

Biopepeli i mogućnost korištenja u melioracijama poljoprivrednih tala

Mraz, Barbara

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Agriculture / Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:067904>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-21**



Repository / Repozitorij:

[Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

**BIOPEPELI I MOGUĆNOST KORIŠTENJA U
MELIORACIJAMA POLJOPRIVREDNIH TALA**
ZAVRŠNI RAD

Barbara Mraz

Mentor: Prof. dr. sc. Gabrijel Ondrašek

Zagreb, rujan, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

IZJAVA STUDENTA
O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, Barbara Mraz, JMBAG 0178125583, izjavljujem da sam samostalno izradila završni rad pod naslovom:

BIOPEPELI I MOGUĆNOST KORIŠTENJA U MELIORACIJAMA POLJOPRIVREDNIH
TALA

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedina autorica ovoga završnog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj završni rad ne sadrži dijelove radova predanih na Agronomskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga završnog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznata/upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, 19.09.2024.

Potpis studentice

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

IZVJEŠĆE
O OCJENI I OBRANI ZAVRŠNOG RADA

Završni rad studentice Barbare Mraz, JMBAG 0178125583, naslova

BIOPEPELI I MOGUĆNOST KORIŠTENJA U MELIORACIJAMA POLJOPRIVREDINIH
TALA, mentor je ocijenio ocjenom vrlo dobar (4).

Završni rad obranjen je dana 19.09.2024. pred povjerenstvom koje je prezentaciju ocijenilo
ocjenom odličan (5), te je studentica postigla ukupnu ocjenu odličan (5).

Povjerenstvo:

potpisi:

- Prof. dr. sc. Gabrijel Ondrašek mentor
- Izv. prof. dr. sc. Monika Zovko član
- Izv. prof. dr. sc. Ivan Mustać član

Sadržaj	
Sažetak	1
Summary	1
1. Uvod	1
2. Cilj rada	2
3. Pojam i svojstva biopepela	3
3.1. Pojam i podrijetlo	3
4. Fizikalna i kemijska svojstva biopepela	7
4.1. Fizikalna svojstva	7
4.2. Kemijska svojstva	9
5. Primjena biopepela u poljoprivredi i utjecaj na pH reakciju tala	12
5.1. Utjecaj na agroekosustav i rast poljoprivrednih kultura	15
6. Zaključak	17
7. Popis literature	18
Životopis	24

Sažetak

Biopepeo, kao nusproizvod sagorijevanja biomase u raznim postrojenjima, pokazuje značajan potencijal za primjenu u poljoprivredi. Njegov bogat sastav fitonutrijentima poput kalcija (Ca), kalija (K), fosfora (P) i magnezija (Mg) čini ga korisnim za poboljšanje fizikalno-kemijskih svojstava tla, osobito u kontekstu melioracija kiselih tala i povećanja njihove pH reakcije. Ova svojstva omogućuju bolju apsorpciju hranjivih tvari, što može dovesti do povećanja prinosa poljoprivrednih kultura. Međutim, potrebno je uzeti u obzir i moguće ekološke rizike, uključujući prisutnost teških metala i drugih toksičnih elemenata. Varijabilnost kemijskog sastava biopepela, koja ovisi o vrsti biomase i tehnologiji proizvodnje, naglašava važnost provođenja analize prije primjene. Dugoročna istraživanja su također ključna za određivanje optimalnih doza biopepela za različite tipove tla i kulture. Uz pravilnu primjenu, biopepeo može postati održiva alternativa sintetskim gnojivima, doprinoseći smanjenju troškova i zaštiti okoliša.

Ključne riječi: biomasa, pepeo biomase, biopepeo, održivost, poljoprivreda, kiselina tla, alkalnost, hranjive tvari, poboljšanje tla

Summary

Bioash, as a byproduct of biomass combustion in various facilities, shows significant potential for application in agriculture. Its rich composition of phytonutrients such as calcium (Ca), potassium (K), phosphorus (P), and magnesium (Mg) makes it useful for improving the physical and chemical properties of soil, especially in the context of amelioration in acidic soils and increasing soil pH levels. These properties enable better nutrient absorption, which can lead to increased yields of agricultural crops. However, it is also necessary to consider potential ecological risks, including the presence of heavy metals and other toxic elements. The variability in the chemical composition of bio ash, which depends on the type of biomass and the production technology, highlights the importance of conducting analyses prior to application. Long-term studies are also crucial for determining the optimal doses of bio ash for different soil types and crops. With proper application, bio ash can become a sustainable alternative to synthetic fertilizers, contributing to cost reduction and environmental protection.

Keywords: biomass, biomass ash, bioash, sustainability, agriculture, acidic soil, alkalinity, nutrients, soil improvement

1. Uvod

Ulaskom u doba industrijalizacije povećala se i potreba za većom količinom energije. Dobivanje energije i do dan danas velikim dijelom proizlazi iz fosilnih goriva (nafta, ugljen, zemni plin). Korištenjem fosilnih goriva otpušta se velika količina stakleničkih plinova, ponajviše CO₂ (ugljkovog dioksida), koji trenutno u svijetu predstavlja veliki problem za okoliš (Scolow i sur. 2010.). Globalna zajednica unatrag nekoliko godina postala je svjesna negativnog utjecaja korištenja fosilnih goriva u proizvodnji energije, te se sve više nastoji smanjiti korištenje istih.

Alternativu fosilnim gorivima predstavljaju obnovljivi izvori energije (energija sunca, vjetra, vode i biomase). Biomasa je jedan od najperspektivnijih oblika obnovljivih izvora energije. Biomasa predstavlja organsku materiju koja zaostaje iza šumarske i poljoprivredne industrije – žetveni ostaci, ostaci u preradi, ostaci iz šumarskih djelatnosti i drvne industrije, te komunalni biootpad (Narodne Novine, 138/21).

Spaljivanjem biomase u elektranama dobiva se toplinska i električna energija. Nakon spaljivanja biomase ostaje mineralni ostatak, biopepeo, koji se pretežito odlaže na odlagališta (Wenzel i sur. 2008.). Odlagališta biopepela zauzimaju velike površine zemljišta te mogu direktno utjecati na kvalitetu okoliša i sigurnost ljudi ukoliko pojedine komponente dospiju u zrak (fine čestice lebdećeg pepela) i/ili se ispiru u podzemne vode (metali).

Pored negativnih aspekta biopepela, zbog svoji povoljnih karakteristika, isti se mogu koristiti u izgradnji cesta i proizvodnji građevinskih blokova (Zagvozda i sur. 2018.). Osim navedenog, zbog svog povoljnog kemijskog sastava (minerali, alkalijski i zemnoalkalijski metali), biopepelom se mogu vratiti esencijalni elementi, te meliorirati tla koja imaju kiselu pH reakciju, te tla siromašna određenim hranivima (Biedermann i Obernberger, 2005., Ondrašek i sur. 2021.).

Ovaj rad kompiliran je kako bi se sagledali potencijalno pozitivni i negativni aspekti korištenja biopepela u poljoprivredi. Korištenjem biopepela u poljoprivredi predstavlja dodatan način zbrinjavanja otpada, tj. integracije biopepela u prirodni ciklus tvari. Pored toga, ojačava se održivost i upravljanje resursima, odnosno smanjuje se potreba za proizvodnjom anorganskih gnojiva i poboljšivačima tla iskorištenjem ovog vrijednog nusproizvoda iz raznih postrojenja na biomasu.

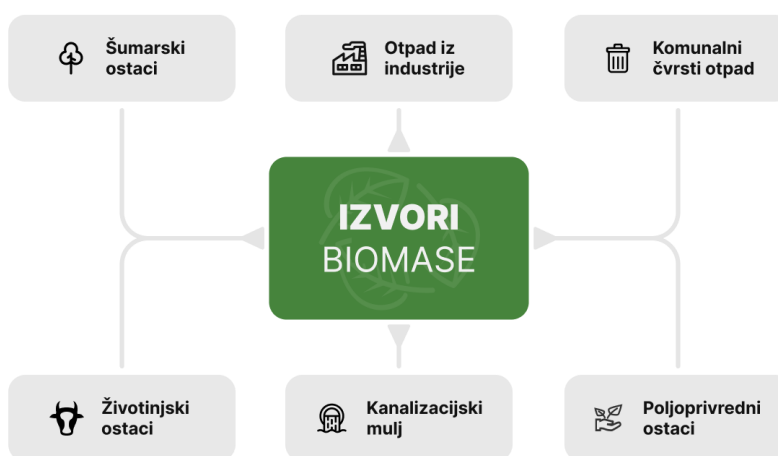
2. Cilj rada

Cilj ovog preglednog rada je prikazati mogućnost iskorištenja biopepela, kao potencijalno vrijednog nusproizvoda iz raznih postrojenja na biomasu. Nadalje, cilj je prikazati najznačajnije kemijske i fizikalne karakteristike biopepela, te pozitivne i potencijalno negativne aspekte primjene biopepela u agroekosustavima.

3. Pojam i svojstva biopepela

3.1. Pojam i podrijetlo

Prema trenutnoj zakonskoj regulativi (Narodne Novine, 138/21) elektrane na biomasu predstavljaju tehnološku nezavisnu cjelinu postrojenja za proizvodnju električne i/ili toplinske energije iz krute biomase iz šumarstva, poljoprivredne, drvo – prerađivačke industrije i biomase nastale pročišćenjem otpadnih voda (slika 3.1.).



Slika 3.1. Izvori biomase i njihova mogućnost korištenja za dobivanje energije

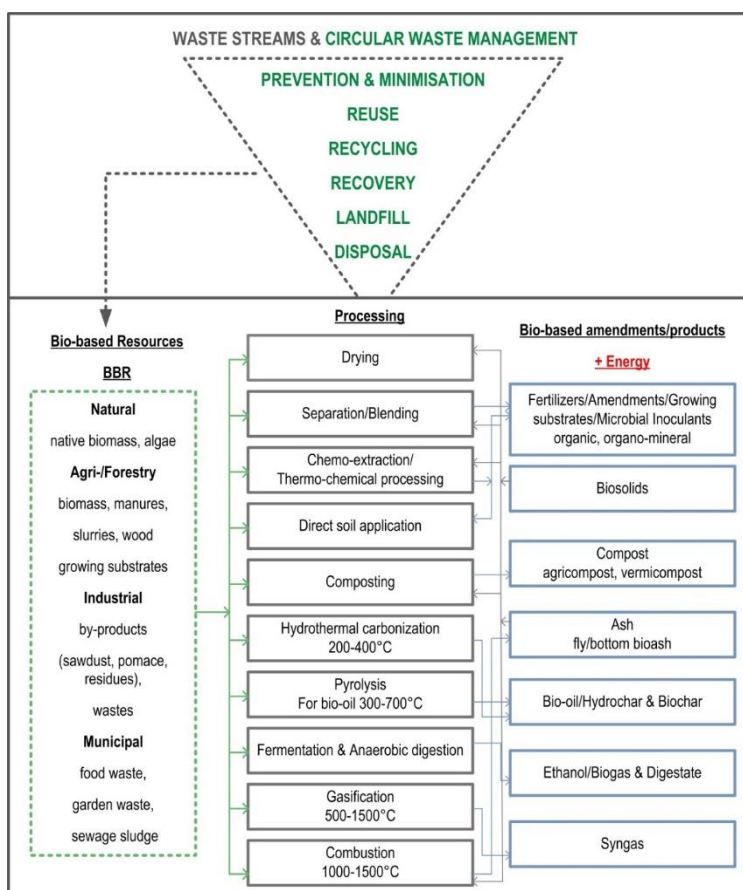
Izvor: modificirano prema Munawar i sur. (2021.)

Sagorijevanjem organske tvari šumskog ili poljoprivrednog podrijetla s ciljem proizvodnje energije u elektranama generira i (nus)produkt – biopepeo. Njegov kemijski sastav vrlo je varijabilan i heterogen, a određen je ponajviše vrstom biomase i načinom njezina sagorijevanja, odnosno sustavom i parametrima sagorijevanja u samim postrojenjima (Ondrašek i sur. 2021.).

Čimbenici koji također utječu na sastav biopepela jesu životni stadij biomase, aplikacija određenih (agro)kemikalija, blizina određenih izvora onečišćenja (industrija, ceste), način dopreme biomase do elektrana, itd. (Vassilev i sur. 2013.). Ovi faktori mogu rezultirati povećanjem ili smanjenjem prisutnosti određenih elemenata u pepelu biomase. Zbog ove raznolikosti u kvaliteti pepela, ključno je provesti detaljnu analizu kemijskog sastava biopepela kako bi se odredio optimalan pristup njegovom gospodarenju i zbrinjavanju, posebice u kontekstu korištenja kao poboljšivača za

melioracije kiselih i/ili hranivima osiromašenih tala u poljoprivredi i šumarstvu (Vassilev i sur. 2013., Zajac i sur. 2018.).

Pels i suradnici (2005.) navode da je upotreba pepela dio održive proizvodnje energije iz biomase, te pridonosi ekološkoj osviještenosti, a njegovo nekorisćenje se može smatrati gubitkom korisnih hranjivih sastojaka. Iako je prema hijerarhiji upravljanja otpadom odlaganje pepela na odlagališta najmanje poželjna opcija, s ekonomskog aspekta ono se često prikazuje kao najisplativije rješenje. Prije samog odlaganja, postoje druge mogućnosti zbrinjavanja pepela, a jedna od poželjnijih opcija, je njegova ponovna upotreba u agroekosustavima i šumskim ekosustavima (slika 3.2.).



Slika 3.2. Shematski prikaz kružnog gospodarenja bio-otpadima iz raznih sektora.

Izvor: Ondrašek i sur. (2024.)

U proizvodnji energije u elektranama na biomasu, najveći udio sirovina, oko 70%, dolazi iz šumskih izvora, dok preostalih 30% potječe iz poljoprivrednog sektora i drugih izvora (Ivanović, 2020.). Količina proizvedenog biopepela pokazuje rastući trend, te je u Europi porasla sa 5,6 na 15,5 Mt/godišnje, a u svijetu na čak 500 Mt/godišnje u razdoblju od 2005. do 2020. godine (Ondrašek i sur. 2021.). Međutim, zbog potencijalno povišenog sadržaja opasnih organskih tvari i elemenata u tragovima, odlagališta (bio)pepela mogu predstavljati značajan ekološki problem. Prisustvo teških metala poput kadmija, olova i

žive, kao i organskih onečišćivača poput policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAU), može negativno utjecati na okoliš i zdravlje ljudi. Wenzel i suradnici (2008.) ističu nekoliko ključnih ekoloških rizika povezanih s odlaganjem pepela: (1) zagađenje zemljišta kroz akumulaciju toksičnih tvari, (2) zagađenje površinskih i podzemnih voda uslijed procjeđivanja onečišćenja, (3) disperzija prašine koja može nositi teške metale i druge opasne tvari u atmosferu, te (4) mogući prijenos toksičnih elemenata u hranidbeni lanac, što može izazvati dugoročne zdravstvene i ekološke posljedice.

Osim navedenih problema, odlaganje pepela može doprinijeti i emisiji stakleničkih plinova, posebno ako sadrži organske tvari koje mogu generirati metan i druge plinove tijekom razgradnje. Uz to, postoje i potencijalni rizici za biološku raznolikost, jer kontaminacija tla i vode može utjecati na biljni i životinjski svijet u blizini odlagališta. S obzirom na brojne izazove, istražuju se alternativni načini gospodarenja (bio)pepelom, poput njegove ponovne upotrebe u građevinskoj industriji (npr. za proizvodnju betona ili asfaltnih mješavina) ili kao aditiva u poljoprivredi, pod uvjetom da su rizici od zagađenja pravilno kontrolirani. Također, napredne tehnologije za smanjenje toksičnih spojeva, kao što su stabilizacija pepela ili bioremedijacija, postaju ključne u smanjenju njegovog ekološkog otiska.

Prema Francescato i sur. (2008.) nastali pepeo uglavnom se može podijeliti u dvije kategorije: nesagorena pepelna troska ili pepeo sa dna ložišta (eng. *bottom ash*) i lebdeći pepeo (eng. *fly ash*) (slika 3.3.). Pepeo sa dna ložišta je relativno krupnija frakcija koja se nakuplja pod rešetkom kotla, dok je lebdeći pepeo finija frakcija i može se podijeliti na ciklonski pepeo i fine čestice iz elektrostatičkih vrećica i vrećica filtra (Francescato i sur. 2008.) Nesagorena pepelna troska nastaje na rešetki i u primarnoj komori za izgaranje. Ova frakcija pepela najčešće sadrži mineralne nečistoće poput kamenja, pijeska i zemlje koje mogu uzrokovati stvaranje i nakupljanje troske i sinteriranje (okrupnjivanje) čestica u ovoj frakciji pepela (Biedermann i Obernberger, 2005.) Agrela i sur. (2019.) navode da je pepeo sa dna ložišta frakcija koja nastaje na rešetki tijekom primarnog izgaranja, te se sastoji i od nesagorenih ostataka biomase, anorganskih komponenti i čestica kvarca, dok je lebdeći pepeo fini ostatak koji nastaje izgaranjem biomase i koji se prenosi dimnim plinovima do filtera.



Slika 3.3. Prikaz pepela sa dna ložišta (lijevo) i lebdećeg pepela (desno) pohranjenog u posebnom spremniku

Izvor: Ondrašek (2024.)

4. Fizikalna i kemijska svojstva biopepela

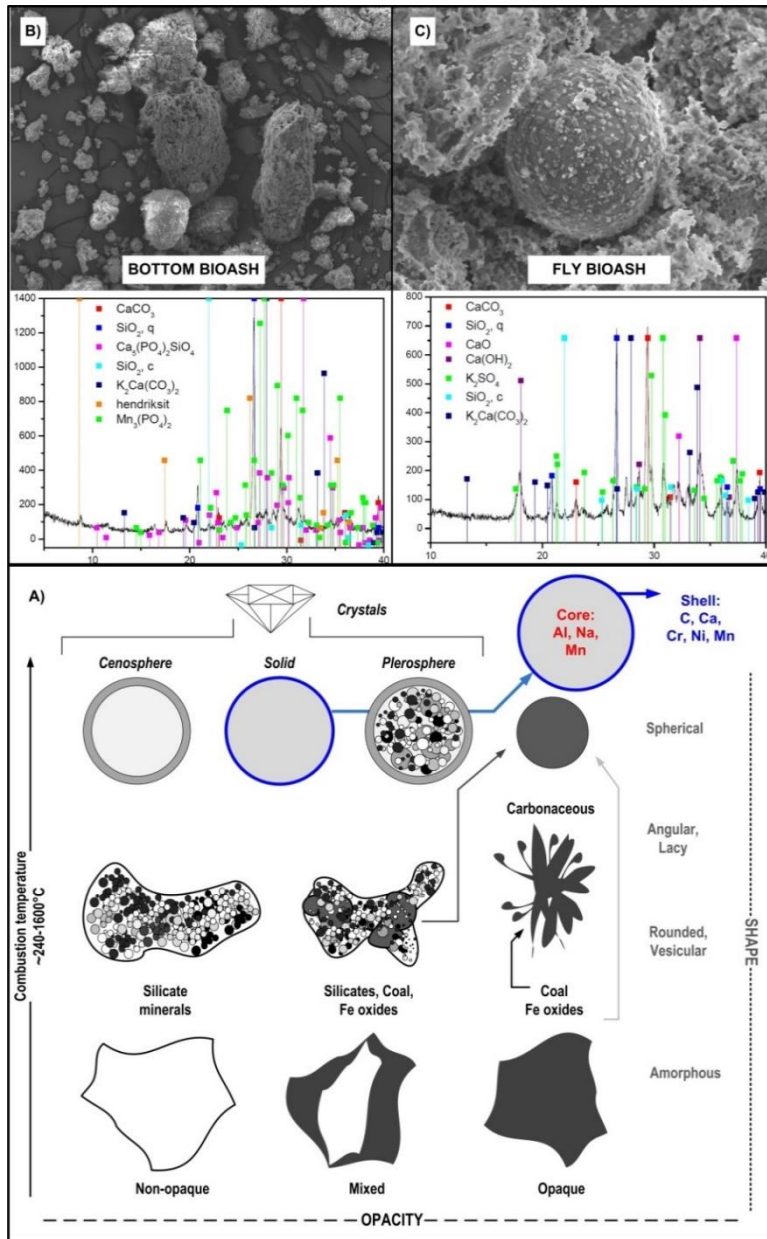
4.1. Fizikalna svojstva

Čestice biopepela pokazuju različitosti u morfometriji i morfologiji (Sarkar i sur. 2008.). Primjerice, oblici mogu biti sferne čestice, porozni aglomerati nepravilnog oblika, pahuljasti konglomerati i razne nepravilne čestice s glatkim rubovima (slika 4.1.) Pravilne čestice s glatkim rubovima vezane su sa drugim česticama (nepravilne, hrpave i pahuljaste čestice). Također, vidljivo je vezanje submikrometarskih čestica sa većim glatkim česticama i njihovo formiranje u relativno veće aglomerate. Polomljene mikrosfere imaju oblik cenosfere (šuplje mikrosfere s rupama, najčešće ispunjene plinom), plenisfere i plerisfere (mikrosfere ispunjene zamućenim mineralima i pjenastom zamućenom ili dodatno poroznom matricom (slika 4.1)). Njihova fizikalna struktura upućuje na veliku aktivnu površinu za fizikalno–kemijsku sorpciju (Ondrašek i sur. 2021.).

Veličina čestica bioepela varira u širokom rasponu, od nekoliko mm (čestice pepela sa dna ložišta) do svega nekoliko nm (lebdeći pepeo). Na primjer, cenosfere i čvrste Fe/Al silikatne mikrosfere sa strukturom jezgre i ljuske javljaju se u veličini od 1-300 μm (Sarkar i sur. 2008). Nadalje, različite biljne vrste generiraju različite veličine, oblike i količine biopepela nakon sagorijevanje. Primjerice, multivarijantna analiza je pokazala da sadržaj pepela opada u slijedećem nizu (Tao i sur. 2012.):

- C3 graminoide (zeljaste jednosupnice, trave),
- zeljaste dvosupnice i C4 graminoide i
- drvenaste vrste širokih i igličastih listova.

Također, postoji i razlika u sadržaju pepela između pojedinih biljnih organa. Primjerice, prosječni sadržaj pepela u ljusci (~18% m/m) može biti nekoliko puta veći nego u kori zimzelenog (~3,0%) i listopadnog drveća (~4,5% m/m) ili u drvetu (zimzeleno ~1,0% i listopadno drveće ~1,0% m/m) (Tao i sur. 2012). Nadalje, pri višim temperaturama sagorijevanja biomase postiže se veća količina dobivenog pepela u odnosu na niže temperature sagorijevanja (Michalick i Wilczynska Michalick, 2012.).



Slika 4.1. Snimke čestica biopepela sa dna ložišta i lebdećeg biopepela provedene skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) i shematski prikaz njihovih glavnih morfoloških oblika.

Izvor: Ondrašek i sur. (2024.)

4.2. Kemijska svojstva

Biopepeo je materijal dominantno (99%) anorganskog sastava (Ondrašek i sur. 2020.) te ovisno od koje sirovine potječe, uglavnom se sastoji od sljedećih elemenata - Ca, Si, Al, P, M, Mg, K, Zn, itd... Zbog povećanog sadržaja alkalnih elemenata i spojeva, pH reakcija biopepela u vodenim otopinama je vrlo alkalna (11,1-12,5) (Ondrašek i sur. 2021; Schiemenz i sur. 2011.). Kemijska svojstva biopepela također ovise o nizu parametrima izgaranja. Tako je primjerice biopepeo sa dna ložišta obogaćen sadržajem C i N, dok je lebdeći biopepeo nastao izgaranjem u fluidizirajućem sloju obogaćen sliktima (albit i kvarc) (Pöykiö i sur. 2014.). Primjerice, prilikom izgaranja pri temperaturama većim od 400°C povećava se razina karbonizacije biopepela i potiče aromatska karbonizacija degradiranih alifatskih skupina, popraćena gubitkom O₂, N i H tijekom dehidracije i dekarboksilacije (Gámiz i sur. 2019.). Posljedično, veći udio C nalazi se u karboniziranom biougljenu (do 80%), dok je udio C u pepelu poljoprivredne biomase manji od 13% (Deokar i sur. 2016., Yargicoglu i sur. 2015.). Općenito vrste biopepela dobivene iz biomase poljoprivrednih ostataka sadrže veću količinu K, P, S, Cl u odnosu na pepeo dobiven iz drvenaste biomase, koji sadrži veću količinu Mg, Mn i Ca, te ima viši pH (Vassilev i sur. 2013.). Nadalje, pepeo biomase drvenastog podrijetla pokazuje veće varijacije u sastavu u odnosu na pepeo zeljastih biljaka, te pokazuju trend rasta Si i smanjenja Ca sljedećim redoslijedom: drvenasta masa > zeljaste supnice > C4 graminoide > C3 graminoide (Tao i sur. 2012.).

U nedavnom istraživanju Ondrašek i sur. (2021.) navode kompleksnu i različitu mineralošku matricu biopepela (npr. lebdećeg u odnosu na pepeo sa dna ložišta dobivenog iz istog postrojenja), kao i neke sličnosti u sadržaju široko korištenih Ca/Mg homogenih karbonatnih minerala (npr. dolomita). Minerologija biopepela je vrlo kompleksna i obuhvaća nerijetko i više od 200 različitih minerala (uglavnom Ca, Mg, Si, P, Zn, Fe, Al i Mn), u različitim frakcijama i/ili vrstama pepela (Maresca i sur. 2017.). Nadalje, biopepeo u usporedbi sa pepelom ugljena sadrži manju količinu minerala sumpora (npr. arkanita) (Singh i sur. 2020.). Također, biopepeo sadrži veliki broj kemijskih elementa i rijetkih izotopa koje biljke usvajaju putem korijenovog sustava i koji se talože u dijelovima biljaka (Ondrašek i sur. 2019.).

U nastavku su prikazani sadržaji glavnih minerala raznih vrsta biopepela prema studiji Michalick i Wilczynska Michalick (2012.) provedenoj na 8 različitih uzoraka iz poljskih elektrana:

- Sadržaj SiO₂ je relativno visok u pepelu od slame (> 66% m/m u pepelu dobivenom na 475°C i > 73 % m/m u pepelu dobivenom na 800°C) ili kore bukve (oko 56 % m/m na 475°C i oko 58 % m/m na 800°C) i vrlo nizak u pepelu od ljuski suncokreta (<2.4 % m/m u pepelu dobivenom na 800°C) ili kore kukuruza (8.3 % m/m na 475°C i 10.6 % masenog udjela na 800°C).

- Sadržaj K_2O u pepelu od ljuski suncokreta dobivenom na $800^\circ C$ varira od 27.6 do 31.4 % m/m u pepelu, od kore kukuruza je 24 % m/m ($475^\circ C$) i 26.7 % m/m ($800^\circ C$); u pepelu od ostataka masline je 22.9 % m/m ($475^\circ C$) i 25.6 % m/m ($800^\circ C$). S druge strane, pepeo od kore bukve karakterizira nizak sadržaj K_2O (<4% m/m).
- Sadržaj P_2O_5 je vrlo visok u nekoliko vrsta pepela biomase. U pepelu od kore kukuruza P_2O_5 doseže >36 % m/m ($475^\circ C$) i >42 % m/m ($800^\circ C$); u pepelu od palmiranih koštica varira od 21.6 % m/m ($475^\circ C$) do 32.6 % m/m ($900^\circ C$).
- Sadržaj CaO je relativno visok u pepelu od kore bukve – 15.4 % m/m ($475^\circ C$) i 17.7 % m/m ($800^\circ C$). U nekoliko uzoraka pepela biomase sadržaj MgO premašuje 10 % m/m (kora kukuruza, slama i palmirane koštice).

Nadalje, provedena je analiza 5 različitih uzoraka pepela biomase iz elektrane sa tehnologijom rasplinjavanja u Italiji, pepeo biomase vinove loze, drvenih peleta, biomase drveta masline te čička artičoke (Tablica 4.1.). Ova analiza omogućuje uvid u ključne komponente pepela, uključujući okside metala i nemetala, te ističe njihovu ulogu u procjeni potencijalne primjene pepela u različitim industrijama. Primjerice, jedna od bitnih komponenti u sastavu biopepela je natrijev oksid (Na_2O), koji se u analiziranim uzorcima kreće uglavnom u relativno niskim koncentracijama (<1%) (Tablica 4.1.)

Druga važna komponenta je klor (Cl), koji je najviše prisutan u pepelu termoelektrane na biomasu (0,30%). Klor u pepelu može izazvati koroziju i pogoršati trajnost materijala, što treba uzeti u obzir kod njegovih potencijalnih građevinskih primjena. Zanimljivo je primijetiti da većina ostalih uzoraka ima vrlo nisku koncentraciju klora (0,01%). Manganov oksid (MnO_2) i kalijev oksid (K_2O) su također važni pokazatelji kemijskog sastava pepela. Kalijev oksid je posebno zastupljen u pepelu vinove loze (1,78%), što može pridonijeti njegovoj upotrebi u poljoprivredi, kao važan izvor makro elementa. S druge strane, pepeo drva masline pokazuje visoku koncentraciju K_2O (4,94%), što ga čini zanimljivim kandidatom za istraživanje u poljoprivrednom sektoru kao potencijalno gnojivo. Također, sadržaj fosforovog (V)-oksida (P_2O_5), posebno je visok u pepelu vinove loze (8,86%) i drvu masline (7,83%), što ukazuje na njihovu moguću primjenu u poljoprivredi, posebno u tlima deficitarnim fosforom. Silicijev dioksid (SiO_2) i kalcijev oksid (CaO) dva su dominantna oksida u gotovo svim uzorcima pepela (Tablica 4.1.). Silicijev dioksid, ključan za mnoge primjene u građevinarstvu, najviše je prisutan u pepelu čička artičoke (65%), što sugerira da bi ovaj pepeo mogao imati potencijal kao dodatak u betonskim smjesama ili sličnim materijalima. Slično tome, visoka koncentracija kalcijevog oksida u pepelu drva masline (43,3%) i čička artičoke (65,04%) ukazuje na to da ovi pepeli mogu imati cementirajuća svojstva, što bi moglo biti korisno u industriji cementa ili kao stabilizatori u građevinskim materijalima (Ondrasek i sur., 2021a.). Među ostalim komponentama, niska koncentracija kromovog oksida (Cr_2O_3) i željezovog oksida (Fe_2O_3) pokazuje da teški metali nisu prisutni u značajnim količinama, što je pozitivan pokazatelj s ekološkog stajališta. Krom i željezo u većim

koncentracijama mogu predstavljati ekološki problem, ali njihova niska prisutnost u analiziranim uzorcima sugerira da bi pepeli mogli biti sigurni za primjenu u okolišu ili industrijskim procesima. Sveukupno, kemijski sastav biopepela iz različitih izvora biomase ukazuje na široku varijabilnost u njegovim svojstvima, što direktno utječe na potencijalne načine upotrebe. Primjerice, visok udio silicijevog dioksida i kalcijevog oksida u nekim uzorcima pogoduje primjeni u građevinskim materijalima, dok visok udio kalija i fosfora otvara mogućnosti za primjenu u melioracijama kiselih poljoprivrednih ili šumskih tala. Međutim, kako bi se odredila točna primjena za pojedine vrste pepela, potrebno je dodatno istražiti njihova fizikalno-kemijska svojstva, kao i njihov dugoročniji utjecaj na razne komponente okoliša.

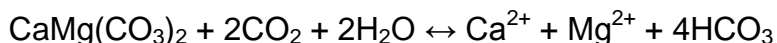
Tablica 4.1. Kemijski sastav raznih vrsta biopepela iz elektrane sa tehnologijom rasplinjavanja (prilagođeno prema Comodi i sur., 2021).

Kemijski sastav	Pepeo iz termoelektrana na biomasu	Pepeo biomase vinove loze	Pepeo drvenih peleta	Pepeo drveta masline	Pepeo čička artičoke
Na ₂ O	0,08	0,94	0,112	0,582	0,907
Cl	0,30	0,009	0,008	0,006	0,008
MnO ₂	0,146	0,127	1,113	0,121	0,025
K ₂ O	0,184	1,78	0,005	4,94	0,008
MgO	0,213	9,14	32,4	3,85	1,563
SiO ₂	11,8	26,2	16,5	27,9	9,57
Cr ₂ O ₃	0,136	0,012	0,007	0,014	0,007
Fe ₂ O ₃	0,611	2,34	2,765	2,89	0,537
CaO	39,8	44,3	37,2	43,3	65,0
Al ₂ O ₃	0,55	5,52	5,54	7,97	1,103
P ₂ O ₅	0,392	8,86	3,51	7,83	7,67
TiO ₂	0,067	0,318	0,202	0,349	0,084

U istraživanju Ondrašeka i sur. (2021b, c) korišten je lebdeći pepeo dobiven iz čipsa tvrdog listopadnog drveta, sastavljenog od hrasta (85%), graba (10%), jasena (3%) te nekoliko drugih bjelogoričnih vrsta drveta (2%), prikupljenog u kogeneracijskom postrojenju na biomasu istočno kontinentalnog dijela Hrvatske. Utvrđeno je da je lebdeći pepeo bio gotovo potpuno anorganskog sastava (> 99%) s vrlo niskim udjelom ukupnog dušika (< 0,06%), ugljika (< 0,3%), sumpora (< 0,2%) i metala (Cd, Co, As, Hg, V, svaki < 1,0 mg/kg), ali bogat alkalnim mineralima i raznim hranivima (Ca, K, Mg, P, Zn). Temeljem navedenog, isti autori zaključuju kako korištenje navedenog biopepela predstavlja ekološki prihvatljiv način upravljanja otpadom, uz potencijal za poboljšanje poljoprivrednih kiselih tala i njihovo obogaćivanje ključnim mineralima i hranjivim tvarima. Zbog niskog sadržaja štetnih elemenata i visokog udjela korisnih alkalnih minerala, ovaj biopepeo može igrati važnu ulogu u održivoj poljoprivredi i poboljšanju agroekosustava. Ovakva primjena biopepela pomaže smanjenju biootpada, te promiče kružno gospodarstvo u poljoprivrednoj i energetskej industriji (više u narednom poglavlju).

5. Primjena biopepela u poljoprivredi i utjecaj na pH reakciju tala

Spomenuti alkalni sastav biopepela čini ga potencijalno korisnim u meliorativnim radnjama u poljoprivredi, ponajprije u kemijskim melioracijama kiselih (Tablica 5.1.), eluviranih tala, kod kojih je došlo do ispiranja alkalnih elemenata (Ca, Mg, K) iz površinskog sloja. Naime, otapanjem biopepela u tlu potiče se alkalna reakcija, kao što je prikazano u sljedećoj jednadžbi (Bolan i sur. 2003.):



Unatoč navedenom, biopepeo se ne može izravno koristiti u poljoprivredi bez njegove prethodne kemijske analize, kao i analize tla na kojega se planira primijeniti, kako bi se osigurala učinkovita korekcija vrijednosti pH tla, gnojidba, te potencijalno štetni učinci biopepela uslijed nekontrolirane primjene (Cruz, 2023.). Nadalje, većina poljoprivrednih kultura preferira neutralnu pH reakciju tla, pri čemu je usvajanje makro- i mikro-elemenata optimalno, pospješeno i uravnoteženo. Suprotno tome, u uvjetima povećane pH reakcije tla dolazi do slabijeg usvajanja pojedinih elemenata (npr. P, Fe, Mn) i njihove deficijencije (npr. Fe - kloroza), dok u kiselim uvjetima tla može doći do pojačanog usvajanja određenih elemenata (npr. Al, Mn), što može uzrokovati fitotoksičnost (npr. aluminijska fitotoksičnost, koja oštećuje korijenov sustav. Posljedično, kod nižih i viših pH vrijednosti tla dolazi do redukcije procesa.

Tablica 5.1. FAO klasifikacija tala prema pH reakciji (prilagođeno prema Sadovski, 2012.).

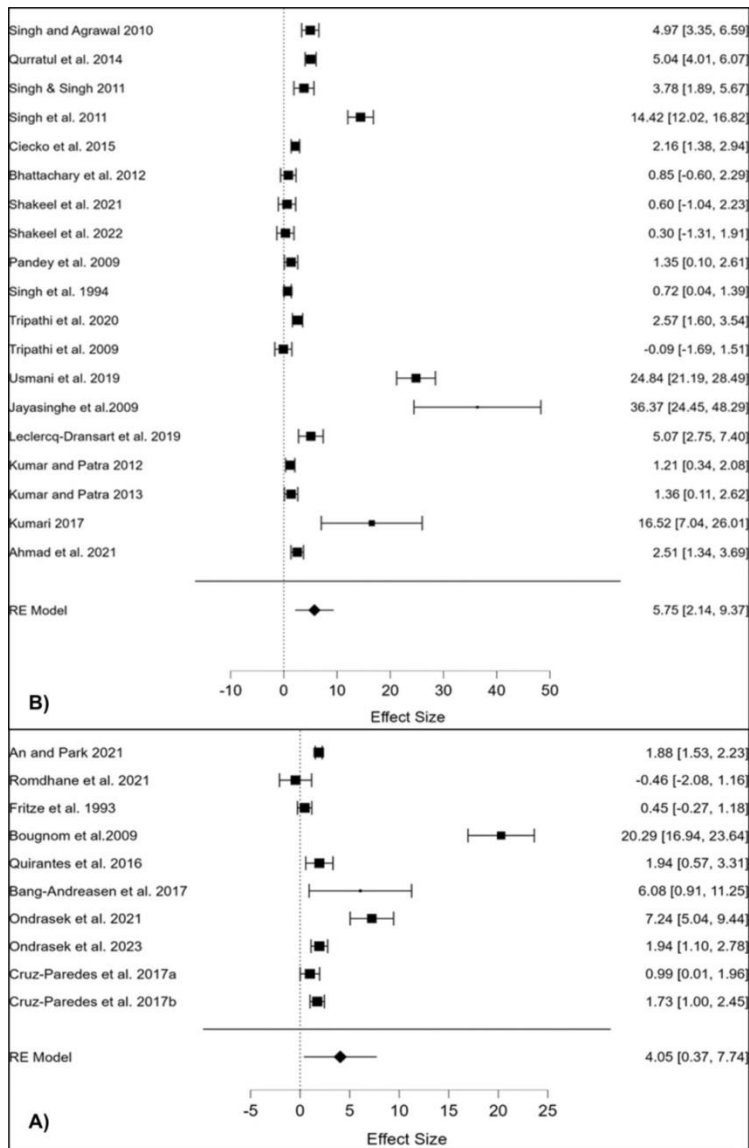
Kategorija tla	pH _{H2O}
Izuzetno kiselo	<3,0
Vrlo jako kiselo	3,0-4,0
Jako kiselo	4,1-5,0
Umjereno kiselo	5,1-6,0
Slabo kiselo	6,1-6,9
Neutralno	7,0
Vrlo slabo alkalno	7,1-7,5
Slabo alkalno	7,6-8,1
Umjereno alkalno	8,2-8,6
Alkalno	8,7-8,9
Jako alkalno	9,0-10,0
Vrlo jako alkalno	10,1-11

Kisela lesivirana tla, koja su karakteristična po niskim pH vrijednostima, odlikuju se ispiranjem baznih kationa poput Ca²⁺, Mg²⁺ i K⁺ (dekarbonizacija), što dovodi do

osiromašenja tla esencijalnim hranjivima; Ca, Mg, K i P. Također, manjak elemenata poput Ca i Mg, koji doprinose stabilnoj strukturi tla, dodatno pogoršava njihovu kvalitetu. Ova tla mogu potencijalno sadržavati povećane količine toksičnih elemenata kao što su Al, Cu, Mn i Fe. Lesivirana tla raširena su u kontinentalnoj Hrvatskoj (Špoljar, 2015.). U istraživanju se navodi da prosječna pH vrijednost tala iz 33 europske zemlje iznosi 5,8 u Ap horizontu, odnosno 5,5 u Gr horizontu, pri čemu više od 70 % potencijalno obradivih parcela spada u kategoriju kiselih tala, dok na globalnoj razini, oko 30-40 % obradivih zemljišta pripada skupini kiselih tala (Špoljar, 2015.)

U istraživanju Quirantes i sur. (2016.) u slabo kiselo (pH $6,4 \pm 0,05$), pjeskovito ilovasto tlo sa C/N odnosom 7, dodane su tri vrste biopepela; i) pepeo komine masline, koji je nastao sagorijevanjem na 450°C (pH $10,7 \pm 0,4$), ii) pepeo drveta, koji je nastao sagorijevanjem na temperaturi 350°C (pH $12,8 \pm 0,4$), te iii) pepeo otpada iz staklenika nastao rasplinjavanjem na 270°C (pH $9,9 \pm 0,3$). Autori su utvrdili da je dodatak pepela značajno utjecao na pH vrijednost tla i električnu vodljivost. Najveći porast pH vrijednosti zabilježen je kod pepela komine masline, posebno u dozi od 25 Mg ha^{-1} , gdje je pH tla narastao s početnih $6,4 (\pm 0,05)$ na $8,5$. Drveni pepeo i pepeo iz postrojenja na rasplinjavanje, u količini od 5 Mg ha^{-1} također su povećali pH tla, ali u manjoj mjeri, podižući ga na $7,4$. Iako su te promjene manje izražene, vidljiv je prijelaz tla iz slabo kisele u alkalnu reakciju, što ukazuje na pozitivan utjecaj dodanih pepela na kemijske osobine tla.

Prema nedavno provedenom istraživanju Ondrašek i sur. (2024.) prikazana je usporedba aplikacije pepela biomase i pepela ugljena i njihov utjecaj na reakciju tla (slika 5.1). Kvantitativna meta-analiza na uzorku od 10 studija, pokazala je značajan pozitivan učinak primjene lebdećeg pepela biomase na pH tla, s veličinom efekta (Cohenov $d = 4,05$, $p < 0,001$, 95% CI: $0,37, 7,74$). Ukratko, 90% analiziranih rezultata bilo je pozitivno, potvrđujući povećanje pH tla od 23% uz primjenu lebdećeg pepela biomase. Sličnom meta-analitičkom metodom, ali analizirajući korištenje pepela iz ugljena na uzorku od 19 studija, također je zabilježen pozitivan učinak na pH tla (Cohenov $d = 5,75$, $p = 0,002$, 95% CI: $2,14, 9,37$). Međutim, povećanje pH tla uz primjenu pepela iz ugljena bilo je sporije i manje učinkovitije, svega 11%. Ovi rezultati ukazuju na to da oba tipa pepela mogu značajno utjecati na povećanje pH tla, ali lebdeći pepeo biomase pokazuje brži i snažniji učinak u odnosu na pepeo iz ugljena (slika 5.1.).



Slika 5.1. Prikaz pH reakcije tla nakon dodatka pepela biomase (A) i pepela ugljena (B).

Izvor: Ondrašek i sur. (2024.)

Općenito, pepeo biomase je jedno od najstarijih mineralnih gnojiva, a zahvaljujući visokom sadržaju Ca i Mg, često se koristi kao zamjena za gnojiva koja se primjenjuju u kalcizaciji, odnosno za smanjenje kiselosti tla (Wójcik i sur., 2020.). Iako primjena pepela biomase može smanjiti kiselost tla, uspjeh te primjene ovisi o brojnim faktorima (Romdhane i sur., 2021.), uključujući način primjene, količinu i kvalitetu pepela, neutralizacijski kapacitet, veličinu čestica, tvrdoću pepela, oborinske prilike i mineraloški sastav tla. Ondrašek i sur. (2021.) ističu dugotrajnu reaktivnost pepela, njegov potencijalni toksični učinak te nedostatak zakonske regulative za gospodarenje biološkim otpadom. Također navode i potencijalne negativne učinke primjene pepela

biomase na tlo, uključujući solni stres zbog visokoalkalnih svojstava pepela, zagađenje teškim metalima i utjecaj na mikrobiološku raznolikost tla. Osim toga, biopepeo može sadržavati opasne tvari poput policikličkih aromatskih ugljikovodika i hlapljivih organskih spojeva, što predstavlja dodatne rizike u njegovoj upotrebi (Odzijewicz, 2022.).

5.1. Utjecaj na agroekosustav i rast poljoprivrednih kultura

Rast i produktivnost biljaka uvelike ovise o dostupnosti hranjivih tvari te o fizikalno-kemijskim svojstvima tla, prvenstveno pH reakciji i električnoj vodljivosti (EC) tla (Romhdane, 2021., prema Wolfe i sur., 1990.). Brojna istraživanja potvrđuju mogućnost korekcije pH tla kiselih tala dodavanjem pepela biomase, pri čemu dovođenje pH vrijednosti tla na neutralnu razinu omogućuje bolju apsorpciju mikro- i makro-elemenata, koji su u kiselim tlima imobilizirani i/ili nedostupni biljkama (Vukadinović i Vukadinović, 2011.). Primjerice, u kiselim tlima nedostatak P brzo se manifestira već u ranim fazama razvoja biljaka (Vukadinović i Vukadinović, 2011.). Slabije razvijen korijen smanjuje apsorpcijsku moć biljke prema vodi i hranjivima, što usporava njen rast i dovodi do kasnijeg cvjetanja i zriobe. Manjak P rezultira nižim udjelom proteina u plodovima te smanjenjem ukupnog prinosa. Najveća potreba biljaka za P javlja se tijekom početka vegetacije, kada korijen intenzivno raste, te prilikom prijelaza iz vegetativne u reproduktivnu fazu (Vukadinović i Vukadinović, 2011.). Fosfor u obliku P_2O_5 jedan je od najzastupljenijih oksida u pepelu biomase, često iza SiO_2 , CaO , K_2O i MgO . Koncentracija P_2O_5 varira (0,2–37,5%) i prosječno iznosi oko 4% (Vassillev i sur., 2023.), te time može biti značajan izvor P u poljoprivrednim tlima. Prema istraživanju Romhdane i sur. (2021.), primjena biopepela u poljskim eksperimentima pozitivno je utjecala na rast izdanaka i broj listova kod dva različita hibrida kukuruza. Ujedno je zabilježeno smanjenje koncentracije Cu i Mg u stabljikama kukuruza, dok su Ca i Ni također značajno smanjeni. U uzgoju žitarica primjena pepela rezultirala je povećanom koncentracijom P (+16%) i Ni (+21%). Nadalje, u istraživanju Szostek i sur. (2023.) proveden je komparativni eksperiment uzgoja uljane repice, uspoređujući učinke mineralnog NPK gnojiva, biopepela i kontrole bez dodanih gnojiva/biopepela. Dodatak biopepela rezultirao je sličnim prinosom suhe tvari kao i uz primjenu NPK gnojiva, dok je K iz NPK gnojiva imao učinak sličan onome iz biopepela. Najbolje rezultate postigla je srednja doza biopepela ($1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$), dok su preniske i previsoke koncentracije imale slabiji učinak. Također, mjerenja sadržaja klorofila u listovima pokazala su bolje rezultate za biljke tretirane biopepelom u dozama 1,0, 1,5 i $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ u usporedbi s kontrolnim skupinama.

Slični rezultati, prema kojima srednje ili manje količine biopepela pospješuju rast biljaka, prikazani su i u radu Ondraška i sur. (2021c.), gdje je dodatak manjih količina biopepela (5 t/ha) pozitivno utjecao na rast nadzemnih i podzemnih dijelova kukuruza. Veće

koncentracije pepela (>5 t/ha) izazvale su negativan učinak (simptomi kloroze i nekroze na listovima), a što autori pripisuje alkalnom stresu. Pepeo biomase također sadrži povećane koncentracije Si, osobito kod sirovina poput rižinih ljuski (30% Si). Zbog visokog udjela Si, biopepeo može poboljšati fizikalno-mehanička svojstva glinastih tala. Primjerice, dodatak lebdećeg biopepela smanjuje gustoću tla i poboljšava strukturu, poroznost, prodiranje korijena i zadržavanje vode (Sahu i sur., 2017.), dok umjereno poboljšava hidrauličku vodljivost tla.

Primjena lebdećeg pepela biomase također može smanjiti dostupnost toksičnih metala u tlu, čineći ih manje pristupačnima biljkama i smanjujući rizik od fitotoksičnosti i kontaminacije hranidbenog lanca (Ondrašek i sur., 2020., 2021.c). Zaključno, iako pepeo biomase ima značajan potencijal za poboljšanje tla i smanjenje njegove kiselosti, potrebno je daljnje istraživanje u stvarnim uvjetima kako bi se dugoročno potvrdila njegova učinkovitost, osobito u pogledu sigurnosti i zaštite okoliša. Naime, svježe proizveden biopepeo biološki je inertan, ali može imati snažan učinak na širok raspon živućih organizama:

- autohtonne i uzgojene šumske vrste biljaka (Moilanen i sur. 2002.)
- poljoprivredne usjeve (Lopareva-Pohu i sur. 2012.)
- travnate kulture, šumsko voće i gljive (Olsson i sur. 2002., Moilanen i sur. 2006.)
- mezofaunu tla (Leclercq-Dransart i sur. 2019.)
- i mikrobiotu u tlu (Ivanović i sur. 2014.)

Prema navedenim studijama, brojni pozitivni ili negativni indikatori (rast i prinos, normalna hormonalna i nutritivna funkcija) mogu biti povezani s nekoliko ključnih čimbenika, pogotovo s primijenjenim dozama pepela i specifičnim karakteristikama pepela i okoliša u kojemu je primijenjen. U spomenutim istraživanjima, primijenjen je pepeo u širokim rasponima (0-30% w/w), odnosno od nekoliko stotina kilograma do gotovo 200 t/ha. Uglavnom, negativan utjecaj imale su visoke količine primijenjenog pepela (>5 t/ha) te nestabilizirani oblici biopepela (Aronsson i sur. 2004.). Prema određenim studijama može se zaključiti kako najveće količine primijenjenog pepela ne bi trebale prelaziti 10% w/w, iznad kojih ekološki pozitivni aspekti manje očekivani zbog različitog štetnog djelovanja na biljne vrste (klijavost, smanjen rast i pad prinosa, sadržaj ugljikohidrata, kloroza i nekroza) (Ondrašek i sur. 2021a, c.), moguće fitotoksičnosti iona (Ni, As, B) (Singh i sur. 1997.), izazvanog salinitete i/ili alkaliteta odnosno oksidativnog stresa (Leclercq-Dransart i sur. 2019.) i moguće toksičnosti neesencijalnim teškim metalima poput Cd i Pb (Goix i sur. 2015.).

6. Zaključak

Kao nusproizvod sagorijevanja biomase u elektranama, biopepeo sve više dobiva na značaju kao potencijalni alat za poboljšanje poljoprivrednih zemljišta. Njegov sastav, koji obiluje esencijalnim mikro- i makroelementima poput Ca, K, P i Mg, čini ga pogodnim za poboljšanje fizikalno-kemijskih svojstava tla. Biopepeo se često promatra kao održiva alternativa sintetskim gnojivima, a njegova primjena u poljoprivredi može značajno smanjiti troškove uz istovremeno smanjenje negativnog utjecaja na okoliš.

Jedna od ključnih prednosti biopepela jest njegova visokoalkalna priroda, koja omogućuje učinkovitu neutralizaciju kiselih tala. U poljoprivrednoj praksi, povećanje pH vrijednosti tla ključno je za poboljšanje apsorpcije mikro- i makroelemenata koji su u kiselim tlima često imobilizirani i nedostupni biljkama. Pravilna primjena biopepela ne samo da poboljšava dostupnost hranjivih tvari, već doprinosi i boljoj strukturi tla, povećanoj obradivosti i boljoj zadržavanju vode.

Iako su prednosti biopepela brojne, potrebno je uzeti u obzir i potencijalne ekološke rizike koji mogu proizići iz njegove primjene. Naime, biopepeo može sadržavati teške metale i druge toksične elemente koji, ako se ne kontroliraju pravilno, mogu predstavljati rizik za okoliš. Kemijski sastav pepela uvelike ovisi o vrsti biomase koja se koristi, tehnologiji sagorijevanja te procesima hlađenja, zbog čega je nužno provesti detaljne analize pepela prije primjene kako bi se izbjegle potencijalne štetne posljedice.

Dugoročna istraživanja također su ključna za daljnju primjenu biopepela u poljoprivredi. Iako su neka istraživanja već pokazala pozitivne rezultate, posebice u kontekstu poboljšanja plodnosti tla i rasta biljaka, potrebno je provesti dodatna istraživanja kako bi se utvrdile optimalne doze pepela za različite vrste tala i kulture. Svako tlo ima specifične karakteristike, a nepravilna ili prekomjerna primjena biopepela mogla bi izazvati neželjene posljedice, poput stresa biljaka ili promjene u mikrobiološkoj ravnoteži tla.

U konačnici, biopepeo predstavlja izuzetno vrijedan resurs s velikim potencijalom za poljoprivrednu primjenu. Njegova pravilna upotreba mogla bi značajno pridonijeti održivoj poljoprivredi, smanjenju troškova i zaštiti okoliša. Međutim, zbog varijabilnosti njegovog sastava i mogućih ekoloških rizika, nužno je provesti detaljne analize i dugoročna istraživanja prije nego što se usvoji kao standardna praksa u poljoprivredi.

7. Popis literature

1. Agrela F., Cabrera M., Martín Morales M., Zamorano M., Alshaaer M. (2019). 2 - Biomass fly ash and biomass bottom ash. New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01898-0> Pristupljeno 13.09.2024.
2. Aronsson K. A., Ekelund N. G. A. (2004). Biological effects of wood ash application to forest and aquatic ecosystems. *Journal of environmental quality*, 33(5), 1595–1605. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.1595>. Pristupljeno 10.09.2024.
3. Asokbunyarat V., van Hullebusch E. D., Lens P. N. L., Annachhatre A. P. (2015). Coal bottom ash as sorbing material for Fe(II), Cu(II), Mn(II), and Zn(II) removal from aqueous solutions. *Water, Air and Soil Pollution*. 143:226. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-015-2415-5>. Pristupljeno 12.09.2024.
4. Biedermann F., Obernberger I. (2005). Ash related problems during biomass combustion and possibilities for sustainable ash utilisation. World renewable conference (WREC)
5. Bolan N., Adriano D. C., Curtin D. (2003). Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *Advances in agronomy*. 78:215–72. [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)78006-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(02)78006-1). Pristupljeno 16.09.2024.
6. Chang A. C., Lund L. J., Page A. L., Warneke J. E. (1977). Physical properties of fly ash-amended soils. *Journal of Environmental Quality*. 6:267–70. <https://doi.org/10.2134/jeq1977.00472425000600030007x>. Pristupljeno 16.09.2024.
7. Comodi P., Zucchini A., Susta U., Cambi C., Vivani R., Cavalaglio G., Cotana F. (2021). Multi-Scale Mineral-Chemical Analysis of Biomass Ashes: A Key to Evaluating Their Dangers vs. Benefits. *Sustainability*. 13, 6052. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/6052#>. pristupljeno 13.09.2024.
8. Cruz N., Avellan A., Ruivo L., Silva F. C., Römkens P. F. A. M., Tarelho L. A. C., Rodrigues S. M. (2023). Biomass ash-based soil improvers: Impact of formulation and stabilization conditions on materials' properties. *Journal of Cleaner Production*, 391, 136049. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136049>. Pristupljeno 13.09.2024.
9. Deokar S. K., Mandavgane S. A., Kulkarni B. D. (2016). Behaviour of biomass multicomponent ashes as adsorbents. *Current Science*. 110(2): 180-186. <https://www.jstor.org/stable/24906743>. Pristupljeno 10.09.2024.
10. Francescato V., Antonini E., Bergomi L.Z., Metschina C., Schnedl C., Krajnc N., Kosciuk K., Gradziuk K., Nocentini G., Stranieri S. (2008). Priručnik o gorivima iz drvene biomase. Regionalna energetska agencija Sjeverozapadne Hrvatske.

11. Gámiz B., Hall K., Spokas K. A., Cox L. (2019). Understanding activation effects on lowtemperature biochar for optimization of herbicide sorption. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100588>. Pristupljeno 13.09.2024.
12. Goix S., Mombo S., Schreck E., Pierart A., Lévêque T., Deola F., Dumat C. (2015). Field isotopic study of lead fate and compartmentalization in earthworm–soil–metal particle systems for highly polluted soil near Pb recycling factory. *Chemosphere*. 138:10–7. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.05.010>. Pristupljeno 13.09.2024.
13. Ivanković T., Hrenović J., Itkos G., Koukouzas N., Kovačević D., Milenković J. (2014). Alkaline disinfection of urban wastewater and landfill leachate by wood fly ash. *Archive of industrial hygiene and toxicology*. 65:365–75. <https://doi.org/10.2478/10004-1254-65-2014-2546>. Pristupljeno 13.09.2024.
14. Jalal M., Pouladkhan A., Harandi O. F., Jafari D. (2015). Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete. *Construction and building materials*. 94:90–104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.001>. Pristupljeno 16.09.2024.
15. Karampinis E., Kourkoumpas D. S., Grammelis P., Kakaras E. (2015), New power production options for biomass and cogeneration. *Wiley interdisciplinary reviews. Energy and Environment*. 4: 471-485. <https://doi.org/10.1002/wene.163>. Pristupljeno 13.09.2024.
16. Leclercq-Dransart J., Demuynck S., Bidar G., Douay F., Grumiaux F., Louvel B, Pernin C., Leprêtre A. (2019). Does adding fly ash to metal-contaminated soils play a role in soil functionality regarding metal availability, litter quality, microbial activity and the community structure of Diptera larvae? *Applied soil ecology*. 138:99–111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.027>. Pristupljeno 12.09.2024.
17. Lopareva-Pohu A., Verdin A., Garçon G., Loun`es-Hadj Sahraoui A., Pourrut B., Debiane D., Waterlot C., Laruelle F., Bidar G., Douay F., Shirali P. (2011). Influence of fly ash aided phytostabilisation of Pb, Cd and Zn highly contaminated soils on *Lolium perenne* and *Trifolium repens* metal transfer and physiological stress. *Environmental pollution*. 159:1721–9. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.02.030>. Pristupljeno 03.09.2024.
18. Maresca A., Hyks J., Astrup T. F. Recirculation of biomass ashes onto forest soils: ash composition, mineralogy and leaching properties. *Waste Manag* 2017;70:127–38. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.008>.
19. Michalik M., Wilczyńska-Michalik W. (2012). Mineral and chemical composition of biomass ash. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.4298.5603>. Pristupljeno 08.07.2024.
20. Mir B. A., Sridharan A. (2013). Physical and compaction behaviour of clay soil–fly ash mixtures. *Geotechnical and geological engineering*. 31:1059–72. <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9632-8>. Pristupljeno 11.09.2024.

21. Moayedi H., Aghel B., Abdullahi M. M., Nguyen H., Safuan A., Rashid A. (2019). Applications of rice husk ash as green and sustainable biomass. *Journal of cleaner production*. 117851:237. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117851>.
22. Moilanen M., Fritze H., Nieminen M., Piirainen S., Issakainen J., Piispanen J. (2006). Does wood ash application increase heavy metal accumulation in forest berries and mushrooms? *Forest ecology and management*. 226:153–60. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.033>. Pristupljeno 11.09.2024.
23. Moilanen M., Silfverberg K., Hokkanen T. J. (2002). Effects of wood-ash on the tree growth, vegetation and substrate quality of a drained mire: a case study. *Forest ecology and management*. 171:321–38. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00789-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00789-7). Pristupljeno 10.09.2024.
24. Munawar M. A., Khoja A. H., Naqvi S. H., Mheran M. T., Hassan M., Liaquat R., Dawood U. F. (2021). Challenges and opportunities in biomass ash management and its utilisation in novel application. *Renewable and sustainable energy reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111451> Pristupljeno 10.09.2024.
25. Odziejewicz J. I., Wołejko E., Wydro U., Wasil M., Jabłońska-Trypuć A. (2022). Utilization of Ashes from Biomass Combustion. *Energies*. 15, 9653. <https://doi.org/10.3390/en15249653>. Pristupljeno 20.07.2024.
26. Olsson B. A., Kellner O. (2002). Effects of soil acidification and liming on ground flora establishment after clear-felling of Norway spruce in Sweden. *Forest ecology and management*. 2002; 158:127–39. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00713-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00713-1). Pristupljeno 10.09.2024.
27. Ondrasek G., Rengel Z., Clode P. L., Kilburn M. R., Guagliardo P., Romić D. (2019.) Zinc and cadmium mapping by NanoSIMS within the root apex after short-term exposure to metal contamination. *Ecotoxicology and environmental safety*. 171:571–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.021>. Pristupljeno 01.09.2024.
28. Ondrasek G., Bubalo Kovačić M., Carević I., Štirmer N., Stipičević S., Udiković-Kolić N., Filipović V., Romić D., Rengel Z. (2021a.) Bioashes and their potential for reuse to sustain ecosystem service and underpin circular economy. *Elsevier*, vol. 151(C).
29. Ondrasek G., Kranjčec F., Maltašić G., Stipičević S. (2021b.). Hardwood fly ash as a low-C waste has strong potential to become a value-added sorbent for removal of the herbicide terbuthylazine from the aquatic matrix. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02088-3>. Pristupljeno 10.09.2024.
30. Ondrasek G., Zovko M., Kranjčec F., Savić R., Romić D., Rengel Z. (2021c.) Wood biomass fly ash ameliorates acidic, low-nutrient hydromorphic soil & reduces metal accumulation in maize. *Journal of clean production*. 283:124650. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124650>. Pristupljeno 23.07.2024.
31. Ondrasek, G., Meriño-Gergichevich, C., Manterola-Barroso, C., Seguel Fuentealba, A., Romero, S.M., Savić, R., Cholin, S.S., Horvatinec, J. (2024). Bio-

- based resources: systemic & circular solutions for (agro)environmental services. RSC Adv. 14, 23466– <https://doi.org/10.1039/D4RA03506B>
32. Pels J.R., de Nie D.S., Kiel J.H. (2005), October. Utilization of ashes from biomass combustion and gasification. In *14th European Biomass Conference & Exhibition* (Vol. 17, pp. 17-21).
 33. Poykiö R, Nurmesniemi H, Dahl O, Makelä M. Chemical fractionation method for characterization of biomass-based bottom and fly ash fractions from large-sized power plant of an integrated pulp and paper mill complex. *Trans Nonferrous Met Soc China* 2014;24:588–96. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63099-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63099-5). Pristupljeno 17.09.2024.
 34. Quirantes M., Calvo F., Romero E., Nogales R. (2016). Soil-nutrient availability affected by different biomass-ash applications. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16(1), 159-163. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162016005000012>. Pristupljeno 12.09.2024.
 35. Romdhane L., Ebinez L. B, Panozzo A., Barion G., Dal Cortivo C., Radhouane L., Vamerli T. (2021). Effects of soil amendment with wood ash on transpiration, growth, and metal uptake in two contrasting maize (*Zea mays* L.) Hybrids to Drought Tolerance. *Frontiers in plant science*. 20(12):661909. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.661909>. Pristupljeno 13.09.2024.
 36. Sadovski, A. N. (2019). Study on pH in water and potassium chloride for Bulgarian soils. *Eurasian Journal of Soil Science*, 8(1), 11-16. <https://doi.org/10.18393/ejss.477560>. Pristupljeno 10.10.2024.
 37. Sahu G., Bag A. G., Chatterjee N., Kumar A. (2017). Potential use of flyash in agriculture: A way to improve soil health. *Journal of pharmacognosy and phytochemistry*. 6:873–80.
 38. Sarkar A., Rano R., Mishra K. K., Mazumder A. (2008). Characterization of cenospheres collected from ash-pond of a super thermal power plant. *Energy sources. Part A. Recovery, utilisation, and environmental effect*. 30:271–83. <https://doi.org/10.1080/00908310600713883>. Pristupljeno 14.09.2024.
 39. Schiemenz K., Kern J., Paulsen H., Bachmann S., Eichler-Lobermann B. (2011). Phosphorus Fertilizing Effects of Biomass Ashes. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19354-5_2. Pristupljeno 15.09.2024.
 40. Scolow R., Hotinski R., Greenblatt J. B., Pacala S. (2010). Solving the climate problem: technologies available to curb CO₂ emissions. *Environment: Science and policy for sustainable environment*. 46; 8-19. <https://doi.org/10.1080/00139150409605818>. Pristupljeno 13.09.2024.
 41. Singh A. K., Masto R. E., Hazra B., Esterle J., Singh P. K. (2020). Utilization of coal and biomass ash. *Ash from coal biomass combust., cham: springer international publishing*. 89-37. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56981-5_3. Pristupljeno 15.09.2024.
 42. Singh S. N. N., Kulshreshtha K., Ahmad K. J. J. (1997). Impact of fly ash soil amendment on seed germination, seedling growth and metal composition of

- Vicia faba L. *Ecological Engineering*. 9: 203–8. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(97\)10004-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(97)10004-0).
43. Sivaram A. K., Logeshwaran P., Subashchandrabose S. R., Lockington R., Naidu R., Megharaj M. (2018). Comparison of plants with C3 and C4 carbon fixation pathways for remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon contaminated soils. *Scientific reports*. 8:2100. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20317-0>. pristupljeno 16.09.2024.
44. Szostek, M., Szpunar-Krok, E., Ilek, A. (2023). Chemical Speciation of Trace Elements in Soil Fertilized with Biomass Combustion Ash and Their Accumulation in Winter Oilseed Rape Plants. *Agronomy*. 13, 942. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030942>. Pristupljeno 21.08.2024.
45. Špoljar, A. (2015). *Pedologija*. Visoko gospodarsko učilište, Križevci
46. Tao G., Geladi P., Lestander T. A., Xiong S. (2012). Biomass properties in association with plant species and assortments. II: a synthesis based on literature data for ash elements. *Renewable and sustainable energy Review*. 16:3507–22. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.023>.
47. Tao G., Geladi P., Lestander T. A., Xiong S., Geladi P., Xiong S. (2012). Biomass properties in association with plant species and assortments I: a synthesis based on literature data of energy properties. *Renew Sustain Energy Rev*. 16:3481–506. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.039>. Pristupljeno 10.09.2024.
48. 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. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.001>. Pristupljeno 21.08.2024.
49. Vassilev S., Baxter D., Andersen L., Vassileva C. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. *Fuel*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041>. Pristupljeno 13.08.2024.
50. Vassilev S., Vassileva C., Bai J. (2023). Content, modes of occurrence, and significance of phosphorous in biomass and biomass ash. *Journal of the Energy Institute*. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101205>. Pristupljeno 08.09.2024.
51. Vukadinović V., Vukadinović V. (2011). *Ishrana bilja*. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Poljoprivredni fakultet u Osijeku. 442
52. Wenzel W. W., Fitz W. J., Dellantonio A., Kupusovć T., Custovic H., Jabučar D., Zerem N., Haznadarević M., Markovic M., Babic M. et al. *Prirucnik o tretmanu odlagališta pepela*. Beč, 2008.
53. Wójcik M., Stachowicz F., Masłoń A. (2020). The Use of Wood Biomass Ash in Sewage Sludge Treatment in Terms of Its Agricultural Utilization. *Waste Biomass*

- Valoriz. 11, 753–768. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0518-0>. Pristupljeno 21.08.2024.
54. Yargicoglu E. N., Sadasivam B. Y., Reddy K.R., Spokas K. (2015). Physical and chemical characterization of waste wood derived biochars. *Waste Management*. 36:256–68. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.029>.
55. Zagvozda M., Dimter S., Rukavina T., Netinger Grubeša I. (2018). Possibilities of bioash application in road building. *Građevinar*. 70 (5): 393-402. <https://doi.org/10.14256/JCE.2074.2017>. Pristupljeno 10.07.2024.
56. Zając G., Szyszlak-Bargłowicz J., Gołębiowski W., Szczepanik M. (2018). Chemical Characteristics of Biomass Ashes. *Energies*. 11, 2885. <https://doi.org/10.3390/en11112885>. Pristupljeno 28.08.2024.
57. Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (2023). Narodne novine [online] 138/21. https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2023_06_70_1164.html Pristupljeno: 03.07.2024.

Životopis

Barbara Mraz rođena je 24. prosinca 2024. godine u gradu Zaboku u Krapinsko – zagorskoj županiji. Pohađala je Srednju školu Zabok, smjer komercijalist u razdoblju 2014. – 2017. godine. 2019. godine završila je obuku za rad u operativi vatrogasne postrojbe. 2020. godine upisala je Agronomski fakultet u Zagrebu, smjer Biljne znanosti. Redovito sudjeluje u volonterskim akcijama (festivali, utrke) i tajnica je u neprofitnoj kulturno – umjetničkoj udruzi. Vrlo dobro govori i piše na engleskom jeziku.