UPRAVLJANJE PEPELOM DRVNE BIOMASE – POTENCIJAL PRIMJENE U GRAĐEVINSKOJ INDUSTRIJI

WOOD BIOMASS ASH MANAGEMENT –
APPLICATION POTENTIAL IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Prof. dr. sc. Nina Štirmer

E-mail: nina.stirmer@grad.unizg.hr

Doc. dr. sc. Bojan Milovanović

E-mail: bmilovanovic@grad.unizg.hr

Sonja Cerković, mag. ing. aedif.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Fra Andrije Kačića Miošića 26, 10 000 Zagreb, Hrvatska/Croatia

E-mail: sonja.cerkovic@grad.unizg.hr

UDK/UDC: 62-666+691.322

JEL klasifikacija/JEL classification: Q56; L74

DOI: 10.30657/hdmk.2020.31

Pregledni članak/Review

Jezik/Language: Hrvatski/Croatian

SAŽETAK

U svrhu ostvarivanja ciljeva koje je postavila Europska unija (EU) da udio energije proizvedene iz obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji treba iznositi 32% do 2030. godine prema Direktivi 2018/2001/EU o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora, došlo je do povećanja korištenja drvene biomase kao obnovljivog izvora, a posljedično i do značajnog povećanja količine pepela drvene biomase (PDB) koji pritom nastaje. Sastav i količine PDB-a mogu značajno varirati, a ovise o vrsti biomase, tehnologiji izgaranja, lokaciji prikupljanja pepela i načina njegova skladištenja. Procjenjuje se da u Hrvatskoj godišnje nastane približno 25.000 tona pepela drvene biomase koji se zasada većinom odlaže te djelomično koristi u poljoprivredi. U budućnosti se mogu očekivati poteškoće u pronalaženju novih odlagališta te povećanje troškova odlaganja PDB-a. Dosadašnja istraživanja pokazuju da PDB ima veliki potencijal primjene u građevinarstvu, osobito u industriji cementa i betona. U radu je prikazano trenutno gospodarenje PDB-om u Republici Hrvatskoj te mogućnosti njegove primjene u građevinskoj industriji, čime bi se smanjila potreba za odlaganjem, ali ujedno sačuvali prirodni resursi te smanjila emisija stakleničkih plinova. Time se podupire Direktiva 2008/98/EC o otpadu u kojoj je postavljena hijerarhija gospodarenja otpadom na način da se prioritet daje sprječavanju, zatim ponovnoj upotrebi ili recikliranju, a tek onda odlaganju.

Ključne riječi: *Pepeo drvene biomase, drvna biomasa, energane na biomasu, građevinska industrija, cementni kompozit.*

1. UVOD

Globalna svijest o pitanjima zaštite okoliša i očuvanju energije u sklopu europskog plana za primjenu 20% obnovljive energije do 2020.¹ potaknula je na razmišljanje o iskorištavanju krute i plinovite biomase kao najznačajnijih obnovljivih izvora energije (OIE) u EU. Direktivom 2018/2001/EU o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora (Direktiva II), institucije EU postavile su novi obvezujući cilj da udio energije iz OIE u ukupnoj konačnoj bruto potrošnji bude najmanje 32% do 2030. godine.² Osim toga, slijedi mogućnost klimatske neutralnosti do 2050. godine što znači da će OIE morati opskrbljivati većinu potrošnje energije, a biomasa će imati presudnu ulogu u postizanju tih ciljeva, osobito energane na krutu i plinovitu biomasu. Biomasa predstavlja jedan od najznačajnijih globalnih OIE u EU i svijetu te je ključna za postizanje navedenih ciljeva. Biomasa može odigrati važnu ulogu u rješavanju klimatskih problema, istodobno doprinoseći gospodarskom rastu i zapošljavanju, posebno u ruralnim područjima.³ Od 2000. godine, potrošnja biomase izrazito se povećala s 55,6 Mtoe, na prijelazu stoljeća, do 119 Mtoe 2017. godine. Prema predviđanjima država članica EU28, potrošnja biomase u Europi trebala bi iznositi 139 Mtoe do 2020. Pri izgaranju drvene biomase nastaje pepeo koji se trenutno većinom odlaže, a manji dio koristi u poljoprivredi. Mnogi istraživači su zbog toga došli na ideju da se pepeo koji nastaje izgaranjem drvene biomase primjeni kao ekološki prihvatljiva komponenta u industriji cementa i betona. Naime, cement se smatra jednim od najviše korištenih materijala u svijetu, a cementna industrija jednom od najvećih prijetnji za okoliš, jer se prilikom ukupne proizvodnje cementa emitira čak 5 – 7% CO₂, primarnog stakleničkog plina koji je jedan od glavnih uzroka globalnih klimatskih promjena.⁴ Stoga se u pogledu smanjenja stakleničkih plinova od 80 do 95% i očuvanja prirodnih resursa razvila ideja o primjeni ekološki prihvatljivih materijala poput pepela iz biomase. Korištenje PDB u građevinskoj industriji doprinijelo bi očuvanju okoliša. Osim toga, uštedjelo bi se na troškovima zbrinjavanja pepela, smanjila bi se potreba za energijom, očuvali prirodni resursi (vapnenac, pijesak, prirodni agregati) te smanjila emisija stakleničkih plinova.

2. ENERGANJE NA BIOMASU

Biomasa je najveći pojedinačni OIE u Europi i čini gotovo 60% u ukupnoj konačnoj potrošnji obnovljive energije (Slika 1. a). Na Slici 1. b prikazana je bruto konačna potrošnja energije biomase na proizvodnju toplinske energije u udjelu od 74,2% 2017. godine, s glavnom potrošnjom u stambenom i industrijskom sektoru. Biomasa je značajan izvor u dekarbonizaciji sektora grijanja i hlađenja koji predstavlja gotovo polovinu konačne potrošnje energije unutar EU 2017. godine.⁵

¹ European Parliament and the Council of the European Union, "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," pp. 39-85, 2009.

² European Parliament and the Council of the European Union, "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 (Recast)," *Official Journal of the European Union*, pp. 82-209, 2018.

³ European Parliament and the Council, "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*, pp. 3-30, 2008.

⁴ Dubravka Bjegović and Nina Štirmer, *Teorija i Tehnologija Betona*, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2015.

⁵ Bioenergy Europe, "Bioenergy Landscape," 2019.

Slika 1. a) Raspodjela bruto konačne potrošnje obnovljive energije u EU28 2017. godine (%)
b) Bruto konačna potrošnja energije biomase za toplinu, električnu energiju i transport u državama članicama EU28 2017. godine (ktoe)

Izvor: SHARES 2017, Eurostat.

Drvena biomasa klasificira se kao kruta biomasa koja samostalno izgara na tri osnovne vrste ložišta: izgaranje na rešetki, izgaranje u fluidiziranom sloju te izgaranje u letu (raspršujućem sloju).⁶ Tehnologiju izgaranja na rešetki uglavnom primjenjuju mala i srednja postrojenja, a razlikuju se razne vrste tehnologija: fiksna rešetka, pokretna rešetka, rotirajuća rešetka i vibrirajuća rešetka, a suvremena rješenja uključuju kontinuirano pomičnu i vodom hladenu rešetku što omogućava stabilno izgaranje, smanjenje emisije CO₂ i količine neizgorelih čestica u dimnim plinovima. Ovisno o brzini fluidizacije, tehnologija izgaranja u fluidiziranome sloju podrazumijeva dvije vrste tehnologija: izgaranje u mjehuričastom fluidiziranom sloju (engl. bubbling fluidised bed – BFB) i izgaranje u cirkulirajućem fluidiziranom sloju (engl. circulating fluidised bed - CFB). Kod obje vrste tehnologija (BFB i CFB) biomasa izgara u mješavini plina i sloju čvrstog materijala (pijeska), dok se primarni zrak za izgaranje ubacuje odozdo i fluidizira ležište. Najčešće se primjenjuje za srednja i velika postrojenja. Tehnologija izgaranja u letu (raspršujućem sloju) prikladna je za goriva koja se sastoje od malih čestica (između 10 i 20 mm), a primjenjuje se za velika postrojenja, komunalne namjene te u sustavima gdje se biomasa spaljuje zajedno s ugljenom. Kriteriji za izbor tehnologije izgaranja su: veličina postrojenja, značajke biomase, dopuštena razina emisija štetnih tvari, opseg i troškovi održavanja.⁷⁸

Prema podacima iz 2016. godine, projektom *Basis BioEnergy* zabilježeno je 4.079 energana na biomasu u zemljama članicama EU28, s time da je istraživanje ograničeno na postrojenja koja koriste drvenu sječku čija je snaga jednaka ili veća od 1 MW. Većina energana nalazi se u Francuskoj, Austriji, Finskoj, Njemačkoj i Švedskoj.⁹

Primjena drvne biomase kao OIE u Republici Hrvatskoj (RH) od velike je važnosti, jer RH raspolaže velikim potencijalom drvne biomase. Prema podacima Hrvatskih šuma, ukupna površina šuma i šumskih zemljišta u RH iznosi 2.688.687 ha što je 47% kopnene površine države. Međutim, gradnja i uspostavljanje energana na biomasu još je uvijek u začetku te ne postoji baza podataka o svim postojećim energanama na biomasu. Hrvatski operator tržišta energije (HROTE) nudi bazu podataka o postrojenjima koja su spojena na elektroenergetsku

⁶ Viktor Dragičević, *Optimizacija Ložišta Za Izgaranje Biomase*, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2011.

⁷ Dražen Lončar, Goran Krajačić and Milan Vujanović, "Podrška Developerima - Primjeri Najbolje Prakse Za Kogeneraciju Na Drvnu Biomasu", Zagreb, 2009.

⁸ Valter Francescato, and Nike Krajnc, "Wood Fuels Handbook," *Italian Agriforestry Energy Association AIEL*, 2009.

⁹ Basis Bioenergy Project, "Basisbioenergy.Eu Project Results," 2016.

mrežu (dakle postrojenja koja proizvode električnu energiju i kogeneracijska postrojenja koja prodaju električnu energiju). S druge strane, postoje postrojenja koja proizvedenu energiju koriste za tehnološke potrebe industrijskog pogona u sklopu kojeg su smještena (kao što su sušare u drvenoj industriji, itd.). Posljednji dostupni službeni podaci HROTE – a o povlaštenim proizvođačima električne energije u RH utvrđuju 33 postrojenja na biomasu ukupne instalirane snage 70,714 MWe, koji su u sustavu poticanja, te 18 postrojenja na biomasu ukupne instalirane snage 39,394 MWe koja još nisu puštena u pogon.^{10,11}

3. PEPEO OD DRVNE BIOMASE

PDB je neizgorivi kruti ostatak koji nastaje nakon potpunog izgaranja drvene biomase i koji sadrži najveći dio mineralnih frakcija koje potječu iz biomase. PDB je kompleksna mješavina anorganskog i organskog sastava koji može znatno varirati.¹² Sastav i količine PDB – a mogu značajno varirati, a ovise o vrsti biomase, tehnologiji izgaranja postrojenja i temperaturi toplinske obrade, lokaciji prikupljanja pepela te načinu njegova skladištenja.^{13,14,15}

Slika 2. Uzorci pepela iz drvene biomase: a) pepeo s dna peći; b) leteći pepeo finije frakcije; c) leteći pepeo krupnije frakcije

Izvor: Izvorno autorsko.

PDB se može podijeliti s obzirom na različite tehnologije izgaranja koje se koriste u energanama na drvnu biomasu (tehnologija izgaranja u nepokretnom sloju u ložištima s rešetkom, izgaranje u mjehuričastom fluidiziranom sloju, te izgaranje u cirkulirajućem fluidiziranom sloju) na pepeo s dna peći i leteći pepeo. Leteći pepeo najčešće dolazi u dvije

¹⁰ HRVATSKI OPERATOR TRŽIŠTA ENERGIJE d.o.o. (HROTE), "Povlašteni proizvođači s kojima je HROTE sklopio ugovor o otkupu električne energije, a čija su postrojenja u sustavu poticanja (stanje na dan 05.11.2019.)", Zagreb, 2019.

¹¹ HRVATSKI OPERATOR TRŽIŠTA ENERGIJE d.o.o. (HROTE), "Povlašteni proizvođači s kojima je HROTE sklopio ugovor o otkupu električne energije, a čija su postrojenja još nisu puštena u pogon (stanje na dan 05.11.2019.)", Zagreb, 2019.

¹² Stanislav Vassilev et al., "An Overview of the Composition and Application of Biomass Ash. Part 1. Phase-Mineral and Chemical Composition and Classification," *Fuel*, vol. 105, 2013, pp. 40-76,

¹³ Neven Ukrainczyk, Nevenka Vrbos and Van Breugel E. A. B. Koenders, "Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials," *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, vol. 30, no. 2, 2016 pp. 137-48.

¹⁴ Rejini Rajamma, Richard James Ball, Luis A. Tarelho, Geoffrey C. Allen and João António Labrincha, "Characterisation and Use of Biomass Fly Ash in Cement-Based Materials," *Journal of Hazardous Materials* vol. 172, no. 2-3, 2009, pp.1049-60.

¹⁵ Chee Ban Cheah and Mahyuddin Ramli, "The Implementation of Wood Waste Ash as a Partial Cement Replacement Material in the Production of Structural Grade Concrete and Mortar: An Overview," *Resources, Conservation and Recycling* vol. 55, no. 7, 2011, pp. 669-685.

frakcije – finijoj i krupnijoj. Pepeo s dna peći (ložišni pepeo) prikuplja se s dna komore izgaranja ili ložišta s fluidizirajućim slojem (Slika 2. a), sitni leteći pepeo (tzv. aerosoli – veličine $< 1\mu\text{m}$) u elektrostatičkom precipitatoru ili vrećastom filtru (Slika 2. b), a relativno krupni leteći pepeo (veličine nekoliko μm) u ciklonima ili kotlovima (Slika 2. c).¹⁶

3.1. Procijenjene količine PDB-a i gospodarenje pepelom

Udio pepela najviše ovisi o vrsti i načinu prikupljanja biomase, temperaturi toplinske obrade te vrsti i hidrodinamici kotla, a može značajno varirati u nekoliko masenih postotaka (od 0,2 do 15%). Što je veća temperatura toplinske obrade, generira se manja količina pepela. Najveći utjecaj na količinu pepela koji nastaje nakon izgaranja drvene biomase (uz pretpostavku da u postrojenjima dolazi do potpunog izgaranja) ima vrsta biomase.^{17,18}

Godišnje može nastati čak $15,5 \times 10^6$ tona pepela od biomase na razini EU. Potrebno je naglasiti da ova pretpostavka proizlazi iz ciljeva koje je potrebno ostvariti do 2020. godine, odnosno 20% energije iz OIE. Budući da je pred nama novi cilj od 32% do 2030., može se zaključiti da će se količine pepela iz biomase povećavati.¹⁹ Za primjenu PDB-a u industriji betona važno je poznavati njegov kemijski sastav te fizikalna svojstva koja mogu znatno utjecati na svojstva betona u svježem i očvrnulom stanju. Ovdje je potrebno napomenuti da se u industriji cementa i betona već desetljećima primjenjuje pepeo iz ugljena te su kriteriji za njegovu primjenu definirani normama kojima nije obuhvaćen PDB.

Procjenjuje se da u Hrvatskoj godišnje nastane približno 25.000 tona PDB – a, pri čemu je udio pepela od 3,1% dobiven na osnovi provedenih anketa u 13 postrojenja na drvenu biomasu u RH.²⁰

U okviru projekta „Razvoj inovativnih građevnih kompozita primjenom biopepela“ provedeno je istraživanje koje je obuhvatilo 9 energana na drvu biomasu u RH. Zaključeno je da se PDB u većini slučajeva skladišti u zatvorenim kontejnerima (73%) i nije u dodiru s oborinama, ali je u kontaktu s vlagom iz zraka. 18% PDB – a hladi se i prikuplja vodom u sustavima za mokro otpeljeljivanje, dok se 9% deponira, ali tretira vodom za upotrebu u poljoprivredi (Slika 3. a). Po pitanju gospodarenja PDB-om, 50% energana predaje ga ovlaštenim tvrtkama za gospodarenje otpadom, 29% predaje tvrtkama za upotrebu u poljoprivredi, a čak 21% privremeno odlaže na vlastitom deponiju. Podaci su prikupljeni provođenjem anketa u 9 postrojenja na drvenu biomasu u RH (Slika 3. b).

¹⁶ Ingwald Obernberger and Friedrich Biedermann, “Ash-Related Problems during Biomass Combustion and Possibilities for a Sustainable Ash Utilisation Friedrich Biedermann”, in Proceedings of the Internacional Conference “World Renewable Energy Congress” (WREC), 2005.

¹⁷ Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, *The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring*, Second Edition, Earthscan, 2012.

¹⁸ Adrian K. James, Ronald W. Thring, Steve Helle and Harpuneet S. Ghuman, “Ash Management Review-Applications of Biomass Bottom Ash,” *Energies*, 2012.

¹⁹ Ingwald Obernberger and Klaus Supancic, “Possibilities of Ash Utilisation from Biomass Combustion Plants,” *In Proceedings of the 17th European Biomass Conference & Exhibition*, no. July, 2009.

²⁰ Bojan Milovanović, Nina Štirmer, Ivana Carević i Ana Baričević, “Pepeo drvene biomase kao sirovina u betonskoj industriji,” *Građevinar*, vol. 71, no. 6, 2019, pp. 505–514.

Slika 3. Upravljanje PDB-om u 9 postrojenja na drvenu biomasu u RH: a) skladištenje PDB – a; b) gospodarenje PDB – om

Izvor: Izvorno autorsko.

U EU se oko 70% PDB-a odlaze na odlagališta, 20% se nastoji primijeniti kao dodatak u tlu u poljoprivredi, a 10% se koristi za ostale namjene.²¹ Pri gospodarenju PDB-om javlja se potencijalni rizik za zdravlje i sigurnost ljudi od udisanja sitnih čestica letećeg PDB – a te onečišćenja podzemnih voda. Zabrinutost raste zbog sve manje dostupnosti prostora i povećanja troškova odlaganja PDB-a. Zbog toga je potreban dobro osmišljen i pripremljen plan odlaganja otpada, čime bi se poduprla Direktiva 2008/98/EC o otpadu u kojoj se postavljena hijerarhija gospodarenja otpadom: a) sprječavanje; b) priprema za ponovnu uporabu; c) recikliranje; d) drugi postupci uporabe npr. energetska uporaba; e) zbrinjavanje.

4. PRIMJENA PDB – a U GRAĐEVINSKOJ INDUSTRIJI

Dosadašnja istraživanja pokazuju da otpad od izgaranja drvene biomase, PDB, pokazuje veliki potencijal kao zamjena dijela cementa u betonu zbog potencijalne hidraulične i pucolanske aktivnosti, mineraloškog sastava te fizikalnih i kemijskih svojstava. Još jedna moguća primjena je korištenje PDB-a kao zamjenskog agregata u prirodnom ili prerađenom stanju, mineralnog dodatka ili punila u betonu. Rezultati određenih istraživanja pokazali su da se primjenom PDB-a u betonu, dobiva beton zadovoljavajuće čvrstoće, a moguća je primjena u samozbijajućem i laganom betonu. Budući da je pepeo drvene biomase bogat oksidima Ca, Si, Al i Fe može se koristiti kao alternativna sirovina i sirovina za tradicionalne sirovine kao što su vapnenac, škriljevac i glina. PDB može se koristiti u sljedećim proizvodima i za sljedeće namjene: samonivelirajućim mortovima, posteljicama cesta, kolničkim konstrukcijama, laganim agregatima, laganim opekama i blokovima, betonskim blokovima, gipskartonskim pločama, opekama, asfaltu itd.²²

²¹ Swaptik Chowdhury, Mihir Mishra and Om Suganya, "The Incorporation of Wood Waste Ash as a Partial Cement Replacement Material for Making Structural Grade Concrete: An Overview," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 6, no. 2, 2015, pp. 429-437.

²² Stanislav V. Vassilev, David Baxter, Lars K.Andresen and Christina G. Vasilleva, "An Overview of the Composition and Application of Biomass Ash.: Part 2. Potential Utilisation, Technological and Ecological Advantages and Challenges," *Fuel*, vol. 105, 2013, pp. 19-39.

5. ZAKLJUČAK

Pregledom stanja područja može se zaključiti da postoji potencijal primjene PDB-a u građevinskoj industriji, ali je istraživanjima potrebno utvrditi područje njegove primjene. Dosadašnja istraživanja o ponovnoj upotrebi PDB-a građevnim kompozitima, pokazala su zadovoljavajuća svojstva takvih materijala te bi se na taj način doprinijelo smanjenju količina koje se odlažu. Upotreba PDB-a u građevnim kompozitima znači pozitivan učinak na njegovu održivost u smislu smanjenja energije koja se koristi prilikom proizvodnje cementa, smanjenja emisije stakleničkih plinova CO₂ i očuvanje prirodnih sirovina (npr. vapnenca). Budući da RH raspolaže s velikim potencijalom drvene biomase, od iznimne je važnosti iskorištavanje iste za potrebe ispunjavanja cilja od 32% do 2030. godine. Posljedično se u budućnosti mogu očekivati velike količine PDB-a, za koje je potrebno pronaći druge mogućnosti uporabe osim odlaganja. Zbog toga primjena PDB-a u građevinskoj industriji predstavlja veliki potencijal za razvijanje inovativnih proizvoda i ujedno očuvanje okoliša.

ZAHVALA

Istraživanje prikazano u ovom radu provedeno je u okviru projekta „Razvoj inovativnih građevnih proizvoda primjenom biopepela“ koje financira Ministarstvo gospodarstva, poduzetništva i obrta temeljem „Ugovora o dodjeli bespovratnih sredstava za projekte koji se financiraju iz europskih strukturnih i investicijskih fondova u financijskom razdoblju 2014. – 2020.“

Abstract:

WOOD BIOMASS ASH MANAGEMENT – APPLICATION POTENTIAL IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

To reach the EU target set by the Directive 2018/2001/EU on the promotion of the use of energy from renewable sources, which states that 32 % of the total energy consumption should be derived from renewable energy sources, there has been an increase in the use of wood biomass as renewable energy sources, and consequently a significant increase in the amount of wood biomass ash that is being generated. The consumption and quantities of WBA can vary significantly, depending on the type of biomass, combustion technology, ash collection and how it is stored. It is estimated that approximately 25,000 tonnes of biomass ash are generated annually in Croatia, which is currently mostly landfilled and partially used in agriculture. Difficulties in finding new landfills and increasing the cost of WBA disposing can be expected in the future. Current research has proven that WBA shows a great potential for application in the construction industry, especially in the cement and concrete industry. This paper presents the current state of WBA management in the Republic of Croatia and the possibilities of its application in the construction industry. This would reduce the need for WBA landfill, but at the same time conserve natural resources and therefore reduce greenhouse gas emissions. This supports the Directive 2008/98/EC on waste, which establishes a waste hierarchy in a way that prioritises prevention, then reuse or recycling, and then at the end disposal of waste.

Key words: wood biomass ash, wood biomass, biomass power plant, construction industry, cement composite.

6. LITERATURA

1. Basis Bioenergy Project. “Basisbioenergy.Eu Project Results,” 2016.
2. Bioenergy Europe. “Bioenergy Landscape,” 2019.
3. Bjegović, Dubravka i Nina Štirmer, *Teorija i tehnologija betona*. Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2015.

4. Cheah, C. B. and M. Ramli, "The Implementation of Wood Waste Ash as a Partial Cement Replacement Material in the Production of Structural Grade Concrete and Mortar: An Overview." *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, no. 7, 2011.
5. Chowdhury, S., Mishra M. and O. Suganya, "The Incorporation of Wood Waste Ash as a Partial Cement Replacement Material for Making Structural Grade Concrete: An Overview." *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 6, no. 2, 2015.
6. Dragičević, V., "Optimizacija Ložišta Za Izgaranje Biomase." Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2011.
7. European Parliament and the Council. "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*, 2008.
8. European Parliament and the Council of the European Union. "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 (Recast)." *Official Journal of the European Union*, 2018.
9. European Parliament and the Council of the European Union "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," 2009.
10. Francescato, V., Krajnc, N. "Wood Fuels Handbook." *Italian Agriforestry Energy Association AIEL*, 2009.
11. HRVATSKI OPERATOR TRŽIŠTA ENERGIJE d.o.o. (HROTE). "Povlaštteni proizvođači s kojima je HROTE sklopio ugovor o otkupu električne energije, a čija postrojenja još nisu puštena u pogon (stanje na dan 05.11.2019.)." Zagreb: HROTE, 2019.
12. HRVATSKI OPERATOR TRŽIŠTA ENERGIJE d.o.o. (HROTE) "Povlaštteni proizvođači s kojima je HROTE sklopio ugovor o otkupu električne energije, a čija su postrojenja u sustavu poticanja (stanje na dan 05.11.2019.)." Zagreb: HROTE, 2019.
13. James, A. K., Thring R. W., Helle, S. and H. S. Ghuman, "Ash Management Review- Applications of Biomass Bottom Ash." *Energies*, vol. 5, no. 10, 2012.
14. Lončar, D., Krajačić, G. and M. Vujanović, "Podrška Developerima - Primjeri Najbolje Prakse Za Kogeneraciju Na Drvnu Biomasi." Zagreb, 2009.
15. van Loo, S. and J. Koppejan, *The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring*. Edited by Second Edition. Earthscan, 2012.
16. Milovanović, B., Štirmer Nina, Carević, Ivana i Ana Baričević, "Pepeo Drvne Biomase Kao Sirovina u Betonskoj Industriji." *Građevinar*, vol. 71, no. 6, 2019.
17. Obernberger, I. i K. Supancic, "Possibilities of Ash Utilisation from Biomass Combustion Plants." *In Proceedings of the 17th European Biomass Conference & Exhibition*, no. July, 2009.
18. Obernberger, I. and F. Biedermann, "Ash-Related Problems during Biomass Combustion and Possibilities for a Sustainable Ash Utilisation Friedrich Biedermann." in *Proceedings of the International Conference "World Renewable Energy Congress" (WREC)*, 2005.
19. Rajamma, R., Ball, R. J., Tarelho, L. A., Allen, G. C., Labrincha J. A., and V. M. Ferreira, "Characterisation and Use of Biomass Fly Ash in Cement-Based Materials." *Journal of Hazardous Materials*, vol. 172, no. 2–3, 2019.
20. Ukrainczyk, N., Vrbos, N. and A. B. Koenders, "Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials." *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, vol. 30, no. 2, 2016.
21. Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L. K. and Christina G. Vassileva, "An Overview of the Composition and Application of Biomass Ash.: Part 2. Potential Utilisation, Technological and Ecological Advantages and Challenges." *Fuel*, vol. 105, 2013.

22. Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K. and Christina G.Vassileva, "An Overview of the Composition and Application of Biomass Ash. Part 1. Phase-Mineral and Chemical Composition and Classification." *Fuel*, vol. 105, 2013.