Različiti aspekti primjene pepela biomase

Netinger Grubeša, Ivanka; Barišić, Ivana; Dokšanović, Tihomir; Šandrk Nukić, Ivana; Kralik, Davor; Glavaš, Hrvoje; Ivanović, Milan

Authored book / Autorska knjiga

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Publication year / Godina izdavanja: **2021**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:162391

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Različiti aspekti primjene pepela biomase

Ivanka Netinger Grubeša, Ivana Barišić,
Tihomir Dokšanović, Ivana Šandrk Nukić,
Davor Kralik, Hrvoje Glavaš, Milan Ivanović



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Izdavač:
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Za izdavača:
prof. dr. sc. Damir Varevac, dekan

Urednica
prof. dr. sc. Ivanka Netinger Grubeša

Tehnički urednici:
izv. prof. dr. sc. Ivana Barišić
doc. dr. sc. Tihomir Dokšanović

Recenzenti:
prof. dr. sc. Jan Turan
Poljoprivredni fakultet Univerziteta u Novom Sadu

prof. dr. sc. Ivana Banjad Pečur
Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek

Lektorica:
Narcisa Vekić, prof.

ISBN: 978-953-6962-63-1

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Suglasnost za izdavanje ove sveučilišne znanstvene knjige donio je Senat Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na sjednici održanoj 28. rujna 2021. godine pod brojem: 28/21

RAZLIČITI ASPEKTI PRIMJENE PEPELA BIOMASE

Prof. dr. sc. Ivanka Netinger Grubeša
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
Izv. prof. dr. sc. Ivana Barišić
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
Doc. dr. sc. Tihomir Dokšanović
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
Izv. prof. dr. sc. Ivana Šandrk Nukić
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
Prof. dr. sc. Davor Kralik
Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek
Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
Dr. sc. Milan Ivanović
Panon institut za strateške studije Osijek

Osijek, svibanj 2021. godine

© Sva prava zadržava autor. Ni jedan dio ove knjige ne smije se reproducirati ili distribuirati u bilo kojem obliku ili na bilo koji način, uključujući fotokopiranje, skeniranje, fotografiju, magnetni ili bilo koji drugi oblik zapisa itd., bez prethodne pismene dozvole autora.
U pripremi i obradi ove knjige učinjeni su svi napori da se ne pojave pogreške. Izdavač i autor ne preuzimaju odgovornost za eventualnu pojavu pogrešaka i omaški u izloženoj materiji, kao ni za njihove posljedice.

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Predgovor

Knjiga prikazuje politiku i regulativu Europske unije vezano za obnovljive izvore energije, nastojeći pozicionirati Republiku Hrvatsku u odnosu na druge članice EU-a u pogledu postizanja zadanih ciljeva o uporabi obnovljivih izvora energije. Obnovljivost i održivost nisu istoznačnice, ali se radi o težnjama koje se međusobno nadopunjuju te sinergijski djeluju u cilju postizanja ravnoteže na dugoročnoj osnovi. U tom smislu treba sagledati, analizirati i razmotriti sve moguće načine ostvarenja takvih ciljeva. Upravo s takvom se namjerom ostvarivanja pozitivnih pomaka biomasa analizira kao energent, s naglaskom na lokalno dostupnoj biomasi - žetvenim ostatcima i drvnoj biomasi. S obzirom na to da kao rezultat sagorijevanja biomase u energetskim procesima nastaje pepeo, prikazan je pregled literature na temu primjene pepela biomase u građevnim proizvodima, što je korak ka poboljšanju trenutačnoga stanja kroz iznošenje značajnih informacija u znanstvenom, zakonodavnom, ekonomskom i praktičnom smislu. Dodana se vrijednost knjige očituje u prikazu rezultata vlastitih istraživanja na temu primjene pepela biomase u građevnim proizvodima nastalih u sklopu provedbe projekta Poljoprivredni otpad - izazovi i poslovne mogućnosti - Eco build. Radi se o složenoj tematici koja uključuje više znanstvenih područja, polja i grana, a s takvim se interdisciplinarnim pristupom knjiga hvata u koštac pitanjima na koja je potrebno i neophodno tražiti odgovore kako bi se osigurao boljitak.

Kako je već spomenuto, tematika ove knjige zbog složenosti iziskuje angažiranost široke lepeze zainteresiranih struka pa su tako autori ove knjige nastavnici Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera različitih istraživačkih profila, s prinosom u svom području rada i djelovanja. Iako je knjiga primarno znanstvena, autori se nadaju da će pobuditi zanimanje i kod svih onih koji posjeduju biomasu, onih koji ju mogu koristiti kao energent, kao i kod dionika građevne industrije koja bi mogla koristiti pepeo biomase. Umrežavanjem bi sve uključene strane mogle ostvariti korist te bi se, općenito, poboljšala konkurentnost regionalnih ekonomskih subjekata i pospješio daljnji razvoj poslovnoga okruženja na ovom području.

Autori

SADRŽAJ

1. POLITIKA I REGULATIVA EUROPSKE UNIJE U ZAŠTITITI OKOLIŠA – OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE

Autori: Hrvoje Glavaš, Milan Ivanović

1.1. Klimatske promjene i obnovljivi izvori energije..... 1
1.2. EU politika i regulativa za obnovljive izvore energije..... 5
1.3. EU regulativa i ciljevi do 2030..... 6
1.3.1. Zabrana palminog ulja..... 6
1.3.2. Era proizvodnje i potrošnje vlastite energije iz obnovljivih izvora..... 7
1.3.3. Čisti i digitalni sektor grijanja/hlađenja..... 7
1.4. Postignuća EU energetske politike..... 8
1.5. Biomasa u energetskoj funkciji..... 11
1.5.1. Pepeo – ostatak sagorijevanja biomase..... 13
Reference..... 13

2. POLITIKA I REGULATIVA EUROPSKE UNIJE U ZAŠTITI OKOLIŠA ZA RECIKLIRANJE OTPADA

Autori: Milan Ivanović, Hrvoje Glavaš

2.1. Klimatske promjene i otpad..... 15
2.2. EU okviri zaštite okoliša..... 17
2.3. Politika i legislativa Europske unije u gospodarenju otpadom..... 18
2.4. Legislativa i gospodarenje otpadom u Hrvatskoj..... 20
Reference..... 24

3. PODJELA BIOMASE I NJEZIN ENERGETSKI POTENCIJAL

Autor: Davor Kralik

3.1 Pojam biomase i podjela biomase..... 26
3.2. Sirovine za proizvodnju biogoriva..... 28
3.2.1. Žetveni ostaci..... 28
3.3. Potencijal biomase kao obnovljivog izvora energije..... 39
Reference..... 40

4. PRIMJENA PEPELA BIOMASE U CEMENTNIM KOMPOZITIMA

Autor: Tihomir Dokšanović

4.1. Primjena alternativnih materijala u proizvodnji cementa..... 42
4.2. Primjena pepela biomase u proizvodnji cementa..... 44
4.3. Primjena pepela drvne biomase mase u cementnim kompozitima..... 44
4.4. Primjena pepela poljoprivredne biomase mase u cementnim kompozitima..... 47
4.5. Učinci korištenja alternativa cementu..... 49
4.6. Završne napomene..... 53
Reference..... 54

5. PRIMJENA PEPELA BIOMASE U CESTOGRADNJI

Autor: Ivana Barišić

5.1. Potencijal primjene alternativnih materijala u cestogradnji..... 59
5.2. Biomasa i pepeo biomase u asfaltnim kolnicima..... 60
5.3. Pepeo biomase za izvedbu nosivih slojeva kolničkih konstrukcija..... 62
5.4. Stabilizacija tla za izradu nasipa i posteljice ceste..... 63
5.5. Ekološki aspekt primjene pepela biomase u cestogradnji..... 66
Reference..... 68

6. ENERGETSKI POTENCIJAL POLJOPRIVREDNE BIOMASE I MOGUĆNOST UPORABE PEPELA POLJOPRIVREDNE BIOMASE U GRAĐEVNIM PROIZVODIMA – REZULTATI PROJEKTA ECO BUILD

Autor: Ivanka Netinger Grubeša

6.1. O projektu Eco build..... 71
6.2. Raspoložive količine biomase u Hrvatskoj..... 72
6.3. Potencijal poljoprivredne biomase kao energenta..... 73
6.4. Karakterizacija pepela poljoprivredne biomase kao građevnog materijala..... 77
6.5. Građevni proizvodi sa pepelima poljoprivredne biomase..... 81
6.5.1. Mortovi sa pepelima poljoprivredne biomase..... 81
6.5.1.1. Produžni mortovi sa pepelima poljoprivredne biomase..... 81
6.5.1.2. Cementni mortovi sa pepelima poljoprivredne biomase..... 86
6.5.2. Beton sa pepelom poljoprivredne biomase..... 88
6.5.2.1. Beton sa pepelom poljoprivredne biomase kao djelomičnom zamjenom cementa..... 88
6.5.2.2.Beton sa pepelom poljoprivredne biomase kao zamjenom za punilo 93
6.5.3. Tlo stabilizirano pepelima poljoprivredne biomase..... 95
6.6. Smjernice za buduća istraživanja..... 100
Reference..... 101

7. CIRKULARNA EKONOMIJA S ASPEKTA DRVNE I POLJOPRIVREDNE BIOMASE

Autor: Ivana Šandrk Nukić

7.1. Razvoj ideje o kružnom gospodarstvu..... 104
7.2. Biomasa u kontekstu kružnog gospodarstva..... 106
7.2.1. Biomasa kao izvor energije..... 107
7.2.2. Inovativne primjene biomase u građevinskoj industriji..... 109
7.3. Eko inovacijski profil Hrvatske..... 110
7.3.1. Pojam eko inovacija..... 110
7.3.2. Produktivnost resursa kao mjera uspješnosti..... 111
7.3.3. Kompozitni indeks eko inovacija..... 112
7.4. Potencijali i ograničenja cirkularne ekonomije u Hrvatskoj..... 113
7.5. Završne napomene..... 117
Reference..... 118

Bilješka o autorima..... 121

1. POLITIKA I REGULATIVA EUROPSKE UNIJE U ZAŠTITITI OKOLIŠA - OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE

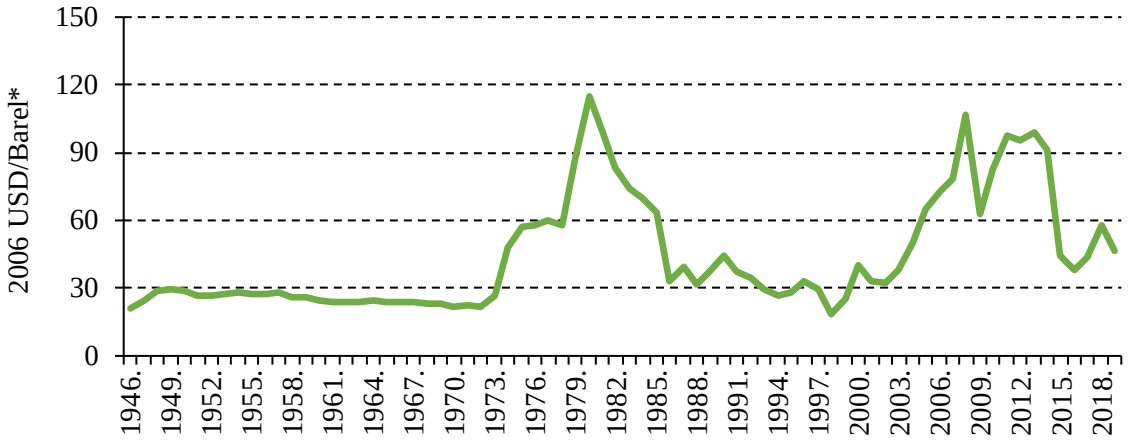
Sažetak: Tehnološkim (civilizacijskim) razvojem te urbanizacijom raste potrošnja energije u svijetu, posebice u drugoj polovini XX. stoljeća. Zbog ograničenih raspoloživih prirodnih energetskih resursa, rastu i cijene energenata. Prema tehnološkim i transportnim karakteristikama te zastupljenosti u ukupnoj potrošnji, cijena nafte ima najveći utjecaj na svjetskom energetskom tržištu; prema cijeni se nafte određuju cijene drugih energenata. Rast cijena konvencionalnih oblika energije (prvi naftni šok sredinom 70-ih godina XX. stoljeća) pokrenuo je i proces istraživanja novih tehnologija u korištenju nuklearne energije te nekonvencionalnih obnovljivih izvora (solarna i energija vjetra), što je smanjilo početne velike razlike u cijeni njihovoga komercijalnoga korištenja te omogućilo porast njihove uporabe. Isto tako, započeo je i proces povratku korištenja biomase; ograničeni resursi fosilnih goriva te klimatske promjene (među ostalim i zbog emisije CO_2) vraćaju biomasi iznova značajnu energetsku funkciju - prije svega kao obnovljivi izvor energije i k tomu lokalno dostupan. Poglavlje razmatra politiku i regulativu EU-a za obnovljive izvore energije - posebice za biomasu koja ima najveći potencijal za rast u narednom razdoblju. Posebno se ukazuje na: klimatske promjene i značaj obnovljivih izvora energije, energetsku politiku i regulativu EU-a za obnovljive izvore energije, kao i na postignuća energetske politike EU-a u proteklih 20 godina. Analizira se biomasa u energetskoj funkciji te na kraju ukazuje na problem pepela kao ostatka sagorijevanja biomase u energetskim procesima.

Ključne riječi: biomasa, regulativa EU-a, klimatske promjene, obnovljivi izvori energije, pepeo biomase, zaštita okoliša

1.1. Klimatske promjene i obnovljivi izvori energije

Tehnološkim (civilizacijskim) razvojem te urbanizacijom raste potrošnja energije u svijetu, posebno u drugoj polovini XX. stoljeća. Zbog ograničenih raspoloživih prirodnih energetskih resursa rastu i cijene energenata; zbog svojih tehnoloških i transportnih karakteristika te zastupljenosti u ukupnoj potrošnji - cijena nafte ima najveći utjecaj na svjetskom energetskom tržištu; prema cijeni se nafte određuju cijene drugih energenata (Ivanović, 2009b).

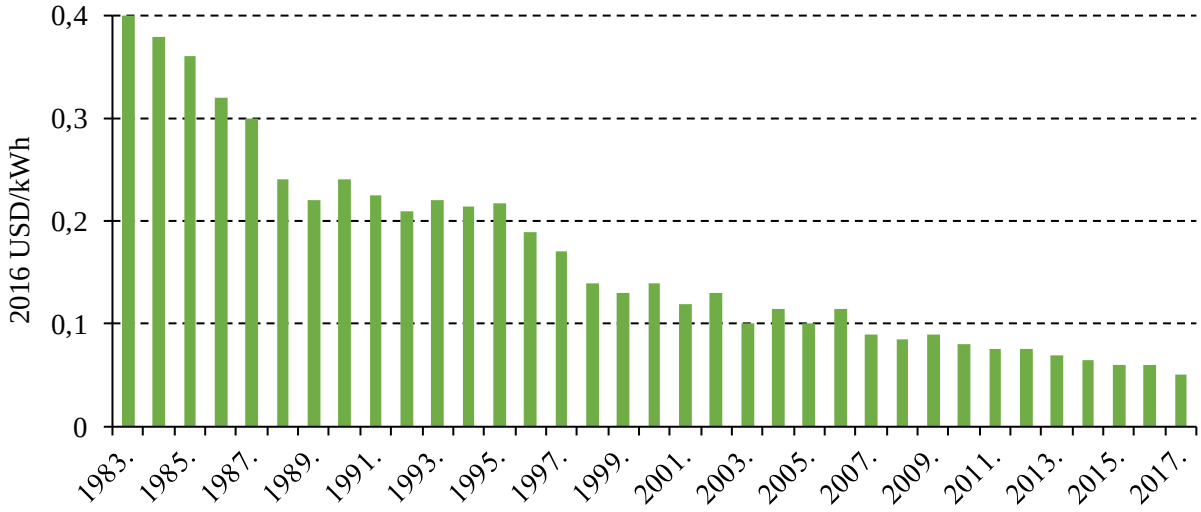
Cijene nafte, prirodnoga plina, kao i svih drugih oblika energije u posljednjih su dvadesetak godina, uz oscilacije, u porastu. Kretanje cijene nafte od 1946. do 2019. prikazano je slikom 1.1.



*cijene po godinama deflatorom preračunane na stalne cijene na bazi 2006.

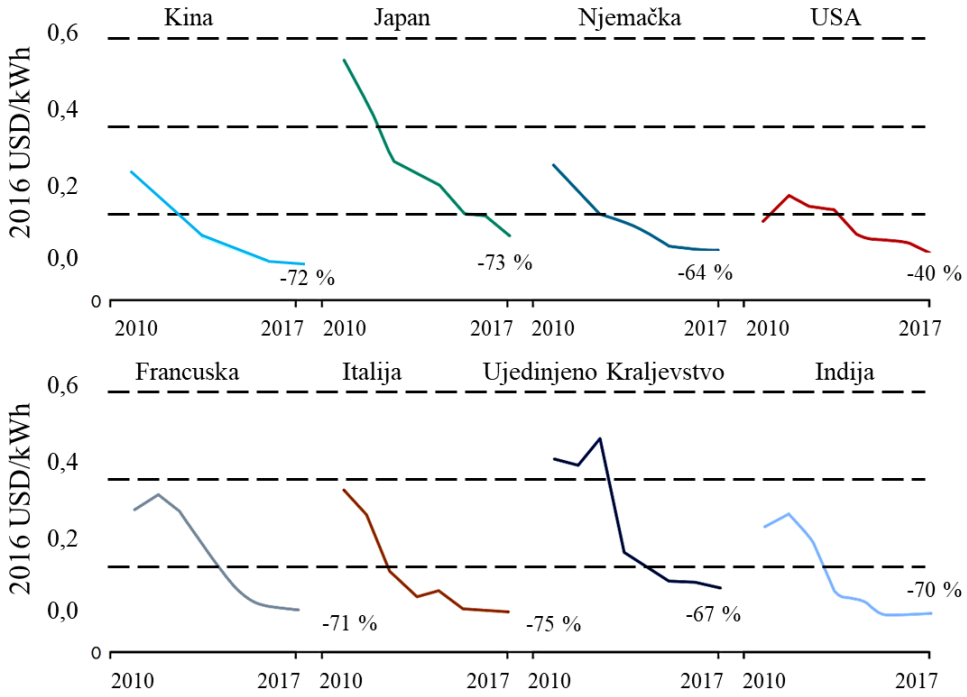
Slika 1.1: Cijena sirove nafte u razdoblju 1946. - 2019. (McMahon, 2020)

Rast cijena konvencionalnih oblika energije (prvi naftni šok sredinom 70-ih godina XX. stoljeća) pokrenuo je i proces istraživanja novih tehnologija u korištenju nuklearne energije te nekonvencionalnih obnovljivih izvora (solarna i energija vjetra), što je smanjilo početne velike razlike u cijeni njihovoga komercijalnoga korištenja (slike 1.2 i 1.3) te omogućilo porast njihove uporabe. Prema analizama Istarske regionalne energetske agencije IRENA, troškovi proizvodnje električne energije iz energije vjetra i solarne fotonaponske energije (PV) sada su u razini usporedivosti s troškovima proizvodnje električne energije iz fosilnih goriva (IRENA, 2018). Tako je već nekoliko godina globalni poravnani trošak električne energije za energiju vjetra u rasponu troškova proizvodnje iz fosilnih goriva, a poravnani trošak električne energije za solarne fotonaponske pogone je pao (od kraja 2009.) na usporedive razine zbog smanjenja troškova fotonaponskih modula i ostale pogonske opreme za 81%. Isto tako, započeo je i proces povratku korištenja biomase (slike 1.4 i 1.5).



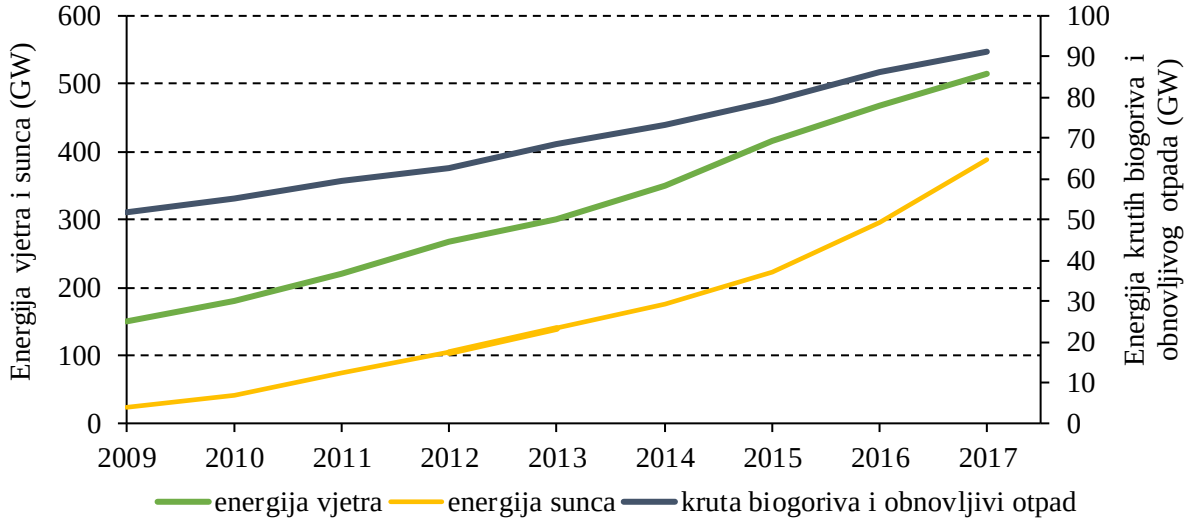
*cijene po godinama deflatorom preračunane na stalne cijene na bazi 2016.

Slika 1.2: Cijene opreme za energiju vjetra u svijetu u razdoblju 1983. - 2017. (IRENA, 2018)

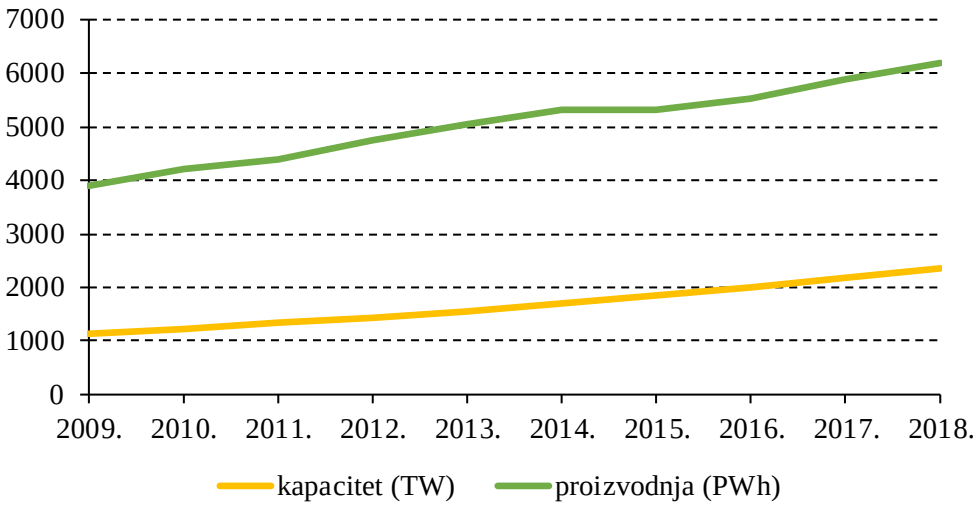


*cijene po godinama deflatorom preračunane na stalne cijene na bazi 2016.

Slika 1.3: Cijene solarne energije u razdoblju 2010. - 2017. (IRENA, 2018)



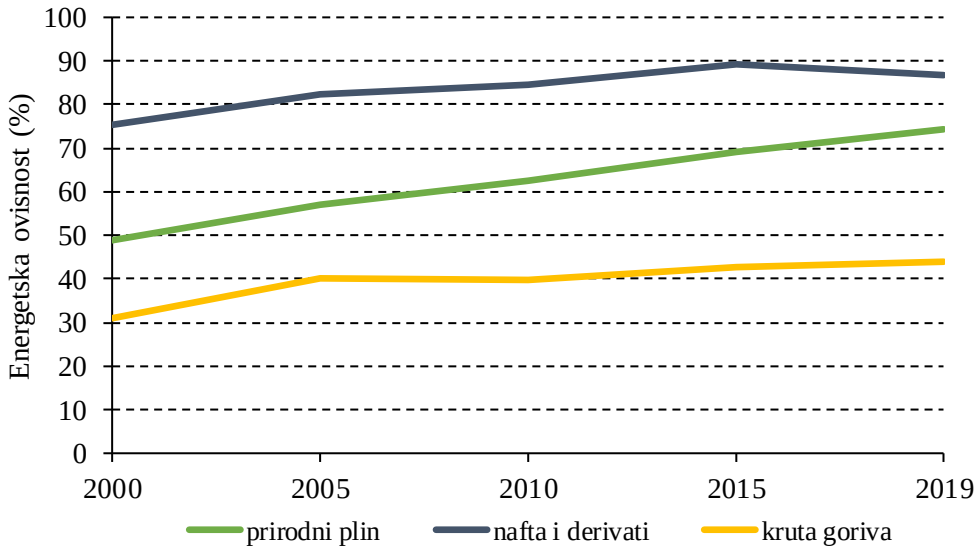
Slika 1.4: Instalirana snaga elektrana na vjetar, sunce i biomasu u svijetu u razdoblju 2009. - 2017. (IRENA, 2018)



Slika 1.5: Instalirana snaga i proizvodnja obnovljive energije u svijetu (IRENA, 2018)

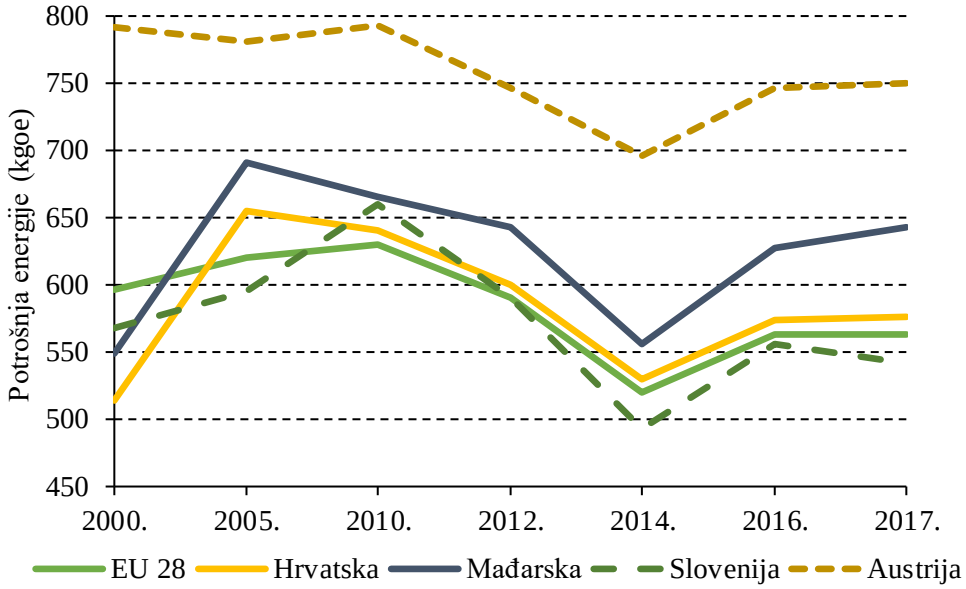
U posljednjih je 30-ak godina prikupljeno više dokaza o klimatskim promjenama koje su prouzročene razvojem civilizacije: rast potrošnje energije i nastajanje/odlaganje otpada ugrožavaju okoliš te utječu na promjenu postojećega klimatskoga režima (Ivanović, 2009a, Ivanović, 2012). Stoga su mnoge zemlje započele promjene u pristupu industrijskom i tehnološkom razvoju te privrednim aktivnostima kako bi smanjile utjecaje čovjeka na klimu na Zemlji, a Europska unija prednjači u tim nastojanjima.

Ovdje treba naglasiti da su zemlje članice EU-a u velikom postotku ovisne o uvozu energenata (slika 1.6), posebice prirodnoga plina, nafte i derivata te krutih goriva, tako da bi povećana uporaba obnovljivih izvora energije (OIE) postupno mogla smanjivati uvoznu ovisnost (European Commission, 2012a, European Environment Agency (EEA), 2011, European Commission, 2012b).



Slika 1.6: Energetska ovisnost Europske unije (Eurostat, 2018)

Potrošnja energije po stanovniku u EU-u opadala je od 2005. do 2014., od kada se opet bilježi porast - slika 1.7 daje prikaz ove potrošnje za EU-28, Republiku Hrvatsku i tri susjedne zemlje: Austriju, Mađarsku i Sloveniju.



Slika 1.7: Konačna potrošnja energije u kućanstvima po glavi stanovnika, izraženo kao ekvivalent kilograma nafte (Eurostat, 2018)

Korištenje OIE-a je važno i zbog ublažavanja klimatskih promjena; zamjenjuju fosilna goriva koja, pak, uzrokuju veliku emisiju stakleničkih plinova. Isto tako, uporabom se OIE-a ostvaruje održivi razvoj, štiti okoliš i smanjuju nepovoljni utjecaji na ljudsko zdravlje. Energija iz obnovljivih izvora pokretač je i uključivoga gospodarskoga rasta; stvara nova radna mjesta i povećava energetsku sigurnost EU-a; ovi se elementi nalaze u čl. 194. Ugovora o funkcioniranju EU, u skladu s kojim se promiču OIE-i (European Commission, 2016).

1.2. Politika i regulativa EU-a za obnovljive izvore energije

Politika EU-a za OIE oslanja se na regulativu koja obuhvaća više stotina dokumenata (komunikacije, direktiva, odluka, uredbi) koje države članice trebaju prenijeti u svoja nacionalna zakonodavstva. Budući da se novim rezultatima znanstvenih istraživanja glede klimatskih promjena te brzim razvojem tehnologije i tržišnim kretanjima vrlo ubrzano mijenja stanje, ukazuje se potreba za čestim dopunama i/ili izmjenama postojećih regulativa u ovom sektoru. Pravna regulativa EU-a za sva područja djelovanja je vrlo sustavna pa tako i za područje OIE-a. Tako, npr. svaka odluka o OIE-u ima odgovarajuću zastupljenost u dokumentima EU-a iz područja financija, zaštite okoliša, industrijske i poljoprivredne politike, znanstvenoistraživačkih politika, tehnoloških, poreznih i drugih gospodarskih politika. Stoga izmjene ili dopune nekih propisa u ovom sektoru rezultiraju stotinama stranica novih pravila i obveza koje se potom moraju transponirati u nacionalna zakonodavstva zemalja članica EU-a.

EU je po objavljivanju tzv. *Bijele knjige o OIE* 1997. (European Commission, 1997) postavila sljedeće ciljeve: do 2010. udio OIE-a u potrošnji energije treba dostići 12%, a da u ukupnoj potrošnji električne energije bude 22,1%; uz okvirne ciljeve EU-a za svaku su državu članicu utvrđene obveze u *Direktivi 2001/77/EZ* (European Commission, 2009).

Zbog nedovoljnoga je napretka u postizanju ciljeva za 2010. donesen novi (sveobuhvatniji) zakonodavni okvir; Europska komisija (EK) je u svojoj komunikaciji (2007.) pod nazivom *Plan za obnovljivu energiju - energija iz obnovljivih izvora u 21. stoljeću: stvaranje održive budućnosti* (European Commission, 2007) predložila obvezan cilj prema kojemu udio obnovljivih izvora energije u potrošnji energije EU-a do 2020. treba iznositi 20%, kao i obvezu od 10% udjela biogoriva u potrošnji goriva u prometu do 2020. te donošenje novoga zakonodavnoga okvira, što je usvojeno i navedeno u sada važećoj *Direktivi o obnovljivoj energiji* (European Commission, 2009). Ovom je Direktivom, također, postavljeno više mehanizama koje države članice mogu koristiti za postizanje svojih ciljeva (programi potpora, jamstva o podrijetlu, zajednički projekti, suradnja između država članica i trećih zemalja), kao i kriteriji održivosti za biogoriva.

1.3. Regulativa i ciljevi EU-a do 2030.

Europsko vijeće (EV) u listopadu je 2014. postavilo novi cilj od najmanje 27% potrošnje energije iz obnovljivih izvora na razini EU-a, koji bi trebala dostići do 2030. Na EV-u (u listopadu 2015.) usuglašen je okvir za klimatske promjene i energetiku do 2030. kojim je iznova potvrđena dugoročna predanost ambicioznoj strategiji EU-a u području OIE-a. U novom se okviru utvrđuje cilj da udio OIE-a u potrošnji EU-a do 2030. dosegne najmanje 27%. Slijedom toga (30. studenoga 2016.) Europska komisija je predstavila paket *Čista energija* koji je među osam zakonodavnih prijedloga uključio i novo razmatranje *Direktive 2009/28/EZ* o obnovljivoj energiji (European Council, 2019). Cilj je paketa bio uskladiti energetsko zakonodavstvo EU-a s klimatskim i energetskim ciljevima za 2030.

No, u prosincu 2018. Europski parlament i Vijeće EU-a usvojili su preinake *Direktive o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora* (kako su je izmijenili *Odbor za industriju, istraživanje i energetiku* i *Odbor za okoliš, javno zdravlje i sigurnost hrane*) te je određen novi obvezujući cilj za EU glede udjela obnovljivih izvora energije od 32% do 2030. U prometnom je sektoru određen cilj o udjelu OIE-a od 14%, od čega bi udio biogoriva nove generacije i bioplina trebao iznositi 3,5% (1% do 2025.). Isto tako, ovim je dokumentom određeno ograničenje od 7% na udio biogoriva prve generacije u cestovnom i željezničkom prometu (European Commission, 2018).

1.3.1. Zabrana palminoga ulja

Biogoriva iz usjeva za proizvodnju hrane, poput palminoga ulja, koje imaju visoku „neizravnu promjenu uporabe zemljišta“ (tj. promjenu načina na koji se koristi poljoprivredno zemljište na kojoj se ne uzgajaju usjevi, kao što su travnjaci i šume, s negativnim utjecajem na emisije CO_2),

trebaju biti ukinuta kroz proces certificiranja, kako se navodi u preinačenoj direktivi o OIE-u (European Commission, 2018).

1.3.2. Era proizvodnje i potrošnje vlastite energije iz obnovljivih izvora

Prema preinakama ove Direktive (European Commission, 2018) države članice moraju osigurati da potrošač u EU-u ima pravo postati proizvođač i potrošač vlastite energije iz obnovljivih izvora te da:

- može generirati obnovljivu energiju za osobnu potrošnju, pohraniti i prodati višak energije;
- može ugraditi i upravljati sustavima za skladištenje električne energije u kombinaciji s postrojenjima koja proizvode obnovljivu električnu energiju za osobnu potrošnju, bez odgovornosti za bilo kakvu dvostruku naplatu;
- ne smije biti podvrgnuto nikakvoj naknadi ili naknadi za vlastitu energiju do 2026., s određenim ograničenim izuzećima koja su predviđena nakon toga;
- primati naknadu za vlastitu proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora koja ulazi u mrežu;
- pridružiti se zajednicama obnovljivih izvora energije kako bi integrirao vlastitu potrošnju u prijelaz na čišću energiju.

1.3.3. Čisti i digitalni sektor grijanja/hlađenja

Preinačena Direktiva postavlja i novi podcilj od 1,3% godišnjega povećanja OIE-a u postrojenjima za grijanje i hlađenje, računajući na razdoblje od pet godina, počevši od 2021. Države članice moraju osigurati da informacije o energetskoj učinkovitosti i udio obnovljivih izvora energije u svojim sustavima daljinskoga grijanja i hlađenja pružaju krajnjim potrošačima na pristupačan način. Kupci sustava za daljinsko grijanje ili hlađenje, koji nisu učinkoviti, smiju raskinuti ugovore kako bi sami proizvodili grijanje ili hlađenje iz obnovljivih izvora energije. Zemlje članice EU-a morat će uključiti nove elemente ove Direktive u svoja nacionalna zakonodavstva do 30. lipnja 2021. (European Commission, 2018).

Usporedo s nastankom energetske i klimatske krize te razvojem tehnologije nastaju i novi pojmovi u energetici te se primjenjuju novi organizacijski oblici u planiranju, investiranju i izgradnji energetskih kapaciteta, kao i različiti elementi u sustavu energetske opskrbe i tržišta energijom, posebice u zadnja dva desetljeća; npr. distribuirana proizvodnja, FED tarife, nezavisna regulacijska tijela, energetske agencije, trgovina emisijama CO_2, ekološki otisak. Pojam *ekološki otisak* nastao je istraživanjima Mathisa Wackernagela (švicarskoga inženjera) prilikom rada na doktoratu (1990.) na temu lokalnoga i regionalnoga planiranja na Sveučilištu British Columbia u Vancouveru, Kanada, pod mentorstvom profesora Williama Reesa. Prof. Rees je kasnije koncept razvijao i nazvao ga *ekološki otisak*. Plod njihove suradnje je knjiga *Naš ekološki otisak - smanjenje utjecaja čovjeka na Zemlju* (objavljena 1995.). U knjizi je ekološki otisak opisan kao alat kojim se mjeri količina „tla i vode potrebnih da podrže materijalni standard određene populacije uz korištenje prevladavajuće tehnologije“. Dakle, važne su četiri kategorije: prirodni resursi, životni stil, populacija i tehnološka učinkovitost.

Ideja koja je u temelju ovakvoga računanja ističe da se ne može ići preko granica nosivoga kapaciteta ekosustava. Nosivim se kapacitetom određuje maksimalna veličina populacije neke vrste koja može živjeti na nekom području. Primjerice, zna se broj jelena koji mogu živjeti u određenoj šumi s obzirom na raspoloživu hranu i resurse. Nosivi kapacitet ekosustava „zahtijeva kapacitet ekosustava koji podržava zdrave organizme održavajući njihovu produktivnost, prilagodljivost i sposobnost obnove. Takav način gledanja ukazuje na važnost ekoloških procesa i činjenice da se nosivi kapacitet za bilo koju vrstu, uključujući i ljudsku, mora odrediti unutar konteksta zdravlja i produktivnosti drugih vrsta“ (Wackernagel and Rees, 1996, Wackernagel and Galli, 2007).

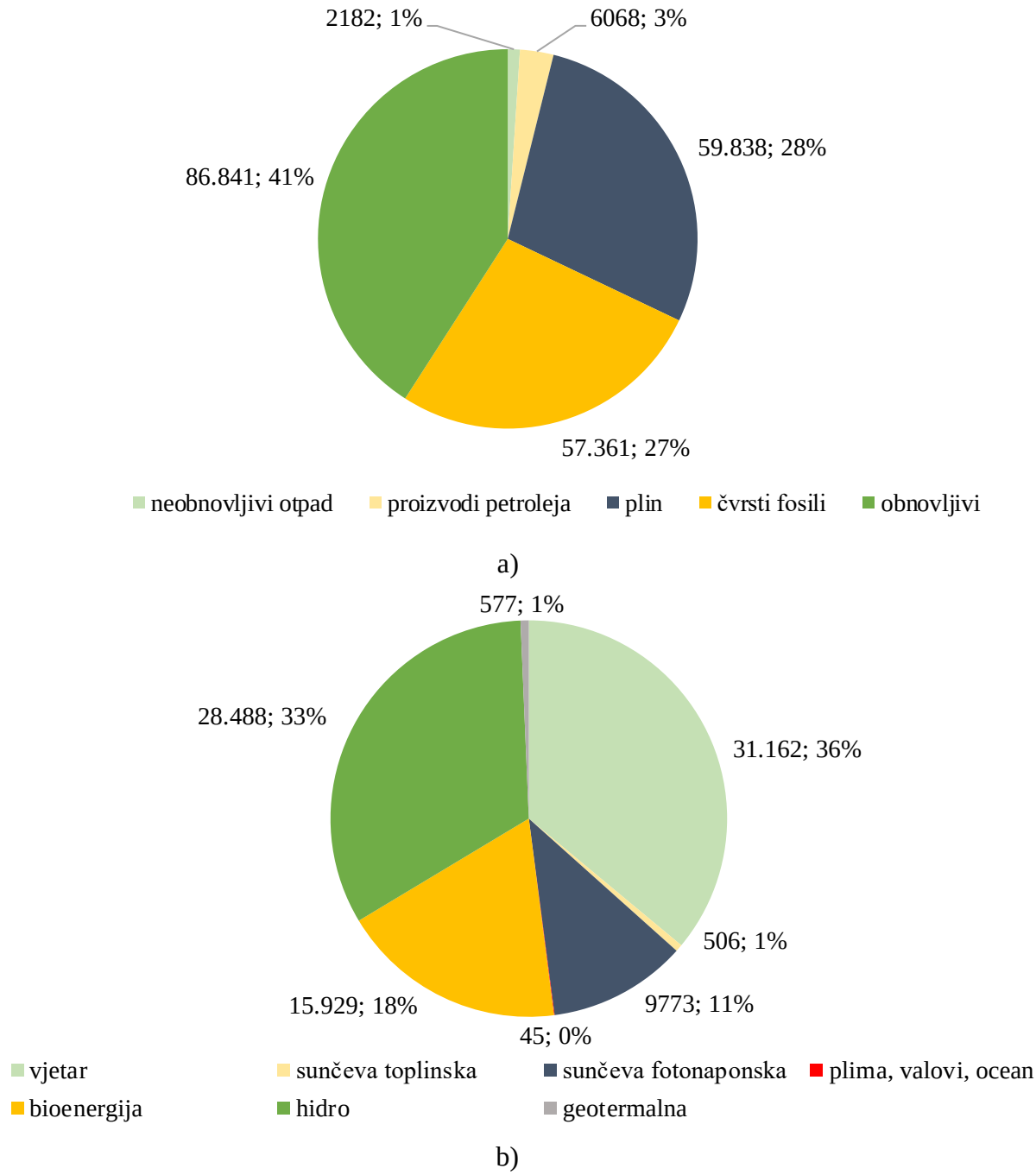
U najuglednijoj organizaciji za ovu temu, *Global Footprint Network*, ističu da živimo iznad održivosti planete, iznad njezinoga kapaciteta da podrži našu silnu potrošnju i pospremi i proguta silne količine otpada koje ostavljamo nakon konzumiranja. Potrebno je 1,4 planeta kao što je naš da to podnese, odnosno planetu treba godinu dana i četiri mjeseca da nadoknadi i apsorbira sve ono što mi potrošimo u godinu dana. Kada je ekološki otisak veći od biokapaciteta, govori se o ekološkom minusu (Global Footprint Network, 2018).

1.4. Postignuća energetske politike EU-a

EU je na putu dostizanja cilja od 20% obnovljive energije do 2020.; prema izvještaju Europske komisije (European Commission, 2020) u 2018. godini udio je OIE-a u ukupnoj energetskoj potrošnji EU-a dosegnuo 18,0% (za EU-27 to je 18,9%). Ulaganja u OIE sve više pokreću tržište, a udio javnih subvencija opada. To je potaknuto značajnim smanjenjem troškova tehnologija OIE-a, smanjenjem subvencija putem konkurentnijih shema potpore, a primjerom brojnih rezultata aukcija s nižim cijenama u nekoliko europskih zemalja.

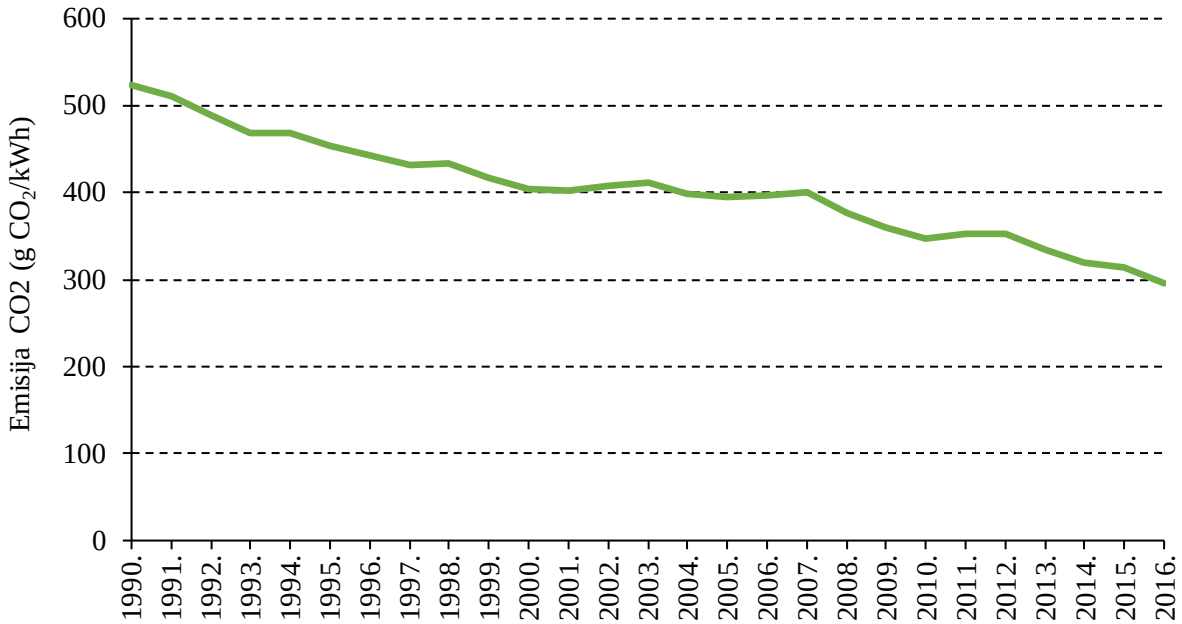
Obnovljiva energija je srž prioriteta EU-a, jer u pogledu energetske sigurnosti OIE-i smanjuju uvoznu ovisnost od fosilnih goriva. Procjenjuje se da je porast korištenja OIE-a omogućio da EU 2017. smanji potražnju za fosilnim gorivima za 12% ukupne potrošnje primarnoga fosilnoga goriva u odnosu na 2005. Za unutrašnje energetsko tržište obnovljivi izvori energije imaju sve veću ulogu, posebice za tržište električne energije, na kojem je u 2017. godini 30,5% bruto proizvodnje električne energije u EU-u ostvarena obnovljivim izvorima energije (slike 1.8a i 1.8b).

OIE imaju značajnu ulogu u dekarbonizaciji; u 2016. godini pridonijeli su sa 460 Mt izbjegnutih bruto emisija CO_2. Od 1990. ugljični otisak kWh električne energije proizvedene u EU-28 smanjen je za 43,5%, što se objašnjava smanjenjem uporabe čvrstih goriva i naftnih derivata te njihovom zamjenom plinom ili obnovljivim izvorima energije (slika 1.9).



Slika 1.8: Bruto proizvodnja električne energije po tipu izvora (a) i tipu obnovljivih izvora (b) u EU-28 u 2017. (ktoe) (Bioenergy Europe, 2019a)

Osim toga, obnovljivi izvori energije ključni su prinos u inovacijama; na području OIE-a 53% izuma tvrtki sa sjedištem u EU stječe patentnu zaštitu izvan Europe te je EU vodeći u ovim inovacijama u svijetu. U tom pogledu, kako je prepoznala agencija IRENA, Europa je postala svjetionik u prikazivanju uspješnih putova k energetskoj budućnosti koja se temelji na obnovljivim izvorima energije i koja je prednjačila u energetskim inovacijama. Vodeća uloga EU-a je i u različitim OIE tehnologijama duž njihovih lanaca opskrbe; vjetroagregati proizvođača EU-a činili su 2016. čak 41% novih instaliranih kapaciteta. U svijetu su proizvođači opreme za PV vodeći su s tržišnim udjelom od 50% (Hoogland, 2017).



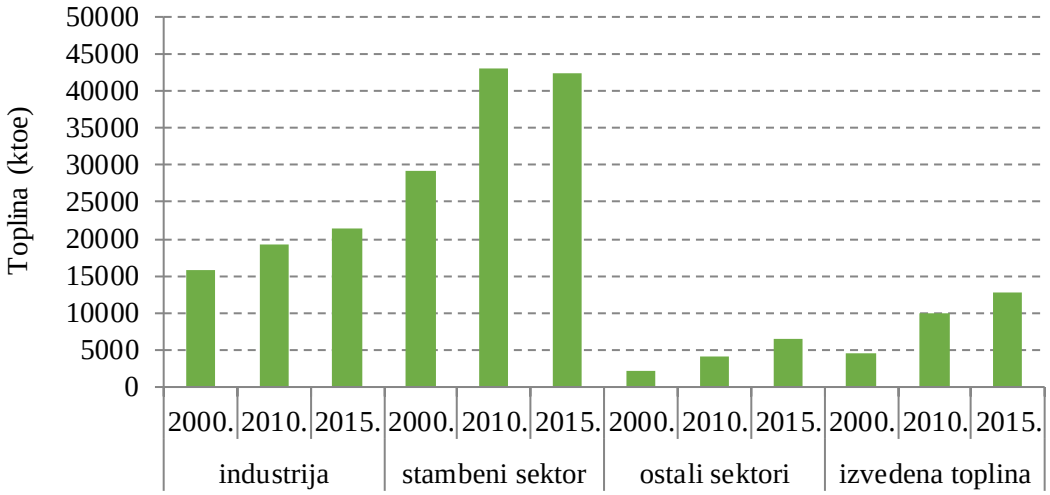
Slika 1.9: Razvoj emisije CO_2 u proizvodnji električne energije u EU-28 (gCO_2/kWh) (Bioenergy Europe, 2019a)

Prednosti obnovljivih izvora energije znatno su šire od uobičajeno isticanih pet političkih dimenzija; obnovljivi izvori su i izvor ekonomskoga rasta i radnih mjesta, posebno za lokalni razvoj - više od 1,4 milijuna ljudi radi u tom sektoru. Najnovije izvješće o cijenama energije u EU-u iz 2017. dokumentira i pozitivne učinke na industrijsku konkurentnost, jer veće količine OIE-a su ključni čimbenik pada veleprodajnih cijena energije u posljednjih nekoliko godina. Kako IRENA ističe, rastuće korištenje OIE-a je pokrenulo globalnu energetsku transformaciju sa značajnim posljedicama za geopolitiku i EU je očito u prvom planu. OIE-i, također, pridonose smanjenju zagađenja zraka i pomažu zemljama u razvoju u dostupnosti pristupačnoj i čistoj energiji.

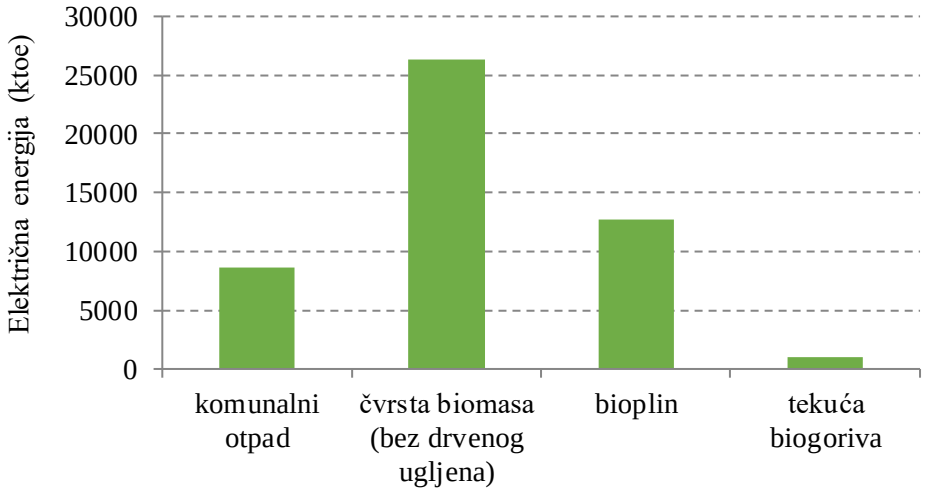
U apsolutnoj su potrošnji OIE-i najviše zastupljeni u sektoru grijanja i hlađenja, proizvodnji električne energije te u sektoru prometa; glavni obnovljivi izvori koji se koriste u potrošnji energije su biomasa za grijanje i hlađenje, hidroenergija i vjetar za električnu energiju i biogoriva za transport. U sektoru električne energije dolazi do jasnoga pomaka paradigme prema obnovljivim izvorima energije. Jedan od ključnih čimbenika bio je pad troškova električne energije iz solarnih (PV) i vjetroelektrana, koji su u razdoblju od 2009. do 2018. pali gotovo 75%, odnosno oko 50% (ovisno o tržištu), zbog smanjenja investicijskih troškova, napretka u poboljšanju učinkovitosti i opskrbnoga lanca te konkurentnoga nadmetanja za programe potpora. Pad troškova je, također, jedan od ključnih pokretača povećanja korporativnoga korištenja obnovljivih izvora energije, posebice u slučaju kada korporativni korisnici energije potpisuju ugovor o izravnoj kupnji električne energije s proizvođačem obnovljivih izvora energije (IRENA, 2018).

1.5. Biomasa u energetskoj funkciji

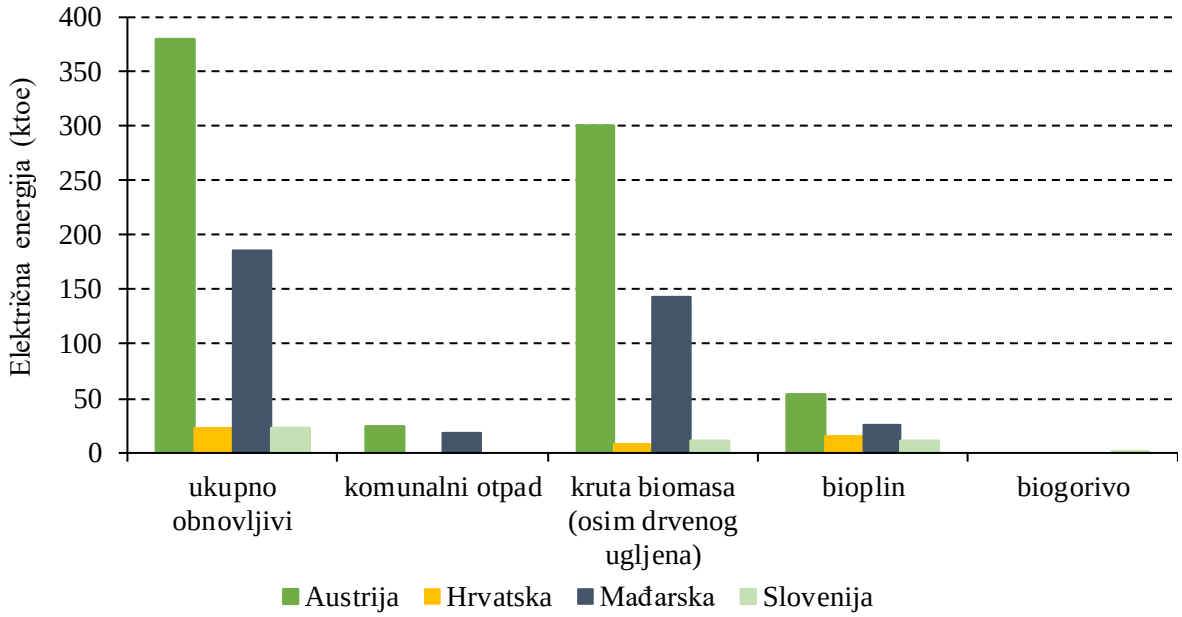
Biomasa je tradicionalno (tijekom milenija) imala važnu energetsku funkciju, ali je u posljednjih stotinjak godina zbog tehnološkoga i industrijskoga razvoja prepustila primat fosilnim gorivima (ugljen, nafta i prirodni plin). No, ograničeni resursi fosilnih goriva te klimatske promjene (među ostalim i zbog emisija CO_2) vraćaju biomasi iznova značajnu energetsku funkciju, prije svega kao obnovljivi izvor energije i k tomu lokalno dostupan. Tako je i u EU-u biomasa doživjela svojevrsnu evoluciju; na slikama od 1.10 do 1.13 i tablici 1.1 prikazana je uporaba biomase u razdoblju od 2000. do 2015. Uočava se snažan rast potrošnje biomase za grijanje u sektorima stanovanje i industrija te početci uporabe u ostalim sektorima, a u proizvodnji električne energije ostvaren je snažan rast proizvodnih kapaciteta.



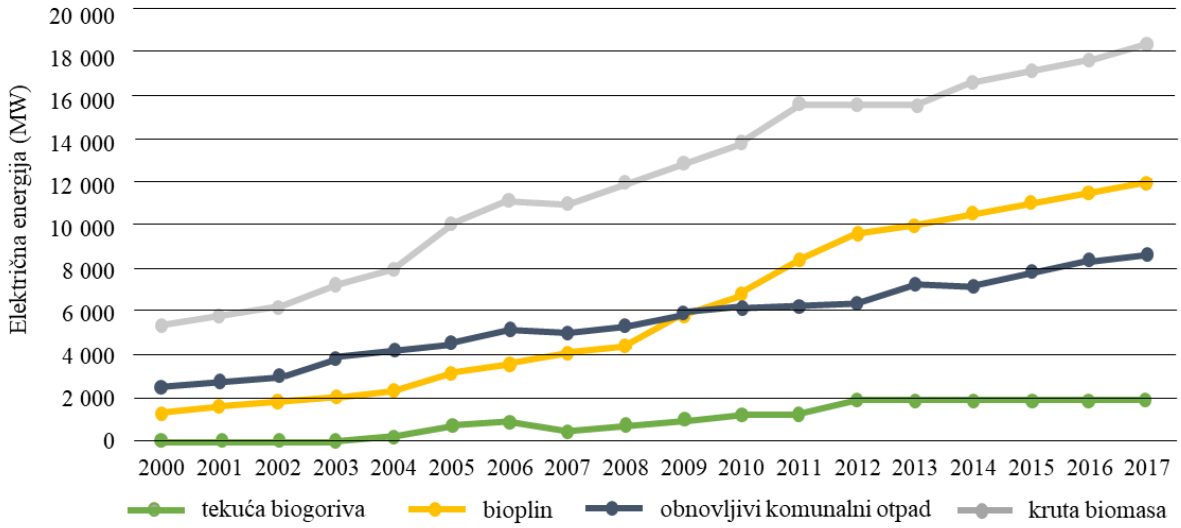
Slika 1.10: Razvoj biomase za toplinu i izvedenu toplinu u razdoblju 2000. - 2015. u EU-28 (ktoe) (Eurostat, 2018)



Slika 1.11: Uporaba biogoriva za proizvodnju električne energije u EU-28 u 2018. godini (ktoe) (Bioenergy Europe, 2020)



Slika 1.12: Proizvedena električna energija u Austriji, Hrvatskoj, Mađarskoj i Sloveniji po tehnologijama (OIE i kogeneracije) u 2018. godini (Eurostat, 2018)



Slika 1.13: Razvoj instalirane snage električne energije iz postrojenja za biomasu po tipu u EU-28 (MW) (Bioenergy Europe, 2019b)

Table 1.1: Uporaba biomase za toplinu i izvedenu toplinu u članicama EU-a (ktoe) (Eurostat, 2018)

	Industrija			**Stambeno**			**Drugi sektori**			**Izvedena toplina**		
Država/god.	2000	2010	2015	2000	2010	2015	2000	2010	2015	2000	2010	2015
Austrija	705	1248	1132	1435	1540	1581	185	260	281	177	885	887
Hrvatska	53	51	30	948	1187	1161	0	3	5	0	2	20
Mađarska	60	85	128	553	659	1765	81	49	42	13	72	120
Slovenija	75	68	75	358	515	463	2	2	2	6	23	35

Biomasa kao lokalno dostupan obnovljivi izvor energije bilježi značajan rast u ukupnoj potrošnji energije u svim članicama EU-a i u narednom će razdoblju bilježiti velike stope rasta. Drvo se smatra ugljično neutralnim gorivom, jer apsorbira istu količinu ugljikovoga dioksida tijekom rasta koliko stvara tijekom izgaranja. Stoga je glede klimatskih promjena (smanjenja emisija) drvo (i drvni ostatci) vrlo poželjan energent.

1.5.1. Pepeo - ostatak sagorijevanja biomase

Iako toplinsko izgaranje smanjuje masu loženoga drveta, kao i volumen otpada, nakon sagorijevanja biomase ostaje pepeo. Izgaranje jedne tone drvne biomase proizvede 5 MWh energije, ali i 20 - 50 kilograma pepela s dna peći, te lebdećega pepela koji onečišćuje zrak. Prosječna energana na biomasu u Hrvatskoj je godišnje u pogonu prosječno 7580 h. U radnom procesu za jedan sat energana potroši pet tona drvne biomase, pri čemu obično nastane oko 3,1% pepela (Milovanović et al., 2019).

Ovih se godina oko 70% pepela drvne biomase odlaže na odlagališta, oko 20% se upotrebljava kao dodatak tlu u poljoprivredi i šumarstvu, a oko 10% za druge namjene (Ivanović, 2019).
U skladu s načelima kružne ekonomije, kao i glede zaštite okoliša i zdravlja stanovništva, bit će potrebno smanjiti postotak odlaganja pepela iz drvne biomase, odnosno pronaći moguće načine njegove uporabe. Trend porasta primjene biomase kao obnovljivoga izvora energije utječe i na porast količine pepela iz drvne biomase. Predviđa se da će do 2050. od 33 do 50% od ukupno proizvedene primarne energije u svijetu biti proizvedeno od biomase. Stoga pitanje uporabe pepela postaje urgentno.

Reference:

BIOENERGY EUROPE 2019a. *Report Bioelectricity*. Statistical Report 2019. Belgija, EU: Bioenergy Europe.

BIOENERGY EUROPE 2020. *Report Bioelectricity*. Statistical Report 2020. Belgija, EU: Bioenergy Europe.

BIOENERGY EUROPE 2019b. *Report Biomass*. Statistical Report 2019. Belgija, EU: Bioenergy Europe.

EUROPEAN COMMISSION 1997. *White Paper for a Community Strategy and Action Plan*. Brisel, Belgija

EUROPEAN COMMISSION 2007. *Renewable energies in the 21st century: building a more sustainable future*. Brisel, Belgija.

EUROPEAN COMMISSION 2009. *Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC*. Official Journal of the European Union, L140.

EUROPEAN COMMISSION 2012a. *Europe 2020: Europe's growth strategy*. The European Union explained. Luksemburg.

EUROPEAN COMMISSION 2012b. *Roadmap to a Resource Efficient Europe Brussels*, Belgija.

EUROPEAN COMMISSION 2016. *Consolidated versions of the Treaty on European Union and the Treaty on the Functioning of the European Union*. Official Journal of the European Union, C202, 59.

EUROPEAN COMMISSION 2018. *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources*. Official Journal of the European Union, L328.

EUROPEAN COMMISSION 2020. *Report from The Commission to The European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of The Regions - Renewable Energy Progress Report*, COM(2020) 952 final, Brisel, Belgija, 14. 10. 2020

EUROPEAN COUNCIL. 2019. *Clean energy for all: Council adopts remaining files on electricity market and Agency for the Cooperation of Energy Regulators* [Online]. European Council. dostupno: http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm [pristupljeno 12. 7. 2020].

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). 2011. *A resource efficient Europe-flagship initiative under the Europe 2020 strategy* [Online]. Kopenhagen, Danska, dostupno: https://www.eea.europa.eu/policy-documents/a-resource-efficient-europe-flagship [pristupljeno 10. 7. 2020].

EUROSTAT. 2018. *Database* [Online]. Eurostat. dostupno: https://ec.europa.eu/eurostat/data/database [pristupljeno 15. 9. 2019].

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. 2018. *Sustainable Development* [Online]. Global Footprint Network. dostupno: https://www.footprintnetwork.org/our-work/sustainable-development/ [pristupljeno 05. 7. 2020.].

HOOGLAND, O., LIJN, N., RADEMAEKERS, K. 2017. *Assessment of Photovoltaics (PV) - Final report*, Trinomics, dostupno: https://trinomics.eu/wp-content/uploads/2017/07/AssessmentofPV.pdf [pristupljeno 14. 4. 2021]

IRENA 2018. *Renewable Power Generation Costs in 2017*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA).

IVANOVIĆ, M. 2009a, *Millennium Scientific Paradigm and Climate Millenium Intervention*. u*:* MILUTINOVIĆ, V. (ur.) VIPSI Beograd 2009, Beograd, Srbija. VIPSI & Elektrotehnički fakultet Beograd, 161.-166.

IVANOVIĆ, M. 2009b. *Tri eseja o znanosti*, Osijek, Hrvatska, Elektrotehnički fakultet Osijek

IVANOVIĆ, M. 2012. *Milutin Milankovic (1879 - 1958) one of the most significant scientists of 20th century*. Economy of eastern Croatia yesterday, today, tommorow, 2012, Osijek, Hrvatska, Ekonomski fakultet u Osijeku, 326.-335.

IVANOVIĆ, M. 2019. *Komunalno zbrinjavane otpada - stanje u gradovima slavonske regije*. u*:* HADZIMA-NYARKO, M., KARAKAŠIĆ, M., FEKETE, K., GLAVAŠ, H. & BLAŽEVIĆ, D. (ur.). 28. međunarodni znanstveni skup *Organizacija i tehnologija održavanja* - OTO 2019, 2019 Vinkovci, Hrvatska, Panon - Institut za strateške studije - Osijek.

MCMAHON, T. 2020. *Historical Crude Oil Prices (Table)* [Online]. InflationData.com. dostupno: https://inflationdata.com/articles/inflation-adjusted-prices/historical-crude-oil-prices-table [pristupljeno 10. 7. 2020].

MILOVANOVIĆ, B., ŠTIRMER, N., CAREVIĆ, I. & BARIČEVIĆ, A. 2019. *Wood biomass ash as a raw material in concrete industry*. Građevinar, 71**,** 505.-514.

WACKERNAGEL, M. & GALLI, A. 2007. *An overview on ecological footprint and sustainable development: a chat with Mathis Wackernagel*. International Journal of Ecodynamics, 2**,** 1.-9.

WACKERNAGEL, M. & REES, W. 1996. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*, Philadelphia, SAD, New Society Publishers.

2. POLITIKA I REGULATIVA EUROPSKE UNIJE U ZAŠTITI OKOLIŠA ZA RECIKLIRANJE OTPADA

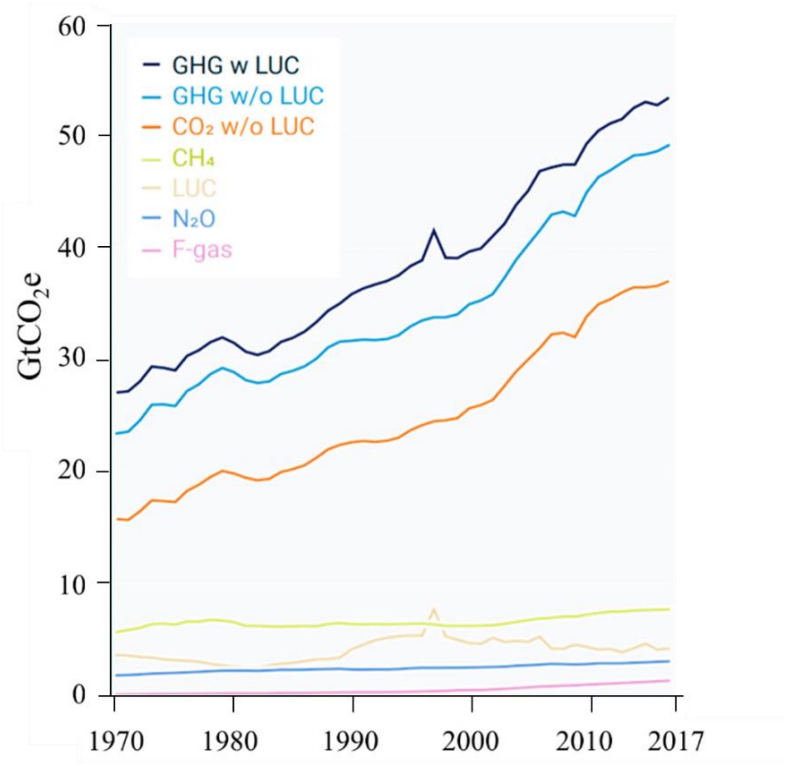
Sažetak: Civilizacijskim razvojem i urbanizacijom rastu količine svih oblika otpada iz ljudskih aktivnosti, što uz emisiju stakleničkih plinova (posebice iz energetskih transformacija) ima vrlo nepovoljne utjecaje na okoliš i klimatski sustav na planetu. Europska unija je izradila i usvojila najviše standarde očuvanja okoliša i klime na svijetu, a Republika Hrvatska je pristupanjem u ovu međunarodnu zajednicu država prihvatila niz obveza, između ostaloga i u području zaštite okoliša, u ovom slučaju u sektoru zbrinjavanja i gospodarenja otpadom. U ovom je poglavlju načinjen okvirni pregled zakonodavstva EU-a za zbrinjavanje otpada te se razmatraju postignuća Republike Hrvatske u realizaciji preuzetih obveza u prikupljanju i odvajanju otpada.

Ključne riječi: zakonodavstvo EU-a, klimatske promjene, komunalni otpad, recikliranje, zaštita okoliša

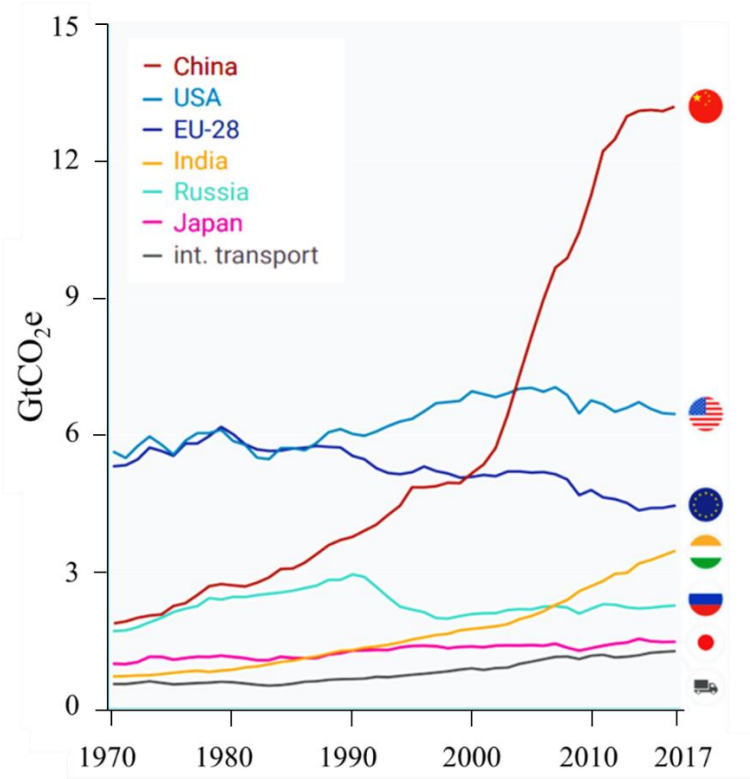
Napomena: Dio teksta objavljen u radu IVANOVIĆ, M. 2019. *Komunalno zbrinjavanje otpada - stanje u gradovima slavonske regije*, 28. međunarodni znanstveni skup *Organizacija i tehnologija održavanja*, Vinkovci, 12. 12. 2019.

2.1. Klimatske promjene i otpad

Tehnološkim razvojem i urbanizacijom rastu količine svih oblika otpada iz industrije i rudarstva, poljoprivrede i šumarstva, građevinarstva, transporta, turizma, javnih službi (napose zdravstva) te kućanstava, posebice od kraja XX. stoljeća. U isto je vrijeme, a naročito početkom XXI. stoljeća, prikupljeno više dokaza o klimatskim promjenama koje su prouzročene razvojem civilizacije; emisije CO_2 i drugih stakleničkih plinova (iz energetskih transformacija i nastajanjem i odlaganjem otpada) kako je to prikazano slikama 2.1 i 2.2, a koji ugrožavaju okoliš, tj. tlo, vodne resurse, biljni i životinjski svijet te utječu na klimatske promjene. To su temeljni razlozi zbog kojih je Europska unija pokrenula niz mehanizama u svojim razvojnim politikama za smanjenje utjecaja čovjeka na postojeći klimatski režim na Zemlji. Naš je planet ugrožen i prijete mu velike promjene, kao što su rast temperature, porast razine oceana, poremećaj zračnih i morskih struja te smanjenje bioraznolikosti i nestajanje brojnih biljnih i životinjskih vrsta. Tako je EU razradio i postavio standarde očuvanja okoliša, a Republika Hrvatska pristupanjem u ovu međunarodnu zajednicu država prihvatila niz obveza, između ostalih, i iz područja zaštite okoliša.



Slika 2.1: Globalna emisija stakleničkih plinova prema vrsti plina ($GtCO_2e$) (United Nations Environment Programme (UNEP), 2019)



Slika 2.2: Globalna emisija stakleničkih plinova prema najvećim zagađivačima ($GtCO_2e$) (United Nations Environment Programme (UNEP), 2019)

2.2. Okviri zaštite okoliša Europske unije

Europska je unija razradila i postavila najviše standarde očuvanja okoliša na svijetu. Politika (i zakonodavstvo) zaštite okoliša EU-a obuhvaća više od 300 pravnih dokumenata (smjernice, propisi, odluke) koje države članice trebaju prenijeti u nacionalna zakonodavstva.

Tri su ključne faze razvoja politike zaštite okoliša u EU: prva počinje 1972. kada EU stvara institucionalnu osnovu za razvoj politika zaštite okoliša te određuje ključna strateška načela, druga počinje stupanjem na snagu *Jedinstvenog europskog akta* (1987.) kojim se jača pravna osnova politike zaštite okoliša te donose ciljevi i dopunjuju procedure, a treća faza počinje donošenjem *Ugovora iz Maastrichta* (1992.) kada zaštita okoliša ulazi u temelje politika EU-a i traje do danas. *Ugovorom iz Amsterdama* (potpisanim 1997.) uvedena je obveza prema kojoj politika okoliša mora postati dijelom svih sektorskih politika EU-a u svrhu promicanja održivoga razvoja. *Ugovor iz Lisabona* (2007.) donosi ciljeve očuvanja, zaštite i poboljšanja kvalitete okoliša, zaštite zdravlja ljudi, mudroga i racionalnoga korištenja prirodnih resursa i promicanja mjera na međunarodnoj razini za rješavanje regionalnih ili svjetskih problema u području okoliša, s posebnim naglaskom na mjere zaustavljanja klimatskih promjena (Jordan and Liefferink, 2004).

Za područje zaštite okoliša u EU, uz direktive, važne su sektorske strategije, planovi održivoga rasta te akcijski planovi. Glede aktualne EU strategije rasta (Europa 2020.) na snazi su tri ključna prioriteta Europske unije do 2020. (European Commission, 2012a):

- pametan rast: razvijanje ekonomije utemeljene na znanju i inovaciji,
- održiv rast: promicanje ekonomije koja učinkovitije iskorištava resurse, koja je zelenija i konkurentnija,
- uključiv rast: njegovanje ekonomije s visokom stopom zaposlenosti koja donosi društvenu i teritorijalnu povezanost.

U akcijskim programima zaštite okoliša EU definira najvažnije srednjoročne i dugoročne ciljeve zaštite okoliša i konkretne mjere za njihovo ostvarivanje. Sedmi se akcijski program zaštite okoliša 2013. - 2020. (*Živjeti dobro unutar granica našeg planeta*) (European Environment Agency (EEA), 2011) temelji na tri strateška dokumenta: *Europa 2020.* (European Commission, 2012a), *Planu za resursno učinkovitu Europu* (European Commission, 2012b) i *Strategiji bioraznolikosti za 2020.* (European Commission, 2011). Tako je okvir politike zaštite okoliša EU -a do 2020. strateški određen sljedećim elementima:

1) zaštititi, očuvati i povećati prirodni kapital EU-a;

2) pretvoriti EU u resursno učinkovito, zeleno i konkurentno gospodarstvo s niskom razinom emisije CO_2;

3) zaštititi građane EU-a od pritisaka i opasnosti za njihovo zdravlje i blagostanje, povezanih s okolišem.

U ostvarenju ova tri cilja određena su četiri prioriteta:

4) poboljšati provedbu zakonodavstva EU-a u području okoliša,

5) poboljšati utemeljenost politike EU-a u području okoliša na dokazima i znanju,

6) osigurati ulaganja u politiku okoliša i klimatsku politiku, rješavati popratne troškove povezane s okolišem i
7) povećati uključenost pitanja okoliša i usklađenost politika.
Uz ova sektorska usmjerenja, usvojena su i dva (horizontalna) prioriteta:
8) poboljšati održivost gradova na području EU-a te
9) povećati djelotvornost EU-a u rješavanju međunarodnih izazova povezanih s okolišem i klimom.

Predmet naših razmatranja je gospodarenje otpadom tako da se ovdje neće ukazivati na bitne dokumente i aktivnosti izravno vezane za bioraznolikost, očuvanje voda (i gospodarenje) te klimatska pitanja, iako su svi ovi sektori međusobno povezani.

2.3 Politika i zakonodavstvo Europske unije u gospodarenju otpadom

Cilj je politike (i pratećega zakonodavstva) EU-a u gospodarenju otpadom smanjiti negativan učinak nastajanja otpada na okoliš. Politika gospodarenja otpadom u EU razvijala se progresivno od 1975. kada je donesen prvi zakonodavni akt o otpadu. Dugoročni cilj EU-a u području gospodarenja otpadom je postati „društvo koje reciklira sve vrste otpada“. Taj je cilj naznačen u *Tematskoj strategiji o sprečavanju nastajanja i recikliranju otpada* (European Commission, 2005).

Godine 2012. Europski je parlament usvojio *Rezoluciju o resursno efikasnoj Europi* u kojoj ističe da financiranje iz fondova EU-a mora biti usklađeno s prioritetnim aktivnostima koje se nalaze na vrhu hijerarhije gospodarenja otpadom (European Environment Agency (EEA), 2011).

Koncept hijerarhijskoga slijeda zbrinjavanja otpada temelji se na načelu rangiranja opcija u zbrinjavanju otpada:

- od prioritetne prevencije nastajanja otpada
- preko ponovne uporabe (recikliranje, materijalne i/ili energetske oporabe)
- do odlaganja otpada.

Cilj je ove politike povećanje energetske učinkovitosti i smanjivanje nepovoljnih utjecaja na okoliš i zdravlje ljudi, a zakonodavni okvir čine: *Okvirna direktiva o otpadu* (European Commission, 2008), *Direktiva o odlaganju otpada* (European Commission, 1999), *Direktiva o spaljivanju otpada* (European Commission, 2000) i *Uredba o pošiljkama otpada* (European Commission, 2006).

Direktiva o odlaganju otpada utvrđuje stroge uvjete koje odlagališta moraju zadovoljiti kako bi se spriječili i umanjili štetni utjecaji na okoliš, te specificira mjere za prikupljanje procjednih voda, kontrolu plinova na odlagalištima i zaštitu podzemnih voda. Uz ostale uvjete, Direktiva propisuje obradu otpada prije odlaganja te da se biorazgradivi otpad mora postupno smanjiti na 35% od ukupne količine biorazgradivoga komunalnoga otpada nastaloga 1995.
Direktiva o spaljivanju otpada nastoji, što je više moguće, spriječiti ili umanjiti štetne utjecaje koje na okoliš može imati spaljivanje ili suspaljivanje otpada. Ova uputa posebice propisuje

redukciju zagađenja koje nastaje emisijom u zrak, tlo, nadzemne i podzemne vode - kako bi se umanjio rizik koji takvo zagađenje predstavlja za ljudsko zdravlje. Ovo se mora postići osiguravanjem operativnih uvjeta, tehničkih zahtjeva i primjenom graničnih vrijednosti emisije u spalionicama i suspalionicama otpada unutar EU-a.

Okvirna direktiva o otpadu propisuje da sve države članice do 2020. trebaju (putem nadležnih tijela) osigurati pripremu za:

- ponovno korištenje i recikliranje papira, metala, plastike i stakla iz kućanstava u najmanjem udjelu od 50% količine otpada i
- ponovnu uporabu, recikliranje i druge načine materijalne oporabe neopasnoga građevnoga otpada u najmanjem udjelu od 70% mase otpada.

EU je kao dio razvojne strategije Europa 2020. usvojio i dokument *Resursno učinkovita Europa - Vodeća inicijativa strategije Europa 2020* (European Commission, 2020). Intencija je ove inicijative prelazak s postojećega linearnoga na kružno gospodarstvo - ekonomski model koji osigurava održivo gospodarenje resursima i produljenje životnoga vijeka materijala i proizvoda (slika 2.3). Cilj je ovoga modela svesti nastajanje otpada na najmanju moguću mjeru, ali ne samo otpada koji nastaje u proizvodnim procesima, već sustavno, tijekom životnoga ciklusa proizvoda i svih njegovih sastavnica.



Slika 2.3: Model kružne ekonomije (European Commission, 2015a)

Europska komisija je *Planom za resursno učinkovitu Europu* postavila okvir za izradu i provedbu budućih aktivnosti te načinila temelj za usmjerenje EU-a na put resursne učinkovitosti i održivoga rasta. Ciljevi do 2020. predviđaju sljedeće:

- upravljanje otpadom kao resursom,
- smanjenje količine otpada po stanovniku,
- uporabu financijskih instrumenata u postizanju više stope recikliranja i ponovne uporabe kako bi te opcije postale ekonomski atraktivnije javnom i privatnom sektoru.

U osnovi se radi o sljedećem:

- recikliranju većega broja materijala, uključujući materijale koji imaju značajan utjecaj na

okoliš,

- potpunoj provedbi zakonodavstva EU-a o otpadu
- iskorjenjivanju ilegalnoga izvoza otpada,
- limitiranju energetske oporabe na materijale koje je nemoguće reciklirati te
- eliminiranju odlaganja otpada.

Dokument (2014.) *Prema kružnom gospodarstvu: Program nulte stope otpada za Europu* (European Commission, 2014) promiče prelazak EU-a s linearnoga na kružni model te postavlja nove mjere za učinkovito korištenje resursa i smanjenje odlaganja otpada, a novi paket o kružnom gospodarstvu (2015.) s pripadajućim dokumentom *Zatvaranje kruga - akcijski plan EU-a za kružno gospodarstvo* (European Commission, 2015a) europskim tvrtkama i potrošačima olakšava prijelaz na novi model poslovanja. Novim se paketom o kružnom gospodarstvu revidira postojeće zakonodavstvo i postavljaju ambiciozni ciljevi: recikliranje komunalnoga otpada (60% do 2030.), recikliranje ambalažnoga otpada (75% do 2030.), smanjenje odlaganja komunalnoga otpada na odlagališta (do najviše 10% do 2030.) te potpunu zabranu odlaganja odvojeno prikupljenoga otpada na odlagališta.

Nakon donošenja akcijskoga plana za kružno gospodarstvo (2015.) i platforme dionika (2017.) Europska je komisija donijela (2018.) novi paket mjera za ostvarenje postavljenih ciljeva s novim inicijativama (European Commission, 2015b):
a) strategija EU-a za plastiku;
b) komunikacija o načinu poboljšanja povezanosti zakonodavstva o kemikalijama, proizvodima i otpadu;
c) izvješće o kritičnim sirovinama;
d) okvir za praćenje napretka prema kružnom gospodarstvu.

Zbog niza specifičnosti i složenosti, komunalni je otpad (iako količinski malo zastupljen - oko 10% ukupnoga otpada u EU) jedan od tokova otpada kojima se najteže gospodari. Način gospodarenja u ovom sektoru otpada, u pravilu, pouzdano označava kvalitetu sustava gospodarenja otpadom u nekoj zemlji.

2.4. Zakonodavstvo i gospodarenje otpadom u Hrvatskoj

Kao i u nizu drugih sektora, tako i u području gospodarenja otpadom, Republika Hrvatska nije se (u vrijeme pristupa EU-u) dovoljno pripremila te kasni u dinamici ispunjavanja etapnih ciljeva. RH je u tom razdoblju usvojila *Nacionalnu strategiju zaštite okoliša* (Vlada Republike Hrvatske, 2002), *Plan gospodarenja otpadom* (Vlada Republike Hrvatske, 2005), *Plan gospodarenja otpadom 2007. - 2015.* (Vlada Republike Hrvatske, 2007), *Strategiju održivog razvitka Republike Hrvatske* (Vlada Republike Hrvatske, 2009).

Kako je (2014.) ocijenjeno, sustav gospodarenja otpadom u RH ekološki je neodrživ i neprihvatljiv te obilježen nedostatnim postrojenjima za gospodarenje otpadom, visokim udjelom komunalnoga i biorazgradivoga otpada koji se odlaže na odlagališta otpada i s niskim je udjelom recikliranja komunalnoga otpada (Agencija za zaštitu okoliša, 2013). Sustav

zbrinjavanja je (tada bio) usmjeren na sakupljanje otpada i njegovo odlaganje umjesto da je orijentiran na recikliranje. Hrvatska je u narednih nekoliko godina trebala riješiti i problem neodgovarajućega zbrinjavanja otpada putem sanacije odlagališta komunalnoga otpada i zatvaranja nelegalnih odlagališta.

U razdoblju od 2008. do 2013. udio komunalnoga otpada zbrinutoga na odlagališta smanjen je s 97% na 82%, no gotovo sva količina odložena je bez prethodne obrade. Miješani komunalni otpad imao je (2013.) visokih 76% udjela u ukupnom komunalnom otpadu (Agencija za zaštitu okoliša, 2013). Okvirna uputa o otpadu nalaže 50% odvojenoga sakupljanja i recikliranja komunalnoga otpada do 2020., a Hrvatska je 2014. dostigla tek 17% komunalnoga otpada upućenoga na oporabu, odnosno 2017. je na odlagalištu završilo 72% komunalnoga otpada (8% manje nego 2014.), što je znatno iznad prosjeka Europske unije (EU = 24%) (Hrvatska agencija za okoliš i prirodu, 2019).

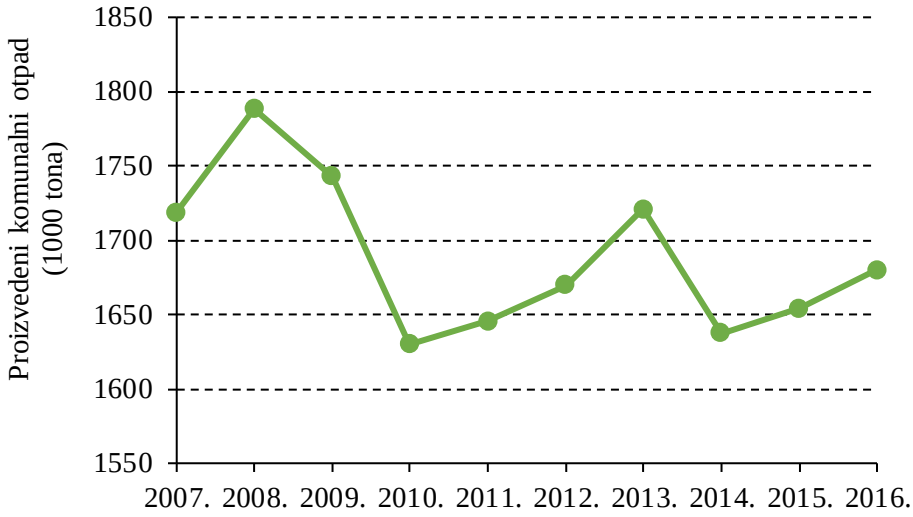
Hrvatska ima obvezu osigurati postupno smanjivanje količine biorazgradivoga komunalnoga otpada koji se odlaže na odlagališta: do 31. 12. 2016. smanjenje na 50%, a do 31. 12. 2020. na 35% ukupne količine biorazgradivoga komunalnoga otpada prema stanju iz 1997. Iako je količina odloženoga biorazgradivoga komunalnoga otpada u razdoblju od 2010. do 2018. smanjena, zadani cilj u odlaganju biorazgradivoga komunalnoga otpada nije dostignut (Hrvatski sabor, 2017).

Obveza je Hrvatske bila smanjiti ukupnu količinu otpada koji se odlaže na neusklađenim odlagalištima, a (2014.) je evidentirano 312 lokacija službenih odlagališta otpada; od 2013. do svibnja 2018. zatvoreno je 185 takvih odlagališta, a do kraja 2018. predviđeno je zatvaranje još 26 odlagališta (Vlada Republike Hrvatske, 2019). Godine 2018. službeno je aktivno 127 odlagališta na kojima je odloženo 1,638.599 tona otpada; to je 9,7% manje nego u 2017. godini. Od procijenjenih 3.000 tzv. divljih odlagališta (2013.) sanirano je i uklonjeno više od 2.000 lokacija, a Fond za zaštitu okoliša provodi postupke sanacije prioritetnih lokacija onečišćenih opasnim otpadom (tzv. crne točke). Obveza je Hrvatske, također, bila izgradnja 13 centara za gospodarenje otpadom (CGO) do 31. 12. 2018. Danas (2019.) su u funkciji dva centra (Kaštijun i Marišćina), a u pripremi su CGO Bikarac, Biljane Donje, Lećevica i Babina Gora i Orlovnjak; ostali su u procesu planiranja. Obuhvat stanovništva organiziranim sakupljanjem komunalnog otpada u Hrvatskoj je povećan s 80% (2000.) na 99% 2018. (Hrvatska agencija za okoliš i prirodu, 2019).

Vlada RH je (2017.) usvojila *Plan gospodarenja otpadom RH za razdoblje od 2017. do 2022.* (PGOHR) usmjeren na (Hrvatski sabor, 2017, Vlada Republike Hrvatske, 2017):

- sprječavanje nastanka komunalnoga otpada,
- sprječavanja nastanka biootpada, s posebnim naglaskom na otpad od hrane,
- sprječavanja nastanka građevnoga otpada,
- sprječavanje nastanka otpadnoga papira i kartona i
- sprječavanje nastanka električnoga i elektroničkoga otpada.

Kratki prikaz gospodarenja otpadom u Hrvatskoj ilustriraju tablica 2.1 i slike 2.4 i 2.5.



Slika 2.4: Proizvedeni komunalni otpad u Republici Hrvatskoj u razdoblju 2007. - 2016. (1000 t) (Hrvatska agencija za okoliš i prirodu, 2019)

U ukupno prijavljenim količinama proizvodnoga otpada (2018.) najveći su udio imali: otpad iz uređaja za pročišćavanje gradskih otpadnih voda i pripremu pitke vode i vode za industrijsku uporabu (27,5%), građevni otpad i otpad od rušenja objekata, uključujući iskopanu zemlju s onečišćenih lokacija (26,2%) te otpad iz termičkih procesa (9,6%) (Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, 2019).

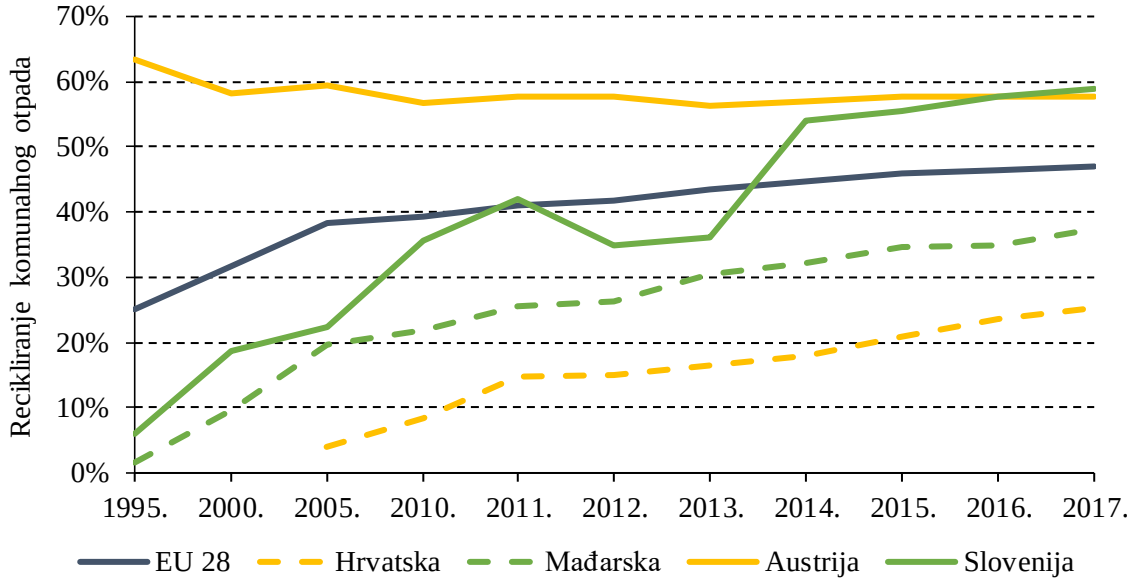
Zbog male industrijske proizvodnje i slabije razvijenoga poslovnoga sektora, Hrvatska ima najveći postotak otpada iz domaćinstava (tablica 2.1), a prema stopi recikliranja komunalnoga otpada RH znatno zaostaje za Austrijom, Mađarskom i Slovenijom (slika 2.5).

Tablica 2.1: Proizvodnja otpada prema ekonomskim aktivnostima u 2016. (%) (Eurostat, 2018)

Država	Rudarstvo i vađenje	Proizvodnja	Energija	Izgradnja i rušenje	Ostale ekonomske aktivnosti	Domaćinstva
EU-28	25	10	3	36	16	8
Hrvatska	12	8	2	24	31	22
Mađarska	1	17	16	23	25	18
Austrija	0	9	1	73	10	7
Slovenija	0	26	14	10	38	12

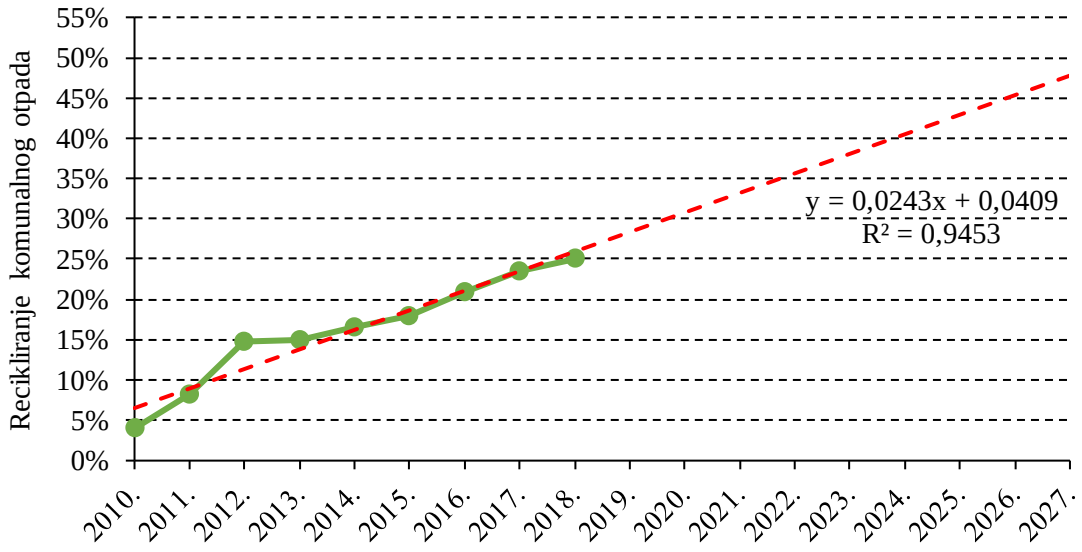
Stopa kružne (sekundarne) uporabe materijala, kao jedan od novih ključnih pokazatelja recikličnosti materijala, u Hrvatskoj je 2016. iznosila 4,4%, dok je prosjek u EU-28 bio 11,7%.

Republika Hrvatska posljednjih je godina ostvarila napredak u usklađivanju nacionalnoga zakonodavstva sa smjernicama EU-a u sektoru otpada. Hrvatsko zakonodavstvo je od 2019. u potpunosti usklađeno s *Okvirnom direktivom o otpadu*, a u tijeku su postupci izmjene nacionalnih propisa kojima bi se trebala postići usklađenost s *Direktivom o odlagalištima otpada* i direktivama za određene tokove otpada.



Slika 2.5: Stopa recikliranja komunalnoga otpada za razdoblje 1995. - 2017. godine u EU-u, Austriji, Hrvatskoj, Mađarskoj i Sloveniji (%) (Eurostat, 2018)

Unatoč blagom porastu recikliranja komunalnoga otpada (uključujući kompostiranje), Hrvatska je i dalje je na niskoj razini - svega 24% (2017.) u odnosu na prosjek EU-a (46%); prema Izvješću Europske komisije o ranom upozorenju za Hrvatsku postoji rizik da do 2020. neće ispuniti cilj recikliranja komunalnog otpada od 50%. Prema dosadašnjoj dinamici ovih aktivnosti (izračunan je trend), Hrvatska će obvezu recikliranja najmanje 50% komunalnoga otpada, umjesto 2020., ispuniti tek 2027. (slika 2.6), za što joj prijeti plaćanje kazni EU-u do ispunjenja preuzetih obveza (Ivanović, 2019).



Slika 2.6: Trend stope recikliranja komunalnoga otpada u RH (2010./'18. - 2027.)

Članice EU-a koje nisu izvršile obveze u zbrinjavanju komunalnoga otpada plaćaju kazne kako slijedi: Mađarska 27.316 € dnevno; Bugarska 15.220 € dnevno; Poljska 67.314 € dnevno; Grčka jednokratno 10 mil. € + 14,52 mil. € svakih šest mjeseci do ispunjenja obveza te Italija jednokratno 40 mil. € + 42,8 mil. € svakih šest mjeseci do ispunjenja obveza (Polonijo, 2017).

Reference:

AGENCIJA ZA ZAŠTITU OKOLIŠA 2013. *Pregled podataka iz registra dozvola i potvrda za gospodarenje otpadom* - 2013. Zagreb, Hrvatska, Agencija za zaštitu okoliša,.

EUROPEAN COMMISSION 1999. *Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste*. Official Journal of the European Union, L182.

EUROPEAN COMMISSION 2000. *Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste*. Official Journal of the European Union, *L332*.

EUROPEAN COMMISSION 2005. *Taking sustainable use of resources forward - A Thematic Strategy on the prevention and recycling of waste*. Brisel, Belgija.

EUROPEAN COMMISSION *2006. Regulation (EC) No 1013/2006 of the European Parliament and of the Council of 14 June 2006 on shipments of waste*. Official Journal of the European Union, L190**,** 5.-43.

EUROPEAN COMMISSION 2008. *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives*. Official Journal of the European Union, *L312*.

EUROPEAN COMMISSION 2011. *The EU 2020 Biodiversity Strategy*. Brisel, Belgija

EUROPEAN COMMISSION 2012a. *Europe 2020: Europe's growth strategy*. *The European Union explained*. Luksemburg.

EUROPEAN COMMISSION 2012b. *Roadmap to a Resource Efficient Europe Brussels*, Brisel, Belgija

EUROPEAN COMMISSION 2014. *Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe*. Brisel, Belgija

EUROPEAN COMMISSION. 2015a. *Closing the Loop - an ambitious EU Circular Economy Package* [Online]. European Commission. dostupno: https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/circular-economy-factsheet-general_en.pdf [pristupljeno 10. 9. 2019].

EUROPEAN COMMISSION 2015b. *Directive (EU) 2015/720 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2015 amending Directive 94/62/EC as regards reducing the consumption of lightweight plastic carrier bags*. Official Journal of the European Union, *L115,* 53**,** 13-35.

EUROPEAN COMMISSION 2020. *A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe*. Brisel, Belgija.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). 2011. *A resource efficient Europe-flagship initiative under the Europe 2020 strategy* [Online]. Kopenhagen, Danska, dostupno: https://www.eea.europa.eu/policy-documents/a-resource-efficient-europe-flagship [pristupljeno 10. 7. 2020].

EUROSTAT. 2018. *Database* [Online]. Luksemburg, dostupno: https://ec.europa.eu/eurostat/data/database [pristupljeno 15. 9. 2019].

HRVATSKA AGENCIJA ZA OKOLIŠ I PRIRODU. 2019. *Izvješća* [Online]. Zagreb, Hrvatska: Ministarstvo zaštite okoliša i energetike. dostupno: http://www.haop.hr/hr/tematska-podrucja/otpad-registri-oneciscavanja-i-ostali-sektorski-pritisci/gospodarenje-otpadom-0 [pristupljeno 14. 6. 2019].

HRVATSKI SABOR 2017. *Zakon o održivom gospodarenju otpadom*. Narodne novine br. 94/2013, 73/2017.

IVANOVIĆ, M. 2019. *Komunalno zbrinjavane otpada - stanje u gradovima slavonske regije*. u: HADZIMA-NYARKO, M., KARAKAŠIĆ, M., FEKETE, K., GLAVAŠ, H. & BLAŽEVIĆ, D. (ur.) 28. Međunarodni znanstveni skup *Organizacija i tehnologija održavanja* - OTO 2019, 2019 Vinkovci, Hrvatska, Panon - Institut za strateške studije - Osijek.

JORDAN, A. J. & LIEFFERINK, D. 2004. *Environmental Policy in Europe: The Europeanization of National Environmental Policy,* Engleska, UK, Routledge.

MINISTARSTVO ZAŠTITE OKOLIŠA I ENERGETIKE 2019. *Pregled podataka o odlaganju i odlagalištima otpada za 2018. godinu*. Ministarstvo zaštite okoliša i energetike.

POLONIJO, S. 2017. *Zakonodavni okvir Hrvatska* [Online]. Udruga gradova. dostupno: https://www.udruga-gradova.hr/wordpress/wp-content/uploads/2017/11/RIJEKA-5.-Sonja_Polonijo_Zakonodavni-okvir_gospodarenje_otpadom.pdf [pristupljeno 18. 7. 2020].

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP) 2019. *Emissions Gap Report 2018*. UNEP.

VLADA REPUBLIKE HRVATSKE 2002. *Nacionalna strategija zaštite okoliša*. Narodne novine br. 46/2002.

VLADA REPUBLIKE HRVATSKE 2005. *Strategija gospodarenja otpadom Republike Hrvatske*. Narodne novine br. 130/2005.

VLADA REPUBLIKE HRVATSKE 2007. *Plan gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj za razdoblje 2007. - 2015. godine*. Narodne novine br. 85/2007.

VLADA REPUBLIKE HRVATSKE 2009. *Strategija održivog razvitka Republike Hrvatske*. Narodne novine br. 30/2009.

VLADA REPUBLIKE HRVATSKE 2017. *Plan gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj za razdoblje 2017. - 2022. godine*. Narodne novine br. 3/2017.

VLADA REPUBLIKE HRVATSKE 2019. *Odluka o redoslijedu i dinamici zatvaranja odlagališta*. Narodne novine br. 3/2019.

3. PODJELA BIOMASE I NJEZIN ENERGETSKI POTENCIJAL

Sažetak: U poljoprivredne kulture koje se neposredno koriste za proizvodnju biogoriva ubrajamo: kukuruz, šećernu trsku i repu, pšenicu, sirak, krumpir, uljanu repicu, suncokret, soju, palmu i dr. Zapravo, danas se traže kulture koje će proizvesti što je moguće "više kilometara po hektaru", ne ograničavajući zalihe hrane i pri tom ne iscrpljujući nutrijente iz tla. Koliko je ovakva proizvodnja opravdana, danas se u svijetu još uvijek polemizira. Pretpostavlja se da bi ovakva proizvodnja biogoriva, dakle izravno iz poljoprivrednih kultura, mogla ozbiljno konkurirati proizvodnji hrane te ujedno i podići cijenu hrane na tržištu, a to bi tek neznatno umanjilo emisiju stakleničkih plinova. U budućnosti će se ipak morati intenzivirati uporaba obnovljivih izvora energije, na čemu se danas i radi. Tako se otvaraju novi proizvodni pogoni, usputno povećavajući i broj radnih mjesta. To zasigurno pridonosi poboljšanju infrastrukture određenih regija.

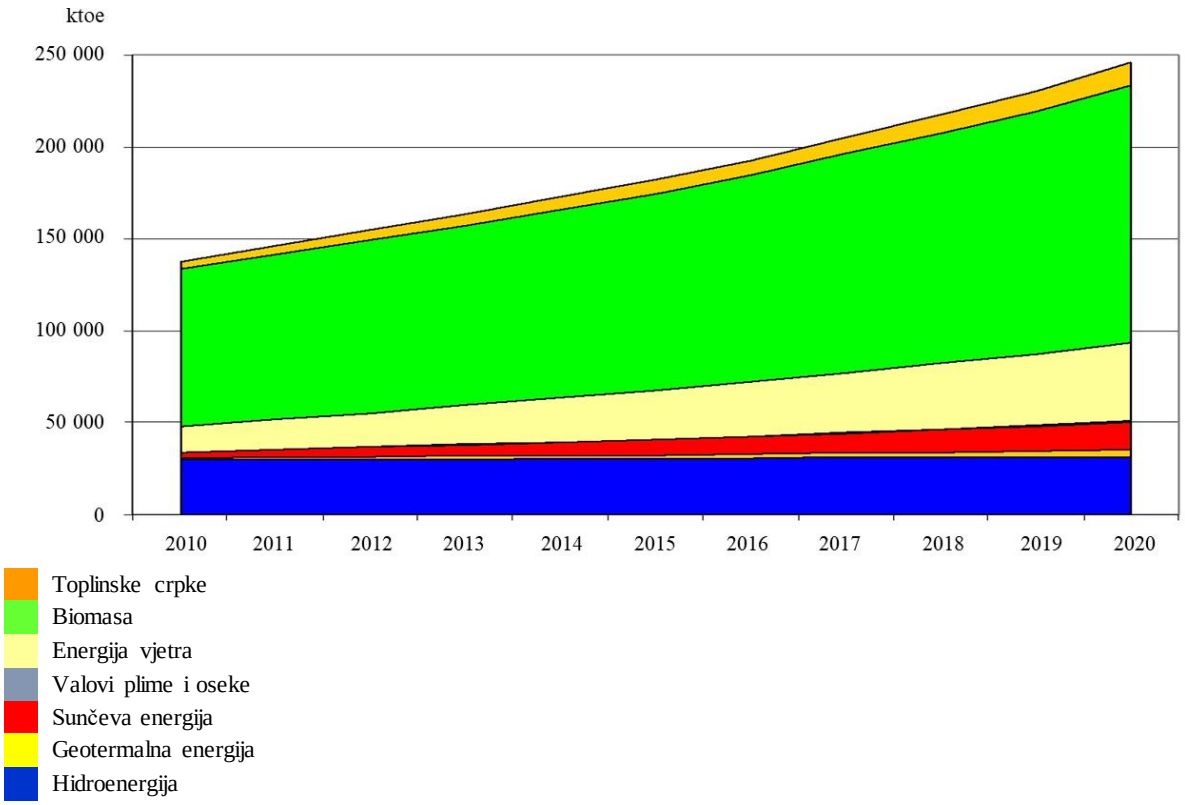
Ključne riječi: biomasa, energetske biljke, bioplin, etanol, biodizel

3.1 Pojam biomase i podjela biomase

Prema definiciji danoj u Direktivi 2009/28/EK, biomasa je biorazgradivi dio proizvoda, otpada i ostataka biološkoga (kako biljnoga, tako i životinjskoga) podrijetla iz poljoprivrede, šumarstva i srodnih sektora, kao što je ribarstvo i akvakultura, ali i biorazgradivi dio industrijskoga i komunalnoga otpada. Biomasa se prema podrijetlu dijeli na:

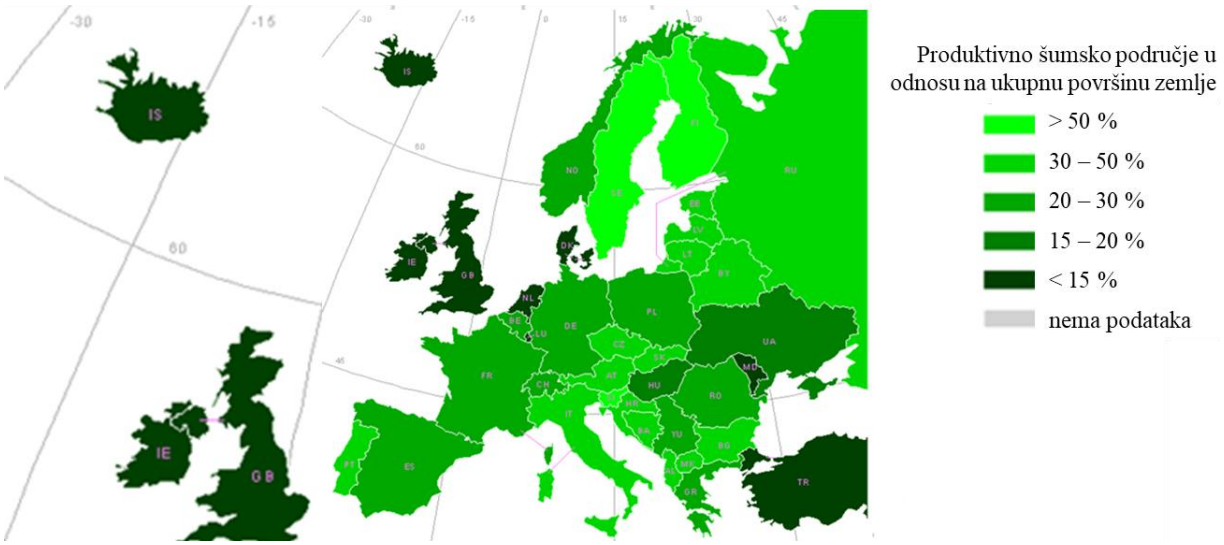
1. poljoprivrednu biomasu:
   - žetveni ostatci,
   - uzgajane kulture,
   - životinjski otpad i ostatci;
2. biomasu iz prehrambeno-prerađivačke industrije
3. šumsku i drvno-prerađivačku biomasu
4. komunalni otpad.

Slika 3.1 prikazuje udio uporabe energije iz pojedine vrste obnovljivoga izvora energije. Iz nje je razvidno da se upravo iz biomase očekuje najveća proizvodnja energije.



Slika 3.1: Razvoj tehnologija za obnovljive izvore energije iz nacionalnih akcijskih planova (Volpi, 2011)

Da bi biomasa bila prikladan izvor energije, njezina bi ogrjevna vrijednost trebala biti oko 14 - 16 MJ/kg. Teorijski je moguće zamijeniti jedan m^3 prirodnoga plina sa 2,5 kg biomase. Ipak, potencijali biomase ovise o regiji i stupnju razvijenosti poljoprivredne proizvodnje. Slikom 3.2 prikazana je regionalna rasprostranjenost šumske biomase u odnosu na površinu pojedine države.



Slika 3.2: Produktivno šumsko područje u odnosu na ukupnu površinu pojedine države (World Energy Council (WEC), 2004)

Kada je riječ o poljoprivrednoj biomasi, kao obnovljivi ju izvor energije možemo upotrebljavati za proizvodnju toplinske energije spaljivanjem ili tehnološkim postupcima za proizvodnju biogoriva.

3.2. Sirovine za proizvodnju biogoriva

Kao sirovine za proizvodnju biogoriva mogu se koristiti čitave biljke ili dijelovi biljaka, ostatci od proizvodnje, otpad i ostatci nastali ljudskom i aktivnošću životinja. Sirovine se mogu razvrstati po kategorijama biljaka ili ostataka, prema produktima koji nastaju njihovom preradom ili na neki drugi način. Najčešća podjela je na šećerne/škrobne sirovine, vlaknaste/travnate celulozne sirovine, uljne kulture, gnojiva i organski otpad, drvo i drvnu biomasu, žetvene ostatke.

Šećerne/škrobne sirovine su biljke s visokim udjelom šećera ili škroba, a koriste se pretežno za proizvodnju hrane za ljude i životinje te kao zaslađivači. Tu ubrajamo: kukuruz, šećernu repu, šećernu trsku, pšenicu, sirak i krumpir. Korjenaste i gomoljaste škrobne sirovine najčešće se upotrebljavaju kao osnovne prehrambene namirnice. Ove sirovine i njihovi produkti lako se mogu fermentacijom pretvoriti u etanol i njemu slične alkohole za uporabu u prijevozu.

Vlaknaste travnate celulozne sirovine su sijeno i ispaša te različiti energetski nasadi. Ovu skupinu sirovina karakterizira visoki udio vlakana (celuloze, hemiceluloze i lignina) te nizak udio ugljikohidrata, masti i bjelančevina. Iz ovih je sirovina moguće proizvesti energiju primjenom različitih metoda: izgaranjem (proizvodnja struje i topline), konverzijom celuloze u etanol, termokemijskom proizvodnjom dodataka fosilnim gorivima ili anaerobnom digestijom metana. Uljne kulture ili uljarice (uljana repica, suncokret, soja, lan, ricinus, palma, kokos, kikiriki, konoplja, alge i dr.) mogu dati ulje ekstrakcijom - drobljenjem zrna/sjemena i cijeđenjem ulja, nakon čega je transesterifikacijom moguće proizvesti biodizel.

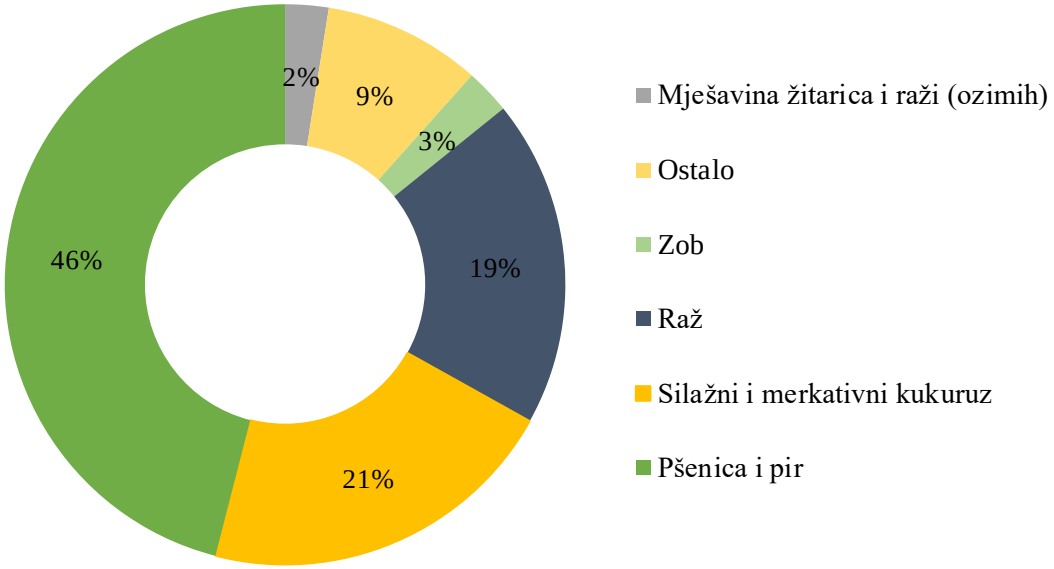
Drvo i drvna biomasa stoljećima se upotrebljavaju za proizvodnju struje i topline, kao izvor goriva za uplinjavanje te konverziju celuloze u etanol. U novije je vrijeme sve više „energetskih šuma“ ili „drvnih energetskih farmi“ na kojima se uzgajaju drvni nasadi za proizvodnju energije. Energetski nasadi namjenski su uzgojene jednogodišnje ili višegodišnje trave ili brzorastuće drveće od kojega se potom dobiva biomasa koja se koristi kao gorivo. Kada se radi o šumskoj biomasi, za njezino su dobivanje najprikladniji energetski nasadi drveća koje brzo raste, kao što su topola, vrba, platana, joha, rogač i sl.

U žetvene se ostake ubrajaju ostatci od žetve (listovi, slama, klipovi...), različite vrste gnojiva te ostatci od proizvodnje i prerade hrane i komunalni otpad (otpadna jestiva ulja, masnoće, muljevi...).

3.2.1. Žetveni ostatci

Žetveni ostatci predstavljaju sekundarni ostatak biomase nakon skidanja primarnoga uroda te imaju značajnu ulogu u održavanju plodnosti tla i sprječavanju erozije tla. U žetvene se ostatke

ubrajaju slama žitarica (pšenična, ječmena, kukuruzna…), slama uljarica (sojina slama, slama uljane repice, slama suncokreta) te ostatci industrijskih biljaka kao što su šećerna repa, industrijska konoplja i maslinova komina. U Europskoj se uniji godišnje proizvodi oko 308 milijuna tona žitarica. Struktura zastupljenosti pojedinih žitarica u EU prikazana je na slici 3.3.



Slika 3.3: Struktura proizvodnje žitarica u EU (%) (Eurostat, 2018)

Žetveni ostatci najveći su dio ukupne godišnje proizvodnje biomase. Njihova suha tvar sadrži 15 - 60% celuloze, 10 - 30% hemiceluloze, 5 - 30% lignina, 2 - 15% proteina, do 10% topljivih tvari (kao što su šećeri, amino kiseline, amino šećeri i organske kiseline) te 40 - 50% ugljika. (Harmsen et al., 2010, Shahzadi et al., 2014).

Žetveni ostatci žitarica predstavljaju najznačajniji potencijal poljoprivredne biomase. Ipak, nisu svi žetveni ostatci raspoloživi za uporabu kao izvor energije. Prilikom planiranja žetvenih ostataka potrebno je voditi računa o minimalnim količina slame radi zaštite tla od erozije i poboljšanja strukture tla. Potrebno je ostaviti minimalno 30% žetvenih ostataka na poljoprivrednim površinama kako ne bi došlo do gubitka organske tvari u tlu. Potrebna količina žetvenih ostataka koja će biti ostavljena ovisi o vrsti tla i nagibu (Harrison et al., 2014). Kod pjeskovitih je tala potrebno ostaviti slame oko 2 do 2,5 t/ha, gline 1,15 do 1,7 t/ha, a ilovače 0,8 do 1,15 t/ha. Za potrebe stočarske proizvodnje potrebno je osigurati oko 0,38 - 0,8 t po uvjetnom grlu (UG) goveda. Računa li se kao optimalan broj, dva uvjetna grla po hektaru, tada za potrebe stočarske proizvodnje treba računati oko 0,8 - 1,6 t slame po hektaru. Minimalni broj UG-a po ha za ostvarivanje prava na poticaj određen je Pravilnikom o provedbi izravne potpore poljoprivredi i IAKS mjerom ruralnoga razvoja za 2019. godinu (Ministarstvo poljoprivrede, 2019).

Količina se žetvenih ostataka može približno procijeniti uz pomoć žetvenoga indeksa (omjera biološkoga i merkantilnoga prinosa). Uobičajeni žetveni indeks za pšenicu i ječam je 1,5; za kukuruz, soju i zob 1,0; za krumpir i šećernu repu 0,25. Dakle, uz prinos pšenice od 5 t/ha treba računati sa 7,5 t/ ha slame, uz prinos kukuruza od 10 t/ha jednaka je i količina žetvenih ostataka,

dok šećerna repa uz prinos korijena od 60 t/ha ostavlja 15 t/ha glava i lišća (Veseth, 1984, Sokhansanj et al., 2006).

Pšenica (Triticum aestivum) je najvažniji ratarski usjev, a uzgaja se na oko 23% svjetskih obradivih površina. Dobro se prilagođava tlu i klimi i uzgaja gotovo posvuda jer može biti i ozima i jara kultura. Ubrajamo ju u prave (strne) žitarice. Postoji mnogo vrsta i kultivara pšenice. Pšenična slama kao energent može se upotrijebiti za proizvodnju bioetanola, dobra je sirovina za fermentacijske procese (proizvodnju bioplina), ali se prije fermentacije mora obraditi termički ili enzimatski. Balirana se slama kao energent koristi u termoelektranama, dok je za grijanje domaćinstava praktičnije upotrebljavati brikete i pelete od slame.

Prinos slame ovisi o puno čimbenika: vrsti i kultivaru, agrotehničkim uvjetima, prihrani, zaštiti, utjecaju lokaliteta i godine te načinu rada kombajna.



Slika 3.4: Pšenica (Triticum aestivum)

Budući da se dosta koristi u prehrani ljudi i hranidbi stoke, rijetko se pojavljuje u suvišku (mali broj zemalja ostvaruje viškove ove kulture dovoljne za proizvodnju bioetanola).

Količina žetvenih ostataka može se približno procijeniti uz pomoć žetvenoga indeksa (omjera biološkoga i merkantilnoga prinosa). Žetveni indeks za pšenicu je od 0,75 do 1,6. Kod prinosa pšenice od 5 t/ha treba računati sa 3,75 - 8 t/ha slame.

Gornja ogrjevna vrijednost slame pri 15% suhe tvari iznosi 17,5 GJ/t ili oko 65 do 140 GJ/ha (Alakangas et al., 2007).

Uvažavajući potrebe stočarske proizvodnje i zaštite tla, slobodna količina slame za proizvodnju energije je oko 30%. Slama kao energent koristi se spaljivanjem cijelih bala ili peleta i za proizvodnju biogoriva (bioetanola i bioplina).

Ječam (*Hordeum vulgare L.*) se uglavnom koristi kao stočna hrana jer posjeduje visoku hranidbenu vrijednost. U hranidbi stoke ječam se upotrebljava kao prekrupa i miješa se s ostalim zrnatim kulturama, a količina ječma u smjesi ovisi o vrsti i načinu hranidbe životinja. U industriji se rabi prvenstveno u proizvodnji piva i alkohola jer daje kvalitetan slad. Slad ječma rabi se u pekarskoj, konditorskoj i tekstilnoj industriji, u proizvodnji kvasca, škroba i dr. Prinos ječma u prosjeku je oko 4 t/ha, a žetveni je indeks 1,5. Kod proizvodnje od 4 t/ha zrna treba računati do 6 t/ha slame. Gornja ogrjevna vrijednost slame ječma pri 15% suhe tvari iznosi 16,2 GJ/t ili oko 97 GJ/ha (Alakangas et al., 2007).



Slika 3.5: Ječam

Potrebno je uvažavati potrebe stočarske proizvodnje i zaštite tla, te je slobodna količina slame za proizvodnju energije oko 30%. Slama ječma kao energent može se koristi spaljivanjem cijelih bala ili peleta i za proizvodnju biogoriva (bioetanola i bioplina).

Raž (*Secale cereale*) je žitarica po proizvodnji rangirana na osmom mjestu na svjetskim oranicama. Nakon pšenice predstavlja drugu krušaricu.



Slika 3.6: Raž (KWS, 2020)

Raž ima za cca 2 - 4% manje škroba nego pšenica, ali unatoč tomu vrlo je važna sirovina za proizvodnju bioetanola. Sve vrste raži sadrže visoko aktivan amilolitički enzimatski sustav, no

katkad i pentozane koji povećavaju viskozitet kaša i stvaraju izvjesne probleme tijekom fermentacije.

Postoje ozime i jare forme raži. Prosječan prinos raži u svijetu je oko 2 t/ha, a najveći se postižu u zapadnoeuropskim zemljama (Nizozemska oko 5 t/ha, Danska, Njemačka i Švicarska 4,5 t/ha).

Prinos raž u prosjeku je oko 4,5 t/ha, a žetveni je indeks 1,5. Kod proizvodnje od 4,5 t/ha zrna treba računati do 6,75 t/ha slame.

Donja ogrjevna vrijednost slame raži pri 15% suhe tvari iznosi 15,84 GJ/t ili oko 100,17 GJ/ha (Kovačević, 2018).

Slama raži kao energent se može koristi isto kao i kod ostalih žitarica, spaljivanjem cijelih bala ili peleta i za proizvodnju biogoriva (bioetanola i bioplina).

Kukuruz (*Zea mays*) je jednogodišnja biljka podrijetlom iz Srednje Amerike. Kukuruz se uzgaja u cijelom svijetu, a područje uzgoja vrlo mu je veliko, što omogućuje različita duljina vegetacije, raznolika mogućnost upotrebe i sposobnost kukuruza da uspijeva na lošijim tlima i u lošijim klimatskim uvjetima. Po zasijanim površinama kukuruz je treća svjetska kultura, nakon pšenice i riže. U svijetu se gotovo polovica proizvodnje ove biljke koristi za hranidbu stoke, a sve više i intenzivnije i za proizvodnju bioetanola. Spada u C_4 biljke, što znači da izravno proizvodi C_4 šećer, a ne preko C_3 kao neke druge biljke. Zbog toga kukuruz jako dobro koristi Sunčevu svjetlost proizvodeći velike količine šećera koji je vrlo značajan u proizvodnji biogoriva. Sve navedeno ukazuje na to da se kukuruz praktički može izdvojiti kao biljka s najboljim karakteristikama za proizvodnju biogoriva, promatrano po jedinici površine.

Danas se proizvodi više od 500-njak različitih prerađevina ove biljke. Osim toga, statusu vrlo raširene biljne vrste sigurno je pridonijela i činjenica da se gotovo svi njezini dijelovi mogu iskoristiti. Prinos kukuruza ovisi o načinu uporabe, ali i vremenu berbe. Prinosi kukuruza mogu znatno varirati jer ovise o mnogo čimbenika, no kreću se u proizvodnji zrna 8-15 t/ha, a prinosi su silažne mase 40 - 60 t/ha. Prinos kukuruzovine na bazi prinosa zrna kreće se od 14 do 26 t/ha, a oklaska od 8 do 14 t/ha (Babić et al., 2010).



a) b)

Slika 3.7: Kukuruzovina (a) i peleti od kukuruzovine (b)

Kukuruz se koristi za proizvodnju energije na različite načine. Za proizvodnju bioetanola koristi se uglavnom zrno. Za 1 t bioetanola potrebno je utrošiti od 2,5 do 3,2 t zrna kukuruza. Od jedne tone kukuruzne silaže može se dobiti oko 180 do 250 m^3 bioplina.

Energetska vrijednost kukuruzovine je oko 16 MJ/kg, a oklaska oko 19 MJ/kg (Bilandžija et al., 2017)

Soja (*Glycine max*) pripada mahunarkama i jedna je od poljoprivrednih kultura s najširim spektrom uporabe. Koristi se u proizvodnji ulja, hranidbi svih vrsta stoke te u prehrambenoj industriji. Uspijeva u svim proizvodnim područjima koja pogoduju i kukuruzu, a za normalan rast i razvoj zahtijeva minimalnu količinu oborina od 600 do 700 mm/god. U proizvodnji soje treba izbjegavati uzgoj u monokulturi.

Prinosi se najčešće kreću u rasponu od 2,5 do 5 t/ha, premda se može ostvariti i više. U sjemenu sadrži 40% bjelančevina, 18 - 20% ulja, više od 30% raznih ugljikohidrata, razne vitamine i minerale. Zbog toga je vrlo značajna sirovina i u prehrani ljudi (bjelančevine soje najsličnije su bjelančevinama animalnoga podrijetla).



Slika 3.8: Soja (*Glycine max*)

Iako zrno soje sadrži manje ulja od suncokreta, prednost soje je u tom što za proizvodnju zahtijeva vrlo malo ili gotovo nimalo dušika. Stoga možemo pretpostaviti da je soja prikladnija za proizvodnju biodizela.

Prednost soje u odnosu na suncokret je i u tom što daje veće prinose - oko 2668 kg/ha naspram suncokreta koji daje oko 1500 kg/ha. Proizvodnja soje od 2668 kg/ha zahtijeva input od otprilike tri milijuna kcal/ha i troškove od 537 $/ha. Uzmemo li da je udio ulja u zrnu soje 18%, možemo računati da će nam za proizvodnju 1000 kg ulja trebati 5556 kg zrna. Istraživanjima je utvrđeno da je biodizel proizveden iz soje 2,8 puta skuplji u odnosu na obično dizel gorivo. Uobičajeni žetveni indeks za soju je 1, a prinos sojine slame je 2,5 - 3 t/ha. Kalorična vrijednost sojine slame je od 16 do 17 MJ/kg ili oko 40 do 51 GJ/ha (Kiš et al., 2013).

Sojino zrno koristi se za proizvodnju biodizela, a slama se spaljuje u balama ili peletira.

Suncokret (*Helianthus annuus*) predstavlja iznimno važnu industrijsku poljoprivrednu kulturu. Koristi se u prehrambenoj industriji (proizvodnja ulja, margarina, brašna i sl.), kemijskoj industriji (sapun, glicerol i dr.) i farmaceutskoj industriji (lijekovi i kozmetički proizvodi). Tijekom prerade ove biljke dobivamo nusproizvode koji predstavljaju važnu komponentu stočne hrane (pogače i sačma, glave, čitave biljke - proizvodnja silaže). Nutritivno je vrlo bogat. Jezgra sjemena (bez ljuske) sadrži do čak 60% ulja, 24% proteina, 3% vlakana, 10% NET-a i 3% minerala. S obzirom na ovoliku zastupljenost ulja, suncokret se uglavnom i koristi kao sirovina za proizvodnju istoga (Lešić and Hrgović, 2000, Darby et al., 2019).

Obični domaći suncokret *Helianthus annuus* naraste 2 - 3 metra, stabljika mu je uspravna, hrapava, kao i veliki srcoliki listovi. Cvijet mu je žute, narančaste ili crvenkasto smeđe boje, s tamnom - crnom ili sivozelenom - bojom u sredini. Može biti jednostavan ili dvostruki - puni cvijet. Cvate od početka srpnja pa sve do listopada, ovisno o podneblju u kojem raste. Cvijet se koristi i kao rezana biljka. Cvjetovi mogu dosegnuti i više od 40 cm u promjeru, sa 100 - 8000 sjemenki. Raspored sjemenki na glavi suncokreta savršeno je smještanje najvećega mogućega broja sjemenki na ograničenoj površini u spiralama.

Prosječni urodi sjemena suncokreta kreću se od 2,5 do 3 t/ha, a mogući su i do 4 t/ha. Prinos se računa i u kg/ha ulja, a kreće se od 1500 do 2000 kg/ha sirovoga ulja. To je značajno niži prinos od onoga soje i kukuruza po istoj jedinici površine. Proizvodnja od 1,5 t/ha sjemena zahtijeva energetski input fosilnih goriva od 6,1 milijun kalorija. Omjer kalorijski input:output pri tom iznosi 1:0,76, što znači da je negativan. Suncokretovo sjeme ima veći udio ulja od sojinoga (26% u suncokretovu sjemenu, u odnosu na 18% u sojinom). Da bismo proizveli 1000 kg suncokretovoga ulja, moramo utrošiti 3929 kg sjemena suncokreta s energijskim inputom od 9 milijuna kcal. Utvrđeno je da pri tom troškovi koštanja 1 kg suncokretovoga ulja iznose 1,66 $ (Darby et al., 2019).

Za proizvodnju biodizela pomoću suncokretovoga ulja potrebno je 118% više energije od fosilnih goriva proizvedenoga biodizela.

Sjeme suncokreta koristi se za proizvodnju biodizela, a stabljika suncokreta je neiskorišteni potencijal biomase.

Sirak (*Sorghum vulgare*) je peta žitarica u svijetu u rangu po proizvodnji i požnjevenoj površini. U nekim dijelovima svijeta, poput Afrike, predstavlja glavnu namirnicu u prehrani ljudi. Koristi se u ishrani stoke te u industriji (škrob, alkohol, ulje, šećerni sirup) te za izradu četki i metli. Zelena masa i sijeno koriste se u hranidbi stoke (tzv. sudanska trava) (Kovačević and Rastija, 2014).
Vrlo se lako prilagođava zemljišnim i klimatskim uvjetima, stoga se uzgaja na svim kontinentima. Najveći proizvođači su Indija, Kina i SAD. Sirak obiluje škrobom (kao i kukuruz), ali mu škrob sadrži oko 25% amiloze te cca 75% amilopektina. Godišnji prinos suhe tvari sirka je oko 28 t/ha. Kalorična vrijednost mu je od 16 do 17 MJ/kg ili kroz dva godišnja otkosa oko 170 GJ/ha (Kralik et al., 2015). Od jedne tone sirka može se proizvesti oko 350 litara bioetanola (Lević et al., 2007) ili oko 330,4 m^3/t bioplina (Kralik et al., 2015).



Slika 3.9: Sirak *(Sorghum vulgare)*

Šećerna repa (*Beta vulgaris altissima*) važna je poljoprivredna kultura, ekonomski zanimljiva zbog visokoga prinosa. Prema literaturnim podatcima, prinosi šećerne repe iznose od 40 do 90 t/ha, pa i više (Pospišil et al., 2017). U istraživanjima provedenima na 42 hibrida šećerne repe, prinos je u rasponu od 61 do rekordnih 101,54 t/ha. Vremenski uvjeti (godina) imaju značajan utjecaj na prinos i tehnološku kvalitetu šećerne repe. Uz osnovnu proizvodnju šećera, nusproizvodi su šećerne repe suhi ili mokri rezanci šećerne repe, melasa, lišće i glava. Prije upotrebljavani kao stočna hrana, danas lišće i glave ostaju na oranicama kao zelena gnojidba. Zbog energetskih kriza u svijetu, šećerna repa postaje sve zanimljiviji energetski usjev za proizvodnju biogoriva. Nakon vađenja i manipulacije šećernom repom, ostaju glava i lišće koji se mogu upotrijebiti kao jeftina sirovina za proizvodnju biogoriva. Pri prinosu korijena šećerne repe od 60 t/ha ostavlja se oko 15 t/ha glava šećerne repe s lišćem (Bukvić et al., 2008).



a) b)

Slika 3.10: Šećerna repa *(Beta vulgaris altissima)* (a) i repini rezanci (b)

Pri proizvodnji rafiniranoga šećera iz šećerne repe kao nusproizvodi nastaju melasa i repini rezanci. Melasa sadrži 45 - 50% šećera, ali i visokovrijedne minerale i vitamine.

Iz sirovoga soka i sirovih rezanaca šećerne repe može se dobiti i etanol. Iz sirovoga je soka prinos etanola iznosio 59,89 g/l, a iz sirovih rezanaca šećerne repe 54,53 g/l (Goldemberg and

Guardabassi, 2010). Proizvodnja bioplina iz glava šećerne repe kreće se od 0,31 do 0,55 m^3/kg suhe tvari (Brdarić et al., 2010).

Krumpir (*Solanum tuberosum*) zeljasta je biljka karakterističnoga oblika gomolja, podrijetlom iz Srednje Amerike. U Europu su ga koncem 16. stoljeća donijeli Španjolci i Englezi. U Hrvatsku je donesen najvjerojatnije 1769. godine. Bio je i ostao nezamjenjivo povrće za ljudsku i stočnu ishranu, kao i za industrijsku preradu (Kantoci, 2007).



Slika 3.11: Krumpir (*Solanum tuberosum*)

U istočnoj Europi i Njemačkoj koriste se velike količine krumpira za proizvodnju bioetanola. Sadrži oko 80% vode i 20% škroba te je iznimno dobra sirovina za fermentacijske procese. Nedostatak krumpira kao sirovine problem je skladištenja. Tijekom skladištenja krumpira dolazi do značajnih gubitaka. Istraživanjima je utvrđeno da se pri standardnim uvjetima skladištenja tijekom šest mjeseci izgubi oko 8% škroba, a nakon osam mjeseci čak 16,5% (Lević et al., 2007). Prinosi krumpira kreću se od 40 do 60 t/ha (Pospišil et al., 2017). Krumpir je pogodna sirovina za proizvodnju bioplina, jer je po jednom hektaru moguće proizvesti 8855 m^3 bioplina ili 40.733 kWh/ha (Liang and McDonald, 2015).

Čičoka (*Helianthus tuberosus*), poznata još i kao jeruzalemska artičoka, krtola, zemljina kruška, divlji krumpir itd., višegodišnja je zeljasta biljka, slatkoga gomolja i nepravilnoga oblika. U gomolju ne sadrži škrob, poput krumpira, nego inulin, te se baš zbog toga preporučuje u prehrani dijabetičara. Prosječan prinos gomolja je 25 do 35 t/ha, a zelene mase od 27 do 35 t/ha. Lević et al. (2007) navode da prinos gomolja može dosegnuti i 50 t/ha.

Podrijetlom je iz Južne Amerike, a uzgaja se i u našim područjima. Otporan je na štetočine i razne bolesti, a uspijeva i na siromašnijim tlima. U gomoljima sadrži do 80% vode, a u suhoj tvari oko 17% ugljikohidrata, od čega dominantan udio zauzima već spomenuti inulin (Lević et al., 2007).



Slika 3.12: Cvijet čičoke *(Helianthus tuberosus L.)* (Plantea, 2020)

Onsoy et al. (2007) navode da je čičoka jedna od najpogodnijih biljaka za proizvodnju etanola. Od 100 kg gomolja ove biljke može se proizvesti 8 - 10 litara etanola. Za proizvodnju bioplina pogodna je cijela biljka: iz gomolja se može proizvesti 50,46 m^3/t bioplina, a iz nadzemnoga dijela 82,89 m^3/t (Kralik et al., 2016).

Industrijska konoplja (*Cannabis sativa L*) kao poljoprivredna kultura je izuzetno zanimljiva jer nema bolesti i štetnika, pa su u njezinu uzgoju pesticidi nepotrebni. Prinos suhe stabljike po hektaru je oko deset tona, a sjemena od 1 do 2 t/ha. Uzgoj konoplje nema velike zahtjeve za vodom i hranjivima, ne zahtijeva uporabu pesticida i herbicida. Od jednoga kvadratnoga metra konoplje dobije se 2-3 puta više vlakana nego od kvadratna metra pamuka. Vlakno dobiveno od konoplje je mekše i čvršće, traje dvostruko duže nego pamučno. Industrijska konoplja koristi se u proizvodnji papira i bogat je izvor proteina, koji su jednako hranjivi, no ekonomski mnogo isplativiji od sojinih. Sve proizvode od soje moguće je napraviti i od konoplje.

Konopljin beton (hempcrete) građevni je materijal koji se proizvodi od usitnjenih unutrašnjih vlakana stabljike. Pomiješana s vapnom, mljevenom drozgom ili drugim dodatcima, vlakna stvaraju celulozni cement koji je lakši od konvencionalnih materijala, ali s poboljšanim svojstvima toplinske i zvučne izolacije. Bioplastika od konoplje upotrebljavala se za izradu autokaroserija, koja je bila šest puta lakša od čelične, a imala je deset puta veću otpornost na sudare.

Budući da biljka sadrži oko 70% celuloze, pogodna je za proizvodnju biogoriva. Energetske karakteristike konoplje su 296 GJ/ha za bioplin i 246 GJ/ha kao kruto gorivo. Konoplja daje jednako ili više energije od većine energetskih usjeva uobičajenih u sjevernoj Europi (Crnac, 2016).



Slika 3.13: Industrijska konoplja

Miskantus *(Miscanthus x giganteus)* pripada sorti trstike i višegodišnja je kultura, vrlo ekonomična i ekološka biljka. Eksploatacija miskantusa traje 20 - 30 godina od sadnje, što znači da nakon što ju posadite, idućih ju 20 godina nećete morati ponovno saditi ni ponovno uzgajati. Za potpuno uspostavljanje plantaža pod miskantusom i postizanje maksimalne stope prinosa potrebno je tri do šest godina. Godišnji prinos iznosi 20 - 25 t/ha zemljišta. Prinosi žetve dostižu maksimum nakon tri do pet godina (Anderson et al., 2011).

Prinosi miskantusa u velikoj mjeri ovise o lokaciji i klimatskim uvjetima. Najveći su prinosi zabilježeni u Južnoj Europi, gdje voda nije bila ključni čimbenik. Veliki broj plantaža pokazao je značajne razlike u prinosima suhe mase, od 4 do 25 t/ha u zemljama središnje Europe, a od 30 do 40 t/ha u južnoeuropskim zemljama (Dražić et al., 2010). Prinos bioplina iz miskantusa iznosi 146,04 m^3/t (Rukavina, 2019).



Slika 3.14: Miskantus *(Miscanthus x giganteus)* (Rukavina, 2019)

3.3. Potencijal biomase kao obnovljivog izvora energije

Problematika opskrbe energijom uvijek je aktualna i prisutna, kako među proizvođačima i distributerima, tako i među potrošačima, i to na globalnoj razini. Fosilna goriva kao neobnovljivi izvori energije još uvijek dominiraju na tržištu. Ipak, u posljednje vrijeme sve više nailazimo i na alternativna goriva, čija proizvodnja i upotreba zauzima sve veći broj pristaša. Razlozi za to su brojni. Primjerice, predviđa se da će svjetske naftne zalihe biti iscrpljene u narednih 50 - 100 godina nastavi li se iskorištavanje dosadašnjim intenzitetom. Istodobno, s povećanjem broja stanovnika, nezaustavljivo raste i potrošnja nafte, a time i njezina cijena, što zasigurno potiče na osmišljavanje novih rješenja. Nadalje, svjedoci smo sve izraženijih klimatskih i ekoloških promjena koje su posljedica povećane emisije CO_2. Ove promjene utječu na okoliš, a samim tim i poljoprivredu i energetiku (Krička et al., 2006).

S ciljem redukcije i usporavanja negativnih promjena na našem planetu moralo se pribjeći alternativnim rješenjima. U prilog svemu navedenomu ide i činjenica da zemlje OPEC-a (Organization of the Petroleum Exporting Countries) drže monopol u trgovini naftom (Krička et al., 2006) pa je većina zemalja svijeta ovisna o njima. Procjenjuje se da je na području zemalja članica OPEC-a oko dvije trećine svjetskih zaliha nafte, a one trenutačno pokrivaju oko 40% svjetskoga tržišta nafte. Taj je podatak dobar argument zašto su alternativna goriva sve popularnija. Dakle, između ostaloga, cilj proizvodnje biogoriva bio bi smanjiti ovisnost o zemljama izvoznicama nafte i zemnoga plina. Zemlje EU-a po tom su se pitanju dosta angažirale, što je rezultiralo donošenjem mnogobrojnih uredbi i direktiva o razvitku spomenutih goriva, kao i njihovoj neizostavnoj potrošnji u prometu (Krička et al., 2006).

Biomasa je jedini obnovljivi izvor energije iz kojega je moguće proizvesti visokovrijedna tekuća i plinovita goriva (Krička et al., 2006). To su goriva koja mogu biti proizvedena izravno iz biljaka (tzv. „energetske biljke“, koje su ujedno i tematika ovoga rada) ili, pak, neizravno, iz industrijskoga, poljoprivrednoga, domaćega i komercijalnoga otpada. U poljoprivredne kulture koje se neposredno upotrebljavaju za proizvodnju biogoriva ubrajamo: kukuruz, šećernu trsku i repu, pšenicu, sirak, krumpir, uljanu repicu, suncokret, soju, palmu i dr. Zapravo, danas se traže kulture koje će proizvesti što je moguće „više kilometara po hektaru“, ne ograničavajući zalihe hrane i pri tom ne iscrpljujući nutrijente iz tla (Rozman et al., 2009). Koliko je ovakva proizvodnja opravdana, danas se u svijetu još uvijek polemizira. Pretpostavlja se da bi ovakva proizvodnja biogoriva, dakle izravno iz poljoprivrednih kultura, mogla ozbiljno konkurirati proizvodnji hrane te ujedno i podići cijenu hrane na tržištu, a to bi, kako navode Rozman et al. (2009), tek neznatno smanjilo emisiju stakleničkih plinova. Ipak, u budućnosti će se morati intenzivirati uporaba obnovljivih izvora energije, na čemu se danas zapravo i radi. Tako se otvaraju novi proizvodni pogoni, a samim tim usputno povećava i broj radnih mjesta. To zasigurno dpridonosi poboljšanju infrastrukture nekih regija. Bilo kako bilo, prostora za ovakve pothvate zasigurno ima.

Reference:

ALAKANGAS, E., HEIKKINEN, A., LENSU, T. & VESTERINEN, P. 2007. *Biomass fuel trade in Europe: Eubionet II Summary Report EIE/04/065/S07.38628*. VTT Tutkimusraportti. Jyväskylä, VTT Technical Research Centre of Finland.

ANDERSON, E., ARUNDALE, R., MAUGHAN, M., OLADEINDE, A., WYCISLO, A. & VOIGT, T. 2011. *Growth and agronomy of Miscanthus x giganteus for biomass production*. Biofuels, 2**,** 71.-87.

BABIĆ, S., DESPOTOVIĆ, M. Z. & MILOSAVLJEVIĆ, B. 2010. *Analysis of the energy balance of biogas production from maize silage in Serbia*. u*:* ARSOVSKI, S., LAZIĆ, M. & STEFANOVIĆ, M. (ur.), Quality Festival 2010, Kragujevac, Srbija. Mašinski fakultet i Centar za kvalitet.

BILANDŽIJA, N., JURIŠIĆ, V., MATIN, A., KRIČKA, T., GRUBOR, M., ANTONOVIĆ, A., VOĆA, N. & SLIPČEVIĆ, D. 2017. *Piroliza orezanih ostataka važnijih mediteranskih voćnih kultura - energetska karakterizacija biougljena*. u*:* VILA, S. & ANTUNOVIĆ, Z. (ur.), 52 Hrvatski i 12 međunarodni simpozij agronoma, Dubrovnik, Hrvatska. Poljoprivredni fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 632.-636.

BRDARIĆ, D., KRALIK, D., KUKIĆ, S., URANJEK, N. & JOVIČIĆ, D. 2010. *Proizvodnja bioplina iz svinjske gnojovke i siliranih glava šećerne repe*. Krmiva: Časopis o hranidbi životinja, proizvodnji i tehnologiji krme, 52**,** 195.-199.

BUKVIĆ, Ž., KRALIK, D., MILAKOVIĆ, Z., BOGUT, I. & MILOŠ, S. 2008. *Employment of Sugar Beet Head for Biogas Production*. Cereal Research Communications, 36**,** 575.-578.

CRNAC, V. 2016. *Utvrđivanje bioplinskog potencijala industrijske konoplje*, diplomski rad, Svaučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet u Osijeku

DARBY, H., HALTEMAN, P. & GRUBINGER, V. 2019. *Sunflowers for Biofuel Production* [Online]. Missouri, USA: eXtension Farm Energy. dostupno: https://farm-energy.extension.org/sunflowers-for-biofuel-production/ [pristupljeno 25. 4. 2020].

DRAŽIĆ, G., SEKULIĆ, S., MILOVANOVIĆ, J. & ALEKSIĆ, J. 2010. *Master plan plantaže energetskog useva Miscanthus x giganteus*. Energ. Ekon. Ekol, 2**,** 96.-99.

EUROSTAT. 2018. *Database* [Online]. Luksemburg, dostupno: https://ec.europa.eu/eurostat/data/database [pristupljeno 15. 9. 2019].

GOLDEMBERG, J. & GUARDABASSI, P. 2010. *The potential for first-generation ethanol production from sugarcane*. Biofuels, Bioproducts & Biorefining, 4**,** 17.-24.

HARMSEN, P. F. H., HUIJGEN, W., BERMUDEZ, L. & BAKKER, R. 2010. *Literature review of physical and chemical pretreatment processes for lignocellulosic biomass*. Wageningen: Wageningen UR - Food & Biobased Research.

HARRISON, P., MALINS, C., SEARLE, S., BARAL, A., TURLEY, D. & HOPWOOD, L. 2014. *Wasted: Europe's untapped resource*. Washington, SAD, International Council on Clean Transportation.

KANTOCI, D. 2007. *Savjeti za uzgoj krumpira*. Glasnik zaštite bilja, 30**,** 25.-28.

KIŠ, D., SUČIĆ, B., ŠUMANOVAC, L. & ANTUNOVIĆ, M. 2013. *Energetska i fertilizacijska vrijednost žetvenih ostataka soje*. Poljoprivreda, 19**,** 48.-52.

KOVAČEVIĆ, L. 2018. *Piroliza poslježetvenih ostataka zobi, ječma i raži*, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet

KOVAČEVIĆ, V. & RASTIJA, M. 2014. *Žitarice (Cereals),* Osijek, Hrvatska, Poljoprivredni fakultet u Osijeku.

KRALIK, D., GANTNER, R., POPOVIĆ, B., JOVIČIĆ, D., KOVAČIĆ, Đ. & BOKUN, D. 2015. *Komparacija proizvodnje bioplina iz siliranog sirka i kukuruzne silaže*. 50 Hrvatski i 10 međunarodni simpozij agronoma, Zagreb, Hrvatska, Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, 167.-168.

KRALIK, D., KOVAČIĆ, Đ., JOVIČIĆ, D., SPAJIĆ, R. & BELJAN, B. 2016. *Iskorištavanje biomase čičoke u proizvodnji bioplina*. u*:* LULIĆ, S. (ur.), 23. međunarodno savjetovanje Krmiva, 2016 Opatija, Hrvatska, Krmiva d.o.o. Zagreb, 85.

KRIČKA, T., VOĆA, N., JUKIĆ, Ž., JANUŠIĆ, V. & MATIN, A. 2006. *Iskustva u proizvodnji i iskorištavanju obnovljivih izvora energije u Europskoj uniji*. Krmiva: Časopis o hranidbi životinja, proizvodnji i tehnologiji krme, 48**,** 49.-54.

KWS. 2020. *KWS TAYO* [Online]. Osijek, Hrvatska, KWS Sjeme d.o.o. dostupno: https://www.kws.com/hr/hr/proizvodi/zitarice/raz/kws-binntto/ [pristupljeno 10. 7. 2020].

LEŠIĆ, L. & HRGOVIĆ, S. 2000. *Suncokret*. Zagreb, Hrvatska, Hrvatski zavod za poljoprivrednu savjetodavnu službu.

LEVIĆ, L., LEVIĆ, J., SREDANOVIĆ, S., ĐURAGIĆ, O., KULJANIN, T. & ČOLOVIĆ, R. 2007. *Bioetanol kao gorivo - stanje, perspektive i tehnologija proizvodnje*. Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi/*PTEP,* 11**,** 198.-202.

LIANG, S. & MCDONALD, A. G. 2015. *Anaerobic digestion of pre-fermented potato peel wastes for methane production*. Waste Management, 46**,** 197.-200.

MINISTARSTVO POLJOPRIVREDE 2019. *Pravilnik o provedbi izravne potpore poljoprivredi i IAKS mjera ruralnog razvoja za 2019. godinu*. Narodne novine br. 21/2019.

ONSOY, T., THANONKEO, P., THANONKEO, S. & YAMADA, M. J. 2007. *Ethanol production from Jerusalem artichoke by Zymomonas mobilis in batch fermentation*. Current Applied Sscience Techonology, 7**,** 55.-60.

PLANTEA. 2020. *Helianthus tuberosus* [Online]. Plantea. dostupno: https://www.plantea.com.hr/cicoka/ [pristupljeno 14. 5. 2020].

POSPIŠIL, A., POSPIŠIL, M. & ŠVENCBIR, M. 2017. *Influence of organic and mineral fertilizers on agronomic traits of potato*. Poljoprivreda, 23**,** 11.-16.

ROZMAN, V., KIŠ, D. & KRALIK, D. 2009. *Gorivo iz poljoprivrednih proizvoda za i protiv (Crop based fuel - advantages and disadvantages)*. u*:* KORUNIĆ, Z. (ur.). seminar DDD i ZUPP 2009 - slijedimo li svjetski razvoj, Zadar, Hrvatska. Korunić d.o.o., 53.-67.

RUKAVINA, J. 2019. *Mogućnost proizvodnje bioplina iz miskantusa (Miscanthus x Gigantheus).* diplomski rad, Svaučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet u Osijeku

SHAHZADI, T., MEHMOOD, S., IRSHAD, M., ANWAR, Z., AFROZ, A., ZEESHAN, N., RASHID, U. & SUGHRA, K. 2014. *Advances in lignocellulosic biotechnology: A brief review on lignocellulosic biomass and cellulases*. Advances in Bioscience Biotechnology, 5**,** 246.-251.

SOKHANSANJ, S., MANI, S., STUMBORG, M., SAMSON, R. & FENTON, J. 2006. *Production and distribution of cereal straw on the canadian prairies*. Canadian Biosystems Engineering, 48**,** 39.-46.

VESETH, R. 1984. *Fertility Management for No-till and Minimum Tillage Systems*. Pacific Northwest Consevation Tillage Handbook. Washington, SAD: Pacific Northwest.

VOLPI, G. 2011. *The role of bioenergy in the European Union* [Online]. Global Bioenergy Partnership (GBEP). dostupno: http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/2011_events/Bioenergy_Conference_Rome_10-12Nov2011/5-_Day3_Volpi.pdf [pristupljeno 20. 6. 2020].

WORLD ENERGY COUNCIL (WEC). 2004. *EU Biomass Policy* [Online]. RESbroker International N.V. . dostupno: https://resbroker.wordpress.com/projects-for-sale-2/biomassbiofuel/ [pristupljeno 26. 6. 2020].

4. PRIMJENA PEPELA BIOMASE U CEMENTNIM KOMPOZITIMA

Sažetak: Primjena pepela biomase u cementnim kompozitima najviše je istraživana primjena ovoga nusproizvoda u građevnim proizvodima. Ovo poglavlje prikazuje učinke uporabe alternativnih materijala za proizvodnju cementa kao učestalo korišteno vezivo u cementnim kompozitima izraženo kroz pojmove ugrađene energije i ugrađenoga ugljika, te prikazuje učinke primjene alternativnih materijala kao zamjene za vezivo u betonu na svojstva betona u svježem i očvrsnulom stanju. Prikazan je pregled svjetske literature na temu primjene pepela biomase kao dodatka u postupku proizvodnje cementa te pepela drvne i poljoprivredne biomase kao djelomične ili potpune zamjene za cement u betonu i mortu.

Ključne riječi: alternativni materijali, drvna biomasa, poljoprivredna biomasa, cement, beton, mort.

4.1. Primjena alternativnih materijala u proizvodnji cementa

Pri proizvodnji betona godišnje se u svijetu iskoristi 10 - 11 milijarda tona agregata (Calkins, 2009), a iskop, obrada i transport tako velikih količina agregata zahtijevaju znatne količine energije i utječu na prirodnu ravnotežu. Betonska industrija, uz navedeno, koristi i velike količine svježe vode - milijardu tona godišnje. Iako su ove brojke zastrašujuće velike, najveći udio u negativnom učinku betona na prirodni okoliš zauzima proizvodnja portland cementa. Naime, za svaku proizvedenu tonu cementa potrebno je utrošiti 1,5 tonu vapnenca, uz fosilna goriva kao energiju u proizvodnji. Na godišnjoj se osnovi proizvede 1,6 milijarda tona cementa, što je odgovorno za 7% ukupne emisije CO_2 u atmosferu (Crouch et al., 2007), no treba naglasiti da taj postotak varira i neprestano raste.

Portland cement je jedan od materijala koji se najviše proizvodi na svijetu, s više od tri milijarde tona u 2012. godini (Imbabi et al., 2012), bez znakova usporavanja potražnje zbog razvoja infrastrukture u gospodarski brzorastućim zemljama (Benhelal et al., 2013). Takvi su alarmantni podatci ponukali cementnu industriju na borbu protiv klimatskih promjena, prvenstveno u trendu globalnih napora za smanjenje ispuštanja stakleničkih plinova, a SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats) analiza otkriva posebnosti industrije u tom smislu (tablica 4.1).

S obzirom na to da je najveći negativni utjecaj betona na okoliš posljedica proizvodnje portland cementa, smanjenje njegove uporabe jedan je od najvažnijih koraka prema „zelenijemu“ betonu ili bilo kojemu drugomu cementomu kompozitu. Osnovni se utjecaji proizvodnje cementa ogledaju u višestrukim aspektima ljudskoga okoliša (tablica 4.2) te napore treba usmjeriti na ciljana područja. Strategije umanjenja utjecaja cementa na okoliš uključuju smanjenje količine cementa u betonskoj mješavini i zamjenu dijela portland cementa u betonskoj mješavini alternativama, pucolanskim industrijskim nusproizvodima. U tom smislu također pridonosi lokalna dostupnost alternativnih sirovina, jer ona čini proizvod jeftinijim i ekološki povoljnijim

te uporaba takvih materijala omogućuje zajednici izravan uvid u ekološki proces i predstavlja poticaj za bolju prihvaćenost konačnih proizvoda.

Tablica 4.1: SWAT analiza stanja cementne industrije po pitanju klimatskih promjena (Humphreys and Mahasenan, 2002)

Snage	**Prilike**
- pojedini su proizvođači smanjili emisiju CO_2 po toni proizvoda; - deset najvećih proizvođača cementa, uz vanjske suradnike, razvilo je standardizirani protokol praćenja emisije CO_2.	- poboljšanje energetske učinkovitosti; - uporaba alternativnih sirovinskih materijala; - uporaba alternativnih, niskougljičnih goriva; - zasluge za smanjenje štetnih emisija; - smanjenje troškova kroz sustav trgovanja emisijama CO_2.
Slabosti	**Prijetnje**
- velika ovisnost o fosilnoj energiji; - cement na osnovi vapnenca temelj je proizvodnje; - nedovoljna usredotočenost na potrebna značajna smanjenja emisije CO_2; - isprekidani angažman bez jasnoga dugoročnoga plana u aktivnostima usmjerenima na klimatske regulative; - nedovoljna ulaganja u istraživanja koja bi omogućila jeftino smanjenje emisije CO_2.	- velika financijska opterećenja zbog onečišćenja; - mogućnost nametnutih tehnoloških kontrola; - rano umirovljenje tvornica i opreme; - mogućnost da cementna industrija bude zanemarena pri stvaranju klimatskih regulativa, te da se takvim regulativama dovede u nepovoljan položaj uz bok velikim onečišćivačima; - gubitak udjela u tržištu zbog konkurentnih materijala koji su ekološki povoljniji.

Tablica 4.2: Ključni pokazatelji štetnosti proizvodnje cementa (Marlowe and Mansfield, 2002)

Emisije	**NO_x, SO_x, Prašina/Čestice**
Uporaba otpada kao goriva	Otpuštanje dioksina, drugih kloriranih ugljikovodika i teških metala
Smetnje	Buka, vibracije, prašina i vizualni utjecaj
Staklenički plinovi	CO_2
Uporaba zemlje i bioraznolikost	Prvenstveno vezano uz kamenolomske aktivnosti

U okvir se željenih promjena uklapa biomasa, odnosno obnovljivi izvor energije čija je primjena u stalnom porastu, a u trendu globalnih napora smanjenja klimatskih promjena. Naime, biomasa predstavlja priliku za cementnu industriju jer može iskoristiti pepeo koji nastaje njezinim

izgaranjem kao energetskoga resursa. Takav je izvor obično lokalno dostupan te je njegov štetni utjecaj na okoliš već sadržan u životnom ciklusu prvotne primjene, odnosno ulazi u proizvode kao „besplatna“ komponenta u vidu ispuštanja stakleničkih plinova ili ekvivalentnoga ugrađenoga ugljika (Salas et al., 2016) te ukida linearnost prvotnoga životnoga ciklusa. Pri tom se ovdje pod biomasom koja se upotrebljava u tom kontekstu, prema podijeli prema Basu (2018), podrazumijeva poljoprivredna biomasa, šumska biomasa i biomasa energetskih usjeva.

4.2. Primjena pepela biomase u proizvodnji cementa

Miješani cementi smjesa su portland cementa i dodataka kao što su leteći pepeo, silikatna prašina ili zgura visokih peći, pomiješana tijekom proizvodnoga procesa cementa. Takav način miješanja, tijekom proizvodnje, omogućuje učinkovito i točno doziranje smjese, ali ne nudi mogućnost povećanja količina cementnih zamjena. Ono što je ekološki bitno jest da se proizvodnjom miješanih cemenata u tvornicama cementa ostvaruju uštede u potrošnji prirodnih resursa, zbrinjavaju sekundarne sirovine i smanjuje onečišćenje atmosfere. Primjenom miješanih cemenata u proizvodnji betona, zbog svojstava alternativnih cementnih materijala u smjesi, mogu se postići i određena poboljšanja svojstava trajnosti betona, kojima se povećavaju prinosi održivomu razvoju.

Mogućnost kombiniranja pepela drvne i poljoprivredne biomase u miješanim cementima za takve je pepele vrlo zanimljiva mogućnost zbog sinergijskih prednosti zasebnih glavnih sastavnica, čime bi se mogle razviti mješavine u robusne i kvalitete proizvode. Primjerice, visok udio alkalija u pepelima biomase aktivira hidrataciju kod CEM II (Lothenbach et al., 2011, Naik et al., 2001).

4.3. Primjena pepela drvne biomase mase u cementnim kompozitima

Proizvodnjom energije u energanama na biomasu stvara se značajna količina biopepela koji se kao otpad odlaže na odlagalištima, poljoprivrednim zemljištima ili šumama, najčešće bez kontrole. Takva praksa uzrokuje zagađenje okoliša i potencijalne rizike za ljudsko zdravlje (Carević et al., 2016), a upravo u tom se smislu trebaju pronaći prihvatljivi načini za prikupljanje i reciklažu pepela biomase.

S obzirom na to da svojstva pepela biomase znatno ovise o samoj biomasi, tehnologiji sagorijevanja i dijelu peći gdje se pepeo prikuplja (Demis et al., 2014), potrebno je za svaku od vrsta biopepela pronaći namjenu kako bi se iskoristila njihova pozitivna svojstva te se stoga svaki od tih pepela mora istražiti zasebno. Pri tom činjenica da su pepeli biomase u najvećem broju fini praškasti materijali s visokim udjelom kalcija i silicijeva oksida čini ove materijale zanimljivima za istraživanje u raznim cementnim kompozitima. Kao što je spomenuto, mogućnosti i izbor primjene prvenstveno su diktirani svojstvima pepela, a prema Vassilev et al. (2013) razlikuju se sljedeći materijali i primjene:

- inertni materijali - punila ili zamjene za sitnozrnate frakcije,

- vezivne komponente - kada pepeo sadrži aktivne minerale koji za posljedicu imaju hidrauličko vezanje ili kada pepeo sadrži pucolanske minerale koji u kombinaciji s drugim materijalima vode do pucolanske reakcije.

Drvna biomasa predstavlja vrijedan i izdašan izvor sirovine za sve veći broj energana te su stoga količine biopepela iz takvih izvor značajne. Upravo cementni kompoziti predstavljaju jedan od način zbrinjavanja takvoga otpada te je u skladu s tim posljednjih godina intenzivirano istraživanje primjene takvih pepela. Za sagorijevanje se šumske biomase upotrebljavaju dokazane tehnologije, tako da je pepeo na dnu (ložištu) u pravilu krupnijih frakcija (Garcia and Sousa-Coutinho, 2013), koji se može koristiti za rasprostiranje po poljima, jer sadrži vrijedne elemente za tlo i biljke, s vrlo malim koncentracijama teških metala. Leteći pepeo (sitnije frakcije pepela) obično se odlaže jer sadrži previsok udio teških metala da bi se mogao koristiti kao poboljšivač tla (Kröppl and Lanzerstorfer, 2013, Lima et al., 2008). Takve pepele, dakle, treba iskoristiti na neki drugi način, a jedna od mogućih primjena je enkapsulacija teških metala u cementnim kompozitima.

Prvu su primjenu drvnoga pepela kao alternative cementu u Hrvatskoj predstavili Ukrainczyk et al. (2016), a dodatna istraživanja predstavili Carević et al. (2016), Carević et al. (2017). Ukrainczyk et al. (2016) prikazali su da krupni leteći pepeo po kemijskom sastavu (povećana količina alkalija i nedostatan pucolan) i veličini čestica ne zadovoljava zahtjevima za primjenu ugljenoga pepela u betonskim mješavinama (HRN EN 450-1), no, unatoč tomu, mehanička svojstva upućuju na mogućnost primjene u mješavinama za mort. Optimalna je količina pepela utvrđena istraživanjem 15%, što je u mortu imalo za posljedicu zadovoljavajuća mehanička svojstva i obradivost. Preliminarna istraživanja primjene lokalno dostupnoag (Hrvatska) pepela drvne biomase kao zamjene za cement koje su prikazali Carević et al. (2017) sugeriraju da dodatak pepela od 10% smanjuje obradivost, ali zadržava dostatna mehanička svojstva i otpornost na cikluse smrzavanje/odmrzavanje.

Strana iskustva o primjeni različitih vrsta pepela znatno su opsežnija te ukazuju da se pepeo drvne biomase može upotrebljavati u betonskim mješavinama, ovisno o kemijskim i fizikalnim svojstvima samoga pepela. Dakle, može se koristiti kao aktivni pucolanski materijal (Shearer et al., 2016, Naik et al., 2001), kao djelomična zamjena za cement (Cheah and Ramli, 2012) te kao mineralni dodatak (Wang et al., 2008) ili kao zamjena za pijesak i sitni agregat.

Pepeo drvne biomase često ne uspijeva zadovoljiti zahtjeve HRN EN 450-1 koji određuje uvjete za primjenu ugljenoga pepela u betonu, no unatoč tomu istražene primjene ukazuju na pozitivna iskustva. To posebice vrijedi kada je u pepelu značajnija količina amorfnog SiO_2 koji pridonosi razvoju čvrstoće kroz pucolansku reakciju (Chowdhury et al., 2015) te omogućuje da se pepeo koristi kao djelomična zamjena za cement. Pepeo drvne biomase u svom kemijskom sastavu uobičajeno sadrži manje količine aluminijeva oksida (Al_2O_3) te veće količine alkala (Na i K) nego u ugljenom pepelu (Wang et al., 2008), no isto tako sadrži znatne količine CaO. Prekomjerna organska tvar u pepelu drvne biomase može imati nepovoljan učinak na mehanička svojstva i trajnost betona te je stoga potrebno ograničiti primjenu takvoga pepela na betone srednjih i niskih čvrstoća (Siddique, 2012). Osim toga, Naik (1999) navodi kako drvni

pepeo može biti korišten u velikom broju drugih materijala, kao što su zidni elementi, betonski opločnjaci i kolnici, miješani cementi i te materijali s kontrolirano nižom razinom čvrstoće.

Zamjena dijela cementa drvnim pepelom u betonskim mješavinama smanjuje konzistenciju u svježem stanju (Udoeyo et al., 2006), a dodatkom drvnoga pepela i miješanoga drvnoga i ugljenoga pepela povećava se potrebna količina vode u mješavini (Wang et al., 2008). Primjenom drvnoga pepela kao zamjene za cement moguće je postići jednaku ili čak povećanu tlačnu čvrstoću u odnosu na kontrolne mješavine, što je indikator pucolanske aktivnosti (Siddique, 2012). Zamjenom cementa s 5%, 8% i 12% Naik (1999) je prikazao da je moguće dostići tlačnu čvrstoću od 42 do 46 MPa (nakon 365 dana), dok je tlačna čvrstoća kod kontrolnih mješavina bila 44 MPa. Rajamma et al. (2009) su prikazali da se zamjenom pepela u iznosu od 10% mogu postići veće 28-dnevne tlačne čvrstoće nego kod kontrolnih mješavina, no daljnje povećanje zamjene cementa smanjuje tlačnu čvrstoću. Kroz istraživanje koje su predstavili Wang et al. (2008) uspostavljeno je da se zamjenom dijela cementa (5 - 20%) pepelom piljevine postiže pad tlačne, vlačne i neizravne vlačne čvrstoće, no mješavine ispunjavanju zahtjeve planirane kvalitete betona s čvrstoćom od 20 MPa. Razvoj čvrstoće mješavina s pepelom pripisuje se pucolanskoj reakciji.

Neizravna vlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje uobičajeno je u korelaciji s tlačnom čvrstoćom betona, no Naik (1999) je utvrdio kako su te čvrstoće kod mješavina s pepelom drvne biomase slične ili veće nego kod kontrolnih mješavina. Takvo je svojstvo posebno naglašeno nakon dužih razdoblja njege pa je nakon 365 dana neizravna vlačna čvrstoća kontrolne mješavine iznosila 4,3 MPa, a kod mješavina s pepelom između 4,2 i 5,1 MPa. Čvrstoća na savijanje kod kontrolnih je mješavina bila 4,4 MPa, dok je kod mješavina s pepelom bila od 4,3 do 5,3 MPa. Ložišni pepeo upotrijebljen je u ograničenom broju istraživanja, posebice u usporedbi s letećim pepelom. Naime, on obično ima veće čestice te se za zamjenu cementa trebaju provesti obrade poput prosijavanja i mljevenja (Garcia and Sousa-Coutinho, 2013). U istraživanju koje su predstavili Garcia and Sousa-Coutinho (2013) prikazano je da ložišni pepeo po kemijskom sastavu ne sadrži betonu štetne sastavnice, ali isto tako ne sadrži amorfne materijale te dostatne količine pucolanskih oksida da bi se koristio kao dodatak Tipa II. Takav se pepeo može stoga koristiti kao punilo, što je potvrđena primjena kroz veće tlačne čvrstoće nego kod kontrolnih mješavina, no nakon dužega razdoblja njege od 365 dana (Garcia and Sousa-Coutinho, 2013). Drvni se pepeo ne koristi samo kao sirovi materijal, već i za predgotovljene građevne proizvode kao što su cigla, blok te slični elementi. Naime, Madrid et al. (2017) su istražili da se zamjenom dijela cementa pepelom drvne biomase u proizvodnji betonskih blokova tlačna čvrstoća blokova smanjuje, no zamjena od 10% zadovoljava zahtjeve za nosive zidove. Osim toga, zamjena od 15% je moguća za blokove koji nisu nosivi, odnosno za ispunu. Dodatak drvnoga pepela smanjio je gustoću i toplinsku provodljivost betonskih blokova, a pri tom povećao kapacitet zadržavanja topline. Eliche-Quesada et al. (2017) su utvrdili da s dodatkom 20% drvnoga pepela glini tijekom proizvodnje blokova dolazi do smanjenja gustoće i toplinske provodljivosti, uz zadržavanje ispunjenja tehničkih uvjeta te mehaničkih svojstava. Veće količine pepela nisu pogodne, jer se zbog organskoga sadržaja povećava broj spojenih pora, što rezultira smanjenom tlačnom čvrstoćom (Eliche-Quesada et al., 2017). Vu et al. (2019) su

prikazali istraživanje učinka djelomične zamjene cementa pri izradi drvno-cementnih panela. Zamjenom 10%, 20%, 30%, 40% i 50% cementa pepelom drvne biomase utvrđeno je da se povećava potreban udio vode s povećanjem udjela pepela, a mehanička svojstva blago se smanjuju s povećanjem udjela pepela do 30%. Toplinski kapacitet se povećava povećanjem udjela pepela, što može pridonijeti energetskoj učinkovitosti u usporedbi s gips kartonskim panelima. Udio pepela od 30% procijenjen je kao optimalan (Eliche-Quesada et al., 2017).

4.4. Primjena pepela poljoprivredne biomase mase u cementnim kompozitima

U posljednje vrijeme raste broj istraživača uključenih u primjenu poljoprivredne biomase u građevnim proizvodima. Ovakva vrsta biomase ima veliki potencijal zbog znatnih količina dostupnih cementnoj industriji, odnosno obično se radi o pepelu koji nastaje izgaranjem proizvoda koji se koriste za prehrambene svrhe. Tako je osigurana stalna i izdašna količina sirovine, što je preduvjet pouzdane proizvodnje. Prepreka primjeni poljoprivredne biomase nešto je manja razina istraženosti primjene u odnosu na drvnu biomasu.
Najviše istražena tema je mogućnost primjene takve vrste pepela kao djelomične zamjene cementa, poput istraživanja koje su predstavili Shrivas et al. (2015), Aksoğan et al. (2016), Biricik et al. (2000), Goyal et al. (2007), Rajamma et al. (2015), Matalkah et al. (2016), a sumarni prikaz takvih istraživanja dao je Chandra Paul et al. (2019). U nešto manjem je broju istražena mogućnost potpune zamjene cementa (Shearer et al., 2016, Rajamma et al., 2012, Ban et al., 2017).

Pepeo se palminoga ulja može upotrebljavati u betonu kao sitnozrnati agregat, dodatak cementnim materijalima i kao punilo (Al-mulali et al., 2015, Aslam et al., 2016). Takav je pepeo bogat amorfnim SiO_2 kao glavnim sastojkom, kojega je znatno veća količina nego u cementu, što čini ovaj materijal zanimljivim iz aspekta istraživanja u cementnim kompozitima, bilo u vidu zamjene veziva ili kao punilo (Al-mulali et al., 2015, Aslam et al., 2016, Kanadasan and Abdul Razak, 2015). Ovaj pepeo prije primjene treba prosijati da bi se uklonile organske i nesagorene tvari, a reaktivnost se može poboljšati smanjujući veličinu čestica (mljevenjem) (Tangchirapat et al., 2007). Ako se pepeo palminoga ulja koristi kao djelomična zamjena za cement, mogu se postići povoljni učinci na razvoj mikro strukture betona (Awal and Shehu, 2013). Naime, ima povoljna pucolanska svojstva te slično kao leteći pepeo ima potencijal za kontroliranu toplinu hidratacije betona, što je vezano uz nisku pucolansku aktivnost u ranim fazama hidratacije. U kontekstu svojstva svježega betona, obradivost se povećava povećanjem udjela pepela. Čvrstoća se betona u pravilu smanjuje povećanjem udjela pepela (Ul Islam et al., 2016, Teo et al., 2007), no trajnost se povećava. Povećanjem pepela dolazi do smanjenja kloridne difuzivnosti mješavina (Chindaprasirt et al., 2008, Rukzon and Chindaprasirt, 2009), upijanja vode (Zeyad et al., 2017) i propusnosti (Megat Johari et al., 2012, Tangchirapat and Jaturapitakkul, 2010) te povećanja sulfatne otpornosti (Tangchirapat et al., 2009) i suzbijanja alkalno-silikatne reakcije (Awal and Hussin, 1997).

Nešto je manji broj istraživanja posvećen primjeni pepela biomase maslina koji se, prema Cuenca et al. (2013), može koristiti kao punilo u samozbijajućem betonu i prema Cruz-Yusta

et al. (2011) kao zamjena cementa u mortu. Cuenca et al. (2013) su utvrdili da se takvom primjenom može povoljno ekološki zbrinuti takav pepeo, jer se u ispitanim mješavinama samozbijajućeg betona zamjenom cementa pepelom zadržava tlačna čvrstoća ili čak povećava u odnosu na kontrolne mješavine. Cruz-Yusta et al. (2011) su kemijskom analizom utvrdili postojanje pucolanske aktivnosti, povezano uz prisutnost kalcijeva oksida i silicijevog dioksida te stoga preporučili zamjenu punila ili cementa. Vezano uz mehanička svojstva, utvrdili su da se zamjenom do 10% cementa ne utječe negativno na čvrstoće morta.

Pepeo rižinih ljuski, koji se dobije sagorijevanjem ljuski koje pokrivaju zrna riže, prvenstveno je silikatnoga sastava i predstavlja vrlo reaktivan pucolan (Xu et al., 2012, Nair et al., 2008). Naime, kada se spaljuje u odgovarajućim uvjetima, pepeo rižine ljuske sadrži 90 - 96% amorfnog SiO_2, što ga čini pogodnim za alternativu cementu u betonu. Kao i kod ostalih pepela, kemijski sastav ovisi o metodi spaljivanja te su moguća odstupanja, posebice u vidu nesagorjeloga ugljika (Boateng and Skeete, 1990). Pepeo rižine ljuske vrlo je porozan pa ima vrlo visoku specifičnu površinu, s relativno velikim česticama pa stoga neki autori predlažu da se mljevenje na veće stupnjeve finoće treba izbjegavati jer su pucolanska svojstva značajna zbog veće unutrašnje površine (Mehtra and Folliard, 1995). Osim toga, mljevenjem se povećava trošak proizvodnje, što umanjuje vrijednost ovoga pepela u zemljama gdje je lako dostupan. Zbog poboljšane kontaktne zone agregat-cementna pasta pri primjeni ovoga pepela (u odnosu na kontrolni beton) slom se događa kroz agregat (Zhang et al., 1996), što ima za posljedicu poboljšana mehanička svojstva - tlak, vlak i savijanje (Hesami et al., 2014). Hasan Sahan i Ertug (2018), između ostaloga su istražili utjecaj pepela kokosove i rižine ljuske kao zamjene cementa u raznim omjerima (10, 15 i 20%) na obradivost, vrijeme slijeganja, tlačnu čvrstoću i silu čupanja kod betona. Rezultati su otkrili da se ti pepeli mogu koristiti kao zamjena cementa u proizvodnji betona jer je pad čvrstoće neznatan ili ga nema u slučaju vremena njege od 180 dana. Pepeo rižine ljuske u kontekstu svojstava svježega betona također ima utjecaja, odnosno utvrđeno je da povećava vrijeme vezanja (El-Dakroury and Gasser, 2008), ali smanjuje izdvajanje vode i segregaciju (Le and Ludwig, 2016) te povećava plastičnu viskoznost (Hesami et al., 2014). Kada je u pitanju trajnost, ona se poboljšava uključivanjem pepela rižine ljuske zbog strukture pora. Naime, betoni s takvim pepelom imaju veću otpornost na prodor klorida (Chindaprasirt et al., 2008, Chopra et al., 2015), manju propusnost vode i upijanje vode (Chindaprasirt et al., 2007a, Zareei et al., 2017), poboljšanu otpornost na sulfate (Chindaprasirt et al., 2007b) i manje su podložni alkalno-silikatnoj reakciji (Rodríguez de Sensale, 2010).

Pepeo pšenične slame i kukuruzovine jedni su od najmanje istraženih pepela poljoprivredne biomase, iako je riječ o vrlo dostupnim materijalima. Shrivas et al. (2015) su istražili mogućnost zamjene cementa s 10%, 20% i 30% pepela rižine ljuske, suhih vlakana šećerne trske i pšenične slame. Zaključeno je da uporaba 10% takvih pepela u betonu ne smanjuje tlačnu čvrstoću. Trajnosna svojstva betona s 2% i 5% pepela kukuruzovine, pšenične slame i suncokretove stabljike istražili su Aksoğan et al. (2016) te zaključili da sve vrste pepela poboljšavaju otpornost na cikluse smrzavanje/odmrzavanje te otpornost na trošenje. Pozitivni učinak pepela pšenične slame na otpornost betona na cikluse smrzavanje/odmrzavanje potvrdili su Biricik et al. (2000). Zamjenom 15% cementa mješavinom pepela pšenične slame i rižinih ljuski

povećavaju se tlačna i vlačna čvrstoća betona, što se može objasniti sinergijskim učinkom tih pepela zbog zajedničkoga djelovanja pucolanske reakcije i učinka punila (Goyal et al., 2007). Dodatak tih pepela povećava vrijeme vezanja cemente paste (Aliyu and Yakubu, 2011), a Matalkah et al. (2016) upozoravaju da je u takvim pepelima visok udio alkalija. Iako Rajamma et al. (2015) ne navode vrste biomase, primijećeno je da pepeli biomase povećavaju vrijeme vezanja i smanjuju toplinu hidratacije.

Pepeo vlakana šećerne trske također sadrži značajan udio amorfnoga SiO_2 (Bahurudeen et al., 2015), ali i značajne količine Al_2O_3, Fe_2O_3 i CaO, što ga čini mogućom alternativom cementu u proizvodnji betona (Liou and Chang, 1996). S obzirom na to da mu je sastav sličan pepelu palminoga ulja, reaktivnost mu je moguće poboljšati smanjenjem veličine čestica (mljevenjem) (Cordeiro et al., 2008). Primjenom ovoga pepela kao djelomične zamjene cementa smanjuje se toplina hidratacije u odnosu na kontrolni beton (Bahurudeen et al., 2015) i to proporcionalno postotku zamjene cementa. Obradivost se betona smanjuje povećanjem udjela pepela vlakana šećerne trske (Sampaio et al., 2014), no postoje istraživanja u kojima se došlo do suprotnih rezultata (Priya and Ragupathy, 2016). Kada su u pitanju mehanička svojstva, većina istraživanja prijavljuje poboljšanje u odnosu na kontrolne mješavine, a za optimalnu se zamjenu preporučuje 20% (Bahurudeen et al., 2015, Ganesan et al., 2007, Mangi et al., 2017). Vezano uz trajnost, učinak je kao kod većine drugih pepela poljoprivredne biomase također pozitivan. Povećava se otpornost na prodor klorida te smanjuje prodor vode (Bahurudeen et al., 2015, Modani and Vyawahare, 2013, Chusilp et al., 2009).

Slično kao pepeli vlakana šećerne trske i rižinih ljuski, pepeo lišća bambusa ima visoku pucolansku reaktivnost zbog visokoga udjela SiO_2 (Chandra Paul et al., 2019). Upravo zbog toga se može upotrebljavati u proizvodnji betona (Villar-Cociña et al., 2011), no to je jedan od najmanje istraženih pepela poljoprivredne biomase u kontekstu primjene u proizvodnji betona. U (Singh et al., 2007) utvrđeno je da se zamjenom cementa s 10% pepela lišća bambusa odgađa vrijeme vezanja, a u (Olutoge and Oladunmoye, 2017) da se povećava obradivost betona zbog smanjenja segregacije i izdvajanja vode pri manjim postotcima zamjene cementa (do 20%), no postoje proturječni rezultati. Kada su u pitanju mehanička svojstva, većina istraživanja (Asha et al., 2014, Olutoge and Oladunmoye, 2017, Dhinakaran and Gangava, 2016) prikazuju njihovo blago smanjenje s povećanjem sadržaja pepela. U (Frías et al., 2012) je zaključeno da je optimalan postotak zamjene u kontekstu mehaničkih svojstava 10%. Trajnosna svojstva, poput otpornosti na kiseline i kloride, značajno su poboljšana primjenom zamjene od 10% cementa (Asha et al., 2014), što se može pripisati popunjavanju šupljina u cementu.

4.5. Učinci uporabe alternativa cementu

Kako je spomenuto, smanjenje uporabe portland cementa najlakše je ostvarivo zamjenom ostalim pucolanskim ili hidrauličnim materijalima. Ovakva je nakana uvelike ostvarena primjenom različitih ostataka iz termoelektrana ili proizvodnje čelika (leteći pepeo, zgura visokih peći i silikatna prašina) pa je već u 2000. godini Portland Cement Association objavila da su alternativni cementni materijali djelomično zamijenili portland cement (ili su

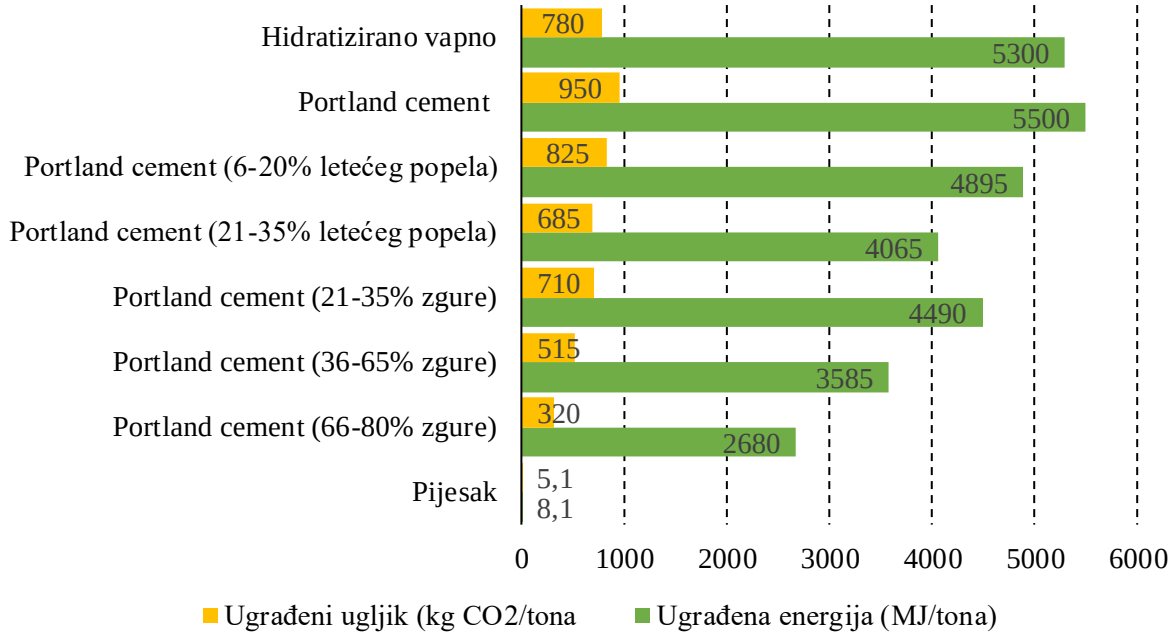
upotrijebljeni kao dodatak) u više od 60% suvremenih betonskih mješavina. Uz industrijske nusproizvode, odnosno umjetne pucolane, postoje zamjene u vidu prirodnih pucolana, kao što su kaolinske gline, metakaolin i sagorjeli škriljac (Ignjatić and Netinger, 2010, Bentz et al., 2011). Novi, inovativni cementi stalno se razvijaju, a njihov je cilj razvoj proizvodnih postupaka koji koriste drukčije sirove materijale u svrhu smanjenja emisije stakleničkih plinova te se ovu skupinu mogu svrstati primjene otpadnih materijala i sirovina (Mineral Products Association, 2013).

Kroz nekoliko su prethodnih desetljeća utvrđeni brojni načini procjene utjecaja materijala na okoliš, koji su razvijeni unutar određenih programa certificiranja ili kao samostalna istraživanja (Calkins, 2009, Hamond and Jones, 2008, Athena Sustainable Materials Institute, 2006). Pomoću takvih je procjena moguće uvidjeti koliki je ukupni utjecaj nekog materijala na okoliš preko ugrađene energije (*embodied energy*, EE) te kako određeni materijal utječe na prirodu kroz spomenute etape životnoga ciklusa preko procjene životnoga ciklusa (*life-cycle assessment*). Upravo procjena životnoga ciklusa daje mogućnost određivanja problematične faze, odnosno one faze na koje ima najviše smisla djelovati u kontekstu smanjenja utjecaja na okoliš. Količina ispuštenoga CO_2 u ciklusu materijala često se podudara s ugrađenom energijom materijala, no to nije pravilo, pa je razvijena i metoda procjene ukupne emisije CO_2 u životnom ciklusu materijala, pod nazivom ugrađeni ugljik (*embodied carbon*, EC), odnosno ugljični otisak (*carbon footprint*) materijala.

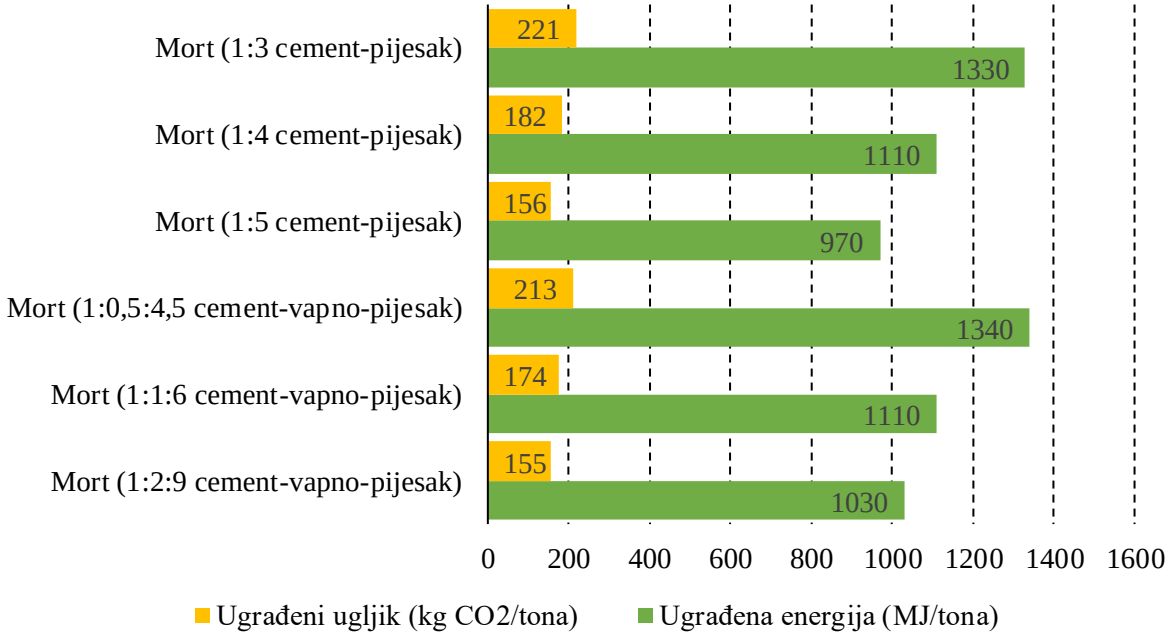
Kroz spomenuta su razna istraživanja na području održive gradnje utvrđene količine ugrađene energije i ugljika danas najviše upotrjebljavanih sastavnica morta i betona (slika 4.1). Vidljivo je da pijesak (agregat) zapravo ima izrazito niske vrijednosti ugrađene energije (EE) i ugrađenoga ugljika (EC) te da bi stoga trebao najmanje pridonositi takvim vrijednostima kod morta. Nije iznenađujuće da cement ima izrazito visoku vrijednost EE-a i EC-a, jer se radi o intenzivnom postupku proizvodnje. Isto tako, uočljiv je velik raspon vrijednosti ovisno o sastavu cementa, jer udio klinkera u cementu te dodatci (leteći pepeo, zgura itd.) uvelike utječu na vrijednosti EE-a i EC-a. Primjena letećega pepela i zgure u sastavu cementa osjetno smanjuje EE i EC, što opravdava njihovu ekološku vrijednost. Iako leteći pepeo ima nižu razinu EC-a od zgure, gornja je granica udjela letećega pepela koja se može upotrijebiti za stabilnu mješavinu niža od one za zguru, što omogućuje da se najmanje vrijednosti EE-a i EC-a za cement ostvare uporabom zgure. Vapno se često odabire kao okolišno prihvatljiviji materijal u odnosu na cement, zbog čega iznenađuje podatak da je EE vrijednost viša nego za većinu vrsta cementa, odnosno slična vrijednosti za portland cement.

Mort je važna komponenta zidanih konstrukcija pa tako čini oko 17% površine ziđa (Calkins, 2009), a ključan je za trajnost zidane konstrukcije. U sastavu morta najveći utjecaj na okoliš imaju portland cement i (hidratizirano) vapno zbog navedenih izrazito visokih stopa ugrađene energije i ugljika po toni materijala. Uporaba morta s vapnom ili isključivo s cementom daje određene prednosti vapnu vezano uz EC, a najpovoljnija kombinacija bila bi uporaba cementa s većim udjelom letećega pepela ili zgure zajedno određenih udjelom vapna koji smanjuje postotak cementa i dodatno smanjuje EC morta. Osim toga, mješavine s većim udjelom pijeska u odnosu na vezivo dodatno smanjuju nepovoljan ekološki utjecaj morta (slika 4.2). Iz raznih

omjera sastavnica morta u mješavini vidljivo je da zamjena masenoga dijela cementa vapnom, uz zadržavanje iste količine pijeska, omogućuje pad EC i EE vrijednosti morta, i to tako da primjerice izjednačavanje cementa i vapna u sastavu donosi uštedu od 21% EC-a, a unos vapna kao polovica cementa donosi uštedu od 4% EC-a.



Slika 4.1: Ugrađena energija (EE) i ugrađeni ugljik (EC) sastavnica morta prema (Hamond and Jones, 2008)



Slika 4.2: Ugrađena energija (EE) i ugrađeni ugljik (EC) morta različitih sastava prema (Hamond and Jones, 2008)

Dakle, može se pretpostaviti da pijesak ima gotovo zanemariv utjecaj, a da omjeri između veziva pomnoženi pripadajućom jediničnom veličinom EC-a i EE-a daju ukupan utjecaj morta.

Prema takvom slijedu zamjena vapna biopepelom uklanja cijeli utjecaj vapna bez dodatnih vrijednosti EC-a i EE-a, odnosno u mješavini 1:0,5:4,5 pad EC-a bi bio jednak 33%, a u mješavini 1:1:6 čak 50%.

Kada je u pitanju beton, odnosno betonska mješavina, procijenjeno je da bi smanjenje portland cementa od samo 30% (Mehta, 1998) prekinulo porast emisije CO_2 za koji je odgovorno neprekidno povećanje proizvodnje betona, a danas je moguće smanjenje udjela portland cementa teoretski i do 100%.

Trenutačno su dostupne mnoge vrste djelomične pa čak i potpune zamjene portland cementa. Svaka od mogućih zamjena ima svoje prednosti i nedostatke, od kojih se neki odnose na svojstva betona, bilo u svježem ili očvrsnulom stanju, a takvi su utjecaji ukratko prikazani u tablicama 4.3 i 4.4.

Tablica 4.3: Utjecaj cementnih alternativa na svojstva svježega betona prema (Taylor et al., 2006, Calkins, 2009)

Svojstvo	**Leteći pepeo**		**Granulirana zgura visoke peći**	**Silikatna prašina**	**Metakaolin**	**Pepeo šumske biomase**	**Pepeo poljoprivredne biomase**
	Razred F	**Razred C**					
Udio vode	značajno smanjen	značajno smanjen	smanjen	značajno povećan	povećan	povećan	povećan
Obradivost	povećana	povećana	povećana	značajno smanjena	smanjena	učinak varira	učinak varira
Izdvajanje vode i segregacija	smanjeno	smanjeno	učinak varira	značajno smanjeno	smanjeno	-	smanjeno
Udio zraka	značajno smanjen	smanjen	smanjen	značajno smanjen	smanjen	-	-
Toplina hidratacije	smanjena	učinak varira	smanjena	nema značajne promjene	smanjena	smanjena	smanjena
Vrijeme vezanja	povećano	učinak varira	povećano	nema značajne promjene	nema značajne promjene	povećano	povećano
Završna obrada	poboljšana	poboljšana	poboljšana	učinak varira	poboljšana	-	-
Pumpabilnost	povećana	povećana	povećana	povećana	povećana	-	-
Plastično skupljanje i puzanje	nema značajne promjene	nema značajne promjene	nema značajne promjene	povećano	nema značajne promjene	-	smanjeno

Tablica 4.4: Utjecaj cementnih alternativa na svojstva očvrsnuloga betona prema (Taylor et al., 2006, Calkins, 2009)

Svojstvo	Leteći pepeo		Granulirana zgura visoke peći	Silikatna prašina	Metakaolin	Pepeo šumske biomase	Pepeo poljoprivredne biomase
	Razred F	Razred C					
Rane čvrstoće	smanjene	nema značajne promjene	smanjene	značajno povećane	značajno povećane	smanjene	smanjene
Dugotrajne čvrstoće	povećane	povećane	povećane	značajno povećane	značajno povećane	smanjene	smanjene
Propusnost	smanjena	smanjena	smanjena	značajno smanjena	značajno smanjena	-	smanjena
Prodor klorida	smanjen	smanjen	smanjen	značajno smanjen	značajno smanjen	-	smanjen
Alkalno-silikatna reaktivnost	značajno smanjena	učinak varira	značajno smanjena	smanjena	smanjena	-	smanjena
Sulfatna otpornost	značajno povećana	učinak varira	značajno povećana	povećana	povećana	-	povećana
Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje	nema značajne promjene	nema značajne promjene	nema značajne promjene	nema značajne promjene	nema značajne promjene	poboljšana	poboljšana
Otpornost na abraziju	nema značajne promjene	nema značajne promjene	nema značajne promjene	nema značajne promjene	nema značajne promjene	-	-
Skupljanje uslijed sušenja	nema značajne promjene	nema značajne promjene	nema značajne promjene	nema značajne promjene	nema značajne promjene	-	-

4.6. Završne napomene

Kroz poglavlje su prikazane potvrde mogućnosti i uporabe alternativa tradicionalnim materijalima. To otvara mogućnost smanjenja uporabe ustaljeno ekološki štetnih materijala, koji su često jeftiniji, trajniji ili jednostavno bolji od svojih alternativa, a nedostatci povezani s njima premostivi. Lokalna dostupnost materijala za proizvodnju alternativa konvencionalnim materijalima, koja postoji u Hrvatskoj, može poslužiti samo kao dodatna povoljnost. Zasigurno postoji još prostora za napredak istraživanja primjene pepela, no već sada se može reći da postoji potreba za takvim materijalima.

Reference:

AKSOĞAN, O., BINICI, H. & ORTLEK, E. 2016. *Durability of concrete made by partial replacement of fine aggregate by colemanite and barite and cement by ashes of corn stalk, wheat straw and sunflower stalk ashes*. Construction and Building Materials, 106**,** 253.-263.

AL-MULALI, M. Z., AWANG, H., ABDUL KHALIL, H. P. S. & ALJOUMAILY, Z. S. 2015. *The incorporation of oil palm ash in concrete as a means of recycling: A review*. Cement and Concrete Composites, 55**,** 129.-138.

ALIYU, S. & YAKUBU, K. I. 2011. *Wheat straw ash as cement replacement material in concrete*. Journal of Faculty of Engineering & Technology.

ASHA, P., SALMAN, A. & KUMAR, R. A. 2014. *Experimental study on concrete with bamboo leaf ash*. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 3 (6)**,** 46.-51.

ASLAM, M., SHAFIGH, P. & JUMAAT, M. Z. 2016. *Oil-palm by-products as lightweight aggregate in concrete mixture: a review*. Journal of Cleaner Production, 126**,** 56.-73.

ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE 2006. *A Life Cycle Perspective on Concrete and Asphalt Roadways: Embodied Primary Energy And Global Warming Potential*. Merrickville: Athena Sustainable Materials Institute.

AWAL, A. S. M. A. & HUSSIN, M. W. 1997. *The effectiveness of palm oil fuel ash in preventing expansion due to alkali-silica reaction.* Cement and Concrete Composites, 19**,** 367-372.

AWAL, A. S. M. A. & SHEHU, I. A. 2013. *Evaluation of heat of hydration of concrete containing high volume palm oil fuel ash*. Fuel, 105**,** 728.-731.

BAHURUDEEN, A., KANRAJ, D., GOKUL DEV, V. & SANTHANAM, M. 2015. *Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete*. Cement and Concrete Composites, 59**,** 77.-88.

BAN, C. C., KEN, P. W. & RAMLI, M. 2017. *Mechanical and Durability Performance of Novel Self-activating Geopolymer Mortars*. Procedia Engineering, 171**,** 564.-571.

BASU, P. 2018. Chapter 3 - *Biomass Characteristics*. u: BASU, P. (ur.), Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third Edition). Academic Press.

BENHELAL, E., ZAHEDI, G., SHAMSAEI, E. & BAHADORI, A. 2013. *Global strategies and potentials to curb CO_2 emissions in cement industry*. Journal of Cleaner Production, 51**,** 142.-161.

BENTZ, D. P., HANSEN, A. S. & GUYNN, J. M. 2011. *Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes*. Cement and Concrete Composites, 33**,** 824.-831.

BIRICIK, H., AKÖZ, F., TÜRKER, F. & BERKTAY, I. 2000. *Resistance to magnesium sulfate and sodium sulfate attack of mortars containing wheat straw ash*. Cement and Concrete Research, 30**,** 1189.-1197.

BOATENG, A. A. & SKEETE, D. A. 1990. *Incineration of rice hull for use as a cementitious material: the guyana experience*. Cement and Concrete Research, 20**,** 795.-802.

CALKINS, M. 2009. *Materials for Sustainable Sites,* Hoboken, New Jersey, SAD, John Wiley & Sons, Inc.

CAREVIĆ, I., BANJAD PEČUR, I., ŠTIRMER, N., MILOVANOVIĆ, B. & BARIČEVIĆ, A. 2016. *Potencijal biopepela i stanje u Republici Hrvatskoj*. Zbornik skupa Sabor hrvatskih graditelja, Cavtat. Hrvatska. HSGI, 133.-140.

CAREVIĆ, I., PEČUR, I. B. & ŠTIRMER, N. 2017. *Utilization of wood biomass ash (WBA) in the cement composites*. ICBBM-ECOGRAFI-2nd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRAnular and FIbrous materials, 2017.

CHANDRA PAUL, S., MBEWE, P. B. K., KONG, S. Y. & ŠAVIJA, B. 2019. *Agricultural Solid Waste as Source of Supplementary Cementitious Materials in Developing Countries*. Materials, 12**,** 1112.

CHEAH, C. B. & RAMLI, M. 2012. *Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement*. Construction and Building Materials, 30**,** 320.-329.

CHINDAPRASIRT, P., HOMWUTTIWONG, S. & JATURAPITAKKUL, C. 2007a. *Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash*. Construction and Building Materials, 21**,** 1492.-1499.

CHINDAPRASIRT, P., KANCHANDA, P., SATHONSAOWAPHAK, A. & CAO, H. T. 2007b. *Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash*. Construction and Building Materials, 21**,** 1356.-1361.

CHINDAPRASIRT, P., RUKZON, S. & SIRIVIVATNANON, V. 2008. *Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash*. Construction and Building Materials, 22**,** 932.-938.

CHOPRA, D., SIDDIQUE, R. & KUNAL 2015. *Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash*. Biosystems Engineering, 130**,** 72.-80.

CHOWDHURY, S., MANIAR, A. & SUGANYA, O. M. 2015. *Strength development in concrete with wood ash blended cement and use of soft computing models to predict strength parameters*. Journal of Advanced Research, 6**,** 907.-913.

CHUSILP, N., JATURAPITAKKUL, C. & KIATTIKOMOL, K. 2009. *Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete*. Construction and Building Materials, 23**,** 3352.-3358.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., TAVARES, L. M. & FAIRBAIRN, E. M. R. 2008. *Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars*. Cement and Concrete Composites, 30**,** 410.-418.

CROUCH, K., HEWITT, R. & BYARD, B. 2007. *High Volume Fly Ash Concrete*. *World of Coal Ash (WOCA)*. Covington, SAD, University of Kentucky.

CRUZ-YUSTA, M., MÁRMOL, I., MORALES, J. & SÁNCHEZ, L. 2011. *Use of Olive Biomass Fly Ash in the Preparation of Environmentally Friendly Mortars.* Environmental Science & Technology, 45**,** 6991.-6996.

CUENCA, J., RODRÍGUEZ, J., MARTÍN-MORALES, M., SÁNCHEZ-ROLDÁN, Z. & ZAMORANO, M. 2013. *Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, 40**,** 702.-709.

DEMIS, S., TAPALI, J. G. & PAPADAKIS, V. G. 2014. *An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials*. Construction and Building Materials, 68**,** 291.-300.

DHINAKARAN, G. & GANGAVA, H. C. 2016. *Compressive strength and durability of bamboo leaf ash concrete*. Jordan Journal of Civil Engineering, 10.

EL-DAKROURY, A. & GASSER, M. S. 2008. *Rice husk ash (RHA) as cement admixture for immobilization of liquid radioactive waste at different temperatures*. Journal of Nuclear Materials, 381**,** 271.-277.

ELICHE-QUESADA, D., FELIPE-SESÉ, M., LÓPEZ-PÉREZ, J. & INFANTES-MOLINA, A. 2017. *Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks*. Ceramics International, 43**,** 463.-475.

FRÍAS, M., SAVASTANO, H., VILLAR, E., SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I. & SANTOS, S. 2012. *Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes*. Cement and Concrete Composites, 34**,** 1019.-1023.

GANESAN, K., RAJAGOPAL, K. & THANGAVEL, K. 2007. *Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material*. Cement and Concrete Composites, 29**,** 515.-524.

GARCIA, M. D. L. & SOUSA-COUTINHO, J. 2013. *Strength and durability of cement with forest waste bottom ash*. Construction and Building Materials, 41**,** 897.-910.

GOYAL, A., KUNIO, H., OGATA, H., GARG, M., ANWAR, A. M., ASHRAF, M. & MANDULA 2007. *Synergic Effect of Wheat Straw Ash and Rice-Husk Ash on Strength Properties of Mortar*. Journal of Applied Sciences, 7**,** 3256.-3261.

HAMOND, G. & JONES, C. 2008. *Inventory of Carbon and Energy*. Bath: University of Bath.

HASAN SAHAN, A. & ERTUG, A. 2018. *Use of Industrial and Agricultural Wastes in Construction Concrete*. ACI Materials Journal, 115.

HESAMI, S., AHMADI, S. & NEMATZADEH, M. 2014. *Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement.* Construction and Building Materials, 53**,** 680.-691.

HUMPHREYS, K. & MAHASENAN, M. 2002. *Substudy 8:Climate Change - Toward a Sustainable Cement Industry*. World Business Council for Sustainable Development.

IGNJATIĆ, G. & NETINGER, I. 2010. *Mogućnost primjene alkalijski aktivirane zgure kao veziva u mortu*. e-GFOS, 1**,** 115.-123.

IMBABI, M. S., CARRIGAN, C. & MCKENNA, S. 2012. *Trends and developments in green cement and concrete technology*. International Journal of Sustainable Built Environment, 1**,** 194.-216.

KANADASAN, J. & ABDUL RAZAK, H. 2015. *Engineering and sustainability performance of self-compacting palm oil mill incinerated waste concrete*. Journal of Cleaner Production, 89**,** 78.-86.

KRÖPPL, M. & LANZERSTORFER, C. 2013. *Acidic extraction and precipitation of heavy metals from biomass incinerator cyclone fly ash*. E3S Web of Conferences, 1**,** 16007.

LE, H. T. & LUDWIG, H.-M. 2016. *Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete*. Materials & Design, 89**,** 156.-166.

LIMA, A. T., OTTOSEN, L. M., PEDERSEN, A. J. & RIBEIRO, A. B. 2008. *Characterization of fly ash from bio and municipal waste*. Biomass and Bioenergy, 32**,** 277.-282.

LIOU, T.-H. & CHANG, F.-W. 1996. *The Nitridation Kinetics of Pyrolyzed Rice Husk*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 35**,** 3375.-3383.

LOTHENBACH, B., SCRIVENER, K. & HOOTON, R. D. 2011. *Supplementary cementitious materials*. Cement and Concrete Research, 41**,** 1244.-1256.

MADRID, M., ORBE, A., ROJÍ, E. & CUADRADO, J. 2017. *The effects of by-products incorporated in low-strength concrete for concrete masonry units*. Construction and Building Materials, 153**,** 117.-128.

MANGI, S. A., JAMALUDDIN, N., WAN IBRAHIM, M., ABDULLAH, A. H., ABDUL AWAL, A., SOHU, S. & ALI, N. 2017. *Utilization of sugarcane bagasse ash in concrete as partial replacement of cement*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017. IOP Publishing, 1-8.

MARLOWE, I. & MANSFIELD, D. 2002. *Substudy 10: environment, health & safety performance improvement*. Toward a Sustainable Cement Industry. December.

MATALKAH, F., SOROUSHIAN, P., UL ABIDEEN, S. & PEYVANDI, A. 2016. *Use of non-wood biomass combustion ash in development of alkali-activated concrete*. Construction and Building Materials, 121**,** 491.-500.

MEGAT JOHARI, M. A., ZEYAD, A. M., MUHAMAD BUNNORI, N. & ARIFFIN, K. S. 2012. *Engineering and transport properties of high-strength green concrete containing high volume of ultrafine palm oil fuel ash*. Construction and Building Materials, 30**,** 281.-288.

MEHTA, P. K. 1998. *The role of fly ash in sustainable development*. Concrete, Fly Ash and the Environment Proceedings. San Francisco, SAD.

MEHTRA, P. & FOLLIARD, K. 1995. *Rice Husk Ash--a Unique Supplementary Cementing Material: Durability Aspects*. Special Publication, 154**,** 531.-542.

MINERAL PRODUCTS ASSOCIATION 2013. *Fact sheet 12, Novel cements: low energy, low carbon cements*. u*:* TAYLOR, M. G. (ur).

MODANI, P. O. & VYAWAHARE, M. R. 2013. *Utilization of Bagasse Ash as a Partial Replacement of Fine Aggregate in Concrete*. Procedia Engineering, 51**,** 25.-29.

NAIK, T., KRAUS, R. & KUMAR, R. 2001. *Wood Ash: A New Source of Pozzolanic Material: Report N. REP-435*. UMW Center for By-Products Utilization.

NAIK, T. R. 1999. *Tests of wood ash as a potential source for construction materials*. *Report NoCBU-1999-09*. Milwaukee, SAD: UWM Center for By-products utilization, Department of Civil Engineering and Mechanics, University of Wisconsin-Milwaukee.

NAIR, D. G., FRAAIJ, A., KLAASSEN, A. A. K. & KENTGENS, A. P. M. 2008. *A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes*. Cement and Concrete Research, 38**,** 861.-869.

OLUTOGE, F. & OLADUNMOYE, O. 2017. *Bamboo leaf ash as supplementary cementitious material*. American Journal of Engineering Research, 14**,** 1.-8.

PRIYA, K. L. & RAGUPATHY, R. 2016. *Effect of sugarcane bagasse ash on strength properties of concrete*. International Journal of Research in Engineering and Technology, 5**,** 159.-164.

RAJAMMA, R., BALL, R. J., TARELHO, L. A. C., ALLEN, G. C., LABRINCHA, J. A. & FERREIRA, V. M. 2009. *Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials*. Journal of Hazardous Materials, 172**,** 1049.-1060.

RAJAMMA, R., LABRINCHA, J. A. & FERREIRA, V. M. 2012. *Alkali activation of biomass fly ash - metakaolin blends*. Fuel, 98**,** 265.-271.

RAJAMMA, R., SENFF, L., RIBEIRO, M. J., LABRINCHA, J. A., BALL, R. J., ALLEN, G. C. & FERREIRA, V. M. 2015. *Biomass fly ash effect on fresh and hardened state properties of cement based materials*. Composites Part B: Engineering, 77**,** 1.-9.

RODRÍGUEZ DE SENSALE, G. 2010. *Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials*. Cement and Concrete Composites, 32**,** 718.-725.

RUKZON, S. & CHINDAPRASIRT, P. 2009. *Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and fly ash*. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 16**,** 475.-481.

SALAS, D. A., RAMIREZ, A. D., RODRÍGUEZ, C. R., PETROCHE, D. M., BOERO, A. J. & DUQUE-RIVERA, J. 2016. *Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review*. Journal of Cleaner Production, 113**,** 114.-122.

SAMPAIO, Z. L. M., SOUZA, P. A. B. F. & GOUVEIA, B. G. 2014. *Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 7**,** 626.-647.

SHEARER, C. R., PROVIS, J. L., BERNAL, S. A. & KURTIS, K. E. 2016. *Alkali-activation potential of biomass-coal co-fired fly ash*. Cement and Concrete Composites, 73**,** 62.-74.

SHRIVAS, A., JAIN, D. & JOSHI, R. 2015. *Application of different waste in concrete as a partial replacement of cement*. International Journal of Science, Technology and Engineering, 2**,** 89.-107.

SIDDIQUE, R. 2012. *Utilization of wood ash in concrete manufacturing*. Resources, conservation and Recycling, 67**,** 27.-33.

SINGH, N., DAS, S., SINGH, N. & DWIVEDI, V. 2007. *Hydration of bamboo leaf ash blended Portland cement.* Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 14, 69.-76.

TANGCHIRAPAT, W. & JATURAPITAKKUL, C. 2010. *Strength, drying shrinkage, and water permeability of concrete incorporating ground palm oil fuel ash*. Cement and Concrete Composites, 32**,** 767.-774.

TANGCHIRAPAT, W., JATURAPITAKKUL, C. & CHINDAPRASIRT, P. 2009. *Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete*. Construction and Building Materials, 23**,** 2641.-2646.

TANGCHIRAPAT, W., SAETING, T., JATURAPITAKKUL, C., KIATTIKOMOL, K. & SIRIPANICHGORN, A. 2007. *Use of waste ash from palm oil industry in concrete*. Waste Management, 27**,** 81.-88.

TAYLOR, C. P., KOSMATKA, H. S. & VOIGT, F. G. 2006. *Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual*. Washington: Federal Highway Administration Office of Pavement Technology.

TEO, D. C. L., MANNAN, M. A., KURIAN, V. J. & GANAPATHY, C. 2007. *Lightweight concrete made from oil palm shell (OPS): Structural bond and durability properties*. Building and Environment, 42**,** 2614.-2621.

UDOEYO, F. F., INYANG, H., YOUNG, D. T. & OPARADU, E. E. 2006. *Potential of Wood Waste Ash as an Additive in Concrete.* Journal of Materials in Civil Engineering, 18**,** 605.-611.

UKRAINCZYK, N., VRBOS, N. & KOENDERS, E. A. 2016. *Reuse of woody biomass ash waste in cementitious materials.* Chemical and biochemical engineering quarterly, 30**,** 137.-148.

UL ISLAM, M. M., MO, K. H., ALENGARAM, U. J. & JUMAAT, M. Z. 2016. *Durability properties of sustainable concrete containing high volume palm oil waste materials.* Journal of Cleaner Production, 137**,** 167.-177.

VASSILEV, S. V., BAXTER, D., ANDERSEN, L. K. & VASSILEVA, C. G. 2013. *An overview of the composition and application of biomass ash.: Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges.* Fuel, 105**,** 19.-39.

VILLAR-COCIÑA, E., MORALES, E. V., SANTOS, S. F., SAVASTANO, H. & FRÍAS, M. 2011. *Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters*. Cement and Concrete Composites, 33**,** 68.-73.

VU, V.-A., CLOUTIER, A., BISSONNETTE, B., BLANCHET, P. & DUCHESNE, J. 2019. *The Effect of Wood Ash as a Partial Cement Replacement Material for Making Wood-Cement Panels*. Materials, 12**,** 2766.

WANG, S., MILLER, A., LLAMAZOS, E., FONSECA, F. & BAXTER, L. 2008. *Biomass fly ash in concrete: mixture proportioning and mechanical properties*. Fuel, 87**,** 365.-371.

XU, W., LO, T. Y. & MEMON, S. A. 2012. *Microstructure and reactivity of rice husk ash*. Construction and Building Materials, 29**,** 541.-547.

ZAREEI, S. A., AMERI, F., DOROSTKAR, F. & AHMADI, M. 2017. *Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties*. Case Studies in Construction Materials, 7**,** 73.-81.

ZEYAD, A. M., MEGAT JOHARI, M. A., TAYEH, B. A. & YUSUF, M. O. 2017. *Pozzolanic reactivity of ultrafine palm oil fuel ash waste on strength and durability performances of high strength concrete*. Journal of Cleaner Production, 144**,** 511.-522.

ZHANG, M. H., LASTRA, R. & MALHOTRA, V. M. 1996. *Rice-husk ash paste and concrete: Some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste*. Cement and Concrete Research, 26**,** 963.-977.

5. PRIMJENA PEPELA BIOMASE U CESTOGRADNJI

Sažetak: Primjena pepela biomase u cestogradnji pokazuje velik potencijal. Ovakvom je primjenom moguće iskoristiti različite karakteristike pepela kroz njegovu primjenu kao veziva ili zamjene za najsitnije frakcije agregata, tj. punila. Ovo poglavlje prikazuje učinke uporabe pepela biomase u različitim dijelovima ceste: od nasipa i posteljice, preko nosivih slojeva, do asfaltnih zastora. Prikazan je pregled svjetske literature na temu iskorištavanja različitih karakteristika pepela biomase, s obzirom na hidrauličku i pucolansku aktivnost ili neaktivnost. Prikazan je i ekološki aspekt primjene pepela biomase u cestogradnji, s obzirom na to da su kolnička konstrukcija i nasipi u izravnom kontaktu s okolnim tlom, te potencijalno zagađenje može vrlo lako doći i do podzemnih voda.

Ključne riječi: drvna biomasa, poljoprivredna biomasa, cestogradnja, asfaltni zastor, nasip, nosivi slojevi, procjeđivanje

5.1. Potencijal primjene alternativnih materijala u cestogradnji

Građevinarstvo se u svojoj osnovi oslanja na uporabu prirodnih materijala, a cestogradnja je aktivnost koja, osim toga, koristi i velike količine električne energije i energenata iz neobnovljivih izvora. Tako su istraživanja pokazala da je za izgradnju, eksploataciju i održavanje 1 kilometra ceste tijekom 40 godina projektnoga razdoblja potrebno 23 TJ energije za cestu s asfaltnim zastorom te 27 TJ za cestu s betonskim zastorom (Stripple, 2001). Energija se pri tom koristi za proizvodnju i obradu materijala za gradnju ceste, sam proces izvođenja građevinskih radova, održavanje i popravke tijekom eksploatacije te u konačnici za uklanjanje i reciklažu materijala nakon isteka vijeka trajanja (Wang, 2018). Tijekom izgradnje i eksploatacije cesta nastaju i velike količine otpada, onečišćenje vode te zagađenje zraka. Ovo se posebno odnosi na materijale i način izvedbe i održavanja donjega ustroja ceste koji je u izravnom kontaktu s okolišem te se potencijalna zagađenja lako mogu proširiti u okoliš. Stoga je nužno smanjiti negativan utjecaj cestogradnje na okoliš kroz modernizaciju procesa proizvodnje i podrijetla osnovnih materijala, samoga procesa izgradnje cesta te metoda održavanja izgrađene mreže cesta.

U Europi je više od 90% autocesta izvedeno s asfaltnim zastorom, dok u Americi imamo isti trend s više od 93% asfaltnih kolnika (Wang, 2018). Prema podatcima European Asphalt Pavement Association (EAPA) (EAPA, 2017), tijekom posljednje se tri godine bilježi porast proizvodnje asfalta, te je ona 2017. samo u Europi dosegnula 296,7 milijuna tona. Najviše je proizvedeno u Turskoj, zatim Njemačkoj te Francuskoj.

Nameće se imperativ smanjenja negativnoga utjecaja cestogradnje na okoliš, što se u novije vrijeme pokušava postići uporabom alternativnih materijala za izgradnju svih elemenata ceste. Prinos održivomu razvoju u cestogradnji moguće je tako postići i primjenom pepela biomase u različitim fazama izgradnje i različitim elementima ceste. S obzirom na karakteristike pepela biomase, kemijske i mehaničke, najviše se istražuju mogućnosti njegove primjene u asfaltnim

slojevima te za izgradnju, točnije stabilizaciju tla prilikom izgradnje nasipa i posteljice ceste. Stoga će u nastavku biti dan prikaz dosadašnjih istraživanja mogućnosti primjene pepela biomase u tim elementima ceste, dok su mogućnosti primjene u betonskim kolničkim konstrukcijama, točnije betonu, prikazane u poglavljima 4 i 6.

5.2. Biomasa i pepeo biomase u asfaltnim kolnicima

Asfalt je vodeći materijal za izgradnju kolničkih zastora u Europi, a za njegovu se proizvodnju upotrebljavaju velike količine energije dobivene prvenstveno iz fosilnih goriva. Najveći se udio energije u proizvodnom procesu asfalta koristi prilikom sušenja i zagrijavanja agregata pri miješanju s bitumenom kao vezivom. U cilju racionalizacije proizvodnje asfalta, ističu se dvije mogućnosti smanjenja proizvodne energije (Bühler, 2016). Prvi se odnosi na optimizaciju konstrukcije asfaltne baze i samoga proizvodnoga procesa unutar nje. Drugi se, pak, temelji na razvoju tehnologije različitih dodataka asfaltu koji omogućuju smanjenu temperaturu proizvodnje uz zadržavanje kvalitete proizvedenoga asfalta. Međutim, s obzirom na nesigurnost i neiskustvo u ugradnji i ponašanju, novi tipova asfalta s novim dodatcima često teže prodiru na tržište. U novije se vrijeme ističe i mogućnost primjene alternativnih izvora energije, poput biomase u samom procesu proizvodnje energije za potrebe asfaltne industrije. Analize su pokazale da je uporaba slame i drvne sječke u procesu gasifikacije te izravno spaljivanje drvnih peleta u asfaltnom proizvodnom procesu ekonomski i tehnički izvodljiva (Bühler, 2016). Osim same količine energije koju je na ovaj održivi način moguće proizvesti i kompetitivne cijene asfalta koja bi pri tom procesu nastala, ističe se i mogućnost smanjenja specifične emisije CO_2 sa 16,7 kg/t na manje od 2 kg/t proizvedenoga proizvoda.

European Waste Cataloque (European Comission Decision 2000/532/CE) klasificira otpad nastao spaljivanjem biomase bezopasnim (Melotti et al., 2013). Međutim, njime je dopuštena reciklaža ovoga otpada samo u betonu, cementu, proizvodnji opeke, pri izgradnji nasipa te za ponovnu uporabu u okolišu. Stoga su brojna istraživanja usmjerena na mogućnosti njegove primjene i u asfaltnim mješavinama, najčešće kao punila.

Punilo je agregat veličine čestica koje potpuno prolaze sitom otvora 2 mm i čine ga većina čestica manjih od 0,063 mm. Čini 5 - 10% ukupne mase agregata u asfaltnoj mješavini, a može biti vapnenačko ili dolomitno (nastalo drobljenjem kamena) ili dobiveno industrijski (cement, leteći pepeo iz izgaranja ugljena). Osnovna je funkcija punila povećanje gustoće asfaltne mješavine popunjavanjem šupljine u agregatnom skeletu. Istraživanje je 27 vrsta različitih pepela biomase u svrhu ocjene pogodnosti za primjenu kao punila u asfaltnim mješavinama pokazalo potrebu za mljevenjem pepela radi postizanja potrebne finoće mliva (Melotti et al., 2013). Isto je istraživanje pokazalo i velike vrijednosti šupljina u suhom zbijenom punilu, što bi moglo rezultirati povećanjem krutosti bitumena u mješavini.

Riža je jedna od najvažniji žitarica na svijetu te je u posljednjoj godini berbe u svijetu proizvedeno gotovo 482 milijuna tona oljuštene riže (Shahbandeh). Stoga su i brojna istraživanja provedena upravo na karakterizaciji pepela nastaloga spaljivanjem rižine ljuske za primjenu u građevinarstvu. Pepeo rižine ljuske ima potencijal primjene kao dodatak bitumenu,

pri čemu se poboljšanjem svojstava bitumenskoga veziva poboljšavaju i mehanička svojstva asfaltne mješavine. Istraživanja su pokazala da se dodatkom pepela rižine ljuske bitumenu mijenjaju njegova reološka svojstva (Arabani and Tahami, 2017). Povećanje udjela pepela rezultira povećanjem stabilnosti mješavine te rastom točke razmekšanja i smanjenjem penetracije bitumena, što, pak, rezultira asfaltnim vezivom veće krutosti. Stabilnost po Marshallu vrućih asfaltnih mješavina moguće je povećati zamjenom konvencionalnoga punila pepelom rižine ljuske, što je prikazano u (Al-Hdabi, 2016). Primjena ovoga pepela rezultira neznatnim poboljšanjem svojstava neizravne vlačne čvrstoće, ali i poboljšanjem trajnosti, smanjenjem osjetljivosti na vodu te općenito trajnijom mješavinom. Povećanje stabilnosti po Marshallu i modula krutosti asfaltnih mješavina pepelom rižine ljuske i sjemena datulja rezultat je istraživanja prikazanoga u (Tahami et al., 2018). Također je istaknuta i mogućnost povećanja otpornosti na kolotraženje, poboljšanim kohezijskim svojstvima asfaltnoga mastiksa te adhezije između asfaltnoga mastiksa i agregata, što sve, pak, rezultira poboljšanjem otpornosti asfaltne mješavine na zamor. I dok su istraživanja primjene pepela rižine ljuske u vrućim asfaltnim mješavinama rezultirala poboljšanjem svojstava mješavine, pri niskim temperaturama dolazi do nepovoljnoga ponašanja asfalta i smanjenja otpornosti na zamor (Han et al., 2017). Rješenje je prikazano u zajedničkom djelovanju organskoga ulja dobivenoga iz otpadnih drvenih peleta u kombinaciji s pepelom rižine ljuske, čime su dobivena zadovoljavajuća svojstva mješavina pri niskim i visokim temperaturama. Kao nedostatak primjene pepela rižine ljuske u asfaltnim mješavinama istaknuto je i opadanje stabilnosti mješavine pri skladištenju s povećanjem udjela pepela (Xue et al., 2014).

Osim pepela rižine ljuske, i pepeo drugih tipova biomase ima potencijal primjene kao punila u asfaltnim mješavinama. Primjerice, pepeo nastao sagorijevanjem drvne biomase značajno poboljšava modul elastičnosti asfaltne mješavine, ali se stabilnost mješavine smanjuje s porastom udjela pepela (Bi and Jakarni, 2018). U istom se istraživanju ističe i da s porastom udjela pepela dolazi do povećanja otpornosti na trajne deformacije te poboljšanja otpornosti materijala na zamor. Pepeo drvne sječke upotrijebljen je kao zamjena dijela punila u vrućoj asfaltnoj mješavini te su rezultati pokazali povećanje otpornosti asfaltne mješavine na pojavu plastičnih deformacija i veću vlačnu čvrstoću te dobru otpornost na djelovanje vode (Dimter, 2021).

Bitumenske emulzije spadaju u hladne mješavine, s obzirom na to da pri njihovoj proizvodnji nije potrebna toplinska energija kao kod proizvodnje vrućih asfaltnih mješavina. Međutim, ovaj materijal ima relativno male početne čvrstoće i vrlo je osjetljiv na pojavu vlage. Stoga im se dodaje cement radi povećanja čvrstoće i krutosti mješavine, kao i otpornosti na vlagu. Industrija proizvodnje cementa jedan je od najvećih zagađivača okoliša u smislu oslobađanja CO_2 u okoliš po toni proizvedenoga proizvoda (oko 8% ukupne svjetske proizvodnje CO_2) (REPORT). Ako bismo zamijenili cement pepelom biomase u hladnim bitumenskim emulzijama, dobili bismo ekološki prihvatljiviji i ekonomski isplativiji proizvod. S tim su ciljem provedena istraživanja mogućnosti primjene pepela palminog lista kao punila u hladnim bitumenskim emulzijama, koja su pokazala da zamjena cementa pepelom palminoga lista u vrijednosti od 25 do 75% daje zadovoljavajuće rezultate, bez značajnijega pada u mehaničkim karakteristikama materijala

(Al-Merzah et al., 2019). Dodatkom je pepela moguće povećati neizravnu vlačnu čvrstoću i otpornost na trajne deformacije te smanjiti osjetljivost na vlagu.

5.3. Pepeo biomase za izvedbu nosivih slojeva kolničkih konstrukcija

Asfaltni slojevi čine najskuplji dio kolničke konstrukcije s obzirom na upotrijebljene materijale i sam proces proizvodnje koji zahtijeva velike količine energije. Izvedba nevezanih nosivih slojeva kolničke konstrukcije, iako jeftiniji od asfaltnih slojeva, zbog svoje debljine (uobičajeno 25 - 45 cm) značajno opterećuje okoliš, s obzirom na to da se izvode od prirodnih, neobnovljivih materijala. Stoga su i svjetska istraživanja usmjerena na primjenu novih, otpadnih materijala kao zamjene za prirodne, u cilju održivoga razvoja cestogradnje. U taj se koncept svakako uklapa i primjena pepela biomase koja bi, osim korekcije granulometrijske krivulje i učinka punila, poput onoga u asfaltnim mješavinama, mogla imati i stabilizirajuća svojstva, poput veziva, ovisno o njegovu kemijskom sastavu.

Primjena pepela rižine ljuske u kombinaciji s karbidnim otpadom i recikliranim asfaltom prikazana je u (Edeh et al., 2016), gdje je istaknut značajan utjecaj na mogućnost zbijanja i neznatna vodoupojnost te da ovakav materijal ima potencijal primjene u cestogradnji. Rezultati laboratorijskoga istraživanja mogućnosti primjene pepela drvne piljevine za stabilizaciju recikliranoga asfalta također su pokazali ohrabrujuće rezultate. Povećanjem udjela biopepela porasla je optimalna vlažnost i maksimalna suha prostorna masa materijala (Osinubi et al., 2012). Vrijednosti CBR-a inicijalno su opale s porastom udjela pepela biomase do minimalne vrijednosti od 11%. S obzirom na prikazane rezultate, mješavina s 90% recikliranoga asfalta i 10% pepela biomase pokazala je najveći potencijal u smislu vrijednosti CBR-a - postignuta je vrijednost od 26%. Slično istraživanje prikazano je i u (Edeh et al., 2019), gdje se također reciklirani asfalt stabilizirao pepelom iz otpada pri preradi šećerne trske. Istaknuto je da ovaj pepeo nema pucolansku ni hidrauličnu aktivnost, ali se može upotrebljavati kao inertni građevinski materijal. Dodatkom pepela recikliranom asfaltu poboljšava se granulometrijski sastav materijala. Sitne čestice pepela popunjavaju šupljine u agregatnom skeletu te tako povećavaju gustoću materijala. Dolazi do pada maksimalne suhe prostorne mase te porasta optimalne vlažnosti materijala. Najveće su CBR vrijednosti dobivene za mješavinu s jednakim udjelom pepela i recikliranoga asfalta. Istaknuto je i da se stabilizacijom recikliranoga asfalta pepelom nastalim spaljivanjem otpada iz prerade šećerne trske može dobiti trajan cestograđevni materijal, s neznatnim upijanjem vode.

Drvni se pepeli mogu primijeniti i u nosivim slojevima od nekoherentnih materijala. U istraživanju prikazanom u (Šķēls et al., 2016) utvrđeno je da se dodatkom 10% i 20% drvnoga pepela može znatno poboljšati nosivost pijeska prikazano CBR indeksom. CBR samoga pijeska iznosio je manje od 15%, a nakon dodatka pepela izmjerene su vrijednosti za potopljeno i nepotopljeno stanje od 34,1% i 43,4% za dodatak 10% pepela te 48,65% i 46,0% za dodatak 20% pepela. Pepelom kore drveta i mulja iz tvornice papira stabilizirali su šljunak u svrhu izvedbe nosivoga sloja u radu (Vestin et al., 2015). Mješavine šljunka s 20% i 30% pepela pokazale su povećanje tlačne čvrstoće nakon šest tjedana od 2 i 5,3 MPa, u odnosu na inicijalne

vrijednosti od 4,7 MPa i 4,4 MPa za 20% i 30% pepela. Nakon 12 su se ciklusa smrzavanja tlačne čvrstoće povećale u mješavinama s 30% pepela.

Aktivna pucolanska i hidraulična svojstva pepela biomase iskorištena su u istraživanju mogućnosti stabilizacije nevezanih nosivih slojeva kolničkih konstrukcija od prirodnih materijala tradicionalno upotrebljavanih u cestogradnji. Tako se u radovima (Šķēls et al., 2016, Skels et al., 2017) prikazuje istraživanje utjecaja letećega pepela drvne biomase kao hidrauličnoga veziva za primjenu u površinskim slojevima šumskih cesta. Ističe se da se ovim pepelom mogu stabilizirati površinski slojevi od tucanika i šljunka, pri čemu je dobivena najveća vrijednost neposrednoga indeksa nosivosti za udio pepela od 10% mase agregata (Šķēls et al., 2016). Ističe se utjecaj vremena njege uzoraka na aktivnost letećeg pepela drvne biomase, što je izraženo kroz povećanje jednoosne tlačne čvrstoće za uzorke njegovane sedam i 28 dana. Najveće vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće dobivene su za mješavine s 30% letećega pepela drvne biomase. Slični su zaključci istaknuti i za stabilizaciju pijeska letećim pepelom drvne biomase, pri čemu je istaknuto da mješavine s 20% pepela daju bolje vrijednosti od mješavina s 10% pepela s porastom duljine njege te njege u vodi (Skels et al., 2017).

5.4. Stabilizacija tla za izradu nasipa i posteljice ceste

Uz kvalitetu asfaltne mješavine, vrlo je bitan parametar u sprječavanju kolotraga i progresivnom pucanju asfaltnih slojeva kvalitetna podloga dovoljne nosivosti. Za osiguranje trajnosti, konstruktivnih svojstava, sigurnosti i udobnosti vožnje kolnička konstrukcija treba biti izgrađena na dobro nosivoj podlozi - posteljici. Posteljica je uređeni završni sloj nasipa ili u usjeku uređeno ili zamijenjeno sraslo tlo koje svojim fizikalnim i kemijskim svojstvima omogućuje preuzimanje prometnoga opterećenja kolničke konstrukcije. S obzirom na to da su prometnice linijski objekti, ponekad je nemoguće izbjeći dionice na kojima temeljno tlo ili tlo posteljice ne mogu zadovoljiti minimalne zahtjeve kvalitete. Tada se primjenjuju različiti postupci poboljšanja svojstava materijala u obliku stabilizacije osnovnoga materijala (tla) dodavanjem veziva (najčešće cementa ili vapna) ili korekcijom granulometrijskoga sastava i mehaničkim zbijanjem. Nestabilna tla pod djelovanjem vode i smrzavanja mijenjaju svoja svojstva, a osnovni uzrok nestabilnosti kod koherentnih tala je prisutnost vode. Brojna se istraživanja bave mogućnošću poboljšanja stabilnosti glinovitoga tla prilikom izgradnje cesta. Većina rješenja za ovaj problem, koja se koriste i danas, utvrđena su još 1960-ih u vidu metode stabilizacije nestabilnoga tla vapnom (Petry and Little, 2002). Primjenjivost ove metode proizlazi iz karakteristika vapna kao veziva i gline kao osnovnoga materijala koji je potrebno stabilizirati. Naime, vapno nije samostalno vezivo poput cementa, nego reakcijom s aktivnim silikatima i mineralima gline dolazi do pucolanske reakcije. Nastali kalcijevi i silikatni hidrati sljepljuju zrna tla, što rezultira poboljšanjem obradljivosti, mogućnošću zbijanja i povećanjem čvrstoće. To, pak, rezultira mogućnošću izrade slabije kolničke konstrukcije i izrade posteljice otporne na kišu tijekom izvođenja građevinskih radova. S obzirom na kemijski sastav pepela biomase te nemogućnosti da djeluju kao samostalno vezivo, istraživane su mogućnosti njihove kombinacije s vapnom radi stabilizacije tla za potrebe izvođenja radova u cestogradnji. Tako su istraživanja prikazana u (Basha et al., 2005) pokazala da je za poboljšanje svojstava

rezidualnoga tla u smislu plastičnosti, čvrstoće te ekonomičnosti optimalan udio cementa 6 - 8% i 10 - 15% pepela rižine ljuske. Stabilizacija aluvijalnoga tla pepelom rižine ljuske i šećerne trske rezultira padom indeksa plastičnosti s porastom udjela pepela od 2,5% do 12,5% te da je optimalni udio pepela u toj stabilizaciji 7,5% (Yadav et al., 2017). Dodavanje pepela rižine ljuske i slame te pepela otpada u preradi šećerne trske s tlom, rezultira povećanjem optimalne vlažnosti s porastom udjela pepela te dodatak od 20 - 25% rezultira i povećanjem CBR-a (Anupam et al., 2013). Utjecaj pepela rižine ljuske i ostatka kalcijeva karbida iz tvornice acetilena na stabilizirajuća svojstva ekspanzivnoga tla istraživan je u (Yang et al., 2019). Porastom je udjela stabilizirajućega materijala, vremena njege te početne količine vode u uzorcima zaključeno da se znatno smanjuje potencijal i bubrenje osnovnoga tla. Također je zaključeno i da se pri bubrenju razvijaju tanje pukotine i očuvana je cjelovitost uzoraka. Stabilizacija ekspanzivnoga tla mješavinom pepela rižine ljuske i ostatka kalcijeva karbida rezultira naglim porastom jednoosne tlačne čvrstoće materijala, ali i poboljšanjem kohezije i kuta unutrašnjega trenja stabiliziranoga tla zahvaljujući cementirajućim svojstvima stabilizirajuće mješavine. Maksimalne postignute vrijednosti čvrstoća dobivene su za dodatak pepela od 15% ukupne mase mješavine, a dovoljne su za širok spektar primjene ovako stabiliziranoga tla, poput izrade posteljice cesta i željeznica, izgradnju brana te u druge geotehničke svrhe.

Kombinacija vapna, pepela rižine ljuske i ostataka šećerne trske također rezultira povećanjem tlačne čvrstoće stabiliziranoga tla (Kharade et al., 2014). Slični su rezultati prikazani u (Amu et al., 2011), dodavanje pepela ostataka u preradi šećerne trske u ekspanzivna tla rezultira povećanjem CBR-a, tlačne čvrstoće i maksimalne suhe prostorne mase, ali i smanjenjem linearnoga bubrenja (Hasan et al., 2016). Pepeo nastao kao ostatak u preradi šećerne trske uzrokuje smanjenje gustoće tla u zbijenom stanju, što će, pak, rezultirati manjom težinom izgrađenoga nasipa i opterećenjem na temeljno tlo (Mir et al.). Uz pozitivan učinak na geotehnička svojstva tla, puno istraživanoga pepela rižine ljuske i šećerne trske, primjena kombinacije pepela ljuske pšenice i šećerne trske također daje slične rezultate (Singh and Sharma, 2017). Stabilizacija lateritnoga tla pepelom kore tropske biljke manioke prikazana je u (Edeh et al., 2014b). Istaknut je pozitivan učinak pepela na granulometrijsku krivulju osnovnoga tla, kao i promjene Atterbergovih granica. Naime, dodatak pepela rezultira porastom granice tečenja i granice plastičnosti te smanjenjem linearnoga bubrenja stabiliziranoga tla. Rezultat je to porasta specifične površine čestica koja nastaje dodatkom pepela, a što, pak, zahtijeva povećanu količinu vode radi vlaženja cjelokupne matrice mješavine. Osim ovih za Europu netipičnih biomasa, rižine ljuske, šećerne trske ili kore manioke, poznata su i istraživanja poljoprivredne biomase raširenije u Europi. Tako se u (Jimoh and Apampa, 2014) prikazuje utjecaj pepela oklasaka od kukuruza na stabilizaciju lateritnoga tla. Istaknuto je da ovaj pepeo ima učinak sličan cementu pri stabilizaciji nestabilnoga tla. Osim karakterističnih pojava poput smanjenja maksimalne suhe prostorne mase i povećanja optimalne vlažnosti, ističe se i sličnost utjecaja ovoga pepela s cementom i u pogledu Atterbergovih granica te uvjeta zbijanja. Pri dodatku pepela u vrijednosti od 1,5% lateritnom tlu postiže se najveći kapacitet izmjene kationa te prestanak pucolanske reakcije i daljnje povećanje udjela pepela dovodi do smanjenja čvrstoće stabiliziranoga tla. Navodi se i da se pri tom jednoosna tlačna čvrstoća

povećava za 14% u odnosu na tlo stabilizirano cementom. Pepeo s ložišta iz prerade maslina također se može koristiti kao filer u izradi nasipa (Cabrera et al., 2014), dok se dodatak letećega pepela ostataka prerade maslina pokazao manje djelotvoran u stabilizaciji lužnatoga tla te njegova učinkovitost može ovisiti o vrsti tla koje se stabilizira (Sol-Sánchez et al., 2016). Pozitivan utjecaj pepela s ložišta iz prerade maslina na svojstva ekspanzivnoga glinovitog tla prikazan je i u (Cabrera et al., 2018), gdje se ističe povećanje nosivosti tla zahvaljujući visokom udjelu kalcija u pepelu koji potiče pucolansku aktivnost. Ističe se i potencijal smanjenja linearnoga bubrenja gline za 99,5%, što je slično učinku dodatka 5% vapna osnovnom materijalu. Krivulje Proctorovog pokusa pokazuju slabu osjetljivost pepela na promjenu vlažnosti pri zbijanju te je ovako stabilizirano glinovito tlo moguće primijeniti za izgradnju nasipa cesta i za sve ostale potrebe gdje je povoljno i tlo stabilizirano vapnom.

Osim do sada prikazanih pepela poljoprivredne biomase, drvni se pepeli također mogu primijeniti za poboljšanje svojstava lokalnih materijala pri izvedbi nasipa, posteljice ili slojeva kolničke konstrukcije. S obzirom na velike količine CaO u sastavu drvnih pepela, oni se mogu koristiti kao potpuna ili djelomična zamjena za vapno pri modifikaciji i stabilizaciji koherentnih tala. Dodatkom vapna ili drvnoga pepela dolazi do modifikacije tla, odnosno kationske izmjene s mineralima gline i okrupnjivanja čestica tla, nakon čega su tla lakša za obradu i zbijanje te otpornija na djelovanje vode. Osim trenutačnoga učinka, vidljiv je i dugotrajan učinak kroz poboljšanje mehaničkih svojstava (tlačne čvrstoće, nosivosti po CBR-u), kao i otpornosti na djelovanje smrzavanja. Stabilizacijom se koherentnih materijala različitim vrstama i frakcijama drvnih pepela mogu postići tlačne čvrstoće nakon 28 dana podjednake stabilizaciji vapnom (Supancic and Obernberger, 2011). No, za postizanje su istoga stabilizirajućega učinka potrebne znatno veće količine biopepela, jer sadrži manje reaktivnih spojeva (CaO). Veće potrebne količine veziva u kombinaciji sa sitnim česticama letećih pepela mogu predstavljati problem pri izvedbi stabilizacija, jer postojeća mehanizacija nije prilagođena ovakvim materijalima. Također, optimalni udio pepela drvne sječke ovisi o stupnju plastičnosti osnovnoga materijala koji se stabilizira (Zagvozda, 2020).

Primjena pepela treseta kao veziva za koherentno tlo pri izgradnji nasipa istraživan je u (Mousavi, 2015). Utvrđeno je da je optimalan sastav stabilizacijske mješavine onaj s 14% dodatka cementa, 12% pepela treseta te 5% pijeska. Manji udio pepela treseta nije bio dovoljan za poticanje hidratacijske reakcije cementa i vode, dok je udio pepela veći od 12% rezultirao zarobljavanjem čestica cementa i sprječavanjem njegova kontakta s vodom, a time i sprječavanjem razvoja hidratacije cementa te posljedično padom čvrstoće. Pepeo drvne piljevine poboljšava granulometrijski sastav lateritnoga tla tako da sitne čestice pepela popunjavaju šupljine između krupnijih čestica tla te dolazi do flokulacije-aglomeracije čestica tla i pepela u čestice primjerenije veličine (Edeh et al., 2014a). Atterbergove se granice (granica tečenja, plastičnosti, linearno skupljanje te indeks plastičnosti) smanjuju dodatkom pepela drvne piljevine lateritnom tlu uslijed združivanja i cementiranja čestica u veće klastere pri pucolanskoj reakciji u mješavini.

Dodatkom se 4% drvnoga pepela niskoplastičnim glinama povećava tlačna čvrstoća za 26,5% te CBR za 103,22% (Butt et al., 2016). Jednoosna tlačna čvrstoća stabilizirane gline visoke

plastičnosti drvnim pepelom pokazala je trend porasta s produljenjem njege te je u mješavinama s 18% pepela iznosila 1,6 MPa nakon 28 dana (Emeh and Igwe, 2016). Dodatkom 6% pepela lateritnom tlu moguće je postići CBR vrijednosti od 92,26%, dok je za usporedbu ista količina vapna rezultirala CBR-om od 110,73% (Amu et al., 2005). Istraživači navode i da postoji određena optimalna količina dodatka pepela nakon koje dolazi do pada mjerenih mehaničkih svojstava (Butt et al., 2016) te da se u pojedinim slučajevima dodatkom manje količine vapna dodatno mogu poboljšati tlačne čvrstoće (Emeh and Igwe, 2016).

S obzirom na cijeli prikazani pregled literature i stanje dosadašnjih istraživanja mogućnosti primjene pepela biomase u cestogradnji, tablica 5.1 sumarno prikazuje rezultate laboratorijskih istraživanja i utjecaja pepela biomase na stabilizaciju tla kao najčešćega oblika njegove primjene. Utjecaj primjene pepela biomase na ekspanzivna tla prikazan je i dijelom u radu (Vijayan and Parthiban, 2020).

Tablica 5.1: Utjecaj tipova pepela biomase na stabilizaciju tla u cestogradnji

Svojstvo /pepeo	**Rižina ljuska**	**Šećerna trska**	**Masline**	**Oklasci kukuruza**	**Drvo**
Optimalna vlažnost	↑	↑	↑	↑	↑
Maksimalna suha prostorna masa	↓	↓	↓	↓	↓
CBR	↑	↑	↑	↑	↑
Bubrenje	↓	↓	↓		
Jednoosna tlačna čvrstoća	↑	↑		↑	↑
Referenca	(Basha et al., 2005, Yadav et al., 2017, Yang et al., 2019)	(Hasan et al., 2016, Mir et al.)	(Cabrera et al., 2018)	(Jimoh and Apampa, 2014)	(Edeh et al., 2014a, Butt et al., 2016)

Učinkovitost pepela biomase kao stabilizatora ili veziva ovisi o svojstvima osnovnoga materijala, ali i o svojstvima pepela. Svojstva pepela, pak, ovise o svojstvima biomase, tehnologiji spaljivanja i dijelu peći gdje se pepeli sakupljaju, te svaki pepeo treba istražiti zasebno (Demis et al., 2014).

5.5. Ekološki aspekt primjene pepela biomase u cestogradnji

Osnovno je načelo održivoga recikliranja ekološka prihvatljivost, tj. potencijalni štetni učinci primjene nekoga otpadnoga materijala u novoj funkciji. Pri valorizaciji i procjeni utjecaja na okoliš primjene biopepela treba uzeti u obzir i radnje koje prethode samoj ugradnji materijala u konstrukciju, kao što su njegovo sušenje, utovar, istovar i prijevoz do mjesta ugradnje te ih treba uzeti u obzir i pri analizi njegova cjelokupnoga gospodarenja (Pacheco da Costa et al., 2019). S druge strane, njegovom se primjenom smanjuje uporaba prirodnih materijala, kao i

potrošnja energije i vode potrebne za njihovu obradu i pripremu prije transporta na mjesto ugradnje.

Ekološkom je aspektu primjene otpadnih materijala posebice bitno posvetiti pozornost pri njihovoj primjeni u cestogradnji s obzirom na to da su kolnička konstrukcija i nasipi u izravnom kontaktu s okolnim tlom te potencijalno zagađenje može vrlo lako doći i do podzemnih voda. Iako se teški metali prirodno javljaju u tlu i podzemnim vodama, njihov je sadržaj rijetko na razinama toksičnosti. Oborinska voda pri otjecanju s kolnika može biti kontaminirana teškim metalima od abrazije guma (cink, kadmij), kočnica vozila (bakar), kao i drugih elemenata (Lucke and Dierkes, 2015), dok na onečišćenje teškim metalima tla i podzemnih voda utječu i materijali koji se upotrebljavaju prilikom izgradnje ceste.

Kao najopasniji se elementi u tragovima ističu kadmij i olovo. Kadmij nepovoljno djeluje na dišni i krvožilni sustav živih organizama, dok visoki udio olova može zatrovati probavni i živčani sustav (Jagustyn et al., 2017). Olovo je kancerogeno i mutageno, slično cinku, koji također uzrokuje anemiju. Spojevi kroma mogu prouzročiti oštećenja probavnoga sustava. Trovanje arsenom može dovesti do smrti uslijed smanjenja aktivnosti enzima potrebnih za pravilno funkcioniranje organizma te može izazvati i neurološke poremećaje. Koncentracija ovih elemenata u biljkama jako varira ovisno o vrsti i uvjetima u kojima biljka raste te su osnovni izvori ovih elemenata u biomasi minerali i gnojivo u tlu i vodi. Primjerice, kadmij u biomasu dolazi kroz korijen biljke ili preko lišća izloženoga atmosferskoj prašini i kiši. Količina teških metala u pepelu biomase ovisi o sadržaju pojedinih elemenata u samoj biomasi, uvjetima procesa njezina izgaranja, sustavu pročišćavanja ispušnih plinova te sklonosti elemenata isparavanju, što ovisi o prirodnim kemijskim vezama elemenata u biomasi. Znatan udio prisutnih teških metala u biomasi, 70 - 95% prelazi u preostali pepeo tijekom procesa spaljivanja (Jagustyn et al., 2017). Stoga su i svjetska istraživanja usmjerena na analizu mogućnosti prelaska tih elemenata u okoliš prilikom primjene u konstrukcijama izravno vezanih za okoliš, poput nasipa i kolničke konstrukcije.

Istraživanja su pokazala da, iako je u nekim biomasama detektiran udio teških metala veći od propisanih, količina je otpuštenih elemenata pri procjeđivanju znatno manja, gotovo zanemariva. Za pepele drvne biomase ističu se vrijednosti arsena i olova kao kritične s obzirom na to da ih je najveća koncentracija zabilježena u eluatu (Jagustyn et al., 2017). U istraživanju prikazanom u (Melotti et al., 2013) rezultati testa procjeđivanja ukazali su, pak, na potencijalnu opasnost procjeđivanja kroma i sulfata u okoliš.

Pri miješanju prirodnoga tla s drvenim pepelom, specifična svojstva pepela utječu na promjenu kemijskoga sastava i pH-vrijednosti tla, što, pak, utječe i na potencijal i svojstva procjeđivanja štetnih elemenata iz pepela (Oburger et al., 2016). Karakteristike pepela biomase znatno variraju ovisno o dijelu godine u kojem se dobavlja biomasa za spaljivanje, što se ističe kao jedan od glavnih nedostatak njegove potencijalno široke primjene (Melotti et al., 2013). No, iako im kemijski sastav znatno varira i ovisi o nizu čimbenika, rezultati testa procjeđivanja teških metala kao funkcije pH-vrijednosti eluata pokazuju ujednačene trendove (Tosti et al., 2019). Stoga je procjena prikladnosti nekoga pepela biomase s obzirom na utjecaj na okoliš

kroz potencijal procjeđivanja teških metala prikladnija metoda od analize ukupne količine teških metala u materijalu.

Istraživanje ekološkoga utjecaja primjene pepela s ložišta peći u cestogradnji identificiralo je oslobađanje kroma (Cr) u okoliš kao najveći ekološki problem te da su osnovni putevi izloženosti čovjeka kroz konzumaciju pitke vode i povrća koje je moglo biti u kontaktu s kontaminiranom podzemnom vodom (Shih and Ma, 2011). Jedan od ključnih čimbenika potencijalnog ekološkog rizika pokazalo se da je i projektno razdoblje kolničke konstrukcije u čijem se sastavu nalazi pepeo, koliko se često kolnička konstrukcija obnavlja tijekom toga razdoblja te reciklira li se on ponovo nakon tog vremena ili odlaže na odlagalište.

Kroz prikazana istraživanja mogućnosti primjene pepela biomase u cestogradnji ističe se njegov izniman potencijal s obzirom na ostvarena mehanička svojstva i utjecaj na osnovne materijale, tradicionalno upotrebljavane u cestogradnji. Međutim, kao i kod primjene svih alternativnih, otpadnih materijala, osim pozitivnih fizičkih i mehaničkih karakteristika, nužno je provesti cjelokupnu analizu životnoga ciklusa materijala koji se koristi u izgradnji ceste te utjecaja na okoliš i žive organizme. Ovaj je dio karakterizacije cestograđevnih materijala još uvijek nedovoljno istražen te je osim standardnih laboratorijskih metoda i kriterija potrebno izraditi i dodatne kriterije kako bi se karakterizaciji pristupilo na sveobuhvatnoj razini.

Reference:

AL-HDABI, A. 2016. *Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler*. Construction and Building Materials, 126**,** 544.-551.

AL-MERZAH, S., AL-BUSALTAN, S. & AL NAGEIM, H. 2019. *Characterizing Cold Bituminous Emulsion Mixtures Comprised of Palm Leaf Ash*. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(6).

AMU, O. O., ADEWUMI, I. K., AYODELE, A. L., MUSTAPHA, R. A. & OLA, O. O. 2005. *Analysis of California Bearing Ratio Values of Lime and Wood Ash Stabilized Lateritic Soil,*. Journal of Applied Sciences, 5**,** 1479.-1483.

AMU, O. O., OGUNNIYI, S. A. & OLADEJI, O. O. 2011. *Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with sugarcane straw ash*. American Journal of Scientific and Industrial Research, 2**,** 323.-331.

ANUPAM, A. K., KUMAR, P. & RANSINCHUNG, G. D. 2013. *Use of Various Agricultural and Industrial Waste Materials in Road Construction*. Procedia - Social and Behavioral Sciences; 2nd Conference of Transportation Research Group of India, 104**,** 264.-273.

ARABANI, M. & TAHAMI, S. A. 2017. *Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture*. Construction and Building Materials, 149**,** 350.-358.

BASHA, E. A., HASHIM, R., MAHMUD, H. B. & MUNTOHAR, A. S. 2005. *Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement*. Construction and Building Materials, 19**,** 448.-453.

BI, Y. C. & JAKARNI, F. M. 2018. *Evaluating properties of wood ash modified asphalt mixtures*. 10th Malaysian Road Conference & Exhibition 2018, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 512.

BÜHLER, F., NGUYEN, T-V., ELMEGAARD, B. 2016. *Sustainable Production of Asphalt using Biomass as Primary Process Fuel*. Chemical Engineering Transactions, 52**,** 685.-690.

BUTT, W. A., GUPTA, K. & JHA, J. N. 2016. *Strength behavior of clayey soil stabilized with saw dust ash*. International Journal of Geo-Engineering, 7.

CABRERA, M., GALVIN, A. P., AGRELA, F., CARVAJAL, M. D. & AYUSO, J. 2014. *Characterisation and technical feasibility of using biomass bottom ash for civil infrastructures.* Construction and Building Materials 58**,** 234.-244.

CABRERA, M., ROSALES, J., AYUSO, J., ESTAIRE, J. & AGRELA, F. 2018. *Feasibility of using olive biomass bottom ash in the sub-bases of roads and rural paths*. Construction and Building Materials, 181**,** 266.-275.

DEMIS, S., TAPALI, J. G. & PAPADAKIS, V. G. 2014. *An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials.* Construction and Building Materials, 68**,** 291.-300.

DIMTER, S., ŠIMUN, M., ZAGVOZDA, M. & RUKAVINA, T. 2021. *Laboratory evaluation of the properties of asphalt mixture with wood ash filler*. Materials, 14(3)

EAPA. dostupno: https://eapa.org/eapa-asphalt-in-figures-2017 [pristupljeno 20. 12. 2018].

EDEH, J. E., AGBEDE, I. O. & TYOYILA, A. 2014a. *Evaluation of sawdust ash–stabilized lateritic soil as highway pavement material*. Journal of materials in civil engineering, 26**,** 367.-373.

EDEH, J. E., JOEL, M. & ABUBAKAR, A. 2019. *Sugarcane bagasse ash stabilization of reclaimed asphalt pavement as highway material*. *International Journal of Pavement Engineering,* 20**,** 1385.-1391.

EDEH, J. E., SAMSON, I. & TERHEMBA, A. 2016. *Rice-husk ash-carbide-waste stabilization of reclaimed asphalt pavement*. Nigerian Journal of Technology, 35**,** 465.-472.

EDEH, J. E., TYAV, S. T. & OSINUBI, K. J. 2014b. *Cassava Peel Ash Stabilized Lateritic Soil as Highway Pavement Material,*. Geo-Shanghai 2014. Shanghai, China.

EMEH, C. & IGWE, O. 2016. *The combined effect of wood ash and lime on the engineering properties of expansive soils*. International Journal of Geotechnical Engineering. 10(3), 246.-256.

HAN, Z., SHA, A., YUAN, D., TONG, Z., LIU, Z., GAO, J. & ZOU, X. 2017. *Study on the optimum rice husk ash content added in asphalt binder and its modification with bio-oil*. Construction and Building Materials, 147**,** 776.-789.

HASAN, H., DANG, L., KHABBAZ, H., FATAHI, B. & TERZAGHI, S. 2016. *Remediation of Expansive Soils Using Agricultural Waste Bagasse Ash*. Procedia Engineering, The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics, 143**,** 1368.-1375.

JAGUSTYN, B., KMIEĆ, M., SMĘDOWSKI, L. & SAJDAK, M. 2017. *The content and emission factors of heavy metals in biomass used for energy purposes in the context of the requirements of international standards*. Journal of the Energy Institute, 90**,** 704.-714.

JIMOH, Y. A. & APAMPA, O. A. 2014. *An Evaluation of the Influence of Corn Cob Ash on the Strength Parameters of Lateritic Soils*. Civil and Environmental Research, 6**,** 1.-10.

KHARADE, A. S., SURYAVANSHI, V. V., GUJAR, B. S. & DESHMUKH, R. R. 2014. *Waste product 'bagasse ash' from sugar industry can be used as stabilizing material for expansive soils.* International Journal of Research in Engineering and Technology, 3**,** 506.-512.

LUCKE, T. & DIERKES, D. 2015. *Addressing the demands of the new german permeable pavement design guidelines and the hydraulic behaviour of a new paving design*. Journal of Engineering Science and Technology, Special Issue on ACEE 2015 Conference**,** 14.-28.

MELOTTI, R., SANTAGATA, E., BASSANI, M., SALVO, M. & RIZZO, S. 2013. *A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures.* Waste Management, 33**,** 1906.-1917.

MIR, B. A., GUPTA, K. & JHA, J. N. 2016. *Some studies on the behavior of sugarcane bagasse ash admixed with cement stabilized soil.* International Conference on Soil and Environment, ICSE 2016, Bangalore.

MOUSAVI, S. E. 2015. *Stabilization of compacted clay with cement and/or lime containing peat ash.* Road Materials and Pavement Design, 18**,** 1304.-1321.

OBURGER, E., JÄGER, A., PASCH, A., DELLANTONIO, A., STAMPFER, K. & WENZEL, W. W. 2016. *Environmental impact assessment of wood ash utilization in forest road construction and maintenance - A field study*. Science of the Total Environment, 544**,** 711.-721.

OSINUBI, K., EDEH, J. & ONOJA, W. 2012. *Sawdust Ash Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement*. Journal of ASTM International, 9**,** 1.-10.

PACHECO DA COSTA, T., QUINTEIRO, P., TARELHO, L. A. C., ARROJA, L. & DIAS, A. C. 2019. *Environmental assessment of valorisation alternatives for woody biomass ash in construction materials*. Resources, Conservation & Recycling, 148**,** 67.-79.

PETRY, T. M. & LITTLE, D. N. 2002. *Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures - History, Practice, and Future.* Journal of materials in civil engineering, 14**,** 447.-460.

REPORT, C. H. *Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete* [Online]. dostupno: https://reader.chathamhouse.org/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete# [pristupljeno 20. 12. 2019.].

SHAHBANDEH, M. *Rice - Statistics & Facts* [Online]. dostupno: https://www.statista.com/topics/1443/rice/ [pristupljeno 20. 12. 2019.].

SHIH, H. C. & MA, H. W. 2011. *Assessing the health risk of reuse of bottom ash in road paving.* Chemosphere, 82**,** 1556.-1562.

SINGH, M. & SHARMA, R. 2017. *Soill stabilization using industrial waste (wheat husk and sugarcane straw ash).* International Research Journal of Engineering and Technology, 4**,** 589.-596.

SKELS, P., BONDARS, K. & HARITONOVS, V. 2017. *Wood fly ash stabilization of unbound pavement layers.* Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seul 2017**,** 513.-516.

SOL-SÁNCHEZ, M., CASTRO, J., UREÑA, C. G. & AZAÑÓN, J. M. 2016. *Stabilisation of clayey and marly soils using industrial wastes: pH and laser granulometry indicators.* Engineering Geology, 200**,** 10.-17.

STRIPPLE, H. L. 2001. *Life Cycle Assessment of Road, A Pilot Study for Inventory Analysis*. Gothenburg, Sweden: Swedish National Road Administration.

SUPANCIC, K. & OBERNBERGER, I. 2011. *Wood ash utilisation as a stabiliser in road construction - First results of large - scale tests.* 19th European Biomass Conference & Exhibition.

ŠĶĒLS, P., BONDARS, K., PLONIS, R., HARITONOVS, V. & PAEGLĪTIS, A. 2016. *Usage of Wood Fly Ash in Stabilization of Unbound Pavement Layers and Soils.* Proceedings of 13th Baltic Sea Geotechnical Conference**,** 122.-125.

TAHAMI, S. A., ARABANI, M. & MIRHOSSEINI, A. F. 2018. *Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt.* Construction and Building Materials, 170**,** 547.-556.

TOSTI, L., VAN ZOMEREN, A., PELS, J. R., DIJKSTRA, J. J. & COMANS, R. N. J. 2019. *Assessment of biomass ash applications in soil and cement mortars.* Chemosphere, 223, 425.-437.

VESTIN, J., ARM, M., NORDMARK, D., LAGERKVIST, A., HALLGREN, P. & LIND, B. 2015. *Fly ash as a road construction material*. WASCON 2012 Conference proceedings**,** 1.-8.

VIJAYAN, D. S. & PARTHIBAN, D. 2020. *Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil - A review.* Environmental Technology & Innovation, 20, 101108

WANG, T. X., F.; ZHU, X.; HUANG, B.; WANG, J.; AMIRKHANIAN, S. 2018. *Energy consumption and environmental impact of rubberized asphalt pavement.* Journal of Cleaner Production, 180**,** 139.-158.

XUE, Y., WU, S., CAI, J., ZHOU, M. & ZHA, J. 2014. *Effects of two biomass ashes on asphalt binder: Dynamic shear rheological characteristic analysis*. Construction and Building Materials, 56, 7.-15.

YADAV, A. K., GAURAV, K., KISHOR, R. & SUMAN, S. K. 2017. *Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads.* International Journal of Pavement Research and Technology, 10**,** 254.-261.

YANG, Q., LIU, Y., CHANG, C.-W., NAMDAR, A., SHE, Y., LIN, C.-H. & YUAN, X. 2019. *Stabilization of expansive soil using cementing material from rice husk ash and calcium carbide residue*. Construction and Building Materials, 221**,** 1.-11.

ZAGVOZDA, M., RUKAVINA, T. & DIMTER, S. 2020. Wood bioash effect as lime replacement in the stabilisation of different clay subgrades. International Journal of Pavement Engineering

6. ENERGETSKI POTENCIJAL POLJOPRIVREDNE BIOMASE I MOGUĆNOST UPORABE PEPELA POLJOPRIVREDNE BIOMASE U GRAĐEVNIM PROIZVODIMA - REZULTATI PROJEKTA ECO BUILD

Sažetak: Poglavlje prikazuje rezultate projekta Eco build koji je provođen u sklopu programa prekogranične suradnje Interreg IPA između Hrvatske i Srbije u razdoblju od 2017. do 2020. Cilj je projekta bio umrežiti poljoprivrednike kao posjednike poljoprivredne biomase, s industrijom kao potencijalnim korisnikom poljoprivredne biomase, te industriju s građevinskom industrijom, kao potencijalnim korisnikom pepela koji nastaje sagorijevanjem poljoprivredne biomase. U projektu je istražen energetski potencijal poljoprivredne biomase te mogućnost primjene pepela te biomase u građevnim proizvodima. U dijelu je istraživanja, na razini biomase, zaključeno da je poljoprivredna biomasa jednako kvalitetna kao i drvna sječka koja se uobičajeno upotrebljava kada je riječ o obnovljivim izvorima energije. U dijelu istraživanja koje obuhvaća pepele poljoprivredne biomase zaključeno je da pepeli imaju potencijala za uporabu u građevnim proizvodima, ali i da svaki pepeo treba zasebno istražiti. Umrežavanje posjednika i korisnika poljoprivredne biomase i pepela poljoprivredne biomase može pridonijeti unaprjeđenju gospodarstva, kao i učinkovito riješiti problem zbrinjavanja otpada u svim fazama njegova nastanka.

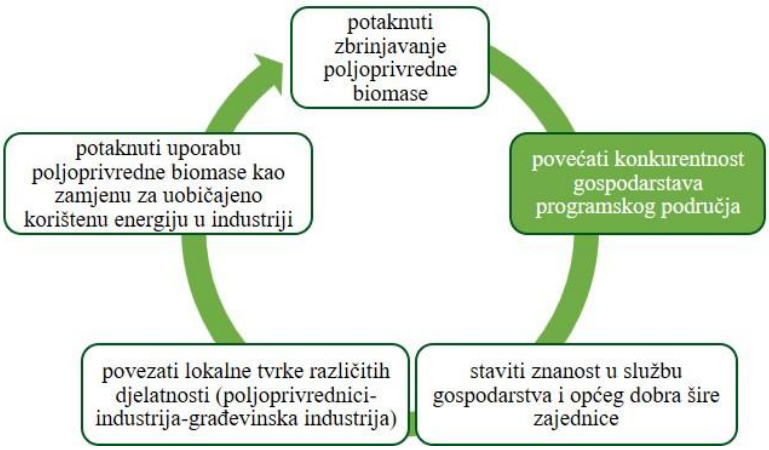
Ključne riječi: poljoprivredna biomasa, energetski potencijal, pepeo poljoprivredne biomase, mort, beton, stabilizirano tlo

6.1. O projektu Eco build

Zajednički su problemi koji muče Slavoniju i Vojvodinu, kao područja u Hrvatskoj i Srbiji u kojima je poljoprivreda dominantna djelatnost, niska konkurentnost u gospodarstvu, slaba povezanost tvrtki i neodgovarajuće odlaganje žetvenih ostataka - biomase. Upravo su se tim problemima odlučili pozabaviti Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku i Departman za građevinarstvo i geodeziju Fakulteta tehničkih nauka koji djeluje u sklopu Univerziteta u Novom Sadu, prijavivši projekt Eco build - *Poljoprivredni otpad - izazovi i poslovne mogućnosti* u sklopu natječaja Interreg IPA programa prekogranične suradnje Hrvatske-Srbije za razdoblje 2014. - 2020. Projekt je prošao na natječaju te je usvojeno njegovo financiranje ukupne vrijednosti 464.582,54 eura za oba projektna partnera. Projekt je provođen u partnerskim institucijama u razdoblju od 1. kolovoza 2017. do 30. siječnja 2020.

Ideja projekta Eco build bila je umrežavanje znanstvenih organizacija s gospodarstvom radi stvaranja prekogranične mreže proizvođača i potencijalnih korisnika poljoprivredne biomase i pepela poljoprivredne biomase. Pod poljoprivrednom se biomasom ovdje podrazumijevaju dijelovi žitarica i industrijskih biljaka koji ostaju na poljima nakon žetve - ubiranja usjeva ili, pak, nakon prerade tih usjeva u industriji. Zadatak je projektnih timova bio uspostaviti suradnju

između poljoprivrednika, koji posjeduju poljoprivrednu biomasu i lokalne industrije, koja bi tu biomasu koristila kao zamjenu za uobičajeno korištene energente te suradnju između lokalne industrije i građevinske industrije koja bi mogla iskoristiti pepeo nastao sagorijevanjem žetvenih ostataka u građevinskim proizvodima. Slika 6.1 prikazuje ciljeve projekta Eco build.



Slika 6.1: Ciljevi projekta Eco build

Projektom se nastojalo povezati tri profila tvrtki (poljoprivrednici/lokalna industrija/građevinska industrija) te ukazati na činjenicu da zajedničkim djelovanjem mogu ostvariti korist za sve uključene strane te, općenito, poboljšati konkurentnost regionalnih ekonomskih subjekata i pospješiti daljnji razvoj poslovnoga okruženja u pograničnom području Hrvatske i Srbije. Uspostavljanjem bi se mreže između proizvođača i korisnika ispunila osnovna načela kružne ekonomije, a to su pretvaranje otpada u društveno koristan proizvod reciklažom i smanjenje ukupne količine otpada.

U istraživačkom su dijelu projekta obje partnerske institucije radile na razvoju četiriju građevinskih proizvoda: morta, betonskih/armiranobetonskih elemenata, predgotovljenih betonskih elemenata i stabiliziranog tla u kojima se može upotrebljavati lokalno dostupan pepeo nastao sagorijevanjem poljoprivredne biomase. Kada je riječ o uporabi biomase kao energenta, u Hrvatskoj dominira uporaba drvne sječke koja dolazi iz sječe šuma te obrade drveta. Locirano je tek nekoliko tvornica koje kao energent koriste ovaj lokalno dostupan tip biomase. Kako bi popularizirali uporabu poljoprivredne biomase, u sklopu su projekta Eco build istražena i svojstva ovog tipa biomase kao energenta. Rezultati istraživanja hrvatske partnerske institucije u projektu Eco build prikazani su u nastavku ovoga poglavlja.

6.2. Raspoložive količine biomase u Hrvatskoj

Tablica 6.1 prikazuje ukupne količine najvažnijih ratarskih kultura u Republici Hrvatskoj čiji se žetveni ostatci mogu rabiti kao zamjena za energent u industriji. Podatci za petogodišnje razdoblje prikazani tablicom 6.1 preuzeti su iz dokumenata *Biljna proizvodnja u 2014. - 2018.* koji se svake godine objavljuju na stranici Državnog zavoda za statistiku Republike Hrvatske. Količina biomase preostale nakon žetve ovih kultura jednaka je ili čak i veća od količine požnjevenih usjeva (Ambrosio et al., 2017).

Tablica 6.1: Količine ratarskih usjeva u Republici Hrvatskoj za razdoblje 2014. - 2018.

Ratarska kultura	Požnjevena količina (u tonama) po godinama				
	2014.	**2015.**	**2016.**	**2017.**	**2018.**
Pšenica	648.917	758.638	960.081	682.322	738.363
Kukuruz	2,046.966	1,709.152	2,154.470	1,559.638	2,147.275
Ječam	175.592	193.451	263.165	260.926	227.520
Raž	2800	3356	4646	2566	4100
Zob	56.555	71.743	80.414	68.333	44.827
Pšenoraž	61.316	54.595	81.393	68.648	62.010
Ostale žitarice	2656	5860	10.264	6068	6830
Soja	131.424	196.431	244.075	207.765	245.188
Suncokret	99.489	94.075	110.566	115.880	110.790
Uljana repica	71.228	56.783	112.990	135.810	155.842
Ostale uljarice	1685	2481	3825	3441	4650
Ukupno	**3,298.628**	**3,146.565**	**4,025.889**	**3,111.397**	**3,747.395**

Poljoprivredna struka podržava zaoravanje žetvenih ostataka usjeva te smatra da se time poboljšava struktura tla (Vukadinović et al., 2014). Međutim, uslijed povećanih troškova za gorivo i mehanizaciju pri zaoravanju žetvenih ostataka te nedovoljne edukacije individualnih proizvođača, neki su poljoprivrednici pribjegavali rješavanju problema biomase njezinim spaljivanjem, što, ne samo da donosi štetu u poljoprivredi kroz gubitak organske tvari u tlu i uništavanje živih organizama, nego i zagađuje okoliš. Iako je ovo u Republici Hrvatskoj u današnje vrijeme zabranjeno kroz *Pravilnik o višestrukoj sukladnosti* (Ministarstvo poljoprivrede, 2015), još uvijek imamo priliku vidjeti da se na poljima žetveni ostatci spaljuju (slama, a posebice kukuruzovina). Razloge za to, prije svega, treba tražiti u tehničkim problemima koji se javljaju kod zaoravanja te usitnjavanja i pripreme tla za sljedeću kulturu, posebice kada se radi o velikim količinama žetvenih ostataka i zaostaloj masi. U takvim bi slučajevima idealno bilo preusmjeriti suvišnu biomasu u lokalnu industriju koja bi ju koristila kao zamjenu za uobičajeno upotrebljavanje energente.

6.3. Potencijal poljoprivredne biomase kao energenta

Energente se obično u literaturi opisuje kroz njihove vrijednosti ogrjevne moći (gornju - H_g i donju - H_d granicu), sadržaj pepela te sadržaj sumpora čija je prisutnost nepoželjna, jer utječe na emisije nepoželjnih plinova pri njezinu izgaranju (Matin et al., 2013). Tablica 6.2 prikazuje navedene parametre za ugljen i prirodni plin kao uobičajeno upotrebljavane energente te neke vrste biomasa (drvna biomasa: breza, javor, smreka, tikovina, palisander, jasen, kesten, lovor, bukva te biomasa ljuski lješnjaka i oraha), sukladno domaćoj i svjetskoj literaturi. Općenito, ogrjevne su vrijednosti drvne biomase te biomase ljuske lješnjaka i oraha niže od ogrjevnih vrijednosti standardnih energenata poput prirodnog plina i ugljena.

Tablica 6.2: Ogrjevne vrijednosti, udio pepela i sumpora kod različitih energenata

Energent	H_d (MJ/kg)	H_g (MJ/kg)	Pepeo (%)	Sumpor (%)
Ugljen (vlažan)	22,73 (Essom co., 2008)	23,97 (Essom co., 2008)	10-40 (Jayanti et al., 2007)	0,2-10 (Pak et al., 2016)
Prirodni plin	47,14 (Essom co., 2008)	52,23 (Essom co., 2008)	-	0,001 (Posarić, 2009)
Nafta	42,69 (Essom co., 2008)	45,54 (Essom co., 2008)	-	<6 (Riazi et al., 1999)
Breza	16,6 (Günther et al., 2012)	17,9 (Günther et al., 2012)	-	-
Javor	17,1 (Günther et al., 2012)	18,5 (Günther et al., 2012)	-	-
Smreka	17,2 (Günther et al., 2012)	18,6 (Günther et al., 2012)	-	-
Tikovina	18,9 (Günther et al., 2012)	20,3 (Günther et al., 2012)	-	-
Palisander	19,1 (Günther et al., 2012)	20,5 (Günther et al., 2012)	-	-
Lješnjak	19,10-19,70 (Matin et al., 2013)	20,65-21,29 (Matin et al., 2013)	0,97-1,0 (Matin et al., 2013)	0,07-0,08 (Matin et al., 2013)
Orah	18,74-19,21 (Matin et al., 2013)	19,61-20,54 (Matin et al., 2013)	1,11-1,19 (Matin et al., 2013)	0,04-0,05 (Matin et al., 2013)
Jasen	16,39 (Viškanić, 2015)	17,39 (Viškanić, 2015)	1,32 (Viškanić, 2015)	-
Kesten	16,81 (Viškanić, 2015)	17,75 (Viškanić, 2015)	0,60 (Viškanić, 2015)	-
Lovor	16,38 (Viškanić, 2015)	17,52 (Viškanić, 2015)	0,94 (Viškanić, 2015)	-
Bukva	16,78 (Viškanić, 2015)	17,85 (Viškanić, 2015)	0,64 (Viškanić, 2015)	-

Istraživanjem u sklopu projekta Eco build analizirane su: ljuske sjemenki suncokreta te slama ječma, pšenice i soje (slika 6.2).



a) ljuske sjemenki suncokreta b) slama ječma i pšenice c) slama soje

Slika 6.2: Izgled poljoprivrednih biomasa

Uzorci poljoprivredne biomase i uzoraka pepela dostavljeni su u Centralni kemijsko-tehnološki laboratorij (CKTL) HEP-Proizvodnje d.o.o. te je provedena njihova analiza prema ispitnim metodama navedenima u tablici 6.3. Uzorci biomase prvo su sušeni te im je određena ukupna vlaga, zatim su usitnjeni u mlinu na veličinu čestica manju od 1 mm, a na kraju im se određuje sadržaj pepela, sumpora i klora te ogrjevna vrijednost. Sadržaj pepela određen je gravimetrijski, žarenjem u peći. Na temelju toga je rezultata moguće procijeniti količine pepela koje će nastati

izgaranjem biomase u energetskim postrojenjima. Sumpor i klor u biomasi se nalaze u vrlo niskim koncentracijama, no tijekom izgaranja goriva mogu prouzročiti koroziju na izmjenjivačkim površinama (Berlanga and Ruiz, 2013) te je, stoga, njihovo određivanje bitno. Ogrjevna vrijednost predstavlja količinu toplinske energije koja se može dobiti izgaranjem biomase u energetskom postrojenju. Na ogrjevnu vrijednost najviše utječu kemijski sastav i vlažnost biomase. Ogrjevna se vrijednost određuje kalorimetrom. Gornja ogrjevna vrijednost predstavlja količinu topline koja nastaje potpunim izgaranjem jedinične količine goriva, pri čemu se dimni plinovi ohlade na 25 °C, a vlaga iz dimnih plinova izluči kao kondenzat. Donja ogrjevna vrijednost predstavlja onu količinu topline koja nastaje potpunim izgaranjem jedinične količine goriva, pri čemu se dimni plinovi ohlade na 25 °C, a vlaga u dimnim plinovima ostaje u parovitom stanju i toplina kondenzacije ostaje neiskorištena (Lončar et al., 2009).

Tablica 6.3: Pregled metoda ispitivanja uzoraka poljoprivredne biomase (Netinger Grubeša et al., 2018b)

Parametar	Jedinica	Metoda
Sadržaj ukupne vlage	mas. %	HRN EN ISO 18134-1:2015(ISO, 2015c)
Sadržaj pepela	mas. %	HRN EN ISO 18122:2015(ISO, 2015b)
Sadržaj sumpora	mas. %	HRN EN ISO 16994:2015(ISO, 2015a)
Sadržaj klora	mas. %	HRN EN ISO 16994:2015(ISO, 2015a)
Ogrjevna vrijednost	MJ/kg	HRN EN ISO 18125:2017(ISO, 2017)

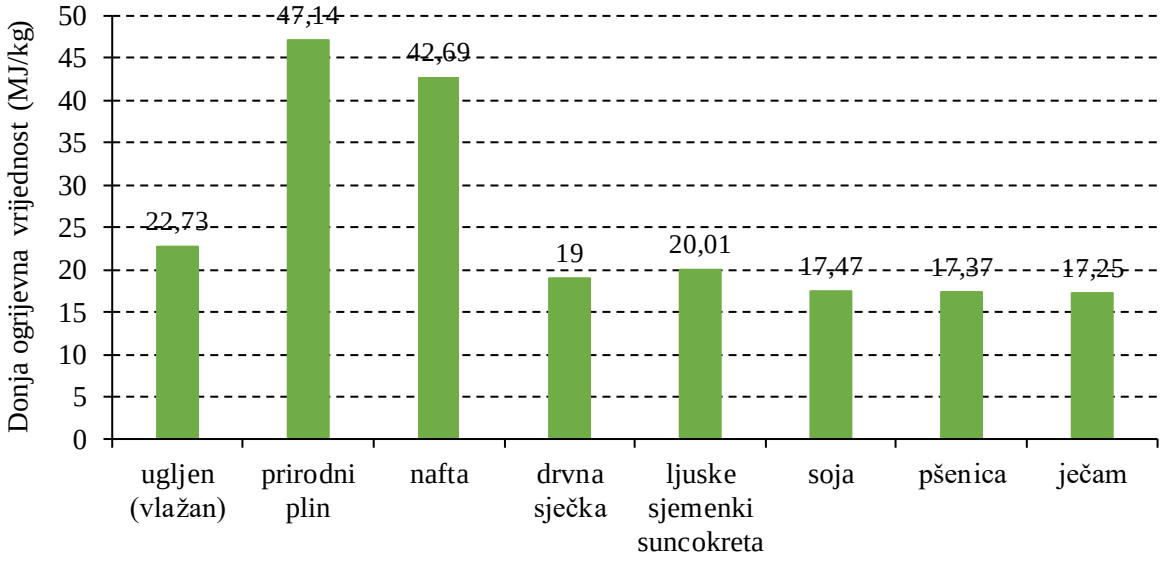
U tablici 6.4 prikazani su rezultati analiza poljoprivredne biomase. Rezultati ukupne vlage su izraženi na dostavnom stanju, dok su rezultati sadržaja pepela, sumpora i klora izraženi na suho stanje, odnosno uzorak bez vlage. Gornja i donja ogrjevna vrijednost izraženi su i na suhom i dostavnom stanju.

Tablica 6.4: Rezultati ispitivanja poljoprivredne biomase (Netinger Grubeša et al., 2018b)

Parametar	Jedinica	Osnova	Ječam	Pšenica	Soja	Ljuske sjemenki suncokreta
Sadržaj ukupne vlage	mas. %	dostavno	7,7	8,0	11,5	11,2
Sadržaj pepela	mas. %	suh	6,5	5,5	4,2	4,0
Sadržaj sumpora	mas. %	suh	0,072	0,062	0,053	0,109
Sadržaj klora	mas. %	suh	0,134	0,145	0,072	0,117
Ogrjevna vrijednost, gornja	MJ/kg	suh	18,45	18,59	18,71	21,36
		dostavno	17,03	17,10	16,56	18,97
Ogrjevna vrijednost, donja	MJ/kg	suh	17,25	17,37	17,47	20,01
		dostavno	15,74	15,78	15,18	17,50

Iz rezultata je vidljivo da ječam ima najmanji (7,7 mas. %), a soja najveći udio vlage (11,5 mas. %). Sadržaji pepela su podjednaki u svim uzorcima, s tim da je najmanji kod suncokreta (4,0 mas. %), a najveći u ječmu (6,5 mas. %). Sadržaj sumpora je najmanji u soji (0,053 mas. %), a najveći u suncokretu (0,109 mas. %), dok je sadržaj klora znatno manji u soji (0,072 mas. %), a najveći u žitu (0,145 mas. %). Uspoređujući ogrjevne vrijednosti najveću donju ogrjevnu vrijednost ima suncokret (17,50 MJ/kg). Prema dobivenim se rezultatima može zaključiti da je suncokret najpogodniji za spaljivanje kao biogorivo zbog najviše ogrjevne vrijednosti i najmanjega sadržaja pepela.

Na slici 6.3 je prikazan odnos dobivenih donjih ogrjevnih vrijednosti poljoprivredne biomase u suhom stanju u odnosu na izmjerene ogrjevnih vrijednosti drvne sječke (u suhom stanju), te fosilnih goriva ugljena, plina i nafte. Donja ogrjevna vrijednost za drvnu sječku preuzeta je iz literature (Ea Energy Analyses, 2018), a za ugljen, prirodni plin i naftu iz tablice 6.2 ovoga poglavlja.



Slika 6.3: Usporedni prikaz donjih ogrjevnih vrijednosti pojedinih vrsta goriva

Iz slike 6.3 vidljivo je da poljoprivredna biomasa ima znatno manju ogrjevnu vrijednost od fosilnih goriva kao što su plin i nafta te čak ugljena, uzme li se u obzir da je ovdje iskazana ogrjevna vrijednost za ugljen u vlažnom stanju, dok je za sve ostale energente ona iskazana u suhom stanju. Međutim, usporede li se ogrjevne vrijednosti poljoprivredne biomase s ogrjevnim vrijednostima drvne sječke, vidljivo je da su podjednakih vrijednosti, dok jedan tip poljoprivredne biomase, ljuske sjemenki suncokreta, bilježe i veću ogrjevnu vrijednost od drvne sječke.

Prema Strategiji gospodarenja otpadom Republike Hrvatske (Vlada Republike Hrvatske, 2005) u Hrvatskoj održavanjem šuma godišnje nastane oko 400.000 tona šumskoga otpada. Sukladno podatcima Hrvatskog operatera tržišta energije do 2020. je u pogon pušteno 37 elektrana na biomasu (drvnu sječku) i taj je broj u porastu. Raspoložive se količine poljoprivredne biomase u Hrvatskoj za petogodišnje razdoblje kreću u granicama od 3,111.297 do 4,025.889 tona

godišnje, što je i do 10 puta veća količina u usporedbi s količinom raspoloživoga šumskoga otpada koji sadašnje elektrane na biomasu upotrebljavaju kao energent. Uzimajući u obzir da dio poljoprivredne biomase treba ostaviti za potrebe zaoravanja na poljima kako bi se očuvala kvaliteta poljoprivrednih tala, još uvijek preostaju velike količine neiskorištene biomase te vrste. Preusmjeravanje bi suvišne poljoprivredne biomase u lokalnu industriju donijelo korist i poljoprivrednicima koji je posjeduju, a i industriji koja bi ju upotrebljavala. Naime, suvišna biomasa trenutačno ostaje zarobljena na poljima ili ju, pak, poljoprivrednici spaljuju onečišćujući tako okoliš. Prodajom biomase industriji poljoprivrednici bi ostvarili financijsku korist. S druge strane, poljoprivredna je biomasa otpadni proizvod i očekuje se da se prodaje za nižu cijenu od uobičajeno upotrebljavanih energenata, što bi donijelo određene uštede industriji koja ju koristi kao energent. Sagorijevanjem poljoprivredne biomase u industriji generiraju se velike količine pepela koje će biti potrebno zbrinuti. U nastavku ovog poglavlja dan je prikaz istraživanja o mogućnostima uporabe takvih pepela u građevnim proizvodima.

6.4. Karakterizacija pepela poljoprivredne biomase kao građevnog materijala

Prije uporabe pepela poljoprivredne biomase u građevnim proizvodima potrebno je napraviti njihovu karakterizaciju koja će uputiti na moguće nedostatke te uporabe. U nastavku je dan prikaz karakteristika pepela nastalih sagorijevanjem četiriju različitih poljoprivrednih biomasa: ljuski sjemenki suncokreta, slame ječma, slame pšenice te slame soje. Naime, lokalna tvornica ulja koristi ljuske sjemenki suncokreta kao gorivo u svom postrojenju. Pri tom se, u omjeru 50:50, generiraju dvije vrste pepela: leteći pepeo i pepeo s ekonomajzera. Količina pepela koja godišnje nastaje procjenjuje se na 84 tone. Leteći pepeo i pepeo s ekonomajzera ljuski sjemenki suncokreta uzorkovani su u pogonu lokalne tvornice ulja. U istoj su tvornici ulja pokušali zamijeniti ljuske sjemenki suncokreta slamom ječma i pšenice kao energentom. Gorenjem slama svake kulture nastala su po tri pepela: leteći pepeo, pepeo s ekonomajzera i ložišni pepeo. Sojin pepeo je preuzet iz kućanstva koje slamu soje koristi kao ogrjev.

Prije ispitivanja svi pepeli su prosijani na situ veličine otvora 1 mm (slika 6.4). Kod svih raspoloživih pepela (slika 6.5) ispitane su gustoće sukladno normi HRN EN 1097-7:2008 (CEN, 2008d), specifična površina BET metodom sukladno HRN ISO 9277:2016 (ISO, 2016), ostatci na situ 0,045 mm i indeks pucolanske aktivnosti u starosti uzoraka 28. dana sukladno HRN EN 450-1:2013 (CEN, 2013a), situ 0,063 mm sukladno HRN EN 933-10:2009 (CEN, 2009b), ostatci na situ 0,09 mm sukladno normi HRN EN 196-6:2010 (CEN, 2010a) te ispitivanje postojanosti obujma sukladno normi HRN EN 196-3:2009 (CEN, 2009a) cementnih pasta u kojima je 30% mase cementa zamijenjeno pepelom. Dodatno, 15 grama pepela pomiješano je s 1,5 dcl vode. Mješavina je dovedena u stanje suspenzije te je nakon 24 h, kada se pepeo istaložio, ispitana pH-vrijednost vode pomoću pH-metra (slika 6.6). Radi ocjene su kvalitete pepela isti parametri određeni i za cement CEM I 42,5 R. Provedba ispitivanja prikazana je slikama od 6.6 do 6.10. Rezultati navedenih ispitivanja prikazani su tablicom 6.5. Kemijski sastav pepela određen je fluorescencijom X zraka XRF prijenosnim uređajem u Centralnom kemijsko-tehnološkom laboratoriju (CKTL) hrvatskoga distributera električne energije, HEP-a te je ovdje prikazan u tablici 6.6.



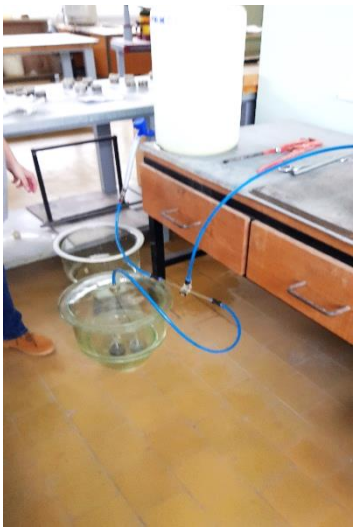
Slika 6.4: Prosijavanje pepela na situ veličine otvora 1 mm



Slika 6.5: Raspoloživi pepeli i cement



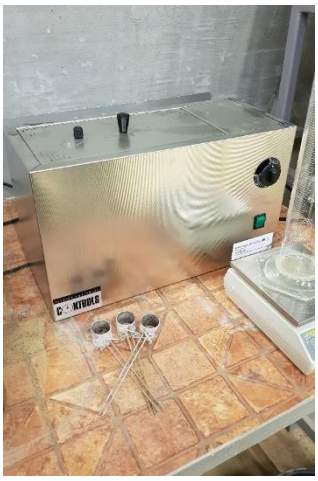
Slika 6.6: Ispitivanje pH-vrijednosti vode pomiješane s pepelima



Slika 6.7: Ispitivanje gustoće



Slika 6.8: Prosijavanje na sitima sijačicom zračnim mlazom



Slika 6.9: Ispitivanje postojanosti obujma



Slika 6.10: Ispitivanje specifične površine BET metodom

Tablica 6.5: Svojstva pepela (Netinger Grubeša et al., 2018a)

Svojstvo/Oznaka uzorka	**R**	**SL**	**SE**	**JL**	**JE**	**JLO**	**PL**	**PE**	**PLO**	**S**
Gustoća (g/cm^3)	2,983	2,401	2,400	2,400	2,399	2,397	2,400	2,399	2,398	2,400
Specifična površina (cm^2/g)	30 980	33 740	47 720	34 080	42 660	30 990	36 850	46 690	32 850	103 470
Indeks aktivnosti (AI)	1	0,4	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4
Ostatak na situ 0,045 mm (%)	6,22	50,51	32,34	53,30	42,59	72,41	54,63	29,47	87,53	12,78
Ostatak na situ 0,063 mm (%)	1,41	39,24	17,47	46,11	33,14	73,50	40,64	22,73	80,75	10,25
Ostatak na situ 0,09 mm (%)	0,21	25,79	13,97	19,53	20,05	57,77	17,41	14,08	62,40	10,23
Postojanost obujma (mm)	0,6	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0
pH-vrijednost	12,07	12,31	11,89	10,18	10,48	10,16	10,13	10,25	10,38	10,58

Oznake u tablici: R - cement, SL - leteći pepeo suncokreta, SE - pepeo suncokreta s ekonomajzera, JL - leteći pepeo ječma, JE - pepeo ječma s ekonomajzera, JLO - pepeo ječma s ložišta, PL - leteći pepeo pšenice, PE - pepeo pšenice s ekonomajzera, PLO - pepeo pšenice s ložišta

Rezultati iz tablice 6.5 ukazuju na znatno manje gustoće pepela u usporedbi s cementom. Indeksi aktivnosti pepela su ispod 0,8, što znači da pepeli nemaju pucolanska svojstva, tj. ne mogu biti samostalno vezivo u cementnim kompozitima. Specifične su površine pepela znatno iznad specifičnih površina cementa, tj. pepeli su sitnije granulacije od cementa. Na temelju specifičnih površina, ostataka na sitima 0,045, 0,063 i 0,09 mm, zaključuje se da su pepeli s ekonomajzera sitniji od letećih pepela, a leteći pepeli sitniji od pepela s ložišta. Zamjenom 30% cementa u cementnim pastama s pepelima nije narušena postojanost obujma cementnih pasta. pH-vrijednosti vode s pepelima su niže od pH-vrijednosti vode s cementom, što ukazuje na činjenicu da bi pepeli potencijalno mogli biti korozivno opasni po armaturu ugrađenu u beton s pepelima u sastavu.

Tablica 6.6: Kemijski sastav pepela (Netinger Grubeša et al., 2018a)

Oksidi (%)	Udjeli oksida (%)									
	R	**SL**	**SE**	**JL**	**JE**	**JLO**	**PL**	**PE**	**PLO**	**S**
P_2O_5	-	18,71	6,83	4,40	7,12	2,69	6,70	6,12	1,90	11,80
Na_2O	0,23	<0,10	0,25	0,26	0,26	0,54	0,21	0,35	0,21	<0,10
K_2O	0,60	24,13	43,58	44,16	33,86	7,48	32,46	36,48	17,70	8,98
CaO	59,48	28,68	18,19	10,20	14,15	7,86	15,26	12,34	6,09	41,02
MgO	2,62	21,68	11,75	4,15	7,80	2,93	7,19	6,71	2,78	21,09
Al_2O_3	5,25	0,52	0,52	0,68	0,99	3,01	0,86	1,03	1,24	2,50
TiO_2	-	0,01	0,01	0,03	0,07	0,35	0,05	0,08	0,34	0,22
Fe_2O_3	1,91	0,31	0,19	0,38	0,92	1,43	0,63	0,99	0,54	1,71
SiO_2	20,56	1,96	1,24	23,38	26,78	72,86	29,49	26,89	68,05	11,07
MnO	0,12	0,08	0,04	0,03	0,05	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05
SO_3	3,25	3,91	17,39	12,34	8,02	0,83	7,11	8,96	1,10	1,56

Na temelju se rezultata prikazanih u tablici 6.6 zaključuje da svi pepeli imaju znatno veći udio alkalija u obliku K_2O u odnosu na cement te bi mogli uzrokovati alkalno-silikatnu reakciju. Naime, visok udio Na_2O i K_2O u cementnoj matrici u kombinaciji s reaktivnim SiO_2 iz agregata (Grinys et al., 2014) mogu rezultirati alkalno-silikatnom reakcijom koja će prouzročiti mrežaste pukotine na betonu/mortu i dovesti do njegovoga postupnoga raspadanja. Istraženi pepeli uglavnom imaju manji udio CaO od cementa, no sadržaj je ovoga oksida u pepelu soje prilično visok te bi dodatno trebalo istražiti udio reaktivnoga CaO u ovom pepelu. Visok bi udio MgO kod većine pepela (osim kod ložišnih) mogao prouzročiti volumnu nestabilnost (Nokken, 2010) cementnih pasta s pepelom u sastavu. Pepeli imaju manji udio Al_2O_3 i Fe_2O_3 od cementa. U pogledu se SiO_2 ističu pepeli ječma i pšenice, a posebice oni s ložišta te će udio reaktivnoga SiO_2 u ovim pepelima biti dodatno istražen. Nema značajne razlike između pepela i cementa u pogledu sadržaja MnO, ali gotovo svi pepeli (osim ložišnih) imaju veće udjele SO_3 u odnosu na cemente. Sukladno literaturi (Borhan and Al-Rawi, 2016), visok udio SO_3 u kombinaciji s visokim udjelom MgO mogu pridonijeti volumnoj nepostojanosti cementne paste.

Unatoč kemijskom sastavu koji je ukazivao na potencijalnu volumnu nepostojanost pepela, sukladno rezultatima u tablici 6.5, volumna nepostojanost nije zabilježena. Rezultati iz tablice 6.5 upućuju na zaključak da su pepeli gustoće manje od gustoće cementa prema indeksu aktivnosti pucolanski neaktivni te daju pH-vrijednosti otopine manje od cementa. Niže pH-vrijednosti ukazuju na potencijalno korozivno djelovanje (Liu et al., 2018) ovih pepela na armaturu u armiranobetonskim elementima s betonom u čijem se sastavu ovakvu pepeli nalaze. Pepeli imaju potencijal za primjenu u građevinskim proizvodima, ali sukladno tablicama 6.5 i 6.6 zaključuje se i da postoje znatne razlike u finoći čestica, kemijskim sastavima pepela između pepela različitih ratarskih kultura te čak i unutar iste ratarske kulture, što ukazuje na to da primjenu svakoga pepela u građevinskim proizvodima treba zasebno istražiti.

6.5. Građevni proizvodi s pepelima poljoprivredne biomase

6.5.1. Mortovi s pepelima poljoprivredne biomase

U ovom su dijelu prikazani rezultati istraživanja mogućnosti primjene pepela biomase u cementnim i produžnim mortovima.

6.5.1.1. Produžni mortovi s pepelima poljoprivredne biomase

Pripravljeno je jedanaest mješavina produžnoga morta, volumnih omjera komponenti 1:1:5 (cement - vapno ili pepeo - agregat), što je preporučeni omjer za postizanje razreda morta M5 koji se minimalno zahtijeva za uporabu u seizmički aktivnim područjima. Mješavina M1 (referentna mješavina) načinjena je od miješanoga portland cementa CEM II/B-M (P-S) 32,5R, hidratiziranoga kalcijeva vapna CL 80-S i agregata (pijeska), dok su u ostalim mješavinama umjesto vapna dodani različiti pepeli biomase. Svim su mješavinama s pepelom dodane iste količine vode, osim ako je navedeno drukčije. Cilj je bio postići isti razred konzistencije, od 14 do 20 cm. Prilikom pripremanja mješavina morta, agregat (pijesak) je bio u zasićenom, površinski suhom stanju. Gustoće praškastih materijala određene su prema HRN EN 1097-7:2008 (CEN, 2008d), a specifična površina je određena BET metodom, sukladno HRN ISO 9277:2016 (ISO, 2016), čiji su rezultati za ovu isporuku pepela prikazani u tablici 6.7.

Tablica 6.7: Svojstva pepela upotrijebljenih za pripremu mješavina produžnoga morta

Svojstvo/ oznaka uzorka	**R**	**V**	**K**	**S**	**SE**	**SL**	**PE**	**PL**	**PLO**	**JE**	**JL**	**JLO**
Gustoća (g/cm^3)	2,983	2,650	2,395	2,400	2,400	2,401	2,399	2,400	2,398	2,399	2,400	2,397
Specifična površina (cm^2/g)	30 980	16 671	45 506	103 470	47 720	33 740	46 690	36 850	32 850	42 660	34 080	30 990

Oznake u tablici: R - cement, V - vapno, K - pepeo oklasaka kukuruza i koštica šljiva, S - pepeo slame soje, SE - pepeo ljusaka suncokreta s ekonomajzera, SL - leteći pepeo ljusaka suncokreta, PE - pepeo slame pšenice s ekonomajzera, PL - leteći pepeo slame pšenice, PLO - pepeo slame pšenice s ložišta peći, JE - pepeo slame ječma s ekonomajzera, JL - leteći pepeo slame ječma, JLO - pepeo slame ječma s ložišta peći.

U tablici 6.7 po prvi se puta u ovom poglavlju spominje pepeo oklasaka kukuruza i koštica šljiva. Taj je pepeo uzorkovan u lokalnoj tvornici bučinoga ulja koja, da bi osušila bučine sjemenke na razinu zahtijevanu za proizvodnju ulja, suši sjemenke na temperaturi oslobođenoj sagorijevanjem oklasaka kukuruza i koštica šljiva. Tablica 6.8 prikazuje volumne omjere komponenata morta (cement, vapno ili pepeo, pijesak) te masene omjere vode i veziva (cement/pepeo). Značenje oznaka mješavina morta je sljedeće: M1 - referentna mješavina, M2 - mješavina s pepelom oklasaka kukuruza i koštica šljiva, M3 - mješavina s pepelom slame soje, M4 - mješavina s pepelom ljusaka suncokreta s ekonomajzera, M5 - mješavina s letećim

pepelom ljusaka suncokreta, M6 - mješavina s pepelom slame pšenice s ekonomajzera, M7 - mješavina s letećim pepelom slame pšenice, M8 - mješavina s pepelom slame pšenice s ložišta peći, M9 - mješavina s pepelom slame ječma s ekonomajzera, M10 - mješavina s letećim pepelom slame ječma, M11 - mješavina s pepelom slame ječma s ložišta peći.

Tablica 6.8: Omjeri komponenata u mješavinama morta (Barišić et al., 2019a)

Mješavina	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
Cement	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Vapno	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pepeo	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pijesak	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Voda/vezivo	0,68	0,76	1,03	0,76	0,76	0,76	0,76	1,03	0,76	0,76	1,03

Konzistencija morta ispitana je sukladno HRN EN 1015-3:2000/A2:2008 (CEN, 2008a), gustoća je određena sukladno HRN EN 1015-6:2000/A1:2008 (CEN, 2008b), a udio pora prema HRN EN 1015-7:2000 (CEN, 2000). Određivanje konzistencije stolićem za potresanje te gustoće i udjela pora svježega morta pomoću porometra prikazano je slikom 6.11. Izmjerene vrijednosti konzistencije, gustoće i udjela pora mortova prikazane su tablicom 6.9.



Slika 6.11: Određivanje konzistencije stolićem za potresanje te gustoće i udjela pora svježega morta pomoću porometra

Tablica 6.9: Konzistencija, gustoća i udio pora u mortu s pepelima biomase u sastavu (Barišić et al., 2019a)

Mješavina	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
Konzistencija potresanjem (mm)	163	143	153	155	148	153	145	140	158	168	158
Gustoća (kg/m^3)	2000	1920	1820	1950	1960	1900	1860	1650	1930	1960	2720
Udio pora (%)	6,0	6,7	5,6	5,0	6,0	7,5	9,3	11,0	6,5	6,0	8,0

Do izdvajanja prstena vode oko rasprostranjene mješavine morta pri određivanju konzistencije došlo je kod mješavina M3, M8 i M11, tj. kod mješavina s pepelom soje te pepelima pšenice i ječma s ložišta peći. Iz tablice 6.9 vidljivo je da mješavine s pepelom u sastavu (M2 - M9, M11) ostvaruju manju konzistenciju od referentne mješavine (M1), što je izravna posljedica znatno veće specifične vrijednosti pepela u odnosu na vapno (Tablica 6.3) u mješavinama morta koja zahtijeva veću količinu vode za približno istu obradljivost. Gustoće mješavina s pepelima u sastavu (M2 - M11) neznatno su manje od gustoće referentne mješavine (M1), dok kod udjela pora nije uočen trend ponašanja.

Od svake su mješavine izrađene po tri prizmice dimenzija 160×40×40 mm (slika 6.12), namijenjene ispitivanju tlačne i vlačne čvrstoće. Nakon 24 sata u kalupu, prizmice su izvađene iz kalupa i njegovane u vodi (slika 6.13) do 28. dana starosti, kada su ispitane.



Slika 6.12: Uzorci ugrađeni u kalupe



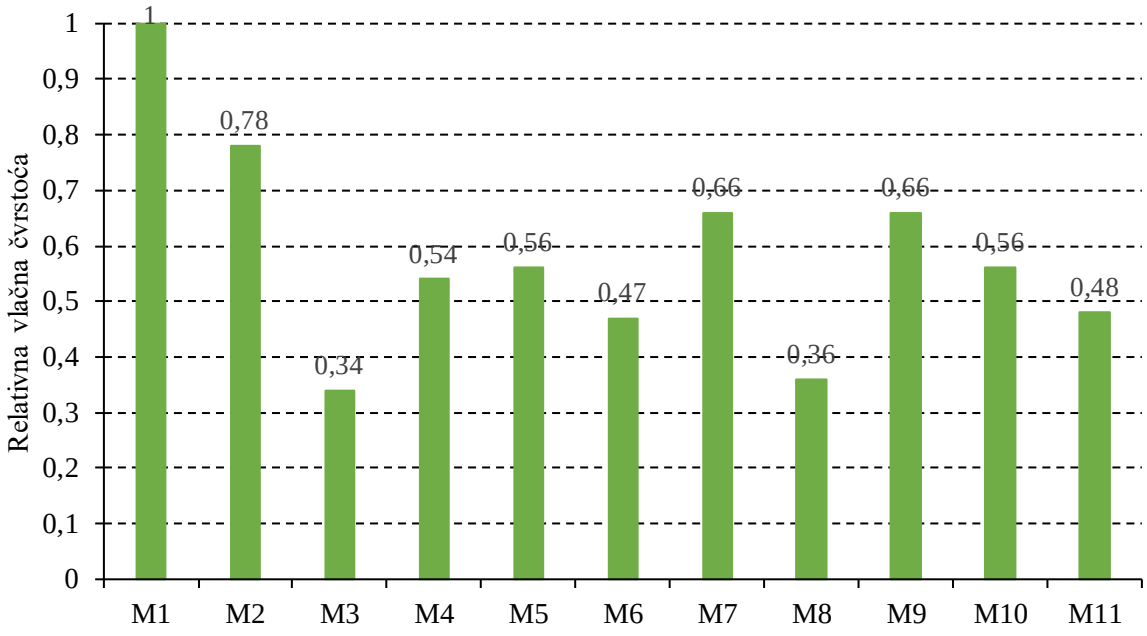
Slika 6.13: Njega uzoraka u vodi

Vlačna čvrstoća pri savijanju i tlačna čvrstoća morta ispitane su prema HRN EN 1015-11:2000/A1:2008 (CEN, 2008c). Rezultati tlačnih i vlačnih čvrstoća prikazani su apsolutno tablicom 6.10 te relativno, u odnosu na referentnu mješavinu, slikama 6.14 i 6.15.

Tablica 6.10: Ostvarene vrijednosti vlačnih i tlačnih čvrstoća mortova s pepelom biomase u sastavu (Barišić et al., 2019a)

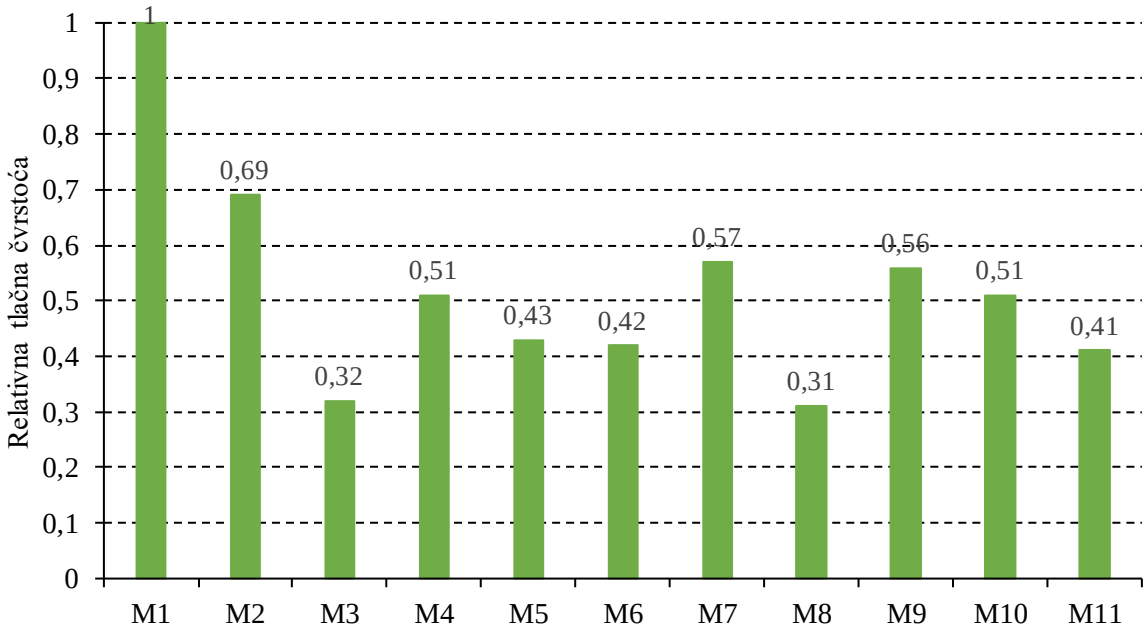
Mješavina	**M1**	**M2**	**M3**	**M4**	**M5**	**M6**	**M7**	**M8**	**M9**	**M10**	**M11**
Vlačna čvrstoća savijanjem (MPa)	2,00	1,56	0,68	1,08	1,12	0,94	1,32	0,72	1,32	1,12	0,96
Tlačna čvrstoća (MPa)	6,7	4,6	2,1	3,4	2,9	2,8	3,8	2,1	3,8	3,4	2,8

Referentna je mješavina postigla tlačnu čvrstoću (tablica 6.10) koja prema HRN EN 1996-1-1:2012 (CEN, 2012) odgovara razredu čvrstoće M5. Zamjenom je vapna pepelima biomase u mješavinama došlo do smanjenja vlačne i tlačne čvrstoće mješavina morta, no prema ostvarenim tlačnim čvrstoćama većina pepela zadovoljava razred M2,5 kao najniži razred čvrstoće mortova za zidanje prema HRN EN 1996-1-1. Razred M2,5 nisu uspjele zadovoljiti mješavine M3 i M8, tj. mješavine s pepelom soje i pepelom pšenice s ložišta peći. Treba istaknuti da je mješavina s pepelom oklasaka kukuruza i koštica šljiva (M2) ostvarila najbolju tlačnu i vlačnu čvrstoću od svih mješavina s pepelima u sastavu.



Slika 6.14: Relativne vlačne čvrstoće produžnih mortova s pepelima biomase

Iz prikaza na slici 6.14 vidljivo je da su vlačne čvrstoće svih mješavina s pepelom u sastavu (M2 - M11) smanjene u odnosu na referentnu mješavinu (M1) te da postotak umanjenja vlačne čvrstoće varira od 22 do 66% zamijeni li se vapno u mortu pepelima biomase. Od svih je mješavina s pepelima ona s pepelom soje (M3) ostvarila najmanju vlačnu čvrstoću, dok je mješavina s pepelom oklasaka kukuruza i koštica šljiva (M2) ostvarila najveću vlačnu čvrstoću.



Slika 6.15: Relativne tlačne čvrstoće produžnih mortova s pepelima biomase

Na slici 6.15 grafički je prikazan odnos relativnih tlačnih čvrstoća te se opet može zaključiti da

zamjenom vapna pepelima biomase u mortovima za zidanje dolazi do opadanja tlačne čvrstoće morta. Najveći pad čvrstoća vidljiv je kod mješavine morta s pepelom soje u sastavu (M3) i to za čak 68%. Od svih je mješavina morta s pepelima u sastavu najbolju tlačnu čvrstoću ostvario mort s pepelom oklasaka kukuruza i koštica šljiva (M2).

Zaključno, zamjenom vapna pepelima biomase u mortovima za zidanje dolazi do opadanja mehaničkih svojstava mortova, no ostvarene vrijednosti čvrstoća uglavnom zadovoljavaju najniži zahtijevani razred čvrstoće sukladno HRN EN 1996-1-1:2012 (CEN, 2012).

6.5.1.2. Cementni mortovi s pepelima poljoprivredne biomase

Pripravljeno je sedam mješavina morta s istom količinom veziva (450 kg), istim vodovezivnim faktorom (v/v) od 0,55, ali s različitim udjelom pepela suncokretove ljuske. Mješavina M1 (referentna mješavina) načinjena je u potpunosti s cementom, u mješavinama M2 - M4 je 5, 10 i 15% volumena cementa zamijenjeno pepelom s ekonomajzera, a u mješavinama M5 - M7 je 5, 10 i 15% volumena cementa zamijenjeno letećim pepelom suncokretove ljuske. Prilikom pripreme mješavina morta, agregat (pijesak) je bio u zasićenom, površinski suhom stanju. Sastav mješavina morta prikazan je tablicom 6.11. Cement upotrijebljen u pripremi mješavina je CEM I 42,5 R. Gustoće praškastih materijala određene prema HRN EN 1097-7:2008 (CEN, 2008d) su iznosile 2,983 g/cm^3, 2,401 g/cm^3 za leteći pepeo te 2,400 g/cm^3 za pepeo s ekonomajzera. Specifična je površina BET metodom određena sukladno HRN EN 9277:2016 (ISO, 2016) iznosila za cement 30.980 cm^2/g, leteći pepeo 33.740 cm^2/g, a pepeo s ekonomajzera 47.720 cm^2/g.

Tablica 6.11: Sastav mješavina morta s pepelom ljuske sjemenki suncokreta u sastavu (Netinger Grubeša et al., 2018c)

Mješavina	**M1**	**M2**	**M3**	**M4**	**M5**	**M6**	**M7**
Cement (kg)	450	427,5	405	382,5	427,5	405	382,5
Pepeo (kg)	-	17,2	34,4	51,6	17,2	34,4	51,6
Voda (kg)	247,5	244,6	241,7	238,8	244,6	241,7	238,8
v/c	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Pijesak 0-1 mm (kg)	1508,4	1516,1	1523,8	1531,5	1516,1	1523,8	1531,5

Konzistencija, gustoća i udio pora mortova prikazani su tablicom 6.12. Konzistencija morta ispitana je sukladno HRN EN 1015-3:2000/A2:2008 (CEN, 2008a), gustoća sukladno HRN EN 1015-6:2000/A1:2008 (CEN, 2008b), a udio pora prema HRN EN 1015-7:2000 (CEN, 2000).

Tablica 6.12: Konzistencija, gustoća i udio pora u mortu s pepelom ljuske sjemenki suncokreta u sastavu (Netinger Grubeša et al., 2018c)

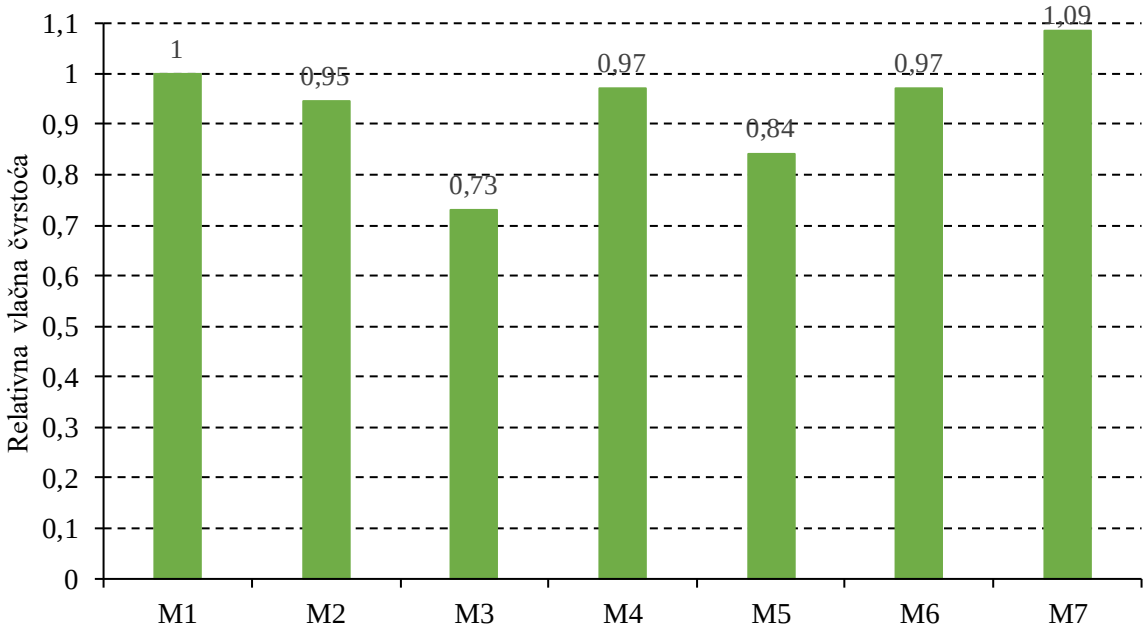
Mješavina	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Konzistencija potresanjem (mm)	198	188	171	150	187	159	139
Gustoća (kg/m³)	2060	2050	2000	1970	2030	1980	1950
Udio pora (%)	5,3	5,2	5,0	4,7	5,0	4,8	4,4

Uvidom u tablicu 6.12 uočava se da povećanjem udjela obje vrste pepela ljuske sjemenki suncokreta opadaju konzistencija morta i njegova gustoća, dok značajniji utjecaj na udio pora nije opažen.

Od svake su mješavine izrađene po tri prizmice dimenzija 160×40×40 mm namijenjene ispitivanju tlačne i vlačne čvrstoće. Nakon 24 sata provedena u kalupu, prizmice su njegovane u vodi do 28. dana starosti, kada su ispitane. Vlačna čvrstoća pri savijanju i tlačna čvrstoća morta ispitane su prema HRN EN 1015-11:2000/A1:2008 (CEN, 2008c). Rezultati tlačnih i vlačnih čvrstoća prikazani su apsolutno tablicom 6.13 te relativno, u odnosu na referentnu mješavinu, slikama 6.16 i 6.17.

Tablica 6.13: Ostvarene vrijednosti vlačnih i tlačnih čvrstoća mortova s pepelom ljuske sjemenki suncokreta u sastavu (Netinger Grubeša et al., 2018c)

Mješavina	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Vlačna čvrstoća savijanjem (MPa)	6,61	6,25	4,83	6,42	5,57	6,42	7,18
Tlačna čvrstoća (MPa)	29,5	28,0	23,1	22,9	23,4	26,5	26,3



Slika 6.16: Relativne vlačne čvrstoće savijanjem cementnih mortova s pepelom ljuske sjemenki suncokreta



Slika 6.17: Relativne tlačne čvrstoće cementnih mortova s pepelom ljuske sjemenki suncokreta

Iz rezultata prikazanih slikom 6.16 vidljivo je da mješavine s dodatkom pepela ljuski sjemenki suncokreta ostvaruju od 73 do 109% vlačne čvrstoće te od 78 do 95% tlačne čvrstoće referentne mješavine, tj. mješavine M1 (slika 6.17). S obzirom na zahtjeve koji su, vezano za tlačnu čvrstoću, postavljeni na mort unutar HRN EN 998-2:2016 (CEN, 2016), mortovima s pepelom ljuske sjemenki suncokreta bi se mogli pridružiti izrazito visoki razredi čvrstoća, M20 za mješavine M3 - M7 te čak M25 za mješavinu M2, dok bi se referentnoj mješavini pridružio razred M25.

6.5.2. Beton s pepelom poljoprivredne biomase

U ovom su dijelu prikazani rezultati istraživanja mogućnosti primjene pepela biomase u betonu kao zamjena dijela cementa te potpuna zamjena za punilo. Kod istraživanja mogućnosti zamjene dijela cementa pepelom poljoprivredne biomase istražen je učinak zamjene cementa maseno, ali i volumno.

6.5.2.1. Beton s pepelom poljoprivredne biomase kao djelomičnom zamjenom cementa

Pri izradi je betonskih mješavina upotrijebljen dolomitni agregat gustoće 2,75 kg/dm^3, frakcije 0 - 4 mm, 4 - 8 mm i 8 - 16 mm. U svim je mješavinama korišten cement CEM I 42,5 R, gustoće 3,0 kg/dm^3. Količina veziva u svim je mješavinama bila 400 kg/m^3 betonske mješavine. Sve mješavine projektirane su s istim vodovezivnim omjerom, v/c = 0,5. Sastav betonskih mješavina prikazan je tablicom 6.14. Svojstva svježega betona prikazana su tablicom 6.15.

Tablica 6.14: Sastav mješavina betona (Netinger Grubeša et al., 2019)

Komponente	**M0**		**M5**		**M7,5**		**M10**	
Voda/vezivo (v/v)	0,5		0,5		0,5		0,5	
Cement (kg)	400		380		370		360	
Pepeo ljuske sjemenki suncokreta (kg)	-		20		30		40	
Voda (kg)	200		200		200		200	
Agregat (kg)	1764		1764		1764		1764	
Dolomit 0 - 4 mm (% - kg)	42	741	42	741	42	741	42	741
Dolomit 4 - 8 mm (% - kg)	19	335	19	335	19	335	19	335
Dolomit 8 - 16 mm (% - kg)	39	688	39	688	39	688	39	688

Tablica 6.15: Svojstva svježega betona (Netinger Grubeša et al., 2019)

Svojstva	**M0**	**M5**	**M7,5**	**M10**
Gustoća (kg/m^3)	2433	2370	2356	2343
Sadržaj zraka (%)	2,5	3,0	2,7	3,2
Konzistencija slijeganjem (mm)	210	30	25	10

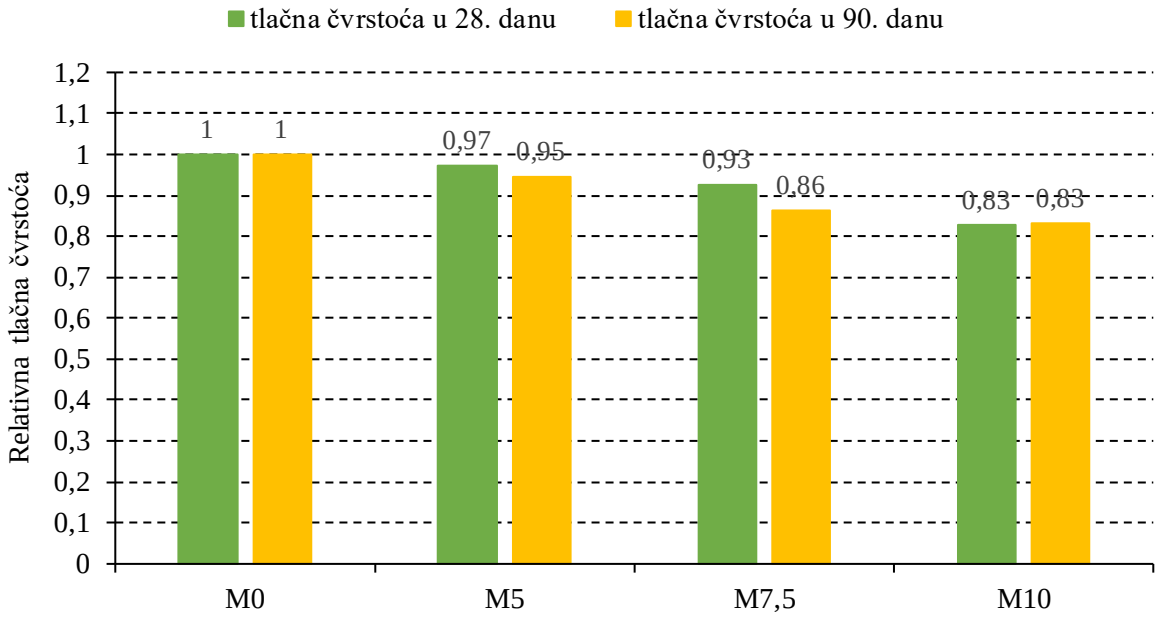
Konzistencija slijeganjem značajno se smanjuje s povećanjem udjela pepela u ukupnom udjelu mase (tablica 6.15). Uzrok je tomu manja gustoća pepela u odnosu na cement, što znači da ista masa pepela daje veći volumen od mase cementa. U nastavku, veći volumen pepela, uz uvijek istu količinu vode, rezultira manjim slijeganjem svježe betonske mješavine. Za potrebe ispitivanja tlačne čvrstoće od svake su mješavine izrađene tri kocke brida 15 cm te za ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem tri prizme dimenzija 10/10/40 cm. Nakon jednoga su dana starosti uzorci betona izvađeni iz kalupa te potopljeni pod vodu i ostavljeni do 28. dana starosti (slika 6.18). Po 28. danu starosti, na uzorcima su ispitana sljedeća svojstva očvrsnuloga betona: tlačna čvrstoća sukladno normi HRN EN 12390-3:2019 (CEN, 2019a), vlačna čvrstoća savijanjem sukladno normi HRN EN 12390-5:2019 (CEN, 2019b) te statički modul elastičnosti sukladno HRN EN 12390-13:2013 (CEN, 2013b). Rezultati ispitivanja prikazani su tablicom 6.16 u apsolutnim vrijednostima te slikama 6.19, 6.20 i 6.21 u relativnim vrijednostima.



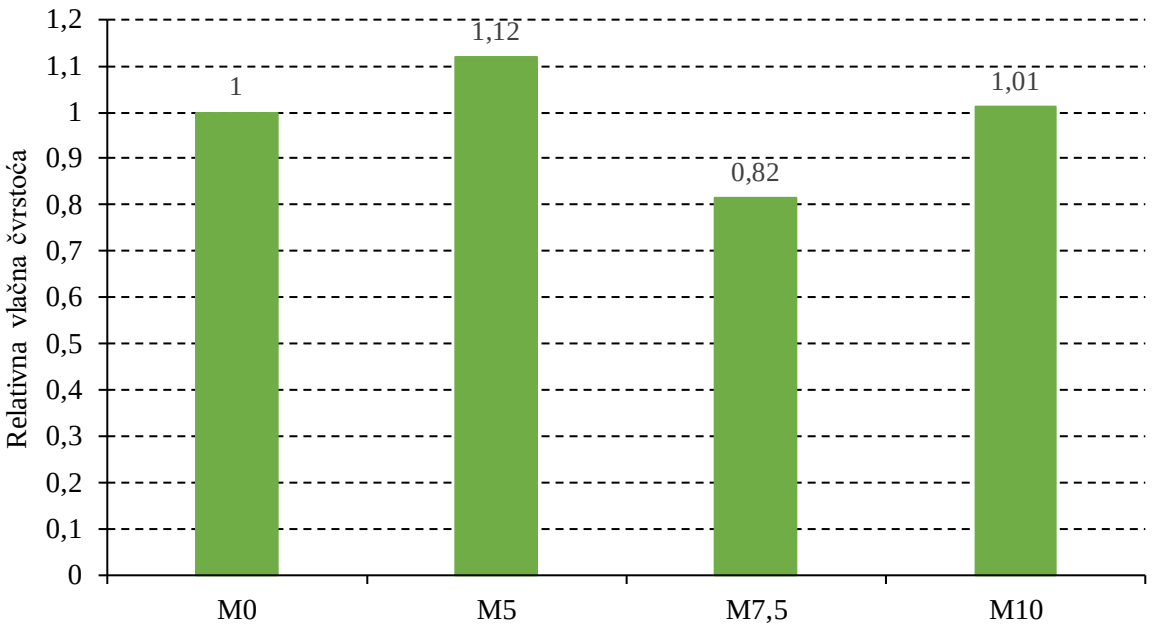
Slika 6.18: Njega uzoraka betona pod vodom

Tablica 6.16: Rezultati ispitivanja očvrsnuloga betona (Netinger Grubeša et al., 2019)

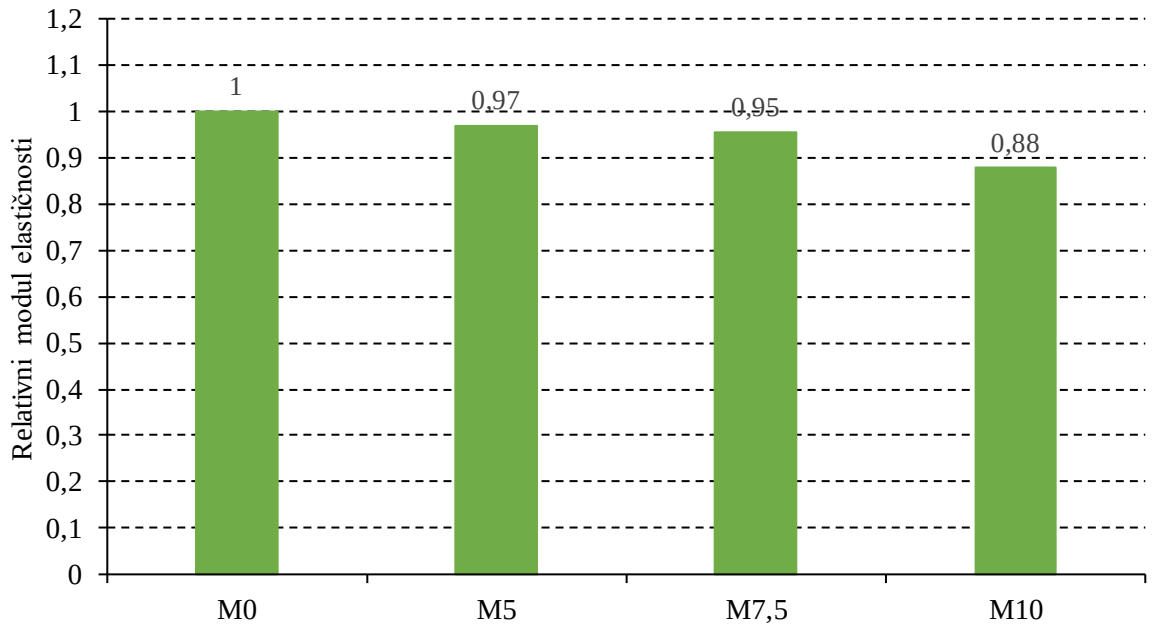
Svojstva	M0	M5	M7.5	M10
Tlačna čvrstoća u 28. danu starosti (MPa)	40,8	39,7	37,8	33,7
Tlačna čvrstoća u 90. danu starosti (MPa)	47,8	45,2	41,3	39,7
Vlačna čvrstoća savijanjem (MPa)	5,00	5,60	4,08	5,06
Modul elastičnosti (MPa)	25.942	25.157	24.753	22.766



Slika 6.19: Relativne tlačne čvrstoće betona s pepelom ljuske sjemenki suncokreta kao zamjenom dijela cementa maseno



Slika 6.20: Relativne vlačne čvrstoće betona s pepelom ljuske sjemenki suncokreta kao zamjenom dijela cementa maseno



Slika 6.21: Relativni moduli elastičnosti betona s pepelom ljuske sjemenki suncokreta kao zamjenom dijela cementa maseno

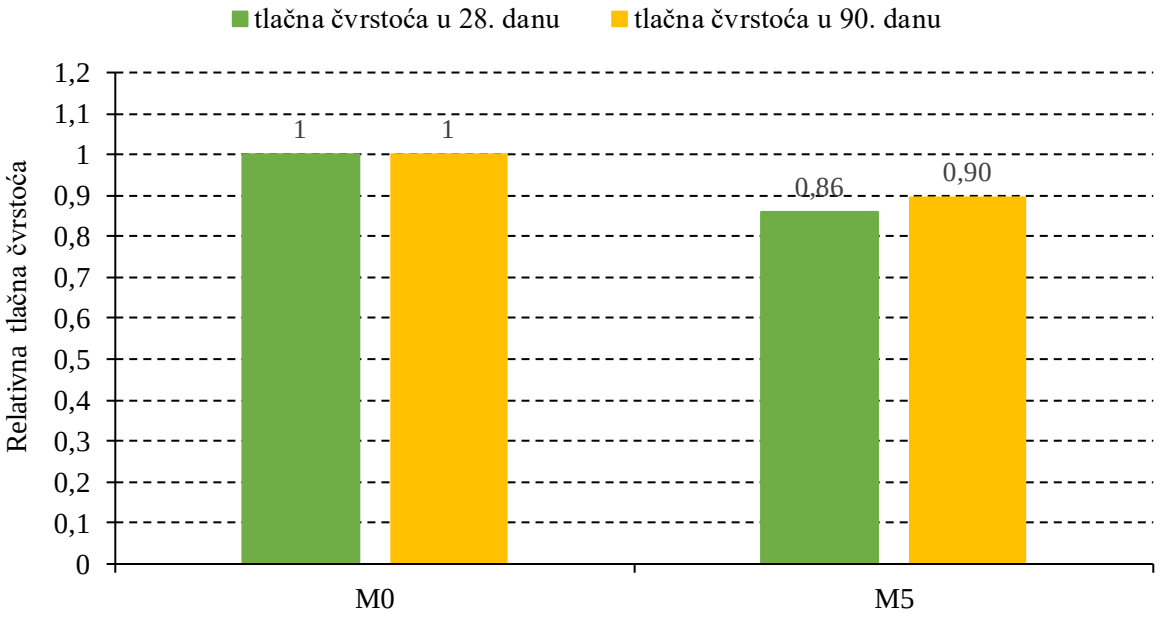
Rezultati ispitivanja prikazuju da je moguća zamjena cementa u betonu pepelom ljuske sjemenke suncokreta. Kao optimalni udio zamjene cementa pepelom ljuske sjemenke suncokreta maseno preporučuje se 5%, s obzirom na to da povećanjem udjela pepela iznad 5% u ukupnoj količini veziva u betonu dolazi do opadanja mehaničkih svojstava betona. Zamjenom 5% cementa pepelom ljuske sjemenki suncokreta maseno došlo je do neznatnoga pada tlačne

čvrstoće u 28. danu starosti uzorka te modula elastičnosti od 3%, kao i pada tlačne čvrstoće u 90. danu starosti od 5%. Kako je cement ujedno i najskuplja komponenta u betonu, zamjenom cementa pepelom došlo bi do smanjenja ukupne cijene betona.

S obzirom na to da se masena zamjena cementa pepelom ljuski sjemenki suncokreta negativno odrazila na konzistenciju betona, u nastavku je istraživanja pokušana zamjena cementa pepelom ljuski sjemenki suncokreta na volumnoj osnovi. Spravljena je referentna mješavina M0 sastava kako je to prikazano tablicom 6.14, no s cementom CEM I 52,5 N, te mješavina u kojoj je 5% volumena cementa zamijenjeno pepelom ljuski sjemenki suncokreta (M5). Obje su mješavine imale konzistenciju po metodi slijeganja od 210 mm. Usporedba tlačnih čvrstoća ovih mješavina u njihovom 28. i 90. danu starosti prikazana je tablicom 6.17 u apsolutnim vrijednostima te slikom 6.22 u relativnim vrijednostima.

Tablica 6.17: Rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća betona

Svojstva	M0	M5
Tlačna čvrstoća u 28. danu starosti (MPa)	71,1	61,1
Tlačna čvrstoća u 90. danu starosti (MPa)	78,2	70,1



Slika 6.22: Relativne tlačne čvrstoće betona s pepelom ljuske sjemenki suncokreta kao zamjenom dijela cementa volumno

Rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća betona M0 prikazani u tablici 6.17 veći su od rezultata tlačnih čvrstoća betona M0 prikazanih u tablici 6.16, a razlog se tomu nalazi u višem razredu čvrstoće cementa upotrijebljenom za pripremu betona u ovom drugom dijelu ispitivanja. Usporede li se tlačne čvrstoće betona u 28. i 90. danu starosti za mješavinu M0 i M5, iz rezultata prikazanih u tablici 6.17 moguće je uočiti porast tlačne čvrstoće sa starošću betona za 10% kod mješavine M0 te 15% kod mješavine M5, dok je iz rezultata prikazanih u tablici 6.16 vidljivo

da porast u tlačnoj čvrstoći sa starošću betona iznosi 17% za mješavinu M0 i 14% za mješavinu M5. U radu (Netinger Grubeša et al., 2019) zaključeno je da pepeo ljuske sjemenki suncokreta nije pucolanski aktivan, ali ni potpuno inertan materijal, što znači da ipak može pridonijeti razvoju čvrstoća tijekom vremena, a to se ovdje i pokazalo. Sposobnost ovoga pepela da pridonosi tlačnoj čvrstoći betona očito je više došla do izražaja kod mješavine M5 u kojoj je cement zamijenjen s 5% pepela na volumnoj osnovi, jer je ona bila veće konzistencije/tečljivosti nego mješavina M5 u kojoj je cement zamijenjen pepelom ljuske sjemenki suncokreta maseno. Iz slike 6.22 vidljiv je pad tlačne čvrstoće betona u 28. danu starosti betona za 14% zamijeni li se 5% volumena cementa pepelom ljuski sjemenki suncokreta te pad tlačne čvrstoće betona za 10% u starosti betona od 90 dana.

6.5.2.2. Beton s pepelom poljoprivredne biomase kao zamjenom za punilo

Betonske su mješavine spravljene s dolomitnim agregatom frakcija 0 - 4 mm, 4 - 8 mm i 8 - 16 mm, gustoće 2,75 kg/dm^3. Kao vezivo je upotrijebljen cement CEM II / A (S-V) 42,5 N, gustoće 3,05 kg/dm^3. U mješavini M1 korišteno je dolomitno brašno - punilo gustoće 2,65 kg/dm^3, dok je u mješavini M2 kao punilo uporabljen pepeo ljuskica sjemenki suncokreta s ekonomajzera, gustoće 2,4 kg/dm^3. Ovaj je pepeo zadovoljio zahtjeve vezano za postotke prolaska kroz sita veličine otvora 0,063, 0,125 i 2 mm prema normi HRN EN 12620:2013 (CEN, 2013c). Količina cementa u obje je mješavine iznosila 340 kg/m^3. Vodocementni faktor (v/c) za obje je mješavine iznosio 0,44. Sastav ispitivanih betonskih mješavina prikazan je u tablici 6.18.

Tablica 6.18: Mješavine betona

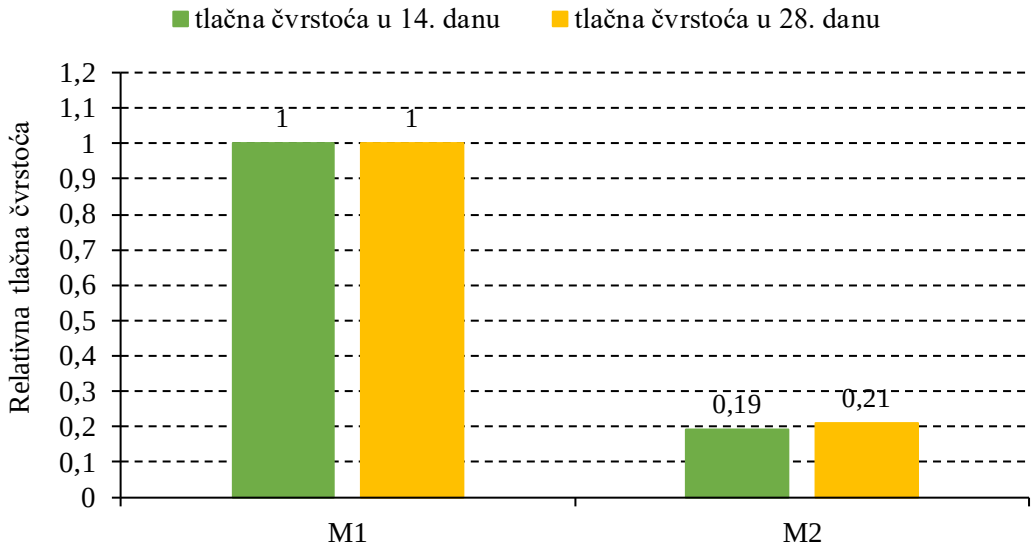
Komponente	**M1**	**M2**
Cement (kg)	340	340
Voda (kg)	149,6	149,6
v/c	0,44	0,44
Superplastifikator (kg)	2,72	2,72
Agregat (kg)		
Dolomitno brašno (% / kg)	3 / 57,4	-
Pepeo ljuskica sjemenki suncokreta (% / kg)	-	3 / 57,4
Dolomit 0 - 4 mm (% / kg)	42 / 802,9	42 / 802,9
Dolomit 4 - 8 mm (% / kg)	15 / 309,5	15 / 309,5
Dolomit 8 - 16 mm (% / kg)	40 / 822,3	40 / 822,3

Ispitani su konzistencija, tlačna čvrstoća u 7. i 28. danu starosti te vlačna čvrstoća u 28. danu starosti uzoraka sukladno standardnim metodama opisanima u točki 6.5.2.1. Zabilježena je konzistencija od 19 mm za mješavinu M1 te 0 mm za mješavinu M2. Konzistencija betona slijeganjem značajno se smanjila kada je dolomitno brašno zamijenjeno pepelom ljuski suncokreta. Uzrok tomu je niža gustoća pepela u odnosu na gustoću dolomitnoga brašna, što znači da ista masa pepela i dolomitnoga brašna daje veći volumen pepela nego dolomitnoga brašna. Tako veći volumen pepela s istom količinom vode rezultira manjom konzistencijom

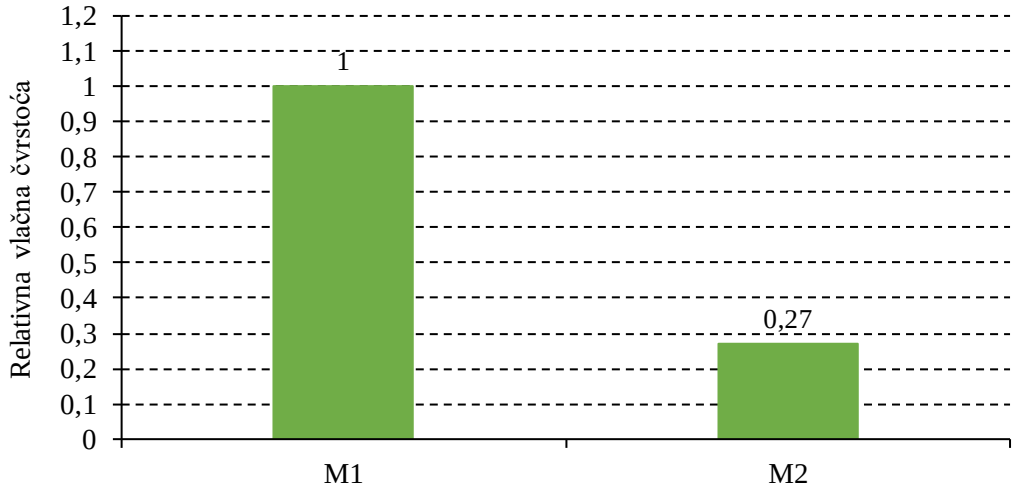
betonske mješavine s pepelom u sastavu. Tlačne i vlačne čvrstoće betona prikazane su u tablici 6.19 u apsolutnim vrijednostima te slikama 6.23 i 6.24 u relativnim vrijednostima.

Tablica 6.19: Rezultati tlačnih i vlačnih čvrstoća (Barišić et al., 2018)

Svojstvo	M1	M2
Tlačna čvrstoća u 7 dana starosti (MPa)	45,4	8,8
Tlačna čvrstoća u 28 dana starosti (MPa)	58,2	12,3
Vlačna čvrstoća savijanjem u 28 dana starosti (MPa)	0,52	0,14



Slika 6.23: Relativne tlačne čvrstoće betona s pepelom ljuske sjemenki suncokreta kao punilom



Slika 6.24: Relativne vlačne čvrstoće savijanjem betona s pepelom ljuske sjemenki suncokreta kao punilom

Vrijednosti tlačnih i vlačnih čvrstoća betona s pepelom ljuski sjemenki suncokreta (mješavina

M2) znatno su niži nego iste vrijednosti kod referentne mješavine M1. Razlog tomu vjerojatno leži u nedovoljnoj količini vode za spravljanje mješavine M2 zbog znatno većega volumena pepela u odnosu na volumen dolomitnoga brašna u mješavini M1.

6.5.3. Tlo stabilizirano pepelima poljoprivredne biomase

Osnovni materijal u ovom dijelu istraživanja bila je glina niske plastičnosti (CL) indeksa plastičnosti 12,48% i granice tečenja 34,45% određeno prema HRN EN ISO 17892-12:2018 (ISO, 2018). Specifična površina gline iznosila je 9760 cm^2/g određeno prema ISO 9277 (ISO, 2016), a gustoća 2,74 kg/dm^3 određeno prema HRN EN 1097-7:2008 (CEN, 2008d). Za stabilizaciju tla (gline) kao temeljno je vezivo upotrijebljeno hidratizirano vapno CL 80 S prema normi HRN EN 459-1:2015 (CEN, 2015). Kako bi se procijenila mogućnost primjene pepela biomase u stabilizaciji tla za potrebe cestogradnje, dio vapna je nadomješten pepelom biomase i to letećim pepelima pšenice, ječma i ljuski sjemenki suncokreta. Gustoća i specifična površina korištenog pepela prikazane su u tablici 6.5 ovoga poglavlja. Gustoća i specifična površina vapna iznosile su 2,65 kg/dm^3 i 16671 cm^2/g.
Kako bi utvrdili sastav mješavina na kojima će se odrediti osnovna mehanička svojstva materijala, bilo je najprije potrebno definirati optimalni udio veziva za stabilizaciju osnovnoga materijala. Za definiranje optimalnoga udjela veziva te optimalnoga udjela pepela biomase u vezivu korištena je norma ASTM D 6276-99a:1999 (ASTM International, 1999) koja se temelji na mjerenju pH-vrijednosti mješavine tla i veziva. Tako je određen optimalni udio veziva od 7% suhe mase tla te optimalni omjer vapno/pepeo biomase 80/20%. Mjerenje pH-mješavine radi definiranja optimalnoga sastava stabiliziranoga tla prikazano je na slici 6.25.



Slika 6.25: Mjerenje pH radi definiranja optimalnoga sastava stabiliziranoga tla

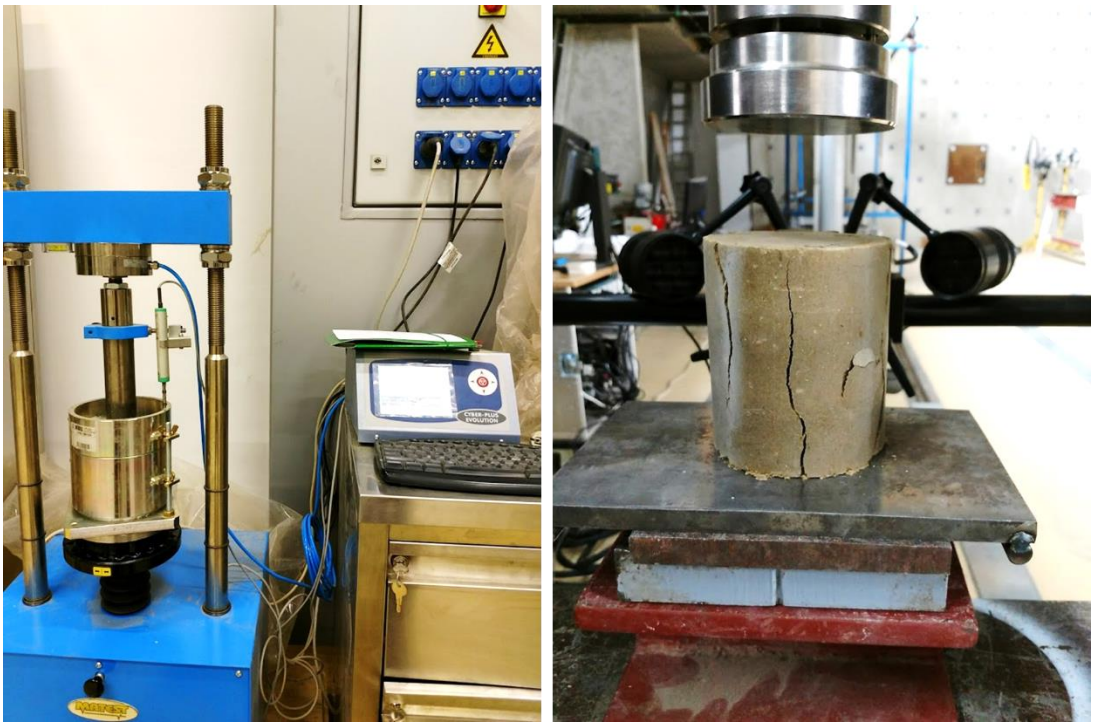
Na tako definiranom sastavu mješavina stabiliziranoga tla određeni su optimalna vlažnost i maksimalna suha prostorna masa prema normi HRN EN 13286-2:2010 (CEN, 2010b). Na slici 6.26 prikazani su uzorci stabiliziranoga tla pri različitim vlažnostima.



Slika 6.26: Uzorci vapnom/pepelom biomase stabiliziranoga tla pri različitim vlažnostima

Nakon utvrđivanja optimalnoga udjela vode u mješavini, izrađeni su cilindrični uzorci promjera 100 mm i visine 120 mm koji su umotani u foliju radi sprječavanja gubitka vlage te su njegovani 28 dana u kontroliranim uvjetima (temperatura 20 °C i vlažnost zraka 60%) do ispitivanja tlačne čvrstoće prema normi HRN EN 13286-41:2004 (CEN, 2003a).

Pored tlačne čvrstoće, podatak koji se uobičajeno koristi pri karakterizaciji stabiliziranoga tla za primjenu u cestogradnji je CBR (California Bearing Ratio) određen prema normi HRN EN 13286-42:2004 (CEN, 2003b) (slika 6.27). Tijekom njege uzorka za određivanje CBR-a mjereno je i linearno bubrenje materijala prema istoj normi.



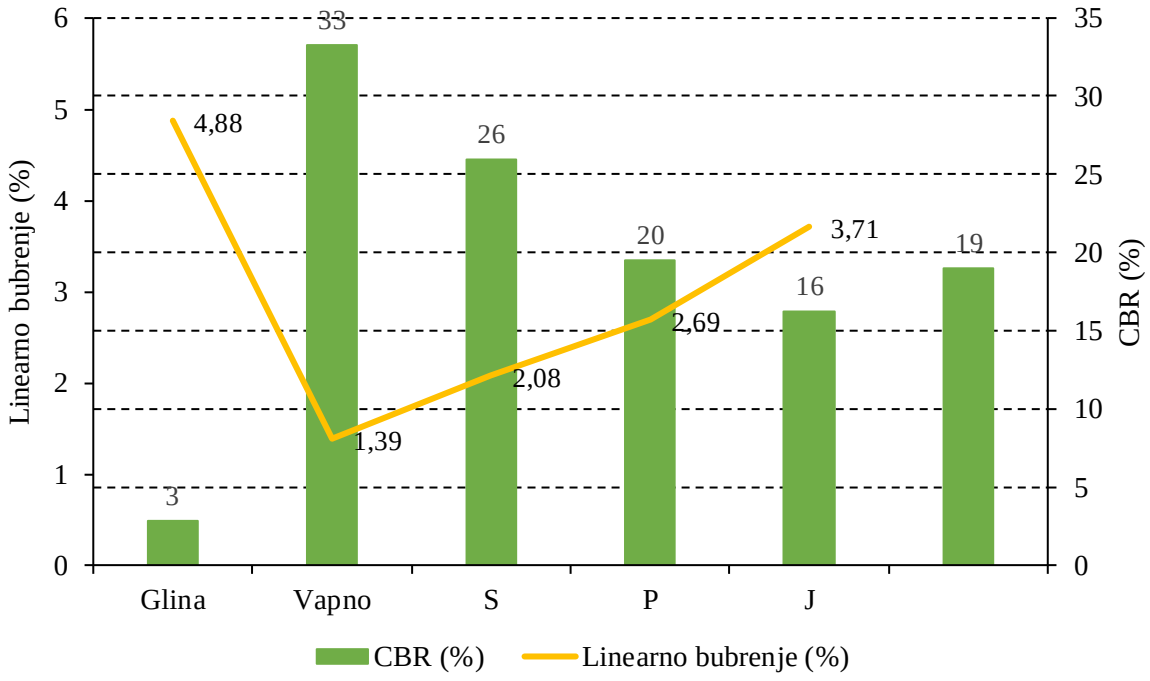
Slika 6.27: Ispitivanje CBR-a i tlačne čvrstoće

Utjecaj pepela biomase na granice plastičnosti i tečenja određene prema HRN EN ISO 17892-12:2018 (ISO, 2018) prikazan je u tablici 6.20.

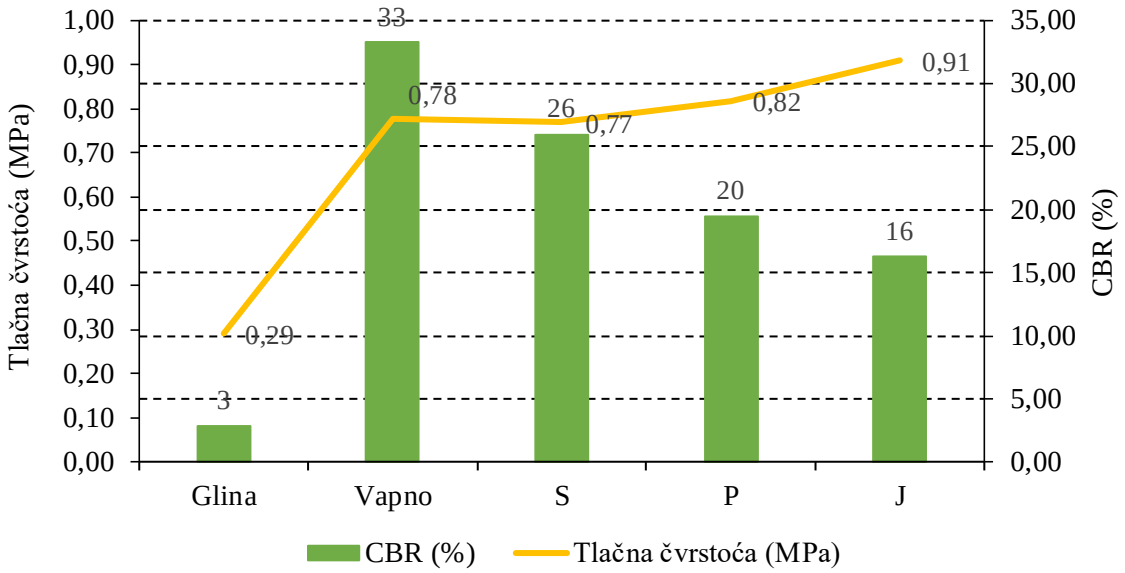
Tablica 6.20: Rezultati mjerenja granica plastičnosti, tečenja i indeksa plastičnosti

Materijal	Granica tečenja (%)	Granica plastičnosti (%)	Indeks plastičnosti (%)
Glina	34,45	21,97	12,48
Glina + vapno	40,31	29,53	10,77
Glina + vapno + pepeo ječma	40,40	29,20	11,20
Glina + vapno + pepeo pšenice	36,78	26,18	10,60
Glina + vapno + pepeo ljuski sjemenki suncokreta	39,46	28,37	11,09

Utjecaj pepela biomase na CBR, linearno bubrenje i tlačnu čvrstoću prikazan je slikama 6.28 i 6.29. *S* na slikama označava stabilizirano tlo u kojem je dio vapna zamijenjen letećim pepelom ljuski sjemenki suncokreta, *P* tlo u kojem je dio vapna zamijenjen letećim pepelom pšenice, a *J* tlo u kojem je dio vapna zamijenjen letećim pepelom ječma.



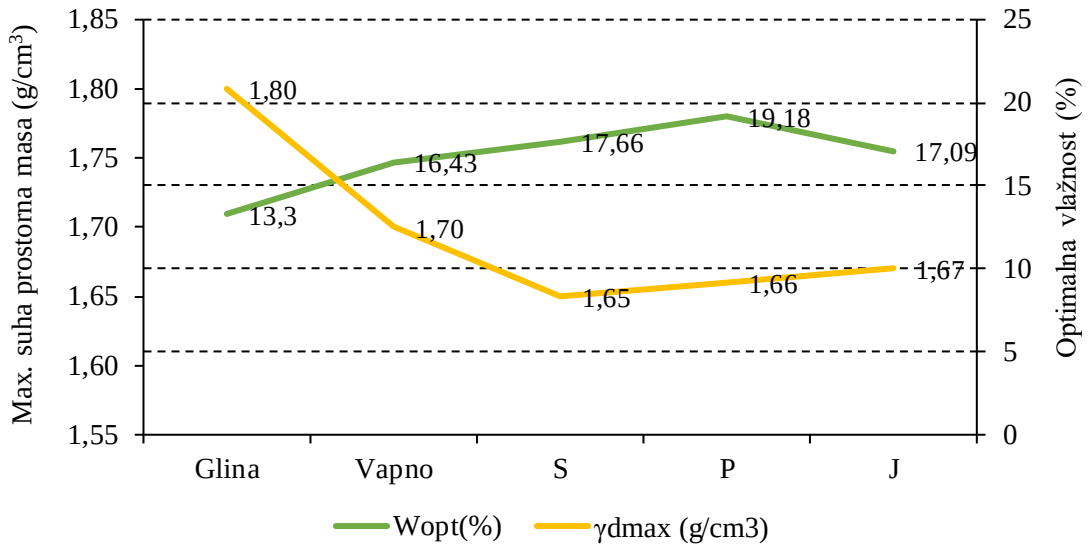
Slika 6.28: Rezultati mjerenja linearnoga bubrenja i CBR-a (Barišić et al., 2019a, Barišić et al., 2019b)



Slika 6.29: Rezultati mjerenja tlačne čvrstoće i CBR-a (Barišić et al., 2019a, Barišić et al., 2019b)

Dodatak vapna te pepela biomase, posebice pepela pšenične slame rezultira smanjenjem indeksa plastičnosti. Ovo smanjenje indeksa plastičnosti rezultira poboljšanjem tla u smislu veće stabilnosti i manje sklonosti bubrenju. To je također potvrđeno mjerenjem linearnoga bubrenja provedenim usporedo s CBR testom. Smanjenje linearnoga bubrenja s dodatkom vapna, pepela ljuski sjemenki suncokreta, slame ječma te slame pšenice u usporedbi s bubrenjem *čistoga* osnovnoga materijala iznosilo je 71,5%; 57,3%; 44,7% i 24%. Rezultati ukazuju na pad CBR-a s dodatkom pepela biomase te rast tlačnih čvrstoća u odnosu na vrijednosti dobivene za tlo stabilizirano samo vapnom. Ovakvi trendovi rezultat su različitoga kemijskoga sastava pepela te režima njege uzoraka na zraku za tlačnu čvrstoću te pod vodom za CBR. Najveći utjecaj na razvoj čvrstoća vapnom stabiliziranoga tla uz dodatak pepela biomase imaju komponente kemijskoga sastava pepela i to CaO, MgO, SiO_2 i K_2O.

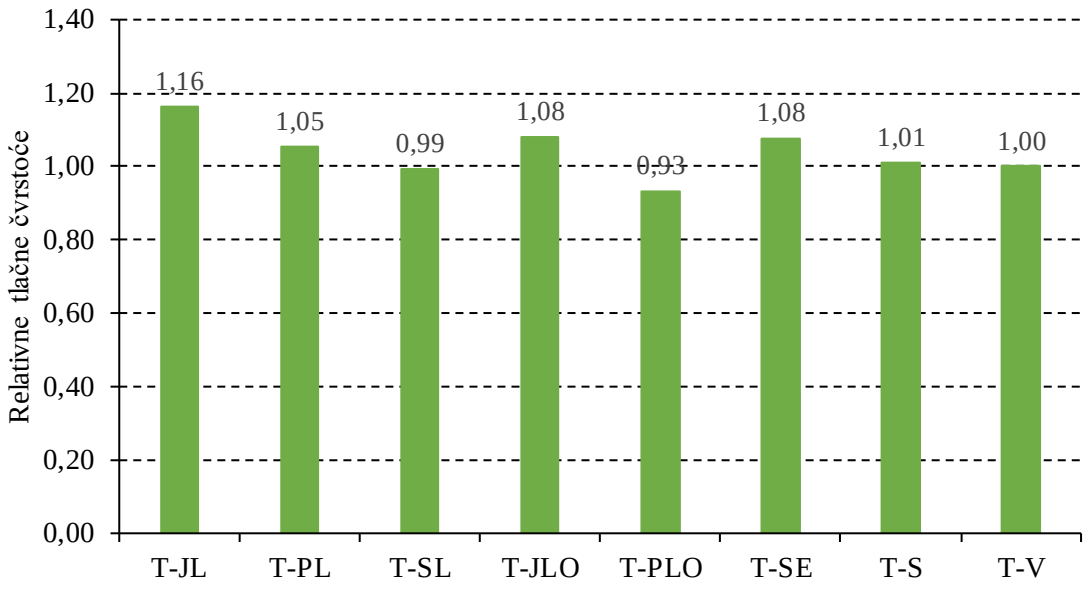
Slikom 6.30 prikazani su rezultati mjerenja optimalne vlažnosti i maksimalne suhe prostorne mase.



Slika 6.30: Rezultati mjerenja optimalne vlažnosti i maksimalne suhe prostorne mase (Barišić et al., 2019a, Barišić et al., 2019b)

Pri analizi su Proctorovih elemenata sve mješavine pokazale sličnu osjetljivost na promjenu vlažnosti s obzirom na slične Proctorove krivulje. Dodatak pepela biomase rezultira porastom optimalne vlažnosti materijala te padom maksimalne suhe prostorne mase, što također govori o poboljšanju svojstava osnovnoga materijala. Naime, radovi mogu biti izvedeni pri većoj vlažnosti materijala tijekom, primjerice, kišne sezone. Pad maksimalne suhe prostorne mase rezultat je manje gustoće pepela u odnosu na vapno i tlo, ali i veće specifične površine pepela u odnosu na vapno.

Nakon ovih preliminarnih rezultata sa samo tri vrste biopepela, istraživanja su proširena na ostale pepele koji pokazuju mogućnost poboljšanja svojstava tla. Sve ispitane mješavine pokazale su tlačne čvrstoće veće od 0,5 MPa, što zadovoljava uvjete postavljene za primjenu vapnom vezanoga/tretiranoga materijala u temeljnom tlu, nasipima i posteljici prema važećim Tehničkim uvjetima za radove na cestama (Institut građevinarstva Hrvatske, 2001). Usporedni rezultati tlačnih čvrstoća svih ispitanih mješavina u odnosu na mješavinu samo s vapnom kao vezivom, dani su na slici 6.31. Indeks *JL* u oznakama tala označava leteći pepeo slame ječma, *PL* leteći pepeo slame pšenice, *SL* leteći pepeo ljusaka suncokreta, *JLO* pepeo slame ječma s ložišta peći, *PLO* pepeo slame pšenice s ložišta peći, *SE* pepeo ljusaka suncokreta s ekonomajzera, *S* pepeo slame soje, a indeks *V* označava vapno.



Slika 6.31: Relativne tlačne čvrstoće stabiliziranoga tla (Barišić et al., 2019a)

Ako se kao referentna mješavina uzme tlo stabilizirano sa 7% vapna, tada samo mješavine s letećim pepelom suncokreta i pepelom pšenice s ložišta pokazuju pad tlačne čvrstoće, ali i dalje zadovoljavajući minimalnu vrijednost od 0,5 MPa. Ostali pepeli pokazuju poboljšanje 28-dnevne tlačne čvrstoće.

6.6. Smjernice za buduća istraživanja

Iako se u Republici Hrvatskoj proizvodi više od polovice potrebne primarne energije, spadamo u energetski ovisne zemlje pa se nedostatna energija uvozi. S obzirom na to da se većina energije proizvodi iz neobnovljivih izvora, posebice prirodnoga plina, nužno je što prije iznaći nove načine proizvodnje energije iz obnovljivih izvora i uklopiti se u okvire održivoga razvoja. Proizvodnja energije iz poljoprivredne biomase nameće se kao ekonomski i ekološki najprihvatljivije rješenje s obzirom na veliki potencijal u obliku neobrađene poljoprivredne površine i povoljne klime. Nakon izgaranja poljoprivredne biomase u procesu proizvodnje energije ostaje pepeo koji je potrebno na prihvatljiv i održiv način zbrinuti. U ovom su poglavlju prikazane mogućnosti proizvodnje građevnih proizvoda s pepelima biomase u sastavu: mort, beton i stabilizirano tlo. S obzirom na to da su pepeli pokazali nižu pH-vrijednost u odnosu na cement te time i potencijalnu opasnost od korozije armaturnoga čelika (ugrađenoga u beton u čijem se sastavu takvi pepeli nalaze), nisu nastavljena istraživanja o primjeni tih pepela u armiranobetonskim konstrukcijama. Rezultati laboratorijskih istraživanja pokazali su da je moguća primjena pepela poljoprivredne biomase u građevnim proizvodima, no i da se ovakvi pepeli ne mogu generalizirati, već treba svaki zasebno istražiti.

Reference:

AMBROSIO, R., PAULETTI, V., BARTH, G., POVH, F. P., SILVA, D. A. D. & BLUM, H. 2017. *Energy potential of residual maize biomass at different spacings and nitrogen doses*. Ciência e Agrotecnologia, 41**,** 626.-633.

ASTM INTERNATIONAL 1999. *D 6276-99a, Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization,* West Conshohocken, Pennsylvania, USA, ASTM International.

BARIŠIĆ, I., GRUBEŠA, I. N., ZEKIĆ, D. & DRAGANIĆ, H. 2018. *Potential of agricultural biomass ashes application in road construction*. u: RADONJANIN, V. & FOLIĆ, R. (ur.). 14th International scientific conference on planning, design, construction and building renewal, Novi Sad, Srbija. Departman za građevinarstvo i geodeziju Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.

BARIŠIĆ, I., NETINGER GRUBEŠA, I., DOKŠANOVIĆ, T. & GOJEVIĆ, A. 2019a. *Istraživanja primjene poljoprivredne biomase za proizvodnju građevinskih materijala u Hrvatskoj u sklopu projekta Eco build.* u: MALEŠEV, M., LABAN, M. & NETINGER GRUBEŠA, I. (ur.) Savremena građevinska praksa 2019. Novi Sad, Srbija: Fakultet tehničkih nauka, Departman za građevinarstvo i geodeziju.

BARIŠIĆ, I., NETINGER GRUBEŠA, I., DOKŠANOVIĆ, T. & MARKOVIĆ, B. 2019b. *Feasibility of Agricultural Biomass Fly Ash Usage for Soil Stabilisation of Road Works.* Materials, 12**,** 1375.

BERLANGA, C. & RUIZ, J. A. 2013. *Study of corrosion in a biomass boiler*. Journal of Chemistry.

BORHAN, T. M. & AL-RAWI, R. S. 2016. *Combined effect of MgO and SO3 contents in cement on compressive strength of concrete.* Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences, 9**,** 516.-525.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2000. *HRN EN 1015-7, Metode ispitivanja mortova za ziđe - 7. dio: Određivanje udjela pora u svježem mortu,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2003a. *HRN EN 13286-41, Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine - 41. dio: Određivanje tlačne čvrstoće hidrauličkim vezivom vezanih mješavina,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2003b. *HRN EN 13286-42, Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine - 42. dio: Određivanje vlačne čvrstoće neizravnim postupkom hidrauličkim vezivom vezanih mješavina,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2008a. *HRN EN 1015-3, Metode ispitivanja mortova za ziđe - 3. dio: Određivanje konzistencije svježeg morta,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2008b. *HRN EN 1015-6, Metode ispitivanja mortova za ziđe - 6. dio: Određivanje gustoće svježeg morta,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2008c. *HRN EN 1015-11, Metode ispitivanja mortova za ziđe - 11. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrslog morta,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2008d. *HRN EN 1097-7 Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata - 7. dio: Određivanje gustoće punila - Piknometrijska metoda,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2009a. *HRN EN 196-3, Metode ispitivanja cementa - 3. dio: Određivanje vremena vezivanja i postojanosti volumena,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2009b. *HRN EN 933-10, Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata - 10. dio: Procjena sitnih čestica - Razvrstavanje punila (sijanje strujanjem zraka),* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2010a. *HRN EN 196-6, Metode ispitivanja cementa - 6. dio: Određivanje finoće,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2010b. *HRN EN 13286-2, Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine - 2. dio: Metode ispitivanja za određivanje laboratorijske referentne gustoće i udjela vode - Zbijanje prema Proctoru,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2012. *HRN EN 1996-1-1, Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila za armirane i nearmirane zidane konstrukcije,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2013a. *HRN EN 450-1, Leteći pepeo za beton - 1. dio: Definicije, specifikacije i kriteriji sukladnosti,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2013b. *HRN EN 12390-13, Ispitivanje očvrsloga betona - 13. dio: Određivanje sekantnog modula elastičnosti pri tlaku,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2013c. *HRN EN 12620, Agregati za beton,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2015. *HRN EN 459-1, Građevno vapno - 1. dio: Definicije, specifikacije i kriteriji sukladnosti ,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2016. *HRN EN 998-2, Specifikacija morta za ziđe - 2. dio: Mort za ziđe,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2019a. *HRN EN 12390-3, Ispitivanje očvrsloga betona - 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka,* Brisel, Belgija, CEN.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION) 2019b. *HRN EN 12390-5, Ispitivanje očvrsloga betona - 5. dio: Čvrstoća ispitnih uzoraka na savijanje,* Brisel, Belgija, CEN.

DRŽAVNI ZAVOD ZA STATISTIKU REPUBLIKE HRVATSKE 2014.-2018. *Biljna proizvodnja*. Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske.

EA ENERGY ANALYSES 2018. *Biomass Statistics: Wood chips*. Danish Energy Agency.

ESSOM CO. 2008. *Heating values of hydrogen and fuels* [Online]. Department of Chemical Engineering, Queens University. dostupno: https://chemeng.queensu.ca/courses/CHEE332/files/ethanol_heating-values.pdf [pristupljeno 09.12. 2019].

GRINYS, A., BOCULLO, V. & GUMULIAUSKAS, A. 2014. *Research of Alkali Silica Reaction in Concrete With Active Mineral Additives*. Journal of Sustainable Architecture Civil Engineering, 6**,** 34.-41.

GÜNTHER, B., GEBAUER, K., BARKOWSKI, R., ROSENTHAL, M. & BUES, C.-T. 2012. *Calorific value of selected wood species and wood products*. European Journal of Wood and Wood Products, 70**,** 755.-757.

INSTITUT GRAĐEVINARSTVA HRVATSKE 2001. *Opći tehnički uvjeti za radove na cestama,* Zagreb, Hrvatska, Hrvatske ceste.

ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION) 2015a. *HRN EN ISO 16994 - Čvrsta biogoriva - Utvrđivanje ukupnog udjela sumpora i klora,* Ženeva, Švicarska, ISO.

ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION) 2015b. *HRN EN ISO 18122 - Čvrsta biogoriva - Određivanje udjela pepela,* Ženeva, Švicarska, ISO.

ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION) 2015c. *HRN EN ISO 18134-1 - Čvrsta biogoriva - Određivanje udjela vlage - Metoda sušionika - 1. dio: Ukupna vlaga - Referentna metoda,* Ženeva, Švicarska, ISO.

ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION) 2016. *HRN ISO 9277, Određivanje specifične površine krutine plinskom adsorpcijom - BET metoda,* Brisel, Belgija, CEN.

ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION) 2017. *HRN EN ISO 18125 - Čvrsta biogoriva - Određivanje ogrjevne vrijednosti,* Ženeva, Švicarska, ISO.

ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION) 2018. *HRN EN ISO 17892-12, Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Laboratorijsko ispitivanje tla - 12. dio: Određivanje granice tečenja i granice plastičnosti,* Ženeva, Švicarska, ISO.

JAYANTI, S., MAHESWARAN, K. & SARAVANAN, V. 2007. *Assessment of the effect of high ash content in pulverized coal combustion*. Applied Mathematical Modelling, 31**,** 934.-953.

LIU, X., NIU, D., LI, X., LV, Y. & FU, Q. 2018. *Pore Solution pH for the Corrosion Initiation of Rebars Embedded in Concrete under a Long-Term Natural Carbonation Reaction*. Applied Science, 8**,** 128.

LONČAR, D., KRAJAČIĆ, G. & VUJANOVIĆ, M. 2009. *Podrška developerima-primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvnu biomasu*. Zagreb, Hrvatska: Centar za transfer tehnologije - CTT.

MATIN, A., KRIČKA, T., JURIŠIĆ, V., BILANDŽIJA, N., VOĆA, N. & MRKŠIĆ, J. 2013. *Energetska iskoristivost ljuske oraha i lješnjaka*. Zbornik radova 48. hrvatskog i 8. međunarodnog simpozija agronoma, Dubrovnik, Hrvatska. 836.-840.

MINISTARSTVO POLJOPRIVREDE 2015. *Pravilnik o višestrukoj sukladnosti*. Narodne novine br. 30/2015.

NETINGER GRUBEŠA, I., BARIŠIĆ, I., DIMTER, S., ZAGVOZDA, M., VAREVAC, D., DOKŠANOVIĆ, T., JELEČ, M., DRAGANIĆ, H., MILIČEVIĆ, I., RADIĆ, I. & ZOVKIĆ, J. 2018a. *Research on the application of agricultural biomass ash in building products within the framework of Eco build project in Croatia*. u*:* MALEŠEV, M., LABAN, M. & NETINGER GRUBEŠA, I. (ur.) Contemporary Civil Engineering Practice 2018. Novi Sad, Srbija: Fakultet tehničkih nauka, Departman za građevinarstvo i geodeziju.

NETINGER GRUBEŠA, I., BARIŠIĆ, I., TRKMIĆ, M. & RADIĆ, T. 2018b. *Cjeloviti pristup zbrinjavanju poljoprivredne biomase i pepela poljoprivredne biomase istočnog dijela Republike Hrvatske*. u*:* ŠTRKALJ, A., GLAVAŠ, Z. & KALAMBURA, S. (ur.) I. međunarodna konferencija *Cjeloviti pristup okolišu* Sisak, Hrvatska, Udruga za promicanje cjelovitog pristupa okolišu.

NETINGER GRUBEŠA, I., JURADIN, S., BOKO, I. & CRNOJEVAC, S. 2018c. *Utjecaj pepela ljuske suncokreta i brnistre na svojstva mortova*. 14. Međunarodna naučna konferencija iNDiS 2018 Planiranje, projektovanje, građenje i obnova graditeljstva, Novi Sad, Srbija. Departman za građevinarstvo i geodeziju Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, 144.-144.

NETINGER GRUBEŠA, I., RADEKA, M., MALEŠEV, M., RADONJANIN, V., GOJEVIĆ, A. & SIDDIQUE, R. 2019. *Strength and microstructural analysis of concrete incorporating ash from sunflower seed shells combustion*. Structural Concrete, 20**,** 396.-404.

NOKKEN, M. R. 2010. *Expansion of MgO in Cement Pastes Measured by Different Methods*. ACI Materials Journal, 107.

PAK, Y. N., PONOMARYOVA, M. V. & PAK, D. Y. 2016. *Monitoring the sulfur content of coal*. Coke and Chemistry, 59**,** 8.-13.

POSARIĆ, I. 2009. *Izgradnja skladišno-distributivnog postrojenja ukapljenoga naftnog plina u petrokemijskoj industriji DINA Petrokemija dd*. Polimeri: časopis za plastiku i gumu, 30**,** 47.-49.

RIAZI, M. R., NASIMI, N. & ROOMI, Y. A. 1999. *Estimation of Sulfur Content of Petroleum Products and Crude Oils*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 38**,** 4507.-4512.

VIŠKANIĆ, M. 2015. *Eksperimentalno određivanje ogrjevne vrijednosti drvne biomase.* Sveučilište u Rijeci.

VLADA REPUBLIKE HRVATSKE 2005. *Strategija gospodarenja otpadom Republike Hrvatske*. Narodne novine br. 130/2005.

VUKADINOVIĆ, V., JUG, I., VUKADINOVIĆ, V., JUG, D. & ĐURĐEVIĆ, B. 2014. *The carbon balance in eastern Croatian soils with burning or removal wheat straw for energy needs*. 7th International Scientific/Professional Conference, Agriculture in Nature and Environment Protection, Vukovar, Hrvatska.

7. CIRKULARNA EKONOMIJA S ASPEKTA DRVNE I POLJOPRIVREDNE BIOMASE

Sažetak: U situaciji kada svjetska populacija intenzivno raste i usto očekuje način života u kojem ni u čemu ne oskudijeva, a suvremena tehnologija omogućava brzu proizvodnju velikih količina proizvoda, razmišljanje o povećanju učinkovitosti postojećih resursa postaje imperativom. U ekonomskom se smislu takav model naziva 3R načelo - reduce, reuse and recycle, a implicira prelazak s linearne na kružnu ekonomiju. Uspješnost se posljedično mjeri kroz produktivnost resursa ili kompozitnim indeksom ekoinovacija. Ovo je poglavlje usredotočeno na sadašnji i potencijalni stupanj razvoja cirkularne ekonomije na području biomase na hrvatskom tržištu, apsolutno i u odnosu na EU. Biomasa se smatra najvažnijim obnovljivim izvorom energije, a osim u energetici, identificirane su i njezine inovativne primjene u građevinarstvu. Međutim, uslijed nedovoljno razvijene industrijske proizvodnje, nedovoljno razvijenih politika za promicanje kružne ekonomije te nedovoljne informiranosti javnosti o nužnosti cirkularne ekonomije i izvorima financiranja, potencijali ekoinovacija, uključujući one temeljene na biomasi, još su daleko od iskorištavanja punoga potencijala.

Ključne riječi: cirkularna ekonomija, poljoprivredna biomasa, drvna biomasa, održivi razvoj, Republika Hrvatska

7.1. Razvoj ideje o kružnom gospodarstvu

Prema podatcima Svjetske banke (The World Bank, 2019) godišnja stopa rasta populacije je stabilna i prosječno je iznosila 1,2% tijekom zadnjega desetljeća. Ova je informacija o kontinuirano uzlaznom trendu još impresivnija uzmu li se u obzir nominalne brojke umjesto relativnih pokazatelja. Naime, trenutačna svjetska populacija broji 7,8 milijarda ljudi, a očekuje se da će kroz sljedeće desetljeće, dakle, do 2030. ta brojka porasti na 8,6 milijarda, odnosno da će psihološka i stvarna granica od devet milijarda stanovnika Zemlje biti probijena prije 2040. (United Nations, 2019).

Istodobno, svjetska populacija ima i sve veća očekivanja u pogledu života u blagostanju, a to dovodi do sve izraženije spoznaje o ograničenosti resursa (van Leeuwen et al., 2018). Osim svjesnosti o ograničenosti resursa, povećana ekstrakcija sirovina iz prirode dovodi i do nepovoljnih utjecaja na okoliš te tako utječe i na zdravlje i kvalitetu života ljudi. U Europskoj se uniji (EU) trenutačno koristi otprilike 16 tona materijala po glavi stanovnika, od čega se deset utroši na materijalna dobra (infrastrukturu, stanovanje, trajna dobra), a šest izlazi iz gospodarstva kao otpad (Amanatidis, 2019).

Jedini je racionalni pristup takvoj situaciji pokušati unaprijediti učinkovitost korištenja postojećih resursa, što uključuje i njihovu višekratnu uporabu. Povećanje učinkovitosti korištenja resursa pridonosi smanjenju intenziteta uporabe prirodnih resursa te se usko povezuje s ublažavanjem nepovoljnih utjecaja na okoliš. Međutim, pravi prinos održivomu razvoju nije

moguć bez značajnih promjena unutar samoga načina funkcioniranja gospodarstva (Andabaka, 2018).

Takvo se razmišljanje pretvorilo u povod za nastanak inicijative o kružnom gospodarstvu. Kružno gospodarstvo kao ekonomski model manifestira tzv. 3R načelo: smanjiti, ponovno upotrijebiti i reciklirati *(*eng. *reduce, reuse and recycle)*. Kao takav, model kružnoga gospodarstva zapravo podrazumijeva promjenu tradicionalnoga načina razmišljanja karakterističnoga za linearnu ekonomiju, jer više ne percipira otpad kao smeće koje je problem u smislu prikupljanja i odlaganja, nego kao potencijalno koristan resurs (Andrews, 2015).

Pokušaja ponovne uporabe bilo je, naravno, tijekom cijele povijesti čovječanstva, međutim generalna potreba za ponašanjem u skladu s načelima kružnoga gospodarstva pojavila se nakon industrijske revolucije. Naime, u tom je razdoblju čovjek počeo intenzivno primjenjivati tehnologije koje su omogućavale brzu proizvodnju velikih količina proizvoda, što je dovelo do rastuće pojave potrošačkoga društva. Kružno se gospodarstvo postupno nametnulo kao jedina prihvatljiva alternativa do tada dominantnom ekonomskom modelu *take, make and dispose of* (Ness, 2008).

Analizirajući razvoj kružnoga gospodarstva, treba reći da se njegovi sustavni začetci mogu prepoznati u radovima američkoga ekonomista E. Bouldinga, koji je sredinom prošlog stoljeća razvio diskurs o otvorenoj i zatvorenoj ekonomiji. U ono se vrijeme revolucionarnom smatrala njegova izjava: "Zatvorena ekonomija budućnosti mogla bi se zvati i 'svemirska' ekonomija, ako zamislimo da je Zemlja svemirski brod koji ima neograničene rezerve svih resursa koje iskorištavamo ili zagađujemo, te u kojem čovjek, stoga, mora naći svoje mjesto u kružnom ekološkom sustavu." (Boulding, 1966).

Što se tiče doslovnoga izraza *kružno gospodarstvo (*eng. *circular economy),* njegovi su autori britanski ekonomisti David Pearce i Kerry Turner (1989), koji su pisali da se u tradicionalnom, otvorenom gospodarstvu okoliš poima kao nepresušan bazen resursa koji je istodobno i prikladan rezervoar za smeće te isticali da takvo razmišljanje nije održivo.

Ipak, ne može se pojavu kružnoga gospodarstva pripisati kao zaslugu jednoga autora ili povezati s točno određenim datumom u prošlosti. 3R načelo ovoga ekonomskoga modela može se prepoznati u različitim školama koje dijele ideju kružnoga pristupa, čiji su rezultat uštede resursa i energije, kao i smanjena količina otpada za odlaganje. Sve one impliciraju promjenu mentalnoga sklopa u smislu poimanja oporabe materijalnih resursa i energije kao načina stvaranja nove dodatne vrijednosti i povrata troškova (Andrews, 2015).

Sve inicijative kružnoga gospodarstva imaju za cilj očuvati vrijednost proizvoda i materijala što duže, istodobno minimizirajući generiranje otpada. Ultimativni je cilj takvoga pristupa razdvajanje ekonomskoga razvoja od degradacije okoliša (Ghisellini et al., 2016). Implementacija je takvih inicijativa najvažniji prinos razvoju održivoga gospodarstva (Šandrk Nukić and Marošević, 2019).

S obzirom na važnost modela kružnoga gospodarstva, suvremenu je povijest njegova razvoja obilježila službena, sustavna podrška europskih institucija. U prosincu je 2015. Europska

komisija usvojila ambiciozni *Circular Economy Package* kako bi stimulirala tranziciju europskoga gospodarstva prema kružnim načelima i održivom ekonomskom rastu. Taj je paket o kružnom gospodarstvu obuhvatio *Circular Economy Action Plan* i revidirane zakonodavne prijedloge u području gospodarenja otpadom. Tim je akcijskim planom uspostavljen specifičan program mjera koje pokrivaju čitav krug: od proizvodnje i potrošnje do upravljanja otpadom i tržišta sekundarnih sirovina. Tako sve mjere zajedno pridonose zatvaranju kruga i uspostavljanju ravnoteže između interesa ekonomije, okoliša i društva (European Commission, 2015b).

I hrvatsko zakonodavstvo u području gospodarenja otpadom proizlazi iz europskih smjernica i temelji se na načelima zatvaranja kruga. Tako krovni nacionalni propis, *Zakon o održivom gospodarenju otpadom* (Hrvatski sabor, 2017), propisuje tzv. red prvenstva gospodarenja otpadom kako slijedi:

- sprječavanje nastanka otpada,
- priprema za ponovnu uporabu,
- recikliranje,
- drugi postupci oporabe, npr. energetska oporaba i
- zbrinjavanje otpada.

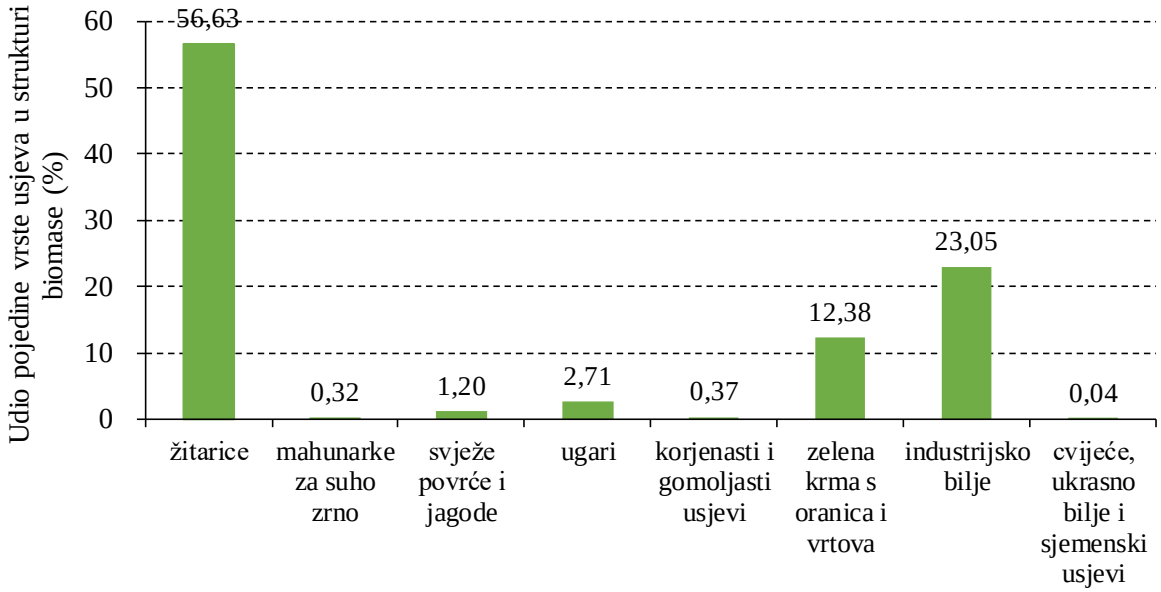
Takav se red gospodarenja odnosi na sve kategorije otpada iz nacionalnog *Pravilnika o katalogu otpada* (Ministarstvo zaštite okoliša i prirode, 2015). S obzirom na temu ovoga poglavlja, u nastavku će fokus biti na otpadu iz poljoprivrede i šumarstva, dakle biomasi.

7.2. Biomasa u kontekstu kružnoga gospodarstva

Biomasa je obnovljivi izvor energije koji uključuje ogrjevno drvo, grane i drvni otpad iz šumarstva, te piljevinu, koru i drvni ostatak iz drvne industrije, kao i slamu, kukuruzovinu, stabljike suncokreta, ostatke pri rezidbi vinove loze i maslina, koštice višanja i kore od jabuka iz poljoprivrede, životinjski izmet i ostatke iz stočarstva, komunalni i industrijski otpad (Energetski institut Hrvoje Požar, 2005). S obzirom na ciljeve istraživanja iz kojega proizlazi, ovo poglavlje prioritetno analizira drvnu i biljnu poljoprivrednu biomasu (u daljnjem tekstu drvna i poljoprivredna biomasa).

Ukupna površina Republike Hrvatske je 56.594 km^2 (Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske, 2018a), od čega je 1,496.663 ha korištena poljoprivredna površina (Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske, 2018c), dok je ukupna površina šumskoga zemljišta 2,751.842 ha (Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske, 2019).

Poljoprivrednu biomasu čine ostatci s polja nakon žetve, odnosno berbe. Potencijalne količine poljoprivredne biomase izravno ovise o vrsti nasada na zasijanim površinama, a njihova je struktura prikazana slikom 7.1.



Slika 7.1: Vrste nasada na poljoprivrednim površinama u Republici Hrvatskoj u 2017. (Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske, 2018c)

Drvnu biomasu predstavlja sva šumska drvna masa (stablo, krošnje, grane i grančice), drvni ostatci nastali iz prerade drveta, kao i sve ostale vrste drvnoga otpada (npr. otpad nastao prilikom uređenja parkova, ostatci čišćenja vodotokova i trasa dalekovoda, ostatci nastali uslijed održavanja zelenih površina, hortikulturnih radova itd.) (Razvojni program Ujedinjenih nacija (UNDP), 2017).

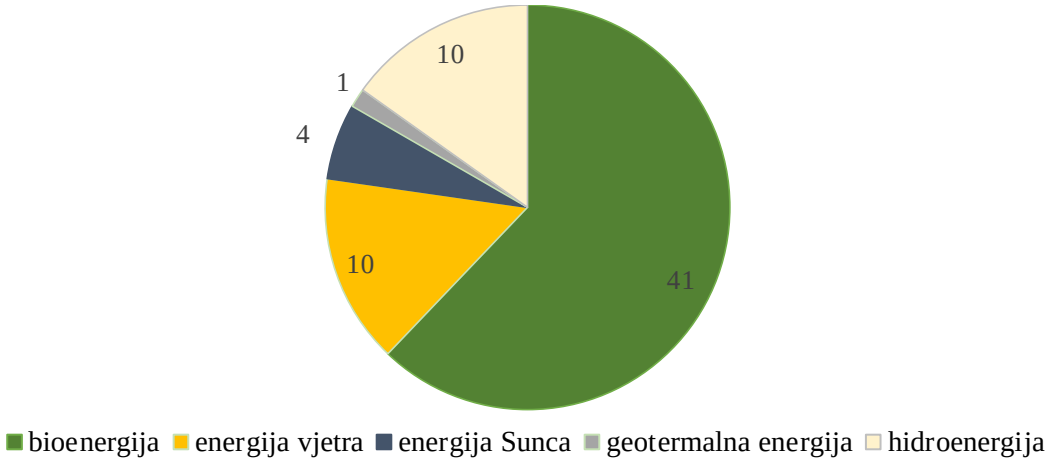
Što se tiče njezinoga potencijala u Hrvatskoj, najbolje ga ilustrira podatak da prosječna godišnja količina ukupno posječenoga drveta u državnim i privatnim šumama iznosi 5,4 milijuna m^3 drvne mase (Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske, 2019). Uz to, upravljanje šumskim resursima u Republici Hrvatskoj osigurava maksimiziranje koristi od šume s okolišnoga, ekonomskoga i društvenoga aspekta (Hrvatski sabor, 2018).

7.2.1. Biomasa kao izvor energije

O biomasi se obično govori kao o značajnom obnovljivom izvoru energije, jer su biljke od kojih nastaje živi organizmi koji nakon sječe mogu ponovno izrasti. Prosječno se poljoprivredna biomasa može obnoviti kroz godinu-dvije, dok je za drvnu biomasu potrebno oko 15-20 godina. Drvna biomasa potječe iz gospodarenja šumama, iz drvne industrije te energetskih nasada na kojima se brzorastuće drveće uzgaja ciljano za povećanje obnovljivih izvora energije (Razvojni program Ujedinjenih nacija (UNDP), 2017). Evidentno, održivom se uporabom biomase može postići kontinuirana eksploatacija, u smislu da se količina biomase koja se koristi prilagodi količini biomase koja se obnovi u istom razdoblju.

Hrvatski *Zakon o energiji*, čl.13. (Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, 2018) naglašava da je korištenje obnovljivih izvora energije od interesa za Republiku Hrvatsku. Generalni značaj biomase u sektoru energetike ističe statističko izvješće Europskog udruženja za biomasu

(European Biomass Association, 2017), koje navodi da je biomasa najznačajniji izvor među različitim obnovljivim izvorima energije. To izvješće mjeri udio pojedinih obnovljivih izvora energije u strukturi ukupne energetske potrošnje brojem dana tzv. čiste energije. U 2017. godini biomasa je osigurala 41 dan čiste energije na razini Europske unije, odnosno 40 dana na globalnoj razini, što je oboje više od ostalih obnovljivih izvora zajedno. Navedeno je ilustrirano slikom 7.2.



Slika 7.2: Broj dana čiste energije ostvaren iz različitih obnovljivih izvora energije (European Biomass Association, 2017)

Kao obnovljivi se izvor energije biomasa koristi za proizvodnju toplinske energije, ali je važna i kao izvor električne energije te mehaničke energije u smislu biogoriva za potrebe prijevoza. Postoje razni načini dobivanja energije iz biomase. Biomasa se može izravno pretvarati u energiju jednostavnim izgaranjem, pri čemu se proizvodi pregrijana vodena para za grijanje u industriji i kućanstvima ili za dobivanje električne energije u malim termoelektranama. Fermentacija biomase u alkohol za sada je najrazvijenija metoda kemijske konverzije biomase. Takav se postupak najopsežnije razvija u Brazilu, gdje se godišnje dobiva oko milijun tona etanola za pogon vozila, a očekuje se da će se ta proizvodnja i povećati. Uljana repica i neke druge uljarice daju biodizel koji se može izravno upotrebljavati u dizelskim motorima. Anaerobnom se fermentacijom može iz biomase dobiti metan. Bioplin nastao fermentacijom bez prisutnosti kisika sadrži metan i ugljik pa se može upotrebljavati kao gorivo (Energetski institut Hrvoje Požar, 2005). Analizirajući zadnje dostupne podatke o bruto potrošnji energije proizvedene iz biomase različitim postupcima, na razini EU-a je proizvedeno 82.921 ktoe toplinske energije, 14.158 ktoe biogoriva za transport i 15.295 ktoe električne energije (European Biomass Association, 2017).

Sadašnjom se *Strategijom energetskog razvoja RH* (2009) predviđa da će tijekom narednih desetljeća znatnije porasti ovisnost Hrvatske o uvozu energije od sadašnjega uvoza na razini 50%, do očekivanoga uvoza u 2030. godini od više od 70%. Takva je energetska budućnost ne samo vrlo nepovoljna gospodarski s aspekta uvozno-izvozne bilance zemlje, već je jednako tako nepovoljna i politički zbog sve veće ovisnosti o uvozu energije i energenata. Takva se situacija može riješiti jedino davanjem potpune prednosti domaćim (lokalnim) izvorima energije kao što je biomasa te istodobnim sustavnim smanjivanjem uvoza fosilnih energenata.

7.2.2. Inovativne primjene biomase u građevinskoj industriji

Neosporno je da primjena biomase u energetici ima velike potencijale, no u procesu spaljivanja biomase u svrhu stvaranja energije nastaje i velika količina pepela od biomase, za koji je potrebno osigurati prikladno odlaganje kao i za ostali otpad.

Volumen pepela koji nastaje spaljivanjem poljoprivredne biomase količinski je manji nego volumen koji nastaje spaljivanjem fosilnih goriva (ugljena), ali odlaganje toga pepela, ipak, predstavlja problem i važno je pronaći rješenje za odgovarajuće upravljanje njime, odnosno uporabu toga otpada. Trenutačno se pepeo od poljoprivredne biomase odlaže nesustavno: na komunalnim odlagalištima otpada, na poljima i u šumama, uglavnom bez nadzora, a to znači da takvo odlaganje predstavlja potencijalni izvor rizika za okoliš i ljudsko zdravlje (Carević et al., 2016).

Upravo stoga znanstvenici koji provode najnovija istraživanja nastoje i tom pepelu biomase pronaći primjenu, kako bi se i on iskoristio umjesto odlagao. Temeljem dosadašnjih spoznaja, čini se da najviše izgleda ima primjena pepela od biomase u građevinskoj industriji.

Pepeo koji nastaje spaljivanjem poljoprivredne biomase identificiran je kao potencijalno iskoristiv materijal izgradnju svih slojeva kolnika. Naime, izgradnja cesta je područje građevinarstva koje najviše ovisi o dostupnosti prirodnih materijala. Istodobno, porast prometnih opterećenja nameće potrebu izgradnje cesta i na područjima na kojima je teško osigurati cjenovno prihvatljivu dopremu prirodnih materijala potrebnih za građenje. Zbog toga dolazi do potrage za drugim, lokalno dostupnim materijalima. Međutim, iako potreba postoji, poljoprivredna biomasa i njezin pepeo mogu potjecati od velikoga broja različitih usjeva, što dovodi do potrebe za istraživanjem svojstava toga pepela, prije bilo kakve njegove primjene (Barišić et al., 2019). Ovo se poglavlje neće fokusirati na različite mogućnosti primjene pepela poljoprivredne biomase ovisno o njegovim svojstvima jer je to detaljno objašnjeno u prethodnom poglavlju.

Osim pepela poljoprivredne biomase, građevinarstvu je zanimljiv i pepeo drvne biomase. Naime, nakon spaljivanja jedne tone drvne biomase ostaje prosječno 3,1% pepela drvne biomase. Karakteristike toga pepela također nisu ujednačene, jer, ne samo da potječu od različitih vrsta stabala, nego većina postrojenja na drvnu biomasu koristi i drvne ostatke s nečistoćama. Dosadašnja su istraživanja potencijalnih primjena pepela drvne biomase u građevinarstvu pokazala da je prikladan kao alternativna sirovina u proizvodnji klinkera, kao mineralna primjesa u proizvodnji cementa te kao mineralna primjesa u proizvodnji cementnih kompozita. Ipak, prikladnost primjene pepela u cementu i cementnim kompozitima zahtijeva detaljnu analizu mehaničkih svojstava i svojstava izdržljivosti, kao i kontrolu kvalitete u svakoj pojedinoj situaciji (Štirmer et al., 2018).

Da to ne bi bio uzaludan posao potvrđuje podatak da se u Hrvatskoj godišnje spali 676.786 tona drvne biomase, što rezultira s oko 20.890 tona pepela godišnje. S obzirom na to da je maksimalna preporučena količina u kojoj pepeo drvne mase može zamijeniti cement 20%, ta bi količina pepela zadovoljila godišnju proizvodnju 20 betonara prosječnoga kapaciteta 50.000

m^3 betona godišnje. Zamjena u većem postotku nije moguća, jer bi imala negativan utjecaj na svojstva cementa i cementnih kompozita (Štirmer et al., 2018).

7.3. Ekoinovacijski profil Hrvatske

Govoreći o kružnom gospodarstvu, ne mogu se ne spomenuti ekoinovacije, za koje se smatra da imaju ključnu ulogu u poticanju 3R načela (European Commission, 2015a). Sustavan način podrške kružnom gospodarstvu i ekoinovacijama na području Europske unije platforma je za strukturirano prikupljanje i analizu širokoga spektra informacija o ekološkim inovacijama. Ta se platforma zove Eco-Innovation Observatory (EIO), a pokrenuta je s namjerom da informacije koje pruža smanje neizvjesnost i stvore podlogu za donošenje kvalitetnijih odluka (Eco Innovation Observatory, 2018). To je izuzetno bitno, jer su inovacije po svojoj prirodi nešto novo i neisprobano pa nužno uključuju visoku razinu rizika. Stoga takve informacije jačaju sposobnost i kompanija i *policy makera* te izravno ubrzavaju nastanak inovacija i povećavaju investicije kojima će se realizirati značajni tržišni potencijali u svim ekonomskim sektorima.

7.3.1. Pojam ekoinovacija

Potrebno je, ipak, krenuti od objašnjenja pojma ekoinovacije. Prema metodologiji EIO (Eco-Innovation Observatory, 2013), ekoinovacije su svaki novi ili značajno unaprijeđen proizvod (roba ili usluga), proces, organizacijska promjena ili tržišno rješenje koje smanjuje uporabu prirodnih resursa (uključujući materijale, energiju, vodu i tlo) te smanjuje otpuštanje štetnih supstanci tijekom cijeloga životnoga ciklusa (Eco-Innovation Observatory, 2012).

Takvu definiciju podržava i *Oslo manual* (OECD and Eurostat, 2019), referentni međunarodni vodič za prikupljanje i korištenje podataka o inovacijama, koji zastupa sljedeću tipologiju inovacija:

I. Inovacije proizvoda - roba ili usluga koja je nova ili značajno unaprijeđena, što uključuje značajna unaprjeđenja tehničkih specifikacija, komponenti, materijala, softvera u proizvodu, jednostavnost uporabe ili druge funkcionalne karakteristike.
II. Inovacije procesa - novi ili značajno unaprijeđeni načini proizvodnje ili isporuke, što uključuje značajne promjene u tehnikama, opremi i/ili softveru.
III. Marketinške inovacije - nove marketinške metode koje uključuju značajne promjene u barem jednom od četiriju elementa marketinškoga spleta:
    - dizajnu proizvoda ili njegove ambalaže,
    - distribuciji proizvoda,
    - promociji proizvoda i/ili
    - politici cijene proizvoda.
IV. Organizacijske inovacije - nove organizacijske metode u poslovnoj praksi, u organizaciji internoga radnoga okruženja ili u organizaciji odnosa s javnošću.

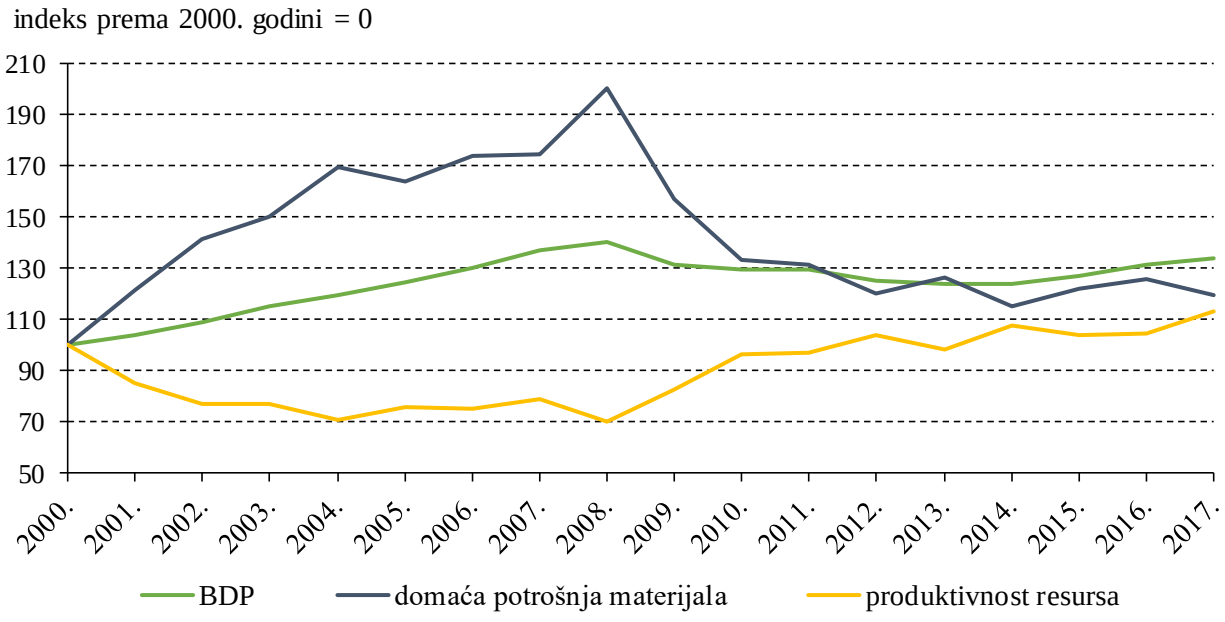
Ekoinovacije se odnose na sve oblike inovacija - tehnološke i netehnološke, proizvodne, uslužne te one koje predstavljaju novu poslovnu praksu. Svima im je zajedničko da stvaraju nove poslovne prilike te pogoduju okolišu u smislu preveniranja ili smanjenja negativnih utjecaja, odnosno u smislu optimiziranja uporabe resursa (Harc and Briš Alić, 2018).

Prema EIO, poticanje ekoinovacija i *zelene ekonomije*, dakle poticanje učinkovite uporabe resursa u svrhu gospodarskoga rasta i razvoja znači pronalaženje prilika za rast bez uporabe ili uz smanjenu uporabu primarnih resursa (Eco-Innovation Observatory, 2013). To znači da je razdvajanje ekonomskoga razvoja od degradacije okoliša moguće jedino primjenom 3R načela.

7.3.2. Produktivnost resursa kao mjera uspješnosti

Prilikom ocjenjivanja uspješnosti pojedinog gospodarstvo u tom razdvajanju, najčešće se uspoređuje kretanje gospodarskoga rasta mjereno BDP-om i domaće potrošnje materijala, odnosno promatra se produktivnost resursa koja predstavlja omjer tih vrijednosti. Ako gospodarstvo raste brže od potrošnje resursa, ostvaruje se relativno razdvajanje (engl. *relative decoupling*), dok se apsolutno razdvajanje (engl. *absolute decoupling*) postiže kada prilikom gospodarskoga rasta potrošnja materijala ostaje stabilna ili se smanjuje (OECD, 2002).

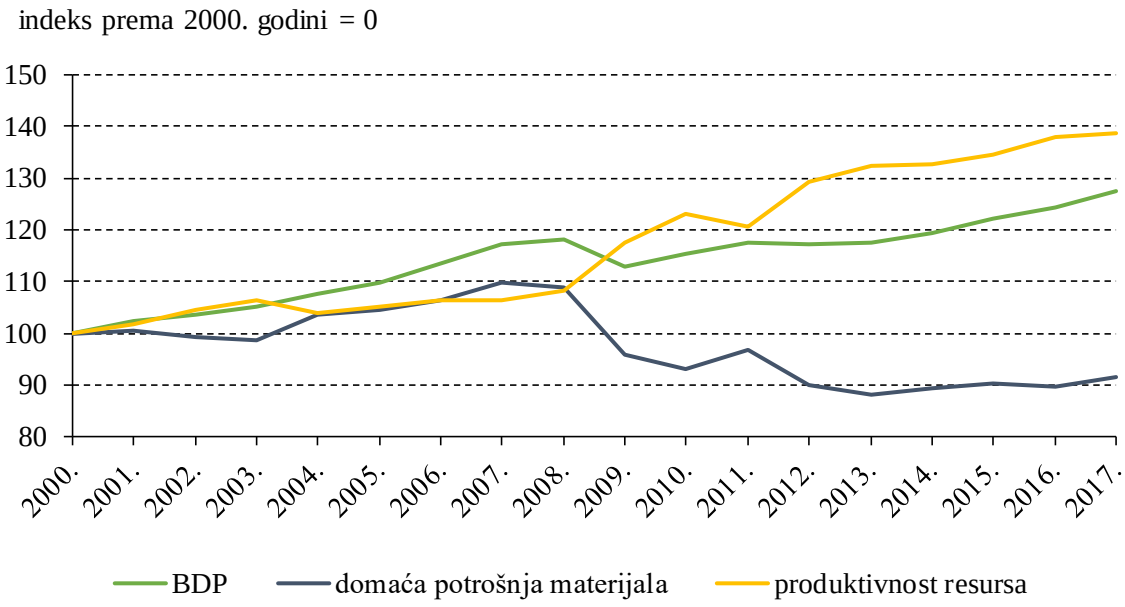
Prema zadnjim se podatcima za Hrvatsku produktivnost resursa smanjivala do 2008., jer je domaća potrošnja materijala rasla brže od BDP-a, dok je trend porasta produktivnosti resursa prisutan od 2009., ali samo zato što je istodobno došlo do recesijom uzrokovanoga nagloga smanjenja potrošnje materijala. Takva su kretanja prikazana slikom 7.3.



Slika 7.3: Produktivnost resursa u Republici Hrvatskoj od 2000. do 2017. (European Environment Agency (EEA), 2018)

Tomu je u najvećoj mjeri pridonijelo snažno i dugotrajno smanjenje aktivnosti u djelatnosti građevinarstva, koje je ujedno i jedan od najznačajnijih potrošača prirodnih resursa (Andabaka, 2018). Indeks fizičkoga obujma građevinske aktivnosti počeo je padati u travnju 2009. i nastavio se kontinuirano smanjivati gotovo šest godina (Hrvatska gospodarska komora, 2016).

Promatraju li se isti pokazatelji na razini Europske unije (EU-28), kao što je to prikazano slikom 7.4 (u tada postojećih 28 zemalja članica EU-a), tada je situacija drukčija, jer je od 2009. prisutan trend razdvajanja gospodarskoga rasta od potrošnje materijala, što je vidljivo na slici 7.5. U promatranom razdoblju od 2000. do 2017. došlo je do stvarnoga povećanja produktivnosti. Tek takvi trendovi stvaraju mogućnost trajnoga održivoga rasta.

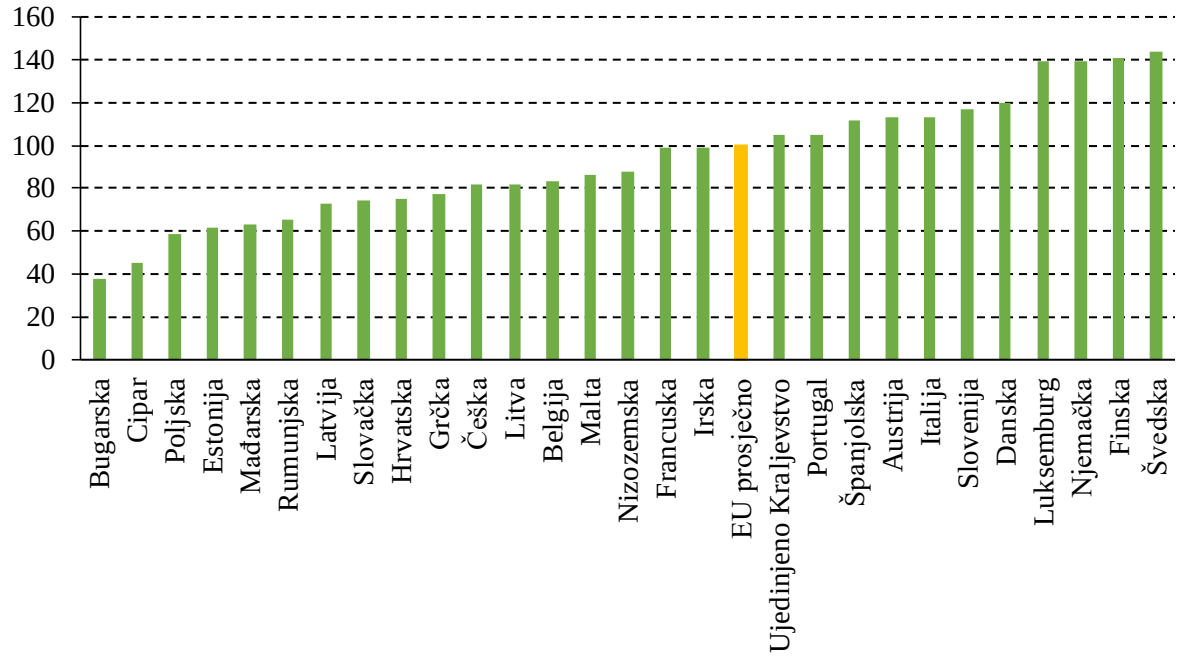


Slika 7.4: Produktivnost resursa u Europskoj uniji (EU-28) od 2000. do 2017. (European Environment Agency (EEA), 2018)

7.3.3. Kompozitni indeks ekoinovacija

Mjerenje produktivnosti resursa nije jedini način mjerenja uspješnosti u primjeni 3R načela, odnosno u razdvajanju gospodarskoga rasta od degradacije okoliša. Sustav praćenja napretka prema ostvarenju kružne ekonomije još se uvijek razvija i pokazatelji se kontinuirano nadopunjavaju, pa još nisu dostupni svi potrebni podatci koji bi stvorili cjelovitu sliku o učinkovitosti djelovanja na razini EU-a i nacionalnoj razini. Ipak, indikaciju uspješnosti u primjeni koncepta kružne ekonomije daje i kompozitni indeks ekoloških inovacija. Indeks ekoloških inovacija je kompozitni indeks utemeljen na 16 indikatora grupiranih u pet komponenti: ekoinovacijske ulazne varijable, ekoinovacijske aktivnosti, ekoinovacijski rezultati aktivnosti, okolišna postignuća i društveno-ekonomska postignuća (Šandrk Nukić i Marošević, 2019).

Indeks ekoloških inovacija demonstrira ekoinovativnu performansu neke zemlje te omogućuje usporedbu s ostalim državama i EU prosjekom. Kao što je prikazano slikom 7.5, Hrvatska je ostvarila prosjek za četvrtinu niži od prosjeka EU-a te se rangirala kao 20. na ljestvici EU-28. Takav rezultat svrstava Hrvatsku među države koje tek sustižu ekološke inovacije u usporedbi s ostatkom Europe. To nije slučaj sa svim zemljama iz regije, jer je, primjerice, Slovenija ostvarila vrijednost indeksa 117, što ju svrstava među lidere u ekološkim inovacijama. Ipak, uzme li se u obzir da je u 2015. godini Hrvatska ostvarila tek 61% od EU prosjeka mjereno ovim indeksom te da je bila 24. od 28 europskih zemalja, može se zaključiti da ekoinovacijski trendovi u Hrvatskoj imaju uzlaznu putanju (European Commission, 2019).



Slika 7.5: Indeks ekoloških inovacija u Europskoj uniji u 2017. godini (Eco-Innovation Observatory, 2018)

7.4. Potencijali i ograničenja cirkularne ekonomije u Hrvatskoj

Kako bi se barem približila europskom prosjeku, u Hrvatskoj bi trebalo razvijati i promicati ekološke inovacije. Naravno, cirkularna ekonomija važna je ne samo radi međunarodnih standarda, nego i zbog stanja nacionalnoga gospodarstva. Jedan od najjačih argumenata koji govori u prilog važnosti cirkularne ekonomije na temelju biomase jest mogućnost otvaranja novih radna mjesta i snaženje industrije namijenjene izvozu.

Na razini Europske unije procjenjuje se da je u 2020. godini proizvodnja energije iz biomase bila 113 Mtoe godišnje, što predstavlja mogućnost za otvaranje čak oko 1,500.000 novih radnih mjesta. Mogućnost novoga zapošljavanja zbog korištenja biomase i na nacionalnoj hrvatskoj razini predstavlja ogroman potencijal, s obzirom na to da su nova radna mjesta rezultat i neposrednoga zapošljavanja (zahvaljujući proizvodnji goriva i drugih proizvoda u koje je ugrađena biomasa, odnosno njezini produkti te izgradnji i upravljanju energetskim i drugim

postrojenjima) i posrednoga zapošljavanja (unutar cijeloga lanca aktivnosti koji biomasa prođe - od prikupljanja i prerade ostataka, do prijevozničkih, savjetodavnih i drugih potrebnih usluga). Prema podatcima Energetskog instituta Hrvoje Požar za pojedinačno promatrana petogodišnja razdoblja od 2000. do 2015., posredno i neposredno zapošljavanje su zbog korištenja biomase u Hrvatskoj zajedno generirala 900, 1800, 3200 i 4400 novih radnih mjesta. Dakle, stopa novoga zapošljavanja uslijed korištenja biomase raste progresivno (Energetski institut Hrvoje Požar, 2005).

Međutim, ne može se očekivati da se potencijali biomase spontano realiziraju bez uloženoga svjesnoga napora. U tom smislu, u nepristranom istraživanju Europske komisije (Eco-Innovation Observatory, 2018) navode se sljedeći čimbenici ekspanzije ekoinovacija i cirkularne ekonomije:

- okolišni i organizacijski kapaciteti,
- tehnološki kapaciteti,
- pritisci vlasti,
- financijske subvencije,
- tržišni instrumenti i potražnja za zelenim proizvodima,
- pritisak konkurencije.

Prethodnim je poglavljima argumentirano postojanje okolišnih potencijala za ekoinovacije i cirkularnu ekonomiju na temelju poljoprivredne i drvne mase, odnosno njihovih primjena u energetici i građevinarstvu.

Tehnološki kapaciteti također postoje, što argumentiraju podatci Hrvatskog operatora tržišta energije d.o.o. - HROTE, prema kojima u Hrvatskoj stalno raste broj postrojenja koja proizvode energiju iz biomase, a 2019. ih je 29 s kojima je HROTE sklopio ugovor o otkupu električne energije ukupne instalirane snage 59.329 kW. Uz to, u pripremi su još 24 postrojenja planirane snage ukupno 52.274,00 kW, a s kojima je HROTE sklopio ugovor o otkupu električne energije, no koja još nisu puštena u pogon (Hrvatski operator tržišta energije (HROTE), 2019). Ova količina postrojenja izravna je posljedica financijskih poticaja koje Vlada Republike Hrvatske daje proizvođačima energije iz biomase. Međutim, s tim poticajima priča o financiranju kružne ekonomije u kontekstu biomase i počinje i završava pa se nedovoljna ulaganja navode uz bok ostalih prepreka cirkularnoj ekonomiji u Hrvatskoj.

Naime, hrvatskim ekoinovacijskim profilom identificirane su sljedeće prepreke cirkularnoj ekonomiji i ekoinovacijama (Eco-Innovation Observatory, 2018):

- nedovoljna zastupljenost zelene javne nabave,
- nedovoljna svjesnost/voljnost ukupne populacije da daje prinos cirkularnoj ekonomiji,
- različitosti hrvatskoga teritorija - oblik zemlje, razvedenost obale,
- kompleksnost teritorijalne i administrativne organizacije države - broj županija, gradova i općina te njihove ovlasti,
- nedovoljna ulaganja u istraživanje i razvoj,
- nedostatan broj primjera dobre prakse koji bi povezivali javni i privatni sektor.

S obzirom na to da su inovacije u samoj srži prelaska na model kružnoga gospodarstva, bitno je od navedenih ograničenja izdvojiti financiranje inovacija. Na makroekonomskoj je razini poražavajuće da je, prema zadnjim podatcima, svega 0,86% BDP-a uloženo u istraživanje i razvoj (Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske, 2018b). Takva niska razina ulaganja odražava se i na broj prijavljenih patenata: Hrvatska je među pet zemalja koje nisu imale ni jedan patent povezan s recikliranjem i sekundarnim sirovinama (Eurostat, 2018). Ako se financiranje analizira na mikroekonomskoj razini, tada je zanimljivo istraživanje koje je proveo Flash Eurobarometer 441 (European Commission, 2016), čiji rezultati među najznačajnijim poteškoćama na koje su nailazila male i srednje tvrtke u Hrvatskoj pri implementaciji aktivnosti povezanih s kružnom ekonomijom navode složene administrativne i zakonske procedure te otežan pristup financiranju. Prema tom se istraživanju 67% tvrtki koristilo samofinanciranjem za navedene aktivnosti, pri čemu je više od polovice malih i srednjih tvrtki koje su tražile informacije o raspoloživim vanjskim izvorima financiranja izjavilo da ima vrlo malo ili uopće nema dostupnih informacija.

Dodatnu prepreku u Hrvatskoj predstavlja i nedostatak potražnje za inovativnim proizvodima, prije svega od strane države koja bi trebala biti primjer ostalim tržišnim dionicima. Naime, tijela javne vlasti mogu pridonijeti kružnoj ekonomiji putem zelene javne nabave tako da prednost daju proizvodima, radovima i uslugama koje imaju povoljniji utjecaj na okoliš, odnosno uključivanjem zahtjeva za cirkularnost u postupak nabave. Kružna javna nabava ide i korak dalje od zelene javne nabave te se može definirati kao proces kojim tijela javne vlasti kupuju proizvode, radove ili usluge koji pridonose kružnom toku energije i materijala unutar sustava nabave, pri čemu minimiziraju i, u najboljem slučaju, izbjegavaju negativne utjecaje na okoliš i stvaranje otpada tijekom cijeloga njihovoga uporabnoga vijeka (European Commission, 2017). U Hrvatskoj je svega 1,44% ugovora s područja javne nabave nastalo postupkom zelene javne nabave, iako je *Nacionalnim akcijskim planom za zelenu javnu nabavu* planirana njihova primjena kod 40% ugovora u 2017. godini. Gledano vrijednosno, ti su ugovori nosili svega 6,37% ukupne vrijednosti javne nabave u Hrvatskoj (Andabaka, 2018).

Zbog svega toga službeni popis tvrtki koje su dobile status ekoinovatora još uvijek je manji od potencijala, što je evidentno iz tablice 7.1.

Tablica 7.1: Pregled ekoinovativnih proizvoda i usluga koje nude hrvatske tvrtke (Eco-Innovation Observatory, 2018)

Naziv tvrtke	Proizvod/usluga
Centar za razvoj održivih tehnologija d.o.o.	Proizvodnja bioplina
Ducati componenti d.o.o.	Održiva mobilnost
Ecology 108 d.o.o.	Ekološki deterdženti
Ekomobile d.o.o.	IT rješenja za usluge zaštite okoliša (daljinsko očitavanje)
Fabula	Kemijske olovke iz recikliranih, organskih materijala
Freewa project d.o.o.	Ekoboce, web i mobilne aplikacije
Gumiimpex d.o.o.	Recikliranje automobilskih guma
iCat d.o.o.	Energetski učinkoviti i ekološki prihvatljivi brodovi
Include d.o.o.	Pametne klupe
MikroGoran d.o.o.	IT rješenja za usluge zaštite okoliša
MiPlast d.o.o.	Recikliranje, projekti razvoja biopolimera
Mobile Vechicle Technologie d.o.o.	GRUNNER, pametni električni bicikl
Mobilisis d.o.o.	IT obnovljiva rješenja
Rimac automobili d.o.o.	e-vozila, baterije, informatička zabava i rješenja
Solvis d.o.o.	Solarna drvo, solarne klupe
Spectra media d.o.o.	Uređaji za recikliranje tonera
Tehnix do.o.	Tehnološka rješenja za zbrinjavanje otpada
Visiobike d.o. o.	e-bicikl

Od svih se njih biomasom bavi jedino Centar za razvoj održivih tehnologija - CROTEH, razvojno-projektantska tvrtka na području projektiranja, inženjeringa i razvoja tehnologija za obradu i energetsko iskorištavanje biorazgradivih materijala i otpada te komunalnih i industrijskih otpadnih voda.

Primjena cirkularne ekonomije podrazumijeva određenu razinu svjesnosti društva, usvajanje primjerenih i jasnih politika i instrumenata, kao i uporabu suvremenih tehnologija. Na žalost, uslijed nedovoljno razvijene industrijske proizvodnje u Hrvatskoj, pojedinačni i često izolirani primjeri kružne ekonomije i ekoinovacija češće su samo primjeri učinkovitijega upravljanja otpadom, a ne stvarnoga provođenja svih 3R načela. Unatoč svim potencijalima, u Hrvatskoj još uvijek nema dovoljno industrijskih i komercijalnih primjera temeljem kojih bi se moglo zaključiti da je cirkularna ekonomija uistinu zaživjela (Šandrk Nukić i Miličević, 2019).

Evidentno, cirkularna se ekonomija razvija etapno. Postrojenja za proizvodnju energije iz biomase više se ne smatraju toliko suvremenima da bi imala status ekoinovacije, već su ušla u fazu komercijalizacije. Fazi industrijske eksploatacije i komercijalizacije prethodi faza razvoja, u kojoj dominiraju znanstveno-istraživački projekti. Na području biomase, u Hrvatskoj su u toj fazi trenutačno dva aktualna projekta. Građevinski fakultet Zagreb nositelj je projekta TAREC[2], čiji je cilj omogućiti prijelaz uporabe pepela od biomase s primjena male dodane vrijednosti,

gdje se pepeo od drvne biomase trenutačno koristi (zamjena za prirodno tlo i šljunak za geotehničke ispune) na primjenu visoke dodane vrijednosti i to prvi put uzimajući u obzir i mehanička i trajnosna svojstva razvijenih građevnih kompozita (TAREC, 2019). Uz projekt TAREC[2], važna su i istraživanja u sklopu projekta Eco build, *Poljoprivredni otpad - izazovi i poslovne mogućnosti*. Nositelj je toga projekta Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, a projekt i njegovi rezultati detaljno su opisani u 6. poglavlju ove knjige (Eco build, 2019).

7.5. Završne napomene

U suvremeno vrijeme postaje imperativom promišljati, planirati i djelovati u skladu s načelima kružnoga gospodarstva. Ne samo da se tako podržava održivi razvoj i vodi briga o budućim naraštajima, nego je to ujedno i najbolji način postizanja maksimalne produktivnosti u uvjetima rastućih potreba i sve veće ograničenosti prirodnih resursa. Zadatak je nacionalnih zakonodavstava slijediti europske i globalne smjernice te omogućiti prelazak gospodarstva s linearne na kružnu ekonomiju. Jedino tako će i Hrvatska ostvariti svoje potencijale koji su, s naglaskom na biomasu, identificirani u ovom poglavlju.

S obzirom na iznese podatke, može se zaključiti da model kružnoga gospodarstva, čak i analiziran isključivo s aspekta biomase, donosi prednosti koje podrazumijevaju ravnotežu ekonomskih, okolišnih i društvenih aspekata. Te je prednosti moguće rezimirati kako slijedi:

- povećanje investicija, što rezultira povećanjem ekonomskih i tehničkih aktivnosti u lokalnom i međunarodnom okruženju;
- povećanje produktivnosti resursa i stvaranje dodatne vrijednosti;
- otvaranje novih radnih mjesta;
- energetska sigurnost - smanjenje nacionalne ovisnosti o uvoznim količinama energenata čije cijene kontinuirano rastu;
- porast inovacija kroz razvoj i implementaciju novih proizvoda koji koriste biomasu i njezine prerađevine;
- stvaranje izvozno atraktivnih proizvoda;
- smanjenje ovisnosti o uvozu sirovina;
- razvoj ruralnih područja - poljoprivredna i šumska zemljišta nalaze se u ruralnim područjima kojima je uglavnom potrebna revitalizacija uslijed nedostatnoga broja radnih mjesta i odseljavanja radno aktivnoga stanovništva;
- rekultivacija zemljišta;
- pozitivni klimatski utjecaji;
- smanjenje količine otpada koji je potrebno odlagati.

Kako bi unaprijedila svoj trenutačni status inovatora i iskoristila biomasu, kao i druge potencijale koje ima za ostvarenje održivoga razvoja, Hrvatska mora prevladati ograničenja koja proizlaze iz nedovoljno razvijenih politika za promicanje kružne ekonomije te nedovoljne informiranosti javnosti o međunarodnim izvorima financiranja ekoinovacija, kao i informiranosti o prednostima kružne ekonomije.

Reference:

AKSOĞAN, O., BINICI, H. & ORTLEK, E. 2016. *Durability of concrete made by partial replacement of fine aggregate by colemanite and barite and cement by ashes of corn stalk, wheat straw and sunflower stalk ashes*. Construction and Building Materials, 106**,** 253.-263.

AMANATIDIS, G. 2019. *Učinkovita uporaba resursa i kružno gospodarstvo*. dostupno: https://www.europarl.europa.eu/factsheets/hr/sheet/76/ucinkovitaupotreba-resursa-i-kruzno-gospodarstvo. [pristupljeno 09.12. 2019].

ANDABAKA, A. 2018. *Potencijali i ograničenja primjene kružne ekonomije u kontekstu održivoga razvoja Hrvatske*. u*:* DRUŽIĆ, G. & DRUŽIĆ, I. (ur.). Modeli razvoja hrvatskog gospodarstva, Zagreb, Hrvatska. Ekonomski fakultet Zagreb, 427.-458.

ANDREWS, D. 2015. *The circular economy, design thinking and education for sustainability*. Local Economy, 30**,** 305.-315.

ARABANI, M. & TAHAMI, S. A. 2017. *Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture*. Construction and Building Materials, 149**,** 350.-358.

BARIŠIĆ, I., NETINGER GRUBEŠA, I., DOKŠANOVIĆ, T. & MARKOVIĆ, B. 2019. *Feasibility of Agricultural Biomass Fly Ash Usage for Soil Stabilisation of Road Works*. Materials, 12**,** 1375.

BOULDING, K. E. 1966. *The economics of the coming spaceship earth: Environmental quality in a growing economy*. u*:* JARRETT, H. (ur.). Essays from the sixth resources for the future forum on environmental quality in a growing economy, Baltimore. SAD. Johns Hopkins University Press, 3.-14.

CAREVIĆ, I., BANJAD PEČUR, I., ŠTIRMER, N., MILOVANOVIĆ, B. & BARIČEVIĆ, A. 2016. *Potencijal biopepela i stanje u Republici Hrvatskoj*. Zbornik skupa Sabor hrvatskih graditelja, Cavtat, Hrvatska. HSGI, 133.-140.

DRŽAVNI ZAVOD ZA STATISTIKU REPUBLIKE HRVATSKE 2018a. *Hrvatska u brojkama - Croatia in figures*. Zagreb, Croatia: Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske.

DRŽAVNI ZAVOD ZA STATISTIKU REPUBLIKE HRVATSKE 2018b. *Istraživanje i razvoj u 2017.* Zagreb, Croatia: Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske.

DRŽAVNI ZAVOD ZA STATISTIKU REPUBLIKE HRVATSKE 2018c. *Poljoprivredna proizvodnja u 2017*. Zagreb, Croatia: Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske.

DRŽAVNI ZAVOD ZA STATISTIKU REPUBLIKE HRVATSKE 2019. *Šumarstvo u 2018*. Zagreb, Croatia: Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske.

ECO-INNOVATION OBSERVATORY 2012. *Methodological report*. Brisel, Belgija: Eco-Innovation Observatory.

ECO-INNOVATION OBSERVATORY 2013. *Europe in transition: Paving the way to a green economy through eco-innovation*. u*:* O'BRIEN, M. & MIEDZINSKI, M. (ur.) *Annual Report*. Brisel, Belgija: Eco-Innovation Observatory.

ECO-INNOVATION OBSERVATORY 2018. *Eco-innovation in Croatia. EIO Country Profile*. Brisel, Belgija: Eco-Innovation Observatory.

ECO INNOVATION OBSERVATORY. 2018. *About Us* [Online]. Eco Innovation Observatory. dostupno: https://www.eco-innovation.eu/index.php/about-us [pristupljeno 16. 8. 2019].

ECOBUILD. 2019. *O projektu* [Online]. Osijek, Croatia: Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Sveučilište J. J. S. u Osijeku. dostupno: http://www.gfos.unios.hr/ecobuild [pristupljeno 25. 9. 2019].

ENERGETSKI INSTITUT HRVOJE POŽAR 2005. *Biomasa kao obnovljivi izvor energije*. Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodnog gospodarstva, Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva.

EUROPEAN BIOMASS ASSOCIATION 2017. AEBIOM *Statistical Report–European Bioenergy Outlook*. Brisel, Belgija: European Biomass Association.

EUROPEAN COMMISSION. 2015a. *Circular economy and the role of eco-innovation* [Online]. European Commission. dostupno: https://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-eco-innovation/policies-matters/eu/circular-economy-ecoinnovation_en [pristupljeno 01.09. 2019].

EUROPEAN COMMISSION. 2015b. *Closing the Loop - an ambitious EU Circular Economy Package* [Online]. European Commission. dostupno: https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/circular-economy-factsheet-general_en.pdf [pristupljeno 10. 9. 2019].

EUROPEAN COMMISSION 2016. *Flash Eurobarometer 441: European SMEs and the Circular Economy*. Brisel, Belgija: European Commission.

EUROPEAN COMMISSION 2017. *Public Procurement for Circular Economy: Good Practice and Guidance*. Publications Offce of the European Union, Luxembourg.

EUROPEAN COMMISSION. 2019. *European eco-innovation scoreboard interactive tool* [Online]. European Commission. dostupno: https://ec.europa.eu/environment/ecoap/indicators/index_en [pristupljeno 16. 11. 2019].

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). 2018. *DMC, GDP, resource productivity* [Online]. Copenhagen, Denmark: EEA. dostupno: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/dmc-gdp-resource-productivity-population-4#tab-chart_1_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_category%22%3A%5B%22DMC%22%3B%22GDP%22%3B%22Resource%20productivity%22%5D%3B%22pre_config_ugeo%22%3A%5B%22European%20Union%22%5D%7D%7D [pristupljeno 10. 10. 2019].

EUROSTAT. 2018. *Database* [Online]. Eurostat. dostupno: https://ec.europa.eu/eurostat/data/database [pristupljeno 15. 9. 2019].

GHISELLINI, P., CIALANI, C. & ULGIATI, S. 2016. *A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems*. Journal of Cleaner Production, 114**,** 11.-32.

HARC, M. & BRIŠ ALIĆ, M. 2018. *The role of eco-innovation and transition towards a green economy in Croatia*. u*:* MAŠEK, A. & CRNKOVIĆ, B. (ur.). 7th International Scientific Symposium Economy of Eastern Croatia - vision and growth, Osijek, Hrvatska. Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Ekonomski fakultet u Osijeku.

HRVATSKA GOSPODARSKA KOMORA 2016. *Građevinski sektor EU i Hrvatske - od recesije do oporavka Zagreb*, Hrvatska: Hrvatska gospodarska komora.

HRVATSKI OPERATOR TRŽIŠTA ENERGIJE (HROTE). 2019. *Sklopljeni ugovori* [Online]. Zagreb, Croatia: HROTE. dostupno: https://www.hrote.hr/ugovaranje [pristupljeno 20. 9. 2019].

HRVATSKI SABOR 2017. *Zakon o održivom gospodarenju otpadom*. Narodne novine br. 94/2013, 73/2017.

HRVATSKI SABOR 2018. *Zakon o šumama*. Narodne novine br. 68/2018.

MELOTTI, R., SANTAGATA, E., BASSANI, M., SALVO, M. & RIZZO, S. 2013. *A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures*. Waste Management, 33**,** 1906.-1917.

MINISTARSTVO ZAŠTITE OKOLIŠA I ENERGETIKE 2018. *Zakon o energiji*. Narodne novine br. 120/2012, 14/2014, 95/2015, 102/2015, 68/2018.

MINISTARSTVO ZAŠTITE OKOLIŠA I PRIRODE 2015. *Pravilnik o katalogu otpada*. Narodne novine br. 90/2015.

NESS, D. 2008. *Sustainable urban infrastructure in China: Towards a Factor 10 improvement in resource productivity through integrated infrastructure systems*. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 15**,** 288.-301.

OECD 2002. *Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth*. OECD.

OECD & EUROSTAT 2019. *Oslo Manual 2018*.

PEARCE, D. W. & TURNER, R. K. 1989. *Economics of natural resources and the environment,* Maryland, USA, Johns Hopkins University Press.

RAZVOJNI PROGRAM UJEDINJENIH NACIJA (UNDP) 2017. *Drvna Biomasa - gorivo budućnosti*. Sarajevo, BiH: UNDP.

SHRIVAS, A., JAIN, D. & JOSHI, R. 2015. *Application of different waste in concrete as a partial replacement of cement*. - International Journal of Science Technology & Engineering, 2**,** 89.-107.

ŠANDRK NUKIĆ, I. & MAROŠEVIĆ, K. 2019. *Eco Innovations as part of the Circular Economy: Evidence from Croatia*. u*:* BARKOVIĆ, D., CRNKOVIĆ, B., ZEKIĆ SUŠAC, M., DERNOSCHEG, K.-H., PAP, N., RUNZHEIMER, B. & WENTZEL, D. (ur.). Interdisciplinary Management Research XV, Opatija, Hrvatska. Ekonomski fakultet Osijek, Hochschule Pforzheim University, HAZU, 86.-104.

ŠANDRK NUKIĆ, I. & MILIČEVIĆ, I. 2019. *Fostering Eco-Innovation: Waste Tyre Rubber and Circular Economy in Croatia*. Interdisciplinary Description of Complex Systems*: INDECS,* 17**,** 326.-344.

ŠTIRMER, N., CAREVIĆ, I., MILOVANOVIĆ, B. & BARIČEVIĆ, A. 2018. *Market Potential of Wood Biomass Ash Utilisation in Cement Composites - Croatian Case Study*. u*:* AZENHA, M., SCHLICKE, D., BENBOUDJEMA, F. & JEDRZEJEWSKA, A. (ur.). SynerCrete'18 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete, Funchal, Madeir, Portugal. RILEM Publications S.A.R.L., 529.-534.

TAHAMI, S. A., ARABANI, M. & FOROUTAN MIRHOSSEINI, A. 2018. *Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt*. Construction and Building Materials, 170**,** 547.-556.

TAREC. 2019. *O projektu* [Online]. Zagreb, Hrvatska: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. dostupno: https://www.grad.unizg.hr/tarec/o_projektu [pristupljeno 25. 9. 2019].

THE WORLD BANK. 2019. *World Development Indicators* [Online]. The World Bank. dostupno: https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators [pristupljeno 20. 9. 2019].

UNITED NATIONS. 2019. *World Population Prospects* [Online]. United Nations. dostupno: https://population.un.org/wpp/Download/Probabilistic/Population/ [pristupljeno 25. 9. 2019].

VAN LEEUWEN, K., DE VRIES, E., KOOP, S. & ROEST, K. 2018. *The Energy & Raw Materials Factory: Role and Potential Contribution to the Circular Economy of the Netherlands*. Environmental management, 61**,** 786.-795.

VASSILEV, S. V., BAXTER, D., ANDERSEN, L. K. & VASSILEVA, C. G. 2013. *An overview of the composition and application of biomass ash.: Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges*. Fuel, 105**,** 19.-39.

Bilješka o autorima

Ivanka Netinger Grubeša redovita je profesorica Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek. U istraživačkom se smislu bavi trajnošću građevinskih materijala i primjenom svih vrsta otpadnih materijala u cementnim kompozitima. Tijekom svoje je karijere objavila pet knjiga i tri znanstvena poglavlja te više od 90 znanstvenih radova.

Ivana Barišić izvanredna je profesorica Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek. Znanstveno je područje njezinoga istraživanja primjena otpadnih materijala u kolničkim konstrukcijama, pri čemu je posebice aktivna na području istraživanja cementom stabiliziranih nosivih slojeva kolničkih konstrukcija. Do sada je objavila više od 50 znanstvenih i stručnih radova, koautoricom je jedne knjige i triju znanstvenih poglavlja.

Tihomir Dokšanović docent je Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek. Njegovi su znanstveni interesi vezani uz aluminijske i čelične konstrukcije te eksperimentalno ispitivanje konstrukcija, elemenata i materijala. Objavio je 30 radova, od kojih 14 u časopisima indeksiranima u WoSCC, CC i Scopus bazama podataka.

Ivana Šandrk Nukić izvanredna je profesorica Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek. Područje su njezinoga znanstveno-istraživačkog interesa organizacija i menadžment, prije svega u građevinarstvu i s njim povezanim industrijama. Pri tom se primarno usredotočuje na organizacijsko ponašanje, strateški menadžment, projektni menadžment i konkurentnost poslovanja. Do sada je objavila 50 znanstvenih radova u relevantnim publikacijama.

Davor Kralik redoviti je profesor u trajnom zvanju Fakulteta agrobiotehničkih znanosti Osijek. Voditelj je Centralnog laboratorija za poljoprivrednu tehniku i obnovljive izvore energije, gdje se bavi istraživanjima iz područja obnovljivih izvora energije. Tijekom svoje je karijere kao koautor objavio tri sveučilišna udžbenika, dva sveučilišna priručnika te više od 120 znanstvenih radova.

Hrvoje Glavaš izvanredni je profesor na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Područje njegovoga interesa obuhvaća: energetske bilance, energetske preglede, energetsku učinkovitost, javnu rasvjetu, infracrvenu termografiju, vođenje elektroenergetskoga sustava te mjerenja električnih i magnetskih polja. Autor je dvaju sveučilišnih udžbenika i 160 znanstvenih radova.

Milan Ivanović, umirovljeni znanstvenik Elektrotehničkog fakulteta u Osijeku, prije karijere u sustavu visokoga školstva radio je u industriji te javnoj upravi kao savjetnik za industriju i energetiku. Objavio je više od 500 stručnih i znanstvenih radova iz ekonomike industrije i energetike te 50-ak radova iz filozofije znanosti. Autorom je 24 knjige i 56 poglavlja u knjigama drugih autora. Aktivan je član i utemeljitelj Panon instituta za strateške studije Osijek.