

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

Kandidat:

**MITJA ŠTANGELJ**

**ŠTUDIJA STABILIZACIJE LESNEGA PEPELA S CO<sub>2</sub>  
POD RAZLIČNIMI POGOJI**

Diplomska naloga št.: 183/VKI

**STUDY OF THE WOOD ASH STABILIZATION BY  
TREATMENT WITH CO<sub>2</sub> UNDER VARIOUS  
CONDITIONS**

Graduation thesis No.: 183/VKI

**Mentor:**  
izr. prof. dr. Viktor Grilec

**Predsednik komisije:**  
doc. dr. Dušan Žagar

Ljubljana, 26. 3. 2012

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

<b>Stran z napako</b>	<b>Vrstica z napako</b>	<b>Namesto</b>	<b>Naj bo</b>
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

## **IZJAVE**

Podpisani Mitja Štangelj izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Študija stabilizacije lesnega pepela s CO<sub>2</sub> pod različnimi pogoji«.

Izjavljam, da je elektronska različica povsem enaka tiskani različici.

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

Ljubljana, 13.3.2012

Mitja Štangelj

## **IZJAVE O PREGLEDU NALOGE**

Nalogo so pregledali naslednji učitelji:

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>662.6/3.11:665.625 (043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Mitja Štangelj</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Viktor Grilc, univ. dipl. inž</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Študija stabilizacija lesnega pepela s CO<sub>2</sub> pod različnimi pogoji</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>64 str., 18 pregl., 14 sl., 15 graf.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>odpadni lesni pepel, stabilizacija, karbonatizacija, recikliranje, odlaganje</b>

### **Izvleček**

Odpadni lesni pepel je kakovosten odpadki kurjenja lesa, ki ima preveliko vrednost, da bi ga odlagali na odlagališča odpadkov in ne s pridom izkoriščali. Njegovo direktno odlaganje ali neposredna aplikacija na različnih področjih je omejena, predvsem zaradi njegove praškaste konsistence, vsebnosti vodotopnih snovi, vsebnosti nezgorelega lesa (oglja) in močne 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 odpadki (komposti, blata ...).

V diplomski nalogi sem predstavil možne postopke ravnanja z odpadnimi lesnimi pepeli pri nas in v Evropi ter v eksperimentalnem delu naloge prikazal enega od postopkov predelave odpadnega lesnega pepela v stabiliziran produkt. To je karbonatizacija z ogljikovim dioksidom pod različnimi pogoji.

Na koncu sem iz pepela P2 dobil produkt ustreznih karakteristik, ki omogočajo njegovo 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. Pepel P1 je bil težavnejši za obdelavo. Po končanem postopku karbonatizacije vsi parametri niso zadoščali kriterijem mejnih vrednosti. Da bi tudi iz takšnih pepelov, ki so okoljsko zahtevnejši dobili produkt ustreznih karakteristik, bi bilo potrebno karbonatizacijo izvajati dalj časa in s predhodnim vlaženjem, na kar lahko sklepam po najnovejših raziskavah, ki so bile narejene na tem področju.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 662.6/3.11:665.625 (043.2)  
**Author:** Mitja Štangelj  
**Supervisor:** izr. prof. dr. Viktor Grilc, univ. dipl. inž  
**Title:** Study of the wood ash stabilization by treatment with CO<sub>2</sub> under various conditions  
**Notes:** 64 p., 18 tab., 14 fig., 15 graph.  
**Key words:** wood ash, stabilization, carbonatization, recycling, landfilling

### **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 fine powder consistency, high content of soluble substances, unburned carbon fraction or their high alkalinity. With relatively simple procedures they can be processed 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 sewage sludge.

Options of handling wood ashes are represented in this study. At first the treatment of waste wood ashes in Slovenia and Europe has been reviewed. In the experimental part an attempt of stabilization of wood ash by means of spontaneous or forced carbonization has been studied on two fresh industrial ash samples.

End products from the ash sample P2 has quality characteristics that allow its use in various areas. It can be used in forests ecosystems, landfill construction (top covering layers), for covering mine tailings, geotechnical uses or for fertilization in agriculture and improvement of acidic soils, which allows mineral structure and the corresponding pH of these products. The ash sample P1 was more difficult to process. After the carbonatization process some parameters were above limit values. For more environmentally demanding ashes - according to the latest studies - carbonatization taking longer time periods should be implemented using pre-wetted samples to get acceptable product quality characteristics.

## **ZAHVALA**

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

Prav tako se zahvaljujem svojim staršem, ki so mi omogočili študij in me skozi vsa ta leta spodbujali ter mi pomagali, da sem uresničil zastavljene cilje.

## KAZALO VSEBINE

<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Delovna hipoteza .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Namen dela .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Razvoj reševanja problematike odpadnega lesnega pepela .....</b>	<b>2</b>
<b>2 TEORETIČNI DEL .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Pregled podatkov o lesu.....</b>	<b>10</b>
2.1.1 Les in lesna biomasa .....	10
2.1.2 Lastnosti lesa .....	11
2.1.3 Kemijska sestava lesa.....	13
2.1.4 Energijska vrednost lesa.....	13
<b>2.2 Odpadna lesna biomasa in lesni odpadki .....</b>	<b>15</b>
2.2.1 Vrste lesnih odpadkov .....	15
2.2.2 Mejne vrednosti za kakovost odpadne lesne biomase in lesnih odpadkov .....	15
<b>2.3 Pregled podatkov o lesnem pepelu .....</b>	<b>17</b>
2.3.1 Glavne značilnosti lesnih pepelov .....	18
2.3.2 Kemična sestava pepela .....	18
2.3.3 Težke kovine in organska onesnaževala .....	18
<b>2.4 Lastnosti lesnih pepelov.....</b>	<b>20</b>
<b>2.5 Pregled potencialne uporabnosti lesnih pepelov .....</b>	<b>22</b>
2.5.1 Lesni pepel kot nevtralizacijsko sredstvo.....	22
2.5.2 Lesni pepel v geotehniki .....	23
2.5.3 Uporaba lesnega pepela v gozdovih.....	25
2.5.4 Uporaba lesnega pepela na kmetijskih zemljiščih.....	26
<b>2.6 Potencialni postopki stabilizacije lesnih pepelov .....</b>	<b>27</b>
<b>2.7 Informatika in zakonodaja v zvezi z odpadnim lesnim pepelom .....</b>	<b>29</b>
2.7.1 Informacijski sistem za odpadke v RS .....	29



2.7.2 Uredba o ravnanju z odpadki (Ur. l. RS, št. 34/08).....	30
2.7.3 Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališčih (Ur. l. RS, št. 32/06, 61/11).....	31
2.7.4 Uredba o obremenjevanju tal z vnašanjem odpadkov (Ur. l. RS, št. 34/08 in 61/11) .....	31
2.7.5 Uredba o sežiganju odpadkov .....	32
2.7.6 Klasifikacija lesnih pepelov .....	33
<b>3 EKSPERIMENTALNI DEL .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 Delovni materiali in njihove karakteristike.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Analizne metode .....</b>	<b>35</b>
3.2.1 Sejalna analiza.....	35
3.2.2 Nasipna gostota .....	36
3.2.3 Določitev vlage materiala (odpadka) .....	36
3.2.4 Določitev vsebnosti žarilnega ostanka .....	36
3.2.5 Priprava standardnih izlužkov in vrednotenje njihovih lastnosti .....	37
3.2.6 Merjenje pH.....	38
3.2.7 Določanje sušilnega ostanka izlužka.....	38
3.2.8 Določanje raztopljenega organskega ogljika – DOC .....	38
<b>3.3 Metode poskusov stabilizacije.....</b>	<b>38</b>
3.3.1 Statična karbonatizacija na zraku .....	38
3.3.2 Dinamična karbonatizacija na zraku v rotacijskem bobnu.....	39
3.3.3 Dinamična karbonatizacija v komori .....	40
3.3.4 Dinamična karbonatizacija s CO <sub>2</sub> pod tlakom v rotacijski tlačni celici.....	41
<b>4 REZULTATI.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 Sejalna analiza.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2 Posnetek pepela P1 pod elektronskim mikroskopom .....</b>	<b>45</b>
<b>4.3 Statična karbonatizacija pepela v tankem sloju na zraku .....</b>	<b>47</b>
<b>4.4 Dinamična karbonatizacija pepela na zraku v rotacijskem bobnu .....</b>	<b>49</b>

<b>4.5 Dinamična karbonatizacija pepela s CO<sub>2</sub> v rotacijski komori .....</b>	<b>52</b>
<b>4.6 Dinamična karbonatizacija pepela s CO<sub>2</sub> v rotacijski tlačni celici .....</b>	<b>55</b>
<b>4.7 Potrditev hipotez .....</b>	<b>57</b>
<b>4.8 Primerjava neobdelanega in stabiliziranega odpadnega lesnega pepela .....</b>	<b>57</b>
<b>5 DISKUSIJA .....</b>	<b>59</b>
<b>6 ZAKLJUČEK .....</b>	<b>60</b>
<b>VIRI .....</b>	<b>61</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Kurilnost lesa iz nekaterih drevesnih vrst (Kollmann, 1982; povzeto po: Polanc, 2011).....	12
Preglednica 2: Kemijska sestava lesa (SIST – TS CEN/TS 14961:2005; povzeto po: Kranjc in sod., 2009). .....	13
Preglednica 3: Kurilnost in vsebnost pepela različnih biomasnih goriv ..... (SIST – TS CEN/TS 14961:2005; povzeto po Kranjc in sod. 2009). .....	14
Preglednica 4: Limitni parametri in njihove mejne vrednosti svežega in odpadnega lesa (Uredba o predelavi nenevarnih odpadkov v trdno gorivo, Ur. l. RS, št. 57/08). .....	16
Preglednica 5: Kemijska sestava različnih pepelov lesnih goriv (Kranjc, 2009). .....	20
Preglednica 6: Karakteristične lastnosti lesnih pepelov v Sloveniji (Grilc, 2010). .....	21
Preglednica 7: Letne količine nastalih lesnih odpadkov v RS v letu 2010 (Grilc in Husič, 2010). .....	30
Preglednica 8: Največje vrednosti anorganskih parametrov umetno pripravljene zemljine, ki je namenjena rekultivaciji tal.....	32
Preglednica 9: Klasifikacija lesnega pepela (Uredba za ravnanje z odpadki, Ur. l. RS, št. 34/2008). .....	33
Preglednica 10: Lastnosti uporabljenih pepelov .....	35
Preglednica 11: Lastnosti standardnih izlužkov osnovnih materialov .....	35
Preglednica 12: Rezultati sejalne analize – pepel P1 .....	43
Preglednica 13: Rezultati sejalne analize – pepel P2 .....	43
Preglednica 14: Prirast mase in vrednosti parametrov v izlužku obeh pepelov .....	47
Preglednica 15: Vrednost parametrov v izlužku pepela P1 .....	49
Preglednica 16: Vrednost parametrov v izlužku pepela P2 .....	49
Preglednica 17: Vrednost parametrov v izlužku obeh pepelov .....	52
Preglednica 18: Vrednosti parametrov stabiliziranih pepelov in izlužkov pepela P1 po 24 – ih urah kontakta s komprimiranim CO <sub>2</sub> v odvisnosti od tlaka.....	55

## KAZALO SLIK

Slika 1: Pepel v cesto gradnji (Ribbing, 2010).....	24
Slika 2: Dozorel, stabiliziran, zdrobljen in presejan odpadni lesni pepel v kupih (Ribbing, 2010).....	28
Slika 3: Pladnja s pepelom P1 (levo) in P2 (desno) .....	39
Slika 4: Rotacijski boben.....	40
Slika 5: Rotacijska komora, odprta.....	41
Slika 6: Kalorimetrijska bomba s pepelom in CO <sub>2</sub> (levo) in polnilna naprava z manometrom (desno) ....	42
Slika 7: Slika pepela P1, narejena z elektronskim mikroskopom, primer 1 .....	45
Slika 8: Arbitrna sestava steklastega dela pepela P1, narejena z elektronskim mikroskopom .....	45
Slika 9: Emisijski spekter steklastega dela materiala v pepelu P1 .....	45
Slika 10: Slika pepela P1, narejena z elektronskim mikroskopom, primer 2.....	46
Slika 11: Arbitrna sestava kristaliziranjega dela P1, narejena z elektronskim mikroskopom .....	46
Slika 12: Emisijski spekter kristaliziranega dela materiala v pepelu P1 .....	46
Slika 13: Rentgenski posnetek svežega lesnega pepela (pepel P2).....	54
Slika 14: Rentgenski posnetek dinamično karbonatiziranega lesnega pepela z zrakom (pepel P2). Karbonatizacija povzroči nastanek številnih novih spojin, kar se odraža s številčnejšimi piki in pomikom dominantnih oksidnih pasov spektra v karbonatne.....	54

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Granulometrična krivulja pepela P1 .....	44
Grafikon 2: Granulometrična krivulja pepela P2 .....	44
Grafikon 3: Potek statične karbonatizacije obeh pepelov .....	47
Grafikon 4: Prikaz žaroizgube obeh pepelov pri 900°C (%) v odvisnosti od časa kontakta....	48
Grafikon 6: Prikaz vrednosti raztopljenih snovi v izlužku obeh pepelov v odvisnosti od časa kontakta .....	49
Grafikon 8: Prikaz pH vrednosti izlužkov obeh pepelov v odvisnosti od časa kontakta z zrakom .....	51
Grafikon 9: Prikaz vrednosti raztopljenih snovi v izlužku obeh pepelov v odvisnosti od časa kontakta .....	51
Grafikon 10: Prikaz odvisnosti žaroizgube obeh pepelov pri 900°C (%) od časa kontakta s CO <sub>2</sub> .....	52
Grafikon 11: Prikaz pH vrednosti izlužkov obeh pepelov v odvisnosti od časa kontakta s CO <sub>2</sub> .....	53
Grafikon 12: Prikaz vrednosti raztopljenih snovi v izlužku obeh pepelov v odvisnosti od časa kontakta s CO <sub>2</sub> .....	53
Grafikon 13: Prikaz žaroizgube pepela P1 pri 900°C (%) v odvisnosti od tlaka CO <sub>2</sub> .....	55
Grafikon 14: Prikaz pH vrednosti izlužkov pepela P1 v odvisnosti od tlaka CO <sub>2</sub> .....	56
Grafikon 15: Prikaz vrednosti raztopljenih snovi v izlužku pepela P1 v odvisnosti od tlaka CO <sub>2</sub> .....	56

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

Al	Aluminij
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminijev oksid
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
As	Arzen
B	Bor
Ca	Kalcij
CaO	Kalcijev oksid
CaCO <sub>3</sub>	Kalcijev karbonat
Ca(OH) <sub>2</sub>	Kalcijev hidroksid
CO <sub>2</sub>	Ogljikov dioksid
Cd	Kadmij
Cl	Klor
Cr	Krom
Cu	Baker
DOC	Raztopljeni organski ogljik
F	Fluor
Fe	Železo
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Železov oksid
Hg	Živo srebro
K	Kalij
K <sub>2</sub> O	Kalijev oksid
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Kalijev karbonat
Mo	Molibden
Mg	Magnezij
MgO	Magnezijev oksid
MgCO <sub>3</sub>	Magnezijev karbonat
Na	Natrij
Na <sub>2</sub> O	Natrijev oksid
Ni	Nikelj
Pb	Svinec
S	Žveplo

Si	Silicij
SiO <sub>2</sub>	Silicijev dioksid
SO <sub>3</sub>	Žveplov trioksid
TOC	Skupni organski ogljik
Ur. l. RS	Uradni list Republike Slovenije
V	Vanadij
Zn	Cink

## SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

<b><i>Izlužek</i></b>	raztopina pridobljena z laboratorijskim testom izluževanja odpadka
<b><i>Karbonatizacija</i></b>	kemijski proces, ki nastane z reakcijo (vezavo) ogljikovega dioksida in snovi (oksidi) na površini trdnega materiala
<b><i>Obdelava odpadkov</i></b>	zajema postopke predelave, obdelave in odstranjevanja odpadkov
<b><i>Odpadek</i></b>	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)
<b><i>Odstranjevanje odpadkov</i></b>	namenjeno je 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)
<b><i>pH</i></b>	brez dimenzijski anorganski parameter, ki določa bazičnost (od 7-14) in kislost (1-7) raztopin
<b><i>Predelava odpadkov</i></b>	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 energetske 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*** kemijski parameter, ki ga določamo v izlužku odpadka in izraža raztopljeno vsebnost organskega ogljika
- Skladiščenje odpadkov*** je skladiščenje odpadkov za največ tri leta pri izvajalcu obdelave odpadkov. Za obdobje daljše od treh let, gre za odlaganje odpadkov
- Totalni organski ogljik*** kemijski organski parameter, ki izraža skupno vsebnost organskega ogljika v odpadku
- Začasno skladiščenje*** je skladiščenje odpadkov na kraju nastanka (pri povzročitelju), pred njihovo oddajo v zbiranje ali obdelavo

## 1 UVOD

Podnebne spremembe in predvideno bližnje pomanjkanje fosilnih goriv je povzročilo povečano uporabo biomase v energetske namene. Zaradi vedno višjih okoljskih zahtev postaja lesna biomasa za javnost čedalje bolj interesantna. Goriva iz lesne biomase predstavljajo eno izmed najbolj zanimivih vrst obnovljivih energetskih virov. Glede na druge vrste biomas ima lesna biomasa največji prihranek CO<sub>2</sub> na enoto ustvarjene energije.

Masovna uporaba lesa povzroča nastajanje velikih količin lesnih odpadkov, njihova termična izraba pa znatne količine odpadnega lesnega pepela.

Lesni pepel je praviloma nenevaren odpadek, razen če ni bil pridobljen s sežigom močno onesnaženega lesa (težke kovine, predvsem Cu, Hg in Cr; organoklorni pesticidi, PAO-i).

Uporaba pepela je možna vendar zapletena, saj je proizvodnja energije iz lesne biomase raznolika. Zgorevanje različnega lesa poteka v napravah različnih tipov in velikosti, od velikih do zelo majhnih enot. Kakovost pepela ni odvisna le od goriva, temveč tudi vrste kurišč in kako ta delujejo, kot npr. ali so nizko ali visoko obremenjena.

Varna uporaba ali odstranjevanje, zlasti enostavnost glede upravljanja in minimalnega tveganja za prihodnje stroške, sta pogosto najpomembnejša parametra pri uporabi pepela iz majhnih in velikih objektov.

Podatki o količinah lesnih pepelov so pri nas dokaj nezanesljivi. Problem je v tem, da lesni pepel pogosto ni prepoznan kot dejavnost, ki jo je potrebno prijaviti.

Kljub temu, da predstavlja potencialno gnojilo, je lesni pepel pogosto odložen na odlagališča odpadkov. Pogosta omejitvena faktorja za odlaganje lesnega pepela na odlagališčih nenevarnih odpadkov sta njegova vodotopnost in alkalnost, lahko pa tudi vsebnost nezgorelega ogljika, ki se prišteva med organsko snov.

Sveži lesni pepel, čeprav neonesnažen, je zaradi svoje visoke alkalnosti neprimeren za uporabo na kmetijskih zemljiščih.

### **1.1 Delovna hipoteza**

Odpadni lesni pepel je sam po sebi kakovosten in potencialno uporaben ostanek, nastal s sežigom lesa. Vendar pa je svež zaradi svoje močne alkalnosti, velike vodotopnosti in prašljivosti neprimeren za direktno uporabo. Zato bom poskusil izvršiti njegovo stabilizacijo s postopkom karbonatizacije. Predvidevam, da:

- (1) bo pH materiala zaradi oblikovanja karbonatnih mineralov sčasoma upadel
- (2) se bo zmanjšala tudi vsebnost vodotopnih snovi
- (3) bo v sprejemljivem času staranja pridobljen stabilen material ustreznih karakteristik, ki ne bodo presegale predpisanih mejnih vrednosti za odlaganje na odlagališčih nenevarnih odpadkov oz. za uporabo v kmetijstvu in gozdarstvu.

### **1.2 Namen dela**

V diplomski nalogi sem preizkusil različne metode za stabilizacije lesnega pepela s karbonatizacijo (vezavo CO<sub>2</sub> na pepelne okside). Karbonatizacija je naravna reakcija, katero je mogoče pospešiti s tem, da reaktivne alkalne materiale v pepelu izpostavimo povišanim koncentracijam in tlakom ogljikovega dioksida. Z ogljikovim dioksidom reagirajo številne odpadne snovi, zlasti tiste pridobljene z industrijskimi termičnimi postopki, vključno z ostanki sežiganja.

S postopkom karbonatizacije tako lahko zmanjšamo vrednosti kritičnih parametrov (alkalnost, topnost), ki omejujejo odlaganje lesnega pepela na odlagališča nenevarnih odpadkov, prav tako pa s tem pepel lahko pretvorimo v obliko primerno za uporabo v okolju (kmetijstvo, gozdarstvo).

### **1.3 Razvoj reševanja problematike odpadnega lesnega pepela**

Lesni pepel predstavlja trden 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 karakteristike določajo kvaliteto pepela in njihovo primernost za nadaljnje uporabe. Lesni pepel vsebuje makro in mikro elemente, ki jih je potrebno izkoristiti. Danes nastaja v velikih

količinah predvsem zaradi sežiganja sveže ali odpadne biomase za pridobivanje toplote in električne energije. Sežig kontaminiranega lesa lahko povzroči tudi vsebnost težkih kovin in organskih onesnaževal, ki jih je nujno potrebno omejiti (Insam in Knapp, 2011). Demeyer in sod. (2001) so preučevali lastnosti lesnih 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 na 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. Ugotovili so, 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. Uporaba lesnega pepela v kmetijstvu in gozdarstvu ne predstavlja večjih nevarnosti za okolje pod pogojem, če je uporabljen v zmernih količinah in da se uporablja samo pepel iz gorenja čistega neonesnaženega lesa (Muratović, 2011).

Lesni pepel je načeloma nenevaren odpadki zanimive mineralne vsebnosti vendar ni inerten odpadki, 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 (ogljja) 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 CO<sub>2</sub> na okside alkalijskih in zemljoalkalijskih kovin v pepelu (K, Ca, Mg). Nastali karbonati so mnogo manj topni in alkalni od oksidov in hidroksidov, zato postane pepel primeren za odlaganje. Naravni proces karbonatizacije oksidov v pepelu je zaradi majhne vsebnosti CO<sub>2</sub> v zraku slabo učinkovit, zato so ga izboljšali z uvajanjem CO<sub>2</sub> 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.

S karbonatizacijo so se tako ali drugače ukvarjali številni avtorji. Glede na sestavo ostankov zgorevanja, je pretežen del stabilizacije odvisen od reakcij med kislimi in bazičnimi oksidi (Bjurström in Herbert, 2009). S pepeli se lahko zapolni podzemne jame, ki so služile shranjevanju kurilnega olja. Predhodna izkušnja je bila, da je pH vrednost na začetku visoka, vendar pa strmo pada in koncentracije svinca v usedlinski vodi se znižajo za faktor 20 do 50 že v roku enega meseca. Tako so postavili hipotezo, da s karbonatizacijo preprečimo izločanje

svinca in znižamo pH. Čeprav je razpoložljivost CO<sub>2</sub> precej nizka je mogoče potrditi, da je ravnovesje karbonatov glavni dejavnik pri znižanju pH.

Karbonati težkih kovin so na splošno manj topni kot njihovi kloridi in sulfati. Ko je pepel izpostavljen zraku in vlagi, je to do neke mere naraven proces. Vendar pa povečanje izkoristka in skrajšanje časovnega obsega procesa lahko vodi v izboljšanje lastnosti pepelov v zvezi z okoljskimi merili. Po Ecke - jevi trditvi (2001) lahko ugotovimo, da se mobilnost kritičnih elementov (svinec, cink, krom) po karbonatizaciji zmanjša. S karbonatizacijo lahko stabiliziramo nekatere elemente kot so npr. težke kovine.

Svensson in sod. (2005), Todorović in Ecke (2006) ter Todorović in sod. (2006) so z namenom, da bi ugotovili koliko lahko spremenijo lastnosti odpadnih lesnih pepelov, karbonatizirali leteči pepel, nastal s sežigom lesa. Raziskavo so naredili v okviru poskusnega projekta »Ash Programme«. Pri neobdelanem pepelu so bili kritični elementi krom, svinec in selen. Po karbonatizaciji so se spremenile izluževalne lastnosti pepela, predvsem v zeleno smer, vendar ne dovolj, da bi vplivale na razvrščanje teh materialov v skladu z direktivo o odpadkih ali merili sprejemljivosti za odlagališča. So pa potrdili, da je to učinkovit način za zmanjšanje koncentracij in topnosti klora.

Primaren tok odpadkov kar zadeva termične procese predstavljajo pepeli iz sežiga komunalnih odpadkov in pepeli iz biomase. Mnoge evropske države (zlasti Nemčija, Nizozemska, Francija in Danska) uporabijo velik del grobega pepela (žlindre), nastalega s sežigom komunalnih odpadkov kot sekundarni gradbeni material pri gradnji cest in nasipov (Gori in sod., 2011). Nasprotno pa večina pepela iz biomase konča na odlagališčih odpadkov ali pa se ga integrira v tla, s čimer se vrača hranila kot so Ca, K, Mg in P. Vendar, če upoštevamo, da stroški odlaganja pepela naraščajo, prav tako pa se povečuje njegova količina, je potrebno vzpostaviti trajnostno ravnanje s pepelom.

V državah EU je najpogostejša metoda stabilizacije po gašenju, staranje na zraku 6 – 12 tednov. Grobi pepel je heterogen material z zapleteno mineralno sestavo. »Staranje« je proces, ki se naravno pojavi v ostankih sežiganja kot posledica več dejavnikov kot so pH, redoks potencial, temperatura in vlažnost ter koncentracije nekaterih sestavin (npr. CO<sub>2</sub>). Počasne mineraloške spremembe, ki nastajajo skozi čas, spreminjajo izluževanje težkih kovin bodisi na srednji ali dolgi rok (Gori in sod., 2011).

Vpliv staranja na elemente v sledovih je pomemben, saj je pH tisti parameter, ki določa topnost kovin. Za večino trdnih oblik je bila minimalna topnost ugotovljena pri pH = 8.

Splošno zmanjšanje portlandita v obliki kalcita in anhidrita je imelo za posledico nižje vrednosti pH izlužkov in večjo stabilnost volumna. Kar zadeva stabilnost volumna se lahko kot material pri gradnji cest uporabi le tisti pepel, ki izponjuje vse postavljene kriterije. Postavljene kriterije pa lahko dosežemo s karbonatizacijo, saj izboljšuje stabilnost pepela (Gori in sod., 2011).

Podnebne spremembe, ki smo jim priča že nekaj časa in nas bodo spremljale tudi v prihodnosti močno vplivajo na stabilnost makadamskih cest na Švedskem. Največji problem predstavlja zamrzovalno – odtajevalni cikel. Stabilizacija makadamskih cest, predvsem nosilne plasti, je mogoča z geotekstilom, močnim lesom ali s cementom. Možna pa je tudi uporaba lesnega pepela. Lesni pepel je bogat s kalcijem, aluminijem in silicijem kar mu daje vezivne lastnosti, odvisno od razmerja med minerali silikatov, kalcijevimi oksidi in hidroksoidi. Pepel mešan z obstoječim materialom se z reakcijama hidratacije in karbonatizacije otrdi, zato se stabilnost ceste poveča. Prav tako je tlačna trdnost mešanice s pepelom višja kot tlačna trdnost samega materiala. To pomeni, da nobeno drugo sredstvo za stabilizacijo razen pepela ni potrebno uporabiti. Vezivne lastnosti pepela omogočajo nadomestitev cementa, s čimer prihranimo energijo in zmanjšamo emisije pri proizvodnji cementa, morda pa tudi nekaj denarja. Torej lahko potrdimo, da je mogoče doseči dober stabilizacijski učinek, pri deležu pepela 30 % pa bi taka cesta lahko zdržala več kot 12 zamrzovalno – odtajevalnih ciklov. Z okoljskega vidika, elementi prisotni v pepelu izvirajo iz gozda, zato vrnitev hranilnih snovi in mineralov, ki so bili nekoč odvzeti s sečnjo dreves ne bi smeli bistveno spremeniti okolje (Nordmark in sod., 2011).

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 in Herbert, 2009).

Zaprta odlagališča nenevarnih odpadkov so potencialni vir ogljikovega dioksida. Plina na odlagališčih nastane z biološko razgradnjo odpadkov in je sestavljen predvsem iz metana, ogljikovega dioksida, dušika in kisika.

Gunning in sod. so preučili možnosti zgorenega deponijskega plina kot vir ogljikovega dioksida za uporabo v nadzorovani pospešeni karbonatizaciji. Cilj teh poskusov je bil najprej namen zbiranja virov odpadnega ogljikovega dioksida in nato pretvarjanje nevarnih ostankov sežigalnic, t.j. pepela tako v material, primeren kot inženirsko polnilo, kot tudi agregat za uporabo v betonskih konstrukcijah in proizvodnji zidakov. Ob stiku s pepelom se je iz plinov pri izgorevanju bistveno zmanjšala vsebnost ogljikovega dioksida kar dokazuje, da je mogoče izkoristiti vir tega plina za koristno uporabo. Izpiranje iz karbonatiziranih proizvodov je bilo znotraj stabilne, ne – reaktivne meje odlagališča in je po tem takem primerno za uporabo na prizorišču kot geotehnični medij in za izdelavo betonskih gradbenih blokov.

Najnovejše raziskave karbonatizacije pepelov so bile nedavno predstavljene na konferenci "Ash 2012", ki je potekala v Stockholmu.

Raziskava, ki so jo opravili Supancic in sod. je v prvi vrsti vsebovala laboratorijske teste s katerimi so bile preiskane spremembe fizikalnih in kemijskih lastnosti predhodno skladiščenega pepela različnih frakcij. Pepel je bil skladiščen pod različnimi pogoji (suh, moker, na prostem, v zaprtem prostoru). Ker se mora pepel skladiščiti več mesecev se jim je zdelo logično izkoristiti to obdobje in pospešiti proces samo-utrjevanja pepela z dodajanjem vode. Zaradi kemične sestave lesnega pepela, ki vsebuje tudi nad 50 % CaO dodajanje vode pospeši tvorjenje Ca(OH)<sub>2</sub> in nadalje z zračnim CO<sub>2</sub> oblikovanje CaCO<sub>3</sub>. Ta proces spremeni kemične in fizikalne lastnosti pepela in vodi v samo-utrjevanje pepela. Ker samo-utrjevanje znižuje pH in prašenje pepela so potrdili, da lahko z dodajanjem določene količine vode izboljšamo proces karbonatizacije. Pri vseh vzorcih se je masa med skladiščenjem povečala kar je posledica vezave vode. Vrednost pH se je v povprečju znižala za 0,5 točke. Izpiranje kalcija in magnezija se je zmanjšalo, zvečalo pa izpiranje kalija in natrija pri vseh mokrih vzorcih. Pri suhih vzorcih so bili trendi podobni, vendar so bile spremembe manjše. Ker se med procesom karbonatizacije pH zniža tako preprečimo škodljive učinke visoke alkalnosti na talno vegetacijo. Prav tako je pozitiven rezultat manjše izpiranje kalcija, saj s takim pepelom dosežemo dolgotrajen učinek apnenja.

Do podobnih ugotovitev so prišle tudi druge skupine strokovnjakov. Leta 1979 je Kluge opazoval mehanske poškodbe v konstrukciji ceste, kjer je pepel iz sežiganja komunalnih odpadkov uporabljen kot gradbeni material. Poškodbe so bile posledica oksidacije elementarnega aluminija in formacija aluminijevega hidroksida, ki nabreka. Zato je predhodno staranje pepela pred njegovo uporabo ugodna rešitev. Po staranju so reakcije, ki povzročijo poškodbe v konstrukciji ceste končane. Kluge je prav tako predvidel, da ima

proces staranja pozitiven učinek na izluževalne lastnosti pepela. Kasnejše raziskave, v začetku 90-ih prejšnjega stoletja, ki jih je naredil Lahl so pokazale, da proces naravnega staranja zmanjša izpiranje težkih kovin. V koncu 90-ih let so ugotovili, da med staranjem poteka več reakcij v različnih plasteh pepela. Na površju poteka karbonatizacija kalcijevega hidroksida z ogljikovim dioksidom iz zraka ali padavinske vode. S tvorbo težko topnega kalcijevega karbonata se pH in koncentracije kalcija v izlužku zmanjšata. Prav tako se zaradi nižjega pH zmanjšajo topne sestavine cinka, svineca in bakra. V globljih plasteh kupa pepela karbonatizacija ne poteka. To je posledica omejenega prodiranja CO<sub>2</sub> v kup.

Na podlagi teh podatkov so zato razvili koncept pospešene karbonatizacije s kontaktom plinov, ki vsebujejo CO<sub>2</sub>. Reakcija je bila izvedena v tunelu kompostnika in karbonatizacija je bila po nekaj dnevih končana. Vrednost pH se je znižala prav tako pa tudi koncentracije raztopljenega svineca, bakra in molibdena. Pospešeno staranje ima smisel, če imamo na voljo zadosten vir CO<sub>2</sub> kot npr. deponijski plin ali bioplin. Rezultati so bili boljši pri vzorcih, ki so bili izpostavljeni padavinski vodi kot pri suhih vzorcih. So pa vseeno vsi izpolnjevali zahteve glede mejne vrednosti pH za odlagališča nenevarnih odpadkov. Na koncu so prišli do zaključka, da je potrebno zagotoviti prodiranje vode tudi globlje v kupe pepela, da lahko karbonatizacija poteče tudi v notranjosti, ne le na površju (Marzi in sod., 2012).

Poznamo pa tudi druge postopke predelave odpadnega lesnega pepela. Bougnom in sod. (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 kislih 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 kislim tlom, ki ne ustvarjajo optimalnih pogojev za njeno rast.

Poleg boljšega končnega produkta se izboljšajo tudi reakcije znotraj procesa kompostiranja. Bougnom in sod. (2009, 2010) so dokazali, da z dodatkom pepela lahko stimuliramo različne procese, ki se pojavijo s kompostiranjem: manjše uhajanje amoniaka ter večjo mikrobnost. Bougnom in sod. (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.

Podobno študijo so naredili Insam in sod. (2009) in dokazali, da lahko z mešanjem dveh različnih vrst odpadkov dobimo mešanico, uporabno v kmetijstvu. Raziskali so 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 onesnaženje v 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 izboljša zračnost. Ugotovili so, da anaerobno blato v kombinaciji z lesnim pepelom v zmernih dozah izboljša talne parametre, mikrobno 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.

Manjša količina odloženih odpadkov, ki jo s takim načinom ravnanja dosežemo pa izpolnjuje tudi zahteve zakonodaje. Evropski predpisi nalagajo ravnanje po hierarhični lestvici, kjer je odlaganje predstavljeno kot zadnja možnost. Direktno odlaganje pa 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, 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 karakteristike segajo pod te mejne vrednosti (Grilc in sod., 2010).

Z izboljšanjem in razvojem znanja o ravnanju in uporabi ostankov izgorevanja so se povečale tudi možnosti za širšo aplikacijo. Odskok na lestvici 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 na leta 2006-2008 in drugič na leta 2009-2011.

Ribbing (2010) podaja končne analize in ugotovitve dosežene v zadnjem obdobju opazovanja. 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.

Še ne poznan vendar uporaben postopek recikliranja pepela so preučili italijanski avtorji v članku Melotti in sod. (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 mešanicah 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 Pregled podatkov o lesu

#### 2.1.1 Les in lesna biomasa

Les spremlja človeka od pradavnine pa vse do današnjih dni. V svojem civilizacijskem razvoju je človek les vedno ponovno odkrival in prilagajal njegovo uporabo trenutnim potrebam. Iz njega je izdeloval predmete, ki so mu lajšali življenje ali pa je izkoriščal v njem skrito toploto. Tudi v današnji dobi v kateri prevladuje elektronika in umetne snovi ostaja les v svoji enkratnosti zelen in iskan material.

Les predstavlja poleg vodne energije najpomembnejši obnovljivi vir energije v Sloveniji. Povečana raba lesa v modernih individualnih, skupinskih in industrijskih kurilnih napravah za ogrevanje, procesno toploto in proizvodnjo električne energije je za Slovenijo pomembna za izboljšanje zanesljivosti in konkurenčnosti oskrbe z energijo, zmanjševanje emisij toplogrednih plinov in varstvo okolja. Površina gozdov se v Sloveniji povečuje že od leta 1875 – takrat je bila zabeležena komaj 36-odstotna gozdnatost ozemlja Slovenije. Po nekaterih podatkih gozd že presega 60 % njene površine in je tako Slovenija med najbolj gozdnatimi državami v Evropi. Večji delež imata v Evropi le Finska in Švedska (Škarja in sod. 2007).

V Sloveniji izvira razmeroma veliko lesa za proizvodnjo energije neposredno iz gozdov (okrog 60 %) v primerjavi z oceno EU, kjer je ta delež manjši in znaša 45 %. Raba lesa v energetske namene je v Sloveniji skoraj izključno vezana na gospodinjstva in lesno industrijo (Polanc, 2011).

Kar se tiče uporabe sveže lesne biomase moramo upoštevati dejstvo, da je treba za naravno ravnotežje ohranjati konstantno 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).

Biomasa nastaja iz sončne energije, ki se v obliki kemične energije shranjuje v organizmih rastlin in živali. Lesna biomasa je najbolj znan primer biomase. K lesni biomasi uvrščamo gozdne ostanke, ostanke pri industrijski predelavi lesa in kemično neobdelan les. Med goriva na osnovi lesne biomase uvrščamo lesno biomaso, ki še ni bila kemično obdelana, regenerirane ostanke lesa po kemični obdelavi (ostanki proizvodnje tanina...) ter reciklirane produkte, ki nastajajo iz lesne biomase (papir...).

### **2.1.2 Lastnosti lesa**

#### Fizikalne lastnosti:

- a) Vlažnost
  - b) Kurilnost
- a) Svež les vsebuje vezano ali higroskopsko vodo v celičnih stenah in prosto ali kapilarno vodo v celičnih lumnih. V procesu sušenja se najprej izloči prosta voda v obliki masnega toka. Vezana voda se izloči v nadaljevanju po difuzijski poti. Vsebnost higroskopske vode je omejena s številom prostih mest v celični steni, ki lahko vežejo vodo, tudi v več slojih.

Vodo v lesu opredeljujemo z vlažnostjo, ki je izražena kot delež mase vode glede na maso lesa v absolutno suhem stanju ( $u$ ) oziroma kot delež mase vode glede na maso vlažnega lesa ( $w$ ). Delež je pogosto izražen v odstotkih.

#### **Vlažnost $u$ (%)**

Delež mase vode v lesu glede na maso sušilnično (absolutno) suhega lesa.

$$u = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (1)$$

#### **Vsebnost vode $w$ (%)**

Delež mase vode v lesu glede na maso vlažnega lesa.

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_w} * 100 \quad (2)$$

$m_w$  – masa svežega lesa

$m_0$  – masa sušilnično suhega lesa

b) Kurilnost označuje tisto količino toplote, ki jo dobimo z zgorevanjem goriva, če dimne pline ohlajamo samo do temperature rosišča vodne pare, ki je v dimnih plinih. Voda, ki se sprošča, se šteje kot para, kar pomeni, da smo odšteli toplotno energijo, nujno za spremembo vode v paro (latentna toplota uparjanja vode pri 25 °C, t.j. 2,2 MJ/kg). Kurilnost lesa je odvisna od gostote, kemijske sestave lesa in vlažnosti lesa (Kranjc in sod., 2009).

Preglednica 1: Kurilnost lesa iz nekaterih drevesnih vrst (Kollmann, 1982; povzeto po: Polanc, 2011).

Drevesna vrsta	Kurilnost lesa			
	u = 0 % MJ/kg	u = 15 % MJ/kg	na m <sup>3</sup> GJ/m <sup>3</sup>	Prm* GJ/prm
Gaber	17,01	13,31	11,047	7,733
Bukev	18,82	14,84	10,685	7,479
Hrast	18,38	14,44	9,964	6,975
Jesen	17,81	13,98	9,646	6,752
Brest	/	14,70	9,996	6,997
Javor	17,51	13,73	8,650	6,055
Breza	19,49	15,43	10,029	7,020
Topol	17,26	13,52	6,084	4,259
Smreka	19,66	15,60	7,332	5,132
Jelka	19,49	15,45	6,952	4,866
Bor – rdeči	21,21	16,96	8,819	6,173
Macesen	16,98	14,86	8,767	6,137

\* prostorninski meter

Kurilna vrednost lesa se znižuje, če narašča vlažnost lesa, saj se del energije, ki se sprosti med procesom izgorevanja, porabi za izparevanje vode, ki jo les vsebuje. Za izhlapevanje kilograma vode se porabi 2,2 MJ energije.

### 2.1.3 Kemijska sestava lesa

Rastlinska biomasa v glavnem sestoji iz ogljika (C), kisika (O) in vodika (H). Ti trije elementi sestavljajo do 99% suhe snovi lesa. Za vpogled in boljšo predstavo o medsebojnih razmerjih med deleži kemijskih elementov v lesu, ločeno za iglavce in listavce, navajam v preglednici na naslednji strani podatke iz tehnične specifikacije SIST – TS CEN/TS 14961:2005.

Preglednica 2: Kemijska sestava lesa (SIST – TS CEN/TS 14961:2005; povzeto po: Kranjc in sod., 2009).

Parameter	Enota	Les iglavcev		Les listavcev	
		Značilna vrednost	Značilna variacija	Značilna vrednost	Značilna variacija
Ogljik, C	% m.s.	51	47 do 54	49	48 do 52
Vodik, H	% m.s.	6,3	5,6 do 7,0	6,2	5,9 do 6,5
Kisik, O	% m.s.	42	40 do 44	44	41 do 45
Dušik, N	% m.s.	0,1	< 0,1 do 0,5	0,1	< 0,1 do 0,5
Žveplo, S	% m.s.	0,02	< 0,01 do 0,05	0,02	< 0,01 do 0,05
Klor, Cl	% m.s.	0,01	< 0,01 do 0,03	0,01	< 0,01 do 0,03
Fluor, F	% m.s.	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005

Opomba: % m,s. – masni delež elementa na suho osnovo

### 2.1.4 Energijska vrednost lesa

Energijska vrednost goriva je količina energije, ki se sprosti pri popolnem izgorovanju enote mase goriva. Kadar ni posebej opredeljeno, je energijska vrednost mišljena kot kurilnost oz. spodnja kalorična vrednost (angl. *net calorific value* - *NCV*). Kurilnost lesa je odvisna od gostote, kemijske sestave lesa in vlažnosti lesa (Kranjc in sod., 2009).

Kurilna vrednost lesa se znižuje, če narašča vlažnost lesa, saj se del energije, ki se sprosti med procesom izgorovanja, porabi za izparevanje vode, ki jo les vsebuje.

Zaradi vsebnosti vode v lesu ločimo med naslednjimi energijskimi vrednostmi (Kranjc in sod., 2009):

- **Zgorevalna toplota H<sub>s</sub>** (prej zgornja kalorična vrednost – *gross calorific value*):

označuje vso toploto, ki se sprosti pri gorenju, vključno s toploto vodne pare v dimnih plinih (latentna toplota), če se vsi produkti ohladijo na začetno temperaturo. V produktih izgorevanja se voda šteje kot tekočina.

- **Kurilnost ( $H_i$ )** (prej spodnja kalorična vrednost – *net calorific value (NCV)*):  
označuje tisto količino toplote, ki jo dobimo z zgorevanjem goriva, če dimne pline ohlajamo samo do temperature rosišča vodne pare, ki je v dimnih plinih. Voda, ki se sprošča, se šteje kot para, kar pomeni, da smo odšteli toplotno energijo, nujno za spremembo vode v paro (latentna toplota uparjanja vode pri 25 °C, t.j. 2,2 MJ/kg).

Kadar ni posebej opredeljeno, je »energijska vrednost« mišljena kot kurilna oziroma neto energijska vrednost (NCV) (Kranjc in sod., 2009).

Preglednica 3: Kurilnost in vsebnost pepela različnih biomasnih goriv  
(SIST – TS CEN/TS 14961:2005; povzeto po Kranjc in sod. 2009).

Parameter	Les iglavcev			Les listavcev	
	Enota	Značilna vrednost	Značilna variacija	Značilna vrednost	Značilna variacija
Pepel	% m,s.	0,3	0,2 do 0,5	0,3	0,2 do 0,5
Zgorevalna toplota $H_{s, s.bp}$	MJ/kg <sub>s.bp</sub>	20,5	20,2 do 20,8	20,2	19,5 do 20,4
Kurilnost $H_{i, s.bp}$	MJ/kg <sub>s.bp</sub>	19,2	18,8 do 19,8	19,0	18,5 do 19,2

Parameter	Skorja iglavcev			Skorja listavcev	
	Enota	Značilna vrednost	Značilna variacija	Značilna vrednost	Značilna variacija
Pepel	% m,s.	4	2 do 6	5	2 do 10
Zgorevalna toplota $H_{s, s.bp}$	MJ/kg <sub>s.bp</sub>	21	20 do 23	21	20 do 23
Kurilnost $H_{i, s.bp}$	MJ/kg <sub>s.bp</sub>	20	19 do 21	20	19 do 21

Parameter	Sečni ostanki iglavcev			Sečni ostanki listavcev	
	Enota	Značilna vrednost	Značilna variacija	Značilna vrednost	Značilna variacija
Pepel	% m,s.	2	1 do 4	1,5	0,8 do 3
Zgorevalna toplota H <sub>s, s.bp</sub>	MJ/kg <sub>s.bp</sub>	21	20,8 do 21,4	20	19,7 do 20,4
Kurilnost H <sub>i, s.bp</sub>	MJ/kg <sub>s.bp</sub>	20	19,5 do 20,0	19	18,4 do 19,1

s.bp – suha osnova brez pepela

% m,s. – delež mase na suho osnovo

H<sub>s</sub> – zgorevalna toplota

H<sub>i</sub> – kurilnost

## 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 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 4. Za primerjavo so podane tudi mejne vrednosti za kakovost lesnega goriva iz pristojnega evropskega standarda.

Preglednica 4: Limitni parametri in njihove mejne vrednosti svežega in odpadnega lesa (Uredba o predelavi nenevarnih odpadkov v trdno gorivo, Ur. l. RS, št. 57/08).

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

Najbolj kritičen element glede doseganja mejnih vrednosti je klor, kar je razvidno iz zgoraj predpisanih vsebnosti nevarnih snovi. Presežene mejne vrednosti klora vsebuje celo naraven neonesnažen les, po nekaterih podatkih tudi za petkratno vrednost. Tega problema ni mogoče rešiti s preventivnimi in tehnološkimi ukrepi, zato so številni uporabniki postavljeni pred dilemo, 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.

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<sub>x</sub> – i, razni ogljikovodiki (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) ter majhne količine hlapnih težkih kovin (Hg, Pb, Zn, Cd, 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.

### **2.3 Pregled podatkov o lesnem pepelu**

Lesni pepel nastaja z zgorevanjem lesne biomase ali odpadnega lesa. Lesna biomasa v primerjavi z tekočimi in plinastimi gorivi vsebuje znaten delež pepela. Tako nastajajo pri gorenju emisije letečega pepela (emisije prahu), ki so pri popolnem izgorevanju sestavljene predvsem iz sulfatov, kloridov, karbonatov, silikatov in oksidov kalija, kalcija in magnezija.

Lesni pepeli so praviloma nenevarni odpadki, razen, če niso bili pridobljeni s sežigom močno onesnaženega lesa (težke kovine, predvsem Cu, Hg in Cr; nekovine npr. bor in arzen; organoklorni pesticidi, PAO-i).

V Sloveniji je bilo leta 2010 prijavljeno nastajanje 435.260 ton lesnih odpadkov raznih vrst in 178 ton lesnih pepelov. Vprašanje je, koliko so te številke točne, saj lesni odpadki (in njihovo kurjenje) pogosto niso prepoznani kot dejavnost, ki jo je potrebno prijavljati. Podobno je z nastajanjem in ravnanjem z lesnim pepelom. Pri pepelu ugotovljeno neustreznost podatkov javnega informacijskega sistema prispeva neustrezna klasifikacija tega odpadka v katalogu odpadkov (Grilc, 2010).

### **2.3.1 Glavne značilnosti lesnih pepelov**

Pepel lahko razdelimo v dve skupini:

- **Ogorke**, ki tvorijo precejšen del pepela, ki se nabira pod rešetko kotla in se steka v rezervoar za skladiščenje (pepelnik). Nasipna gostota ogorkov je 1300 kg/m<sup>3</sup>.
- **Leteči pepel** je pepel, ki izhaja iz čiščenja zgorelega plina in ga lahko dodatno razdelimo v:
  - lahki ciklonski pepel;
  - pepel iz elektrostatskih in vrečastih filtrov.

### **2.3.2 Kemična sestava pepela**

Lesni pepel, preostal po kurjenju čistega naravnega lesa, vsebuje predvsem alkalijske in zemljoalkalijske okside, karbonate 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, železo, mangan in žveplo (Knapp & Insam, 2011). Pri zgorevanju lesa organske snovi (celuloza in hemiceluloza, lignin, smole ...) prehajajo v CO<sub>2</sub> in vodno paro, anorganske sestavine pa mineralizirajo v okside in silikate. Po ohladitvi pepela in med njegovim začasnim shranjevanjem na zraku poteka naglo vezanje ogljikovega dioksida (karbonatizacija) in vlage (hidratacija), kar povzroča strjevanje pepela. Nastali karbonati so mnogo manj alkalni in topni od oksidov in hidroksidov (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 aluminij, 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 in Insam, 2011).

### **2.3.3 Težke kovine in organska onesnaževala**

Odpadni les je lahko kontaminiran v različnem obsegu z barvami, z zaščitnimi sredstvi in premazi. Nekatere aktivne sestavine lahko predstavljajo tveganje. Med temi so pentaklor fenol, spojine živega srebra, arzena in kroma, kakor tudi kreozotno olje (Peek, 2004). Da bi

preprečili migracijo onesnažil v izdelke iz recikliranega lesa in da bi minimalizirali tveganja, ki se pojavljajo ob predelavi in uporabi odpadnega lesa oz. njegovega pepela, običajno kontroliramo naslednje parametre (Vogt in sod., 2007):

- težke kovine, kot so As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sn, Ti, Zn,
- policiklične aromatske ogljikovodike: naftalen, antraceni, kreozotno olje (ta vsebuje benzopiren),
- halogene spojine klora, broma in fluora,
- pentaklorfenol (PCP) in heksaklorbenzen (lindan),
- poliklorirani bifenil (PCB),
- hlapne organske snovi (HOS oz. VOC).

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 in 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 kontaminiranega odpadnega lesa (Grilc, 2010).

Sestavine pepela, ki najbolj škodljivo vplivajo na okolje (svinec, kadmij in cink), se večinoma nabirajo v drobnem, t.i. letečem pepelu (Preglednica 5).

Preglednica 5: Kemijska sestava različnih pepelov lesnih goriv (Kranjc, 2009).

Elementi	Enota	Pepel iz lesnih sekancev	Pepel iz drevesne skorje	Pepel iz sečnih ostankov
<b>pH</b>	% s.s.	12,8	12,7	12,5
<b>C<sub>org</sub></b>		1,3	0,8	5,9
<b>CO<sub>2</sub></b>		7,2	4	12,5
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>		3,6	1,7	2,5
<b>K<sub>2</sub>O</b>		6,7	5,1	7,1
<b>CaO</b>		44,7	42,2	35,5
<b>MgO</b>		4,8	6,5	5,7
<b>Na<sub>2</sub>O</b>		0,6	0,8	0,5
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>		4,6	7,1	2,3
<b>SiO<sub>2</sub></b>		25,0	26,0	25,0
<b>SO<sub>3</sub></b>		1,9	0,6	2,4
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>		2,3	3,5	3,7
<b>MnO</b>		1,7	1,5	2,6
<b>Cu</b>		mg/kg s.s.	126,8	87,8
<b>Zn</b>	375,7		618,6	1429,8
<b>Co</b>	15,3		23,9	16,7
<b>Mo</b>	1,7		4,8	3,4
<b>As</b>	8,2		11,4	7,8
<b>Ni</b>	61,5		94,1	71,9
<b>Cr</b>	54,1		132,6	137,2
<b>Pb</b>	25,4		25,3	35,6
<b>Cd</b>	4,8		3,9	16,8
<b>V</b>	42,0		58,4	26,7

% m.s. – delež mase na suho osnovo: s.s. – suha snov

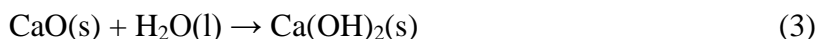
#### 2.4 Lastnosti lesnih pepelov

Že v starem veku so ljudje poznali razliko med kislimi in bazičnimi snovmi. Iz lesnega pepela so z vodo izlužili snovi, ki so imele bazične lastnosti. V lesnem pepelu so poleg nezgorelega ogljika še CaO, CaCO<sub>3</sub>, MgO, MgCO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> in drugi kovinski oksidi, karbonati in silikati

(Al, Fe, Zn...). Nekatere od teh snovi so topne v vodi in nekatere z vodo tudi reagirajo, zato ima vodna suspenzija lesnega pepela bazične lastnosti.

Primer:

CaO reagira z vodo, pri tem nastane kalcijev hidroksid Ca(OH)<sub>2</sub>.



Vodna raztopina kalcijevega hidroksida ima močne bazične lastnosti (pH > 13).

Pepeli so zelo alkalni, saj se njihov pH giblje v območju med 12,0 – 13,5. Poleg visoke alkalnosti pa je omejitveni faktor za odlaganje pepela na odlagališčih nenevarnih odpadkov tudi njegova vsebnost vodotopnih snovi. Problem vodotopnosti predstavljajo tako nevtralne soli (kloridi, sulfati), kot tudi soli težkih kovin, ki nastanejo pri sežigu onesnaženega lesa. Takšen pepel pa se seveda ne sme odlagati na odlagališčih za nenevarne odpadke.

Preglednica 6: Karakteristične lastnosti lesnih pepelov v Sloveniji (Grilc, 2010).

Parameter	Mejne vrednosti*	Izmerjene vrednosti
<i>Lesni pepel</i>		
Vlaga (% <sub>m</sub> )	-	0,3-2,3
Žaroizguba, 550°C (% <sub>m.s.</sub> )	6	0,7-2,8
TOC (%)	18	1,6-10,6
Standardni izlužek lesnega pepela <sup>#</sup>		
pH	13	12,4-12,9
Topne snovi (g/kg <sub>s.s.</sub> )	60	27,6- <b>149,2</b>
DOC (mg/kg <sub>s.s.</sub> )	800	10- <b>2255</b>

\* za odlagališče nenevarnih odpadkov; <sup>#</sup> SIST EN 12457-4, vrednosti napisane krepko so okoljsko kritične

Vendar pa lesni pepeli nimajo le slabih lastnosti. Zaradi visoke vsebnosti hranil je lesni pepel koristen za gozdarstvo in kmetijstvo, lahko pa se uporabi tudi za primešavanje kompostu. Lesni pepel je pomemben vir hranilnih snovi kot so fosfor, kalij, magnezij, kalcij in apno. V lesnih pepelih so v bistvu prisotna vsa makro in mikro hranila z izjemo dušika. Pepel bi se lahko uporabljal kot dodatek gnojilom, znano pa je tudi, da dodajanje pepela organskim odpadkom izboljša kakovost kompostu (Bougnom in sod., 2009, 2010; Zmora-Nahum in sod., 2005).

## 2.5 Pregled potencialne uporabnosti lesnih pepelov

Pepel iz biomase je trden ostanek, ki je nastal pri termičnih postopkih v energijskih obratih, kjer uporabljajo biomaso. Med pepele, pridobljene iz biomase, uvrščamo tudi lesni pepel. Vsebuje različna makro in mikro hranila, ki se s sežigom biomase ne izločijo. Ker postaja biomasa prevladujoča oblika uporabe bioenergije vse širše v svetu, se gradi vse več energijskih obratov na biomaso, posledično pa se tako proizvajajo ogromne količine pepela. Kljub vrednosti različnih elementov, ki jih pepel vsebuje, je njegovo odlaganje na odlagališča odpadkov še vedno pogosta praksa. To pa ustvarja veliko stroškov za upravljavce energetskih obratov na biomaso in izničuje potencial recikliranja pepela. Predpogoj za trajnostno uporabo lesnega pepela v kmetijstvu in gozdarstvu je njihova kakovost v smislu odsotnosti težkih kovin in organskih onesnaževal. Ustrezno zgorevanje in tehnike ločevanja različnih frakcij pepela so tako nujne.

### 2.5.1 Lesni pepel kot nevtralizacijsko sredstvo

Lesni pepel je več kot samo gnojilo. Uporabimo ga lahko kot nevtralizacijsko sredstvo za različne namene (odpadne vode, druge odpadke).

- ✓ Odpadne vode je potrebno pred izpustom v kanalizacijski sistem poleg številnih drugih postopkov tudi nevtralizirati. Konvencionalno se jih nevtralizira s suspenzijo hidratiziranega apna (Ca(OH)<sub>2</sub>) ter obdela s flokulanti in kompleksanti, da se iz nje oborijo in odstranijo škodljive kovine. Odpadni lesni pepel vsebuje velike količine apna, zato bi ga lahko v tem primeru uporabljali kot njegov nadomestek.
- ✓ Biološka blata iz čistilnih naprav vsebujejo veliko količino organskih snovi in so bogata s hranili, zato jih ne moremo neposredno odlagati na odlagališča nenevarnih odpadkov. Raziskave so pokazale, da je možno s kombinacijo bioloških blat in odpadnega lesnega pepela dobiti mešanico z zanimivimi novimi lastnostmi. Z dodajanjem suhega lesnega pepela se je vsebnost vlage v blatu precej zmanjšala, hkrati pa je postalo bolj stabilno pred propadanjem mikroorganizmov zaradi alkalnega pH, ki zavira biološko aktivnost. Če sta oba materiala zmešana v pravih razmerjih, lahko tako naredimo nove geotehnične materiale, katere bi lahko uporabljali v gradbeni industriji, npr. za zaključni pokrov odlagališč (Grile in sod. 2010).

- ✓ Kompostiranje je naravni način stabilizacije in potencialnega recikliranja organskih odpadkov. Pomeni biološko razgradnjo organskih snovi, npr. ostanki hrane, odpadki iz vrtov ali parkov, odpadni papir, karton ali drugi odpadki, ki se razgradijo, ipd. Biološka razgradnja poteka s pomočjo mešane mikrobne združbe v toplem, vlažnem in aerobnem okolju. Z njo pridobimo higieniziran, humificiran stabilni produkt prstnega, temnega, drobljivega izgleda in otipa, ki ga lahko uporabljamo kot gnojilo oz. kondicionat za tla (izboljša sestavo in lastnosti tal).

Primešan pepel nima negativnih posledic na proces kompostiranja, tudi omejitve glede vsebnosti težkih kovin je možno izpolniti v skladu z zahtevami. Kompost z dodanimi pepeli lahko poveča tudi produktivnost tal, celo bolj kot nekatera mineralna in organska gnojila (Bougnom in sod., 2009, 2010, 2011).

### ***2.5.2 Lesni pepel v geotehniki***

- Uporaba na odlagališčih odpadkov

Veliko odlagališč odpadkov se zapira, bodisi zaradi izkoriščenih kapacitet, bodisi ne izpolnjujejo zahtev evropske direktive o odlaganju odpadkov (Ribbing, 2010). Za končni pokrov za prekritje teh odlagališč je potrebno veliko materiala. Uporaba samo naravnih materialov bi v naravi pustila grde rane, pomenilo pa bi to tudi potratu dragocenih naravnih virov. Zato je zagotovo najbolje, da se v največji možni meri uporabljajo primerne odpadne snovi.

Na odlagališčih odpadkov se ostanki, nastali pri izgorevanju, uporabljajo kot pregrada proti vdiranju vode ali kisika v telo odlagališča. Lastnosti, ki pripomorejo k taki uporabi pepela, pridobljenega s sežigom trdnih biogoriv, so njihov visok pH in sposobnost vezanja. Potencial za uporabo v različnih kontekstih je dokaj velik in povpraševanje bi lahko preseglo razpoložljivost ustreznih ostankov.

Pepel lahko uporabljamo kot posamezen material ali v kombinaciji z blatom. Mora pa izpolnjevati zahteve v zvezi z zadostno gostoto.

Največji problem pri uporabi pepela na odlagališčih odpadkov je njegova izlužljivost. Zanj so odgovorne predvsem topne mineralne snovi (hidroksidi, karbonati, kloridi, sulfati...).



Dokazano je bilo tudi, da je izpiranje organskih snovi majhno in se s časom zmanjšuje (Ribbing, 2010).

- Gradnja cest

Z namenom uporabe lesnih pepelov v cestogradnji gozdnih komunikacij ne bi samo zmanjšali porabo standardnih materialov, ki se običajno uporabljajo. Z okoljskega vidika, elementi prisotni v pepelu, izvirajo iz gozdov, zato vračanje hranil in mineralov, ki so bili enkrat odstranjeni s sečnjo dreves ne bi smelo močno vplivati na okolje. Možno je le kratkotrajno zvišanje nekaterih raztopljenih snovi v tleh v bližini ceste, kjer je bil pepel uporabljen. Določene karakteristike, ki jih imajo pepeli, bi tudi pripomogle k izboljšanju voziščne konstrukcije (Ribbing, 2010):

- bolj toge in močnejše ceste
- stabilizacija slabega oz. starega materiala
- do 1/4 manj porabljenega materiala
- boljša odpornost proti zmrzali
- manj vzdrževanja
- brez izmerjenih vplivov na okolje
- ima koncept lahke konstrukcije.



Slika 1: Pepel v cesto gradnji (Ribbing, 2010)

- Nadomestek oz. dodatek za cement

Odpadni pepeli so v betonu odlično polnilo. Naravne vezivne lastnosti pepelov omogočajo nadomestitev cementa s čistim pepelom. Tako lahko privarčujemo s porabo energije in

emisijami, ki nastanejo pri proizvodnji cementa, zmanjšamo pa tudi stroške. Izziv je doseči isti kakovosten material in ravnanje z njem, kot je mogoče doseči pri uporabi cementa. Očitno pa je, da je potrebno več pepela kot cementa (Nordmark, 2011).

Študija pepela, nastalega z izgorevanjem biomase je pokazala, da bi bil primeren za oblikovanje cementnih mešanic, pod pogojem, da se predhodno zmanjša vsebnost klora v njem. Izluževalni testi so pokazali, da bi že enostopenjska obdelava tega pepela z deionizirano vodo lahko bila dovolj za zmanjšanje vsebnosti kloridov na sprejemljivo raven (Berra in sodel., 2011).

### ***2.5.3 Uporaba lesnega pepela v gozdovih***

Z masovnim krčenjem gozdov smo povzročili veliko izgubo hranil v gozdnih tleh. Še posebej zaskrbljujoče je, ker se po sečnji počisti prav vse, tudi manjše vejice in listje. Brez vsega tega pa si težko predstavljamo sklenjen krog hranil. V lesnih pepelih so prisotna vsa makro in mikro hranila z izjemo dušika. So zelo alkalni, zato jih lahko uporabljamo proti zakisljevanju. S svojim alkalnim pH med 12 in 13,5 lahko lesni pepel nadomesti apno in s tem preprečuje zakisljevanje gozdnih tal.

Poleg hranilnih snovi so v pepelih prisotne tudi številne težke kovine.

Da bi lesne pepele lahko uporabljali na gozdnih tleh, mora le ta izpolnjevati tri osnovne zahteve:

- Vsebovati mora vsa makro hranila, ki so prisotna v ostankih sečnje (razen dušika, ki se med izgorevanjem izloči).
- Ne sme povzročiti kopičenja težkih kovin ali drugih škodljivih snovi v tleh. Torej mora biti pridobljen s sežigom neonesnaženega lesa.
- Ne sme povzročati neposredne škode, medtem ko ga dodajamo tlom. Da so primerni za uporabo jih je treba najprej obdelati, da se zmanjša reaktivnost in topnost.

V Sloveniji moramo biti pri aplikaciji pepela v gozdove zelo previdni. Največji problem reciklaže lesnih pepelov v Sloveniji predstavljajo kraška tla, ki pokrivajo 44 % ozemlja Slovenije. To pomeni, da skoraj polovico naših tal sestavlja apnenec. Tod najdemo zelo malo površinske vode, saj padavinska voda takoj ponikne v podzemlje. Vendar pa ima kras bogate zaloge podzemnih kraških virov, s tem pa neprecenljivo vrednost, ne le naravovarstveno,

ampak tudi ekonomsko. Te vrednote pa niso samo po sebi umevne. Kras vse bolj ogrožen zaradi onesnaževanja tal in vode, ki je posledica intenzivnega kmetijstva, industrijske dejavnosti in vplivov poselitve ter razvoja infrastrukture. Samočistilna sposobnost kraških tal je zelo nizka, zaradi plitve prsti in porozne kamnine, skozi katero voda hitro pronica.

#### ***2.5.4 Uporaba lesnega pepela na kmetijskih zemljiščih***

Kmetijska dejavnost izčrpava hranilne snovi, potrebne za rast rastlin in ta hranila je zato potrebno nadomestiti. Kisla neplodna tla so glavna ovira za rast rastlin na zelo preperelih in izpranih tleh tako v Evropi kot tudi drugod po svetu.

Kislost tal lahko štejemo kot sposobnost tal, ki očitno kaže na lastnosti kislin. To se zgodi, ko procesi, ki ustvarjajo kislost odtehtajo dolgotrajne procese zakisljevanja. Tla opredelimo kot kislila, kadar je njihov pH nižji od 7. Zakisljevanje tal ima veliko vzrokov, ki so naravni in nenaravni. Čeprav je zakisljevanje tal počasen naraven proces, ga je mogoče pospešiti z rastlinami, živalmi in človekovimi dejavnostmi, ali pa ga upočasniti oz. obrniti z preišljenim ravnanjem (Bougnom in sod., 2011).

Vzroki, ki povzročajo kislila tla so:

- kisle padavine, ki povzročajo izpiranje tal;
- tla, ki so že sama po sebi kislila;
- načini kmetovanja.

Glavne značilnosti kislilih tal so: nizek pH, nizka vsebnost organskih snovi; pomanjkanje kalcija, magnezija in fosforja ter onesnaženost z aluminijem ali manganom; nizka mineralizacija in nitrifikacija.

Lesni pepel je stranski produkt sežiganja lesa in lesnih ostankov. Večina anorganskih hranil in elementov v lesu se med procesom sežiganja ohrani. Kvaliteta pepela je odvisna od lesa, drevesnih vrst in procesa zgorevanja. Vsebnost pepela in kovin je ponavadi večja v lubju. Leteči pepel vsebuje višje vrednosti težkih kovin kot usedline (večji, bolj grobi delci pepela). Zato za uporabo v kmetijstvu pride v poštev le grobi pepel (ogorki).

Lesni pepel je pomemben vir hranilnih snovi kot so fosfor, kalij, magnezij in kalcij in so njegove lastnosti podobne tistim, ki jih ima apno.

Gnojenje s pepelom lahko nadomesti izgube hranil, povzročene s spraviom pridelkov, spiranjem hranil in zakisljevanjem tal.

## 2.6 Potencialni postopki stabilizacije lesnih pepelov

Okoljsko neugodne lastnosti svežih lesnih pepelov lahko spremenimo z naslednjimi postopki:

1. karbonatizacija
2. kemična nevtralizacija
3. izpiranje
4. mešanje z drugimi agregati, ki so kisli (kompost,...)

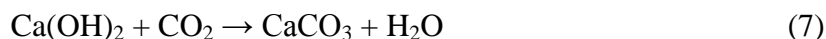
V Sloveniji svežega lesnega pepela zaradi njegove alkalnosti in vodotopnosti praviloma ne moremo neposredno odlagati na odlagališča nenevarnih odpadkov ali ga kako drugače koristno uporabiti brez predhodne stabilizacije.

V drugem delu diplomske naloge je podrobneje obdelan eden izmed postopkov stabilizacije lesnih pepelov in sicer karbonatizacija. Preizkušene so bile štiri različne metode karbonatizacije glede na koncentracijo in tlak ogljikovega dioksida ter načina kontakta med pepelom in plinom.

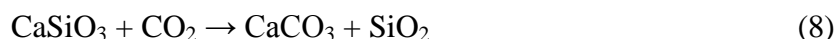
Karbonatizacija je naravna reakcija med oksidom ali bazo in CO<sub>2</sub>. Spontana karbonatizacija z zračnim CO<sub>2</sub> je zelo počasna; mogoče jo je pospešiti z uporabo povišane koncentracije ogljikovega dioksida oz. povišanim tlakom le-tega. Z ogljikovim dioksidom reagirajo številne odpadne snovi, zlasti tiste iz industrijskih termičnih postopkov (npr. metalurške žlindre in prahovi), vključno z ostanki sežiganja, kjer je najpogostejša komponenta močno bazični kalcijev oksid (živo apno):



Direktna vezava molekularnega CO<sub>2</sub> na živo apno je zelo počasna. Reakcija hitreje poteka ob prisotnosti vode. V tem primeru se CO<sub>2</sub> najprej raztopi v vodi, disociira in reagira z raztopljenim in disociiranim kalcijevim hidroksidom, pri čemer izpada netopni karbonat:



Podobno poteka tudi reakcija:



S postopkom karbonatizacije tako lahko zmanjšamo vrednosti kritičnih parametrov (alkalnost, topnost), ki omejujejo odlaganje lesnega pepela na odlagališča nenevarnih odpadkov, prav tako pa s tem pepel lahko pretvorimo v obliko, primerno za uporabo v okolju (kmetijstvo, gozdarstvo), če ne vsebuje predpisanih onesnažil.



Slika 2: Dozorel, stabiliziran, zdrobljen in presejan odpadni lesni pepel v kupih (Ribbing, 2010)

Karbonatizacijo lahko izvedemo na različne načine, bistveno pa je, da ločimo med spontano in pospešeno karbonatizacijo.

Bolj enostavna je spontana karbonatizacija, saj s samo pripravo postopka nimamo veliko dela. Ponavadi je pepel skladiščen v kupih in se ga pusti starati več mesecev. S staranjem pepela na zraku poteka vezava zračnega CO<sub>2</sub> na okside alkalijskih in zemljoalkalijskih kovin v pepelu (K, Ca, Mg). Naravni proces karbonatizacije oksidov v pepelu je zaradi majhne vsebnosti CO<sub>2</sub> v zraku slabo učinkovit, zato se ga da izboljšati z uvajanjem CO<sub>2</sub> iz drugih virov (največkrat kar dimnih plinov iz kurišča). Temu postopku pravimo pospešena karbonatizacija. Pospešena karbonatizacija ima smisel, če imamo na voljo zadosten vir ogljikovega dioksida. Uporaba čistega CO<sub>2</sub> bi namreč bila neekonomična. Gunning in sod., 2011 so predstavili rezultate

raziskave pri kateri so za izvedbo pospešene karbonatizacije v prostor s pepelom uvajali plin, ki je nastal s sežiganjem zbranega plina iz odlagališča komunalnih odpadkov. Z nadzorovanim izgorevanjem je bilo mogoče dobiti dimni plin z vsebnostjo ogljikovega dioksida do 14 %.

Karbonatizacijo lahko izboljšamo tudi s tem, da pepelu na mestu skladiščenja dodajamo vodo (Marzi in sod., 2012).

Spontana karbonatizacija načeloma poteče hitreje (v 3-4 tednih) od vsiljene (dva meseca), vendar pa je količina vezanega plina pri slednji dvakrat večja (Grilc in Husić, 2010).

Kar se mi zdi tudi pomembno, ko se lotimo postopka karbonatizacije pepela je to, da so prostori kjer bo le-ta izvedena v bližini kjer se bo pepel uporabljal. Tako bodo rešene transportne težave, je pa to tudi najboljša rešitev gledano tako z okoljskega kot tudi ekonomičnega vidika.

## **2.7 Informatika in zakonodaja v zvezi z odpadnim lesnim pepelom**

### **2.7.1 Informacijski sistem za odpadke v RS**

Iz podatkov ARSO je razvidno, da je bilo leta 2010 v Sloveniji prijavljeno nastajanje 435.260 ton lesnih odpadkov raznih vrst in 178 ton lesnih pepelov. Pojavlja se vprašanje točnosti teh števil, saj lesni odpadki (in njihovo kurjenje) pogosto niso prepoznani kot dejavnost, ki jo je potrebno prijavljati, posebno, če jih kurijo v lastnih kotlovnica. Podobno je z nastajanjem in ravnanjem z lesnim pepelom. Pri lesnem pepelu ugotovljeno neustreznost podatkov javnega informacijskega sistema povzroča neustrezna klasifikacija tega odpadka v katalogu odpadkov. Tam je navedena 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 prijavljajo odpadek kot 10 01 01 *pepel, žindra in kotlovni prah*, kjer pa se predvsem pojavlja premogov pepel. Iz zgoraj navedene količine prijavljenega odpadnega lesa bi na podlagi povprečne količine nastalega pepela po zgorevanju 1 % sklepali na vsaj 4350 ton letne količine pepela. Tudi pepel pogosto ni prepoznan kot odpadek, ki ga je potrebno prijavljati in po predpisih odstranjevati (Grilc in Husić, 2010).

Ustreznejše ravnanje z odpadnim lesom oz. pepelom in prijavljanje podatkov o njiju se je pričelo urejati šele v zadnjih letih, po izidu ustreznih predpisov in izvajanju inšpekcijskega nadzora, ki pa je pretežno omejen na velike povzročitelje teh odpadkov. Dejanske količine so zagotovo še precej višje, saj ravnanje še pogosto poteka mimo zakonskih zahtev (Grilc in Husić, 2010).

Preglednica 7: Letne količine nastalih lesnih odpadkov v RS v letu 2010 (Grilc in Husić, 2010).

Klasif. št.	Naziv odpadka	Letna količina (t)
Lesni odpadki		
03 01 01	odpadna skorja (lubje) in pluta	22.644
03 01 04*	žagovina, oblanci, sekanci, odrezki, odpadni les, delci plošč in furnir, ki vsebuje nevarne snovi	1
03 01 05	žagovina, oblanci, sekanci, odrezki, odpadni les, delci plošč in furnir, ki niso zajeti v 03 01 04	367.534
03 03 01	lubje in les	24.132
15 01 03	lesena embalaža	15.372
17 02 01	les (gradbeni)	4.006
17 02 04*	Steklo, plastika in les, ki so onesnaženi z nevarnimi Snovmi ali vsebujejo nevarne snovi	1
19 12 06*	les, k vsebuje nevarne snovi	0
19 12 07	les, ki ni zajet v 19 12 06	214
20 01 37*	les, ki vsebuje nevarne snovi	320
20 01 38	drugi les, ki ni zajet v 20 01 37	1.036
<b>Skupaj</b>		<b>~435.000</b>
Lesni pepeli		
10 01 03	elektrofiltrski pepel iz kurilnih naprav na šoto in les	178
10 01 01	pepel in žindra (mišljen je premogov pepel)	151.256

### 2.7.2 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 9).

### **2.7.3 Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališčih (Ur. l. RS, št. 32/06, 61/11)**

Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališčih (Uradni list RS, št. 32/06, 61/11) določa obvezna ravnanja in druge pogoje za odlaganje odpadkov in ukrepe v zvezi z načrtovanjem, gradnjo, obratovanjem in zapiranjem odlagališč.

Lesni pepeli so praviloma nenevarni odpadki, razen, če niso bili pridobljeni s sežigom močno onesnaženega lesa (težke kovine, predvsem Cu, Cd, Sn, Hg in Cr; organoklorni pesticidi, PAO-i).

V nasprotju z lesnimi odpadki, ki se ne smejo odlagati zaradi biorazgradljivosti in kurilnosti, so pogosti omejitveni faktorji za odlaganje lesnega pepela kot odpadka z majhno vsebnostjo biorazgradljivih snovi na odlagališčih nenevarnih odpadkov njegova vsebnost vodotopnih snovi (mejna vrednost 60g<sub>s.s.</sub>/kg), vsebnost nezgorelega ogljika (TOC, m. vr. 3 %), vsebnost izlužljivega organskega ogljika (DOC, m. vr. 800 mg/kg) in alkalnost standardnega izlužka (mejna vrednost 13,0).

Karakteristične lastnosti lesnih pepelov v Sloveniji so podane v Preglednici 6.

### **2.7.4 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<sub>tot.</sub>, 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 <sup>*</sup>	Zemljina B <sup>#</sup>
	mg/kg s.s.	mg/kg s.s.
As	20	20
Pb	40	50
Cd	0,5	0,7
Cr	40	40
Cu	30	30
Ni	30	30
Hg	0,2	0,3
Zn	100	100

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

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

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

### 2.7.5 Uredba o sežiganju odpadkov (Ur. l. RS, št. 68/08)

Ta uredba določa ukrepe, obvezna ravnanja, prepovedi in druge pogoje za so-sežiganje in sežiganje odpadkov ter pogoje in ukrepe glede obratovanja naprav za so-sežig odpadkov in sežigalnic odpadkov z namenom, da se preprečijo ali omejijo škodljivi učinki na okolje.

Lesni odpadki in ostanki so lahko impregnirani z različnimi strupenimi zaščitnimi sredstvi.

Preostanek pepela po sežiganju lesa, ki je impregniran s CCA pripravki, je zelo toksičen in z njim moramo ravnati v skladu s specifičnimi varnostnimi ukrepi (Humar in sod. 2007).

Po sežiganju lesa ostane večina težkih kovin v pepelu in ne zaide v dimne pline. Pepela, v katerem je ostala večina organskih biocidov, ne smemo odlagati na običajne deponije pepela.

### 2.7.6 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 9: Klasifikacija lesnega pepela (Uredba za ravnanje z odpadki, Ur. l. RS, št. 34/2008).

<b>Klasifik.št.</b>	<b>Naziv skupine/podskupine/odpadkov</b>
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 pri številki, ki označuje klasifikacijo nima 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.

Kot je razvidno je v slovenski zakonodaji le malo napisanega o lesnem pepelu. V klasifikaciji odpadkov je navedena le ena vrsta, ki se specifično nanaša na lesni pepel t.j. 10 01 03 – elektrofiltrski pepel iz kurilnih naprav na šoto in les.

### **3 EKSPERIMENTALNI DEL**

Za študijo stabilizacije svežega lesnega pepela s postopkom karbonatizacije sem se odločil, ker je ta v primerjavi z drugimi postopki dokaj enostavna. Vse kar potrebujemo je primeren prostor in zadosten vir ogljikovega dioksida. Prednost tega postopka je tudi v tem, ker lahko poteka na licu mesta, torej ob kotlovnica z dimnimi plini.

Problem lesnega pepela je, da se ga ne da prosto odlagati na odlagališča nenevarnih odpadkov, poleg tega ga je za odlaganje tudi škoda. Zato sem s pomočjo karbonatizacije poizkusil znižati kritične parametre, ki omejujejo njegovo odlaganje oz. okoljsko uporabo.

#### **3.1 Delovni materiali in njihove karakteristike**

Za eksperimentalno delo sta bila uporabljena lesna pepela z dveh različnih obratov lesno-predelovalne industrije v Sloveniji. Oba vzorca pepela sta bila suha.

Pepel št.1 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 sežigajo 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 kontejner. Vzorec je zelo sipek, prašljiv in sivo-rjavega homogenega izgleda, brez vonja.

Pepel št.2 je bil pridobljen iz GOZDNEGA GOSPODARSTVA POSTOJNA – obrat Marof, v katerem nastane letno približno 40 ton pepela. Nastane pri kurjenju lesnih odpadkov (odpadni naravni les, žaganje, prah). Temperatura na kurišču je med 900 - 1000°C. Pepel odlagajo a imajo probleme z občasnim preseganjem mejnih vrednosti. Je heterogenega izgleda, z delci različnih oblik, barv in velikosti.

Osnovne lastnosti preskušanih pepelov in njihovih standardnih izlužkov so podane v preglednicah 10 in 11.

Preglednica 10: Lastnosti uporabljenih pepelov

Material	Vlaga (%)	Žaroizguba [550°C] (%)	Žaroizguba [900°C] (%)	Nasipna gostota – netresena (kg/m <sup>3</sup> )	Nasipna gostota – tresena (kg/m <sup>3</sup> )
Pepel P1	0,8	0,3	14,1	544	580,2
Pepel P2	0,2	1,3	8,8	715,8	725,3

Preglednica 11: Lastnosti standardnih izlužkov osnovnih materialov

Material	pH (/)	Raztopljene snovi (g <sub>s.s.</sub> /kg)	DOC (mg/kg)
Pepel P1	13,0	115,1	846,0
Pepel P2	12,7	29,48	80,0

## 3.2 Analizne metode

### 3.2.1 Sejalna analiza

Sejalna analiza je postopek s katerim določamo porazdelitev velikosti delcev materiala. Sejalne analize vršimo z mrežastimi siti s točno določenimi odprtini (po velikosti in obliki). Delci, ki sestavljajo vzorec, se med sejanjem razvrstijo po velikosti tak, da ostanejo na odprtinah sit določenih velikosti. Za ustrezno razvrstitev delcev moramo zagotoviti premikanje delcev po sejalni površini, kar dosežemo z gibanjem sita (vibriranjem ali kroženjem) in dovolj dolgim časom sejanja. Izbira stavka sit, v katerem je najvišje sito z največjo odprtino, najnižje pa sito z najmanjšo odprtino, je odvisna od granulacijske sestave vzorca in zahtevane natančnosti pri določitvi zrnave sestave agregata. Največkrat se uporabljajo standardna sita po ISO-DIN 3310-1.

#### Postopek:

100 g pepela sem vsul v izbrani stavek sit in sicer na zgornje sito, to je sito, ki ima največje odprtine. Sejal sem v sejalnem vibracijskem stroju tako dolgo, da so vsa zrna posamezne frakcije, ki je manjša od odprtine sita, šla skozi to sito, t.j. okoli 10 minut. Postopek sem naredil za oba pepela, vsakič v paralelki. Za pepel P1 sem uporabil sita velikosti 0,25 mm, 0,16 mm, 0,071 mm in 0,056 mm. Pri pepelu P2 je bilo že na prvi pogled videti, da je bolj

heterogen in da vsebuje dosti delcev večjega premera. Zato sem tu uporabil sita velikosti 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm in 0,16 mm. Po končanem sejanju sem stehal dobljene frakcije materiala in izračunal njihove masne deleže.

### **3.2.2 Nasipna gostota**

Nasipna gostota je lastnost praškastih, zrnatih in drugih nesprijetih materialov. Opredelimo jo kot maso sloja delcev, deljeno s skupno prostornino sloja. Odvisna je od oblike delcev, njihove poroznosti in načina nasutja. Lahko ji rečemo tudi navidezna gostota (ker je med delci še prazen prostor), saj se lahko spreminja glede na to kako ravnamo z materialom. Tako ločimo ne-treseno in treseno nasipno gostoto.

#### Postopek:

Pri določanju nasipne gostote sem uporabil merilni valj s prostornino 250 ml. Vanj sem nasul pepel in nato na podlagi znane mase in prostornine izračunal ne-treseno gostoto pepela. Treseno gostoto sem določil z stresanjem vzorca v merilnem valju do konstantnega volumna. Meritve sem za vsak pepel izvedel v paralelki.

### **3.2.3 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 karbonatizacije je pomembno vzdrževati konstantno vlažnost mešanic.

Vlago osnovnih materialov sem določil z infrardečim vlagomerom. Vlago materiala se določi na podlagi razlike teže mas, pred in po sušenju vzorca do konstantne mase pri 105°C.

### **3.2.4 Določitev vsebnosti žarilnega ostanka**

Žarilni ostanek je suhi preostanek po žarenju vzorca (npr. lesa ali pepela) v zračni atmosferi pri izbrani temperaturi. Nekako predstavlja vsebnost mineralnega ostanka potem, ko organske snovi zgorijo. Pri lesu oz. lesnem pepelu sta pomembni dve temperaturi določanja:

- 550°C, do katere razpadejo in zgorijo vse organske snovi (celuloza, lignin, oglje)

- 900°C, do katere razpadejo tudi nekateri minerali, predvsem karbonati (npr. apnenec).

Prvo metodo uporabimo za določitev približne vsebnosti organskih snovi v vzorcu (npr. oglja v pepelu). Drugo metodo pa uporabimo za določitev predvidene količine pepela po sežigu trdnega goriva na kurišču, kjer so temperature praviloma med 900-1000°C.

Žarilni ostanek laboratorijsko določamo gravimetrično s standardno metodo SIST EN 15169: 2007 z žarenjem natančno zatehtanega suhega vzorca (1-2 g) v keramičnem ali platinskem lončku pri izbrani temperaturi v žarilni peči do konstantne mase. (SIST EN 15169: 2007)

### ***3.2.5 Priprava standardnih izlužkov in vrednotenje njihovih lastnosti***

Izluževanje je kemijska metoda, ki omogoča snovni prenos molekul iz trdne zmesi v tekočo fazo pri njenem 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, tako da pride med njima do ravnotežja. 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 v naravnem okolju. 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 izvajal skladno s standardom SIST EN 12457-4 z masnim 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 ali v čašah z magnetnim mešalom mešajo 24 ur pri sobni temperaturi. (SIST EN 12457- 4: 2004).

Za svoj eksperimentalni del izluževanja vmesnih karbonatiziranih vzorcev pepela sem pripravil manjše vzorce in sicer 10 g suhe mase posameznega pepela in 100 ml destilirane vode. Ti vzorci so se 24 ur mešali pri sobni temperaturi.

### **3.2.6 Merjenje pH**

Z uporabo pH metra sem prefiltriranim vzorcem standardnega izlužka izmeril pH. pH je brezdimenzijski elektrokemični 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.

### **3.2.7 Določanje sušilnega ostanka izlužka**

Iz prefiltriranih vzorcev skozi filter 0,7 µm sem odpipetiral 25 ml standardnega izlužka v predhodno stehtane suhe steklene petrijevke ter jih dal v sušilnik na 105°C. Postopek sem ponovil za vse vzorce karbonatiziranih pepelov. Razliko v masi pred sušenjem in po njem sem uporabil za izračun suhega ostanka (SIST EN 12880:2001). Dobljene podatke sem preračunal v ustrezno enoto – mg/l. Kritična mejna vrednost za raztopljene snovi v izlužku je 6000 mg/l oz. 60.000 mg/kg odpadka.

### **3.2.8 Določanje raztopljenega organskega ogljika – DOC**

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

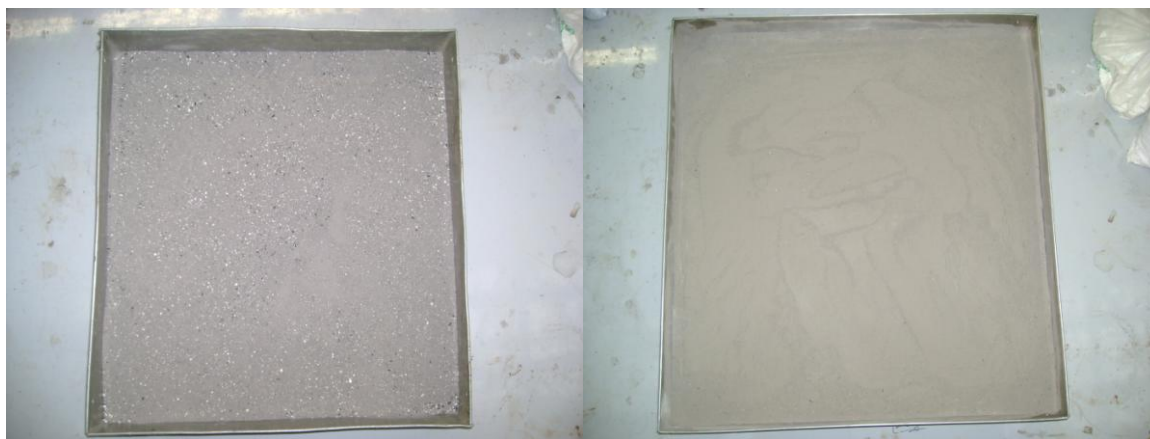
Raztopljeni organski ogljik (DOC) v izlužkih je bil izmerjen po standardni metodi SIST ISO 8245:2000, na aparaturi TORCH combustion TOC Analyzer, Teledine Technologies Company (SIST ISO 8245:2000). Kritična vrednost DOC je 80 mg/l oz. 800 mg/kg odpadka.

## **3.3 Metode poskusov stabilizacije**

### **3.3.1 Statična karbonatizacija na zraku**

#### 1. Naprava

Za postopek statične karbonatizacije sem uporabil dva pločevinasta pladnja, enega za vsak pepel. Površina prvega pladnja je znašala 0,295 m<sup>2</sup>, površina drugega pa 0,17 m<sup>2</sup>. Debelina nasutega pepela v prvem pladnju je bila približno 10 mm, v drugem pa približno 8 mm.



Slika 3: Pladnja s pepelom P1 (levo) in P2 (desno)

## 2. Postopek

V oba pladnja sem nasul 2 kg svežega pepela. Pladnja s pepelom sem nato pustil starati v odprti omari v laboratoriju pri sobnih pogojih 75 dni. Na predvidena časovna obdobja (7, 14, 21, 30, 45, 60, 75 po začetku poskusa) sem tehtal pladnja s pepelom. Da sem zagotovil čim boljši kontakt pepela z zrakom sem vsebino v pladnjih po vsakem tehtanju vsakič dobro premešal. Po koncu postopka sem iz vsakega pladnja z žlico vzel vzorec ca. 20 g pepela in vsakega analiziral na predvidene parametre.

### **3.3.2 Dinamična karbonatizacija na zraku v rotacijskem bobnu**

#### 1. Naprava

Uporabili smo boben komercialnega keramičnega krogeljnega mlina (notranji premer 20 cm, dolžina 25 cm), brez kroglic. Boben ima na eni čelni strani odprtino premera 10 cm za potrebe polnjenja in praznjenja; v primeru uporabe kot mlin ga zapremo s prilegajočim pokrovom (v našem primeru ga nisem uporabil). Druga bistvena sestavina mlina je podstavek s tečaji in električno-mehanskim pogonom za vrtenje mlina. Hitrost naprave za normalne mlevne potrebe je za kontaktiranje praškastega pepela in zraka prevelika, zato sem jo zmanjšal s frekvenčnim regulatorjem na primerno vrednost tako, da se ne ustvarja prašenje in izguba materiala. V takem presipajočem stanju je vsa masa pepela stalno izpostavljena zraku, ki se v bobnu samodejno obnavlja zaradi gibanja pepela in bobna.





Slika 4: Rotacijski boben

## 2. Postopek

V boben sem nasul 1 kg svežega pepela in ga (odprtega!) dal na vrtilni podstavek. Presipanje pepela preko roba polnilne odprtine sem preprečil z rahlim nasprotnim nagibom podstavka. Kontaktiranje pepela z zrakom se zagotovi z neprekinjenim vrtenjem bobna (dan in noč) pri izbrani hitrosti 15 obr/min. Na predvidena časovna obdobja (1, 3, 7, 14, 21 dni po zagonu) sem napravo ustavil in z dolgo žlico odvezel ca. 20 gramov povprečnega vzorca pepela. Vmesne vzorce sem hranili do konca poskusa v neprodušnih plastičnih vrečkah, nato pa jih analiziral na predvidene parametre.

### ***3.3.3 Dinamična karbonatizacija v komori***

#### 1. Naprava

Uporabil sem rotacijsko komoro kubične oblike s pokrovom, dimenzije 100x250x250mm, iz trdega PVC ki je bila prirejena prav za postopek karbonatizacije pepela. V notranjosti je komora diagonalno pregrajena s pregrado za poboljšanje mešanja pepela. Komora ima votlo prečno pogonsko-vrtilno os z motorjem, skozi katero se v komoro vpihuje ogljikov dioksid. Potreboval sem tudi jeklenko s čistim CO<sub>2</sub>.



Slika 5: Rotacijska komora, odprta

## 2. Postopek

V komoro sem nasul 250 g svežega pepela. Pepel P2 sem pred tem še presejal, saj je vseboval veliko grobih delcev in tiste, ki so ostali na situ velikosti 2 mm, izločil. Skozi vrtilno os komore sem nadzorovano počasi vpilhoval čisti CO<sub>2</sub> iz jeklenke. Boljše kontaktiranje pepela z ogljikovim dioksidom sem zagotovil z neprekinjenim vrtenjem komore (dan in noč) pri izbrani hitrosti 18 obr./min. Na predvidena časovna obdobja (2, 8, 24, 48 ur; pri pepelu P1 še 264 ur po zagonu) sem napravo ustavil in z žlico odvezel ca. 20 g povprečnega vzorca. Vmesne vzorce sem hranil do konca poskusa v neprodušnih plastičnih vrečkah, nato pa jih analiziral na predvidene parametre.

### ***3.3.4 Dinamična karbonatizacija s CO<sub>2</sub> pod tlakom v rotacijski tlačni celici***

#### 1. Naprava

Uporabil sem tlačno celico komercialnega kalorimetra, t.j. jeklen cilinder z notranjim premerom 50 mm in dolžino 100 mm, s plinotesnim navojnim pokrovom. Pokrov ima nastavek za polnitev celice z izbranim plinom (v našem primeru CO<sub>2</sub>, sicer pa kisik) in pripadajoči ventil. Plin se v celico na želeni tlak napolni s pomočjo polnilne naprave z manometrom, kapilarno povezano z jeklenko s tekočim čistim CO<sub>2</sub>, ki ima pri sobni temperaturi parni tlak okoli 35 bar.

Intenziven kontakt pepela in plina sem zagotovil z vrtenjem celice okoli njene prečne osi (»preko glave«) v rotacijski napravi z nastavljivo hitrostjo vrtenja. Masno razmerje pepela in

plina je takšno, da količina med poskusom zreagirane plina ne povzroči opaznega padca tlaka v celici.



Slika 6: Kalorimetrijska bomba s pepelom in CO<sub>2</sub> (levo) in polnilna naprava z manometrom (desno)

## 2. Postopek

V celico sem nasul 10 g svežega pepela, jo začasno netesno zaprli s pokrovom in nekaj časa vpihoval CO<sub>2</sub>, da je bil izpihan zrak. Nato sem porov tesno privil in celico napolnili s CO<sub>2</sub> pri izbranem tlaku. Uporabili smo tlake plina 5, 10, 20 in 30 bar. Celico s pepelom in plinom smo nato prenesli in pritrdili v vrtilno napravo in jo 24 ur vrteli pri hitrosti 10 obr/min. Na koncu smo napravo ustavili, celico demontirali in jo počasi dekomprimirali, odvili porov in karbonatiziran pepel analizirali na predvidene parametre.

## 4 REZULTATI

### 4.1 Sejalna analiza

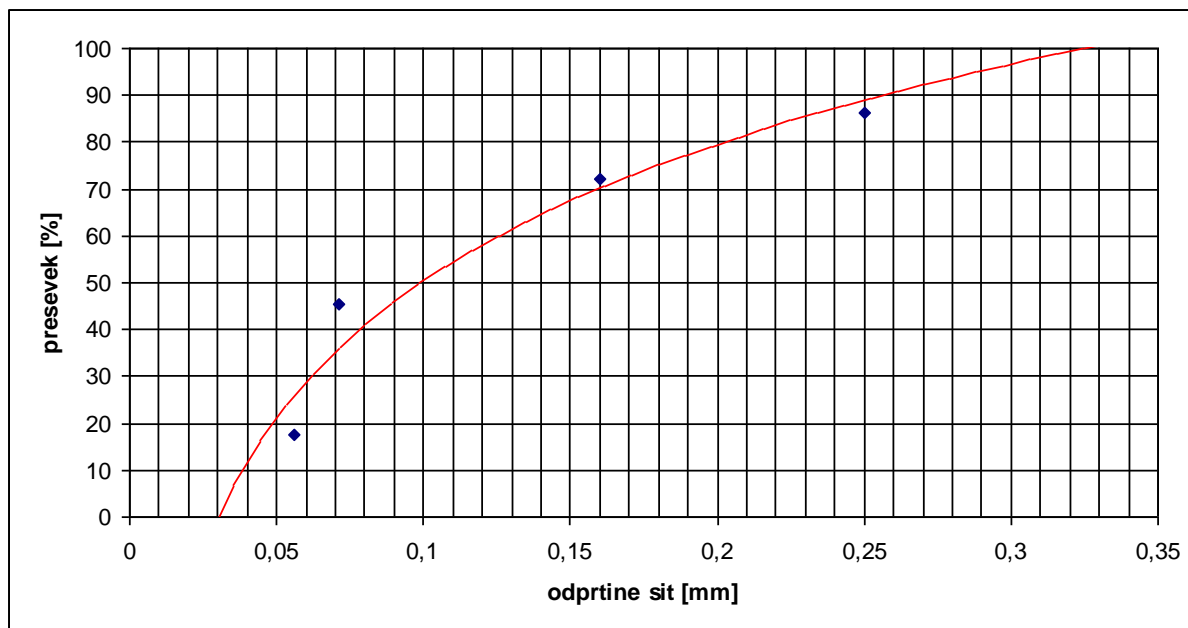
Preglednica 12: Rezultati sejalne analize – pepel P1

Sito (mm)	Ostanek na situ		Presevek skozi sito (%)
	(g)	(%)	
0,25	13,83	13,86	86,14
0,16	27,9	27,97	72,03
0,071	54,39	54,52	45,48
0,056	82,29	82,49	17,51
ostanek	99,76	100	0

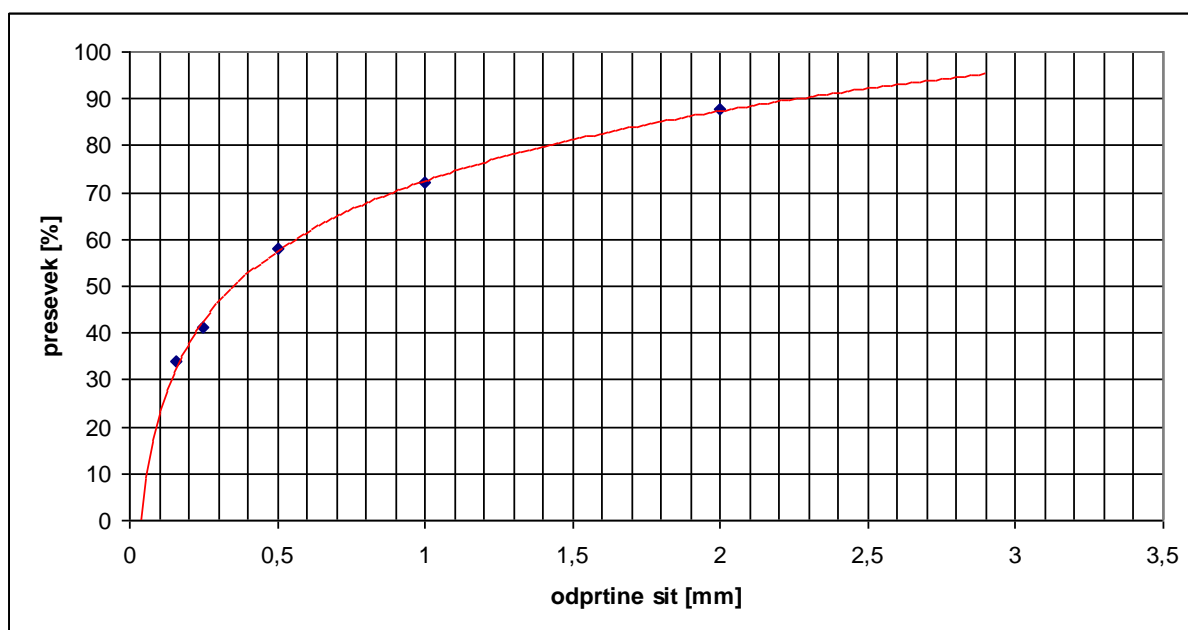
Preglednica 13: Rezultati sejalne analize – pepel P2

Sito (mm)	Ostanek na situ		Presevek skozi sito (%)
	(g)	(%)	
2	11,94	11,98	87,71
1	27,61	27,70	71,99
0,5	41,52	41,65	58,04
0,25	58,29	58,47	41,22
0,16	65,53	65,73	33,96
ostanek	99,69	100	0

Zgornji preglednici prikazujeta rezultate sejalne analize obeh pepelov. Kontrolna teža pri obeh vzorcih je bila 100 g svežega pepela. Iz tabel je razvidno minimalno odstopanje pri ostanku, saj je pepel praškast material, tako da se je izgubam mase težko izogniti. Vendar pa so te razlike tako majhne, da le to ne vpliva na same rezultate.



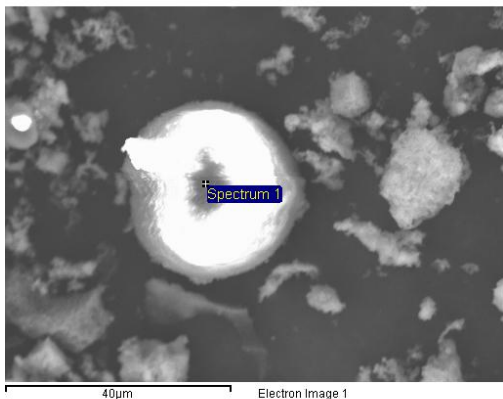
Grafikon 1: Granulometrična krivulja pepela P1

 $d_{10} = 0,039 \text{ mm}$  $d_{50} = 0,1 \text{ mm}$  $d_{90} = 0,255 \text{ mm}$ 

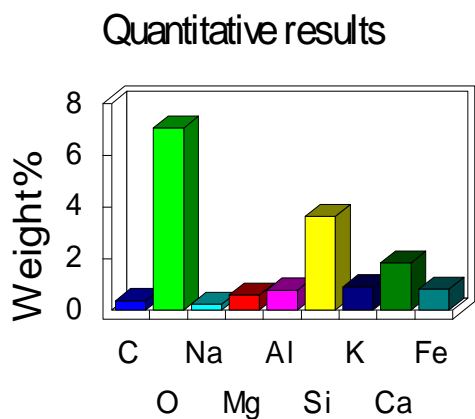
Grafikon 2: Granulometrična krivulja pepela P2

 $d_{10} = 0,05 \text{ mm}$  $d_{50} = 0,35 \text{ mm}$  $d_{90} = 2,25 \text{ mm}$

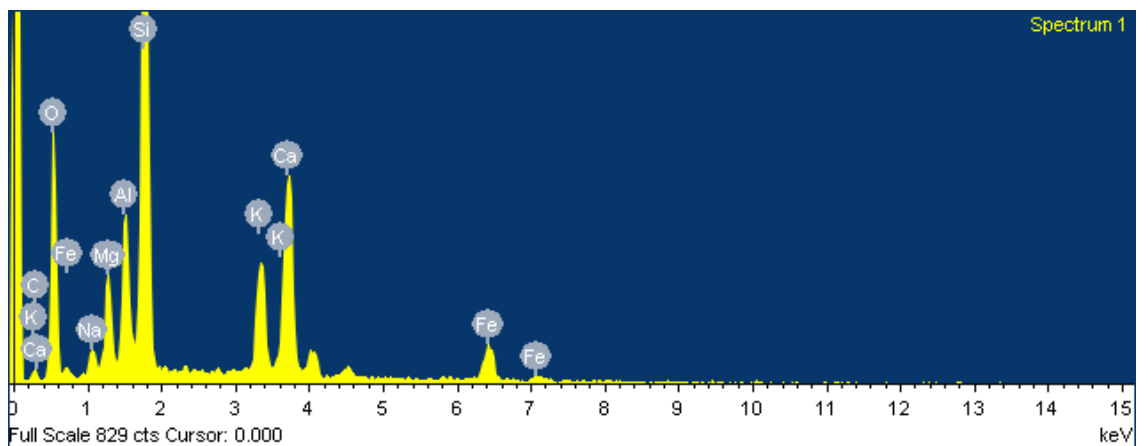
## 4.2 Posnetek pepela P1 pod elektronskim mikroskopom



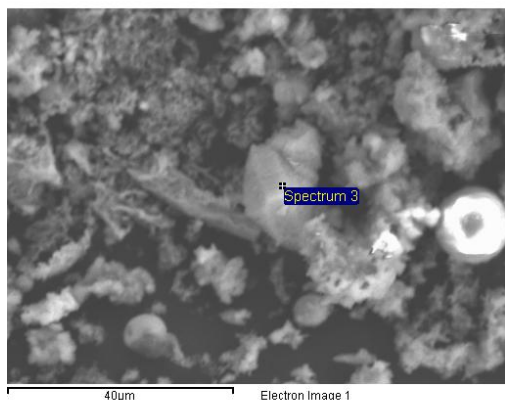
Slika 7: Slika pepela P1, narejena z elektronskim mikroskopom, primer 1



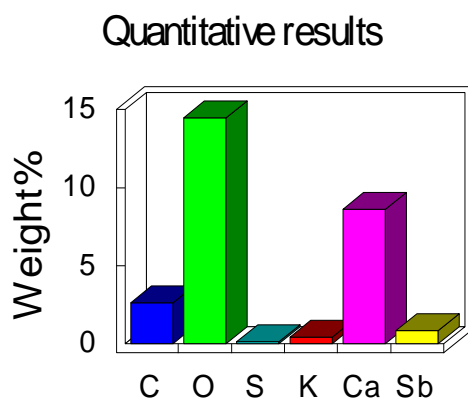
Slika 8: Arbitrarna sestava steklastega dela pepela P1, narejena z elektronskim mikroskopom



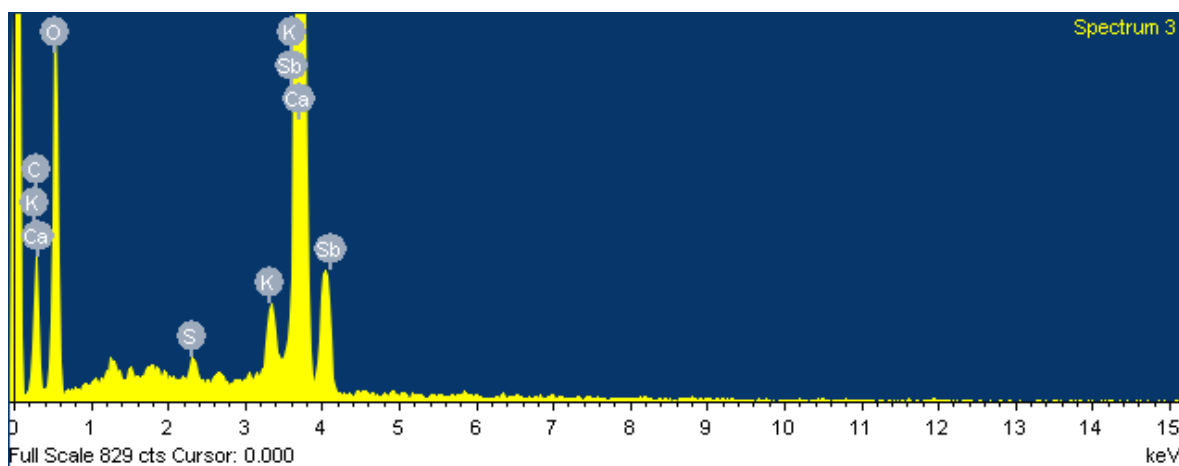
Slika 9: Emisijski spekter steklastega dela materiala v pepelu P1



Slika 10: Slika pepela P1, narejena z elektronskim mikroskopom, primer 2



Slika 11: Arbitrarna sestava kristaliziranega dela P1, narejena z elektronskim mikroskopom



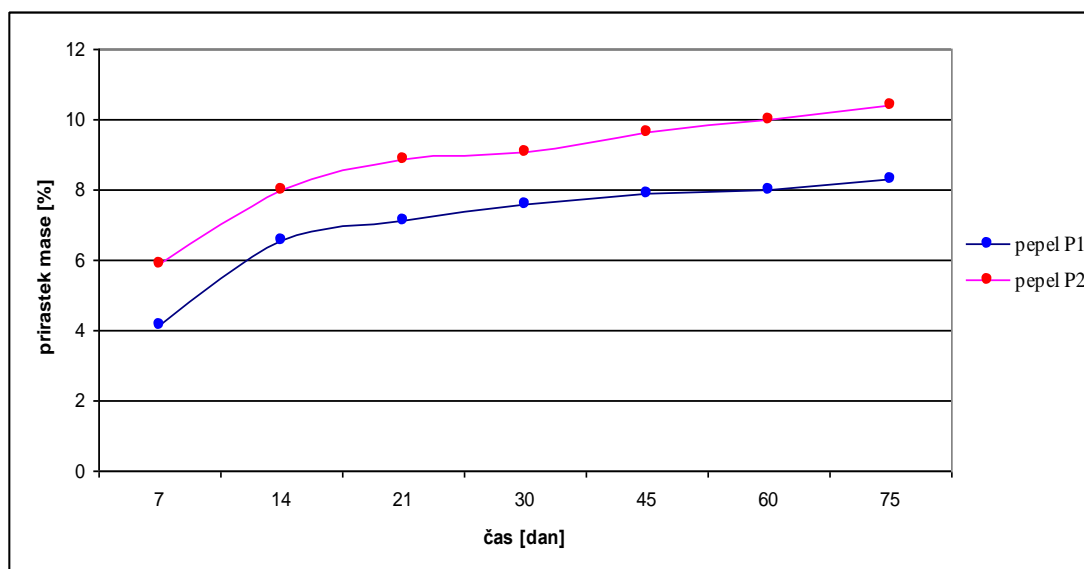
Slika 12: Emisijski spekter kristaliziranega dela materiala v pepelu P1

Pepel je bil slikan z elektronskim mikroskopom CARL ZEISS FE-SEM Supra 35 VP. Delci so deloma kristalizirani, deloma zastekljeni (kroglice). Hkrati je aparat naredil tudi kemijsko analizo določene tarče. Tako sem dobil sliko in sestavo za kristalni in stekleni del pepela.

### 4.3 Statična karbonatizacija pepela v tankem sloju na zraku

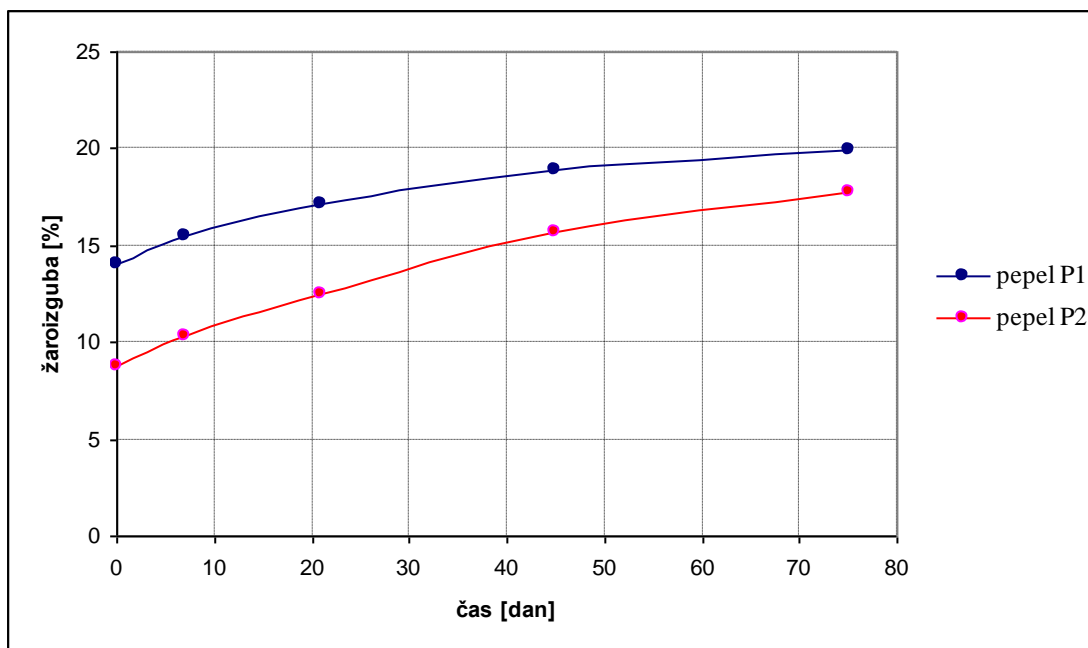
Preglednica 14: Prirast mase in vrednosti parametrov v izlužku obeh pepelov

Tip pepela	Čas karbonat. (dni)	Masa pepela (kg)	Prirast mase (%)	Žaroizguba 900°C (%)	pH (/)	Razt. snovi (g/kg)
P1	0	1,6384	0	14,1	13,0	115,1
	7	1,7067	4,1687	15,5	13,0	112,3
	14	1,7463	6,5857			
	21	1,7556	7,1533	17,2	13,0	107,1
	30	1,7624	7,5684	-	-	-
	45	1,7676	7,8857	18,9	12,9	98,5
	60	1,7695	8,0017	-	-	-
	75	1,7748	8,3252	19,9	12,9	87,8
P2	0	1,8468	0	8,8	12,7	29,5
	7	1,9557	5,8967	10,3	12,7	29,1
	14	1,9942	7,9814	-	-	-
	21	2,0107	8,8748	12,5	12,7	28,5
	30	2,0149	9,1022	-	-	-
	45	2,0248	9,6383	15,7	12,7	27,0
	60	2,0312	9,9848	-	-	-
	75	2,0387	10,3909	17,8	12,6	26,24

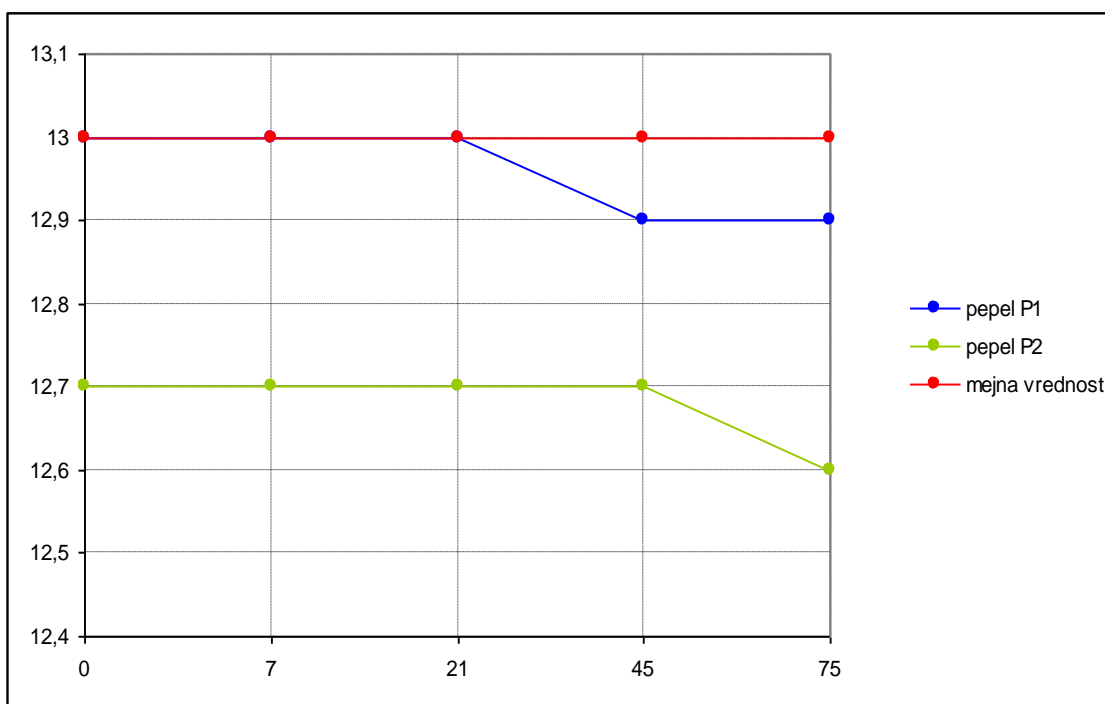


Grafikon 3: Potek statične karbonatizacije obeh pepelov

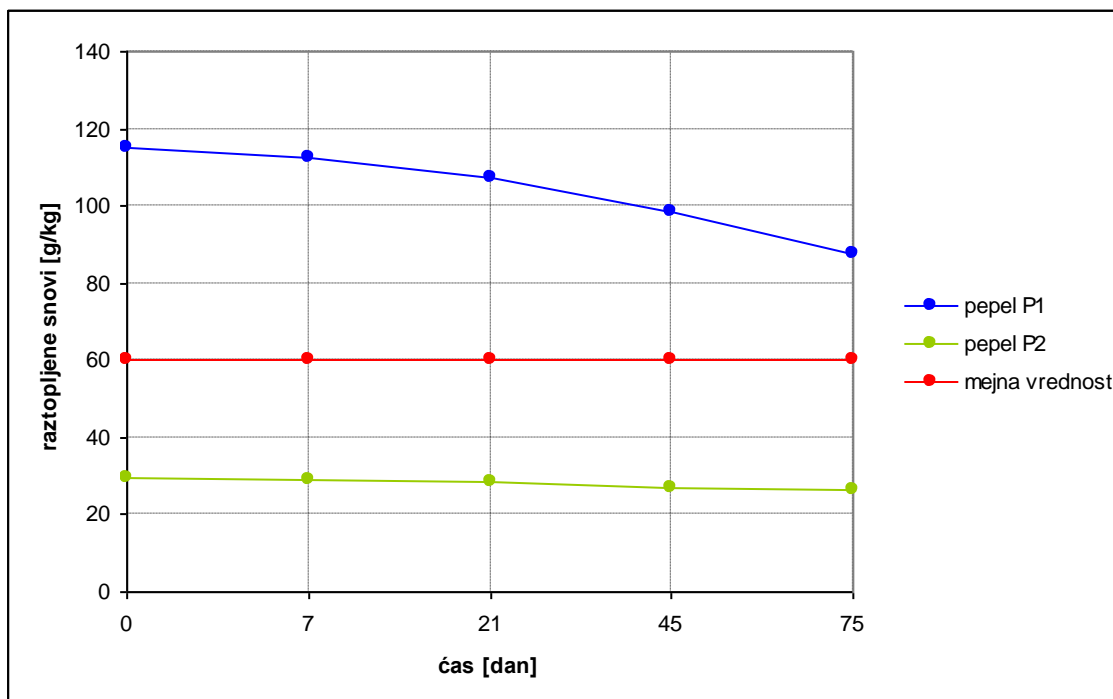




Grafikon 4: Prikaz žaroizgube obeh pepelov pri 900°C (%) v odvisnosti od časa kontakta



Grafikon 5: Prikaz pH vrednosti izlužkov obeh pepelov v odvisnosti od časa kontakta



Grafikon 6: Prikaz vrednosti raztopljenih snovi v izlužku obeh pepelov v odvisnosti od časa kontakta

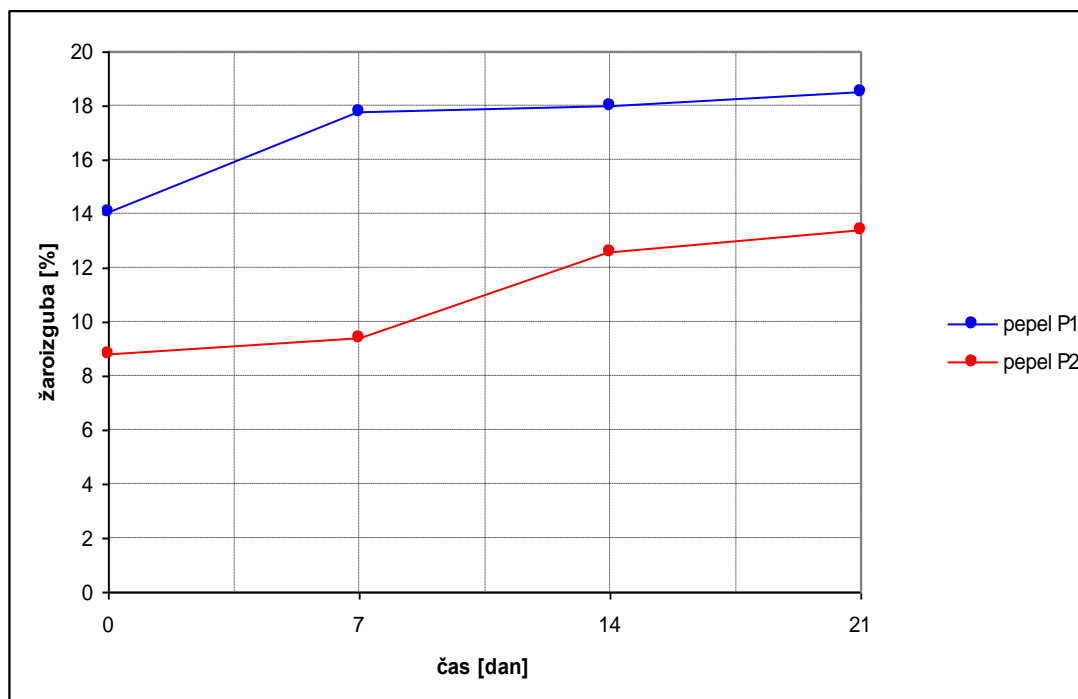
#### 4.4 Dinamična karbonatizacija pepela na zraku v rotacijskem bobnu

Preglednica 15: Vrednost parametrov v izlužku pepela P1

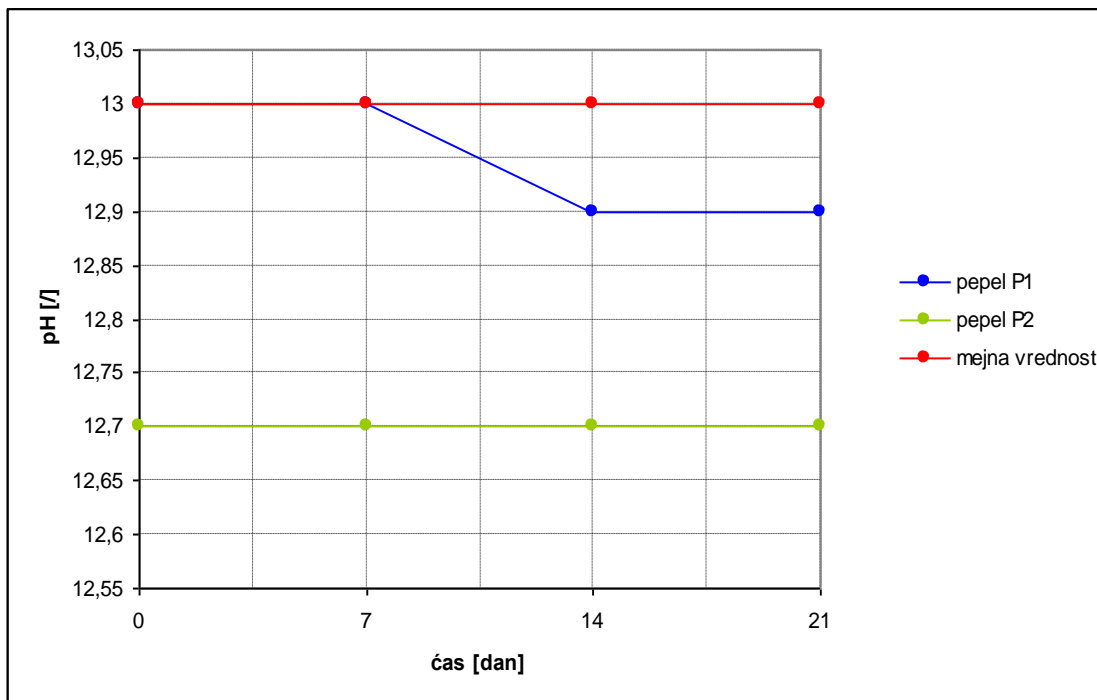
Čas zračenja (dni)	Žaroizguba (%)	pH (/)	Razt. snovi (g/kg)
0	14,1	13,0	115,1
1	16,0	13,0	109,9
3	17,3	13,0	105,8
7	17,8	13,0	104,4
14	18,0	12,9	101,5
21	18,5	12,9	100,3

Preglednica 16: Vrednost parametrov v izlužku pepela P2

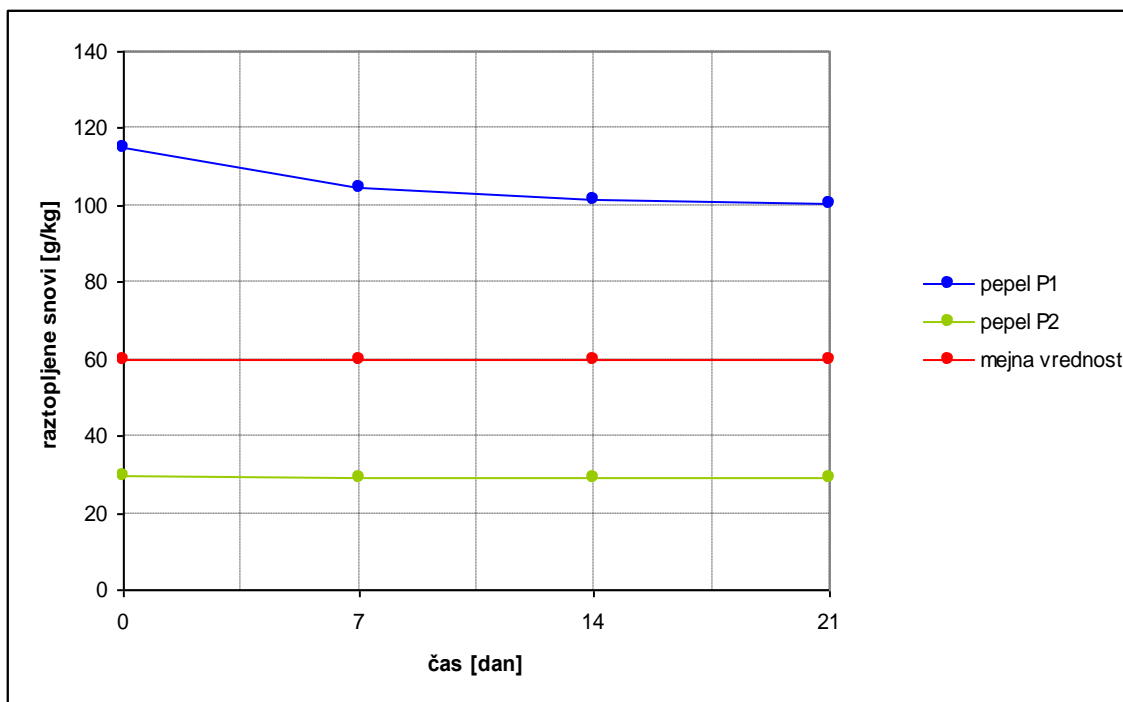
Čas zračenja (dni)	Žaroizguba (%)	pH (/)	Razt. snovi (g/kg)
0	8,8	12,7	29,5
7	9,4	12,7	29,4
14	12,6	12,7	29,2
21	13,4	12,7	29,0



Grafikon 7: Prikaz žaroizgube obeh pepelov pri 900°C (%) v odvisnosti od časa kontakta



Grafikon 8: Prikaz pH vrednosti izlužkov obeh pepelov v odvisnosti od časa kontakta z zrakom

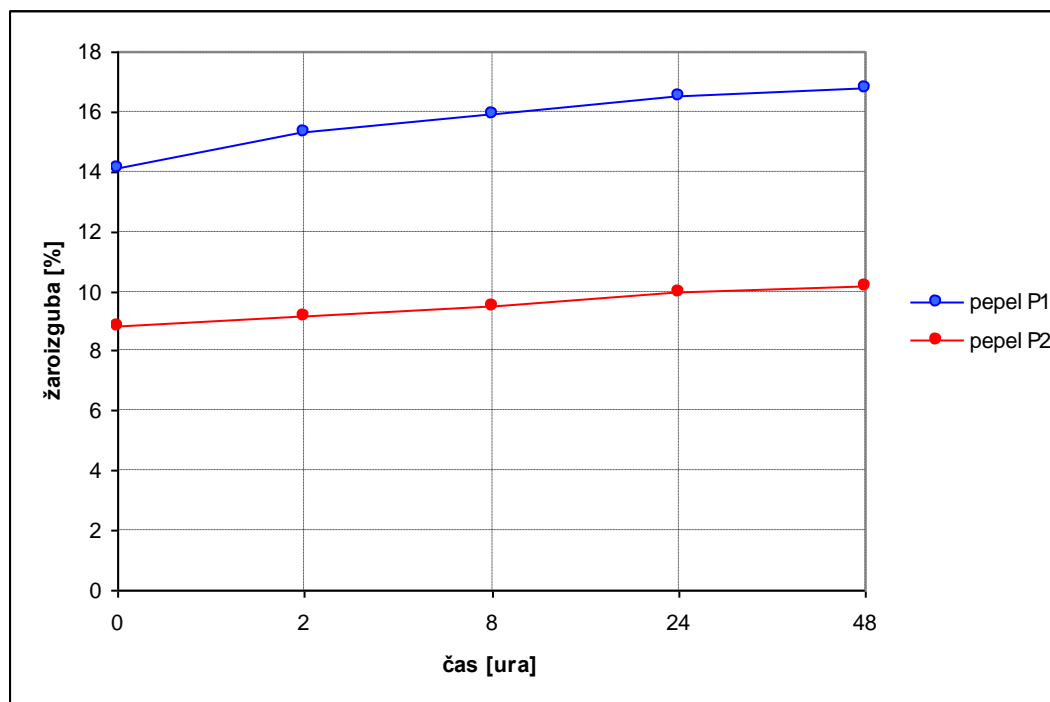


Grafikon 9: Prikaz vrednosti raztopljenih snovi v izlužku obeh pepelov v odvisnosti od časa kontakta

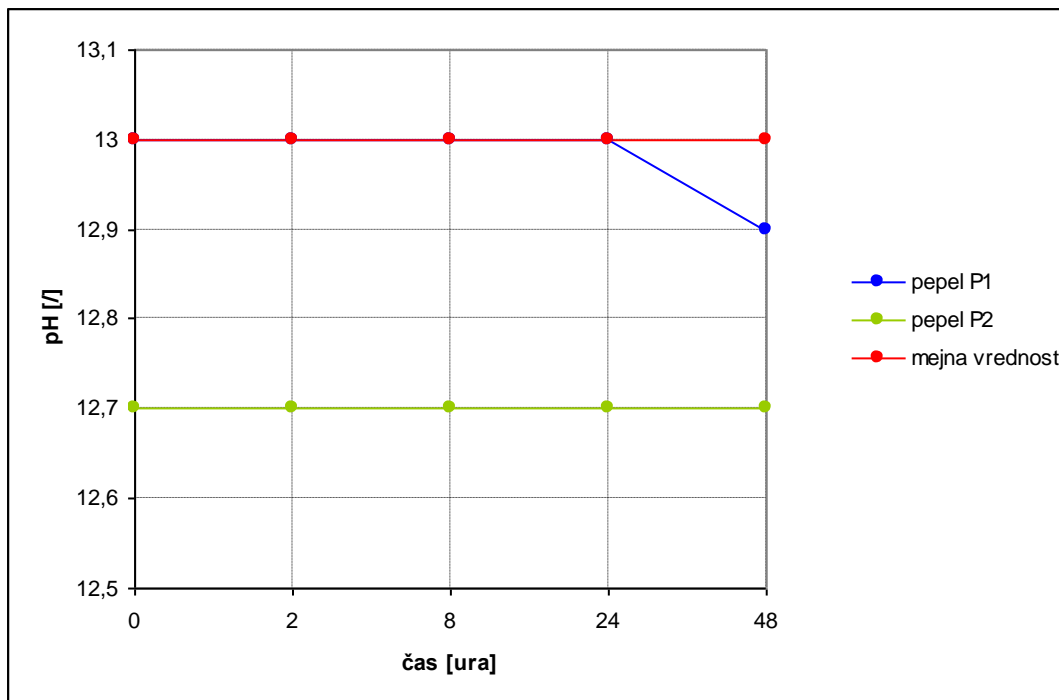
#### 4.5 Dinamična karbonatizacija pepela s CO<sub>2</sub> v rotacijski komori

Preglednica 17: Vrednost parametrov v izlužku obeh pepelov

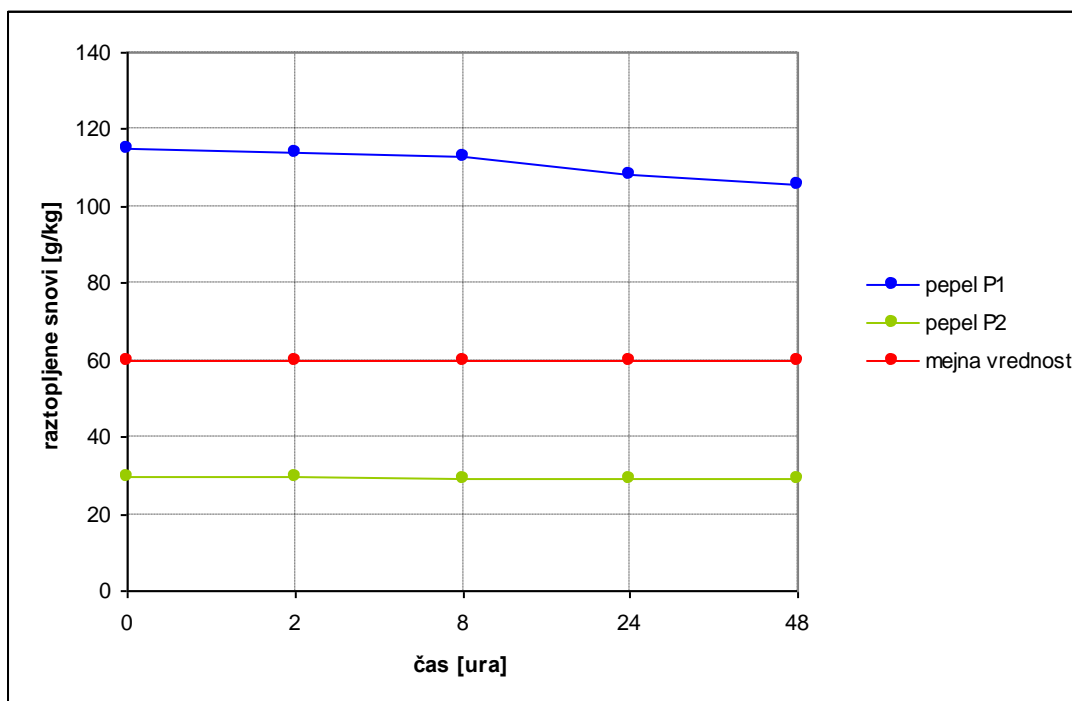
Vrsta pepela	Čas kontakta (ure)	Žaroizguba (%s.s.)	pH (l)	Razt. snovi (g/kg)
P1	0	14,1	13,0	115,1
	2	15,3	13,0	114,2
	8	15,9	13,0	113,1
	24	16,5	13,0	108,0
	48	16,8	12,9	105,9
	264	18,2	12,9	101,7
P2	0	8,8	12,7	29,5
	2	9,2	12,7	29,5
	8	9,5	12,7	29,4
	24	10,0	12,7	29,2
	48	10,2	12,7	29,1



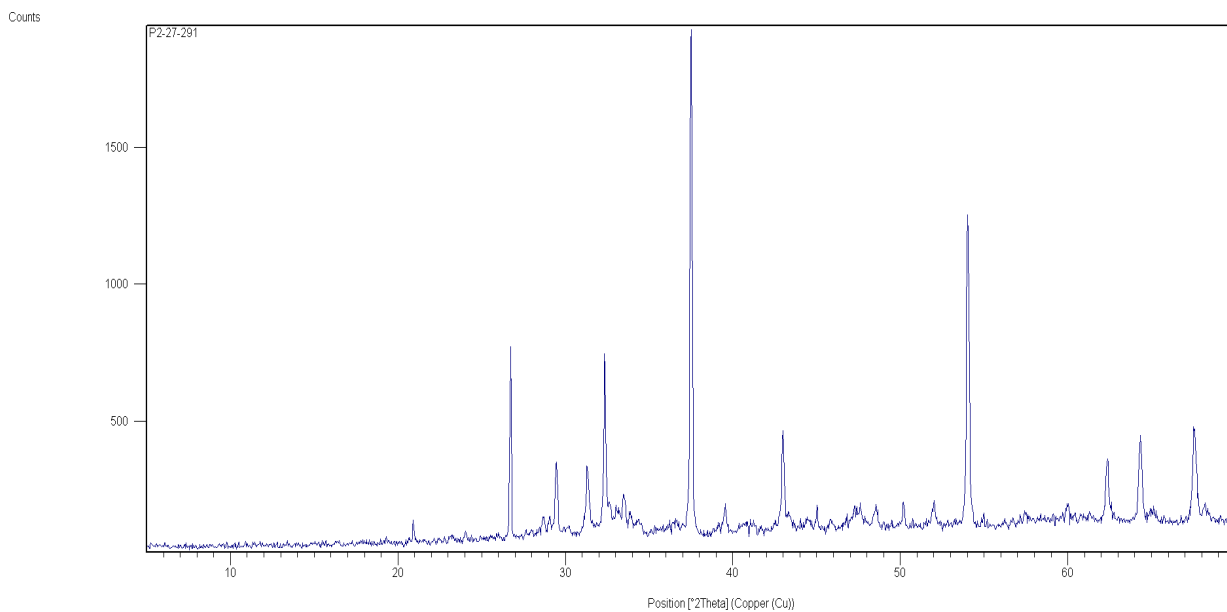
Grafikon 10: Prikaz odvisnosti žaroizgube obeh pepelov pri 900°C (%) od časa kontakta s CO<sub>2</sub>



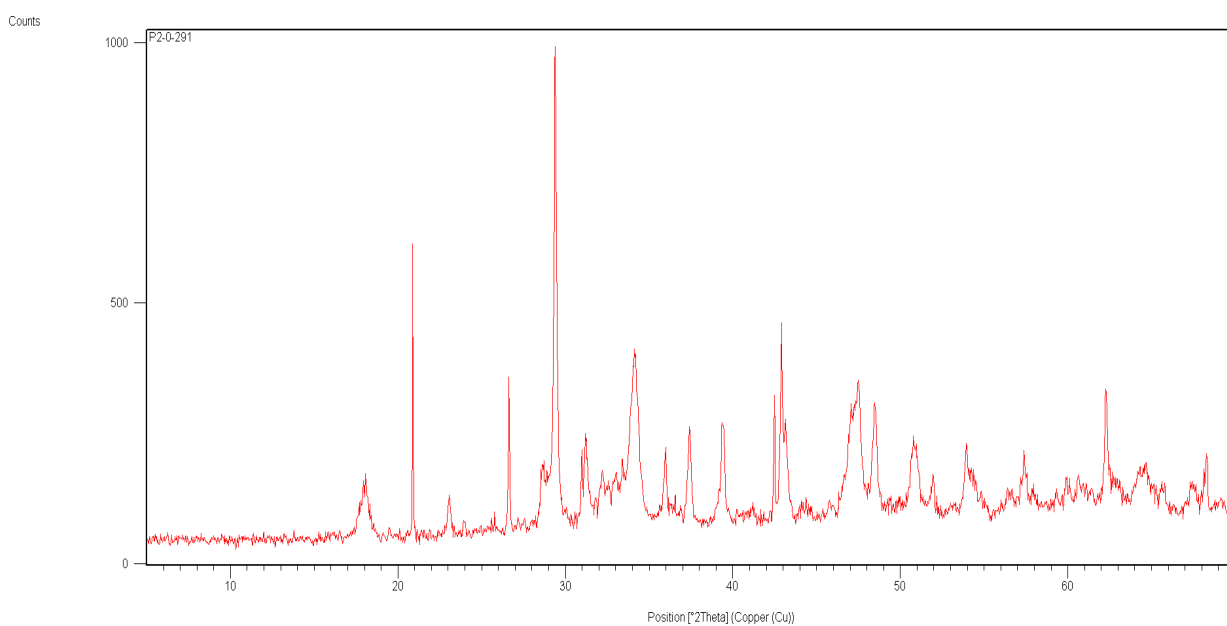
Grafikon 11: Prikaz pH vrednosti izlužkov obeh pepelov v odvisnosti od časa kontakta s CO<sub>2</sub>



Grafikon 12: Prikaz vrednosti raztopljenih snovi v izlužku obeh pepelov v odvisnosti od časa kontakta s CO<sub>2</sub>



Slika 13: Rentgenski posnetek svežega lesnega pepela (pepel P2)

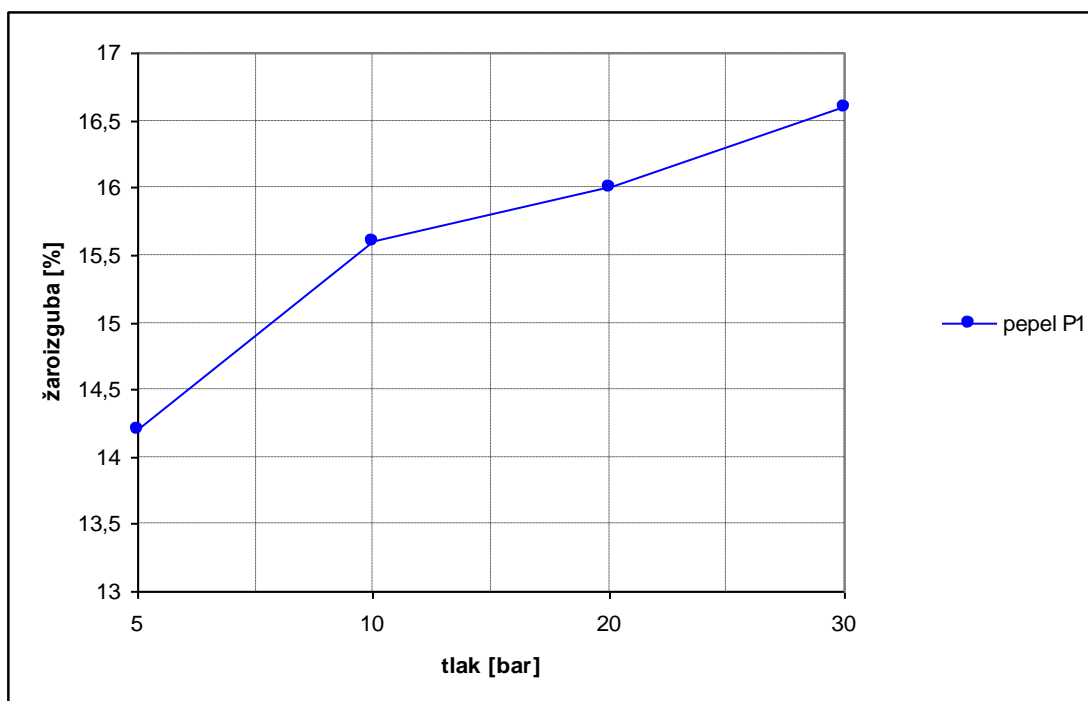


Slika 14: Rentgenski posnetek dinamično karbonatiziranega lesnega pepela z zrakom (pepel P2). Karbonatizacija povzroči nastanek številnih novih spojin, kar se odraža s številčnejšimi piki in pomikom dominantnih oksidnih pasov spektra v karbonatne.

#### 4.6 Dinamična karbonatizacija pepela s CO<sub>2</sub> v rotacijski tlačni celici

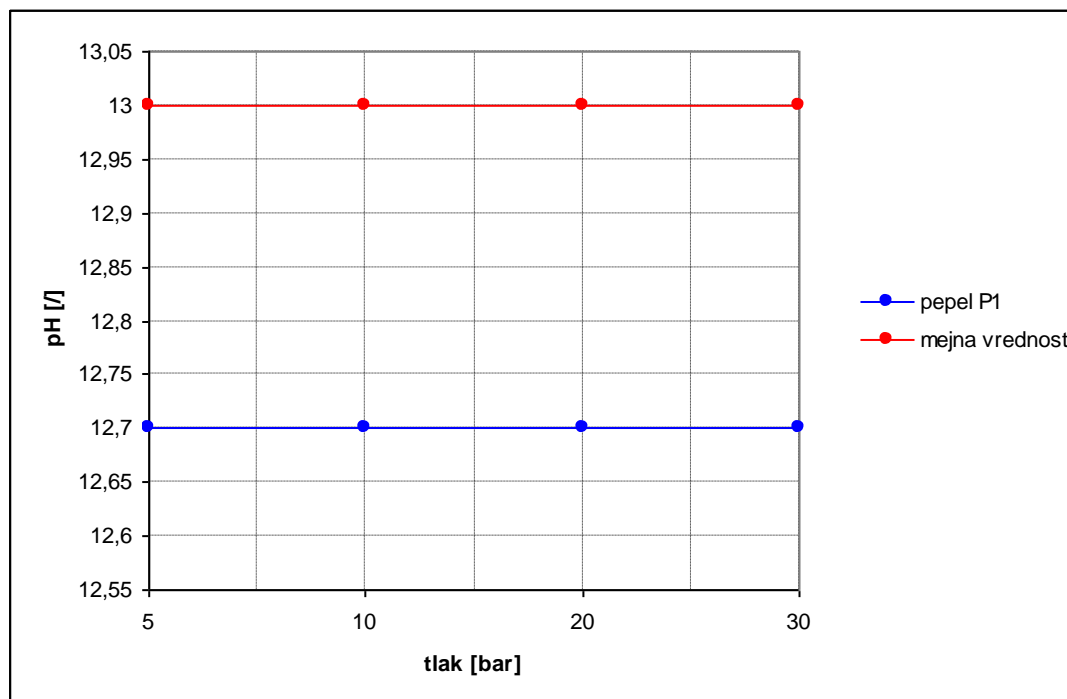
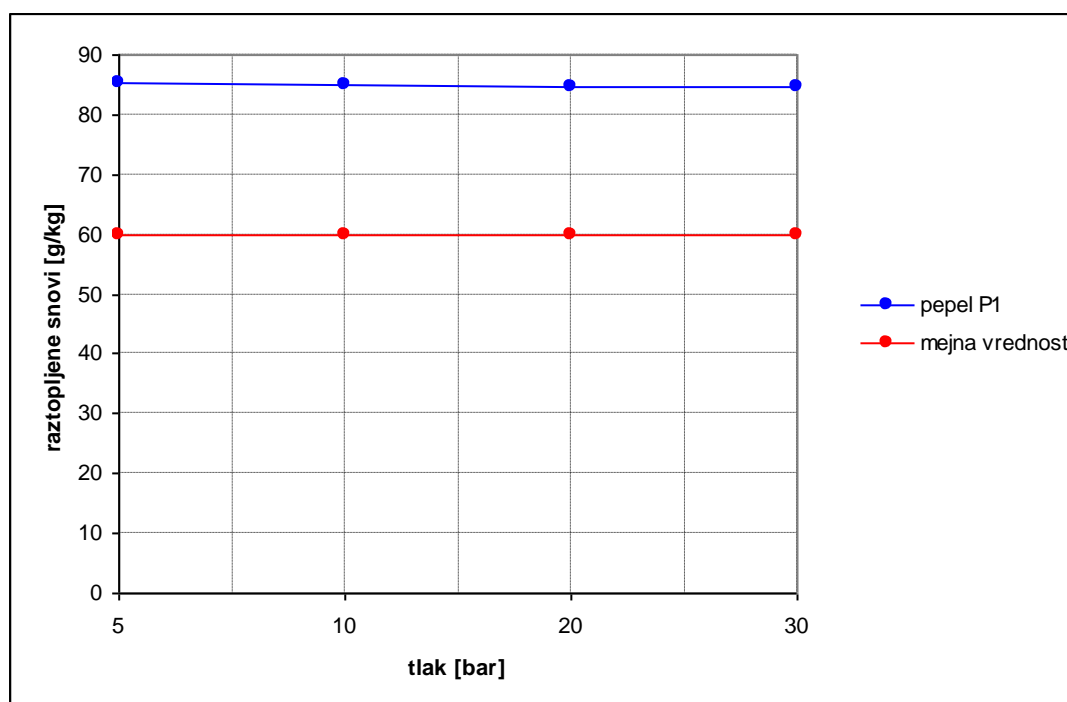
Preglednica 18: Vrednosti parametrov stabiliziranih pepelov in izlužkov pepela P1 po 24 – ih urah kontakta s komprimiranim CO<sub>2</sub> v odvisnosti od tlaka

Tlak CO <sub>2</sub> (bar)	Žaroizguba (%)	pH (/)	Razt. snovi (g/kg)
5	14,2	12,7	85,4
10	15,6	12,7	85,0
20	16,0	12,7	84,7
30	16,6	12,7	84,5



Grafikon 13: Prikaz žaroizgube pepela P1 pri 900°C (%) v odvisnosti od tlaka CO<sub>2</sub>



Grafikon 14: Prikaz pH vrednosti izlužkov pepela P1 v odvisnosti od tlaka CO<sub>2</sub>Grafikon 15: Prikaz vrednosti raztopljenih snovi v izlužku pepela P1 v odvisnosti od tlaka CO<sub>2</sub>

#### **4.7 Potrditev hipotez**

Približno polovica vseh vzorcev, to so predvsem vzorci pepela P2 zadovoljujejo vse cilje predpostavljene na začetku, hkrati pa tudi izpolnjujejo vse mejne kriterije parametrov, določene v predpisih. Tako na podlagi teh podatkov ne morem popolnoma potrditi hipoteze, ki sem jo predpostavil na začetku, da je karbonatizacija suhega pepela dovolj, da bi po koncu tega postopka dobili stabilen material ustreznih karakteristik, ki ne bodo presegale predpisanih mejnih vrednosti za odlaganje na odlagališčih nenevarnih odpadkov oz. za uporabo v kmetijstvu in gozdarstvu.

Že po analizah obeh svežih pepelov je bilo jasno, da je pepel P1 tisti, ki bo tehnično bolj zahteven za stabilizacijo in na koncu problematičen pri izpolnjevanju vseh mejnih kriterijev. Vsi vzorci so tako po naravni kot tudi vsiljeni karbonatizacije še vedno presegali mejno vrednost raztopljenih snovi, pH pa je bil razen po karbonatizaciji v tlačni celici, ves čas na meji.

#### **4.8 Primerjava neobdelanega in stabiliziranega odpadnega lesnega pepela**

Rezultati raziskave so pokazali (preglednica 11), da so kemijske lastnosti standardnega izlužka suhega pepela okoljsko sporne, kar tudi omejuje njegovo direktno uporabo. Problem predstavlja tudi visoka vsebnost topnih soli ter njegova praškasta struktura, ki pri uporabi povzroča veliko prašenja.

Količina vodotopnih snovi v izlužku suhega pepela P1 je skoraj 2x presegla dovoljeno vrednost, medtem ko ta parameter pri suhem pepelu P2 ni bil kritičen. Po karbonatizaciji se ta količina ni stabilizirala tako kot sem pričakoval. Največje padanje začetnih visokih koncentracij je bilo opaziti pri statični karbonatizaciji na zraku, ki je trajala najdlje. Pri ostalih treh poskusih je bilo padanje zmerno, ponekod tudi zanemarljivo. Podobno velja za pH, ki se je malo znižal, vendar ne bistveno.

Prirastek mase pri naravni karbonatizaciji je bil dobrih 10 %. Podobne rezultate so dobili tudi v drugih raziskovalnih študijah, kjer so ugotovili, da sicer naravna karbonatizacija poteče hitreje kot vsiljena, vendar pa je količina vezanega plina pri slednji dvakrat večja. Prirast

mase pri spontani karbonatizaciji gre pretežno na račun vezave CO<sub>2</sub>, pri vsiljeni pa tudi vode (vlažen plin) (Grilc in Husić, 2010).

## 5 DISKUSIJA

Z eksperimentalnim delom naloge lahko dokažem stabilizacijo osnovnih kritičnih organskih in anorganskih parametrov lesnih pepelov, s čimer lahko dosežemo zadovoljive možnosti za uporabo teh produktov na različnih področjih. Vendar pa moram poleg tega dodati še, da to velja predvsem za pepele, ki so okoljsko manj zahtevni. Dosegel sem ustrezno raven pH vrednosti in raztopljenih snovi za pepel P2. Medtem ko sem za pepel P1 ugotovil, da so raztopljene snovi, ki so že pred stabilizacijo skoraj 2x presegle mejno vrednost, problematičen parameter. Je bil pa pri pepelu P1 zadovoljiv prirastek mase pri naravni karbonatizaciji. Vsekakor pa je karbonatizacija proces, ki sproži številne reakcije, ki ugodno vplivajo na fizikalne kot tudi kemijske lastnosti pepela. Proces staranja ima pozitivne učinke na izluževalne lastnosti pepela. Izpiranje težkih kovin se sčasoma zmanjša (Marzi in sodel., 2012).

Za doseganje dobrih končnih produktov bi bilo potrebno proces karbonatizacije izboljšati z dodajanjem določene količine vode. Zaradi kemične sestave lesnega pepela, ki vsebuje tudi nad 50 % CaO dodajanje vode pospeši tvorjenje Ca(OH)<sub>2</sub> in nadalje z zračnim CO<sub>2</sub> oblikovanje CaCO<sub>3</sub>. Ta proces spremeni kemične in fizikalne lastnosti pepela in vodi v samoutrjevanje pepela (Supancic in sod., 2012). Marzi in sod. (2012) so razvili koncept pospešene karbonatizacije s kontaktom plinov, ki vsebujejo CO<sub>2</sub>. Na koncu so prišli do zaključka, da bolj učinkovit proces karbonatizacije dosežemo, če poleg uvajanja CO<sub>2</sub>, v pepel dodamo še vodo in tako dobimo varen končni produkt. Je pa tak način karbonatizacije oz. stabilizacije precej težavnejši, saj mora potekati v fizikalno mnogo težavnejšem testastem stanju materiala, ki zahteva posebno strojno opremo in več moči za mešanje.

## 6 ZAKLJUČEK

Diplomska naloga predstavlja možnost reciklaže odpadnega lesnega pepela kot odpadka in njegove kasnejše ponovne uporabe na različnih področjih. 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 stabilizacije. S tem mislim na staranje pod ustreznimi zunanji pogoji, kot so zadosten vir ogljikovega dioksida in pravilna količina dodane vode, kar so pokazale najnovejše raziskave kot tudi moji dobljeni rezultati. Če primerjam rezultate na začetku poskusa s tistimi po 10-ih tednih, lahko ugotovim, da sta karbonatizirana pepela dosegla boljše rezultate. Vrednosti kritičnih parametrov so se spustile pod mejne vrednosti, če pa bi s poskusom nadaljeval še nekaj tednov, bi se izlužljivost organskih in drugih vodotopnih snovi še znižala in na koncu ustalila na neki konstantni vrednosti. Najverjetneje tako kot pri pH-ju, kjer že takoj na začetku vrednost pade, nato pa se ustali na neki konstantni vrednosti.

Kar vidim kot problem so strukturno bolj zahtevni pepeli, ki imajo visoko vsebnost vodotopnih snovi. To se je izkazalo pri pepelu P1, zato bi bilo pri takem pepelu potrebno proces karbonatizacije izboljšati z dodajanjem vode, ki bi omogočala večjo in hitrejšo karbonatizacijo.

Na koncu lahko vseeno zaključim, da je obdelava odpadnega lesnega pepela s postopkom karbonatizacije ob ustreznih pogojih učinkovita.

Tako lahko naenkrat zadovoljimo ekološke in ekonomske cilje skupaj z upoštevanjem smernic, ki nam jih narekuje zakonodaja. S tem se zmanjša količina odloženih odpadkov, koristno pa uporabimo dragocene naravne vire. Sočasno pa se zadovoljijo tudi predpisi in zahteve uredb, ki urejajo to področje. Eden od prednostnih na obvezujoči hierarhični lestvici gospodarjenja z odpadki je ta, da iz odpadne snovi dobimo novo uporabno snov. Gre za visoko kakovosten ekološki produkt, ki bi lahko rešil probleme tako z okoljskega kot tudi ekonomičnega vidika (stroški transportiranja, skladiščenja in odlaganja na deponijah).

Pozitivne lastnosti lesnih pepelov kažejo na to, da so smernice pravilno začrtane in 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.

Berra, M., De Casa, G., Dell'Orso, M., Galeotti, L., Mangialardi, T., Evangelista Paolini, A., Piga, L. 2011. Reuse of Woody Biomass Fly Ash in Cement-Based Materials: Leaching Tests. Bougnom, B. P., Insam, H. (ur.). Recyclig of Biomass Ashes. Austria, Innsbruck, Institute of Microbiology, University of Innsbruck: str 133-146.

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.). Recyclig of Biomass Ashes. Austria, Innsbruck, Institute of Microbiology, University of Innsbruck: str. 87-106.

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

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

(Pridobljeno 20.10.2011.)

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, 13th International Waste Management and Landfill Symposium, 3-7 October 2011, Cagliari, Italy.

Grilc, V., Husić, M. 2010. Problemi pri termični izrabi lesnih odpadkov in možne rešitve. V: Zbornik 11. strokovnega posvetovanja z mednarodno udeležbo Gospodarjenje z odpadki - GZO'10, avgust 2010, Moravske Toplice. Ljubljana: Naravoslovno-tehniška fakulteta, Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo: str. 58-67.

Grilc, 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.

Gunning, P., Hills, C., Antemir, A., Carey, P. 2011. Novel approaches to the valorisation of ashes using aggregation by carbonation. V: 2<sup>nd</sup> International Slag Valorisation Symposium, April 18-20. 2011, Leuven, Belgium.

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.). *Recycling of Biomass Ashes*. Austria, Innsbruck, Institute of Microbiology, University of Innsbruck: str. 1-16.

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.

Lesna biomasa. Zavod za Gozdove Slovenije. 2006.

[http://www.biomasa.zgs.gov.si/index.php?p=les\\_raba](http://www.biomasa.zgs.gov.si/index.php?p=les_raba) (Pridobljeno 18.10.2011.)

Marzi, T., Bertling, R., Köhl, M., Auel, W. 2012. Aging behaviour of bottom ashes from RDF-power plants. V: ASH Conference 2012, Stockholm, Sweden, January 25-27.

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: 13th International Waste Management and Landfill Symposium, 3-7 October 2011, Cagliari, Italy.

Muratovič, B. 2011. Razvoj postopkov predelave odpadnih lesnih pepelov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, VKI: 51 f.

Nordmark, D., Lagerkvist, A., Vestin, J., Arm, M., Lind, B., Hallgren, P. 2011. Environmental and mechanical assessment of wood fly ash used for stabilisation of gravel

roads. V: 13th International Waste Management and Landfill Symposium, 3-7 October 2011, Cagliari, Italy.

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.

Ribbing, C. 2010. Swedish Ash program with focus on bio ashes. Bougnom, B. P., Insam, H. (ur.). Recyclig of Biomass Ashes. Austria, Innsbruck, Institute of Microbiology, University of Innsbruck: str. 147-164.

Supancic, K., Obernberger, I., Kienzl, N., Arich, A. 2012. Conversion and leaching characteristics of ashes during outdoor storage – results of laboratory tests. V: ASH Conference, Stockholm, Sweden, January 25-27.

Škarja, M., Novak, P., Orel, B., Bregar, Z., Ivanjko, Š., Hlebčar, B., Matvoz, D., Maksić, M., Kralj, P., Nemac, F., Likovič, A., Andrejašič, T., Lampič, G., Kupčič, I. 2007. Primerjalna analiza trendov vlaganj v raziskave in razvoj v tehnologije na področju energije. Ljubljana, Slovenija, 27. november 2007. Ljubljana: Inštitut BION d.o.o., str. 122-124.

Uredba o obremenjevanju tal z vnašanjem odpadkov. Uradni list RS št. 34/2008: 3258.  
Sprememba: Uradni list RS, št. 61/2011

<http://www.uradni-list.si/1/objava.jsp?urlid=200834&stevilka=1363>

(Pridobljeno 25.10.2011.)

Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališčih. Uradni list RS št. 97/2008. Sprememba:  
Uradni list RS, št. 61/2011.

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

(Pridobljeno 25.10.2011.)

Uredba o predelavi nenevarnih odpadkov v trdno gorivo. Uradni list RS št. 57/2008: 6210

<http://www.uradni-list.si/1/content?id=86955> (Pridobljeno 25.10.2011.)



Uredba o ravnanju z odpadki. Uradni list RS št. 34/2008: 3194. Sprememba: Uradni list RS št. 103/2011.

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

(Pridobljeno 25.10.2011.)

Uredba o sežiganju odpadkov. Uradni list RS št. 68/2008: 9266

<http://www.uradni-list.si/1/objava.jsp?urlid=200868&stevilka=2966>

(Pridobljeno 25.10.2011.)

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.