

AKADEMIJA TEHNIČKIH ZNANOSTI HRVATSKE

GODIŠNJAK 2024.

AKADEMIJE TEHNIČKIH ZNANOSTI HRVATSKE

Godišnjak Akademije tehničkih znanosti Hrvatske 2024

Izdavač i nakladnik:

Akademija tehničkih znanosti Hrvatske,
Kačićeva 28, 10000 Zagreb, Hrvatska

Glavni i odgovorni urednik:

Prof. dr. sc. Vedran Mornar, predsjednik
Akademije tehničkih znanosti Hrvatske

Urednik:

Prof. dr. sc. Bruno Zelić, dopredsjednik
Akademije tehničkih znanosti Hrvatske

Urednički odbor:

Prof. dr. sc. Vedran Mornar, predsjednik
Akademije tehničkih znanosti Hrvatske
Prof. dr. sc. Bruno Zelić, dopredsjednik
Akademije tehničkih znanosti Hrvatske
Prof. dr. sc. Neven Duić, dopredsjednik
Akademije tehničkih znanosti Hrvatske
Izv. prof. dr. sc. Mario Bačić, vršitelj
dužnosti glavnog tajnika Akademije
tehničkih znanosti Hrvatske
Prof. dr. sc. Vladimir Andročec, član Uprave
Akademije tehničkih znanosti Hrvatske

Suradnice:

Tanja Miškić Rogić, univ. spec. oec.,
poslovna tajnica Akademije tehničkih
znanosti Hrvatske
Adrijana Pavičić, ekon. teh., administrativna
referentica Akademije tehničkih znanosti
Hrvatske

Dizajn naslovnice:

Prof. dr. sc. Jana Žiljak Gršić,
Tehničko veleučilište u Zagrebu

ISSN 2975-657X (Print)

ISSN 2991-1532 (Online)

Godišnjak Akademije tehničkih znanosti
Hrvatske 2024

God. Akad. teh. zn. Hr. 2024

Priprema za tisak:

Tiskara Zelina d.o.o., Zelina

Tisak:

Tiskara Zelina d.o.o., Zelina

Naklada:

200 knjiga

Izjava o dozvoli za korištenje:

Godišnjak Akademije tehničkih znanosti Hrvatske 2024 vlasništvo je Akademije tehničkih znanosti Hrvatske. Radovi, tekstovi, slike, grafikoni, tablice i drugi podaci ne smiju se kopirati, distribuirati niti koristiti u publikacijama koje nisu akademske i znanstvene, bilo u pisanom ili u elektroničkom obliku, u cijelosti ili djelomično, osim uz izričitu dozvolu Akademije tehničkih znanosti Hrvatske.

Akademija tehničkih znanosti Hrvatske dopušta korištenje radova, tekstova, slika, grafikona, tablica i drugih podataka isključivo u akademske i znanstvene svrhe.

Napomena:

Tekstovi radova autora prikazani su prema dostavljenom izvorniku.

AKADEMIJA TEHNIČKIH ZNANOSTI HRVATSKE

God. Akad. teh. zn. Hr. 2024

ISSN 2975-657X (Print)

ISSN 2991-1532 (Online)

**GODIŠNJAK
AKADEMIJE TEHNIČKIH
ZNANOSTI HRVATSKE 2024**



Zagreb, svibanj 2025.

Sadržaj

Uvodna riječ.....	1
<i>Mornar V.</i>	

Riječ urednika	5
<i>Zelić, B.</i>	

Prvi dio – Radovi članova Akademije

Energetska tranzicija u zgradarstvu	9
<i>Veršić, Z., Binički, M., Nosil Mešić, M.</i>	

Pregled primjene koncepta mrežnog rezanja za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža	21
<i>Lorincz, J., Kukuruzović, A., Blažević, Z.</i>	

Parametarska analiza temeljenja pučinskih vjetroelektrana na sjevernom Jadranu primjenom sustava monopilota	51
<i>Bačić, M., Kučinić, L., Kovačević, M. S.</i>	

Biološki procesi proizvodnje biovodika	71
<i>Vičević, R., Šalić, A., Zelić, B.</i>	

Izrada i opremanje geotermalnih bušotina – ključ za istraživanje i eksploataciju geotermalne vode u energetske svrhe	93
<i>Gaurina-Međimurec, N., Brkić, V., Zornjak, Lj., Pašić, B.</i>	

Smanjenje ugljičnog otiska u metalurškoj praksi: kritične / strateške sirovine i energetska učinkovitost peći	115
<i>Zovko Brodarac, Z., Lazić, L.</i>	

Utjecaj ozona i temperature na učinke procesa pranja standardnih pamučnih tkanina	137
<i>Šantak, V., Pušić, T., Čurlin, M.</i>	

Energetski prihvatljiviji proces alkalne hidrolize poliesterske tkanine	151
<i>Tarbuk, A., Flinčec Grgac, S., Dekanić, T., Čorak, I.</i>	
Kompleksnost upravljanja energetsom tranzicijom	161
<i>Višković, A.</i>	
Energetska tranzicija u području grafičke tehnologije	169
<i>Bolanča, Z., Bolanča Mirković, I.</i>	
Drugi dio – CAETS E-mobility Working Group Report	
¹ Navigating the Future: A Report on the Current State and Future Path of Energy Transition in the Transport Sector	191
<i>Duić, N., Hendrickson, C., Yubo, L., Pelata, P., Evans, R. L., Ridjan Skov, I. Beck, V., Dominguez, J., Pienaar, P., Funk, E.</i>	
Autorski indeks	251

1 CAETS E-mobility working group. Navigating the Future: A report on the current state and future path of energy transition in the transport sector. Report No.:1. District of Columbia, USA: Council of Academies of Engineering and Technological Sciences (CAETS); 2024; Available from: <https://www.newcaets.org/statements-reports/caets-reports/>

Uvodna riječ

Poštovani čitatelji,

Godišnjak Akademije tehničkih znanosti Hrvatske za 2024. godinu donosi novi niz stručnih i znanstvenih priloga posvećenih jednoj od ključnih tema današnjice – energetske tranziciji. Kao i u prethodnim izdanjima, i ovogodišnje izdanje rezultat je kontinuiranog rada članova Akademije koji, kroz vlastita istraživanja i ekspertizu, aktivno sudjeluju u oblikovanju rješenja za izazove s kojima se suočava naše društvo. Posebno smo ponosni što Akademija redovito izdaje svoje publikacije te time njeguje znanstvenu izvrsnost, jača vidljivost tehničkih znanosti i doprinosi razmjeni znanja među domaćim i međunarodnim stručnjacima.

Energetska tranzicija, iako najčešće percipirana kao tehničko pitanje zamjene fosilnih goriva obnovljivim izvorima energije, u svojoj biti obuhvaća čitav niz promjena koje zadiru u sve aspekte društva – od proizvodnje i distribucije energije do svakodnevne potrošnje, zakonodavnog okvira, obrazovanja, navika potrošača i urbanog planiranja. Upravo zbog takve složenosti, rješenja za energetske tranzicije moguće je osmisliti i implementirati isključivo kroz interdisciplinarni pristup.

Naša Akademija, koja okuplja stručnjake iz četrnaest različitih odjela, prirodno je pozicionirana za takav pristup. Ta raznolikost omogućuje nam da energetske tranzicije pristupimo s različitih gledišta i da uočimo njezine specifičnosti u pojedinim sektorima.

Kroz radove objavljene u ovom Godišnjaku vidljivo je kako članovi Akademije svojim istraživanjima doprinose razumijevanju i rješavanju izazova koji prate tranziciju prema održivim energetske sustavima. Radovi koji su uključeni pokazuju širinu i dubinu znanstvenih pristupa – od tehničkih rješenja za poboljšanje energetske učinkovitosti, preko istraživanja obnovljivih izvora energije, do analiza utjecaja propisa i tehnologija na okoliš.

Upravo zato ovakav Godišnjak ima dvostruku vrijednost. S jedne strane, on je znanstveni i stručni doprinos razumijevanju energetske tranzicije, a s druge strane, on je i ogledalo snage i kapaciteta Akademije tehničkih znanosti Hrvatske da se nosi s kompleksnim temama i ponudi konkretna rješenja temeljena na znanstvenim dokazima i multidisciplinarnoj suradnji.

Važni je istaknuti da se u ovom Godišnjaku ne zadržavamo samo na prikazu tehnoloških inovacija, već da promišljamo širi kontekst – uključujući i društvene, gospodarske te okolišne aspekte tranzicije. Takav sveobuhvatan pristup nužan je ako želimo izgraditi pravedan, održiv i konkurentan energetske sustav koji će zadovoljiti potrebe današnjih, ali i budućih generacija.

U godinama koje dolaze, energetska tranzicija će i dalje biti središnja tema brojnih javnih i stručnih rasprava, a Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, kroz svoj rad i javno djelovanje, nastavit će doprinosti oblikovanju tih rasprava te nuditi konkretne prijedloge i smjernice.

Posebnu vrijednost ovog izdanja daje i uključivanje međunarodne perspektive kroz CAETS E-Mobility Report, dokument koji predstavlja sintezu globalnih istraživanja i stručnih uvida u procese dekarbonizacije prometa. CAETS (International Council of Academies of Engineering and Technological Sciences) je međunarodno vijeće koje okuplja akademije tehničkih i inženjerskih znanosti iz cijelog svijeta. Riječ je o nezavisnoj, nestranačkoj organizaciji koja služi kao globalni forum za razmjenu mišljenja i informacija o tehničkim izazovima s kojima se čovječanstvo suočava. Njeni članovi aktivno doprinose politikama, inovacijama i strateškim dokumentima vezanima uz tehnologiju, industriju, održivi razvoj i klimatske ciljeve.

Prometni sektor – koji već desetljećima zaostaje za drugim granama gospodarstva kada je riječ o dekarbonizaciji – konačno je ušao u fazu ubrzane transformacije. No taj prijelaz daleko je od jednostavne zamjene motora s unutarnjim izgaranjem električnim pogonom. Riječ je o dubinskoj promjeni čitavog sustava – od načina na koji energiju proizvodimo i distribuiramo, do načina na koji planiramo gradove, upravljamo resursima, ali i promišljamo mobilnost kao društvenu uslugu.

Izvješće CAETS-a, u kojem je dopredsjednik HATZ-a prof. dr. sc. Neven Duić vodeći autor, donosi sveobuhvatan pogled na stanje i perspektive energetske tranzicije u prometnom sektoru. Oslanjajući se na stručna znanja iz više zemalja, autori analiziraju stanje razvoja električnih vozila, infrastrukture, logističkih rješenja i zakonodavnih okvira. Istovremeno, pozivaju na realističan, sistemski i tehnološki neutralan pristup – svjesni da rješenja koja odgovaraju jednoj regiji možda nisu primjenjiva u drugoj.

Neki zaključci posebno zaslužuju isticanje. Tako se, primjerice, naglašava da električna vozila, iako sve prisutnija, još uvijek čine manji udio u ukupnoj svjetskoj prodaji, no dinamika promjena je impresivna. U Norveškoj već preko 80 % novih vozila ima električni pogon, dok je u Kini uspostavljena kompletna industrijska vertikalna – od rudarenja sirovina do proizvodnje baterija i infrastrukture za punjenje.

No, elektrifikacija nije bez izazova. Autori upozoravaju na ograničenu dostupnost ključnih sirovina poput litija, kobalta i nikla, što može stvoriti uska grla i ovisnost o geopolitici. Kao odgovor, izvješće snažno podržava kružno gospodarstvo – od reciklaže baterija do razvoja novih kemijskih sastava koji ovise o dostupnijim elementima. S druge strane, sve veće opterećenje elektroenergetskih mreža zahtijeva razvoj pametnih mreža, fleksibilnih sustava pohrane i integraciju vozila u mrežu kao aktivnih sudionika – kroz tehnologije poput Vehicle-to-Grid.

Izvješće također realno sagledava alternativna rješenja tamo gdje elektrifikacija nije najprikladnija – u zračnom i pomorskom prometu, ali i za teška teretna vozila. U tim područjima zeleni vodik, e-goriva i biogoriva mogu igrati važnu ulogu, no njihova komercijalizacija još uvijek traži značajna ulaganja i regulatornu potporu.

Uvrštavanjem ovog izvješća u Godišnjak željeli smo omogućiti čitateljima neposredan uvid u međunarodne trendove, ali i podsjetiti na odgovornost stručne i znanstvene zajednice u oblikovanju tranzicije koja nas očekuje. Hrvatska ne može ostati po strani – naš prometni sektor suočava se s istim izazovima kao i ostale zemlje, a izvješće CAETS-a može poslužiti kao inspiracija i vodič u oblikovanju domaćih politika, znanstvenih prioriteta i tehnoloških strategija.

Na kraju, zahvaljujem svim autorima na njihovom doprinosu, a najviše uredniku, dopredsjedniku HATZ-a prof. dr. sc. Bruni Zeliću na predanom radu. Vjerujem da će čitatelji u ovom izdanju pronaći sadržaje koji će ih inspirirati, informirati i potaknuti na daljnje istraživanje i djelovanje u području energetske tranzicije.

Glavni urednik
Prof. dr. sc. Vedran Mornar

Uvodna riječ

Poštovani čitatelju,

Godišnjak Akademije tehničkih znanosti Hrvatske 2024 posvećen je energetske tranziciji. Usko gledajući, energetska tranzicija uključuje prelazak s energetskog sustava koji se temelji na fosilnim gorivima na različite sustave koji za podlogu imaju niskougljične izvore energije. Pri tome, osim cijene, ključnu ulogu ima smanjenje negativnih učinaka na okoliš prilikom proizvodnje i korištenja energije. Članovi Akademije tehničkih znanosti Hrvatske svakako spadaju u grupu znanstvenika i stručnjaka kojima je energetska tranzicija jedna od ključnih smjernica kojom se vode u radu na različitim znanstvenim i stručnim projektima. Navedeno pokazuje i deset radova, priloga članova Akademije tehničkih znanosti Hrvatske području energetske tranzicije koje možete pronaći u ovom Godišnjaku. Godišnjak Akademije tehničkih znanosti Hrvatske 2024 podijeljen je u dva dijela, izvorne znanstvene, pregledne i stručne radove članova Akademije te CAETS E-mobility report.

Kroz svoje izvorne znanstvene, pregledne i stručne radove na hrvatskom jeziku, članovi Akademije demonstriraju svu različitost pristupa tehničkih i biotehničkih struka području energetske tranzicije. Iako je u okviru Godišnjaka 2024 nažalost izostao doprinos svih odjela Akademije, kroz radove koji su pripremili članovi odjela Arhitekture i urbanizma, Elektrotehnike i elektronike, Energijskih sustava, Građevinarstva i geodezije, Grafičkog inženjerstva, Kemijskog inženjerstva, Rudarstva i metalurgije i Tekstilne tehnologije vidljiva je sveobuhvatnost interesa članova Akademije koji su sposobni odgovoriti na različite izazove koje energetska tranzicija stavlja pred tehničke znanosti.

U radu prof. Veršića i suradnika obrađuje se energetska tranzicija u zgradarstvu pri čemu se istražuje koliko su, u odnosu na energetske učinkovitost, promjene u regulativi Republike Hrvatske utjecale na uštedu energije kod projektiranih zgrada te potrošnju energije iz fosilnih i obnovljivih izvora.

Pregled primjene koncepta mrežnog rezanja za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža istražuje u svom radu prof. Lorincz sa suradnicima pri čemu rezultati provedene analize pokazuju moguća daljnja smanjenja potrošnje energije 5G mreža kao i povezanih emisija ugljičnog dioksida.

Parametarska analiza temeljenja pučinskih vjetroelektrana na sjevernom Jadranu primjenom sustava monopilota tema je koju analiziraju prof. Bačić i prof. Kovačević sa suradnicima. Provedena analiza ilustrira ulogu geotehnike u podršci energetske tranziciji, posebice kroz razvoj održivih i pouzdanih sustava temeljenja za konstrukcije obnovljivih izvora energije.

U preglednom radu prof. Zelića i suradnika, prikazani su biološki procesi proizvodnje vodika kao obnovljivog izvora energije. U svom prikazu, a s obzirom na globalne inicijative za smanjenje emisija stakleničkih plinova i sve veća ulaganja u obnovljive izvore energije, posebno ističu biovodik kao važan resurs za postizanje energetske održivosti.

Trenutni istražni prostori i eksploatacijska polja geotermalne vode u energetske svrhe na području Republike Hrvatske, relevantni podaci iz geotermalnih bušotina te tehnologija izrade i opremanja geotermalnih bušotina obrađeni su u okviru priloga kojega je priredila prof. emerita Gaurina-Međimurec sa suradnicima.

Potencijal smanjenja ugljičnog otiska korištenjem NRT s dva aspekta utjecaja: primjenom sekundarnih sirovina i poboljšanjem energetske učinkovitosti peći u metalurškoj praksi tema je koju istražuje prof. Zovko Brodarac sa suradnicima.

U radu prof. Pušić i suradnika istraživao je utjecaj ozona i temperature na učinke procesa pranja standardnih pamučnih tkanina, a rezultati provedenih istraživanja pokazali su potrebu analize i drugih sredstava u procesu pranja, primarno onih obogaćenih suvremenim višeenzimskim kompleksima u kombinaciji s ozonom.

Energetski prihvatljiv proces alkalne hidrolize poliesterske tkanine obrađuju u svom prilogu prof. Tarbuk i prof. Flinčec Grgac sa suradnicima te nakon provedenog istraživanja ističu kako je analizirani proces ekonomski i energetski prihvatljiviji u odnosu na konvencionalni postupak, te posljedično i održiviji.

Kritički osvrt na upravljanje energetskom tranzicijom prikazao je u okviru svog priloga prof. Višković.

Energetsku tranziciju u području grafičke tehnologije istražuju prof. Bolanča i prof. Bolanča Mirković. Pri tome ističu utjecaj korištenih sirovina industrije tiska i ambalaže na uštede energije i resursa s posebnim naglaskom na papir i karton. Uz to, prikazuju i kumulativnu potrebnu energiju po pročitanoj e-knjizi i uspoređuju je s utroškom energije za tiskanu knjigu.

Osim radova članova Akademije tehničkih znanosti Hrvatske koji se nalaze u prvom dijelu, Godišnjak u okviru drugog dijela u cijelosti prenosi CAETS E-mobility Working Group Report, Navigating the Future: A Report on the Current State and Future Path of Energy Transition in the Transport Sector. CAETS E-mobility report priredili su eminentni svjetski stručnjaci, okupljeni u CAETS E-Mobility Working Group 2023-2024, a vodeći autor publikacije bio je prof. Neven Duić. U okviru CAETS E-mobility report poseban osvrt dan je na dekarbonizaciju cestovnog prometa što se nedavno smatralo najizazovnijim dijelom klimatskih agendi. Napredak u proizvodnji električnih vozila je pak u zadnje vrijeme otvorio i dodatna kompleksna pitanja koja se odnose na integraciju energetskog i transportnog sustava, kao što su uspostavljanje opskrbnih lanaca za potrebne materijale te transformaciju industrijskog sektora s postojećih na nove proizvode.

Vjerujem kako ćete čitajući radove iz Godišnjaka Akademije tehničkih znanosti Hrvatske 2024 pronaći sadržaje koji će Vas motivirati da na sličan način analizirate energetsku tranziciju na temama iz svog područja interesa.

Urednik
Prof. dr. sc. Bruno Zelić

Prvi dio – Radovi članova Akademije

Energetska tranzicija u zgradarstvu

Zoran Veršić¹, Marin Binički¹, Mateja Nosil Mešić¹

¹Sveučilište u Zagrebu Arhitektonski fakultet, Zagreb

Sažetak: Zgrade su odgovorne za otprilike 40% ukupne potrošnje energije u Europskoj uniji pa tako i u Republici Hrvatskoj. Iz tog razloga Europski parlament i Vijeće Europske unije donose mjere koje imaju za cilj smanjiti potrošnju energije u zgradarstvu i potaknuti korištenje energije iz obnovljivih izvora kako bi se smanjila energetska ovisnost Europske unije i emisija stakleničkih plinova. Regulativa iz područja energetske učinkovitosti zgrada u Republici Hrvatskoj, u skladu s ciljevima Europske unije, kontinuirano uvodi poboljšanja energetske učinkovitosti i smanjenje CO₂ emisija. Kroz zadnjih 20 godina značajan napredak je postignut u uštedi energije koja se troši u zgradama kao i u izvorima energije. Gotovo nula energetska standard, obavezan od 2020. godine, predstavlja najveći doprinos u pogledu obveze primjene obnovljivih izvora energije u zgradama. Ovim radom istražiti će se koliko su, u odnosu na energetska učinkovitost, promjene u regulativi Republike Hrvatske utjecale na uštedu energije kod projektiranih zgrada i potrošnju energije iz fosilnih i obnovljivih izvora.

Ključne riječi: zgrade, CO₂ emisije, energetska učinkovitost, gotovo nula energetske zgrade, obnovljivi izvori energije

1. Potrošnja energije u zgradama

Toplinska energija u zgradama prvenstveno se koristi za grijanje i pripremu PTV (potrošne tople vode). Ostala potrošnja uključuje električnu energiju za rasvjetu, ventilaciju, hlađenje i pogon kućanskih uređaja. Za različita klimatska područja Europe različita je i potrošnja energije za pojedine funkcije. U mediteranskom području energija za hlađenje iznosi do 40% ukupne potrošnje i premašuje energiju za grijanje koja iznosi do 30% [1]. U srednjoj i sjevernoj Europi taj omjer je drugačiji i energija za grijanje je dominantna dok je energija za hlađenje zanemariva. U Europskoj uniji je 2022. godine 78% ukupne potrošnje u zgradama predstavljala potrošnja energije za grijanje i pripremu PTV [2]. Ostala potrošnja energije je značajno manjeg udjela, priprema PTV iznosi oko 20% potrošnje, a rasvjeta 5-10% [1].

2. Zahtjevi regulativa Republike Hrvatske u pogledu energetske učinkovitosti u zgradama

U Republici Hrvatskoj prvi propisi o toplinskoj zaštiti zgrada doneseni su 1970. godine [3]. U njima je bila određena podjela državnog teritorija na tri građevinsko-klimatske zone. Za svaku zonu su bile propisane najveće dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaza topline za pojedine građevne dijelove. Prva naftna kriza 1973. godine ubrzala je opće prihvaćanje činjenica da su izvori fosilnih goriva, na kojima se temeljila energetska tehnologija, sasvim sigurno ograničeni i da je stoga energente potrebno racionalno koristiti [4,5]. Mnoge industrijski razvijene zemlje ubrzo donose prve zakone i propise o štednji toplinske energije za zagrijavanje građevina. Kod nas se propis iz 1970. godine prvi put mijenja 1980. godine [6]. Promjena se odnosila na pooštavanje dopuštenih vrijednosti koeficijenta prolaza topline za pojedine građevne dijelove. Novi tehnički propis pod nazivom Toplinska tehnika u građevinarstvu, Tehnički uvjeti za projektiranje i građenje zgrada (HRN U.J5.600./1987) izlazi 1987. godine [7]. Bitna novost bila je u ograničavanju toplinskih gubitaka, ne samo kroz pojedine građevne dijelove ovojnice zgrade, već i za zgradu kao cjelinu. Osnovna svrha ovog propisa je bila zadovoljiti tri glavna cilja toplinske zaštite: osigurati povoljne mikroklimatske uvjete prostora zgrade, zaštititi građevinske elemente od oštećenja uslijed građevinsko – fizikalnih djelovanja i osigurati racionalno korištenje energije. Potpuno novi Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama objavljen je 2005. godine (Narodne novine 79/2005) s obaveznom primjenom od 1. srpnja 2006. godine [8]. Za proračune i ispitivanja građevnih dijelova zgrade postalo je obavezno korištenje europskih normi koje su preuzete u Republici Hrvatskoj. Za izračune se koriste klimatološki podaci najbliže meteorološke postaje, a zahtjevi za zgrade ovise o srednjim mjesečnim temperaturama vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade ($\theta_{e,mj,min} > +3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ili $\theta_{e,mj,min} \leq +3\text{ }^{\circ}\text{C}$) što, u pravilu, odgovara vrijednostima lokacija u primorskoj i kontinentalnoj Hrvatskoj.

Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama iz 2005. godine obuhvaćao je zahtjeve za koeficijente prolaza topline za pojedine građevne dijelove, ali i za potrošnju energije zgrade u cjelini. Dozvoljena specifična godišnja potrošnja energije za grijanje određivala se prema faktoru oblika, f_0 [m^{-1}] gdje je faktor oblika količnik oplošja, A [m^2], i obujma, V_e [m^3], grijanog dijela zgrade [9]. Za stambene zgrade, dozvoljena specifična energija za grijanje $Q''_{H,nd}$ [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \times \text{a})$] određivala se u odnosu na korisnu površinu zgrade, A_k [m^2] prema jednadžbi (1):

$$\begin{aligned}
 & - \text{za } f_0 \leq 0,20 & Q''_{H,nd} &= 51,31 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times \text{a}) \\
 & - \text{za } 0,20 < f_0 < 1,05 & Q''_{H,nd} &= (41,03 + 51,41 \cdot f_0) \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times \text{a}) \\
 & - \text{za } f_0 \geq 1,05 & Q''_{H,nd} &= 95,01 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times \text{a})
 \end{aligned} \tag{1}$$

Za nestambene zgrade dozvoljena specifična godišnja energija za grijanje, $Q'_{H,nd}$ [kWh/(m³×a)] iskazivala se u odnosu na grijani volumen zgrade, V_e [m³] prema jednadžbi (2):

$$\begin{aligned} - \text{za } f_0 \leq 0,20 & \quad Q'_{H,nd} = 16,42 \text{ kWh}/(\text{m}^3 \times \text{a}) \\ - \text{za } 0,20 < f_0 < 1,05 & \quad Q'_{H,nd} = (13,13 + 16,45 \cdot f_0) \text{ kWh}/(\text{m}^3 \times \text{a}) \\ - \text{za } f_0 \geq 1,05 & \quad Q'_{H,nd} = 30,40 \text{ kWh}/(\text{m}^3 \times \text{a}). \end{aligned} \quad (2)$$

2008. godine izlazi novi Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (Narodne novine 110/2008) [9]. Ovim propisom, kao i svim Tehničkim propisima nakon njega implementiraju se europske Uredbe i Direktive u svrhu ispunjavanja bitnog zahtjeva za građevinu: “ušteda energije i toplinska zaštita”. Tehničkim propisom iz 2008. godine bilo je zabranjeno korištenje elektro-otpornog grijanja u zgradama, ali nije bila propisana maksimalna dozvoljena potrošnja primarne energije, kao niti minimalan udio obnovljivih izvora energije. Drugim riječima, izvor toplinske energije mogli su biti fosilni izvori poput prirodnog plina, lož ulja i sl. što je najčešće i bio slučaj.

U Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (Narodne novine 97/2014) uvedeno je ograničenje godišnje potrebne primarne energija po jedinici ploštine korisne površine zgrade za stvarne klimatske podatke Q''_{prim} [kWh/(m²×a)], godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje po jedinici ploštine korisne površine zgrade, $Q''_{c,nd}$ [kWh/(m²×a)], te ispunjavanje zahtjeva u pogledu primjene obnovljivih izvora energije [10].

Novi Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (Narodne novine 128/2015) stupa na snagu 2015. godine, koji je kroz niz dopuna i izmjena i danas na snazi [11]. Kao i u propisu iz 2005. godine obuhvaćeni su zahtjevi za pojedine građevne dijelove i za potrošnju energije za grijanje zgrade u cjelini. Osim toga propisana je maksimalna dozvoljena potrošnja primarne energije u zgradi, kao i minimalan udio obnovljivih izvora energije u isporučenoj energiji za zgrade gotovo nulte energije. Propisan je i izračun godišnje isporučene energije E_{del} [kWh/a]. Tablica 1 prikazuje godišnju dozvoljenu specifičnu energiju za grijanje $Q''_{H,nd}$ [kWh/(m²×a)] u odnosu na faktor oblika i namjenu zgrade te dozvoljenu specifičnu potrošnju primarne energije u zgradi $E_{prim/Ak}$ [kWh/(m²×a)] za zgrade gotovo nulte energije i nove zgrade u periodu od 2015. godine do početka obveze primjene zgrada gotovo nulte energije [12].

Tablica 1: Dozvoljena potrošnja energije u zgradama [12]

ZAHTEJEVI ZA NOVE ZGRADE i GÖEZ	$Q''_{H,nd}$ [kWh/(m ² ·a)]						E_{prim} [kWh/(m ² ·a)]			
	NOVA ZGRADA i GÖEZ						NOVA		GÖEZ	
	kontinent, $\theta_{mm} \leq 3$ °C			primorje, $\theta_{mm} > 3$ °C			kont $\theta_{mm} \leq 3$ °C	prim $\theta_{mm} > 3$ °C	kont $\theta_{mm} \leq 3$ °C	prim $\theta_{mm} > 3$ °C
KATEGORIJA ZGRADE	$f_a \leq 0,20$	$0,20 < f_a < 1,05$	$f_a \geq 1,05$	$f_a \leq 0,20$	$0,20 < f_a < 1,05$	$f_a \geq 1,05$				
Višestambena	40,50	$32,39 + 40,58 \cdot f_a$	75,00	24,84	$19,86 + 24,89 \cdot f_a$	45,99	120	90	80	50
Obiteljska kuća	40,50	$32,39 + 40,58 \cdot f_a$	75,00	24,84	$17,16 + 38,42 \cdot f_a$	57,50	115	70	45	35
Uredska	16,94	$8,82 + 40,58 \cdot f_a$	51,43	16,19	$11,21 + 24,89 \cdot f_a$	37,34	70	70	35	25
Obrazovna	11,98	$3,86 + 40,58 \cdot f_a$	46,48	9,95	$4,97 + 24,91 \cdot f_a$	31,13	65	60	55	55
Bolnica	18,72	$10,61 + 40,58 \cdot f_a$	53,21	46,44	$41,46 + 24,89 \cdot f_a$	67,60	300	300	250	250
Hotel i restoran	35,48	$27,37 + 40,58 \cdot f_a$	69,98	11,50	$6,52 + 24,89 \cdot f_a$	32,65	130	80	90	70
Sportska dvorana	96,39	$88,28 + 40,58 \cdot f_a$	130,89	37,64	$32,66 + 24,91 \cdot f_a$	58,82	400	170	210	150
Trgovina	48,91	$40,79 + 40,58 \cdot f_a$	83,40	13,90	$8,92 + 24,91 \cdot f_a$	35,08	450	280	170	150
Ostale nestambene	40,50	$32,39 + 40,58 \cdot f_a$	75,00	24,84	$19,86 + 24,89 \cdot f_a$	45,99	150	100	/	/

Primjena zahtjeva za zgrade gotovo nulte energije postala je obavezna od početka 2018. godine za zgrade u vlasništvu javnopravnih tijela, i od početka 2020. godine za sve nove zgrade. U periodu od 2015. do trenutka obaveze primjene standarda gotovo nulte energije bila je dozvoljena znatno viša potrošnja primarne energije, a udio obnovljivih izvora energije nije bio propisan. Tadašnje zahtjeve Tehničkog propisa bilo je i dalje moguće ispuniti toplinskim sustavima baziranim na fosilnim izvorima energije – prirodni plin, lož ulje i sl.

Od 2018. odnosno 2020. godine zahtjevi za potrošnjom primarne energije znatno su se postrožili kao i obaveza udjela obnovljivih izvora energije. Nisku potrošnju primarne energije, kao i udio obnovljivih izvora energije u isporučenoj energiji nije moguće postići bez primjene obnovljivih izvora energije. Od 2018. odnosno 2020. godine sustavi grijanja i pripreme PTV (potrošne tople vode) u zgradama više nisu mogli biti bazirani na fosilnim izvorima, već to postaju visokoučinkovite dizalice topline i kotlovi na biomasu. Osim tih sustava, za zgrade gotovo nulte energije primjenjivi su i sustavi solarne pripreme tople vode, fotonaponske elektrane i sustavi daljinskog grijanja bazirani na kogeneraciji, međutim oni nisu obuhvaćeni ovom analizom.

Dizalice topline koriste električnu energiju za rad. Električna energija se većinom dobiva iz fosilnih izvora energije zbog čega se promatra kao neobnovljivi energent, ima relativno visok faktor primarne energije kao i specifične CO₂ emisije po kWh (Tablica 2). Međutim, visokoučinkovite dizalice topline električnu energiju koriste za mehanički rad kojim toplinu preuzimaju iz okoliša – okolnog zraka, tla ili vode. Na taj način, za 1 kWh utrošene električne energije, dizalica topline može preuzeti npr. 3 kWh toplinske energije iz okoliša.

Sustavi grijanja i pripreme PTV na pelete ili sječku prikladni su za zgrade gotovo nulte energije jer koriste obnovljivi energent – biomasu. Biomasa lokalno stvara velike količine CO₂ i zagađenje stoga nije prikladna za visoko urbanizirana područja. Međutim, globalno gledano, biomasa ima najniže faktore primarne energije kao i

CO₂ emisije (Tablica 2). Razlog tome je taj što je ugljik koji se oslobađa iz biomase apsorbiran iz atmosfere unazad nekoliko desetaka godina. Suprotno tome, ugljik koji je oslobođen iz fosilnih goriva je apsorbiran prije nekoliko stotina milijuna godina.

Tablica 2: Faktori primarne energije i CO₂ emisije energenata [13]

Energent		Faktor primarne energije [-]	Emisija CO ₂ [kg CO ₂ /GJ]	Emisija CO ₂ [kg CO ₂ /MWh]
Kameni ugljen		1,0381	95,49	343,78
Mrki ugljen		1,0540	98,09	353,14
Lignit		1,0814	105,13	378,48
Ogrjevno drvo		1,0000	8,08	29,09
Drveni briketi		1,0000	9,10	32,76
Drveni peleti		0,123	9,56	34,4
Drvena sječka		0,154	11,76	42,35
Drveni ugljen		1,000	7,27	26,17
Sunčeva energija		0,000	0,00	0,00
Geotermalna energija		0,000	0,00	0,00
Prirodni plin		1,095	61,17	220,20
UNP		1,160	72,47	260,88
Petroleji		1,033	73,54	264,73
Ekstra lako loživo ulje		1,138	83,21	299,57
Loživo ulje		1,130	86,20	310,31
Električna energija-preuzeto iz mreže		1,614	65,22	234,81
Daljinska toplina	Hrvatska prosjek	1,494	100,69	362,49
	CTS ZG+OS (kogeneracija)	1,466	97,59	351,33
	KO - prosjek za HR	1,597	109,57	394,46
	CTS ZG (kogeneracija)	1,462	96,05	345,78
	CTS OS (kogeneracija)	1,478	110,15	396,53
	KO - prosjek za ZG	1,559	107,86	388,31
	KO - prosjek za OS	1,529	93,66	337,18
	KO - prosjek za RI	1,569	106,84	384,62
	KO - prosjek za SI. Brod	1,385	100,12	360,42
	KO - prosjek za Split	1,540	132,48	476,94
	KO - prosjek za KA	1,434	115,77	416,77
	KO - prosjek za VŽ	1,489	91,27	328,56
	KO - prosjek za Vinkovce	1,442	103,52	372,66
	KO - prosjek za Vukovar	1,363	86,00	309,61
	KO - prosjek za Sisak	2,419	148,13	533,25
	KO - prirodni plin	1,350	82,74	297,88
	KO - loživo ulje	1,444	124,41	447,88
	KO - ekstra lako loživo ulje	1,429	118,87	427,94

2.1 Specifična isporučena energija i CO₂ emisije

Napredak u regulativi energetske učinkovitosti u odnosu na obnovljive izvore energije i CO₂ emisije energije za grijanje iskazat će se za tri perioda: od 2006. do 2015. godine, od 2015. godine do trenutka obaveze gotovo nula energetskog standarda 2018. odnosno 2020. godine, te period nakon toga do danas. S obzirom da je u primorskom klimatskom području Hrvatske dominantna energija za hlađenje, ova analiza fokusirat će se samo na zgrade u kontinentalnom klimatskom području. Budući da su zahtjevi za dozvoljenom specifičnom energijom za grijanje drugačiji za različite vrste zgrada, različite namjene će se također uzeti u obzir.

Potrošnja specifične energije za grijanje za pojedine namjene uzet će se kao prosjek minimalne i maksimalne dozvoljene potrošnje definirane Tehničkim propisom. Za period od 2006. do 2015. godine dozvoljena specifična potrošnja energije za grijanje kod nestambenih zgrada iskazuje se u odnosu na volumen grijanog dijela zgrade, $Q'_{H,nd}$ [kWh/(m³×a)] [8]. Dozvoljena potrošnja energije svedena je s volumena na korisnu površinu na način da su pretpostavljene visine etaža za različite namjene zgrada. Tablica 3 prikazuje dozvoljene specifične energije za grijanje za zgrade u periodu od 2006. do 2015. godine.

Tablica 3: Prosječna dozvoljena specifična energija za grijanje zgrada od 2006. do 2015. godine

Vrsta zgrade	$Q''_{H,nd,min}$ [kWh/(m ² ×a)]	$Q''_{H,nd,max}$ [kWh/(m ² ×a)]	$Q''_{H,nd,avg}$ [kWh/(m ² ×a)]	h' (m ¹)	$Q''_{H,nd,avg}$ [kWh/(m ² ×a)]
Višestambena	51,31	95,01	73,16	-	73,16
Obiteljska kuća					73,16
	$Q'_{H,nd,min}$ [kWh/(m ³ ×a)]	$Q'_{H,nd,max}$ [kWh/(m ³ ×a)]	$Q'_{H,nd,avg}$ [kWh/(m ³ ×a)]		
Uredska	16,42	30,4	23,41	4	93,64
Obrazovna				4	93,64
Bolnica				4	93,64
Hotel i restoran				4	93,64
Sportska dvorana				6	140,46
Trgovina				4	93,64
Ostale nestambene				4	93,64

Tehnički propis iz 2015. godine definira dozvoljenu specifičnu energiju za grijanje u odnosu na ploštinu korisne površine zgrade ovisno o namjeni zgrade i klimatskom području u kojem se zgrada nalazi [12]. Isti zahtjevi su zadržani i nakon uvođenja

obaveze gotovo nula energetskog standarda 2018. odnosno 2020. godine. Tablica 4 pokazuje minimalne i maksimalne dozvoljene te prosječne specifične energije za grijanje za različite vrste zgrada od 2015. godine do danas.

Specifična potrošnja energije za grijanje pokazuje količinu toplinske energije koju je potrebno osigurati unutar grijane zone kako bi se osigurala željena temperatura prostora tijekom sezone grijanja. Potrebnu toplinu u zoni moguće je osigurati raznim sustavima i energentima. Procjena isporučene energije za grijanje napravljena je za četiri različita sustava grijanja: standardni i kondenzacijski kotao na prirodni plin, dizalica topline zrak-voda i kotao na pelete. Osnovni parametri sustava proizvodnje i predaje topline određeni su prema *Algoritmu za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama* [14]. Tablica 5 prikazuje osnovne karakteristike termotehničkih sustava korištenih u analizi.

Tablica 4: Prosječna dozvoljena specifična energija za grijanje zgrada od 2015. godine

Vrsta zgrade	Kontinentalna klima			Primorska klima		
	$Q''_{H,nd,min}$ [kWh/ (m ² ×a)]	$Q''_{H,nd,max}$ [kWh/ (m ² ×a)]	$Q''_{H,nd,avg}$ [kWh/ (m ² ×a)]	$Q''_{H,nd,min}$ [kWh/ (m ² ×a)]	$Q''_{H,nd,max}$ [kWh/ (m ² ×a)]	$Q''_{H,nd,avg}$ [kWh/ (m ² ×a)]
Više-stambena	40,50	75,00	57,75	24,84	45,99	35,42
Obiteljska kuća	40,50	75,00	57,75	24,84	45,99	35,42
Uredska	16,94	51,43	34,19	16,19	37,42	26,81
Obrazovna	11,98	46,48	29,23	9,95	31,13	20,54
Bolnica	18,72	53,21	35,97	46,44	67,60	57,02
Hotel i restoran	35,48	69,98	52,73	11,50	32,65	22,08
Sportska dvorana	96,39	130,89	113,64	37,64	58,82	48,23
Trgovina	48,91	83,40	66,16	13,90	35,08	24,49
Ostale nestambene	40,50	75,00	57,75	24,84	45,99	35,42

Tablica 5: Karakteristike analiziranih termotehničkih sustava

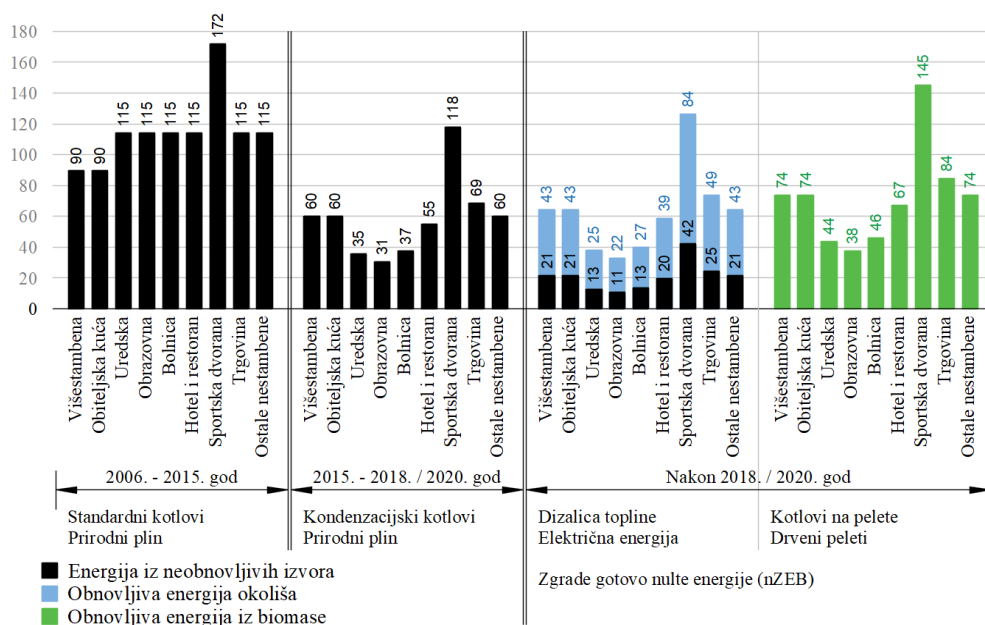
Period	Termotehnički sustav grijanja	$\eta_{gen} (-)^*$	$\eta_{em} (-)^*$
2008. – 2015.	Standardni plinski kotao; Radijatorsko grijanje	0,86	0,95
2015. – 2018. / 2020.	Kondenzacijski plinski kotao; Podno grijanje	1,07	0,90
2018. / 2020. do danas (nZEB)	Dizalica topline zrak-voda; Podno grijanje	3,00	0,90
	Kotao na pelete; Podno grijanje	0,82	0,90

* η_{em} – učinkovitost sustava predaje; η_{gen} – učinkovitost izvora topline

3. Rezultati

Temeljem specifične godišnje potrebne energije za grijanje $Q''_{H,nd,avg}$ [kWh/(m²×a)] i učinkovitosti podsustava grijanja $\eta_{em,gen}$ [-] određena je specifična godišnja isporučena energija za grijanje $E''_{del,H}$ [kWh/(m²×a)] za promatrane periode, kako je prikazano na Slici 1.

Slika 1 prikazuje promjene u specifičnoj isporučenoj energiji za grijanje $E''_{del,H}$ [kWh/(m²×a)] u skladu s unaprijeđenjem propisa vezanih za energetska učinkovitost u zgradama u kontinentalnoj klimi. Isporučena energija ovisi o dozvoljenoj specifičnoj energiji za grijanje $Q''_{H,nd}$ [kWh/(m²×a)] koja je definirana Tehničkim propisom i učinkovitosti sustava grijanja. Uz specifičnu isporučenu energiju za grijanje prikazan je i udio obnovljivih izvora energije iz okoliša i biomase. U periodu nakon 2015. godine vidljiv je značajan pad u isporučenoj energiji uslijed strožih zahtjeva za specifičnom energijom za grijanje $Q''_{H,nd}$ [kWh/(m²×a)], kao i primjeni učinkovitijih kondenzacijskih kotlova. Nakon obaveze gotovo nula energetskog standarda 2018., odnosno 2020. godine, zahtjevi za specifičnom energijom za grijanje $Q''_{H,nd}$ [kWh/(m²×a)] nisu se mijenjali, ali unatoč tome primjećuje se značajan porast udjela obnovljive energije u grijanju kao i pad energije iz neobnovljivih izvora. Razlog tomu je obaveza prijelaza na obnovljive izvore energije i minimiziranje korištenja fosilnih izvora.



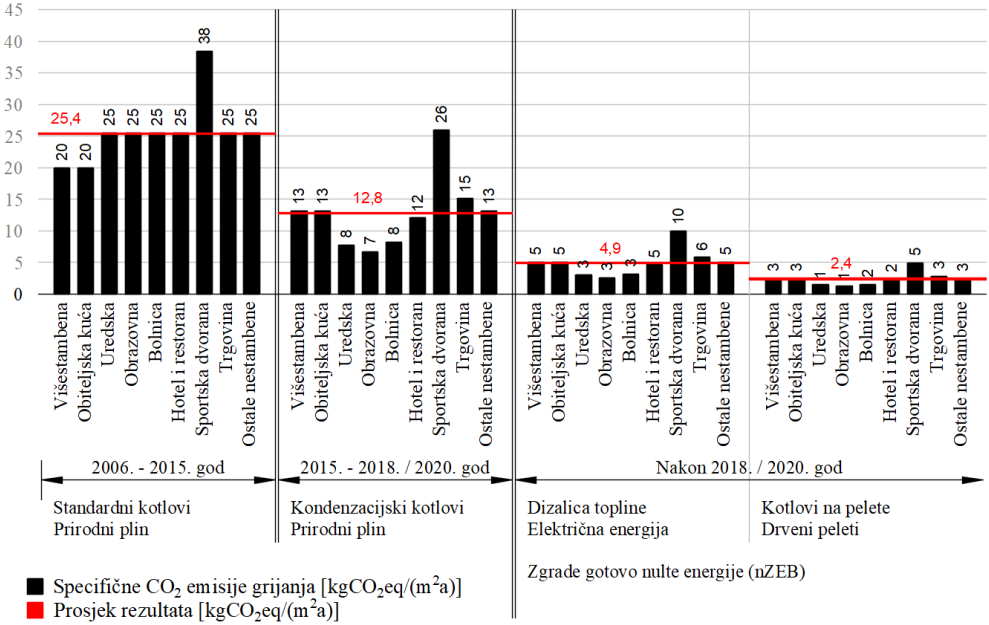
Slika 1: Specifična isporučena energija za grijanje $E''_{del,H}$ [kWh/(m²×a)], kontinentalna klima

U slučaju dizalica topline, specifična obnovljiva energija okoliša u grijanju, $E''_{ren,H}$ [kWh/(m²×a)] predstavlja većinu toplinske energije za grijanje, a ovisi o učinkovitosti dizalica topline. Obnovljiva energija za grijanje određuje se prema jednadžbama (3) i (4):

$$E_{ren,H} = Q_{H,in} - E_{del,H} \text{ [kWh]} \quad (3)$$

$$E_{del,H} = \frac{Q_{H,in}}{\eta_{gen}} \text{ (kWh)} \quad (4)$$

gdje je $Q_{H,in}$ [kWh] toplinska energija koju izvor topline mora isporučiti sustavu grijanja zgrade. Kod kotlova na pelete energija iz obnovljivog energenta odnosno biomase, $E''_{renI,H}$ [kWh/(m²×a)] predstavlja ukupnu toplinsku energiju za grijanje. U prikazanim rezultatima, pomoćna električna energija izvora topline, kao i energija za rad pumpi razvoda grijanja i primarne cirkulacije nije uzeta u obzir jer je ona vrlo mala u odnosu na isporučenu energiju za grijanje. Povezivanjem specifične isporučene količine energije s obzirom na vrstu energenta (Slika 1) i specifične emisije energenata po kWh energije (Tablica 2) dobivamo specifične godišnje emisije CO₂ za grijanje, kako je prikazano na Slici 2.



Slika 2: Specifične CO₂ emisije energije za grijanje [kgCO₂eq/(m²×a)]

4. Zaključak

Slika 2 prikazuje kako su promjene u regulativi energetske učinkovitost, kroz strože uvjete potrošnje energije i obaveze primjene obnovljivih energenata, naročito od 2015. do danas utjecale na specifične CO₂ emisije [kg CO₂eq/(m²×a)] za potrebe grijanja zgrada.

U periodu od 2008. do 2015. godine regulirana je dozvoljena potrošnja energije za grijanje kod stambenih i nestambenih zgrada. Tada još nije postojala obaveza korištenja obnovljivih izvora energije i najčešći sustavi grijanja bili su oni na fosilna goriva. Prema dozvoljenim vrijednostima potrošnje energije i karakteristikama tada uobičajenih sustava grijanja, prosječne specifične CO₂ emisije energije grijanja za različite vrste zgrada iznose 25,4 kg CO₂eq/(m²×a).

2015. godine na snagu stupa novi Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama sa strožim zahtjevima za dozvoljenu specifičnu potrošnje energije za grijanje $Q''_{H,nd}$ [kWh/(m²×a)], a dozvoljene vrijednosti definirane su za sve vrste zgrada. Uvodi se izračun primarne energije i udjela obnovljivih izvora energije, ali ne postaje obavezan sve do uvođenja gotovo nula energetskeg standarda 2018. godine za zgrade u vlasništvu javnopravnih tijela odnosno 2020. godine za sve nove zgrade. U tom periodu i dalje se koriste sustavi grijanja na fosilne izvore, odnosno najčešće kondenzacijski kotlovi. Stroži zahtjev za uštedom energije i učinkovitiji sustavi grijanja rezultiraju nižim specifičnim emisijama. Za taj period, prosjek za sve vrste zgrada prema propisu iznosi 12,8 kg CO₂eq/(m²×a) što čini smanjenje od 50% u odnosu na period do 2015. godine.

Uvođenjem gotovo nula energetskeg standarda 2018. odnosno 2020. godine zahtjevi za dozvoljenu specifičnu potrošnje energije za grijanje $Q''_{H,nd}$ (kWh/(m²×a)) nisu se mijenjali, ali primjena sustava baziranih na obnovljivim izvorima energije postaje obaveza. Grijanje zgrada i priprema potrošne tople vode više ne može biti isključivo fosilnim gorivima, već to moraju biti dizalice topline, kotlovi na biomasu, kogeneracija, solarna energija i drugi obnovljivi izvori. Dizalice topline koriste električnu energiju za preuzimanje ili predavanje topline okolišu, stoga imaju vrlo visoku učinkovitost. Iako koriste energent koji smatramo neobnovljivim, električnu energiju, koriste ga u vrlo maloj mjeri što rezultira niskim specifičnim emisijama CO₂ za grijanje. Analiza ušteda CO₂ emisija napravljena je za dizalice topline zrak-voda i kotlove na biomasu – drvene pelete.

Prema dozvoljenim vrijednostima potrošnje energije sukladno Tehničkom propisu i prosječnim karakteristikama dizalica topline, specifične CO₂ emisije energije grijanja za različite vrste zgrada iznose u prosjeku 4,9 kg CO₂eq/(m²×a). U odnosu na period prije uvođenja gotovo nula energetskeg standarda to predstavlja smanjenje od 62% u specifičnim CO₂ emisijama za grijanje, a u odnosu na period do 2015. godine smanjenje od 81%.

U slučaju biomase kao izvora energije za grijanje, prosjek specifičnih emisija iznosi 2,4 kg CO₂eq/(m²×a), što u odnosu na period do uvođenja gotovo nula energetskeg standarda predstavlja smanjenje od 81%, a u odnosu na period do 2015. godine smanjenje od 91%.

Osim za grijanje, toplinska energija se u zgradama koristi i za pripremu PTV, uz električnu energiju za rasvjetu, hlađenje, ventilaciju i kućanske uređaje. Iako toplinska energija nije jedina potrošnja energije u zgradama, ona predstavlja udio od približno 80% u ukupnoj potrošnji energije.

Iz ove analize možemo zaključiti kako je svaka nadogradnja regulative iz energetske učinkovitosti napravila napredak u smanjenju stakleničkih plinova iz zgrada, dok je obaveza gotovo nula energetskeg standarda najviše doprinijela uštedama CO₂ emisija za proizvodnju toplinske energije u zgradama.

5. Literatura

- [1] Bekele, M. T.; Atakara, C.: Residential Building Energy Conservation in Mediterranean Climate Zone by Integrating Passive Solar and Energy Efficiency Design Strategies, *Buildings*, **13** (2023) 1073, <https://doi.org/10.3390/buildings13041073>
- [2] EEA, Decarbonising heating and cooling - a climate imperative, EEA Brief. (2023) 1–19, https://www.eea.europa.eu/publications/decarbonisation-heating-and-cooling/decarbonising-heating-and-cooling?utm_source=piano&utm_medium=email&utm_campaign=23084&pnespid=sbd9ES5NaKQCxemZoGy0Cpncrh_vRZl_dbDgwutn9g9mwc_iGAeN7BsWO-pnT1pcXpqFS3yiCwA, *Pristupljeno*: 2025.03.10.
- [3] Pravilnik o tehničkim mjerama i uvjetima za toplinsku zaštitu zgrada, Službeni list SFRJ br. 35/70, 1970
- [4] Kristjansdottir, T. F.; Heeren, N.; Andresen, I.; Brattebø, H.: Comparative emission analysis of low energy and zero emission buildings, *Building Research & Information*, **46** (2018) 367–382, <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1305690>
- [5] Muraj, I.; Veršić, Z.; Binicki, M.: Sustainability, Environmental Performance and Energy Efficiency in Higher Education: Faculty of Architecture, University of Zagreb, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 410 (2020) 012088, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012088>
- [6] JUS U.J5.600 – Toplinska tehnika u građevinarstvu, Tehnički uvjeti za projektiranje i gradnje zgrada, Službeni list SFRJ br. 3/80, 1980
- [7] JUS U.J5.600 – Toplinska tehnika u građevinarstvu, Tehnički uvjeti za projektiranje i gradnje zgrada, Službeni list SFRJ 69/87, 1987

- [8] Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Narodne novine broj 79/2005, 2005
- [9] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Narodne novine broj 110/2008, 2008
- [10] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Narodne novine broj 97/2014, 2014
- [11] Ministarstvo prostornog uređenja graditeljstva i državne imovine, Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Narodne novine brojevi 128/2015, 70/2018, 73/2018, 86/2018, 102/2020, 2020
- [12] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Narodne novine broj 128/2015, 2015
- [13] Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, Faktori primarne energije i emisija CO₂ (u primjeni od 30. rujna 2017.), Algoritam za izračun energetske svojstava zgrada (objavljen 15. svibnja 2017. - u obveznoj primjeni od 30. rujna 2017.), 2017., <https://mpgi.gov.hr/pristup-informacijama-16/zakoni-i-ostali-propisi/podrucje-energetske-ucinkovitosti/algoritam-za-izracun-energetskih-svojstava-zgrada-objavljen-15-svibnja-2017-u-obveznoj-primjeni-od-30-rujna-2017/8930>, *Pristupljeno: 2025.03.08.*
- [14] Dović, D.; Horvat, I.; Rodić, A.; Soldo, V.; Srećko, Š.: Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama, Sustavi grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015

Pregled primjene koncepta mrežnog rezanja za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža

Josip Lorincz¹, Amar Kukuruzović¹, Zoran Blažević¹

¹Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB), Rudera Boškovića 32, 21000 Split, Hrvatska

Sažetak: Uvođenje pete generacije (engl. fifth generation – 5G) mobilnih mreža dovodi do povećanja potrošnje energije i većih operativnih troškova mobilnih mrežnih operatora (engl. mobile network operator – MNO). Posljedično, optimizacija energetske učinkovitosti 5G mreža ključna je, kako u smislu smanjenja troškova MNO-a, tako i u smislu negativnog utjecaja emisija ugljičnog dioksida (CO₂). Standardizacija rada 5G mobilne mreže je rezultirala razvojem različitih 5G mrežnih implementacija koje uključuju koncept 5G mrežnog rezanja (engl. network slicing). Ovaj koncept omogućuje stvaranje više neovisnih logičkih 5G mreža unutar iste fizičke 5G mrežne infrastrukture. Budući da se samo neophodni resursi u 5G mrežama koriste kako bi se realizirao određeni 5G mrežni rez (engl. network slice), jedan od značajnih aspekata implementacije 5G mrežnog rezanja je i mogućnost poboljšanja energetske učinkovitosti 5G i budućih mreža šeste generacije (engl. sixth generation – 6G). Ovaj pregledni rad analizira koncept 5G mrežnog rezanja te energetske zahtjeve i doprinos poboljšanju energetske učinkovitosti različitih praktičnih slučajeva upotrebe mrežnog rezanja. Kako bi se pokazalo na koji način učinkovito mrežno rezanje može optimizirati potrošnju energije 5G mreža, analizirani su scenariji upotrebe (engl. use case) 5G mreže s različitim pristupima i konceptima raspodjele resursa u domenama prostora, vremena i frekvencije te primjenom umjetne inteligencije. Rezultati sveobuhvatne analize pokazuju da različite implementacije i pristupi mrežnom rezanju otvaraju put mogućim daljnjim smanjenjima potrošnje energije 5G mreža kao i emisija ugljičnog dioksida u budućnosti.

Ključne riječi: 5G, 6G, mrežno rezanje, energetska učinkovitost, softverski definirana mreža (SDN), virtualna mrežna funkcija (VNF), 3GPP, mobilni mrežni operator

1 Rad je prilagođen i dopunjen verzija rada objavljenog pod CC-BY licencom u znanstvenom časopisu Sensors: Lorincz Josip, Kukuruzović Amar, Blažević Zoran, „A Comprehensive Overview of Network Slicing for Improving the Energy Efficiency of Fifth-Generation Networks“, Sensors, Vol. (issue): 2024 (24), 2024. p.p: 1-34, DOI: 10.3390/s24103242

1. Uvod

Mobilne mreže pete generacije (engl. *fifth generation* – 5G) transformiraju digitalni svijet na način da donose korisnicima nove i revolucionarne usluge, značajno veće brzine prijenosa podataka te međusobno povezivanje raznih mrežnih i korisničkih uređaja. Pored izazova koji se odnose na osiguravanje potrebne količine resursa potrebnih za potpunu realizaciju samostalnih 5G mreža kao i cijene implementacije 5G mreža, uvođenje ove napredne tehnologije mobilnih mreža također donosi izazove koji su povezani s povećanom potrošnjom energije mobilnih mreža. Povećana potrošnja energije je posljedica povećanja broja instaliranih baznih postaja (engl. *base station* – BS) u 5G mreži i potrebe za većim kapacitetima baznih postaja koje su nužne radi osiguravanja prijenosa sve veće količine podataka sve većim brzinama putem širokopojasnih kanala. Povećana potrošnja energije mobilne mreže ima nekoliko negativnih posljedica. Prva se odnosi na negativne aspekte za okoliš uslijed povećanja emisija ugljičnog dioksida (CO_2). Prema dostupnim podacima, telekomunikacijska industrija odgovorna je za približno 2% ukupnih globalnih emisija CO_2 [1]. Osim toga, negativan aspekt povećane potrošnje energije očituje se u povećanim operativnim troškovima mobilnih operatora, što u mnogim slučajevima dovodi do povećanja cijena telekomunikacijskih usluga. Procjenjuje se da će do 2030. godine, u najboljem scenariju, 8% globalne potražnje za električnom energijom dolaziti iz sektora informacijske i komunikacijske tehnologije (engl. *information and communications technology* – ICT) [1].

Navedeni čimbenici ukazuju na to da je težnja prema boljoj energetskej učinkovitosti (engl. *energy efficiency* – EE) u mobilnim mrežama jedan od ključnih ciljeva u planiranju, implementaciji i radu 5G mobilnih mreža. S obzirom na to, poboljšanje energetske učinkovitosti mobilne mreže podrazumijeva optimizaciju resursa koji mogu smanjiti potrošnju energije, ublažiti emisiju stakleničkih plinova (CO_2) te uključiti obnovljive izvore energije u napajanje mrežnih elemenata [2]. Očekuje se da će se nakon potpune globalne implementacije 5G mreža do 2030. godine, u odnosu na mobilne mreže prethodne generacije (4G), brzina prijenosa podataka povećati za faktor 1000, dok će se istovremeno potrošnja energije mreže smanjiti za faktor 2. Kako bi se postigla takva poboljšanja energetske učinkovitosti, koja su 2000 puta veća po prenesenom bitu u usporedbi s energetskej učinkovitošću prethodnih generacija mobilnih mreža, potrebno je implementirati različita rješenja za optimizaciju potrošnje energije 5G mreža [3]. Jedno od istaknutih rješenja posvećenih optimizaciji korištenja resursa 5G mreže je tehnika poznata kao “mrežno rezanje” (engl. *network slicing*), koja se ponegdje opisuje i kao “mrežno segmentiranje”. Mrežno rezanje u 5G mrežama omogućuje stvaranje i postojanje više neovisnih logičkih 5G mreža unutar iste fizičke mrežne infrastrukture. Koncept mrežnog rezanja pruža veliku fleksibilnost za specifične implementacije mobilnih mreža, što može pridonijeti smanjenju troškova implementacije usluga, proširenju ponude usluga te osiguranju boljeg iskorištavanja resursa mobilnih mrežnih operatora (engl. *mobile network operators* – MNO). U tom

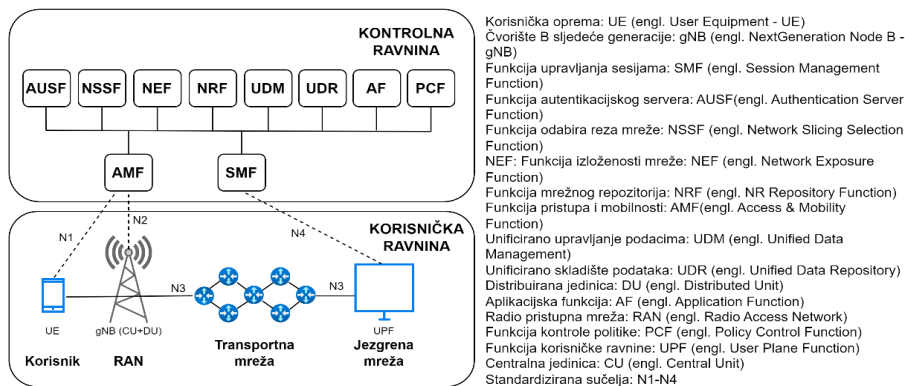
kontekstu, postavlja se pitanje može li implementacija koncepta mrežnog rezanja u 5G mrežama doprinijeti poboljšanju energetske učinkovitosti mobilne mreže? Cilj ovog preglednog rada je pružiti odgovor na to pitanje, kroz provođenje opsežne analize mogućnosti poboljšanja energetske učinkovitosti 5G mobilnih mreža primjenom tehnike mrežnog rezanja (NS).

1.1 Uvod u 5G mrežno rezanje

Arhitektura 5G mobilnih mreža omogućuje na zajedničkoj fizičkoj infrastrukturi 5G mreže, stvaranje, održavanje i deaktiviranje jedne ili više neovisnih logičkih mreža poznatih kao mrežni rezovi (segmenti) (engl. *network slices* – NSs). Svaki neovisni 5G mrežni rez ima svoje vlastite zahtjeve za resursima mreže, s ciljem zadovoljenja zahtjeva za kvalitetom usluge svake aplikacije, skupine korisnika, scenarija uporabe ili određenog tržišta koje NS opslužuje. U okviru koncepta mrežnog rezanja, svaki pojedinačni mrežni rez tvori zasebnu virtualnu mrežu koja objedinjuje korištenje određene skupine mrežnih resursa i funkcija. Opisani mrežni rezovi djeluju autonomno, od svoje inicijalizacije do deaktivacije te imaju različite zahtjeve na kvalitetu usluge (engl. *quality of service* – QoS) koju moraju osigurati korisnicima mrežnog reza, pri čemu zahtjevi mogu uključivati i optimalnu potrošnje energije. Osim toga, mrežne rezove karakteriziraju neovisni mehanizmi upravljanja i kontrole koji su prilagođeni specifičnim zahtjevima korisnika, operatora, aplikacije, usluge ili određenog tržišta koje opslužuje mrežni rez [4]. Na Slici 1 prikazana je 5G samostalna mreža s elementima mreže na kontrolnoj i korisničkoj ravni.

Prethodno navedeno implicira da u praktičnoj realizaciji 5G mreža postoje i nesamostalne implementacije 5G mobilnih mreža (engl. *non-standalone*) koje se praktično realiziraju kroz integraciju postojećih 4G mobilnih mreža i 5G radijske pristupne mreže (engl. *radio access network* – RAN). Nasuprot tome, samostalna 5G mreža (engl. *standalone*) prikazana na Slici 1 djeluje neovisno o mrežnim elementima mobilne mreže prethodne generacije (4G), koristeći 5G elemente radijske pristupne mreže (RAN) kao i izvorno u oblaku (engl. *cloud*) locirane elemente 5G jezgrene mreže. Ovo je glavni razlog zašto nesamostalne 5G mreže nemaju mogućnost implementacije koncepta mrežnog rezanja, te su izvan opsega ovog rada.

Slika 1 prikazuje 5G mrežu koja se sastoji od korisničke ravnine, koja obuhvaća korisničku opremu (engl. *user equipment* – UE), radijsku pristupnu mrežu (RAN), transportnu mrežu (engl. *transport network* – TN) i jezgrenu mrežu (engl. *core network* – CN) koja sadrži i funkciju korisničke ravnine (engl. *user plane function* – UPF). Korisnička ravnina uključuje funkcionalnosti osiguravanja tokova podataka s kraja na kraj mreže (engl. *end-to-end data flow*), enkapsulaciju podataka (engl. *data encapsulation*) i sam prijenos podataka (engl. *data transfer*).



Slika 1: 5G samostalna mreža s elementima mreže na kontrolnoj i korisničkoj ravnini [5], [6]

S druge strane, kontrolna ravnina obuhvaća prijenos informacija o kontroli i upravljanju mrežom te uzima u obzir sve funkcionalnosti koje nisu povezane s transportom korisničkog sadržaja (Slika 1). Primjerice, kontrolna ravnina upravlja administracijom komunikacijskih sesija, provjerava prava pristupa mrežnim uslugama, distribuira i provodi pravila usluga u mreži te pohranjuje korisničke podatke.

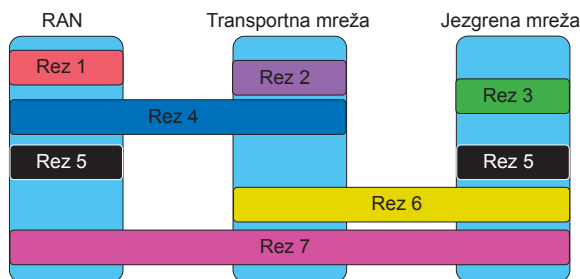
Mrežno rezanje se može primijeniti na neke od elemenata (komponenti) mreže na način da se uspostavljaju zasebni fizički entiteti mreže karakteristični za svaki mrežni rez (NS), ili se može omogućiti dijeljenje jednog fizičkog entiteta mreže između više mrežnih rezova. Uobičajeno je u praktičnim implementacijama mrežnog rezanja 5G mreže da se funkcija pristupa i mobilnosti (engl. *access and mobility function* – AMF) dijeli između nekoliko mrežnih rezova, dok su funkcija upravljanja sesijama (engl. *session management function* – SMF) i UPF obično dodijeljeni svakom mrežnom rezu zasebno (Slika 1). Razlog zašto se AMF dijeli među mrežnim rezovima jest smanjenje razmjene signalizacijskih poruka između mreže i korisničkih uređaja (engl. *user devices* – UD), kada se korištene usluge protežu preko različitih mrežnih rezova. Uz AMF, funkcija unificiranog (jedinstvenog) upravljanja podacima (engl. *unified data management* – UDM) i funkcija odabira mrežnog reza (engl. *network slicing selection function* – NSSF) također se dijele među više mrežnih rezova, s ciljem pojednostavljenja složenosti upravljanja istima.

Iako transportna mreža (TN) obično pripada mobilnom mrežnom operatoru, u praksi se mogu vidjeti različite alokacije elemenata infrastrukture transportne mreže (TN) između mrežnih rezova 5G mreže. Slika 2 prikazuje primjere dosega mrežnih rezova u 5G mrežama. Prema Slici 2, mrežno rezanje se može primijeniti zasebno na svaki element arhitekture 5G mobilne mreže ili se može ostvariti kao kombinacija nekih dijelova ili svih elemenata samostalne 5G mreže. Ako mrežno rezanje obuhvaća dio jezgrene mreže (CN), dio transportne mreže (TN) i dio radio pristupnog (RAN) dijela

mreže (kao što je prikazano za mrežni rez 7 na Slici 2), takvo rezanje se naziva mrežno rezanje s kraja-na-kraj (engl. *end-to-end (E2E) network slicing*).

1.2 Pregled glavnih doprinosa rada

U pogledu poboljšanja energetske učinkovitosti (engl. *energy efficiency* – EE) mobilnih mreža, implementacija bilo koje vrste mrežnog rezanja osim s kraja-na-kraj (E2E) mrežnog rezanja nije sveobuhvatno rješenje za postizanje ambicioznih ciljeva usmjerenih na poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mreža. Takvo se rezanje može smatrati improvizacijom u specifičnim slučajevima upotrebe ili prijelaznim rješenjem do uspostave s kraja-na-kraj mrežnog rezanja. Primjeri takvih koncepata mrežnog rezanja prikazani su na Slici 2 kao rez 1 (rezanje na razini RAN-a), rez 2 (rezanje na razini TN-a), rez 3 (rezanje na razini CN-a), itd. Povećani troškovi energije i ekološka svijest doveli su do razvoja koncepta energetski osviještenog ugrađivanja virtualnih mreža (engl. *energy-aware virtual network embedding* – EA-VNE) [7], [8], [9], čiji je cilj optimizacija upotrebe energije mreže alokacijom zahtjeva virtualne mreže prema fizičkim mrežnim resursima. Budući da implementacija E2E mrežnog rezanja i EA-VNE podrazumijeva uspostavu brojnih virtualnih mreža na zajedničkoj fizičkoj infrastrukturi 5G mreže, tehnologije poput virtualizacije mrežnih funkcija (engl. *network function virtualization* – NFV) i softverski definiranih mreža (engl. *software defined network* – SDN) postaju ključni za realizaciju 5G mrežnog rezanja [10]. Osim ovih tehnologija, važni koncepti koji omogućuju realizaciju mrežnog rezanja su rubno i računalstvo u oblaku (engl. *edge and cloud computing*) [11]. Svi ovi koncepti bit će analizirani u ostatku rada kao metode za poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mreža kroz implementaciju mrežnog rezanja.



Slika 2: Primjeri dosega mrežnih rezova u 5G mrežama [5]

Dakle, doprinos ovog rada je istaknuti prednosti primjene mrežnog rezanja kao sredstva za poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mreža. Na temelju pregleda objavljene literature, bit će pokazano da tema poboljšanja energetske učinkovitosti 5G mreža

kroz primjenu mrežnog rezanja nije dovoljno obrađena, zbog čega ovaj rad ima za cilj dati sveobuhvatan prikaz mogućnosti primjene 5G mrežnog rezanja za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža.

Kako bi se pokazalo kako učinkovita primjena mrežnog rezanja može optimizirati potrošnju energije 5G mreža, u radu će se analizirati razni scenariji primjene 5G mrežnog rezanja, pristupi i koncepti alokacije mrežnih resursa u prostornoj, vremenskoj i frekvencijskoj domeni, uključujući implementacije mrežnog rezanja temeljene na primjeni umjetne inteligenciji (engl. *artificial intelligence* – AI). Rad također diskutira ideje za daljnja istraživanja u području poboljšanja energetske učinkovitosti 5G mreža kroz implementaciju mrežnog rezanja.

Ostatak ovog rada organiziran je na sljedeći način. Sekcija 2 pruža opći opis utjecaja mrežnog rezanja na energetske učinkovitost 5G mreža te predstavlja ideje za moguća daljnja istraživanja koja se odnose na poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mreža kroz implementaciju mrežnog rezanja. U Sekciji 3 rada, analizira se utjecaj primjene različitih koncepata mrežnog rezanja na poboljšanje energetske učinkovitosti radio pristupnog dijela mobilne mreže (RAN). Sekcija 4 sadrži zaključak rada.

2. Mogućnosti poboljšanja energetske učinkovitosti mreže primjenom mrežnog rezanja

U ovoj sekciji rada opisana su operativna stanja mrežnih rezova i pripadajući resursi koji se koriste u postupcima mrežnog rezanja, pristupi poboljšanju energetske učinkovitosti mrežnih rezova u 5G mrežama, alokacija resursa u rezanju 5G mreže, implementacija mrežnih rezova metodom podmrežavanja mreže i metode ograničavanja potrošnje energije mrežnih rezova.

2.1 Operativna stanja mrežnih rezova i pripadajući resursi

Provođenje procjenjivanja razine energetske učinkovitosti cijele mobilne mreže ili određenog mrežnog reza realizira se temeljem uspostavljenih ključnih pokazatelja izvedbe (engl. *key performance indicator* – KPI) koji ukazuju na razinu energetske učinkovitosti mreže. Međutim, za postizanje bolje energetske učinkovitosti mobilne mreže, ključna je mogućnost da mobilni mrežni operatori upravljaju mrežnim resursima koji tvore mrežne rezove na energetske učinkovit način, uz istodobno održavanje odgovarajuće kvalitete usluge (QoS) u mreži. U kontekstu mrežnog rezanja, standard 3GPP (engl. *third-generation partnership project*) TS 23.501 [12] definira tri pojma: mrežna funkcija (engl. *network function* – NF), mrežni rez i instanca mrežnog reza. Mrežna funkcija (NF) je funkcija obrade u mreži koja definira funkcionalno ponašanje mrežnog reza i koja može biti implementirana kao vitalizirana funkcija instalirana

na odgovarajućoj platformi (npr. infrastrukturi u oblaku), kao softverska aplikacija koja se izvršava na dodijeljenom sklopovlju (hardveru) ili kao mrežni element koji djeluje s pripadajućim hardverom. Dok je mrežni rez logička mreža koja pruža specifične mrežne karakteristike i mogućnosti, instanca mrežnog reza predstavlja skup mrežnih funkcija (NF) i pripadajućih resursa (potrebnih, primjerice za umrežavanje, pohranu ili računalne operacije) koji zajedno čine implementirani mrežni rez.

Postoje dva operativna stanja resursa mrežnog reza koja su standardizirana u [13] od strane 3GPP standardizacijskog tijela, u kojima se mogu naći dijelovi RAN mreže, instanca mrežnog reza, mrežna funkcija (NF) i cjelokupni mrežni rez. Ta stanja su energetski štedljivo stanje i operativno (aktivno) stanje (koje nije energetski štedljivo stanje). Dakle, osnovno načelo bilo kojeg mehanizma za uštedu energije primjenom mrežnog rezanja 5G mreža je prijelaz tijekom rada mrežnog reza ili njegovog dijela iz energetski neštedljivog stanja u energetski štedljivo stanje i obrnuto. Taj prijelaz mora biti popraćen načelom da drugi mrežni resursi koji ostaju raditi u neštedljivom stanju (kao što su drugi mrežni rez(ovi), NF, RAN, određeni element mrežnog reza koji radi u štedljivom stanju, itd.) trebaju prihvatiti radno opterećenje resursa dijela mrežnog reza ili cjelokupnog mrežnog reza koji je u energetski štedljivom stanju.

Nadalje, kada pojedini elementi mrežnog reza ili cjelokupni mrežni rez budu u energetski štedljivom stanju, to ne smije rezultirati degradacijom korisničke kvalitete usluge (QoS) mrežnog reza te se mora spriječiti preopterećenje preostalih aktivnih mrežnih rezova ili elemenata mrežnog reza koji rade u neštedljivom stanju [13]. S obzirom na prethodno spomenuta dva stanja energetske uštede, definirane su temeljne procedure za ulazak i izlazak iz stanja štedljivog i neštedljivog načina rada. Sljedeće sekcije rada daju objašnjenja metoda vezanih za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža primjenom 5G mrežnog rezanja.

2.2 pristupi poboljšanju energetske učinkovitosti mrežnih rezova u 5G mrežama

Energetska učinkovitost 5G mreže se može poboljšati smanjenjem potrošnje električne energije mrežnih resursa 5G mreže koji osiguravanju funkcionalnosti mrežnog(ih) reza(ova). Ovo smanjenje potrošnje električne energije također dovodi do smanjenja operativnih troškova MNO-a. Takvo poboljšanje energetske učinkovitosti mrežnih rezova u 5G mrežama se općenito može postići na tri načina koji su kategorizirani kao redizajn mrežne opreme, dinamička dodjela mrežnih resursa i pametno mirovanje (engl. *smart sleeping*) [14]. Ova tri pristupa mogu se primijeniti u mrežnom rezanju 5G mreža zasebno ili kombinirano.

U ovom radu neće se analizirati redizajn mrežne opreme, budući da to izlazi izvan opsega ovog rada. Redizajn mrežne opreme uključuje korištenje energetski učinko-

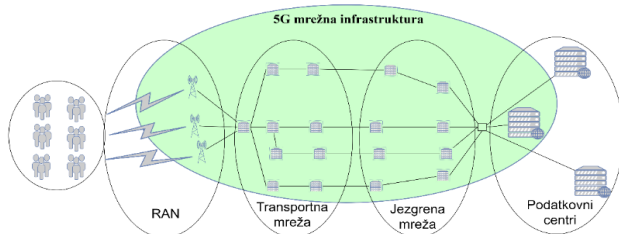
vitih materijala i komponenti za razvoj energetske učinkovitije hardverske opreme te smanjenje sklopovske složenosti mrežnih uređaja, što osigurava postizanje iste razine performansi uz manji broj elektroničkih elemenata, a što posljedično smanjuje njihovu potrošnju energije. Međutim, dinamička prilagodba dodjele mrežnih resursa i pametno mirovanje, kao istaknuti pristupi za poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mrežnih rezova, bit će analizirani u preostalim dijelovima ovog rada. Dinamička dodjela mrežnih resursa uključuje skaliranje resursa mrežnih rezova na način da se resursi koji u određenom trenutku nisu nužni za pružanje usluga ne koriste. Kod pristupa pametnog mirovanja, određeni elementi mrežnih rezova se isključuju (odnosno stavljaju u stanje mirovanja) kako bi se postigle uštede energije te se ponovo pokreću kada se ukaže potreba [15], [16].

Kao što je već prethodno spomenuto, ključni koncepti koji omogućuju realizaciju mrežnog rezanja su programski definirane mreže (SDN), virtualizacija mrežnih funkcija (VNF) i računalstvo u oblaku. Koncept SDN odvaja upravljačku razinu od fizičkih mrežnih elemenata, te se upravljanje istima odvija s jednog centraliziranog mjesta. Centralizacija upravljanja mrežnim rezovima s jedne lokacije omogućuje učinkovitiju kontrolu mrežnih resursa u usporedbi s pristupom gdje svaki element mrežnog reza ima vlastitu upravljačku ravninu. Ovo dovodi do pozitivnog učinka na ukupnu potrošnju energije cijelog mrežnog reza, a to se posljedično odražava i na smanjenje ukupne potrošnje energije cijele mreže. Stoga, osim učinkovitog upravljanja mrežom, koncept mrežnog rezanja može doprinijeti smanjenju ukupne potrošnje energije mobilne mreže, budući da se energija ne troši na rad upravljačke ravnine na nivou svakog fizičkog elementa mreže.

Pored navedenoga, implementacija VNF tehnologije za realizaciju mrežnog rezanja također ima pozitivan utjecaj na energetske učinkovitost mrežnih rezova. Taj utjecaj ogleda se u mogućnosti implementacije više mrežnih rezova na jednom fizičkom mrežnom uređaju putem virtualizacije mrežnih resursa (VNF), čime se postižu ekvivalentni učinci kao kod realizacije mrežnih rezova na odvojenim fizičkim mrežnim uređajima. U tom kontekstu, implementacija VNF zahtijeva virtualne veze između elemenata mrežnih rezova, koje imaju manje energetske potrebe u usporedbi s fizičkim vezama. Također, računalstvo u oblaku, kao jedan od koncepta koji omogućuje implementaciju mrežnog rezanja, može osigurati još učinkovitije korištenje resursa mreže. Kod računalstva u oblaku, učinkovitija uporaba procesora, sustava za pohranu podataka i sustava hlađenja podatkovnih centara (engl. *data center* – DC), smanjuje generiranje topline ili pregrijavanje u podatkovnim centrima, što opet pozitivno utječe na ukupnu energetske učinkovitost mobilne mreže. Važno je napomenuti da podatkovni centri u oblaku kao izvore energije mogu koristiti obnovljive izvore energije, što na kraju smanjuje troškove za mobilne mrežne operatore (MNO) i doprinosi smanjenju potrošnje energije iz neobnovljivih izvora.

2.2.1 Alokacija resursa za realizaciju 5G mrežnih rezova

U slučaju klasičnih 5G mreža realiziranih bez mrežnog rezanja (Slika 3), različiti korisnici mogu generirati različite vrste prometa, počevši od onih s visokim do onih s niskom kvalitetom usluge (QoS). U takvoj konfiguraciji cijela 5G mreža koristi značajno više resursa nego što je potrebno, budući da je mobilna mreža dimenzionirana u odnosu na zadovoljavanje najviših parametara kvalitete usluge (QoS) i kapaciteta mreže. Međutim, u stvarnim mrežama često puta je količina prometa koja prolazi kroz mrežu uglavnom manja od maksimalnih količina za koje je mreža dimenzionirana, a veliki dio mrežnih resursa i dalje aktivno radi te je na niskim razinama iskorištenosti. Ovo često dovodi do bespotrebne potrošnje energije mrežnih elemenata koji su podopterećeni, pri čemu navedena potrošnja doprinosi porastu ukupne potrošnje mobilne mreže. Iako su pojedini mrežni elementi (engl. *network element* – NE) u 5G mrežama općenito energetski učinkovitiji od mrežnih elemenata prethodnih generacija (bolja potrošnja energije po jedinici prenesenog prometa), povećanje broja instaliranih mrežnih elemenata 5G mreže dovodi do povećanja ukupne potrošnje energije 5G mreže u usporedbi s mrežama prethodnih generacija. Navedeno povećava operativne troškove mobilnih mrežnih operatora (MNO). Na primjer, jedna makro bazna postaja (BS) u 5G mreži, iako osigurava značajno veće kapacitete u odnosu na makro BS u mrežama prethodnih generacija, zahtijeva gotovo 70% više energije nego makro BS koja u istom kućištu kombinira tehnologije druge (2G), treće (3G) i četvrte generacije (4G) [17].



Slika 3: Tradicionalna 5G mrežna arhitektura bez implementacije mrežnog rezanja [5]

Iako su mogućnosti poboljšanja energetske učinkovitosti 5G mreža ograničene, primjena mrežnog rezanja može doprinijeti njihovom poboljšanju. Jedan od glavnih pristupa za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih mreža kroz implementaciju koncepta mrežnog rezanja, je dodjela mrežnih resursa uz pomoć orkestratora, koji je sastavni dio entiteta za upravljanje i orkestraciju (engl. *management and orchestration* – MANO) mreže. MANO je odgovoran za prevođenje različitih modela usluga i slučajeva uporabe (engl. *use cases*) u operativne mrežne rezove. MANO obavlja

dinamičke zadatke upravljanja, uključujući pokretanje, završavanje i praćenje rada mrežnih rezova i njegovih virtualnih mrežnih funkcija (VNF). To je nužno za postizanje skaliranja resursa mrežnih rezova u stvarnom vremenu ili saniranja potencijalnih problema u mreži koji mogu nastati tijekom rada mrežnih rezova. Mrežni rezovi se mogu kreirati i orkestrirati na temelju mekanog (engl. *soft*) ili tvrdog (engl. *hard*) mrežnog rezanja. Kod mekanog mrežnog rezanja, mrežno rezanje može dijeliti neke mrežne resurse s drugim mrežnim rezovima, dok kod tvrdog mrežnog rezanja mrežni rezovi moraju biti potpuno izolirani jedni od drugih.

Stoga su dva temeljna mehanizma koja se koriste za alokaciju mrežnih resursa izolacija mrežnih rezova i orkestracija. Na primjer, kod tvrde izolacije mrežnih rezova, mrežni rez B ne može koristiti resurse dodijeljene mrežnom rezu A, čime se sprječava povećanje potrošnje energije mrežnog reza A. Pritom mrežne funkcije za mrežne rezove A i B mogu biti realizirane na istom fizičkom mrežnom elementu, ali se mora precizno znati koliko energije svaka VNF na tom fizičkom elementu troši za mrežni rez A, a koliko za mrežni rez B. Orkestracija (MANO) može dinamički dodavati ili smanjivati resurse mrežnih rezova na inteligentan način ili uz pomoć umjetne inteligencije (AI).

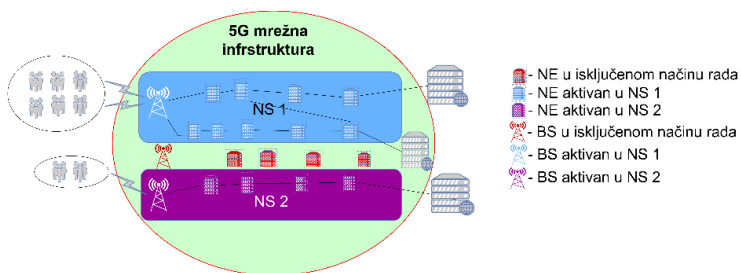
Grupiranjem korisnika koji imaju slične ili iste karakteristike generiranog mrežnog prometa i dodjeljivanjem odgovarajućih resursa samo specifičnim vrstama mrežnog prometa ili usluga, uz korištenje mehanizama izolacije mrežnih rezova i orkestracije kao i stavljanjem određenih mrežnih elemenata u način mirovanja putem preraspodjele mrežnih resursa, mrežno rezanje može utjecati na dinamiku korištenja mrežnih elemenata i iskoristivost njihovih kapaciteta.

Stoga se kao način mjerenja energetske učinkovitosti mobilne mreže uvode KPI-evi energetske učinkovitosti koji se definiraju kao omjer performansi mrežnog resursa i potrošene energije. Za povećanje ovih KPI-eva koji predstavljaju mjeru energetske učinkovitosti mobilne mreže, moguće je ili povećavati performanse mrežnog reza za istu potrošnju energije i/ili smanjivati ukupnu potrošnju energije za ostvarivanje istih performansi mrežnog reza. Pri tome metode dinamičke prilagodbe mrežnih resursa i preraspodjele resursa prvenstveno utječu na povećanje ili smanjenje performansi mrežnog reza, dok način pametnog mirovanja utječe na smanjenje potrošene energije.

2.2.2 Primjer alokacije mrežnih rezova za poboljšane energetske učinkovitosti mreže

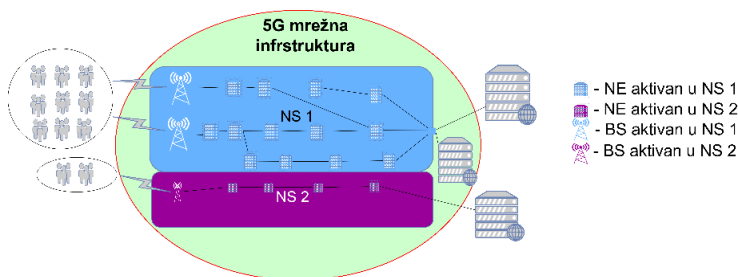
Spomenuti pristupi za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilne mreže primjenom metode mrežnog rezanja prikazani su u primjeru na Slikama 4, 5 i 6. Slika 4 predstavlja primjer mobilne mreže s dva mrežna reza, gdje su korisnici grupirani u mrežne rezove prema vrsti komunikacijske usluge koju koriste u mreži. Mrežna konfiguracija tih rezova je takva da se mora osigurati potrebna QoS koju korisnici zahti-

jevaju. Kao što se može vidjeti na Slici 4, tijekom uspostave mrežnih rezova moguće je da neki mrežni elementi neće biti uopće korišteni, budući da oba mrežna reza zadovoljavaju specificirane parametre QoS s dodijeljenim mrežnim resursima. Na Slici 4 prikazani neiskorišteni resursi 5G mreže nisu trenutno potrebni za pružanje usluga koje su omogućene putem mrežnih rezova. Budući da mrežni elementi mogu prelaziti iz aktivnog u isključen mod (engl. *sleep mode*) rada, potrošnja energije u cijeloj 5G mreži bit će smanjena u usporedbi s tradicionalnom 5G mrežom realiziranom bez primjene mrežnog rezanja (koja je prikazana na Slici 3). Stoga, kroz orkestraciju mrežnih rezova i upravljanje istima, prilagodba 5G mrežnih resursa potrebama definirane usluge koju pruža mrežni rez, postiže se dodavanjem ili smanjenjem resursa mreže u cilju očuvanja potrebne kvalitete usluge (QoS) te uz poboljšanje energetske učinkovitosti mreže.



Slika 4: Alokacija mrežnih elemenata za dva mrežna reza u 5G mobilnoj mreži [5]

Ako dođe do povećanja prometa u nekom mrežnom rezu, na primjer, u mrežnom rezu NS 1 (Slika 5), dodatni resursi se angažiraju putem orkestratora (MANO) u svrhu zadovoljavanja svih prometnih zahtjeva i zahtjeva za kvalitetom usluge (QoS). Slika 5 prikazuje alokaciju novih mrežnih resursa 5G mreže za mrežni rez NS 1 u kojemu je došlo do povećanja prometa u odnosu na inicijalno stanje potreba za prijenosom prometa prikazanim na Slici 4.



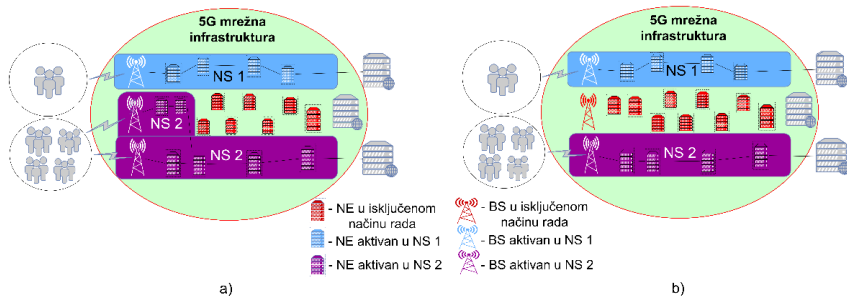
Slika 5: Alokacija novih mrežnih elemenata 5G mreže za mrežni rez NS 1 [5]

Budući da se zbog porasta prometa u mrežnom rezu NS1 prenosi mnogo veći volumen prometa, mrežni elementi koji su potrebni za rad mrežnog reza NS1 se povećavaju (Slika 5) u odnosu na inicijalno stanje (Slika 4). Međutim, ovaj dodatni angažman mrežnih resursa dovest će i do povećanja potrošnje energije mreže zbog dodatno aktiviranih mrežnih elemenata (resursa). To vodi do zaključka da prilagodba mrežnih resursa u mrežnom rezanju može doprinijeti povećanju energetske učinkovitosti mobilne mreže, jer u razdoblju manjeg prometa 5G mreže prikazanog na Slici 4, mreža troši manje energije u usporedbi s 5G mrežom prikazanom na Slici 3 ili mrežom prikazanom na Slici 5. Manja potrošnja energije posljedica je korištenja manje resursa mreže za osiguravanje rada mrežnih rezova.

Osim toga, u situaciji kada dolazi do smanjenja prometa ili potražnje za uslugama u nekom drugom mrežnom rezu u usporedbi s konfiguracijom u kojoj su resursi mrežnog reza potpuno aktivirani (na način prikazan na Slici 5), mehanizmi prilagodbe MANO entiteta mogu djelovati kako bi smanjili korištenje resursa 5G mreže. U takvoj situaciji, resursi oslobođeni mehanizmima prilagodbe mogu biti u dva stanja: ili ih koristi drugi mrežni rez zbog povećane potražnje za prometom u tom mrežnom rezu, kao što je prikazano na Slici 6a, ili se stavljaju u stanje mirovanja, kao što je prikazano na Slici 6b. U oba slučaja, energetska učinkovitost 5G mreže bit će poboljšana u usporedbi s učinkovitošću klasične 5G mreže bez mrežnih rezova (prikazane na Slici 3), budući da će se barem neki elementi sveukupnih resursa 5G mreže nalaziti u stanju mirovanja, a samim tim i u stanju uštede energije.

2.2.3 Implementacija mrežnog rezanja putem podmreža određenog dijela mreže

U prethodnim primjerima prikazano je tvrdo mrežno rezanje, gdje su pojedini resursi mreže dodijeljeni samo jednom mrežnom rezu na korištenje. Ovakav vid komunikacije opslužuje jedan mrežni rez koristeći resurse pristupne, transportne i jezgrene mreže, zbog čega resursi mrežnog reza ne mogu biti dijeljeni između različitih mrežnih rezova. Stoga je svaki mrežni rez namijenjen pružanju određene usluge korisnicima, pri čemu koristi isključivo vlastite mrežne resurse, bez dijeljenja tih resursa s drugim mrežnim rezovima. Ovaj pristup stvaranju rezane mreže (engl. *sliced network*) jedan je od mogućih pristupa implementaciji 5G mrežnog rezanja. Međutim, pored opisanog pristupa standard 3GPP TS 28.530 [18] navodi da različiti mrežni rezovi mogu koristiti zajedničku podmrežu u pristupnom (RAN i TN) ili jezgrenom (CN) dijelu 5G mreže. Na Slici 7 je kao primjer prikazan pristupni i jezgreni dio 5G mreže koji čine specifične mrežne rezove. U ovom slučaju, različiti dijelovi podmreža koji tvore pojedini mrežni rez mogu se koristiti u različitim dijelovima 5G mreže (pristupnom ili jezgrenom).



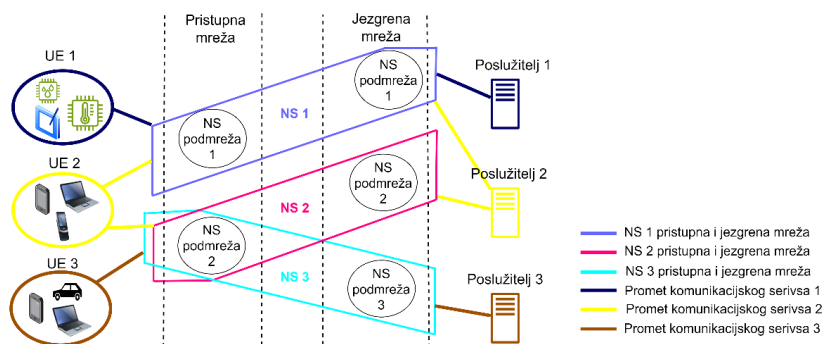
Slika 6: Alokacija mrežnih elemenata u 5G mreži s dva mrežna reza za slučaj: (a) povećanja prometa u mrežnom rezu NS 2; (b) smanjenja prometa u mrežnom rezu NS 2 [5]

U slučaju primjera na Slici 7, postoje tri mrežna reza (NS1, NS2 i NS3) s tri komunikacijske usluge na poslužiteljima 1, 2 i 3, koje su ponuđene trima različitim skupinama krajnjih korisnika (UE1, UE2 i UE3). Usluge se realiziraju kroz mrežne rezove NS1, NS2 i NS3, a njihove odgovarajuće podmreže protežu se preko različitih dijelova pristupne i jezgrene mreže (Slika 7). 3GPP standardizacija predstavlja mogućnost da više od jednog mrežnog reza istovremeno koristi jednu podmrežu u pristupnom ili jezgrenom dijelu mreže (npr. NS2 i NS3 koriste istu podmrežu u 5G pristupnoj mreži, kao što je ilustrirano na Slici 7). Ovaj primjer mekog mrežnog rezanja otvara daljnje mogućnosti za smanjenje potrošnje energije u 5G mreži. Dva ili više mrežnih rezova koji dijele iste mrežne resurse omogućavaju bolje iskorištavanje resursa 5G mreže i otvaraju mogućnost stavljanja više elemenata u isključeno stanje u cilju uštede energije.

Zanimljiv slučaj korištenja takvog mekog mrežnog rezanja za postizanje poboljšanja energetske učinkovitosti 5G mreže je prikazan na jednom od primjera sa Slike 7. Ovdje komunikacijska usluga koju poslužitelj 2 nudi grupi korisnika UE2, koristi jezgrene i pristupne resurse dva mrežna reza (NS1 i NS2). U slučaju scenarija u kojem se mala količina prometa prenosi putem NS2 tijekom određenog vremenskog razdoblja, postoji potencijal za postizanje uštede energije postavljanjem elemenata jezgrene podmreže NS2 u isključeno stanje, dok se komunikacijska usluga, ostvarena putem NS2 između UE2 i poslužitelja 2, može realizirati preko pristupne i jezgrene podmreže NS1. U ovom slučaju, mrežni resursi jezgrene i pristupne podmreže NS1, trebaju prilagoditi svoje kapacitete kako bi osigurali odgovarajuću kvalitetu usluge (QoS) za prijenos dodatnog prometa NS2 kao i za prijenos postojećeg prometa NS1. Ovo otvara novo polje istraživanja posvećeno razvoju algoritama za dinamičku aktivaciju i deaktivaciju dijelova jezgrenih ili transportnih/pristupnih mreža koje opslužuju određene mrežne rezove u skladu s varijacijama u intenzitetu prometa određenih vrsta usluga koje su specifične za pojedini mrežni rez. U sljedećem odjeljku predstavljani su neki od mogućih pristupa poboljšanju energetske učinkovitosti 5G mreže kroz dinamičku prilagodbu mrežnih resursa pri mrežnom rezanju.

2.3 Ograničavanje potrošnje energije reza mreže

Poboljšanje energetske učinkovitosti rezane 5G mreže može se postići ograničavanjem i preraspodjelom potrošnje energije za određene usluge mrežnog reza ili za cijeli mrežni rez, na način da mobilni mrežni operator (MNO) definira kao fiksni KPI maksimalnu potrošnju energije za iste. Slike 8a i 8c prikazuju primjer MNO politike potrošnje energije bez ograničenja potrošnje za tri usluge jednog mrežnog reza i tri mrežna reza, respektivno.



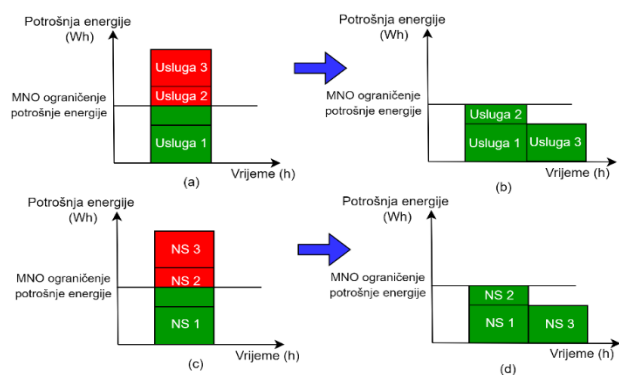
Slika 7: Realizacija različitih komunikacijskih usluga kroz istovremeno dijeljenje mrežnih resursa od strane više različitih mrežnih rezova [5], [18]

Međutim, u slučaju ograničenja ukupne potrošnje energije koje definira MNO, usluge ili mrežni rezovi se mogu realizirati uz blagu degradaciju kvalitete usluge (QoS) na prihvatljive razine za te iste usluge ili mrežne rezove (što je prikazano kao primjer na Slikama 8b i 8d). Ovaj pristup uštedi energije koji se temelji na degradaciji kvalitete usluge (QoS) može se implementirati za one usluge ili mrežne rezove koji ne zahtijevaju visoku pouzdanost ili imaju nisko kašnjenje u prijenosu prometa te mogu odgoditi obradu podataka. Također, postoje i pristupi prema kojima QoS može biti degradiran za neke usluge samo tijekom kratkog vremenskog razdoblja. Ako ovakvo degradirani QoS potraje, isti može postati neprihvatljiv, a maksimalni prag potrošnje energije treba prilagoditi aktivacijom dodatnih mrežnih resursa koji će održavati prihvatljivu razinu kvalitete QoS. To dovodi do nužnosti razvoja tehnika za dinamičku prilagodbu praga maksimalne potrošnje energije za specifične usluge ili mrežne rezove koji su u skladu s potrebom prilagođavanja specifičnim zahtjevima QoS.

Uz načela degradacije usluge i dinamičkog prilagođavanja maksimalne potrošnje energije, moguće je koristiti algoritme koji odgađaju izvršenje usluge ili preraspodjelu dodjele mrežnih resursa mrežnom rezu izvan razdoblja najveće potrošnje energije, omogućujući tako potpuno izvršenje i degradiranih usluga. Slike 8b i 8d ilustriraju slučaj u kojoj su ograničenja na potrošnju energije usluge ili mrežnog reza primije-

njena na uslugu 2, odnosno NS2, za količinu koja premašuje energetska ograničenje. Slike 8b i 8d još prikazuju i primjer scenarija u kojem je izvršenje usluga 3 i rada NS3 vremenski pomaknuto u razdoblje izvan praga maksimalne potrošnje energije. Ovaj pristup vremenskog pomaka izvršenja usluga i rada mrežnog reza se implementira u praksi na način da su korisnici svjesni kako izvršenje njihove usluga može biti pomaknuto u određenim vremenskim periodima. Prihvatanje prethodne mogućnosti vremenskog pomaka, zauzvrat može osigurati niže troškove usluga korisnicima, budući da MNO smanjuje troškove vezane uz potrošnju energije. Stoga je razvoj inovativnih algoritama za vremensko pomicanje izvršenja usluga ili preraspodjelu dodjele mrežnih resursa mrežnim rezovima izvan razdoblja maksimalne potrošnje energije također mogući način za optimizaciju potrošnje energije 5G mreža.

S druge strane, u praktičnim implementacijama mrežnih rezova i odgovarajućih usluga, postoje korisničke usluge kojima treba dati prioritet u smislu izvršenja. Ovo se postiže tako što će MNO odrediti prioritete izvršavanja usluga ili prioritete aktivacije mrežnih rezova, čime odlučuje koji od njih imaju prednost u korištenju resursa 5G mreže. U tom slučaju mogu se postaviti prioritete, kako bi se odredilo koja usluga ili mrežni rez ima prednost, u pogledu potrošnje energije, a posljedično i u korištenju mrežnih resursa. Ostale usluge ili mrežni rezovi nižeg prioriteta mogu doživjeti privremenu degradaciju ili privremeno vremensko pomicanje izvršenja zbog nemogućnosti angažiranja dovoljnih resursa 5G mreže. Međutim, takvi će slučajevi zahtijevati trenutnu akciju kako bi se smanjili negativni utjecaji na QoS u određenim dijelovima 5G mreže. Stoga će ovo uravnoteženje potrošnje energije za svaku uslugu ili za sveukupne mrežne rezove zahtijevati nove pristupe i tehnike koje je potrebno istražiti s ciljem postizanja optimalne raspodjele potrošnje energije između mrežnih rezova.



Slika 8: Pristupi potrošnji energije mrežnih rezova temeljeni na metodi: (a) bez ograničenja maksimalne potrošnje energije po usluzi mreže; (b) uz ograničenja potrošnje energije usluga i planirane potrošnje energije koje definira MNO; (c) bez ograničenja maksimalne potrošnje energije po mrežnom rezu; (d) uz ograničenje potrošnje energije više mrežnih rezova koje definira MNO [5]

3. Poboljšanje energetske učinkovitosti u RAN dijelu 5G mreže

S obzirom na to da se gotovo 70% energije 5G mreže troši u RAN dijelu mreže, odnosno konkretno od strane baznih postaja (BS), često je glavni fokus istraživanja koja se odnose na optimizaciju potrošnje energije 5G mreža usmjeren na tehnike koje omogućuju energetske učinkovitu dodjelu RAN resursa između mrežnih rezova. Prema [19], resursi BS ostaju neiskorišteni tijekom 75–90% vremena njihovog rada, iako povremeno mogu imati značajna prometna opterećenja. Područje poboljšanja energetske učinkovitosti RAN dijela različitih generacija mreža (2G, 3G, 4G i 5G) opsežno je analizirano u literaturi [2], [15], [20], [21]. Stoga se mnoge tehnologije i metode predložene ili korištene za poboljšanje energetske učinkovitosti RAN dijela 5G mreže mogu primjenjivati i u rezanim 5G mrežama. U 5G mrežama, RAN dio mreže može biti dodijeljen određenom mrežnom rezu ili se može dijeliti između različitih mrežnih rezova, što znači da i BS, kao glavni potrošači energije u RAN dijelu mreže, mogu opsluživati samo jedan mrežni rez ili se mogu dijeliti između nekoliko različitih mrežnih rezova. Iako će slučajevi u kojima BS-ovi služe više mrežnih rezova biti dominantni u praksi, situacija u kojoj jedan mrežni rez koristi jednu BS posebno je zanimljiva u slučajevima implementacije mikro, piko ili femto BS-ova u privatnim 5G mrežama koje djeluju kao samostalni mrežni rez.

Sukladno novom standardu poznatom kao novi radio (engl. *new radio* – NR) koji definira rad 5G mreža, cijela BS ili različite komponente bazne postaje mogu prelaziti u stanje mirovanja (engl. *sleep state*) kako bi se postigla ušteda energije. Mogućnost optimizacije potrošnje energije mrežnih rezova u RAN dijelu 5G mreže ovisi o razini dubine stanja mirovanja koje bazne postaje (BS) ili pojedine komponente mogu postići. Općenito, dubine stanja mirovanja baznih postaja ili njihovih komponenti kategoriziraju se kao makro- i mikro-isključeno stanje, a različite komponente baznih postaja prikladnije su za različite razine dubina stanja mirovanja. Tablica 1 prikazuje kategorizaciju komponenti 5G bazne postaje kao kandidata za rad u stanju mirovanja. Trajanje mikro-stanja mirovanja je reda veličine mikro sekundi ili milisekundi, dok su trajanja makro-stanja mirovanja duža i mogu trajati satima ili čak danima. Komponente BS koje su praktičnije za primjenu načina rada BS ulaskom u makro-stanja mirovanja su udaljena radijska jedinica (engl. *remote radio head/unit* – RRH/U), aktivni antenski element (engl. *active antenna element* – AAE), pojačalo snage (engl. *power amplifier* – PA), jedinica za obradu u osnovnom pojasu (engl. *base band unit* – BBU) ili cijele BS (Tablica 1). Komponente BS-a koje su pogodnije za primjenu mikro-stanja mirovanja uključuju frekvencijske resursne blokove (engl. *resource blocks* – RB) bazne postaje, frekvencijske podnositelje (engl. *subcarriers*), cjelokupne bežične kanale i simbole ortogonalno frekvencijskog multipleksiranja (engl. *orthogonal frequency division multiplexing* – OFDM).

Tablica 1 - Kategorizacija komponenti 5G bazne postaje kao kandidata za rad u stanju mirovanja

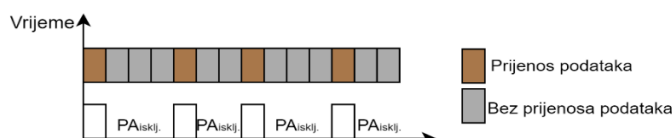
Makro isključeno stanje	Mikro isključeno stanje
Udaljena radijska jedinica (RRH/U)	Frekvencijski blokovi
Aktivni antenski element (AAE)	Podnosioci
Pojačalo snage (PA)	Bežični kanali
Jedinica osnovnog opsega (BBU)	OFDM simboli
Kompletna BS	N/P

Općenito proces uštede energije temeljen na prebacivanju cijele BS ili neke njezine komponente u stanje mirovanja, koja služi jedan ili više mrežnih rezova ovisi o tri aspekta: različitim okidačima i scenarijima za ulazak ili izlazak iz stanja mirovanja (isključenog stanja), trajanju stanja mirovanja te dubini stanja mirovanja. Stoga će optimizacija potrošnje energije mrežnih rezova u 5G mrežama zahtijevati algoritme za prilagodbu konfiguracijskih parametara baznih postaja koje podržavaju rad mrežnih rezova. Takvi algoritmi moraju omogućiti cjelokupnoj BS ili komponentama BS da često ulaze i izlaze iz stanja mirovanja u potpuno aktivno stanje, pri čemu na trajanje tog stanja utječe intenzitet podatkovnog i signalizacijskog prometa mrežnog reza koji koristi određenu BS komponentu ili cijeli BS. Dubina stanja mirovanja (od makro do mikro mirovanja) postiže se prebacivanjem različitih količina BS komponenti koje ne opslužuju nijedan mrežni rez, u neko od stanja mirovanja. To može varirati od djelomičnog gašenja do potpunog isključivanja određenih BS komponenti, uz mogućnost ponovnog pokretanja kada je to potrebno. Međutim, ponovno pokretanje BS komponenti iz isključenog stanja traje duže ako je dubina stanja mirovanja (isključenja) veća [22]. Stoga, okidači za ulazak/izlazak BS ili komponente BS koja opslužuje određene mrežne rezove iz/u stanja mirovanja, kao i dubina i trajanje stanja mirovanja BS ili komponente BS, mogu biti izravno pod utjecajem karaktera usluga mrežnog reza, intenziteta i količine njegovog prometa, intenziteta i količine razmjene signalizacijskih poruka te ograničenja na QoS. Osim toga, ušteda energije u RAN dijelu 5G mreže može se postići u vremenskoj, prostornoj i frekvencijskoj domeni. Mogućnosti uštede energije u rezanom 5G RAN dijelu mreže unutar svake od ovih domena analiziraju se u sljedećim odjeljcima.

3.1 Mogućnosti uštede energije u vremenskoj domeni u rezanom RAN dijelu mreže

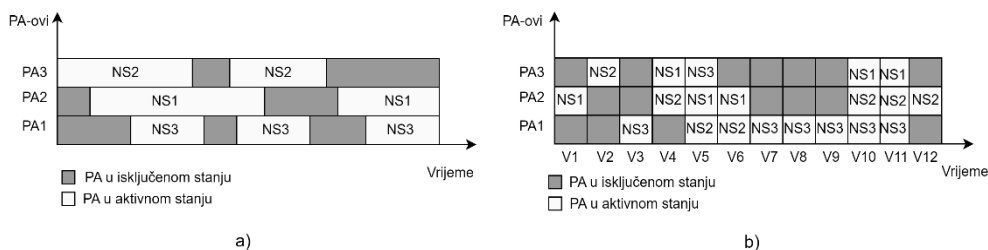
U vremenskoj domeni, moguće uštede energije u rezanom RAN dijelu mreže ostvaruju se na razini gašenja OFDM simbola. U slučaju baznih postaja koje opslužuju jedan mrežni rez, aktivnost pojačala snage (PA) primopredajnika (engl. *transceiver*) kao i učestalost prijenosa nadzornih signala mogu se značajno smanjiti kada nema prijenosa OFDM podatkovnih simbola.

Kao što je prikazano na Slici 9, osnovno načelo uštede energije BS je isključivanje PA tijekom razdoblja bez prijenosa OFDM podatkovnih simbola. Ovaj koncept već je implementiran za nove generacije 5G baznih postaja u klasičnim ne-rezanim 5G mrežama, a pokazalo se da može doprinijeti smanjenju potrošnje energije BS. Važno je naglasiti da se ova vrsta uštede energije može primijeniti kod umjerenih opterećenja baznih postaja, što znači da se uključivanje i isključivanje PA može dopustiti samo u razdobljima kada se preko mrežnog reza prenosi manja količina prometa. U slučaju intenzivnog prijenosa podatkovnog prometa unutar mrežnog reza, svaki vremenski odsječak OFDM simbola bit će zauzet, što smanjuje mogućnost isključivanja pojačala snage (PA) [23].



Slika 9: Aktivnost PA primopredajnika BS sukladno vremenskim varijacijama toka podataka [5], [22]

Dodatno, u rezanim 5G mrežama s baznim postajama koje istovremeno opslužuju više mrežnih rezova, kako bi se postigle dodatne uštede energije, koncept raspoređivanja aktivnosti pojačala snage (PA) može se proširiti na njihovu distribuciju između različitih mrežnih rezova, primjenom tehnika prikazanih na Slici 10.



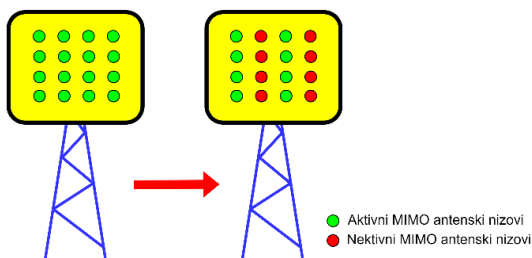
Slika 10: Alokacija pojačala snage bazne(ih) postaje(a) između više mrežnih rezova: a) trajnom alokacijom; (b) na temelju rasporeda PA između mrežnih rezova [5]

Jedan koncept temelji se na pristupu prema kojem je određeni PA trajno dodijeljen određenom mrežnom rezu, kao što je prikazano u primjeru na Slici 10a, dok se drugi pristup temelji na vremenskom rasporedu prijenosa prometa više mrežnih rezova između različitih pojačala snage bazne(ih) postaje(a) (Slika 10b). U oba koncepta, ušteda energije postiže se za određene mrežne rezove u razdobljima kada nema

podatkovnog prometa za prijenos putem mrežnih rezova. Implementacija takvog koncepta zahtijevat će razvoj tehnika koje će omogućiti dinamičko raspoređivanje pojačala snage među mrežnim rezovima na istoj ili različitoj BS ili će zahtijevati mogućnost dodjele određenog pojačala snage određenim mrežnim rezovima putem konfiguracije BS-a.

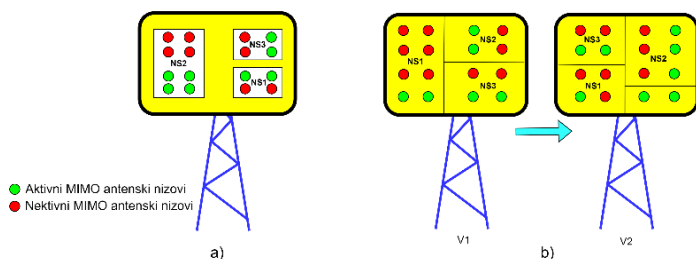
3.2 Mogućnosti uštede energije u prostornoj domeni u rezanom RAN dijelu mreže

Uštede energije u rezanim 5G mrežama u prostornoj domeni mogu se postići primjenom prijenosne tehnike višestrukog ulaza–višestrukog izlaza (engl. *multiple-input multiple-output* – MIMO). MIMO kao tehnika se temelji na bežičnom istovremenom prijenosu više sljedova podataka preko nizova višestrukih antena, što rezultira smanjenim slabljenjem signala, poboljšanim omjerom signala i šuma na krajevima bežične komunikacije i mogućnošću stvaranja višestrukih komunikacijskih tokova koji povećavaju kapacitet kanala za prijenos podataka u ograničenom frekvencijskom spektru. Implementacija višekorisničkog MIMO (engl. *multi-user MIMO* – MU-MIMO) i masivnog MIMO (engl. *massive MIMO* – mMIMO) prijenosnih tehnika omogućuje daljnje poboljšanje kapaciteta bežičnog kanala u 5G mrežama. Zgušnjavanje i povećanje broja antenskih nizova u MIMO sustavu omogućuje implementaciju tehnika uštede energije kroz prostornu alokaciju bežičnih tokova preko nizova MIMO antenskih elemenata. Osnovna ideja uštede energije u prostornoj domeni u rezanom RAN dijelu mreže povezana je s uključivanjem i isključivanjem MIMO antenskih nizova u skladu s intenzitetom mrežnog prometa onog dijela antenskih elemenata i popratne opreme koja opslužuje određeni mrežni rez. Tijekom vremenskih razdoblja kada aktivnost svih MIMO antenskih primopredajnika nije nužna zbog niskog ili nepostojećeg intenziteta prometa u određenom mrežnom rezu, određeni broj MIMO antenskih nizova može se isključiti (Slika 11), pod uvjetom da isključivanje antenskih elemenata neće utjecati na kvalitetu ukupnog korisničkog iskustva.



Slika 11: Koncept raspoređivanja aktivnosti elemenata antenskog niza u cilju uštede energije mreže [5], [22]

Uzimajući u obzir da 5G općenito koristi više antenskih nizova, posebno kada se koriste MU-MIMO i mMIMO tehnike prijenosa, moguće uštede energije u prostornoj domeni mogu biti značajne. Nakon isključivanja određenih primopredajnika koji predstavljaju kanalske odašiljače, doći će do smanjenja ukupne snage odašiljanja antene i posljedično do smanjenja potrošnje energije BS. Smanjena snaga odašiljanja se može kompenzirati povećanjem spektralne gustoće snage preostalih aktivnih primopredajnika MIMO antenskog niza kroz odašiljanje primjenom MIMO tehnike [23].



Slika 12: Dodjela elemenata BS antenskog niza određenim mrežnim rezovima: a) trajno; b) na temelju prostornog rasporeda elemenata antenskog niza koji će se dinamički dijeliti između mrežnih rezova [5]

Kako bi se omogućile daljnje uštede energije kroz implementaciju mrežnog rezanja, postoji mogućnost dodjele različitih MIMO antenskih nizova različitim mrežnim rezovima. Moguća konfiguracija takvog MIMO prijenosa u rezanoj 5G mreži se može vidjeti na Slici 12. Može se primijetiti da se u praksi mogu implementirati dva pristupa dodjeli mrežnih rezova MIMO antenskim nizovima. Prvi pristup temelji se na namjenskoj konfiguraciji s trajnijom dodjelom određenog skupa MIMO antenskih nizova za određeni mrežni rez (Slika 12a), dok drugi pristup obuhvaća mogućnost dinamičkog raspoređivanja različitih MIMO antenskih nizova između različitih mrežnih rezova (Slika 12b). Svaka od ovih opcija uključuje isključivanje određenih elemenata MIMO antenskih nizova dodijeljenih određenom mrežnom rezu, s ciljem smanjenja potrošnje energije BS te posljedično i mobilne mreže (Slika 12).

Praktična implementacija dinamičke dodjele mrežnih rezova između različitih elemenata antenskih nizova, uz mogućnost isključivanja određenih elemenata radi uštede energije, zahtijevat će nove pristupe i algoritme koji mogu podržati takve praktične implementacije. Međutim, primjena masivnih mMIMO antena u 5G mrežama s raspodjelom između različitih mrežnih rezova prema predloženim pristupima (na Slici 12), može dovesti do smanjenja potrošnje energije. Konvencionalna upotreba antena u mobilnim mrežama karakterizirana je emisijom signala u određenim sektorima (ćelijama) koji pokrivaju široko područje, što rezultira time da značajan postotak

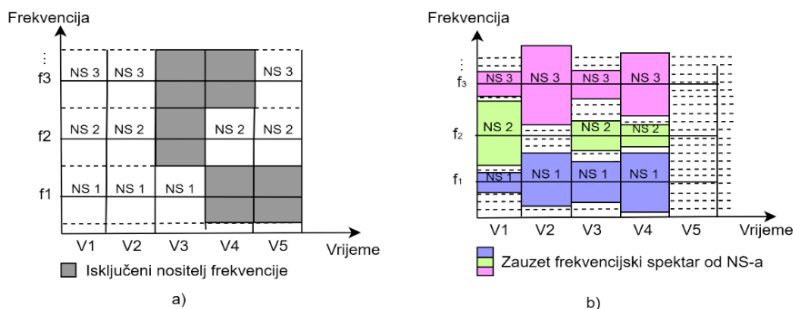
emitirane energije bežičnog signala ostaje neiskorišten. Predloženi pristup, temeljen na raspoređivanju mrežnih rezova između elemenata masivnih mMIMO antenskih nizova, omogućuje usmjeravanje elektromagnetskih valova izravno prema korisnicima određenih mrežnih rezova, čime se eliminira rasipanje energije koje je prisutno kod konvencionalnog MIMO prijenosa sa sektorskim (čelijskim) antenama. U kombinaciji s tehnikama koje podržavaju isključivanje određenih elemenata mMIMO antenskih nizova tijekom razdoblja niske prometne aktivnosti, mrežno rezanje može omogućiti značajne uštede u potrošnji energije 5G mreže.

3.3 Mogućnosti uštede energije u frekvencijskoj domeni u rezanom RAN dijelu mreže

Mogućnosti za poboljšanje energetske učinkovitosti rezane 5G RAN mreže postoje i u frekvencijskoj domeni. Dva pristupa u frekvencijskom domeni mogu doprinijeti povećanju uštede energije 5G mreža. Prvi pristup temelji se na potpunom isključivanju frekvencijskog 5G podnositelja signalizacijskih poruka, dok se drugi oslanja na smanjenje širine radnog frekvencijskog pojasa isključivanjem određenih frekvencijskih podnositelja. S obzirom na proširenje radnog frekvencijskog spektra 5G mreža do 6 GHz i mogućnost korištenja spektra milimetarskih valova (od 20 GHz do 30 GHz za 5G mreže), u cilju poboljšanja energetske učinkovitosti 5G mreža primjena koncepta raspoređivanja radiofrekvencijskih resursa između mrežnih rezova u frekvencijskom području može imati značajnu ulogu.

Ovo je posebno izraženo u područjima gdje dolazi do preklapanja signala 4G i 5G mreža [22]. U situacijama kada je promet u 5G mreži vrlo nizak i nije zahtjevan u smislu osiguravanja visokih prijenosnih brzina, korisnici se mogu preusmjeriti na 4G mrežu isključivanjem 5G signalnog nositelja putem odgovarajućeg sučelja. Kada nadzorni mehanizmi detektiraju porast aktivnosti tih korisnika ili povećanje zahtjeva za prometom, signalni nositelj u 5G mreži ponovno se uspostavlja putem nadzornih mehanizama kako bi se prilagodio potrebama korisnika i njihovim zahtjevima za prometom [23].

Predstavljeni pristup, koji je već implementiran u nove generacije 5G baznih postaja, može se proširiti na mrežno rezanje 5G mreže u cilju poboljšanja energetska učinkovitost istih. Na Slici 13 prikazana su dva pristupa dodjeli frekvencijskog spektra različitim mrežnim rezovima.



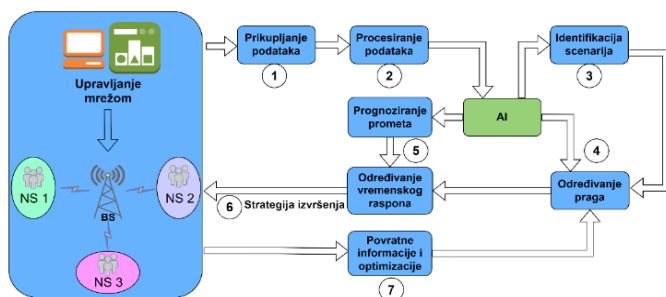
Slika 13: Dodjela frekvencijskog spektra različitim mrežnim rezovima: (a) trajna dodjela; (b) dodjela na temelju rasporeda resursa frekvencijskog spektra koji će se dijeliti između mrežnih rezova [5]

Na Slici 13a, frekvencije nositelja i raspoloživi frekvencijski spektar (širina pojasa) statički su dodijeljeni kroz VNF konfiguraciju baznih postaja određenom mrežnom rezu. U slučaju kada nema podatkovnog prometa u pojedinim mrežnim rezovima, frekvencijski nositelj tog mrežnog reza može se isključiti, zbog čega će primopredajnik bazne postaje raditi u energetski štedljivom načinu rada. Na Slici 13b, prikazana dodjela dinamičkog spektra (širina pojasa) nositelja frekvencije odgovarajućem mrežnom rezu izvodi se u skladu s ukupnom dostupnošću spektra frekvencija i trenutnim potrebama mrežnog reza za određenom širinom frekvencijskog pojasa. U prometnim situacijama kada mrežni rez zahtijeva manju širinu pojasa, dodjela smanjene širine pojasa bežičnog kanala kroz smanjenje korištenih podnosioca može doprinijeti uštedi energije baznih postaja koje opslužuju taj mrežni rez. Opisani modeli uštede energije mobilne mreže mogu biti realizirani primjenom algoritama umjetne inteligencije, koji su predstavljeni u sljedećem odjeljku rada.

3.4 Optimizacija energetske učinkovitosti RAN dijela mreže primjenom AI tehnologije

Moguće strategije za uštedu energije u rezanim 5G mrežama u vremenskim, prostornim i frekvencijskim domenama sukladno opisanom u prethodnim odjeljcima mogu se realizirati samo s naprednim strategijama upravljanja i orkestracije 5G RAN dijela mreže. Da bi se praktično realizirale takve strategije, primjena umjetne inteligencije (AI) pojavljuje se kao mogući važan pristup optimizaciji potrošnje energije mrežnih rezova u RAN dijelu mreže. Pregled općeg postupka provođenja strategije uštede energije u RAN dijelu mreže temeljen na primjeni tehnika umjetne inteligencije (AI) prikazan je na Slici 14 [23]. Postupak se sastoji od nekoliko faza od kojih je prva faza posvećena prikupljanju relevantnih podataka o karakterističnim radnim performansama RAN dijela mreže, čiji se resursi koriste za realizaciju određenog mrežnog reza

putem nadzornih mehanizama (Slika 14). Prikupljeni podatci se u sljedećoj fazi filtriraju i prilagođavaju formatu koji je primjenjiv za daljnju obradu. Takvi se podatci u 3. fazi šalju programima (softveru) koji koristi neki od modela i algoritama umjetne inteligencije (AI) za generiranje konfiguracijskih parametara za određeni mrežni rez, s ciljem optimizacije potrošnje energije mobilne mreže. Na temelju zadanih operativnih ciljeva koje je potrebno postići, u 4. fazi definiraju se vrijednosti KPI parametara koji karakteriziraju uštedu energije kao i pragovi koji određuju minimalne radne parametre za osiguranje QoS korisnicima (Slika 14). Nakon toga, u 5. fazi, koristeći povijesne podatke, AI predviđa vrstu i količinu prometa koji će se prenositi u određenom razdoblju mrežnim rezom, te određuje tehniku(e) uštede energije i vremenski okvir za njihovu primjenu. U 6. fazi, odabrana strategija uštede energije za određeni mrežni rez, koja može biti u vremenskoj, prostornoj ili frekvenciji domeni (ili njihovoj kombinaciji), se šalje kontrolnom sustavu kao virtualna mrežna funkcija (VNF) te se izvršava korištenjem tehnika SDN. Nakon implementacije odabrane strategije, u fazi 7. se prati rad mrežnog reza, u cilju procijene zadovoljavanja postavljenih ciljeva energetske učinkovitosti mreže kao i postizanje ciljeva koji se odnose na osiguranje radnih performansi pojedinog mrežnog reza. Ovaj postupak koji se temelji na primjeni AI za smanjenje potrošnje energije u RAN dijelu mreže, potrebno je implementirati u sustavu zatvorene petlje, koji uključuje stalne prilagodbe KPI parametara koji se odnose na energetska učinkovitost mreže kao i pragova radnih parametara za određeni mrežni rez (sukladno naznačenom u 4. fazi na Slici 14).



Slika 14: Procedura optimizacije potrošnje energije u RAN dijelu mreže s različitim mrežnim rezovima primjenom tehnika umjetne inteligencije [5], [23]

Važno je naglasiti da se različite AI metode mogu primijeniti zasebno na pojedine RAN podsustav svakog mrežnog reza u cilju optimalnog upravljanja mrežnim resursima koji doprinose smanjenju potrošnje energije. Također, optimizacija energetske učinkovitosti mreža primjenom AI tehnika može rezultirati prelaskom djela komponenata ili cijele BS u energijski štedljivi način rada, čak i onda kada resurse te BS koristi jedan li više mrežnih rezova.

3.5 Raspoređivanje resursa u mrežnom rezanju primjenom umjetne inteligencije

Glavni izazov u praktičnoj realizaciji opisanog općeg postupka provođenja strategije uštede energije primjenom AI je realizacija faza 5. i 6. Faza 5. se odnosi na predviđanje vrste i količine prometa koji će biti prisutan u mrežnom rezu za određeno vremensko razdoblje, dok u fazi 6. treba odabrati minimalne mrežne resurse koji će osigurati maksimalne uštede energije ali bez degradacije QoS za korisnike mrežnog reza. Ove tehnike predviđanja prometa i uštede energije izravno su povezane s dodjelom mrežnih resursa svakom mrežnom rezu, koje treba raspodijeliti (provizionirati) kako bi se osigurala odgovarajuća kvaliteta usluge (QoS) uz istovremeno minimiziranje potrošnje energije mrežnog reza i posljedično cijele mobilne mreže.

Kao primjer navode se rezultati predstavljeni u [24], u kojem autori proučavaju primjenu dva pristupa upravljanju virtualnim usmjerenicima (engl. *routers*) u realizaciji mrežnog rezanja. Prvi pristup se temelji na predviđanju lokalnog prometa samo na lokalnom znanju o prometnim profilima specifičnog mrežnog reza, dok se drugi pristup temelji na predviđanju globalnog prometa ali temeljem informacija o kompletnom dnevnom prometnom profilu mobilnog mrežnog operatora (MNO). Pokazano je da je metoda temeljena na globalnom predviđanju prometa postigla 35% bolje rezultate u pogledu smanjenja potrošnje energije i operativnih troškova MNO, u usporedbi s metodom predviđanja temeljenom na lokalnom prometu.

Problem odabira odgovarajućih mrežnih resursa pojavljuje se kada se rezervira više resursa za rad određenog mrežnog reza nego što je stvarno potrebno, što dovodi do većih troškova. S druge strane, ako se rezervira premalo resursa, to može uzrokovati degradaciju QoS i povećati troškove za MNO. Dosadašnji koncepti upravljanja su se uglavnom temeljili na usklađivanju odabranih mrežnih resursa potrebnih za izvršavanje virtualnih mrežnih funkcija (VNF) kroz reaktivan proces koji koristi pragove histereze kako bi se osiguralo učinkovito korištenje mrežnih resursa. Stoga je praktična primjena tehnologija AI u dodjeli mrežnih resursa između mrežnih rezova još uvijek u ranoj fazi.

Neki preliminarni rezultati koji se odnose na korištenje AI za optimizaciju raspodjele resursa među mrežnim rezovima prikazani su u radu [25], gdje autori predlažu algoritam raspodjele resursa primjenom modela duge kratkoročne memorije (engl. *long short-term memory* – LSTM) temeljen na AI. Funkcija troška (engl. *cost function*) predloženog algoritma uključuje kaznu za povećane mrežne troškove i uzima u obzir trošak dodjele mrežnih resursa te degradaciju QoS. U radu [25] je dodatno pokazano da je predloženi algoritam predviđanja u scenariju primjene mrežnog rezanja u mreži s četiri sučelja virtualnih mrežnih funkcija, doveo do poboljšanja troška u mreži od 40%. U radu [26] predložen je još jedan, proaktivan i automatiziran alat za analizu podataka koji optimizira korištenje mrežnih resursa među mrežnim rezovima. Razvi-

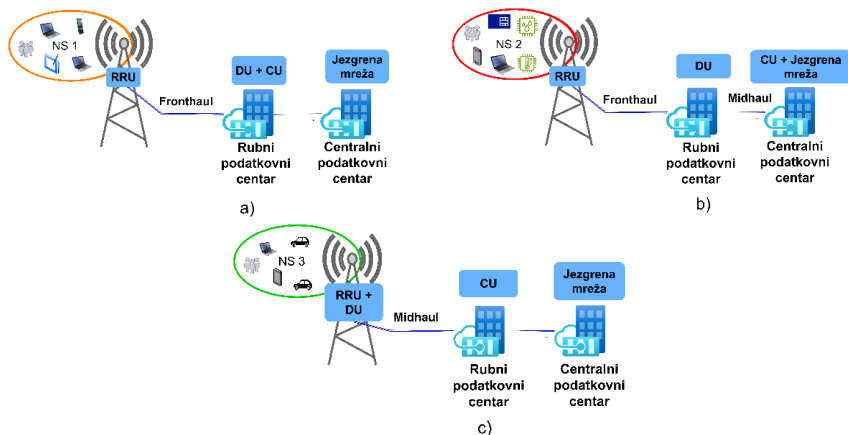
jeno rješenje se temelji na strojnom učenju koje iskorištava korelacije mobilnog prometa neovisno o prostoru i vremenu te pruža mobilnim mrežnim operatorima (MNO) informacije o kapacitetu potrebnom za zadovoljenje zahtjeva svakog mrežnog reza. Predloženo rješenje izračunava izlaze na razini podatkovnog centra putem prilagođene funkcije gubitka (engl. *loss function*), koja predviđa potrebe za kapacitetom i na taj način omogućuje MNO da smanji mogućnost prekomjernog ili premalog izdvajanja resursa za određeni mrežni rez.

Unatoč opisanim rezultatima, praktična primjena AI u raspodjeli mrežnih resursa između mrežnih rezova za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilne mreže još je u začecima. Postoji potreba za dodatnim istraživanjima koja će rezultirati razvojem novih algoritama i tehnika temeljenih na AI, a koje će omogućiti integraciju umjetne inteligencije za učinkovitu raspodjelu mrežnih resursa između mrežnih rezova, s ciljem optimizacije potrošnje energije mreže.

3.6 Raspored mrežnih elemenata za energetske učinkovito mrežno rezanje

Najnovije 5G arhitekture RAN dijela mreže karakterizira odvajanje BBU i RRH/U komponenata (jedinica) bazne postaje (BS). To znači da BBU i RRU/H jedinice mogu biti implementirane na različitim fizičkim lokacijama (sukladno prikazanom na primjerim sa Slike 15). Nadalje, 5G novi radio (NR) uvodi podijeljenu BBU arhitekturu, gdje je funkcionalnost BBU općenito podijeljena na dva funkcionalna entiteta koji tvore funkcije distribuirane jedinice (engl. *distributed unit* – DU) i centralizirane jedinice (engl. *centralized unit* – CU). U praksi, DU i CU jedinice ne moraju biti implementirane na istoj fizičkoj lokaciji (Slika 15). To znači da se BBU funkcionalnosti DU i CU jedinica mogu distribuirati ili implementirati u oblaku. Pri tome veza poznata kao “engl. *fronthaul*” omogućuje optičku vezu između DU i RRU/H, a veza poznata kao “engl. *midhaul*” predstavlja vez optičkih vlakana temeljena na paketima koja povezuje CU i DU u 5G RAN arhitekturi kada CU i DU jedinice nisu na istoj lokaciji (Slika 15).

S pojavom VNF i SDN kao glavnih koncepata za praktičnu realizaciju mrežnog rezanja, DU i CU kao BBU funkcionalnosti se mogu dijeliti između različitih mrežnih rezova. To može omogućiti preciznu dodjelu DU i CU resursa određenim mrežnim rezovima. Slika 15 prikazuje primjere neke od mogućih kombinacija implementacije RRU/H, DU i CU jedinica (komponenta) u RAN i jezgrenom dijelu mreže s jednom 5G baznom postajom koja pruža usluge određenom mrežnom rezu. S obzirom na energetske učinkovitost 5G rezane mreže, raspored ovih mrežnih komponenata ovisit će o vrsti prometa koji će se prenositi tom mrežom.



Slika 15: Arhitekture 5G mreže s mrežnim rezom a) prikladnim za pružanje usluga poboljšane mobilne širokopolasne povezanost (eMBB), b) prikladnim za pružanje usluge masivne komunikacije strojnog tipa (mMTC) i c) prikladnim za pružanje usluge komunikacije vozila prema svemu (V2X) [5]

U rezanim 5G mrežama, vrste prometa uglavnom su unaprijed poznate, budući da je promet određenog mrežnog reza koncentriran u tom mrežnom rezu i prenosi se kroz odgovarajuće resurse 5G mreže. Na primjer, za tipove usluga koje zahtijevaju mobilnu širokopolasnu povezanost (engl. *enhanced mobile broadband connectivity* – eMBB), masivnu komunikaciju strojnog tipa (engl. *massive machine-type communications* – mMTC) i komunikacije vozila prema svemu (engl. *vehicle-to-everything* – V2X), preporučene arhitekture mrežnog rezanja 5G mreže su one prikazane na Slici 15.

Budući da DU i CU komponente u novim BBU arhitekturama predstavljenim na Slici 15 mogu biti fizički odvojive i distribuirane, iste se mogu implementirati u rubne ili središnje podatkovne centre (engl. *edge or core data center* – DC). Ova implementacija BBU funkcionalnosti u podatkovnim centrima omogućuje virtualizaciju DU i CU funkcionalnosti po određenim mrežnim rezovima na virtualnim strojevima ili spremnicima (kontejnerima) podatkovnog centra (Slika 15). Takva dodjela virtualnih resursa podatkovnog centra (DC) za određenu BBU funkcionalnost i mogućnost brzog raspoređivanja ovih resursa za korištenje od strane različitih mrežnih rezova, otvara velike mogućnosti za poboljšanje energetske učinkovitosti BBU jedinica u usporedbi s dosadašnjim tradicionalnim BBU realizacijama temeljenim na fiksnoj alokaciji BBU jedinica unutar bazne postaje (BS). Također, implementacije DU i CU funkcija u rubnim ili centralnim podatkovnim centrima dodatno doprinose smanjenju potrošnje energije jer podatkovni centri implementiraju modele za optimizaciju energetske učinkovitosti. To čak može uključivati napajanje energijom podatkovnog centra iz obnovljivog izvora energije. Dodatno, moderne metode hlađenja opreme podatkovnog centra uglavnom se koriste za cijeli podatkovni centar. Stoga ovakav pristup alokacije DU i CU jedinica smanjuje troškove korištenja zasebnih rashladnih uređaja za klimatizaciju pojedinačnih BBU jedinica, što je karakteristično za makro

bazne postaje u tradicionalnim 5G (ne virtualiziranim) mrežama i mobilnim mrežama prethodnih generacija. Dodatne moguće uštede energije se mogu ostvariti kroz realizacija BBU elemenata (DU i CU) kao virtualnih mrežnih funkcija (VNF), što omogućuje brže izvršavanje potrebnih funkcija i stavljanje BBU elemenata u isključeno stanje kada ne obrađuju podatke i signalizaciju.

Fleksibilnost alokacija funkcija CU i DU u arhitekturama modernih 5G mreža prikazanih na Slici 15 omogućuju optimizaciju izvedbe mrežnih rezova kao i njihovu skalabilnost i jednostavnije upravljanje opterećenjem. Na primjer, sukladno Slici 15b, alociranje DU funkcija u rubni, a CU funkcija u centralni DC kod pružanja mMTC usluga koje se ne izvršavaju u stvarnom vremenu (engl. *real time*) i koje su procesorski intenzivne, omogućuje učinkovitije usmjeravanje prometa mrežnog reza i korištenje RAN resursa mreže. S druge strane, premještanjem funkcija CU i DU te samo CU jedinica bliže RRU/RRH jedinicama u slučaju upotrebe mreže s velikim zahtjevima za propusnost (kao na Slici 15a za eMBB), ili za slučaj osiguranja usluga s vrlo niskim kašnjenjem (kao na Slici 15c za V2X uslugu), može se postići značajno poboljšanje učinkovitosti obrade informacija. U usporedbi s klasičnim (tradicionalnim) arhitekturama 5G mreža, ovo poboljšanje učinkovitosti također će se odraziti na optimalniju potrošnju energije resursa mobilne mreže koji opslužuju pripadajuće mrežne rezove. Stoga, za poboljšanje energetske učinkovitosti 5G RAN dijela mreže kroz primjenu koncepta mrežnog rezanja, komponente BBU (DU i CU) moraju biti dodijeljene prema karakteristikama usluge mrežnog reza. Takva odgovarajuća dodjela BBU elemenata (DU i CU jedinica) i njihova primjerena alokacija u mreži može doprinijeti poboljšanju energetske učinkovitosti mobilnih mreža.

4. Zaključak

Rad pruža pregled različitih aspekata mrežnog rezanja 5G mreže s ciljem poboljšanja energetske učinkovitosti mobilnih mreža. Različiti slučajevi korištenja mrežnih rezova 5G mreže su predstavljeni i analizirani u smislu utjecaja na potrošnju energije mobilne mreže. Rad prezentira i ideje za buduća istraživanja o temama koje se odnose na poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mreža korištenjem koncepta mrežnog rezanja.

U radu je predložen niz različitih rješenja za razvoj novih tehnika i algoritama koji bi mogli utjecati na smanjenje potrošnje energije 5G mreža kroz implementaciju koncepta mrežnog rezanja. Predložena rješenja uključuju tehnike kao što je ograničavanje potrošnje energije mrežnih rezova od strane mobilnih mrežnih operatora (MNO), implementacija dinamičkih promjena u operativnim stanjima mrežnih rezova te raspodjela odgovarajućih mrežnih resursa u skladu s varijacijama mrežnog prometa. Dodatno, u radu je predstavljena opsežna analiza mogućnosti poboljšanja energetske učinkovitosti u RAN dijelu mreže primjenom mrežnog rezanja 5G mre-

že. Analizirane su implementacije metoda za poboljšanje energetske učinkovitosti mobilne mreže primjenom koncepta mrežnog rezanja kroz prilagodbe mrežnih resursa u vremenskoj, frekvencijskoj i prostornoj domeni. Rad također daje pregled mogućnosti upravljanja alokacijom resursa mreže između različitih mrežnih rezova primjenom modela umjetne inteligencije, s ciljem optimiziranja energetske učinkovitosti 5G RAN dijela mreže. Prezentirane su objavljene studije u kojima su korištene tehnike umjetne inteligencije za upravljanjem mrežnim rezanjem u cilju poboljšanja energetske učinkovitosti mobilne mreže. Na kraju rada, razrađen je utjecaj prostornog rasporeda BBU elemenata u podatkovnim centrima na poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mreže u slučaju implementacije mrežnog rezanja 5G mreže.

Pokazano je da koncept mrežnog rezanja analiziran u ovom radu može doprinijeti poboljšanju energetske učinkovitosti 5G mreže. Stoga poboljšanje energetske učinkovitosti 5G mreže primjenom jedne ili kombinacije analiziranih tehnika temeljenih na mrežnom rezanju, predstavlja područje sa značajnim istraživačkim potencijalom, koje može pridonijeti daljnjoj optimizaciji potrošnje energije energijski zahtjevnih 5G i budućih 6G mreža.

5. Literatura

- [1] Phyu, H. P.; Naboulsi, D.; Stanica, R.; Poitau, G.: Towards Energy Efficiency in RAN Network Slicing, *023 IEEE 48th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, 1-9, Daytona Beach, FL, USA, Listopad 2023, <https://doi.org/10.1109/LCN58197.2023.10223377>
- [2] Lorincz, J.; Bule, I.; Kapov, M.: Performance Analyses of Renewable and Fuel Power Supply Systems for Different Base Station Sites, *Energies*, **7** (2014) 12, 7816-7846, <https://doi.org/10.3390/en7127816>
- [3] Matthiesen, B.; Aydin, O.; Jorswieck, E. A.: Throughput and Energy-Efficient Network Slicing, *WSA 2018; 22nd International ITG Workshop on Smart Antennas*, 1-6, Bochum, Germany, ožujak 2018., <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.08922>
- [4] Tipantuña, C.; Hesselbach, X.: Adaptive Energy Management in 5G Network Slicing: Requirements, Architecture, and Strategies, *Energies*, **13** (2020) 15, 3984-4011, <https://doi.org/10.3390/en13153984>
- [5] Lorincz, J.; Kukuruzović, A.; Blažević, Z.: A Comprehensive Overview of Network Slicing for Improving the Energy Efficiency of Fifth-Generation Networks, *Sensors*, **24** (2024) 10, 3242-3276, <https://doi.org/10.3390/s24103242>
- [6] <https://commsbrief.com/5g-new-radio-what-is-5g-nr-technology-and-how-does-it-work/>, *Pristupljeno*: 2024-05-13
- [7] Su, S.; Zhang, Z.; Liu, A. X.; Cheng, X.; Wang, Y.; Zhao, X.: Energy-Aware Virtual Network Embedding, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, **22** (2014) 5, 1607-1620, <https://doi.org/10.1109/TNET.2013.2286156>

- [8] Botero, J. F.; Hesselbach, X.; Duelli, M.; Schlosser, D.; Fischer, A.; Meer, H. d.: Energy Efficient Virtual Network Embedding, *IEEE Communications Letters*, **16** (2012) 5, 756-759, <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2012.030912.120082>
- [9] Botero, J. F.; Hesselbach, X.: Greener networking in a network virtualization environment, *Computer Networks*, **57** (2013) 7, 2021-2039, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2013.04.004>
- [10] Li, X.; Samaka, M.; Chan, H. A.; Bhamare, D.; Gupta, L.; Guo, C.; Jain, R.: Network Slicing for 5G: Challenges and Opportunities, *IEEE Internet Computing*, **21** (2017) 5, 20-27, <https://doi.org/10.1109/MIC.2017.3481355>
- [11] Kazmi, S. M. A.; Khan, L. U.; Tran, N. H.; Hong, C. S.: *Network Slicing for 5G and Beyond Networks*, Springer Cham, 978-3-030-16170-5, (2019)
- [12] <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3144> , *Pristupljeno*: 2024-05-13
- [13] <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3550> , *Pristupljeno*: 2024-05-13
- [14] Telecommunication Engineering Centre, Ministry of Communications and Information Technology, Departments of Telecommunications, Government of India: Study Paper on Software Defined Networking (SDN) as a Tool for Energy Efficiency Approaches in Information and Communication Technology (ICT) Networks, *Dostupan na* <https://www.tec.gov.in/pdf/StudyPaper/Final%20SDN%20and%20energy%20efficiency%20approaches%20in%20SDN%20-%20Copy%20-%20Copy%20-%20Copy.pdf>, *Pristupljeno*: 2024-05-13
- [15] Lorincz, J.; Matijevic, T.; Petrovic, G.: On interdependence among transmit and consumed power of macro base station technologies, *Elsevier - Computer Communications*, **50** (2014), 10-28, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.02.010>
- [16] Lorincz, J.; Bogarelli, M.; Capone, A.; Begušić, D.: Heuristic approach for optimized energy savings in wireless access networks, *18th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks - SoftCOM 2010*, Split, Croatia, rujan 2010
- [17] <https://carrier.huawei.com/~media/CN BG/Downloads/Spotlight/5g/5G-Power-White-Paper-en.pdf>, *Pristupljeno*: 2024-05-13
- [18] <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3273>, *Pristupljeno*: 2024-05-13
- [19] Shurdi, O.; Ruci, L.; Biberaj, A.; Mesi, G.: 5G Energy Efficiency Overview, *European Scientific Journal*, **17** (2021) 3, 315-328, <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n3p315>
- [20] Lorincz, J.; Capone, A.; Begusic, D.: Heuristic Algorithms for Optimization of Energy Consumption in Wireless Access Networks, *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, **5** (2011) 4, 626-648, <https://doi.org/10.3837/tiis.2011.04.001>
- [21] Lorincz, J.; Bule, I.: Renewable Energy Sources for Power Supply of Base Station Sites, *International Journal of Business Data Communications and Networking*, **9** (2012) 3, 53-74, <https://doi.org/10.4018/jbdcn.2013070104>
- [22] Tan, R.; Shi, Y.; Fan, Y.; Zhu, W.; Wu, T.: Energy Saving Technologies and Best Practices for 5G Radio Access Network, *IEEE Access*, **10** (2022), 51747-51756, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174089>

- [23] <https://www.itu.int/md/T17-SG05-210511-TD-GEN-1865>, *Pristupljeno*: 2024-05-13
- [24] Eramo, V.; Miucci, E.; Ammar, M.: Study of Reconfiguration Cost and Energy Aware VNE Policies in Cycle-Stationary Traffic Scenarios, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **34** (2016) 5, 1281-1297, <https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2520179>
- [25] Eramo, V.; Lavacca, F. G.; Catena, T.; Salazar, P. J. P.: Application of a Long Short Term Memory neural predictor with asymmetric loss function for the resource allocation in NFV network architectures, *Computer Networks*, **193** (2021), 108104-108116, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108104>
- [26] Bega, D.; Gramaglia, M.; Fiore, M.; Banchs, A.; Costa-Pérez, X.: DeepCog: Optimizing Resource Provisioning in Network Slicing With AI-Based Capacity Forecasting, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **38** (2020) 2, 361-376, <https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2959245>

Parametarska analiza temeljenja pučinskih vjetroelektrana na sjevernom Jadranu primjenom sustava monopilota

Mario Bačić¹, Leon Kučinić², Meho Saša Kovačević¹

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, fra Andrije Kačića Miošića 26, Zagreb

²Infraplan Consulting, Nova cesta 109, Zagreb

Sažetak: U skladu s globalnim trendovima, gdje se izgradnja vjetroelektrana u velikoj mjeri premješta s kopna na pučinu, ovaj rad istražuje mogućnosti temeljenja vjetroelektrana na području sjevernog Jadrana, s fokusom na primjenu monopilota kao odabranog sustava dubokog temeljenja. Za odabranu lokaciju izračunat će se karakteristična opterećenja uzrokovana vlastitom težinom, vjetrom i valovima, dok će se geotehnički profil tla formirati na temelju rezultata istražnog bušenja, laboratorijskih ispitivanja i CPT ispitivanja, provedenih na lokaciji plinske platforme. Rezultati analize obuhvaćaju procjenu vertikalnih i bočnih pomaka, momenata savijanja te posmičnih sila monopilota. Ova analiza omogućit će evaluaciju odgovora vjetroturbina na različita opterećenja i uvjete tla, uz identifikaciju ključnih parametara tla koji najviše utječu na ponašanje monopilota kao izabranog sustava temeljenja. Navedena analiza ujedno će ilustrirati jednu od ključnih uloga geotehnike u podršci energetske tranziciji, posebno kroz razvoj održivih i pouzdanih sustava temeljenja za konstrukcije obnovljivih izvora energije.

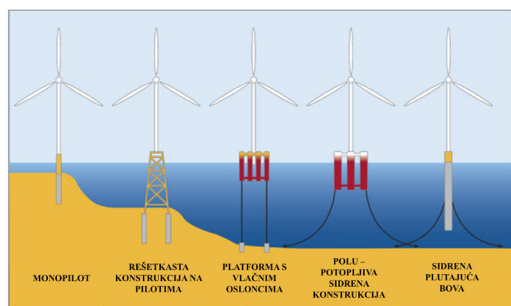
Ključne riječi: pučinska vjetroelektrana, temeljenje, monopilot, sjeverni Jadran

1. Uvod

Građevinarstvo ima važnu ulogu u energetske tranziciji, procesu koji ima za cilj smanjenje emisije stakleničkih plinova, povećanje energetske učinkovitosti i postizanje održivijeg razvoja društva. Među infrastrukturnim projektima koji doprinose ostvarivanju ovih ciljeva, vjetroelektrane zauzimaju značajno mjesto. One se mogu graditi na kopnu, ali i na moru, gdje prednosti vjetra čine pučinske vjetroelektrane vrlo učinkovitim rješenjem. Postojani vjetrovi na moru, uz mogućnost instaliranja većih vjetroturbina, smanjuju potrebu za opsežnom kopnenom infrastrukturom i mini-

miziraju negativan utjecaj na okoliš [1]. Energija vjetra s mora nudi nekoliko ključnih prednosti u odnosu na konvencionalne izvore energije. Za razliku od fosilnih goriva, energija vjetra je obnovljiva, neiscrpna i ekološki prihvatljiva. Osim toga, pučinske vjetroelektrane imaju veći kapacitet i manju varijabilnost u proizvodnji energije u odnosu na druge oblike obnovljivih izvora, što ih čini konkurentnim alternativama tradicionalnim izvorima energije. Globalni potencijal energije vjetra na moru je ogroman, s procjenama koje sugeriraju da bi mogao zadovoljiti čak 35 % svih svjetskih energetske potrebe [2]. S obzirom na rast tržišta pučinske energije vjetra od 13 % godišnje, predviđa se da će do 2040. godine ova industrija dostići vrijednost od 1 trilijun dolara [3], što zahtijeva velika ulaganja.

Pučinske vjetroturbine (engl. *Offshore Wind Turbine*, OWT) predstavljaju složene sustave koji se sastoje od nekoliko ključnih komponenata, koje zajedno omogućuju pretvorbu energije vjetra u električnu energiju. Osnovni dijelovi uključuju temeljeni sustav, toranj koji se uzdiže iznad razine mora, kućište na vrhu tornja u kojem se nalaze ključni elementi poput glavne osovine, prijenosnika i generatora koji pretvaraju kinetičku energiju vjetra u električnu energiju te glavčine s lopaticama. Pučinske vjetroturbine se razlikuju od onih na kopnu, prvenstveno u dizajnu te izazovima tijekom izvedbe i tijekom rada. Naime, pučinske vjetroturbine su obično veće, a njihova ugradnja je složenija zbog potrebe da se učvrste na morskom dnu ili da se koriste plutajuće platforme, ovisno o dubini vode. Također, ove vjetroturbine moraju podnijeti teže uvjete na moru, uključujući jake struje i valove, što čini temelje bitnim dijelom ukupnih troškova, prema nekim izvorima gotovo trećinu cijelog projekta pučinskih vjetroturbina [4]. Postoji nekoliko opcija za temeljenje pučinskih vjetroturbina, koje se mogu podijeliti u dvije glavne kategorije: sustave s fiksnim potporama (kao što su pilot i četveronožno rešetkasto sidrište) i plutajuće sustave (poput platformi s napetim nogama, šupljih bova i polupotopljivih platformi). Ovi sustavi pričvršćuju vjetroturbine za morsko dno, kao što je prikazano na Slici 1.



Slika 1: Vrste temeljenja pučinske vjetroturbine, modificirano iz [5]

Ovaj rad analizira sustav fiksnog temeljenja korištenjem monopilota. Piloti su vrsta dubokih temelja koji se buše ili zabijaju u tlo kako bi prenijeli opterećenje na dublje slojeve tla, te koji prenose opterećenje trenjem po plaštu ili otpornosti na bazi pilota. Monopiloti su cjevasti piloti većeg promjera koji se zabijaju u morsko dno kako bi osigurali stabilnost vjetroturbine. Tipični promjeri pilota kreću se od 3 do 7 metara, dok veće varijante, tzv. XL piloti, mogu doseći promjer i do 10 metara. Debljina stijenke pilota može biti do 150 mm, ovisno o projektnim zahtjevima. Dubina zabijanja u morsko dno varira ovisno o opterećenju i karakteristikama temeljnog tla. Čelična cijev kao prijelazni dio, spaja monopilot s tornjem vjetroturbine. Monopiloti se obično koriste u morima dubine od 30 do 35 metara, iako se mogu prilagoditi za veće dubine, čak do 60 metara, ovisno o specifičnostima projekta [6, 7]. Iako se smatra da će XXL monopiloti dosegnuti dubine i do 100 m, važno je posvetiti posebnu pažnju problemima poput izbočavanja vrha monopilota, rukovanja monopilotima, transporta i skladištenja, što može povećati troškove. Rešetkaste konstrukcije na više pilota manjeg promjera su trenutno najfleksibilniji tip temeljenja za srednje dubine (50-80 metara), dok plutajuće platforme postaju konkurentne u tim dubinama, a također su trenutno prvi izbor za dublja mora (> 90 metara). Jednostavnost u projektiranju, izradi i ugradnji, u kombinaciji s visokom učinkovitošću, čine monopilote preferiranim izborom za većinu projekata pučinskih vjetroelektrana, pa čak 60 % svih vjetroelektrana na svijetu koristi ovaj tip temeljenja [8], Slika 2.

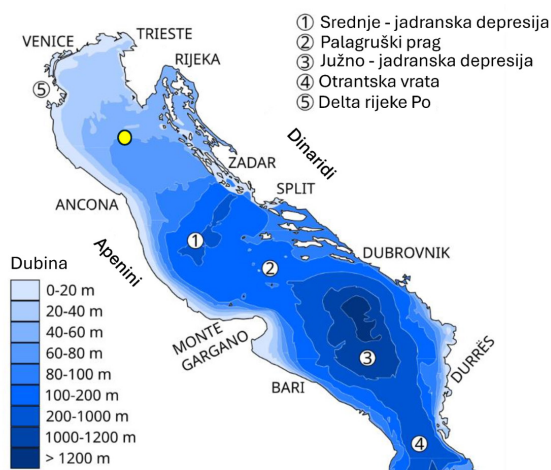


Slika 2: XL monopilot za temeljenje vjetroturbine [9] te neki primjeri izvedbe monopilota [10, 11]

Pri tome treba naglasiti da je Republika Hrvatske zabranila izgradnju kopnenih vjetroturbina na hrvatskim otocima općenito, kao i na kopnu u području unutar 1000 m od Jadranske obale (*Odluka o uređenju i zaštiti zaštićenog obalnog morskog područja* iz 2004. godine), što je još jedna motivacija za analizu pučinskih vjetroelektrana u hrvatskom dijelu Jadranskog mora [12]. Ovaj rad kroz analize osjetljivosti ispituje utjecaj parametara tla na ponašanje odabranog temelja monopilota, uzimajući u obzir karakteristična opterećenja koja djeluju na temelje vjetroturbina. Fokus je na specifičnoj lokaciji na sjevernom Jadranu, gdje se razmatraju geotehničke značajke tla koje mogu utjecati na učinkovitost temeljenja. Kroz provedene analize, identificiraju se ključni faktori koji imaju najveći utjecaj na pomake i rezne sile monopilota pod različitim uvjetima opterećenja.

2. Geološki i geotehnički uvjeti odabrane lokacije sjevernog Jadrana

U ovom poglavlju bit će predstavljeni rezultati geotehničkih istražnih radova provedeni na području eksploatacijskog polja plinske platforme Ika-C [13]. Ovi istražni radovi dio su šire kampanje koja obuhvaća veći dio sjevernog Jadrana, a lokalitet Ika-C predstavlja najjužnije ispitivano područje. Dubina mora na mjestu izvođenja istražnih radova iznosi oko 60 m, Slika 3, što se smatra prikladnom dubinom za efikasnu ugradnju monopilota kao sustava temeljenja prema trenutačnim tehnološkim mogućnostima. Važno je napomenuti da napredak tehnologije omogućava izvedbu monopilota i na većim dubinama od navedene.



Slika 3: Prikaz izobata Jadranskog mora, modificirano iz [14], s lokacijom plinske platforme Ika-C

2.1 Opća geologija područja

Lokacija Ika-C nalazi se u sjevernom Jadranskom moru, koje je poluzatvoreni, plitki bazen. Jadransko more ima duguljast i uski oblik, koji se prostire od sjeverozapada prema jugoistoku, a u njegovim sjevernim i središnjim dijelovima karakterizira ga vrlo blag nagib, što ga čini relativno ravnim. Nasuprot tome, južni Jadran ima strmiji nagib. Sjeverni Jadran može se smatrati podvodnim nastavkom Padske nizine, gdje su tijekom milijuna godina, posebno tijekom pliocenske epohe, taloženi pješčani i glinoviti sedimenti. Ovi sedimenti uglavnom potiču od erozije Alpa i Apenina, pri čemu rijeka Po ima glavnu ulogu u doprinosu materijala.

Tijekom kvartarne epohe, oscilacije razine mora, osobito u glacijalnim razdobljima, dovele su do značajnih promjena u obliku jadranske obale. Posljednja glacijacija, prije oko 18.000 godina, uzrokovala je pad razine mora za 120 metara, čime je veliki dio morskog dna bio izložen. S topljenjem ledenjaka, podizanje razine mora, poznato kao flandrijska transgresija, preplavilo je prethodno izloženo kopno, taložeći tanki sloj morskih sedimenata na starijim aluvijalnim naslagama.

2.2 Geološko – geotehnički profil tla

Na samom području plinske platforme Ika-C istražni radovi su provedeni na dvije mikrolokacije, Ika-C_CPT1 i Ika-C_BH1. Na lokaciji Ika C_CPT1 provedeno je ispitivanje statičkim prodiranjem (engl. *Cone Penetration Test*, CPT) do dubine od 30 metara ispod morskog dna, dok je na lokaciji Ika C_BH1 provedeno istražno bušenje s kontinuiranim uzorkovanjem do dubine 30 metara ispod morskog dna, a od 30 do 120 metara je naizmjenično provedeno istražno bušenje s uzorkovanjem i ispitivanje statičkim prodiranjem [13]. Istražna bušenja i statičko prodiranje su poželjni istražni radovi za projektiranje vjetroturbina na moru jer omogućuju precizno razumijevanje karakteristika tla na morskom dnu, što je ključno za evaluaciju mehaničke otpornosti i stabilnosti temelja vjetroturbina. Istražna bušenja omogućuju uzorkovanje i laboratorijsku analizu tla na različitim dubinama, dok CPT pruža informacije o svojstvima tla kroz kontinuirano mjerenje otpora pri penetraciji, što pomaže u procjeni čvrstoće i deformabilnosti tla. Profil tla na lokaciji istraživanja je prikazan u Tablici 1, zajedno s rasponima dubine za svaki sloj. Ovi podaci omogućuju bolje razumijevanje geoloških i geotehničkih uvjeta na lokaciji istraživanja.

Tablica 1: Opis slojeva tla s pripadajućim dubinama [13]

Sloj	Opis tla	vrh (m)	dno (m)
I	Rahli do srednje zbijeni vapnenački silicijski fini pijesak	0	1,2
II	Čvrsta do kruta vapnenačka glina s primjesama praha	1,2	4,5
III	Rahli do srednje zbijeni vapnenački silicijski prah	4,5	8,7
IV	Srednje zbijeni do zbijeni silicijski fini do srednji pijesak	8,7	43
V	Srednje zbijeni do zbijeni tamni vapnenački silicijski pjeskoviti prah do fini pjeskoviti pijesak, s glinom	43	61,35
VI	Vrlo krut vapnenački ilovasti prah do ilovasta glina sa slojevima finog pijeska	61,35	90,7
VII	Srednje zbijeni do zbijeni vapnenački silicijski fini do srednji pijesak	90,7	120,0 ¹

¹ dno bušotine, ne nužno i dno sloja

Na temelju rezultata istražnih radova, definirani su ključni parametri tla, čiji se opširan pregled i detaljna objašnjenja mogu pronaći u literaturi [13]. U ovom radu, u Tablici 2, prikazani su samo parametri čvrstoće i indikatori relativne zbijenosti, koji će biti korišteni u analizi osjetljivosti. Ovi parametri odabrani su jer predstavljaju osnovne ulazne vrijednosti za primjenu specifičnih modela tla, koji će omogućiti preciznu procjenu ponašanja tla pod opterećenjem, te time pomoći u optimizaciji temelja vjetroturbin.

Tablica 2: Preporučeni parametri čvrstoće tla i relativne zbijenosti, modificirano iz [13]

Sloj	Raspon (m)	q_t^1 (MPa)	S_u^1 LE ² (kPa)	S_u^1 BE ² (kPa)	S_u^1 UE ² (kPa)	S_t^1 (-)	D_r^1 LE ² (%)	D_r^1 BE ² (%)	D_r^1 UE ² (%)	Φ'^1 (°)
I	0,0 - 0,9	1	-	-	-	-	25	30	35	31
	0,9 - 1,2	4	-	-	-	-				
II	1,2 - 4,5	1	20	45	70	1,3	-	-	-	-
III	4,5 - 6,0	3	-	-	-	-	-	30	35	25
	6,0 - 6,7	2,5	40	60	80	1,3	25			
	6,7 - 7,0	2,5	-	-	-	-	-			
	7,0 - 8,7	3	-	-	-	-	17	22	27	31
IV	8,7 - 24	10	-	-	-	-	35	45	55	33,5
	24 - 27,6	8	40	70	100	2	30	40	50	30
	27,6 - 34	20	-	-	-	-	42	50	58	33,5
	34 - 43	15	-	-	-	-				
V	43 - 57	25	-	-	-	-	40	55	70	25
	57 - 61,4	25	-	-	-	-	25	30	35	
VI	61,4 - 66	4	70	110	140	2	-	-	-	-
	66 - 76	4	100	145	190		-	-	-	-
	76 - 91	4	100	145	190		-	-	-	-
VII	91 - 106	40	-	-	-	-	55	65	75	35
	106 - 118	30	-	-	-	-	50	60	70	33,5
	118 - 120	30	-	-	-	-	50	60	70	33,5

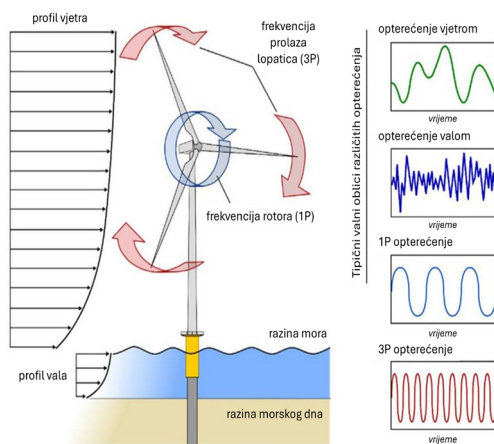
¹ q_t – otpor šiljka CPT-a; S_u – nedrenirana čvrstoća tla; S_t – osjetljivost tla; D_r – relativna zbijenost;

Φ' – efektivni kut trenja tla

² UE – upper estimate, tj. gornja granica procjene; BE – best estimate, tj. najbolja procjena; LE – lower estimate, tj. donja granica procjene

3. Analiza opterećenja na odabranoj lokaciji

Monopiloti pučinskih vjetroturbina prvenstveno se projektiraju da se odupru značajnim silama koje nastaju zbog okolišnih i radnih opterećenja. Jedna od ključnih sila kojima se piloti moraju oduprijeti je moment prevrtanja, koji se javlja zbog dvije glavne komponente: potiska koji djeluje na razini glavčine i opterećenja valova na donju konstrukciju, kao što je prikazano na Slici 4. Osim navedenih, treba spomenuti i 1P te 2P/3P opterećenja koja se odnose na harmonike rotacije rotora, koji uzrokuju oscilacije i vibracije konstrukcije turbine.



Slika 4: Tipovi opterećenja kod pučinskih vjetroturbina, modificirano iz [15]

Potisak vjetra na lopaticama i tornju turbine generira bočnu silu koja, u kombinaciji s visinom turbine, stvara značajan destabilizirajući moment prevrtanja na temelj vjetroturbine. Sile valova dodatno doprinose ovom momentu prevrtanja, osobito kada valovi udaraju u donji dio konstrukcije, stvarajući bočnu silu kojoj se monopilot mora oduprijeti. Osim toga, bočna opterećenja od vjetra i valova uzrokuju velike momente savijanja u samom monopilotu. Pučinske vjetroturbine izložene su oko 10 milijuna ciklusa opterećenja tijekom svog radnog vijeka. Ova dugotrajna ciklička opterećenja mogu uzrokovati promjene u krutosti monopilota i temeljnog tla, što potencijalno može utjecati na prirodnu frekvenciju sustava vjetroturbina-monopilot-tlo. Dugoročno cikličko bočno opterećenje, osobito u uvjetima visokog broja ciklusa opterećenja, može dovesti do većeg progiba i rotacije glave monopilota nego što je prvobitno predviđeno. Ovim radom su provedene preliminarne analize koje ne obuhvaćaju cikličko opterećenje, te je potrebno daljnje istraživanje bočnog odgovora monopilota u cikličkim uvjetima kako bi se bolje razumjelo i predvidjelo njihovo dugoročno ponašanje.

3.1 Ulazni parametri vjetroturbine i monopilota

Za potrebe analize opterećenja, odabrana je vjetroturbina nazivne snage od 3,6 MW, promjera rotora 120 m i površine rotora 11.300 m² (odgovara karakteristikama turbine *Siemens SWT-3.6-120 Offshore*). Počinje s radom pri 3,5 m/s, dok je brzina isključivanja 25 m/s. Nazivna brzina vjetra korištena u analizama je 12 m/s. Za proračun vlastite težine konstrukcije korišteni su ključni geometrijski i materijalni parametri tornja i RNA sklopa (engl. *Rotor-Nacelle Assembly* – sklop koji obuhvaća rotor, gondolu i pripadajuće komponente odgovorne za pretvorbu kinetičke energije vjetra u električnu energiju). Visina glavčine iznosi 87 m. Toranj ima promjer od 3 m na vrhu i 5 m na dnu te debljinu stijenke od 27 mm. Odabrani promjer čeličnog monopilota je 6 m, s debljinom stijenke od 120 mm.

Važan aspekt ovog rada predstavlja i sama dubina mora koja će se uvažiti u daljnjim analizama. Naime, istražni radovi su provedeni na lokaciji gdje je dubina mora 60 m. Analizirajući više lokacija na Jadranskom moru kao potencijalnih zona izvedbe pučinskih vjetroelektrana, Liščić i dr. [12] zaključuju da je optimalna lokacija za priobalnu vjetroelektranu s fiksnim sustavom temeljenja otvoreno more ispred grada Pule i otoka Malog Lošinja (udaljenost od cca 60 km zračne linije od lokacije plinske platforme Ika-C), gdje je, prema Slici 3, dubina mora oko 40 m. Stoga se i ova dubina mora obuhvatila analizama, koristeći isti profil tla kao i na lokaciji provedbe istražnih radova. Konačno, u ovom radu se analizira monopilot ukupne duljine 80 m, od čega je 40 m dio od površine mora do morskog dna, a 40 m je dio koji se zabija u tlo, odnosno monopilot ukupne duljine 120 m, od čega je 60 m dio od površine mora do morskog dna, a 60 m je dio koji se zabija u tlo. Za napomenuti je da je prikazana analiza opterećenja preliminarnog karaktera, provedena u cilju identifikacije relevantnih opterećenja i njihovih okvirnih vrijednosti.

3.2 Kombinacije opterećenja

Kako bi se procijenilo ponašanje temelja vjetroturbine pod različitim uvjetima, radom se analiziraju dvije ključne kombinacije okolišnih opterećenja. Scenarij E-1 predstavlja normalne operativne uvjete, uz vjetar s normalnom turbulencijom (NTM) pri nazivnoj brzini i valne uvjete s jednogodišnjom značajnom visinom valova (ESS). Scenarij E-2 prikazuje ekstremni valni scenarij, gdje se koristi ekstremni model turbulencije (ETM) pri istoj nazivnoj brzini, uz maksimalnu valnu visinu s pedesetogodišnjim povratnim periodom (EWH). Modeli vjetra sastoje se od statičke komponente, koja uglavnom odgovara nazivnoj brzini, i dinamičke komponente, koja uključuje utjecaj turbulencije te varira ovisno o tome je li primijenjen model normalne (NTM) ili ekstremne turbulencije (ETM). Modeli valova definirani su prema povratnom periodu i intenzitetu, pri čemu se analiziraju jednogodišnja značajna visina valova (ESS) i pedesetogodišnja maksimalna valna visina (EWH). Ove kombinacije omogućuju analizu ponašanja temelja u uvjetima od standardnog rada do ekstremnih opterećenja.

3.3 Opterećenje od vlastite težine

Toranj je izrađen od čelika, s ukupnom masom od 250 t, dok masa RNA sklopa iznosi 243 t. Ukupna sila težine konstrukcije na vrhu monopilota iznosi 4,84 MN.

3.4 Opterećenje od vjetra

Opterećenje od vjetra predstavlja horizontalnu silu koja djeluje na vjetroturbinu s hvatištem u središtu rotora. Računa se prema jednadžbi:

$$T_h = \frac{1}{2} \times C_t \times \rho_a \times A \times U^2 \quad (1)$$

gdje je T_h sila vjetra [N], C_t koeficijent otpora [–], ρ_a gustoća zraka [kg/m^3], A površina rotora [m^2], a U brzina vjetra [m/s].

Koeficijent otpora C_t ovisi o brzini vjetra u odnosu na nazivnu brzinu (U_R). Za brzine do nazivnog režima koristi se Froebhese – Schmuck izraz:

$$C_t = \frac{3,5 \times (2U_R + 3,5)}{U_R^2} \quad (2)$$

dok za brzine iznad nazivne vrijedi:

$$C_t = \frac{7 \times U_R^2}{U^3} \quad (3)$$

Kako C_t opada pri većim brzinama, konzervativniji pristup uključuje Froebhese-Schmuck izraz jer rezultira većim silama vjetra.

Brzina vjetra sastoji se od statičke i dinamičke komponente. Statička komponenta obično odgovara nazivnoj brzini turbine, dok dinamička uključuje utjecaj turbulencije. Brzina na visini glavčine računa se pomoću zakona profila vjetra:

$$U(z) = U_{ref} \times \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{0,1} \quad (4)$$

pri čemu je U_{ref} srednja godišnja brzina vjetra na referentnoj visini z_{ref} od 10 m. U proračunu su korištene vrijednosti iz DHMZ-ovog Atlasa brzine vjetra za zadanu lokaciju [16].

Za izračun turbulentne komponente brzine u NTM (engl. *Normal Turbulence Model* – model normalne turbulencije) scenariju koriste se izrazi:

$$\sigma_{u,NTM} = I_{ref}(0,75 U_r + b) \quad (5)$$

$$u_{NTM} = 1,28 \times \sigma_{u,NTM} \quad (6)$$

gdje je $\sigma_{u,NTM}$ standardna devijacija turbulentne komponente brzine vjetra u NTM scenariju [m/s], I_{ref} je referentni intenzitet turbulencije, b je konstanta [5,6 m/s], dok je u_{NTM} dinamička komponenta brzine vjetra za normalni model turbulencije [m/s].

Za ETM (engl. *Extreme Turbulence Model* – model ekstremne turbulencije) scenarij, turbulentna komponenta brzine računa se prema izrazu:

$$\sigma_{u,ETM} = c I_{ref} [0,072 (\frac{U_{avg}}{C} + 3) (\frac{U_R}{C} - 4) + 10] \quad (7)$$

$$u_{ETM} = 2 \times \sigma_{u,ETM} \quad (8)$$

gdje je $\sigma_{u,ETM}$ standardna devijacija turbulentne komponente brzine vjetra u ETM scenariju [m/s], a c je konstanta [2 m/s].

Ukupna brzina vjetra kombinira statičku i dinamičku komponentu. Statička vrijednost za oba scenarija iznosi 12 m/s, dok su konačne ukupne brzine 13,87 m/s za U-1 (NTM) i 18,09 m/s za U-2 (ETM). U Tablici 3 su dane konačne izračunate vrijednosti opterećenja od vjetra za oba scenarija te za dubine mora od 40 m i 60 m.

Tablica 3: Opterećenje od vjetra za analizirane scenarije

moment od vjetra [MNm]		
Dubina mora \ Scenarij	40 m	60 m
E-1	87,72	105,81
E-2	150,00	180,94

3.5 Opterećenje od valova

Opterećenje od valova na temelje vjetroturbine procjenjuje se pomoću Morison-ove jednadžbe, koja ukupnu silu prikazuje kao zbroj sile otpora i inercijske sile. Sila otpora proporcionalna je kvadratu brzine čestica vode, dok inercijska sila ovisi o ubrzanju čestica. Za izračun brzine i ubrzanja koristi se Airy-jeva linearna teorija valova, koja omogućuje aproksimaciju kretanja čestica pod utjecajem valova.

Brzina čestica vode određuje se izrazom:

$$u(z,t) = \frac{H_m}{2} \omega^2 \frac{\cosh(k(S+z))}{\sinh(kS)} \cos(\omega t) \quad (9)$$

dok ubrzanje čestica iznosi:

$$a(z,t) = -\frac{H_m}{2} \omega^2 \frac{\cosh(k(S+z))}{\sinh(kS)} \sin(\omega t) \quad (10)$$

gdje su H_m visina vala [m], ω kutna frekvencija [rad/s], k valni broj [1/m], S dubina vode [m], z visina iznad dna [m] i t vrijeme [s]. Budući da maksimalne vrijednosti sile otpora i inercijske sile ne nastupaju istovremeno, konzervativni pristup uključuje uzimanje njihovih najvećih vrijednosti za procjenu ukupnog opterećenja od valova.

Za određivanje opterećenja od valova korištena su mjerenja s platforme *Copernicus Climate Data Store* [17] za zadanu lokaciju, analizirana metodom prekoračenja praga i primjenom log-normalne distribucije. Na temelju tih podataka određena je 1-godišnja značajna valna visina (2,868 m) i 50-godišnja maksimalna valna visina (7,181 m).

Proračun je proveden primjenom diskretizacije pilota na segmente od 0,5 m, uz izračun sila za svaki segment pomoću Morison-ove jednadžbe. Parametri valova, kao što su kutna frekvencija, valna duljina i valni broj, izračunati su standardnim hidrauličkim formulama za idealne valove. Rezultati pokazuju da ukupne sile valova i pripadni momenti variraju ovisno o analiziranom scenariju. U Tablici 4 su dane konačne izračunate vrijednosti opterećenja od valova za oba scenarija te za dubine mora od 40 m i 60 m.

Tablica 4: Opterećenje od valova za analizirane scenarije

moment od valova [MNm]		
Scenarij \ Dubina mora	40 m	60 m
E-1	28,96	45,87
E-2	74,23	118,81

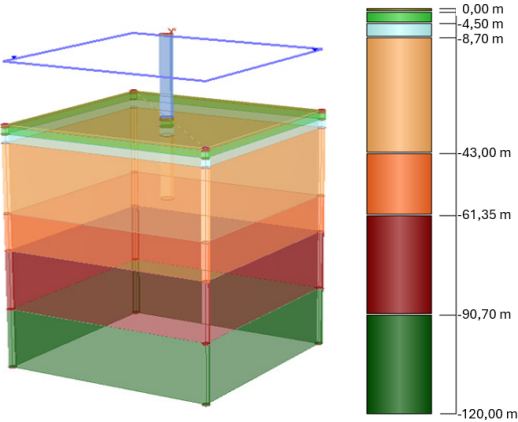
4. Analize osjetljivosti ponašanja monopilota

Cilj ove analize osjetljivosti je evaluirati utjecaj odabranih parametara tla na ponašanje temelja pod identificiranim karakterističnim opterećenjima, pri čemu će se analizirati vertikalni i bočni pomaci, moment savijanja i posmična sila. Parametri tla koji će se varirati uključuju kut trenja za nekoherentne materijale i nedreniranu posmičnu čvrstoću za koherentne materijale, koristeći konstitucijske modele API SAND i API CLAY za analize uzdužnog opterećenja te standardni model pijeska i potopljene krute gline (engl. *Submerged Stiff Clay*) za analize bočnog opterećenja. Sistematskom analizom ovih varijacija nastoje se identificirati ključni faktori koji najviše utječu na ponašanje monopilota. Za analizu se koristi računalni program *RS Pile*, specijaliziran za proračune ponašanja pilota u različitim uvjetima tla. *RS Pile* omogućava modeliranje i procjenu ponašanja temelja putem metoda t - z i p - y krivulja. t - z krivulje primjenjuju se za simulaciju osnovog ponašanja pilota, pri čemu se razmatra otpor tla duž cijele duljine pilota, omogućujući preciznu procjenu prijenosa opterećenja i identifikaciju zona s povećanom koncentracijom naprezanja. S druge strane, p - y krivulje, se koriste za modeliranje bočnog ponašanja pilota na horizontalna opterećenja poput vjetra i valova. Ove krivulje omogućuju simulaciju ponašanja konstrukcije u smislu savijanja i pomaka u uvjetima horizontalnog opterećenja, pri čemu se uzima u obzir nelinearna otpornost tla kroz dubinu, kao što je detaljno opisano u teoriji p - y krivulja [18].

Analiza se provodi u dvije kombinacije opterećenja koje predstavljaju normalne operativne uvjete i ekstremni valni scenarij. Osjetljivost, nedrenirana posmična čvrstoća i pregnječena posmična čvrstoća preuzeti su iz Tablice 2, dok su faktor deformacije i koeficijent krutosti K_s odabrani iz preporuka [18]. Najveće jedinično trenje na plašt monopilota postavljeno je kao jednako nedreniranoj posmičnoj čvrstoći tla, dok je jedinična nosivost na vrhu temelja određena kao $9 \times S_u$. U nastavku su prikazane vrijednosti parametara tla korištenih za analizu osjetljivosti ponašanja u različitim scenarijima, Tablica 5. Analize obuhvaćaju varijacije kuta unutarnjeg trenja za slojeve pjeskovitog tla i nedrenirane posmične čvrstoće za sloj glinovitog tla. Na Slici 5 je dan prikaz numeričkog modela monopilota s uslojenosti tla.

Tablica 5: Prikaz variranih parametara čvrstoće za pojedini sloj tla na predmetnoj lokaciji

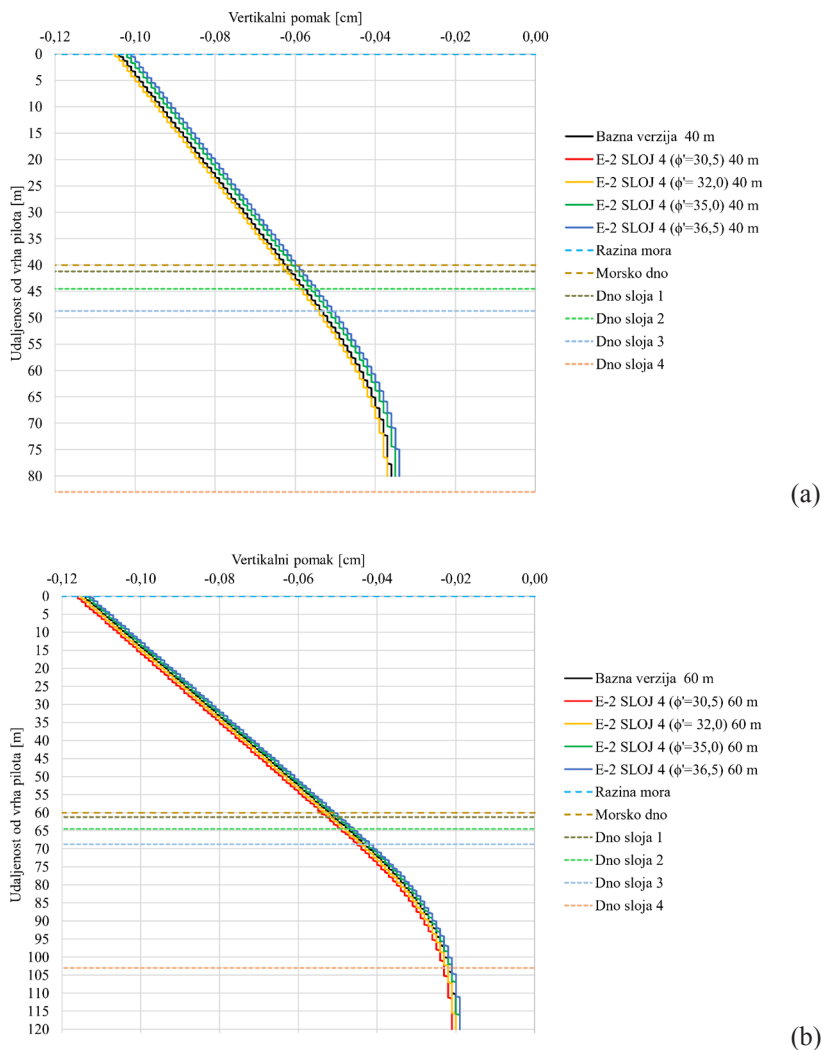
Sloj tla	Kut trenja tla (°)				
	-3°	-1.5°	BE	+1,5°	+3°
I	28	29,5	31	32,5	34
III	22	23,5	25	26,5	28
IV	30,5	32	33,5	35	36,5
V	22	23,5	25	26,5	28
Nedrenirana čvrstoća tla (kPa)					
	LE	Niža vrijednost	BE	Viša vrijednost	UE
II	20	32,5	45	57,5	70



Slika 5: Numerički model monopilota sa slojevima tla (bojama odgovaraju danom u Tablicama 1 i 2)

Provedene analize su obuhvaćale varijaciju navedenih parametara tla pojedinog sloja pri čemu su sve referentne vrijednosti za ostale slojeve tla ostale jednake vrijednostima najbolje procjene (BE). Od svih rezultata analiza se u nastavku prikazuju rezultati scenarija E-2 s obzirom da je isti rezultirao s većim vrijednostima pomaka i reznih sila. Osim toga, rezultati su prikazani samo za analize varijacija parametara onih slojeva koji imaju najveći utjecaj na vertikalni (Slika 6) i bočni (Slika 7) pomak monopilota, te na poprečne sile (Slika 8) i momente savijanja (Slika 9) monopilota.

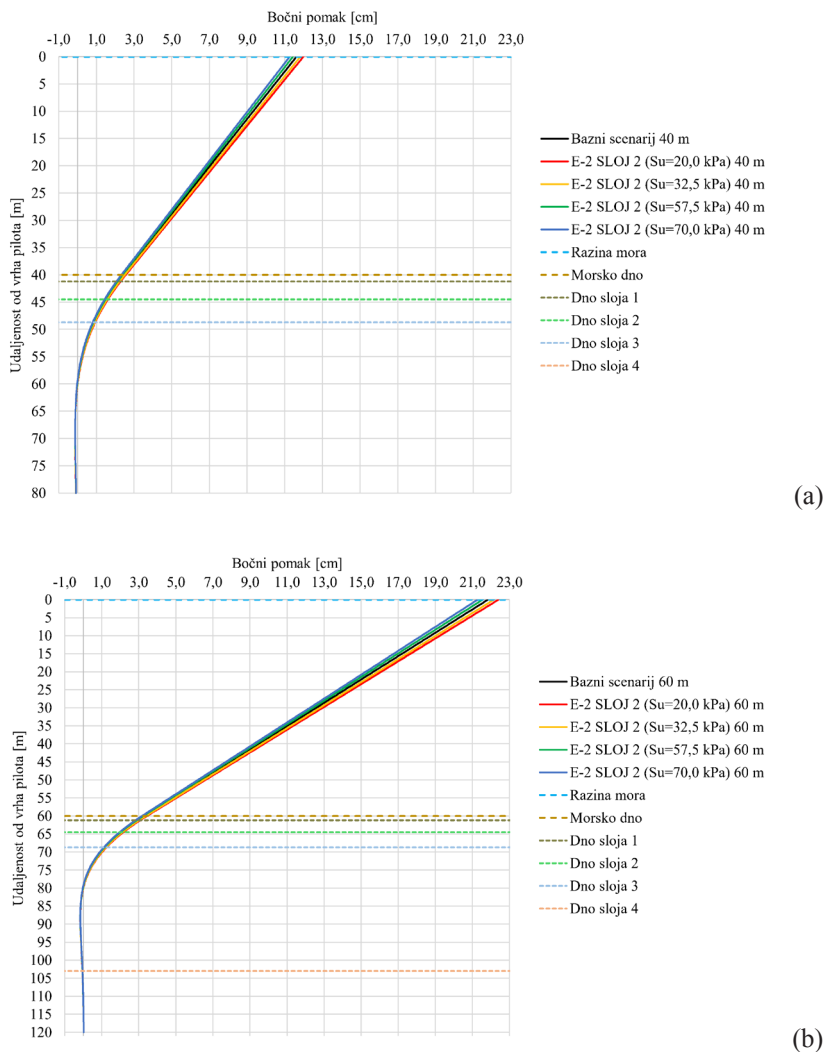
Vertikalni pomak monopilota, Slika 6, je dominantno uvjetovan uzdužnim opterećenjem nametnutim na vrh pilota. S obzirom da su u oba slučaja, i za 40 m i za 60 m dubinu mora, korištene iste dimenzije i karakteristike tornja i glavčine, uzdužno opterećenje je jednako. Na vertikalni pomak najveći utjecaj ima varijacija kuta trenja sloja IV. Vertikalni pomak u svim analizama iznosi od 10 do 12 cm te je tek nešto veći kod monopilota za dubinu mora od 60 m.



Slika 6: Vertikalni pomak monopilota za scenarij E-2 i varijaciju kuta trenja sloja IV:

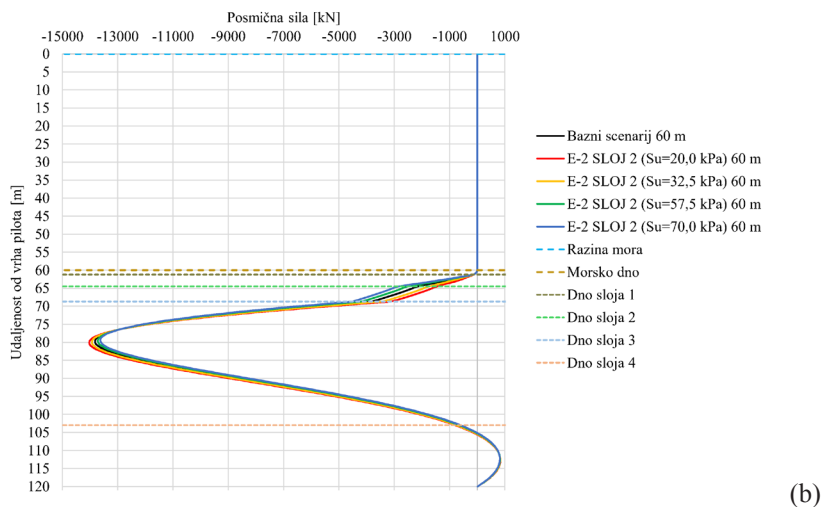
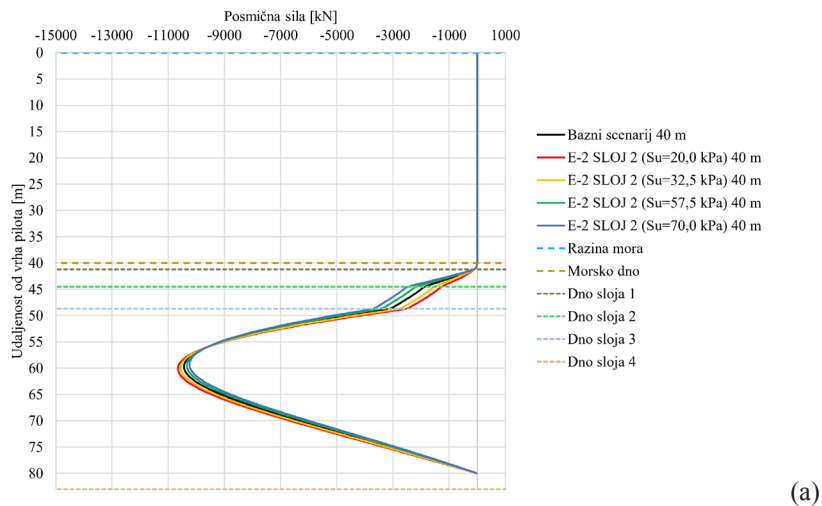
- (a) monopilot ukupne duljine 80 m s 40 m dubine mora,
 (b) monopilot ukupne duljine 120 m s 60 m dubine mora

Bočni pomak monopilota, Slika 7, je dominantno uvjetovan momentima od djelovanja vjetera i valova nametnutim na vrh pilota. Na vertikalni pomak najveći utjecaj ima varijacija nedrenirane čvrstoće sloja II. S obzirom da su navedena opterećenja značajno veća kod monopilota za dubinu mora od 60 m, njegov najveći bočni pomak je u granicama od 21 do 23 cm, dok je kod monopilota za dubinu mora od 40 m isti u granicama od 11 do 12 cm.

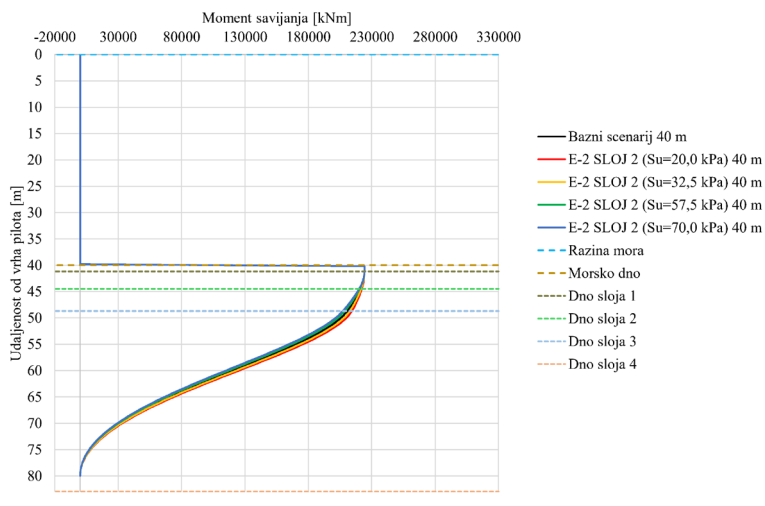


Slika 7: Bočni pomak monopilota za scenarij E-2 i varijaciju nedrenirane čvrstoće sloja II:
 (a) monopilot ukupne duljine 80 m s 40 m dubine mora,
 (b) monopilot ukupne duljine 120 m s 60 m dubine mora

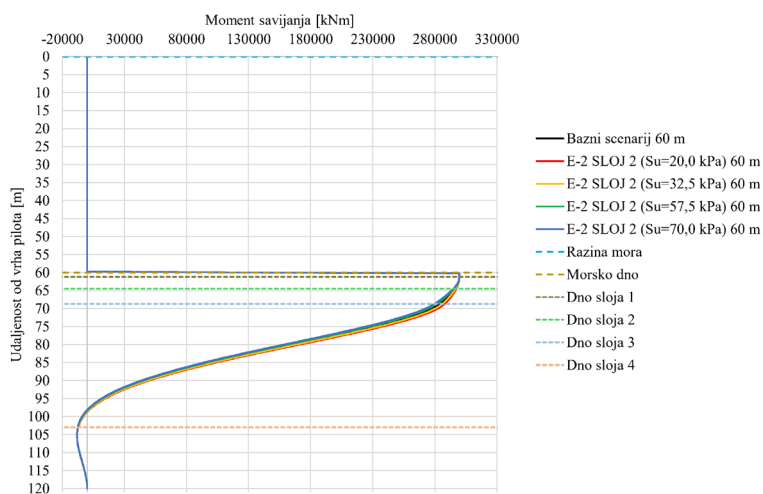
Poprečna sila u monopilotu (Slika 8), kao i moment savijanja (Slika 9), poprimaju izrazito visoke vrijednosti za analizirani scenarij E-2. Najveće vrijednosti reznih sila se ostvaruju pri varijaciji nedrenirane čvrstoće sloja II. Pri tome su iste veće za oko 30% za dubinu mora od 60 m u odnosu na dubinu mora od 40 m.



Slika 8: Poprečna sila monopilota za scenarij E-2 i varijaciju nedrenirane čvrstoće sloja II:
 (a) monopilot ukupne duljine 80 m s 40 m dubine mora,
 (b) monopilot ukupne duljine 120 m s 60 m dubine mora



(a)



(b)

Slika 9: Moment savijanja monopilota za scenarij E-2 i varijaciju nedrenirane čvrstoće sloja II:
 (a) monopilot ukupne duljine 80 m s 40 m dubine mora,
 (b) monopilot ukupne duljine 120 m s 60 m dubine mora

5. Zaključak

U radu se daje prikaz analiza osjetljivosti monopilota kao odabranog sustava temelja vjetroturbine u sjevernom Jadranu. Na odabranoj lokaciji su provedeni geotehnički istražni radovi i identificiran je geološko – geotehnički profil tla koji se sastoji od izmjena koherentnih i nekoherentnih depozita varijabilne prekonsolidiranosti, odnosno zbijenosti. Određene su vrijednosti parametara tla koji imaju utjecaj na ponašanje temeljnog sustava. Provedenom preliminarnom analizom opterećenja su određena karakteristična djelovanja vlastite težine, vjetra i valova za monopilote koji se nalaze u moru dubine 40 m i 60 m. Numeričkim modeliranjem je simulirano ponašanje monopilota pod navedenim djelovanjima pri čemu su evaluirani pomaci i rezne sile u monopilotu uslijed varijacije parametara čvrstoće tla. Pokazalo se da najveći utjecaj na bočno ponašanje pilota ima varijacija nedrenirane čvrstoće sloja koji se nalazi neposredno ispod morskog dna, dok slijezanje pilota najviše ovisi o čvrstoći sloja u kojemu monopilot završava. Pri tome svakako treba naglasiti da veliki utjecaj na ponašanje monopilota imaju i krutosne karakteristike depozita sjevernog Jadrana, dok se ovaj rad fokusira na parametre čvrstoće. Stoga je nužno u daljnjim istraživanjima identificirati varijacije krutosnih karakteristika pojedinih slojeva te istražiti njihov utjecaj na ponašanje monopilota za različita opterećenja. Iako su prikazane analize preliminarne, one omogućuju određivanje najvažnijih parametara koji bi mogli biti potrebni za daljnje istraživanje, kao i smjernice za buduće projekte temeljenja pučinskih vjetroelektrana na sjevernom Jadranu.

Zahvala

Autori zahvaljuju tvrtki INA d.d. na ustupanju podataka iz geotehničkog elaborata za lokaciju plinske platforme Ika-C. Dio istraživanja je financiran kroz potpore Sveučilišta u Zagrebu, projekt *Optimizacija temeljenja priobalnih vjetroelektrana*, koji se provodi na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Literatura

- [1] Ledec, G. C.; Rapp, K. W.; Aiello, R. G.: *Greening the wind - Environmental and social considerations for wind power development*. Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) Washington, DC: World Bank, 2011, ISBN: 978-0-8213-8926-3.
- [2] Filom, S.; Radfar, S.; Panahi, R.; Amini, E.; Neshat, M.: Exploring wind energy potential as a driver of sustainable development in the southern coasts of Iran: The importance of wind speed statistical distribution model, *Sustainability*, **13** (2021) 14, 7702, <https://doi.org/10.3390/su13147702>

- [3] International Energy Agency (IEA): *Offshore wind outlook 2019: World energy outlook special report*, International Energy Agency (2019)
- [4] Basack, S.; Dutta, S.; Saha, D.; Das, G.: Power generation by offshore wind turbines: An overview on recent research and developments, *WSEAS Transactions on Power Systems*, **16** (2021) 254-261, <https://doi.org/10.37394/232016.2021.16.26>
- [5] Arapogianni, A.; Genachte, A.; Ochagavia, R.; Vergara, J.; Castell, D.; Tsouroukdissian, A.; Korbijn, J.; Bolleman, N.; Huera-Huarte, F.; Schuon, F.; Ugarte, A.; Sandberg, J.; de Laleu, V.; Maciel, J.; Tunbjer, A.; Roth, R.; de la Gueriviere, P.; Coulombeau, P.; Jadrec, S.; Philippe, C.; Voutsinas, S.; Weinstein, A.; Vita, L.; Byklum, E.; Hurley, W.; Grubel, H.: *Deep Water: The Next Step for Offshore Wind Energy*, European Wind Energy Association report, Brussels, Belgium (2013)
- [6] Bhattacharya, S.: *Design of foundations for offshore wind turbines*, John Wiley & Sons Ltd (2019), <https://doi.org/10.1002/9781119128137>
- [7] Gupta, B. K.; Basu, D.: Offshore wind turbine monopile foundations: Design perspectives, *Ocean Engineering*, **213** (2020) 107514, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107514>
- [8] Sánchez, S.; López-Gutiérrez, J-S.; Negro, V.; Esteban, M. D.: Foundations in offshore wind farms: Evolution, characteristics and range of use, *Journal of Marine Science and Engineering*, **7** (2019) 12, 441, <https://doi.org/10.3390/jmse7120441>
- [9] URL: www.eew-group.com/projects-references/, EEW SPC. Completion of first monopile for Baltic Eagle project, *Pristupljeno*: 2025-03-05
- [10] URL: www.newcivilengineer.com/latest/innovation-to-enhance-installation-of-offshore-wind-monopiles-unveiled-26-11-2024/, *Pristupljeno*: 2025-03-05
- [11] URL: <https://iqip.com/products/handling-equipment/dynamic-outtrigger-frame/>, *Pristupljeno*: 2025-03-05
- [12] Liščić, B.; Senjanović, I.; Čorić, V.; Kozmar, H.; Tomić, M.; Hadžić, N.: Offshore Wind Power Plant in the Adriatic Sea : an Opportunity for the Croatian Economy, *Transactions on maritime science*, **3** (2014) 2, 103-110, <https://doi.org/10.7225/toms.v03.n02.001>
- [13] RINA: *Ika-C Geotechnical Investigation*, Final Report, INA d.d., Zagreb, Hrvatska (2022)
- [14] URL: www.en.wikipedia.org/wiki/Adriatic_Basin, *Pristupljeno*: 2025-02-18
- [15] Nikitas, G.; Vimalan, N.; Bhattacharya, S.: An innovative cyclic loading device to study long term performance of offshore wind turbines, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **82** (2016), 154–160, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.12.008>
- [16] Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ): Atlas vjetrova Hrvatske, www.meteo.hr, *Pristupljeno*: 2024-09-29
- [17] URL: www.cds.climate.copernicus.eu/datasets, *Pristupljeno*: 2024-09-28
- [18] URL: www.rocsience.com/help/rspile/documentation, *Pristupljeno*: 2025-01-22

Biološki procesi proizvodnje biovodika

Renata Vičević¹, Anita Šalić¹, Bruno Zelić^{1,2}

¹Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije,
Marulićev trg 19, 10000 Zagreb

²Sveučilište Sjever, Trg Žarka Dolinara 1, 48000 Koprivnica

Sažetak: Ubrzano iscrpljivanje rezervi i negativni utjecaji na okoliš koji su posljedica prerade i korištenja fosilnih goriva te nestabilnost tržišta energenata, samo su neki od razloga sve većeg istraživanja i korištenja čistih, zelenih i obnovljivih izvora energije. Biogoriva se smatraju ekološki i ekonomski prihvatljivom alternativom fosilnim gorivima, pri čemu je vodik jedno od najperspektivnijih alternativnih energetske rješenja. Vodik praktički ne postoji u prirodi u slobodnom obliku, ali se može proizvesti kemijskim i biološkim procesima. Glavni nedostaci kemijskih procesa proizvodnje vodika su veliki investicijski i ukupni troškovi, velika specifična potrošnja i niska učinkovitost procesa. Kako bi se prevladali navedeni problemi te ekološki i ekonomski opravdao i unaprijedio proces proizvodnje (bio)vodika (bioH_2), biološki procesi postaju sve zastupljenija alternativa kemijskim procesima. Ovaj pregledni rad pruža literaturni uvid u biološke procese proizvodnje bioH_2 kao obnovljivog izvora energije.

Ključne riječi: biovodik, biogorivo, biootpad, biomasa, enzimi

1. Uvod

Iscrpljivanjem rezervi fosilnih goriva i rastućim klimatskim izazovima, raste potreba za povećanjem raznolikosti energetskog portfelja. Prema predikciji Canuta i Mazze [1], fosilna goriva za masovnu potrošnju će u potpunosti nestati do 2200. godine. Iz tog razloga raste zanimanje za biogoriva (bioplin, bioetanol, biodizel, biovodik itd.) koja se smatraju ekološki i ekonomski prihvatljivom alternativom fosilnim gorivima [2]. Prednosti korištenja biogoriva su višestruke pri čemu se mogu izdvojiti sljedeće:

- **Smanjenje emisija stakleničkih plinova:** Korištenje biogoriva umjesto fosilnih goriva može značajno smanjiti emisije CO_2 i drugih štetnih plinova, što doprinosi borbi protiv klimatskih promjena.

- *Smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima*: Biogoriva doprinose smanjenju ovisnosti o uvozu fosilnih goriva, što povećava energetske sigurnost država.
- *Obnovljivost*: Biogoriva se proizvode iz obnovljivih izvora poput biljaka, algi ili otpadnih biorazgradivih materijala, što ih dugoročno čini održivim izvorom energije.
- *Podrška ruralnom razvoju*: Proizvodnja biogoriva može potaknuti razvoj ruralnih područja kroz uzgoj sirovina poput biljaka ili algi te stvaranje radnih mjesta u poljoprivredi i industriji biogoriva.
- *Diversifikacija energetskeg portfelja*: Korištenje biogoriva doprinosi diversifikaciji energetskeg portfelja, smanjujući rizik od nestanka ili fluktuacija cijena fosilnih goriva.
- *Smanjenje onečišćenja zraka*: Biogoriva obično imaju niže emisije štetnih čestica i drugih onečišćenja u usporedbi s fosilnim gorivima, što poboljšava kvalitetu zraka i smanjuje zdravstvene probleme povezane sa zagađenjem.
- *Potencijal za inovacije*: Razvoj tehnologija za proizvodnju biogoriva otvara put za inovacije u području obnovljive energije te potiče istraživanje i razvoj novih tehnologija.

Među spomenutim biogorivima, vodik se smatra jednim od najperspektivnijih zahvaljujući svom visokom energetskeg potencijalu (142 MJ/kg) i činjenici da njegovim izgaranjem nastaje samo voda [3]. Međutim, budući da u prirodi vodik ne postoji u slobodnom obliku, mora se proizvoditi kemijskim ili biološkim procesima. Kemijske procese, trenutno dominantne u proizvodnji vodika, odlikuju veliki investicijski i ukupni troškovi, velika potrošnja energije i niska učinkovitost. Kako bi se prevladali navedeni problemi i unaprijedio proces proizvodnje vodika, sve se više pažnje pridodaje biološkim procesima koji nude ekološki prihvatljiviju varijantu. Proces koji se najčešće koristi za proizvodnju bioH_2 su anaerobna fermentacija, fotofermentacija i mikroba elektroliza, pri čemu učinkovitost tih procesa prvenstveno ovisi o mikroorganizmima koji sudjeluju u procesu te o supstratima bogatim ugljikohidratima. Danas se u proizvodnji bioH_2 najviše pažnje posvećuje lignoceluloznoj biomasi te otpadnim vodama s ciljem razvijanja održivih procesa [4]. Unatoč velikom potencijalu, biološka proizvodnja bioH_2 ograničena je složenošću procesa, što utječe na konačnu cijenu i konkurentnost u odnosu na kemijske metode. Kako bi bioH_2 postao održiva i ekonomski opravdana alternativa fosilnim gorivima, potrebna su daljnja istraživanja usmjerena na pronalazak novih metoda, sirovina, mikroorganizama i tehnologija proizvodnje.

U ovom preglednom radu analizirani su i uspoređeni biološki procesi proizvodnje bioH_2 s ciljem boljeg razumijevanja njegove uloge u tranziciji prema čistim i obnovljivim izvorima energije.

2. Vodik

2.1 Vodik – gorivo budućnosti

Jules Verne je u svojem romanu “Tajanstveni otok” (fr. *L’Île mystérieuse*, 1874.) predvidio upotrebu vodika kao goriva budućnosti. U knjizi jedan od likova iznosi ideju da će voda, rastavljena na svoje sastavne elemente (vodik i kisik), jednog dana postati izvor energije:

“Voda će jednog dana biti gorivo. Vodik i kisik, od kojih se sastoji, korišteni zasebno, osigurat će neiscrpan izvor topline i svjetla, s jačinom koju ugljen ne može postići. Kad zalihe ugljena presuše, ugrijat ćemo se pomoću vode.”

Ova vizionarska izjava smatra se jednim od prvih literarnih nagovještaja korištenja vodika kao energetskog izvora. Iako je tada to bila samo znanstvena fantastika, danas je vodik ključna tema u istraživanjima obnovljive energije i procesu dekarbonizacije. Verneova ideja o elektrolizi vode za proizvodnju vodika postaje sve važnija u modernoj energetici, posebno kroz koncept zelenog vodika, koji se dobiva pomoću obnovljivih izvora energije poput sunca i vjetra.

Prednost vodika leži u velikoj specifičnoj energiji (142 MJ/kg), pri čemu se u gorivnim ćelijama koje koriste vodik, oslobađa 2,75 puta veća energija u usporedbi s izgaranjem goriva na bazi ugljikovodika. S obzirom na njegovu sve širu primjenu, vodik sve više poprima ulogu goriva sadašnjosti. Prednosti njegove upotrebe uključuju nisku emisiju štetnih plinova (njegovim izgaranjem nastaje samo voda), mogućnost brzog punjenja gorivnih ćelija, pohranu viškova energije i primjenu u različitim sektorima [5]. Neka od ključnih svojstava vodika prikazana su u Tablici 1.

Uz brojne prednosti korištenja vodika kao goriva, potrebno je uzeti u obzir i izazove povezane s njegovom primjenom. Vodik je zapaljiv i eksplozivan plin, što može predstavljati sigurnosni rizik u slučaju curenja ili nestručnog rukovanja. Međutim, zahvaljujući strogim sigurnosnim standardima, takvi problemi su iznimno rijetki. Jedan od najvećih izazova u širokoj uporabi vodika kao goriva je nedostatak infrastrukture, odnosno punioca i distribucijskih sustava [5]. Osim toga, zbog male molekulske mase, skladištenje i transport vodika predstavljaju tehnički izazov, budući da se mora čuvati pod visokim tlakom ili iznimno niskim temperaturama [6].

Dodatni čimbenik koji ograničava širu primjenu jest visoka cijena proizvodnje, što vodik trenutno čini skupljim od konvencionalnih goriva [8]. Unatoč tim izazovima, vodik ima brojne primjene u industriji, posebno u procesima proizvodnje amonijaka i gnojiva (55%), rafiniranju nafte (25%), sintezi metanola (10%) te brojnim drugim procesima (10%) kao što su sinteza polimera, farmaceutska industrija, itd. [4,9].

Tablica 1. Svojstva vodika pri standardnim uvjetima (prilagođeno iz [7])

Svojstvo	Vrijednost	Jedinica
<i>Fizikalna svojstva</i>		
Molekulska masa	2,016	g/mol
Gustoća (plin)	0,08988	g/dm ³
Volumetrijska gustoća	0,08376	kg/m ³
Talište	-259,16	°C
Vrelište	-252,87	°C
Kritična točka	-240,2 °C pri 1286,83	kPa
Trojna točka	-259,3 °C pri 7,09	kPa
Specifična toplina	14,304	J/(g·K)
Topljivost u vodi	1,6	mg/dm ³
<i>Termodinamička svojstva</i>		
Viša ogrjevna vrijednost	141,86	MJ/kg
Niža ogrjevna vrijednost	119,93	MJ/kg
Energetska gustoća	10,05	MJ/m ³
Energetska gustoća	141,90	MJ/kg
<i>Kemijska svojstva</i>		
Temperatura samozapaljenja	570	°C
Eksplozivne granice	4 – 75	% vodika u zraku
Standardni elektrođni potencijal	0,00	V (prema SHE*)

* Standardna vodikova elektroda

Vodik se može proizvesti različitim kemijskim i biološkim procesima, pri čemu kemijski procesi i dalje dominiraju unatoč svojim nedostacima, poput velikih investicijskih i ukupnih troškova, velike specifične potrošnje, niske učinkovitosti procesa te negativnog utjecaja na okoliš. Konkretno, proizvodnja vodika iz fosilnih goriva rezultira emisijama ugljikovog dioksida (CO₂) u atmosferu.

Kako bi se ti problemi prevladali te se ekološki i ekonomski opravdao i unaprijedio proces proizvodnje vodika, intenzivno se radi na poboljšanju postojećih i razvoju novih tehnologija i procesa proizvodnje kao održivih alternativa, s posebnim naglaskom na biološke procese [4] o kojima će više biti rečeno u nastavku rada.

2.2 Boje vodika

Vodik se smatra obnovljivim izvorom energije s obzirom da je najzastupljeniji element na Zemlji. Međutim, njegova primjena je ograničena činjenicom da u slobod-

nom obliku ne postoji pa se mora sintetizirati iz različitih izvora kao što su prirodni plin, ugljen ili biomasa korištenjem različitih termodinamičkih, elektrokemijskih i bioloških procesa među kojima su najvažniji elektroliza, piroliza, reformiranje nafte, plinifikacija, fotofermentacija i tamna fermentacija. Odabir optimalne metode proizvodnje vodika ovisi o dostupnosti sirovina, energetske potrebe, ekonomskim čimbenicima i utjecaju na okoliš. S razvojem tehnologija za proizvodnju “zelenog” vodika, tj. vodika proizvedenog iz obnovljivih izvora energije i bez emisija stakleničkih plinova, sve važniji postaju procesi koji minimiziraju ekološki utjecaj. Kako bi se vodik klasificirao ovisno o načinu na koji je proizveden, u industriji i energetici koristi se “sustav boja” [10] (Slika 1).

ZELENI VODIK	PLAVI VODIK	CRNI/SIVI VODIK
proizveden elektrolizom primjenom struje dobivene iz obnovljivih izvora energije i vode	proizveden parnim reformiranjem ili rasplinjavanjem uz hvatanje ugljika pomoću prirodnog plina	proizveden parnim reformiranjem ili rasplinjavanjem ugljena pomoću prirodnog plina ili ugljena
Ugljični otisak minimalan	Ugljični otisak nizak	Ugljični otisak visok
SMEĐI VODIK	TIRKIZNI VODIK	CRVENI VODIK
proizveden rasplinjavanjem fosilnih goriva	proizveden pirolizom iz prirodnog plina	proizveden elektrolizom primjenom struje dobivene iz nuklearne energije
Ugljični otisak visok	Ugljični otisak nizak	Ugljični otisak minimalan
BIJELI VODIK	ŽUTI VODIK	?? VODIK
proizveden pomoću podzemnog plina	proizveden elektrolizom primjenom struje dobivene iz solarne energije	proizveden iz biomase
Ugljični otisak minimalan	Ugljični otisak srednji	Ugljični otisak minimalan

Slika 1: Boje vodika

Zeleni vodik je trenutno najpoželjniji jer se proizvodi iz vode i obnovljive energije, bez emisija CO₂. Međutim, i plavi i tirkizni vodik se smatraju privremenim rješenjima dok tehnologije “zelene” proizvodnje ne postanu jeftinije i dostupnije.

2.3 Biovodik

Osim spomenutih vrsta vodika, postoji i biovodik (bioH₂), vodik dobiven biološkim procesima, kojem još nije dodijeljena boja jer je istraživanje ekonomski održivih

procesa njegove proizvodnje još u ranoj fazi. Jedna od glavnih prednosti proizvodnje bioH₂ je korištenje otpadnih bioloških sirovina što omogućuje minimalno zagađenje i istovremeno rješavanje problema zbrinjavanja biološkog otpada. U teoriji, takav proces proizvodnje nema negativnih utjecaja na okoliš.

Takav tip vodika dobiva se korištenjem bioloških sustava, poput bakterija, algi, ili enzimskih reakcija, koji mogu proizvesti bioH₂ kao nusproizvod svojih metaboličkih aktivnosti. U mnogim slučajevima, bioH₂ se smatra “zelenim” izvorom energije jer ne stvara štetne emisije, osim ako se u procesu koristi određena količina fosilnih goriva za podupiranje proizvodnje. Korištenje bioH₂ u industriji ili transportu može doprinijeti smanjenju ovisnosti o fosilnim gorivima i postizanju globalnih ciljeva smanjenja emisije stakleničkih plinova.

BioH₂ također ima potencijal u različitim industrijskim i komercijalnim primjenama, uključujući gorivne članke za proizvodnju električne energije i vozila na vodik. Iako je proizvodnja bioH₂ još uvijek u fazi istraživanja i razvoja, taj oblik vodika može ponuditi dugoročnu održivost u energetske proizvodnji, posebno ako se poveže s obnovljivim izvorima energije i naprednim biotehnoškim metodama.

Trenutni glavni izazovi proizvodnje bioH₂ uključuju visoku cijenu proizvodnje, relativno niske konverzije supstrata, iskorištenje na produktu i produktivnost. Procjenjuje se kako bi proizvodnja bioH₂ bila ekonomski isplativa kada bi konverzija supstrata bila 60-80% [11]. Ipak, sa svakim novim istraživanjem i poboljšavanjem postojećih metoda, očekuje se da bi do 2050. cijena bioH₂ trebala biti manja od cijene prirodnog plina (Tablica 2). Cijena proizvodnje bioH₂ trenutno iznosi 7,54-7,61 \$/kg za fermentacijske procese, 2,13-7,24 \$/kg za procese izravne biofotolize i oko 1,42 \$/kg za procese neizravne fotolize što te procese čini skupljima u odnosu na troškove proizvodnje konkurentnih procesa proizvodnje vodika [12].

Tablica 2: Projekcije cijena bioH₂ i prirodnog plina od 2019. do 2050. izražene u \$/kg [13]

Energent	2019.	2030.	2050.
bioH ₂	3,55	1,95	1,15
prirodni plin	2,40	2,40	2,15

2.4 Biološke metode proizvodnje vodika

Nekoliko je procesa koji se koriste za proizvodnju bioH₂, kao što su anaerobna (tamna) fermentacija, fotofermentacija, izravna i neizravna biofotoliza i mikroba elektroliza. Učinkovitost tih procesa najvećim dijelom ovisi o metaboličkim putevima, stoga je odabir odgovarajućih mikroorganizama za proizvodnju bioH₂ od presudne

važnosti. Uz mikroorganizme, drugi ključan čimbenik je izbor supstrata, pri čemu je važno da je supstrat bogat ugljikohidratima. Danas se sve više pozornosti posvećuje lignoceluloznoj biomasi kao održivom, obnovljivom i jeftinom supstratu za proizvodnju bioH_2 . Iako proizvodnja bioH_2 iz lignoceluloznih materijala kao sirovina ima brojne prednosti, još nije komercijalizirana. Prvenstveno je to stoga što korištenje lignoceluloznih materijala kao sirovina za proizvodnju bioH_2 zahtijeva njihovu obradu kako bi se uklonile komponente koje mogu imati negativan utjecaj na proizvodnju bioH_2 . Proces proizvodnje bioH_2 složen je i dugotrajan te unatoč prednostima još uvijek ne može konkurirati kemijskim procesima proizvodnje vodika zbog svoje visoke cijene. Kako bi se prevladali postojeći problemi, istražuju se novi pristupi proizvodnji bioH_2 , kao što su učinkovitije korištenja svjetla u fotofermentacijama povezano s razvojem novih tipova foreoreaktora, genetska modifikacija mikroorganizama koji se koriste u fermentacijskim procesima, optimizacija procesa, dizajniranje sintetskih enzimatskih puteva za proizvodnju bioH_2 , itd. Iako su biološki procesi proizvodnje bioH_2 dobro poznati i istraženi, glavni izazov ostaje razvoj industrijski održivih bioloških procesa [11].

2.4.1 Fermentacijski procesi za proizvodnju bioH_2

Fermentacija je biološki proces u kojem mikroorganizmi (bakterije, gljive i kvasci) razgrađuju organske supstrate, obično ugljikohidrate, i pretvaraju ih u druge tvari, najčešće alkohole, kiseline ili plinove. Može se odvijati bez prisustva (anaerobna fermentacija) ili u prisutnosti kisika (aerobna fermentacija) [14]. U kontekstu proizvodnje bioH_2 , proces fermentacije se provodi korištenjem anaerobnih ili fototrofnih bakterija, zbog čega razlikujemo anaerobnu (tamnu) fermentaciju i fotofermentaciju. Kombinacija tih procesa je najčešće korištena i najbolje istražena od svih metoda biološke proizvodnje bioH_2 , prvenstveno zbog jednostavnosti [15]. Prednosti fermentacijskih procesa su mogućnost korištenja biootpada kao sirovine i velika selektivnost prema bioH_2 , dok su glavni nedostaci nizak prinos bioH_2 u odnosu na teoretski maksimum i veća potrošnja energije u usporedbi s drugim biološkim procesima.

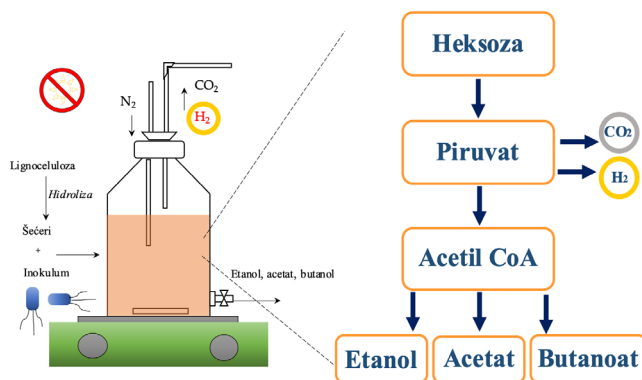
2.4.1.1 Anaerobna (tamna) fermentacija

Tamna ili anaerobna fermentacija biološki je proces u kojem mikroorganizmi razgrađuju organske tvari u odsustvu kisika. Proces se naziva tamnom fermentacijom jer se odvija bez svjetla, za razliku od fotofermentacije koja zahtijeva svjetlosnu energiju. Tijekom anaerobne fermentacije, mikroorganizmi razgrađuju različite organske supstrate poput šećera, celuloze ili drugih ugljikohidrata, i pretvaraju ih u različite produkte, uključujući kiseline, alkohole, plinove i bioH_2 . Bakterije koje se najčešće upotrebljavaju za proizvodnju bioH_2 (Tablica 3) pripadaju skupinama anaeroba (*Clostridia*, *archae*), fakultativnih anaeroba (*Escherichia coli*) i aeroba (*Alcalligenes*,

Bacillus). Kao supstrati za proizvodnju bioH₂ se često koriste jednostavni šećeri, ali se sve više istraživanja usmjerava na lignocelulozu kao održivu, obnovljivu i jeftinu alternativu [16], odnosno općenito prema biološki razgradivim otpadnim sirovinama kao što su organski otpad, poljoprivredni ostaci i industrijske otpadne vode. Treba također istaknuti kako je kod primjene sastavom složenih sirovina, kao primjerice lignoceluloze, potrebno uključiti i različite oblike predtretmana kojima se oslobađaju jednostavni šećeri.

Tablica 3: Usporedba prinosa bioH₂ primjenom različitih supstrata i mikroorganizama [15]

Mikroorganizam	Supstrat	Prinos bioH ₂ po supstratu
<i>Caldicellulosiruptor saccharolyticus</i> DSM 8903	Hidrolizat kore krumpira	3,4 mol/mol
<i>Clostridium butyricum</i>	Hidrolizat vlakana šećerne trske	1,7 mol/mol
<i>Clostridium thermocellum</i> 7072	Kukuruzna stabljika	1,2 mol/mol
<i>Thermotoga naepolitana</i>	Rižina slama	68,2 mL/g
<i>Enterobacter aerogenes</i> HO-39	Glukoza	124,5 mL/g
	Saharoza	109,4 mL/g
	Laktoza	37,8 mL/g



Slika 2: Pojednostavljena shema nastanka vodika tamnom fermentacijom iz heksoza

U prvom koraku fermentacije bakterije razlažu monosaharide na piruvat ($\text{CH}_3\text{CO}-\text{COO}^-$) koji se daljnjim djelovanjem enzima hidrogenaze i piruvat oksidoreduktaze razlaže na plinoviti ugljikov dioksid (CO_2) i vodik (H_2) te kapljeviti acetil koenzim A (acetil CoA). Acetil CoA je intermedijer koji prelazi u etanol, octenu kiselinu ili butansku kiselinu (Slika 2) [15,16].

Optimalni procesni uvjeti za provedbu tamne fermentacije uključuju temperature u rasponu 30-55 °C i pH-vrijednosti u rasponu 6-7. Prinos bioH₂ tamnom fermentacijom se može izračunati proučavajući metaboličke puteve mikroorganizama uzimajući u obzir početne koncentracije šećera u fermentacijskom mediju. Tri metabolička puta koja daju najveći prinos tijekom provedbe tamne fermentacije prikazani su sljedećim jednadžbama kemijskih reakcija (1)-(3):

Fermentacija heksoza u octenu kiselinu:



Fermentacija heksoza u butansku kiselinu:



Fermentacija heksoza u acetat i etanol:

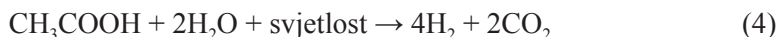


S octenom kiselinom kao glavnim produktom nastaju 4 mola bioH₂, dok s butanskom kiselinom kao produktom nastaju 2 mola bioH₂ po molu utrošene heksoze [17]. Teoretski najveći prinos tamnom fermentacijom nastaje potpunom oksidacijom heksoze, koja rezultira s 12 mol bioH₂ i 6 mol CO₂. Međutim, u praksi se procesom fermentacije najčešće dobiva 1 do 2,5 bioH₂/mol glukoze [15]. Glavni nedostatak tamne fermentacije je nastanak bioplina – smjese CO₂ i bioH₂ pri čemu je potrebno ukloniti CO₂ kako bi se dobio čisti bioH₂. Iako je tamna fermentacija brža od drugih bioloških procesa, prinos bioH₂ je niži zbog nastanka mnogih nusprodukata kao što su kiseline (mliječna, octena kiselina), alkoholi (metanol, butanol), aceton, i plinovi (metan i vodikov sulfid) [18]. S druge strane, dok su foto procesi ograničeni s dostupnošću sunčeve svjetlosti, u procesu tamne fermentacije bioH₂ je moguće proizvoditi cijeli dan što taj proces čini ekonomičnijim.

2.4.1.2 Fotofermentacija

Fotofermentacija je biološki proces proizvodnje bioH₂ iz organskih kiselina djelovanjem anaerobnih bakterija i svjetlosti kao izvora energije. Proces uključuje upotrebu različitih fotosintetskih mikroorganizama poput zelenih algi i cijanobakterija te ljubičaste nesumporne bakterije, a ključni enzim odgovoran za proces proizvodnje

bioH₂ tijekom fotofermentacije je nitrogenaza koja proizvodi vodik u uvjetima limitacije dušikom [19]. U tom procesu se često koriste bakterije roda *Rhodopseudomonas* [20], kao i ljubičaste nesumporne bakterije jer mogu rasti kao fotoautotrofi i kemoheterotrofi, a za razliku od biljaka, algi i cijanobakterija nemaju puno slobodne energije za proizvodnju bioH₂, pa se u sustavu ne proizvodi kisik. Osim toga, imaju sposobnost korištenja širokog spektra organskih spojeva kao supstrata (piruvat, acetat, alkoholi, ugljikohidrati, organske kiseline) [20]. Ukupna reakcija nastajanja bioH₂ fotofermentacijom se može opisati sljedećom jednadžbom kemijske reakcije (Jednadžba (4)) [16]:



Teoretski, u tom procesu se može proizvesti 4 mol H₂/mol octene kiseline. Međutim, ta količina se ne postiže u praksi jer se dio octene kiseline također troši za proizvodnju (rast) biomase.

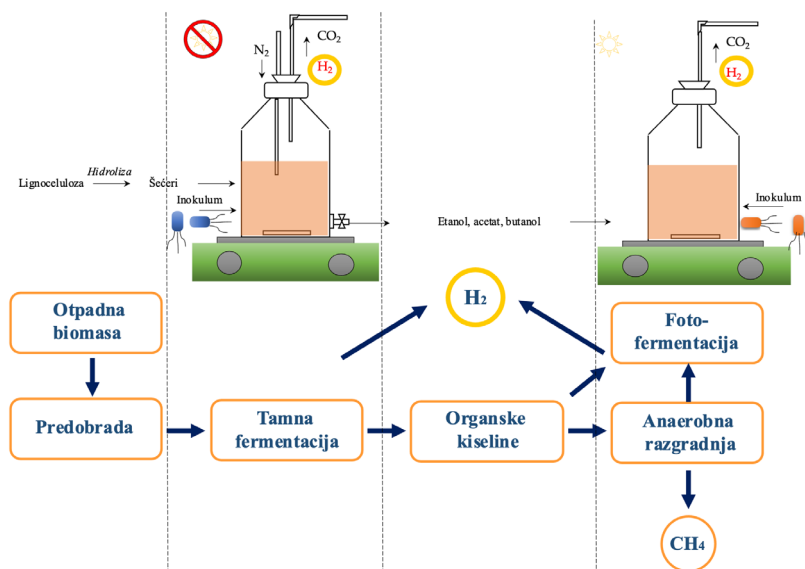
Biokemijski proces fotofermentacije uključuje prijenos elektrona koji se oslobađaju tijekom razgradnje organskih supstrata, pri čemu ih feredoksin prenosi nitrogenazi, koja ih potom koristi za redukciju protona u molekularni vodik. Energija potrebna za taj proces dolazi iz izvora svjetlosti [21], a optimalni procesni uvjeti za fotofermentaciju su pH u rasponu 6,8-7,5, temperatura u rasponu 30-35 °C i intenzitet svjetlosti u rasponu 6-6000 lx [21]. Glavni nedostatak upotrebe enzima nitrogenaze je njegova niska katalitička aktivnost, supresija njegove ekspresije u prisutnosti izvora dušika te manja fotokemijska učinkovitost [16]. Osim toga, nedostatak samog procesa je mala fotokemijska učinkovitost procesa, koja posljedično zahtijeva korištenje velikih površina za prikupljanje dovoljne količine svjetlosne energije. Potrebu za svjetlom ograničava prirodni ciklus dan-noć, što rezultira diskontinuiranom proizvodnjom bioH₂.

Kako bi se prevladali nedostaci tamne i foto(heterotrofne) fermentacije, predložen je dvostupanjski proces koji kombinira oba ta procesa. U prvom dijelu procesa tijekom tamne fermentacije, fermentacijom heksoza dolazi do nastanka bioH₂ i organskih kiselina. BioH₂ se odvodi, a nastale organske kiseline se u drugom dijelu procesa (foto(heterotrofna) fermentacija) prevode do bioH₂ i CO₂.

2.4.1.3 Kombinacija tamne fermentacije i fotofermentacije

Kombinirana fermentacija, koja kombinira tamnu fermentaciju i fotofermentaciju, trenutno je proces koji daje najveći prinos bioH₂. Može se provoditi kao dvostupanjski slijedni proces pri čemu je tamna fermentacija prvi stupanj, a u drugom stupnju se kiseline, nastale kao nusprodukt prvog stupnja, koriste kao supstrat za proizvodnju

bioH₂ putem fotofermentacije. Nedostatak te metode je potreba za predtretmanom prije fotofermentacije i činjenica da su za provedbu procesa potrebna dva reaktora. Kada se kombinirani proces provodi kao jednostupanjska fermentacija, koristi se samo jedan bioreaktor, ali u tom slučaju izazov predstavlja usklađivanje uvjeta pogodnih za obje vrste bakterija [22]. Kombiniranjem tih procesa, teoretski prinos može doseći 12 mol H₂/mol glukoze [15].



Slika 3. Shematski prikaz integrirane tamne fermentacije i fotofermentacije

Sljedeća fermentacija glukoze može se prikazati na sljedećem primjeru (Slika 3) [18]. U prvom koraku, tijekom tamne fermentacije, iz glukoze nastaje octena kiselina, bioH₂ i CO₂, a proces se odvija bez prisustva svjetlosti prema sljedećoj jednadžbi kemijske reakcije (Jednadžba (5)):



U sljedećem koraku fotofermentacijom iz octene kiseline u prisustvu svjetlosti nastaje dodatna količina bioH₂ i CO₂ (Jednadžba (6)) prema sljedećoj jednadžbi kemijske reakcije:



2.4.2 Biofotoliza

Biofotoliza je još jedan od procesa proizvodnje bioH₂, koji se temelji na razgradnji vode u prisutnosti svjetla uz proizvodnju bioH₂. Taj proces se najčešće provodi korištenjem zelenih algi i cijanobakterija, kojima su za proizvodnju bioH₂ potrebni enzimi [FeFe]-hidrogenaza i nitrogenaza [23]. Biofotolizu možemo podijeliti na izravnu i neizravnu biofotolizu [21].

2.4.2.1 Izravna biofotoliza

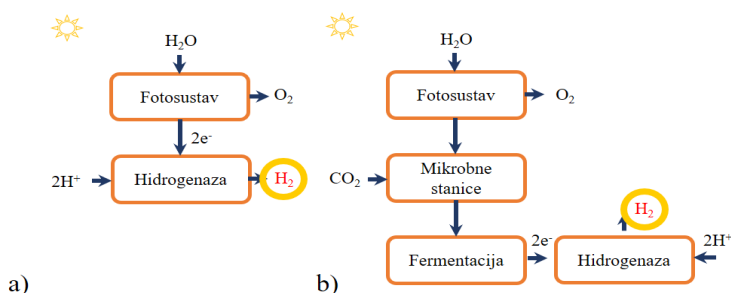
U procesu izravne biofotolize (Slika 4a), zelene alge i cijanobakterije koriste sunčevu svjetlost u rasponu 400-700 nm za svoj rast. Nakon apsorpcije svjetlosti, mogu proizvoditi bioH₂ pomoću enzima hidrogenaze ili nitrogenaze [23]. Proces se može opisati sljedećom jednačbom kemijske reakcije (Jednačba (7)) [12]:



Tijekom izravne fotolize, fotosintetski organizmi reduciraju feredoksin i NADP⁺ korištenjem elektrona i protona iz vode. Elektroni se zatim prenose na feredoksin, koji potom donira elektrone enzimu hidrogenaza koja katalizira pretvorbu protona u bioH₂ prema sljedećoj jednačbi kemijske reakcije (Jednačba (8)) [4]:



Taj proces se mora odvijati u anaerobnim uvjetima zato što kisik u aerobnim uvjetima ometa stvaranje bioH₂.



Slika 4. Shematski prikaz a) izravne i b) neizravne fotolize

2.4.2.2 Neizravna biofotoliza

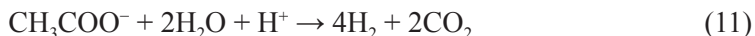
Kod neizravne biofotolize (Slika 4b) odvijaju se dvije različite faze, fotosinteza i tamna fermentacija. U prvoj fazi, CO_2 i H_2O pretvaraju se u organske tvari i O_2 , a u drugoj fazi, u prisutnosti cijanobakterija ili algi, organske tvari prevode se u bioH_2 , CO_2 i druge metabolite [19]. Najveći prinos bioH_2 u tom procesu ostvaruje se pri pH od 4,5 do 8, optimalno oko 6, temperaturi 37 do 55 °C te dobroj izloženosti svjetlosti. Također, prije spomenuti procesi optimizacije poput metoda predobrade, dodatka mikronutrijenata i aktivnih nanočestica pozitivno djeluju na procese biofotolize [24]. Proces se može prikazati sljedećim jednadžbama kemijskih reakcija (Jednadžbe (9)-(10)) [15]:



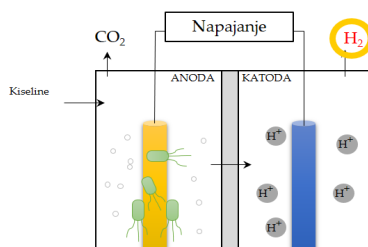
Glavni nedostaci procesa biofotolize su stvaranje O_2 , što može inhibirati postojeće mikroorganizme, te stvaranje eksplozivne smjese O_2 i H_2 . Osim toga, indirektna fotoliza zahtijeva inhibiciju hidrogenaza kako bi se spriječila razgradnja bioH_2 .

2.4.3. Mikrobna elektroliza

BioH_2 se može proizvoditi i u elektrokemijskim sustavima korištenjem tehnologije mikrobnih elektrokemijskih ćelija (engl. *Microbial Electrochemical Cells*, MEC), a sam proces predstavlja kombinaciju mikrobnog metabolizma i elektrokemije (Slika 5) [18]. Mikroorganizmi koji se koriste u ovom procesu su elektrogeni mikroorganizmi koji pretvaraju organski materijal u CO_2 , elektrone i protone (H^+). Generirani elektroni prenose se na anodu, dok H^+ ostaje u elektrolitskoj otopini. Pod utjecajem vanjskog električnog kruga, elektroni se premještaju s katode na anodu, gdje se kombiniraju s H^+ kako bi se proizveo bioH_2 , a proces se može prikazati sljedećom jednadžbom kemijske reakcije (Jednadžba (11)) [19]:



MEC sustavi imaju ogroman potencijal, jer se uz proizvodnju bioH_2 mogu koristiti i za pročišćavanje vode i zraka, budući da kao sirovinu mogu koristiti otpadnu vodu i CO_2 [18,25].



Slika 5. Shematski prikaz mikrobne elektrolize

2.4.4 Enzimatska proizvodnja biovodika

Enzimatska proizvodnja bioH₂ predstavlja inovativan pristup u području obnovljivih izvora energije, koristeći enzime kao biokatalizatore za proizvodnju bioH₂ putem različitih biokemijskih reakcija inspiriranih prirodnim metaboličkim putevima mikroorganizama. Ključnu ulogu u tim procesima imaju enzimi hidrogenaza i nitrogenaza, koji sudjeluju u katalitičkim mehanizmima proizvodnje bioH₂ [26]. Hidrogenaza katalizira reverzibilnu reakciju stvaranja bioH₂ iz protona i oksidaciju bioH₂ u protone, dok nitrogenaza reducira dušik u amonijak te proizvodi bioH₂ kao nusproizvod u anaerobnim uvjetima s limitacijom dušika [27,28].

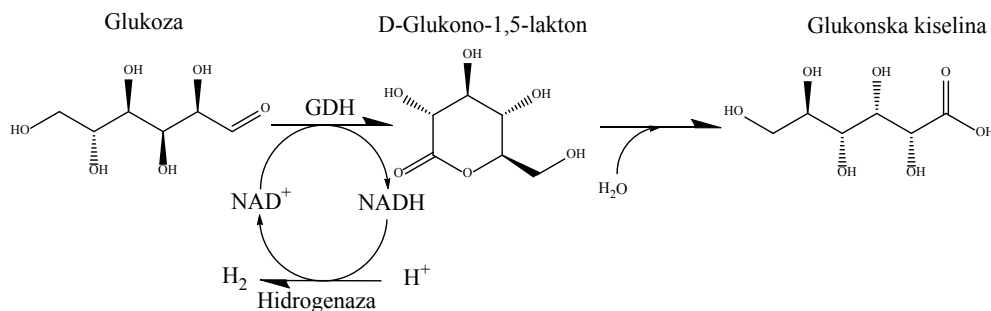
Bakterija *Ralstonia eutropha* H16 pokazala se kao izuzetno značajna u biotehnološkim procesima zahvaljujući svojoj sposobnosti korištenja hidrogenaza za proizvodnju i potrošnju bioH₂ u anaerobnim uvjetima. Ova gram-negativna bakterija raste litoautotrofno i u potpunosti se oslanja na fiksaciju ugljikovog dioksida, što zahtijeva velike količine energije. U njoj se mogu pronaći tri vrste hidrogenaza: membranski vezana hidrogenaza (MBH), slobodna hidrogenaza (SH) i regulatorna hidrogenaza (RH), koje pripadaju skupini [NiFe]-hidrogenaza [29,30]. Za razliku od većine drugih mikroorganizama, čije hidrogenaze inaktivira prisutnost kisika [30], hidrogenaze *R. eutropha* H16 tolerantne su na kisik, što značajno proširuje mogućnosti njihove primjene u biotehnološkim procesima. Izolacija *R. eutropha* H16 moguća je iz različitih okolišnih izvora bogatih organskim materijalima, uključujući tla, vodene ekosustave i industrijske otpadne vode [31]. Kada se jednom izolira, optimalni rast bakterije u laboratorijskim uvjetima postiže se korištenjem mineralnog medija obogaćenog različitim izvorima ugljika [32]. Tijekom uzgoja mogu se pojaviti izazovi poput kontrole pH-vrijednosti, nakupljanja nusprodukata fermentacije i osiguravanja dostupnosti hranjivih tvari. Regulacija pH-vrijednosti ključna je za stabilan rast bakterije, dok se nakupljanje nusproizvoda, poput organskih kiselina i alkohola, može ublažiti primjenom genetičkog inženjerstva i sustava za uklanjanje nusprodukata iz medija [33-34].

Hidrogenaze su ključni enzimi u biološkoj proizvodnji bioH₂ i dijele se prema metalnim centrima aktivnog mjesta u tri glavne klase: [FeFe]-hidrogenaze, [NiFe]-hi-

drogenaze i [Fe]-hidrogenaze. [FeFe]-hidrogenaze karakterizira visoka aktivnost u proizvodnji bioH_2 te prisutnost H-klastera koji sadrži željezo, ugljikov monoksid i cijanidne ligande, što im omogućuje učinkovit prijenos elektrona. [NiFe]-hidrogenaze su stabilnije, ali manje aktivne u odnosu na [FeFe]-hidrogenaze te pokazuju veću otpornost na kisik. [Fe]-hidrogenaze ili Hmd hidrogenaze sadrže jedinstveni željezni centar i ne ovise o niklu, što im omogućuje specifične katalitičke aktivnosti [35-38].

Mehanizam djelovanja hidrogenaza temelji se na vezanju molekularnog vodika na aktivno mjesto enzima, gdje dolazi do njegove disocijacije na protone i elektrone [39]. Elektroni se zatim transportiraju kroz niz kofaktora unutar enzima do konačnog akceptora elektrona, dok se protoni oslobađaju u okoliš [35]. Taj proces može biti reverzibilan, omogućujući sintezu bioH_2 . Izazovi u primjeni hidrogenaza uključuju njihovu osjetljivost na kisik i temperaturu, što ograničava njihovu industrijsku upotrebu. Stoga se intenzivno istražuju metode za poboljšanje njihove stabilnosti, uključujući inženjerstvo enzima i razvoj novih biokatalitičkih sustava prilagođenih za primjenu u održivim energetske sustavima [36].

Kombinacijom enzima glukoza dehidrogenaza (GDH) i enzima hidrogenaza, bioH_2 se može proizvesti i u biokatalitičkoj reakciji s glukozom kao supstratom pri čemu se reakcijski sustav temelji na jednostavnoj enzimskoj konverziji glukoze u glukonsku kiselinu uz paralelnu proizvodnju molekularnog vodika. Enzim GDH katalizira oksidaciju glukoze u glukono-1,5-lakton, koji se hidrolizira u glukonsku kiselinu, a kofaktor za ovu reakciju je NAD^+ ili NADP^+ , koji se pri tome reducira. Drugi enzim, hidrogenaza tolerantna na kisik (hidrogenaza), koristi kofaktor kao donor elektrona, što rezultira nastankom molekularnog vodika i, ne manje bitno, regeneracijom kofaktora (Slika 6) [3].



Slika 6. Shematski prikaz enzimatske proizvodnje bioH_2 iz glukoze katalizirane enzimom GDH i hidrogenaza

2.5 Čimbenici koji utječu na proizvodnju bioH₂

Učinkovitost prethodno navedenih procesa u proizvodnji bioH₂ najvećim dijelom ovisi o metaboličkim putevima organizama/enzima koji se koriste u procesu i izboru supstrata pri čemu je važno da je isti bogat ugljikohidratima. Nadalje, predobrada sirovina/supstrata, početna koncentracija supstrata, pH-vrijednost, temperatura, prisutnost nanočestica i mnogi drugi čimbenici također igraju važnu ulogu u optimizaciji procesa proizvodnje bioH₂ [18].

2.5.1.1 Utjecaj predobrade sirovina na proizvodnju bioH₂

Upotreba jednostavnih šećera poput glukoze i saharoze u proizvodnji bioH₂ relativno je dobro istražena, ali s ciljem dobivanja ekološki i ekonomski prihvatljivog procesa danas se sve više pozornosti posvećuje lignoceluloznoj biomasi kao održivom, obnovljivom i jeftinom supstratu. Lignoceluloza se sastoji od celuloze (33-55%), hemiceluloze (20-25%) i lignina (15-25%), a većinom potječe iz otpada poljoprivredne, prehrambene i drvne industrije. Unatoč brojnim prednostima proizvodnje bioH₂ iz lignoceluloznih materijala, komercijalizirana primjena još nije zaživjela jer je za oslobađanje jednostavnih šećera potrebna složena obrada. Obrada uključuje tri faze: prethodnu obradu, hidrolizu i po potrebi, pročišćavanje hidrolizata. Proces hidrolize lignoceluloze može se podijeliti na tri vrste i to na alkalnu, kiselu i ultrazvučno-potpomognutu hidrolizu [18]. Alkalna hidroliza rezultira koncentracijama 2,6 puta većim u usporedbi s procesom u kojem je proizvodnja provedena na materijalu bez predobrade, kiselinska hidroliza rezultira 3 puta većim koncentracijama bioH₂, a ultrazvučno-potpomognuta hidroliza u trajanju od 15 do 30 minuta povećava prinos bioH₂ za 75-88% [17].

2.5.1.2 Utjecaj koncentracije supstrata

Početna koncentracija supstrata važna je za proizvodnju bioH₂ jer prevelike početne vrijednosti često inhibiraju rast mikroorganizma/aktivnost enzima što se negativno odražava na sam proces. Kako bi se izbjegla inhibicija, mogu se koristiti šaržni reaktori s dotokom supstrata, smanjiti koncentracija samog supstrata ili u proces dodati bakterije (npr. *Enteroerobacter aerogenes*) koje smanjuju inhibiciju i stimuliraju mikrobiološku aktivnost proizvodnje bioH₂ [26].

2.5.1.3 Utjecaj pH-vrijednosti

Jedan od ključnih faktora za uspješnu proizvodnju bioH₂ je pH-vrijednost reakcijske smjese zbog toga što različiti mikroorganizmi imaju različitu aktivnost pri različitim

pH-vrijednostima. Mikroorganizmi koji sudjeluju u proizvodnji bioH_2 najčešće pokazuju najveću aktivnost pri pH-vrijednostima u rasponu od 5 do 8. pH-vrijednost manja od 5 može prepoloviti brzinu proizvodnje bioH_2 u odnosu na neutralnu početnu pH-vrijednost, dok se optimalnim pokazao pH 5,5 [15,17].

2.5.1.4 Utjecaj temperature na proizvodnju bioH_2

Temperatura značajno utječe na aktivnost mikroorganizama i enzima uključenih u proizvodnju bioH_2 . Istraživanja su pokazala da je optimalna proizvodnja bioH_2 u temperaturnom rasponu od 30 do 40 °C, pri čemu najbolje rastu bakterije ključne za ovaj proces, poput roda *Clostridium*. Osim što utječe na aktivnost mikroorganizama, temperatura također utječe i na sastav mikrobne populacije. Primjerice, pri temperaturama između 37 i 45°C dominira *Clostridium*, dok u rasponu temperatura 60-65 °C prevladava *Thermoanaerobacterium*, što rezultira povećanom proizvodnjom etanola [18].

Iznimno, u procesima koji se provode pomoću hipertermofilnih bakterija poput *Pyrococcus furiosus* i *Thermotoga maritima* značajan prinos bioH_2 zabilježen je i pri temperaturama većim od 80 °C. U fotofermentacijskim procesima optimalna je temperatura oko 25 °C, budući da temperature iznad 30 °C imaju značajan inhibicijski utjecaj na enzim nitrogenazu ljubičastih nesumpornih bakterija koje su najčešće korišteni mikroorganizmi u tom procesu [40].

2.5.1.5 Utjecaj ostalih čimbenika na proizvodnju bioH_2

Osim već spomenutih utjecaja, postoji još cijeli niz ostalih čimbenika koji mogu utjecati na proces proizvodnje bioH_2 kao što su primjerice dodatak nanočestica, različitih nutrijenata, metalnih iona, intenzitet svjetlosti, itd. Dodatkom nanočestica površina adsorpcije elektrona znatno raste pri čemu se povećava aktivnost enzima što za posljedicu ima povećan prinos bioH_2 . Primjerice, dodavanjem 20 nmol/dm³ srebrenih nanočestica prinos bioH_2 se povećao za 67,6% u odnosu na kontrolnu grupu u kojoj nanočestice nisu bile prisutne [40]. Prisutnost različitih nutrijenata i soli poput fosfora, dušika i sumpora može značajno utjecati na proces. Fosfatne soli djeluju kao katalizator, dok dušik i sumpor mogu imati i pozitivne i negativne učinke. Dušik služi kao nutrijent za rast bakterija, ali u prevelikim količinama u reakciji s vodikom daje amonijak (NH_3) što negativno utječe na pH ili može reagirati s kisikom stvarajući pri tome nitrite (NO_2^-) koji su toksični za mnoge mikroorganizme. Sumpor u obliku sulfata (SO_4^{2-}) iz procesnog prostora uklanja slabije elektron akceptore poput nitrata (NO_3^-) i nitrita (NO_2^-), ali redukcija sulfata (SO_4^{2-}) u sumporovodik (H_2S) tijekom fermentacije ima negativan utjecaj jer je sumporovodik toksičan za mnoge mikroorganizme [40].

U procesima fotofermentacije, intenzitet svjetlosti ima veliki utjecaj na proces, odnosno na aktivnost ljubičastih nesumpornih bakterija pri čemu te bakterije imaju najveći prinos na intenzitetu svjetlosti od 2500 do 5000 lx [15].

Dodavanje metalnih iona poput Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ni^{2+} i Fe-iona u tragovima također pospješuje reakcije tamne i foto fermentacije optimiziranjem djelovanja enzima i rasta mikroba [40].

3. Zaključak

BioH_2 se smatra gorivo budućnosti zbog svoje visoke energetske gustoće i niskih emisija, unatoč izazovima povezanim s infrastrukturom i visokom cijenom proizvodnje. Optimizacijom uvjeta provedbe procesa kao što su primjerice koncentracija supstrata, pH-vrijednost i temperatura, uz uključene metode predobrade supstrata i pravilan izbor radnih mikroorganizama, moguće je unaprijediti te procese uz postizanje većih prinosa te posljedično povećati ekonomske i ekološke prednosti proizvodnje i korištenja bioH_2 .

Projekcije za budućnost ukazuju na rast proizvodnje bioH_2 , razvoj infrastrukture i poboljšanja u ekonomičnosti i održivosti. S obzirom na globalne inicijative za smanjenje emisija stakleničkih plinova i sve veća ulaganja u obnovljive izvore energije, bioH_2 se ističe kao važan resurs za postizanje energetske održivosti.

Zahvala

Rad je izrađen u okviru projekta "Integrirani mikrosustav za enzimatsku proizvodnju biovodika (MicroBioH_2)" financiranog od Hrvatske zaklade za znanost (IP-2022-10-2175).

4. Literatura

- [1] Canuto, E.; Mazza, D.: Fossil fuel reserves and depletion: can they comply with CO_2 -emission pledges and targets, *Academia Letters*, **2** (2022), <https://doi.org/10.20935/AL5005>
- [2] Jeswani, H. K.; Chilvers, A.; Azapagic, A.: Environmental sustainability of biofuels: a review, *Proceedings of the Royal Society A*, **476** (2020) 20200351, <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0351>
- [3] Vičević, R.; Šalić, A.; Jurinjak Tušek, A.; Zelić, B.: Kinetic modelling of *Ralstonia eutropha* H16 growth on different substrates, *Sustainability*, **16** (2024) 10650, <https://doi.org/10.3390/su162310650>

- [4] Mona, S.; Kumar, S. S.; Kumar, V.; Parveen, K.; Saini, N.; Deepak, B.; Pugazhendhi, A.: Green technology for sustainable biohydrogen production (waste to energy): a review, *Science of the Total Environment*, **728** (2020) 138481, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138481>
- [5] Dash, S. K.; Chakraborty, S.; Roccotelli, M.; Sahu, U. K.: Hydrogen fuel for future mobility: Challenges and future aspects, *Sustainability*, **14** (2022) 8285, <https://doi.org/10.3390/su14148285>
- [6] Xie, Z.; Jin, Q.; Su, G.; Lu, W.: A review of hydrogen storage and transportation: Progresses and challenges, *Energies*, **17** (2024) 4070, <https://doi.org/10.3390/en17164070>
- [7] Sharma, S.; Agarwal, S.; Jain, A.: Significance of hydrogen as economic and environmentally friendly fuel, *Energies*, **14** (2021) 7389, <https://doi.org/10.3390/en14217389>
- [8] Luo, Z.; Hu, Y.; Xu, H.; Gao, D.; Li, W.: Cost-economic analysis of hydrogen for China's fuel cell transportation field, *Energies*, **13** (2020) 6522, <https://doi.org/10.3390/en13246522>
- [9] Machado, H.; Ferreira, A.C.; Teixeira, S.F.; Teixeira, J.C.: Green hydrogen value chain: Modelling of a PV power plant integrated with H₂ production for industry application, *Energies*, **17** (2024) 1414, <https://doi.org/10.3390/en17061414>
- [10] Arcos, J. M. M.; Santos, D. M. F.: The hydrogen color spectrum: Techno-economic analysis of the available technologies for hydrogen production, *Gases*, **3** (2023) 25-46, <https://doi.org/10.3390/gases3010002>
- [11] Arun, J.; Sasipraba, T.; Gopinath, K. P.; Priyadharsini, P.; Nachiappan, S.; Nirmala, N.; Dawn, S. S.; Chi, N. T. C.; Pugazhendhi, A.: Influence of biomass and nanoadditives in dark fermentation for enriched bio-hydrogen production: A detailed mechanistic review on pathway and commercialization challenges, *Fuel*, **327** (2022) 125112, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125112>
- [12] Ahmed, S.; F., Rafa, N.; Mofijur M.; Badruddin, I. A.; Inayat, A.; Ali, M. S.; Khan Y. T. M.: Biohydrogen production from biomass sources: Metabolic pathways and economic analysis, *Frontiers in Energy Research*, **9** (2021) 753878, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.753878>
- [13] Hutsol, T.; Glowacki, S.; Tryhuba, A.; Kovalenko, N.; Pustova, Z.; Rozkosz, A.; Sukmaniuk, O.: *Current Trends of Biohydrogen Production from Biomass–Green Hydrogen*, Libra-Print, Warsaw, (2021)
- [14] Sharma, R.; Garg, P.; Kumar, P.; Bhatia, S. K.; Kulshrestha, S.: Microbial fermentation and its role in quality improvement of fermented foods, *Fermentation*, **6** (2020) 106, <https://doi.org/10.3390/fermentation6040106>
- [15] Sarangi, P. K.; Nanda, S.: Biohydrogen production through dark fermentation, *Chemical Engineering & Technology*, **43** (2020) 601-612, <http://dx.doi.org/10.1002/ceat.201900452>
- [16] Ghimire A.; Frunzo L.; Pirozzi F.; Trabaly E.; Escudie R.; Lens P. N. L.; Esposito G.: A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: Process parameters and use of by-products, *Applied Energy*, **144** (2015) 73-95, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.045>
- [17] Jarunglumlert, T.; Prommuak, C.; Putmai, N.; Pavasant, P.: Scaling-up bio-hydrogen production from food waste: Feasibilities and challenges, *International Journal of Hydrogen Energy*, **43** (2017) 634-648, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.013>

- [18] Albuquerque, M. M.; Sartor, G. d. B.; Martinez-Burgos, W. J.; Scapini, T.; Edwiges, T.; Soccol, C. R.; Medeiros, A. B. P.: Biohydrogen produced via dark fermentation: A review, *Methane*, **3** (2024) 500-532, <https://doi.org/10.3390/methane3030029>
- [19] AlZohbi, G.: An overview of hydrogen energy generation, *ChemEngineering*, **8** (2024) 17, <https://doi.org/10.3390/chemengineering8010017>
- [20] Gupta, S.; Fernandes, A.; Lopes, A.; Grasa, L.; Salafranca, J.: Photo-fermentative bacteria used for hydrogen production, *Applied Sciences*, **14** (2024) 1191, <https://doi.org/10.3390/app14031191>
- [21] Dębowski, M.; Dudek, M.; Zieliński, M.; Nowicka, A.; Kazimierowicz, J.: Microalgal hydrogen production in relation to other biomass-based technologies—a review, *Energies*, **14** (2021) 6025, <https://doi.org/10.3390/en14196025>
- [22] Pankaj, K. R.; Singh, S. P.: Integrated dark- and photo-fermentation: Recent advances and provisions for improvement, *International Journal of Hydrogen Energy*, **41** (2016) 19957-19971, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.084>
- [23] Sharma, R. K.; Nazari, M. A.; Haydary, J.; Singh, T. P.; Mandal, S.: A review on advanced processes of biohydrogen generation from lignocellulosic biomass with special emphasis on thermochemical conversion, *Energies*, **16** (2023) 6349, <https://doi.org/10.3390/en16176349>
- [24] Pathy, A.; Nageshwari, K.; Ramaraj, R.; Maniam, G. P.; Govindan, N.; Balasubramanian, P.: Biohydrogen production using algae: Potentiality, economics and challenges, *Bioresource Technology*, **360** (2022) 127514, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127514>
- [25] Yang, E.; Mohamed, H. O.; Park, S. G.; Obaid, M.; Al-Qaradawi, S. Y.; Castaño, P.; Chae, K. J.: A review on self-sustainable microbial electrolysis cells for electro-biohydrogen production via coupling with carbon-neutral renewable energy technologies, *Bioresource technology*, **320** (2021) 124363, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124363>
- [26] Kovács, K. L.; Maróti, G.; Rákhely, G.: A novel approach for biohydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, **31** (2006) 1460-1468, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.06.011>
- [27] Leone, L.; Sgueglia, G.; La Gatta, S.; Chino, M.; Nastri, F.; Lombardi, A.: Enzymatic and bioinspired systems for hydrogen production, *International Journal of Molecular Sciences*, **24** (2023) 8605, <https://doi.org/10.3390/ijms24108605>
- [28] Ayodele, D. T.; Ogunbiyi, O. D.; Akamo, D. O.; Otun, K. O.; Akinpelu, D. A.; Adegoke, J. A.; Fapojuwo, D. P.; Oladoye, P. O.: Factors affecting biohydrogen production: Overview and perspectives, *International Journal of Hydrogen Energy*, **48** (2023) 27513-27539, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.001>
- [29] Bowien, B.; Kusian, B.: Genetics and control of CO₂ assimilation in the chemoautotroph *Ralstonia eutropha*, *Archives of Microbiology*, **178** (2002) 85-93, <https://doi.org/10.1007/s00203-002-0441-3>
- [30] Lubitz, W.; Ogata, H.; Rüdiger, O.; Reijerse, E.: Hydrogenases, *American Chemical Society*, **114** (2014) 4081-4148, <https://doi.org/10.1021/cr4005814>

- [31] Sohn, Y.J.; Son, J.; Jo, S.Y.; Park, S.Y.; Yoo, J.I.; Baritugo, K.A.; Na, J.G.; Choi, J.; Kim, H. T.; Joo, J.C.; Park, S.J.: Chemoautotroph *Cupriavidus necator* as a potential game-changer for global warming and plastic waste problem: A review, *Bioresource Technology*, **340** (2021) 125693, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125693>
- [32] Li, H.; Opgenorth, P. H.; Wernick, D. G.; Rogers, S.; Wu, T. Y.; Higashide, W.; Liao, J. C.: Integrated electromicrobial conversion of CO₂ to higher alcohols, *Science*, **335** (2012) 1596-1596, <https://doi.org/10.1126/science.1217643>
- [33] Poladyan, A.; Blbulyan, S.; Sahakyan, M.; Lenz, O.; Trchounian, A.: Growth of the facultative chemolithoautotrophy *Ralstonia eutropha* on organic waste materials: Growth characteristics, redox regulation and hydrogenase activity, *Microbial Cell Factories*, **18** (2019) 201, <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1251-5>
- [34] Fritsch, J.; Lenz, O.; Friedrich, B.: Structure, function and biosynthesis of O₂-tolerant hydrogenases, *Nature Reviews Microbiology*, **11** (2013) 106-114, <https://doi.org/10.1038/nrmicro2940>
- [35] Momirlan, M.; Veziroglu, T. N.: The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet, *International Journal of Hydrogen Energy*, **30** (2005) 795-802, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.10.011>
- [36] Vignais, P. M.; Billoud, B.: Occurrence, classification, and biological function of hydrogenases: An overview, *Chemical Reviews*, **107** (2007) 4206-4272, <https://doi.org/10.1021/cr050196r>
- [37] Hoekstra, A. S.; Bayley, J. P.: The role of complex II in disease, *Biochimica et Biophysica Acta*, **1827** (2013) 543-551, <https://doi.org/10.1016/j.bbabbio.2012.11.005>
- [38] Shima, S.; Pilak, O.; Vogt, S.; Schick, M.; Stagni, M. S.; Meyer-Klaucke, W.; Warkentin, E.; Rhauer, R. K.; Ermler, U.: The crystal structure of [Fe]-hydrogenase reveals the geometry of the active site, *Science*, **321** (2008) 572-575, <https://doi.org/10.1126/science.1158978>
- [39] Peters, H. W.; Schut, G. J.; Boyd, E. S.; Mulder, D. W.; Shepard, E. M.; Broderick, J. B.; King, P. W.; Adams, M. W. W.: [FeFe]- and [NiFe]-hydrogenase diversity, mechanism, and maturation, *Biochimica et Biophysica Acta*, **1853** (2015) 1350-1369, <https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2014.11.021>
- [40] Kanwal, F.; Torriero, A.A.J.: Biohydrogen—a green fuel for sustainable energy solutions, *Energies*, **15** (2022) 7783, <https://doi.org/10.3390/en15207783>

Izrada i opremanje geotermalnih bušotina – ključ za istraživanje i eksploataciju geotermalne vode u energetske svrhe

Nediljka Gaurina-Međimurec¹, Vladislav Brkić¹, Ljiljana Zornjak²,
Borivoje Pašić¹

¹Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pierottijeva 6, Zagreb

²Agencija za ugljikovodike, Miramarska 24, Zagreb

Sažetak: U Republici Hrvatskoj postoji duga tradicija istraživanja i korištenja geotermalnih voda u energetske svrhe tako da na njenom području već postoji određeni broj istražnih i eksploatacijskih bušotina kojima su utvrđeni značajni geotermalni potencijali, a temeljem geološko-geofizičkih studija koje ukazuju na postojanje dubokih vodonosnika lociraju se i izrađuju nove istražne bušotine. Trenutno se ulažu veliki naponi u daljnji razvoj geotermalnog energetskeg potencijala Republike Hrvatske pa su u tijeku brojni investicijski projekti čija realizacija će pridonijeti procesu zelene tranzicije, a koji obvezno uključuju izradu istražnih i razradnih/eksploatacijskih geotermalnih bušotina. U radu će biti prikazani trenutni istražni prostori i eksploatacijska polja geotermalne vode u energetske svrhe na području Republike Hrvatske, relevantni podaci iz geotermalnih bušotina te tehnologija izrade i opremanja geotermalnih bušotina.

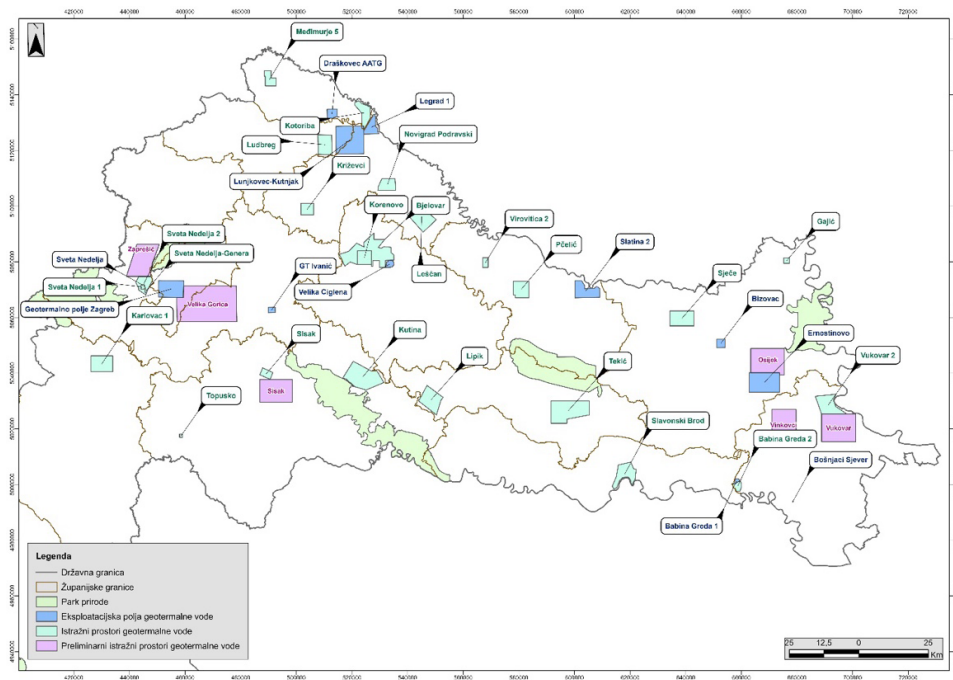
Ključne riječi: geotermalna voda u energetske svrhe, geotermalna bušotina, bušenje, proizvodno opremanje

1. Uvod

Posljednjih se godina u Republici Hrvatskoj bilježi sve veći interes za razvoj geotermalnih projekata i korištenje geotermalne energije u energetske svrhe. Rezultat je to prepoznate važnosti geotermalne energije kao energenta čija implementacija može značajno pridonijeti ostvarenju ciljeva zelene tranzicije i dekarbonizaciji energetskeg sektora Republike Hrvatske.

Geotermalni potencijal utvrđen je u brojnim bušotinama izrađenim u potrazi za ležištima nafte i plina, a mogućnosti uporabe geotermalne energije su brojne. Namjena

U Republici Hrvatskoj trenutno su dodijeljene 24 dozvole za istraživanje geotermalnih voda u energetske svrhe te je utvrđeno 12 eksploatacijskih polja geotermalne vode (EPGV) (Slika 1). Istražne naftno-rudarske aktivnosti nerijetko obuhvaćaju snimanje geofizičkih podataka te izradu geološko-geofizičkih studija na temelju kojih se lociraju i izrađuju nove istražne geotermalne bušotine ili obavljaju naftno-rudarski radovi u cilju potvrđivanja geotermalnog potencijala u postojećim bušotinama te njihova prenamjena u geotermalne.



Trenutno se u Republici Hrvatskoj provodi i važan projekt, projekt Razvoja geotermalnog potencijala za potrebe toplinarstva, koji za cilj ima integraciju geotermalne energije u postojeće centralne toplinske sustave na području 4 hrvatska grada. Projekt u ime Republike Hrvatske provodi Agencija za ugljikovodike, za koji su joj iz

Nacionalnog plana oporavka i otpornosti, dodijeljena sredstva od gotovo 50 milijuna eura. Cilj Projekta je utvrditi potencijal iskorištavanja geotermalne energije izradom i ispitivanjem po jedne istražne bušotine na 4 odabrana preliminarna istražna prostora: Velika Gorica, Osijek, Vinkovci i Zaprešić (Slika 1) [2].

Geotermalna energija je jedan od najperspektivnijih obnovljivih izvora energije u Republici Hrvatskoj, a kako bi se njezin potencijal u potpunosti iskoristio ključna je izrada i opremanje geotermalnih bušotina. Proces izrade i opremanja geotermalnih bušotina tehnički je složen i zahtijeva precizno planiranje, korištenje suvremene tehnologije te strogo pridržavanje sigurnosnih i ekoloških standarda.

2. Izrada geotermalnih bušotina

Naftno-rudarski projekti istraživanja geotermalnog energetskeg potencijala Republike Hrvatske te razrade i eksploatacije eksploatacijskih polja geotermalne vode obvezno uključuju izradu istražnih i razradnih/eksploatacijskih geotermalnih bušotina. Svrha izrade istražnih bušotina je utvrđivanje postojanja, položaja i oblika ležišta geotermalnih voda te količine i kakvoće rezervi geotermalnih voda, a razradnih/eksploatacijskih bušotina pridobivanje geotermalne vode u energetske svrhe.

2.1 Tehnologija izrade geotermalnih bušotina

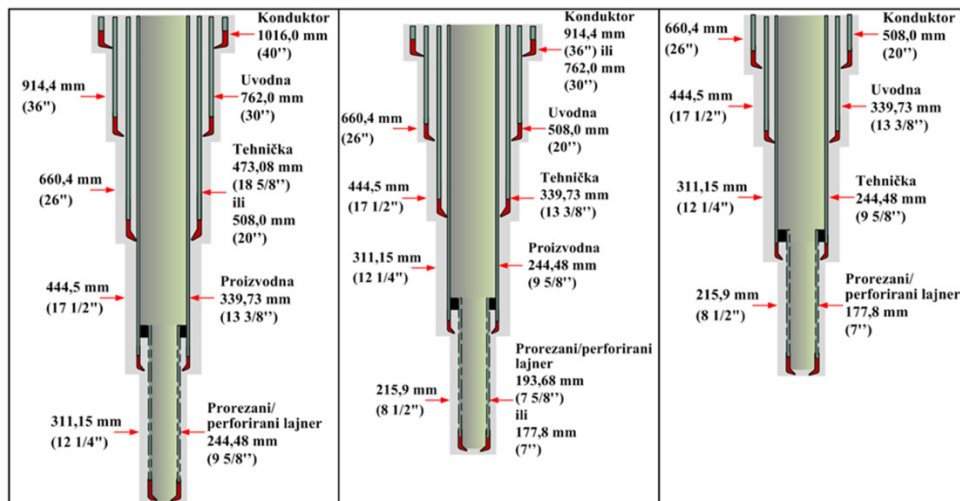
Izrada geotermalnih bušotina se konceptualno ne razlikuje od izrade naftnih/plinskih bušotina. Međutim, postoje određene razlike koje su specifične za izradu geotermalnih bušotina. To je prvenstveno visoka temperatura geotermalne vode koja utječe na: opremu koja se koristi, dizajn niza bušačkih alatki, odabir zaštitnih cijevi te dizajn sastava isplake i cementne kaše. Visoka temperatura određuje i metode kontrole tlaka u geotermalnim bušotinama za sprječavanje nekontroliranog ispuštanje fluida iz bušotine, koje se jako razlikuju od onih primijenjenih kod izrade naftnih bušotina. Geotermalne bušotine općenito su većeg promjera kako bi se omogućilo pridobivanje većih količina geotermalne vode, a time i više toplinske energije.

Tehnologija izrade razradne/eksploatacijske geotermalne bušotine ne razlikuje se od tehnologije izrade istražne geotermalne bušotine. Bušotina se izrađuje bušenjem stijena dlijetom od površine do predviđene konačne dubine (dno kanala) uz kontinuirano iznošenje krhotina razrušenih stijena na površinu cirkulacijom bušotinskog radnog fluida-isplake. Za izradu geotermalnih bušotina u pravilu se koriste žrvanjska i PDC dlijeta. Rotaciju dlijeta moguće je ostvariti s površine vrtačim stolom ili vršnim pogonom ili direktno dubinskim motorom koji se postavlja u niz bušačkih alatki neposredno iznad dlijeta. U praksi se pri izradi vertikalnih, a posebno pri izradi ho-

rizikalnih bušotina i usmjerenih bušotina velikog dosega sve češće koriste različiti upravljivi rotirajući sustavi [3, 4].

Bušenje počinje dlijetom najvećeg promjera, a za nastavak bušenja svakog sljedećeg intervala koriste se dlijeta manjeg promjera. Prema tome, s povećanjem dubine smanjuje se promjer dlijeta odnosno kanala bušotine i promjer zaštitnih cijevi koje se ugrađuju i međusobno spajaju u niz (kolonu).

Konstrukcija geotermalne bušotine uključuje ugradnju više kolona zaštitnih cijevi (konduktor, uvodna, tehnička, proizvodna) koje se nakon ugradnje cementiraju od dna do ušća. U dio kanala bušotine koji prolazi kroz geotermalno ležište obično se ugrađuje čelični proizvodni lajner (prorezani ili perforirani) koji se ne cementira. Ugradnjom lajnera štiti se otvoreni kanal od urušavanja. Primjeri nekih uobičajenih konstrukcija geotermalnih bušotina prikazani su na Slici 2.



Slika 2: Primjeri konstrukcija geotermalnih bušotina [5]

Općenito, odabir i dubina ugradnje kolona zaštitnih cijevi temelji se na geološkom profilu, gradijentu slojnog tlaka i tlaka frakturiranja stijena, slojnom fluidu, sigurnosnim koeficijentima, proračunima naprežanja, programiranim tehnološkim zahtjevima u najnepovoljnijim bušotinskim uvjetima te položaju i svojstvima ležišta geotermalne vode. Zaštitne cijevi moraju izdržati kombinirana naprežanja (uzdužna naprežanja te tlakove gnječenja i rasprskavanja).

Pri odabiru zaštitnih cijevi za geotermalne bušotine u obzir treba uzeti visoku temperaturu geotermalne vode uslijed koje se javljaju toplinska naprežanja u koloni zaštit-

nih cijevi. Visoka temperatura uzrokuje preveliko aksijalno naprezanje i smanjenje čvrstoće pri granici tečenja što dovodi do smanjenja otpornosti zaštitnih cijevi na gnječenje i rasprskavanje. Osim toga, smanjuju se tlačna i vlačna naprezanja koje zaštitne cijevi mogu izdržati bez da se plastično deformiraju. U geotermalne bušotine najčešće se ugrađuju zaštitne cijevi kvalitete čelika J-55 ili K-55 (na većim dubinama), N-80 i L-80 (zamjena za N-80 u prisustvu H_2S). U ekstremnim uvjetima može se koristiti i L-80 s kromom (9 Chrome L-80 i 13 Chrome L-80) [6]. Zaštitne cijevi kvalitete čelika K-55 izrađene su od niskougljičnog čelika koji je otporan na kombinirano djelovanje vlačnog naprezanja i korozije u prisutnosti vode i sumporovodika na svim radnim temperaturama. Zaštitne cijevi izrađene od čelika kvalitete L-80 su cijevi s ograničenom čvrstoćom pri granici tečenja te su velike tvrdoće i mogu podnijeti visoke temperature. Otporne su na sulfidno pucanje pod naprezanjem te se mogu koristiti u bušotinama u kojima su prisutne visoke koncentracije H_2S pri svim temperaturama [7].

Osim izbora zaštitnih cijevi, bitan je i pravilan odabir navojnih spojeva jer oni moraju zadržati čvrstoću i brtviti pri visokim temperaturama.

2.2 Isplaka za ispiranje geotermalnih bušotina

Isplaka namijenjena za ispiranje kanala geotermalne bušotine mora osigurati stabilnost bušotine, omogućiti hlađenje niza bušačih alatki i učinkovito čišćenje kanala od krhotina razrušenih stijena. Isplaka se dizajnira tako da sastavom i svojstvima odgovara uvjetima u kanalu bušotine, sastavu i svojstvima stijena kroz koje se buši, a da pritom bude ekonomski i ekološki prihvatljiva. Tijekom izrade svake bušotine koristi se nekoliko različitih tipova isplake. Za ispiranje geotermalnih bušotina trenutno se najčešće koriste isplake na bazi vode (bentonitne i polimerne), ali se može koristiti samo voda, aerizirana isplaka ili aerizirana voda te zrak i pjena [8, 9]. Pri izboru isplake za geotermalne bušotine treba imati na umu visoku temperaturu na dnu, mali ležišni tlak i prirodno raspucane ležišne stijene u koje se može tijekom bušenja gubiti isplaka. Troškovi saniranja zona gubljenja mogu iznositi i do 20 % od ukupne cijene izrade bušotine te jako utječu na ekonomičnost cijelog projekta pa su u mnogim slučajevima geotermalne bušotine napuštene zbog gubljenja cirkulacije isplake [9,10]. Ukoliko se tijekom bušenja kroz potencijalno ležište geotermalne vode pojavi gubljenje isplake u okolne stijene treba odmah pristupiti saniranju zona gubljenja kako bi se smanjili troškovi i spriječilo smanjenje prirodne propusnosti ležišnih stijena.

2.3 Cementacija geotermalnih bušotina

Nakon ugradnje do predviđene dubine, kolona zaštitnih cijevi se cementira protiskivanjem cementne kaše, kroz kolonu ili kroz bušaće šipke, u izacijevni prstenasti

prostor. Cementacijom se postiže učvršćenje ugrađene kolone zaštitnih cijevi, stabilnost kanala bušotine te sprječava komunikacija ležišnih fluida između probušenih stijena i njihova migracija prema površini. U geotermalnim bušotinama se obavezno od dna do ušća cementiraju uvodna, tehnička i proizvodna kolona zaštitnih cijevi. Pri cementiranju bušotina posebno mjesto pripada dizajnu cementne kaše jer visoke temperature u cirkulaciji na dnu bušotine djeluju na svojstva cementne kaše i cementnog kamena.

Cementne kaše za cementiranje geotermalnih bušotina najčešće su na bazi Portland cementa, a osim različitih aditiva za podešavanje njihovih svojstava, obvezno sadrže i kvarcno brašno (SiO_2) radi sprječavanja opadanja tlačne čvrstoće cementnog kamena na visokim temperaturama ($> 110^\circ\text{C}$) [9, 11]. Kod geotermalnih bušotina posebno treba voditi računa o kvaliteti cementacije kolona zaštitnih cijevi. Problem predstavlja eventualna prisutnost vode u prstenastom prostoru između dvije kolone zaštitnih cijevi koja je zaostala nakon cementacije. Tijekom eksploatacije geotermalne vode, volumen te zaostale vode povećava se zbog povećanja temperature i stvara značajan tlak na stijenke zaštitnih cijevi uslijed čega može doći do gnječenja unutarnje kolone ili do rasprskavanja vanjske kolone zaštitnih cijevi [7].

Za eksploataciju geotermalne vode, potrebna je najmanje jedna eksploatacijska bušotina u slučaju direktnog korištenja u toplinarstvu i poljoprivredi. U slučaju potrebe za većim količinama energije, bilo da se geotermalna voda koristi u svrhu proizvodnje električne energije ili u toplinarske svrhe, za učinkovito iskorištavanje potrebna je primjena najmanje jednog para bušotina od kojih je jedna bušotina eksploatacijska i služi za pridobivanje geotermalne vode, dok je druga bušotina utisna i služi za utiskivanje ohlađene geotermalne vode natrag u ležište s ciljem podržavanja ležišnog tlaka.

Nakon izrade bušotine i pozitivnog ishoda ispitivanja ležišta geotermalne vode, slijedi opremanje geotermalne bušotine u skladu s njenom namjenom. Geotermalne bušotine po svojoj namjeni mogu biti eksploatacijske, utisne ili mjerne bušotine, ovisno o proizvodnim karakteristikama ležišta i energetske potrebama krajnjih korisnika.

3. Opremanje geotermalnih bušotina

Projektiranje bušotine koja će biti korištena za pridobivanje geotermalne vode i iskorištavanje geotermalne energije odvija se paralelno s projektiranjem izrade bušotine kao naftno-rudarskog objekta, dok se sam postupak opremanja odvija nakon uspješno završene faze izrade bušotine te prethodi fazi pridobivanja geotermalne vode. Ovakav pristup neophodan je kako bi se postigao tehničko-tehnološki i sigurnosni optimum, te osiguralo ekonomski isplativo iskorištavanje geotermalne energije. Projektiranje opremanja bušotine uključuje postupke kao što su proračun sila i tlakova u sustavu tubinga i pakera, odabir podzemne i nadzemne opreme kao i metode uspostavljanja

komunikacije s ležištem geotermalne vode. U ovoj fazi potrebno je uzeti u razmatranje i potencijalne probleme koji se očekuju kod pridobivanja geotermalne vode, kao što su izdvajanje kamenca ili pojava korozije [12, 13], kako bi se potreba za remontnim radovima u budućnosti svela na minimum. Osim navedenog, vrlo bitan podatak za fazu projektiranja opremanja bušotine je i sama namjena bušotine, odnosno hoće li se bušotina koristiti za pridobivanje geotermalne vode (eksploatacijska bušotina), njeno zbrinjavanje nakon što se iskoristi toplina (utisna bušotina) ili za praćenje stanja i promjena u podzemlju (mjerna bušotina).

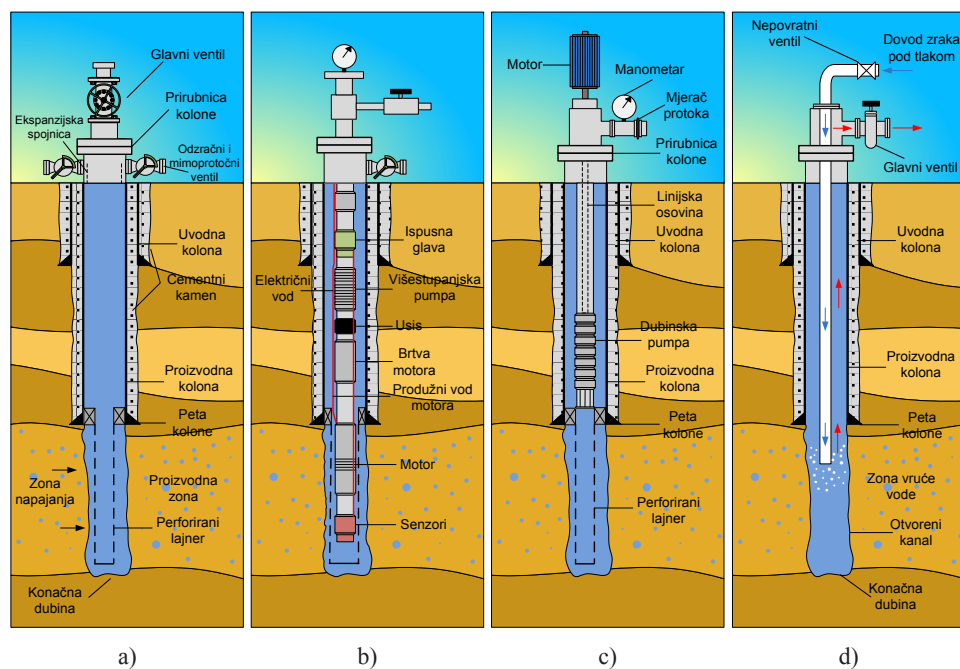
Sam postupak projektiranja opremanja geotermalnih bušotina sličan je postupku projektiranja opremanja bušotina za eksploataciju naftnih i plinskih ležišta, s iznimkom da se kod geotermalnih bušotina nastoji osigurati najveći mogu promjer bušotine za pridobivanje geotermalne vode što kod naftnih i plinskih bušotina nije slučaj. Pridobivanje geotermalne vode najčešće se odvija iz otvorenog kanala ili kroz lajner s prorezima ("slotirani lajner") i dalje prema površini kroz proizvodnu kolonu zaštitnih cijevi, čime se izbjegava trošak opremanja bušotine nizom proizvodnog tubinga.

3.1 Podzemna oprema geotermalnih bušotina

Primarno, način opremanja geotermalnih bušotina ovisi o ranije spomenutoj namjeni bušotine, ali i svojstvima ležišta geotermalne vode (dubini zalijeganja, propusnosti i poroznosti ležišnih stijena) te slojnom tlaku i temperaturi. Kod ležišta koja imaju dobru propusnost te relativno visoki ležišni tlak, pridobivanje se odvija eruptivnim načinom što podrazumijeva podizanje geotermalne vode do površine bez potrebe za sustavom prinudnog podizanja te ostvarivanje tlaka na ušću od minimalno 3 bar. Iako je kod geotermalnih ležišta ležišni tlak najčešće manji od hidrostatskog tlaka stupca hladne vode na određenoj dubini, visoka temperatura uzrokuje djelomično ili potpuno pretvaranje vode u paru, u samom ležištu ili unutar bušotine što uzrokuje smanjenje gustoće fluida i povećanje volumena, te tečenje prema površini. Na Slici 3a [14] shematski je prikazano proizvodno opremanje eruptivne geotermalne bušotine. Ovo je ujedno i najjeftiniji način pridobivanja geotermalne vode i iskorištavanja geotermalne energije jer se postiže najveći maseni protok vode u odnosu na druge sustave.

U slučaju da tlak u ležištu i bušotini nije dovoljan za savladavanje otpora protjecanju geotermalne vode prema površini, potrebno je ugraditi neki od sustava prinudnog podizanja fluida. Najčešće se za prinudno podizanje geotermalne vode koristi uronjena dubinska električna pumpa. Uronjena dubinska električna pumpa (ESP) sastoji se od sekcija statora i rotora, a njihov broj direktno ovisi o dubini s koje je potrebno pumpati geotermalnu vodu. Osim neophodnog tlaka za savladavanje otpora protjecanju geotermalne vode, na odabir pumpe utjecat će i željeni protok fluida, sastav slojnog fluida te njegova temperatura.

Za pogon pumpe koristi se elektro motor koji se ili postavlja neposredno ispod same pumpe kao dio dubinske proizvodne opreme bušotine (Slika 3b) [15] ili na vrhu proizvodne opreme (Slika 3c) [16]. U oba slučaja bušotinu je potrebno dodatno opremiti i nizom proizvodnog tubinga kroz koji će se pumpati geotermalna voda prema površini, te električnim/kontrolnim vodovima i senzorima kod sustava s dubinskim pogonom odnosno sustavom klipnih šipki unutar niza tubinga kod pogona s površine. Potrebno je imati u vidu da se geotermalnu bušotinu može inicijalno opremiti dubinskom uronjenom električnom pumpom, ili naknadno ukoliko se za tim pokaže potreba. U potonjoj varijanti, potrebno je računati i na potencijalno manje protoke, jer će dizajn sustava ovisiti o postojećoj konstrukciji bušotine odnosno promjerima prethodno ugrađenih i zacementiranih nizova zaštitnih cijevi.



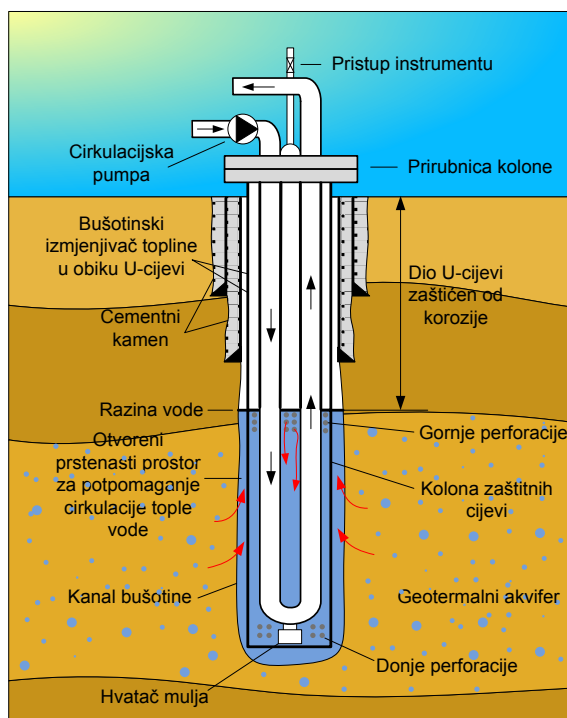
- eruptivna geotermalna bušotina (prilagođeno prema [14])
- geotermalna bušotina opremljena eklektičnom uronjenom dubinskom pumpom i dubinskim pogonom (prilagođeno prema [15])
- geotermalna bušotina opremljena eklektičnom uronjenom dubinskom pumpom i pogonom s površine (prilagođeno prema [16])
- geotermalna bušotina opremljena sustavom sa zračnim podizanjem (prilagođeno prema [17])

Slika 3: Proizvodno opremanje geotermalnih bušotina [14 -17]

Za prinudno pridobivanje geotermalne vode na površinu može se koristiti energija komprimiranog zraka koji se kroz posebni vod malog promjer utiskuje ispod razine vode u bušotini (Slika 3d) [17]. Miješanjem komprimiranog zraka i geotermalne

vode nastaje mješavina manje gustoće koja omogućava iznošenje mješavine na površinu. Zrak kao radni fluid moguće je zamijeniti s dušikom kako bi se izbjegli problemi vezani uz taloženje minerala u pojedinim dijelovima sustava te pojava kisikove korozije. Nažalost, ovo povećava operativne troškove.

Osim geotermalnih sustava koji funkcioniraju na direktnom iskorištavanju topline geotermalnog fluida koji se dovodi na površinu kroz namjenski izrađenu bušotinu, postoji i sustavi koji indirektno koriste toplinu preko dubinskih (bušotinskih) izmjenjivača topline. Sustav podrazumijeva ugradnju "U" cijevi u bušotinu kroz koju cirkulira radni fluid te odvodi toplinu iz bušotine prisilnom konvekcijom, dok se toplina iz ležišta dovodi u bušotinu konvekcijom i kondukcijom (Slika 4) [17]. Ovakvo tehničko-tehnološko rješenje za iskorištavanje geotermalnih ležišta je svakako ekološki prihvatljivije od ranije prezentiranih rješenja jer ne postoji potreba za zbrinjavanjem pridobivene slojne vode. Također valja istaknuti da postoje i poboljšani geotermalni sustavi gdje se primjenom metode hidrauličkog frakturiranja povećava propusnost ležišta kao i kontaktna površina koja je neophodna kako bi se osigurao veći prijenos topline sa stijenske mase na fluid koji protječe [18, 19].



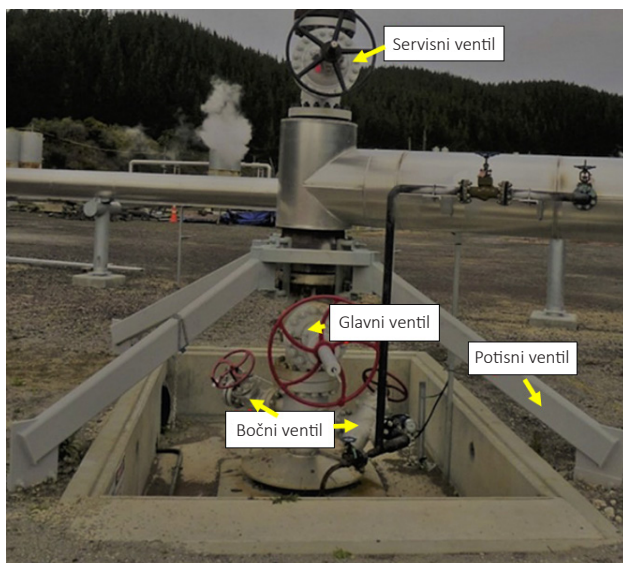
Slika 4: Shematski prikaz geotermalne bušotine s dubinskim (bušotinskim) izmjenjivačem topline (prilagođeno prema [17])

Kao što je to ranije spomenuto, osim eksploatacijskih bušotina na eksploatacijskom geotermalnom polju mogu se nalaziti i utisne i mjerne bušotine, osim kod iskorištavanja geotermalne energije preko dubinskog (bušotinskog) izmjenjivača topline kada one nisu potrebne. Utiskivanje pridobivene geotermalne vode neophodno je u situacijama kada pridobivena geotermalna voda svojim kemijskim sastavom i fizikalnim svojstvima ne zadovoljava minimalne kriterije za površinsko odlaganje, ali i radi održavanja slojnog tlaka unutar geotermalnog ležišta. Bušotina za utiskivanje pridobivene geotermalne vode može biti posebno projektirana i izrađena u tu svrhu, ali isto tako može biti i prenamijenjena eksploatacijska bušotina. Utiskivanje ohlađene geotermalne vode može biti pod djelovanjem gravitacije što je s ekonomskog stajališta i najpovoljnija opcija, a po potrebi ohlađenu geotermalnu vodu može se utiskivati i pomoću pumpi instaliranih na površini.

Mjerne bušotine koriste se za praćenje parametara kao što su tlak, razina vode, temperatura i kemijski sastav, odnosno svih onih parametara koji su bitni za sigurno operativno funkcioniranje cijelog sustava. U pravilu se u ovu svrhu koriste bušotine koje su prethodno bile eksploatacijske, kako bi se izbjegao dodatan trošak bušenja i opremanja mjerne bušotine.

3.2 Površinska oprema geotermalnih bušotina

Slično kao i kod eksploatacijskih naftnih i plinskih bušotina, i eksploatacijske geotermalne bušotine potrebno je opremiti odgovarajućom nadzemnom opremom. U fazi opremanja, geotermalna bušotina se oprema odgovarajućim erupcijskim uređajem koji se postavlja na ušće bušotine, i čije tehničke karakteristike i kvaliteta materijala moraju odgovarati specifičnim uvjetima pridobivanja, odnosno izdržati sva naprezanja kojima bi on mogao biti izložen. Ušće bušotine se sastoji od prirubnica koje uključuju vješalice za odsjedanje ugrađenih nizova zaštitnih cijevi i po potrebi tubinga. Za razliku od naftnih i plinskih bušotina, površinska oprema često uključuje i ekspanzijsku spojnicu, koja omogućava vertikalni pomak proizvodne kolone zaštitnih cijevi uslijed promjene temperature, dok se postavljanje bočnih ventila na prstenastom prostoru izbjegava zbog učestale pojave propuštanja u tom dijelu. Erupcijski uređaj se standardno sastoji od glavnog ventila za zatvaranje bušotine, križnog komada, krilnog ventila za reguliranje protoka te pokrovne prirubnice s dodatnim ventilom (servisnim) za obavljanje remontnih radova te instaliranim manometrom na vrhu (Slika 5) [5]. Često se preko krilnog ventila postavlja mimoprotočni vod, koji osigurava minimalni protok iz bušotine preko bušotinske glave, kako bi se spriječila promjene temperature i hlađenje bušotinske glave tijekom obustave rada bušotine [12].



Slika 5: Površinska oprema geotermalne bušotine [5]

4. Korištenje geotermalne vode

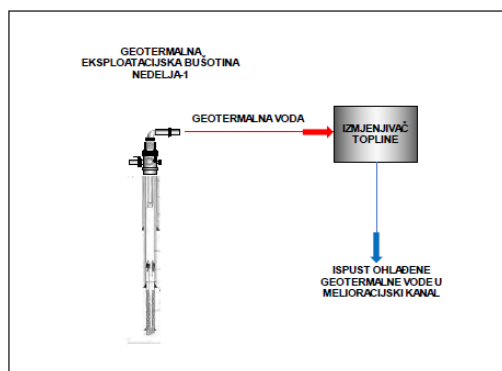
Geotermalna voda može se koristiti za proizvodnju električne i toplinske energije (za grijanje stambenih zgrada, poslovnih prostora, staklenika, te za sušenje voća i povrća). Geotermalni sustavi omogućuju i hlađenje i grijanje što je još jedna značajna prednost u odnosu na druge obnovljive izvore energije.

Pridobivanje i iskorištavanje geotermalne vode može biti kroz njenu direktnu upotrebu i kroz njeno korištenje upotrebom dubinskih izmjenjivača topline. Direktnom upotrebom topla voda (para) se iz bušotine koristi izravno uz odgovarajući površinski tehnološki sustav, ali ovisno o njenom kemijsko-fizikalnom sastavu, potrebno ju je vratiti natrag u ležište kroz drugu utisnu bušotinu s čime se dodatno podržava ležišni tlak. Upotreba dubinskih izmjenjivača topline se zasniva na korištenju proizvodne kolone zaštitnih cijevi za cirkulaciju vode koja se zagrijava i zatim pridobiva kroz uzlazni proizvodni niz, što omogućuje proizvodnju topline pomoću samo jedne bušotine (sistem cijev u cijevi).

4.1 Korištenje geotermalne vode za grijanje staklenika

Korištenje geotermalne energije za grijanje staklenika prikazano je na primjeru eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju geotermalne vode “Sveta

Nedelja” (EPGV “Sveta Nedelja”). Pridobivanje geotermalne vode se obavlja iz jedne eksploatacijske bušotine mehaničkim podizanjem fluida dubinskom centrifugalnom sisaljkom. Pridobivena geotermalna voda se od ušća bušotine otprema, kroz toplinski izoliran cjevovod, do izmjenjivača topline, u kojem se toplina geotermalne vode više temperature u primarnom krugu prenosi na tehnološku vodu niže temperature u sekundarnom krugu, kojom se zagrijevaju grijači elementi i grije prostor objekta korisnika (Slika 6) [20]. Izmjenjivač topline se sastoji od niza paralelnih ploča te prolaza za protok fluida, pri čemu dolazi do konvekcijskog prijenosa topline. Nakon iskorištavanja topline geotermalne vode, ista se putem priključnog cjevovoda ispušta u melioracijski kanal [20].

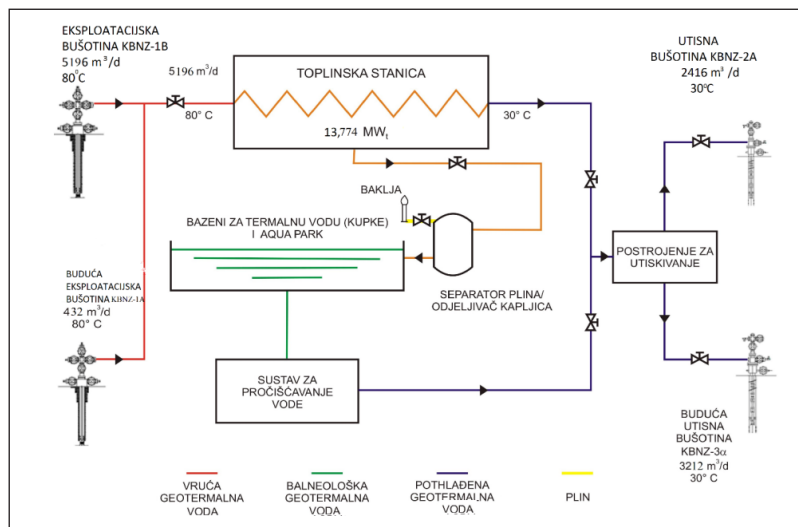


Slika 6: Tehničko-tehnološka shema pridobivanja geotermalne vode na EPGV “Sveta Nedelja” [20]

4.2 Korištenje geotermalne vode za grijanje i zagrijavanje prostora

Korištenje geotermalne vode za grijanje i zagrijavanje prostora prikazano je na primjeru nedovršene Kliničke bolnice Novi Zagreb (lokalitet Blato) koje se obavlja u zatvorenom eksploatacijsko-utisnom sustavu koji se sastoji od ukupno sedam bušotina, međutim trenutno je samo jedna bušotina u funkciji eksploatacije geotermalne vode, dok je druga bušotina utisna [21]. Voda se koristiti za grijanje montažnih zgrada pomoću izmjenjivača topline tj. toplinske stanice. Kada dođe do povećanja eksploatacijskih količina vode, za što je potrebno priključenje novih potrošača, tada će se dodatno koristiti dva para eksploatacijsko-utisnih bušotina. U tom smislu Ministarstvo zdravstva je izradilo projektni zadatak koji predviđa stvaranje uvjeta priključenja i isporuka geotermalne vode iz geotermalnog polja Zagreb prema Nacionalnoj dječjoj bolnici u Blatu koja se planira graditi na lokalitetu Blato te bi se na taj način postiglo ekonomski povoljnije grijanje od onog koje bi imala priključenjem na CTS – Centralni toplinski sustav grada Zagreba. U izradu specifikacije za priključenje navedenog objekta na geotermalnu vodu je uključen i Rudarsko-geološko-naftni fakul-

tet Sveučilišta u Zagrebu. Također u planu je izgradnja termalne rivijere. Tehnološki sustav mora sadržavati i separator plina – odjeljivač kapljica i sustav za pročišćavanje vode prije njenog povratka u ležište kroz utisne bušotine (Slika 7) [21].



Slika 7. Tehničko-tehnološka shema sportsko-rekreacionog centra Blato [21]

4.3 Korištenje geotermalne vode za proizvodnju električne energije – geotermalne elektrane

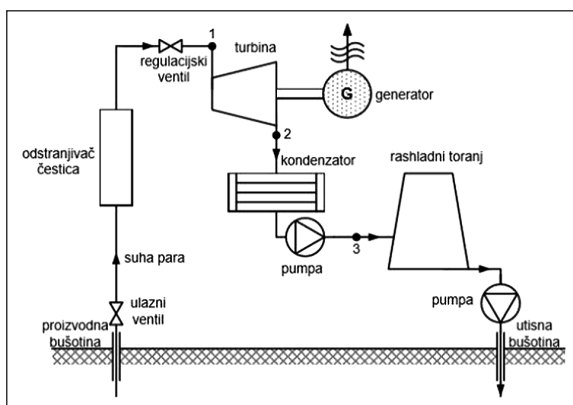
Geotermalne elektrane (geoelektrane) rade kontinuirano, neovisno o vremenskim uvjetima te mogu nadomjestiti proizvodnju električne energije u nedostatku drugih obnovljivih izvora energije. Postoje dvije glavne tehnologije za iskorištavanje geotermalne vode za proizvodnju električne energije, suha para i binarni ciklus.

4.3.1 Suha para (engl. *Flash steam*)

Ova metoda koristi vruću vodu iz geotermalnih ležišta koja su pod visokim tlakom. Pridobivanjem vode na površinu i smanjenjem tlaka dio tekućine se pretvara u paru koja pokreće turbine za proizvodnju struje. U ovakvim elektranama (Slika 8) suha para se direktno dovodi cjevovodom iz bušotine do elektrane, te se prvo usmjerava na odstranjivač čestica koji filtrira i uklanja nečistoće. Zatim dolazi do ekspanzije pare do kondenzatorskog tlaka. Ekspanzija pare pogoni turbinu, a ona pokreće generator koji proizvodi električnu energiju. Kada završi ekspanzija pare, para odlazi u kon-

denzator gdje se odvija kondenzacija, nakon čega je potrebno ohladiti kondenzat u rashladnom tornju. Završna faza nakon kondenzacije pare i hlađenja kondenzata je ta da se voda od rashladnog tornja pomoću crpki utiskuje natrag u geotermalno ležište kroz utisnu bušotinu [22].

Ohlađena voda se može koristiti kaskadno tj. da se preostala toplina prije povratka u ležište predaje potrošačima kao što su stambene zgrade, poslovni prostori, plastenici / staklenici u slučaju njihove blizine i rentabilnosti.



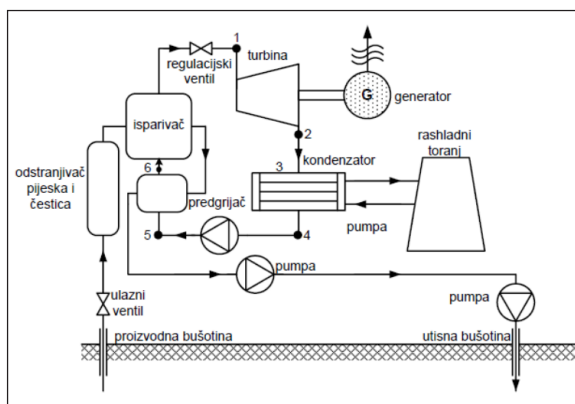
Slika 8: Geotermalna elektrana na suhu paru [22]

4.3.2 Binarni ciklus

Geotermalna ležišta koja imaju niže temperature za nastajanje pare (ispod 150 °C) koriste binarni ciklus za proizvodnju električne energije. Kod geoelektrana s binarnim ciklusom ključnu ulogu imaju izmjenjivači topline koji prenose toplinu geotermalnog izvora iz primarnog kruga radnom fluidu koji ima nisku kritičnu temperaturu, a nalazi se u sekundarnom krugu. Radni fluid mora imati dobra termodinamička svojstva, kao lako hlapljivi fluidi npr. propan, amonijak, ugljikovodici, izobutan. Radni fluid prima toplinu geotermalnog fluida, dolazi do njegovog isparavanja te ekspanzije u turbini koja pokreće generator te on proizvodi električnu energiju. Nakon toga, radni fluid odlazi u kondenzator te se u tekućem stanju vraća u isparivač. Geotermalni fluid koji je predao toplinu zatim se vraća natrag u geotermalno ležište kroz utisnu bušotinu.

Organski Rankineov ciklus (ORC) prikazan na Slici 9 predstavlja proces prijenosa topline geotermalnog fluida na radni fluid (sekundarni fluid). Veća iskoristivost i efikasnost od binarnog ciklusa postignuta je korištenjem tzv. Kalina procesa. Radni

fluid je zamijenjen mješavinom amonijaka i vode. Takva mješavina je temperaturno jako slična temperaturi fluida iz geotermalnog izvora. Veća iskoristivost se postiže na način da mješavina amonijaka i vode može ispariti pri različitim temperaturama, dok se u Rankineovu procesu isparavanje i kondenzacija odvijaju pri konstantnoj temperaturi. Upravo je to razlog veće učinkovitosti Kalina ciklusa koji dovodi toplinu pri većoj temperaturi, a odvodi toplinu pri manjoj temperaturi u odnosu na Rankinea [22].



Slika 9: Geotermalna elektrana s binarnim ciklusom (ORC) [22]

Organski Rankineov ciklus (ORC) općenito je prihvaćen kao održiva tehnologija za pretvaranje geotermalne energije niske do srednje temperature u električnu energiju [23].

U praksi, referentna tehnologija za pretvaranje geotermalne energije u električnu energiju je podkritični jednostavni ORC sustav. Tijekom vremena razvijene su geotermalne ORC elektrane sa složenijim konfiguracijama (arhitekturama). Osnovna podjela naprednih konfiguracija postrojenja je na ORC sustave s dvostrukim tlakom i dvostrukim stupnjem [23].

Bez obzira o kojoj se od navedenih tehnologija proizvodnje električne energije radilo, država treba definirati poticajnu kvotu korištenja geotermalne energije (MW) kroz tzv. *Integrirani nacionalni energetske i klimatski plan do 2030. godine* radi daljnjeg razvoja ovog resursa kao i donošenje tržišnih premija (potpora) radi poticanja proizvodnje električne energije iz geotermalnih izvora zbog održivosti projekata tj. investicije.

5. Geotermalne bušotine u Republici Hrvatskoj

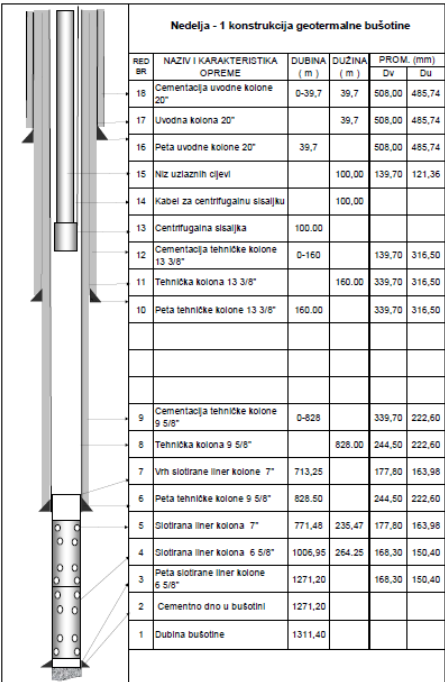
Geotermalna energija se u Republici Hrvatskoj koristi za različite namjene, u svrhu hidroponskog uzgoja rajčica te za grijanje bazena, stambenih jedinica i poslovnih prostora. Naša jedina geotermalna elektrana s binarnom tehnologijom (ORC) Velika 1 snage 16,5 MW koja se nalazi u Velikoj Cigleni kraj Bjelovara koristila je geotermalnu vodu za proizvodnju električne energije od ožujka 2019. do svibnja 2023. Nažalost, geotermalna elektrana Velika 1 je 2023. godine prestala s radom [24].

Konstrukcija eksploatacijskih geotermalnih bušotina je takva da omogućuje stabilno pridobivanje geotermalne vode u kontroliranim uvjetima. U bušotine je ugrađeno više kolona zaštitnih cijevi (konduktor, uvodna, tehnička, proizvodna/lajner) do različitih dubina te različitih kvaliteta čelika i njihovih nominalnih težina. Shematski prikaz konstrukcije eksploatacijske geotermalne bušotine prikazan je na primjeru bušotine “Nedjelja-1” (Slika 10).

U Tablici 1 su prikazani relevantni podaci eksploatacijskih geotermalnih bušotina iz kojih se geotermalna energija koristi za različite namjene, dok su tehnički podaci o ugrađenim zaštitnim cijevima geotermalnih eksploatacijskih bušotina prikazani u Tablicama 2. – 4.

Tablica 1: Relevantni podaci eksploatacijskih geotermalnih bušotina u Republici Hrvatskoj

EPGV	“Sveta Nedjelja” [20]	“Geotermalno polje Zagreb” 21]	“Velika Ciglena” [25, 26]
Naziv bušotine/skraćeni naziv	Nedjelja-1 (N-1)	Klinička bolnica Novi Zagreb-1B (KBNZ-1B)	Velika Ciglena-1 (VC-1)
Trajektorija bušotine	Vertikalna	Usmjerena	Vertikalna
Dubina bušotine (m)	1 311,4	1 374,0 (1 065,9 vert.)	3 405,0
Ležište	Karbonati	Dolomiti	Dolomiti
Krovina/podina ležišta (m)	832,0 - 1 280,0	1 217,0 - 1 374,0 (959,0 - 1 066 vert.)	2 576,0 - 3 188,0
Temperatura ležišta (°C)	71,1	80	175
Tlak ležišta (bar)	103,2	104,0	301,8
Način opremanja	Centrifugalna sisaljka	Eruptivno	Eruptivno
Protok geotermalne vode (l/s)	25	50	80
Temperatura na ušću (°C)	63	80	166
Uporaba geotermalne energije	Grijanje staklenika	Grijanje poslovnih prostora	Proizvodnja električne energije



Slika 10: Shematski prikaz konstrukcije bušotine Nedelja-1 (N-1) s ugrađenom proizvodnom opremom [20]

Tablica 2: Tehnički podaci o ugrađenim zaštitnim cijevima eksploatacijske geotermalne bušotine “Nedelja-1” [20]

Zacjevljenje	Promjer kolone mm (")	Kvaliteta čelika	Jedinična težina kolone N/m (lb/ft)	Dubina ugradnje (m)	Cementacija
Uvodna kolona	508,0 (20)	H-40	1371,8 (94,0)	0,0 – 39,7	Do ušća
I. tehnička kolona	339,7 (13 3/8)	J-55	1050,8 (72,0)	0,0 – 160,0	Do ušća
II. tehnička kolona	244,5 (9 5/8)	J-55	583,7 (40,0)	0,0 – 828,0	Do ušća
Lajner kolona	177,8 (7)	J-55	291,9 (20,0)	713,3 – 1 006,9	Nije cementirano
	168,0 (6 5/8)	J-55	350,3 (24,0)	1 006,9 – 1271,2	Nije cementirano

Tablica 3: Tehnički podaci o ugrađenim zaštitnim cijevima eksploatacijske geotermalne bušotine “Klinička bolnica Novi Zagreb – 1B” [21]

Zacjevljenje	Promjer kolone mm (")	Kvaliteta čelika	Jedinična težina kolone N/m (lb/ft)	Dubina ugradnje (m)	Cementacija
Uvodna kolona	508,0 (20)	H-40	1371,8 (94,0)	0,0 – 53,0	Do ušća
I. tehnička kolona	339,7 (13 3/8)	H-40	700,5 (48,0)	0,0 – 199,0	Do ušća
Proizvodna kolona	244,5 (9 5/8)	H-40	471,4 (32,3)	0,0 – 1 132,0 (0,0 – 901,2 vert.)	Do ušća
Lajner kolona	177,8 (7)	H-40	291,9 (20,0)	1 114,7 – 1 217,3 (890,2 – 959,0 vert.)	Nije cementirano

Tablica 4: Tehnički podaci o ugrađenim zaštitnim cijevima eksploatacijske geotermalne bušotine “Velika Ciglena-1” [25, 26]

Zacjevljenje	Promjer kolone mm (")	Kvaliteta čelika	Jedinična težina kolone N/m (lb/ft)	Dubina ugradnje (m)	Cementacija
Uvodna kolona	508,0 (20)	J-55	1371,8 (94,0)	0,0 – 147,1	Do ušća
I. tehnička kolona	339,7 (13 3/8)	J-55	992,4 (68,0)	0,0 – 1 362,0	Do ušća
II. tehnička kolona	244,5 (9 5/8)	N-80	583,8-685,9 (40,0-47,0)	0,0 – 2 574,4	Do ušća
Lajner kolona	177,8 (7)	J-55	379,4 (26,0)	2 574,4 – 4 043,4	Nije cementirano

6. Zaključak

Geotermalna energija je na razini Europske unije prepoznata kao obnovljivi izvor energije ključan za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima, dekarbonizaciju sektora grijanja i hlađenja, ali i kao ključni element u postizanju ciljeva smanjenja emisija stakleničkih plinova u budućnosti.

Republika Hrvatska dokazano ima veliki geotermalni potencijal u području Panonskog bazena, koji je nažalost do sada bio slabo korišten. Osim svijetlih primjera poput iskorištavanja geotermalne energije za grijanje staklenika, sportsko-rekreacijskih objekata ili prve geotermalne elektrane Velika 1, do unatrag nekoliko godina nije postojala sustavna strategija na razini države za iskorištavanje postojećeg geotermalnog potencijala.

Za razliku od iskorištavanja plitkih geotermalnih resursa, iskorištavanje dubljih geotermalnih resursa zahtjeva veća financijska ulaganja kao i naftno-geološka znanja i iskustva koje svakako Republika Hrvatska ima s obzirom na višedesetljetnu tradiciju eksploatacije ugljikovodika na kopnu i moru. Unatoč znanju i iskustvu, zbog specifičnosti eksploatacije geotermalne vode, nužno je usvajanje novih tehnologija koje bi trebale osigurati brže iskorištavanje ovog prirodnog resursa na siguran i isplativ način.

Investicije u istraživanje i eksploataciju geotermalnih resursa, koje provode domaće i strane tvrtke te lokalne zajednice, pokazuju atraktivnost korištenja geotermalnih izvora. Međutim, za proizvodnju električne energije nužno je definirati adekvatnu kvotu kroz Integrirani nacionalni energetske i klimatski plan za razdoblje od 2021. do 2030. godine radi daljnjeg razvoja ovog resursa kao i donošenje tržišnih premija (potpora) radi poticanja proizvodnje električne energije iz geotermalnih izvora.

7. Literatura

- [1] Agencija za ugljikovodike (2023.): Plan razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske do 2030. godine, *Dostupan na*: <https://mingo.gov.hr/o-ministarstvu-1065/djelokrug/uprava-za-energetiku-1999/naftno-rudarstvo-i-geotermalne-vode-za-energetske-svrhe/plan-razvoja-geotermalnog-potencijala-rh/8315>, *Pristupljeno*: 2025-02-14
- [2] <https://www.azu.hr/hr-hr/npoo-projekti/>, *Pristupljeno*: 2025-02-14
- [3] Gaurina-Medimurec, N.; Pašić, B.; Mijić, P.: Nove tehnologije izrade naftnih i plinskih bušotina. *Godišnjak Akademije tehničkih znanosti Hrvatske 2016.*, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske (HATZ), (2017.), 101-128
- [4] Hudoletnjak, M.; Gaurina-Medimurec, N.: Razvoj rotirajućih upravljivih sustava za bušenje i njihova primjena u praksi, *Nafta i Plin*, **39** (2019) 159–160, 73-82
- [5] Gaurina-Medimurec, N.: Elaborat o tehnologiji izrade i opremanja geotermalnih bušotina i mogućim utjecajima izrade bušotina na okoliš (dio Strateške studije procjene utjecaja na okoliš Plana razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske), Zagreb, 2020. *Dostupan na* <https://www.azu.hr/hr-hr/zastita-okolisa/studije/>, *Pristupljeno*: 2025-03-03
- [6] Teodoriu, C.; Falcone, G.: Comparing completion design in hydrocarbon and geothermal wells: The need to evaluate the integrity of casing connections subject to thermal stresses, *Geothermics*, **38** (2009) 2, 238-246, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.11.006>
- [7] Torres, A.: Challenges of Casing Design in Geothermal Wells. *Proceedings of Asia Pacific Drilling Technology Conference*, Bangkok, Thailand, 25.-27. August 2014. (IADC/SPE-170480-MS) 13, <https://doi.org/10.2118/170480-MS>
- [8] Hole, H.: Drilling Fluids for Drilling of Geothermal Wells, Petroleum Engineering Summer School, Workshop, Dubrovnik, Croatia. 26 June 9 – 13, (2008.), 1-8

- [9] Gaurina-Medimurec, N.; Pašić, B.; Mijić, P.; Medved, I.: Drilling Fluid and Cement Slurry Design for Naturally Fractured Reservoirs, *Applied Sciences-Basel*, **11** (2021) 2, 767, 1-31, <https://doi.org/10.3390/app11020767>
- [10] Saleh, F. K.; Teodoriu, C.; Ezeakacha, Ch. P.; Salehi, S.: Geothermal Drilling: A Review of Drilling Challenges with Mud Design and Lost Circulation Problem, *Proceedings of 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 1-8, Stanford University, Stanford, California, February 10-12, (2020) SGP-TR-214
- [11] Gaurina-Medimurec, N.; Matanović, D.; Krklec, G.: Cementne kaše za cementiranje geotermalnih bušotina, *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, **6** (1994) 1, 127-134, <https://hrcak.srce.hr/13715>
- [12] Thorhallsson, S.: *Geothermal Well Operation and Maintenance*. The United Nations University, Geothermal Training Programme, IGC2003 Short Course, September 2003., 1-3, 11-12, 23. 48 12.
- [13] Karlsdottir, S. N.; Thorbjornsson, I. O.: Hydrogen Embrittlement and Corrosion in High Temperature Geothermal Well, *Proceedings of NACE International Conference & Expo – CORROSION 2012*, Salt Lake City, Utah, March 11 (2012).
- [14] Zarrouk S. J.; Mclean, K.: *Geothermal Well Test Analysis: Fundamentals, Applications and Advanced Techniques*. Academic Press, Elsevier, 978-0-12-819266-5 (2019), <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02723-4>
- [15] Elezović, I.; Škrlec, M.; Kolbah, S.: Konstrukcije proizvodnih geotermalnih bušotina u Hrvatskoj, *Nafta i plin*, **38** (2018) 155, 60-78, <https://hrcak.srce.hr/209327>
- [16] Niyazi, A.: Optimization of downhole pump setting depths in liquid dominated geothermal systems: a case study on the Balcova-Narlıdere field, Turkey, *Geothermics*, **36** (2007) 5, 436-458
- [17] Thain, I.; Reyes, A. G.; Hunt, T.: *A Practical Guide to Exploiting Low Temperature Geothermal Resources*, GNS Science Report 2006/09., 2006., 76p.
- [18] Louis Jr. C.; Huh, M.; Swanson, R.; Raymond, D. W.; Finger, J. T.; Mansure, A.; Polsky, Y.; Knudsen, S. D.: *Enhanced Geothermal Systems (EGS) Well Construction Technology Evaluation Report*, Sandia Report (SAND2008-7866) December 2008, <https://doi.org/10.2172/947299>
- [19] McSpadden, A. R.; Coker, O. D.; Bohlander, S.: Closed-Loop Geothermal Well Design with Optimization of Intermittent Circulation and Thermal Soak Times, *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas, USA, October 3-5 (2022.), <https://doi.org/10.2118/210307-MS>
- [20] Projekt razrade i eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju geotermalne vode „Sveta Nedelja“, EKO PLODOVI d.o.o. (2019.), 152.
- [21] Projekt razrade i eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju geotermalne vode „Geotermalno polje Zagreb“, GPC INSTRUMENTATION PROCESS d.o.o. (2020.), 194.

- [22] Šljivac, D.; Topić, D.: *Obnovljivi izvori električne energije*, sveučilišni udžbenik, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera, 978-953-6032-96-9, Osijek (2018.), 199.
- [23] Mustapić, N.; Brkić, V.; Duić, Ž.; Kralj, T.: Thermodynamic Optimization of Advanced Organic Rankine Cycle Configurations for Geothermal Energy Applications, *Energies*, **15** (2022) 19, 6990, 34, <https://doi.org/10.3390/en15196990>
- [24] https://energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=en&c=HR&stacking=stacked_absolute_area&interval=year&legendItems=jy7&year=2023, *Pristupljeno: 2025-02-02*
- [25] Dopunski rudarski projekt eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju „Velika Ciglena“ (Prva dopuna), GEOen d.o.o. (2017.)
- [26] Rudarski projekt eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju „Velika Ciglena“, GEOen d.o.o (2012.)

Smanjenje ugljičnog otiska u metalurškoj praksi: kritične / strateške sirovine i energetska učinkovitost peći

Zdenka Zovko Brodarac¹, Ladislav Lazić¹

¹Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Aleja narodnih heroja 3, 44000 Sisak

Sažetak: Industrijska proizvodnja vođena je zahtjevima za poboljšanjem kvalitete proizvoda i smanjenjem troškova proizvodnje. Unutar ovih zahtjeva cjelovito upravljanje resursima pa tako i energijom igra važnu ulogu. Izazovi zakonodavstva Europske unije i odnedavno političko-ekonomske situacije, povezani s fluktuacijama na tržištu, preusmjerili su pozornost proizvođača na sirovine i energiju. Sirovine se nalaze na početku svih industrijskih lanaca vrijednosti. Kritične (CRM) i strateške sirovine (SRM) nezamjenjivi su ulazni parametar u metalurškoj praksi za širok skup strateških sektora uključujući obnovljivu energiju, digitalnu industriju, svemirski i obrambeni sektor, ali i zdravstveni sektor. Ključ dobre financijske i ekološke prakse ogleda se u energetske učinkovitosti metalurških postrojenja poboljšanjem učinkovitosti iskorištenja goriva. Najveći potrošači energenata u metalurškoj proizvodnji su industrijske peći. Postoje mnoge mogućnosti za optimizaciju energetske učinkovitosti i smanjenje emisije onečišćujućih tvari nastalih izgaranjem goriva. Suočenoš s navedenim izazovima nameće odabir najboljih raspoloživih tehnika (NRT) s obzirom na: performanse, energetske učinkovitost, niske emisije i nisko održavanje, uzimajući u obzir investicijske troškove.

U ovom radu naglasak je na potencijalu smanjenja ugljičnog otiska korištenjem NRT s dva aspekta utjecaja: primjenom sekundarnih sirovina i poboljšanjem energetske učinkovitosti peći u metalurškoj praksi.

Ključne riječi: ugljični otisak, kritične / strateške sirovine, energetska učinkovitost, NRT, metalurgija

1. Metalurgija kroz koncept Industrija 5.0 / Društvo 5.0

Na razvoj metalurgije u Republici Hrvatskoj utječe reprezentativan trokut utjecajnih čimbenika (*Triple Helix*): poslovni sektor, znanstvenoistraživački kapaciteti i javna

politika, koji je u novije vrijeme evaluirao na *Quadruple* s medijskom i kulturološkom javnošću te *Quintuple Helix* s okolišom ili prirodnim okruženjem. Stoga *Quintuple Helix* ima potencijal poslužiti kao analitički okvir za održivi razvoj i društvenu ekologiju, konceptualnim povezivanjem znanja i inovacija s okolišem [1-4]. Održivo znanje je znanje koje se odražava na održivi razvoj kroz “eko-inovacije” i “eko-poduzetništvo”. Pritom, naglasak je na najboljim raspoloživim tehnikama u smislu raspona mogućnosti smanjenja ugljičnog otiska i poboljšanja energetske učinkovitosti u metalurškoj praksi.

Metalurgija kao znanost o dobivanju i primjeni metala i njihovih legura podrazumijeva izučavanje cijelog spektra fenomena, procesa i svojstava. Suvremena metalurgija je specifično polje koje se bavi dizajnom, razvojem i karakterizacijom materijala od onih svakodnevnih koji nas okružuju u našim domovima, radnim mjestima, ali i materijala s posebnim zahtjevima za specifične namjene poput onih za automobilsku ili svemirsku industriju, medicinu, ali i atraktivnu IT industriju. Pritom je važan segment i primjena suvremenih proizvodnih tehnologija uz uvažavanje uporabe i zbrinjavanja otpada te smanjenja emisija iz proizvodnih procesa. Metalurška proizvodnja smatra se jednim od glavnih pokretača razvoja svjetske ekonomije. Proizvodnja metala i metalnih proizvoda u zemljama Europske unije zasniva se na proizvodima visoke kvalitete, inovativnim proizvodima i tehnološkom razvoju te učinkovitosti i iskustvu. Poduzeća iz promatrane djelatnosti prvenstveno moraju usmjeriti svoje proizvodne kapacitete na zemlje Europske unije, što ujedno znači i povećanje razine produktivnosti imovine i radne snage, kako bi se moglo parirati stranoj konkurenciji, a sve uvažavajući ekološki pristup [5-6].

Koncept Industrije 4.0 podrazumijevao je digitalizaciju, automatizaciju i robotizaciju te umrežavanje svih funkcija poduzeća kroz primjenu informacijskih i komunikacijskih tehnologija za upravljanje proizvodnim i poslovnim procesima i pritom stvaranje pametnih tvornica. Osnovni cilj je isticanje na tržištu poboljšanjem kvalitete, snižavanjem troškova i fleksibilizacije proizvodnje. Uz sveprisutno otuđenje, povratak osnovnim načelima izgradnje pravednog i naprednog društva kroz Društvo 5.0 novu transformaciju donosi i Industrija 5.0 koja je više “antinidustrijska”. Europska komisija je u prosincu 2021. godine uvela koncept Industrije 5.0 s jačanjem uloge i većim doprinosom društvu te postavljanjem naglaska i izvan ciljeva učinkovitosti i produktivnosti. Industrija 5.0 postavlja u središte proizvodnog procesa dobrobit radnika (Društvo 5.0.) uz primjenu novih tehnologija s ciljem podizanja prosperiteta društva s prevladavanjem ekonomske komponente i poštivanjem preporuka za proizvodnju u svrhu zaštite bioraznolikosti i smanjenja nepoželjnog utjecaja industrije na klimatske promjene. Industrija 5.0 / Društvo 5.0 podržava model kružne ekonomije / proizvodnje i promovira proizvodne tehnologije koje učinkovitije iskorištavaju prirodne resurse. Takvim pristupom jača se otpornost poslovanja i konkurentnost poduzeća. Digitalizacija društva i gospodarstva intenzivirat će se u tekućem desetljeću, kako u EU-u, tako i na ostalim tržištima u kojima djeluju hrvatska poduzeća. Važan

segment digitalne tranzicije gospodarstva je olakšana primjena naprednih tehnologija te ulaganje u istraživanje, razvoj i inovacije. Inovacija je primjena nove i poboljšane ideje, postupka, dobra, usluge, procesa koja donosi nove koristi ili kvalitetu u primjeni. U širem smislu riječi, inovacija je svaki zahvat kojim se smanjuju ulazni troškovi, a povećava produktivnost, poboljšava kvaliteta proizvoda ili usluga, povećava sigurnost, smanjuje otpad, odnosno svaka mjera koja vodi ka porastu konkurentnosti [7-9]. Napredne tehnologije poput internet stvari (IoT), umjetnu inteligenciju (UI), poslove temeljene na analizi velikih skupova podataka, tehnologiju virtualne i proširene stvarnosti, 3D ispis, strojno učenje, robotiku i sl., sastavni su dio društvenih i gospodarskih aktivnosti stoga mogu transformirati tradicionalne načine poslovanja i potaknuti stvaranje novih proizvoda i usluga.

Primjena koncepta Industrija 5.0 / Društvo 5.0 u metalurgiji iziskuje implementaciju naprednih tehnologija, najboljih raspoloživih tehnika (NRT) u svim segmentima proizvodnje poput valorizacije uloge i učinka kritičnih (engl. *Critical Raw Materials* – CRM) i strateških sirovina (engl. *Strategic Raw Materials* – SRM) te energetskog aspekta proizvodnih procesa. Industrija 5.0 uz suvremene koncepte proizvodnje, automatizaciju i digitalizaciju proizvodnih procesa na osnovu obrade baza podataka rezultata iz znanstvenoistraživačkih i razvojnih aktivnosti omogućava jednostavnu i brzu tranziciju i prilagodbu metalurške prakse Društvu 5.0.

2. Uloga kritičnih i strateških sirovina u metalurgiji

Sastavni dio naprednih tehnologija čine kvantitativno i kvalitativno sirovine bez čije dostupnosti je cijeli lanac vrijednosti doveden u pitanje. Pristup sirovinama ključan je za razvoj i funkcioniranje gospodarstva Europske unije [10-11]. Identificiran je niz neenergetskih i nepoljoprivrednih sirovina koje se smatraju kritičnima zbog njihove velike gospodarske važnosti i izloženosti velikom riziku za sigurnost opskrbe jer je izvor opskrbe koncentriran u nekoliko trećih zemalja. Kritične sirovine imaju ključnu ulogu u ostvarivanju zelene i digitalne tranzicije te s obzirom na njihove primjene u obrambenom i zrakoplovno-svemirskom programu, očekuje se da će u narednim desetljećima potražnja za njima eksponencijalno rasti. Istodobno, povećava se rizik od poremećaja u opskrbi zbog sve većih geopolitičkih napetosti i konkurencije u području sirovina. Ukoliko povećana potražnja ne poluči kvalitetan odgovor u izvorima sirovina i tehnologijama proizvodnje i prerade, ista bi mogla imati negativne posljedice za okoliš i društvo.

Većina kritičnih sirovina su metali, koji se mogu beskonačno reciklirati uz ponekad smanjenje kvalitete. Time se prakticira kružno gospodarstvo u kontekstu zelene tranzicije, dok se istodobno povećava dostupnost kritičnih sirovina i time doprinosi sigurnosti opskrbe. Iako svjedočimo naglom rastu potražnje za kritičnim sirovinama za nove tehnologije, u kojoj će primarno eksploatacija i dalje biti glavni izvor sirovina,

recikliranjem bi se sve više smanjivala potreba za primarnom eksploatacijom i s njom povezani troškovi, ali i posljedice. Pritom je nužno inzistirati na održavanju visoke razine EU kapaciteta za recikliranje preko čvrstog tržišta sekundarnih kritičnih sirovina [12-15]. Međutim, danas su stope recikliranja većine kritičnih sirovina niske, a otpad, nakon završetka životnog vijeka, kao što su baterije, električna i elektronička oprema te vozila šalju se većinom na recikliranje u treće zemlje. Sustavi i tehnologije recikliranja često nisu prilagođeni posebnostima tih sirovina. Inovacije imaju važnu ulogu u smanjenju potrebe za kritičnim sirovinama, smanjenju rizika od nestašice u opskrbi i razvoju tehnologija recikliranja kako bi se na odgovarajući i siguran način vadile kritične sirovine iz otpada. Stoga su nužne europske i nacionalne mjere kružnosti [14-15].

Uredbe EU 1252 i 1735 predviđaju osiguravanje mjera kružnosti kroz strateške i nacionalne programe s ciljem:

- poticanja tehnološkog napretka i učinkovitosti uporabe resursa radi smanjenja očekivanog povećanja potrošnje kritičnih sirovina u EU;
- promicanja sprečavanja nastanka otpada i povećanja ponovne uporabe kao i popravka proizvoda i dijelova s relevantnim potencijalom uporabe kritičnih sirovina;
- povećanja sakupljanja, razvrstavanja i obrade otpada s relevantnim potencijalom uporabe kritičnih sirovina, uključujući viškove metala i usmjeravanja otpada u odgovarajući sustav recikliranja radi maksimalnog povećanja dostupnosti i kvalitete materijala koji se može reciklirati kao ulazni materijal u postrojenjima za recikliranje kritičnih sirovina;
- povećanja uporabe sekundarnih kritičnih sirovina, među ostalim i mjerama kao što su uzimanje u obzir recikliranog sadržaja u kriterijima za dodjelu u vezi s javnom nabavom ili financijskim poticajima za uporabu sekundarnih kritičnih sirovina;
- povećanja tehnološke zrelosti tehnologija recikliranja kritičnih sirovina i promicanja kružnog dizajna, učinkovitosti sirovina te zamjenu kritičnih sirovina u proizvodima i primjenama, uključivanjem mjera potpore u nacionalne istraživačke i inovacijske programe;
- osiguranja uspostavljenih mjera kojima se radnoj snazi omogućuje stjecanje vještina potrebnih za podupiranje kružnosti lanca vrijednosti kritičnih sirovina, uključujući mjere za usavršavanje i prekvalifikaciju;
- promicanja prilagodbe financijskih doprinosa koje proizvođač mora platiti u skladu sa svojim obvezama proširene odgovornosti proizvođača na temelju na-

cionalnog prava, a u skladu s člankom 8. stavkom 1. Direktive 2008/98/EZ, kako bi se na taj način poticalo da proizvodi sadržavaju veći udio sekundarnih kritičnih sirovina oporabljenih iz otpada recikliranog u skladu s relevantnim okolišnim standardima EU;

- poduzimanja potrebnih mjera kojima se osigurava da kritične sirovine koje se izvoze nakon što su prestale biti otpad ispunjavaju relevantne uvjete u skladu s Direktivom 2008/98/EZ i drugim relevantnim pravom EU;
- podupiranja primjene standarda kvalitete EU za postupke recikliranja koji sadržavaju kritične sirovine.

Granice sustava primarnih kritičnih sirovina čine eksploatacija, koncentracija i rafiniranje kao faze životnog ciklusa proizvoda, koji se mogu provesti kroz procese proizvodnje metala iz primarnih i sekundarnih sirovina:

- primarna proizvodnja metala: prijevoz rude, koncentrata i sirovina u vozilima koja su u vlasništvu organizacije; skladištenje rude, koncentrata i sirovina; drobljenje i čišćenje rude; proizvodnja koncentrata sirovine;
- proizvodnja metala iz primarnih i sve više zamjenskih, sekundarnih sirovina: eksploatacija metala, kemijskim, fizičkim ili biološkim postupcima; taljenje; oplemenjivanje metala; čišćenje troske; rafiniranje metala; elektroliza metala; lijevanje; obrada nusproizvoda (troske).

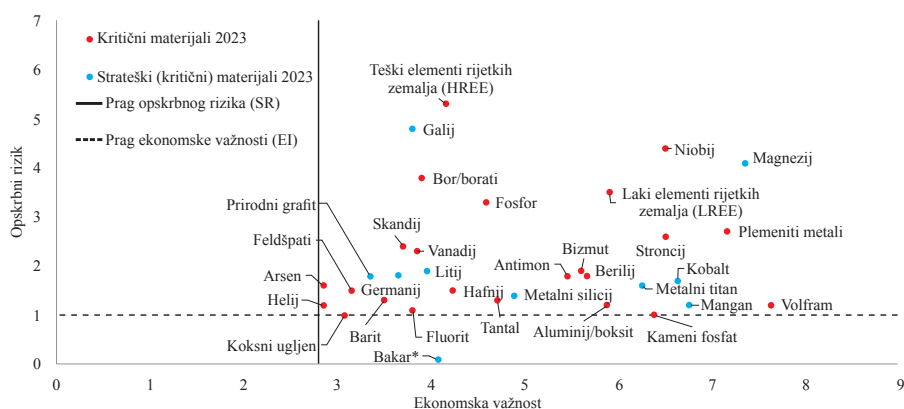
Kritične sirovine (CRM) su one sirovine koje su ekonomski i strateški važne za europsko gospodarstvo, ali imaju visok rizik povezan s njihovom opskrbom. Korišteni u tehnologijama za zaštitu okoliša, potrošačkoj elektronici, zdravstvu, proizvodnji čelika, obrani, istraživanju svemira i zrakoplovstvu, ovi materijali nisu samo “kritični” za ključne industrijske sektore i buduće primjene, već i za održivo funkcioniranje europskog gospodarstva. Važno je napomenuti da ti materijali nisu klasificirani kao “kritični” jer se ti materijali smatraju rijetkima, već su klasificirani kao “kritični” jer postoji nedostatak održivih zamjena, zbog vrlo jedinstvenih i pouzdanih svojstava ovih materijala za postojeće, kao i buduće primjene [18-19]. CRM imaju:

- značajnu gospodarsku važnost za ključne sektore u europskom gospodarstvu, kao što su potrošačka elektronika, ekološke tehnologije, automobilska industrija, zrakoplovstvo, obrana, zdravstvo i čelik;
- visok rizik opskrbe zbog vrlo visoke ovisnosti o uvozu i visoke razine koncentracije postavljenih kritičnih sirovina u pojedinim zemljama.

Osim visokog rizika povezanog s njihovom opskrbom, kritične sirovine toliko su važne jer su “kritične” za mega-sektore EU i za širok raspon komercijalnih i vladinih

aplikacija: zelena tehnologija, telekomunikacije, istraživanje svemira, snimanje iz zraka, zrakoplovstvo, medicinski uređaji, mikroelektronika, transport, obrana i drugi proizvodi i usluge visoke tehnologije. Kao rezultat toga, industrija EU, okoliš te kvaliteta i suvremeni način života ovise o pristupu i korištenju ovih kritičnih sirovina [16-19].

Godine 2023. Europska komisija izradila je svoj peti (5.) popis kritičnih sirovina na temelju kriterija ekonomske važnosti i rizika opskrbe [19]. Jedna od novosti popisa za 2023. godine je uvrštavanje strateških sirovina (SRM). Ova posebna kvalifikacija temelji se na interesu Europske komisije da se usredotoči na one sirovine koje se koriste u strateškim sektorima kao što su obnovljiva energija, digitalne, svemirske i obrambene tehnologije te za one za koje je vjerojatno da će stvoriti rizike opskrbe u bliskoj budućnosti. Ekstrakcija i obrada CRM-a može imati negativne utjecaje na okoliš, ovisno o metodama i procesima koji se koriste, kao i društvene učinke. Najvažnijim sirovinama poput baznih metala kao što su aluminij, bakar, olovo, nikal, kositar i cink trguje se na burzama. U posljednje vrijeme razvoj gospodarstava u nastajanju i širenje ključnih pokretačkih tehnologija diktiraju potražnju za sirovinama. Proizvođači reagiraju na dostupnost CRM i SRM, kao i na fluktuacije cijena stvaranjem zaliha, pregovaranjem o dugoročnim ugovorima ili zaštitom od cijena. Nedavna Studija o kritičnim sirovinama za EU 2023 [19] predstavlja procjenu kritičnih sirovina za EU: 70 sirovina koje se sastoje od 67 pojedinačnih materijala i tri grupe materijala: deset teških (HREE – *Heavy Rare Earth Elements*) i pet lakih (LREE – *Light Rare Earth Elements*) elemenata rijetkih zemalja i pet metala platinske skupine (PGM – *Platinum Group Metals*) i ukupno 87 pojedinačnih sirovina. Rezultati procjene kritičnih sirovina u EU prikazani su grafom na Slici 1 i Tablicom 1 [19].

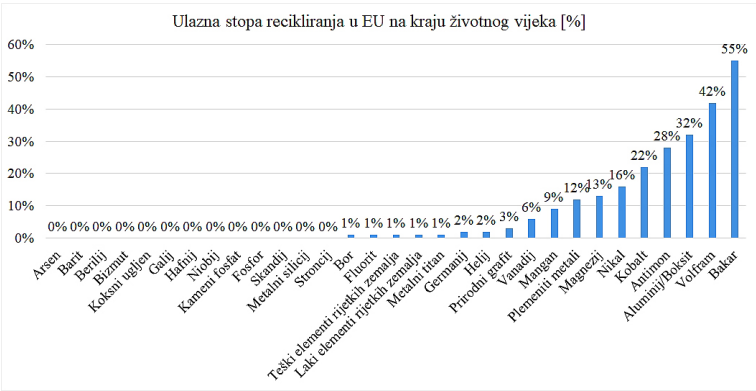


Slika 1: Procjena kritičnih sirovina u EU u 2023. godini [19]

Tablica 1: Kritične sirovine (CRM) i strateške sirovine (SRM) u EU prema procjeni iz 2023. godine [19]

2023 Kritične sirovine CRM		2023 Strateške sirovine (SRM)
Aluminij/boksit	Fluorit	<i>Kobalt</i>
Antimon	Hafnij	<i>Galij</i>
Arsen	Helij	<i>Germanij</i>
Barit	Niobij	<i>Litij</i>
Berilij	Plemeniti metali	<i>Magnezij</i>
Bizmut	Stroncij	<i>Mangan</i>
Bor/borati	Fosfor	<i>Prirodni grafit</i>
Koksni ugljen	Tantal	<i>Metalni silicij</i>
Feldšpati	Skandij	<i>Metalni titan</i>
Kameni fosfat	Volfram	<i>Bakar*</i>
Teški elementi rijetkih zemalja (HREE)	Vanadij	<i>Nikal*</i>
Laki elementi rijetkih zemalja (LREE)		

Od iznimnog je značaja zamjena primarnih sirovina sekundarnima kroz postupke oporabe i recikliranja. EU sve više podiže udio kružnog gospodarstva korištenjem sekundarnih sirovina u ukupnom opsegu proizvodnje, kako je prikazano Slikom 2. Više od 50% legura na bazi željeza, cinka ili platine se reciklira i pokrivaju više od 25% potrošnje u EU [19]. Međutim, sekundarna proizvodnja legura korištenih u tehnologijama obnovljivih izvora energije ili visokotehnološkim aplikacijama, kao što su elementi rijetkih zemalja, galij ili indij, ima samo marginalni doprinos.



Slika 2: Ulazna stopa recikliranja u EU na kraju životnog vijeka (EoL-RIR) [19]

2.1 Smanjenje ugljičnog otiska zamjenom primarnih sirovina sekundarnima istraživanjima kritičnih (CRM) i strateških sirovina (SRM): primjer istraživanja AlSi9Cu3(Fe) i primjena u metalurškoj praksi

Povećanje ulazne stope recikliranja i time smanjenja ugljičnog otiska proizvodnje oslanja se na najbolje raspoložive tehnike (NRT) iz pojedinih sektora proizvodnje željeznih i neželjeznih legura, industrijskim emisijama, ali i obradi otpada [20-28]. Primjeri dobre prakse u metalurškoj proizvodnji u implementaciji kružnog gospodarstva, oslanjaju se na dugogodišnju znanstvenoistraživačku suradnju s gospodarstvom, s ciljem primjene NRT i poboljšanja kvalitete proizvoda. Iz prepoznavanja potreba za visokokvalitetnim istraživanjima i visokom razinom tehnološke spremnosti (TRL6 → TRL9) zajedničkih projekata proizašlo je idejno rješenje, provedba i implementacija Centra za ljevarstvo – SIMET [6]. Usporedno su provedena istraživanja poput zamjene primarnih sirovina sekundarnima s rezultatima na visokoj razini znanstvene i stručne verifikacije [29-35], ali i primijenjena u proizvodnom procesu s ciljem direktnog utjecaja na smanjenje ugljičnog otiska.

Primjer istraživanja AlSi9Cu3(Fe) i primjene u metalurškoj praksi ogleda se u zamjeni primarnih sirovina sekundarnima na bazi aluminijske legure koje prema Studiji pripadaju u skupinu kritičnih materijala [19]. Proučavana je uobičajena primjena sekundarne sirovine u konvencionalnim ljevaonicama koja se oslanja na vlastiti povrat (otpad) kojim se garantira 0% ugljičnog otiska sirovine. Kontrolirane značajke poput kemijskog sastava i razine nečistoća omogućavaju dodavanje veće količine aluminijskog otpada iz povrata u ponovnu proizvodnju aluminijskih legura [36-39]. Ispitivana AlSi9Cu3(Fe) legura primjenjuje se u transportnoj industriji s naglaskom na automobilsku industriju za sigurnosno-kritične komponente zahvaljujući visokoj čvrstoći i istezanju te otpornosti na puzanje, napetosnu i integranularnu koroziju, dobroj zavarivosti, strojnoj obradivosti ali i visokoj žilavosti u toplinski obrađenom stanju. Aluminijske legure općenito su karakterizirane niskom gustoćom zbog čega pronalaze sve veću ulogu u zamjeni masivnijih proizvoda od željeznih legura, a čime doprinose direktno smanjenju mase konačnog proizvoda (automobila). Time se smanjuje ugljični otisak automobila u njegovoj primjeni zahvaljujući smanjenoj energetske potrebi za pogon i upravljanje. Višestruko pretapanje važan je aspekt u produljenju životnog vijeka materijala. Pri konvencionalnoj primjeni određenog udjela sekundarne sirovine u sirovini uočeno je da kemijski sastav legure odgovara zahtjevima normi, ali i uz određena smanjenja mehaničkih svojstava [40-42].

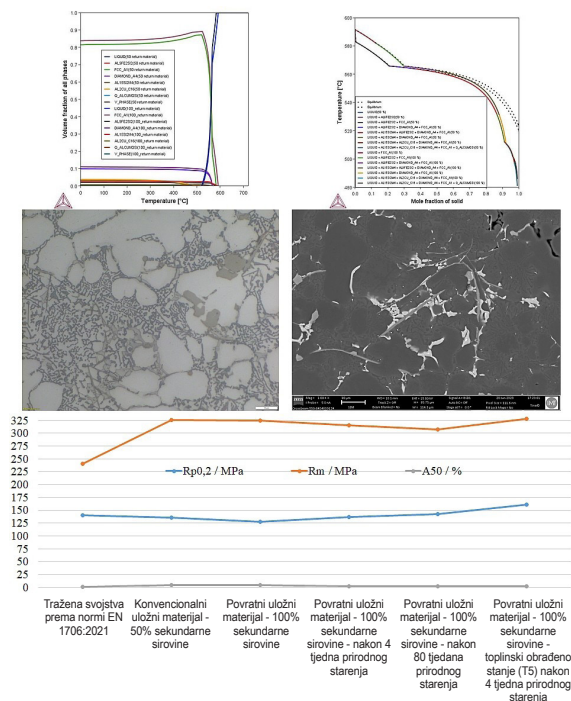
Opseg primjene sirovine na bazi aluminija obuhvaća sektor metalnih i nemetalnih materijala nužnih i neophodnih za proizvodnju trajnih dobara. U skladu s Nacionalnom klasifikacijom djelatnosti (NKD) te Studijom iz 2023. godine, udio primjene aluminijske sirovine prikazan je u Tablici 2.

Tablica 2: Primjena kritične sirovine na bazi aluminija s udjelom u pojedinom NKD sektoru [19]

Vrsta proizvoda	Udio primjene, %	NKD sektor
Građevinarstvo	21	C25 – Proizvodnja gotovih metalnih proizvoda, osim strojeva i opreme
Automobilska industrija	19	C29 – Proizvodnja motornih vozila, prikolica i poluprikolica
Prijevozna sredstva	19	C30 – Proizvodnja ostalih prijevoznih sredstava
Ambalaža	15	C25 – Proizvodnja metalnih proizvoda, osim strojeva i opreme
Inženjerstvo visoke tehnologije	11	C28 – Proizvodnja strojeva i opreme, d.n.
Trajna roba široke potrošnje	5	C25 – Proizvodnja metalnih proizvoda, osim strojeva i opreme
Vatrostalni materijali	3	C23 – Proizvodnja proizvoda od ostalih nemetalnih minerala
Cement	3	C23 – Proizvodnja proizvoda od ostalih nemetalnih minerala
Abrazivi	2	C23 – Proizvodnja proizvoda od ostalih nemetalnih minerala

S obzirom da su konačni proizvodi sigurnosno-kritične komponente, podložni su visokim zahtjevima za svojstva i kvalitetu koji zavise od cjelokupnog procesa lijevanja i skrućivanja od početnog kemijskog sastava koji se direktno oslanja na kvalitetu uložnog materijala (primarne i/ili sekundarne sirovine), obrade taline do kontrole uvjeta odvođenja toplinske energije tijekom lijevanja i skrućivanja. Tijekom procesa skrućivanja dolazi do brojnih termodinamičkih interakcija između elemenata i kao rezultat nastaju brojne faze koje različito utječu na mehanička svojstva konačnog proizvoda. Korelacijom udjela sekundarne sirovine [29, 31], termodinamike procesa skrućivanja [32-33], dobivene mikrostrukture [29, 31, 34] i odgovarajućih mehaničkih svojstava [34] poput čvrstoće i istezanja te potencijalne naknadne toplinske obrade [30] procjenjuje se održivost svojstava i potencijal očuvanja kvalitete proizvoda. Opseg podizanja razine tehnološke spremnosti za punu primjenu u proizvodnji (TRL9) zahtjeva dugotrajna opsežna istraživanja i izradu baze podataka koja omogućava predviđanje ponašanja legure tijekom skrućivanja, traženih svojstava i kvalitete konačnog materijala u odnosu na početne postavke uložnog materijala iz sekundarnih sirovina. Rezultati termodinamičkih, mikrostrukturnih istraživanja legure AlSi9Cu3(Fe) u korelaciji s postignutim mehaničkim svojstvima (čvrstoće i istezanja) upućuju da se sekundarna sirovina u obliku potpuno povratnog materijala, može smatrati kvalitetnim uložnim materijalom s visokim potencijalom recikliranja. Unatoč očekivanom odstupanju od kemijskog sastava, kontrolom procesa skrućivanja postignut je ispravan razvoj mikrostrukture i slijedom navedenog postignute su

visoke vrijednosti ispitivanih mehaničkih svojstava. Time se kritična sirovina u obliku povrata AlSi9Cu3(Fe) legure može smatrati izvrsnim uložnim materijalom bez degradacije svojstava [43]. Prikaz segmenta istraživanja AlSi9Cu3(Fe) legura s uviđom u termodinamičke proračune, dobivene mikrostrukture i postignuta mehaničkih svojstava prikazan je Slikom 3.



Slika 3: Segment istraživanja AlSi9Cu3(Fe) legura s aspekta procjene utjecaja primjene sekundarnih sirovina na održivost kvalitete konačnog proizvoda [43].

3. Mjere i valorizacija energetske učinkovitosti

Metali su od strateške važnosti za digitalnu i zelenu tranziciju, preobrazbu u području energije, materijala i kružnoga gospodarstva te jačanje EU gospodarske otpornosti i neovisnosti i postizanje ciljeva europskog zelenog plana i industrijske strategije [43]. Postizanje tih ciljeva moguće je uz dodatni razvoj održivih domaćih kapaciteta i opskrbe, imajući u vidu rastuću globalnu potražnju, ranjivost lanaca opskrbe i geopolitičku situaciju. Djelotvorne, prilagođene i usklađene mjere nužne su kako bi se osigurala uspostava i primjena najboljih raspoloživih tehnika, čime bi se primjenjivali procesi koji su najučinkovitiji i imaju najmanji mogući učinak na zdravlje ljudi i okoliš.

Jedan od aspekta smanjenja ugljičnog otiska pokriva segment energetske učinkovitosti. Najčešća definicija razine okolišne učinkovitosti povezana s NRT za specifičnu potrošnju energije (energetska učinkovitost) opisuju se sljedećom jednadžbom:

$$\text{specifična potrošnja energije} = \frac{\text{potrošnja energije}}{\text{unos}}$$

pri čemu su:

- potrošnja energije: ukupna količina topline (generirane iz primarnih izvora energije) i električne energije potrošena u relevantnom postupku/relevantnim postupcima, izražena u MJ/godina ili kWh/godina. U slučaju zagrijavanja sirovina potrošnja energije odgovara ukupnoj količini topline (generirane iz primarnih izvora energije) i električne energije potrošenoj u svim pećima u relevantnom postupku/relevantnim postupcima.
- unos: ukupna količina prerađenih sirovina, izražena u t/godina.

Za povećanje opće energetske učinkovitosti industrijskih postrojenja u metalurškoj proizvodnji NRT obuhvaćaju primjenu [25]:

- Plana energetske učinkovitosti i energetske pregledi – Plan energetske učinkovitosti dio je EMS-a i podrazumijeva definiranje i praćenje specifične potrošnje energije za određenu aktivnost/postupke, utvrđivanje ključnih pokazatelja uspješnosti na godišnjoj razini (primjerice MWh/tona proizvoda) te planiranje periodičnih ciljeva poboljšanja i povezanih aktivnosti. Energetski pregledi provode se barem jednom godišnje kako bi se osiguralo ispunjavanje ciljeva plana upravljanja energijom. Plan energetske učinkovitosti i energetski pregledi mogu se uključiti u opći plan energetske učinkovitosti većeg postrojenja (npr. za proizvodnju željeza i čelika);
- Evidenciju energetske bilance – Godišnja izrada evidencije energetske bilance koja sadržava raščlambu potrošnje i proizvodnje energije (uključujući izvoz energije) prema vrsti izvora energije (npr. električna energija, prirodni plin, procesni plinovi iz industrije željeza i čelika, energija iz obnovljivih izvora, uvezena energija za zagrijavanje i/ili hlađenje). To uključuje određivanje energetske granice postupka, informacije o potrošnji energije u pogledu isporučene energije, informacije o energiji isporučenoj iz postrojenja, informacije o protoku energije (npr. Sankey dijagram ili energetska bilanca) kojima se prikazuje kako se energija upotrebljava u postupcima.

Odgovarajućim kombinacijama NRT moguće je polučiti značajan učinak na poboljšanje energetske učinkovitosti u postrojenjima za zagrijavanje i taljenje metala. Poznata je činjenica da je poboljšanje učinkovitosti iskorištenja goriva ključ dobre financijske i ekološke prakse. Kako bi se zadovoljili viši zahtjevi, potrebno je poboljšati postojeće peći optimizacijom energetske učinkovitosti i smanjenjem emisije onečišćujućih tvari u procesu izgaranja goriva. U nastavku, navedene su mogućnosti poboljšanja učinkovitosti sustava procesnog zagrijavanja i taljenja uloška u metalurškim pećima koje koriste fosilna goriva, a koje se mogu se grupirati u pet kategorija [45]:

1. Generiranje topline: govori o opremi i gorivima koja se koriste za zagrijavanje uloška;
2. Zadržavanje topline: opisuje metode i materijale koji mogu smanjiti gubitak toplinske energije u okoliš;
3. Prijenos topline: raspravlja o metodama poboljšanja prijenosa topline na uložak kako bi se smanjila potrošnja energije, povećala produktivnost i poboljšala kvaliteta gotova proizvoda;
4. Oporaba otpadne topline: identificira izvore gubitka energije koji se mogu oporabiti u korisnije svrhe i bavi se načinima za dobivanje dodatne energije;
5. Najbolje raspoložive tehnike: bave se uobičajenim metodama smanjenja gubitka energije u praksi poboljšanjem rukovanja materijalima, učinkovitim slijedom i rasporedom zagrijevnih zona, traženjem učinkovitije kontrole procesa kao i poboljšanjem performansi pomoćnih sustava.

Stvarni operativni problemi peći u metalurškoj praksi mogu se navesti sljedećim redoslijedom: energetska učinkovitost i operativni troškovi, emisije stakleničkih plinova, učinkovitost izgaranja, kontrola emisija, kvaliteta proizvoda, životni vijek i pouzdanost dijelova postrojenja, troškovi održavanja te sigurnost. Unutar ovih zahtjeva energetska učinkovitost igra posebice važnu ulogu.

Prije svega, rješenja za optimizaciju energetske učinkovitosti peći, uz bitno smanjene emisije onečišćujućih tvari, treba tražiti u poboljšanju upravljačkih procesa u pećima s otvorenim plamenom u segmentima:

- Goriva i izgaranje;
- Aerodinamika gorionika i radnog prostora peći;
- Prijenos topline.

S tim u vezi, posebno je važno obratiti pozornost na radne uvjete kao što su: suvišak (pretičak) zraka u procesu izgaranja, kontrola tlaka u peći, obogaćivanje zraka za iz-

garanje goriva kisikom, predgrijavanje zraka za izgaranje goriva, temperatura uloška (na ulazu i ispustu), temperatura i emisivnost plamena, emisivnost ozida peći.

Jednako je važno ispitati mogućnost zamjene postojeće konvencionalne tehnologije izgaranja s takozvanim “naprednim” komercijalno dostupnim tehnikama izgaranja, na primjer, visokotemperaturnim izgaranjem goriva sa zrakom (engl. *High Temperature Air Combustion* – HiTAC) ili izgaranjem goriva s kisikom, s ciljem povećanja energetske učinkovitosti i smanjenja emisije onečišćujućih tvari. U procesu odabira određene tehnologije bitno je voditi računa o isplativosti investicije, odnosno o razdoblju povrata. No, u svakom slučaju, smanjenje potrošnje energije primjenom u praksi odgovarajućih tehnoloških parametara, kao i ulaganje u napredne tehnologije, mogu znatno povećati konkurentnost u metalurškoj proizvodnji.

Posljednjih petnaestak godina na Metalurškom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu provedeno je nekoliko istraživanja s ciljem povećanja energetske učinkovitosti pojedinih peći u metalurškim pogonima u Republici Hrvatskoj. U nastavku su prikazani sažetici nekih primjera rješenja.

3.1 Implementacija nove tehnologije izgaranja na kružnoj peći

Peć s rotacijskom podnicom nazivnog zagrijevnog kapaciteta 27 t/h nalazila se prije valjaonice tipa “pilger” u liniji za proizvodnju bešavnih cijevi. Cilj studije bio je na peći s rotacijskom podnicom, opremljenoj konvencionalnim tehnologijama izgaranja, odabrati napredne komercijalno dostupne tehnike izgaranja prema kojima bi peć trebala raditi kako bi se maksimizirala energijska učinkovitost i minimizirale emisije onečišćujućih tvari, uzimajući u obzir isplativost investicije, odnosno razdoblje povrata [46].

Ponuđena rješenja zamjene postojećeg sustava izgaranja bile su tri pristigle komercijalne ponude s tri različite tehnologije izgaranja:

- Novi visokobrzinski gorionici s novim centralnim rekuperatorom (engl. *High Speed Flame Burners*);
- Regenerativni bezplameni gorionici (engl. *Self-regenerative Flameless Burners*);
- Bezplameni gorionici za izgaranje prirodnog plina kisikom (engl. *Flameless Oxy-fuel Natural Gas Burners*).

Analiza isplativosti pojedinih ponuda provodila se usporedbom sljedećih čimbenika kao pokazatelja energijske učinkovitosti sustava: učinkovitost izgaranja, raspoloživa toplina i ušteda goriva, uzimajući u obzir emisije štetnih tvari u okoliš.

Za izračun korištena je sljedeća metodologija:

- izmjerena je potrošnja goriva po satu u trenutnom stanju te temperatura zraka za izgaranje i višak zraka u procesu izgaranja;
- godišnja potrošnja goriva odgovara potrošnji goriva po satu pomnoženoj s godišnjim brojem radnih sati peći, koji se zatim pomnoži s cijenom goriva;
- na isti način je izračunata godišnja potrošnja kisika pri izgaranju kisikom;
- izračunate su postotne uštede goriva ostvarene predgrijavanjem zraka te su utvrđene godišnje uštede goriva primjenom pojedinih tehnologija izgaranja;
- rok povrata investicije je određen usporedbom troška investicije i dodatnih troškova s godišnjom uštedom goriva.

Analiza je pokazala da regenerativni bezplameni gorionici kao i bezplameni gorionici izgaranja s kisikom pokazuju vrhunske karakteristike izgaranja u zagrijevnim industrijskim pećima s otvorenim plamenom u smislu visoke energijske učinkovitosti, ravnomjerne raspodjele toplinskog toka i niske emisije NO_x . Međutim, primjena kisika bila bi opravdana samo ako bi bilo potrebno dodatno smanjiti emisiju CO_2 , znatnije ispod dopuštenih graničnih vrijednosti.

3.2 Mogućnosti niske potrošnje energije u pećima za taljenje i održavanje aluminijских legura

Energetska učinkovitost ljevaoničkih peći za taljenje aluminija znatno je niža nego kod većine drugih pećnih agregata, posebice zbog niske emisivnosti konvencionalnog vatrostaalnog materijala na radnoj temperaturi peći, kao i niske emisivnosti aluminija i niske toplinske vodljivosti rastaljenog aluminija.

Glavni problemi u procesu taljenja aluminija u ljevaoničkoj praksi su sljedeći:

- inherentno niska energetska učinkovitost aluminija i konvencionalnih vatrostaalnih materijala na radnim temperaturama peći;
- rekuperacija je otežana zbog onečišćenih izlaznih plinova;
- kontaminacija rastaljenog aluminija oksidom.

Budući da u Republici Hrvatskoj postoji nekoliko peći za taljenje aluminijских legura u linijama za lijevanje, od iznimne je važnosti razmotriti moguća rješenja za pove-

ćanje energetske učinkovitosti u postojećim pećima [47]. Posebno se ističe važnost održavanja pogonskih uvjeta poput:

- održavati peć nepropusnom, s minimalnim otvaranjem vrata za ulaganje uloška i otvora za promatranje;
- koristiti automatsku kontrolu tlaka u peći. Treba održavati blago pozitivan tlak (0,05 - 0,25 mm stupca vode) kako bi se spriječio ulaz okolišnog zraka;
- koristiti kvalitetan regulator omjera zrak/gorivo. Peć bi trebala raditi s dovoljnim suviškom zraka kako bi se osiguralo gotovo potpuno izgaranje goriva. Količina suviška O₂ na najnižoj razini također je potrebna kako bi se smanjilo stvaranje neizgorjelih ugljikovodika, a istovremeno i H₂ kao jednog od glavnih produkata izgaranja u uvjetima nepotpunog izgaranja tj. manjka O₂. Naime, sloj troske na površini taline lakše je ukloniti nego apsorbirani vodik iz aluminija;
- izbjegavati udaranje mlazova plamena ili vrućih plinova izgaranja izravno na površinu rastaljenog aluminija;
- analizirane su i prednosti pojedinih konstrukcijskih rješenja;
- zamjena svoda kupole obložene standardnim vatrostalnim materijalom sa suvremenim vatrostalnim materijalima na bazi keramičkih vlakana;
- zamjena konvencionalnih načina zagrijavanja s gorionicima s otvorenim plamenom s keramičkim plinskim uronjenim gorionicima, koji omogućuju proces taljenja potopljenim izgaranjem (engl. Submerged Combustion Melting Process – SCMP).

3.3 Poboljšanje energetske učinkovitosti peći za taljenje aluminija povećanjem emisivnosti obzida peći

U visokotemperaturnim pećima, kao što je peć za taljenje aluminija, radijacijski prijenos topline često dominira tako da je udio konvektivnog prijenosa topline relativno malen (5 do 10%) zbog malih brzina strujanja plinova izgaranja. Prijenos topline zračenjem u peći ovisi o temperaturi plamena, temperaturi uloška, emisivnosti plamena, emisivnosti uloška te temperaturi i emisivnosti obzida. Površinska emisivnost rastaljenog aluminija kreće se od 0,004 do 0,550, a sloj troske formiran na površini rastaljenog aluminija, koji se sastoji od aluminijevog oksida, ima emisivnost od 0,11 do 0,19. U praksi je prirodni plin često zadani izbor kao gorivo u industrijskim pećima, premda zbog svog niskog omjera ugljik / vodik rezultira niskom emisivnošću produkata izgaranja koja je, ovisno o temperaturi i suvišku zraka, obično na razini 0,25 [48].

Sve to dovodi do lošeg prijenosa topline zračenjem na površinu uloška. Stoga, u usporedbi s nekim drugim dizajnom peći, peć je dizajnirana da to kompenzira tako što ima visok omjer površine svoda i taline kako bi se intenzivirao prijenos topline na talinu. Iz toga slijedi da je od velike važnosti povećati emisivnost vatrostralnog materijala svoda peći. Često se pretpostavlja da vatrostralni materijali imaju emisivnost od oko 0,9. Međutim, u slučaju većine konvencionalnih vatrostralnih materijala emisivnost značajno opada s porastom temperature, tako da je na primjer obično manja od 0,5 na 1000 °C. Obloge od keramičkih vlakana također mogu imati nisku emisivnost od 0,5-0,6 pri visokim temperaturama. Međutim, treba imati na umu da keramička vlakna imaju puno manju mehaničku čvrstoću od tradicionalnih materijala na bazi šamota.

Jasno je da je u ovom slučaju emisivnost vatrostralne stijenke od velike važnosti. Jedno od rješenja za postizanje visoke emisivnosti je nanošenje visokoemisivnog premaza. U tom slučaju, emisivnost vatrostralne stijenke ostaje između 0,85 i 0,95 do temperatura iznad 1650 °C. Naime, kada se premaz visoke emisivnosti nanosi na vatrostralni materijal u visokotemperaturnoj peći, energija zračenja od plinova izgaranja kao i konvektivna energija od atmosfere peći apsorbira se površinom premaza i ponovno zrači na hladnije dijelove zida peći, gdje je temperatura stijenke peći viša od uloška u peći.

Model jedinstvene plinske zone (engl. *The Single Gas Zone Model*) korišten je za analizu utjecaja emisivnosti vatrostralne obloge na prijenos topline, a time i na energetska učinkovitost kao i na potrošnju goriva u peći za dva slučaja promatrana na početku i na kraju procesa taljenja [49]:

- uporabom konvencionalnog vatrostralnog materijala;
- uporabom konvencionalnog vatrostralnog materijala s visokoemisivnim premazom.

Na temelju dobivenih rezultata razvidno je da je toplinski tok od plinova izgaranja i stijenki na uložak, u razdoblju od početka do kraja procesa taljenja, kod visokoemisivnog premaza u odnosu na konvencionalnu vatrostralnu oblogu povećan u rasponu od 10,7% do 14,1%. To znači da se vrijeme taljenja skraćuje za otprilike 12%. Očekuje se da će se isto toliko smanjiti potrošnja goriva jer se energetska učinkovitost povećava u intervalu od 0,6% do 0,9%.

6. Zaključak

U kontekstu klimatskih promjena, iscrpljivanja prirodnih resursa i izazova upravljanja otpadom u složenoj geopolitičkoj situaciji, EU nastoji usvojiti asertivnu, kooperativnu i održivu trgovinsku politiku, definiranu kao “otvorena strateška autonomija”. Ključno načelo je osiguravanje otpornosti u strateškim opskrbnim lancima i sektorima što uključuje obnovljive izvore energije, digitalne tehnologije, mobilnost, svemirske i obrambene tehnologije. Ključnim dokumentima potiče se kružno gospodarstvo – model za optimizaciju ekonomske i ekološke učinkovitosti i recikliranje materijala. Regulatorni okvir za ubrzavanje implementacije i povećanje konkurentnosti energetske tehnologije s nultom neto stopom emisija pretpostavlja razvoj “kružnog energetskog sustava” koji naglašava resursno učinkovitu proizvodnju i korištenje recikliranih kritičnih sirovina “u petlji” s ciljem istovremenog ublažavanja utjecaja na okoliš i smanjenja ovisnosti o njihovom uvozu. Brojni primjeri smanjenja ugljičnog otiska uz primjenu NRT proizašli iz suradnje znanstvenika s Metalurškog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i gospodarskih dionika iz polja metalurgija. Ishod komplementarnih istraživanja prema konceptu Industrija 5.0 / Društvo 5.0 rezultirao je višestrukim ekonomski opravdanim optimizacijama korištenja resursa – kritičnih (CRM) i strateških sirovina (SRM), poboljšanjem energetske učinkovitosti, zadržavanjem niske emisije onečišćujućih tvari i niskih troškova održavanja uz poboljšanje funkcionalnih svojstava konačnih proizvoda.

Zahvala

Istraživanje je provedeno u okviru Institucijskog projekta: *Dizajn i karakterizacija inovativnih inženjerskih legura* (FPI-124-ZZB); infrastrukturnih međunarodnih projekata: *Centar za ljevarstvo – SIMET* (KK.01.1.1.02.0020) i *VIRTULAB — Integrirani laboratorij za primarne i sekundarne sirovine* (KK.01.1.1.02.0022) financiran iz Europskog fonda za regionalni razvoj, Operativni program Konkurentnost i kohezija 2014.–2020.

7. Literatura:

- [1] Carayannis, E.G.; Barth, T.D.; Campbell, D.F.: The Quintuple Helix innovation model: global warming as a challenge and driver for innovation, *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, **1** (2012) 2, <https://doi.org/10.1186/2192-5372-1-2>
- [2] Rame, R.; Purwanto, P.; Sudarno, S.: Industry 5.0 and sustainability: An overview of emerging trends and challenges for a green future, *Innovation and Green Development*, **3** (2024) 100173, <https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100173>

- [3] Barata, J.; Kayser, I.: Industry 5.0 – Past, Present, and Near Future, *Procedia Computer Science*, **219** (2023) 778-788
- [4] van Erp, T.; Pereira Carvalho, N. G.; Gerolamo, M.; Gonçalves, R.; Malý Rytter, N. G.; Gladysz, B.: Industry 5.0: A new strategy framework for sustainability management and beyond, *Journal of Cleaner Production*, **461** (2024) 142271, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142271>
- [5] Zovko Brodarac, Z.: Advancement of the scientific-research potential of the Faculty of Metallurgy through the implementation of infrastructure projects, *Engineering Power*, **17** (2022) 3, 2-6, <https://hrcak.srce.hr/302297>
- [6] Zovko Brodarac, Z.; Unkić, F.; Srećec, Lj.; Filipović, A.: Centar za ljevarstvo – SIMET kao temelj razvoja metalske industrije Republike Hrvatske, *Godišnjak 2020. Akademije tehničkih znanosti Hrvatske*, ur. Andročec V., Mrša V., Rogale D., Zagreb: Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, 2021, 249-264
- [7] Rousseau, F.; Nominé, A.; Zavašnik, J.; Cvelbar, U.: Is alloying a promising path to substitute critical raw materials?, *Materials Today*, 2025, In press, Corrected proof, <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2025.01.015>
- [8] Masoomi, B.; Ghasemian Sahebi, I.; Ghobakhloo, M.; Mosayebi, A.: Do industry 5.0 advantages address the sustainable development challenges of the renewable energy supply chain?, *Sustainable Production and Consumption*, **43** (2023) 94-112, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.10.018>;
- [9] Horn, S.; Turunen, T.; Saukkonen, S.; Nylén, E-J.; Sorvari, J.: Circular economy solutions for magnetic resonance imaging–Mitigation of environmental impacts and critical raw material use, *Resources, Conservation & Recycling*, **215** (2025) 108095, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108095>
- [10] Baldassarre, B.; Carrara S.: Critical raw materials, circular economy, sustainable development: EU policy reflections for future research and innovation, *Resources, Conservation & Recycling*, **215** (2025) 108060, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108060>
- [11] Koese, M.; Parzer, M.; Sprecher, B.; Kleijn, R.: Self-sufficiency of the European Union in critical raw materials for E-mobility, *Resources, Conservation & Recycling*, **212** (2025) 108009, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108009>
- [12] Uredba (EU) 2021/1056 o uspostavi Fonda za pravednu tranziciju, 24.6.2021., Službeni list Europske Unije, 30.6.2021.
- [13] Provedbena odluka komisije (EU) 2022/2110 o utvrđivanju zaključaka o najboljim raspoloživim tehnikama (NRT) za industriju prerade neobojenih metala u skladu s Direktivom 2010/75/EU o industrijskim emisijama, 11.10.2022., Službeni list Europske Unije, 4.11.2022.
- [14] Uredba (EU) 2024/1252 o uspostavi okvira za osiguravanje sigurne i održive opskrbe kritičnim sirovinama i o izmjeni uredbi (EU) br. 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 i (EU) 2019/1020, 11.4.2024., Službeni list Europske unije, 3.5.2024.
- [15] Uredba (EU) 2024/1735 o uspostavi okvira mjera za jačanje europskog ekosustava za proizvodnju tehnologija s nultom neto stopom emisija i izmjeni Uredbe (EU) 2018/1724, 13.6.2024., Službeni list Europske unije, 28.6.2024.

- [16] Draghi, M.: The future of European competitiveness, Part A: A competitiveness strategy for Europe 9.9.2024., https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en#paragraph_47059, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [17] Draghi, M.: The future of European competitiveness, Part B: In-depth analysis and recommendations, 9.9.2024, https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en#paragraph_47059, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [18] European Comission, EU principles for sustainable raw materials, Publications Office of the European Union, 2021, ISBN 978-92-76-40054-7 DOI: 10.2873/09707, <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/47815>, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [19] Grohol, M.; Veeh, C.: *Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report*, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585>, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [20] Provedbena odluka komisije (EU) 2022/2110 o utvrđivanju zaključaka o najboljim raspoloživim tehnikama (NRT) za industriju prerade nebojenih metala u skladu s Direktivom 2010/75/EU o industrijskim emisijama, 11.10.2022., Službeni list Europske unije, 4.11.2022.
- [21] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Ferrous Metals Processing Industry, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, doi:10.2760/196475, JRC131649, <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [22] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2013, doi:10.2791/97469, JRC 69967, <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [23] Provedbena odluka komisije (EU) 2016/1032 o utvrđivanju zaključaka o najboljim raspoloživim tehnikama (NRT-i) za industrije obojenih metala u skladu s Direktivom 2010/75/EU, 13.6.2016., Službeni list Europske unije, 30.6.2016.
- [24] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the main Non-Ferrous Metals Industries, EUR 28648, doi:10.2760/8224, <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [25] Direktiva 2010/75/EU o industrijskim emisijama (integrirano sprečavanje i kontrola onečišćenja), 24.11.2010., Službeni list Europske unije, 17.12.2010.
- [26] JRC Reference Report on Monitoring of Emissions to Air and Water from IED Installations; EUR 29261 EN; doi 10.2760/344197, <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [27] Provedbena odluka komisije (EU) 2018/1147 o utvrđivanju zaključaka o najboljim raspoloživim tehnikama (NRT-i) za obradu otpada, na temelju Direktive 2010/75/EU, 10.8.2018., Službeni list Europske unije, 17.8.2018.
- [28] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste treatment Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control); EUR 29362 EN; Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018; ISBN 978-92-79-94038-5, doi:10.2760/407967, JRC113018 <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>, *Pristupljeno*: 2025-02-25

- [29] Zovko Brodarac, Z.; Kozina, F.; Medved, J.; Burja, J.: Investigation of recycled AlSi9Cu3(Fe) alloy, *Livarski vestnik*, **71** (2024) 3, 127-140
- [30] Zovko Brodarac, Z.; Kozina, F.; Burja, J.; Šetina Batič, B.; Stanić, D.; Folta, M.: Influence of heat treatment on microstructure of recycled AlSi9Cu3(Fe) alloy, *Abstract / Proceedings book 64th IFC Portoroz 2024*, Križman, A.; Bührig-Polaczek, A.; Medved, J., et al. (ur.), Ljubljana: Slovenian Foundrymen Society, 2024, 1-10
- [31] Zovko Brodarac, Z.; Kozina, F.; Medved, J.; Burja, J.: Investigation of recycled AlSi9Cu3(Fe) alloy, *Conference proceedings 63rd IFC Portoroz 2023*, ur. Križman, A., Ljubljana: Slovenian Foundrymen Society, 2023, 10, 1-9
- [32] Zovko Brodarac, Z.; Kozina, F.; Stanić, D.; Folta, M.: Solidification of remelted AlSi9Cu3(Fe) alloy, *Book of abstracts 7th Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (CEEC-TAC7)*, ur. Kučerik, J.; Šiler, P.; Rotaru, A., Brno: SITECH, Rumunjska, 2023, 134-134
- [33] Zovko Brodarac, Z.; Kozina, F.; Stanić, D.; Folta, M.: Quality assessment of the AlSi9Cu3(Fe) alloy with regard to recycling ratio, *Congress Proceedings - MME SEE 2023. 5th Metallurgical & Materials Engineering Congress of South-East Europe*, Beograd: Association of Metallurgical Engineers of Serbia (AMES), 2023, 251-256
- [34] Zovko Brodarac, Z.; Stanić, D.; Folta, M.; Kozina, F.: Influence of remelting on mechanical properties of AlSi9Cu3(Fe) alloy, *74th WFC_E-Abstract Book*, Busan: The World Foundry Organization, Korea Foundry Society, 2022, 1-0437, 1-2
- [35] Zovko Brodarac, Z.; Stanić, D.; Folta, M.; Kozina, F.: Recycling potential of AlSi9Cu3(Fe) alloy, *Conference proceedings 61st IFC Portoroz 2021*, ur. Križman, A.; Mrvar, P.; Medved, J. et al., Ljubljana: Slovenian Foundrymen Society, 2021, 24, 1-8
- [36] Taylor, J. A.: Iron-containing intermetallic phase in Al-Si based casting alloys, *Procedia Materials Science*, **1** (2012) 19-33
- [37] Zolotarevsky, V. S.; Belov, N. A.; Glazoff, M. V.: *Casting Aluminum Alloys*, 1st Edition. Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands, 2007
- [38] Mahfoud, M.; Prasada Rao, A. K.; Emadi, D.: The role of thermal analysis in detecting impurity levels during aluminum recycling, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **100** (2010) 847-851
- [39] Sencakova, L.; Vircikova, E.: Life cycle assessment of primary aluminium production. *Acta Metallurgica Slovaca*, **13** (2007) 3, 412-419
- [40] Kuchariková, L.; Tillová, E.; Bokuvka O.: Recycling and properties of recycled aluminium alloys used in the transportation industry, *Transport Problems*, **11** (2016) 117-122
- [41] Kasínska, J.; Bolibruchová, D.; Marek, M.: The Influence of Remelting on the Properties of AlSi9Cu3 Alloy with Higher Iron Content, *Materials*, **13** (2020) 575, <https://doi.org/10.3390/ma13030575>
- [42] Cagala, M.; Bruška, M.; Lichý, P.; Beno, J.; Špirutová, N.: Influence of aluminium-alloy remelting on the structure and mechanical properties, *Materials and Technology*, **47** (2013) 239-243

- [43] Zovko Brodarac, Z.; Kozina, F.; Stanić, D.; Folta, M.; Medved, J.; Burja, J.: Influence of remelting on AlSi9Cu3(Fe) alloy properties, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2025, <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14198-5>, *In press*
- [44] Direktiva (EU) 2024/1785 o izmjeni Direktive 2010/75/EU o industrijskim emisijama (integrirano sprečavanje i kontrola onečišćenja) i Direktive Vijeća 1999/31/EZ o odlagalištima otpada, 24.4.2024., Službeni list Europske unije, 15.7.2024.
- [45] Improving Process Heating System Performance: A Sourcebook for Industry, Third Edition, U.S. Department of Energy Efficiency and Renewable Energy Washington, D.C.20585-0121, https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/proc_heat_sourcebook.pdf *Pristupljeno: 2025-02-25*
- [46] Lazić, L.; Brovkin, V.; Varga, A.; Kizek, J.: Implementing a New Combustion Technology on the Rotary Hearth Furnace, *Acta Metallurgica Slovaca Conference*, **2** (2011) 1, 118-125
- [47] Lazić, L.; Varga, A.; Kizek, J.; Brovkin, V.: Opportunities for Low Energy Consumption in the Furnaces for Melting of Aluminium Alloys, *Proceeding Book of 12th International Foundrymen Conference: Sustainable Development in Foundry Materials and Technologies*, ur. Dolić, N.; Glavaš, Z.; Zovko Brodarac, Z., Sisak, University of Zagreb Faculty of Metallurgy, 2012, 226-235
- [48] Lazić, L.; Cerinski, D.; Baleta, J.; Lovrenić-Jugović, M.: Impact of Excess Air on Energy Efficiency of Industrial Open-flame Furnaces, *Proceedings 26th International Conference Ecological Truth and Environmental Research – EcoTER'18*, ur. Šerbula, S., Bor: University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, 2018, 462-467
- [49] Lazić, L.; Lovrenić-Jugović, M.; Grubišić, Ž.: Application of high emissivity coating in foundry aluminium melting furnaces, *Proceedings Book 15th International Foundrymen Conference: INNOVATION - The Foundation of Competitive Casting*, ur. Dolić N.; Zovko Brodarac Z., Sisak: Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2016, 151-159

Utjecaj ozona i temperature na učinke procesa pranja standardnih pamučnih tkanina

Vanja Šantak¹, Tanja Pušić², Mirjana Čurlin³

¹Ammonia d.o.o, Vlaha Bukovca 34, Zaprešić

²Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Prilaz baruna Filipovića 28a, Zagreb

³Sveučilište u Zagrebu Prehrambeno-biotehnološki fakultet, Pierottijeva 6, Zagreb

Sažetak: Složen kemijski sastav pojedinih obojenih mrlja na tekstilijama zahtijeva pojačano termičko i kemijsko djelovanje u Sinnerovom krugu procesa pranja. Kemijski učinak moguće je postići povećanim udjelom površinski aktivnih tvari, enzima, bjelila i njihovih aktivatora. U ovom istraživanju prati se kemijski učinak procesa pranja i ozonom potpomognutog procesa pranja pri temperaturama 30, 40, 60, 75 i 90 °C s ciljem vrednovanja primarnoga učinka kroz stupanj obezbojavanja obojenih mrlja i stupnja sanitacije. Povoljan utjecaj ozona potvrđen je pri nižoj koncentraciji deterdženta. Viša koncentracija deterdženta potpomognuta ozonom poboljšava stupanj sanitacije u procesu pranja.

Ključne riječi: tekstil, proces pranja, ozon, primarni učinak, sanitacija

1. Uvod

Suvremena sredstva za pranje tekstilija ili deterdženti unaprjeđuju se s ciljem postizanja visoke razine čistoće, očuvanja kvalitete tekstilija i održivosti, što objedinjuje funkcionalnost i ekološke značajke. Među najvažnijim sastojcima suvremenih deterdženata su površinski aktivne tvari, enzimi, bjelila i njihovi aktivatori [1-3].

Površinski aktivne tvari (PAT) zbog sposobnosti smanjivanja površinske napetosti vode omogućuju bolji kontakt komponenti kupelji za pranje i prljavština na tekstu. Ove molekule sastoje se od hidrofilne glave i hidrofobnog repa, što im omogućuje emulgiranje masti i ulja te njihovo uklanjanje iz tekstilija. U deterdžentima se najčešće koriste anionske, neionske i amfoterne površinski aktivne tvari. Anionske površinsko aktivne tvari nose negativan naboj i učinkovite su u uklanjanju mrlja s tekstila. Lako stupaju u reakciju s kalcijevim i magnezijevim ionima iz vode, te je u formula-

cijama važno ugraditi dobar bilder. Imaju visoku moć pjenjenja i snažno djelovanje na masnoće i ulja. Neionske površinski aktivne tvari nemaju naboj i učinkovite su u uklanjanju mrlja od masti i ulja. Imaju nisku tendenciju generiranja pjene i razvijaju izvrstan učinak u kombinaciji s anionskim površinski aktivnim tvarima [3]. Amfoterne površinski aktivne tvari imaju dobru kompatibilnost s neionskim i prihvatljive su za tekuće formulacije deterdženata niskopjenjećih performansi [4,5].

Enzimi kao biokatalizatori igraju ključnu ulogu u deterdžentima već desetljećima, jer omogućuju učinkovitu razgradnju specifičnih zaprljanja. Osim što ubrzavaju kemijske reakcije razgradnje oni i sudjeluju u razgradnji složenih molekula na manje, topive molekule koje se lako ispiru. Specifičnost pojedinog enzima očituje se u aktivnosti samo na određene vrste molekula odnosno ubrzavaju samo jednu reakciju. Djelovanje enzima prema principu ulaska ključa (molekule) u bravu (aktivno mjesto enzima) pomaže uspostavljanju pravilne orijentacije molekula i pritom povećava vjerojatnost da će molekule međusobno reagirati. Djelovanje enzima uvelike ovisi o pH-vrijednostima i temperaturi. Stalnost i učinkovitost pojedinih enzima postiže se formuliranjem sa stabilizatorima ili procesima inkapsulacije. Ova tehnika omogućuje kontrolirano otpuštanje enzima i zaštitu od denaturacije tijekom skladištenja [1,3,5,6].

Bjelila i njihovi aktivatori su ključne komponente u deterdžentima radi moći uklanjanja obojenih mrlja. Uklanjanje obojenih prljavština i mrlja koje pranjaju na tekstilije postiže se oksidativnom ili redukcijskom dekompozicijom kromofornih sustava. Aktivatori bjelila povećavaju učinkovitost bjelila pri nižim temperaturama, omogućujući učinkovito bijeljenje i dezinfekciju tekstila. Natrijev perkarbonat i vodikov peroksid smatraju se ekološki prihvatljivijim opcijama jer se razgrađuju na kisik i vodu, bez stvaranja štetnih nusproizvoda.

Suvremena sredstva za pranje ili deterdženti formulirani su tako da sve navedene komponente djeluju sinergijski kako bi se postigla maksimalna učinkovitost i dezinfekcija u procesu pranja. Neki primjeri sinergije su:

- (i) PAT i enzimi: PAT omogućuju bolje prodiranje enzima u tkaninu, čime se povećava njihova učinkovitost. Njihovi hidrofobni repovi mogu olakšati pristup enzima lipaza masnim mrljama, a hidrofilne glave bolju distribuciju enzima u kupelji za pranje.
- (ii) PAT i bjelila: PAT smanjuju površinsku napetost vode, omogućujući bjelilima bolji kontakt s mrljama. Time se poboljšava oksidacijska učinkovitost bjelila, osobito pri nižim temperaturama.
- (iii) Enzimi i bjelila: Enzimi i aktivatori bijeljenja djeluju u sinergiji pri nižim temperaturama, čime se povećava učinkovitost procesa pranja i smanjuje potrošnja energije [1,3,5,6].

Cilj razvoja formulacija deterdženata je poboljšanje učinkovitosti, sigurnosti i održivosti kroz:

- Biorazgradive sastojke

Razvoj biorazgradivih PAT, enzima i bjelila koji imaju manji utjecaj na okoliš

- Niskoenergetske proizvode

Učinkovitost pri nižim temperaturama, čime se značajno smanjuje potrošnja energije.

- Zdravstvenu sigurnost

Korištenje hipoalergenih sastojaka i eliminacija potencijalno štetnih kemikalija kako bi se smanjili rizici za zdravlje korisnika.

- Inovacije u pakiranju

Razvoj ekološki prihvatljivih pakiranja koja smanjuju količinu plastičnog otpada.

- Primjenu ozona u procesu pranja.

Ozon je alotropski oblik koji se sastoji od tri atoma kisika (O_3). Njegova molekula je nestabilna i brzo se razgrađuje u kisik (O_2), posebno u prisutnosti topline ili drugih katalizatora [7-11]. Ova nestabilnost doprinosi visokom oksidacijskom potencijalu ozona, oslobađanjem jednog atoma kisika generira se reaktivan radikal kisika, koji može oksidirati druge tvari. Ozon može reagirati s brojnim tvarima uključujući viruse, bakterije, gljivice, organske molekule i anorganske ione. Poznato je da je oksidacija pomoću ozona učinkovita za razgradnju organskih tvari s ugljik-ugljik dvostrukim vezama, olefinskim dvostrukim vezama, acetilenskim trostrukim vezama, aromatskih spojeva, fenola, različitih vrsta bojila policikličke aromatske i kompleksne strukture [12,13]. Ozon specifično razara konjugirane lance u molekuli, koji se povezuje s obojenošću, što ga čini korisnim za razgradnju širokog spektra organskih i anorganskih zaprljanja [12-19]. Korištenje ozona u procesu pranja ima prednosti funkcionalne i održive naravi [18].

Funkcionalnost

- (i) Visok oksidacijski potencijal: ozon može učinkovito razgraditi organske i anorganske molekule koje čine mrlje obojenim, a čime se postiže i visoka razina čistoće i dezinfekcije.
- (ii) Učinkovito uklanjanje mrlja: zbog visokog oksidacijskog potencijala, ozon može razgraditi širok spektar mrlja uključujući one na bazi proteina, masti i pigmenta.

- (iii) Dezinfekcija: ozon učinkovito uništava bakterije, viruse i gljivice, čime se osigurava visoka razina higijene. Njegova sposobnost razgradnje staničnih stjenki mikroorganizama čini ga izuzetno učinkovitim dezinfekcijskim sredstvom.

Održivost

- (i) Niže temperature pranja: korištenje ozona omogućava učinkovito pranje i dezinfekciju pri nižim temperaturama, što može rezultirati značajnom uštedom energije i smanjenjem ekološkog otiska.
- (ii) Ekološka prihvatljivost: ozon se razgrađuje na kisik, ne ostavljajući štetne ostatke u okolišu.
- (iii) Energetska učinkovitost: ozon djeluje učinkovito pri nižim temperaturama, čime se ostvaruju uštede energije.

Unatoč istaknutim prednostima, njegova primjena u procesu pranja suočava se s nekoliko izazova:

- (i) Stabilnost ozona: ozon je nestabilan i mora se generirati na licu mjesta, što zahtijeva specijaliziranu opremu.
- (ii) Sigurnosni rizici: visoke koncentracije ozona mogu biti štetne za zdravlje, pa je potrebna adekvatna ventilacija i sigurnosne mjere kako bi se smanjili rizici u primjeni.

U praksi, ozon se može dodati u proces pranja putem ozonatora integriranih uz perilice rublja. Proces uključuje generiranje ozona i njegovu infuziju u vodu, gdje djeluje kao snažno oksidacijsko sredstvo, razgrađujući mrlje i djelujući na bakterije. Ovaj proces omogućuje učinkovito pranje i dezinfekciju tekstilija pri nižim temperaturama, čime se postiže ušteda energije. Ozon se u procesima pranja često koristi uz sredstva za pranje ili deterdžente [14-17].

U ovom istraživanju kemijski potencijal deterdženata i ozona uz ostale čimbenike Sinnerova kruga analiziran je kroz primarne učinke procesa pranja koji su vrednovani kroz moć uklanjanja zaprljanja i analizom prisutnosti aerobnih bakterija na tkaninama – stupanj sanitacije.

2. Eksperimentalni dio

2.1 Materijali i sredstva

U istraživanju su korištene standardne tkanine kao nosači zaprljanja koji se kao standardi koriste u istraživanju i razvoju novih formulacija deterdženata, optimiranju procesa pranja kao i u ocjeni njegove kvalitete [19,20]. Opis korištenih EMPA (njem.

Eidgenössische Materialprüfungs - und Forschungsanstalt) i WFK (njem. *Wissenschaftliches Forschungsinstitut für Reinigungstechnologie*) standardnih nosača prikazan je u Tablici 1.

Tablica 1: Oznake i opis standardnih tkanina za analizu primarnog učinka u procesu pranja

Oznaka	Zaprljanje	Tekstilni materijal	Učinak
WFK 90 LI	Crveno vino	Pamučna tkanina	Izbjeljivanje
WFK 10 J	Čaj	Pamučna tkanina	Izbjeljivanje
EMPA 116	Krv/mljeko/tinta	Pamučna tkanina	Opći Izbjeljivanje

Kemijski bijeljena standardna pamučna tkanina, WFK 11 A korištena je za procjenu stupnja sanitacije u postavljenom konceptu istraživanja.

Korištena sredstva u procesu pranja su tekući deterdžent *Select Detergent* i praškasti dodatak-bjelilo *Hyperblan*, oba od tvrtke Christeys iz Belgije.

Sastav *Select Detergenta* prema EC-direktivi sadrži:

- < 5 % anionskih i amfoternih površinski aktivnih tvari,
- 5 – 15 % sapuna i neionskih površinski aktivnih tvari,
- optička bjelila i mirise.

Visoki udio površinski aktivnih tvari omogućava uklanjanje mrlja, optičko bjelilo osigurava visok stupanj bjeline, specijalni polimeri sprječavaju posivljenje bijelih tekstilija tijekom pranja, a inhibitori prijenosa boje sprječavaju prijenos boje s jednog komada rublja na drugi. Njegove ekološke značajke su biorazgradivost površinski aktivnih tvari i odsutnost štetnih kemikalija.

Uz odabrani deterdžent korišteno je kemijsko bjelilo *Hyperblan* prema EC-direktivi sadrži:

- < 5 % neionski površinski aktivne tvari,
- > 30 % izbjeljivača na bazi kisika (natrijev perkarbonat).

Osim toga, sadrži karbonate, sekvestrante i miris. *Hyperblan* je formuliran za intenzivno pranje i izbjeljivanje na temperaturama pri 40 °C. Njegova glavna svojstva uključuju učinkovito uklanjanje mrlja, a posebno je aktivan u uklanjanju mrlja od rajčice, čaja, kave i sokova.

2.2 Proces pranja

Proces pranja proveden je u profesionalnoj perilici LG Giant-C MAX, koja je opremljena generatorom ozona, BW⁰³ (0,5 do 1 mg/L), koji se dozira u pretpranju pri dovodu vode i posljednju vodu za ispiranje, temperature do 20 °C.

Standardni nosači zaprljanja oprani su s pamučnim balastom mase 6 kg variranjem vremena, temperature i doziranja sredstava. U Tablici 2 navedene su temperature i vrijeme procesa pranja.

Tablica 2: Temperatura i vrijeme procesa pranja pri odabranim temperaturama

<i>T</i> (°C)	20	30	40	60	75	90
<i>t</i> (sati)	0:35	0:51	1:01	1:09	1:24	1:39

Utjecaj kemijskog djelovanja u procesu pranja praćen je kroz dva načina doziranja sredstava (niža i viša koncentracija), (niža koncentracija uz ozon) i (viša koncentracija uz ozon), Tablice 3 i 4.

Tablica 3: Oznake i uvjeti procesa pranja uz nižu koncentraciju sredstava i nižu koncentraciju sredstava potpomognutu ozonom

Doziranje I

Select Detergent: 8,3 mL/kg

Hyperblan: 6,7 g/kg

NIŽA					NIŽA-OZON				
1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10
30 °C	40 °C	60 °C	75 °C	90 °C	30 °C	40 °C	60 °C	75 °C	90 °C

Tablica 4: Oznake i uvjeti procesa pranja uz višu koncentraciju sredstava i nižu koncentraciju sredstava potpomognutu ozonom

Doziranje II

Select Detergent: 15 mL/kg

Hyperblan: 10 g/kg

VIŠA					VIŠA-OZON				
2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10
30 °C	40 °C	60 °C	75 °C	90 °C	30 °C	40 °C	60 °C	75 °C	90 °C

2.3 Metode

Utjecaj sredstava i temperature procesa pranja na primarni učinak i stupanj sanitacije vrednovan je remisijском spektrofotometrijom i analizom prisutnosti aerobnih bakterija prema standardnom protokolu za uzorke vode [21].

Primarni učinak vrednovan je analizom spektralnih karakteristika standardnih nosača zaprljanja prije i nakon procesa pranja korištenjem remisijскоg spektrofotometra *Spectraflash* SF300, DataColor, Rotkreutz, Švicarska, uz standardni izvor svjetla D₆₅, koji oponaša dnevno svjetlo, i geometrijom d/8° (difuzno osvjetljenje pod kutom promatranja 8°). Vrijednost remisije pri valnoj duljini 460 nm (*R*₄₆₀) odabrana je za analizu primarnog učinka. Mjerenja su provedena na slučajno odabranim mjestima, a rezultati su prikazani kroz prosječnu vrijednost četiri pojedinačna mjerenja [22].

Stupanj sanitacije u procesu pranja proveden je kroz klasifikaciju onečišćenja na standardnoj pamučnoj tkanini, WFK 11A, Tablica 5, prema nakupinama bakterija na hranjivoj Agar podlozi nakon inkubacije 48 sati na 37 °C.

Tablica 5: Klasifikacija onečišćenja i ocjene (1-5) čistoće uzoraka

Onečišćenje	Čistoća uzorka
Vrlo malo	5
Malo	4
Srednja	3
Veliko	2
Vrlo veliko	1

1 – nečisto; 5 – jako čisto

3. Rezultati

Primarni učinak u procesu pranja vrednovan je pri temperaturama 30, 40, 60, 75 i 90 °C uz varijacije:

(i) koncentracije *Detergent Selecta* i koncentracije *Hyperblana*

Programi: 1.1 – 1.5 i 2.1 – 2.5 (NIŽA i VIŠA)

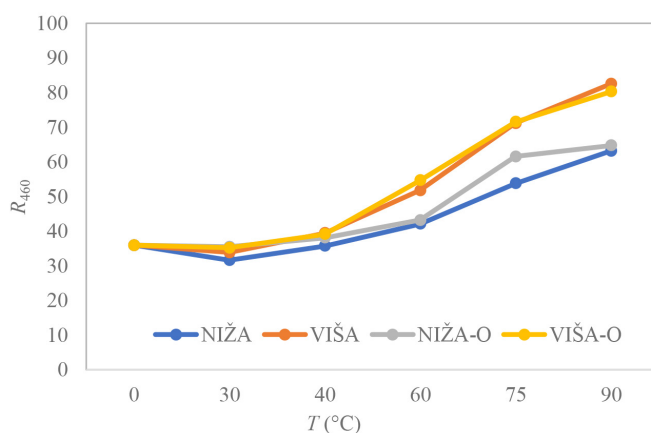
(ii) koncentracije *Detergent Selecta* i koncentracije *Hyperblana* potpomognute ozonom

Programi: 1.6 – 1.10 i 2.6 – 2.10 (NIŽA-O i VIŠA-O)

3.1. Primarni učinak procesa pranja – moć uklanjanja zaprljanja

Primarni učinak u procesu pranja standardnih nosača zaprljanja, pamučne tkanine zaprljane čajem (WFK 10 J), crvenim vinom (WFK 90 LI) i krvlju/mlijekom/tintom (EMPA 116) prikazan je na Slikama 1-3.

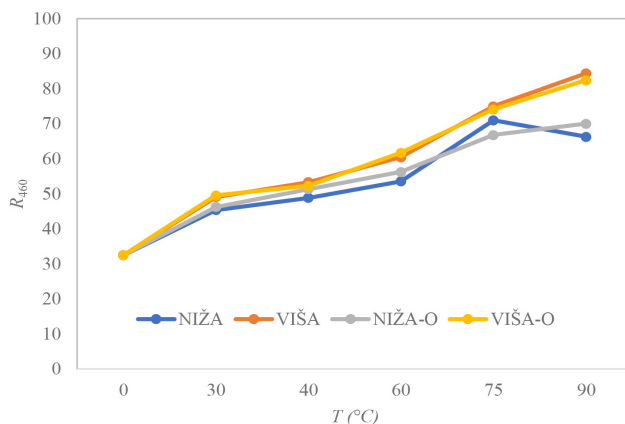
Smeđi tanini u mrljama od voća, čaja i vina nastaju kondenzacijom polifenola s proteinima. Drugi smeđi organski polimeri uključuju huminske kiseline prisutne u kavi, čaju i kakau. Uklanjanje mrlja s površine može biti povezano s kemijskom reakcijom ili se može dogoditi bez kemijske promjene. Primjer prvog je redoks proces koji uključuje izbjeljivač, pri čemu se neka tvar (npr. prirodna boja iz čaja, vino ili voćni sok), a koja se može oksidirati cijepa [4].



Slika 1: Moć uklanjanja zaprljanja od čaja s pamučne tkanine – remisija s WFK 10 J prije (0) i nakon provedenih procesa pranja

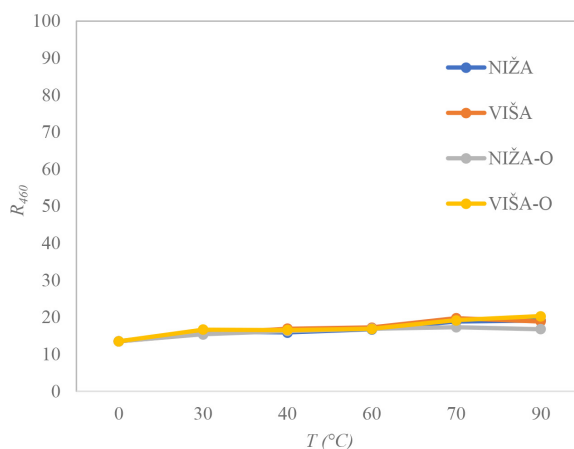
Viša koncentracija deterdženta i bjelila (doziranje II) poboljšava uklanjanje zaprljanja od čaja pri temperaturama 60, 75 i 90 °C u odnosu na niže koncentracije deterdženta i bjelila (doziranje I). Proces pranja potpomognut ozonom minoran je u odnosu na deterdžent i bjelilo. Povoljan utjecaj ozona zabilježen je jedino u procesu pranja s nižom koncentracijom deterdženta i bjelila (doziranje I) pri temperaturi 75 °C.

Primarni učinak u procesu pranja pamučne tkanine zaprljane crvenim vinom poboljšava se porastom temperature i koncentracijom deterdženta. Utjecaj ozona uz doziranje sredstava u višim koncentracijama (doziranje II) je neznatan. Niže koncentracije sredstava (doziranje I) potpomognuto ozonom u manjoj mjeri poboljšava učinak pri 40, 60 i 90 °C, Slika 2.



Slika 2: Moć uklanjanja zaprljanja od crvenog vina s pamučne tkanine – remisija s WFK 90 LI prije (0) i nakon provedenih procesa pranja

Moć uklanjanja zaprljanja od krvi/mlijeka/tinte s pamučne tkanine – remisija s EMPA 116 prije i nakon provedenih procesa pranja u ovisnosti o promatranim varijablama prikazuje Slika 3. Proces pranja pamučne tkanine zaprljane smjesom krv/mlijeko/tinta (EMPA 116) iziskuje sinergiju komponenti koje osiguravaju opći učinak i učinak obezbojavanja. Krv je mrlja koja iziskuje sredstvo za obezbojavanje, iako njeno uklanjanje ponekad može predstavljati probleme [4]. Tvrdokorne mrlje od bjelančevina na tekstilu koje potječu iz izvora kao što su mlijeko, kakao, krv, jaja, žumanjak i trava otporne su na uklanjanje deterdžentima bez enzima, posebno kada se mrlje osuše. Tinta je otopina ili suspenzija prikladnih bojila ili pigmenata [23], koje je potrebno obezbojiti u procesu pranja.



Slika 3: Moć uklanjanja zaprljanja od krvi/mlijeka/tinte s pamučne tkanine – remisija s EMPA 116 prije (0) i nakon provedenih procesa pranja

Učinak uklanjanja zaprljanja sa standardnog nosača EMPA 116 (pamučna tkanina zaprljana mješavinom krvi, mlijeka i tinte) izuzetno je slab u svim uvjetima procesa pranja. Na temelju rezultata primarnog učinka prikazanog na Slici 3, može se zaključiti da u ovom heterogenom zaprljanju prevladava proteinska komponenta (krv/mlijeko) u odnosu na tintu kao obojenje, a koja iziskuje proteolitičku aktivnost enzima u procesu pranja, koji *Select Detergent* nema u sastavu.

3.2. Primarni učinak procesa pranja- moć sanitacije

Klasifikacija onečišćenja na standardnoj pamučnoj tkanini provedena je prema nakupinama bakterija na hranjivoj Agar podlozi nakon inkubacije 48 sati na 37 °C, tablica 6.

Tablica 6: Učinak sanitacije na neopranoj pamučnoj tkanini (N) i opranim pamučnim tkaninama u analiziranim procesima pranja.

	Uzorak	Vrlo malo	Malo	Srednje	Veliko	Vrlo veliko	Čistoća
$T (^{\circ}\text{C})$	N					X	1
doziranje I							
30	1.1				X		2
40	1.2					X	1
60	1.3			X			3
75	1.4			X			3
90	1.5			X			3
30	1.6			X			3
40	1.7			X			3
60	1.8			X			3
75	1.9				X		2
90	1.10			X			3
doziranje II							
30	2.1	X					5
40	2.2	X					5
60	2.3	X					5
75	2.4		X				4
90	2.5	X					5
30	2.6		X				4
40	2.7			X			3
60	2.8	X					5
75	2.9		X				4
90	2.10		X				4

U procesima pranja uz doziranje I prevladava termička sanitacija (60, 75 i 90 °C). Povoljan utjecaj ozona na učinak sanitacije dobiven je u procesima uz doziranje I pri 30 i 40 °C. Dobar učinak sanitacije dobiven je u procesima uz doziranje II pri svim temperaturama (izuzev 75 °C), a utjecaj ozona nije zabilježen pri analiziranim temperaturama.

4. Zaključak

Istraživanja primarnog učinka ukazala su na selektivan utjecaj ozona u procesima pranja u analiziranim uvjetima – sinergija standardnih materijala – nosača zaprljanja i čimbenika Sinnerova kruga.

Učinak uklanjanja zaprljanja sa standardnog nosača zaprljanja EMPA 116 (pamučna tkanina zaprljana mješavinom krvi, mlijeka i tinte) izuzetno je slab u svim uvjetima procesa pranja, što je uvjetovano izostankom proteolitičke aktivnosti u procesu pranja (*Select Detergent* nema u sastavu proteazu).

Viša koncentracija deterdženta i bjelila (doziranje II) poboljšava uklanjanje zaprljanja od čaja pri temperaturama 60, 75 i 90 °C. Utjecaj ozona je minoran u odnosu na deterdžent i bjelilo. Utjecaj ozona zabilježen je kod niže koncentracije deterdženta i bjelila (doziranje I) samo pri temperaturi 75 °C.

Povoljan utjecaj ozona na učinak sanitacije dobiven je u procesima uz doziranje I (niža koncentracija *Detergent Selecta* i *Hyperblana*) u procesima pri 30 i 40 °C.

Najbolji učinak sanitacije ostvaren je u procesima uz doziranje II (povišena koncentracija *Detergent Selecta* i *Hyperblana*).

Rezultati istraživanja ukazuju na potrebu analize i drugih sredstava u procesu pranja, primarno obogaćena suvremenim višeenzimskim kompleksima u kombinaciji s ozonom. Dodatno, učinak sanitacije pokazuje na potrebu daljnjih istraživanja kako bi se kvantificirao stupanj redukcije pojedinih Gram pozitivnih i Gram negativnih bakterija.

5. Literatura

- [1] McCoy, M.: *Soaps and Detergents, Chemical & Engineering News*, **82** (2004) 4, 23-31, <http://dx.doi.org/10.1021/cen-v082n004.p023>
- [2] Falbe, J.: *Surfactants in Consumer Products*, Springer, ISBN: 978-3642722422, Berlin, (2012).

- [3] Soljačić, I.; Pušić, T.: *Njega Tekstila: Čišćenje u vodenim medijima*, Tekstilno-tehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, ISBN: 953-7105-08-3, Zagreb, (2005).
- [4] Smulders, E.: *Laundry Detergents*, Wiley-VCH, ISBN: 978-3527305209, Weinheim, (2002).
- [5] Soljačić, I.; Čavara, L.: *Deterdženti za pranje tekstila*, *Tekstil*, **48** (1999) 10, 498-504.
- [6] Pušić, T.; Šostar-Turk, S.; Soljačić, I.; Tarbuk, A.; Fijan, R.; Arnuš, S.: *Primarni učinak praškastog i tekućeg deterdženta u pranju*, *Tekstil*, **55** (2006) 1, 11-18.
- [7] Grady, L.; Daigger, G.; Love, N.; Carlos, D.; Filipe, C.: *Biological Wastewater Treatment*, CRC Press, ISBN: 978-1439804841, Boca Raton, FL, (2011), <https://doi.org/10.1201/b13775>
- [8] Kim, J.-G.; Yousef, A. E.; Khadre, M. A.: Ozone and its current and future application in the food industry, *Advances in Food and Nutrition Research*, **45** (2003) 167-218, [https://doi.org/10.1016/s1043-4526\(03\)45005-5](https://doi.org/10.1016/s1043-4526(03)45005-5)
- [9] Roelofs, G.J.; Lelieveld, J.: Model Analysis of Stratosphere-Troposphere Exchange of Ozone and Its Role in the Tropospheric Ozone Budget, In: *Chemistry and Radiation Changes in the Ozone Layer*, NATO Science Series, vol 557, Springer, ISBN: 978-0792362996, Dordrecht, (2000).
- [10] Nguyen, H. N.; Cuong, L. C.; Dieu, T. V.; Ngu, T.; Oanh, D. T. Y.: Ozonation Process and Water Disinfection, *Vietnam Journal of Chemistry*, **56** (2018) 6, 717-720, <https://doi.org/10.1002/vjch.201800076>
- [11] Von Gunten, U.: Ozonation of Drinking Water: Part I. Oxidation Kinetics and Product Formation, *Water Research*, **37** (2003) 7, 1443-1467, [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00457-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00457-8).
- [12] Turhan, K.; Turgut, Z.: *Decoloration of Direct Dye in Textile Wastewater by Ozonation in a Semi-Batch Bubble Column Reactor*, *Desalination*, **242** (2009) 6, 256-263, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.005>
- [13] Wang, C.; Yediler, A.; Lienert, D.; Wang, Z.; Kettrup, A.: *Ozonation of an Azo Dye C.I. Remazol Black 5 and Toxicological Assessment of its Oxidation Products*, *Chemosphere*, **52** (2003) 6, 1225-1232, [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00331-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00331-X)
- [14] Nayak, R.; Ratnapandian, S.: *Care and Maintenance of Textile Products Including Apparel and Protective Clothing*, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN: 978-1138566750, Boca Raton, FL, (2018).
- [15] Garcia, B.: *Reduced Water Washing of Denim Garments*, In: *Denim: Manufacture, Finishing and Applications*, Woodhead Publishing, ISBN: 978-0857098436, Cambridge, (2015)
- [16] Md. Nahid-Ull-Islam, H.; Chowdhury, S. M. M.; Shahidul Islam Sakib, M. K. H.; Sabbir A.; Md. Sayeed, A.; Akter, M.: Sustainable Approaches of Ozone Wash and Laser Fading Over Conventional Denim Wash, *Tekstilec*, **67** (2024) 2, 104-118, <https://doi.org/10.14502/tekstilec.67.2024011>
- [17] Neral, B.: *Kvaliteta pranja u kućanskom stroju za pranje s ozonatorom*, *Tekstil*, **65** (2016) 7-8, 241-251
- [18] Hoigné, J.; Bader, H.: The Role of Hydroxyl Radical Reactions in Ozonation Processes in Aqueous Solutions, *Water Research*, **10** (1976) 5, 377-386, [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(76\)90055-5](https://doi.org/10.1016/0043-1354(76)90055-5)

- [19] Dostupno na: <https://testgewebe.de/> Pristupljeno: 04.02.2025.
- [20] Dostupno na: <https://www.empa.ch/> Pristupljeno: 04.02.2025.
- [21] Frece, J.; Markov, K. *Uvod u mikrobiologiju i fizikalno kemijsku analizu voda*, Inštitut za sanitarno inženierstvo, ISBN: 978-961-92846-5-0, Ljubljana (2015).
- [22] Scheid, F.; Lambert, E.; Maitra, W.; Niestrath, M.; Fäh, D.; Portmann, C.; Gorny, S.; Stamminger, R.: Textile Quality Depletion due to Household Machine Wash – Ways to Measure and Impacts of Wash Duration and Temperature on Textiles, *Tenside Surfactants Detergents*, **53** (2016) 5, 438-444, <https://doi.org/10.3139/113.110462>.
- [23] Tinta, Hrvatska enciklopedija, <https://www.enciklopedija.hr/clanak/tinta>, Pristupljeno 20.03.2025.

Energetski prihvatljiviji proces alkalne hidrolize poliesterske tkanine

Anita Tarbuk¹, Sandra Flinčec Grgac¹, Tihana Dekanić¹, Ivana Čorak¹

¹Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Prilaz baruna Filipovića 28a, HR-10000 Zagreb

Sažetak: U svrhu ekonomičnosti i energetske uštede u odnosu na konvencionalni proces alkalne hidrolize (100 °C, 60 min) u radu je istražena mogućnost hidrolize poliestera pri nižoj temperaturi i uz odležavanje. Poliesterska tkanina iz poli(etilen-tereftalat) vlakana (PET tkanina) je obrađivana pri temperaturi od 80 do 100 °C uz dodatak akceleratora, kationskog tenzida heksadeciltrimetil amonijevog klorida (HDTMAC) uz varijaciju vremena obrade i vremena odležavanja ovisno o temperaturi. Na tako hidroliziranim tkaninama, prema normiranim metodama, ispitana je prekidna sila i istezanje, gubitak mase, te stupanj bjeline. Rezultati su uspoređeni s neobrađenim uzorkom i referentnim uzorkom, alkalno hidroliziranim na 100 °C u vremenu 60 min. Pokazalo se da je moguće provesti alkalnu hidrolizu pri nižoj temperaturi uz dodatak akceleratora i dodatno uštedjeti energiju odležavanjem u kupelji. Obrada na 80 °C uz dodatak HDTMAC u vremenu 5 min uz odležavanje 10 min daje optimalne rezultate, a takav proces je energetski i ekonomski održiv.

Ključne riječi: poli(etilen-tereftalat), alkalna hidroliza, prekidna sila, gubitak mase, stupanj bjeline

1. Uvod

Poliesterska vlakna (PES) su najzastupljenija umjetna vlakna na tržištu, a najčešće su iz poli(etilen-tereftalata) (PET). Standardni tipovi poliesterskih vlakana izrazite su kristaličnosti koja pridonosi visokoj čvrstoći, ali i slaboj apsorptivnosti radi čega se teško dorađuju, sklona su stvaranju pilinga, prljanju, nabijanju statičkim elektricitetom i mogu uzrokovati neudobnost odjeće pri nošenju u vrućim ljetnim danima. Navedeni nedostaci se mogu smanjiti ili ukloniti ciljanim modifikacijama. Konvencionalni postupci modifikacije površine poliestera su alkalna hidroliza i aminoliza [1-10], dok se u novije vrijeme istražuju enzimi lipaze, esteraze i kutinaze [11-14] te ionske otopine za hidrolizu površine [15, 16]. Za održivi razvoj ključno je pratiti

ekološka i ekonomska načela koja u suštini imaju važnu ulogu u razvojnim procesima tekstilnih materijala. Važne ideje koje se provlače cijelim područjem proizvodnje i dorade tekstilija su primjena minimalnih količina ekološki povoljnih resursa te postizanje željene učinkovitosti [17]. Iz svih gore navedenih razloga provode se brojna istraživanja s ciljem poboljšanja svojstava poliesterske tkanine uz primjenu konvencionalnih i inovativnih doradbenih postupaka.

Alkalna hidroliza se provodi na temperaturama višim od 100 °C (130-140 °C) u vremenu 1-2 sata. Rezultira fizikalnim i kemijskim promjenama na površini vlakana stvaranjem malih jamica i povećanjem aktivne površine s dodatnim funkcionalnim skupinama, pa hidrolizirani poliesterski materijali imaju bolju sposobnost kvašenja i bojadisanja te izgled i sjaj tkanina poput svile, ali nastale jamice negativno utječu na čvrstoću materijala [3-10, 14]. Alkalna hidroliza se može ubrzati uz različite kationske tenzide i polimere [6, 9, 10]. Kallay i Grancarić [5, 6] su razvili teorijski model kinetike razgradnje PET tkanine u ovisnosti o temperaturi i dodatku akceleratora. Utvrđeno je da optimalno smanjenje mase iznosi između 10 i 24 %, a smanjenje prekidne sile može biti do 35 % za daljnju tekstilnu uporabu. U oštrijim uvjetima obrade jamice se pojavljuju i poprečno na os vlakna što dovodi do potpunog oštećenja materijala [3-6, 9]. Dodatno, alkalna hidroliza zahtijeva veliku potrošnju energije i vode što nije ekološki i energetski prihvatljivo. Osim što primjena jake lužine i visoke temperature obrade mogu dovesti do oštećenja materijala, mogu dovesti i do onečišćenja okoliša, pa se danas istražuju i količine otpuštenih čestica mikroplastike nakon procesa [18].

U ovom radu je, iz razloga ekonomičnosti i energetske uštede, a sa svrhom održivosti procesa, istražena mogućnost hidrolize poliestera pri sniženoj temperaturi uz odležavanje materijala u kupelji.

2. Eksperimentalni dio

2.1 Materijal i obrade

U radu je korištena komercijalna poliesterska tkanina tvrtke Belira, proizvedena od 100 % poli(etilen-tereftalnog) vlakna (PET) plošne mase 60 g/m² stabilizirana vrućim zrakom, izrađena od teksturirane multifilamentne pređe 50 dtex, 16 f.

Hidroliza je provedena u laboratorijskom uređaju za obradu Linitest, Original Hanau, uz omjer kupelji OK 1:50 uz varijaciju temperature (80 i 100 °C) i vremena obrade i vremena odležavanja od 5 min do 60 min (Tablica 1). Hidroliza je provedena u 1,5 mol/l NaOH bez i uz dodatak 2 g/l akceleratora, kationskog tenzida heksadeciltrimetil amonijevog klorida (HDTMAC). Uzorci su isprani najprije vrućom vodom kako bi se uklonili oligomeri s površine, potom mlakom i hladnom vodom, neutralizirani

5 %-tnom octenom kiselinom te isprani hladnom vodom do neutralnoga. Oznake i uvjeti obrade navedeni su u Tablici 1.

Tablica 1: Oznake i uvjeti alkalne hidrolize PET tkanina

Oznaka	Obrada
PET	Poliesterska (PET) tkanina – početna
H	Hidroliza bez akceleratora HDTMAC
AH	Hidroliza uz akcelerator HDTMAC
$T^{\circ}\text{C}$	Temperatura (80 ili 100 °C)
t'	Vrijeme obrade (5, 10, 15 ili 60 min)
$+t_o'$	Vrijeme odležavanja (5 ili 10 min)

2.2 Metode

Masa po jedinici površine (m) u g/m^2 određena je prema HRN ISO 3801:2003 *Tekstil – Tkanine – Određivanje mase po jedinici duljine i mase po jedinici površine*, pomoću analitičke vage, model ALJ 220-5DNM (KERN & Sohn GmbH) s točnošću mjerenja od 0,0001 g. Promjena mase (Δm) je izračunata na apsolutno suhom uzorku prema:

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \text{ [\%]} \tag{1}$$

gdje je m_1 početna masa uzorka [g], a m_2 masa uzorka poslije obrade [g].

Prekidna sila (F [N]) i istezanje (ε [%]) određeni su prema HRN EN ISO 13934-1:2013 *Tekstil – Vlačna svojstva plošnog tekstila – 1. dio: Određivanje maksimalne sile i istezanja pri maksimalnoj sili metodom trake* na dinamometru Tensolab tvrtke Mesdan S.p.A. uz razmak među stezaljkama 100 mm, širinu uzorka 50 mm i predopterećenje od 2 N. Maksimalno istezanje pri djelovanju vlačne sile u trenutku prekida naziva se i prekidno istezanje, a maksimalna vlačna sila u trenutku prekida prekidna sila.

Iz dobivenih vrijednosti prekidne sile izračunata je promjena prekidne sile (ΔF) prema:

$$\Delta F = \frac{F_1 - F_2}{F_1} \cdot 100 \text{ [\%]} \tag{2}$$

gdje je F_1 sila prekida početne tkanine [N], a F_2 sila prekida hidrolizirane tkanine [N].

Spektralna remisija poliesterskih tkanina prije i nakon hidrolize izmjerena je na remisijском spektrofotometru Spectraflash SF 300 tvrtke Datacolor. Stupanj bjeline prema CIE (W_{CIE}) izračunat je automatski prema HRN EN ISO 105-J02:2003 *Tekstil – Ispitivanje postojanosti obojenja – Dio J02: Instrumentalno određivanje relativne bjeline*.

Za odabrane uzorke napravljena je analiza površine PET tkanina iz mikrografija snimljenih na skenirajućem elektronskom mikroskopu FE-SEM, Mira II, Tescan, s povećanjem 3000 $\times$. Tkanine su naparene tankim slojem kroma 180 s u aparivaču Quorum Technologies, Q150T ES Plus.

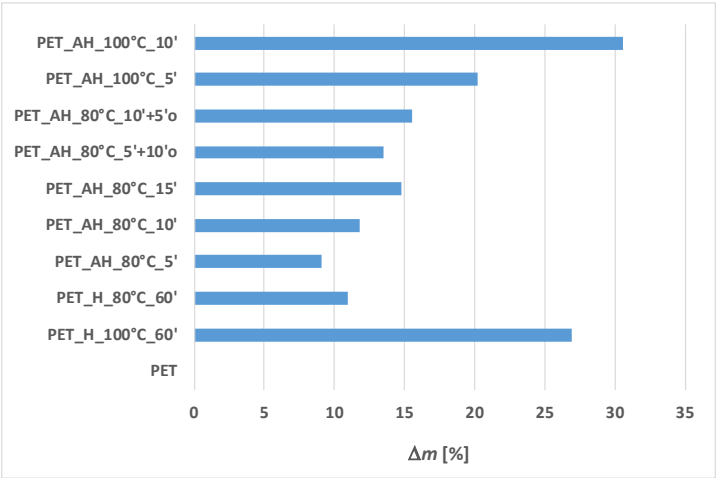
3. Rezultati i rasprava

U radu je istražena modifikacija površine komercijalne poliesterske tkanine alkalnom hidrolizom uz djelovanje akceleratora pri sniženoj temperaturi i uz odležavanje, u svrhu postizanja bolje ekonomičnosti i energetske uštede. Učinci su uspoređeni s neobrađenim uzorcima tkanina dok je kao referentni uzorak za usporedbu uzet alkalno hidrolizirani uzorak na 100 °C u vremenu 60 min (PET_H_100°C_60'). Rezultati promjene plošne mase prikazani su na Slici 1. Mehanička svojstva PET tkanina iskazana silom prekida u smjeru osnove (F_o [N]), prekidnim istezanjem osnovinih niti (ϵ_o [%]) i vremenom prekida (t [s]) prikazani su u Tablici 2, a promjena sile prekida na Slici 2. Promjena bjeline iskazana je stupnjem bjeline prema CIE (W_{CIE}) (Slika 3). SEM analiza provedena je na odabranim uzorcima iz mikrografija prikazanih na Slici 4.

Iz rezultata prikazanih na Slikama 1 i 2 te u Tablici 2 vidljivo je da se alkalnom hidrolizom komercijalne poliesterske tkanine (PET) pri 100 °C bez dodatka akceleratora postiže gubitak mase od 26,89 % u vremenu obrade od 60 min. Istovremeno s gubitkom na masi, dolazi do smanjenja prekidne sile uslijed nagrizanja PET vlakana lužinom. Nakon 40 min obrade lužinom dolazi do graničnog gubitka mase od 41,82 %.

Dodatkom HDTMAC kao akceleratora alkalne hidrolize dolazi do većeg smanjenja plošne mase u kraćem vremenu. Kod dodatka HDTMAC se već u vremenu od 5 min postiže smanjenje plošne mase od 20,22 %, a nakon 10 min 30,55 %. Upravo radi tako brze razgradnje, dodatak HDTMAC kao akceleratora uzrokuje najveće smanjenje prekidne sile, za 5 min prekidna sila obrađene tkanine iznosi 49,1 %, a nakon 10 min smanjenje je veće od 75 %. Smanjenje prekidne sile praćeno je smanjenjem prekidnog istezanja. Prekidno istezanje neobrađenog uzorka iznosi 34,20 % dok primjerice kod alkalne hidrolize u trajanju od 5 min s HDTMAC iznosi 25,78 %.

Budući da je vrijeme reakcije teško skratiti, učinci alkalne hidrolize uz dodatak HDTMAC kao akceleratora istraženi su nakon obrada pri sniženoj temperaturi od 80 °C. Obrade su provedene u vremenu 5, 10, 15 min, a za usporedbu je provedena obrada bez akceleratora u vremenu od 60 min.



Slika 1: Promjena plošne mase uslijed hidrolize PET tkanina

Tablica 2: Mehanička svojstva PET tkanina iskazana silom prekida u smjeru osnove (F_o [N]), prekidnim istežanjem osnovinih niti (ϵ_o [%]) i vremenom prekida (t [s])

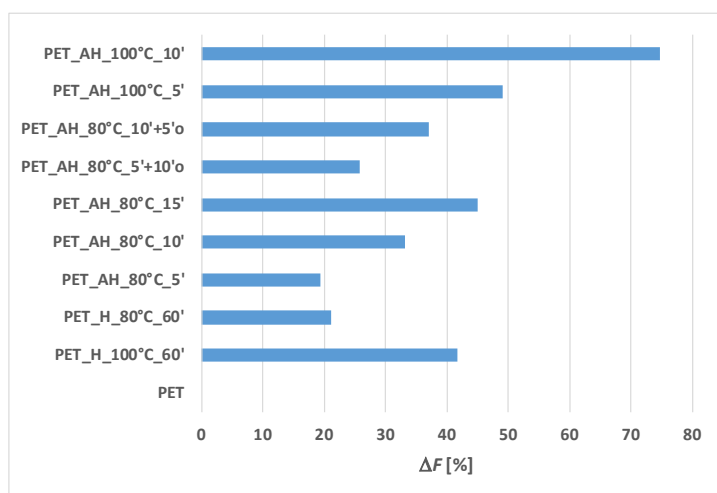
Uzorak	F_o [N]	ϵ_o [%]	t [s]
PET	638,00	34,20	19,0
PET_H_100°C_60'	371,50	31,89	16,3
PET_H_80°C_60'	503,00	26,28	15,8
PET_AH_80°C_5'	514,50	26,13	15,3
PET_AH_80°C_10'	426,50	23,14	15,3
PET_AH_80°C_15'	350,50	23,18	13,9
PET_AH_80°C_5'+10'o	473,50	25,54	15,1
PET_AH_80°C_10'+5'o	402,00	24,13	14,8
PET_AH_100°C_5'	325,00	25,78	15,8
PET_AH_100°C_10'	161,00	22,22	13,7

Iz rezultata gubitka plošne mase PET tkanina, prekidne sile i istežanja je vidljivo da alkalna hidroliza na 80 °C bez dodatka akceleratora za 60 min dovodi do gubitka mase tkanine od 10,94 %. Uz dodatak akceleratora gotovo isti gubitak mase 9,11 % postiže

se za 5 min, a nakon 15 min gubitak mase je 14,75 %, što je unutar željenog gubitka mase (10-20 %). Pad prekidne sile iznosi 45,11 % te je ovo vrijeme optimalno.

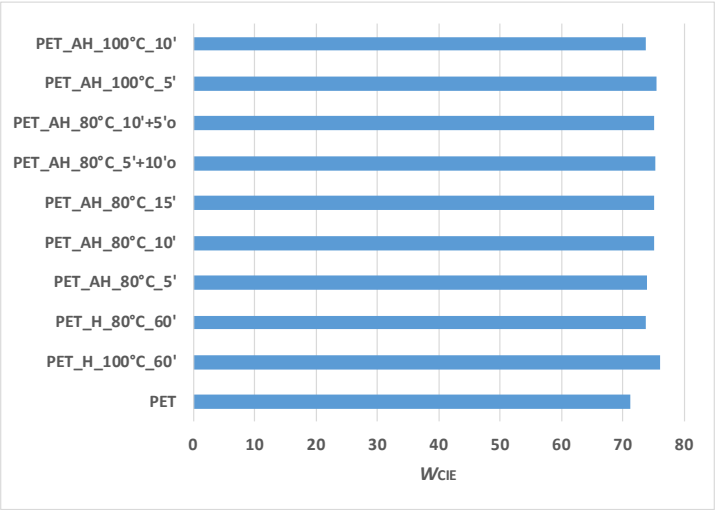
Iz rezultata gubitka plošne mase PET tkanina, prekidne sile i istezanja je vidljivo da alkalna hidroliza na 80 °C bez dodatka akceleratora za 60 min dovodi do gubitka mase tkanine od 10,94 %. Uz dodatak akceleratora gotovo isti gubitak mase od 9,11 % postiže se za 5 min, a nakon 15 min gubitak mase je 14,75 %, što je unutar željenog gubitka mase (10-20 %). Pad prekidne sile iznosi 45,11 % te je ovo vrijeme optimalno.

Kako bi se dodatno uštedjela energija, a uzevši u obzir kratko vrijeme obrade, istraženi su učinci u dvije kombinacije: a) obrada 5 min i odležavanje 10 min; b) obrada 10 min i odležavanje 5 min. Iz rezultata promjene plošne mase i sile prekida vidljivo je kako se u oba slučaja postižu slični rezultati. Budući da se kod vremena obrade 5 min i odležavanja 10 min postiže smanjenje mase od 13,53 % i sile prekida od svega 25,78 %, ovaj postupak (PET_AH_80°C_5'+10'o) pokazao se optimalnim.

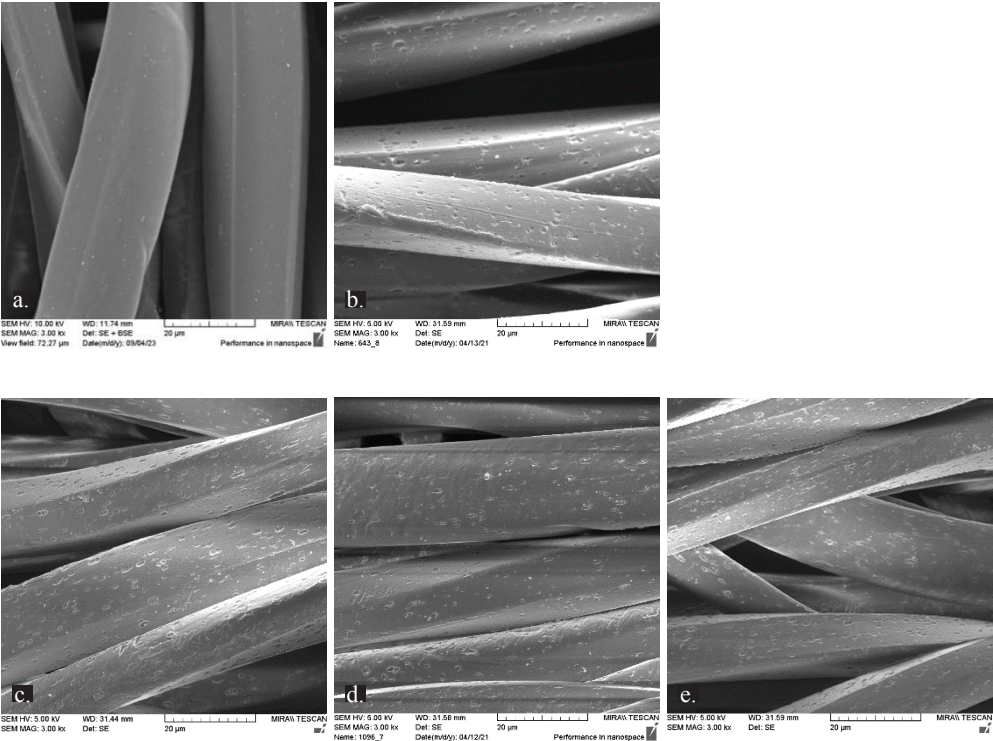


Slika 2: Promjena prekidne sile uslijed hidrolize PET tkanina

Iz rezultata stupnja bjeline (W_{CIE}) prikazanih na Slici 3 vidljivo je da je stupanj bjeline neobrađene PET tkanine 71,2. Alkalnom hidrolizom nije došlo do požućenja tkanine, štoviše, došlo je do porasta bjeline što ukazuje da je alkalnom hidrolizom došlo do čišćenja površine. Uspoređujući bjeline svih uzoraka, vidljivo je da se stupanj bjeline kreće od 73,7 za PET_AH_100 °C_10' do 76,1 za PET_H_100 °C_60', dok gotovo svi uzorci obrađivani na 80 °C postižu stupanj bjeline $W_{CIE} \approx 75$.



Slika 3: Stupanj bjeline prema CIE (W_{CIE}) PET tkanina prije i nakon hidrolize



Slika 4: SEM mikrografije PET vlakana u tkanini pri povećanju 3000×: a. neobrađena, PET, b. PET_H_100°C_60', c. PET_AH_100°C_5', d. PET_AH_80°C_10', e. PET_AH_80°C_5' + 10'

Na Slici 4 prikazane su SEM mikrografije PET vlakana u tkanini pri povećanju 3000×. Na SEM mikrografiji neobrađene PES tkanine vidljivo je da je površina vlakana glatka, a hidrolizom dolazi do ljuštenja površine i postaju vidljive jamice na površini vlakana. Na temperaturi od 100 °C uz dodatak akceleratora dolazi do znatnijeg oštećenja vlakana u poprečnom smjeru, što su potvrdili i rezultati prekidne sile.

Iz SEM mikrografija uzorka hidrolizirane PET tkanine uz dodatak akceleratora na 80 °C u vremenu od 10 min također su vidljive karakteristične jamice, ali nema vidljivog oštećenja vlakna, a slično se postiže i uz odležavanje, što ukazuje na dobre učinke ove energetski i ekonomski povoljnije obrade.

4. Zaključak

U svrhu energetske i ekonomske učinkovitosti u odnosu na konvencionalni proces alkalne hidrolize (100 °C, 60 min) u radu je istražena mogućnost hidrolize PET tkanina pri sniženoj temperaturi i uz odležavanje u kupelji. Hidroliziranim PET tkaninama prema normiranim metodama ispitana je prekidna sila i istežanje, gubitak mase, te stupanj bjeline. Rezultati su uspoređeni s neobrađenim uzorkom i referentnim uzorkom, konvencionalno alkalno hidroliziranom PET tkaninom. Pokazalo se da se pri visokoj temperaturi uz dodatak akceleratora PET tkanina prebrzo hidrolizira uz veće gubitke na masi i čvrstoći. Snižanjem temperature na 80 °C moguće je provesti alkalnu hidrolizu u kraćem vremenu i pri nižoj temperaturi, a da pri tome zadovoljavajuća svojstva tkanine ostanu zadržana. Dodatno se pokazalo da je moguće uz dodatak akceleratora i dodatno uštedjeti energiju odležavanjem u kupelji. Obrada na 80 °C uz dodatak HDTMAC u vremenu 5 min uz odležavanje 10 min daje optimalne rezultate. Iako ovaj postupak još uvijek nije u potpunosti ekološki prihvatljiv s obzirom na upotrebu natrijeva hidroksida, ekonomski je i energetski prihvatljiviji u odnosu na konvencionalni postupak, a time i održiviji.

5. Literatura

- [1] Gawish, S. M.; Ambroise, G.: Alkaline Hydrolysis of Polyester Fabrics, *American Dyestuff Reporter*, **75** (1986) 30-32
- [2] Dave, J.; Kumar, R.; Srivastava, H. C.: Studies on modification of polyester fabrics I: Alkaline hydrolysis, *Journal of Applied Polymer Science*, **33** (1987) 2, 455-477, <https://doi.org/10.1002/app.1987.070330215>
- [3] Grancarić, A. M.; Soljačić, I.; Rukavina, I.; Čavar, T.: Utjecaj obrade na efekte alkalne hidrolize poliestera, *Tekstil*, **37** (1988) 12, 689-694

- [4] Grancarić, A. M.; Pušić, T.; Kallay, N.: Modifikacija poliesterskog vlakna alkalnom hidrolizom. *Polimeri*, **12** (1991) 141-145
- [5] Kallay, N.; Grancarić, A. M.; Tomić, M.: Kinetics of Polyester Fibre Dissolution. *Textile Research Journal*, **60** (1990) 11, 663-668, <https://doi.org/10.1177/004051759006001106>
- [6] Grancarić, A. M.; Kallay, N.: Kinetics of polyester fiber alkaline hydrolysis: Effect of temperature and cationic surfactants, *Journal of Applied Polymer Science*, **49** (1993) 1, 175-181, <https://doi.org/10.1002/app.1993.070490121>
- [7] Hsieh, Y.L.: Surface Characteristics of Polyester Fibers. In *Surface Characteristics of Fibers and Textiles*, 1st ed.; Pastore, C.; Kiekens, P.; Eds.; Marcel Dekker: Basel, Switzerland, (2001), Chapter 2, str. 33-58
- [8] Cao, J.; Meng, C.; Cheng, X.; Pan, X.: Surface alkali deweighting and dyeing of polyester fabric by one-bath and one-step process, *Surface Innovations*, **7** (2019) 2, 104-111, <https://doi.org/10.1680/jsuin.18.00049>
- [9] Čorak, I.; Tarbuk, A.; Đorđević, D.; Višić, K.; Botteri, L.: Sustainable Alkaline Hydrolysis of Polyester Fabric at Low Temperature, *Materials*, **15** (2022) 1530, <https://doi.org/10.3390/ma15041530>
- [10] Pušić, T.; Kaurin, T.; Liplin, M.; Budimir, A.; Čurlin, M.; Grgić, K.; Sutlović, A.; Volmajer Valh, J.: The Stability of the Chitosan Coating on Polyester Fabric in the Washing Process, *Tekstilec*, **66** (2023) 2, 85-104, <https://doi.org/10.14502/tekstilec.66.2023010>
- [11] Đorđević, D.; Petronijević, Z.; Dimitrijević, S.; Đorđević, S.: Commercial and Laboratory Application of Enzymatic Lipase Preparation in the Polyester Fabric Processing to Improve the Sorption and Dyeability Properties, *Tekstil*, **55** (2006) 8, 402-409
- [12] Quartinello, F.; Guebitz, G. M.; Ribitsch, D.: Surface functionalization of polyester, *Methods in Enzymology*, **627** (2019) 339-360, <https://doi.org/10.1016/bs.mie.2019.08.007>
- [13] Wu, J.; Cai, G.; Liu, J.; Ge, H.; Wang, J.: Eco-friendly surface modification on polyester fabrics by esterase treatment, *Applied Surface Science*, **295** (2014) 150-157, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.01.019>
- [14] Čorak, I.; Tarbuk, A.; Flinčec Grgac, S.; Dekanić, T.: Bio-Innovative Modification of Poly(Ethylene Terephthalate) Fabric Using Enzymes and Chitosan, *Polymers*, **16** (2024) 2532. <https://doi.org/10.3390/polym16172532>
- [15] Mitić, J.; Amin, G.; Kodrić, M.; Šmelcerović, M.; Đorđević, D.: Modifikacija strukture poliesterskih vlakana primjenom organskih otopina, *Tekstil*, **65** (2016) 5-6, 190-195
- [16] Dong, Z.; Chen, G.: Alkaline hydrolysis of polyester in the presence of ionic liquids, *Advanced Materials Research*, **441** (2012) 661-665, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.441.661>
- [17] https://www.google.com/search?q=80+%2F+5%2C000+ecological%2C+energy+and+economic+aspects+in+the+development+of+textiles+with+targeted+properties&oq=80+%2F+5%2C000+ecological%2C+energy+and+economic+aspects+in+the+development+of+textile+with+targeted+properties&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOdIBCTEWnZrQMGoXNagCALACAA&sourceid=chrome&ie=UTF-8, *Pristupljeno*: 2025-02-14

- [18] Pušić, T.; Šaravanja, A.; Bušac, T.; Šimić, K.; Dimitrov, N.; Čurlin M.: Assessment of polyester knitted fabrics and effluents from standard and innovative washing processes, *Engineering Power: Bulletin of the Croatian Academy of Engineering*, **18** (2023) 1, 13-20

Zahvala

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2017-05-8780 Bolničke zaštitne tekstilije, HPROTEX. Dio istraživanja je rezultat znanstveno-istraživačkog projekata u sklopu zajedničke hrvatsko-srpske suradnje “Bio-inovirani poliesteri”.

UPRAVLJANJE ENERGETSKOM TRANZICIJOM

Alfredo Višković¹

¹Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vukovarska 58, Rijeka

Sažetak: *Pariški sporazum je 2015. godine potpisalo 196 zemalja, s ciljem “ograničavanja globalnog zagrijavanja na znatno ispod 2 °C, po mogućnosti na 1.5 stupnjeva Celzijusa, u odnosu na predindustrijske razine”. Tijekom COP 26 2021. godine, većina zemalja sudionica složila se smanjiti emisije do 2030. godine i postići nulte emisije do 2050. godine, planirajući povezana financiranja. Važno je napomenuti da je od 1990. godine temperatura već porasla za +1.1 °C (u 2019.) te da su u razdoblju od 1980. do 2020. kumulativne ekonomske štete uzrokovane klimatskim promjenama iznosile 487 milijardi eura u Europskoj uniji. Jasno je da je potrebna značajna promjena kako bi se postigli europski ciljevi dekarbonizacije: emisije moraju biti smanjene za 5,5% godišnje kako bi se postigla negativna bilanca emisija, ali prema trenutačnom trendu cilj smanjenja emisija za 55% neće biti postignut za 16 postotnih bodova do 2030. godine i bit će postignut tek 2050. godine. Pitanje koje se nameće kao presudno nije pitanje samo opsega, načina, roka ostvarivosti energetske tranzicije sa starog na novo, nego istovremeno i pitanje kako njome upravljati da ne bismo odbacili ono staro prije nego što sazrije ono novo, pošto nije razumno prepustiti razvoj situacije nepredvidljivoj igri tržišta ili usuglašavanju neusklađenih nacionalnih politika. Sve dok tehnologije ne dosegnu stupanj zrelosti na kojem će moći ponuditi rješenje za problem varijabilnosti koja danas karakterizira proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora, staro i novo nužno će morati supostojati. Neko će vrijeme biti neophodna, a nije moguće predvidjeti koliko će to dugo trajati, paralelna koevolucija i integracija fosilnih i obnovljivih izvora. Politike dekarbonizacije napredovat će različitim tempom u različitim područjima i sektorima gospodarstva. Eliminirati jedan dio emisija iziskuje poseban društveni angažman, poput sektora kemijske proizvodnje, zrakoplovnog prijevoza, teške proizvodne industrije.*

Tehnologije zarobljavanja ugljika ili tehnologije “negative emissions” – bioenergetski procesi s negativnom ugljičnom bilancom – moći će ponuditi rješenje u rokovima koji se ipak neće moći pouzdano zacrtati ne posveti li se dovoljna pažnja razvoju i istraživanju. Kompleksnost je najistaknutije obilježje pitanja klimatskih promjena. Da bi se izbjegli nesporazumi, autor ovog teksta izjavljuje da je uvjerenja da se trebamo hitno i odlučno uhvatiti u koštac s najozbiljnijom prijetnjom u povijesti čovječanstva: zagrijavanjem Zemlje, što znači da prihvaća istinitost te tvrdnje. Pariški sporazum, koji je u prosincu 2015. potpisalo 196 zemalja na

21. konferenciji stranaka Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o klimatskim promjenama (COP 21), predstavlja koristan politički okvir za zajedničke napore država u tom smjeru. Europska unija koja je ili želi biti svjetski predvodnik u borbi protiv klimatskih promjena "the greenest of the class" izdala je tisuće novih stranica punih prijedloga Komisije koje nose naslov *Clean Energy for All Europeans* kojima je cilj, kako čitamo, "upravljati tranzicijom k čistoj energiji".

1. Upravljanje tranzicijom k čistoj energiji

Pitanje koje se na temelju dosadašnjih iskustava napisali nameće kao presudno nije toliko pitanje opsega, načina, roka ostvarivosti energetske tranzicije sa starog na novo, nego više pitanje kako njome upravljati da ne bismo odbacili ono staro prije nego što sazrije ono novo, pošto nije razumno prepustiti razvoj situacije nepredvidljivoj igri tržišta ili usuglašavanju neusklađenih nacionalnih politika. Sve dok tehnologije ne dosegnu stupanj zrelosti na kojem će moći ponuditi rješenje za problem varijabilnosti koja danas karakterizira proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora, staro i novo nužno će morati supostojati.

Neko će vrijeme biti neophodna, a nije moguće predvidjeti koliko će to dugo trajati, paralelna koevolucija i integracija fosilnih i obnovljivih izvora. Promatrati ih kao antitezu više je kontraproduktivno negoli pogrešno. Politike dekarbonizacije napredovat će različitim tempom u različitim područjima i sektorima gospodarstava. Jedan dio emisija jednostavno se neće moći eliminirati, barem tamo gdje neće biti moguće naći zamjenu za ugljikovodike, poput sektora kemijske proizvodnje, zrakoplovnog prijevoza, teške proizvodne industrije. Tehnologije zarobljavanja ugljika ili tehnologije "negative emissions" – bioenergetski procesi s negativnom ugljičnom bilancom – moći će ponuditi rješenje u rokovima koji se ipak neće moći pouzdano zacrtati ne posveti li se dovoljna pažnja razvoju i istraživanju.

Što penetracija novih *low-carbon* tehnologija bude veća, to će manja biti potražnja za tradicionalnim izvorima energije. Investicije koje mogu zajamčiti priljev tehnoloških inovacija i dalje će biti potrebne, mada će neizvjesnost rasti. "Prekidi opskrbe i skokovi cijena bili su noćna mora s kojom su se suočavali *policy makers* u svijetu nakon 1973. U svijetu nakon 2020. mogli bi opet postati normalni" [1]. Zanimljivo je uloge koju će nafta i prirodni plin još dugo morati igrati povećava rizik nestabilnosti tržišta i ugrozu sigurnosti, drukčije nego u prošlosti, ali još ozbiljnije. Iz toga proizlazi – a to je najvažnija točka koju treba istaknuti – očito proturječan položaj fosilnih industrija: između mogućnosti da ih klimatske politike, budu li dosljedne u ispunjavanju obveza preuzetih u Parizu, postupno marginaliziraju i imperativa, s druge strane, da te iste industrije donesu strateške odluke *danas za sutra* o kojima će zatim ovisiti ne toliko njihova budućnost koliko budućnost tržišta energije u cjelini i budućnost svjetske ekonomije.

Zvono je u Parizu zvonilo za te industrije dajući im do znanja da ih međunarodna zajednica više ne smatra ključnima za budućnost energetike. Dosad su uživale podršku država kojoj je sada suđeno da nestane ili da se pak bitno promijeni zbog sve većih zakonskih prepreka – kontrola emisija, postupci za dobivanje odobrenja, pooštrevanje ekoloških standarda – dodatna fiskalna opterećenja za proizvodnju, smanjenje potpora koje još uvijek dobivaju, podrška zamjenskim tehnologijama [2]. Mnogo je elemenata koji to potvrđuju. Javne politike, ali i dio financijske zajednice, preusmjere su težište na obnovljive izvore.

Prvi koji plaća cijenu je ugljen. Svjetska banka odlučila je da neće financirati nove projekte s ugljenom “osim u rijetkim slučajevima” [3], a slično je napravila i Deutsches Bank, oduvijek glavni financijer njemačkog ugljena. Finska vlada predložila je, prva na svijetu, zabranu korištenja ugljena u proizvodnji električne energije. Grupe investitora, mirovinski fondovi, osiguravajuća društva, vjerske zajednice, sveučilišta – svi povlače investicije iz industrije ugljena. Vrijednost njezine imovine, *assets*, praktički se strmoglavlila u pet godina s padom od devet desetina u Americi, pri čemu polovicu aktualne proizvodnje ostvaruju kompanije koje su ustvari na rubu propasti. I na kraju, ali ne najmanje važno, zatvaranje posljednjeg engleskog rudnika, što je imalo veliko simboličko značenje, označilo je kraj ere ugljena na kojem je Europa gradila svoj razvoj. Tako je zbrisana, potopljena, vrijednost stotina milijardi tona zaliha ugljena koje još uvijek leže u europskom podzemlju [4].

Bojazan da bi slična sudbina mogla zadesiti naftu i plin opravdana je. Dapače, to je neizbježno budu li se ispunjavale obveze preuzete u Parizu. Prema znanstvenom konsenzusu, da bismo imali priliku barem prepoloviti globalno zagrijavanje od 2 °C, “budžet ugljika” iz antropogenih izvora, koji će biti na raspolaganju budućim naraštajima, mora biti ograničen na 1000 milijardi tona CO₂eq. A tako ograničen budžet bio bi dostatan tek za tri desetljeća ne promijene li se brojke vezane za tokove emisija [5]. Da bismo ostali u okvirima budžeta, velik dio utvrđenih rezervi fosilnih izvora morao bi ostati pod zemljom – 82 % ugljena, 49 % metana, 35 % nafte [6] – što odgovara količini od 650 milijardi tona ekvivalenta nafte i vrijednosti koja se procjenjuje na 111 tisuća milijardi dolara.

2. Dva ključna pitanja

Prvo: hoće li se energetska tranzicija ostvariti u rokovima i na način kako je to definirano u Parizu, uz krah potražnje za fosilnim izvorima, a time i potrebe da se povećava njihova ponuda? Drugim riječima: treba li vjerovati Agenciji iz Pariza – koja okuplja sve razvijene zemlje – i njezinim projekcijama scenarija u kojima će fosilni izvori biti dominantni još desetljećima ili pak samim državama, koje se trude izbaciti fosilne izvore iz svojih energetske bilanci?

Drugo: pošto se na prethodno pitanje ne može sa sigurnošću odgovoriti osim *ex post*, otvara se drugo pitanje: kako osigurati da same fosilne industrije ipak realiziraju ulaganja potrebna da se zadovolji potražnja za fosilnim resursima u slučaju da se ona ne smanji ili čak poraste, tako da se izbjegn timer tržišne neravnoteže?

Ravnotežu bismo mogli postići samo u idealnom svijetu: gdje države poštuju (dobrovoljno) preuzete obveze, gdje “maksimalna suradnja” među državama, kako stoji u Sporazumu, ima prednost nad tisućama sukoba kojima je premrežena međunarodna scena, gdje nova tehnološka čuda ostvaruju puni industrijski razvoj u skladu s tržišnom logikom, gdje su zahtjevi investitora u pogledu isplativosti u potpunosti zadovoljeni. U idealnom svijetu, koji nije od ovoga svijeta.

Napori koji se ulažu u osiguravanje ekološke održive budućnosti ne oslobađaju čovječanstvo – to je je rizik na koji smo ukazali – bremena obveze da utaži glad svijeta za energijom. Dva su to prioriteta, na kojima treba raditi usporedno u nastojanju da se izbjegne *mismatch* između rizika na strani klime i rizika na strani ponude. Da bar imamo snažne ekološke politike! Ustvari, pošto su te politike usvojene na brzinu i kao *prisilne*, a to je presudno u borbi protiv klimatskih promjena, i pod (hrabrom?) pretpostavkom da će ostvariti željene ciljeve, krivulja zagrijavanja planeta spuštati će se do priželjkivane polovice od 2 °C nauštrb vrijednosti rezervi fosilnih goriva i već realiziranih investicija [7].

Ako pak, s druge strane, Pariški sporazum ne uspije – stvarno – promijeniti stanje stvari, a bojimo se da bi se to moglo dogoditi, odnosno ako dinamike energetske tranzicije ne budu konvergirala prema 2 °C, klimatski rizici će se povećati pošto ćemo se morati oslanjati na fosilne resurse, pri čemu postoji utemeljena bojazan da će se ulaganja danas već sutra pokazati nedostatnima za ispunjavanje potreba. Zaključak glasi da, pošto snažne klimatske politike ne jamče baš ništa što se tiče dugoročnih ishoda, posljedice obeshrabrivanja tradicionalnih investicija očitovale bi se sad odmah u vidu kraha, s predviđenim opsegom smanjenja od jedne trećine u sljedeća dva desetljeća [8], a to bi pak negativno utjecalo na tržišnu ravnotežu, cijene energije, energetsko siromaštvo. Prema tom scenariju, koji se ne može isključiti, cijene bi odletjele u nebesa: u tom slučaju, slom velikih naftnih kompanija bilo bi puno veseliji – manje proizvodnje, a više profita.

Bilo bi, dakle, bolje kad bi države, ne odričući se obveza preuzetih u Parizu, priznale da svijet još dugo neće moći bez fosilnih izvora energije, pri čemu ipak moraju odlučno raditi na tome da izgrade budućnost koja slijedi nakon toga: povećati napore u području razvoja i istraživanja, pripremiti nove industrijske platforme kao nužnu podršku za prodor novih tehnologija, usvojiti ekonomske instrumente koji pogoduju preusmjeravanju investicija iz tradicionalnih u nove tehnologije.

“Politika voli” – napisao je Dieter Helm – “obećavati rješenja bez ikakvih troškova, a samo dodatno povećava račun u nastojanju da izbjegne platiti cijenu i troškove. Pro-

blem emisija ugljika neće se riješiti bez direktne integracije ugljika u ekonomije”. I, ne najmanje važno, bez “zajedničkog djelovanja”, koje se uvijek naglašava na raznim *summitima* velikih nacija.

Nastavi li i dalje živjeti od akumuliranog kapitala umjesto od prihoda, čovječanstvo će, pod pritiskom demografskog rasta i razvoja, neizbježno udariti o zid ograničene dostupnosti resursa. Iz toga proizlazi da je nužno pronaći alternativne izvore energije – među kojima i nuklearnu energiju – koji mogu zamijeniti fosilna goriva kako bi se spriječila regresija čovječanstva na razinu agrarnoga društva, što bi pak podrazumijevalo nepojmljivu i bolnu kontrakciju dimenzija djelokruga čovječanstva i kvalitete života ljudi da se ne bismo “zatekli u situaciji u kojoj će rudnici biti prazni, a spremnici onečišćujućih tvari puni”. To se ne razlikuje od zaključka do kojega je došao povjesničar energije Vaclav Smil:

Naša civilizacija tek je prijelazna faza: za razliku od onih koje su joj prethodile, budući da se u cijelosti zasniva na iskorištavanju fosilnih goriva, jednostavno neće moći trajati tisućama godina pošto su zalihe fosilne energije ograničene, a, čak i kad bi se koristile na učinkovitiji način, ipak će se iscrpiti kroz pola tisućljeća ili malo više. Ustvari, kraj naše civilizacije mogao bi nastupiti mnogo prije nego što sasvim iscrpimo materijalne zalihe ugljena i ugljikovodika: rastući troškovi, rastući ekološki rizici vezani za korištenje fosilnih goriva prisilit će naše potomke da se vrate korištenju sunčeve energije ili da razviju nove izvore energije.

3. Neizvjesnost budućnosti energetike

Iz tih razmišljanja proizlazi apsolutna neizvjesnost budućnosti energetike i pitanja klime, koja će predstavljati zaglavni kamen sutrašnjice zato što je jednostavno previše varijabli u igri i previše međuovisnosti o kojima ta budućnost ovisi. Neizvjesnost je to koja ne dozvoljava da se predvidi bilo kakav iole pouzdan scenarij. Nema nikakve izvjesnosti, a time ni istina za koje se treba boriti. Taj zaključak počiva na sljedećim pretpostavkama:

1) Pariški sporazum za međunarodnu je zajednicu predstavljao važno političko-diplomatsko postignuće zato što je uspio osigurati opći konsenzus i kolektivno osvještavanje rizika klimatskih promjena. Moramo slijediti put energetske tranzicije u smjeru dekarbonizacije i smanjivanja globalnog zatopljenja, i to žurno, odlučno, postojano, mada pritom moramo biti svjesni da, na našem sadašnjem stupnju znanja, *zero-carbon* svijet može biti “zadani ideal” kojem trebamo težiti, ali koji će u konačnici ostati nedostižan;

2) Energetska tranzicija zahtjevan je put, dugačak, skup, koji će se teško moći prijeći u rokovima koji odgovaraju ciljevima zacrtanima u Parizu. Dekarbonizacija će ustva-

ri zahtijevati zamjenu čitavog postojećeg temeljnog kapitala u području energije kako na strani ponude tako i na strani potražnje. Zavaravati se da to nije tako predstavlja tek jalovu utjehu i usporava provedbu mjera koje moramo poduzeti. Reći kako stvari stvarno stoje, nadilazeći moralizatorske i manihejske poglede na situaciju, nudeći analize činjenica umjesto emocija i izbjegavajući lažne tvrdnje u maniri “lako ćemo”, nužan je preduvjet za postizanje nužnog konsenzusa u stavovima javnosti, koja će ionako platiti cijenu energetske tranzicije;

3) Stvari ne idu onako kako smo se nadali, zbog politike koja kasni s donošenjem potrebnih mjera. Nedjelovanje vlada stoji na putu žurnoj potrebi za poduzimanjem mjera s ciljem rješavanja hitnih situacija koje se sve češće javljaju, umanjuje izgleda za usporavanje emisija onečišćujućih tvari, povećava troškove nužnih mjera, jača skepsu spram klimatskih promjena kod stanovništva;

4) Kako nas prošlost uči, stroge zadatosti koje određuju procese zamjene izvora energije ne dopuštaju da se, osim u dugom roku od više desetljeća, dominantni izvori energije – u našem slučaju, fosilni – dugoročno i u znatnom opsegu zamijene drugim izvorima. Još ćemo dugo ostati, htjeli ne htjeli, njihovi taoci u toj igri, iako će njihova uloga postupno nužno slabiti;

5) Stoga je potrebno dugoročno zajamčiti punu ravnotežu između ponude i potražnje za energijom, posebno kad govorimo o siromašnim zemljama. Borba protiv klimatskih promjena ne može biti suprotstavljena – s gledišta obveza država, raspodjele resursa, strategija industrija – borbi protiv energetskog siromaštva, koja nije ništa manje hitna. Pobjeda u prvoj borbi nauštrb one druge ne bi bila ništa doli jalove pobjede za cijelo čovječanstvo;

6) Postoji rizik da će industrija nafte i prirodnog plina, suočena s neizvjesnošću vlastite budućnosti i mogućim rušenjem cijena mineralnih rezervi, na kojima počiva i njezina vrijednost, uslijed agresivnih klimatskih politika, odlučiti smanjiti ulaganja stvarajući tako pretpostavke za snažnu neravnotežu na tržištima. Tranzicija prema novim izvorima energije ne oslobađa svijet odgovornosti da osigura ispunjavanje svih energetskih potreba u budućnosti. Stoga je nužno pažljivo kalibrirati klimatske politike i upravljati energetskom tranzicijom;

7) Kao i u prošlosti, iz nevolja će nas izvući upravo razvoj tehnologije i njegovi nepredvidljivi putovi, koji se ipak polako naziru. Da bi se to ostvarilo, prije svega je neophodno usmjeriti – a to moraju činiti kako države tako i poduzeća – mnogo više sredstava u istraživanje i razvoj nego dosada, pak čak i ako to znači smanjiti potpore postojećim tehnologijama (bilo da je riječ o obnovljivim izvorima ili ne). Moramo riješiti tu skupu i neučinkovitu neravnotežu da bismo izašli iz ere fosilnih goriva;

8) Provedba energetske tranzicije zahtjeva golema ulaganja dodatnih sredstava, osim inicijalnih investicija privatnih subjekata kojima se mora zajamčiti prihvatljiva profi-

tabilnost, u aktivnosti koje se ne oslanjaju na tržišnu logiku. Trenutni tokovi potrošnje mnogo su manji od potreba;

9) Trenutna tržišna dinamika ne podupire klimatske politike. Pretpostavku na kojoj su se temeljile, naime, da će se uzlazni trend cijena zadržati, opovrgnule su inovacije u području iskorištavanja nekonvencionalnih izvora ugljikovodika pa bi se faza niskih cijena mogla pokazati tek kao besplatan ručak, a to se javnosti mora jasno objasniti;

10) Pogled na sutra očima jučerašnjega iskustva pokazuje da nema razloga vjerovati da će se nova katastrofična predviđanja o “klimatskim promjenama” pokazati išta točnijima od nekadašnjih predviđanja o “granicama razvoja” i da nema mogućnosti, alata, načina da odgovorimo na te izazove. Ne smijemo dati šansu rezignaciji ili pesimizmu. Počnimo mijenjati sami sebe i naš sustav vrijednosti, koje ne smiju ostati ovakve kakve jesu pošto ugrožavaju sudbinu planeta. To je prava “srž problema”.

4. Literatura

- [1] Van der Linde, *Energy Security. New Forms of Energy Creates New Dependencies*, in Kramer and Vermer, (2016), 34
- [2] Heffron. *The implication of the Paris Agreement and Climate Change from a Legal Perspective*, in OIES, (2016)
- [3] World Bank, *Toward a Sustainable Energy Future for All, Directions for the World Bank Group's Energy Sector*, Washington DC, (2013)
- [4] Caldecott, B.; Kruitwagen, L.; Dericks, G.; Tulloch, D. J.; Kok, I.; Mitchell, J.: *Stranded Assets and Thermal Coal: As Analysis of Environment-related Risk Exposure*, Oxford, Oxford Smith School, University of Oxford, (2016)
- [5] UNFCC, *Updated Syntesis Report on the Aggregate Effects of INDCs*, (2016)
- [6] McGlade, C.; Ekins, P.: The Geographical Disteribution of Fossil Fuel Unused When Limiting Global Warming to 2 °C, *Nature*, **517** (2015) 187-190, <https://doi.org/10.1038/nature14016>
- [7] Mitchell, J.; Marcel, V.; Mitchell, B.: *Oil and Gas Mismatches, Finance, Investment and Climate Polices*, Chatham House, (2015) 36
- [8] IEA, *World Energy Outlook*, (2024)

ENERGETSKA TRANZICIJA U PODRUČJU GRAFIČKE TEHNOLOGIJE

Zdenka Bolanča¹, Ivana Bolanča Mirković^{1,2}

¹Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, Kačićeva 28, 10000 Zagreb

²Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet, Getaldićeva 2, 10000 Zagreb

Sažetak: Zelene i digitalne tehnologije mogu se smatrati podrškom energetske tranzicije. Energetski fosilni bazni sustavi prelaze u pametne i održive energetske sustave uz podršku digitalne i energetske tranzicije. U radu se diskutiraju potrošnja i ušteda energije, rješenja i inovacije u domeni mehaničkih i digitalnih tehnika tiska te medija. Mehaničke tiskarske tehnike uglavnom troše više energije po toni otisnutog proizvoda u odnosu na neke digitalne. U tisku novina veća je potrošnja energije, veća emisija plinova koji doprinose klimatskim promjenama od e- novina na tabletu. Ovisno o korištenim sirovinama industrija tiska i ambalaže ima mogućnost uštede energije i resursa. Posebni je naglasak na papiru i kartonu, kao najviše korištenim tiskovnim podlogama. Osim toga prikazuje se kumulativna potrebna energija po pročitanoj e-knjizi korištenjem čitača za e-knjigu i uspoređuje s utroškom energije za tiskanu knjigu kroz LCA uz komentar za emisiju stakleničkih plinova i njihov utjecaj na vrijeme i klimu.

Ključne riječi: potrošnja energije, mehanički tisak, digitalni tisak, hibridni tisak, e-knjiga

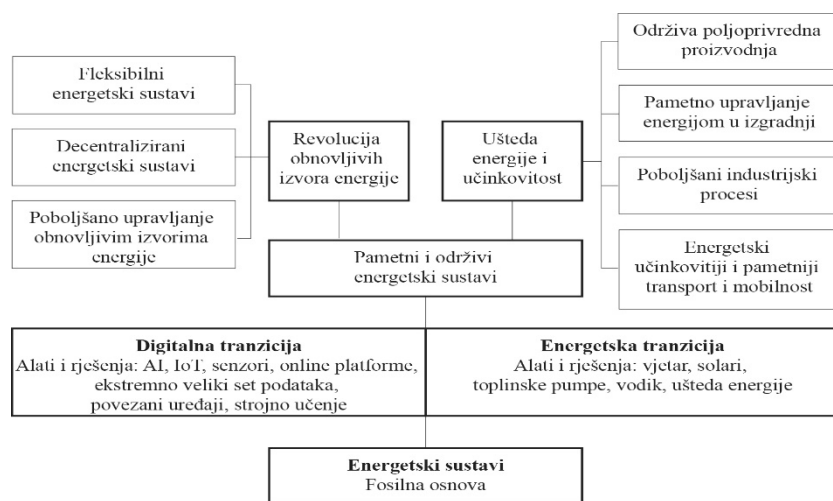
1. Uvod

Energetska tranzicija je proces transformacije energetskog sektora s ciljem prelaska s fosilnih goriva na obnovljive, ekološko prihvatljive izvore energije [1]. Taj proces obuhvaća smanjenje emisije stakleničkih plinova, digitalizaciju, uvođenjem pametnih tehnologija za bolje upravljanje potrošnjom i proizvodnjom energije, optimizaciju potrošnje energije u industriji i transportu, te prelazak gdje je to moguće s centraliziranih na distribucijske izvore energije [2].

Glavni cilj energetske tranzicije je osigurati održivu, sigurnu i gospodarski prihvatljivu energiju, usporiti klimatske promjene i smanjiti ovisnost o fosilnim gorivima. Istraživanja na tom području bitna su za razumijevanje procesa tranzicije, a ovisne

o tome kako će energetska politika modelirati energetske tranzicije i prilagoditi se povezanim transformacijama [3]. Istraživanja potvrđuju da će nadolazeće energetske tranzicije imati poželjnu energetske budućnost [4]. Teorije tranzicije i održivosti javljaju se uglavnom kao najčešće primjenjivi konceptualni okviri, a važnost u rješavanju problematike je u domeni identifikacije čimbenika koji pokreću prijelaz. Pokretači zelene energetske tranzicije su politički, ekonomski, tehnološki, socijalni i okolišni. [5].

Održivi i pametni energetske sustavi (Slika 1) kombiniraju obnovljive izvore energije, digitalne tehnologije i napredne upravljačke mehanizme kako bi osigurali stabilnu, učinkovitu i ekološki prihvatljivu opskrbu energijom [6]. Ključni elementi održivog energetske sustava su dekarbonizacija, energetska učinkovitost, lokalna proizvodnja i kružno gospodarstvo. U domeni održivog energetske sustava naglasak je na istraživanju optimizacije potrošnje energije i kružnom gospodarstvu [7,8].



Slika 1: Održivi i pametni energetske sustavi (modificirano prema [6])

Pametni energetske sustavi koriste digitalizaciju, koja ima važnu ulogu u energetskej tranziciji omogućujući efikasnije i održivije upravljanje energetske sustavima [9-14]. Digitalne tehnologije, poput pametnih mreža, IoT, umjetne inteligencije, pomažu u optimizaciji, distribuciji, proizvodnji i potrošnji energije. Pametne mreže koriste senzore i umjetnu inteligenciju za praćenje i optimizaciju distribucije električne energije u stvarnom vremenu, olakšavaju uključivanje energije iz obnovljivih izvora i omogućavaju dvosmjernu komunikaciju [15-19]. Implementacija pametnih mreža predstavlja ključni korak prema modernizaciji elektroenergetskih sustava, omogućujući sigurniju, učinkovitiju i održiviju distribuciju električne energije.

Pametni energetske sustavi koriste digitalizaciju, koja ima važnu ulogu u energetskej tranziciji omogućujući efikasnije i održivije upravljanje energetskim sustavima [9-14]. Digitalne tehnologije, poput pametnih mreža, I_0T , umjetne inteligencije, pomažu u optimizaciji, distribuciji, proizvodnji i potrošnji energije. Pametne mreže koriste senzore i umjetnu inteligenciju za praćenje i optimizaciju distribucije električne energije u stvarnom vremenu, olakšavaju uključivanje energije iz obnovljivih izvora i omogućavaju dvosmjernu komunikaciju [15-19]. Implementacija pametnih mreža predstavlja ključni korak prema modernizaciji elektroenergetskih sustava, omogućujući sigurniju, učinkovitiju i održiviju distribuciju električne energije.

Pohrana električne energije ključna je za osiguranje stabilnosti i fleksibilnosti elektroenergetskog sustava, posebno s rastućim udjelom obnovljivih izvora energije. Oni omogućuju pohranu viška proizvedene energije za kasniju upotrebu, čime se smanjuje ovisnost o fosilnim gorivima i povećava pouzdanost opskrbe. Postoji nekoliko tehnologija pohrane koje se razlikuju prema obliku energije u kojem se električna energija pohranjuje kao što su: baterijski sustavi, mehanički sustavi, toplinski sustavi i kemijski sustavi. Hrvatska elektroprivreda ima u pogonu baterijske sustave za skladištenje energije u Zagrebu, Vukovoj Gorici i na Visu uz sunčanu elektranu. Prednosti sustava za pohranu energije su: povećana energetska učinkovitost za skladištenje (skladištenje viška energije tijekom niske potražnje i korištenje tijekom vršnih sati), smanjenje troškova energije (korištenje tijekom vršnih sati smanjuje potrebu dodatne proizvodnje ili smanjuje kupnje iz mreže), integracija obnovljivih izvora energije (obnovljivi izvori, solari i vjetroelektrane su povremeni i varijabilni), povećava stabilnost mreže, smanjuje rizik od nestanka struje [20-24]. Implementacija sustava za skladištenje energije ključna je za tranziciju prema održivom i pouzdanom energetskom sustavu, omogućujući bolje iskorištavanje obnovljivih izvora energije i povećanja energetske neovisnosti.

Prelazak na obnovljive izvore je važan za očuvanje okoliša, ekonomski razvoj i poboljšanje kvalitete života, čime se osigurava održiva budućnost za nadolazeće generacije. Obnovljivi izvori energije igraju ključnu ulogu u energetskej tranziciji EU. Udio ukupne potrošnje električne energije iz obnovljivih izvora u zemljama EU u 2023 iznosio je 24,5% što je u porastu u odnosu na 2022 godinu. Udio obnovljive energije se gotovo utrostručio kada se promatra razdoblje između 2004 i 2023 godine [25]. Podaci uzimaju u obzir slijedeće izvore obnovljive energije: energiju vjetrova, solarnu energiju (toplinska, fotonaponska i koncentrirana), hidroenergiju, energiju plime i oseke, geotermalnu energiju, toplinu okoline prikupljene dizalicama topline, energiju dobivenu od biogoriva i obnovljivog dijela otpada [26]. Vjetrova i voda daju većinu obnovljive električne energije, a solarna energija je najbrži rastući izvor energije. Obnovljivi izvori energije trebali bi činiti 69% ukupne energije EU do 2030 godine, od čega 55% samo od sunca i vjetrova [27] Nova solarna energija proizvodi najjeftiniju struju prema IEA (International Energy Agency) [28]. Solarni fotonaponski PV (Photovoltaic) moduli su postali najjeftiniji iz razloga koji slijede: masovna pro-

izvodnja, napredne tehnologije, korištene u proizvodnji, smanjenje cijene sirovina, subvencije i politike podrške u obnovljivim izvorima energije, veliki broj proizvođača stvara tržišni pritisak koji dovodi do smanjenja cijena, duži vijek trajanja i niži troškovi održavanja, te brži povrat investicije [29-34].

2. Karakteristike i izazovi tiskarske industrije

Tiskarska industrija prolazi kroz impresivne tehnološke promjene. Napredak u području elektronike i računarstva revolucionira procesa ispisa, a nastavak slijedi uz podršku AI, I₀T, *online* platformi, povezanih uređaja i strojnog učenja. Održavanje koraka s tempom tehnoloških promjena stalan je izazov za tiskarsku industriju.

Potrošnja električne energije u domeni mehaničkog tiska raspodijeljena je kako slijedi: oko 32,9% troši se u tisku radom pogona stroja, zatim slijede pogon strojeva u post presu 19,4% i u pripremi tiska 11%. [35]. Specifični pokazatelji za tiskarsku industriju usredotočeni su na potrošnju energije i materijala. Međutim, potrošnja energije je ipak glavni pokazatelj za ocjenu Tiskarska industrija prolazi kroz impresivne tehnološke promjene. Napredak u području elektronike i računarstva revolucionira procesa ispisa, a nastavak slijedi uz podršku AI, I₀T, *online* platformi, povezanih uređaja i strojnog učenja. Održavanje koraka s tempom tehnoloških promjena stalan je izazov za tiskarsku industriju.

Tablica 1: Energetski i materijalni utrošci u nekim mehaničkim i digitalnim tehnikama tiska [36]

Indikator	Jedinica	Coldset web ofset	Heatset Web ofset	Ofset na arke	Bakrotisak	Elektro- fotografija	Inkjet
Utrošak energije	kWh/ tona	420-500	750-850	800-1040	590-650	300-700	450-800
Utrošak boje CMYK	kg/tona	14-20	26-32	5-8	22-50	11-39	10-40
Utrošak papira	tona/tona	1,06-1,10	1,20-1,24	1,10-1.30	1,09-1,14	1,05-1,17	1,06-1,11

Na osnovi rezultata prikazanih u Tablici 1 može se zaključiti da digitalni tiskarski strojevi troše manje energije u odnosu na mehaničke [36]. Proučavanjem životnog ciklusa proizvoda mogu se proširiti spoznaje za poboljšanje energetske učinkovitosti tiska. Pihkola i suradnici smatraju da ukupan udio ugljičnog otiska koji pripada fazi ispisa u LCA od kolijevke do groba varira 13-46 % u ovisnosti o otisnutom proi-

zvodu: novinama, časopisu, knjigama, što u stvari daje informaciju i o energetskejoj potrošnji [36]. Kada se promatraju materijalni izvori emisije najveći je proizvodnja papira, koji se koristi kao tiskovna podloga.

Industrija celuloze i papira predstavlja energetske intenzivan sektor, koji je činio približno 6% globalne industrijske potrošnje energije u 2017. godini, da bi se u 2022. to smanjilo na nešto manje od 2% [37].

Industrija celuloze i papira predstavlja energetske intenzivan sektor, koji je činio približno 6% globalne industrijske potrošnje energije u 2017 godini, da bi u 2022 to smanjio na nešto manje od 2% [37]. Predviđa se daljnja ukupna proizvodnja papira do 2030, a uložiti će se napor i za smanjenje emisije. Taj cilj se može postići smanjenjem korištenja fosilnih goriva i poboljšanjem energetske učinkovitosti. Da bi se to postiglo treba primijeniti inovacije u tehnologijama u smjeru smanjenja količine topline, primjenom industrijskih dizalica topline. Pristup je neophodan, jer je poznato da udio reciklaže sve više raste, a ta proizvodnja se oslanja na fosilna goriva.

Tiskarska industrija suočava se s izazovima strukture i tržišta, rastućim troškovima materijala, otežavanju profitabilnosti, ekološkim trendovima i održivošću, te implementacijom energetske učinkovitijih tehnologija. Prema predviđanjima Gamprellisa i suradnika, te saznanja FEP (Federation of European Publisher) samo tiskane novine bilježe pad naklade od – 1,00%, dok najmanje povećanje naklade je u sektoru knjiga 0,90%, a najveće u tisku ambalažnih proizvoda +4,24 % (Tablica 2) [38].

Tablica 2: Predviđeni godišnji hod različitih sektora tiskarske industrije [38]

Sektori tiskarske industrije	2020	2025	Određen godišnji rast (%)
Tisak novina milioni	157,57	149,15	-1,00
Publikacije-knjige milijarde	117,07	122,44	+0,90
Komercijalni tisak milijarde	409,40	460,28	+2,24
Tisak ambalaže milijarde	352.10	433,40	+4,20
Tisak etiketa milijarde	42,70	51,89	+4,00
Sigurnosni tisak milijarde	29,50	36,00	+4,10

Prema podacima Agencije za zaštitu tržišnog natjecanja u 2023. godini u Hrvatskoj je prodana naklada svih opće informativnih dnevnih novina iznosila nešto manje od 28 milijuna primjeraka, što predstavlja pad od 15% u odnosu na 2022. godinu [39].

Smanjenje prodane naklade u 2023. godini iznosi 15% u odnosu na 2022. godinu. To smanjenje je jače izraženo nego kada se usporedi 2022. u odnosu na 2021., koje iznosi 11%. Obzirom na prikazane vrijednosti proizlazi da u promatranom četverogodišnjem periodu se radi o kontinuiranom padu prodane naklade. Treba naglasiti da je najveće smanjenje prodane naklade općeinformativnih dnevnih novina bilo 2021. u odnosu na 2020. godinu.

Prodaja opće informativnih tjednika smanjena je za 8% u 2023. godini u odnosu na 2022., a ukupno prodanih je 1,7 milijuna primjeraka [39]. U 2022. godini prodano je 1,9 miliona primjeraka, pa u odnosu na 2021. pad je iznosio 15%. Smanjenje naklada općeinformativnih novina i časopisa uzrokovano je kombinacijom ekonomskih, tehnoloških i društvenih faktora. Brz razvoj internetskih medija omogućio je besplatan i lakši pristup vijestima putem web portala, društvenih mreža i mobilnih aplikacija. Sve češće se konzumiraju informacije putem digitalnih uređaja umjesto tiskanih izdanja. Posebno mlade generacije rijetko kupuju tiskane novine, jer su navikle na brze i ažurne informacije dostupne *online*. Povećana upotreba pametnih telefona i tableta smanjuju također potrebu za tiskanim medijima. Tiskanim novinama su konkurencija alternativni mediji: Podcasti, You Tube kanali i blogovi.

S druge pak strane zapažen je rast potražnje za ambalažnim proizvodima. Etikete i fleksibilna ambalaža postaju bitna područja rasta za tiskarske tvrtke. Ključne karakteristike ambalažnog tiska su: velika potražnja, napredne tehnologije, personalizacija i ekološki standardi. Tehnologije ambalažnog tiska su: fleksotisak-velike naklade, niski troškovi, fleksibilni materijali; ofsetni tisak-kartonska ambalaža i etikete visoke kvalitete; digitalni tisak-personalizirana ambalaža i duboki tisak-vrlo velike naklade. Izazovi i trendovi u ambalažnom tisku su ekološka ambalaža, pametna ambalaža, integracija QR kodova, NFC tehnologija i senzora za interakciju s potrošačima; automatizacija proizvodnje-napredni tiskarski strojevi i robotika; personalizacije-kroz male serije i digitalni tisak.

3. Ambalažni tisak, tisak etiketa i ušteda energije

3.1 Fleksografski tisak

Fleksografski tisak sve više koristi LEAN proizvodne principe i AI kako bi smanjio utrošak energije, resurse, poboljšao učinkovitost i smanjio otpad [40]. Osim toga to omogućuju tiskarama povećanje produktivnosti, smanjenje troškova i poboljšanje kvalitete ispisa.

Faktori za smanjenje potrošnje energije su:

1. UV LED sušenje nema zagrijavanja i hlađenja zraka

- 2. Automatizirana kontrola viskoznosti boje - AI sustavi mogu precizno regulirati debljinu sloja boje, što smanjuje prekomjernu potrošnju, manje je otpada i manja je potreba za ponovnim tiskom
- 3. Prediktivno održavanje AI sustavi mogu optimizirati radne brzine i tlak valjaka, čime se smanjuje potrošnja električne energije
- 4. Optimizacija sustava za prijenos boje - korištenjem keramičkih anilox valjaka visoke preciznosti višak boje se uklanja i smanjuje se potreba za intenzivnim sušenjem. Poboljšanjem sustava miješanja i distribucije boje smanjuje se trenje, time se troši manje energije
- 5. Korištenje energetski učinkovitijih motora i regenerativnog napajanja - servo motori s niskom potrošnjom, troše manje energije u odnosu na stare. Regenerativni sustavi omogućuju ponovnu upotrebu energije generirane kočenjem valjaka i motora. Integracija I₀T senzora omogućava prilagodbu snage stroja prema potrebama proizvodnje

U fleksografskom tisku najveća ušteda energije se može postići u procesu UV LED sušenja (Tablica 3). Abusaq i suradnici u istraživanju su primjenu LEAN principe i strojno učenja/ML u fleksografskom tisku na dva stroja. Utvrdili su uštedu energije od 34,198% odnosno 38,635% po proizvodnom metru u ovisnosti o vrsti stroja [41]. Kombinacija strojnog učenja AI/ML i LEAN metodologije omogućava značajno smanjenje potrošnje u tiskarskoj industriji.

Tablica 3: Fleksografski tisak i ušteda energije [41]

Metodologija/metoda	UV LED sušenje	Automatizirana kontrola boje	AI optimizacija brzine rada stroja	Prediktivno održavanje	Optimizirani prijenos boje	Servo motor, regeneracija energije	Ukupna moguća ušteda energije
Procjena uštede energije %	40-50	10-20	10-25	15-30	10-20	20-40	30-40

Prediktivni algoritmi omogućuju tvrtkama smanjenje troškova, veću produktivnost i uštedu energije. U fleksografskom tisku oni se koriste za predviđanje kvarova strojeva, optimizaciju potrošnje energije i smanjivanje otpada.

3.2 Ofsetni tisak

Proizvođač tiskarskih strojeva, Heidelberger Druckmaschine AG povećao je energetsku učinkovitost svojih strojeva tijekom godina. Tako usporedba modela Speedmastera CD 102-6+ L iz 1990. godine i najnovijeg modela Speedmastera B1 XL 106-sa osam jedinica pokazuje smanjenje potrošnje energije za više od 40% [42]. Potrošnja energije za 1000 listova u najučinkovitijem načinu rada smanjena je sa 13,5 kWh na 8 kWh. Kod najveće brzine stroja od 18000 sph koristi se 144 kW po satu neprekidnog rada. Stroj može kontinuirano pokazivati potrošnju energije na Wallscrenu. Ušteda energije je postignuta inovacijama i optimizacijom detalja, kao što je povrat energije koja nastaje kočenjem motora. Učinkovitost energije povećana je s 35% do 70%.

AirStar Pro opskrbljivač vakuumom i sušilo vrućim zrakom s optimiziranom mlaznicom štedi 35% na 70% što može uštediti do 140 000 kW s istim formatom listova od 36 m. Ta vrijednost znači dvostruku učinkovitost u odnosu na prethodne generacije. DryStar Combination sušilo na topli zrak može uštediti 27000 kW godišnjom nakladom od 36 miliona listova u usporedbi s modelima prijašnjih generacija sušila. Takovi rezultati se postižu optimiranjem mostova, vodenim hlađenjem, zračnim pumpama s optimiziranim napajanjem.

Na DRUPI 2024 je predstavljen novi Speedmaster XL sa smanjenjem potrošnje energije od 30% kod sušenja, automatiziranim preuzimanjem što smanjuje vrijeme pripreme za 30% i s impresivnim povećanje brzine tiska od 21000 listova na sat [43,44]. Što je veća brzina sušenja, manja je potrošnja energije na 1000 listova. Povećanjem ispisa s 18000 na 21000 smanjuje se potrošnja energije za 4,5%. Osim toga prisutan je visoki stupanj automatizacije podržan AI, koji štedi vrijeme, smanjuje troškove i čine ofsetni tisak konkurentnijim. Visoko automatiziran proces pakiranja pokazuje kako se robotikom i automatizacijom u postpresu može postići revolucionarna industrijska proizvodnja.

Specijalna konfiguracija za tisak ambalaže koja omogućuje autonomne opcije za PUSH to STOP, povećava neto učinak do 20% u usporedbi s prethodnom generacijom i smanjenu potrošnju energije za sušenje do 30% s novom DryStarCombination Eco [45,46]. Može se postaviti pitanje da li ofsetna tehnika tiska može postati konkurentna digitalnom tisku? Potrošnja energije od 144 kW kod najveće brzine stroja po satu neprekidnog rada najnovijeg ofsetnog stroja mnogo je veća od potrošnje digitalnih tiskarskih strojeva. Međutim Heidelbergov Speedmaster 106 XL ispisuje znatno više površina A4 stranica, nego što proizvode digitalni strojevi u jednom satu. Osim toga ofsetni i fleksografski strojevi troše dodatnu električnu energiju u procesu izrade tiskovnih ploča, pa i za dodatni potrošni materijal koji digitalnim strojevima nije potreban.

Potrošnja energije za izradu ofsetnih i fleksografskih tiskovnih ploča ovisi o više faktora: vrsta tehnologije, materijala, veličina ploče i vrsta lampi. CTP tehnologija

eliminira potrebu za filmovima, smanjujući materijalne troškove i potencijalno potrošnju energije. Kodakovi novi uređaji kao što su Trendsetteri i Achive novi Platteseteri tijekom rada troše 43% energije od prethodnih modela. Energetska učinkovitost ne samo da smanjuje troškove u fazi proizvodnje, već i potrošnju energije u fazi grafičke pripreme, što je u skladu s konceptom zelene i ekološki prihvatljive proizvodnje. Tradicionalna mokra proizvodnja ploča uključuje složenu kemijsku obradu, korištenjem velike količine energije i vode, popraćeno nastankom opasnog otpada. Bez procesne ploče donose slijedeće prednosti: smanjenje korištenja kemikalija, veliku uštedu energije i vode, smanjenje potrošnje komunalnih usluga i smanjenje nastajanje otpada.

UV LED tehnologija u odnosu na fluorescentnu ima slijedeće prednosti: bolja izloženost flexo ploča, veća učinkovitost na stroju, trajnost veća od 6 puta i manja potrošnju električne energije [47]. UV LED diode mogu više električne energije pretvoriti u svjetlosnu nego u toplinsku, što znači da pri istom osvjetljenju smanjuje se potrošnja energije UV LED dioda Tablica 4 [48] Korištenjem UV LED diode smanjuje se emisija CO₂ za 50%, ne dolazi do emisije ozona, a eliminirani su problemi vezani za živu. Konvencionalne živine žarulje potrebno je mijenjati svakih 1000-1500 sati rada, dok UV LED diode se mijenjaju nakon više od 60000 sati ako se pravilno održavaju [49] Za potrebe produktivnosti na tržište su se integrirale inherentno ravne formulacije.

Tablica 4: Ušteda energije UV LED tehnologije u odnosu na tradicionalnu [48]

Proces izrade ploče	Tradicionalna tehnologija	UV LED tehnologija	Ušteda energije UV LED %
Ekspozicija ploče	5-10kW/h	2-4kW/h	40-60
Sušenje i otvrdnjavanje	Termalno sušenje 7-15 kw/h	UV LED dioda 2-4kW/h	50-70
Hlađenje	potrebno	nije potrebno	20-30
Cjelokupni proces	100% potrošnje	40-60 % potrošnje	40-80

3.3 Digitalni tisak

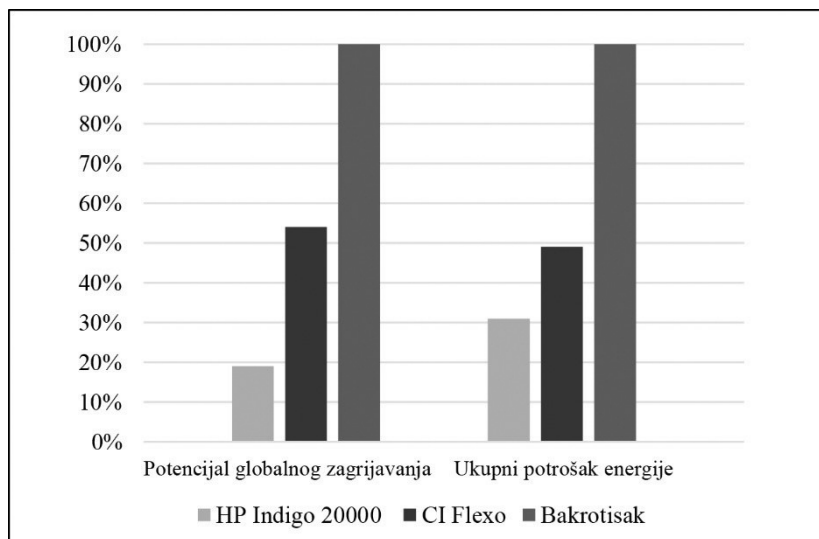
Prednosti digitalnog tiska su: brzina, isplativost za male naklade, ispis se po kvaliteti gotovo ne razlikuje od ofsetnog, veća fleksibilnost u pogledu prilagodbe, personalizacija, smanjenje materijala i otpada, ekološka prihvatljivost i manja potrošnja energije. Ušteda energije u kratkoročnim poslovima je oko 0,15-0,3 kWh za 1000 ispisa. Tvrtke poput Xeroxa proizvode emulzijski agregacijski toner, a pri tome je utrošak energije manji za 30%. Digitalna tehnika s obzirom na nabrojeno više pridonosi tranziciji energije i održivosti u odnosu na ofsetni i fleksografski tisak

Konvencionalni ofsetni strojevi su potrošači energije u slučaju korištenja aluminijskih ofsetnih ploča. Većina ofsetnih strojeva koriste online proces sušenja, koji je veliki potrošač energije [50]. Fleksografski tisak u procesu sušenja koristi visoku razinu energije upotrebom vrućeg zraka, IR-a ili obje mogućnosti, kada koristi boje na osnovi vode i otapala, tako da je UV sušenje još jedan veliki potrošač energije. LED UV koristi 30% manje energije, a i emisije karakterističnih zagađivala su manje.

U usporedbi s prije rečenim digitalni tisak je održiva metodom ispisa za male naklade. Međutim digitalni ispis može biti skup, ako se u obzir uzme kapitalna oprema, pa ispisne glave, što ga čini neprikladnim za veće naklade.

Strojevi za digitalni tisak etiketa i ambalaže posljednjih godina značajno su unaprijeđeni, kako bi smanjili potrošnju energije i što više zadovoljili kriterije održivosti. Neki od vodećih proizvođača digitalnih strojeva za tisak ambalaže su: HP indigo, Canon, Konica Minolta, Xeikon i Durst. Prototip Canonovog LabelStream LS 4000 stroja na osnovi Inkjeta i tinte na osnovi vode prikazan je na DRUPI 2024 [51]. To je određen doprinos tržištu obzirom da se radi o tisku etiketa, proizvodu koji je uz ambalažu najbrže rastuće područje (Tablica 2). Tinta za LS 2000 s je polimerima na osnovi vode, razvio ju je Canon, a ona ispunjava uvjete za indirektan kontakt s hranom. Automatizacijom i inovacijom se utječe na povećanje produktivnosti, smanjenje potrošnje energije i emisije stakleničkih plinova. Konica Minolta AccurioJet 400 je digitalno rješenje za tisak etiketa [52] Nova tehnologija Elektro fotografski suhi toner Simitri® V pogoduje širokom rasponu tiskovnih podloga. Jedna od prednosti je niska potrošnja energije.[53]. Xeikon XP3300HD LED UV inkjet digitalni stroj s rezolucijom od 1200dpi namijenjen je segmentu tiska vrhunskih etiketa. Xeikon je razvio PX-Cure LED HD tinte. Nova PX Cure HD tehnologija ima prednost i u području održivosti s naglaskom na energetska tranziciju [53]. To uključuje značajne uštede u potrošnji energije, trenutno zagrijavanje, deset puta duži vijek LED UV dioda u odnosu na tradicionalne UV žarulje, što rezultira i manjim otpadom. Toneri su bez mirisa otporni na sunčevu svjetlost, vodu i migracije. Rješenja su povezana s oblakom, a sučelje je čovjek-stroj i stroj -stroj. Eko toner tehnologija LX 3000 koristi naprednu tehnologiju vida i umjetnu inteligenciju za kontinuirani nadzor i automatsko podešavanje postavki proizvodnje ispisa [53].

HP Indigo predstavljen je tržištu fleksibilne ambalaže 2014 godine. Proizvodnja fleksibilne ambalaže je u porastu i ima prognozu uspješne budućnosti. Utrošak energije promatran je kroz životni ciklus proizvoda od kolijevke do vrata. Utvrđeno je da najveći utrošak energije pripada fazi tiska, slijedi proizvodnja ElectroInka, a na trećem mjestu je energija koja se koristi u pripremi tiska [55]. Smanjenje potroška energije tijekom ispisa moguće je primjenom EPM (Enhanced Productivity Moda) koja povećava propusnost proizvodnje i smanjuje ukupnu potrošnju energije.



Slika 2: Potencijal globalnog zagrijavanja i ukupni potrošak energije za 3000 m² otiska digitalnog stroja HP Indigo 20000 [54]

Rezultati prikazani na Slici 2 dobiveni su na osnovi LCA analize, a odnose se na globalni potencijal zagrijavanja i ukupni potrošak energije za otisak 3000 m², namijenjen izradi vrećica za kavu. Pri tome su korištene, tri tehnike tiska koje se upotrebljavaju za tisak ambalaže: digitalna LEP tehnologija (Liquid Electrophotography Printing), analogne tehnike: flexo i bakrotisak. Ukupni potrošak energije u tisku za 3000 m² fleksibilne podloge za vrećice za kavu strojevima: Indigo HP, CI fleksotisak i duboki tisak prikazan je na Slici 2. Dani rezultati pokazuju da HP Indigo u usporedbi sa bakrotiskom tiskom koristi za isprint oko 70% manje energije, a u usporedbi s CI fleksotiskom oko 23 % manje [54]. Ukupni potencijal zagrijavanja odnosi se slično kao utrošak energije, tako da Indigo HP u usporedbi s bakrotiskom ima oko 72% manji potencijal globalnog zagrijavanja, a u usporedbi s CI fleksotiskom za oko 34% manji [54].

3.4 Hibridni tisak

Hibridni tisak je integracija jedne analogne i digitalne tehnike tiska unutar jednog stroja. Modularni sustavi omogućuju kombinaciju različitih tehnologija prema potrebama proizvodnje. Prednosti takovog odabira su višestruke. Njihova struktura omogućuje modularne jedinice za fleksibilnost, a korisno je za male i srednje naklade kada je potreban velik stupanj prilagodbe i kvaliteta koja zadovoljava standarde modernog ispisa. Ovime se smanjuju višestruke proizvodne serije, skraćuje vrijeme pripreme, troškovi rada i materijala, optimizira utrošak resursa i smanjuje otpad. To je tehnika

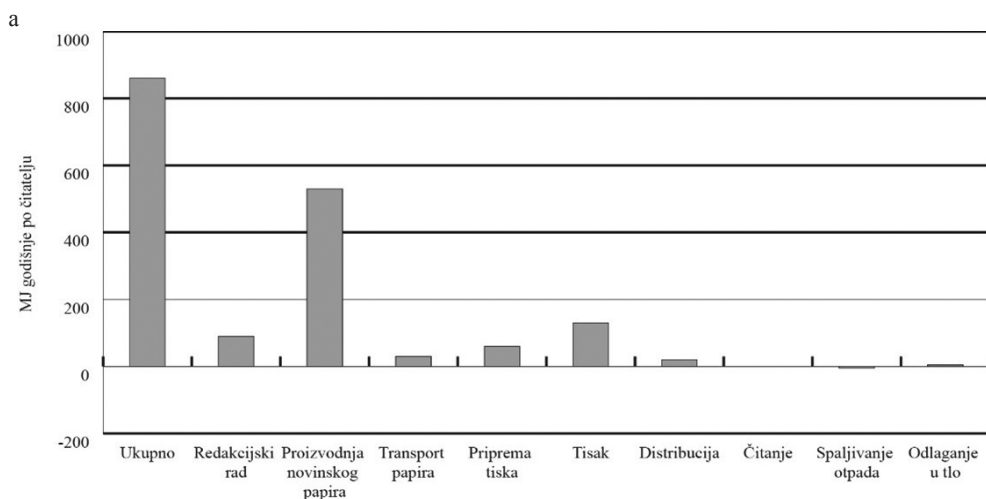
kojoj se prognozira razvoj u budućnost uz inovacije u formulacijama tinti, automatizaciji, integraciji s drugim digitalnim tehnikama, I₀T, AR površinama stvarnosti.

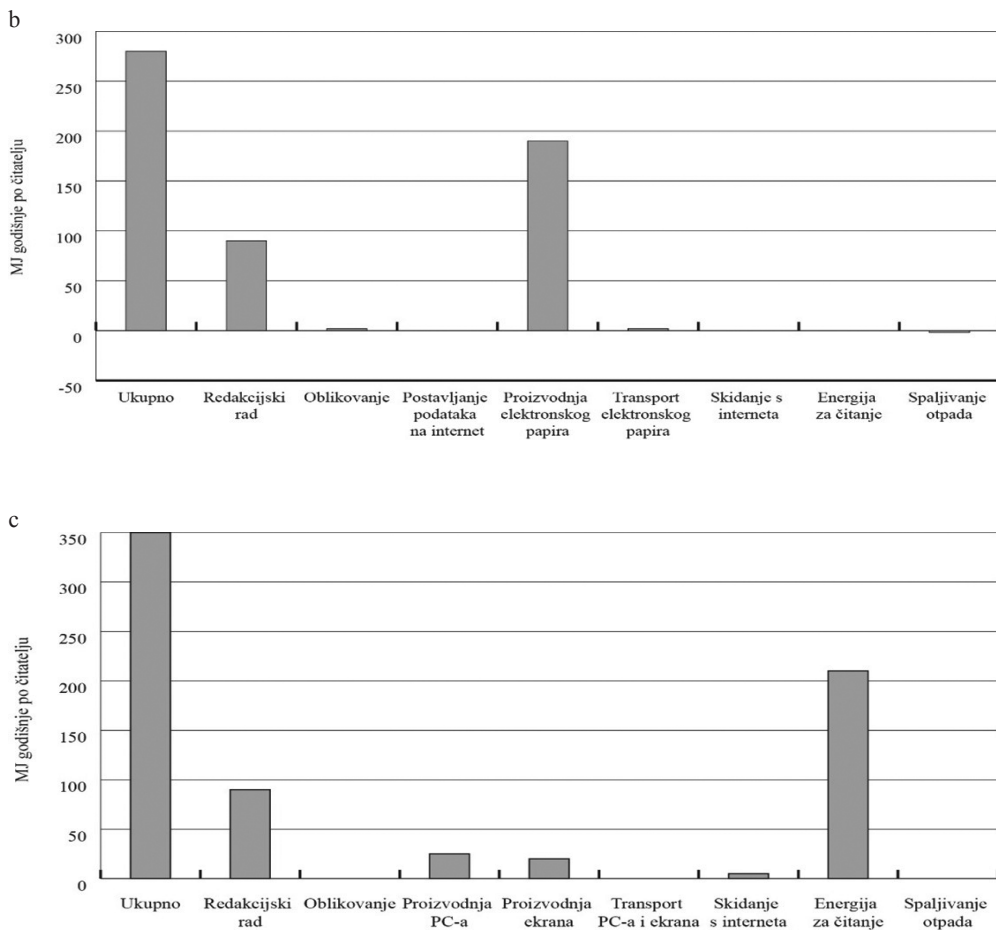
Koncept sve u jednom pokrenuo je BOBST DM5 kao flekso M5 s digitalnim modulom 2019. godine [55]. Koncept je unapređen u DM 340 DM 2022 s kategorijom strojeva potpuno modeliranih nadograđivanih strojeva. Na DRUPI 2024 prikazan je MASTER DM 340/510 koji ima modularnu arhitekturu flexo i inkjet u jednom toku rada, obuhvaća pripremu, isprint, završnu obradu i rezanje etiketa sve u jednom prolazu s jednim operatorom [55].

Primjeri nekih hibridnih tiskarskih strojeva u područje ambalažnog tiska, tiska etiketa su: Heidelberg Gallus Laelfire, Mark Andy Series HD, Domino N610i Hybrid, Nilpeter Panorama Hybrid, i OMET XJet. Svi oni nude fleksibilnost i visoku kvalitetu tiska uz optimiziranu potrošnju energije. Oni omogućuju kombinaciju digitalnih i fleksografske tehnologije, automatizirane procese i inline doradu, čime se postiže maksimalna učinkovitost u proizvodnji.

4. LCA tiskanih, on line i elektronskih novina u odnosu na utrošak energije

Tradicionalne dnevne novine dugo vremena bile su pouzdan izvor informacija. Digitalna tranzicija je revolucionirala medijsku industriju, preobličujući način na koji se komuniciraju informacije dovodeći u pitanje dominaciju tradicionalnih tiskanih publikacije. Novinsko tržište u Europi je poput mnogih drugih u Svijetu u istoj situaciji, da digitalizacija štetno djeluje na nakladu, prodaju i čitanost.





Slika 3: Godišnja potrošnja energije za tri proizvoda u MJ kroz životni ciklus: a - tiskane novine, b - digitalne novine, c - elektroničke novine [57]

Prema STATIST-i u EU prodaja dnevnih novina smanjila se 21% za 2022. godinu. Interesan je primjer Nizozemske, gdje dobna skupina od 60-65 godina svakodnevno čita tiskane novine, dok ona od 50-64 godine čita u iznosu od 40% [56].

Imajući na umu energetske tranzicije, prednosti, trendove i izazove na Slici 3 prikazuje se utrošak energije kroz životni ciklus tiskanih novina, online i elektroničkih novina. Na Slici 3a je prikazan utrošak energije u životnom ciklusu od kolijevke do vrata prema fazama za tiskane novine. Ova analiza obuhvaća slijedeće ključne korake: redakcijski rad, proizvodnju novinskog papira, transport papira, pripremu tiska, proces tiska, distribuciju, čitanje, spaljivanje otpada i odlaganje. Najveći utrošak energije u MJ godišnje po čitatelju je u fazi proizvodnje novinskog papira.

Tijekom proizvodnje papira koristi se velika količina vode, ovisno o tehnologiji i može iznositi 30-70 m³ po toni papira proizvedenog iz drveta dok proizvodnja reciklažom troši 8-10 m³ po toni [58]. Reciklažom se može uštedjeti energija i ona iznosi 19,083 GJ po toni recikliranog papira. Proizvodnja papira je karakteristična po emisiji CO₂ od oko 851 kg po toni proizvedenog papira. Novine se uglavnom tiskaju na papiru načinjenom od sto postotnog udjela recikliranih vlakana. Po utrošku energije slijedi tisak [59]. Za tisak novina uglavnom se koriste mehaničke tehnike tiska. Prosječna potrošnja energije po satu tiska je 100-200 kWh, ako se koristi ofsetna rotacija, a ako se koristi fleksotisak utrošak energije je nešto manji, iznosi 50-150 kWh. Smanjiti utrošak energije u tisku moguće je optimizacijom strojeva, korištenjem energetski učinkovitijih motora i elektronike. Treći po utrošku energije u životnom ciklusu je redakcijski rad, slijedi priprema tiska. Ukupni utrošak energije za pripremu tiska novina ovisi o veličini naklade. Male naklade, ispod 50.000 primjeraka troše energiju od 50-150 kWh, a velike naklade preko 200000 primjeraka troše preko 500 kWh [60]. Potrošak energije u pripremi tiska može se smanjiti automatiziranim sustavom postavljanja ploča i optimizacijom papirnih rola, misli se na pravilno balansiranje što smanjuje potrebu za dodatnim kalibracijama. Manji utrošak energije je utvrđen transportom papira i distribucijom novina, koja uključuje transport od tiskare do distribucijskih centara, prodajnih mjesta i pretplatnika te povratak remitende.

Na Slici 3b prikazan je godišnja potrošnja energije u MJ po čitaču za digitalne novine. Životni ciklus obuhvaća: redakcijski rad, oblikovanje, proizvodnju PC, proizvodnju ekrana, transport PC i ekrana skidanje s interneta, energiju za čitanje i spaljivanje otpada. U ovom slučaju energetski najzahtjevnije je čitanje. Utrošak energije proizlazi iz nekoliko ključnih komponenata: potrošnja energije uređaja, prijenos podataka putem interneta i rad podatkovnih centara. Stolna računala obično troše između 60 i 250 W tijekom rada, a prijenosna računala između 15 i 60 W ovisno o modelu i opterećenju [60]. Prosječna energetska potrošnja tableta kreće se od 3-7 W tijekom aktivnog korištenja. Prijenos podataka s web poslužitelja do uređaja primatelja također troši energiju. Prema dostupnim podacima, globalna potrošnja električne energije mreža za prijenos podataka činila je između 1,1 % i 1,4 % ukupne svjetske potrošnje električne energije u 2020. godini [61]. Web stranice novina hostiraju se u podatkovnim centrima koji rade neprekidno kako bi osigurali dostupnost sadržaja. Ti centri troše značajne količine energije za rad sustava hlađenja servera. U 2020. godini potrošnja električne energije podatkovnih centara činila je oko 1% ukupne globalne potrošnje energije [62].

Iako čitanje novina na webu smanjuje potrebu za papirom, tiskom i fizičkom distribucijom, važno je biti svjestan energetske potrošnje povezane s korištenjem elektroničkih uređaja, prijenosom podataka i radom podatkovnih centara. Odabir energetski učinkovitih uređaja, optimizacija postavki poput smanjene svjetline zaslona, te racionalno korištenje interneta mogu doprinijeti smanjenu ukupne potrošnje pri čitanju.

Na Slici 3c prikazan je utrošak energije u životnom ciklusu elektroničkih novina. Energetski najzahtjevnija je proizvodnja e-čitača. Održiva alternativa za tiskane novine dostupna je prije više od dvadesetak godina, a kroz povijest je mijenjala naziv: elektronički papir, e papir, i konačno e-čitač, naziv koji je aktualan i danas. Karakteristika e-čitača je vrlo niski potrošak energije kod čitanja, za razliku od tradicionalnih tehnologija zaslona kao što su LCD, CRT ili plazma ekrani. Iako su detaljni podaci o potrošnji energije u proizvodnji ograničeni, dostupne analize životnog ciklusa e-čitača pružaju određene uvide. Proizvodnja e-čitača uključuje nekoliko energetskih intenzivnih procesa: ekstrakcija sirovina dobivanje rijetkih metala i plastike zahtjeva znatnu količinu energije, zatim proizvodnja komponenti, izrada elektroničkih dijelova uključujući zaslone i baterije su također energijski zahtjevni procesi i na kraju sklapanje uređaja, montaža svih komponenti doprinosi ukupnoj potrošnji energije. Iz prikaza godišnje potrošnje energije kroz životni ciklus elektroničkih novina (Slika 3) vidljivo je da energija za čitanje godišnje po čitatelju gotovo zanemariva što pokazuje i neka naša istraživanja [63, 64]

5. E- knjiga

Digitalizacijom knjige mijenjaju gotovo svaki aspekt stvaranja knjige, počevši od formata, prirode autorstva, vlasništva, čitatelja te poslovnog modela u izdavaštvu. U Tablici 5 prikazan je udio stanovnika EU koji kupuje tiskane knjige, te onih koji se odlučuje za e-knjige u razdoblju 2021.-2023. godina prema EUROSTAT-u [65]. Udio stanovnika koji kupuju tiskanu knjigu je veći u odnosu na one koji kupuju e-knjigu. Pitanje je: zašto tiskane knjige imaju poseban status? One imaju estetsku, emocionalnu i dugoročnu vrijednost, pružaju taktilni doživljaj. E-knjige karakterizira sadašnjost i praktičnost, a okrenute su budućnosti

Tablica 5: Online kupovina tiskanih i e-knjiga u EU [65]

Godine	Tiskane knjige %	E-knjige %
2021.	14,5	Nema podataka
2022.	12,7	6,6
2023.	13,4	7,2

Za održivost i energetske učinkovitost pojava E ink zaslona smatra se izvanrednom tehnologijom. Ovi zaslone se koriste u e-pisačima i nude značajne prednosti u e-čitačima i drugim digitalnim uređajima. E ink koristi tehnologiju elektroforetskog prikaza. Mikro kapsule sadrže crne i bijele čestice suspendirane u tekućini. Kada se promijeni električno polje, čestice se pomiču gore ili dolje stvarajući tekst ili sliku. E ink zaslone troše do 99% manje energije od LCD zaslona [66].

Kang i suradnici su proveli sustavni pregled literature kako bi predložili ekološke učinkovitosti tiskanog i digitalnog čitanja [67]. Pregled otkriva da oba formata imaju prednosti i nedostatke te da postoji potreba za daljnjim istraživanjem i međusobnim nadopunjavanjem. Trebalo bi razmotriti sada prevladavajući stav da je ekološki prihvatljivije-čitanje. Bitne činjenice koje utječu na ekološku prihvatljivost tiskanih knjiga su: dulji vijek trajanja, prenose među korisnicima, da bi vlakanca nakon reciklaže papira zadovoljila kvalitetom za izradu sekundarnog materijala za tisak mogu se reciklirati do 7 puta čime se dodatno smanjuje ekološki otisak. Elektronički otpad se reciklira u daleko manjem opsegu.

Emisija stakleničkih plinova za tiskane knjige iznosi 1,24 kg CO₂, a smanjuje se na 1,11 kg CO₂ e/knjiga kada se uzme u obzir učinak recikliranog papira [68]. Rezultati za e-knjigu u uvjetima prosječnog vremena korištenja kreću se od 0,25-0,91 kg CO₂, pri čemu tablet s e-tintom ima najniže emisije. Kada se primjeni prosječno vrijeme korištenja svakog uređaja za e knjigu, tiskana knjiga ima veći utjecaj od svih e-knjiga. Međutim, utjecaj tiskanih knjiga može biti manji od utjecaja e-knjiga za uređaje s većim ekranom.

6. Zaključak

Zelene i digitalne tehnologije mogu se smatrati podrškom energetske tranzicije. Alati i rješenja za energetska tranziciju su: vjetar, solari, vodik, toplinske pumpe, štednja energije i mjerenje energetske učinkovitosti. Alati i rješenja digitalne tranzicije su: AI, ekstremno veliki set podataka, IoT, senzori, online platforme, povezani uređaji i algoritmi strojnog učenja. Energetski fosil bazni sustavi prelaze u pametne i održive energetske sustave uz podršku digitalne i energetske tranzicije. Zelena tranzicija i digitalna transformacija daju održivi energetski sustav, uključujući kružnu ekonomiju, zelenu elektroniku, nultu zagađenju, održivu mobilnost, održiv izgrađen okoliš, održiv prehrambeni sustav i očuvan i obnovljen ekosustav, te bioraznolikost.

Energetska tranzicija u tiskarskoj industriji je u tijeku, s naglaskom na održivost, smanjenje otpada i prelazak na obnovljive izvore energije. Iako tisak ostaje važan dio medijske i izdavačke djelatnosti digitalizacija i tehnološke inovacije potpuno mijenjaju način proizvodnje i potrošnje energije i materijala.

7. Literatura

- [1] Lamnatou, Cristofary, C.; Chemisana, D.: Renewable energy sources as a catalyst for the energy transition, *Renewable Energy*, **221** (2024) 11060, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.11960>

- [2] Dekeyrel, S.; Fessler, M.: Digitalisation: Enabler for clean Energy transition, *Journal of Energy & Natural Resources Law*, **42** (2024) 185-209, <https://doi.org/10.1080/02646811.2023.2254103/>
- [3] Gielen, D.; Boshell, F.; Saygind, D.; Bazilian, M. D.; Wagner, N.; Gorini, R.: The role of renewable energy in the global Energy transition, *Energy Strategy, Reviews*, **24** (2019) 38-50, <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.006>
- [4] Getto, A.: Futures we want and policy agenda for Energy transition, *Energy Research & Social Energy Science*, **89** (2022) 11, 102639, <https://doi.org/10.1016/j.erss.102639>
- [5] Muhre, F.; Turyareeba, D.; Muiywas, I.; Adaramola, S.; Nantongo, M.: Drivers of green energy transition: A review, *Green Energy and Resources*, **2** (2024) 2, 100105, <https://doi.org/10.1016/j.grr.2024.100105>
- [6] EPC EU., Digitalization: An enabler for the clean Energy transition, Dostupan na http://www.epc.eu/content/PDF/2023/Vodafone_DP_final, *Pristupljeno*: 2025-01-12
- [7] Renna, P.; Materi, S.: A literature review of energy efficiency and sustainability in Manufacturing Systems, *Applied Science*, **11** (2021) 16, 7366, <https://doi.org/10.3390/app11167366>
- [8] Dulge K.; Azis, R.; Lund, P. D., Blumberga, D.: Importance of energy efficient manufacturing industries for climate and competitiveness, *Environmental and Climate Technologies*, **25** (2021) 1, 306-317, <https://doi.org/10.102478/truce2021-0022>
- [9] Sarkis, J.; Kouhizadel, M.; Zhu Q. S.: Digitalization and the greening of supply chains, *Industry Management & Data Systems*, **121** (2021) 1, 65-68, <https://doi.org/10.1108/IMDS-08-2020-0450>
- [10] Lange, S.; Pohl, I.; Santarivis, T.: Digitalization and Energy consumption does ICT reduce Energy demand? *Ecology Economic*, **176** (2020) 176, 10676, <https://doi.org/10.1016/j.ace/econ.2020.106760>
- [11] Zhao, X.; Xu, S.; Lio, B.: Digital economy's impact on green innovation efficiency: bottom-up or top-down? *Clean Technology And Environment Policy*, **22** (2025) 1, 367-388, <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02753-x>
- [12] Huang, S.; Tan, H.: Evolution of the effects of green supply chain digital Technologies and Energy prices on renewable energy innovations: A way forward for an emerging economy, *Energy Economics*, **141** (2025) 108038, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108038>
- [13] Kuzmin, E.; Vlasov, M.; Strielkowski, W.; Faminskaya, M.; Kharchenko, K.; Faminskaya, M.; Kharchenko, K.: Digitalization of the energy sector in its transition towards renewable energy: A role of ICT and human capital, *Energy Strategy Reviews*, **53** (2024) 101418, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101418>
- [14] Look, M.: Unlocking the value of digitalisation for the European energy transition: A typology of business models, *Energy Research & Social Science*, **69** (2020) 101740, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101740>
- [15] Butt, O. M.; Zulqarnain, M.; But, T. M.: *Recent advancements in smart grid Technology: Future prospects in the electrical power network*, *Ain Shams Engineering Journal*, **12** (2021) 1, 686-695, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.004>

- [16] Jacobson, T.: The cost of grid stability with 100% clean, renewable energy for purposes when countries are isolated, versus interconnected, *Renewable Energy*, **179** (2020) 1065, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.115>
- [17] Sharma P.; Salkuti, S. R.; Kim, S.: Advancement in energy storage technologies for smart grid development, *Journal of Electrical and Computer Engineering*, **12** (2022) 4, 3421-3429, <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i4-pp3421-3429>
- [18] Kumar, A.: Beyond Technical smartness: rethinking the development and implementation of sociotechnical smart grids in India, *Energy Research and Social Science*, **40** (2019) 158-178, <https://doi.org/10.1016/erss.2018.10.026>
- [19] Javed, M. S.; Jurasz J.; Mc Pherson, M.; Dai, Y.; Tao, M. A.: Quantitative evaluation of renewable energy based remote microgrids: curtailment, load shifting and reliability, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **164** (2022) 11, 2516, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112516>
- [20] Olushola, A.: Energy storage system technologies, evolution and applications, *Energy and Power Engineering*, **16** (2024) 2, 97-119, <https://doi.org/10.4236/epe.2024.162005>
- [21] Izzati, L.; Zain, A. S. M.; Ariffin W. U. S. F. W.; Zain A. S. M.; Nordin, N.; Saad, N. S.: Comparative study of energy storage system, *Journal of Physics Conference Series*, **1962** (2022) 1, 012035, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1962/1/012035>
- [22] Badea, I.-C. C.; Serban, B. A.; Anasiei, I.; Matrica, D.: The energy storage technology revolution to achieve climate neutrality, *Energies*, **17** (2023) 1, 140, <https://doi.org/10.3390/en17010140>
- [23] Elalfy, D. A.; Kotb, M. F.; Bureš, V.; Sedhorn, B.: Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends, *Energy Strategy Reviews*, **54** (2024) 101482, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>
- [24] Amir M.; Deshmukh, R. G.; Khalid, H. M.; Said, Z.; Raza, A.; Muyeen, S. M.; Nizami, A. S.; Elavarasan, R. M.; Saidur, R.; Sopian, K.: Energy storage technologies: an integrated survey of developments, global economic/ Environmental effects, optimal scheduling model, and sustainable adaption policies, energy storage, *Journal of Energy Storage*, **72** (2023) E30, 108694, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108694>
- [25] European Commission, Review analyses full-year electricity generation and data for 2023 in all EU countries, Dostupan na: <http://ember-energy>, *Pristupljeno*: 2024-02-15
- [26] European Commission, Shedding light energy in the EU-2023 edition, Dostupno na: <https://www.ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/ddn-20250221-3>, *Pristupljeno*: 2025-02-15
- [27] European Commission, 2023: record-breaking increase in renewable electricity, Dostupno na: <https://www.ec.europa.eu/energy>, *Pristupljeno*: 2025-02-15
- [28] IEA, Solar, Dostupno na: <https://www.iea.org/solar-pv>, *Pristupljeno*: 2025-02-27
- [29] IEA-PUPS, Trend in photovoltaic applications 2024, Dostupno na: <https://www.iea-pvps.org/uploads/iea.org>, *Pristupljeno*: 2025-02-15

- [30] ICA. ORG Reports What is the impact of increasing commodity and energy prices on solar PV, wind and biofuels? Dostupno: ica.org/articles/what-is-important-of-increasing-commodity-and-energy-prices-on-solar-PV-and-biofuels, *Pristupljeno*: 2025-03-01
- [31] IEP-PVPS Trend in photovoltaic applications 2024, Dostupno na: <https://www.ica-pups.org/2024/10/IEA>, <https://doi.org/10.1023.10.022> , *Pristupljeno*: 2025-03-05
- [32] Hamed H. Pourasl, H. H.; Barenji, R. V.; Khojastehnezhad, V.M.: Solar energy status in the world: A comprehensive review, *Energy Reports*, 10 (2023) 3474-3493, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.022>
- [33] Eurostat, European Commission share of energy from renewable sources-Statistic/Eurostat, Dostupno na: <https://ac.europe.eu/view/table>, *Pristupljeno*: 2025-03-01
- [34] Breyer, C.: Low-cost solar power enables a sustainable energy industry system, *Proceedings of the National Academy of Science*, **118** (2023) e 2116940118, <https://doi.org/10.1073/pnas.2116940118>
- [35] Murgolis, G. N.; Pellegrino, J. L.: Energy efficiency in the printing and publishing Industries, Dostupno na: www.aceee.org/files/data/papers, *Pristupljeno*: 2025-03-05
- [36] Pihkola, H.; Nors, M.; Kujanpää, M.; Helin, T.; Kariniemi, M. P.: *Carbon footprint and environmental impacts of print products from cradle to grave*, VTT Technical Research Centre of Finland, ISBN 978-951-38-7669-2, 2010
- [37] IEA, Tracking Pulp and Paper, Dostupno na: <https://www.iea.org/energy-system/industry/paper>, *Pristupljeno*: 2025-03-08
- [38] Gamprellis, G.; Politis, A. E.; Sofias, A. E.; Tsigonias A.; Vonitsanas, G.; Tsiganias, M.; Marco K.: Challenges for the printing industry in the modern digital and meta pandemic area, *Proceedings of the 47th International Research Conference of IARIGAI*, Politis, A., E., 10-28, ISBN 978-3-948039, Athens, Greece, September 2021, IARIGAI, Darmstadt, 2021
- [39] AZTN, Istraživanje tržišta tiska za 2023, Dostupno na: <https://www.hr/uploads> > 2024/07, *Pristupljeno*: 2025-03-07
- [40] Powel, D. J.: Artificial intelligence in lean manufacturing: Digitalization with a human touch? *International Journal of Lean SixSigma*, **15** (2024) 3, 719-729, <https://doi.org/10.1108/IJLSS-05-2024-256>
- [41] Abusaq, Z.; Zahor, S.; Habib, S.; Rehman, M.: Improving energy performance in flexographic printing process through lean and AI techniques: A Case study, *Energies*, **16** (2023) 4, 1972, <https://doi.org/10.3390/en16041972>
- [42] Heidelberg Druckmaschinen: Energy efficiency as standard, Dostupno na <https://www.heidelberg.com/Products/offset-printing>, *Pristupljeno*: 2025-03-01
- [43] Print Weak Heidelberg launches New generation Speedmaster SX, <http://www.printerweekmena.com>, *Pristupljeno*: 2025-03-05
- [44] DRUPA 2024, UV dryers: conventionals and LED, <https://www.drupacom/cataloge>, *Pristupljeno*: 2025-03-01

- [45] Heidelberg Druckmaschine AG, Speedmaster: Energy efficiency as standard, https://www.global/en/products/offset_printing/energy_efficiency/speedmaster_energy_efficien, *Pristupljeno*: 2025-03-06
- [46] DRUPA, Heidelberg DRUPA 2024, http://www.innovation/in/printing/and/packaging_machinery, *Pristupljeno*: 2025-03-10
- [47] Goodiuv, LED UV curing: data: Analysis LED versus traditional methods, https://inovation-of-UV-technology-UV_flexo_printing-analysis-led-uv.-vs-traditional-methods, *Pristupljeno*: 2025-03-11
- [48] Zhang, H.; Wang, Z.; Li, W.; Feng, Y.: Printing and CtP-trends and Technology, part 2., Computer-to-plate, *Graphix*, **9** (2010) 3, 31-35
- [49] Flexographic Technical Association, UV LED & photopolymer Technology: The future of flexographic plate making, <http://www.flexography.org/industry-news/uv/led-photo-polymer-technology-flexographic-plate-making-future>, *Pristupljeno*: 2025-03-10
- [50] DRUPA American Council for an Energy-Efficient Economy, Energy efficiency in the Printing, https://www.waceee.org/SS05_paper_24.pdf, *Pristupljeno*: 2025-03-10
- [51] Canon, Label Stream LS 4000, <https://www.cnn.com/2023/03/24/cnn/business/canon-label-stream-ls-4000/index.html>, *Pristupljeno*: 2025-03-24
- [52] DC Market Note, Konica Minolta Accurio Label 400 Brochure bmy2023, <https://konicaminolta.com.my/uploads/2023/05/pd>, *Pristupljeno*: 2025-03-24
- [53] Xeikon, Engine XEIKON PX 3300HD, <http://xeikon.com/en/Products/px>, *Pristupljeno*: 2025-03-10
- [54] DRUPA, Bobst hybrid label press: all-in-one all-in-line model, <https://www.drupa.com>, *Pristupljeno*: 2025-03-15
- [55] HP Indigo Low environmental impact printing with HP Indigo Digital Presses, http://h20195www2.hp.com/V2/Get_Document.aspx?docname-A4AA7-5259ENW, *Pristupljeno*: 2025-03-10
- [56] STATISTA, Newspaper market in Europa-statistic & fakt, <https://www.statista.com/topics>, *Pristupljeno*: 2025-03-25
- [57] Moberg, A.; Johansson, M.; Finnveden, G.; Jonsen, A.: Screening environmental life based cycle assessment of printed, web-based and tablet e-paper newspaper, Reports from the KTH Centre for Sustainable Communications Stockholm, www.sus.kth.se, *Pristupljeno*: 2025-03-10
- [58] Bajpai, P.: *Recycling and Deinking of recovered paper*, Elsevier, ISBN, 978-12-416998, Amsterdam, 2014
- [59] Vasquez, L. C.; Espina-Romero, L. C.; Vera J. R. R.; Cristel, L. C.: Energy management in the newspaper production process, *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, **14** (2021) 2150-2158
- [60] Econnex, Laptop vs desktop: A showdown of energy consumption Dostupno na <http://www.econnex.com>, *Pristupljeno*: 2025-03-01

- [61] Kamiya, G., Bertoldi, P., Energy consumption in data centres and broad Communications networks in the EU, European Commission [interacdc.com/JRC135926_01](https://interactions.jrc.ec.europa.eu/JRC135926_01) Dostupno na <https://interactions.jrc.ec.europa.eu>> Pristupljeno: 2025-03-10
- [62] EU Science Hub, European code of conduct for energy efficiency in data, <https://joint-research-centre.ec.europa.eu>>, Pristupljeno: 2025-03-10
- [63] Kong, A.; Lu, J.,; Xu, J.: Is e-reading environmentally more sustainable than conventional reading? Evidence from a systematic literature review, *Library & Information Science Research*, **43** (2021) 3, 101105, <https://doi.org/10.1016/j.lisr.202110.1105>
- [64] Bolanča Mirković, I.; Bolanča, Z.: Calculation of the carbon footprint of books and e-readers through the stage of the product life cycle, International Symposium on graphic engineering and design, Grid, Novi Sad, 2024, <https://doi.org/10.24867/grid-2024-p70>
- [65] EUROSTAT: online purchases: printed books are preferred over e-books, europa.eu/web7products-eurostat-news/w/ddn-2024423-2, Pristupljeno: 2025-03-10
- [66] Paperslate, How e-ink screens contribute to reduced energy, paperslate.io/en/user-well-being/how-e-ink-screens-contrbute-to-reduced-energy-consumption, Pristupljeno: 2025-03-10
- [67] Kang, Q.; Lu, J.; Xu, J.: Is e-reading environmentally more sustainable than conventional reading? Evidence from a systematic literature review, *Library & Information Science Research*, **43** (2021) 101105, <https://doi.org/10.1016/j.lisr.2021.101105>
- [68] Amasava, E.; Thara, T.; Hanaki, K.: Live-ciclle greenhouse gas *emissions* of e-books vs. paper books: A Japanese case study, *Journal of Cleaner Production*, **186** (2018) 59-66, <https://doi.org/10.1016/j.jelepro.2018.03321>

Drugi dio – CAETS E-mobility Working Group Report

NAVIGATING THE FUTURE: *A REPORT ON THE CURRENT STATE AND FUTURE PATH OF ENERGY TRANSITION IN THE TRANSPORT SECTOR*



CAETS

International Council of
Academies of Engineering
& Technological Sciences

October 2024



NAVIGATING THE FUTURE: A REPORT ON THE CURRENT STATE AND FUTURE PATH OF ENERGY TRANSITION IN THE TRANSPORT SECTOR

ABSTRACT

Decarbonisation of road transport was until recently considered the most challenging part of the climate agenda. Still the ascent of electric vehicles is making significant advances possible while, at the same time, opening several new complex conundrums: integration of power and transport systems, establishing supply chains of needed materials and conversion of existing industries to new products.

At the same time, the decarbonisation of heavy road transport, aviation, and maritime transport raises many questions regarding the prevailing fuels and technologies that will secure net zero emissions of greenhouse gases. Different e-fuels like ammonia, methanol, and similar liquid fuels synthesised from green hydrogen look like a possible solution.

This decade is crucial since the whole process, which is essential for achieving the goals of the Paris Agreement, depends on decisions made soon.

CAETS Energy Community

E-Mobility Working Group

This report was written by the members of the E-Mobility Working Group 2023–2024, lead authors of specific chapters were Neven Duić (HATZ, Croatia), Chris Hendrickson (NAE, United States), Lian Yubo (nominated by CAE, China), Patrick Pelata (NATF, France), Robert L. Evans (CAE, Canada), Iva Ridjan Skov (HATZ, Croatia), Vaughan Beck (ATSE, Australia), Jaime Dominguez (RAI, Spain), Pine Pienaar (SAAE, South Africa) and Elena Funk (ATV, Denmark). All chapter authors were of great help in providing, beyond their engineering expertise, country-specific and region-specific input for analysis, and Antun Pfeifer (Croatia) was providing technical assistance for the publication.

This report has been produced with the support of the Croatian Academy of Technical Sciences of Croatia, the National Academy of Engineering of the United States and CAETS. The views expressed herein can in no way be taken to reflect the official opinion of Croatia or United States, and do not necessarily reflect the views of any CAETS member Academies. This report was discussed by the International Council of Academies of Engineering and Technological Sciences (CAETS) which agreed to submit the report to international journals and policymakers worldwide. The authors are grateful to the delegates for their input, comments, and suggestions. Any errors or omissions are the sole responsibility of the authors.



The report is copyrighted under [CC BY 4.0 Deed | Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Publisher: CAETS

District of Columbia, USA

E.I.N. 52-2251297

An IRS Section 501(c)(3) organization

Web: <https://www.newcaets.org>

Cite as: CAETS E-mobility working group. *Navigating the Future: A report on the current state and future path of energy transition in the transport sector*. Report No.:1. District of Columbia, USA: Council of Academies of Engineering and Technological Sciences (CAETS); 2024; Available from: <https://www.newcaets.org/statements-reports/caets-reports/>

The report was endorsed by the following CAETS member academies:

Academia Nacional de Ingenieria of Argentina	Hungarian Academy of Engineering	Academy of Engineering Sciences of Serbia
Australian Academy of Technological Sciences and Engineering	Indian National Academy of Engineering	Academy of Engineering of Singapore
Royal Belgian Academy Council	Irish Academy of Engineering	Slovenian Academy of Engineering
Canadian Academy of Engineering	Engineering Academy of Japan	South African Academy of Engineering
Chinese Academy of Engineering	National Academy of Engineering of Korea	Real Academia de Ingenieria of Spain
Croatian Academy of Engineering	Academy of Engineering of Mexico	Royal Swedish Academy of Engineering Sciences
Engineering Academy of the Czech Republic	Netherlands Academy of Engineering	Royal Academy of Engineering of the United Kingdom
Danish Academy of Technical Sciences	Royal Society Te Aparangi of New Zealand	National Academy of Engineering of the United States
Council of Finnish Academies	Nigerian Academy of Engineering	National Academy of Engineering of Uruguay
National Academy of Science and Engineering of Germany	Pakistan Academy of Engineering	
	Academy of Engineering of Poland	

Contents

Executive summary.....	198
Batteries Development for EVs	203
Abstract	203
Materials	204
Pack Structure	205
Battery Management Systems.....	206
Reuse and Recycling.....	207
Supply Chain.....	208
Summary and Outlook	209
Integration of power and transport system.....	210
Emerging renewable energy solutions drive the electrification of transport	210
Energy demand and charging infrastructure	211
Electric vehicle batteries' role in the power system balancing	212
Car Industry: the challenges of a necessary speedy transformation	213
A speedy transformation is already on its way	214
A strong push from Public Authorities.....	214
Changes from Internal Combustion Engine vehicles to Electric vehicles (ICE to EV)	215
Newcomers versus traditional players, China versus traditional automotive industry strongholds...216	
Conclusion	217
Electricity or hydrogen for sustainable road vehicles?	218
E-fuels other than hydrogen.....	220
Modal shift: can it help?	223
Introduction.....	223
Active transport.....	224
Shared Ride Passenger Transport.....	225
Freight Modal Shifts	225
E-mobility in developing countries.....	227
E-mobility in Latin America	227
Introduction.....	227
Some features.....	227
Evolution of the electric vehicle sales	228
Charging stations	230
Regulations on electro-mobility.....	231
Other considerations	231
E-mobility in Africa	232
Introduction.....	232
Opportunities.....	232

Challenges.....	233
The way forward.....	234
E-mobility in South and Southeast Asia	234
Introduction.....	234
Some Features.....	234
Opportunities.....	234
Challenges.....	235
Other considerations	235
Overarching observations	236
Fire Safety of Electric Vehicles.....	237
Summary	237
Electric vehicle fire statistics	237
Electric vehicle fire hazards.....	237
Toxicity of EV fires.....	238
Emergency response challenges	238
Transportation	239
Future of battery chemistries and implications for fire safety	239
References.....	240
E-mobility working group.....	249
Co-chairs.....	249
Lead authors.....	249
Working group members.....	249

Executive summary

Decarbonisation of transport was until recently considered the most challenging part of the climate agenda, but the ascent of electric vehicles (EV) is making significant advances possible, while, at the same time, opening several new complex conundrums: integration of power and transport systems, establishing supply chains of needed materials, developing the charging infrastructure for the users, and conversion of existing industries to new products. This decade is crucial since the whole process, which is essential for achieving the goals of the Paris Agreement, depends on the policy being adopted.

This report aims to provide a short overview of the status of the transformation towards new energy technologies within the transport sector and to indicate pointers for future development. The report draws on the extensive experience of members of the various engineering and technical academies forming part of the CAETS organisation.

Key takeaways from each specific chapter of the report are presented in Table 1:

Key messages	The ascent of the electric vehicle opened up the possibility of significant advances in establishing environmentally sustainable transport. Sectoral vital messages can be observed as follows: ➤ Joint efforts from industry and research throughout the complete value chain are needed for the innovative and sustainable development of EV batteries ➤ Integrating the power and transport sectors helps to decarbonise both sectors more effectively, which can be done through smart charging and market coupling ➤ The car industry is already being transformed, and newcomers have the opportunity to contribute with additional innovations ➤ Hydrogen-based solutions are still in competition with battery-electric solutions in applications that have functionality as a priority (military, long-distance and heavy freight) ➤ E-fuels have become competitive in maritime and aviation transport, with fuel storage being a cost-competitive option compared to electrified solutions. ➤ Active transport options and sharing travel are cost-effective, while in freight transport, rail and water options provide low-emission solutions but with significant investment costs ➤ In some developing countries, local abundance of mineral sources offers an opportunity to consider holistic and sustainable mining practices and benefit economically, socially and environmentally from the decarbonization industry. ➤ The fire hazard of EVs is not higher than that of ICEVs but is different, and new methodologies are needed to handle them.
----------------------------	---

	Opportunities	Issues to overcome
Battery development for EVs	Technological innovations are imperative in a rapidly expanding global battery industry and providing new chemistries The gaining of new knowledge on EV batteries is excellent due to the extensive focus of science and industry on this subject around the World	More joint research efforts and collaborations between industry and academia are needed Collaboration between all members of the complete value chain of resource mining, materials synthesis, cell design, pack design, manufacturing, use, and recycling is of paramount importance
Integration of power and transport systems	EVs can contribute towards managing the variability in renewable energy production when connected to the electric network through smart chargers (when not in use)	Smart chargers should be added to most parking bays to enable the power-transport system coupling Wholesale and retail electricity markets should be dynamically price coupled to allow EV use as a demand response
Car Industry transformation	The car industry is already engaged in a fast and much-needed transformation. The commercial vehicle sector is next in line, with good progress being achieved regarding electric buses, with China playing a leading role The transformation provides an opportunity for newcomers to join the industry with innovative solutions	Transformation of the world fleet of approximately 1.6 billion vehicles to the new technologies will be relatively slow due to the long lifespan of a vehicle and can be expected to take 25 to 35 years
Hydrogen vs. electricity	When functionality is of larger importance – for example, with large vehicles, heavy transport, and military applications – hydrogen solutions are still in competition with battery electric solutions , but so are liquid fuels such as methanol (due to handling issues) and traditional fuels	For passenger vehicles, battery electric vehicles prevail in terms of efficiency and cost-effectiveness compared to hydrogen/hydrogen-electric vehicles, with the roundtrip efficiency of over 90%, compared to 34% in the case of the fuel cell

		Hydrogen use is hampered by transportation, storage difficulties and safety issues.
E-fuels	Ammonia is most interesting in the maritime industry due to the quantity of fuel needed Carbon-based e-fuels are to be primarily used for aviation and heavy-duty road transport (depending on electrification rates and direct hydrogen application)	The regulatory framework is still in development, and minimising the cost gap represents some of the critical non-technical challenges e-fuels face. Safety issues, technology development and standardisation, are needed to support the penetration of e-fuels in the sector
Modal shift	Active transport options, such as cycling (including e-bikes and e-scooters) and walking, offer highly cost-effective options to achieve decarbonisation Sharing travel schemes reduces the greenhouse gas emissions per passenger kilometre of travel, is becoming more popular, and should be promoted Public transport offers significant benefits in terms of the efficiency of the transport system in general and the carbon footprint of the car industry specifically, and should be supported and promoted	Rail and water transport have the lowest emissions per metric ton-kilometre in freight transport. The implications and cost of transition to these modes are significant challenges; however, and transition is not always practically possible. Travel time and reliability issues further complicate the matter
E-mobility in developing countries	Policies for the transition of the transport sector towards e-mobility are being promoted by almost all countries in Latin America, leading to increased EV sales In some countries like Argentina, Bolivia, or Chile, the local availability of critical	In Africa, an inadequate regulatory environment and low-income levels, combined with long travel distances and poor infrastructure, pose barriers to e-mobility International support will be needed to facilitate the transition of transport in Africa

	minerals offers an opportunity for an integrated industrial approach to address environmental challenges of possible exploitation. In South and Southeast Asia and some parts of Latin America, two- and three-wheelers prevail in road transport, reducing pollution. In addition to this, there is significant legislative support and industrial development enhancing transformation (especially in Thailand and Indonesia)	A shortage of charging and other infrastructure and the relatively high cost of EVs impede the transition towards environmentally sustainable technologies in South and Southeast Asia
Fire safety of EVs	The fire hazard related to EVs is not higher than that of ICEVs, but it is different regarding battery-specific hazards. Heat release rates from EV and ICEV are similar. Toxic gases emitted from EV and ICEV fires pose health and environmental risks. Different methodologies are required to combat such fires	Training for emergency response: EV fires require a unique approach to be applied and given due attention. Emergency response to EV fires is challenging, and more research and training is needed to assist firefighting
Two subjects that are not covered in separate chapters but deserve mentioning are:		
Standardisation	It is crucial to achieve the standardisation of voltages, connectors, chargers, and other elements of the EV grid and to do it right. Too early standardisation may stifle innovation; too late it may impede integration and waste value across world regions. The chaotic world of plugs and sockets is a case in point	
Financing	This issue appears in several chapters in different forms. In some advanced economies, financing has taken the form of economic instruments (incentives and fiscal subsidies); in others, there are various forms of carbon markets or regulations. In emerging markets and developing economies, internationally organised financing is needed. The World Bank should take the lead in parallel with regional multilateral development banks and with advanced economies' financial development agencies	

It is now probable that most short-distance transport will be electrified, but need substantial charging infrastructure that will consume up to 40% more electricity (more details in Chapter 3). Will these

changes put pressure on the power system, and/or will they help the integration of variable renewables? The answers to these questions depend on decisions made now. If cars are mainly fast-charged on demand, that will exacerbate the problems. Still if vehicles are mostly charged on smart chargers when parked, they can help integrate variable renewables.

The central part of the new transport system, the battery and the fuel cell, is rapidly improving. New chemistries bring higher energy densities, charging speeds, reduced charging times, and better battery management systems to decrease the degradation of batteries. While batteries will require the build-up of new material supply chains, new battery chemistries will enable additional levels of flexibility. Unavoidable bottlenecks in the supply of certain minerals will result in different market shares of various battery chemistries. Bottlenecks and their resolution will depend on decisions made now or in the next few years. Chapter 1, addresses battery development, car battery chemistries, supply chains and recycling.

Chapter 2, focusing on the integrating power and transport systems, elaborates on the charging infrastructure as a contact point of power and transport systems and stationary batteries needed for support of charging. Issues of charging from the power system perspective, which is based 100% on Renewable Energy Sources (RES), are discussed, as well as concepts like Vehicle-to-Grid (V2G), smart charging, wireless charging and crucial battery issues. The dynamics of charging and demand response provisions are the first critical to tackle as the number of EVs rises in the road transport fleet.

Chapter 3 deals with car industry transformation and addresses supply chain issues related to electric motors and inputs other than batteries. The electric vehicle industry is significantly different from the incumbent automotive sector. The transition will create significant turbulent adjustments, leading to new supply chains and business models, as well as road construction and maintenance financing. These aspects are expected to substantially impact entire countries, especially those heavily dependent on car manufacturing industries and car-based mobility.

While hydrogen and fuel cells will probably play minor roles in short-distance transport, they may have significant roles in long-distance transport. How this will evolve is still unclear. Developing of new hydrogen supply infrastructure will take a long time and depend on early decisions. Furthermore, will hydrogen be supplied as ammonia or some other energy carrier, or will hydrogen be utilised to produce electrofuels used in incumbent engine technologies? Chapters 4 and 5 address hydrogen as a fuel or as a green feedstock for e-fuels to be used in hard-to-abate processes and long-distance transport (maritime or air transport), respectively. More concretely, e-fuels, Power-to-X (PtX), renewable fuels of non-biological origin (RFNBOs) and hydrogen-derived synthetic fuels all represent the production of e-fuels based on electrolytic green hydrogen paired with a carbon or nitrogen source.

Chapter 6, "Modal shift, can it help?" includes active transport, car sharing and similar solutions. It aims to answer whether modal shift helps with the transition in densely populated areas and how freight transport can use different solutions to decarbonise short and medium-distance deliveries. Although it is recognised that public transport has a huge role, this mode of transport is not explicitly addressed in this report.

Chapter 7, on Developing countries and decarbonisation of transport, barriers and opportunities, consists of several subchapters: a subchapter on Latin America, a subchapter on developing countries of Africa, and a subchapter on East and Southeast Asia. These subchapters analyse the evolvement of transition in developing countries given EV's higher capital expense (CAPEX), spill-off effects of second-hand cars, specific local solutions and other particularities.

Chapter 8, on Fire Safety of Electric Vehicles, brings forward current problems related to fire safety of EVs. The widespread adoption of electric vehicles introduces unique fire safety challenges, especially related to battery hazards and emergency response. Addressing these requires updated regulations, firefighter training, and collaborative safety strategies for a safe transition to sustainable transportation.

Batteries Development for EVs

Lead author: Lian Yubo

- Technological innovations are imperative in a rapidly expanding global battery industry.
- More joint research efforts and collaborations between industry and academia are needed to address scientific and technological barriers.
- Collaboration between all members of the complete value chain of resources mining, materials synthesis, cell design, pack design, manufacturing, use, and recycling is paramount importance.

Abstract

The signing of the Paris Agreement in 2015 drew global attention and marked the beginning of global carbon neutrality efforts. Many governments see it as part of their national development strategy and a vision for net zero greenhouse gas (GHG) emissions. Major global economies, including China, Europe and the United States, have taken the lead in transitioning towards electrified transportation systems, resulting in a rapid uptake in the global electric vehicles (EVs) market. Meanwhile, the battery system is still faced with enormous challenges. For example, further increase of cruising ranges of EVs requires higher energy density¹ of battery materials, high consumer expectations on EV safety require enhanced structural integration of battery pack in vehicles, the dependence of the lifetime² of a battery pack on battery cell variations requires an effective battery management system (BMS), the technologies and industry for reusing and recycling of battery towards the end of its life cycle are yet to be mature, the regional concentration of key resources and the imbalance of the production cycle of each link in the supply chain are challenging for the development of a healthy and sustainable industry. Therefore, this chapter intends to address critical technological evolution pathways of EV batteries in terms of materials, pack design, battery management system, reuse and recycling methods, and the supply chain.

Table 2 List of abbreviations in this chapter

Abbreviations	Definitions
EV	Electric vehicle
GHG	Greenhouse gas
LFP	Lithium iron phosphate, LiFePO_4
LFMP	Lithium manganese iron phosphate, $\text{LiFe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{PO}_4$
NMC	Lithium nickel manganese cobalt oxide, $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$
NCA	Lithium nickel cobalt aluminium oxide, $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{O}_2$
LRMO	Lithium-rich manganese-based cathode material
Ni90/Ni92/Ni96	Nickel content in the cathode, 90% / 92% / 96%
BMS	Battery Management System
SOC	State of Charge
SOP	State of Power
SOE	State of Energy
SOH	State of health
CMP	Cell-Module-Pack

¹ The energy density of a battery is the amount of electrical energy stored per unit volume or unit mass of the battery.

² The lifetime of a battery can generally be defined as the time when the battery can no longer meet the requirements for range, operating time or maximum power capacity under typical usage profiles.

CTP	Cell-to-pack
CTC	Cell-to-chassis
CTB	Cell-to-body
OEM	Original equipment manufacturer
AFE	Analog front end
PCB	Printed circuit board
V2G	Vehicle-to-grid
RUL	Remaining useful life
DLE	Direct lithium extraction
DLP	Direct lithium to product
DSO	Direct shipping ore
HPAL	High pressure acid leaching
46800	Cylindrical battery with a diameter of 46 mm and a height of 80 mm
18650	Cylindrical battery with a diameter of 18 mm and a height of 65 mm
21700	Cylindrical battery with a diameter of 21 mm and a height of 70 mm

Materials

The range and safety of electric vehicle batteries are still important factors limiting the rapid spread of electrification in the transport sector. Materials determine the electrochemical performance of batteries and play a dominant role in their energy density and safety [1]. In mass-produced electric vehicles (EVs), lithium-ion batteries, including ternary materials and lithium iron phosphate (LFP) batteries, dominate electric vehicles energy storage medium. Effective ways to increase the energy density of ternary lithium batteries include increasing the nickel content and voltage limit, but the resulting thermal stability and battery safety issues must also be considered. Major suppliers of ternary lithium batteries, including CATL, LG Chem, Panasonic, and Samsung SDI, have either announced or achieved mass production of new battery products with a nickel content of up to 90%. Batteries with LFP cathodes achieve longer lifetimes, improved safety, and lower cost. However, LFP cathodes suffer from low electronic conductivity and slow ion diffusion rate. In the mass production of LFP cathodes, modification techniques, including surface coating, nanocrystallisation, and lithium supplementation, are commonly employed to improve the electrochemical performance of the battery cell [2]. Major suppliers of LFP batteries include BYD and CATL.

Next-generation battery technology focuses primarily on higher energy density and higher safety levels. New electrode materials to improve the energy density include higher nickel content in ternary cathode materials beyond 90%, including Ni90, Ni92, and Ni96 [3]. For LFP materials, competitive next-generation alternatives include lithium manganese iron phosphate (LFMP), cobalt-free lithium nickel manganese oxides, and lithium-rich manganese-based cathode material (LRMO) [4]. For anode materials, natural graphite and artificial graphite are evolving towards silicon-graphite, silicon-oxide, and lithium metal anodes. To improve battery safety performance, solid-state batteries have great potential. However, there are still significant obstacles in technology and the manufacturing process. Solid-state batteries are still in the research and development and pilot production stage. While semi-solid-state batteries are expected to achieve mass production by 2025, it takes another 5–10 years for all-solid-state batteries to reach mass production.

Intensive efforts and investment are still needed in basic research, for example, developing new solid-state electrolytes and electrode materials, gaining an in-depth understanding of the interaction mechanisms between the electrolyte and the electrodes, and optimising the interface structure. Innovations in production technologies, such as process optimisation to improve production efficiency and reduce waste, are also vital to successful mass production.

In addition, new battery technologies that build upon innovations in materials have gained enormous interest, such as lithium-sulphur, lithium-air, and sodium-ion batteries. These new battery chemistries could improve batteries energy density, safety performance, and cost, thereby contributing to more competitive EV products.

Pack Structure

The battery pack of an electric vehicle consists of cells in three form factors: prismatic, cylindrical, and pouch types. All three forms could be integrated into a module considering standardisation and enhancement of structural integrity. One step further, modules can be incorporated into a battery pack. This type of integration, typically called cell-module-pack (CMP), as shown in Fig.1, was common during the early development of electric vehicles. It features low volume utilisation limiting the battery capacity and the travelling range. Further increasing the travelling range would result in heavier packs, negatively impacting the energy efficiency. Technical pathways to increase the volume utilisation of the battery pack include employing higher capacity cells, larger modules and even module-less designs. For example, the use of larger 46800 type cylindrical cells compared to earlier versions of 18650 type and 21700 type cells, as represented by Tesla, resulted in higher volume utilisation and reduced pack complexity due to the reduced number of cells. As represented by BYD, the cell-to-pack (CTP) concept uses a blade battery cell technology, a specialised version of prismatic cells, and a module-less design. These designs reduced structural redundancy to improve volume utilisation.

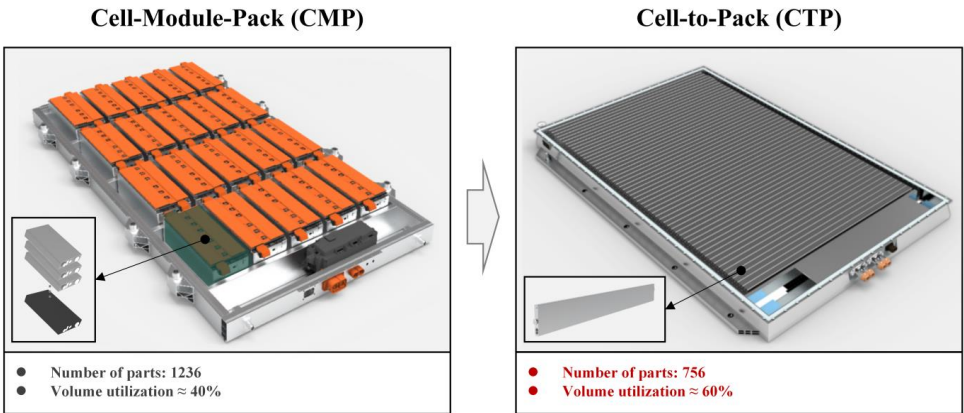


Fig.1 Comparison of two types of battery packs

In the early times of the development of electric vehicles, the battery pack was designed to be protected by the vehicle body structure from intrusions caused by impacts. At present times, the design concept has been transformed such that an integrated vehicle body-battery pack structure enhances the safety of both, as seen in the cell-to-chassis (CTC) concept from OEMs like Tesla and the cell-to-body (CTB) concept from BYD. For example, the CTB concept features a complete integration of the vehicle body and the battery pack by module-less designs, a cold plate that also works as the tray, and shared structural components between the pack and the vehicle body [5]. The design significantly improved the volume utilisation of the battery pack, as well as the strength and stiffness of the body. Moreover, design features that enhance pack safety employ specially designed degassing valves and separate the thermal and electrical systems. In case of a thermal runaway of battery cells, such a design could ensure electrical safety and reduce the risk of high-voltage arcing, thereby improving the safety of the battery pack and the vehicle.

In the future, the pursuing of higher volume utilisation and higher levels of battery pack-vehicle integration will be strengthened by considering the vehicular design and safety targets in the design of

battery cells and packs, aiming for longer ranges, higher energy efficiency, and enhanced safety of electric vehicles.

Battery Management Systems

The battery pack generally comprises of a battery module, a thermal management system, a battery management system (BMS), an electrical system and structural components. The battery module consists of multiple battery cells. The BMS is an integral part that connects the battery and the EV, which is responsible for battery status analysis, battery safety protection, energy control and management, battery information management, and vehicle level information exchange, as shown in Fig. 2 and Table 3 [6]. Recent improvements in the BMS include higher levels of hardware integration and intelligent software development.

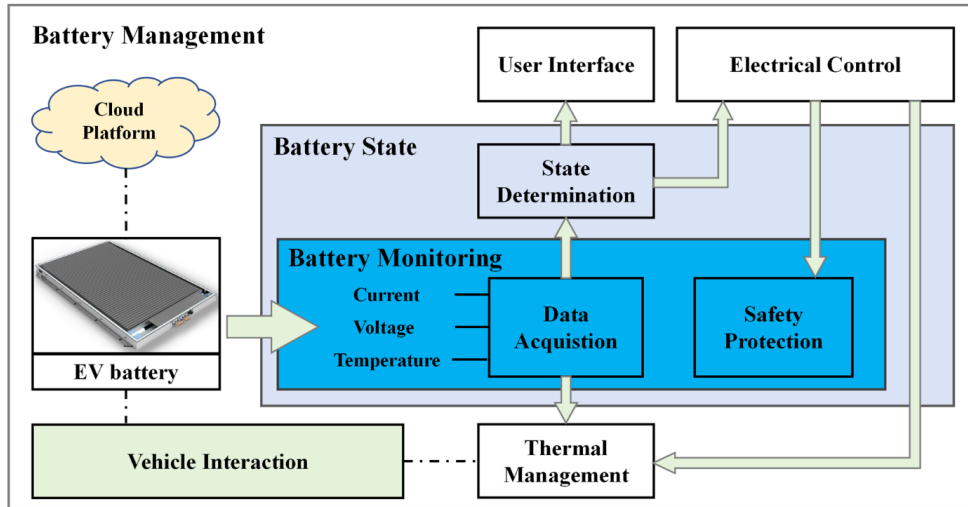


Fig. 2 Battery Management System

Regarding hardware architecture, wired BMS is the mainstream solution. The BMS monitors battery cell status through the analogue front-end (AFE) chip and the high-voltage monitoring chip for control purposes. The complex high/low-voltage wiring scheme results in low levels of integration, and failure of specific printed circuit board (PCB) parts leads to system failure. One of the solutions is the employment of a wireless BMS [7], which reduces the circuit complexity, and improves the reliability and flexibility of the system. However, wireless BMS suffer from poor signal transmission stability in harsh environments and poor electromagnetic compatibility.

Regarding software and control, more complex software and higher levels of software-hardware integration make coordination among software increasingly tricky. The battery monitoring algorithms are mainly calibrated against ternary material and LFP chemistries, and adaptations are needed towards new chemistries and new applications, such as vehicle-to-grid (V2G), where the vehicle battery is used as a resource for energy storage.

With the development of intelligent and connected vehicle technology, the upgrades in vehicular architecture and the demands from more intelligent scenarios, the following trends are expected for the BMS.

Table 3 Main functions of EV battery management system

System	Module	Function
Battery Management System (BMS)	Data Acquisition	Lumped voltage acquisition
		Electric current acquisition
		Temperature acquisition
		Cell voltage acquisition
	State Estimation	SOC estimation
		SOP estimation
		SOE estimation
		SOH estimation
	Energy Management	Charge management
		Balanced management
	Safety Protection	Over-current protection
		Over-voltage protection
		Low-voltage protection
		Over-temperature protection
		Insulation protection
	Information Management	Standard data upload
		Historical information storage
		Vehicle interaction

The development of more advanced sensing technologies, such as electrochemical characterization methods-based online monitoring, can provide more information about the internal state of health of the battery. The BMS integrated with these advanced sensors can more accurately monitor and evaluate the battery’s real-time status and long-term health.

Using a cloud-based BMS that leverages fleet battery data to train advanced algorithms online could better monitor battery cell status, including SOH/SOC/SOP. The system could also implement more effective battery management strategies to lengthen battery lifetime and to reduce safety risks [8].

Reuse and Recycling

Global annual battery production capacity is expected to exceed 5 TWh by 2030 [9]. We can also foresee a considerable growth in end-of-life EV battery volumes, with over 100 million vehicle batteries expected to be retired in the next decade [9]. Proper handling and post-processing of these batteries could extend their service life, prevent environmental pollution, and recycle essential materials for a sustainable supply chain.

The two main pathways for retired electric vehicle batteries are reuse and recycling. EV batteries typically retire when they reach 80% capacity or remaining useful life (RUL), although there is a lack of such a standard. The retired batteries can be used for energy storage, backup and other scenarios. Battery reuse or repurposing is still in its early phase of development, which features demonstration projects. Repurposing retired EV batteries into commercial energy storage products and grid energy products is seen by companies such as Brunp Recycling, GEM, Mercedes-Benz, and Nissan. The safety of repurposed energy storage products may also be of concern. Batteries that cannot serve as energy storage resources could be recycled for the raw materials. Recycling EV batteries generally involves two typical processes: physical processes (e.g. crushing, magnetic separation and thermal treatment) and chemical processes (e.g. leaching, chemical/electrochemical precipitation and extraction). Companies such as Brunp Recycling, GEM, Retrie Technologies, and Umicore have carried out small-scale battery recycling. Recycling of batteries is characterised by low recovery levels of critical materials and low efficiency due to the low automation level of the process.

Developing a circular battery value chain requires establishing standards for reusing and recycling retired EV batteries. Key technological developments include cell balancing, rapid sorting and RUL testing. Developments of key processes include more refined and intelligent disassembling and dismantling equipment that improves the recovery of essential materials. A systematic engineering design that includes recycling and repurposing is critical to develop a circular value chain consisting of battery cell manufacturing, battery pack assembling, and recycling.

Battery reuse and recycling are expected to scale up in the long term. For example, an international study [10] projects that recycled materials could meet 60% of China's EV battery demand by 2050. Similar trends are expected globally.

Supply Chain

A rapid increase in the market of electric vehicles poses considerable challenges to the battery supply chain. A highly efficient, healthy, secure, and resilient supply chain is critical to the rapid and sustainable development of the battery industry. The supply chain includes upstream mining, processing and refining suppliers; mid-stream suppliers of battery components, including cathode and anode active materials, solvent, binders, foils, separators, electrolytes and complex production equipment; downstream battery manufacturers, OEMs, and reuse and recycling suppliers.

The supply chain of the battery is spatially concentrated globally. From the supply side, important upstream mining resources are unevenly distributed. For example, over 70% of the global cobalt supply comes from the Democratic Republic of Congo [11]. From the demand side, changes in the market shares of crucial battery chemistry, including LFP cathodes and high-nickel cathodes, pose significant challenges to long-term projections for the need of critical resources and the ensuing investment plans. Innovations in the processing and refining technologies, like direct lithium extraction (DLE), direct lithium to product (DLP), direct shipping ore (DSO), and high-pressure acid leaching (HPAL), expand access to not only previously unusable mining resources but also low-grade mineral resources. Moreover, battery recycling could be essential in building a highly flexible and resilient supply chain.

Mid- and downstream production capacities are also highly concentrated. For example, the top three global battery manufacturers have a market share exceeding 60%. The leading share of the Chinese EV market worldwide is also mirrored in the global battery supply chain. With the continual growth of EV market in Europe and the United States and the need for local production of the EV components, more investments in the local battery supply chain are seen, which will contribute to developing a geographically diversifying supply chain.

The carbon footprint of the whole supply chain may also become a specific constraint. The European Commission has introduced clear regulations for batteries sold in Europe [12]. It sets mandatory minimum levels of recycled contents in batteries with a minimum of 16% for cobalt, 85% for lead, 6%

for lithium and 6% for nickel from August 18th, 2031, and a minimum of 26% for cobalt, 85% for lead, 12% for lithium and 15% for nickel from August 18th, 2036. The necessity for mining products used in the battery to comply with a “sustainable mining” standard is also under discussion.

The battery supply chain is characterised by varying lead times for different components. For example, the lead time could be as short as one year for downstream battery manufacturers or OEMs, whether by retooling existing or building new production facilities. In contrast, lead times for electrode production usually span three to five years, and that for new mining resources, it is between ten and twenty years [13]. Therefore, mining resources might be a key obstacle when developing a battery supply chain for future electric mobility. Closer collaborations across the supply chain and strategic planning for product and technology portfolios are important to building a more resilient supply chain and avoiding over-reliance on certain elements, as exemplified by the current evolving balance between LFP and NMC chemistries.

Summary and Outlook

This chapter provided a comprehensive analysis of the status of the lithium battery industry with a prediction of future trends in battery materials, battery pack structural innovations, battery management systems, battery recycling, and the supply chain. The energy density of mass-produced lithium-ion batteries is approaching the engineering limit, and breakthroughs in new battery materials (i.e. silicon anodes) and new systems (i.e. solid-state batteries) will bring new growth to the battery industry and play a key role in promoting the global adoption of electric vehicles. Therefore, technological innovations are imperative in a rapidly expanding global battery industry. Meanwhile, more research and collaboration between industry and academia are crucial to addressing scientific and technological bottlenecks in terms of material and structure. Agile and close cooperation between supply chain members is also required to upgrade the battery technology along the complete value chain of resources mining, materials synthesis, cell design, pack design, manufacturing, use, and recycling, and creating a more efficient and resilient battery ecosystem.

Integration of power and transport system

Lead author: Neven Duić

- EVs can improve integration of variable renewables if connected when parked to smart chargers
- Smart chargers should be added to each parking spot to enable the power-transport coupling
- Wholesale and retail markets could be dynamically price coupled to allow the use of EVs for demand response

Emerging renewable energy solutions drive the electrification of transport

Wind and solar are becoming the leading new power generation technologies, with 80% of added capacities since 2020 [14] and heading for an even higher share in the coming years. At the COP28 held in Dubai in 2023, a Global Pledge on Renewables and Energy Efficiency together was proclaimed by the EU, with the COP28 Presidency and 118 countries supporting it and announcing the goal to triple the installed capacity of renewable energy and to double the rate of global energy efficiency improvements from roughly 2% to an annual figure of 4%, by 2030. The pace of advancement of variable renewables (VRES) is unequal in different countries, which depends on several factors, including the local potential of wind and solar, local abundance of conventional energy sources and/or policies which may be enabling or creating barriers [15]. In 2023, several North-Eastern Brazilian states, together with several mid-Western US States, Scotland and Denmark, already have more than 50% share of wind in electricity supply, Rio Grande do Norte being the highest, with three times the local energy demand. Solar is a latecomer but is now growing more rapidly than wind, with Tokelau being the first 100% solar nation and several more states, provinces and countries above 10% [16].

Integration of up to 20% wind and 10% solar can usually be done by flexibilisation of the existing power system. Still, more than that means balancing VRES by interconnectors with neighbouring territories, mainly done now, or by using demand response (an immense potential exists in already present electric water heaters, heat pumps, fridges, etc.) and storage [17]. Going above that level of VRES creates an excess of electricity in some hours, which may be traded away, stored, or used in additional demand, which will stem from the electrification of heating, transport and production of green hydrogen needed for decarbonisation of industry and making hydrogen-based fuels and industrial feedstocks [18]. Which way it will go depends on many local factors, like periodicity of VRES (solar in the tropics is periodic, so ideal for storing in batteries), potential for demand response (heating in the Northern hemisphere is 40% of final energy demand and storing hot water is cheap) but mainly from policies and planning. Demand response by sector coupling is more affordable and environmentally friendly than batteries, but batteries need less planning and policy [19]. In contrast, the integrated energy system must be carefully planned for low wind and solar generation. It includes distributed storage and flexibility options, depending on the climate and potential in the observed system [20].

The increasing share of VRES in power systems decreases the marginal price of electricity when an hourly share is high since VRES have zero variable cost (no fuel) [21]. That creates the so-called duck curve (in the case of solar when, during the day, all electricity is supplied by solar). The excess may be traded away, curtailed, stored, or it may create additional demand. When the electricity price falls under 20 EUR/MWh (22 USD/MWh), electricity is cheaper than biomass at the same calorific value. In places where heating, including sanitary hot water, is a significant part of demand and solar insolation is significantly seasonally variable, a power-to-heat demand response may be created if the retail price is coupled with wholesale and there are no regulatory barriers [22]. Governments should remove the barriers to demand response and create flexibility opportunities and markets to minimise the future cost of decarbonisation [23]. While the power-to-heat demand response starts in areas where heating is needed, the power-to-transport demand response will come later.

Energy demand and charging infrastructure

The electrification of transport has started, and plug-in electric vehicle (BEV+PHEV) sales reached 13% of global light vehicle sales. Share of two and three-wheeler sales in China has reached 50% of the worldwide market in 2021 [24]. Commercial vehicles are also starting to electrify; city buses, local delivery trucks, construction, city fleets, and long-distance semi-trucks are beginning to appear on the market. Short distance maritime transport like ferries has started to electrify. Short-distance aviation may also electrify [25]. Medium and long-distance marine and aviation transport will probably need some kind of biogenic or green hydrogen-based fuel, which may be produced in a bio-e-refinery, or it might also be made on demand in ports or airports [26].

Complete electrification of road transport will increase demand for electricity between 20 % [27] and 40 % depending on the share of electrification and the composition of the transport system [28], for example, taking into account only personal and light vehicles or innovations in the long-range transport as well. The production of green hydrogen and hydrogen-based fuels will increase the electricity demand by another 25% [29], which can be further improved depending on energy efficiency, modal shift and electrification in the integrated energy system. Both demands are mostly not time-critical [30], apart from public transport, open road and ferry port chargers [31].

All these will need adequate charging infrastructure and better grids [32]. The three-pronged philosophy can be recommended for planning the development of charging infrastructure and its interplay with the power grid transmission and distribution, based on expert and consultant studies [33]:

- Integrated approach to planning the power grid and the charging grid for EVs.
- The charging process needs to be managed by the system (through smart charging and V2G), with appropriate business models in place, including TSO-DSO cooperation.
- Careful scenario analysis of the bottlenecks and integrated energy systems' operation needs to be employed to plan the grid expansion.

The share of different reasons for taking a drive differs significantly throughout the countries in the European Union [34] and especially in comparison to the United States [35]. Overall, most drives are for commuting or short-distance errands like shopping trips. More than 64 % of the driving is for less than 10 km, while only 2 % is for more than 80 km [35]. Charging quickly when driving long distances is critical, so fast on-demand chargers are the rule. These charging stations must be built to provide for peak transit periods and discharges, which may be many times higher than average [36]. The trend is the increase of charging power of fast chargers, from 50/120 kW to 250/350 kW [37], towards the MW level when electric trucks appear on the highways [38]. For example, a 3.75 MW MCS standard for charging heavy-duty electric vehicles was developed [39] and presented [40]. To aid in flexibility and to minimise the operational and investment costs, the charging providers may implement hybrid systems with stationary batteries that accumulate energy and avoid peak loads [41] or be guided towards regulated and smart charging solutions to limit the influence of >1 MW chargers for heavy-duty trucks [42], which require case-by-case planning, also depending on the telemetry of such vehicles along their operational routes [43]. The build-up of this variety of hybrid systems will be the result of the relation between the CAPEX into batteries and the electrical grid. In the long term, the ratio is expected to be more in favour of expanding the grids.

On the other hand, when used for daily commuting, cars are parked 95 % of the time [44] and drive 60 km daily in the US [45], between 32 and 84 km in the EU [46], [47] 52 in China [48]. How do we charge them? While commercial charging companies may push for high-profit fast charging, consumers will tend to charge at home [49], and charging at work may become a significant employee perk. Since the charging time is not essential, slow charging is acceptable if that means no hassle (like idling fees). Electricity will be costly when wind and solar energy are not abundant (>100 EUR/MWh) and very cheap (<10 EUR/MWh) when they are overabundant [50]. Wholesale price spread is of an order of magnitude, sometimes two. Low prices will be whenever wind or solar is high, 3000-4000 hours per year. If

properly coupled with retail markets, drivers will be incentivised to charge when electricity is cheap [51]. That will only be possible if most parking places have smart slow chargers. Thus, excess wind energy, when available, would be used to charge at home and solar at work, helping to valorise the excess VRES and hence helping energy transitions. Smart charging could help double the share of VRES in the power system [20]. A recent study showcasing various countries in the EU concluded that smart charging might effectively smoothen the charging demand profiles of large fleets of EVs, limiting the peak demand increase (that is expected due to transport electrification) to 30%–41%. In the case of Germany, this would mean a reduction in the average daily electricity demand peak of about 6 GW [52].

An alternative to the smart slow-charging business model is the demand (dumb) charging model. In the unlikely case of everyone wanting to charge an empty car at precisely the same time using a 7 kW charger, the needed power would be approximately double the presently installed power. If everyone would prefer a 50 kW charger, 14 times more power is required for 1 hour than is installed. Due to regular driving cycles, this will never happen, but even increasing power needed by 50% in times when no wind and solar are available will be expensive and environmentally wasteful compared to smart charging [53]. Dynamic road EV charging, which is being tested in various countries of the World (Germany, Italy, Korea, Sweden, UAE, and USA) on smaller portions of the highways, would have a significant influence on load shifting and aligning the charging of (in this case even heavy transport) with most abundant periods of the day, for example in collision with the generation from solar PV generators [54]. The flexibility introduced by the electric vehicles fleet has to be considered with the other flexibilities (electric water heaters, heat pumps, fridges, power-to-X...) to reduce the need for new production capacities and to operate as efficiently as possible the electric power system at lowest cost with low emissions [55], [20].

Electric vehicle batteries' role in the power system balancing

Vehicle-to-grid is a possibility to use car batteries to provide electricity when there is a lack of other sources [56], and price is high enough to cover the cost of decreasing the lifetime of car batteries [57]. System-level cost reductions incurred by V2G use primarily result from displacing stationary storage systems, and reducing the capacity of dispatchable generators, as well as altering the mix of renewable energy sources. Compared to traditional demand response programs, even with modest participation rates (5–10%), V2G technology generates savings over three times higher and displaces storage ten times more effectively. V2G's greatest advantage lies in aggressive emission caps, which decrease the need for surplus renewable generation capacity and expensive CCS technologies [58]. Many more technical standards, pilot applications and empirical research findings are needed to substantiate the application of these technologies.

Since the replacement cost of car batteries is higher than that of stationary batteries, the system will prefer stationary batteries for such situations.

Once car batteries fall to 80% of their nameplate capacity, they must be replaced. However, such batteries can have a second life when used as stationary batteries [59]. Also, other chemistries which do not have energy density as their primary design parameter could be used as stationary batteries to provide buffers for charging, fast response, daily storage, or market arbitrage [60]. Flow batteries are currently receiving the most attention globally as the preferred battery technology for large-scale long duration stationary energy storage and vanadium flow batteries, in particular, are already being installed in multi-MWh applications in grid-connected, off-grid and microgrid applications around the world, with China currently leading the world in vanadium flow battery implementation [61]. However, the more widespread implementation of this technology is currently limited by global vanadium supply issues and insufficient manufacturing capacity, which are being addressed with significant investment and government support in recent years. All these stationary batteries may compete with car batteries smart charging and correct mixture will depend on government and company policies and markets.

Car Industry: the challenges of a necessary speedy transformation

Lead author: Patrick Péлата

- The car industry is already engaged in a very fast but much-needed transformation; commercial vehicles are next in line for the transformation, with China already in a dominant position on electric buses.
- The transformation will be much slower in the service and maintenance sector of the 1.6 billion vehicles in operation worldwide today, happening over 25 to 35 years
- The transformation provides an opportunity for innovative newcomers to join the industry, with innovative companies in small countries providing value

Road mobility emits 10.5% of global greenhouse gasses (GHG) [62] and is still growing. So, no plan for a zero-carbon economy can avoid ways to move cars, light commercial vehicles (LCVs), trucks, buses and coaches out of fossil fuels. Because these vehicles stay in operation for more than 10 years on average, and a substantial proportion of them have more than 15 years, demands that an entire move to zero carbon for new vehicles must be achieved by 2035, 2040 or 2045 in countries which want to be net zero carbon in 2050 or 2060. This means this industry has 12 to roughly 25 years to entirely escape its almost exclusive dependence on fossil fuels for road mobility. That is a challenging, speedy transformation.

Furthermore, the global automotive industry is huge, accounting for approximately 5% of the world economy employing approximately 80 million people [63]. Total production output went heavily down from 2020 to 2022 because of COVID and limited semiconductors supply but has started to recover in 2023.

Table 4 Motor vehicles production (in millions)³

Countries / Regions		Volume 2019	2022 / 2019
Europe		21.5	- 25 %
	European Union 27 & UK	18.0	- 23 %
	Turkey	1.5	- 7 %
	Russia, CIS & others	2.1	- 49 %
Americas		20.2	- 12 %
	US, Canada & Mexico	16.8	- 12 %
	South America	3.3	- 11 %
Asia-Oceania		49.3	+ 1 %
	China	25.8	+ 5 %
	Japan	9.7	- 19 %
	India	4.5	+ 21 %

³ OICA 2023

	Korea	4.0	- 5 %
	Others	9.9	+ 10 %
Africa		1.1	- 7 %
Worldwide		92.1	- 8 %

So how could such a heavy-weight industry transform itself in such a limited time without significant economic or social disturbances? Which challenges need to be overcome?

A speedy transformation is already on its way

After the Li-ion battery revolution made it possible to have safe electric vehicle that could travel a few hundred kilometres, regulations and financial incentives allowed the mass market to take off in China, Europe and parts of the USA. (See Figure 3).

Between 2016 and 2023, most carmakers could start production and selling EVs, with a few = in “automotive volumes”, i.e., those above 100,000/year. However, well-established carmakers have been joined by newcomers, Tesla and BYD notably, the two-volume leaders of this new field in 2022. Interestingly, if we look at carmakers’ market capitalisation [62] in mid-2023, Tesla (#1) and BYD (#4) are now ahead of Mercedes, BMW, Honda, GM, Stellantis, VW and Ford, close to Toyota (#2) and Porsche (#3).

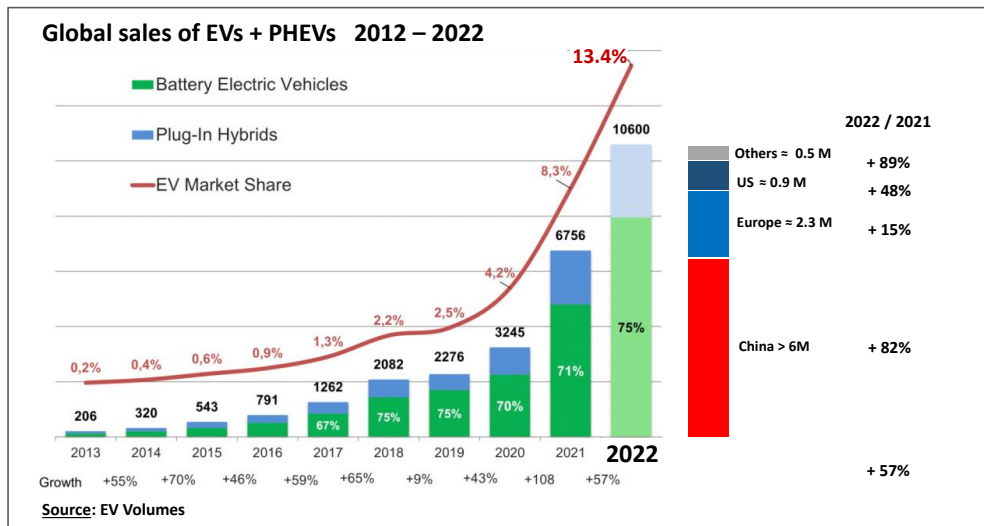


Fig. 3. Global Electric Vehicles Sales, distribution by region in 2022 and growth 2022 / 2021 [64]

A strong push from Public Authorities

The industry is transforming, partially on its own, partially with newcomers shaking up the traditional companies. The move has also been driven by public authorities’ incentives and regulations for this latter. This is especially true in the European Community, where a stringent regulation of CO₂ emissions has been imposed, for the first time, heavy penalties for carmakers not reaching their target in 2020

and 2021. The decrease in diesel engine share following the VW diesel scandal 2015 made the target impossible to reach⁴ without a 10 to 15% share of electric vehicles⁵.

The European Commission, in July 2022, seeing that the European automotive industry had somewhat been able to start such a transformation in the years 2017–2022, decided to raise the bar in terms of CO₂ emissions targets for cars, LCVs and trucks in 2030 (–55%, –50% and –45% respectively) and even forbidding selling cars with thermal fossil fuels engines in 2035. The United States is on a similar trend but with a policy much more focused on supporting financial the production of EVs and batteries made in the US–Mexico–Canada through the Inflation Reduction Act of the President Biden administration.

In China, the *Energy-Saving and New Energy Vehicle Industry Plan (2012–2020)*, specifically, *Notice on printing and issuing the development plan for the energy-saving and new energy automobile industry (2012–2020)* [65], focused on Technology Development for New Energy Vehicles (NEVs)⁶ and related components, Lithium-ion batteries etc. It also set the objective of a 5 million NEVs cumulative total production and sales by 2020 [65], which was almost met. The *New Energy Vehicle Industry Development Plan (2021–2025)* targets a 20% share of NEVs at the end of 2025 in the whole China fleet of passenger cars in operation, in addition to many other more technical objectives on batteries, car efficiency, etc.[66].

Changes from Internal Combustion Engine vehicles to Electric vehicles (ICE to EV)

Whereas the interior and exterior body parts do not change much, many car components will disappear when new ones are needed.

Table 5 Components evolution from ICE car to BEV

Disappearing	No or limited change	New
IC Engine	Interior equipment	Battery pack & Management System
Transmission (only 1 gear in an EV)	Electronics, ADAS, low voltage wiring	Electric Motors
Exhaust system	Axles & Suspension, Tires & Wheels	Power electronics, incl. Inverter
Tank and fuel distribution	Braking system	Heat pump (battery & interior cabin)
Engine Cooling & Air Cond. (current solutions)	Car assembly	High Voltage wiring

⁴ A diesel engine is emitting 10 to 15% less CO₂ than a gasoline engine for the same car.

⁵ Up to 2017, the European average CO₂/km was decreasing in direction of the 95gCO₂/km to be reached in 2021. From 2018 this global average of new cars sold over Europe went up with the double effect of less diesel engines and more SUVs. Not reaching the 2021 target would have led OEMs to pay very important fines above a B€ for the biggest OEMs. Therefore, the only solution was to launch EV and PHEV programs before 2021. Given the way Europe calculates the score on gCO₂/km of each company, 10 to 15% of EVs & PHEVs was necessary not to pay these big fines.

⁶ In the Chinese context, new energy vehicles (NEVs) are battery electric vehicles (BEVs), plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs; extended-range electric vehicles included), and fuel cell electric vehicles (FCEVs).

Impact in terms of cost/ value		
22-24% of a traditional ICE car cost. More in hybrid and plug-in hybrid cars	Very limited cost difference: The body is white and the chassis + because of weight increase, but car assembly – thanks to fewer components to assemble	Motor, power electronics & high voltage wiring become $\approx$ half the cost of ICE and auxiliary. The battery pack is the main added cost: 8,000\$ in 2020, 4,000\$ in 2030 (for a 50kWh battery) [67]

For engine and transmission, as material cost is limited, we can estimate that 20 to 25% of the current auto industry added value will disappear over time while battery, power electronics and electric motor industries, mandatory for EVs & PHEVs, will develop at the speed imposed by European regulation. For battery gigafactories, for example, and only for 2030 Europe needs, it is estimated that 70 B€ (77B\$) of investments will be required with an additional 70B€ for their upstream supply chain⁷.

So, while 1/5 to 1/4 of the current automotive industry will substantially decrease over the next 12 to 25 years⁸, the new one will need R&D and production engineers, technicians and operators with very different skill sets. Training and adaptation of technical education are paramount, aside from easy access to financing for such big investments.

Newcomers versus traditional players, China versus traditional automotive industry strongholds

Newcomers' only focus is EV tech, manufacturing and sales, and they have innovated in these three fields. A few even took over innovative charging networks. Legacy auto powerhouses were much slower to move, and they also had to continue to focus on current ICE R&D, manufacturing and sales. The most profitable companies have deep enough pockets to finance a late surge of an EV line-up. Still, they have difficulties adapting their culture and transforming their R&D or company organisation, supply chain, plants and legacy distribution networks.

But one country, China, anticipated this transformation, and its leadership understood that the move to electricity was the opportunity of a shortcut to become an automotive world leader. A direction was given from the top, but a tough, Darwinian competition among the 100+ carmakers from the years 2010 finally gave birth to excellent companies along the whole EV new value chain, from Nickel and Lithium mining to refining these metals, manufacturing the cathode and anode active materials, building battery gigafactories and finally delivering modern, innovative EVs, impressing the whole global industry leaders in the 2023 Shanghai motor show and again in Beijing motor show in 2024⁹. A steady increase in Chinese EV exports is now following. The challenge to legacy carmakers and suppliers from the US, Europe, Japan and Korea is clear: innovative competition from newcomers and the Chinese auto industry.

⁷ Investment for gigafactories range from 700M€ to 1B€ for a 10GWh/year capacity and forecasts for Europe range from 800 GWh to 1000 GWh/year.

⁸ 12 years in Europe with the zero thermal engines in 2035. 20 to 25 years for the countries having a zero carbon target for 2060. As the carpark last 10 to 15 years or more, new car sales have to be 100% zero carbon in 2045 or 2050 at the latest. Some exemptions may be decided in some limited countries, but volumes would be significantly lower than what they are today.

⁹ All automotive and general media

Conclusion

The car industry is already undergoing a fast but much-needed transformation, challenging legacy players and a more than century-old ecosystem. Commercial vehicles are following. With electric buses, the Chinese industry has already gained a dominant position. However, the transformation will be much slower in the service and maintenance of the 1.6 billion vehicles in operation worldwide, happening over 25 to 35 years.

Electricity or hydrogen for sustainable road vehicles?

Lead author: Bob Evans

- For passenger vehicles, battery-electric vehicles prevail in terms of efficiency and cost-effectiveness compared to hydrogen/hydrogen-electric vehicles
- When functionality is of larger importance – large vehicles, heavy transport, and military – hydrogen-based solutions are still in competition with the battery electric solutions

Both electricity and hydrogen have been proposed as alternative energy carriers for sustainable road vehicles to reduce greenhouse gas emissions. When considering these two approaches, comparing both carriers’ overall energy “in-out” efficiency is instructive. Today, most commercial hydrogen is produced by reforming methane CH_4 , in which case all the carbon becomes CO_2 . To eliminate the use of fossil fuels, it would be necessary to use electricity generated from renewable energy sources, such as wind and solar power or from nuclear power plants. There are two potential ways to use this low-emission electricity to power road vehicles. The first case: batteries are now widely using lithium-ion or other high-efficiency batteries. In the second case, hydrogen, produced by electrolysis of water, is used as an intermediate energy carrier, with a fuel cell then used to convert the stored hydrogen back into electricity. Both cases are summarised in Figure 4.

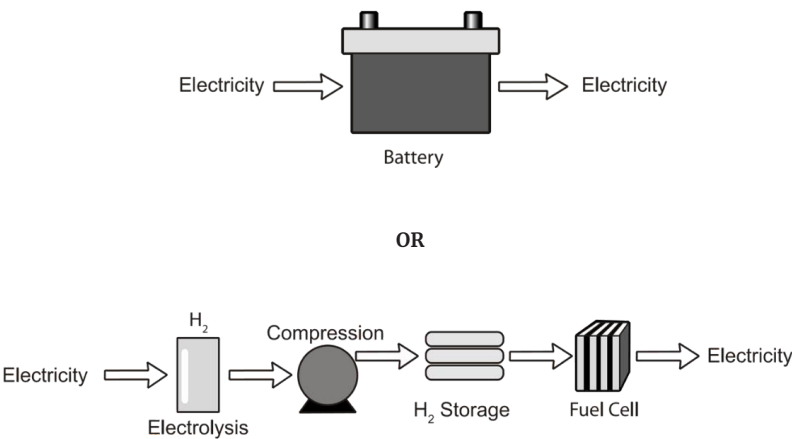


Fig. 4. Alternative Electrical Energy Storage Concepts

Although not all the process steps shown in Figure 4 are energy conversion processes, there is a loss of available energy associated with each step in the chain. To account for these energy losses, we may assign an “in-out” efficiency value to each step in the conversion chain. There is only one step for the battery between the input to the energy storage and output to the vehicle. Since about 10% of this energy is typically lost as heat during the battery charging, we can assign an “in-out efficiency” of 90% to the battery. For the hydrogen storage case, it takes about 8% of the total energy content of the hydrogen to compress it to the pressure used in the storage cylinders. For every 100 kilojoules of hydrogen energy produced by electrolysis, the net energy content of the stored hydrogen is around 92 kilojoules. In more detail, other products are addressed in the E-fuels chapter. The in-out efficiency for each of the steps in the two, equivalent energy “storage” processes of Figure 4 is shown in Table 6 for comparison. The

efficiencies of each step are then multiplied together to get the final “overall efficiency” of the complete process, going from electricity “in” from the primary source to electricity “out” to the traction motor. With an assumed fuel cell energy conversion efficiency of 50%, the overall “in-out efficiency” for the hydrogen storage energy conversion chain is approximately 34%, compared to 90% for the conventional battery.

Table 6 Electrical “In-Out” Efficiencies

“In-Out” Efficiency Comparison			
Fuel Cell		Battery	
Electrolysis	75%	Battery	90%
Compression	92%	—	—
Fuel Cell	50%	—	—
Overall Efficiency	34%	Overall Efficiency	90%

This simple analysis indicates that with batteries with sufficient energy storage capacity to provide a reasonable vehicle range, the battery electric vehicle would be a much more attractive alternative to a fuel-cell-powered vehicle.

Suppose the electricity used to charge the battery is generated primarily by sustainable primary energy sources, such as renewable or nuclear power. Road transportation would no longer significantly contribute to greenhouse gas production. Of course, once significant numbers of these vehicles enter the market, shifting much of the transportation energy requirements from petroleum to electricity, there would need to be a substantial expansion of low-emission electrical generation capacity. An added benefit to utilities of such a shift would be an improved load factor by spreading the electrical load more evenly during the day. With many commuters plugging their cars in for recharging overnight, the increased electrical load, which is usually low at these times, would ensure that electrical generation capacity is better utilised. This “load-levelling” could significantly improve utility load factors, reducing electricity generation costs. However, in countries with a high proportion of solar generation, generation capacity will be low at night, so that daytime charging would be desirable. Passenger transport is moving towards the battery electric vehicles due to cost and efficiency. However, heavy transport of goods is still the field where hydrogen-based solutions can have fruitful ground. Hydrogen use is also needed in other sectors, such as industry (especially high-temperature processes with the need for a longer duration of more significant energy intensity compared to the electric arc technologies) and the buildings sector. Therefore, its abundance and availability for the transport sector depend on the scale and the process of its utilisation in other sectors.

Other important issues that need to be addressed are: storage and functionality. The question of effective storage remains (as current solutions include compression in cylinders or hydrogen liquefaction). There is space for solutions in terms of novel storage applications. However, the issue has been on the table for 20 years, but so far, solutions involving methane have shown better results. The global warming potential (GWP100) of hydrogen is around 20 times that of CO₂ in the worst case [68], while recent studies estimate it to be 11.4 (+/- 2.8) [69]. However, potential hydrogen leakage into the atmosphere during electrolysis, storage and transportation needs to be considered to ensure that the impact of hydrogen on global warming does not exceed current CO₂ emissions.

When functionality is more important than cost and efficiency, hydrogen applications can also come out on top. However, due to handling issues, methanol and similar liquid fuels might come on top as a solution. Examples of such uses include military uses. Hydrogen solutions find space between batteries and e-fuels.

E-fuels other than hydrogen

Lead author: Iva Ridjan Skov

- The integration of fluctuating renewable energy requires storage solutions to achieve a robust system that can meet the demand, with fuel storage being one form of storage that serves the integration of e-fuels.
- Ammonia is the most promising alternative fuel in the maritime industry due to the fuel needed and CO₂ availability limitations.
- Carbon-based e-fuels are to be primarily used for aviation with limited heavy-duty road transport applications, highly dependent on battery development and direct hydrogen application.

The concept of e-fuels has gained increasing interest as systems thinking has become the new norm for integration of renewable energy sources into the entire energy system. Redesigning energy systems from a linear approach, where different demands are met by directly using fossil fuels, toward smart energy systems, which introduce a cross-sector approach, is vital in reaching the 100% renewable energy goals [70].

Conversion of the transport sector is challenging due to the vast types of transport modes, needs and number of transportation units. Finding a solution for the hard-to-abate parts such as heavy-duty road, shipping and aviation, which cannot be easily electrified, resulted in a decades-long focus on utilising conventional biofuels as a direct replacement for oil products [71], [72]. However, as biomass represents a desired fuel for all sectors and is a limited resource, its implementation must be restricted to parts of the energy system where other alternatives are not feasible [73]. Diversification of feedstocks for fuel supply therefore becomes an integral part of ensuring the security of supply.

The integration of fluctuating renewable energy requires storage solutions to achieve a robust system that can meet the demand, with fuel storage being the cheapest form of energy storage [19]. The transport sectors uses large amounts of complex hydrocarbons, and introducing an alternative means of combining carbon and hydrogen allows for integrating variable energy sources into the grid and expanding renewable capacity and balancing. The transport sector's role thus changes from a primarily demand-driven industry to a system flexibility agent.

E-fuels, electro fuels, Power-to-X (PtX), Renewable fuels of non-biological origin (RFNBOs) and hydrogen-derived synthetic fuels all, to a certain extent represent the production of e-fuels based on electrolytic hydrogen paired with a carbon or nitrogen source [74] (Fig 5). Carbon sources can be either fossil (industrial point sources) or biogenic, which are sourced from either biogenic point sources or directly from biomass through biogas or biomass gasification. To meet the fuel demand for carbon-based fuels, Carbon Capture and Utilisation (CCU) technologies are needed to provide the needed carbon. Mikulčić et al. (2019) [75] provide an overview of different carbon capture technologies that can be applied. Using carbon capture technologies such as oxyfuel combustion in combination with electrolysis is beneficial for closing the material balance, as oxygen as a by-product of electrolysis can be utilised for the combustion process. It is still debated whether carbon capture from fossil carbon sources should be used for e-fuel production, as EU legislation does not necessarily recognise this as a green fuel.

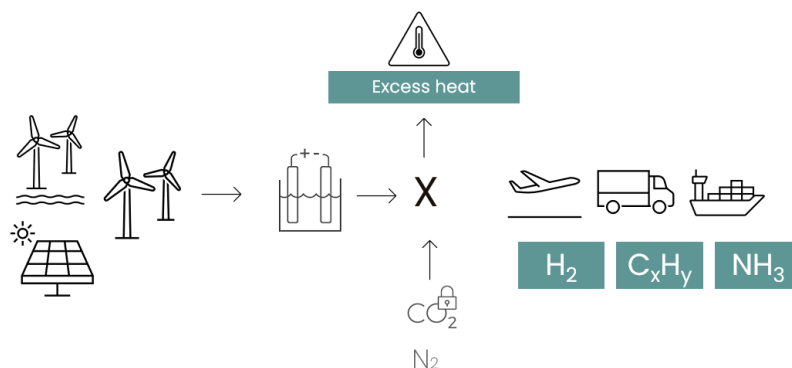


Fig. 5 e-fuel production pathways

Nitrogen, sourced by air separation units, produces ammonia (NH_3). Ammonia eliminates the dependence on carbon sources, which will, in the future, become limited, apart from capturing carbon from the air with direct air capture (DAC) technology. DAC is a promising technology as it can tackle even accumulated atmospheric emissions. However, it is relatively energy intensive, with high costs [75].

Efficiency is not a strong asset of e-fuels, as it is highly dependent on the low efficiency of electrolysis requiring large amounts of renewable energy and high water quality, further coupled with fuel synthesis of different kinds ([76], [77], [78], [79], [80], [81]). Further application of e-fuels in ICE engines lowers the overall efficiency due to the limitations of the Carnot cycle. In addition, the regulatory framework is still in development, and minimising the cost gap represents some of the critical non-technical challenges e-fuels face. However, e-fuels represent lower land and water demands than biofuels [82]. E-fuels have also gained vast interest from industrial actors as the needed length and complexity of e-fuel value chains allow for the involvement of a greater variety of players in the field compared to conventional fuels.

Production of e-fuels also allows for the integration of excess heat flows from electrolysis and fuel production into district heating grids if available [80]. Establishing industrial symbiosis is also possible, especially in cases where there is a potential for excess heat integration and utilisation of oxygen generated during hydrogen production. Vast oxygen production can be used for various applications, for example, in water treatment plants [83] or for oxyfuel combustion and carbon capture [84], as well as in the medical sector, aquaculture and metal production. The end fuels discussed across the sectors have been limited to methanol and ammonia for marine applications, e-jet fuels for aviation, and partly methanol for heavy-duty road transport [85], [86], [87].

Ammonia is most interesting in the maritime industry as a promising alternative fuel due to the quantity of fuel needed. Forty-five percent of the new orders for ships in the shipping sector are for vessels powered by alternative fuels. Among these, 23% are dual-fuel methanol vessels; four vessels are designed to run on ammonia. International and domestic shipping uses approximately 300 million tonnes of fossil fuels annually, making non-carbon-based fuel a more exciting alternative [88]. However, e-ammonia can also be used as a green fertilizer, which could create a competitive market for ammonia. The future ammonia price is expected to be lower than for hydrocarbon e-fuels [89]. Even though ammonia is widely used as a fertiliser and a commodity chemical, it has yet to be tested as a fuel for shipping. There are many developments in applying ammonia as a marine fuel from prominent actors such as DNV, MAN Energy Solution, NCL, Yara, and Mitsubishi Heavy Industries. Bunkering ammonia can increase the risks, therefore, developing on board safety and risk avoidance regimes is needed [90], [91]. E-ammonia offers an option to eliminate CO_2 emissions from the shipping sector, which has set a target to be carbon neutral in 2050 [92]. However, there is still some development to

accommodate the ammonia-related emissions, NH_3 slip, N_2O and NO_x that current emission management technologies cannot provide [93]. On the other hand, E-methanol enables a 95% CO_2 emissions reduction on well-to-wake [94] and is seen as a valid alternative and potentially a transition fuel for parts of the sector, including ferries and fisheries and parts of shipping.

Carbon-based e-fuels are primarily used for aviation but have limited application for heavy-duty road transport, depending on battery development. The transition of aviation based on alternative propulsion technologies will play a relatively small role. At the same time, the continued use of jet fuel requires the development of alternative production pathways, such as e-fuels. Aviation e-fuels can be produced via Power-to-liquid (PtL) routes using Fisher-Tropsch processes or via Methanol-to-jet routes. According to [95], the current TRLs of PtL routes range between 5–8, indicating maturation from technology development and demo stages towards deployment. For example, Exxon Mobile and Haldor Topsøe work with methanol-to-jet routes [96]. Future perspectives from IATA indicate that PtL pathways will play a significant role in meeting the aviation demand.

The application of methanol in combustion engines has been researched for many years, indicating nearly soot-free combustion with extremely low NO_x emissions and reductions in CO and PM emissions ([97], [98], [99]). Geely, a Chinese truck producer, launched a methanol truck in 2019 [100], and 100 trucks have been on the road in China since 2022 [101]. In Denmark, Geely's first EU methanol truck is being tested [102]. However, several truck manufacturers focus on electrification and hydrogen-powered trucks (IVECO, MAN and Volvo); therefore, methanol is not necessarily expected to have large-scale applications in the future haulage sector.

Modal shift: can it help?

Lead authors: Vaughan Beck and Chris Hendrickson

- Active transport options like cycling (including e-bikes and e-scooters) and walking can offer highly cost-effective options to contribute to decarbonisation in the transport sector.
- Sharing travel in a single vehicle can readily reduce the greenhouse gas emissions per passenger kilometre of travel and is becoming more popular.
- In freight transport, rail and water transport have the lowest emissions per metric ton-kilometre, with heavy-duty trucks having significantly larger emissions than rail and medium-duty trucks somewhat higher yet. Still, the transition cost, travel time, and reliability are a primary concern. Air travel has relatively high energy costs and emissions.

Introduction

Vehicle electrification with clean energy and low-carbon alternative fuels are common strategies for achieving transportation decarbonisation, but shifting travel to modes with low or minimal emissions can also be effective [103], [104]. Reducing travel altogether through options telework or virtual meetings can also reduce transport emissions, although telework may divert commuters from transit or induce other travel [105]. This chapter is intended to consider the potential of these alternatives to vehicle modifications, beginning with active transport followed by shared ride passenger transport and freight modal shifts.

Modal shifts in travel are evident over long periods. Railroads only became available in the 19th century, while motor cars and aeroplanes came in the 20th century. Light-duty vehicles have become prominent in passenger travel share over time. Figure 4 shows the growth in light-duty vehicle modal share in the United Kingdom from less than 30% of passenger kilometres in 1952 to over 80% in recent years [106]. During this period, travel increased from 218 to 645 billion passenger kilometres. Other countries also exhibit a shift to greater reliance on motor vehicles over time. Not included in Figure 6 are walking trips undertaken daily for short-distance travel.

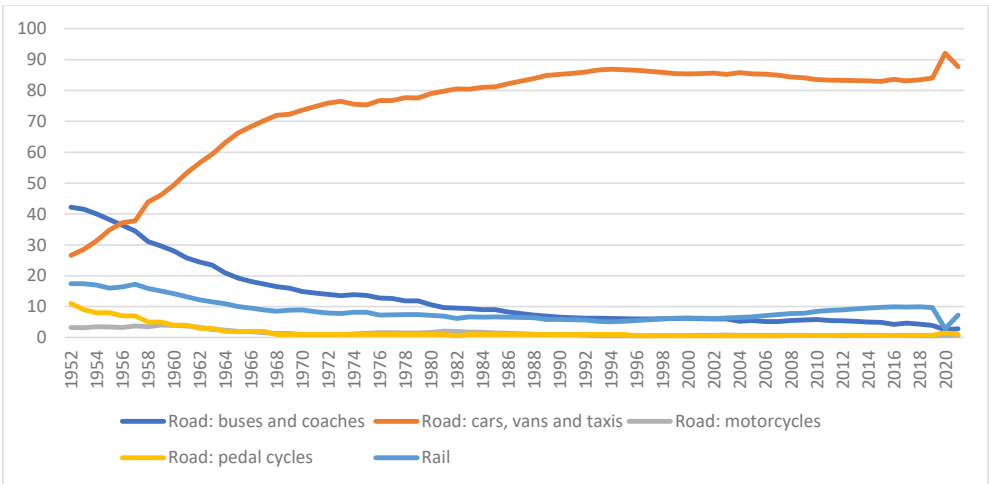


Fig. 6 United Kingdom Passenger Modal shares as a Percentage 1952-2021. Attribution: Authors. Source of Data: UK Department for Transport table code: TSGBo101 [%], [106]

Even with a predominance of light-duty vehicle travel overall, modal shares have considerable variability within and across countries. Urban areas have higher proportions of public transportation. Higher-income countries have higher levels of motor vehicle use. While modal choices are challenging to change significantly, public policies and individual decisions can influence travel modes, energy use and greenhouse gas emissions.

Active transport

Active transport (AT) modes, namely cycling (including e-bikes and e-scooters) and walking, can offer highly cost-effective options to contribute to decarbonisation in the transport sector. AT can also deliver significant co-benefits such as improved human health, and reduced traffic congestion, air pollution and noise. Furthermore, there is considerable complementarity between AT and public transport (refer to section 3). In the USA, e-bikes are outselling electric vehicles (in Europe, this outselling has occurred in recent years) [107]. Accordingly, policy interest in active transport (AT) has been renewed. In this section, consideration is given to the potential scale AT can contribute to decarbonisation, the associated health benefits and the identification of actions that can help achieve some possible benefits.

It was noted in a recent publication [108] that a shift from car to active travel is possible for trips up to 16 km in length, and those trips are responsible for 40% of carbon emissions from all car trips (in medium-size cities). The share of cycling varies significantly between cities. Many factors influence these outcomes, including the provision of cycling infrastructure. One study found a non-linear association between cycling network length and cycling mode share in 167 European cities and where the asymptotic maximum cycling mode share was 25 per cent [109]. Global GHG emissions from light vehicles were about 3.3 Gt CO_{2e} in 2020 [110]. Given the high percentage of short trips made by car, the potential for AT to decrease GHG emissions is considerable. There is widespread recognition that the dependence on personal motor vehicles for transport has substantial and wide-reaching negative health impacts. Mode shifting from personal motor vehicles to AT can lead to substantial reductions [108] in overall mortality, cardiovascular diseases, cardiorespiratory morbidity, cancer, and type 2 diabetes.

Given the potential environmental and health benefits associated with AT, numerous studies have been conducted to quantify these benefits. Results from a recent study [111] show that a mix of policies maximises the net economic benefits (using benefit cost ratios), and these include bike-sharing, cycle parking, training and education, low-traffic neighbourhoods, e-bike grants, a workplace parking levy and increased use of a 'cycle-to-work' scheme. Additional measures that can help promote safe cycling and walking include the following [108]:

- Redesign urban spaces that meet daily needs related to accessing facilities and amenities within distances that can be reached safely by active mobility.
- Provide appropriate infrastructure for safe walking and cycling.
- Provide trip-end facilities, such as changing rooms at workplaces and secure parking for bikes.
- Provide green spaces, parks and trails, and forms of urban revitalisation.
- Reduce car dependency through better land use, urban planning, efficient public transport and disincentivising driving.

A related study [112] recommends reallocating space for cycling and walking, improving active mobility infrastructure, and increasing cyclist and pedestrian safety to reduce fatalities. Such recommendations include the development of national cycling strategies, policies and regulations, providing sustainable funding to construct user-friendly and safe infrastructure and integrating cycling into health policies and urban and transport planning. AT solutions cannot be considered in isolation. To achieve a greater

uptake of AT, it is essential to integrate and deploy a range of strategies supported by strong policy and regulatory frameworks [113].

Many barriers exist to moving away from car-based transport and towards bike riding. In a recent peer-reviewed review paper [114], it was found that some of the leading barriers to adults riding a bike for transport in OECD countries were safety (perceived injury risk and riding on roads with high traffic density), infrastructure (poor condition of dedicated bike lanes and roads); environmental factors (weather); and, personal and attitudinal factors. Recognition of these factors will permit more informed decision-making regarding cycling infrastructure, the development of promotion campaigns and policy reform.

To advance active transport, robust policy-relevant evidence is needed to understand how to change behaviour and support decision-making by policymakers and practitioners. A global-first priority-setting exercise for active transport was undertaken [115]; this study also identified new policy-relevant areas of research, funding, policy-making and practice for active transport in Australia.

Shared Ride Passenger Transport

Sharing travel in a single vehicle can reduce greenhouse gas emissions per passenger kilometre. While extra weight from additional passengers can reduce energy efficiency per kilometre, this reduction is very small compared to the energy required for multiple single-occupancy vehicle trips [116]. Shared rides can occur in private vehicles, for-hire vehicles, urban mass transit and inter-city transport modes.

As illustrated in Figure 6, shared ride modes such as bus and rail have been declined over time for passenger kilometres of travel share in the UK. Similar trends exist elsewhere. A fundamental difficulty for shared rides is to match origins and destinations. Occasionally, this matching is straightforward, such as when a family travels together. However, urban mass transit and shared-for-hire services often involve extra travel time and distance. In addition, travellers usually prefer the privacy of a single occupancy vehicle, especially with fears of disease or security.

For urban mass transit, adequate travel demand is a critical [117]. Buses and trains require considerably more energy and have higher emissions per kilometre of travel than light-duty vehicles. If vehicle loads are sufficiently high, this extra energy use and emissions per kilometre of vehicle travel can be allocated to many passenger kilometres. However, vehicle load factors can be low during off-peak periods or in low population density areas, resulting in high costs, energy use and emissions per passenger. Similarly, shared ride-for-hire services require adequate demand to make up for lower fares for travellers. In the EU, air travel requires 160 gCO_{2e}/passenger-km, cars 143 gCO_{2e}/passenger-km, bus 80 gCO_{2e}/passenger-km, maritime 61 gCO_{2e}/passenger-km and trains 33 gCO_{2e}/passenger-km [118].

A variety of policy levers exist to encourage ride-sharing. Examples include information dissemination, subsidies for urban mass transit, land use restrictions to increase population density, special lanes for high occupancy vehicles to avoid congestions and tolls on private vehicle use [104]. Many of these policy levers have been implemented. However, the average private vehicle occupancy has generally not been increasing, nor has the share of trips in urban mass transit.

With the introduction of electric vehicles powered by clean energy and low-carbon liquid fuels, the ride-sharing emissions are correspondingly reduced. As a result, the long-term emissions reductions from ride-sharing encouragement policies are relatively modest if vehicle electrification with clean power generation goals is achieved.

Freight Modal Shifts

The emissions of current freight movements vary considerably over space and time, especially with different vehicle capacities [119]. Moreover, estimates of efficiencies and emissions are uncertain. Rail

and water transport have the lowest emissions per metric ton-kilometre, with heavy-duty trucks having significantly larger emissions than rail and medium-duty trucks, which are somewhat higher yet. In the EU, the emissions are 1036 gCO_{2e}/tonne-kilometre for air, 137 for trucks, 33 for inland waterways, 24 for rail and 7 for maritime shipping [118].

World carbon dioxide emissions from freight transportation were 7.6 Gt in 2022 [120]. While there was a decline in emissions during the COVID-19 pandemic, the trend of freight emissions has otherwise been steady growth, with 5.8 Gt of emissions in 2000. Roadway transport was the largest share (5.9 Gt), followed by shipping (0.8 Gt), aviation (0.7 Gt), pipeline (0.2 Gt) and rail (0.1 Gt).

While there have been improvements in vehicle efficiency, the primary reason for the growth in freight transport emissions has been the growth in the underlying quantity of freight shipments [121].

The modal share of freight movements also varies among regions and countries. For most countries, trucking is the primary mode of freight movements an exception is Russia, where rail transport dominates. Rail freight modal share is relatively low in China and the EU but higher in North America and India. The availability of rivers for water transport influences the modal share significantly.

As with passenger travel, various strategies can be used to reduce emissions from freight movements [119]. Electric vehicles and low-carbon fuels are of widespread interest, although rail, ship, and long-distance trucking are challenging to rely on batteries due to significant energy requirements. As a result, fuel cells and low-carbon liquid fuels are of considerable interest. Efficiency improvements in routing and material handling can be beneficial in both reducing emissions and costs. Reducing the amount of freight moved can also help with approaches such as local procurement or distributed manufacturing. In addition, shifting freight to different modes is a possible strategy.

Shippers make decisions about modes to use based on the expected level of service. Cost is a significant concern, but also travel time and reliability. Investments in transport infrastructure can influence the predicted shipping level of service. A considerable shift to rail and water freight movements could reduce transportation emissions, but the investments needed to accomplish such a shift can be immense.

Last-mile freight delivery has different characteristics and opportunities than line-haul freight shipping. Delivery services must balance the economies of consolidation of packages with the speedy service customer's desire. Again, routing and inventory efficiencies can be helpful for last-mile services. Modal shifts, such as electric drones or pedal delivery vehicles can also play a role.

E-mobility in developing countries

- Policies for the transition of the transport sector towards e-mobility are being promoted by almost all countries in Latin America (LA), leading to an increase in sales of EVs.
- Local abundance of critical minerals can allow some LA countries to facilitate integrated industrial approaches.
- In Africa, insufficient regulatory mechanisms and low incomes, long travelling distances, and lack of infrastructure pose barriers to e-mobility.
- International support will be needed to facilitate the transport transition in Africa.
- In South and Southeast Asia, two and three-wheelers are used in road transport, which helps in reduce pollution. Still, there is also significant legislative support and industrial development (especially in Thailand and Indonesia).
- Lack of infrastructure and currently still relatively high cost of EVs impedes the transition in South and Southeast Asia.

E-mobility in Latin America

Lead author: Jaime Domínguez

Introduction

Virtually all Latin American countries are taking steps to reduce greenhouse gases and environmental pollution from cities. Although it is not an exact norm, in countries with lower incomes or with cheaper fossil fuels, the measures are more limited or have been taken later. In other countries, usually those with greater economic capacity, the development of public policies has been greater. Those who are more advanced in the development of e-mobility, as is the case of Costa Rica, Colombia, and Chile, have been promoting its growth for years both in the public transport sector and in private vehicles. Brazil and Mexico, with the largest population in Latin America, are a little behind in promoting EVs, but their population makes the increase larger than in any other country.

Other countries, such as Honduras and Guatemala, have been starting in the last two years. In any case, practically all countries are promoting policies for developing electric urban transport to reduce pollution in large cities as soon as possible. Brazil and Mexico, with the largest population in Latin America, are a little behind in promoting EVs, but their population makes the increase larger than in any other country.

Some features

Among the most outstanding features of the development of electric mobility in Latin America are the following:

- Compared to Europe or North America, the proportion of pollution due to traffic is higher in Latin America: more than 20% in Europe and the USA and more than 30% in Latin America.
- The electric vehicle market has grown fast in recent years. While the absolute numbers are still relatively low compared to other more developed markets, the trend is upward, with annual sales growth levels in many cases exceeding 100%. Growth is expected to continue in the coming years as awareness of sustainable mobility increases and more supportive policies are implemented.
- There are significant differences between some countries and others in the number of electric vehicles circulating, which is highly influenced by the country's population and market share.

- Although the absolute numbers are still relatively low compared to other more developed markets, in the case of public urban transport vehicles, such as buses and taxis, their development in some countries is higher than in European or North American countries. The case of Colombia and Chile is worth mentioning, with more than 1000 electric urban transport buses each and a significant fleet of taxis.
- Most countries have implemented and are implementing policies to promote the adoption of electric vehicles, some for more than 5 years and others have started in the last year. These policies include tax incentives, tax exemptions, purchase subsidies, and incentive programs for the installation of charging infrastructure. These government measures are intended to encourage the adoption of electric vehicles and reduce economic barriers for consumers. However, the scope of the measures and their impact on the promotion of electric vehicles is very different in some countries and others.
- Some countries, like Argentina or Chile, have developed plans to ban the sale of fossil fuel vehicles between 2035 and 2050; others, like Costa Rica or Paraguay, have strategic plans but do not consider banning the sale of fossil fuel vehicles yet and others have not yet developed any structured decarbonisation programme of this type.
- One of the critical challenges for adopting electric vehicles in Latin America is charging infrastructure. Although significant advances are being made in installing charging stations in urban areas and on major roads, there is still a need to expand and improve the charging network to increase the comfort and confidence of electric vehicle drivers.
- Automotive multinationals have not yet started to produce electric vehicles in the area, but they have begun to set up factories there. However, several automakers are already introducing electric vehicles to the Latin American market.
- Some local manufacturers have begun to develop electric vehicles in the region, such as Coradir, Sero Electric or Volt in the case of cars in Argentina, or Reborn Electric Motors, which has begun manufacturing passenger buses in Chile. This increased share of the local automotive industry is driving the advancement of electric vehicles in the Latin American market.
- In addition to charging infrastructure, there are other challenges to the widespread adoption of electric vehicles in Latin America. These include the high upfront cost of electric vehicles compared to internal combustion vehicles, a lack of awareness and education about the benefits of electric vehicles, and the limited availability of electric vehicle models and options at affordable prices compared to other markets.
- The incipient development of electric mobility means that statistics are sometimes not sufficiently detailed, combining fully electric vehicles (BEV), hybrids (HEV) and plug-in hybrids (PHEV) without distinction between them or HEV and PHEV without distinction, which makes it challenging to analyse the evolution of their development.
- The typical characteristics of the vehicle fleet in Latin America, with a percentage of motorcycles and mopeds as high or higher than cars in some countries, means that this proportion in the growth of these vehicles also extends to electric vehicles. At the same time, electric micro-mobility has also developed highly in many of the countries analysed here.

Evolution of the electric vehicle sales

Below are some graphs that present the sales of electric vehicles in countries with significant development within Latin America. Those countries in which the development of electric mobility is still embryonic, such as Venezuela, Honduras or Nicaragua, among others, have been excluded.

Figure 7 shows the number of fully electric vehicles sold in 2022 in different countries (author's data).

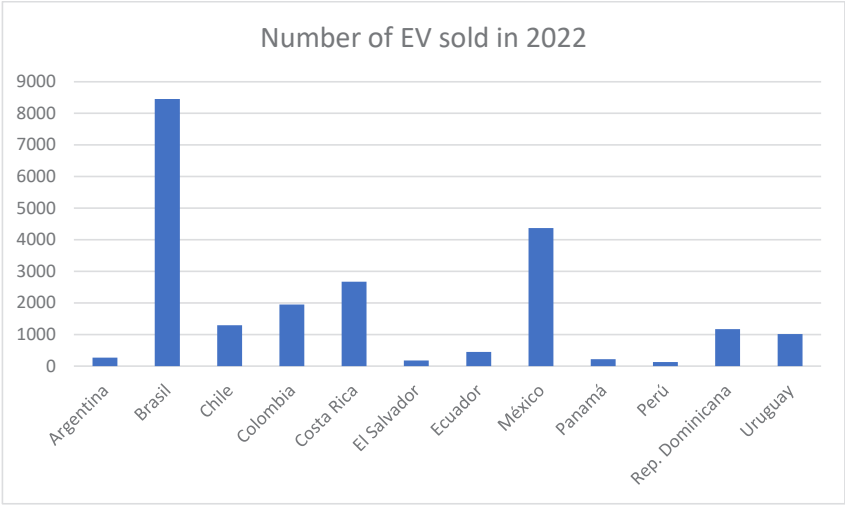


Fig. 7 Fully electric vehicles sold in 2022

It can be seen that Brazil and Mexico are the countries with the highest number of vehicles sold in the last year, mainly due to the more significant population and fleet of vehicles. However, the situation changes if sales data are analysed concerning the total number of cars sold, as shown in Figure 8. In that case, Costa Rica stands out at levels similar to Europeans and the Dominican Republic.

With the speed of growth of the electric vehicle fleet, figure 9 shows that in most countries, sales are growing at a rate of more than 100%. In this case, Mexico stands out, which has begun to have high growth in recent years, and Argentina and Peru, which have so far had lower growth in the last years, but now are starting to grow. So, in these previous two cases, getting a very high number of sales is unnecessary to achieve a higher percentage of growth.

According to these data, it can be said that the development of electric mobility has begun to develop in an orderly manner at an uneven pace except for Costa Rica, which is more advanced, and the countries that are still in incipient development, the rest develops a growth rate similar to that existing in Europe about 5 to 7 years ago.

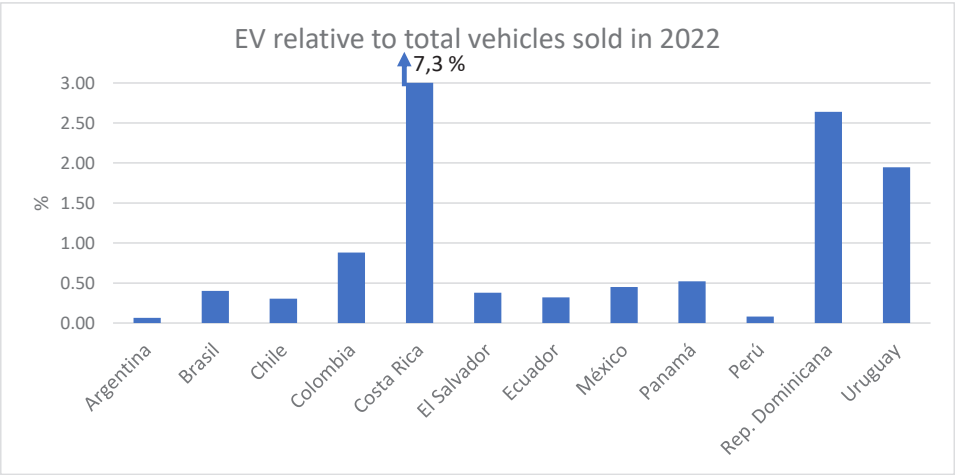


Fig. 8 EV sales relative to total vehicle sales

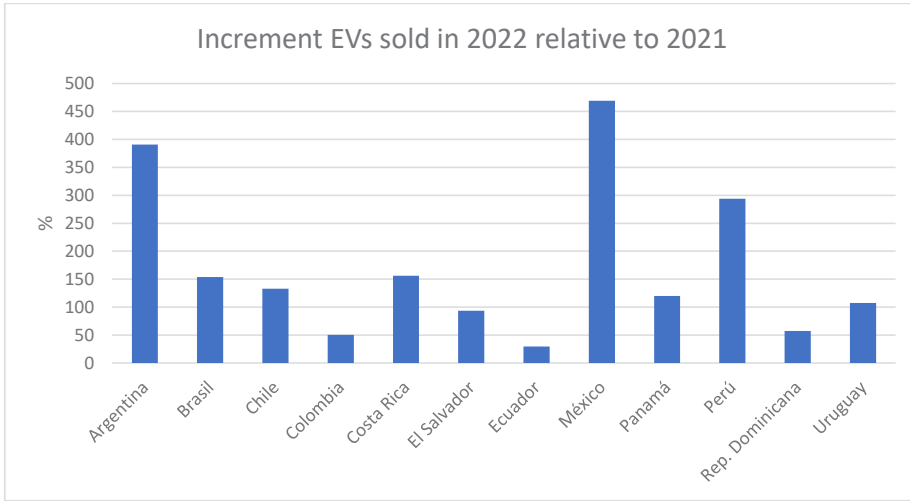


Fig. 9 Increment EVs sold in 2022 relative to 2021

Charging stations

Governments are taking measures to promote the installation of charging stations on public roads and in private garages. They are being installed and dispersed to cover the entire territory as much as possible. On the other hand, in different countries, the busiest roads have been selected, and corridors have been established in which charging stations have been installed at distances between 70 and 100 km. The current situation can be seen in Figure 10, which shows the number of charging stations currently existing in each country, standardised, in the absence of the total number of existing electric vehicles in each country, with the number of vehicles sold in the last year, which is generally between a third and a fifth of the total existing electric vehicles.

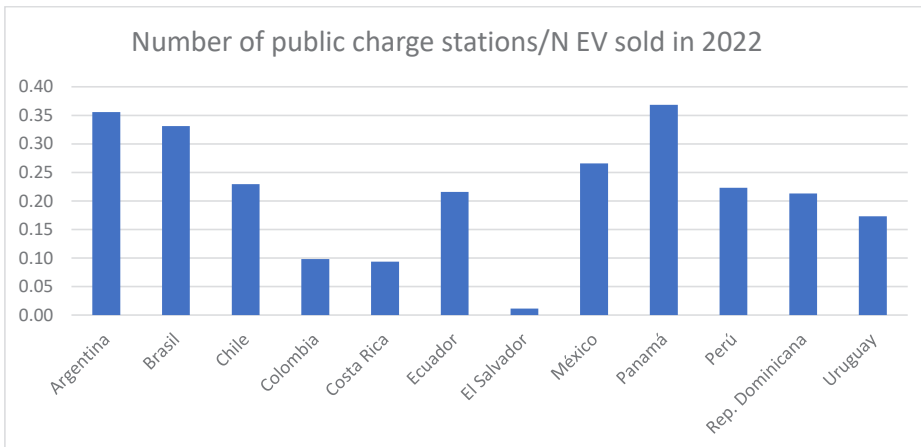


Fig. 10 Public charging stations relative to the number of EVs sold in 2022

Considering that there is also a high number of private charging stations, it can be said that, with limitations, the demand for installed public stations is currently satisfied. In any case, practically all countries are currently developing programs for the installation new charging stations, which will at least double the number of existing ones in the coming years.

Regulations on electro-mobility

All the countries analysed have laws that promote the use of electric and hybrid vehicles, usually through tax incentives, regulations for the development of charging station networks on public roads and other provisions. Some have achieved more significant effects than others, depending on the incentives established and their relationship with the country’s socio-economic conditions. But, for the development of electro-mobility, it is important to have not only tax incentives for the acquisition and use of electric vehicles or standards for the development of the installation of chargers but also a comprehensive plan in which electro-mobility is contemplated as a whole, including analysis of the situation, medium and long-term objectives, expected effects on the environment, manufacturing possibilities of vehicles and components, necessary raw materials, recycling and reuse, etc.

Some countries that have developed national e-mobility plans after establishing different measures to promote electric mobility in the last few years. In addition, others are in the process of approval, although the date these plans will be established is not yet defined. Table 7 shows the list of countries and a column indicating the date of adoption of the comprehensive plan. There are some countries where, although there is not yet a plan, a draft plan is already under discussion and is expected to be adopted shortly. In such cases, the expected date has been indicated with a question mark to show that it has not yet been approved. The column has been marked in grey in countries that do not yet have a comprehensive plan.

Table 7 Adoption of comprehensive clean transportation plans

Country	Year	Country	Year
Argentina	2023?	El Salvador	
Brazil		México	2023?
Chile	2021	Panamá	2022
Colombia	2019	Perú	2023?
Costa Rica	2019	República Dominicana	2020
Ecuador		Uruguay	

Analysing the table and previous graphs of sales, it is worth highlighting the high relationship between the existence of a comprehensive electric mobility plan with several years of operation and the market share of electric vehicles relative to the total number of vehicles sold in 2022.

Other considerations

With the need for electric power generation to meet the future charging needs of vehicles, it does not seem that there will be problems. Most countries currently have sufficient production capacity, and are largely renewable, and the expected growth rate of the electric vehicle fleet will not generate urgent needs to expand production capacity.

Practically all plans for electric mobility contemplate electrification level goals, with goals of eliminating the sale of internal combustion vehicles between 2035 and 2050 and somewhat earlier than that of public transport vehicles. They also set targets for reducing emissions from the transport sector by 30% between 2030 and 2040 and higher levels in 2050.

On the other hand, the plans set objectives for the manufacture of electric vehicles in different countries and exploitation and increase in the efficiency of mines of the materials necessary for the production

of batteries, such as copper or lithium, in countries that have these raw materials such as Argentina, Bolivia and Chile in the case of lithium.

E-mobility in Africa

Lead author: Pine Pienaar

Introduction

The Comprehensive Africa Climate Change Initiative (CACCI) was launched at the 26th United Nations Conference of the Parties (COP26) in November 2021 in Glasgow, Scotland. The CACCI is a partnership formed with the African Union Commission (AUC), aimed at addressing the Paris Agreement goals of reducing carbon emissions and implementing long-term plans to adapt to climate change in Africa. With this event, all fifty-four African countries ratified the Paris Agreement and committed to its objectives ([122]).

There are apparent differences between developed and developing countries regarding their ability to decarbonise and adopt e-mobility technologies. The main characteristics of developing countries include [123]:

- Inadequate regulatory mechanisms to promote decarbonisation
- Low household income levels
- A shortage of infrastructure, not only in terms of basic infrastructure like roads but also charging facilities
- Longer travel distances, which impact on battery charging needs and patterns
- Inadequate financing and ability to service debt.

Opportunities

Opportunities available to developing countries regarding decarbonisation and moving toward e-mobility are discussed below:

Without vested interests and consumer resistance, new technologies are often easily adopted in the developing world. In the e-mobility sphere, for example, [124] refers to renewable energy mini-grids in rural electrification in Africa. Electricity can be provided to rural communities as grid extensions, standalone solar systems and mini-grids (independent, decentralised electricity networks functioning separately from a national grid). Regarding e-mobility, electric vehicles could be charged from such a network, especially scooters and three-wheelers, which are becoming popular in many parts of Africa [125].

Regarding economic development opportunities in mining and manufacturing, essential lithium-ion battery (LIB) minerals are available in various African countries, for example:

- South Africa (manganese, nickel and platinum)
- Democratic Republic of Congo (DRC) (cobalt)
- Zimbabwe (lithium)
- Mozambique (graphite)
- Zambia (copper).

While mining these minerals contributes toward economic development and employment creation, there are also significant opportunities for value addition in smelting, refining, cell assembly and EV production, which could be developed on the African continent. The first step in the value chain consists

of beneficiation, the treatment of raw material to improve its physical or chemical properties, especially in preparation for smelting [125].

Financing is available directly or through dedicated climate change funds from various first-world countries and agencies to fund decarbonising and climate change projects in African countries, specifically Sub-Saharan Africa (SSA). African states can benefit from such funding. A recent study [126] distinguishes amongst the following sources of financing for climate action:

- Concessional financing, mainly through climate funds
- Debt instruments that are linked to climate change
- International carbon credit schemes
- Climate-related insurance schemes.

According to [127], electric vehicles will dominate passenger transport systems worldwide. The opportunity for developing countries is to establish or upgrade public transport fleets to electric vehicles, hopefully with subsidised funding, which will benefit commuters and the economy in general.

Conzade [123] points out that two-wheeler vehicles constitute up to 50 percent of the total vehicle population in most sub-Saharan African (SSA) countries (apart from South Africa). There is considerable potential to improve short-distance mobility by transforming this industry to electric vehicles.

Challenges

Conzade et al. [123] identified several challenges Sub-Saharan Africa is facing in terms of its electric mobility transition, one being unreliable electricity supply. Although many African countries progressed well in terms of access to electricity, a survey done in 2019 across 34 African countries found that fewer than half of users connected to the grid enjoy reliable electricity supply. Without sufficient electricity supply, the introduction of electric vehicles will remain problematic.

A second challenge in terms of electric vehicles is affordability [123]. Low household income, the low availability of asset finance at affordable rates, and the purchase price of electric vehicles tend to be higher than that of the equivalent internal combustion engine vehicle all contribute towards this challenge.

A third challenge is the dominance of used vehicles on much of the continent, caused by affordability challenges and weak regulation [123]. Countries allow the importation of older vehicles that do not meet modern-day emissions standards. A 2020 United Nations Environment Programme (UNEP) report found that used-vehicle regulations are inadequate in many sub-Saharan African countries [128]. Under these circumstances, it is difficult for new electric vehicles to compete price-wise with older, low-cost internal combustion engine (ICE) vehicles.

The International Energy Agency [129] refers to national policies and incentives in developed countries which enhance electric vehicle sales and utilisation. These initiatives include vehicle purchase incentives, direct incentives to car manufacturers, policy support to vehicle and battery manufacturers, as well as to critical mineral supply chains, subsidies, and bans in ICE-only vehicles. Policy support for electric vehicle supply equipment (EVSE) (charging equipment) is also increasing. This type of support is generally not available in SSA countries.

Some African countries are energy-wise dependent on coal and fossil fuels, which is a challenge to replace in the short to medium term. The reasons for this include the abundant availability of these energy sources, the relatively low cost, and inadequate funding and institutional strength to provide sufficient alternative energy sources.

The way forward

It is essential for stakeholders worldwide, from different countries and sectors of the economy, to continue to take hands in the transition to climate-friendly technologies. Undoubtedly, international support has played a vital role in the successes achieved to date in Africa and will continue to do so.

E-mobility in South and Southeast Asia

Lead author: Neven Duić

Introduction

The South and Southeast Asia region constituted more than 30% of the global population. Addressing the surge in emissions and achieving socio-economic progress are top priorities for this region. Transport holds significant importance for these countries, not only in connecting people and markets and facilitating economic growth and social development but also due to its impact on oil demand and contribution to emissions. Over the past few years, South and Southeast Asia countries have been intensifying their efforts and commitments to combat climate change [130].

The transportation sector in Southeast Asia has long been known for its significant carbon-intensive energy consumption. According to the 6th ASEAN Energy Outlook (AEO6), the transportation sector ranks as the second-largest energy-consuming sector after industry, accounting for approximately 30% of the region's total final energy consumption (TFEC). However, the region's transition to electric mobility offers hope for a more sustainable and eco-friendly transportation system if renewable energy sources are used for charging. In South Asia, the transportation sector contributes to GHG emissions in different SAARC countries, with percentages ranging from 6% to 27% of the total emissions. As the world embraces sustainable transportation, adopting EVs is a crucial mission. To achieve this transformative shift, collective efforts from the automotive industries in the nations become essential. By embracing the potential of EVs and aligning strategies towards clean and green mobility, the regions can pave the way towards a brighter and more sustainable future.

Some Features

A notable feature of the transportation landscape in Southeast Asia is the prevalence of two and three-wheelers, constituting about 80% of vehicles in the region [131]. This characteristic sets it apart from other areas like China, Europe, and the United States, where the growth of electric vehicles (EVs) is primarily focused on cars. The adoption of two-wheeled EVs has outpaced that of electric cars, with market leader Vietnam witnessing around 8% of all vehicle sales being attributed to two-wheeled EVs in 2020. However, the transition to EVs faces challenges due to the higher cost of purchasing an electric passenger car than traditional ICE vehicles, deterring many drivers from making the switch.

The automotive industries in South Asian countries display significant diversity, influenced by varying market demands. India stands out as the prominent leader in automobile manufacturing in the region. India boasts a few domestic automobile manufacturers, and has attracted several foreign automobile companies that have established their manufacturing facilities within the country. In contrast, Pakistan features a limited number of automobile manufacturing facilities, while other South Asian nations have opted for automobile assembling plants. On the other hand, Bangladesh possesses domestic manufacturing factories dedicated to the production of two and three-wheelers. Embracing Electric Vehicle adoption calls for transformative changes in the automotive industries of the respective SAARC nations.

Opportunities

Some ASEAN Member States (AMS) governments have already set national targets for the deploying electric vehicles, including Brunei Darussalam, Indonesia, Singapore, and Thailand [132]. This

proactive approach demonstrates the region's willingness to embrace electric mobility. Furthermore, several countries have introduced incentives and subsidies to encourage electric vehicle adoption. For instance, Thailand approved tax cuts and subsidies, while Indonesia is considering reducing value-added tax on electric car sales. These measures aim to make EVs more affordable and attractive to consumers.

The adoption of electric vehicles (EVs) in SAARC nations is driven by many factors, including energy reserve shortages that lead to increased fuel imports. Embracing EVs offers a sustainable solution, reducing reliance on traditional fossil fuels and mitigating energy scarcity challenges. Moreover, countries like Afghanistan, Bhutan, India, and Nepal, rich in natural resources, present a unique opportunity to leverage hydropower for powering EVs, contributing to a greener and more environmentally friendly transportation system [133]. By harnessing their hydropower potential, these countries can significantly enhance the viability and attractiveness of EV adoption, paving the way towards a cleaner and more sustainable future for the entire SAARC region.

Challenges

Despite the progress and opportunities, several challenges impede the widespread adoption of electric vehicles in South and Southeast Asia. One of the main obstacles is the high capital requirement for purchasing EVs, which deters many potential buyers from making the switch. Affordability remains a key concern, and addressing this issue through incentives and financing options is crucial to increasing EV uptake. Furthermore, the lack of supporting infrastructure, especially the availability of charging stations, poses a significant barrier to the seamless integration of electric mobility. A comprehensive and well-connected charging network is essential to alleviate range anxiety and provide EV users with the convenience they need for long-distance travel. Moreover, addressing risk aversion among stakeholders, including consumers and investors, is vital to instil confidence in the reliability and performance of electric vehicles. This requires robust safety standards, transparent information about EV technology, and effective consumer education programs to dispel any misconceptions surrounding electric mobility. To overcome these challenges, concerted efforts from governments, private sector players, and international organisations are essential. Implementing policies and regulations that incentivise EV adoption, investing in charging infrastructure expansion, and promoting research and development in EV technology are all critical steps in advancing the electric mobility agenda in South and Southeast Asia.

Other considerations

Electric vehicle and battery manufacturing

Southeast Asian countries like Thailand and Indonesia aspire to be regional hubs for EV production and are actively building manufacturing facilities for EV batteries. With a strong foothold in the motor vehicle sector, Thailand aims to produce 30% of electric vehicles by the end of the decade [134]. Indonesia, the world's largest nickel producer (a key component in lithium batteries), aims to establish itself as an EV production and export hub in the region. On the other hand, Singapore, a small country with limited natural resources, focuses on battery recycling to extract precious metals from spent batteries for reuse in battery production.

India, the leading country in electric vehicle production in South Asia, has set an ambitious target for its electric vehicles market to reach 17 million units by 2030. However, as of last year, electric vehicle sales have only surpassed the one-million mark (including two and three-wheelers). In response, the Indian government has implemented various initiatives like the Faster Adoption and Manufacturing of Hybrid and Electric Vehicles in India (FAME India) [135]. These measures are aimed at accelerating local production and bolstering the growth of the electric vehicle industry, facilitating the achievement of India's ambitious goal within the specified timeframe. Several companies have also shown keen interest in setting up a production line for two-wheeler EVs in India.

Charging Infrastructure

Accelerating the transition to electric mobility requires establishing adequate charging infrastructure, particularly in urban areas. Governments must play a proactive role in supporting the transformation of mobility and energy systems in cities. For instance, Singapore has proposed laws mandating new buildings with car parks to install EV charging points in at least one percent of their total car and motorcycle parking lots to regulate EV charging. Battery swapping stations offer an efficient charging alternative, particularly for e-motorcycles, e-scooters and other two and three-wheelers. This enables immediate refuelling by swapping discharged batteries with fully charged ones, optimising space and vehicle serviceability [136]. The creation of Electric Vehicle Infrastructure is a crucial prerequisite and a transformative step in shaping the future of transportation in SAARC nations. Recognising the immense potential of electric mobility, several developed countries, alongside some progressive developing nations, have taken proactive measures to invest in and build a comprehensive EV charging infrastructure. Moreover, a well-developed EV charging infrastructure plays a pivotal role in supporting the growth of the electric vehicle market. It not only attracts more consumers to make the switch but also encourages the local manufacturing and production of EV components and technologies, and their recycling.

Overarching observations

- Many developing countries have problems with adequate power supply.
- Do not copy transport modes of advanced economies; prioritise mass transport.
- The less infrastructure there is of gasoline stations and petroleum products storage facilities, the easier it is for a country to promote e-mobility and to leapfrog to all kinds of EVs, mainly two and three-wheelers.
- A long-term lease scheme for batteries makes the cash flow associated with acquiring an EV similar to an ICEV. This option becomes applicable when battery installation designs are suitable for easily exchanging another battery. Battery swapping stations for 2 and 3-wheelers, observed as a feat in SE Asia, apply to all developing economies and, with adequate designs, can be extended to EVs.
- Exports (Imports) of second-hand ICE vehicles should be banned in advanced countries. This is a problem for many developing countries because they go backwards regarding emissions.

Fire Safety of Electric Vehicles

Lead author: Elena Funk

Co-authors: Ola Willstrand, Per Ola Malmquist, Konrad Wilkens, Guillermo Rein

- The fire hazard of EVs is not higher than ICEVs, but it is different due to the battery-related hazards. Heat release rates in EV and ICEV fires are similar.
- Toxic gases emitted from EV and ICEV fires pose considerable health and environmental risks. Emergency response to EV fires is challenging; more research and training are needed to assist firefighting.

Summary

Global adoption of electric vehicles (EVs) brings new fire safety challenges. EV fires, while rare, pose different risks compared to traditional internal combustion engine vehicle (ICEV) fires. These challenges affect all safety procedures within our built environment and transport infrastructure. Key issues to consider are fire hazards stemming from EV batteries, the toxicity of EV fires, emergency response challenges, impacts on building design, and transportation regulations. EV batteries can go into thermal runaway under various conditions, causing ignition and toxic gas emissions. Firefighters face unique challenges in managing EV fires, and collaboration with original equipment manufacturers (OEMs) is crucial. The transportation of EVs, especially aged or second-life batteries, raises regulatory and logistical concerns. Future developments in battery chemistry can improve EV fire safety, yet transparency from battery producers and rigorous testing of these new chemistries are needed. Comprehensive fire safety strategies encompassing regulation, data sharing, research, and public awareness are essential for a successful transition to sustainable transportation.

Electric vehicle fire statistics

The risk in fire safety is defined as the product of the event frequency and expected consequences of an event [137]. However, given their complexity, estimating this frequency for EVs poses significant challenges. Current statistics indicate a lower frequency of EV fires compared to conventional vehicles. For instance, in Sweden in 2021, there were 23 EV fires, a small number compared to approximately 4000 car fires [138]. In the same year, the Netherlands reported that EVs were involved in 133 accidents, 47 of which resulted in fires, with the battery pack involved in half of these incidents [139]. A global scale, a survey from EV FireSafe [140] since 2010 identified 393 EV fires.

Attempts have been made to collate EV fire statistics in various countries [139], [140], [141], but there remains a lack of comprehensive fire statistics needed to assess risk at the international level [142]. This issue is exacerbated by the novelty of EV technology and the reluctance of insurance companies to share relevant data. Addressing this gap requires a cooperative approach involving automakers, insurers, and fire safety regulators. Legislation may also be needed to mandate the sharing of such information for safety research. Developing an international EV fire incident registry and standardised reporting procedures could significantly improve our understanding of EV fire risks. Notably, current fire safety reporting initiatives focus largely on building fires [143], [144] and do not distinguish between vehicle types [139], underscoring the need for policymakers to expand these initiatives to include all kinds of fires, including those involving EVs.

Electric vehicle fire hazards

While EV battery fire incidents are relatively rare [139], [140], [141], they present unique challenges linked to specific battery characteristics: thermal runaway, jet flames, ejected battery parts, explosion risk in confined spaces and post-extinction risk due to stranded energy. These complexities necessitate

tailored response strategies and public awareness, essential to safely adopting sustainable transportation.

EVs and ICEVs contain a significant amount of plastic and other combustible materials [145], resulting in similar heat release rates (HRRs). HRR is defined as the amount of energy released per unit time [kW] during combustion and is a critical metric used by fire safety professionals in the performance-based design of buildings. The differences in HRR progression can be attributed to variations in ignition methods, test set-ups, and the distinct characteristics of their respective drivetrains – the battery in EVs versus the fuel tank in ICEVs. For instance, some comparative studies indicate that the peak HRR for EVs occurs later than for ICEVs, suggesting a longer ignition time for EVs [146]. This points to the critical insight that the fire hazard of EVs isn't higher than that of ICEVs, but it is different in its characteristics.

Due to large-scale EV fire tests' high cost and proprietary nature, our current understanding is primarily based on small-scale tests, leaving some safety issues unresolved. Addressing these requires comprehensive large-scale testing, collaborations between OEMs and academic institutions, publicly funded research, standardised testing protocols, and cross-disciplinary research. Such measures will help translate small-scale data to system-level behaviour, contributing to safer EV technology as their usage expands.

Toxicity of EV fires

All fires, including those in EVs and ICEVs, emit toxic gases that can act as asphyxiants or irritants, posing serious risks to evacuees and first responders. Depending on the levels of exposure, these gases can incapacitate individuals, disrupt evacuation efforts, and potentially lead to long-term health consequences. Toxic gases emitted from EV and ICEV fires pose considerable health and environmental risks. Handling tactics, like letting EV fires burn out, haven't been thoroughly evaluated for their environmental and health implications. Thus, exploring and comparing different fire management tactics, such as direct battery flooding or chassis cooling, is essential [147],[148], [149], [150], [151].

Studies reveal that EV fires produce higher concentrations of toxic substances like hydrogen fluoride (HF) and metals, including nickel, cobalt, lithium, and manganese. While HF can cause irritation and inflammatory reactions, the potential environmental impact of the metals requires further investigation. Water used to suppress EV fires can also become a contamination source, containing high levels of lithium and fluoride compared to water from ICEV fires [148], [150].

Addressing these toxicity issues necessitates establishing regulatory limits for toxic substances in waters, stringent clean-up guidelines for extinguishment water, and further research into the environmental impacts of EV fires. Moreover, promoting best firefighting practices and exploring suppression alternatives would help optimise fire response efficiency and ecological preservation. Such measures should also be relevant for ICEVs and other fire types.

Emergency response challenges

Firefighters face multiple challenges when addressing EV fires in enclosed spaces, such as managing stranded energy, potential explosion hazards, toxic gas exposure, prolonged extinguishing operations, extensive water use, the risk of battery re-ignition, and the handling of the post-fire EV and contaminated water [152]. Due to their cooling effects, water and water-based agents remain the most effective for fighting EV battery fires. While much research concentrates on various suppression methods at smaller scales, these methods may not perform as well at the system level, as batteries installed in systems are well-protected [153].

Despite warnings from OEMs, firefighters are exploring direct methods such as cutting extinguishers and piercing devices, which have shown effectiveness in cooling fires and reducing water usage [154],

[155]. Several post-fire handling techniques have been used, including isolating EVs in containers [156] or letting a fully developed fire burn out to circumvent the stranded energy problem. Collaboration between OEMs and firefighting organisations foster shared learning and creates safety guidelines around EV fire risks. More research is needed to determine which tactic is best from several perspectives: time of operation, risk for fire spread, environmental impact, and handling of stranded energy.

Regulations and knowledge surrounding the fire safety of second-life batteries are lagging. The sale of second-life EV batteries is unregulated, meaning they can be brought into building environments, installed, and reused by the public. Responding to such a fire and the associated potential explosion risk is a current concern for first responders and needs serious attention.

Transportation

Transporting EVs and their batteries, especially in larger quantities or as aged/second-life batteries, poses unique challenges exacerbated by inconsistent regulations across countries. Particularly, regulations for transporting aged and second-life batteries are often insufficient or lacking, leading to market discrepancies and safety concerns [157].

Fire safety considerations for EV transportation by sea aren't fully comprehended or systematically tackled. More research is needed into crew response strategies, fire detection, and suppression methods tailored explicitly for EV transport. Investing more in training on fire safety aspects of EV transportation is crucial, as it would help develop effective crew tactics, enhance detection measures, and optimise fire suppression methods, ultimately increasing safety during EV transportation and reducing potential marine pollution risks.

Future of battery chemistries and implications for fire safety

The safety of Li-ion batteries is intrinsically related to their internal components. Both cathode and anode are continuously being optimised for higher capacity and energy density while mitigating dendrite formation and instability of the solid electrolyte interface. Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) is known for its superior thermal stability, yet studies indicate higher HF concentrations in fires [158], [159].

Flammable solvents in current batteries' electrolytes can decompose at low temperatures [160]. Therefore, ongoing research is continuing into stable lithium salts, non-flammable solvents, flame retardants, and overcharge prevention. Non-flammable solvents and new salts have promising safety performance, with potential for aqueous, polymer, and solid-state electrolytes.

However, battery producers often lack transparency about battery chemistry, influencing fire safety and smoke toxicity. Furthermore, critical examination of fire safety in novel solvents and solid-state batteries is lacking [160]. These batteries may not always perform better under short-circuit scenarios, raising safety concerns and emphasising the need for rigorous fire safety testing of new battery chemistries.

References

- [1] Schmich R, Wagner R, Hörpel G, Placke T, Winter M. Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries. *Nat Energy* 2018;3:267–78. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0107-2>.
- [2] Selinis P, Farmakis F. Review—A Review on the Anode and Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries with Improved Subzero Temperature Performance. *J Electrochem Soc* 2022;169:010526. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac49cc>.
- [3] Li W, Erickson EM, Manthiram A. High-nickel layered oxide cathodes for lithium-based automotive batteries. *Nat Energy* 2020;5:26–34. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0513-0>.
- [4] Murdock BE, Toghiani KE, Tapia-Ruiz N. A Perspective on the Sustainability of Cathode Materials used in Lithium-Ion Batteries. *Adv Energy Mater* 2021;11. <https://doi.org/10.1002/aenm.202102028>.
- [5] Lian Y, Ling H, Jiang L, Yi B, Zhang F, Liu J, et al. Development of Cell to Body Technology towards High Levels of Integration, High Strength and High Stiffness, 2023. <https://doi.org/10.4271/2023-01-0523>.
- [6] Gabbar HA, Othman AM, Abdussami MR. Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards. *Technologies* 2021;9. <https://doi.org/10.3390/technologies9020028>.
- [7] Samanta A, Williamson SS. A Survey of Wireless Battery Management System: Topology, Emerging Trends, and Challenges. *Electronics* 2021;10:2193. <https://doi.org/10.3390/electronics10182193>.
- [8] Wang Y, Han XB, Lu LG. Prospects of Research on Traction Batteries for Electric Vehicles: Intelligent Battery, Wise Management, and Smart Energy. *Automot Eng* 2022;44:617–37. <https://doi.org/http://www.qichegongcheng.com/EN/10.19562/j.chinasae.qcgc.2022.04.017>.
- [9] Breiter A, Linder M, Schuldt T, Siccario G, Vekic N. Battery recycling takes the driver's seat. McKinsey Co 2023, March 10, <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-recycling-takes-the-drivers-seat>.
- [10] Ou S, Hsieh I-YL, He X, Lin Z, Yu R, Zhou Y, et al. China's vehicle electrification impacts on sales, fuel use, and battery material demand through 2050: Optimizing consumer and industry decisions. *IScience* 2021;24:103375. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103375>.
- [11] IRENA (2023), *Geopolitics of the energy transition: Critical materials*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2023. ISBN: 978-92-9260-539-1
- [12] EC. Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC (Text with EEA relevance) n.d.
- [13] IEA (2022), *Global Supply Chains of EV Batteries*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-supply-chains-of-ev-batteries>, Licence: CC BY 4.0
- [14] IRENA. Renewable Capacity Statistics De Capacité Estadísticas De Capacidad. 2021.
- [15] Verzijlbergh RA, De Vries LJ, Dijkema GPJ, Herder PM. Institutional challenges caused by the integration of renewable energy sources in the European electricity sector. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;75:660–7. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.039>.
- [16] Theil S. Data Methodology. *Toward Environ Minim* 2021;289–300. <https://doi.org/10.1017/9781108891769.017>.
- [17] Ueckerdt F, Brecha R, Luderer G. Analyzing major challenges of wind and solar variability in power systems. *Renew Energy* 2015;81:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.002>.
- [18] Lund PD, Lindgren J, Mikkola J, Salpakari J. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;45:785–807. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.057>.

- [19] Lund H, Østergaard PA, Connolly D, Ridjan I, Mathiesen BV, Hvelplund F, et al. Energy storage and smart energy systems. *Int J Sustain Energy Plan Manag* 2016;11:3–14. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2016.11.2>.
- [20] Pfeifer A, Herc L, Batas Bjelić I, Duić N. Flexibility index and decreasing the costs in energy systems with high share of renewable energy. *Energy Convers Manag* 2021;240. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114258>.
- [21] Hirth L. The market value of variable renewables. The effect of solar wind power variability on their relative price. *Energy Econ* 2013;38:218–36. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.02.004>.
- [22] Gjorgievski VZ, Markovska N, Abazi A, Duić N. The potential of power-to-heat demand response to improve the flexibility of the energy system: An empirical review. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;138. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110489>.
- [23] Tronchin L, Manfren M, Nastasi B. Energy efficiency, demand side management and energy storage technologies – A critical analysis of possible paths of integration in the built environment. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;95:341–53. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.060>.
- [24] IEA (2022), *Global EV Outlook 2022*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>, Licence: CC BY 4.0
- [25] Bosma T, Synnøve Bukkholm I, Eijgelaar M, van Gerwen R, Hadizadeh M, K H, et al. *Energy Transition Outlook 2023 TRANSPORT IN TRANSITION 2023*.
- [26] Gray N, McDonagh S, O'Shea R, Smyth B, Murphy JD. Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors. *Adv Appl Energy* 2021;1:100008. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100008>.
- [27] Tamor MA, Stechel EB. Electrification of transportation means a lot more than a lot more electric vehicles. *IScience* 2022;25:104376. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104376>.
- [28] Nadolny A, Cheng C, Lu B, Blakers A, Stocks M. Fully electrified land transport in 100% renewable electricity networks dominated by variable generation. *Renew Energy* 2022;182:562–77. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.039>.
- [29] Libertson F. Requesting control and flexibility: Exploring Swedish user perspectives of electric vehicle smart charging. *Energy Res Soc Sci* 2022;92:102774. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102774>.
- [30] Purnell K, Bruce AG, MacGill I. Impacts of electrifying public transit on the electricity grid, from regional to state level analysis. *Appl Energy* 2022;307:118272. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118272>.
- [31] Mastoi MS, Zhuang S, Munir HM, Haris M, Hassan M, Usman M, et al. An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends. *Energy Reports* 2022;8:11504–29. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.011>.
- [32] Entso-E. European Network of Transmission System Operators for Electricity Electric Vehicle Integration into Power Grids About ENTSO-E ENTSO-E Position Paper on Electric Vehicle Integration into Power Grids // 3 2021:1–60.
- [33] Bermejo C, Geissmann T, Möller T, Nägle F, Winter R. The impact of electromobility on the German electric grid. McKinsey Co 2021.
- [34] Eurostat. Passenger mobility statistics – Statistics Explained. *Stat Explain* 2021:1–12. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?oldid=541810>, last access: 12-10-2023
- [35] Statistics B of T. National Household Travel Survey Daily Travel Quick Facts 2017., May 31, 2017, <https://www.bts.gov/statistical-products/surveys/national-household-travel-survey-daily-travel-quick-facts>
- [36] Ge Y, MacKenzie D. Charging behavior modeling of battery electric vehicle drivers on long-distance trips. *Transp Res Part D Transp Environ* 2022;113:103490.

- <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103490>.
- [37] Lambert F. Tesla Supercharger V4 revealed to be twice as powerful 2023. <https://electrek.co/2023/03/15/tesla-supercharger-v4-revealed-twice-as-powerful/>, last access: 06-20-2023
 - [38] Teichert O, Link S, Schneider J, Wolff S, Lienkamp M. Techno-economic cell selection for battery-electric long-haul trucks. *ETransportation* 2023;16:100225. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100225>.
 - [39] CharIN. CharIN Whitepaper Megawatt Charging System (MCS) Recommendations and requirements for MCS related standards bodies and solution suppliers 2022:1–18.
 - [40] Meintz A, Rowden B, Bohn T. Charging Infrastructure Technologies : Charging System for Medium- and 2020. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/06/f75/elt204_meintz_2020_o_5.7.20_754P_M_LR.pdf
 - [41] Bartolucci L, Cordiner S, Mulone V, Santarelli M, Ortenzi F, Pasquali M. PV assisted electric vehicle charging station considering the integration of stationary first- or second-life battery storage. *J Clean Prod* 2023;383:135426. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135426>.
 - [42] Starke M, Moorthy RSK, Adib A, Dean B, Chinthavali M, Xiao B, et al. A MW scale charging architecture for supporting extreme fast charging of heavy-duty electric vehicles. 2022 IEEE Transp. Electr. Conf. Expo, IEEE; 2022, p. 485–90. <https://doi.org/10.1109/ITEC53557.2022.9813825>.
 - [43] Mishra P, Miller E, Santhanagopalan S, Bennion K, Meintz A. A Framework to Analyze the Requirements of a Multiport Megawatt-Level Charging Station for Heavy-Duty Electric Vehicles. *Energies* 2022;15:3788. <https://doi.org/10.3390/en15103788>.
 - [44] Kondor D, Zhang H, Tachet R, Santi P, Ratti C. Estimating savings in parking demand using shared vehicles for home-work commuting. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2019;20:2903–12. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2869085>.
 - [45] US Department of Transport, FHWA Highway Statistics VM-1 Data Procedure 2019. <https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics/2019/vm1.cfm>
 - [46] Tucki K, Orynych O, Swic A, Mitoraj-Wojtanek M. The development of electromobility in Poland and EU states as a tool for management of CO₂ emissions. *Energies* 2019;12:1–22. <https://doi.org/10.3390/en12152942>.
 - [47] China GP. Chinese bureau of statistics n.d. <https://www.stats.gov.cn/english/>, last access: 10-12-2023
 - [48] Liu H, Man H, Cui H, Wang Y, Deng F, Wang Y, et al. An updated emission inventory of vehicular VOCs and IVOCs in China. *Atmos Chem Phys* 2017;17:12709–24. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12709-2017>.
 - [49] Visaria AA, Jensen AF, Thorhauge M, Mabit SE. User preferences for EV charging, pricing schemes, and charging infrastructure. *Transp Res Part A Policy Pract* 2022;165:120–43. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.08.013>.
 - [50] Antweiler W, Muesgens F. On the long-term merit order effect of renewable energies. *Energy Econ* 2021;99:105275. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105275>.
 - [51] Aljafari B, Jeyaraj PR, Kathiresan AC, Thanikanti SB. Electric vehicle optimum charging-discharging scheduling with dynamic pricing employing multi agent deep neural network. *Comput Electr Eng* 2023;105:108555. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108555>.
 - [52] Mangipinto A, Lombardi F, Sanvito FD, Pavičević M, Quoilin S, Colombo E. Impact of mass-scale deployment of electric vehicles and benefits of smart charging across all European countries. *Appl Energy* 2022;312:118676. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118676>.
 - [53] Sharifi P, Banerjee A, Feizollahi MJ. Leveraging owners' flexibility in smart charge/discharge scheduling of electric vehicles to support renewable energy integration. *Comput Ind Eng*

- 2020;149:106762. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106762>.
- [54] Afridi K. The future of electric vehicle charging infrastructure. *Nat Electron* 2022;5:62–4. <https://doi.org/10.1038/s41928-022-00726-w>.
- [55] Püttgen HB (Teddy), Bamberger Y. Electricity: Humanity's Low-carbon Future. *WORLD SCIENTIFIC*; 2021. <https://doi.org/10.1142/11939>.
- [56] Pfeifer A, Dobravec V, Pavlinek L, Krajačić G, Duić N. Integration of renewable energy and demand response technologies in interconnected energy systems. *Energy* 2018;161:447–55. <https://doi.org/10.1016/j.ENERGY.2018.07.134>.
- [57] Manzolli JA, Trovão JPF, Henggeler Antunes C. Electric bus coordinated charging strategy considering V2G and battery degradation. *Energy* 2022;254. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124252>.
- [58] Owens J, Miller I, Gençer E. Can vehicle-to-grid facilitate the transition to low carbon energy systems? *Energy Adv* 2022;1:984–98. <https://doi.org/10.1039/d2ya00204c>.
- [59] Colarullo L, Thakur J. Second-life EV batteries for stationary storage applications in Local Energy Communities. *Renew Sustain Energy Rev* 2022;169:112913. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112913>.
- [60] Sánchez-Díez E, Ventosa E, Guarnieri M, Trovò A, Flox C, Marcilla R, et al. Redox flow batteries: Status and perspective towards sustainable stationary energy storage. *J Power Sources* 2021;481. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228804>.
- [61] Zhang H. Industry pattern , market demand and development prospect of all-vanadium flow battery energy storage technology Requirements for large-scale energy storage technology in power systems. *Vanitec Conf.*, 2023.
- [62] IPCC. Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change - Full Report. 2022., ISBN 978-92-9169-1609, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf
- [63] STATISTA. Global automotive industry revenue between 2017 and 2030, 2020. <https://www.statista.com/topics/1487/automotive-industry/>
- [64] EV-Volumes. Total World plug-in vehicle volumes 2022. Available online: <https://ev-volumes.com/news/ev/global-ev-sales-for-2022/>
- [65] China (State Council). Notice on printing and issuing the development plan for the energy saving and new energy automobile industry (2012–2020) 2012.
- [66] China State Council. Notice on printing and issuing the development plan for the new energy vehicle industry (2021–2035) 2020. https://english.www.gov.cn/policies/latestreleases/202011/02/content_WS5f9ff225c6d0f7257693ece2.html
- [67] König A, Nicoletti L, Schröder D, Wolff S, Waclaw A, Lienkamp M. An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles. *World Electr Veh J* 2021;12:21. <https://doi.org/10.3390/wevj12010021>.
- [68] IEA (2023), *Comparison of the emissions intensity of different hydrogen production routes, 2021*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparison-of-the-emissions-intensity-of-different-hydrogen-production-routes-2021>, Licence: CC BY 4.0
- [69] Sand M, Skeie RB, Sandstad M, Krishnan S, Myhre G, Bryant H, et al. A multi-model assessment of the Global Warming Potential of hydrogen. *Commun Earth Environ* 2023;4:203. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00857-8>.
- [70] Mathiesen BV, Lund H, Connolly D, Wenzel H, Østergaard P a., Möller B, et al. Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions. *Appl Energy* 2015;145:139–54. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.075>.
- [71] Chiamamonti D, Talluri G, Scarlat N, Prussi M. The challenge of forecasting the role of biofuel in EU transport decarbonisation at 2050: A meta-analysis review of published scenarios. *Renew*

- Sustain Energy Rev 2021;139:110715. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110715>.
- [72] Ridjan I, Mathiesen BV, Connolly D. Terminology used for renewable liquid and gaseous fuels based on the conversion of electricity: a review. *J Clean Prod* 2016;112:3709–20. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.117>.
- [73] Connolly D, Mathiesen BV, Ridjan I. A comparison between renewable transport fuels that can supplement or replace biofuels in a 100% renewable energy system. *Energy* 2014;73:110–25. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.104>.
- [74] Skov IR, Schneider N. Incentive structures for power-to-X and e-fuel pathways for transport in EU and member states. *Energy Policy* 2022;168:113121. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113121>.
- [75] Mikulčić H, Ridjan Skov I, Dominković DF, Wan Alwi SR, Manan ZA, Tan R, et al. Flexible Carbon Capture and Utilization technologies in future energy systems and the utilization pathways of captured CO₂. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;114:109338. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109338>.
- [76] Koj JC, Wulf C, Zapp P. Environmental impacts of power-to-X systems – A review of technological and methodological choices in Life Cycle Assessments. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;112:865–79. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.029>.
- [77] Dolci F, Thomas D, Hilliard S, Guerra CF, Hancke R, Ito H, et al. Incentives and legal barriers for power-to-hydrogen pathways: An international snapshot. *Int J Hydrogen Energy* 2019;44:11394–401. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.045>.
- [78] Burre J, Bongartz D, Brée L, Roh K, Mitsos A. Power-to-X: Between Electricity Storage, e-Production, and Demand Side Management. *Chemie Ing Tech* 2020;92:74–84. <https://doi.org/10.1002/cite.201900102>.
- [79] Decourt B. Weaknesses and drivers for power-to-X diffusion in Europe. Insights from technological innovation system analysis. *Int J Hydrogen Energy* 2019;44:17411–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.149>.
- [80] Skov IR, Schneider N, Schweiger G, Schögl J-P, Posch A. Power-to-X in Denmark: An Analysis of Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats. *Energies* 2021;14:913. <https://doi.org/10.3390/en14040913>.
- [81] Wang L, Zhang Y, Pérez-Fortes M, Aubin P, Lin T-E, Yang Y, et al. Reversible solid-oxide cell stack based power-to-x-to-power systems: Comparison of thermodynamic performance. *Appl Energy* 2020;275:115330. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115330>.
- [82] Schmidt P, Weindorf W, Roth A, Batteiger V, Riegel F. Power-to-Liquids Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel 2020.
- [83] Skouteris G, Rodriguez-Garcia G, Reinecke SF, Hampel U. The use of pure oxygen for aeration in aerobic wastewater treatment: A review of its potential and limitations. *Bioresour Technol* 2020;312:123595. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123595>.
- [84] Hekmatmehr H, Esmaeili A, Pourmahdi M, Atashrouz S, Abedi A, Ali Abuswer M, et al. Carbon capture technologies: A review on technology readiness level. *Fuel* 2024;363:130898. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.130898>.
- [85] Gray N, McDonagh S, O'Shea R, Smyth B, Murphy JD. Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors. *Adv Appl Energy* 2021;1:100008. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100008>.
- [86] Korberg AD, Brynolf S, Grahn M, Skov IR. Techno-economic assessment of advanced fuels and propulsion systems in future fossil-free ships. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;142:110861. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110861>.
- [87] Brynolf S, Hansson J, Anderson JE, Skov IR, Wallington TJ, Grahn M, et al. Review of electrofuel feasibility—prospects for road, ocean, and air transport. *Prog Energy* 2022;4:042007. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac8097>.

- [88] Mærsk Mc-Kinney Møller Center. Maritime Decarbonization Strategy 2022: A Decade of Change 2022. <https://cms.zerocarbonshipping.com/media/uploads/publications/Maritime-Decarbonization-Strategy-2022.pdf>
- [89] Inal OB, Zincir B, Deniz C. Investigation on the decarbonization of shipping: An approach to hydrogen and ammonia. *Int J Hydrogen Energy* 2022;47:19888–900. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.189>.
- [90] Ammonia as a Marine Fuel Safety Handbook 2023. <https://grontskipsfartsprogram.no/wp-content/uploads/2022/03/Ammonia-as-Marine-Fuel-Safety-Handbook-Rev-01.pdf>.
- [91] Alfa Laval, Hanfia, Haldor Topsøe, Vestas, Siemens Gamesa. Ammonfuel - An Industrial View of Ammonia as a Marine Fuel. *Hafnia BW* 2020:1–59.
- [92] Glasgow: UN Climate Change Conference 2021. Declaration on Zero Emission Shipping by 2050. 2021. https://www.mononews.gr/wp-content/uploads/2021/11/211102234343_Shipping-Declaration-1.pdf
- [93] Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping. Managing Emissions from Vessels Vessel Emission Reduction Technologies & Solutions. 2023. https://cms.zerocarbonshipping.com/media/uploads/documents/Ammonia-emissions-reduction-position-paper_v4.pdf
- [94] MAN Energy Solutions. Potential for dual-fuel conversions of marine engines 2023. <https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/potential-for-dual-fuel-conversions-of-marine-engines.pdf>
- [95] Dahal K, Brynolf S, Xisto C, Hansson J, Grahn M, Grönstedt T, et al. Techno-economic review of alternative fuels and propulsion systems for the aviation sector. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;151:111564. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111564>.
- [96] Green Car Congress: Aviation & Aerospace, Bio-hydrocarbons, Catalysts, Fuels M. ExxonMobil developing methanol-to-jet SAF technology 2022. <https://www.greencarcongress.com/2022/06/20220621-xomsaf.html>
- [97] Tian Z, Wang Y, Zhen X, Liu Z. The effect of methanol production and application in internal combustion engines on emissions in the context of carbon neutrality: A review. *Fuel* 2022;320:123902. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123902>.
- [98] Duan Q, Kou H, Li T, Yin X, Zeng K, Wang L. Effects of injection and spark timings on combustion, performance and emissions (regulated and unregulated) characteristics in a direct injection methanol engine. *Fuel Process Technol* 2023;247:107758. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107758>.
- [99] Domínguez VM, Hernández JJ, Ramos Á, Reyes M, Rodríguez-Fernández J. Hydrogen or hydrogen-derived methanol for dual-fuel compression-ignition combustion: An engine perspective. *Fuel* 2023;333:126301. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126301>.
- [100] Autocar Pro News Desk. Monthly EV sales in EU cross 100,000 mark for the first time 2019. <https://www.autocarpro.in/news-international/monthly-ev-sales-in-eu-cross-100-000-mark-for-the-first-time-42846>
- [101] Chinaspv. Geely to deliver 100 units methanol heavy trucks to Gansu 2022. <https://www.chinavehicle.org/news/47391.html>
- [102] Aalborg P of. E-methanol truck proves groundbreaking possibilities 2023. <https://stateofgreen.com/en/news/e-methanol-truck-proves-groundbreaking-possibilities/#:~:text=Aalborg%20is%20home%20to%20Europe%27s%20first%20truck%20powered,the%20Chinese%20owned%20company%20Geely%20Sichuan%20Commercial%20Vehicles>.
- [103] Turnbull K. Decarbonizing Transport for a Sustainable Future: Mitigating Impacts of the Changing Climate. Washington, D.C.: Transportation Research Board; 2018. <https://doi.org/10.17226/25243>.
- [104] Health NA of SE and. Accelerating Decarbonization of the U.S. Energy System. Washington, D.C.:

- National Academies Press; 2021. <https://doi.org/10.17226/25932>.
- [105] Speroni S, Taylor BD, Org E. The Future of Working Away from Work and Daily Travel: A Research Synthesis 2023. <https://doi.org/10.17610/T64W3D>.
- [106] UK Department of Transportation. Passenger Transport by Mode, Annual from 1952, Department for Transport table code: TSGBO101 2022.
- [107] Toll M. Electric bicycles are now outselling electric cars and plug-in hybrids combined in the US 2022. <https://electrek.co/2022/01/26/electric-bicycles-are-now-outselling-electric-cars-and-plug-in-hybrids-combined-in-the-us/>
- [108] . Walking and cycling: latest evidence to support policy-making and practice. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2022. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. ISBN: 978-92-890-5788-2
- [109] Mueller N, Rojas-Rueda D, Salmon M, Martinez D, Ambros A, Brand C, et al. Health impact assessment of cycling network expansions in European cities. *Prev Med (Baltim)* 2018;109:62 – 70. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2017.12.011>.
- [110] IEA (2021), *Global CO₂ emissions from transport by subsector, 2000-2030*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-transport-by-subsector-2000-2030>, Licence: CC BY 4.0
- [111] Gravett N, Mundaca L. Assessing the economic benefits of active transport policy pathways: Opportunities from a local perspective. *Transp Res Interdiscip Perspect* 2021;11:100456. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100456>.
- [112] Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology W. Pan-European Master Plan for Cycling Promotion 2021. https://unece.org/sites/default/files/2023-03/MASTERPLAN_2021-05-20-II_BF%203%20June_0.pdf
- [113] UNECE Economic Commission. Recommendations for Green and Healthy Sustainable Transport – Building Forward Better 2021. https://unece.org/sites/default/files/2021-05/2101940_E_PDF_WEB.pdf; eISBN: 978-92-1-005691-5
- [114] Pearson L, Berkovic D, Reeder S, Gabbe B, Beck B. Adults' self-reported barriers and enablers to riding a bike for transport: a systematic review. *Transp Rev* 2023;43:356–84. <https://doi.org/10.1080/01441647.2022.2113570>.
- [115] Beck B, Thorpe A, Timperio A, Giles-Corti B, William C, de Leeuw E, et al. Active transport research priorities for Australia. *J Transp Heal* 2022;24:101288. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2021.101288>.
- [116] National Academies of Sciences, Engineering and M 2021. Assessment of Technologies for Improving Light-Duty Vehicle Fuel Economy 2025–2035. Washington, D.C.: National Academies Press; 2021. <https://doi.org/10.17226/26092>.
- [117] Chester M V., Horvath A, Madanat S. Comparison of life-cycle energy and emissions footprints of passenger transportation in metropolitan regions. *Atmos Environ* 2010;44:1071–9. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.12.012>.
- [118] European Environment Agency (EEA). Reducing greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles in Europe 2022. <https://www.eea.europa.eu/publications/co2-emissions-of-new-heavy>
- [119] Kaack LH, Vaishnav P, Morgan MG, Azevedo IL, Rai S. Decarbonizing intraregional freight systems with a focus on modal shift. *Environ Res Lett* 2018;13:083001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad56c>.
- [120] International Energy Agency (IEA). Transport. 2022. <https://www.iea.org/energy-system/transport>
- [121] European Environment Agency (EEA). Decarbonising road transport — the role of vehicles, fuels and transport demand. 2021. ISBN 978-92-9480-473-0 ISSN 1977-8449 doi:10.2800/68902
- [122] USAID. USAID Announces New Partnership with African Union Commission to Reach Paris

- Agreement Goals in Africa. 2023, <https://www.usaid.gov/press-release/usaid-announces-new-partnership-african-union-commission-reach-paris-agreement-goals-africa>
- [123] Conzade J, Engel H, Kendall A, Pais G. Power to move: Accelerating the electric transport transition in sub-Saharan Africa 2022. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/power-to-move-accelerating-the-electric-transport-transition-in-sub-saharan-africa>
- [124] Zajicek C. How solar mini-grids can bring cheap, green electricity to rural Africa 2023. <https://odi.org/en/insights/how-solar-mini-grids-can-bring-cheap-green-electricity-to-rural-africa/>
- [125] Raji R. Electric Vehicles: Africa's battery minerals and Global Value Chain (GVC) opportunities 2021. <https://www.ntu.edu.sg/cas/news-events/news/details/electric-vehicles-africa-s-battery-minerals-and-gvc-opportunities>
- [126] Belianska A, Bohme N, Cai K, Diallo Y, Jain S, Melina G, et al. Climate Change and Select Financial Instruments: An Overview of Opportunities and Challenges for Sub-Saharan Africa 2022.
- [127] Briceno-Garmendia, Cecilia, Wenxin Qiao, and Vivien Foster. 2023. The Economics of Electric Vehicles for Passenger Transportation. Sustainable Infrastructure Series. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1948-3. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO
- [128] UN Environment Programme. Used vehicles and the environment: A global overview of used light duty vehicles – Flow, scale and regulation 2020. ISBN: 978-92-807-3804-9, file:///C:/Users/Prezenter/Downloads/UVE.pdf
- [129] IEA (2023), *Global EV Outlook 2023*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0
- [130] ITF (2022), "ITF South and Southwest Asia Transport Outlook", International Transport Forum Policy Papers, No. 104, OECD Publishing, Paris. <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/itf-south-southwest-asia-outlook.pdf>
- [131] Taylor M. Southeast Asia lags in electric vehicles. Can it catch up? The Japan Times 2023. <https://www.japantimes.co.jp/news/2023/02/24/business/southeast-asia-lags-in-electric-vehicles/>
- [132] Kresnawan MR, Yurnaidi Z, Bilqis A, Wijaya TN, Suryadi B. Electric Vehicle Readiness in Southeast Asia: A PEST Policy Review. IOP Conf Ser Earth Environ Sci 2022;997:012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/997/1/012001>.
- [133] Malik MN, Mukhtar MU. Study on Infrastructure and Enabling Environment for Road Electric Transport in SAARC Member States 2020. <https://www.saarcenergy.org/wp-content/uploads/2020/06/Webinar-Report-on-Infra-Enabling-Environment.pdf>
- [134] Soh E. Is Southeast Asia ready for the electric vehicle (EV) evolution? Geotab 2022. <https://www.geotab.com/blog/southeast-asia-ev-evolution/>
- [135] Jain A. EV Industry in India: How India accelerates towards becoming next powerhouse in EV production? Mint 2023. <https://www.livemint.com/news/india/ev-industry-in-india-how-india-accelerates-towards-becoming-next-powerhouse-in-ev-production-11688005217114.html>
- [136] Deloitte SEA. Full speed ahead Supercharging electric mobility in Southeast Asia 2021. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/sg/Documents/strategy/sea-strategy-operations-full-speed-ahead-report.pdf>
- [137] Hurley MJ. SFPE handbook of fire protection engineering (1995). vol. 29. 1997. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(97\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(97)00022-2).
- [138] MSB. Sammanställning av bränder i elfordon och eltransportmedel år 2018–2022 2023.
- [139] Hessels T. Fire statistics on incidents with alternative fuel vehicles in The Netherlands. Seventh Int. Conf. Fires Veh. Stavanger, Norw., 2023.

- [140] EV FireSafe. Passenger EV LIB fire incidents 2023:1–1.
- [141] BRS. Fokusanalyse af brande i el- og hybridbiler 2021.
- [142] Hynynen J, Quant M, Pramanik R, Li YZ, Arvidson M. Electric Vehicle Fire Safety in Enclosed Spaces 2023.
- [143] Manes M, Sauca A, El Houssami M, Andersson P, McIntyre C, Campbell R, et al. Closing Data Gaps and Paving the Way for Pan-European Fire Safety Efforts: Part II—Terminology of Fire Statistical Variables. *Fire Technol* 2023. <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01408-5>.
- [144] Manes M, Sauca A, El Houssami M, Andersson P, McIntyre C, Campbell R, et al. Closing Data Gaps and Paving the Way for Pan-European Fire Safety Efforts: Part I—Overview of Current Practices for Fire Statistics. *Fire Technol* 2023. <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01408-5>.
- [145] Meraner C. Car Park Fires: A Review of Fire Incidents, Progress in Research and Future Challenges. Seventh Int. Conf. Fires Veh. Stavanger, Norway, April 24–25, 2023, 2023.
- [146] Wgrzynski W. Battery fires with Roeland Bisschop 2021.
- [147] Willstrand O, Bisschop R, Blomqvist P, Temple A, Anderson J, Willstrand O, et al. Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles. Borås: 2020.
- [148] Quant M, Willstrand O, Mallin T, Hynynen J. Ecotoxicity Evaluation of Fire–Extinguishing Water from Large-Scale Battery and Battery Electric Vehicle Fire Tests. *Environ Sci Technol* 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08581>.
- [149] Larsson F, Andersson P, Blomqvist P, Mellander BE. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Sci Rep* 2017;7:1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09784-z>.
- [150] Peng Y, Yang L, Ju X, Liao B, Ye K, Li L, et al. A comprehensive investigation on the thermal and toxic hazards of large format lithium-ion batteries with LiFePO_4 cathode. *J Hazard Mater* 2020;381:120916. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120916>.
- [151] Hynynen J, Quant M, Willstrand O, Mallin T. Analysis of combustion gases and fire water run-offs from passenger vehicle fires. Seventh Int. Conf. Fires Veh. Stavanger, Norway, April 24–25, 2023.
- [152] Beredskab Styrelsen. Temahæfte: Indsats ved brand i El- og hybridbiler. 2021.
- [153] Cai L. Suppression of li-ion batteries. Lund University, 2023.
- [154] Sturk D, Malmquist PO, Håkansson L. Study on Water Injection Methodology Applied to Lithium-Ion Battery Fires. Seventh Int. Conf. Fires Veh. Stavanger, Norway, April 24–25, 2023.
- [155] Wijesekere T, Funk E, Wilkens K, Husted B. Large-scale tests of firefighting technologies for electric vehicle fires on board ro-ro ferries, n.d.
- [156] Hessels T. Submerging container and its possible alternatives: a comparative assessment study. Seventh Int. Conf. Fires Veh. Stavanger, Norway, April 24–25, 2023.
- [157] Christensen P. Lithium-ion batteries, vapour cloud explosions and elephants 2022.
- [158] Duh Y-S, Sun Y, Lin X, Zheng J, Wang M, Wang Y, et al. Characterization on thermal runaway of commercial 18650 lithium-ion batteries used in electric vehicles: A review. *J Energy Storage* 2021;41:102888. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102888>.
- [159] Sun P, Bisschop R, Niu H, Huang X. A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. vol. 56. Springer US; 2020. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>.
- [160] Bates AM, Preger Y, Torres-Castro L, Harrison KL, Harris SJ, Hewson J. Are solid-state batteries safer than lithium-ion batteries? *Joule* 2022;6:742–55. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.007>.

E-mobility working group

Co-chairs

1. Neven DUIĆ, HATZ, Croatia
2. Chris HENDRICKSON, NAE, United States

Lead authors

1. LIAN Yubo, recommended by CAE, China
2. Neven DUIĆ, recommended by HATZ, Croatia
3. Patrick PELATA, recommended by NATF, France
4. Robert L. EVANS, recommended by CAE, Canada
5. Iva RIDJAN SKOV, recommended by HATZ, Croatia
6. Vaughan BECK, recommended by ATSE, Australia
7. Chris HENDRICKSON, recommended by NAE, United States
8. Jaime DOMÍNGUEZ, recommended by RAI, Spain
9. Pine PIENAAR, recommended by SAAE, South Africa
10. Elena FUNK, recommended by ATV, Denmark

Working group members

1. José Luis ABURTO
2. Yves BAMBERGER
3. Vaughan BECK
4. Neven DUIĆ
5. Jaime DOMÍNGUEZ
6. Robert L. EVANS
7. Elena FUNK
8. Chris HENDRICKSON
9. LIAN Yubo
10. Young Tae OH
11. Patrick PELATA
12. Axel MEISEN
13. Antun PFEIFER
14. Pine PIENAAR
15. Mustafa Ahmad SHARIEF
16. SHU Yinbiao
17. Iva RIDJAN SKOV
18. Maria SKYLLAS-KAZACOS
19. SONG Gan
20. Joeri VAN MIERLO
21. Willy VAN OVERSCHÉE
22. Oscar VIGNART
23. Ulrich WAGNER
24. ZHU Yu

Autorski indeks

Bačić, M. 51

Beck, V. 191

Binički, M. 9

Blažević, Z. 21

Bolanča, Z. 169

Bolanča Mirković, I. 169

Brkić, V. 93

Čorak, I. 151

Čurlin, M. 137

Dekanić, T. 151

Dominguez, J. 191

Duić, N. 191

Evans, R. L. 191

Flinčec Grgac, S. 151

Funk, E. 191

Gaurina-Međimurec, N. 93

Hendrickson, C. 191

Kovačević, M. S. 51

Kučinić, L. 51

Kukuruzović, A. 21

Lazić, L. 115

Lorincz, J. 21

Mornar, V. 1

Nosil Mešić, M. 9

Pašić, B. 93

Pelata, P. 191

Pienaar, P. 191

Pušić, T. 137

Ridjan Skov, I. 191

Šalić, A. 71

Šantak, V. 137

Tarbuk, A. 151

Veršić, Z. 9

Vičević, R. 71

Višković, A. 161

Yubo, L. 191

Zelić, B. 5, 71

Zornjak, Lj. 93

Zovko Brodarac, Z. 115

