

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



*UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
VODARSTVA IN
KOMUNALNEGA
INŽENIRSTVA*

Kandidatka:

BELMIRA MURATOVIĆ

Razvoj postopkov predelave odpadnih lesnih pepelov

Diplomska naloga št.: 177

**Development of treatment processes for the waste wood
ash**

Graduation thesis No.: 177

Mentor:
prof. dr. Viktor Grilc

Predsednik komisije:
doc. dr. Dušan Žagar

Somentor:
doc. dr. Tjaša Greissler Bulc

Ljubljana, 2011

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

IZJAVE

Podpisana Belmira Muratović izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »Razvoj postopkov predelave odpadnih lesnih pepelov«.

Izjavljam, da je elektronska različica povsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 5.12.2011

Belmira Muratović

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali naslednji učitelji:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	621.039.73:662.613.11 (043.2)
Avtor:	Belmira Muratović
Mentor:	izr. prof. dr. Viktor Grilc
Somentorica:	doc. dr. Tjaša Greissler Bulc
Naslov:	Razvoj postopkov predelave odpadnih lesnih pepelov
Tip dokumenta:	Dipl. nal. - UNI
Obseg in oprema:	51 str., 18 pregl., 7 sl., 9 graf.
Ključne besede:	odpadni lesni pepel, biomasa, stabilizacija, recikliranje, kompost, dehidrirano blato

Izvleček

Odpadni lesni pepel je kakovosten odpadek kurjenja lesa, ki ima preveliko vrednost, da bi ga odlagali in ne s pridom izkoriščali. Njegova neposredna uporaba na različnih področjih je omejena, predvsem zaradi njegove praškaste konsistence, vsebnosti vodotopnih snovi, vsebnosti nezgorelega lesa (oglja) in bazičnosti. Z relativno enostavnimi postopki ga lahko privedemo v obliko primerno za snovno izrabo oz. za odlaganje. Ti postopki so: spontana ali vsiljena karbonatizacija, granuliranje, integriranje odpadka v zemeljski izkop oz. priprava umetne zemljine ali integriranje v drug komplementaren odpadek (komposti, blata ...).

V diplomski nalogi sem predstavila možne postopke ravnanja z odpadnimi lesnimi pepeli pri nas in v Evropi ter v eksperimentalnem delu naloge prikazala enega od postopkov predelave odpadnega lesnega pepela v stabiliziran proizvod. Različne količine odpadnega lesnega pepela sem integrirala v dva prav tako odpadna materiala, to je dehidrirano blato iz čistilne naprave in kompost. Mešanice so se pod ustreznimi zunanji pogoji, to je zadostni vlagi in prezračenosti, starale in tako stabilizirale. Po preteku dveh mesecev sem dobila proizvode z ustreznimi lastnostmi, ki omogočajo njihovo uporabo na različnih področjih. Bodisi za sanacijo gozdnih in degradiranih tal, kot prekrivka odlagališč ali drugih odpadkov (rudarskih jalovin), v gradbeništvu, za razna sanacijska zemeljska dela, še najbolj pa se uporabljajo v kmetijstvu za gnojenje in izboljševanje kislih prsti, kar omogoča njegova bogata mineralna struktura in ustrezen pH.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 621.039.73:662.613.11 (043.2)
Author: Belmira Muratović
Supervisor: Assoc. Prof. Viktor Grilc, Ph.D.
Cosupervisor: Assist. Prof. Tjaša Greissler Bulc, Ph.D.
Title: Development of treatment processes of the waste wood ash
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 51 p., 18 tab., 7 fig., 9 graph.
Keywords: wood ash, biomass, stabilization, recycling, compost, dehydrated sludge

Abstract

Wood ash is a high quality waste that is generated by thermal utilization of fresh and waste wood. The material is too valuable to waste it. Ashes are often found unsuitable for disposal at landfills or for direct application due to their dusty consistency, high content of soluble substances and unburned carbon or their alkalinity. With relatively simple procedures we can make it to a form suitable for utilization or disposal. These processes are: spontaneous or forced carbonization, granulation, preparation of artificial soil or their integration into other complementary waste like compost and digestate sewage sludge.

Options of handling wood ashes are represented in this study. At first the treatment of waste wood ashes in Slovenia and Europe is presented. In the experimental part an attempt to integrate different portions of wood ashes into compost and dehydrated sewage sludge is studied, to get a stabilized product. After two months of aging, under appropriate external conditions, I get the end products that have some quality characteristics that allow their use in various areas. It can be used for rehabilitation degraded forests and soil, for landfill cover, for covering mine tailings, in construction or for fertilization in agriculture and improvement of acidic soils, which allows mineral structure and the corresponding pH of these products.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Viktorju Grilcu za vodenje in strokovno pomoč, natančne preglede ter svetovanja pri izvajanju eksperimentalnih analiz in pri nastajanju teoretičnega dela diplomske naloge.

Zahvaljujem se somentorici doc. dr. Tjaši Greissler Bulc za temeljit pregled diplomske naloge.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	v
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	vi
KAZALO PREGLEDNIC.....	x
KAZALO GRAFIKONOV	xi
KAZALO SLIK	xii
OKRAJŠAVE IN SIMOBLI.....	xiii
SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK	xv
1 UVOD	1
1.1 Vsebina diplomske naloge.....	1
1.2 Namen in cilji naloge.....	2
1.3 Delovna hipoteza	2
1.4 Razvoj reševanja problematike odpadnega lesnega pepela	3
2 TEORETIČNI DEL	7
2.1 Biomasa	7
2.1.1 Lesna biomasa	7
2.1.2 Odvečno blato bioloških čistilnih naprav	8
2.1.3 Komposti	8
2.2 Odpadna lesna biomasa in lesni odpadki.....	9
2.2.1 Vrste lesnih odpadkov	9
2.2.2 Raba lesne biomase	9
2.2.3 Mejne vrednosti za kakovost odpadne lesne biomase in lesnih odpadkov.....	10
2.2.4 Vpliv termične izrabe lesne biomase na okolje.....	11
3 LESNI PEPEL	12
3.1 Kemična sestava	12
3.2 Težke kovine in organska onesnaževala.....	12
3.3 Klasifikacija lesnih pepelov.....	14
3.4 Količina nastalih lesnih pepelov.....	14
3.5 Zakonski predpisi in omejitve glede ravnanja z odpadnim lesnim pepelom.....	15
3.5.1 Uredba o ravnanju z odpadki (Ur. l. RS, št. 34/08).....	16
3.5.2 Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališča (Ur. l. RS, št. 61/11)	16
3.5.3 Uredba o obremenjevanju tal z vnašanjem odpadkov (Ur. l. RS, št. 34/08 in 61/11)	17
3.5.4 Uredba o mejnih vrednostih vnosa nevarnih snovi in gnojil v tla (Ur. l. RS, št. 84/05)	18

3.6	Stabilizacija odpadnega lesnega pepela.....	18
3.7	Problematika ravnanja z lesnim pepelom v Sloveniji in EU	20
3.7.1	Odstranjevanje pepela	20
3.7.2	Recikliranje in uporaba	21
3.7.3	Možnosti ravnanja z odpadnim lesnim pepelom v Evropi	23
3.7.4	Recikliranje lesnega pepela na gozdnih površinah.....	23
3.7.5	Gnojenje kmetijskih zemljišč in izboljšanje kislih prsti.....	24
3.7.6	Uporaba na odlagališčih odpadkov	24
3.7.7	Uporaba v geotehniki	24
4	EKSPERIMENTALNI DEL	26
4.1	Materiali in metode.....	26
4.1.1	Značilnosti delovnih materialov	26
4.1.2	Priprava vzorcev mešanic za stabilizacijo.....	27
4.1.3	Določitev vlage materiala (odpadka)	29
4.1.4	Priprava standardnih izlužkov	30
4.1.5	Separacija izlužka od trdne faze po izluževanju	30
4.1.6	Merjenje pH	32
4.1.7	Določanje sušilnega ostanka	32
4.1.8	Določanje raztopljenega organskega ogljika – DOC	32
5	REZULTATI.....	33
5.1	Opazovanje in vrednotenje vzorcev	33
5.1.1	Fizična konsistenca in vlaga vzorcev	33
5.2	Mešanice odpadnega suhega pepela in komposta	34
5.3	Mešanice odpadnega mokrega pepela in komposta.....	37
5.4	Mešanice odpadnega suhega pepela in dehidriranega blata	40
6	DISKUSIJA.....	43
6.1	Vrednotenje rezultatov standardnih izlužkov staranih mešanic	43
6.2	Primerjava neobdelanega in stabiliziranega odpadnega lesnega pepela.....	44
6.3	Potrditev hipotez.....	45
7	ZAKLJUČEK	46
VIRI.....		47

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Limitni parametri in njihove mejne vrednosti svežega in odpadnega lesa.....	10
Preglednica 2: Kemijska sestava različnih pepelov	13
Preglednica 3: Klasifikacija lesnega pepela	14
Preglednica 4: Delež pepela različnih biomasnih goriv	15
Preglednica 5: Količina v RS nastalih lesnih pepelov v letu 2008-2010	15
Preglednica 6: Mejne vrednosti parametrov izlužka nenevarnih odpadkov (L/S = 10 l/kg).....	16
Preglednica 7: Mejne vrednosti parametrov izlužka odpadkov z visoko vsebnostjo biološko razgradljivih snovi (L/S = 10 l/kg).....	17
Preglednica 8: Največje vrednosti anorganskih parametrov umetno pripravljene zemljine, ki je namenjena rekultivaciji tal	17
Preglednica 9: Največje vrednosti nevarnih snovi v blatu, mulju in kompostu	18
Preglednica 10: Količine predelanih in odstranjenih odpadnih lesnih pepelov v letu 2008-2010	22
Preglednica 11: Lastnosti uporabljenih materialov	27
Preglednica 12: Lastnosti standardnih izlužkov osnovnih materialov	27
Preglednica 13: Sestava mešanic svežega komposta in suhega pepela.....	28
Preglednica 14: Sestava mešanic svežega komposta in mokrega pepela	28
Preglednica 15: Sestava mešanic dehidriranega blata in suhega pepela	28
Preglednica 16: Vrednosti parametrov v izlužku mešanic suhega pepela in komposta	34
Preglednica 17: Vrednost parametrov v izlužku mešanic mokrega pepela in komposta	37
Preglednica 18: Vrednosti parametrov v izlužku mešanic suhega pepela in blata.....	40

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Prikaz pH vrednosti izlužkov iz mešanic od A-E v odvisnosti od časa.....	35
Grafikon 2: Prikaz vrednosti sušilnega ostanka (mg/l) izlužkov mešanic od A-E v odvisnosti od časa.....	35
Grafikon 3: Prikaz vrednosti DOC (mg/l) mešanic od A-D v odvisnosti od časa	36
Grafikon 4: Prikaz pH vrednosti izlužkov mešanic od A'-E' v odvisnosti od časa	38
Grafikon 5: Prikaz vrednosti sušilnega ostanka (mg/l) izlužkov mešanic od A'-E' v odvisnosti od časa	38
Grafikon 6: Prikaz vrednosti DOC (mg/l) mešanic od A'-D' v odvisnosti od časa	39
Grafikon 7: Prikaz pH vrednosti izlužkov mešanic od 1-4 v odvisnosti od časa	41
Grafikon 8: Prikaz vrednosti sušilnega ostanka (mg/l) izlužkov mešanic od 1-4 v odvisnosti od časa	42
Grafikon 9: Prikaz vrednosti DOC (mg/l) izlužkov mešanic od 1-4 v odvisnosti od časa.....	42

KAZALO SLIK

Slika 1: Dozorel, stabiliziran, zdrobljen in presejan odpadni lesni pepel v kupih	20
Slika 2: Pepel v cestogradnji	25
Slika 3: IR vlagomer.....	29
Slika 4: Izluževalne posode z magnetnimi mešali.....	30
Slika 5: Laboratorijska centrifuga	31
Slika 6: Filtriranje.....	31
Slika 7: Prefiltrirani izlužki vzorcev od A-E, A'-B' in 1-4	32

OKRAJŠAVE IN SIMOBLI

Al	Aluminij
Al ₂ O ₃	Aluminijev oksid
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
As	Arzen
B	Bor
Ba	Barij
BČN	Biološka čistilna naprava
Ca	Kalcij
CaCO ₃	Kalcijev karbonat
Ca(OH) ₂	Kalcijev hidroksid
CO ₂	Ogljikov dioksid
Cd	Kadmij
Cl	Klor
Cr	Krom
Cu	Baker
DOC	Raztopljeni organski ogljik
F	Fluor
Fe	Železo
Fe ₂ O ₃	Železov oksid
Hg	Živo srebro
IR	Infrardeča
K	Kalij
K ₂ O	Kalijev oksid
Mo	Molibden
Mg	Magnezij
MgO	Magnezijev oksid
Na	Natrij
Na ₂ O	Natrijev oksid
Ni	Nikelj
OVE	Obnovljivi viri energije
Pb	Svinec
S	Žveplo
Si	Silicij
SiO ₂	Silicijev dioksid

SO ₃	Žveplov trioksid
TOC	Totalni organski ogljik
Ur. l. RS	Uradni list Republike Slovenije
V	Vanadij
ZGS	Zavod za Gozdove Slovenije
Zn	Cink

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

Izlužek je raztopina pridobljena z laboratorijskim testom izluževanja odpadka.

Karbonatizacija je kemijski proces, ki nastane z reakcijo (vezavo) ogljikovega dioksida in snovi(oksidi) na površini trdnega materiala.

Obdelava odpadkov zajema postopke predelave in odstranjevanja odpadkov.

Odpadek je vsaka snov ali predmet, ki ga imetnik ne more ali ne želi uporabiti, ga ne potrebuje, ga moti ali mu škodi in ga zato zavrže, namerava ali mora zavreči. Razvrščeni so v eno od skupin odpadkov, določenih v klasifikacijskem seznamu odpadkov (Ur. l. RS, št. 84/98).

Odpadno blato je odpadek, ki nastane po čiščenju odpadne vode v čistilnih napravah ali ostaja kot blato ob praznjenju greznic za odpadno vodo iz gospodinjstev.

Odstranjevanje odpadkov je namenjeno končni oskrbi odpadkov, ki jih ni mogoče predelati in zajema predvsem obdelavo odpadkov z biološkimi, termičnimi ali kemično-fizikalnimi metodami in odlaganje odpadkov (Ur. l. RS, št. 84/98).

Predelava odpadkov so postopki namenjeni koristni uporabi odpadkov ali njihovih sestavin in zajemajo predvsem pripravo odpadka za ponovno uporabo, recikliranje snovi v odpadkih, njihov sežig ali sosežig z energetsko izrabo (kot na primer sortiranje) in predelavo odpadkov v gorivo. Sežig odpadkov z namenom njihovega odstranjevanja ni predelava odpadkov (Ur. l. RS, št. 84/98).

Raztopljeni organski ogljik je kemijski parameter, ki ga določamo v izlužku odpadka in izraža raztopljeno vsebnost organskega ogljika.

Rekultivacija tal je biološka obnova zgornje plasti tal.

Skladiščenje odpadkov je skladiščenje za največ tri leta pri izvajalcu obdelave odpadkov. Za obdobje daljše od treh let, gre za odlaganje odpadkov.

Totalni organski ogljik je kemijski organski parameter, ki izraža skupno vsebnost organskega ogljika v odpadku.

Umetno pripravljena zemljina je material, ki se pridobi s predelavo zemeljskega izkopa in drugih mineralnih nenevarnih odpadkov, in je v svojih značilnostih podoben naravnim tlom ali podtalju in lahko prevzema vse pomembne naloge tal.

Začasno skladiščenje je skladiščenje odpadkov na kraju nastanka (pri povzročitelju), pred njihovo oddajo v zbiranje ali obdelavo.

1 UVOD

Med vsemi oblikami biomase kot so trave, energetske rastline, rastlinska olja, odpadna biološka blata itd., je les najbolj znana oblika in jo kot vir energije najpogosteje uporabljamo. Les je že od nekdaj nenadomestljiva surovina pri zadovoljevanju vsakodnevnih človekovih potreb (kuhanje in ogrevanje, izdelava opreme itd.). Danes se masovno izkorišča v lesno- predelovalnih industrijah, gradbeništvu, trgovini (embalaža), prometu in komunalnem sektorju.

Najprimernejša metoda odstranjevanja odpadne biomase, ko se je ne da več predelati v uporabne sekundarne surovine, je termično izkoriščanje. Zaradi tehnološkega razvoja ogrevalnih sistemov na lesno biomaso in povpraševanja v velikih energetskih sistemih (termoelektrarni Trbovlje in Šoštanj ter Termoelektrarna toplarna Ljubljana) sveža in odpadna lesna biomasa še bolj pridobivata na pomenu.

Negativni stranski produkt teh dejavnosti pa je velika količina nastalih odpadnih lesnih pepelov, ki so breme za okolje in zahtevajo pravilno in načrtno ravnanje.

Lesni pepel je trden mineralni ostanek, ki je po sestavi specifičen in za določene uporabe zelo kakovosten. Njegova sestava omogoča različno uporabo. Zaradi njegove zanimive mineralne vsebnosti so še posebno primerne naslednje metode ravnanja:

- reciklaža na kmetijske ali gozdne površine, lahko v stabilizirani obliki pepela ali pomešanega s kompostom, blatom bioloških čistilnih naprav ali kakim drugim neonesnaženim mineralno-organskim odpadkom
- uporaba na odlagališčih
- uporaba v geotehniki.

Problem je le v neposredni uporabi ali odlaganju, ki praviloma nista dopustni zaradi preseganja limitnih parametrov pri izluževanju in povzročanja emisij prahu (Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališča (Ur. l. RS, št. 61/11)). Zato je lesni pepel potrebno predhodno stabilizirati.

1.1 Vsebina diplomske naloge

Diplomsko delo obsega pregled in proučevanje razpoložljive literature s področja gospodarjenja z odpadnimi bio masnimi (predvsem lesnimi) pepeli. Natančneje opisuje njegovo naravo in sestavo, probleme pri ravnanju v svežem stanju, njegovo predelavo ter ponovno uporabo.

Prvi del diplome zajema tuja in domača teoretična spoznanja, informacije in podatke potrebne za razumevanje in čim bolj natančen prikaz potencialnih načinov ravnanja z odpadnimi lesnimi pepeli.

Drugi del diplome predstavlja eksperimentalna naloga s katero sem poskušala ugotoviti primernost nekaterih izbranih postopkov predelave odpadnih lesnih pepelov z njihovim integriranjem v druge odpadne snovi za potrebe uporabe v prostoru.

1.2 Namen in cilji naloge

Glavni namen in cilj diplomske naloge je navesti karakteristične lastnosti izbranih vzorcev lesnega pepela, razviti možne postopke njegove predelave v stabiliziran proizvod primeren za integriranje v drug podoben oz. komplementaren odpadek, kot so dehidrirana blata iz čistilnih naprav in komposti z možnostjo končne uporabe pridobljene mešanice za razne namene v okolju.

Cilj je dobiti končen produkt, ki bi imel pozitivne značilnosti obeh odpadnih snovi kot so bogata mineralna struktura, manjša topnost, ustrezen pH in primerna hranilnost. Dobljene proizvode bi lahko uporabljali za sanacijo onesnaženih, degradiranih ali izčrpanih tal, za prekrivanje odlagališč, za rekultivacijo površin v gradbeništvu, lahko pa tudi v kmetijstvu za gnojenje in izboljševanje kislilnih prsti, kar omogoča bogata mineralna struktura, ustrezna tekstura in ustrezen pH.

1.3 Delovna hipoteza

Odpadni lesni pepel je sam po sebi kakovosten in za razne potencialne namene uporaben ostanek kurjenja lesa. Vendar je zaradi svoje močne alkalnosti, velike vodotopnosti in prašnosti v sveže nastalem stanju neprimeren za neposredno uporabo. Zato sem poskusila izvršiti njegovo stabilizacijo z umešanjem in staranjem v dveh drugih odpadnih materialih, to sta: a) blato iz KČN in b) sveži kompost. Poskušala sem dokazati naslednje predpostavljene hipoteze:

- (1) pH mešanic se bo zaradi kislilnih komponent v izbranih dveh odpadkih sčasoma upadel
- (2) zmanjšala se bo tudi vsebnost drugih vodotopnih snovi
- (3) v sprejemljivem času staranja bo pridobljen stabilen proizvod ustreznih značilnosti, ki ne bodo presegle predpisanih mejnih vrednosti za uporabo v kmetijstvu ali za sanacijska zemeljska dela.

1.4 Razvoj reševanja problematike odpadnega lesnega pepela

Lesni pepel predstavlja trdni ostanek termične obdelave lesne biomase, ki se danes široko uporablja, kar povzroča nastanek pepelov v velikih količinah. Na njegovo količino ter fizikalne in kemijske lastnosti vpliva več dejavnikov: vrsta lesa, rastišče in sestavine goriva (les, skorja, listje, nečistoče), za odpadni les njegova predhodna uporaba (vrsta lesnih odpadkov), procesni parametri pri kurjenju ter tudi pogoji zbiranja in shranjevanja pepela. Te lastnosti določajo kvaliteto pepela in njihovo primernost za nadaljnje uporabe. Lesni pepel vsebuje pomembne makro in mikro elemente, ki jih je potrebno izkoristiti. Danes odpadni lesni pepel nastaja v velikih količinah predvsem zaradi sežiganja sveže ali odpadne biomase za pridobivanje toplotne in električne energije. Sežig onesnaženega lesa lahko povzroči tudi vsebnost težkih kovin in organska onesnažila, ki jih je nujno potrebno omejiti (Knapp & Insam, 2011). Demeyer et al. (2001) so preučevali lastnosti pepelov iz lesnih industrij in elektrarn. Predstavljene so fizikalne, kemijske in mineraloške značilnosti pepelov, njihov vpliv na lastnosti tal in plodnost, rast vegetacije ter posledice za okolje. Osnovni elementi (kalij, kalcij, magnezij) so v različnih vrstah lesnih pepelov prisotni v različnih koncentracijah. Kemična struktura je ključnega pomena in daje prednost izkoriščanju pepela pred odlaganjem. Zadovoljive rezultate in pozitivne učinke, ki kažejo da je uporaba smiselna, dokazujejo številni avtorji. Demeyer et al. (2001) so ugotovili, da je pepel zaradi svoje alkalnosti najbolj uporaben za izboljšanje kislih prsti saj povečuje pH, ustvarja ravnovesje snovi v tleh in vpliva na boljšo rast rastlin. Ugotovili so, da uporaba lesnega pepela v kmetijstvu in gozdarstvu ne predstavlja večjih nevarnosti za okolje pod pogojem, da je uporabljen v zmernih količinah in da se uporablja samo pepel iz gorenja čistega neonesnaženega lesa.

Lesni pepel je načeloma nenevaren odpadek zanimive mineralne vsebnosti vendar ni inerten odpadek, zato ga je potrebno pred uporabo stabilizirati. Vzrokov za načrtovano upravljanje ravnanja s pepelom je več: njegova praškasta konsistenca, vsebnost vodotopnih snovi, vsebnost nezgorelega lesa (oglja) in bazičnost. Grilc & Husić (2010) sta predstavila različne postopke stabilizacije ter primerjala proces spontane in vsiljene karbonatizacije. S staranjem pepela na zraku poteka vezava zračnega CO₂ na okside alkalijskih in zemljoalkalijskih kovin v pepelu (K, Ca, Mg). Nastali karbonati so mnogo manj topni in alkalni od oksidov, zato postane pepel primeren za odlaganje. Naravni proces karbonatizacije oksidov v pepelu je zaradi majhne vsebnosti CO₂ v zraku slabo učinkovit, zato so ga izboljšali z uvajanjem CO₂ iz drugih virov (največkrat kar dimnih plinov iz kurišča). Rezultati so pokazali, da spontana karbonatizacija poteče hitreje (v 3-4 tednih) od vsiljene (dva meseca), vendar pa je količina vezanega plina pri slednji dvakrat večja.

Poznamo pa tudi druge postopke predelave odpadnega lesnega pepela. Recikliranje lesnega pepela so Kuba et al. (2008) izvedli tako, da so organskim odpadkom (kompost) pred kompostiranjem primešali

različne odmerke lesnega pepela in opazovali reakcije. Med samim procesom so merili temperaturo in CO_2 , C/N razmerje, mikrobnost aktivnost ter zrelih končnih produktom pH vrednost, električno prevodnost, koncentracijo hranil in vsebnost težkih kovin. Podobno študijo so naredili Insam et al. (2009), kjer so raziskali uporabo mešanice lesnega pepela in blata kot gnojilo ter kako bi tako gnojenje vplivalo na mikrobiološke lastnosti tal in rast rastlin. Drugi cilj pa je bil ugotoviti ali preveliki odmerki lahko povzročijo okoljsko onesnaževanje z vidika spiranja nitratov in če se te težave lahko omeji z dodatkom drugih glinenih mineralov kot je vermikulit. Med drugim je ta znan po tem, da poveča aktivnost v tleh, zadržuje ione, uravnava vlažnost in izboljšuje zračnost. Ugotovili so, da anaerobno blato v kombinaciji z lesnim pepelom v zmernih dozah izboljša talne parametre, mikrobnost aktivnost in sestavo bakterijske skupnosti. Tudi visoke količine dodanega blata ne povzročajo izpiranja nitratov, pojavi se le visoka vsebnost soli, ki lahko negativno vplivajo na rast rastlin. Te učinke se da, vsaj delno, ublažiti z uporabo vermikulita. Na podlagi dobljenih podatkov avtorji sklepajo, da je kombinacija blata in pepela obetavna, priporočajo pa uporabo manjših količin mešanice.

Grilc et al. (2010) prav tako potrjujejo, da produkt ima zanimive nove lastnosti in ga lahko uporabljamo v gradbeni industriji ali kot prekrivko na odlagališčih. Kot prekrivni material se lahko uporabi tudi za dolgoročno odlaganje odpadkov, ki na zraku in v stiku z vodo predstavljajo nevarnost za okolje (npr. rudarske odpadke bogate z žveplom). Prekrivni material preprečuje difuzijo kisika in vdor vode v odpadke (Bjurström & Herbert, 2009).

Bougnom et al. (2009, 2010) so z različnimi laboratorijskimi analizami nakazali, da kompost z dodatkom pepela ne predstavlja nevarnosti in ponuja nove priložnosti za trajnostno uporabo v kmetijstvu. Proučevali so odziv nekaterih lastnosti tal in rast soje. Izbrani vzorci prsti so bili narejeni iz 0%, 8% in 16% pepela, ki so jih preizkušali na dveh vrstah kisljih tal. Učinkovitost pepela se je izkazala v dvigu pH prsti, manjše izpiranje elementarnega ogljika in nitratov. Zaznani niso bili nobeni škodljivi vplivi na C/N razmerje. Boljše rezultate pa so dobili z manjšo količino pepela (8%). Na samo rast soje pa dodatek mešanice komposta in pepela ni bistveno vplival, kar avtorji pripisujejo zelo kisljim tlam, ki ne ustvarjajo optimalnih pogojev za njeno rast.

Poleg boljšega končnega produkta se izboljšajo tudi reakcije znotraj procesa kompostiranja.

Bougnom et al. (2009, 2010) so dokazali, da z dodatkom pepela lahko stimuliramo različne procese, ki se pojavijo s kompostiranjem: manjše uhajanje amonijaka ter večjo mikrobnost aktivnost. Bougnom et al. (2011) so ugotovili, da če ga dodamo na začetku kompostiranja, izboljša sam proces in kvaliteto končnega produkta. Ustrezna količina pepela ima pozitiven učinek na fizikalne, kemijske in biološke lastnosti prsti.

Kuroła et al. (2011) so prav tako spremljali spremembe med procesom kompostiranja. Raziskali so kako dodani različni odmerki odpadnega lesnega pepela vplivajo na spremembo pH vrednosti v

procesu kompostiranja bioloških odpadkov. Opazovani so bili fizični, kemični in biološki parametri procesa z dodajanjem nizkih odmerkov, 2-8%. Delovna hipoteza je bila, da bi se z dodatkom lesnega pepela v zgodnjih fazah povečala učinkovitost kompostiranja. Sočasno bi se zmanjšalo tveganje za nastanek nevarnih, smrdljivih plinov.

Rezultati so pokazali povezavo med nizkim začetnim pH-jem in počasnim dvigom temperature. Lesni pepel je dvignil pH, temperaturo kompostiranja in mikrobo aktivnost, poleg tega pa še spodbudil mineralizacijo. Glede na rezultate, 4-8% odpadnega lesnega pepela zadostuje, da potečejo učinkovite biološke reakcije v procesu in dobimo ekološko varen ter mineralno bogat produkt.

Pomembno pa je postopek integriranja izvesti do konca in dobiti ustrezen produkt. Parametre, ki dokazujejo končno kakovost produkta so raziskovali Zmora-Nahum et al. (2005). Avtorji so na treh različnih vrstah kompostov pripravljenih z različnimi procesi, opazovali kemijske parametre in njihov vpliv na rast kumaric. Med vsemi izmerjenimi parametri je s časom staranja oz. kompostiranja največjo spremembo dosegel kemijski parameter DOC. Koncentracija raztopljenega organskega ogljika se je v vseh kompostih hitro zmanjšala v prvem mesecu potem pa se proti koncu procesa ustalila pri koncentraciji pod 4 g/kg. Sama sprememba je tudi zelo povezana z C/N razmerjem. Nihanje dušikovih spojin je bilo podobno pri vseh kompostih. Večji in boljši vpliv na rast rastlin so dosegli s kompostom, ki je bil dalj časa kompostiran in ko je raven DOC padla pod 4 g/kg. Glede na dobljene podatke avtorji predlagajo uporabo DOC vrednosti za enostavno določanje stopnje zrelosti kompostov različnih virov in procesov. Ti podatki, bi lahko pomagali tudi raziskovalcem in proizvajalcem kompostov za določanje splošnega indeksa kakovosti in področja njihove uporabe.

Z recikliranjem odpadnega lesnega pepela na ta način lahko z eno potezo zadovoljimo dva cilja: zmanjšamo količino odloženih odpadkov in dobimo boljši ekološki produkt, ki predstavlja alternativo drugim kemijskim gnojilom (Kuba et al., 2008). Na primer, razlika med tradicionalnim apnom in mešanico pepel – kompost je ta, da ima kompost, ki je bil pripravljen z lesnim pepelom večji potencial od apnenja in lahko z manjšo količino komposta privede pH tal do ustrezne ravni. Poleg tega pa je ekološko sprejemljiv ter bolj poceni proizvod od tradicionalnega apna. (Bougnom et al., 2011).

Manjša količina odloženih odpadkov, ki jo s takim načinom ravnanja dosežemo izpolnjuje tudi zahteve zakonodaje. Evropski predpisi nalagajo ravnanje po hierarhični lestvici, kjer je odlaganje predstavljeno kot zadnja možnost. Neposredno odlaganje je na sploh prepovedano. Zakonodaja v Sloveniji zahteva spoštovanje predpisanih omejitev vezanih na uporabo in odlaganje odpadkov. Odlaganje blata na odlagališčih ureja Uredba o odlaganju odpadkov (Ur. l. RS, št. 61/11), ki podaja naslednje mejne vrednosti za izlužke odpadkov z visoko vsebnostjo biorazgradljivih snovi:

maksimalen pH je 13, vodotopnost snovi 60 000 mg/l in DOC 7500 mg/l. Z različnimi poskusi je bilo ugotovljeno, da če ta dva odpadka (pepel in blato) pravilno kombiniramo dobimo mešanico, katere lastnosti osnovnih parametrov, segajo pod te mejne vrednosti (Grilc et al., 2010).

Z izboljšanjem in razvojem znanja o ravnanju in uporabi ostankov izgorevanja so se povečale tudi možnosti za širšo uporabo. Največji napredek so doživele predvsem skandinavske države, med njimi najbolj izstopa Švedska, ki je to dosegla v okviru raziskovalnega programa "Okolju prijazna uporaba ne premogovnih pepelov", ki je pričel leta 2002. Program je bil dvakrat podaljšan, prvič od leta 2006-2008 in drugič od leta 2009-2011.

Ribbing (2010) podaja končne analize in ugotovitve dosežene v zadnjem obdobju opazovanja, od 2009-2011. Doseženi napredki, glede integriranja in uporabe lesnega pepela so:

- pozitiven učinek na rast gozdov
- predlog za okoljske smernice o uporabi pepela v gradbeništvu (gradnja cest, nadomestek cementa)
- razvoj uporabe pepela v kombinaciji z odpadnim blatom ČN za prekrivanje odlagališč odpadkov in rudarskih jalovin
- uporaba pepela iz trdnih goriv v betonu
- metoda za razvrstitev pepelov med nevarne ali nenevarne
- nizko tveganje uporabe za zdravje in okolje.

Da je pepel primeren tudi v gradbeništvu je dokazano v članku Gori et al. (2011). Raziskan je vpliv naravnega staranja na kemijske in fizikalne lastnosti talnega pepela iz sežiga komunalnih in lesnih odpadkov ter možnost njihove uporabe v cestogradnji. Vzorci so bili opazovani v dveh intervalih: v četrtem in dvanajstem tednu. Nato je bila analizirana njihova kemična in mineraloška sestava za namene ugotavljanja stabilnosti. Opravljena je bila po metodi, ki je del nemškega sistema nadzora kakovosti za uporabo agregatov pri gradnji cest.

Naravno staranje je spontan postopek stabilizacije, ki je odvisen od pH vrednosti, temperature, vlage in prisotnosti atmosferskega ogljikovega dioksida, ki ga delci pepela vežejo nase. Ta postopek sproži: hidratacijo oksidov kalcija, kalija, aluminija in natrija, obarjanje hidroksidov in soli osnovnih kationov, karbonatizacijo, kompleksacijo... Te počasne mineraloške spremembe, ki nastajajo skozi čas spreminjajo izluževanje težkih kovin iz materiala. Največji vpliv na izluževanje ima pH vrednost. Ta dva procesa sta premo sorazmerna. Z nižjim pH-jem ($\text{pH} \approx 8$) je dosežena minimalna topnost za večino težkih kovin, kot so cink, svinec, kadmij ...

Z opazovanjem in analizo staranih vzorcev so dokazali, da ta naraven spontan proces vodi pepel v stabilen material, ki se brez kakršnih koli omejitev lahko uporablja v cestogradnji.

Še ne poznan vendar uporaben postopek recikliranja pepela so preučili italijanski avtorji v članku Melotti et al. (2011). Raziskali so potencialno uporabo pepela iz biomase kot polnilo v asfaltnih

zmeseh. Morfološke, fizikalne in kemijske lastnosti so bile ocenjene 27-im vrstam različnih pepelov in dvema tradicionalnima polniloma, v skladu z evropskim standardom EN 13043. Opravljeni so bili tudi izluževalni testi, da se oceni možna količina raztopljenih onesnaževal.

EU direktiva o odpadkih 2008/98/CE priporoča recikliranje teh stranskih proizvodov predvsem zaradi doseganja pomembnih okoljskih smernic povezanih z zmanjšanjem naravnih agregatov pridobljenih iz kamnolomov in z zmanjšanjem odpadkov na odlagališčih.

Ravno zato je uporaba pepela v asfaltnih mešanica izrednega pomena saj lahko nadomesti naravna polnila. Raziskave so pokazale, da se pepel lahko uporabi kot polnilo. Pomembno je le upoštevati, da je lesni pepel potrebno pred uporabo obdelati, tako da ne vsebuje onesnaževal, da ima nizko koncentracijo nezgorelega ogljika in ustrezno granulometrijsko sestavo. Za dobro nosilnost in trajnost mora imeti čim finejši premer delcev. Fini delci pepela zapolnijo prazne prostore med grobim agregatom in s tem ugodno vplivajo na zgoščevanje in trdnost asfaltne mešanice.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Biomasa

Biomasa v splošnem pomenu označuje vsako organsko snov rastlinskega ali živalskega izvora, ki jo lahko z vidika energetike uporabimo kot zelo dober alternativni vir za pridobivanje toplote in električne energije ali oboje hkrati (kogeneracija). Biomasa izpodriva uporabo količinsko omejenih fosilnih goriv saj ti nenehno povečujejo koncentracijo strupenih plinov (npr.: CO₂) v atmosferi. Ravno zaradi majhnih vplivov na okolje jo uvrščamo med obnovljive in ekološko neoporečne vire energije. To skupino tvorijo (Krajnc, 2004):

- les in lesni ostanki (lesna biomasa),
- ostanki iz kmetijstva,
- sortirani komunalni (gospodinjski) odpadki,
- ostanki pri proizvodnji industrijskih rastlin,
- ne-lesnate kmetijske rastline uporabne za proizvodnjo energije,
- mokri organski odpadki (odvečno blato bioloških čistilnih naprav, kanalizacijska voda, živinorejski odpadki).

2.1.1 Lesna biomasa

V Sloveniji predstavlja lesna biomasa najbolj poznano in razširjeno vrsto biomase. Poleg tega pa spada tudi med najpomembnejše vire obnovljive energije, predvsem zaradi gozdnosti Slovenije.

Površina gozda znaša 1.185.169 ha. Tako danes gozd pokriva 58,5% ozemlja Slovenije (Poročilo ZGS o gozdovih, 2010).

V skupino lesne biomase spadajo (Lesna biomasa, 30.09.2011):

- les iz gozdov (čiščenje in nega gozdov, končni poseki),
- ostanki sečenj, ki nastajajo pri redčenjih v gozdovih,
- ostanki iz primarne in sekundarne predelave lesa (žagovina, lubje, odpadna skorja, lesni sekanci, lesni peleti),
- les iz kmetijskih in urbanih površin (krčitve površin v zaraščanju, obrezovanje drevja v sadovnjakih in vinogradih),
- lesni ostanki iz vzdrževanja cest, livad, drevoredov,
- lesni odpadki iz gospodinjstev,
- odslužen neonesnažen les in njegovi izdelki (papir, palete, embalaže).

2.1.2 Odvečno blato bioloških čistilnih naprav

Druga tudi količinsko bogata in zanimiva oblika odpadne biomase je odvečno blato bioloških čistilnih naprav, ki jo sestavljajo odmrle bakterije in glive iz procesa čiščenja komunalnih odpadnih vod. Blata postajajo enega od masovnih odpadkov komunalnega sektorja zato je ustrezno ravnanje z njimi nujno potrebno. Optimalni načini ravnanja sledijo hierarhični lestvici:

- zmanjševanje blat na izvoru,
- materialna uporaba (predvsem v kmetijstvu, pridobivanje bioplina),
- izraba toplotne vsebnosti, pridobljene z anaerobno digestijo (metan) in/ali s sežigom dehidriranega blata.

Termična izraba tega odpadka postaja zanimiva v zadnjem času, ko odlaganje odvečnih blat ni več dovoljeno. V zadnjih letih pa se pojavljajo novi energetsko učinkovitejši in okoljsko prijaznejši procesi brez zraka (piroliza, uplinjanje, utekočinjanje, plazma ...). Ti postopki so predvsem zaradi visoke cene še v uvajanju (Grilc, 2010).

2.1.3 Komposti

Komposti so tudi široko uporabljana biomasa, ki nastane z aerobno biološko stabilizacijo gospodinjskih biorazgradljivih organskih odpadkov (ostanki hrane, listje, trava). Recikliranje in

ponovna uporaba kompostov je lahko različna, vendar zaradi prevelike vsebnosti vlage niso primerni za pridelavo energije s sežiganjem.

Kompost je idealen material za izboljšanje plodne zemlje, seveda ob pogoju, da ne vsebuje strupenih primesi oz. da so vsebnosti le-teh znotraj zakonsko predpisanih vrednosti. Kompost je zaradi visoke vsebnosti hranil tudi primerno gnojilo, ki pripomore k zadrževanju vlage, prezračitosti tal, povečani absorpciji toplote, hkrati pa zmanjšuje nagnjenost terena k eroziji.

2.2 Odpadna lesna biomasa in lesni odpadki

2.2.1 Vrste lesnih odpadkov

Lesni odpadki so v evropskem seznamu odpadkov razvrščeni v naslednje skupine (Uredba o ravnanju z odpadki, Ur. l. RS, št. 34/08):

- lesni odpadki nastali pri obdelavi in predelavi lesa ter proizvodnji plošč in pohištva se po evropskem seznamu odpadkov razvrstijo v podskupino 03 01
- lesni odpadki nastali pri proizvodnji celuloze se razvrstijo v podskupino 03 03
- odpadna lesna embalaža se razvrsti v podskupino 15 01
- lesni odpadki nastali pri gradbeni dejavnosti ali rušenju stavb se razvrstijo v podskupino 17 02
- lesni odpadki zbrani kot ločeno zbrana frakcija komunalnih odpadkov se (razen embalažnih) razvrstijo v podskupino 20 01.

2.2.2 Raba lesne biomase

Slovenija razpolaga z velikim naravnim potencialom zato tudi les predstavlja enega izmed pomembnejših obnovljivih virov energije (53%). Največ OVE (59%) se porabi v toplotne namene,

preostali del pa za proizvodnjo električne energije. Med viri lesne biomase je za Slovenijo najpomembnejši gozd, sledijo ostanki lesne industrije ter odslužen les iz raznih virov.

Trenutno rabo lesne biomase lahko razvrstimo na spodnje razrede (Lesna biomasa, 30.09.2011):

- individualni uporabniki (v gospodinjstvih)
- daljinski sistemi ogrevanja krajev
- sistemi za sočasno proizvodnjo toplote in elektrike (kogeneracija)
- industrija za proizvodnjo procesne toplote
- raba lesne biomase v javnih zgradbah

- lesne industrije za proizvodnjo vlaknenih in ivernih plošč.

Biomasa se uporablja večinoma za pridobivanje toplote predvsem v gospodinjstvih (leta 2008 69 %), sledi industrija s 16 %, preostalo pa v transformacijah v večjih sistemih. V večji meri se lesna biomasa še vedno izkorišča v konvencionalnih sistemih s starejšimi tehnologijami z relativno nizkim izkoristkom. V zadnjih letih (2008-2009) je bil opazen tudi trend povečevanja rabe lesne biomase v javnih toplarnah in elektrarnah. Posledica tega je sosežig trdnih lesnih goriv v Termoelektrarni Šoštanj (TEŠ d.o.o.), Termoelektrarni Trbovlje (TET d.o.o.) in Termoelektrarni toplarni Ljubljana (TE-TOL d.o.o.) (Krajnc in sodel., 2009b; Obnovljivi viri, ARSO).

Kar se tiče uporabe sveže lesne biomase moramo upoštevati dejstvo, da je treba za naravno ravnotežje ohranjati stalno vrednost gozda in je mogoče posekati na leto samo tisti del gozda, ki ponovno zraste. To je letni prirastek slovenskih gozdov. Po podatkih Ministrstva za kmetijstvo in gozdarstvo je mogoče za obnavljanje gozda posekati le 57 % celotnega letnega prirastka. Način izrabe odpadne lesne biomase pa je pogosto odvisen od strukture in onesnaženosti ostankov. Rabljen les običajno vsebuje različna impregnacijska sredstva, zaščitne premaze, lepila in druge različne materiale, ki so bili dodani v procesu obdelave in uporabe (Polanc, 2011).

2.2.3 Mejne vrednosti za kakovost odpadne lesne biomase in lesnih odpadkov

Uporabo sekundarnih goriv (pridobljenih iz odpadkov) v Sloveniji ureja več predpisov glede na agregatno stanje goriva. Kakovost alternativnih trdnih goriv predpisuje Uredba o predelavi nenevarnih odpadkov v trdno gorivo (Ur. l. RS, št. 57/08), sam sežig pa Uredba o sežiganju odpadkov (Ur. l. RS, št. 68/08 in 41/09). Limitni parametri in njihove mejne vrednosti so podane v preglednici 1. Za primerjavo so podane tudi mejne vrednosti za kakovost lesnega goriva iz pristojnega evropskega standarda.

Preglednica 1: Limitni parametri in njihove mejne vrednosti svežega in odpadnega lesa (Uredba o predelavi nenevarnih odpadkov v trdno gorivo, Ur. l. RS, št. 57/08)

Onesnažilo	Največje vrednosti za naravni les	Mejne vrednosti za obdelan les	Vrednosti za onesnaženi les	Priporočila SIST EN 14961-1:2010
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
B	15	30	> 30	-
As	0,8	2	>2	1
F	10	30	>30	-

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 1

Cu	5	20	>20	10
Hg	0,05	0,4	>0,4	0,05
Cl	100	150	>150	200-300
Cl (s PVC oplemenitenjem)	-	350	>350	-

Iz zgoraj predpisanih vsebnosti nevarnih snovi je najbolj problematičen klor. Celo naraven neonesnažen les vsebuje presežene mejne vrednosti klora, po nekaterih podatkih celo za petkrat. S preventivnimi in tehnološkimi ukrepi tega problema ni mogoče rešiti, zato so številni uporabniki postavljeni pred vprašanje, kam z lesnimi odpadki, saj njihova uporaba kot gorivo v malih kotlovnica ni dovoljena.

Leta 2005 je delež energije pridobljen iz obnovljivih virov v končni bruto porabi energije za Slovenijo znašal 16%. Nova Evropska direktiva o spodbujanju rabe energije iz obnovljivih virov, kamor sodi tudi lesna biomasa, pa postavlja visoke cilje in sicer, do leta 2020 mora Slovenija doseči 25% delež energije iz tovrstnih virov (Direktiva o spodbujanju ... 2009/28/ES). Glede na to je potrebno, da država čim prej poišče primerne rešitve, ki ne bodo že v izhodišču omejevale uporabo tega naravnega vira, ki ga imamo v izobilju.

2.2.4 Vpliv termične izrabe lesne biomase na okolje

Z vračanjem odpadka v proizvodni proces lahko dosežemo manjšo količino odpadkov na odlagališčih ter zmanjšano porabo svežih oz. primarnih surovin. Na ta način ohranjamo bogastva narave, naše gozdove.

Druga prednost je očitna, če primerjamo emisije ogljikovega dioksida pri zgorevanju biomase in fosilnih goriv. Pri zgorevanju fosilnih goriv prihaja do sproščanja ogljikovega dioksida v zelo kratkem času, kar veča količino toplogrednega plina v ozračju in nastanek kislega dežja. Pri zgorevanju lesa se v ozračje spušča ogljikov dioksid, ki je del naravnega kroženja ogljika.

Njihova termična izraba povzroča stranske produkte, emisije. Zaradi nepopolnega zgorevanja nastajajo emisije škodljivih snovi kot so: ogljikov monoksid CO, dušikovi oksidi NO_x – i, razni ogljikovodiki (C_xH_y) ter majhne količine hlapnih težkih kovin (Hg, Pb, Zn, As ...), ki jih vsebuje les.

Problem predstavljajo tudi velike količine preostalega pepela. Nastala količina in njegova sestava je odvisna od vrste kurjene lesne biomase. Praviloma je nenevaren odpadek, vendar njegova nenadzorovana uporaba in odlaganje vseeno nista dopustna.

3 LESNI PEPEL

Lesni pepel predstavlja trdni mineralni ostanek po kurjenju lesa. Lesni pepeli imajo zanimivo kemično sestavo in lastnosti, ki ponujajo veliko možnost njihove uporabe na različnih področjih.

Na njegovo količino ter fizikalne in kemijske lastnosti vpliva več dejavnikov: vrsta lesa, rastišče in sestavine goriva (les, skorja, listje, nečistoče), predhodna uporaba samega lesa (vrsta lesnih odpadkov), procesni parametri pri kurjenju ter tudi pogoji zbiranja in shranjevanja pepela. Ti dejavniki določajo kakovost pepela in njegovo primernost za nadaljnjo uporabo (Knapp & Insam, 2011).

3.1 Kemična sestava

Lesni pepel, preostal po kurjenju čistega naravnega lesa, vsebuje predvsem alkalijske in zemljoalkalijske okside in silikate. V največjih količinah najdemo hranila kot so kalcij, kalij, magnezij in fosfor, prisotne pa so še spojine elementov kot so silicij, aluminij, natrij, mangan in žveplo (Knapp & Insam, 2011). V času zgorevanja organske snovi (celuloza, lignin, smole ...) prehajajo v CO₂ in vodno paro, anorganske sestavine pa mineralizirajo v okside in silikate. Po ohladitvi pepela in med njegovim začasnim shranjevanjem poteka naglo vezanje ogljikovega dioksida (karbonatizacija) in vlage iz zraka, kar povzroča strjevanje pepela. Nastali karbonati so mnogo manj alkalni in topni od oksidov (Grilc in Husić, 2010). Ogljik se lahko v pepelu pojavi zaradi nepopolnega izgorevanja lesa (kot nezgoreli les ali kot oglje).

Mikroelementi, ki so lahko prisotni v manjših količinah so železo, cink, arzen, nikelj, krom, svinec, živo srebro, baker, bor, molibden, vanadij, barij, kadmij in srebro. Vsi elementi so prisotni v različnih koncentracijah in v različnih vrstah lesnih pepelov (Demeyer, 2001; Knapp & Insam, 2011).

3.2 Težke kovine in organska onesnaževala

Odpadni les je lahko onesnažen v različnem obsegu z barvami, z zaščitnimi sredstvi in premazi. Nekatere aktivne sestavine lahko predstavljajo tveganje. Med temi so pentaklor fenol, živo srebro, arzen in kromove sestavine, kakor tudi kreozotno olje (Peek, 2004). Da bi preprečili prehod nevarnih snovi v izdelke iz recikliranega lesa in da bi zmanjšali tveganja, ki se pojavljajo ob predelavi in uporabi odpadnega lesa oz. njegovega pepela, običajno nadzorujemo naslednje parametre (Vogt et al., 2007):

- težke kovine, kot so As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Ti, Zn,
- policiklične aromatske ogljikovodike: naftalen, antraceni ...,
- halogene spojine klora, broma, fluora,

- pentaklorfenol (PCP) in heksaklorbenzen (lindan),
- poliklorirani bifenil (PCB),
- hlapne organske snovi (VOC).

Lesni pepel se glede na vsebnost težkih kovin in organskih onesnaževal praviloma nenevarni odpadki, razen če niso nastali pri sežigu močno onesnaženega lesa. Sestavine pepela, ki najbolj vplivajo na okolje so svinec, kadmij in cink (Krajnc in sodel., 2009a).

Vsebnost težkih kovin je posebno zaskrbljujoča, če je pepel namenjen za gnojenje kmetijskih površin. V primerjavi s premogovnim pepelom ima lesni pepel manjše koncentracije težkih kovin, vendar je zelo alkalen (Knapp & Insam, 2011).

Pepeli lahko vsebujejo tudi organska onesnaževala. Od obstojnih organskih snovi (*POPs*) so v pepelu potencialni predvsem policiklični aromatski ogljikovodiki – PAO, medtem ko PCB, klorirani ogljikovodiki in mineralna olja le v primeru slabo izvedenega kurjenja zelo onesnaženega odpadnega lesa (Grilc, 2010).

Preglednica 2: Kemijska sestava različnih pepelov (Krajnc in sodel., 2009a)

Parameter	Enota	Pepel iz drevesne skorje	Pepel iz lesnih sekancev	Pepel iz sečnih ostankov
pH	% s.s.	12,7	12,8	12,5
C _{org}		0,8	1,3	5,9
CO ₂		4	7,2	12,5
P ₂ O ₅		1,7	3,6	2,5
K ₂ O		5,1	6,7	7,1
CaO		42,2	44,7	35,5
MgO		6,5	4,8	5,7
Na ₂ O		0,8	0,6	0,5
Al ₂ O ₃		7,1	4,6	2,3
SiO ₂		26	25	25
SO ₃		0,6	1,9	2,4
Fe ₂ O ₃		3,5	2,3	3,7
MnO		1,5	1,7	2,6
Cu		mg/kg	87,8	126,8
Zn	s.s.	618,6	375,7	1429,8

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 2

As		11,4	8,2	7,8
Ni		94,1	61,5	71,9
Cr		132,6	54,1	137,2
Pb		25,3	25,4	35,6
Cd		3,9	4,8	16,8

3.3 Klasifikacija lesnih pepelov

Po evropskem klasifikacijskem seznamu odpadkov določenega v Uredbi za ravnanje z odpadki (Ur. l. RS, št. 34/2008), je odpadni lesni pepel uvrščen v 10-to in 19-to skupino odpadkov. Odpadki so razvrščeni po viru nastanka, t.j. po dejavnostih ali postopkih kjer nastajajo.

Preglednica 3: Klasifikacija lesnega pepela (Uredba za ravnanje z odpadki, Ur. l. RS, št. 34/2008)

Klasifik.št.	Naziv skupine/podskupine/odpadkov
10	<i>Odpadki iz termičnih procesov</i>
10 01	Odpadki iz elektrarn in drugih kurilnih naprav (razen 19)
10 01 01	Pepel, žlindra in kotlovski prah (razen kotlovskega prahu iz 10 01 04)
10 01 03	Elektrofiltrski pepel iz kurilnih naprav na šoto in les
10 01 99	Drugi tovrstni odpadki
19	<i>Odpadki iz naprav za ravnanje z odpadki, čistilnih naprav ter priprave pitne vode in vode za industrijsko rabo</i>
19 01	Odpadki iz sežiga ali pirolize odpadkov
19 01 14	Pepel, ki ni naveden pod 19 01 13

Noben od navedenih odpadkov pa nima pri klasifikacijski številki zvezdice, ki bi opozarjala na nevarni značaj odpadka. Lesni pepel je načelno nenevarni odpadek kar pa ne pomeni, da je z njim možno ravnati brez omejitev. Le inertni odpadki, ki so v naravi fizikalno, biološko in kemično nespremenljivi, netopni ter nevtralni za okolje, so varni za odlaganje brez nadzora.

3.4 Količina nastalih lesnih pepelov

V lesnih gorivih je 0,5-4 % suhe teže v obliki negorljivih mineralov, ki se po procesu zgorevanja spremenijo v pepel. Količina nastalega lesnega pepela je odvisna od več faktorjev, najbolj od vrste in kakovosti svežega lesa.

Preglednica 4: Delež pepela različnih biomasnih goriv (Krajnc in sodel., 2009a)

Vrsta lesa	Srednja vrednost	Značilno območje
	% s.s.	% s.s.
Les iglavcev	0,3	0,2 do 0,5
Les listavcev	0,3	0,2 do 0,5
Skorja iglavcev	4	2 do 6
Skorja listavcev	5	2 do 10
Sečni ostanki iglavcev	2	1 do 4
Sečni ostanki listavcev	1,5	0,8 do 3
Hitrorastoči nasadi - vrba	2	1,1 do 4
Hitrorastoči nasadi - topol	2	1,5 do 2,5

Količine odpadnih lesnih pepelov vodimo pod klasifikacijskima številcama 10 01 03 ter 19 01 14. In sicer je odpadek št. 10 01 03 *odpadni pepel, ki nastane pri kurjenju lesa* ter odpadek pod klasifikacijo 19 01 14 pa *pepel, ki nastane pri kurjenju lesenih odpadkov*.

Preglednica 5: Količina v RS nastalih lesnih pepelov v letu 2008-2010 (Statistični urad RS, osebna komunikacija)

Lesni pepel (skupaj)	2008	2009	2010
	(t)	(t)	(t)
10 01 03 in 19 01 14	21.221	24.013	23.427

V zgornji tabeli so navedene evidentirane količine odpadnega lesnega pepela, realna količina pa je lahko tudi višja. Razlog je predvsem v tem, da povzročitelji lesni pepel ne prepoznajo kot odpadek, ki ga je potrebno prijavljati in po predpisih odstranjevati. Nekoliko nepravilna in zavajajoča pa je tudi opredelitev odpadnega lesnega pepela. Določena je le ena vrsta, ki se specifično nanaša na lesni pepel, t.j. *10 01 03 elektrofiltrski pepel iz kurilnih naprav na šoto in les*. Vendar mnoge (predvsem manjše) kurilnice na les niso opremljene z elektrofiltri, zato povzročitelji pogosto prijavljajo odpadek kot *10 01 01 pepel, žlindra in kotlovni prah*, kamor pa spada le premogov pepel (Grilc, 2010).

3.5 Zakonski predpisi in omejitve glede ravnanja z odpadnim lesnim pepelom

To področje varstva okolja urejajo naslednji podzakonski akti Zakona o varstvu okolja (Ur. l. RS, št. 41/04 in 20/06).

3.5.1 Uredba o ravnanju z odpadki (Ur. l. RS, št. 34/08)

Definira natančna navodila in smernice ravnanja z odpadki na vseh področjih. Določa obveznosti in dolžnosti povzročitelju odpadkov, imetniku, zbiralcu, predelovalcu, odstranjevalcu, prevozniku ... Ključni cilj je zmanjšati količino odloženih odpadkov ter jih preusmeriti v predelavo in nadaljnjo uporabo samega odpadka ali njegovih sestavin. Za to je potrebna uvrstitev oz. klasifikacija odpadka, ki jo tudi določa ta uredba. Odpadni lesni pepel spada v skupini 10 in 19 (preglednica 3).

3.5.2 Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališča (Ur. l. RS, št. 61/11)

Določa mejne vrednosti emisij snovi v okolje zaradi odlaganja odpadkov, obvezna ravnanja in druge pogoje za odlaganje odpadkov posameznih nevarnostnih razredov. V primeru lesnega pepela se to nanaša predvsem na odlagališče nenevarnih in inertnih odpadkov.

V nasprotju z lesnimi odpadki, ki se ne smejo odlagati zaradi biorazgradljivosti in kurilnosti, so pogosti omejitveni faktorji za odlaganje lesnega pepela na odlagališča nenevarnih odpadkov naslednji:

- totalni organski ogljik (TOC) oz. raztopljeni organski ogljik (DOC): limitna vrednost TOC je 3 % mase suhe snovi odpadka. Ta je lahko presežena, če DOC ne presega mejne vrednosti parametra izlužka, ki znaša 800 mg/kg s.s.
- vsebnost vodotopnih snovi (sušilni ostanek) v standardnem izlužku: mejna vrednost parametra je 60 g/kg s.s. Ta vrednost je pogosto presežena, še posebej pri svežih oz. neobdelanih lesnih pepelih. Oksidi in silikati so zelo topni v vodi, na zraku pa reagirajo z CO₂ in se spreminjajo v karbonate, ki so veliko bolj stabilni.
- alkalnost standardnega izlužka (pH): maksimalna dopustna vrednost je 13. Visoko alkalnost imajo njegove prevladujoče substance (npr. kalijev, kalcijev in magnezijevi oksidi/hidroksidi), ki lahko v izlužku dvignejo pH preko mejne vrednosti.

Preglednica 6: Mejne vrednosti parametrov izlužka nenevarnih odpadkov (L/S = 10 l/kg)

Parameter	Izražen kot	Enota	Mejna vrednost parametra izlužka (L/S = 10 l/kg)
Raztopljeni organski ogljik - DOC	C	mg/kg s.s.	800
Celotne raztopljene snovi	-	g/kg s.s.	60
pH	-	/	13

Preglednica 7: Mejne vrednosti parametrov izlužka odpadkov z visoko vsebnostjo biološko razgradljivih snovi (L/S = 10 l/kg)

Parameter	Izražen kot	Enota	Mejna vrednost parametra izlužka (L/S = 10 l/kg)
Raztopljeni organski ogljik - DOC	C	mg/kg s.s.	7500
Celotne raztopljene snovi	-	g/kg s.s.	60

3.5.3 Uredba o obremenjevanju tal z vnašanjem odpadkov (Ur. l. RS, št. 34/08 in 61/11)

Uredba opredeljuje mejne parametre in vrednosti za vnos nekaterih mineralnih odpadkov na zemljišča namenjena kmetijski ali nekmetijski rabi.

Direktna uporaba neobdelanega lesnega pepela ni dopustna. Lesni pepel pride v poštev, če je predelan v t.i. umetno pripravljeno zemljino. Gre za mešanico strogo nadzorovane sestave zemeljskega izkopa in drugih mineralnih odpadkov, namenjene rekultivaciji tal, nasipavanju zemljišč in zapolnjevanju izkopov.

Najbolj kritični parametri, ki bi lahko omejevali uporabo umetno pripravljene zemljine so:

- težke kovine (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)
- organski onesnaževalci (CH_{tot.}, PAH, BTX and PCB)
- pH, el. prevodnost, TOC

Preglednica 8: Največje vrednosti anorganskih parametrov umetno pripravljene zemljine, ki je namenjena rekultivaciji tal

Parameter	Zemljina A ¹ (mg/kg s.s.)	Zemljina B ² (mg/kg s.s.)
As	20	20
Pb	40	50
Cd	0,5	0,7
Cr	40	40
Cu	30	30
Ni	30	30

se nadaljuje ...

¹ Umetno pripravljena zemljina, ki vsebuje več kakor 80 prostorninskih odstotkov naravnih srednje težkih ali težkih tal

² Umetno pripravljena zemljina, ki vsebuje manj kakor 80 prostorninskih odstotkov srednje težkih ali težkih tal

... nadaljevanje Preglednice 8

Hg	0,2	0,3
Zn	100	100

V kolikor so bile vse sestavine umetno pripravljene zemljine pridobljene iz dovolj neonesnaženih sestavin, obstajajo realni zgledi za zadovoljitev teh kriterijev.

3.5.4 Uredba o mejnih vrednostih vnosa nevarnih snovi in gnojil v tla (Ur. l. RS, št. 84/05)

Ta uredba določa pod katerimi pogoji se blata čistilnih naprav, komposti in rečni mulji lahko vnašajo na zemljišča namenjena kmetijski oz. nekmetijski rabi kot gnojila. Lesni pepel v tej uredbi ni neposredno upoštevan, pač pa ga je možno vključiti v enega od navedenih odpadkov.

Preglednica 9: Največje vrednosti nevarnih snovi v blatu, mulju in kompostu

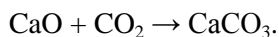
Parameter	Kompost z neomejeno uporabo (1. razred)	Kompost z omejeno uporabo (2. razred) in za kmetijsko uporabo	Blato, mulj in kompost za nekmetijsko uporabo
	(mg/kg s.s.)	(mg/kg s.s.)	(mg/kg s.s.)
Cd	0,7	2	5
Cr	70	150	500
Cu	70	300	600
Hg	0,4	2	5
Ni	25	70	80
Pb	45	100	500
Zn	200	1200	2000

3.6 Stabilizacija odpadnega lesnega pepela

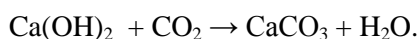
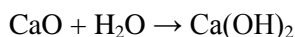
Odpadni lesni pepel je sam po sebi kakovosten, vendar ga je pred uporabo v okolju potrebno stabilizirati predvsem zaradi:

- lastnosti samega pepela in njegovega izlužka: skoraj vedno presegajo limitne parametre onesnaženosti (alkalnost (pH), vodotopne snovi, DOC),
- lahko vsebuje tudi manj primerne snovi: organska onesnaževala in težke kovine,
- fizikalne strukture: lahko povzročajo emisije disperzivnega prahu.

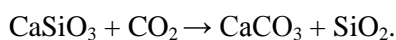
Proces stabilizacije sproži nastanek več sekundarnih mineralov. Oksidi hidratizirajo, nato iz zraka vežejo nase CO₂ in nastanejo karbonati, ki so veliko bolj obstojni in manj topni od oksidov. Najpomembnejša reakcija je preoblikovanje Ca(OH)₂ v CaCO₃, ki znižuje stopnjo izpiranja kalcija (Steenari, 1999):



Reakcija hitreje poteka ob prisotnosti vode:



Poteka pa tudi reakcija:



Podobno reagirata tudi oksida in slikata magnezija in kalija.

Raziskave so pokazale da se čist, neonesnažen in stabiliziran lesni pepel lahko uporabi na različnih področjih brez negativnih vplivov na okolje (Bougnom, 2010; Knapp & Insam; 2011).

Stabilizacijo lahko izvedemo na več različnih načinov:

- (1) Staranje pepela na zraku, med katerim poteka vezava zračnega CO₂ na okside alkalijskih in zemljoalkalijskih kovin (K, Ca, Mg). Gre za spontano karbonatizacijo ali naravno staranje, ki vpliva na mnoge kemijske in fizikalne lastnosti pepela. Nastali karbonati pogojujejo pH odpadka v stiku z vodo. Dalj časa staran odpadka pepela, povzroči manj alkalno raztopino. Počasne mineraloške spremembe, ki se pojavljajo med staranjem, pa vplivajo tudi na manjše izluževanje težkih kovin;
- (2) Uvajanje CO₂ iz drugih virov (vsiljena karbonatizacija z dimnimi plini);
- (3) Granuliranje z vezivi (solidifikacija);
- (4) Integriranje pepela v zemeljski izkop (umetno pripravljena zemljina);
- (5) Integriranje pepela v drug komplementaren odpadek:
 - v kompost iz biorazgradljivih komunalnih odpadkov
 - v kompost iz pregnitega blata BČN ali stabiliziran digestat iz bioplinske naprave
 - v mineralno-organski procesni odpadek (npr. papirniški mulj).

V praktičnem delu diplomske naloge bom raziskala tč. 5 od naštetih možnosti stabilizacije odpadnega lesnega pepela.



Slika 1: Dozorel, stabiliziran, zdrobljen in presejan odpadni lesni pepel v kupih (Ribbing, 2010)

3.7 Problematika ravnanja z lesnim pepelom v Sloveniji in EU

3.7.1 Odstranjevanje pepela

Odpadke za katere ni mogoče zagotoviti predelave ter ko ni razvitih in vpeljanih možnosti recikliranja in ponovne uporabe, je treba odstraniti, pri tem pa je odlaganje najslabša možnost. Uredba o ravnanju z odpadki (Ur. l. RS, 34/08) nalaga, da se odpadki odstranjujejo čim bližje kraju njihovega nastanka, v primeru odlaganja, na najbližjem odlagališču, ki je primerno za odlaganje teh odpadkov.

Pepel načelno velja za nenevaren odpadek zato se odlaga na odlagališčih za nenevarne odpadke, vendar pod določenimi pogoji. Neposredno odlaganje svežega pepela je prepovedano zaradi potencialnega preseganja nekaterih mejnih limitnih parametrov. Zato ga je potrebno, tako kot vse druge odpadke, predhodno stabilizirati.

Pepel, odložen v naravo brez nadzora, lahko povzroča resne okoljske probleme. S tem problemom se srečujejo v številnih afriških državah, kjer lesna goriva predstavljajo 61–86% primarne energijske potrošnje, pri čemer se ustvarjajo velike količine pepela. V Evropi se srečujemo skoraj s podobnim problemom. Uporaba lesa za proizvodnjo bioenergije narašča, kar ustvari ogromne količine odpadnega pepela. Tega se na žalost v veliki večini odlaga, kar predstavlja visoke stroške skladiščenja, transportiranja in odlaganja. V zadnjih letih se je zaradi poostrene zakonodaje ponovna uporaba različnih pepelov nekoliko povečala. Količina odloženih odpadnih lesnih pepelov na odlagališča je prikazana v preglednici št. 10.

Odstranjevanje odpadkov so postopki določeni v prilogi 6, ki je sestavni del Uredbe ravnanja z odpadki (Ur. l. RS, 34/08), in vsi drugi postopki priprave za odstranjevanje odpadkov, katerih ni mogoče predelati:

D1 Odlaganje v ali na zemljo (npr. odlagališče ipd.)

- D2 *Obdelava v zemlji (na primer biološka razgradnja tekočih odpadkov ali gošč v zemlji ipd.)*
- D3 *Globinsko injektiranje (npr. injektiranje odpadkov s črpalkami v vrtine, solne jaške ali naravno dana odlagališča ipd.)*
- D4 *Površinska zajezitev (npr. vlivanje tekočih odpadkov v jame, ribnike ali lagune ipd.)*
- D5 *Posebej prirejeno odlagališče (npr. odlaganje v posamezne obložene celice s pokrovom, ločene med seboj in od okolja ipd.)*
- D6 *Izpuščanje v vode, razen v morja/oceane*
- D7 *Izpuščanje v morja/oceane, vključno z odlaganjem na morsko dno*
- D8 *Biološka obdelava, ki ni določena drugje v tej prilogi, pri kateri nastanejo končne spojine ali mešanice, ki se odstranjujejo z enim od postopkov pod D1–D12*
- D9 *Fizikalno-kemična obdelava, ki ni določena drugje v tej prilogi, pri kateri nastanejo končne spojine ali mešanice, ki se odstranjujejo z enim od postopkov pod D1–D12 (npr. izparevanje, sušenje, kalcinacija, ipd.)*
- D10 *Sežiganje na kopnem*
- D11 *Sežiganje na morju*
- D12 *Trajno skladiščenje (npr. nameščanje posod v rudnik ipd.)*
- D13 *Spajanje ali mešanje pred izvajanjem enega od postopkov pod D1–D12*
- D14 *Ponovno pakiranje pred izvajanjem enega od postopkov pod D1–D13*
- D15 *Skladiščenje do enega od postopkov pod D1–D14 (razen začasnega skladiščenja, do zbiranja, na mestu nastanka odpadkov)*

3.7.2 Recikliranje in uporaba

Preprečevanje nastanka odpadkov in njihova predelava sta najboljši rešitvi, kadar je to ekološko sprejemljivo in ekonomsko upravičeno. Predelava odpadkov ima absolutno prednost pred odlaganjem. Učinkovito predelavo oz. recikliranje odpadkov lahko dosežemo le s predhodnim ločenim zbiranjem posameznih vrst odpadkov. Gre za postopke, ki so namenjeni koristni uporabi odpadkov ali njihovih sestavin

Slovenska zakonodaja v prilogi 5, ki je sestavni del Uredbe o ravnanju z odpadki (Ur. l. RS, 34/08), podaja 13 postopkov predelave, znane pod R-postopki (*R-reuse and recycling*):

- R1 *Uporaba načeloma kot gorivo ali drugače za pridobivanje energije*
- R2 *Pridobivanje topil/regeneracija*
- R3 *Recikliranje/pridobivanje organskih snovi, ki se ne uporabljajo kot topila (vključno s kompostiranjem ali drugimi procesi biološkega preoblikovanja)*
- R4 *Recikliranje/pridobivanje kovin in njihovih spojin*

- R5 *Recikliranje/pridobivanje drugih anorganskih materialov*
R6 *Regeneracija kislin ali baz*
R7 *Predelava sestavin, ki se uporabljajo za zmanjšanje onesnaževanja*
R8 *Predelava sestavin iz katalizatorjev*
R9 *Ponovno rafiniranje olja ali druge ponovne uporabe olja*
R10 *Vnos v ali na tla v korist kmetijstvu ali za ekološko izboljšanje*
R11 *Uporaba odpadkov, pridobljenih s katerim koli postopkom pod R1–R10*
R12 *Izmenjava odpadkov za predelavo s katerim koli postopkom pod R1–R11*
R13 *Skladiščenje odpadkov do enega od postopkov pod R1–R12 (razen začasnega skladiščenja, do zbiranja, na mestu nastanka odpadkov)*

V Sloveniji odpadni lesni pepel najpogosteje uporabimo kot prekrivko na odlagališčih ali recikliramo po postopku R10.

V spodnji tabeli so predstavljeni podatki o količini predelanih in odstranjenih odpadkov s klasifikacijsko številko 10 01 03 in 19 01 14. Ostale količine, ki se ne predelajo ali odstranijo so v začasnem skladiščenju oz. so oddane drugim za nadaljnje ravnanje.

Preglednica 10: Količine predelanih in odstranjenih odpadnih lesnih pepelov v letu 2008-2010 (Statistični urad RS, osebna komunikacija)

Leto	2008	2009	2010
Enota količine	(t)	(t)	(t)
Skupaj predelane količine odpadkov (klas. št. 10 01 03 in 19 01 14)	306	660	612
..... od tega po postopku R10	64	205	562
..... od tega kot prekrivka na odlagališčih	243	455	50
Odstranjene količine odpadkov (klas. št. 10 01 03 in 19 01 14)	685	499	510
..... od tega z odlaganjem na odlagališča	685	499	490
..... od tega po postopku D13	-	-	20

Vnos odpadnih lesnih pepelov v ali na tla urejata Uredba o obremenjevanju tal z vnašanjem odpadkov (Ur. l. RS 34/08 in 61/11) in Uredba o mejnih vrednostih vnosa nevarnih snovi in gnojil v tla (Ur. l. RS 84/05 in 113/09).

Neomejeno uporabo za vnos v tla lahko dosežemo v obliki umetno pripravljene zemljine (primešan svežim kompostom, dehidriranim muljem bioloških čistilnih naprav, zemeljskim izkopom ipd.).

Primerna je tudi za neomejeno uporabo na kmetijskih zemljiščih. Z recikliranjem odpadnega lesnega pepela na ta način, lahko z eno potezo zadovoljimo dva cilja: zmanjšamo količino odloženih odpadkov in dobimo boljši ekološki proizvod, ki predstavlja alternativo drugim kemijskim gnojilom.

Neposredna uporaba pepela kot mineralnega dodatka za apnenje in gnojenje (kalij) na kmetijske površine je načelno možna, vendar omejena zaradi mehanskega prašenja. Zato je potrebno pepel najprej utrditi (solidificirati), kar se počasi doseže samodejno s staranjem in spontano karbonatizacijo. Navlaženje odpadka z vodo do primerne vlage pospeši proces karbonatizacije.

3.7.3 Možnosti ravnanja z odpadnim lesnim pepelom v Evropi

The Ash Programme

Švedska je ena od Evropskih držav, ki ima daleč najbolj razvit sistem gospodarjenja z bio pepelom. Letno proizvede okoli 1,3 milijona ton pepela, ki nastane predvsem zaradi ogrevanja in proizvodnje električne energije.

Leta 2002 je Švedski inštitut za termično energijo (Thermal Engineering Research Institute Värmeforsk) začel dolgoletni raziskovalni program Environmentally friendly use of non-coal ashes (Okolju prijazna uporaba ne premogovnih pepelov) oz. znan kot The Ash Programme. Program je usmerjen v izboljšanje znanja o stranskih proizvodih, ki nastanejo pri proizvodnji energije in njihove uporabe. Pomemben del programa je tudi ocenjevanje stanja okolja in izdelava novih tehničnih in okoljskih smernic. Glavno vodilo je, da se odpadni pepel ne sme voditi kot odpadek ampak kot dragocen material (Bjurström & Herbert, 2009).

3.7.4 Recikliranje lesnega pepela na gozdnih površinah

Na gozdnih površinah iglavcev se pojavlja problem zakisanja tal. Rastlina pri svoji rasti iz zemlje črpa hranila, predvsem katione, ki predstavljajo negorljivi del lesnega pepela in tako znižuje pH. Po naravni poti se ta odvzeta hranila vrnejo z razgradnjo odmrlih dreves, vej in listja, tako moderna ekstenzivna sečnja še dodatno povečuje izgubo mineralnih in drugih hranilnih snovi. Pojav zakisanja tal pospešuje še vnos kislih snovi iz padavin (kisli dež).

Z vračanjem pepela v gozdna tla lahko nadomestimo izgubo. Recikliranje pepela na gozdnih površinah ponovno vzpostavlja stabilen sklenjen eko-krog, ki daje možnost izkoriščanja lesne biomase in hkrati ohranja naravno ravnotežje.

Pomemben je tudi pravilen odmerek pepela. Na Švedskem je največja dovoljena doza 3 tone (suhe teže) na hektar, na manj rodovitnih tleh pa se priporočajo manjši odmerki.

Lesenega pepela reciklirajo okoli 28.000 t in to predvsem na gozdne površine, vendar je to vseeno daleč od potrebnega nadomestila za dobro rast gozda. Vsako leto se približno poseka 30.000 ha dreves, za kar je potrebno kot nadomestilo od 60.000 do 90.000 t pepela (Bjurström & Herbert, 2009).

3.7.5 Gnojenje kmetijskih zemljišč in izboljšanje kislih prsti

Sposobnost lesnega pepela, da z oksidi, hidroksidi in karbonati alkalijskih in zemljoalkalijskih elementov (Ca, K, Mg) poveča pH zemljine, je velika priložnost za izboljšanje kislih prsti.

Kmetijska dejavnost prav tako izčrpava hranilne snovi iz tal, potrebne za rast rastlin, katere je z gnojenjem potrebno nadomestiti. Uporabimo lahko samostojen stabiliziran pepel ali kot dodatek drugim organskim gnojilom, ki vsebujejo dušik, saj ga v pepelu redko najdemo a je nujno potreben za rast rastlin. Na šotnih zemljiščih bi bil lesni pepel zelo dobro gnojilo, saj v takih tleh pogosto primanjkuje fosforja in kalija, kar lesni pepel vsebuje (Kuba, 2008).

Organski odpadki in anaerobna blata imajo podobno elementarno sestavo, zato integriranje teh dveh mešanic v tla lahko pomeni odstranjevanje teh hranil oz. bogatih stranskih proizvodov in hkrati recikliranje ter njihovo ponovno uporabo. Anaerobno blato v kombinaciji z lesnim pepelom izboljšuje mikrobo aktivnost ter rast rastlin. Tudi visoke količine dodanega blata ne povzročajo izpiranja nitratov, pojavi se le visoka vsebnost soli, ki lahko negativno vplivajo na rast rastlin. Zato se priporoča uporaba manjših količin blata (Insam, 2009).

Pepel v kombinaciji s kompostom pospeši proces kompostiranja in poveča kvaliteto končnega proizvoda. Kompost, ki je bil pripravljen z lesnim pepelom ima večji potencial za rekultivacijo tal od apnenja, in lahko z manjšo količino komposta privede pH do ustrezne ravni (Bougnom, 2009, 2010).

3.7.6 Uporaba na odlagališčih odpadkov

Samostojen stabiliziran lesni pepel ali v kombinaciji z dehidriranim anaerobnim blatom, lahko uporabimo kot prekrivni material za sanacijo odlagališč nenevarnih odpadkov. Uporablja se z namenom zmanjšanja pronicanja izcedne vode v zemljo. Obstaja tudi več naravnih materialov kot so glina in ilovica, ki izpolnjujejo funkcionalne zahteve tesnilnih plasti, vendar so omejeni viri in njihovo izkopavanje se lahko izkaže za estetsko nezaželeno.

Kot prekrivno- zaščitni material se lahko uporabi tudi za dolgoročno odlaganje odpadkov, ki na zraku in v stiku z vodo predstavljajo nevarnost za okolje (npr. rudarske odpadke bogate z žveplom). Prekrivni material preprečuje difuzijo kisika in vdor vode v odpadke (Bjurström & Herbert, 2009).

3.7.7 Uporaba v geotehniki

Za proizvodnjo mnogih gradbenih materialov in izgradnjo različnih zgradb pridobivamo surovine iz zemeljske skorje, katerih glavne sestavine najdemo tudi v mineraloški sestavi lesnega pepela. To so predvsem oksidi kalcija, kalija, magnezija, natrija, silicija in drugih, kar nakazuje, da ga lahko v tej smeri pridno izkoristimo. Potrebno pa je vzeti v obzir, da neobdelan pepel nabreka in lahko povzroči razpoke v konstrukcijah, lahko vsebuje kloride, ki povzročajo korozijo armaturnega železa, je za uporabo preveč alkalen ter da vsebuje nezgoreli ogljik in težke kovine. Vse to lahko odpravimo z naravnim staranjem pepela in pridobimo uporaben material (Gori, Bergfeldt ... 2011).

Številne Evropske države (Nemčija, Norveška, Francija, Danska) ga uporabljajo kot sekundarni gradbeni material, za izdelavo nasipov, v cestogradnji skupaj s tamponom, za pripravo nevezane nosilne plasti (Gori, Bergfeldt ... 2011) ali kot polnilo v asfaltnih mešanicah (Melotti, Santagata ... 2011).

Številne študije so pokazale, da gradnja cest z uporabo lesnega pepela kaže tehnične in okoljske prednosti. Voziščne konstrukcije so bolj toge in močnejše, bolj odporne proti izjedanju soli in zmrzali, lahko se gradijo, potrebno je do ¼ manj materiala, vzdrževalna dela so manjša ter ni zaznati nobenih vplivov na okolje. (Ribbing, 2007, 2010).

Da je lesni pepel primeren za nadomestek naravnih mineralnih polnil v asfaltnih mešanicah, dokazuje tudi študija avtorja Melottija (2011). Pomembno je le upoštevati, da je lesni pepel potrebno pred uporabo obdelati, tako da ima nizko koncentracijo nezgorelega ogljika in ustrezno granulometrijsko sestavo. Za dobro nosilnost in trajnost mora imeti čim finejši premer delcev. Fini delci pepela zapolnijo prazne prostore med grobim agregatom in s tem ugodno vplivajo na zgoščevanje in trdnost asfaltna mešanice (Melotti, Santagata ... 2011).



Slika 2: Pepel v cesto gradnji (Ribbing, 2010)

Odpadni lesni pepel predstavlja tudi dobro alternativo drugim vezivnim sredstvom (cement, apno) za izboljšanje stabilizacije tal ali za predelavo oz. solidifiakcijo tekočih odpadkov (blat).

4 EKSPERIMENTALNI DEL

4.1 Materiali in metode

4.1.1 Značilnosti delovnih materialov

Za eksperimentalno delo so bili uporabljeni naslednji materiali:

- vzorec suhega lesnega pepela
- vzorec mokrega lesnega pepela
- vzorec dehidriranega blata iz KČN in
- kompost iz ločeno zbranih komunalnih odpadkov.

Suh lesni pepel je bil pridobljen iz lesne industrije LIKO VRHNIKA d.d., v katerem nastane letno približno 10 ton pepela. Nastane pri kurjenju lesnih ostankov in odpadkov (vključno ivernih plošč) iz izdelave pohištva; odpadke kurijo v lastni kotlovnici na trdo gorivo. Temperatura na kurišču je okoli 900°C. Vroč pepel z rešetke pada v pepelnik od koder ga nalagajo v zaboj. Vzorec je zelo sipek, prašen in homogenega izgleda.

Moker lesni pepel je bil pridobljen iz Gozdnega Gospodarstva Postojna – ENERLES d.o.o., kjer letno nastane okoli 400 ton tega pepela. Temperatura kurjenja je od 950-1000°C; razžarjeni ogorki s kurišča padajo v vodni bazen, kjer se ohladijo in preložijo v kontejner. Je razmeroma heterogenega izgleda, z delci različnih oblik in velikosti; konsistenca je zemljasta, tvori kepe.

Centrifugalno dehidrirano pregnito blato je bilo vzeto iz gnilišča biološke čistilne naprave za komunalne vode, KP Velenje. Je gosto pastozno, slabega (fekalnega) vonja, temne barve, homogenega izgleda.

Kompost je izdelan iz odpadnega blata KČN in lesnih sekancev po enomesečnem kompostiranju v Komunalnem podjetju Šentjur.

Osnovne lastnosti preskušanih materialov in njihovih standardnih izlužkov so podane v preglednicah 11 in 12.

Preglednica 11: Lastnosti uporabljenih materialov

Material	Suha snov	Vlaga	Žaro izguba	TOC
	(%)	(%)	(%)	(%)
Suh lesni pepel	100	< 0,1	0,33	-
Moker lesni pepel	77,3	22,7	2,3	-
Svež kompost	61,7	38,3	36,7	21,4
Dehidrirano blato	22,3	77,7	54,5	23,9

Preglednica 12: Lastnosti standardnih izlužkov osnovnih materialov

Material	pH	T	Sušilni ostanek	DOC
	(/)	(°C)	(mg/l)	(mg/l)
Suh lesni pepel	13,0	20,8	11 511	84,6
Moker lesni pepel	12,7	23,4	2542	26,4
Dehidrirano blato	8,03	23,2	803	722
Svež kompost	7,91	23,8	676	64,8

4.1.2 Priprava vzorcev mešanic za stabilizacijo

V plastična dvolitrska vedra sem v različnih razmerjih vmešala sestavine naslednjih mešanic:

- svež kompost in suh pepel
- svež kompost in moker pepel
- dehidrirano blato in suh pepel
- dehidrirano blato in moker pepel.

Sestave mešanic so podane v preglednicah 13-15. Natehtane sestavine brez vsake predhodne obdelave sem med seboj ročno premešala z lopatico tako, da so dobile homogen izgled. Nato sem jih dala v termostatsko komoro s pladnjem prosto stoječe vode, kjer naj bi pri sobni temperaturi okoli 20°C in pri nasičeni atmosferski vlagi potekala stabilizacija mešanic.

Preglednica 13: Sestava mešanic svežega komposta in suhega pepela

Številka vzorca	Sestava mešanic suh pepel - kompost					
	Masa komposta	Masa suh. pepela	Masno razmerje kompost:pepel	Masa mešanice	Masni delež v mešanici	
					Kompost	Pepel
	(g)	(g)	(/)	(g)	(%)	(%)
A	400	40	10:1	440	90,9	9,1
B	400	80	10:2	480	83,3	16,7
C	400	120	10:3	520	76,9	23,1
D	400	160	10:4	560	71,4	28,6
E	400	200	10:5	600	66,7	33,3

Preglednica 14: Sestava mešanic svežega komposta in mokrega pepela

Številka vzorca	Sestava mešanic moker pepel - kompost					
	Masa komposta	Masa mok. pepela	Masno razmerje kompost:pepel	Masa mešanice	Masni delež v mešanici	
					Kompost	Pepel
	(g)	(g)	(/)	(g)	(%)	(%)
A'	400	40	10:1	440	90,9	9,1
B'	400	80	10:2	480	83,3	16,7
C'	400	120	10:3	520	76,9	23,1
D'	400	160	10:4	560	71,4	28,6
E'	400	200	10:5	600	66,7	33,3

Preglednica 15: Sestava mešanic dehidriranega blata in suhega pepela

Številka vzorca	Sestava mešanic suhega pepela in blata KČN					
	Masa blata	Masa suh. pepela	Masno razmerje blato:pepel	Masa mešanice	Masni delež v mešanici	
					Blato	Pepel
	(g)	(g)	(/)	(g)	(%)	(%)
1	700	70	10:1	770	90,9	9,1
2	700	140	10:2	840	83,3	16,7
3	600	180	10:3	780	76,9	23,1
4	550	220	10:4	770	71,4	28,6

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 15

5	158	245	10:15	403	39,2	60,8
6	292	628	10:22	920	31,7	68,3

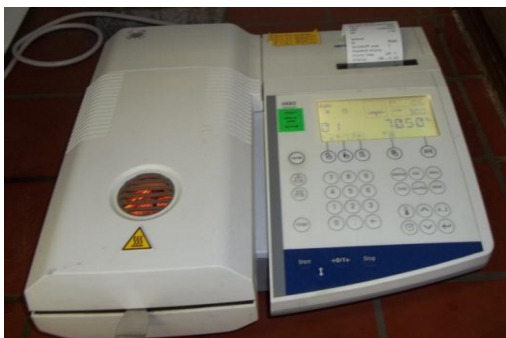
Vlažnost dehidriranega blata je zelo velika (okoli 80%), mokrega pepela pa malo več kot 20%, zato je bil vzorec teh dveh sestavin precej tekoč. Za stabilizacijo take mešanice bi bilo malo možnosti, zato sem te poskuse opustila.

Vse pripravljene mešanice sem opazovala 9 tednov. V začetku so bile meritve lastnosti mešanic opravljene vsaka dva tedna, po četrtem tednu pa vsake tri tedne. Spremljala sem vlažnost in žarilni ostanek mešanic ter lastnosti standardnih izlužkov vzorcev mešanic: pH, DOC in sušilni ostanek. Analize posameznih hranil v mešanicah nisem izvajala, saj te ne predstavljajo kritičnih snovi, katere bi bilo nujno potrebno nadzorovati. Lesni pepel vsebuje veliko esencialnih hranil, predvsem kalij, kalcij, magnezij in fosfor, potrebnih za rast mikroorganizmov. Lahko vsebuje tudi povečano koncentracijo težkih kovin (npr. baker, krom, svinec in cink iz impregnacij in premazov), katerih vsebnost je v primeru uporabe na zemljiščih potrebno omejiti. Odpadni lesni pepel in vsi ostali materiali, ki sem jih uporabljala v raziskavah, niso bili onesnaženi.

4.1.3 Določitev vlage materiala (odpadka)

Vlaga snovi ni odvisna le od vrste in strukture materiala ampak tudi od zunanjih dejavnikov, kot sta temperatura in vlažnost zraka. Za pravilen potek reakcij je pomembno vzdrževati konstantno vlažnost mešanic.

Vlago osnovnih materialov in prav tako vseh mešanic sem določila z vlagomerom. Vlago materiala se določi na podlagi razlike teže mas, pred in po sušenju vzorca pri 105°C. Sproti sem odvzemala in na IR vlagomeru sušila vzorce mešanic mase od 0,5 do 1 g, vse v dveh paralelkah.



Slika 3: IR vlagomer

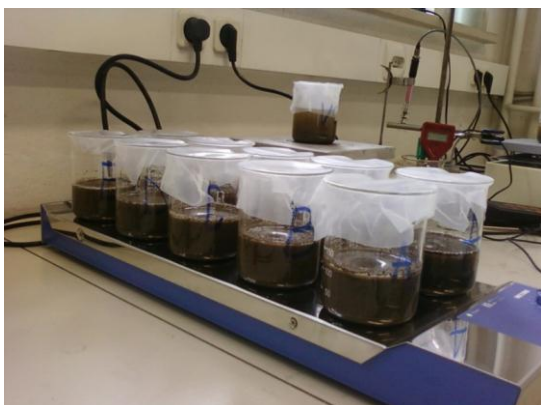
4.1.4 Priprava standardnih izlužkov

Izluževanje je kemijska metoda, ki omogoča snovni prenos molekul iz trdne zmesi v tekočo fazo pri njunem kontaktiranju. Ko je trdna snov, ki je mešanica netopnih in topnih snovi, v stiku s tekočino (največkrat vodo), pride do prehoda neke končne količine topnih snovi v tekočo fazo. Proces, ko komponente trdne zmesi deloma prehajajo v tekočo fazo, imenujemo izluževanje.

Cilj izluževalnega testa je pridobiti informacije o obsegu in hitrosti izluževanja onesnažil iz odpadka, predvsem za potrebe končnega ravnanja z njim. Z laboratorijskim izluževanjem simuliramo proces in pogoje v naravi, ki jim bodo odloženi odpadki izpostavljeni v določenem okolju v nekem časovnem obdobju.

Izluževanje odpadkov sem izvajala skladno s standardom SIST EN 12457 - 4 z razmerjem med tekočo fazo (destilirano vodo) in trdno fazo (suha snov odpadka) $L/S = 10$ l/kg. Pripravljeni vzorci se na vrtljivi izluževalni napravi ali v steklenih posodah (čazah) z magnetnim mešalom mešajo 24 ur pri sobni temperaturi. (SIST EN 12457 - 4 : 2004).

Za svoj eksperimentalni del izluževanja sem pripravila manjše vzorce in sicer 10 g suhe mase posamezne mešanice in 100 ml destilirane vode. Ti vzorci so se 24 ur mešali pri sobni temperaturi.



Slika 4: Izluževalne posode z magnetnimi mešali

4.1.5 Separacija izlužka od trdne faze po izluževanju

Po poteku 24 ur izluževalno mešanico prefiltriramo. Filtracija je fizikalna metoda, pri kateri se z filtriranjem suspenzije tekoče – trdno skozi porozno snov iz tekočine odstranijo trdni delci tako, da se zadržijo na površini filtra. Kot porozni medij oz. filter se lahko uporabi več različnih materialov, v odvisnosti od velikosti delcev (pesek, membrane, vlaknasti materiali, steklo ...). Za laboratorijsko

filtriranje se uporabljajo vlaknasti filtri z različnimi velikosti por. Svoje izlužke sem filtrirala skozi naslednje velikosti filtra: 1,2 μm , 1 μm in 0,7 μm .

Če je izlužek preveč moten pomeni, da vsebuje veliko fino suspendiranih delcev, ki lahko upočasnijo filtracijo. Za pospešitev postopka damo lahko vzorce predhodno na centrifugo. To je metoda, ki se izvaja v trdno zaprtih sistemih z zelo hitrim vrtenjem pri čemer se sproščajo velike centrifugalne sile in povzročijo separacijo trdnih delcev iz motne tekočine.



Slika 5: Laboratorijska centrifuga



Slika 6: Filtriranje

Spodnje slike prikazujejo prefiltrirane vzorce izlužkov po 14 dneh staranja. Filtrat < 0,7 μm sem naprej analizirala.



Slika 7: Prefiltrirani izlužki vzorcev od A-E, A'-B' in 1-4

4.1.6 Merjenje pH

Z uporabo pH metra sem prefiltiranim vzorcem standardnega izlužka izmerila pH in pripadajočo temperaturo. pH je brezdimenzijski parameter, s katerim določamo stopnjo bazičnosti oz. kislosti snovi. Previsoka (9-14) in prenizka (1-6) vrednost nakazuje na onesnaženost odpadka z močno bazo ali kislino.

4.1.7 Določanje sušilnega ostanka

Iz prefiltiranih vzorcev skozi filter (0,7 μm) sem odpipetirala 25 mm izlužka v predhodno stehtane steklene petrijevke ter jih dala v sušilnik na 105°C. Postopek sem ponovila za vse mešanice v dveh paralelkah. Razliko v masi pred sušenjem in po njem sem uporabila za izračun suhega ostanka (SIST EN 12880:2001). Dobljene podatke sem preračunala v ustrezno enoto – mg/l. Kritična vrednost za raztopljenega snovi v izlužku je 6000 mg/l oz. 60.000 mg/kg odpadka.

4.1.8 Določanje raztopljenega organskega ogljika – DOC

Postopek določitve raztopljenega organskega ogljika (DOC) v izlužku je enak določitvi totalnega organskega ogljika (TOC) v trdnih vzorcih odpadka.

Raztopljeni organski ogljik (DOC) v izlužkih je bil izmerjen po standardni metodi SIST ISO 8245:2000, na aparaturi TORCH combustion TOC Analyzer, Teledine Technologies Company (SIST ISO 8245:2000). Kritična vrednost DOC je 80 mg/l oz. 800 mg/kg odpadka.

5 REZULTATI

5.1 Opazovanje in vrednotenje vzorcev

5.1.1 Fizična konsistenca in vlaga vzorcev

Pri pripravi mešanic sem hotela doseči prhko in sipko zmes, ki je na videz in otip podobna naravni zemljini. Pri vzorcih komposta in obeh pepelov (suh, moker) sem to takoj dosegla pri vseh razmerjih, medtem ko so mešanice z blatom, zaradi njegove bolj tekoče konsistence, potrebovale nekoliko več pepela. Sipko strukturo vzorca sem dosegla pri masnem razmerju 68,3% suhega pepela in 31,7% blata (vzorec št. 6). Predhodni vzorec pa je bil narejen v razmerju približno 60% pepela in 40% blata (vzorec št. 5), vendar še vedno dokaj pastozen. V sedmih dneh staranja se je ta vzorec posušil in lepo drobil v rahlo zmes. Do konca opazovanja se oba vzorca nista bistveno spreminjala, na otip in videz sta ostala enaka.

Konsistenca prvih štirih vzorcev blata in suhega pepela se je začela spreminjati po dveh tednih staranja. Vsi vzorci so se na površini nekoliko posušili in strdili. To je bilo najbolj opaziti pri vzorcu št. 4, ki ima največ pepela. Za dovolj natančne meritve je potrebno imeti homogene vzorce, zato je bilo mešanje vzorcev ključnega pomena. Pastozno obliko so obdržali vse do konca eksperimenta. Spremembe so se kazale v trdoti, barvi in vonju. Po četrtem tednu opazovanja je bil vzorec št. 1 najbolj vlažen (približno 70% vlage), mehek in pastozen. Imel je izrazito močan vonj po fekalijah in je bil črne barve. Konica noža je lepo drsela skozi maso. Naslednja dva sta bila nekoliko bolj trda od prvega vzorca, vendar še vedno pastozna. Imela sta sivo-rjavo barvo. Vzorec št. 4 je bil svetlo rjave barve, najmanj vlažen (približno 55% vlage) in brez močnega vonja. Konica noža je maso lepo prerezala in ta ni ostajala na površini noža. V zadnjem, devetem tednu opazovanja pa so se vsi vzorci strdili. Potrebna je bila veliko večja sila za njihovo mešanje.

Vzorci s kompostom in suhim ter mokrim pepelom so se že po sedmih dneh na otip spremenili. Zmanjšala se jim je vlažnost (okoli 30%). Za pravilen potek reakcij vezave pa je potrebno vzdrževati ustrezne vlažne pogoje, zato sem vzorcem dodala še vode oz. vlage. Do konca poskusa je bila vlažnost mešanic od 35-50%.

5.2 Mešanice odpadnega suhega pepela in komposta

Rezultati v preglednici 16 prikazujejo vrednosti pH, raztopljenih snovi in raztopljenega organskega ogljika v izlužku vzorcev.

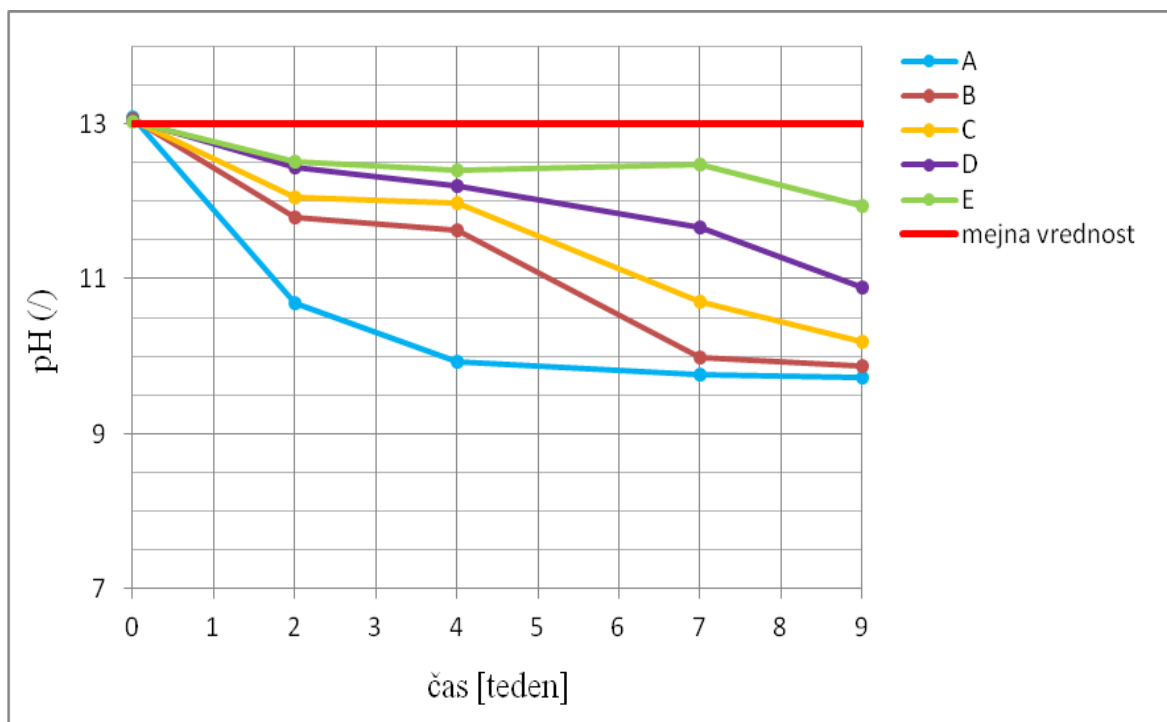
Preglednica 16: Vrednosti parametrov v izlužku mešanic suhega pepela in komposta

Vzorec	Čas stabilizacije (teden)			
	2	4	7	9
A				
Sušilni ostanek (mg/l)	2688	2496	1900	1460
pH (/)	10,7	9,9	9,6	9,7
DOC (mg/l)	350,6	305,5	243,9	217,9
B				
Sušilni ostanek (mg/l)	3604	3636	3310	2850
pH (/)	11,8	11,6	10,0	9,9
DOC (mg/l)	511,3	527,5	388,7	342,9
C				
Sušilni ostanek (mg/l)	3840	4340	4400	3550
pH (/)	12,1	12,0	10,7	10,2
DOC (mg/l)	491,2	569,4	516,4	408,8
D				
Sušilni ostanek (mg/l)	5328	5052	4620	4040
pH (/)	12,4	12,2	11,7	10,9
DOC (mg/l)	422,4	538,8	556,2	473,3
E				
Sušilni ostanek (mg/l)	5880	6160	5750	5480
pH (/)	12,5	12,4	12,5	11,9
DOC (mg/l)	411,6	551,4	443,4	626,4

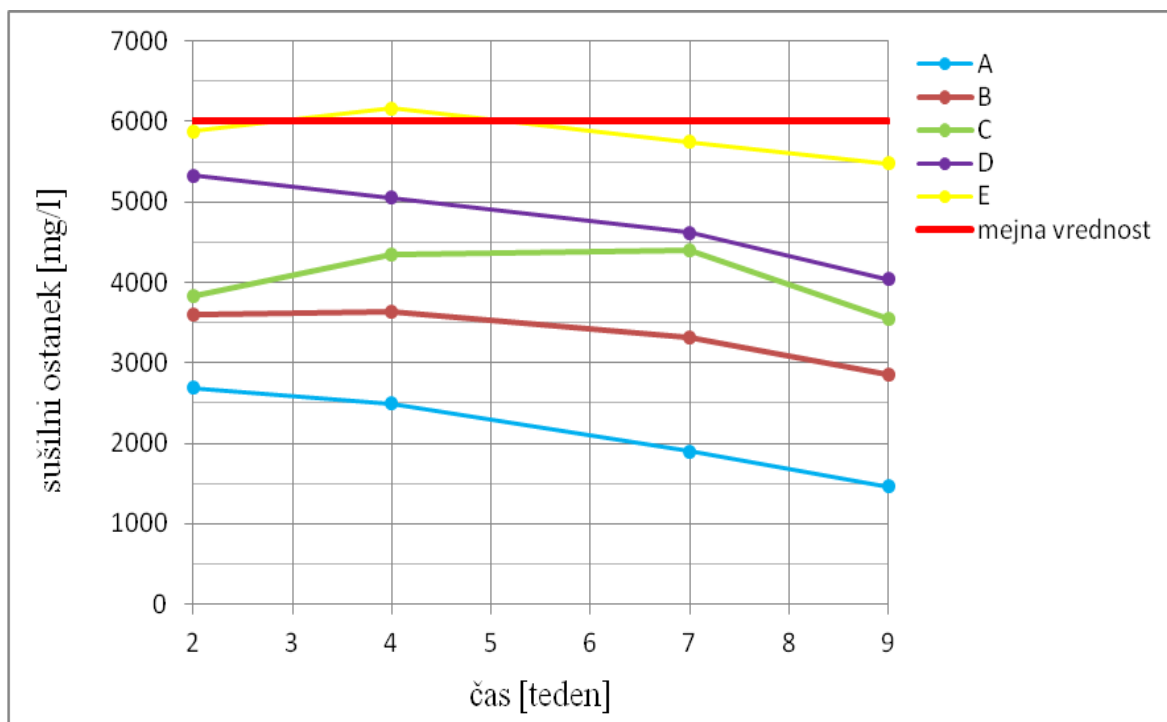
Začetne vrednosti parametrov posameznega vzorca se razlikujejo glede na količino pepela v mešanici. Na primer, pH pri vzorcu A z 10% pepela je manjši kot pri vzorcu B z 20% in prav tako kot pri vzorcu E z največ pepela (50%).

Na koncu poskusa, po 63 dneh staranja, je pH nihal med 9,7 in 11,9, sušilni ostanek med 1460 mg/l in 5480 mg/l ter DOC med 217,9 mg/l in 626,4 mg/l.

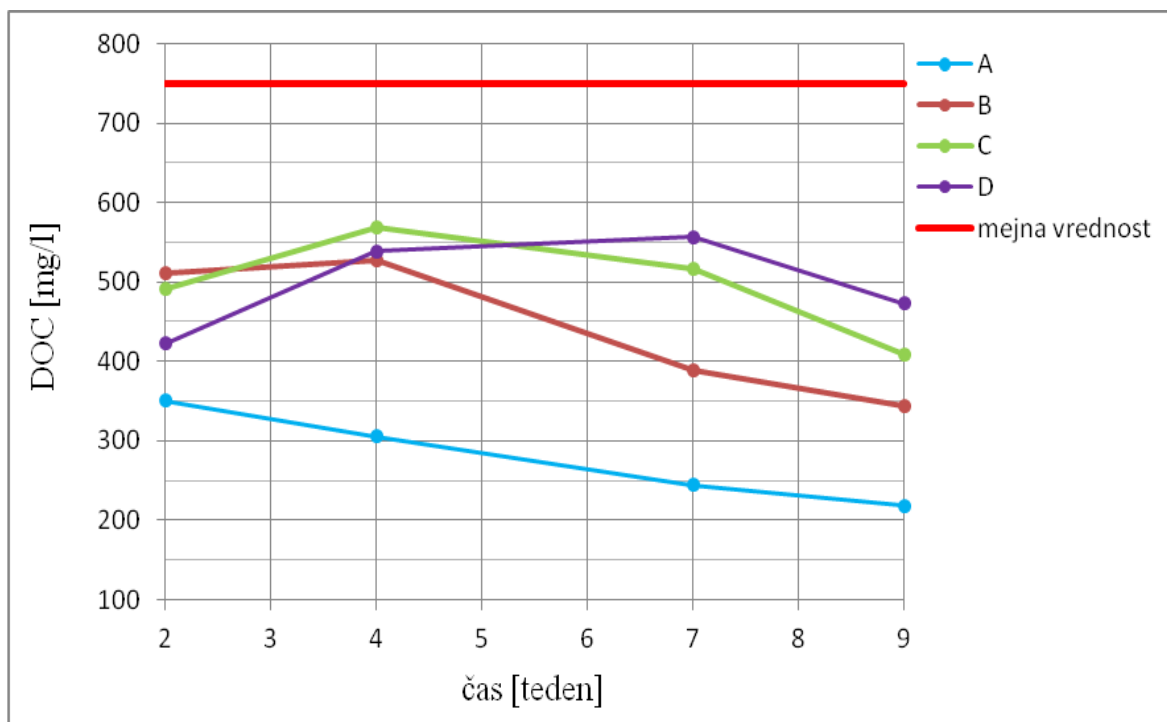
Celoten časovni potek reakcij prikazuje spodnji grafi.



Grafikon 1: Prikaz pH vrednosti izlužkov iz mešanic od A-E v odvisnosti od časa



Grafikon 2: Prikaz vrednosti sušilnega ostanka (mg/l) izlužkov mešanic od A-E v odvisnosti od časa



Grafikon 3: Prikaz vrednosti DOC (mg/l) mešanic od A-D v odvisnosti od časa

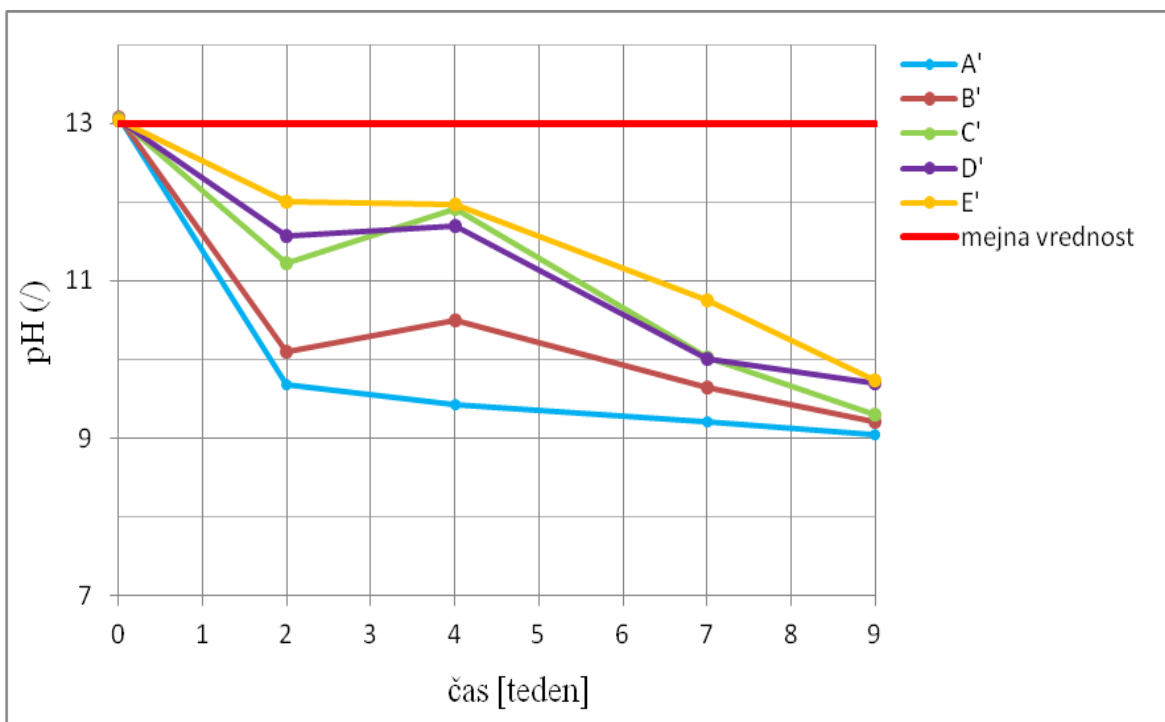
5.3 Mešanice odpadnega mokrega pepela in komposta

Preglednica 17 prav tako prikazuje časovni potek vseh parametrov za vsak posamezen vzorec.

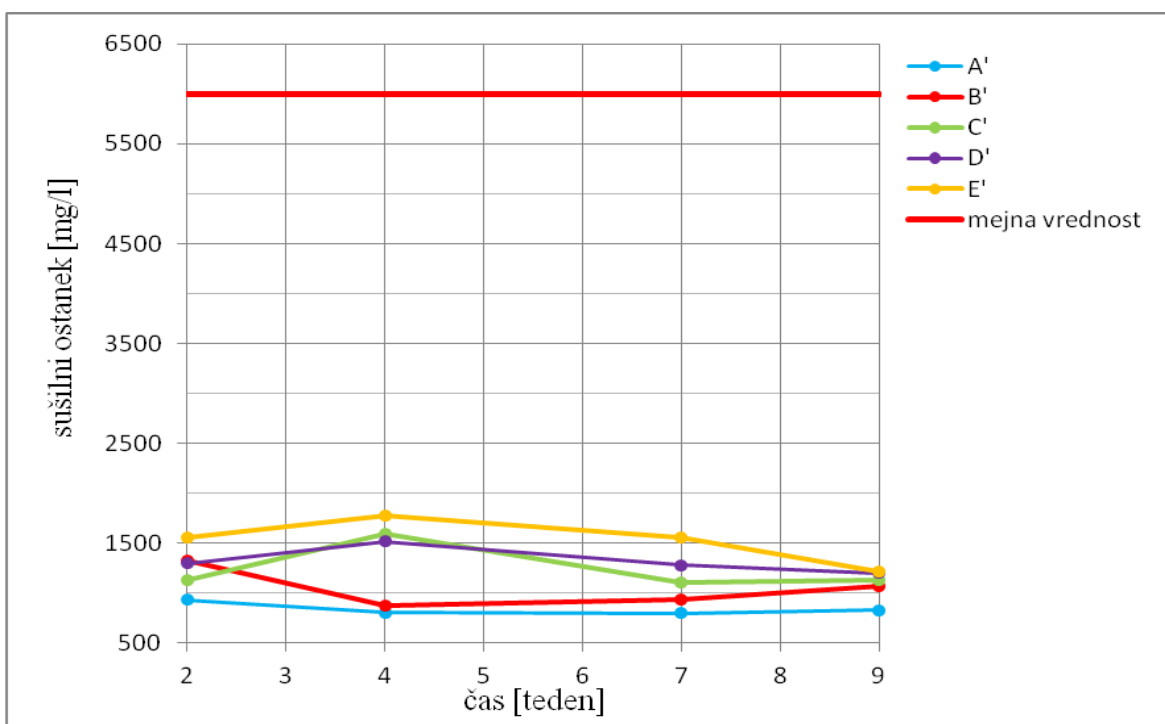
Po dveh mesecih najnižja vrednost pH znaša 9,04 in najvišja 9,73, raztopljene snovi se nahajajo med 830 mg/l in 1220 mg/l in DOC niha med 125,3 mg/l in 261,3 mg/l.

Preglednica 17: Vrednost parametrov v izlužku mešanic mokrega pepela in komposta

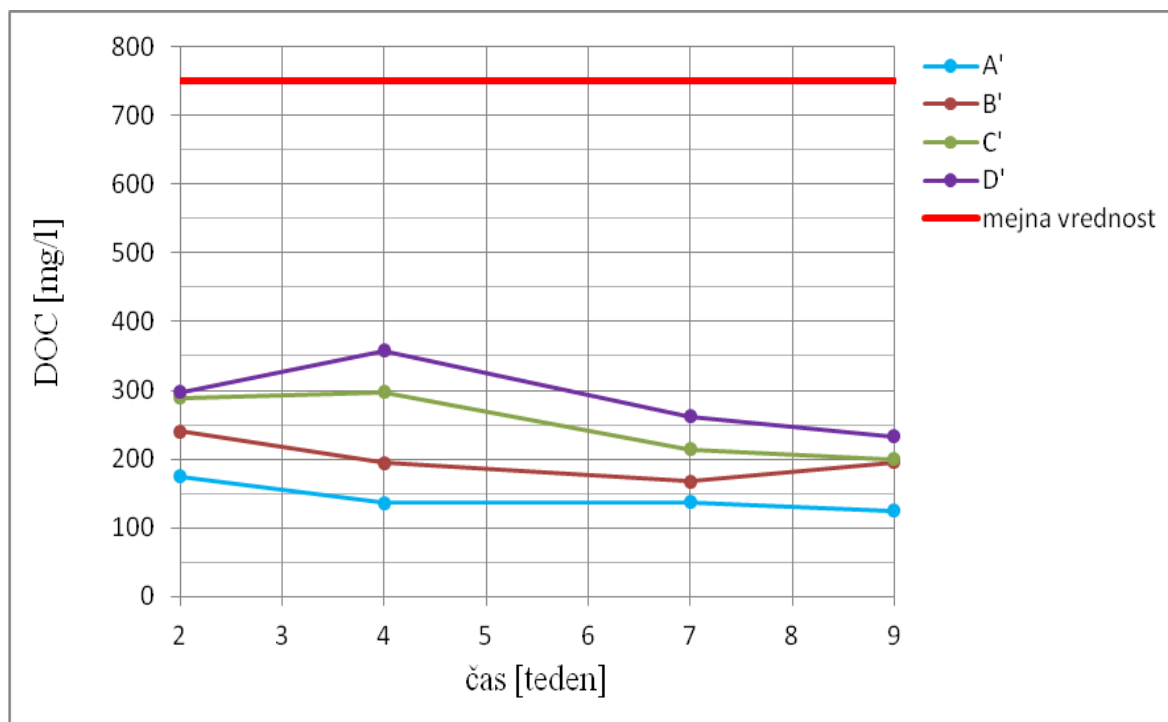
Številka vzorca	Čas stabilizacije (teden)			
	2	4	7	9
	A'			
Sušilni ostanek (mg/l)	936	808	800	830
pH (/)	9,68	9,43	9,21	9,04
DOC (mg/l)	175,3	136,8	137,8	125,3
	B'			
Sušilni ostanek (mg/l)	1320	880	940	1070
pH (/)	10,09	10,49	9,65	9,21
DOC (mg/l)	240,1	194,5	167,5	195,2
	C'			
Sušilni ostanek (mg/l)	1132	1588	1110	1130
pH (/)	11,23	11,92	10,03	9,3
DOC (mg/l)	289,6	297,4	214,1	199,5
	D'			
Sušilni ostanek (mg/l)	1300	1516	1280	1200
pH (/)	11,56	11,7	10,01	9,7
DOC (mg/l)	297,0	358	262,2	232,9
	E'			
Sušilni ostanek (mg/l)	1556	1776	1560	1220
pH (/)	12,01	11,96	10,76	9,73
DOC (mg/l)	269,7	325,5	593,9	261,3



Grafikon 4: Prikaz pH vrednosti izlužkov mešanic od A'-E' v odvisnosti od časa



Grafikon 5: Prikaz vrednosti sušilnega ostanka (mg/l) izlužkov mešanic od A'-E' v odvisnosti od časa



Grafikon 6: Prikaz vrednosti DOC (mg/l) mešanic od A'-D' v odvisnosti od časa

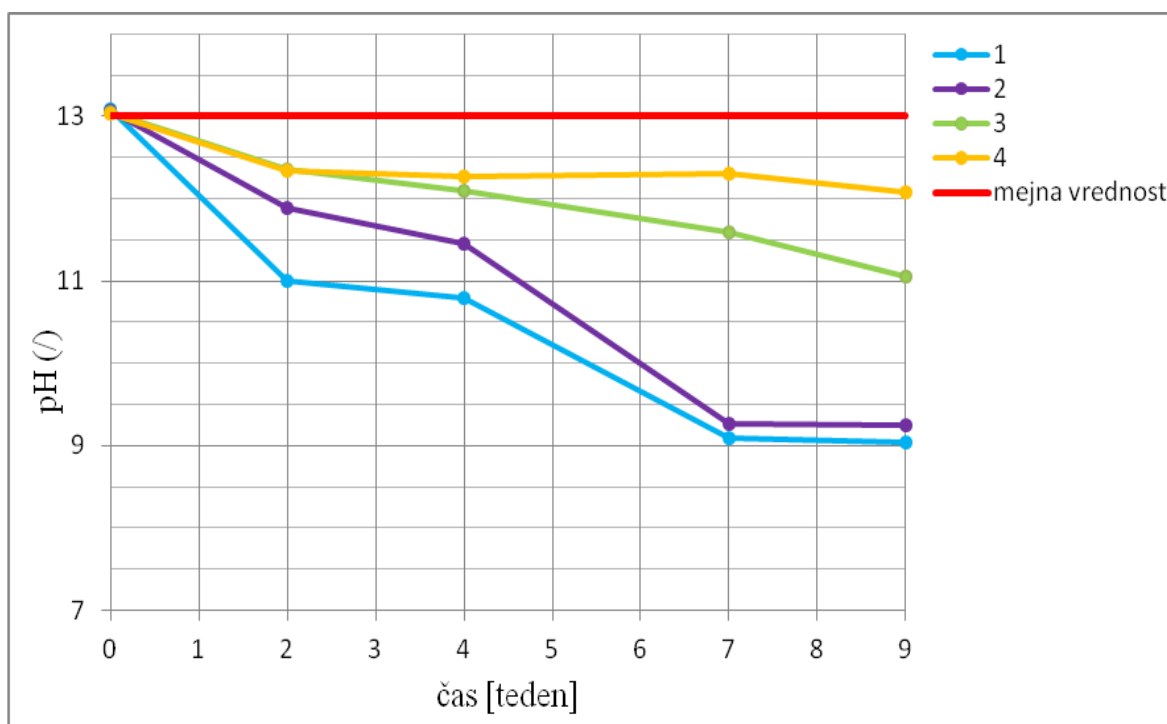
5.4 Mešanice odpadnega suhega pepela in dehidriranega blata

Rezultati v preglednici 18 prikazujejo vrednosti merjenih parametrov pastoznih mešanic suhega pepela in blata KČN.

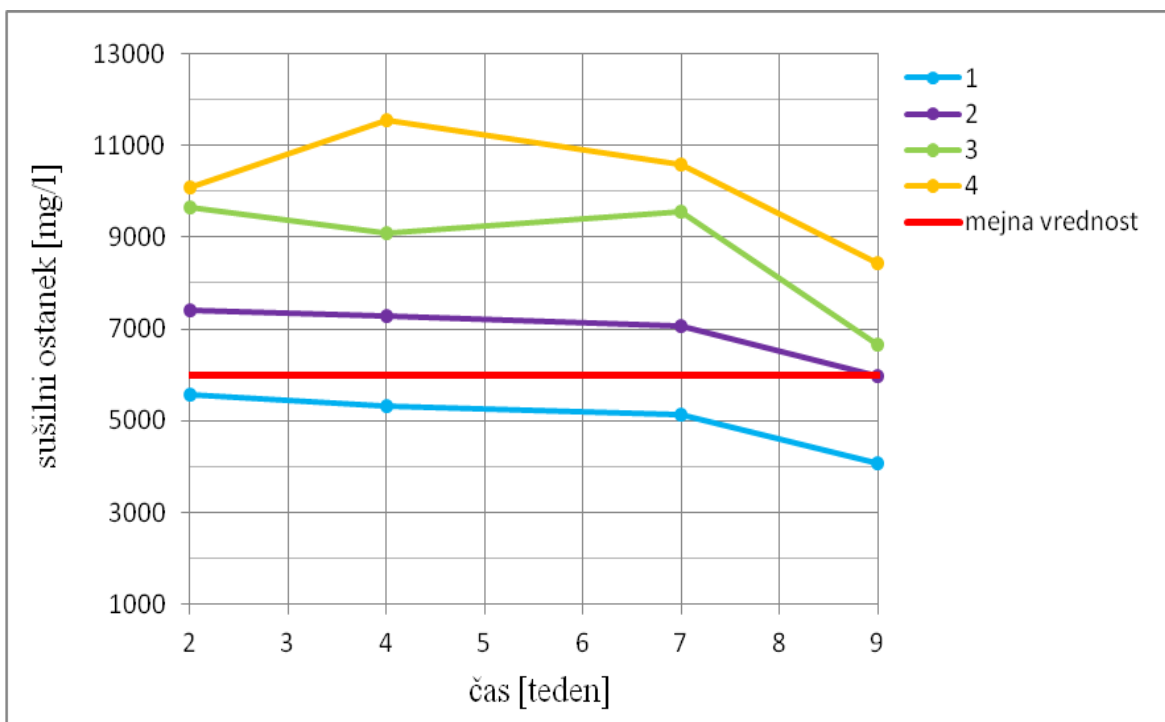
Preglednica 18: Vrednosti parametrov v izlužku mešanic suhega pepela in blata

	Čas stabilizacije (teden)				
	1	2	4	7	9
Številka vzorca	1				
Sušilni ostanek (mg/l)		5584	5330	5120	4080
pH (/)		10,59	11,01	9,1	9,04
DOC (mg/l)		1386,6	1095,1	840,9	653,3
	2				
Sušilni ostanek (mg/l)		7416	7280	7050	5960
pH (/)		11,88	11,46	9,24	9,24
DOC (mg/l)		1634,9	1534,9	1124,2	896,6
	3				
Sušilni ostanek (mg/l)		9644	9100	9560	6660
pH (/)		12,36	12,1	11,6	11,06
DOC (mg/l)		1633,6	1761	1779,8	1115,7
	4				
Sušilni ostanek (mg/l)		10088	11560	10580	8450
pH (/)		12,33	12,26	12,3	12,08
DOC (mg/l)		1689,4	1886,2	1924,1	1423,1
	5				
Sušilni ostanek (mg/l)	11638	11080	10472	11280	9840
pH (/)	13,0	12,67	12,8	12,8	12,90
DOC (mg/l)		713,7	726,2	777	797
	6				
Sušilni ostanek (mg/l)	11710	10828	11704	11260	10330
pH (/)	13,0	12,7	12,8	12,8	12,99
DOC (mg/l)		589,7	610,8	657,8	607,6

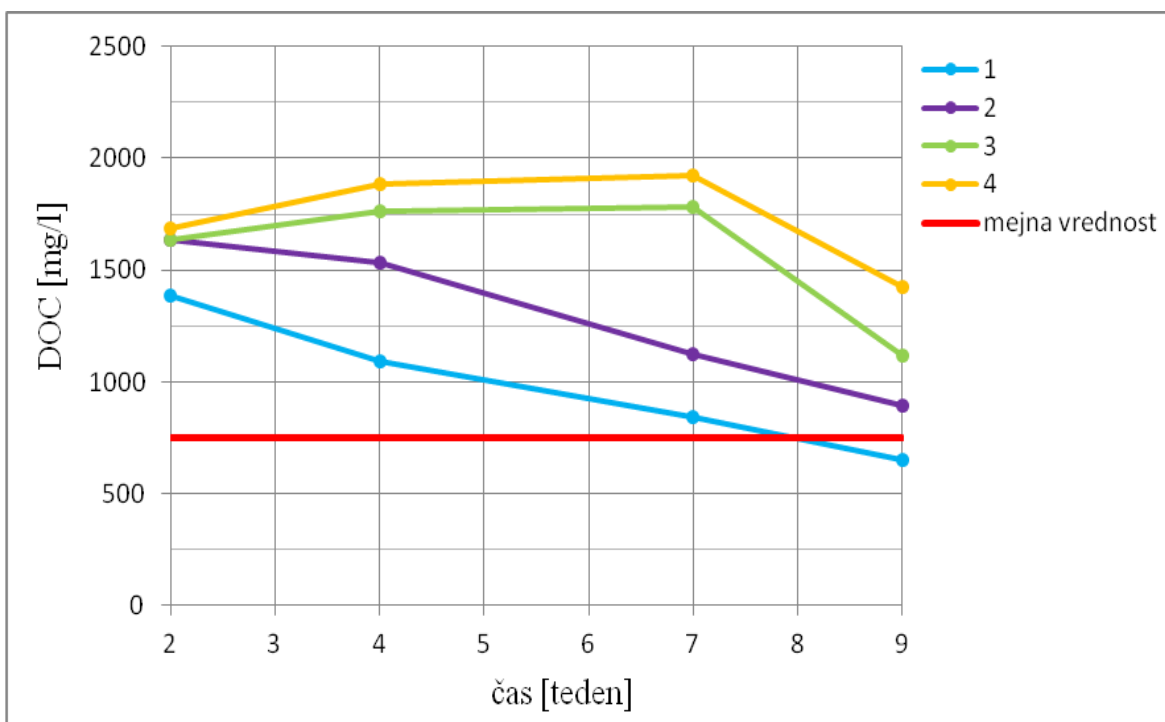
Vzorec številka 1 ima najnižjo vrednost pH-ja, t.j. 9,04, vzorec številka 4 pa najvišjo, 12,08. Prav tako raztopljene snovi znašajo med 4080 mg/l in 8450 mg/l, DOC pa med 653,3 mg/l in 1423 mg/l. Posebna sta dva vzorca s sipko strukturo (številka 5 in 6). Njun pH se v dveh mesecih skoraj nič ne spremeni, podatki so med seboj podobni in relativno konstantni. Minimalno pa tudi padejo vrednosti sušilnega ostanka in raztopljenega organskega ogljika.



Grafikon 7: Prikaz pH vrednosti izlužkov mešanic od 1-4 v odvisnosti od časa



Grafikon 8: Prikaz vrednosti sušilnega ostanka (mg/l) izlužkov mešanic od 1-4 v odvisnosti od časa



Grafikon 9: Prikaz vrednosti DOC (mg/l) izlužkov mešanic od 1-4 v odvisnosti od časa

6 DISKUSIJA

6.1 Vrednotenje rezultatov standardnih izlužkov staranih mešanic

Merjeni organski in anorganski parametri, t.j. pH, sušilni ostanek (mg/l) in raztopljeni organski ogljik (mg/l) v izlužkih staranih mešanic, pri vseh vzorcih, so s časom padli in se približali sprejemljivim mejnim vrednostim. Dosežena vrednost parametrov je odvisna od karakteristik vhodnih materialov, količine dodanega pepela in časa staranja. Vzorci od A'-E' so v primerjavi z vzorci od A-E, dosegli dosti nižje vrednosti parametrov, zato so tudi okoljsko sprejemljivejši.

Vsi rezultati sledijo padajočemu trendu le nekatere vrednosti nekoliko nihajo, so pa relativno majhna, tako da jih lahko zanemarimo. Največjo anomalnost sem opazila pri opazovanju DOC vrednosti, pri vzorcih E in E'. Vrednosti so močno odstopale, kar je verjetno posledica nehomogenosti majhnih vzorcev za analizo, saj trdne mešanice niso bile idealno premešane.

Ustreznost opravljenih postopkov in dobljenih rezultatov parametrov onesnaženosti lahko potrdim s primerjavo z ustreznimi zakonskimi predpisi, ki veljajo v Sloveniji. Upoštevala sem Uredbo o odlaganju odpadkov na odlagališča (Ur. l. RS, št. 32/06 in 32/09) (preglednica 6 in 7):

- pH: zgornja mejna vrednost pH je 13. Začetna vrednost je bila pri vseh vzorcih 13, nato pa je po dveh tednih začela padati. Na koncu raziskave je bil pH pri vseh vzorcih pod predpisano mejno vrednostjo. Najnižjo in najbolj ustrezno vrednost so dosegli vzorci z najmanjšo količino pepela, to so A (9,7), A' (9,04) in 1 (9,04).

Ker je v mešanici več blata oz. komposta, sem za primerjavo drugih dveh parametrov upoštevala kriterije, ki veljajo za izlužke odpadkov z visoko vsebnostjo biološko razgradljivih snovi (preglednica 7):

- sušilni ostanek: po končanem dvomesečnem procesu staranja je imel vzorec št. 1 koncentracijo 4080 mg/l sušilnega ostanka ali 40 800 mg/kg. Pri vzorcu A so celotne raztopljene snovi dosegle vrednost 1460 mg/l ali 14 600 mg/kg, pri A' pa 830 mg/l oz. 8300 mg/kg.
- raztopljene organske snovi (DOC): vzorec št. 1 je imel koncentracijo 653 mg/l ali 6530 mg/kg, pri vzorcu A je znašala 217,9 mg/l ali 2179 mg/kg, pri A' pa 125,3 mg/l ali 1253 mg/kg.

Nižji pH ter nižjo stopnjo izluževanja vodotopnih snovi in organskega ogljika sem dosegla pri vzorcih z nižjo vsebnostjo pepela in daljšim časom staranja. Zgornja primerjava se tudi nanaša na vzorce z 10 % pepela. Celoten proces stabilizacije v odvisnosti od časa pa lepo prikazujejo grafi od 1-9, za vsak vzorec posebej.

Za doseganje dobrih končnih produktov je potrebno integrirati optimalno količino odpadnega pepela. Glede na prikazano lahko rečem, da sem dobila boljše rezultate z manjšo količino pepela, do 10 %. Kuroła (2011) je prav tako z minimalno dozo pepela (4-8%), dosegel učinkovit proces kompostiranja in varen končni produkt.

Vgrajevanje pepela v odpadek, ne pomeni samo njegovo stabilizacijo ampak tudi bogatenje same sestave komposta ali blata, saj ima pepel raznoliko mineralno strukturo. Mnoge raziskave dokazujejo, da pepel tudi izboljša postopek kompostiranja. Povzroči povečanje toplote znotraj procesa in posledično večjo mikrobnost, manjše so izgube dušika, ki je potreben za rast rastlin in pospešuje razgradnjo organskih spojin (Kuba, 2008). Kuroła (2011) je v svojih raziskavah ugotovil izboljšano dovajanje kisika med procesom kompostiranja, zmanjšane emisije vonjav in povečano mineralizacijo.

6.2 Primerjava neobdelanega in stabiliziranega odpadnega lesnega pepela

Rezultati raziskave so pokazali (preglednica 11), da so kemijske lastnosti standardnega izlužka samostojnega neobdelanega suhega pepela okoljsko nesprejemljive, kar tudi omejuje njegovo neposredno uporabo. Problem predstavlja tudi velika vsebnost topnih soli ter njegova praškasta struktura, ki pri uporabi povzroča veliko prašenje.

Moker lesni pepel je deloma že stabiliziran z vodo (izpran, izlužen), zato so karakteristike v okviru predpisov. Kritična je le njegova alkalnost. Mešanje pepela z vodo pomeni spremembo njegove fizične strukture, kar tudi vpliva na izluževanje snovi. Fini delci se združijo v večje bolj goste delce (solidifikacija), kar med drugim tudi odpravi problem dvigovanja prahu (Steenari, 1999).

Količina vodotopnih snovi v izlužku suhega pepela je skoraj 2x preseгла dovoljeno vrednost. Začetna vrednost izlužka suhega pepela je 11 511 mg/l, ki se je v mešanicah stabilizirala. Začetne koncentracije v vzorcih so bile zelo visoke, nato strmo padajo in se kasneje umirijo. Začetne koncentracije sušilnega ostanka se gibljejo približno od 2700 mg/l v mešanicah z 10% suhega pepela pa do približno 5900 mg/l z 50% suhega pepela. Nato padajo in se umirijo na 1500 mg/l pa do 5500 mg/l (preglednica 16). Koncentracije sušilnega ostanka v mešanicah z mokrim pepelom so dosti nižje.

Začetne znašajo med 900 mg/l (10% mokrega pepela) in 1560 mg/l (50% mokrega pepela), po dveh mesecih staranja pa padejo na približno 800 mg/l in 1200 mg/l (preglednica 17).

Enako velja za pH vrednosti. Ravno visoka alkalnost suhega in mokrega pepela predstavlja omejitveni faktor pri ravnanju z njimi. Z integriranjem v drug odpadke in po dvo mesečnem staranju sem dobila manj alkalne raztopine. Najnižje dosežena vrednost je okoli 9.

Raven raztopljenega ogljika se je spustila pod 4 g/kg, nekateri vzorci z mokrim pepelom pa tudi pod 2 g/kg. Zelo podobne rezultate so dobili tudi v tujih raziskovalnih študijah, kjer so 4 g DOC/kg določili za prag, ki označuje zrelost komposta in primernost uporabe, brez učinkov na zemljo ali rast rastlin (Zmora, 2005).

DOC je bil pri mešanicah komposta s suhim pepelom (vzorci od A-E) večji od mešanic z mokrim pepelom (vzorci od A'-E'). Vzrok je v samih karakteristikah vhodnih materialov. V izlužku samega odpadka suhega lesnega pepela znaša DOC 84,6 mg/l, kar pomeni da je 3x večji od DOC vrednosti v izlužku mokrega lesnega pepela. Enako velja pri sušilnih ostankih (preglednica 12).

6.3 Potrditev hipotez

70 % vseh vzorcev, to so 1, A, B, C, D, E in A', B', C', D', E', zadovoljujejo vse cilje predpostavljene na začetku ter hkrati izpolnjujejo vse mejne kriterije parametrov, določene v predpisih. Na podlagi teh podatkov lahko potrdim hipoteze, ki sem jih predpostavila na začetku (poglavje 1.3). To dokazuje, da je mešanje dveh odpadnih materialov s ciljem vzajemne stabilizacije lahko produktivno.

Izjema so le vzorci mešanic blata in suhega pepela, ki po staranju še vedno presegajo mejne vrednosti pH, DOC in raztopljenih snovi. To so vzorci 2, 3, 4, 5 in 6. Vzorci blata z 20 %, 30 % in 40 % pepela, zadovoljujejo le kriterij pH vrednosti, ostala dva parametra (DOC in vodotopne snovi v izlužku) pa mejne vrednosti presegajo.

Posebna vzorca pa sta 5 in 6. Masno razmerje v mešanicah (preglednica 15) ne ustreza. pH vrednost je cel čas staranja zelo blizu mejne vrednosti 13, DOC in sušilni ostanki pa so konstantno nad mejno vrednostjo. V tem primeru bi morali stabilizacijo izvajati v rigoroznejših pogojih (mešanje, kompaktiranje) oz. s pomočjo katerega drugega funkcionalnega dodatka osnovni mešanici.

7 ZAKLJUČEK

Diplomska naloga predstavlja možnost hkratnega recikliranja dveh odpadnih materialov.

Tabelarično in grafično predstavljeni rezultati eksperimentalnega dela kažejo na to, da ima na njihove fizikalno-kemijske lastnosti in posledično tudi uporabo, velik vpliv pravilen proces staranja odpadnih materialov. Pod besedo "pravilno" mislim na staranje materialov oz. mešanic pod ustreznimi zunanji pogoji, kot so zadostna vlažnost, prezračevnost ter homogenost.

Z eksperimentalno nalogo sem dokazala stabilizacijo osnovnih kritičnih organskih in anorganskih parametrov v mešanicah in s tem predstavila zadovoljivo možnost uporabe teh proizvodov na različnih področjih. V primerjavi z rezultati dobljenimi na začetku poskusa so mešanice po koncu 9-ih tednov dosegle boljše rezultate. Dosegla sem ustrezno raven pH vrednosti, DOC in drugih raztopljenih snovi. Vrednosti so se spustile pod mejno vrednostjo, vendar nekatere še vedno strmo padajo, predvsem pri vzorcih z višjo količino pepela. Če pa bi poskus nadaljevala še nekaj tednov, bi se stopnja izlužljivosti organskih in drugih vodotopnih snovi ustalila na neki konstantni vrednosti. To je lepo razvidno pri pH-ju, ki najprej strmo pada in nato s časoma doseže konstanto vrednost, t.j. približno 9.

Ne glede nato, pridobljeni rezultati lepo sledijo predvidenemu trendu in jih lahko primerjam z že narejenimi znanstvenimi študijami.

Iz vsega navedenega lahko zaključim, da je predelava odpadnega lesnega pepela na način integriranja v drug komplementaren odpadek zelo učinkovita. Z eno potezo lahko zadovoljimo ekološke in ekonomske cilje s hkratnim upoštevanjem zakonodajnih smernic. V prid narave se tako zmanjša količina odloženih odpadkov in izkoriščanje dragocenih naravnih virov. Hkrati pa to pomeni upoštevanje predpisov in zahtev uredb, ki urejajo to področje. Eden od pomembnejših zahtev je hierarhična lestvica gospodarjenja z odpadki, ki povzročitelje odpadkov poleg čim večjega preprečevanja nastajanja odpadkov obvezuje tudi, da nastale odpadke reciklirajo in ponovno uporabijo. Z postopkom integriranja pepela v drug odpadek, upoštevamo ta predpis, saj iz dveh odpadnih snovi dobimo novo uporabno snov. Gre za visoko kakovosten ekološki produkt, ki bi ga proizvajalci lahko tržili in uporabljali v različne namene. Povzročitelji odpadkov pa si lahko tako zmanjšajo vedno večje stroške transportiranja, skladiščenja in odlaganja na odlagališčih odpadkov.

Vse te pozitivne lastnosti potrjujejo, da je razvoj v tej smeri smiseln.

VIRI

Bjurström, H., Herbert, R. 2009. The Swedish Ash Programme 2002-2008. Biomass, wastes, peat - any solid fuel but coal. Stockholm, VÄRMEFORSK Service AB.

Bougnom, B. P., Mair, J., Etoa, F. -X., Insam, H. 2009. Composts with wood ash addition: A risk or a chance for ameliorating acid tropical soils? *Geoderma* 153, 3-4: 402-407.

Bougnom, B. P., Knapp, B. A., Elhottova, D., Koubova, A., Etoa, F. -X., Insam, H. 2010. Designer compost with biomass ashes for ameliorating acid tropical soils: Effects on the soil microbiota. *Applied Soil Ecology* 45, 3: 319-324.

Bougnom, B. P., Knapp, B. A., Etoa, F. -X., Insam, H. 2011. Possible use of Wood Ash and Compost for Improving Acid Tropical Soils. V: Bougnom, B. P., Insam, H. (ur.). *Recycling of Biomass Ashes*. Austria, Innsbruck, Institute of Microbiology, University of Innsbruck: ch. 7.

Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., Verloo, M. G. 2001. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresource Technology* 77, 3 : 287-295.

Direktiva o spodbujanju uporabe energije iz obnovljivih virov. 2009/28/ES. 2009.

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:sl:PDF>

(Pridobljeno 2.10.2011)

Gori, M., Bergfeldt, B., Reichelt, J., Sirini, P. 2011. Effect of natural ageing on volume stability of MSW and wood waste incineration residues. V: Sardinia, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium, Italy, 3-7 October 2011.

Grile, V., Husić, M., Zule, J., Podobnik, E. 2010. Management of waste biomass ashes in Slovenia – present situation, problems and solutions. V: Conference on Recycling of Biomass Ashes, Innsbruck, Austria, March 22-23.

Grile, V. 2010. Status in načini ravnanja z odpadnim lesnim pepelom. Ljubljana, Kemijski Inštitut.

Grile, V., Husić, M. 2010. Problemi pri termični izrabi lesnih odpadkov in možne rešitve. Ljubljana, Kemijski Inštitut.

Insam, H., Franke-Whittle, I.H., Knapp, B.A., Plank, R. 2009. Use of wood ash and anaerobic sludge for grassland fertilization: Effects on plants and microbes. *Die Bodenkultur* 60: 39-51.

Knapp, B. A., Insam H. 2011. Recycling of Biomass Ashes: Current Technologies and Future Research Needs. V: Bougnom, B. P., Insam, H. (ur.). *Recyclig of Biomass Ashes*. Austria, Innsbruck, Institute of Microbilology, University of Innsbruck: ch. 1.

Krajnc, N. 2004. Potenciali lesne biomase v Sloveniji. V: Mednarodni posvet »Les za izdelke ali kurjavo«, 26-27. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo in Tehnološki inštitut lesarstva.

Krajnc, N., Piškur, M., Klun, J., Premrl, T., Piškur, B., Robek, R., Mihelič, M., Sinjur, I. 2009a. Lesna goriva: drva in lesni sekanci; proizvodnja, standardi kakovosti in trgovanje. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije.

Krajnc, N., Piškur, Premrl, T., Mihelič, M. 2009b. Proizvodnja toplote iz lesne biomase. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije.

Kuba, T., Tschöll, A., Partl, C., Meyer, K., Insam, H. 2008. Wood ash admixture to organic wastes improves compost and its performance. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 127, 1-2: 43-49.

Kurola, J. M., Arnold, M., Kontro, M. H., Talves, M., Romantschuk, M. 2011. Wood ash for application in municipal biowaste composting. *Bioresource Technology* 102, 8: 5214–5220.

Lesna biomasa. Zavod za Gozdove Slovenije. 2006.

http://www.biomasa.zgs.gov.si/index.php?p=les_raba (Pridobljeno 30.09.2011)

Melotti, R., Santagata, E., Bassani, M., Salvo, M., Rizzo, S. 2011. Characterization of ash from biomass combustion for its use as filler in asphalt mixtures. V: Sardinia, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium, Italy, 3-7 October 2011.

Obnovljivi viri energije. Kazalci okolja v Slovenji. 2009. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje.

http://kazalci.arso.gov.si/?data=indicator&ind_id=272 (Pridobljeno 1.10.2011)

Peek, D.R. 2004. Nemške izkušnje ravnanja z lesnimi ostanki. V: Mednarodni posvet »Les za izdelke ali kurjavo«, 14-25. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo in Tehnološki inštitut lesarstva.

Polanc, J. 2011. Lesni in gozdni sečni ostanki kot gorivo. Magistrsko delo. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo: 110 f.

Poročilo zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2010. 2011. Ljubljana, ZGS.

<http://www.zgs.gov.si/slo/zavod/informacije-javnega-znacaja/letna-porocila/index.html> (Pridobljeno 9.10.2011)

Ribbing, C. 2010. Swedish Ash program with focus on bio ashes. V: Conference on Recycling of Biomass Ashes, Innsbruck, Austria, March 22-23.

Ribbing, C. 2007. Environmentally friendly use of non-coal ashes in Sweden. Waste Management 27, 10: 1428–1435.

SIST EN 14961-1:2010. Trdna biogoriva – Specifikacije goriv in razredi – 1. del: Splošne zahteve.

Steenari, B.M., Karlsson, L.G., Lindqvist, O. 1999. Evaluation of the leaching characteristics of wood ash and the influence of ash agglomeration. Biomass & Bioenergy 16: 119-136.

Statistični urad RS. Povpraševanje po podatkih nastalih, predelanih in odstranjenih količin odpadnega lesnega pepela. Sporočilo za: Belmira Muratović, Oddelek za statistiko okolja in energetike. 7. oktober. 2011. Osebna komunikacija.

Uredba o mejnih vrednostih vnosa nevarnih snovi in gnojil v tla. Ur. l. RS, št. 84/2005: 8709. Sprememba: Ur. l. RS, št. 113/2009.

<http://www.uradni-list.si/1/objava.jsp?urlid=200584&stevilka=3646> (Pridobljeno 17.09.2011)

Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališčih. Ur. l. RS, št. 32/2006: 3351. Sprememba: Ur. l. RS, št. 61/2009.

<http://www.uradni-list.si/1/objava.jsp?urlid=201161&stevilka=2892> (Pridobljeno 17.09.2011)

Uredba o predelavi nenevarnih odpadkov v trdno gorivo. Ur. l. RS, št. 57/2008: 6210.

<http://www.uradni-list.si/1/content?id=86955> (Pridobljeno 17.09.2011)

Uredba o ravnanju z odpadki. Ur. l. RS, št. 34/2008: 3194.

<http://www.uradni-list.si/1/objava.jsp?urlid=200834&stevilka=1358> (Pridobljeno 17.09.2011)

Vogt, M., Gann M., Irle, M. 2007. Detection methods in practical application. Management of recovered wood. Klagenfurt: University studio press: 131-156.

Zmora-Nahum, S., Markovitch, O., Tarchitzky, J., Chen, Y. 2005. Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity. Soil Biology & Biochemistry 37, 11 : 2019-2116.