

Primljen / Received: 12.4.2017.

Ispravljen / Corrected: 13.3.2018.

Prihvaćen / Accepted: 14.4.2018.

Dostupno online / Available online: 10.6.2018.

Mogućnosti primjene biopepela u cestogradnji

Autori:



Martina Zagvozda, mag.ing.aedif.
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet Osijek
mzagvozda@gfos.hr



Prof.dr.sc. **Sanja Dimter**, dipl.ing.građ.
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet Osijek
sdimter@gfos.hr



Prof.dr.sc. **Tatjana Rukavina**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
rukavina@grad.hr



Izv.prof.dr.sc. **Ivanka Netinger Grubeša**, dipl.ing.građ.
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet Osijek
nivanka@gfos.hr

Pregledni rad

Martina Zagvozda, Sanja Dimter, Tatjana Rukavina, Ivanka Netinger Grubeša

Mogućnosti primjene biopepela u cestogradnji

Biopepeli su neizbježan proizvod ispunjavanja zahtjeva za sve većom primjenom obnovljivih izvora u proizvodnji energije. Ekološki i ekonomski problemi zbrinjavanja biopepela, zbog prikladnih kemijskih i fizikalnih svojstava, mogu se smanjiti njegovom primjenom kao sirovine u građevinarstvu. U radu se daje pregled istraživanja mogućnosti primjene biopepela pri gradnji cesta, uzimajući u obzir velik raspon svojstava koja ga karakteriziraju ovisno o porijeklu biomase i uvjetima izgaranja. U radu je također dan pregled istraživanja biopepela nastalog kao proizvod izgaranja biomase u termoelektranama na području Republike Hrvatske.

Ključne riječi:

biopepeo, alternativni materijali, cestogradnja, obnovljivi izvori, ekološki utjecaj

Subject review

Martina Zagvozda, Sanja Dimter, Tatjana Rukavina, Ivanka Netinger Grubeša

Possibilities of bioash application in road building

Bioashes are inevitable product of meeting the demands to satisfy the increased use of renewable resources in energy production. Ecological and economic problems of bioash disposal, due to its appropriate chemical and physical properties, can be reduced by its application in the construction industry as raw materials. The paper therefore provides an research overview on various aspects of the bioash application in road construction, in compliance with a range of properties depending on the type of biomass and the conditions of combustion. Also shown is current state of research of bioash generated in the domestic thermal power plants.

Key words:

bioash, alternative materials, road building, renewable resources, ecological impact

Übersichtsarbeit

Martina Zagvozda, Sanja Dimter, Tatjana Rukavina, Ivanka Netinger Grubeša

Möglichkeit der Verwendung von Bioasche beim Straßenbau

Bioasche ist aufgrund der Erfüllung der Forderungen nach immer größerer Verwendung von erneuerbaren Quellen bei der Energieerzeugung ein unvermeidliches Produkt. Die ökologischen und wirtschaftlichen Probleme bei der Entsorgung von Bioasche können wegen der angemessenen chemischen und physikalischen Eigenschaften durch dessen Verwendung als Rohstoff im Bauwesen verringert werden. Die Abhandlung gibt eine Übersicht über die Untersuchungen der Möglichkeiten der Verwendung von Bioasche beim Straßenbau, unter Berücksichtigung der großen Bandbreite an Eigenschaften, die sie abhängig von der Herkunft der Bioasche und den Verbrennungsbedingungen charakterisieren. Die Abhandlung gibt auch eine Übersicht über die Untersuchungen der Bioasche, die als Produkt der Verbrennung von Biomasse in Wärmekraftwerken auf dem Gebiet der Republik Kroatien entstanden ist.

Schlüsselwörter:

Bioasche, alternative Materialien, Straßenbau, erneuerbare Quellen, ökologischer Einfluss

1. Uvod

Sve veće potrebe za energijom s jedne strane te nužno smanjenje emisije stakleničkih plinova štetnih za okoliš s druge, rezultirale su posljednjih godina povećanjem proizvodnje energije iz obnovljivih izvora. Proizvodnja energije iz obnovljivih izvora sve više dobiva na važnosti zbog Direktive 2009/28/EC [1] koja obvezuje članice Europske unije na proizvodnju energije iz obnovljivih izvora. Prema toj se direktivi očekuje da do 2020. godine energija dobivena iz obnovljivih izvora (Sunčeve energije, energije vjetra, vodenih tokova, vodika i energija iz biomase) predstavlja 20 % ukupne potrošene energije.

Republika Hrvatska se suočava s porastom potrošnje i cijene energije uz istovremeno smanjivanje raspoloživih konvencionalnih izvora energije. U usporedbi s većinom zapadnoeuropskih zemalja, Hrvatska se energijom koristi manje učinkovito: trenutačno trošimo 16,5 % više primarne energije po jedinici BDP-a od prosjeka potrošnje u Europskoj uniji (prema Strategiji energetskega razvoja Republike Hrvatske, NN 130/2009). Analizom postojećeg stanja utvrđeno je da se u segmentima pretvorbe i konačnog korištenja energije, između ostalog i u građevinarstvu, još uvijek nedovoljno primjenjuju tehničko-tehnološki noviteti na tom području.

Biomasa se, kao obnovljivi izvor energije, smatra jednim od najrazličitijih i najvrjednijih izvora na svijetu [2]. Prema Direktivi 2009/28/EC, biomasa je biološko razgradiv dio proizvoda, otpada i ostataka biološkoga podrijetla iz poljoprivrede (uključujući tvari biljnoga i životinjskoga podrijetla), šumarstva i s njima povezanih proizvodnih djelatnosti uključujući ribarstvo i akvakulturu te biološko razgradiv dio industrijskoga i komunalnoga otpada.

Jedan od koraka prema dostizanju ciljeva Direktive 2009/28/EC jest upravo oslobađanje energije pohranjene u biomasi njenim izgaranjem ili drugim tehnološkim postupcima. Kao rezultat ovog procesa očekuje se postupno povećanje broja termoelektrana koje za generiranje toplinske i električne energije upotrebljavaju biomasu. Za proizvodnju energije, biomasa se, osim u velikim generatorima energije poput termoelektrana, može upotrebljavati u manjem opsegu za toplinsku energiju pojedinačnih građevina [3].

Spaljivanjem biomase nastaju velike količine pepela (tzv. biopepela) s kojim treba prikladno postupati. Pretpostavka je da će ispunjavanje obaveza propisanih Direktivom 2009/28/EC do 2020. godine rezultirati godišnjom proizvodnjom 15,5 milijuna tona biopepela u EU-28 [4, 5]. Nastali pepeo potrebno je reciklirati jer neprikladno postupanje s njim može prouzročiti onečišćenje okoliša i zdravstvene probleme ljudi [6], a odlaganje na odlagališta otpada smanjuje kapacitet odlagališta i dovodi do povećanja troškova odlaganja [5, 7, 8]. Biopepeo se Europskim katalogom otpada klasificira kao bezopasan otpad [9], a trenutačno se u najvećem dijelu i tretira kao otpad, te se bez primjerene kontrole odlaže na odlagališta otpada, na poljoprivredne površine ili u šume [1, 11].

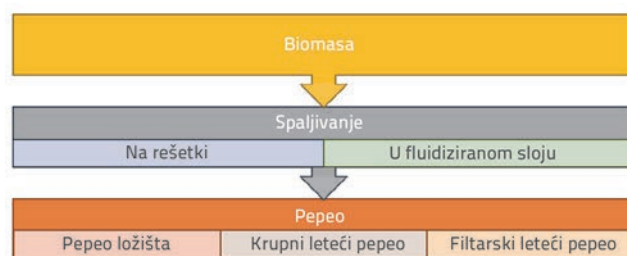
2. Nastajanje i svojstva biopepela

Biomasa se može podijeliti na drvenu i biomasu travastih (eng. *herbacous*) biljaka. Nastaje djelovanjem čovjeka i prirode, a uključuje drvo, nusproizvode drvene industrije, otpad iz šumarstva, poljoprivredni i otpad iz prehrambene industrije (slama, maslinova komina, rižine ljuske, suncokretove ljuske). Pepeo tijekom spaljivanja nastaje od anorganske materije sadržane u gorivu putem složenih kemijskih i fizikalnih procesa [12]. Sastoji se od vezanih anorganskih materijala koji su dio organske strukture biomase i mineralnih čestica koje su unesene tijekom prikupljanja, prijevoza ili obrade biomase [10]. Udio pepela koji nastaje izgaranjem različitih vrsta biomase prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Udio pepela pri izgaranju biomase na 550 °C [10]

Vrsta biomase	Udio pepela [%]
Kora drveta	5,0-8,0
Drvena sječka sa korom	1,0-2,5
Drvena sječka bez kore	0,8-1,4
Piljevina	0,5-1,1
Otpadno drvo	3,0-12,0
Slama i žitarice	4,0-12,0
Miskantus (kineska trava)	2,0-8,0
Otpad od maslina	2,0-4,0

Za spaljivanje biomase postoje dva tipa peći: peći sa spaljivanjem na rešetki i peći sa spaljivanjem u fluidiziranom sloju. Peći sa spaljivanjem na rešetki pogodne su za spaljivanje biomase velike vlažnosti, promjenjive veličine čestica i velikog udjela pepela. Peći sa spaljivanjem u fluidiziranom sloju većeg su kapaciteta kotla i omogućavaju spaljivanje različitih kombinacija biomase, no uz prethodnu obradu kako bi čestice bile dovoljno male i kako bi se otklonile nečistoće. Izgaranje u fluidiziranom sloju obično generira veće količine pepela, jer je pepeo pomiješan s materijalom ložišta, najčešće silikatnim pijeskom ili dolomitom [10].



Slika 1. Načini spaljivanja biomase i frakcije nastalog biopepela

U procesu spaljivanja biomase nastaju tri različite frakcije pepela (slika 1.): pepeo ložišta, krupni (ciklonski) leteći pepeo i leteći pepeo s filtra [10]. Pepeo ložišta (eng. *bottom ash*)

Tablica 2. Raspodjela frakcija pepela kod različitih biomasa spaljivanih na rešetki [10]

Frakcija pepela [%]	Biomasa	Kora drveta	Drvena sječka	Piljevina	Slama i žitarice
Pepeo ložišta		65-85	60-90	20-30	80-90
Krupni (ciklonski)leteći pepeo		10-25	10-30	50-70	2-5
Filtarski leteći pepeo		2-10	2-10	10-20	5-15

Tablica 3. Kemijski udio različitih biopepela

Vrsta pepela	Bukovo drvo [21]	Piljevina [22]	Rižine ljuske [21, 22]	Kukuruzni klip [21, 22]	Slama šećerne trske [22]	Pšenična slama [21, 22]	Ljuske suncokreta [21, 23]
SiO ₂	12,33	67,20	93,2-94,38	27,65-66,38	59,06	4,99-54,24	23,46-26
Al ₂ O ₃	0,12	4,09	0,21-0,4	2,49-7,48	4,75	1,15-4,55	2,23-8,67
Fe ₂ O ₃	1,09	2,26	0,1-0,22	1,55-4,44	3,18	0,95-1,05	1,19-4,23
CaO	67,80	9,98	0,97-1,1	11,57-13,19	19,59	12,54-25,44	15,18-17
MgO	11,43	5,80	0,1-0,19	2,05-2,06	2,25	2,39-4,63	6,65-7,27
Na ₂ O	0,89	0,08	0,1-0,16	0,41-1,26	0,73	1,28	0,22-0,79
K ₂ O	2,59	0,11	1,3-2,29	4,92-35,46	4,75	24,72	17,1-28,29

najkrupnije su frakcije pepela, prikupljene pod rešetkom kotla, često pomiješane s nečistoćama poput pijeska, zemlje ili pak materijala ležišta kod spaljivanja u fluidiziranom sloju. Ciklonski leteći pepeo (eng. *cyclone fly ash*) krupnija je, većinom anorganska, frakcija letećih pepela prenesena dimnim plinovima u sekundarnu zonu spaljivanja. Filtarski pepeo (eng. *filter fly ash*) najfinija je frakcija prikupljena na elektrostatskim i vlaknastim filtrima ili kao kondenzacijski mulj.

Raspon veličina čestica kao i granulometrijski sastav pojedinih frakcija pepela biomase rezultat su svojstava tehnologija za razdvajanje i prikupljanje pepela kao i porijekla biomase koja se spaljuje [13]. Čestice veće od 5 µm mogu se prikupiti ciklonskim otprašivačima te one čine krupniju frakciju letećeg pepela čak do veličine 100 µm. Sve sitnije čestice, veličine aerosola, reda veličine od 1 do 5 µm, čine filtarski pepeo [12, 14]. Najkrupniju frakciju, pepela ložišta, čine čestice veće od 100 µm, a u pojedinim istraživanjima navodi se da se mogu naći i čestice veličine do 10 mm [15-17]. Kod fluidiziranog sloja, pepeo ložišta čini tek 20-30 %, a ostalo je leteći pepeo [10]. Nasuprot tome, raspodjela frakcija pepela pri spaljivanju na rešetki vidljiva je iz tablice 2.

Fizikalna i kemijska svojstva biopepela ovise o porijeklu biomase i dijelu biljke iz koje nastaje (tablica 3.), količini mineralnih nečistoća, lokaciji izvora biomase, načinu prikupljanja i obrade biomase, tehnologiji i temperaturi spaljivanja [10, 18, 19]. Kemijski sastav dobivenog pepela ovisi o anorganskom sastavu biomase, a mineraloški sastav ovisi o načinu spaljivanja [3, 16]. Stoga, postoji mogućnost da, iako se spaljuje isti tip biomase, svojstva dobivenog pepela pokazu veliku različitost [20].

Biopepeli nastali spaljivanjem na rešetki imaju veći udio slobodnog (Ca) ili vezanog kalcija (CaO) u odnosu na biopepele

nastale spaljivanjem u fluidiziranom sloju, što se pripisuje višim temperaturama izgaranja na rešetki [24]. Velik udio SiO₂ obično se može naći u pepelima od spaljivanja u fluidiziranom sloju, gdje se pepeli ložišta većinom sastoje od inertnog materijala ložišta (pijesak), dok su leteći pepeli pomiješani tim materijalom [24]. Na razlike u sastavu pepela, osim porijekla biomase, utječe i temperatura spaljivanja. Primjerice, spaljivanje poljoprivredne biomase potrebno je provesti na nižim temperaturama u odnosu na drvenu masu jer previsoke temperature uzrokuju taljenje i sinteriranje pepela što stvara probleme s upotrebom peći [25]. Udio CaO u biopepelu iz poljoprivredne biomase znatno je manji od onog u drvnom pepelu, ali je udio SiO₂, alkalijski i Cl povećan. Istovremeno udio teških metala u pepelima poljoprivredne biomase je smanjen u odnosu na drvene pepela [26]. Među vrstama biomase čiji pepeo sadrži velike količine SiO₂ ističe se biomasa rižinih ljuski (> 90 %). Količina SiO₂ bitno je manja u drugim poljoprivrednim i travastim biomasama, te vrlo mala kod drvene biomase (tablica 3.).

Biopepeli uobičajeno sadrže i određene količine štetnih spojeva poput teških metala, gdje su u pojedinim ispitivanjima koncentracije Ag, Au, B, Be, Cd, Cr, Cu, Mu, Ni, Rb, Se i Zn bile veće od prosječnih vrijednosti sadržanih u pepelima od ugljena [21]. Velik udio štetnih spojeva, posebice teških metala, u nekim pepelima ograničava njihovu primjenu, posebno u poljoprivredi, gdje se koristi kao dodatak tlu za prihranu biljaka [27]. Neovisno o vrsti biomase, udio teških metala veći je kod letećih pepela nego pepela ložišta [2] koji, zbog svoje hlapljivosti, odlaze u dimne plinove i vežu se na čestice pepela koji se prikuplja na filtrima. Udio teških metala u letećim pepelima od spaljivanja u fluidiziranom sloju, zbog tehnologije izgaranja koja uzrokuje

miješanje materijala ložišta (pjesak) s pepelom, manji je nego kod pepela od spaljivanja na rešetki [24]. Nadalje, ograničavajući faktor u primjeni pepela ložišta može biti udio organskih primjesa štetnih za okoliš. Udio organskog materijala veći je kod biomase s većim postotkom vode, a bitno ovisi o tehnologiji i efikasnosti spaljivanja [28].

Iz navedenoga je očito da fizikalna i kemijska svojstva biopepela variraju u širokom rasponu te da se ne može generalizirati mogućnost njegove primjene. Stoga kada se donosi odluka o primjeni biopepela, trebaju se uzeti u obzir postojeći rezultati, a onda provesti dodatna istraživanja. Pregled dosadašnjih istraživanja pokazuje da biopepeo pripada skupini otpadnih materijala koji se mogu upotrijebiti u građevinarstvu u svom izvornom obliku ili pak uz dodatnu obradu. Dva su osnovna načina primjene biopepela ovisno o njegovim svojstvima:

- kao vezivna komponenta, kada se dodatkom pepela iniciraju određene kemijske reakcije kao posljedice pucolanske aktivnosti ili hidrauličnog vezivanja pepela (posredan način primjene pepela),
- kao punilo, kada je potrebno poboljšati fizikalna svojstva mješavina povećanjem udjela finih čestica ili zamijeniti sitne frakcije agregata (neposredan način primjene pepela).

3. Inozemna istraživanja mogućnosti primjene biopepela u cestogradnji

U skladu s navedenim, u svijetu su provedena istraživanja primjene biopepela u građevinarstvu, pri čemu su istraživani biopepeli koji se bitno razlikuju po porijeklu i svojstvima, ali i načinu primjene i njihovoj svrsi. Prema porijeklu, najčešće su istraživani pepeli drvene biomase i rižinih ljustaka. U nastavku rada izdvojeni su i opisani rezultati dostupnih istraživanja primjene biopepela u cestogradnji.

3.1. Stabilizacija tla i nosivih slojeva kolničke konstrukcije

Tradicionalno za stabilizaciju slabo nosivih tala primjenjuje se vapno kod koherentnih materijala te cement kod nekoherentnih i onih koji predstavljaju prijelaz od nekoherentnih prema koherentnim materijalima, pa je razumljivo da su istraživanja mogućnosti uporabe tih materijala brojna. Primjena alternativnih materijala, poput biopepela, novijeg je datuma te je i broj istraživanja pa prema tome i objavljenih rezultata značajno manji. Stabilizirajuća svojstva biopepela ovisе o kemijskom sastavu i reaktivnosti pojedinih spojeva, te naravno tipu osnovnog materijala koji se stabilizira. S energetskog i ekološkoga gledišta, a uzimajući u obzir stabilizirajuća svojstva biopepela, primjena odgovarajuće vrste biopepela omogućila bi smanjenje troškova izvedbe stabilizacije tla gdje na vezivo otpada čak 50-70 % troškova [29].

Prema autorima Sarkkinenu i dr. [29] te Bohru i dr. [30], kada se primjenjuju kao vezivo u stabilizaciji različitih materijala, biopepeli moraju sadržavati barem 20 % CaO kako bi pokazali

dobra vezivna svojstva. Ako je udio CaO manji, treba upotrijebiti aktivatore (cement ili vapno). Osim udjela CaO, utjecaj na vezivna svojstva imaju i veličine čestica pepela, te se veća reaktivnost i razvoj čvrstoća povezuje s velikom specifičnom površinom sitnijih čestica. Zadovoljavajuća pak pucolanska svojstva prema normi EN 450-1 imaju oni pepeli koji sadrže kumulativno 70 % SiO_2 , Al_2O_3 i FeO_3 [31], kao na primjer pepeli rižinih ljustaka koji imaju i više od 90 % SiO_2 . Osim udjela navedenih oksida, dobra pucolanska svojstva biopepela ovisе o tome jesu li oni amorfne ili kristalne strukture [29], a što je povezano s tehnologijom spaljivanja i veličinom čestica.

3.1.1. Stabilizacijske mješavine koherentnih tala

Koherentna se tla stabiliziraju dodatkom vapna (kalcijev hidroksid). Vapno reagira s mineralima gline disocirajući u Ca^{+} i OH^{-} ione, pri čemu u tlu dolazi do zamjene pojedinih vrsta iona kojima su obložene koloidne čestice glina (kationske izmjene), pa se kalcij uključuje u sastav glina mijenjajući pritom svojstva glinovitog tla. Ova je korekcija brza te je vidljivo gotovo trenutačno poboljšanje obradivosti, mogućnosti zbijanja i početne čvrstoće. Nakon ove reakcije započinje dugotrajna reakcija vapna s aktivnim silikatima i mineralima gline, takozvana pucolanska reakcija. Silikati se razgrađuju, nastaje nova kristalna faza, pri čemu nastaju kalcijevi i silikatni hidrati koji sljepljuju zrna tla povećavajući na taj način njegovu čvrstoću. Reakcija komponenta biopepela kao stabilizacijskog sredstva s mineralima glina događa se na isti način, te su prema tome prikladni pepeli s visokim udjelom CaO i posljedično velikom pH vrijednošću, poput pepela drvene biomase ili iz proizvodnje maslinova ulja [32-34]. Ti pepeli, po dodatku u tlu stvaraju alkalni okoliš koji omogućava razvoj pucolanskih reakcija. Uslijed dodatka ovih pepela u tlu također dolazi do kationske izmjene i promjene strukture tla zbog okrupnjavanja čestica, što rezultira manjim suhim prostornim masama i većom optimalnom vlažnošću mješavine. Ovaj učinak rezultat je i manje gustoće biopepela i poroznijih čestica veće specifične površine koje iziskuju veće količine vode, pa je učinak vidljiv i kod pepela s većim količinama SiO_2 , poput pepela rižinih ljustaka [35, 36] i piljevine [37]. Utjecaj dodatka biopepela koherentnim tlima najčešće smanjuje indeks plastičnosti [33-36]. Gotovo su svi autori u svojim istraživanjima utvrdili da biopepeli mogu smanjiti bubrenje koherentnih tala [32-35].

S obzirom na varijacije svojstava biopepela i tla, variraju i postignute vrijednosti parametara nosivosti i čvrstoće stabilizacijskih mješavina. Autori Supancic i Obernberger [24] istraživali su kombinaciju drvnih pepela ložišta i krupnih letećih pepela od spaljivanja na rešetki te kombinaciju krupnog i filterkopskog letećeg pepela od spaljivanja u fluidiziranom sloju te zaključili kako se različite kombinacije drvenih biopepela mogu upotrebljavati kao vezivo pri stabilizaciji glinenih i muljevutih tala. Također, usporedili su stabilizaciju glina s drvnim pepelom i vapnom na pokusnim dionicama. Ustanovili su da je, uz pravilno doziranje biopepela, tlačna čvrstoća i nosivost mjerena

dinamičkom pločom, 28 dana nakon stabilizacije podjednaka za oba veziva. Poboljšanje CBR-a za 103,11 % i tlačne čvrstoće za 26,35 % niskoplastične gline s dodatkom pepela od piljevine (4 %) uočili su Butt i dr. [37]. Emeh i Igawe [33] su dodatkom drvnog pepela (18 %) visokoplastičnim glinama postigli čvrstoće od 1,59 MPa. Učinak su poboljšali dodavanjem 4 % vapna mješavini što je u konačnici rezultiralo čvrstoćom od 2,50 MPa.

Dodatak pepela rižinih ljuski pokazuje nešto slabiji učinak na poboljšanje svojstava mješavina te se dodatno može aktivirati cementom. Autori Sarkar i dr. [36] dodatkom pepela rižinih ljuski poboljšali su tlačne čvrstoće glina niske plastičnosti te je postignuta optimalna vrijednost od 0,255 MPa kod mješavina s udjelom pepela od 10 %. Autori Rahman i dr. [36] primjenom pepela rižinih ljusaka (0, 5, 10 i 20 %) za stabilizaciju muljevito pijeska i glinovitih tala uočili su poboljšane tlačne i posmične čvrstoće mješavina. Poboljšanje tlačne čvrstoće od 8 % uočili su također Khan i dr. [38]. Najveće vrijednosti tlačne čvrstoće i CBR-a od 74 % postigli su kombiniranim djelovanjem pepela rižinih ljuski sa cementom.

Brojna laboratorijska istraživanja pokazuju da je kod primjene biopepela kao stabilizacijskog sredstva potrebno precizno odrediti optimalni udio biopepela koji poboljšava svojstva mješavina, jer se dodatnim povećanjem udjela biopepela iznad optimalnoga mogu postići slabiji rezultati.

3.1.2. Stabilizirani nosivi slojevi

U nosivim slojevima potencijalnu primjenu imaju i fini leteći pepeli i krupniji pepeli ložišta zbog dva mehanizma: poboljšanja nosivosti, kroz mehaničku stabilizaciju i poboljšanje granulometrijskog sastava ili zbog djelovanja biopepela kao hidrauličnog veziva. Laboratorijska ispitivanja drvnih pepela kao i pepela nastalog spaljivanjem otpada iz tvornica papira pokazuju zadovoljavajuće vrijednosti te je njihova primjena značajna [39-41]. No terenska su ispitivanja, stabilizacije slojeva postojećih (često šumskih) cesta, pokazala oprečne rezultate [30, 41, 42]. Stabilizacijski učinak 10 % i 20 % drvnog pepela u mješavinama s pijeskom ispitivali su Škels i dr. [39]. Rezultati su pokazali višestruko povećanje indeksa nosivosti CBR u obje stabilizacijske mješavine, bez pojave značajnog bubrenja. Drvni su pepeo ti autori okarakterizirali kao dobro samostalno hidraulično vezivo za stabilizaciju pijeska. No, s obzirom na u radu prikazanu metodologiju istraživanja, učinak je vjerojatno rezultat mehaničke stabilizacije.

Finski autori Sarkkinen i dr. [40] istraživali su mješavinu otpada stijenske mase i biopepela kao materijala za izvedbu stabiliziranih nosivih slojeva. Dodatkom 20 % pepela nastalog izgaranjem drva, treseta i otpada iz tvornice papira stabilizirana je otpadna dolomitna stijena. Tlačna čvrstoća mješavine nakon 28 dana iznosila je 9,1 MPa. Nakon što su uzorci bili izloženi utjecaju 10 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, tlačna čvrstoća mješavine iznosila je 9,5 MPa. Time su potpuno bili zadovoljeni uvjeti koji se u Finskoj postavljaju na mješavinu namijenjenu ugradnji u nosive slojeve cesta [40].

Vestin i dr. [41] istraživali su mogućnost primjene pepela iz tvornice papira, od spaljivanja kore drveta i mulja, za stabilizaciju nosivog sloja od šljunka. Mješavine s 20 % i 30 % pepela u laboratorijskom dijelu istraživanja imale su približne inicijalne čvrstoće 4,7 odnosno 4,4 MPa. Povećanje tlačne čvrstoće u mješavini s 20 % pepela iznosilo je 2 MPa, a kod mješavine s 30 % pepela iznosilo je 5,3 MPa. Izmjerene tlačne čvrstoće nakon 12 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja smanjile su se u mješavinama s 20 % pepela, dok su se kod mješavine s 30 % pepela povećale. Isti autori izvještavaju o stabilizaciji ispitne dionice sa 30 % pepela [41], a koja je rezultirala povećanjem nosivosti tijekom vremena. Vizualnim pregledom ispitnih dionica dvije godine kasnije, nakon razdoblja otapanja snijega, nisu utvrđene nikakve promjene, samo su na kontrolnim sekcijama nastale uzdužne pukotine.

Autori Bohrn i Stampfer [30] postigli su povećanje modula elastičnosti E za 20 MN/m² stabilizacijom nosivog sloja postojeće šumske ceste s pepelom ložišta od drvene biomase u odnosu na vrijednosti dobivene mehaničkom stabilizacijom tla. Stabilizacija pepelom drvene biomase iz fluidiziranog sloja pokazala se neprikladna.

Terenska ispitivanja o mogućnostima poboljšanja nosivosti šljunčane šumske ceste dodatkom drvnog pepela proveli su Kaakkurivaara i dr. [42]. Poboljšanje nosivosti šumske ceste je ostvareno, no rezultati su bili slabiji od očekivanih. Autori kao razloge navode nedovoljno zbijanje pri izvedbi, lošu tehnologiju miješanja materijala te nejednolika vremena skladištenja biopepela za pojedine dionice. Naime, biopepeli reagiraju s vlagom i počinju vezivati, pa ako se planiraju upotrijebiti kao vezivo kasnije, treba ih pravilno skladištiti na suhom.

Biopepeo ložišta moguće je upotrebljavati i kao zamjenu za agregat ako to zadovoljava njegova granulometrija. Za mješavine cementom vezanih nosivih slojeva Cabrera i dr. [16] koristili su pepeo dobiven izgaranjem 40 % ostatka iz proizvodnje maslinova ulja i 60 % drvene biomase, veličine čestica 0-10 mm, s manjim udjelom finih čestica (< 0,063 mm) od prirodnog agregata. Ispitivanje mehaničkih svojstava mješavina pokazalo je povećanje tlačne čvrstoće, indirektno vlačne čvrstoće i modula elastičnosti kod svih mješavina s 15 % pepela u odnosu na mješavine s isključivo prirodnim agregatom ili recikliranim agregatom od miješanog građevnog otpada. Mješavine recikliranog agregata s 30 % pepela pokazale su smanjenje indirektno vlačne čvrstoće, a sve mješavine s 30 % pepela pokazale su smanjenje modula elastičnosti E u odnosu na mješavine samo s prirodnim ili recikliranim agregatom. Dobiveni rezultati su potvrdili mogućnost primjene pepela dna ložišta za izradu cementom stabiliziranog nosivog sloja, pri čemu su zadovoljeni zahtjevi navedeni u španjolskim propisima. Osim uobičajenih materijala poput šljunka i pijeska, Pavšić i dr. [43] navode da je biopepelom iz tvornice papira (drvo, kora, proizvodni mulj) moguće stabilizirati kanalizacijski mulj i reciklirani miješani agregat, čime nastaje kompozitni materijal niske razine čvrstoće (eng. *Controlled Low Strength Material*). Istraživanje je pokazalo da dodatak pepela biomase učinkovito

inhibira mikrobiološku aktivnost u mješavini s muljem, te je moguće dobiti inertan i ekološki prihvatljiv materijal, 28-dnevnih tlačnih čvrstoća oko 1,6-1,8 MPa koje zadovoljavaju zahtjeve kvalitete koji se postavljaju na stabilizirane slojeve cesta, podloge za instalacije ili kao materijal za ispunu rovova.

3.2. Asfaltni slojevi

U asfaltnim slojevima su, kao zamjena za mineralno punilo, svoju primjenu našli leteći pepeli nastali izgaranjem ugljena u termoelektranama. Ova vrsta pepela je znatno više istraživana od biopepela. Povećanje količine letećeg pepela od ugljena u asfaltnim mješavinama povećava indirektnu vlačnu čvrstoću, otpornost na zamor i djelovanje niskih temperatura, ali smanjuje otpornost na pojavu kolotruga [44].

U usporedbi s uobičajenim mineralnim punilima, svojstva biopepela imaju mnogo širi raspon i bitno se razlikuju od pepela dobivenog spaljivanjem ugljena, te je često potrebno provesti prethodne radnje kako bi biopepeli zadovoljili normama postavljene zahtjeve za punila. Naime, autori Melotti i dr. [20] istražili su fizikalna i kemijska svojstva 21 biopepela iz 12 termoelektrana nastalih spaljivanjem drvene sječke, rižinih ljusaka, slame, kore i dr. Pri tome su utvrdili da je veličina čestica gotovo svih korištenih biopepela u svom izvornome obliku suviše krupna, veća od normom propisane za punila. Također je to utvrđeno za biopepele u radovima Sargina i dr. [45] te Xuea i dr. [46], dok je u radu Pasandina i dr. [47] utvrđen zadovoljavajući granulometrijski sastav. Stoga je za postizanje željenog granulometrijskog sastava potrebno provesti radnje usitnjavanja i prosijavanja pepela, te odvojeno skladištiti različite frakcije pepela. Nadalje, pojedini pepeli biomase imaju udio vode veći od dopuštenog [20, 47] pa je radi primjene u asfaltnim mješavinama potrebno posebno voditi računa o načinu skladištenja i transporta biopepela.

Po obliku čestica su biopepela različite od sferičnih čestica letećeg pepela ugljena, obično su nepravilnijeg oblika [20, 47, 48]. Takav oblik čestica omogućuje veće upijanje bitumenskog veziva i otežanu ugradivost asfaltne mješavine [47]. No oblik čestica može i povoljno utjecati kroz povećanje posmične čvrstoće i krutosti, a time i povećanje otpornosti na pojavu plastičnih deformacija [48].

Prema istraženoj literaturi, u vrućim asfaltnim mješavinama najviše je zastupljen pepeo nastao od rižinih ljuski, dok su ostali pepeli neprikladni za primjenu [47] ili nisu istraženi. Istraživanja su pokazala da se primjenom pepela rižinih ljuski može povećati stabilnost po Marshallu i indirektna vlačna čvrstoća u odnosu na mješavine s uobičajenim punilom [45, 48]. Ti su pepeli također otporni na djelovanje vode, no negativan učinak imaju na gustoću mješavina i udio šupljina [48]. Stoga je potrebno posebnu pažnju obratiti na doziranje pepela, primjerice djelomično zamijeniti standardni materijal, kako bi se ostvarili pozitivni, a u prihvatljivim granicama zadržali negativni utjecaji. Osim primjene kao mineralno punilo, autori Xue i dr. [46] pokazali su da se pepeli rižinih ljusaka i pepeli drvene piljevine

mogu upotrebljavati za modifikaciju bitumenskog veziva. Željeni učinak ovdje se ne postiže kemijskim reakcijama s bitumenom, već se učinak modifikacije bitumenskog veziva dogodio miješanjem čestica. Utvrđeno je da korišteni biopepeli u asfaltnim mješavinama imaju negativan učinak na stabilnost pri skladištenju i da povećavaju viskoznost, pa je stoga potrebno pažljivo kontrolirati udio biopepela kako bi se postigla željena svojstva. Pravilnim doziranjem biopepeli poboljšavaju otpornost na kolotražnje i ponašanje bitumena pri visokim temperaturama, pri čemu je uočeno da bolji učinak ima pepeo rižinih ljuski [46].

3.3. Beton

Betoni se u cestogradnji upotrebljavaju za izvedbu zastora kolničke konstrukcije, za podloge ili obloge elemenata, za elemente odvodnje i rubnjake ili izvedbu objekata na cestama. Osim potrebe za velikom količinom prirodnih građevnih materijala, javlja se i potreba za znatnim količinama cementa čija proizvodnja utječe na globalne emisije CO₂ plinova. U skladu sa zahtjevom za smanjenjem proizvodnje CO₂, dio cementa u betonima bilo bi moguće zamijeniti odabranim biopepelom.

Europska norma EN 450-1 [31], koja propisuje kakva svojstva pepeli od ugljena moraju zadovoljiti za primjenu kao mineralni dodatak tipa II u cementnim mješavinama, dopušta da dio toga pepela (do 30 %) dolazi od biomase. Hosseini i dr. [22] u radu navode da zbog velikog udjela amornog silicija pepeli od spaljivanja ostataka poljoprivrednih usjeva mogu poslužiti kao sirovina u proizvodnji cementa (tzv. biocementi) ili djelomična zamjena za cement. To su pepeli koji sadrže minimalno 70 % amornog SiO₂+Al₂O₃+ Fe₂O₃ za pucolanske reakcije, a koje se mogu poboljšati dodatnim radnjama poput usitnjavanja pepela. Planiraju li se te vrste pepela upotrebljavati u betonima, potrebno je voditi računa da dolazi do potpunog izgaranja biomase kako bi se ograničio udio organskih tvari. Zamjena cementa pepelima u malim količinama (10-20 %) može poboljšati svojstva betona u očvrslom stanju (čvrstoću, trajnost, otpornost na djelovanja okoliša) [22] te ponašanje betona u svježem stanju [49]. Ovisno o izvoru i svojstvima, biopepeli mogu negativno utjecati na čvrstoću i obradivost betona, što su za pepeo suncokretovih ljuski utvrdili Senas i dr. [50].

Pepeli drvene biomase ne zadovoljavaju zahtjeve za uporabu kao mineralne primjese prema normi EN 450-1 [31] zbog nedovoljne pucolanske aktivnosti, što su opisali Berra i dr. [51] te da Luz Garcia i Sousa-Coutinho [3]. U radu [51] ovi su pepeli imali i prevelik udio klorida i sulfata, za razliku od pepela u radu [3] gdje nije bilo za beton štetnih sastojaka. Zbog prevelikih čestica i nedovoljnih pucolanskih svojstava, mogu se upotrebljavati tek kao punilo ili djelomična zamjena za pijesak u betonima niskih čvrstoća i nearmiranim betonima.

Kada su u pitanju pepeli dna ložišta (masline i druga biomasa), primjenu u betonima i podložnim mortovima (podloga za rubnjake, slivnike i sl.) ispitali su Beltrán i dr [17, 52]. Velik udio organske tvari u tim pepelima može se ograničiti prosijavanjem

Tablica 4. Moguća primjena biopepela u cestogradnji

Primjena	Funkcija	Vrsta
Stabilizacija koherentnog materijala	Djelomična ili potpuna zamjena za vezivo	Drvni pepeo Pepeo iz proizvodnje maslinova ulja Pepeo rižinih ljuski
Mehanička stabilizacija nevezanog materijala	Sitnozrnati agregat	Drvni pepeo
Vezani nosivi slojevi	Vezivo	Pepeo od drveta, treseta i otpada iz tvornice papira
	Agregat	Pepeo ložišta od drveta i ostataka proizvodnje maslinova ulja
Vruće asfaltne mješavine	Punilo	Pepeo rižinih ljuski Pepeo poljoprivrednih usjeva (slama)
Konstruktivski betoni	Djelomična zamjena za cement	Pepeo rižinih ljuski
Nearmirani i betoni niže kvalitete	Punilo ili zamjena za agregat	Pepeo od drveta, maslina i druge biomase

i upotrebom samo sitnijih frakcija (do 2 mm), no i dalje udio organske tvari i velika poroznost pepela negativno utječu na mehaničke karakteristike i trajnost betona i mortova. Primjena je stoga preporučljiva samo u manjim količinama ili u nekonstruktivskim betonima.

Sažet prikaz moguće primjene biopepela u cestogradnji prema istraživanjima koja su dostupna u literaturi navodi se u tablici 4.

3.4. Ekološki utjecaj biopepela

Bez obzira na zadovoljavajuća mehanička svojstva mješavina s biopepelom, eventualni nepovoljni utjecaj na okoliš može ograničiti njegovu primjenu. Ne treba zaboraviti činjenicu da se radi o otpadnom materijalu promjenjivog kemijskog i mineraloškog sastava čija bi nekontrolirana primjena mogla imati i štetne posljedice za ljudsko zdravlje, okolno tlo i vode. Prema autorima Chesneru i dr. [6], okoliš i ljudsko zdravlje mogu se ugroziti prisutnošću hlapljivih i teških metala (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Zn i sl.), prisutnošću organskih tvari (benzeni, fenoli i sl.) i finom prašinom koja sadrži toksične i organske elemente.

Prilikom procjene štetnosti utjecaja biopepela na okoliš važni su podatci o položaju sloja (tlo ili kolnička konstrukcija), njegovoj projektiranoj debljini, vrsti primarnog veziva (bitumen ili cement) te primijenjenoj količini. Naime, vezani materijali imaju znatno manju sposobnost procjeđivanja, jer su čestice pepela okružene slojem bitumena ili cementa što sprječava prolazak vode. Intenzivno procjeđivanje štetnih elemenata iz izvedenog sloja u okolno tlo i vode može se pojaviti tijekom građenja, u trenutku kad je izvedena površina sloja nezaštićena i izložena kiši.

Pojedini autori uz ispitivanja svojstava mješavina s biopepelom, istraživali su i mogući negativan ekološki utjecaj. Autori Supančić i Obernberger [24] ispitivali su primjenu različitih frakcija drvnog pepela spaljivanog na rešetki i u fluidiziranom sloju u stabilizaciji tla. Rezultati su pokazali da pepeo iz spaljivanja na rešetki ima prevelike količine teških metala prema austrijskim propisima i da nije prikladan za stabilizaciju tla.

Vanhanen i dr. [18] u okviru terenskih istraživanja ispitali su ekološki utjecaj ojačanja ceste kombinacijom šljunka i drvnog

letećeg pepela. Također se pokazalo da su koncentracije Cr, Mo, F i SO₄ prevelike za ponovnu uporabu tog otpada u tlu, ali se drvni pepeo može upotrebljavati u konstrukcijama sa zastorom. Vestin i dr. [41] zaključili su da inicijalno izluživanje K, Na, Cl i SO₄ postoji kod šljunčane ceste stabilizirane letećim pepelom od spaljivanja kore drveta i mulja u fluidiziranom sloju. Zabilježeno izluživanje s vremenom se smanjilo, pa su nakon dvije godine koncentracije bile približne referentnoj dionici bez pepela.

Melotti i dr. utvrdili su preveliko izluživanje kroma i sulfata za primjenu ispitivanog biopepela u okolišu, no napominju kako je ispitivanje izluživanja provedeno na čistom pepelu. Kod planirane primjene u asfaltu, oblaganje čestica pepela bitumenom trebalo bi smanjiti otpuštanje štetnih tvari, pa stoga moguću primjenu biopepela ne treba isključiti samo na temelju analize eluata.

Autorice Netinger Grubeša i Barišić [53] u provedenom istraživanju utvrdile su da pepeo suncokretovih ljusaka sadrži prevelike količine cinka i bakra, pa prema hrvatskim propisima nije moguća njegova primjena u poljoprivredi, ali se kao alternativa planira ispitati mogućnost primjene biopepela u građevinarstvu.

Podatci iz različitih istraživanja mogućeg štetnog utjecaja biopepela pokazali su da oni mogu sadržavati štetne tvari u granicama većim od dopuštenih za odlaganje u okolišu ili primjenu na poljoprivrednim tlima. Istraživanja su najčešće provedena analizom koncentracija u samom pepelu ili od njega dobivenom eluatu. Manji broj istraživanja proveden na mješavinama prikupljenim in situ pokazuje da su koncentracije štetnih spojeva manje i imaju tendenciju opadanja tijekom vremena. Stoga, za potencijalno štetne biopepele (utvrđeno analizom samo pepela ili eluata) treba pažljivo odabrati primjenu i mogućnost štetnog djelovanja ispitati na mješavinama.

4. Primjena biopepela u Hrvatskoj

Hrvatska kao članica Europske unije preuzela je obvezu povećanja uporabe energije iz obnovljivih izvora propisanu Europskom Direktivom [1] prema kojoj bi do 2020. godine udio te energije na razini EU trebao biti najmanje 20 %. Potencijal



Slika 2. a) Prva privatna elektrana na biomasu u Hrvatskoj; b) Spaljivana sječka, c) Izgaranje biomase [55]

biomase kao obnovljivog izvora energije u Hrvatskoj je vrlo velik s obzirom na to da se 48 % njezina teritorija nalazi pod šumama [4]. Osim toga, može se upotrijebiti dio poljoprivrednog ostatka poput slame, ljusaka suncokreta, maslinove komine te ostataka obrezivanja vinograda i voćnjaka [5]. Dok upotreba biomase za energiju u svijetu neprekidno raste, u Hrvatskoj su tek u zadnjih nekoliko godina izgrađene prve termoelektrane na biomasu (Slika 2.). U njima se za energiju spaljuje tek drvena biomasa nastala u industriji prerade drva i ostaci šumarske industrije, a spaljivanje se u većini slučajeva odvija u pećima s izgaranjem na rešetki. No, postoje planovi za povećanjem korištenja energije iz biomase te se planira u pogon pustiti 55 elektrana s instaliranom snagom od 93,97MW [54]. Povećanje ovih kapaciteta podrazumijeva i pronalaženje prihvatljivog načina postupanja s nastalim pepelom.

Ispitivanje primjene pepela nastalog u Hrvatskoj u mortovima provedeno je s pepelom od spaljivanja šumskog i drvnog otpada u pećima s izgaranjem na rešetki u tvornici Lika Eko-Energo [4]. Krupni leteći pepeo upotrijebljen je u proizvodnji mortova zamjenjujući 0-30 % cementa i pijeska. Upotrijebljeni pepeo, iako ima minerale klinkera koji upućuju na mogućnost primjene u zamjeni cementa, nije zadovoljio uvjete za primjenu letećih pepela u betonu, a prema normi EN 450-1 [31]. Razlozi su prevelike čestice, nedovoljna količina pucolanskih oksida (SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3) te prevelike količine alkalnih metala i reaktivnih CaO i MgO . Stoga bi na poboljšanje svojstava učinak moglo imati prethodno ispiranje i mehaničko tretiranje biopepela. U ispitanim mortovima povećanje udjela zamjene cementa nepovoljno je utjecalo na mehanizme hidratacije, znatno je smanjilo obradivost, tlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje, no mortovi s 5 % zamjene cementa i 3,3 % pijeska zadovoljavali su zahtjeve za konstrukcijske mortove i betone.

Osim navedenog istraživanja, primjena biopepela iz drvene mase u građevinarstvu planira se istražiti na Građevinskom fakultetu u Zagrebu [5]. Na Građevinskom fakultetu u Osijeku u tijeku su istraživanja mogućnosti primjene pepela iz poljoprivrednih kultura [56] (slika 3.).

5. Zaključak

Udio biomase kao obnovljivog izvora u proizvodnji ukupne energije sve je veći. Spaljivanjem biomase u termoelektranama nastaju velike količine pepela koji treba ponovno upotrijebiti. Nastali pepeo najčešće se odlaže na odlagalištima otpada, a s obzirom na trend povećanja udjela obnovljivih izvora u cjelokupnoj proizvodnji energije, količine nastalog pepela sve se više gomilaju. Povoljna fizikalna i kemijska svojstva biopepela, kao i pozitivna iskustva primjene pepela od izgranja ugljena, potaknula su i sve brojnija istraživanja primjene biopepela u građevinarstvu. Provedena su istraživanja pokazala da biopepeli znatno variraju u svom sastavu i svojstvima ovisno o porijeklu biomase, rukovanju biomasom, načinu i temperaturi spaljivanja. Velik raspon svojstava znači i brojne mogućnosti primjene biopepela u cestogradnji kao zamjene tradicionalnim materijalima. Kemijski sastav biopepela, osobito udio CaO i pucolana, upućuje na mogućnost djelomične ili potpune zamjene



Slika 3. a) Suncokretove ljuske; b) Biopepeo od spaljivanja suncokretovih ljusaka

tradicionalnih veziva, cementa i vapna, prilikom stabilizacije slabije nosivih tala, u nosivim slojevima kolničkih konstrukcija ili u betonima. U nedostatku vezivnih svojstava pepeli se mogu upotrebljavati kao zamjena za mineralno punilo te agregat (pijesak ili šljunak) u asfaltnim mješavinama, betonima i drugim slojevima kolničkih konstrukcija, što ovisi o

frakciji pepela. Vrlo važan aspekt u uporabi pepela je i njegov ekološki utjecaj, pa prethodno treba ispitati količine štetnih elemenata. Širok raspon svojstava biopepela otvara brojne mogućnosti primjene, no ujedno upozorava na činjenicu da prikladnu primjenu pojedinog biopepela u cestogradnji nije moguće odrediti bez detaljnih istraživanja.

LITERATURA

- [1] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April on the promotion of the use of energy from renewable sources, Official Journal of the European Union, 140 (2009), pp. 16-62
- [2] Demirbas, A.: Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues, *Progress in Energy Combustion Science*, 31 (2005) 2, pp. 171-192.
- [3] da Luz Garcia, M., Sousa-Coutinho, J.: Strength and durability of cement with forest waste bottom ash, *Construction and Building Materials*, 41 (2013), pp. 897-910, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.081>
- [4] Ukrainczyk, N., Vrbos, N., Koenders, E.A.B.: Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials, *Chem. Biochem. Eng. Q.*, 30 (2016) 2, pp. 137-148.
- [5] Carević, I., Banjad Pečur, I., Štirmer, N., Milovanović, B., Baričević, A.: Potencijal biopepela i stanje u Republici Hrvatskoj, *Zbornik skupa Sabor hrvatskih graditelja*, Cavtat, pp. 133-140, 2016.
- [6] Chesner, W., Collins, R., MacKay, M., Emery, J.: User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, FHWA Publication, FHWA-RD-97-148
- [7] Pels, J. R., de Nie, D. S., Kiel, J. H. A.: Utilization of ashes from biomass combustion and gasification, 14th European Biomass Conference & Exhibition, Paris, pp. 1-9, 2005.
- [8] Sharma, V., Chandra, S., Choudhary, R., Characterization of Fly Ash Bituminous Concrete Mixes, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22 (2010), pp. 1209-1216, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000125](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000125)
- [9] Environmental Protection Agency: European waste catalogue and hazardous waste list, 2002.
- [10] Van Loo, S., Koppejan, J.: *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, Earthscan, London, 2008.
- [11] Teixeira, E.R., Mateus, R., Camõesa, A.F., Bragança, L., Branco, F.G.: Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016), pp. 2221-2230, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.124>
- [12] Shao, Y., Wang, J., Preto, F., Zhu, J., Xu, C.: Ash deposition in biomass combustion or co-firing for power/heat generation, *Energies*, 5 (2012) 12, pp. 5171-5189.
- [13] Lanzerstorfer, C.: Chemical composition and physical properties of filter fly ashes from eight grate-fired biomass combustion plants, *Journal of Environmental Science*, 30 (2015), pp. 191-197, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.08.021>
- [14] Obernberger, I., Brunner, T., Bärnthaler, G.: Chemical properties of solid biofuels - significance and impact, *Biomass and Bioenergy*, 30 (2006), pp. 973-982, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011>
- [15] Lanzerstorfer, C.: Chemical composition and properties of ashes from combustion plants using *Miscanthus* as fuel, *Journal of Environmental Science*, 54 (2017), pp. 178-183, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.03.032>
- [16] Cabrera, M., Agrela, F., Ayuso, J., Galvin, A.P., Rosales, J.: Feasible use of biomass bottom ash in the manufacture of cement treated recycled materials, *Materials and Structures*, 49 (2016) 8, pp. 3227-3238.
- [17] Beltrán, M.G., Barbudo, A., Agrela, F., Jiménez, J.R., De Brito, J.: Mechanical performance of bedding mortars made with olive biomass bottom ash, *Construction and Building Materials*, 112 (2016), pp. 699-707.
- [18] Vanhanen, H., Dahl, O., Joensuu, S.: Utilization of wood ash as a road construction material - Sustainable use of wood ashes, 2nd International Conference on Final Sinks, Espoo, 2013.
- [19] James, A. K., Thring, R. W., Helle, S., Ghuman, H. S.: Ash management review-applications of biomass bottom ash, *Energies*, 5 (2012) 10, pp. 3856-3873.
- [20] Melotti, R., Santagata, E., Bassani, M., Salvo, M., Rizzo, S.: A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures, *Waste Management*, 33 (2013) 9, pp. 1906-1917.
- [21] Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G.: An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification, *Fuel*, 105 (2013), pp. 40-76, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041>
- [22] Madani Hosseini, M., Shao, Y., Whalen, J. K.: Biocement production from silicon-rich plant residues: Perspectives and future potential in Canada, *Biosystems Engineering*, 110 (2011) 4, pp. 351-362.
- [23] Aksogan, O., Binici, H., Ortlek, E.: 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 (2016), pp. 253-263, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.102>
- [24] Supancic, K., Obernberger, I.: Wood ash utilisation as a stabiliser in road construction - First results of large-scale tests, 19th European Biomass Conference and Exhibition, 43 (2011), pp. 859-870.
- [25] Marek, J.: Pollutant concentrations from a 15 kW heating boiler supplied with sunflower husk pellets, *Environment Protection Engineering*, 38 (2012) 1, pp. 35-43.
- [26] Matakah, F., Soroushian, P., Ul Abideen, S., Peyvandi, A.: Use of non-wood biomass combustion ash in development of alkali-activated concrete, *Construction and Building Materials*, 121 (2016), pp. 491-500.

- [27] Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G.: An overview of the composition and application of biomass ash.: Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges, *Fuel*, 105 (2013), pp. 19-39, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.001>
- [28] Cabrera, M., Galvin, A.P., Agrela, F., Carvajal, M.D., Ayuso, J.: Characterisation and technical feasibility of using biomass bottom ash for civil infrastructures, *Construction and Building Materials*, 58 (2014), pp. 234-244, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.087>
- [29] Sarkkinen, M., Kujala, K., Kemppainen, K., Gehör, S.: Effect of biomass fly ashes as road stabilisation binder, *Road Materials and Pavement Design*, (2016), pp. 1-13.
- [30] Bohrn G., Stampfer, K.: Untreated Wood Ash as a Structural Stabilizing Material in Forest Roads, *Croatian Journal of Forest Engineering*, 35 (2014), pp. 81-90.
- [31] HRN EN 450-1:2013 Leteći pepeo za beton -- 1. dio: Definicije, specifikacije i kriterij sukladnosti, 2013.
- [32] Ureña, C., Azañón, J. M., Caro, J. M., Irigaray, C., Corpas, F., Ramírez, A., Rivas, F., Salazar, L. M., Mochón, I.: Use of Biomass Ash as a stabilization agent for expansive marly soils (SE Spain), EGU General Assembly 2012, 2012.
- [33] Emeh, C., Igwe, O.: The combined effect of wood ash and lime on the engineering properties of expansive soils, *International Journal of Geotechnical Engineering*, XX (2016) X, pp. 1-11, <https://doi.org/10.1080/19386362.2015.1125412>
- [34] Okagbue, C.O.: Stabilization of Clay Using Woodash, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (2007) pp. 14-18, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:1\(14\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:1(14))
- [35] Sarkar, M., Islam, G., Alamgir, R., Rokonuzzaman, M.: Interpretation of Rice Husk Ash on Geotechnical Properties of Cohesive Soil, *Global Journal of Researches in Engineering Civil and Structural Engineering*, 12 (2012) 2, pp. 1-7.
- [36] Ali Rahman, Z., Hasan Ashari, H., Sahibin, A.R., Tukimat, L., Wan Mohd Razi, I.: Effect of Rice Husk Ash Addition on Geotechnical Characteristics of Treated Residual Soil, *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 14 (2014) 12, pp. 1368-1377.
- [37] Butt, W.A., Gupta, K., Jha, J.N.: Strength behavior of clayey soil stabilized with saw dust ash, *International Journal of Geo-Engineering*, 7 (2016) 1, pp. 1-9
- [38] Khan, M. M. H., Loh, E. W. K., Singini, P. T.: Stabilization of Tropical Residual Soil Using Rice Husk Ash and Cement, *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 11 (2016) 1, pp. 73-88.
- [39] Šķēls, P., Bondars, K., Plonis, R., Haritonovs, V., Paeglītis, A.: Usage of Wood Fly Ash in Stabilization of Unbound Pavement Layers and Soils, *Proceedings of 13th Baltic Sea Geotechnical Conference*, Vilnius, pp. 122-125, 2016, <https://doi.org/10.3846/13bsgc.2016.017>
- [40] Sarkkinen, M., Luukkonen, T., Kemppainen, K.: A wasterock and bioash mixture as a road stabilization product, *Selected papers from the 3rd Edition of the International Conference on Wastes: Solution, Treatments and Opportunities*, Viana do Castelo, pp. 283-288, 2015.
- [41] Vestin, J., Arm, M., Nordmark, D., Lagerkvist, A., Hallgren, P., Lind, B.: Fly ash as a road construction material, *WASCON 2012 Conference proceedings*, Gothenburg, pp. 1-8, 2012.
- [42] Kaakkurivaara, T., Kolisoja, P., Uusitalo, J., Vuorimies, N.: Fly Ash in Forest Road Rehabilitation, *Croatian Journal of Forest Engineering*, 37 (2009) 1, pp. 119-130.
- [43] Pavšič, P., Mladenovič, A., Mauko, A., Kramar, S., Dolenc, M., Vončina, E., Pavšič Vrtač, K., Bukovec, P.: Sewage sludge/ biomass ash based products for sustainable construction, *Journal of Cleaner Production*, 67 (2014), pp. 117-124, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.034>
- [44] Kumar, P., Mehndiratta, H.C., Singh, V.: Use of fly ash in bituminous layer of pavement, *Indian Highways*, 36 (2008) 8, pp. 41-50.
- [45] Sargin, Ş., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., Terzi, S.: Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete, *Construction and Building Materials*, 48 (2013), pp. 390-397, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.029>
- [46] Xue, Y., Wu, S., Cai, J., Zhou, M., Zha, J.: Effects of two biomass ashes on asphalt binder: Dynamic shear rheological characteristic analysis, *Construction and Building Materials*, 56 (2014), pp. 7-15, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.075>
- [47] Pasandín, A.R., Pérez, I., Ramírez, A., Cano, M.M.: Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with paper industry wastes as filler, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016), pp. 853-862, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.016>
- [48] Al-Hdabi, A.: Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler, *Construction and Building Materials*, 126 (2016), pp. 544-551, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.070>
- [49] Krishnasamy, T.R., Palanisamy, M.: Pepeo od šećerne trske i rižinih ljuski kao zamjena za cement u samozbijajućem betonu, *GRAĐEVINAR*, 67 (2015) 1, pp. 23-31.
- [50] Señas, L., Priano, C., Marfil, S., Maiza, P., Valea, J.: Final Disposal of Ashes from Sunflower Husk in Cementitious Mortars, *European Journal of Scientific Research* 74 (2012) 2, pp. 292-300.
- [51] Berra, M., Mangialardi, T., Paolini, A.E.: Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials, *Construction and Building Materials*, 72 (2015), pp. 286-296.
- [52] Beltrán, M.G., Agrela, F., Barbudo, A., Ayuso, J., Ramírez, A.: Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates, *Construction and Building Materials*, 72 (2014), pp. 231-238, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.019>
- [53] Netinger Grubeša, I., Barišić, I.: Environmental impact analysis of heavy metal concentrations in waste materials used in road construction, *e-gfos*, (2016) 13, pp. 23-29.
- [54] "Hrvatski operator tržišta energije (HROTE): Nositelji projekata s kojima je HROTE sklopio ugovor o otkupu električne energije, a čija postrojenja još nisu puštena u pogon", http://files.hrote.hr/files/PDF/Sklopljeni_%20ugovori/ARHIVA/Nositelji_projekata_HR_2017.pdf (pristupljeno: 15.1.2017.).
- [55] "Strizivojna Hrast - kogeneracijsko postrojenje." <http://www.strizivojna-hrast.hr/hr/kogeneracija> (pristupljeno: 5.2.2017.).
- [56] "Agricultural Wastes - Challenges and Business Opportunities -ECO BUILD;" <http://www.gfos.unios.hr/ecobuild> (pristupljeno: 30.12.2017.)