

Naloga: »**Načrt za potencialno izrabo presežne biomase iz travnikov KPLB kot surovine za energetska oskrbo bodočih objektov JZ KPLB**«

Naročnik: Javni zavod Krajski park Ljubljansko barje, Podpeška cesta 380, 1357 Notranje Gorice

Izvajalec: Zavod ACT-SI, Leona Zalaznika ulica 35, 2000 Maribor

Avtorji: Blaž Likozar, Tine Seljak, Nina Meglič

Ljubljana, 31. 3. 2026

Končno poročilo izvajalca

Končno poročilo izvajalca je bilo pripravljeno v okviru aktivnosti projekta DiversE (ID: ASP0500481), ki je sofinanciran s sredstvi Evropske unije v okviru transnacionalnega programa Interreg Alpski prostor (2021-2027).

Interreg



Co-funded by
the European Union

DIVERSE

Alpine Space

Kazalo

1. Uvod

2. Opis metodologije

2. 1. Analiza goriva tj. vzorcev sena iz območja KPLB

2. 2. Evalvacija goriva za rabo v kotlih, kuriščih in kogeneracijskih enotah

2. 3. Pregled aktualne zakonodaje in pravnih okvirjev za izvedbo projekta

2. 4. Surovinska izraba biomase za proizvode

3. Rezultati analiz

3. 1. Analiza goriva tj. vzorcev sena iz območja KPLB

3. 2. Evalvacija goriva za rabo v kotlih, kuriščih in kogeneracijskih enotah

3. 3. Možnosti energetske izrabe

3. 4. Razpoložljivost sistemov

3. 5. Izpusti v zrak

3. 6. Preverba ekonomske učinkovitosti projekta

3.7. Vpliv pred-obdelave surovine na ekonomiko

3. 8. Pregled aktualne zakonodaje in pravnih okvirjev za izvedbo projekta

3. 9. Surovinska izraba biomase za proizvode

4. Interpretacija rezultatov

4. 1. Analiza goriva tj. vzorcev sena iz območja KPLB

4. 2. Evalvacija goriva za rabo v kotlih, kuriščih in kogeneracijskih enotah

4. 3. Preverba ekonomske učinkovitosti projekta

4.4. Pregled aktualne zakonodaje in pravnih okvirjev za izvedbo projekta

4.5. Surovinska izraba biomase za proizvode

5. Viri

6. Priporočila

1. Uvod

Uporaba biomase travnišč za zgorevanje je predmet obsežnih raziskav, je v rabi že uveljavljena, pa vendar je še vedno podvržena različnim tehničnim, gospodarskim pa tudi zakonodajnim izzivom. Za doseganje čim boljše kakovosti goriva je potrebno ustrezno upravljanje travnišč z enim poznim košenjem letno, nizkimi ravnmi neobnovljivega dodatnega gnojenja in nizkimi vsebnostmi škodljivih negorljivih snovi. Za spravilo biomase trave se uporablja običajna kmetijska oprema. Kakovost ligno-celuloznega bio-goriva je mogoče izboljšati s peletiranjem ali briketiranjem. Tehnologijo postopka zgorevanja pa je treba prilagoditi različnim težavam opreme, ki izhajajo iz lastnosti travnih bio-goriv. Predvsem je biomasa tu veliko manj gosta kot recimo lesna, kar seveda ne omogoča, da se popolnoma vsa oprema, na voljo za sežig, uporablja neposredno, nekatera pa se (s predelavami) lahko.

Dobičkonosnost proizvodnje uporabnih trdnih bio-goriv iz presežne biomase travnišč je mogoče doseči ob nizkih stroških košnje, oskrbe in zgorevanja, kakovosti ter ob zadostnih tržnih prihodkih od prodaje travnatega ostanka, podpore za rabo travnatih zemljišč in prisotnosti podporne zakonodaje. Okoljske koristi predelave izhajajo iz razvoja področnega gospodarstva, zmanjšanja izpustov škodljivih toplogrednih plinov in posrednih ugodnih učinkov na biotsko raznovrstnost okolja, ozračje ter kakovost površinske vode zaradi neposrednega upravljanja travnišč. Posebno pozornost gospodarjenja pa je treba nameniti nadomeščanju popolnega odvzema biološkega ogljika, dušika in fosforja z odvzeto biomaso trave. Zadostna oskrba travnikov z dušikom, zagotovljena s stročnicami ali gnojenjem, omogoča pridelavo dovolj biomase za nadomeščanje ali celo kopičenje ogljika ali kisika.

Naslednje se šteje za področja nadaljnjega zanimanja pri pripravi trdnih bio-goriv iz travnišč (Prochnow s sodelavci, 2009, 10.1016/j.biortech.2009.05.069):

- ciljna uporaba padavin v obdobju po košnji na polju za izpiranje nezaželenih sestavin (N...),
- razširitev doslej redkih poskusov vesplošnega sprejetega popisa kakovosti goriva/trave,
- izboljšanje tehnologije spravila, dobave in uporabe, ki narekuje posredne CO₂ (izpuste),
- nadaljnja prilagoditev najsodobnejše tehnologije zgorevanja značilnostim travnih bio-goriv,
- celovita presoja gospodarnosti na ravni postopkov, kmetij in področij, ki zajemajo verigo, in

– celovita presoja življenjskega cikla uporabe s poudarkom na izpustih toplogrednih plinov, kroženju celokupnega ogljika, dušika in hranil ter biotski raznovrstnosti okolja, pri čemer se raba trdnih bio-goriv primerja z drugimi gospodarskimi načini rabe travišč ali javnih površin.



Žetev *Miscanthusa* z enim žetvenim prehodom s (samohodnim) kombajnom (Stefanoni s sodelavci, 2023, 10.3390/en16052303).

Javni zavod Krajinski park Ljubljansko barje (JZ KPLB) upravlja z zemljišči v državni lasti na območju Krajinskega parka Ljubljansko barje (KPLB) ter na njih izvaja ukrepe za ohranjanje naravovarstveno pomembnih habitatnih tipov. S temi ukrepi JZ KPLB zagotavlja varovanje in dolgoročno ohranjanje biotske pestrosti enega najpomembnejših mokrotnih ekosistemov v Sloveniji.

Osrednji poudarek upravljanja je namenjen ohranjanju mokrotnih travnikov, ki predstavljajo življenjski prostor številnih redkih in ogroženih rastlinskih in živalskih vrst. Med njimi so značilne rastlinske vrste, kot so močvirska logarica (*Fritillaria meleagris*), divje orhideje kukavičevke (Orchidaceae), veliki poletni zvonček (*Leucjum aestivum*) ter različne vrste šašev (*Carex*) in trav (Poaceae). Mokrotni travniki so hkrati ključni habitat za travniške vrste ptic, kot sta veliki škurh (*Numenius arquata*) in kosec (*Crex crex*), ter za ogrožene vrste metuljev, med katerimi izstopata strašničin mravljiščar (*Maculinea teleius*) in barjanski okarček (*Coenonympha oedippus*).

Eden izmed ključnih naravovarstvenih ukrepov, ki jih izvaja JZ KPLB, je redna košnja travnikov, s katero se preprečuje zaraščanje in ohranja ugodno stanje habitatov. Pri tem nastajajo znatne količine travniške biomase, ki zaradi svoje nizke krmne vrednosti pogosto ostaja neizkoriščena. Ta biomasa predstavlja potencialni lokalni vir energije, ki bi ga bilo mogoče uporabiti za proizvodnjo bioenergije, predvsem za ogrevanje in oskrbo z električno energijo bodočih objektov JZ KPLB.

JZ KPLB načrtuje izgradnjo nove vstopne točke v KPLB na območju Rakove jelše, ki bo obsegala upravno stavbo s pisarnami in spremljevalnimi prostori (približno 700 m²), informacijsko-interpretacijski center (približno 2.500 m²), nastanitveni objekt za raziskovalce in obiskovalce (okoli 200 m²) ter drugo spremljajočo infrastrukturo. Skupna površina načrtovanih objektov znaša okvirno 3.000 m², pri čemer bodo objekti potrebovali vseletno oskrbo s toploto in električno energijo. Predvideno je, da bodo zgrajeni skladno z visokimi standardi energetske učinkovitosti in z ambicijo doseganja čim večje energetske samozadostnosti.

Pri umeščanju objektov in morebitnega energetskega sistema je treba upoštevati tudi prostorski in naravovarstveni kontekst. Načrtovana lokacija se nahaja na delno degradiranem območju OPPN 94, ki meji na varovano območje KPLB, z naslednjimi naravovarstvenimi statusi:

- območje Natura 2000 Ljubljansko barje,
- ekološko pomembno območje Ljubljansko barje,
- zavarovana območja (KPLB – prvo in tretje varstveno območje, naravni spomenik Ljubljanica),
- naravna vrednota – območje Ljubljanica.

Projektna naloga se izvaja v okviru aktivnosti slovenskega Focus Laba, ki deluje kot del mednarodnega projekta DiversE. V tem okviru bo pripravljen poslovni načrt za potencialno energetske izrabo presežne biomase, ki nastaja kot neposredna posledica naravovarstvenih ukrepov na območju KPLB. Rezultati naloge bodo predstavljeni kot primer dobre prakse v poročilih projekta ter obravnavani na strokovnih dogodkih, namenjenih iskanju inovativnih rešitev s povezovanjem deležnikov s področij bioenergije, kmetijstva, biomase, biodiverzitet in naravovarstva v Sloveniji ter širšem alpskem prostoru.

Projekt DiversE se izvaja v okviru programa Interreg in je usmerjen v trajnostno rabo naravnih virov ter razvoj krožnega gospodarstva, s posebnim poudarkom na prepoznavanju in vrednotenju virov za proizvodnjo trajnostne bioenergije na območju Alp.

Dokument se osredotoča na evalvacijo travinja, prisotnega na mokrotnih travnikih v Krajinskem parku Ljubljansko barje (KPLB), z vidika njegovega potenciala za energetske rabe in oskrbo bodočih objektov javnega zavoda KPLB. Glavni vzgibi za obravnavo energetske rabe travinja izhajajo iz njegove nizke kakovosti in posledične omejene uporabnosti za krmne namene ter iz razpoložljivosti biomase, ki je posledica rednih intervalov košnje. Košnja se praviloma izvaja enkrat letno, predvsem z namenom ohranjanja ugodnega stanja habitatov in biotske raznovrstnosti, kar pomeni, da nastaja stalna količina biomase, ki trenutno ni optimalno izkoriščena.

V kontekstu prehoda v nizkoogljično družbo in povečane rabe lokalnih obnovljivih virov energije predstavlja travinje z mokrotnih travnikov potencialno zanimiv, a hkrati nekonvencionalen energetski vir. Njegova uporaba lahko prispeva k zmanjševanju odvisnosti od fosilnih goriv, izboljšanju energetske samooskrbe javnih objektov ter k bolj celostnemu upravljanju zavarovanega območja. Hkrati pa takšna raba zahteva temeljito presojo vplivov na okolje, naravovarstvene cilje in dolgoročno trajnost upravljanja prostora.

Študija je pretežno usmerjena v analizo kemijsko-fizikalnih lastnosti travinja ter v identifikacijo tehnološko in okoljsko sprejemljivih možnosti za njegovo energetske izrabo. Na podlagi pregleda razpoložljivih tehnologij so ovrednotene različne možnosti pretvorbe biomase v energijo, pri čemer je bila identificirana najustreznejša rešitev glede na značilnosti surovine, prostorske omejitve ter potrebe bodočih uporabnikov energije. Posebna pozornost je namenjena izzivom, ki se pojavljajo pri uporabi nekonvencionalnih biomasnih virov, kot so višja vsebnost vlage, pepela in mineralnih primesi ter sezonska razpoložljivost.

V nadaljevanju dokumenta so analizirani tudi organizacijski, logistični in tehnološki vidiki zagotavljanja stabilne oskrbe z biomaso, pri čemer so upoštevane količine razpoložljivega travinja ter možnosti njegovega skladiščenja in priprave. Na tej osnovi je izvedena tehnokomorna analiza, ki vključuje oceno investicijskih in obratovalnih stroškov ter izračun dobe vračanja investicije.

Rezultati študije predstavljajo okvir, znotraj katerega je mogoče presojati smiselnost energetske izrabe travinja v KPLB. Hkrati lahko služijo kot strokovna podlaga za nadaljnje faze načrtovanja, natančnejše dimenzioniranje energetskega sistema ter pripravo investicijske in projektne dokumentacije, ob doslednem upoštevanju naravovarstvenih ciljev in načel trajnostnega razvoja.

2. Opis metodologije

2. 1. Analiza goriva tj. vzorcev sena iz območja KPLB

Vrednotenje obnovljivega goriva, t. j. vzorcev sena trave iz območja Javni zavod Krajinski park Ljubljansko barje (KPLB), je obsegala suhi, mokri in sežgani vzorec biomase. Opravljeno je bilo proksimativno vrednotenje-, ultimativna različica in kurilna vrednost biomase, prisotnost večine (težkih) kovin (vrstična elektronska mikroskopija (SEM)), temperatura taljenja pepela, hkrati pa so se nekateri omenjeni pristopi opravili večkrat zaradi primerjave.

Vrednotenje vlage vzorcev se je naročilo na UL NTF. Natančnost samih meritev s ponovljivostjo je bila $\pm 3 \%$. Uporabljena oprema vrednotenja za določanje vsebnosti vlage je bila sušilnik. Določanje vsebnosti vlage je potekalo v sušilniku pri temperaturi $105 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ do dosežene nespremenjene končne mase vzorca. Za vsak vrednoten vzorec je bilo izvedenih 15 meritev. Za izvedbo vseh meritev sta bila vrednotena 2 različna vzorca mrve.

Vrednotenje hlapnih snovi je potekalo na napravi Q5000 za merjenje mase vzorcev, kjer se je temperatura počasi dvigala s sobne (25 °C) do 400 °C , in sicer s hitrostjo segrevanja lončka 10 K/min . Vrednotenje hlapnih snovi se je določila z izgubo mase (posušenega) vzorca, še preden je prišlo do razpadanja najbolj občutljivega dela hemi-celuloze, in sicer z odčitkom (naprava). Vsak od vzorcev je bil posnet petkrat, poročila pa se povprečna vrednost meritve.

Vrednotenje pepela vzorcev se je naročilo na UL NTF. Natančnost samih meritev s ponovljivostjo je bila $\pm 4 \%$. Uporabljena oprema vrednotenja za določanje vsebnosti pepela je bila peč. Določanje vsebnosti pepela je potekalo v namizni različici peči po vnaprej določenem vzdrževanem toplotnem načrtu do dosežene nespremenjene teže vsakega vzorca. Vzorce se je najprej segrelo na $250 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$, se jih nato na tej določeni temperaturi zadrževalo 1 uro in nazadnje nadaljevalo s segrevanjem. Sledilo je nadaljnje segrevanje mrve na $550 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$, kjer so bili vzorci zadržani še 3 ure. Za vsak vzorec mrve je bilo izvedenih 10 meritev na dokončno suho stanje. Glede na ponovitve je bilo moč izračunati povprečje, poleg tega pa tudi odklon pri meritvi, in sicer je bilo to moč opraviti za vsakega od vzorcev (mrve).

Določitev C je potekala z elementnim vrednotenjem sestave vario EL cube (Elementar). Vsa vrednotenja ogljika smo opravili v več pripravah vzorca. V preglednicah so navedeni izsledki vrednotenij skupaj z odmiki samih postopkov. Visok odmik postopka je tako lahko posledica več ponovitev razklopov vzorca z različnimi končnimi težami. Glede na ponovitve je bilo moč izračunati povprečje, poleg tega pa tudi odklon pri meritvi, in sicer je bilo to enako pri vseh.

Ultimativno vrednotenje vzorcev je obsegalo določitev C, H, N in S je potekala z elementnim vrednotenjem sestave vario EL cube (Elementar). Vsa vrednotenja ogljika smo opravili v več pripravah vzorca. V preglednicah so navedeni izsledki vrednotenij skupaj z odmiki samih postopkov. Visok odmik postopka je tako lahko posledica več ponovitev razklopov vzorca z različnimi končnimi težami. Vrednotenje se je naročilo IJS, izsledki pa podani v nadaljevanju.



Naprava za določitev elementne sestave, ki se lahko uporabi, vario EL cube (Elementar)
(<https://www.elementar.com/en/products/organic-elemental-analyzers>).

Kemijska sestava mrve je opredeljena z vidika njenega posamičnega proksimativnega, ultimativnega (elementarnega) in gorilnega vrednotenja. Če so izsledki proksimativnega vrednotenja tako vlaga, druge hlapne snovi, pepel, celotni vezani ogljik in organski C, je ultimativno vezano na elemente. Elementarno ali ultimativno vrednotenje vzorcev zajema množinsko določanje ogljika, vodika, dušika, žvepla ali/in kisika v mrvi. Poleg tega so lahko različne tudi kemijske, fizikalne in trdnostne lastnosti mrve, mešanje (npr. glede oblike) ter posebne značilnosti tvorbe C. Predvsem zgradba, velikost in oblika so pomembne pri njeni surovinski izrabi, delno pa lahko vpliva tudi na kurjenje, in sicer pri prilagajanju samega kurišča, ne nazadnje pa tudi pri izboljševanju učinkovitosti sežiga, odvisnega od dostopa O_2 .

Kalorična vrednost mrve Q (kJ/kg) je toplota, ki se sprosti pri njenem popolnem zgorevanju s kisikom. Q je v zahtevni odvisnosti elementarne sestave mrve. Q je mogoče s poskusom

določiti z uporabo sežigalnih naprav. V splošnem pa je predlagana naslednjo približna enačba (ki ima tudi več izboljšanih različic) za Q, ko je vsebnost dostopnega kisika manjša od 10 %. Tako se da Q dobiti neposredno iz vrednotenja (nadaljevanje) ali pa izračunati iz sestave.

$$Q = 337 w_C + 1442 (w_H - w_O / 8) + 93 w_S$$

w_C je utežni odstotek ogljika. w_H utežni odstotek vodika. w_O utežni odstotek kisika. w_S utežni odstotek žvepla v mrvi. S temi členi sorazmernosti je Q podan v kJ na kilogram. Moč je tudi razbrati, da ogljik ali vodik povečujeta toploto, O, ki je vezan, pa jo zmanjšuje, S pa je malo.

Vrednotenje kurilne vrednosti se je naročilo na UL NTF. Natančnost samih meritev s ponovljivostjo je bila $\pm 2 \%$. Uporabljena oprema vrednotenja za določanje kurilne vrednosti je bila IKA Calorimeter C 200. Zgorevalna toplota mrve, mokre ali suhe, je bila tako ločeno določena z bombno zgorevalno napravo IKA C 200, ki je deloval v sorazmerno izotermnem načinu. Pri poskusih je bila uporabljena umeritvena vrednost zgorevalne naprave 10.014 J/K. Zgorevanje je potekalo v posodi C 5010. Za vžig vzorca mrve je bila uporabljena bombažna nitka vrste C 710.4, ki pri zgorevanju odda 50 J. Izmerjene so bile masa, celokupna zgorevalna toplota na osnovno stanje vzorca in podobna različica slednje na suho obliko mrve. Za vsak vzorec mrve je bilo izvedenih 5 tehtanj, 5 vrednotenj na njegovo osnovno stanje in 5 poskusov na suho obliko biomase. Za ponovitve je bila izračunana tudi napaka.



Naprava za določitev zgorevalne toplote, ki se lahko uporabi, Calorimeter C 200 (IKA) (<https://www.ika.com/en/Products-LabEq/Calorimeters-pg330/C-200-8802500>).

Zgornja kurilna vrednost označuje gornjo mejo razpoložljive toplotne energije, ki jo proizvede popolno zgorevanje goriva. Označimo jo s HHV ali imenujemo celokupna sproščena energija, zgornja kurilna vrednost, celotna kalorična vsebnost, GCV, ali višja kalorijska raven, HCV). Meri se kot enota sproščene energije na maso ali prostornino. HHV se določi tako, da se vsi

proizvodi zgorevanja vrnejo na prvotno temperaturo okolice pred segrevanjem, vključno z utekočinjenimi nastalimi hlapi. Takšna vrednotenja vrednosti HHV pogosto uporabljajo temperaturo 25 °C (298 K / 77 °F). To je enako termodinamični toploti zgorevanja, saj sprememba entalpije postopka predpostavlja skupno temperaturo spojin pred oziroma po zgorevanju, pri čemer se voda, ki nastane pri razklopu, ohladi do tekočine.

Spodnja kurilna vrednost (LHV, omejena kalorična vsebnost, NCV, ali spodnja kalorijska raven, LCV) je še ena mera razpoložljive toplotne energije, ki nastane pri zgorevanju, merjena kot enota J na težo ali prostornino. V nasprotju s HHV LHV upošteva izgube hlapov.

Prisotnost (težkih) kovin pepela se je vrednotila z vrstično elektronsko mikroskopijo (SEM) ali z določitvijo elementne sestave (vzorca). Določitev vsebnosti kovin Cd, K, Na, Pb, Si in Zn oziroma sestave se je naročila na IJS. Za določitev vsebnosti Cd, K, Na, Pb, Si in Zn pepela oziroma elementne sestave kovin smo uporabili dva različna (in posušen), suha in zmlata vzorca biomase mrve. Določitve vsebnosti kovin smo izvedli z atomsko emisijsko spektrometrijo z induktivno sklopljeno plazmo na napravi Agilent 5800 ICP–OES po predhodnem mikrovalovnem razklopu brez oziroma z dodatkom HF. Vsa vrednotenja vzorcev smo opravili z več vzporednimi tehtanji. V preglednicah v nadaljevanju so navedeni izsledki vrednotenij skupaj z določenimi odmiki napak. Visok odmik napake je za natrij.



ICP–OES (<https://www.agilent.com/en/product/atomic-spectroscopy/inductively-coupled-plasma-optical-emission-spectroscopy-icp-oes/icp-oes-instruments/5800-icp-oes>).

Atomska emisijska spektroskopija z induktivno sklopljeno plazmo (ICP–AES) je pristop vrednotenja sestave, ki se uporablja za zaznavo kemijskih snovi. Imenovana je tudi optična emisijska spektroskopija z induktivno sklopljeno plazmo (ICP–OES). Gre za vrsto spektroskopskega pristopa, ki uporablja neposredno sklopljeno plazmo za ustvarjanje

vzbujenih atomov, ionov in elektronov, ki oddajajo različno elektromagnetno sevanje na posamičnih valovnih dolžinah, značilnih za določen obravnavan element. Plazma je visokotemperaturni vir razklopljenega izvornega plina (pogosto argona). Plazma se pripravi, vzdržuje in ohranja z ustrezno zaporedno sklopitvijo električnih tuljav na MHz frekvencah. Temperatura samega vira je v območju od 6000 do 10.000 K. Odziv odraža vsebnosti (kovin). ICP–OES se pogosto uporablja za vrednotenje količin snovi v sledovih v tleh, je zelo občutljiv in zato se pogosto uporablja za ugotavljanje sestave izvora vzorcev prsti. Odvzem enega vzorca iz nadzorne skupine prsti, vrednotenje in določitev sestave kovin je tu ključen za primerjavo. Poleg tega pa se zaradi natančnosti lahko uporabi na primer za umerjanje SEM.

Poročilo o SEM–EDX (okrajšava energetske razpršene rentgenske spektroskopije) je bilo naročeno na Kemijskem inštitutu za primerjavo (sestave). Cilj SEM–EDS vrednotenja je bil oceniti prisotnost elementarnih pokazateljev snovi, ki ustrezajo različnim vrstam ostankov raznorodnih odpadkov v dveh vzorcih prahu. Vrednotenje se je osredotočilo na določitev prisotnih snovi, povezanih z izbranimi težkimi kovinami (arzen, cink, krom, nikelj...), odloženimi gradbenimi gradivi (kalcij, silicij...), ostanki kemijskih pesticidov (fosfor), premreženjem gumijastimi odpadkov (žveplo) in preostalih električnimi delov (baker). Omeniti gre, da so nekatere omenjene snovi bolj okvirne narave, saj je na primer Cu lahko izviral tudi od drugod, pa vendar so različne vrste onesnaženja izbrane glede na naročnika.

Vrednotena sta bila dva vzorca prahu (vzorec 1 / vzorec 2). Oba vrednotena vzorca sta bila sestavljena iz drobnih raznolikih delcev. Vzorca sta bila pritrjena na aluminijasta držala nosilcev s pomočjo običajnega prevodnega ogljikovega traku. Pred vrednotenjem ni bila izvedena nobena dodatna priprava, premazovanje ali smolnata vdelava vzorca. C je bil tako edini, ki se da tako ni dalo določiti natančno, zato je bil iz vrednotenja utežne sestave izvzet.



Primer SEM (<https://www.zeiss.com/microscopy/en/products/sem-fib-sem.html>).

Temperatura taljenja pepela je bila določena preizkusom taljenja majhnih vzorcev pepela. Vzorec travnatega goriva je bil najprej popolnoma sežgan, da se je pridobil pepel, ki je bil nato pomešan, podvržen trenju in oblikovan v običajni preskusni vzorec. Vzorec je bil ogrevan v majhni visokotemperaturni peči pri nadzorovanih ogrevanja pogojih, pri čemer se je temperatura postopno zviševala. Med segrevanjem so se spremljale temperature, opazoval pepel in beležile značilne temperaturne točke, povezane s spremembo oblike vzorca, temperatura tekočega stanja pa je bila določena kot raven taljenja prahu. Pepel se je ogrevalo s sobne temperature okolice (25 °C) do 1700 °C, in sicer s hitrostjo 10 K/min, hkrati pa je bilo vzorec moč opazovati, da se je tališče oziroma območje lahko ocenilo pravilno.

2. 2. Evalvacija goriva za rabo v kotlih, kuriščih in kogeneracijskih enotah

V analizo so bili prejeti trije vzorci travinja, označeni po lokacijah in načinu predpriprave. Dva vzorca sta odvzeta v KPLB, medtem ko je en vzorec odvzet v Notranjskem regijskem parku (NRP) za namen primerjave z bližnjimi lokacijami in možnostjo replikacije pristopa uporaba travinja:

1. parcela 2156 (mokri vzorec sena KPLB) – prevladujoče vrste so predvidoma: *Solidago gigantea/Solidago canadensis*, *Filipendula ulmaria*, *Urtica dioica*. Prejeto v 50L vreči, vlažen, delno degradiran vlaknast material, stisljiv, velikost delcev ~20cm mehka vlakna temnorjave barve. Poimenovanje Vzorec 1.



Mokri vzorec sena KPLB.

2. parcela 1080 (suhi vzorec sena KPLB) – prisotne vrste so predvidoma: *Lolium perenne*, *Poa pratensis*, *Festuca* spp., *Dactylis glomerata*, *Agrostis capilaris*, *Phleum pratense*. Prejeto v dveh 50L vrečah, suh, krhek voluminozen material, velikost delcev >50cm (stebila premera 2mm do 10mm), svetlorjave/sive barve. Poimenovanje Vzorec 2.



Suhi vzorec sena KPLB.

3. seneni peleti (cerkniško jezero NRP) – prisotne vrste so predvidoma kombinacija zgornjih vzorcev 1. in 2. Prejeto v 50L vreči, suh, uniformen material, peleti premera 15mm, variabilne dolžine 5mm – 20mm, temnozeleno/temnorjave barve. Poimenovanje Vzorec 3.



Seneni peleti

4. referenčni vzorec (lignocelulozni peleti) – FOREST Plus, dobavitelj Petrol d.d., standardizirani EN PLUS SI 302 (A1). Poimenovanje vzorec 4.



Lignocelulozni peleti

2.3. Pregled aktualne zakonodaje in pravnih okvirjev za izvedbo projekta

Opis metodologije pri Pregledu aktualne zakonodaje in pravnih okvirjev za izvedbo projekta je zajemal izbiro, pregled in zaključke povezanih zakonodaj (evropskih ali domačih), in sicer na področjih (1) uporabe preostalega pepela sežiga, nato pa glede surovine (2) in izpustov (3). Pri tem so bili izluščeni predvsem glavni morebitni dejavniki, ki bi lahko preprečilo izvajanje izrabe ali znatno poslabšalo gospodarnost pri uporabi, torej predvsem tveganja.

Doma tako velja najbolj splošno Zakon o varstvu okolja – ZVO-2 (<https://pisrs.si/api/datoteke/integracije/471327649>). Ta zakon ureja varstvo okolja pred obremenjevanjem kot temeljni pogoj za trajnostni razvoj in v tem okviru določa temeljna načela varstva okolja, ukrepe varstva okolja, spremljanje stanja okolja in informacije o okolju, ekonomske in finančne instrumente varstva okolja, javne službe varstva okolja in druga z varstvom okolja povezana vprašanja. S ciljem zagotavljanja varstva okolja in varstva ljudi je treba pri nastajanju odpadkov in ravnanju z njimi izvajati ukrepe za preprečevanje ali zmanjševanje nastajanja odpadkov, škodljive vplive nastajanja odpadkov in ravnanje z odpadki ter z zmanjševanjem celotnega vpliva uporabe virov in izboljšanjem na učinkovitosti.

V Evropski skupnosti pa velja najbolj splošno Direktiva (EU) 2025/1892 Evropskega parlamenta in sveta z dne 10. septembra 2025 o spremembi Direktive 2008/98/ES o odpadkih (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/?uri=celex%3A32025L1892>). Upošteva preprečevanje vseh vrst odpadkov in ravnanje z njimi sta ključni orodji v prizadevanjih za varstvo okolja in zdravja ljudi v Uniji. Nujno je, da države članice pri svojih prizadevanjih za stalno izboljševanje načrtov za preprečevanje odpadkov in ravnanje z njimi dosledno upoštevajo hierarhijo ravnanja z odpadki iz Direktive 2008/98/ES Evropskega parlamenta in Sveta. Evropski zeleni dogovor iz sporočila Komisije z dne 11. decembra 2019 in novi akcijski načrt za krožno gospodarstvo za čistejšo in konkurenčnejšo Evropo iz sporočila Komisije z dne 11. marca 2020 pozivata k okrepljenemu in pospešenemu ukrepanju Unije in držav članic za zagotovitev okoljske in družbene trajnostnosti tekstilnega in živilskega sektorja, saj sta to sektorja, ki zahtevata največ virov in povzročata znatne učinke.

Pomembna pa je tudi Scoping possible further EU-wide end-of-waste and by-product criteria (<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b02130d2-a022-11ec-83e1-01aa75ed71a1/language-en>), ki pa ni vezana posamično na pepel pri sežigu ampak splošno. Medtem ko o pepelu ni govora, je izrazito veliko primerov za žlindro, ki je sicer zahtevna.

2.4. Surovinska izraba biomase za proizvode

V poglavju bomo opisali pristop vrednotenja, ki smo ga uporabili za opredelitev možne surovinske izrabe biomase za proizvode, pri čemer so bili izbrani trije, in sicer na podlagi enostavnosti priprave, ki je pogojena z obstoječimi predelovalnimi danostmi v Sloveniji. Posledično je bilo izbrano bio-ogljje (1), celuloza (2) in lignin (3), pri čemer je prvo lahko uporabno za gnojiva, jeklarstvo ali energijo, druga pa za papir, plastiko ali premaze/lepila.



Proizvodnja ustreznega bio-ogljja iz primerljivih vzorcev biomase potekala z uporabo postopka uplinjanja (Alps4GreenC (<https://www.alpine-space.eu/project/alps4greenc/>)).

Priprava se lahko izvede na enoti za uplinjanje v različnih velikostih izvedbe, in sicer npr. v šaržni posodi obratno dvigajočega se plina. Poskusna postavitve sestava omogoča natančno spremljanje postopka, pri čemer je uplinjanje nameščeno na tehtnici za sprotno določanje teže med obratovanjem. Tako pridobljeno bio-ogljje, nastalo pri uplinjanju podobne biomase, predstavlja končni proizvod postopka, se lahko uporablja raznovrstno in je nadalje vrednoteno glede na njegove fizikalno–kemijske lastnosti. Čas zadrževanja surovine s temperaturo na določa, kakšne bodo značilnosti, ki jih bomo pridobili s postopkom (pirolize). Seveda pa to določa tudi surovina.

Pri biomasi imajo pomembno mesto vsestranske celulozne snovi (npr. v papirju, kartonu in vlaknih), ki zaradi svoje znatne obnovljivosti, biorazgradljivosti ter široke surovinske dostopnosti vzbujajo vse večje temeljno raziskovalno, razvojno in gospodarsko zanimanje (CEL.KROG (<https://celkrog.si/>)). Na podlagi vsebnosti celuloze, lignina in hemi-celuloze se da opredeliti, koliko posamičnega omenjenega gradnika se da pridobiti iz biomase JZ KPLB, le-ti pa bi se lahko uporabljali za papir, različne umetne mase ali premaze, za kar imamo podjetja.

3. Rezultati analiz

3. 1. Analiza goriva tj. vzorcev sena iz območja KPLB

Povprečna vsebnost vlage za vzorec 1 (neobdelana vlažna mrva) je bila tako $76 \% \pm 9 \%$.

Povprečna vsebnost vlage za vzorec 2 (neobdelana suha mrva) je bila tako $9,0 \% \pm 0,3 \%$.

vzorec 1 (začetek) (g)	vzorec 1 (konec) (g)	Vlaga (%)	vzorec 2 (konec) (g)	vzorec 2 (konec) (g)	Vlaga (%)
1,257	0,264	79,007	0,430	0,391	9,061
1,104	0,301	72,743	1,010	0,918	9,104
1,118	0,215	80,752	1,461	1,329	9,060
1,050	0,296	71,863	1,108	1,006	9,153
1,097	0,293	73,272	1,223	1,116	8,789
1,054	0,305	71,097	1,157	1,049	9,309
1,285	0,216	83,191	1,301	1,182	9,103
1,179	0,287	75,668	1,580	1,440	8,862
1,279	0,206	83,882	1,322	1,205	8,808
1,159	0,271	76,635	1,385	1,262	8,903
1,059	0,228	78,437	1,495	1,364	8,725
0,928	0,302	67,428	0,951	0,865	9,062
1,120	0,267	76,157	1,562	1,427	8,643
0,937	0,208	77,843	1,341	1,222	8,911
1,008	0,278	72,442	1,215	1,105	9,045

Povprečna vsebnost hlapnih snovi vzorca 1 (neobdelana vlažna mrva) je bila $0,1 \% \pm 0,1 \%$.

Povprečna vsebnost hlapnih snovi vzorca 2 (neobdelana suha mrva) je bila $0,0 \% \pm 0,1 \%$.

Povprečna vsebnost pepela za vzorec 1 (neobdelana vlažna mrva) je bila tako $14,2 \% \pm 0,6 \%$.

Povprečna vsebnost pepela za vzorec 2 (neobdelana suha mrva) je bila tako $1,37 \% \pm 0,07 \%$.

vzorec 1 (začetek) (g)	vzorec 1 (konec) (g)	Pepel (%)	vzorec 2 (konec) (g)	vzorec 2 (konec) (g)	Pepel (%)
0,476	0,068	14,358	0,480	0,007	1,355
0,567	0,084	14,868	0,449	0,007	1,448
0,623	0,090	14,407	0,422	0,006	1,304

0,419	0,061	14,497	0,516	0,007	1,395
0,463	0,067	14,446	0,495	0,007	1,353
0,453	0,062	13,655	0,474	0,007	1,394
0,442	0,062	14,037	0,490	0,007	1,429
0,465	0,065	13,905	0,459	0,006	1,394
0,472	0,066	13,998	0,592	0,008	1,369
0,509	0,072	14,151	0,642	0,008	1,309

Povprečna vsebnost ogljika za vzorec 1 (neobdelana vlažna mrva) je bila tako 42,6 % ± 0,2 %.

Povprečna vsebnost ogljika za vzorec 2 (neobdelana suha mrva) je bila tako 41,3 % ± 0,4 %.

Za določitev vsebnosti elementov C H N in S oziroma pripadajoče sestave snovi smo prav tako uporabili dva različno vlažna vzorca mrve, ki sta bila predhodno tudi drobljena na delce. Ultimativno vrednotenje vzorcev je obsegalo določitev C, H, N in S je potekala z elementnim vrednotenjem sestave vario EL cube (Elementar). Vsa vrednotenja ogljika smo opravili v več pripravah vzorca. V preglednicah so navedeni izsledki vrednotenja skupaj z odmiki (merjenja).

<u>Vzorec</u>	<u>1</u>	<u>2</u>
w_C (%)	41,3	42,6
Napaka C (%)	0,4	0,2
w_H (%)	5,81	6,14
Napaka C (%)	0,08	0,05
w_N (%)	2,3	1,25
Napaka C (%)	0,3	0,04
w_S (%)	0,32	< 0,15
Napaka S (%)	0,03	/
w_O (%)	50,3	50,1
Napaka O (%)	0,8	0,3
Ponovitve	4	4

Preglednica prikazuje elementno sestavo dveh vzorcev mrve (1 oziroma 2) v določenih utežnih deležih (%), skupaj z ocenjenimi napakami določitev. Največji utežni delež pri obeh vzorcih mrve predstavlja kisik (okoli 50 %), sledita pa ogljik (okoli 41–43 %) kot tudi vodik (okoli 5,8–6,2 %). Dušik je prisoten v nekoliko manjših deležih, žveplo pa je nizko oziroma pod mejo

zaznave naprave pri vzorcu 2. Vsi izsledki temeljijo na štirih ponovitvah vrednotenja. Vrednosti so načeloma pričakovane, saj gre za enako vrsto biomase po sušenju.

Zgorevalna toplota mrve je bila določena glede na osnovno stanje vzorca ali njegovo suho različico. Pripomba pri vzorcu 1 je, da določena zgorevalna toplota, glede na osnovno stanje surovine, ni ustrezna, ni primerljiva in je pri razlagi pridobljenih izsledkov izločena kot glede na postopek neustrezna, saj je zaradi prekomerne začetne vlažnosti prišlo do nepopolnega zgorevanja biomase. Ostale določene vrednosti so znotraj negotovosti določitve naprave, kar potrjuje dobro ponovljivost vrednotenja kljub delni neenakomernosti vzorcev. Ob tem gre tako omeniti, da so za opazke pri samem postopku zgorevanja tako bolj pomembni poskusi s kuriščem. Pri tem (v obliki, ki je izvorna, peletih ali briketih) se da tako pridobiti zaradi velikosti bolj ustrezne izsledke gorenja, kar je predstavljeno tudi v nadaljevanju oz. razlagi.

<u>Vzorec 1</u>	<u>Vzorec 1</u>	<u>Vzorec 1</u>	<u>Vzorec 1</u>	<u>Vzorec 2</u>	<u>Vzorec 2</u>	<u>Vzorec 2</u>	<u>Vzorec 2</u>
Osnovno stanje vzorca	Osnovno stanje vzorca	Suho stanje vzorca	Suho stanje vzorca	Osnovno stanje vzorca	Osnovno stanje vzorca	Suho stanje vzorca	Suho stanje vzorca
Teža vzorca mrve (g)	Zgorevalna toplota vzorca (J/g)	Teža vzorca mrve (g)	Zgorevalna toplota vzorca (J/g)	Teža vzorca mrve (g)	Zgorevalna toplota vzorca (J/g)	Teža vzorca mrve (g)	Zgorevalna toplota vzorca (J/g)
0,657	3338	0,221	17010	0,232	16281	0,207	18450
		0,241	17331	0,223	16083	0,198	18917
		0,322	17867	0,203	15817	0,172	18263
		0,434	17661	0,245	16526	0,160	18866
		0,367	17770	0,251	15722	0,181	18635

Povprečna zgorevalna vrednost osnovnega vzorca 1 (neobdelana vlažna mrva) je bila 3338 J/g, a je, kot rečeno, ne gre vzeti v zakup, ker je bilo zaradi vsebnosti vode izogrevanje slabo.

Povprečna zgorevalna vrednost suhega vzorca 1 (neobdelana vlažna mrva) je $16,1 \pm 0,4$ kJ/g.

Povp. zgorevalna vrednost osnovnega vzorca 2 (neobdelana suha mrva) je $17,5 \pm 0,5$ kJ/g.

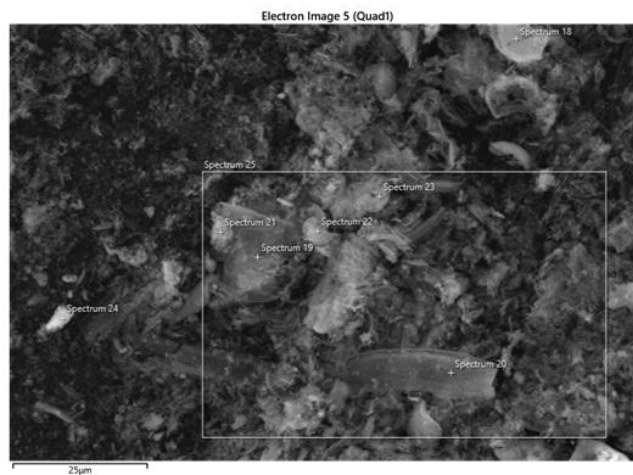
Povprečna zgorevalna vrednost sušenega vzorca 2 (neobdelana suha mrva) je $18,6 \pm 0,4$ kJ/g.

Preglednica prikazuje določene vrednosti mas, zgorevalne toplote vzorcev in razliko v stanju, pri čemer so podatki delno nepopolni (vlažen Vzorec 1). Vrednosti mas vzorcev se pojavljajo v

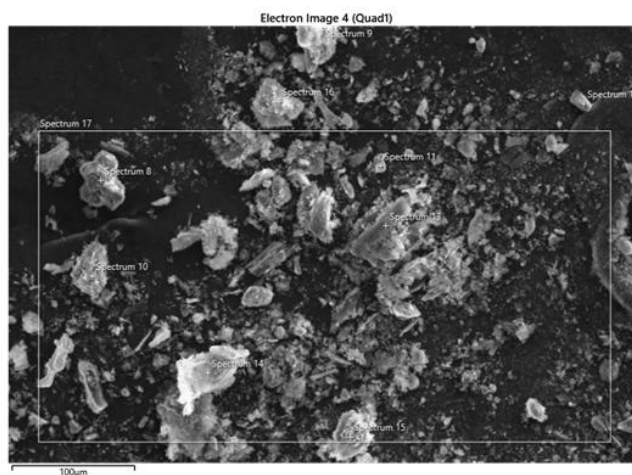
sorazmerno ozkem razponu z dokaj opaznimi razlikami med posameznimi vrednotenji. Zgorevalna toplota vzorcev kaže precej večjo razpršenost dobljenih vrednosti (c 0,4 kJ/g).

w (µg/g)	Vzorec 1	Vzorec 2
Cd	< 0,5	< 0,5
K	3300 ± 20	3130 ± 30
Na	138 ± 1	200 ± 100
Pb	< 1,67	< 1,67
Si	1230 ± 50	4100 ± 200
Zn	16 ± 1	69 ± 4

Preglednica prikazuje utežni delež (w (µg/g)) izbranih vsebovanih kovin v dveh vzorcih mrve. Za kovini Cd oziroma Pb so njune izmerjene vrednosti pod mejo zaznave vrednotenja. Kalij, natrij in silicij so prisotni v večjih vsebovanih deležih z nekoliko opaznimi razlikami med vzorcema. Vzorec 2 vsebuje bistveno več cinka, natrija in silicija kot vzorec 1. Izsledki omogočajo primerjavo snovne sestave med obema vrednotenima vzorcema oziroma mrvo.

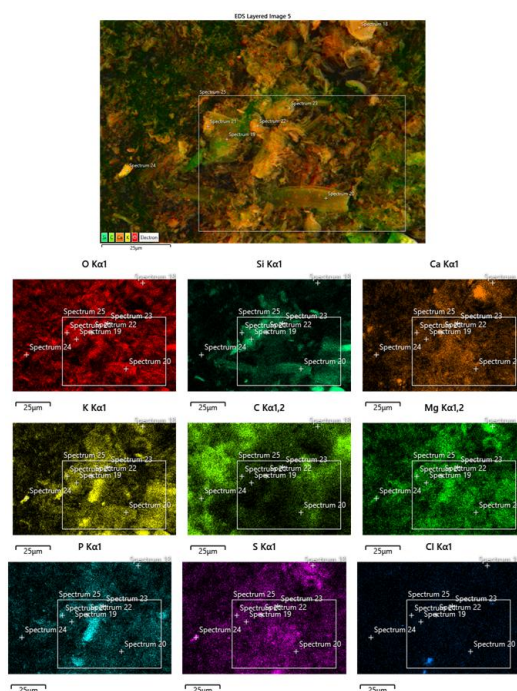


SEM slika za vzorec 1, ki je predstavljal pepel vlažne mrve (povečano na c raven 25 µm).

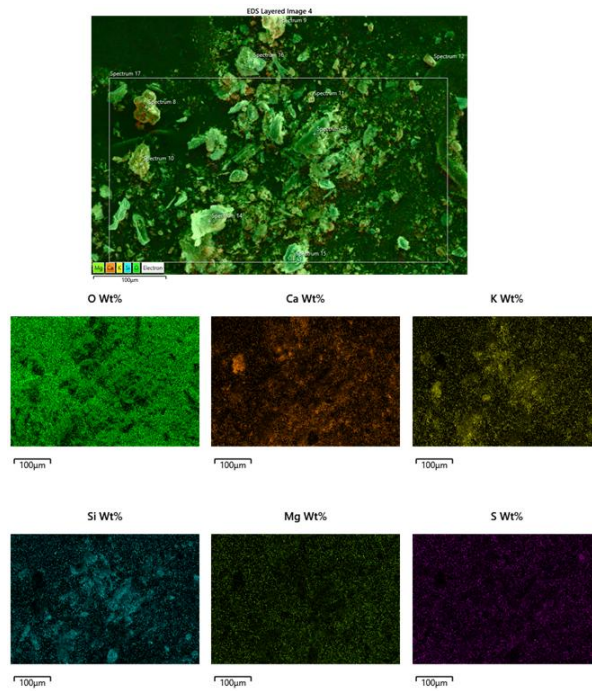


SEM slika za vzorec 2, ki je predstavljal pepel suhe mrve (povečano na c raven 100 µm).

Vzorci smo najprej ovrednotili s slikami SEM, da bi ocenili obliko delcev pepela, porazdelitev njihove velikosti in morebitne površinske značilnosti. Praški so kazali različne velikosti delcev z nepravilnimi oblikami le-teh, značilnimi za pepel mešanega izvora. Primerljive SEM slike pepela za oba vzorca mrve so prikazani na predhodnih prikazih obeh. Kakšnih drugih značilnosti ni bilo moč zaznati, kar se tiče velikosti, porazdelitve ali oblike, kar je pričakovano.



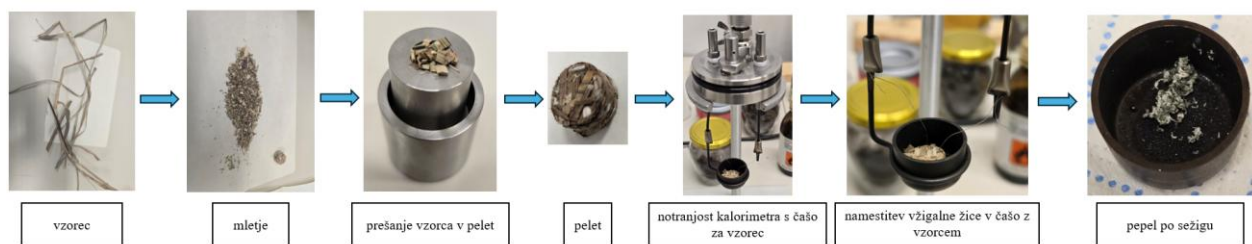
SEM–EDX slike za vzorec 1 (fosfor, kalcij, kalij, kisik, klor, magnezij, ogljik, silicij in žveplo).



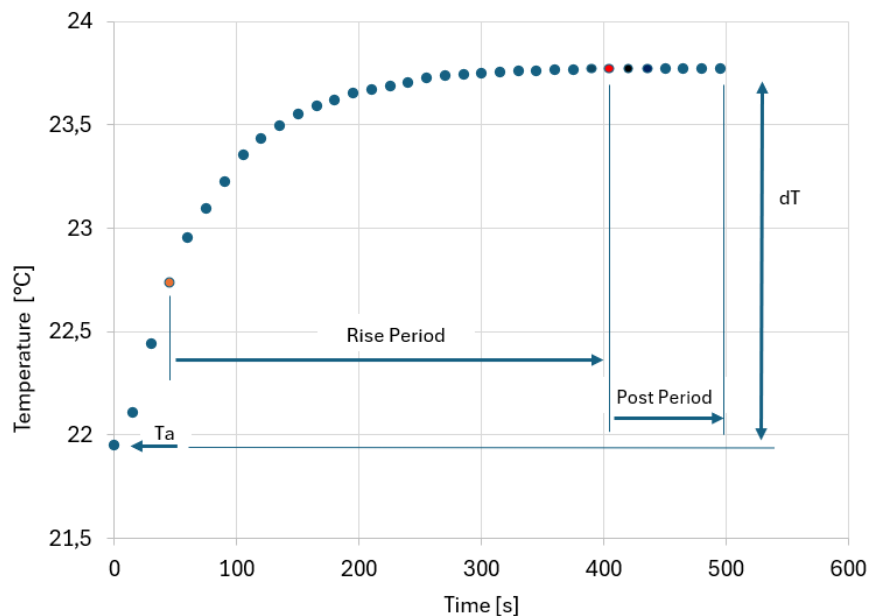
SEM–EDX slike za vzorec 2 (fosfor, kalcij, kalij, kisik, klor, magnezij, ogljik, silicij in žveplo).
 Temperatura taljenja pepela je bila tako za vzorec 1 kot 2 pri približno 1100 °C ± 20 °C.

3. 2. Evalvacija goriva za rabo v kotlih, kuriščih in kogeneracijskih enotah

Kurilna vrednost vzorcev je bila izmerjena v kalorimetru Paar 1341 oxygen bomb calorimeter. Predhodno je bilo opravljeno grobo mletje ter delna homogenizacija vzorca, ki zagotovi reprezentativnost in ustrezne fizikalne lastnosti za analizo v kalorimetru. Po mletju in homogenizaciji je bil vzorec hladno prešan na stiskalnici za pridobitev peleta premera 10mm in maso ~400mg. Pelet je nato vstavljen v čašo kalorimetra. Kalorimeter je polnjen s kisikom (tlak 10bar). Vžig vzorca se zagotovi z žarilno žico dolžine 10cm, ki je potopljena v čašo. Kurilna vrednost je določena z dvigom temperature vode v kalorimetru, stabilne vrednosti so dosežene po okvirno 8 min. Postopek priprave vzorca in izvedbe eksperimenta je prikazan na sliki spodaj, primer dviga temperature v kalorimetru, ki je vstopni podatek za izračun kurilne vrednosti pa na grafu spodaj.



Postopek merjenja kurilne vrednosti



Primer dviga temperature v kalorimetru za vzorec 1.

Podatki o kurilni vrednosti izmerjeni s kalorimetrom za prejete vzorce so podani v tabeli spodaj. Vzorec 3 (peleti) izkazuje najvišjo spodnjo kurilno vrednost, kar je pričakovano predvsem zaradi predhodnega procesa peletiranja, ki rezultira v nizki vsebnosti vode – posledica ogrevanega procesa, ki pospešuje sušenje preko zračno suhih vrednosti.. Dosežena kalorična vrednost je primerljiva z običajnimi vrednostmi lesnih peletov (tipično 16.500–18.500 kJ/kg), kar kaže, da lahko travni peleti z vidika energijske vsebnosti predstavljajo konkurenčno trdno biogorivo. Vzorec 1 (suha trava) ima nekoliko nižjo LHV kot peleti, vendar še vedno dosega vrednosti, primerljive z drugimi suhimi nizkokvalitetnimi biomasnimi gorivi. Razlika v primerjavi s peleti je lahko posledica nekoliko višje vsebnosti vlage, večjega deleža pepela ter tudi komponentne sestave, saj je pretežno prisotna predvsem celuloza, vsebnost ekstraktivov pa je nizka, kar vpliva na vsebnost energije. Vzorec 2 (mokra trava) izkazuje bistveno nižjo spodnjo kurilno vrednost, ki je posledica visoke vsebnosti vlage. Velik del razpoložljive energije se v tem primeru porabi za izhlapevanje vode med zgorevanjem, kar drastično zmanjša neto energijski izplen. Tako nizka LHV pomeni, da mokra trava v surovi obliki ni primerna za neposredno energetska rabo v klasičnih zgorevalnih sistemih brez predhodnega sušenja, predgrevanja zraka za zgorevanje ali druge predobdelave. Morebitni specializirani sistemi, npr. kondenzacijske peči, bi sicer lahko izkoriščale tudi latentno toploto vode, kar bi tudi moker vzorec postavilo ob bok ostalim dvem, vendar so kondenzacijski sistemi za uporabo biomasnih goriv, še posebej alternativnih, manj primerni. V kondenzatu se namreč raztapljajo tudi anorganske snovi, ki so v travinju prisotne v bistveno višjih koncentracijah kar lahko povzročajo obsežne izzive na področju korozije toplotnih izmenjevalnikov in dimniških sistemov.

Rezultati jasno potrjujejo, da je predobdelava goriva ključna za učinkovito energetska izrabo travniške biomase. Sušenje in/ali peletiranje bistveno povečata uporabno energijsko gostoto, izboljšata stabilnost zgorevanja ter zmanjšata logistične zahteve glede skladiščenja in transporta.

Izjemno nizka LHV mokre trave pomeni, da bi bila njena neposredna uporaba v zgorevalnih sistemih energetska neučinkovita, zahtevala bi večje dimenzioniranje kurilnih naprav ter povzročala večje emisije in obratovalne izgube. Alternativno je takšna biomasa lahko primernejša za biološke pretvorbene procese, kot je anaerobna digestija, kjer visoka vsebnost vlage ne predstavlja omejitvenega dejavnika.

Po drugi strani pa rezultati za suho travo in pelete kažejo, da lahko ob ustrezni predelavi travniška biomasa doseže kurilne vrednosti, primerljive s konvencionalnimi gorivi, kar potrjuje njen potencial kot lokalnega obnovljivega vira energije, ob upoštevanju drugih omejitev, kot so vsebnost pepela, taljenje pepela in sestava mineralnih snovi.

Kurilna vrednost vzorcev

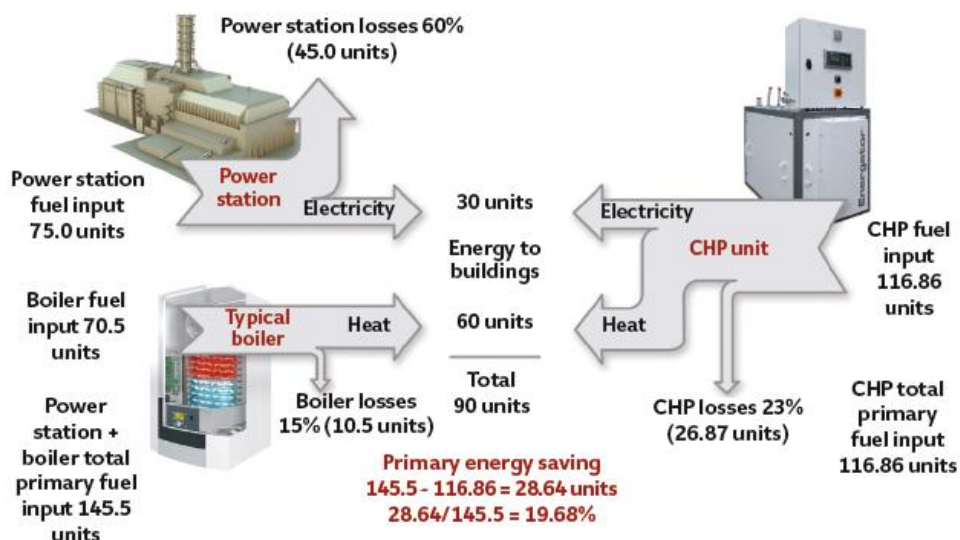
	Vzorec 1	Vzorec 2	Vzorec 3	Vzorec 4
	Suha trava	Mokra trava	Seneni peleti	Lesni peleti
LHV [kJ/kg]	14887	5631	16674	19351
StDev [kJ/kg]	278	71	652	
Masa vzorca 1 [g]	0,69	1,02	1	0,67
Masa vzorca 2 [g]	0,56	0,62	1,08	
Masa vzorca 3 [g]	0,59		1,03	
LHV 1 [kJ/kg]	15208	5681	17078	19351
LHV 2 [kJ/kg]	14730	5581	17022	
LHV 3 [kJ/kg]	14723		15921	
dT 1 [°C]	1,131	0,711	1,82	1,37
dT 2 [°C]	0,893	0,429	1,959	
dT 3 [°C]	0,94		1,757	
Ta 1 [°C]	23,697	20,097	21,953	21,189
Ta 2 [°C]	23,391	19,591	21,795	
Ta 3 [°C]	21,245		22,638	

3.3 Možnosti energetske izrabe

Osnovni princip energetske izrabe trdne biomase temelji na procesu zgorevanja, pri katerem se kemijska energija vezana v organski snovi pretvori v toploto. Ta se sprošča v obliki vročih dimnih plinov, ki predstavljajo primarni energijski tok sistema. Ne glede na izbrano tehnologijo je toplota vedno prvi produkt, ki ga je nato možno uporabiti neposredno ali pa ga vključiti v nadaljnje procese pretvorbe energije.

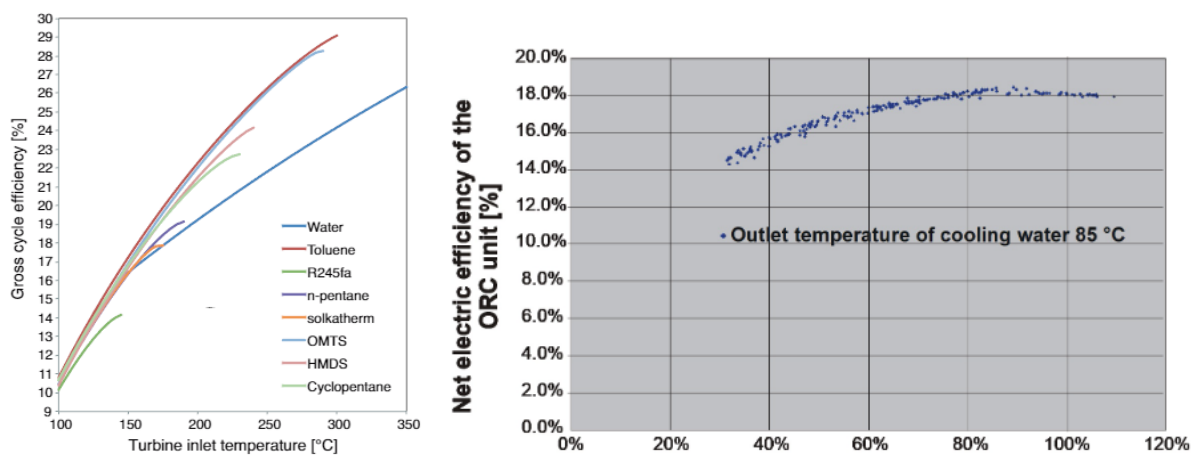
Najenostavnejša in hkrati najpogosteje uporabljena oblika energetske rabe biomase je neposredna proizvodnja toplote v kotlih. Takšni sistemi omogočajo ogrevanje stavb, pripravo sanitarne tople vode ali napajanje manjših sistemov daljinskega ogrevanja. Prednost tovrstnih rešitev je njihova relativna tehnična enostavnost, visoka zanesljivost ter ugodna investicijska in obratovalna struktura. Glede na razpoložljivo količino travne biomase in predviden odjem toplote v okviru načrtovanih objektov KPLB se ta pristop izkazuje kot najprimernejši.

Poleg neposredne rabe toplote je možno biomaso uporabiti tudi za proizvodnjo električne energije. To se običajno izvaja preko parnih procesov (Rankinov cikel), kjer toplota iz zgorevanja biomase poganja parno turbino. Vendar pa so takšni sistemi smiselni predvsem pri večjih instalacijah, saj zahtevajo višje investicije, kompleksnejše obratovanje in imajo praviloma nižji izkoristek pri manjših močeh. V primeru omejene razpoložljivosti goriva, kot je obravnavana količina travne biomase, je takšna rešitev praviloma ekonomsko manj upravičena.



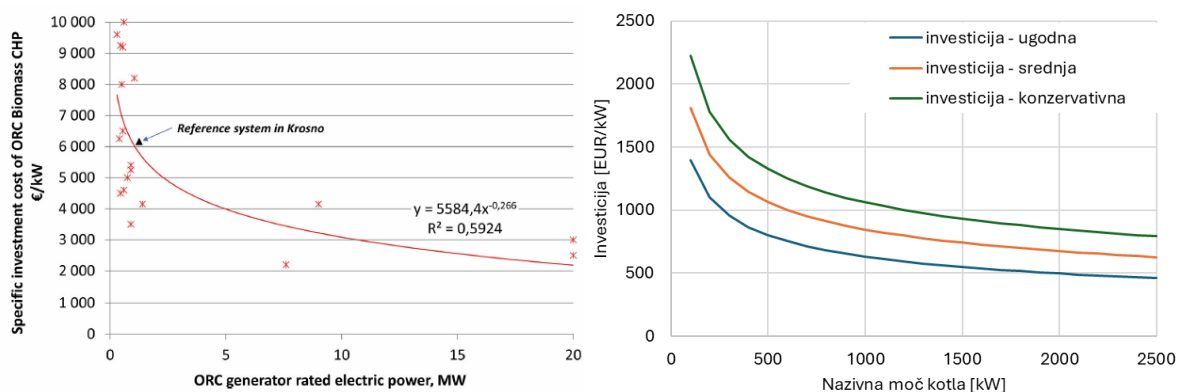
Možnosti energetske izrabe

Razširjen način uporabe predstavlja tudi sproizvodnja toplote in električne energije (CHP), ki omogoča boljši izkoristek vhodne energije. Pri tem se poleg klasičnih parnih sistemov vse pogosteje uporabljajo tudi sistemi z organskim Rankinovým ciklom (ORC), ki omogočajo obratovanje pri nižjih temperaturah in so bolj prilagodljivi glede na delne obremenitve. Zaradi nižjih obratovalnih temperatur lahko ORC sistemi delno zmanjšajo tudi tveganja, povezana z lastnostmi pepela, kar je relevantno pri uporabi travne biomase. Kljub tem prednostim pa CHP sistemi zahtevajo stabilen odjem tako toplote kot električne energije ter višje investicijske vložke, zato so primerni predvsem za večje in energetske intenzivnejše sisteme.



Izkoristki ORC sistemov

Izbira ustrezne tehnologije za energetske izrabo biomase je v praksi odvisna predvsem od razmerja med razpoložljivo količino goriva, obratovalnimi urami in možnostjo kontinuiranega odjema toplote. V obravnavanem primeru je razpoložljiva količina travne biomase omejena na približno 600 ton letno, pri čemer je predvidena raba toplote vezana na objekte skupne površine približno 3000 m². Takšne razmere jasno favorizirajo enostavne in robustne sisteme za proizvodnjo toplote, medtem ko kompleksnejše tehnologije, kot je sproizvodnja, predstavljajo manj optimalno izbiro.



Specifična investicija za ORC sisteme – levo in klasične kotle - desno

Pri tem je potrebno posebej izpostaviti specifične lastnosti travne biomase, ki vplivajo na njeno energetske rabi. V primerjavi z lesno biomaso ima travna biomasa praviloma višjo vsebnost vlage, večjo vsebnost pepela in bolj heterogeno sestavo, ki je odvisna od rastlinskih vrst in časa košnje. Zlasti pri pozni košnji na mokrotnih travnikih je lahko vsebnost vlage visoka, kar omejuje neposredno uporabo biomase v klasičnih zgorevalnih sistemih. Poleg tega mehanska oblika goriva (npr. bale) vpliva na način doziranja in stabilnost zgorevanja.

Zaradi navedenih lastnosti je pri energetske rabi travne biomase potencialno potrebno zagotoviti ustrezno pripravo goriva, ki lahko vključuje sušenje ali prilagoditev velikosti delcev. Prav tako je ključnega pomena izbira tehnologije, ki omogoča stabilno zgorevanje tudi pri gorivih z višjo vsebnostjo pepela in variabilnimi lastnostmi.

Na podlagi analize možnosti energetske izrabe je mogoče zaključiti, da je za obravnavani primer najprimernejša rešitev uporaba kotla za proizvodnjo toplote, ki omogoča enostavno integracijo v načrtovane objekte, relativno nizke investicijske stroške in robustno obratovanje. Kompleksnejše tehnologije sicer ponujajo dodatne možnosti izrabe energije, vendar v danih pogojih ne predstavljajo optimalne izbire.

3.4 Razpoložljivost sistemov (primeri)

Na trgu obstaja več tehnoloških rešitev za energetske izrabo balirane biomase (sena, slame, travinja), ki so se razvile predvsem za potrebe kmetijstva in manjših lokalnih sistemov ogrevanja. Za potrebe te analize sta bila podrobneje obravnavana dva reprezentativna

sistema, ki pokrivata različni razpon moči in stopnjo tehnološke kompleksnosti: manjši kotel z ročnim polnjenjem ter večji sistem z nadzorovanim dvostopenjskim zgorevanjem.

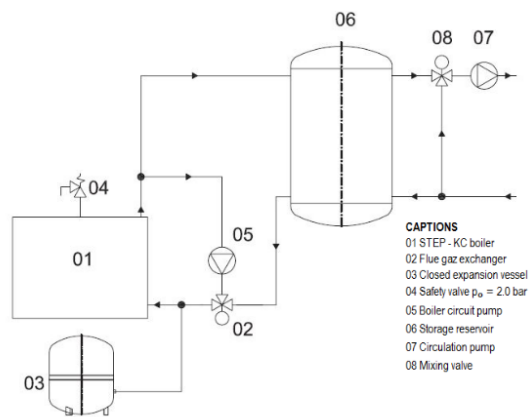
Kotel za bale z ročnim polnjenjem (STEP-KC)

Sistemi tipa STEP-KC predstavljajo osnovno in tehnološko enostavno rešitev za zgorevanje bal biomase. Gre za toplovodne kotle, namenjene neposredni proizvodnji toplote, z nazivno močjo v območju 100–190 kW. Takšni sistemi so zasnovani za zgorevanje celih okroglih ali kvadratnih bal, pri čemer se gorivo v kurišče dovaja ročno preko sprednjih vrat.

Konstruktivno je kotel sestavljen iz vodno hlajenega kurišča in izmenjevalnika dimnih plinov, pri čemer zgorevanje poteka na relativno enostaven način z osnovnim nadzorom dovoda zraka. Regulacija zgorevanja je pri manjših modelih izvedena preko mehanskega regulatorja vleka, medtem ko imajo zmogljivejši sistemi prisilni dovod zraka in osnovno temperaturno regulacijo.



STEP - KC BOILER MOUTING DIAGRAM -
CLOSED EXPANSION VESSEL



Kotel STEP-KC

Ključna značilnost teh sistemov je njihova robustnost in nizka kompleksnost, kar se odraža v relativno nizkih investicijskih stroških in enostavnem vzdrževanju. Vendar pa ima tak pristop tudi pomembne omejitve. Zgorevanje ni optimalno nadzorovano, kar lahko vodi do večjih emisij in slabšega izkoristka, poleg tega pa je obratovanje vezano na ročno delo. Polnjenje poteka v intervalih, odvisnih od velikosti bale in toplotne potrebe, kar pomeni šaržno obratovanje. Tipično šaržno obratovanje ne predstavlja izziva, saj so pri sistemih takšne

nazivne moči običajni zalogovniki toplote, ki lahko premostijo čas ko se kotel polni in ne proizvaja toplote.

Pri sistemu STEP-KC je dodatna omejitev zahteva glede kakovosti goriva. Takšni sistemi praviloma zahtevajo relativno suho biomaso (tipično do približno 15–16 % vlage), saj višja vsebnost vode negativno vpliva na stabilnost zgorevanja in izkoristek sistema. Z vidika obravnavanega projekta bi bil tak sistem primeren predvsem za manjše toplotne potrebe ali kot dopolnilni vir, medtem ko za obravnavani obseg ($\approx 500\text{--}600\text{ kW}$) predstavlja le delno ustrezno rešitev, razen, če se načrtuje vzporedna postavitvev npr. treh enot.

Kotel za bale z dvostopenjskim zgorevanjem (Ekopal RM)

Naprednejši pristop predstavlja sistem tipa Ekopal RM, ki temelji na dvostopenjskem zgorevalnem procesu (uplinjanje – zgorevanje plinov). Ti kotli so zasnovani za zgorevanje bal biomase z večjo stopnjo nadzora nad procesom in so na voljo v bistveno širšem razponu moči, približno od 300 kW do 400 kW, kar omogoča njihovo uporabo tudi v srednje velikih sistemih ogrevanja, možna pa je tudi paralelna postavitvev, kar omogoča doseganje zahtevane okvirno 600 kW termične moči. Osnovni princip delovanja temelji na ločitvi procesa zgorevanja v dve fazi. V prvi fazi poteka uplinjanje biomase pri omejenem dovodu kisika, pri čemer nastajajo gorljivi plini. Ti nato v drugi komori z dodatnim dovodom zraka popolnoma zgorijo. Tak pristop omogoča boljši nadzor nad zgorevanjem, višje izkoristke in nižje emisije, predvsem ogljikovega monoksida (CO).



Kotel Ekopal RM

Sistem je opremljen z ventilatorji za primarni in sekundarni zrak ter mikroprocesorskim krmiljenjem, ki omogoča avtomatsko prilagajanje pogojev zgorevanja glede na obratovalne parametre. Pomembna značilnost je tudi uporaba akumulacijskega rezervoarja, ki omogoča shranjevanje presežne toplote in stabilnejše obratovanje sistema. Za razliko od enostavnejših sistemov je zgorevanje v teh kotlih bistveno bolj učinkovito in stabilno, kar se odraža v boljšem izkoristku in nižjih emisijah. Poleg tega takšni sistemi omogočajo uporabo večjih bal (tipično premera 125–170 cm). Predvideno je ročno doziranje (viličar). Kljub višji tehnološki zahtevnosti ostajajo ti sistemi relativno enostavni v primerjavi z industrijskimi biomasnimi napravami. Obratovanje je še vedno šaržno, kar pomeni, da je potrebno periodično nalaganje goriva (tipično nekajkrat dnevno, odvisno od termične moči je čas zgorevanja 1-4 ure/balo). Dodatna prednost sistema je tudi možnost prigraditve sušilnice za morebitne bale z višjo vsebnostjo vode (>15%).

Oba obravnavana sistema predstavljata realne in že uveljavljene rešitve za energetske izrabo balirane biomase, vendar se razlikujeta v stopnji tehnološke razvitosti, obratovalni zahtevnosti in primernosti za različne velikosti sistemov. Enostavnejši kotli z ročnim polnjenjem so primerni za manjše sisteme, kjer je poudarek na nizkih investicijskih stroških in enostavni uporabi. Njihova uporaba v večjih sistemih je omejena zaradi slabšega nadzora zgorevanja, večjih emisij in večje odvisnosti od ročnega dela. Nasprotno pa sistemi z dvostopenjskim zgorevanjem predstavljajo tehnološko naprednejšo rešitev, ki omogoča boljši nadzor procesa, višje izkoristke in boljšo emisijsko sliko. Zaradi širšega razpona moči so bistveno bolj primerni za obravnavani primer, kjer je potrebna instalirana 567 kW.

Na podlagi analize razpoložljivih sistemov je mogoče zaključiti, da za energetske izrabo travne biomase v obravnavanem primeru najbolj ustreza sistem srednje velikosti z naprednejšim nadzorom zgorevanja, ki omogoča stabilno obratovanje, sprejemljive emisije in učinkovito izrabo razpoložljivega goriva.

Kotel za pelete – več proizvajalcev

Kotli na pelete so zelo razširjena rešitev, pretežno namenjena rabi standardiziranih lesnih peletov. Kljub temu so večje naprave (npr. večje od 100kW) zasnovane s premikajočo rešetko, ki bi v odgovoru s proizvajalcem lahko omogočala tudi rabo travnih pelet. Sistemi so

tehnološko dovršeni, z avtomatskim delovanjem, pogosto so namenjeni uporabi v stanovanjskih soseskah, kjer je ključnega pomena zanesljivost in nizka potreba po intervencijah (delujejo samostojno, z občasno prisotnostjo operaterja). Primer modularnega sistema 400-1500 kW termične moči.



Kotel na pelete/sekance HERZ BioFire

<https://www.herz-energie.at/en/products/wood-chip-pellet-boiler/herz-biofire-500-1500>

Na trgu so prisotni številni proizvajalci (Fröling, Hertz, Windhager,...), nekateri med njimi se posebej posvečajo tudi gorivom z visoko vsebnostjo pepela (t.i. Agro peleti), vendar uporabljajo zelo podobno ali enako tehnologijo (pomična rešetka s ciklonskim odstranjevanjem pepela), zato je smiselno najprej iskati individualizirano rešitev pri uveljavljenih evropski proizvajalcih.

Primer dobavitelja izven EU za uporabo peletov z visoko vsebnostjo pepela je Focus Termo (Ukrajina), ki vključuje tudi sistem za avtomatsko odvajanje pepela v skladiščne posode (https://firebox.com.ua/en/samoochistnye-pelletnye-kotly/pelletnyj-kotel-500-kvt-focus-diapazon-moshhnosti-100-550-kvt-zoloudalenie/?utm_source=chatgpt.com). Gre za robustno tehnologijo, ki uporablja tudi sisteme za čiščenje toplotnih izmenjevalcev (posebej pomembno v primeru uporabe peletov z visoko vsebnostjo pepela).



Primer sistema z avtomatskim čiščenjem pepela z vročih površin

<https://firebox.com.ua/en/samoochistnye-pelletnye-kotly/pelletnyj-kotel-700-kvt-focus-diapazon-moshhnosti-300-750-kvt-zoloudalenie-pnevmoochistka-teploobmennika/>

3.5 Izpusti v zrak

Energetska izraba travne biomase mora biti skladna z veljavno okoljsko zakonodajo, ki ureja emisije snovi v zrak iz kurilnih naprav. V slovenskem prostoru to področje ureja predvsem Uredba o emisiji snovi v zrak iz malih kurilnih naprav (<https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=URED7731>), ki določa mejne vrednosti emisij glede na tip naprave, nazivno moč in namen uporabe. V obravnavanem primeru je pomembna pravilna klasifikacija naprave. Glede na to, da sistem ni namenjen zgolj ogrevanju posamezne stavbe, temveč vključuje tudi proizvodnjo toplote za širšo rabo (npr. več objektov, potencialno tudi sušenje biomase), se takšna naprava lahko uvršča v kategorijo naprav za tehnološke procese ali naprav z nazivno močjo do 500 kW oziroma več.

Ta razvrstitev je pomembna, saj so mejne vrednosti emisij za to kategorijo nekoliko bolj ohlapne kot za klasične individualne kurilne naprave, posebej pa je izpostavljeno, da je gorivo v takšnih sistemih lahko tudi slama, ki sicer pri sistemih namenjenih izključno za ogrevanje, ni navedena kot dovoljeno gorivo. Glede na to, da se obravnavana surovina ne uvršča med slamo, je potrebna individualna obravnava surovine v posvetovanju z Agencijo za energijo RS. Za omenjen sistem so ključni predvsem naslednji emisijski parametri s pripadajočimi mejnimi vrednostmi (suhi dimni plini pri standardnih pogojih):

- PM: 60 mg/m³
- CO: 700 mg/m³
- NO_x (izraženi kot NO₂): 400 mg/m³
- SO₂: 1000 mg/m³

V primerjavi z lesno biomaso ima travna biomasa določene lastnosti, ki vplivajo na izpuste škodljivih snovi: višja vsebnost pepela, večja vsebnost dušika, prisotnost alkalijskih kovin (K, Na) in silicija (Si), heterogena sestava goriva. Posledično so emisije pri zgorevanju travne biomase praviloma višje, zlasti pri: trdnih delcih (PM), kjer pogosto prihaja do preseganja mejnih vrednosti, ogljikovem monoksidu (CO), če zgorevanje ni optimalno nadzorovano, dušikovih oksidih (NO_x), ki so lahko nekoliko višji zaradi vsebnosti dušika v gorivu.

Analiza primerov iz literature in eksperimentalnih meritev kaže, da so največja odstopanja običajno povezana prav z emisijami trdnih delcev, kar nakazuje na potrebo po dodatnih ukrepih za čiščenje dimnih plinov. Slednje ne predstavlja izziva, saj so tržno dostopni sistemi za naknadno obdelavo dimnih plinov široko razširjeni, njihovo prigraditev pa običajno opravi dobavitelj naprave, kar je mogoče upoštevati tudi z višjo nabavno ceno naprave (za potrebe ekonomike). Smiselno je tudi izbrati sistem, ki omogoča naprednejše avtomatsko krmiljenje (npr. Ekopal RM ali drugi uveljavljeni proizvajalci). Za zagotovitev skladnosti z zakonodajo je pri uporabi travne biomase smiselno predvideti naslednje ukrepe:

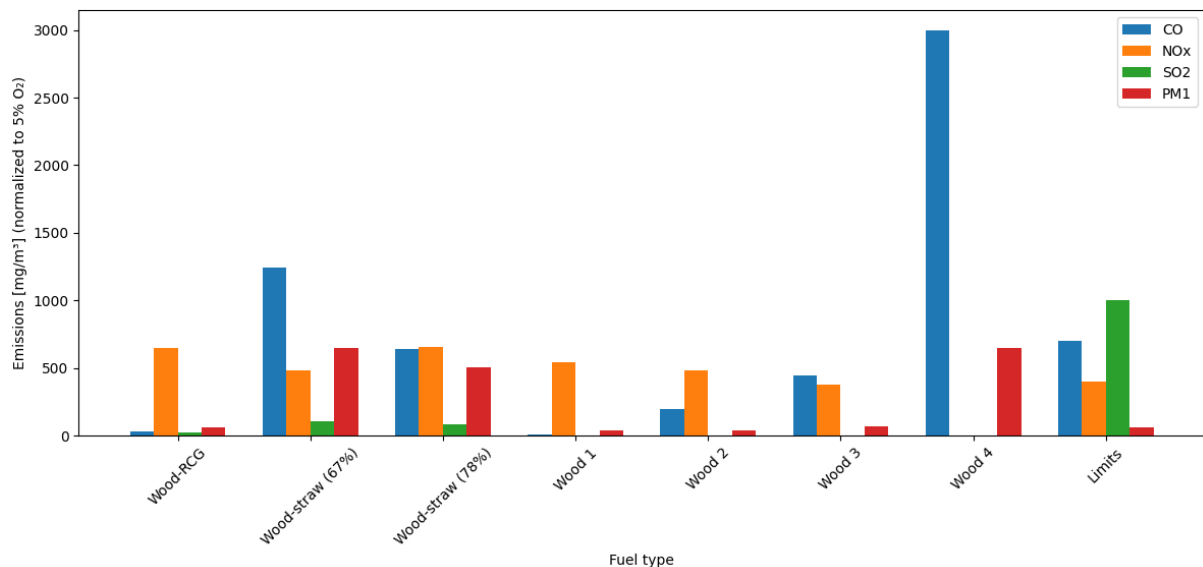
- izbira tehnologije z naprednim nadzorom zgorevanja,
- uporaba suhe in homogenizirane biomase,
- optimizacija dovoda zraka in temperature zgorevanja,
- vgradnja sistemov za zmanjševanje emisij delcev (npr. cikloni, elektrofiltri).

Z vidika zakonodaje energetska izraba travne biomase predstavlja izvedljivo rešitev, vendar zahteva skrbno izbiro tehnologije in ustrezne tehnične ukrepe za obvladovanje emisij ter individualno posvetovanje z Agencijo za energijo RS. Ključni izziv predstavljajo predvsem emisije trdnih delcev, medtem ko je ostale parametre mogoče učinkoviteje nadzorovati z ustrezno zasnovano zgorevalnega sistema.

Za dodatno primerjalno analizo je smiselno upoštevati rezultate eksperimentalnih raziskav na manjših zgorevalnih napravah, ki odražajo ustrezne tehnične značilnosti in jih je mogoče prenesti na večjo skalo. Ena izmed relevantnih študij obravnava zgorevanje sena in lignocelulozne biomase v kotlu nazivne moči 37 kW, kjer so bile analizirane emisije ključnih onesnaževal v realnih obratovalnih pogojih.

Rezultati te študije jasno kažejo, da se emisijska slika travne biomase razlikuje od lesne biomase. Za izpuste škodljivih snovi so na desni strani diagrama prikazane referenčne vrednosti iz Uredbe o emisiji snovi v zrak iz malih kurilnih naprav, primerljiva kategorija za uporabo travinja pa je »Wood-straw 78%), kjer je uporabljena zmes 22% peletov in 78% travinja (v študiji poimenovana kot »straw«). Najizrazitejše odstopanje je bilo zaznано pri emisijah trdnih delcev (PM), kjer so bile izmerjene vrednosti večkrat višje od tipičnih vrednosti

pri zgorevanju lesnih peletov. To je posledica višje vsebnosti pepela in prisotnosti mineralnih komponent, ki pri zgorevanju tvorijo fine delce in aerosolne faze. Emisije ogljikovega monoksida (CO) so bile v študiji prav tako povišane, predvsem v primerih, ko zgorevanje ni potekalo optimalno, vendar še vedno znotraj mej. To potrjuje, da je travna biomasa občutljiva na pogoje zgorevanja, zlasti na razmerje zrak–gorivo in temperaturni režim. Ob ustrezni optimizaciji procesa je sicer možno emisije CO bistveno zmanjšati, vendar to zahteva naprednejše krmiljenje sistema. Pri dušikovih oksidih (NO_x) so bile izmerjene vrednosti nekoliko višje kot pri lesni biomasi, kar je povezano z večjo vsebnostjo dušika v travni biomasi. Izpusti so tudi presegli zakonodajno mejo, vendar je surovina v študiji vsebovala višje deleže dušika, zato v primeru obravnavanega travinja pričakujemo nižje vrednosti NO_x. Emisije žveplovega dioksida (SO₂) so bile v vseh primerih nizke in niso predstavljale pomembnega vpliva, kar je skladno z nizko vsebnostjo žvepla v tovrstni biomasi.



Primerjava izpustov z vrednostmi iz uredbe

Pomembno je poudariti, da je bila analizirana naprava relativno majhna (37 kW) in tehnološko enostavnejša, kar pomeni, da rezultati predstavljajo nekoliko konservativen scenarij. V večjih in tehnološko naprednejših sistemih, zlasti tistih z dvostopenjskim zgorevanjem in boljšim nadzorom procesa, je mogoče pričakovati izboljšano emisijsko sliko, predvsem pri CO in deloma NO_x.

Kljub temu pa rezultati jasno potrjujejo, da emisije trdnih delcev ostajajo ključni izziv pri energetski rabi travne biomase. To pomeni, da je za doseganje skladnosti z zakonodajo v večini primerov potrebno predvideti dodatne sisteme za čiščenje dimnih plinov.

3.6 Preverba ekonomske učinkovitosti projekta

Za preliminarno analizo ekonomske učinkovitosti investicije v sistem za eneregtsko izrabo travinja in uporabo energije za ogrevanje stavb je uporabljen enostavni izračun dobe vračanja pri različnih vstopnih pogojih. Rezultati predstavljajo orientacijske vrednosti in ne nadomeščajo podrobne investicijske študije, ki bi predvsem natančneje določila vrednost investicije (CAPEX). Pri interpretaciji rezultatov je zato potrebna določena previdnost. Analiza temelji na osnovnih kazalnikih, kot sta enostavna doba vračanja (ROI) in izravnana cena toplote (LCOH), ki omogočata primerjavo različnih scenarijev in tehnologij.

Izhodišča

Analiza temelji na razpoložljivi količini biomase približno 600 ton na leto, kar predstavlja osnovno omejitev za dimenzioniranje sistema. Na podlagi te količine in predpostavljenega obratovanja 4000 ur letno (zimski režim, namenjen primarno ogrevanju stavb in tehnoloških objektov) je bil sistem dimenzioniran na približno 560 kW toplotne moči. Biomasa je obravnavana kot mešanica suhe (9% vsebnost vlage) in vlažne frakcije (34% vsebnost vlabe), pri čemer vlažni del biomase zahteva dodatno sušenje, da doseže 9% vsebnost vlage. Ta interna raba toplote zmanjšuje razpoložljivo toploto za prodajo in neposredno vpliva na ekonomiko sistema.

Za izračun stroška priprave surovine (goriva) so uporabljene predpostavke v spodnji tabeli. Gre za interno ceno košnje in spravila (baliranja), za katero je opravljena tudi občutljivostna analiza v nadaljevanju. Analiza je pokazala, da je ekonomika sistema zelo občutljiva na ta parameter, kar pomeni, da je stabilna in predvidljiva oskrba z gorivom ključnega pomena.

Izhodišča za izračun surovinskih tokov:

Letni pridelek	5	t/ha
Razpoložljiva površina	120	ha
Količina surovine	600000	kg/leto
Kurilna vrednost	16	MJ/kg

	4,43	kWh/kg
Masa bale	450	kg/balo
Kurilna vrednost bale	2000	kWh/balo
Interna cena	30	EUR/balo
Cena na kWh	0,015	EUR/kWh
Letna cena	40000	EUR
Letno št. bal	1333	bal

Transportni stroški so ocenjeni za traktorski prevoz (praviloma višji kot za kamionski prevoz) in tipično kapaciteto prikolice za bale. Upoštevana povprečna razdalja za prevoz je 15km.

Izhodišča za izračun transportnih stroškov:

Traktorski prevoz	1,5	EUR/km
Kapaciteta	20	bal/prikolico
Normaliziran strošek	0,075	EUR/balo/km
Razdalja	15	km

Obratovalni stroški so razdeljeni v več kategorij in so ocenjeni glede na pričakovano višino investicije ali nespecifično, glede na pričakovan obseg dela. Analiza kaže, da so obratovalni stroški relativno visoki in v veliki meri določeni s stroškom goriva ter logistike njegove priprave in transporta.

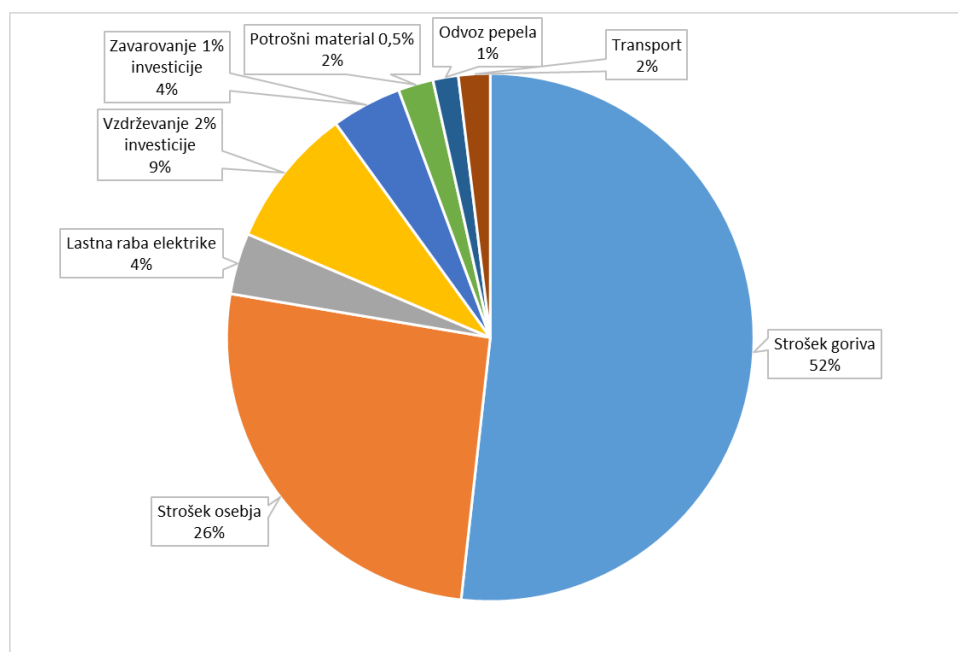
Največji delež obratovalnih stroškov predstavlja strošek biomase, ki vključuje košnjo, spravilo in osnovno pripravo bal. Ta strošek je bil v analizi ocenjen na približno 20–30 EUR na balo, kar predstavlja dominantno komponento celotnega OPEX. Zaradi razpršene narave biomase in omejene mehanizacije je ta strošek bistveno višji kot pri standardnih biomasnih gorivih (npr. lesni sekanci), vendar je z interno ceno mogoče doseči relativno nizek strošek na enoto energije. Pomembno komponento obratovalnih stroškov predstavlja tudi strošek dela. Zaradi narave sistema, ki vključuje ravnanje z balami in potencialno ročno nalaganje goriva, so zahteve po operativnem osebju večje kot pri avtomatiziranih sistemih na standardizirana goriva. Ta strošek je v analizi ocenjen na približno 20.000 EUR letno, oziroma okvirno 0,5 FTE, kar je skladno z nekoliko zahtevnejšim sistemom, ki terja ročno doziranje goriva. Vzdrževanje sistema je bilo ocenjeno na približno 2 % investicijske vrednosti letno, kar je skladno s tipičnimi vrednostmi za tovrstne energetske sisteme. Dodatno je bil upoštevan tudi strošek zavarovanja (1 % investicije) ter potrošnega materiala (0,5 % investicije), kar skupaj predstavlja stabilen,

vendar ne zanemarljiv del OPEX. Posebnost obravnavanega sistema je tudi strošek ravnanja s pepelom, ki vključuje njegovo odstranjevanje in odvoz. Ta strošek je bil ocenjen na osnovi enotne cene na tono in predstavlja manjši, vendar obvezen del obratovalnih stroškov. Dodatno so vključeni še lastna raba električne energije (ocenjena kot 8 kWh/MWh generirane toplote), ter negativen strošek prihranka toplote (toplota, ki se ne odkupuje pri zunanjem dobavitelju) v obsegu 10.000 EUR, ob predpostavki cene toplote pridobljene z zemeljskim plinom 0,067 EUR/kWh in ogrevanju 3000 m² mešanih prostorov ob letni porabi 50 kWh/m²/leto.

Na ta način lahko stroške ocenimo kot:

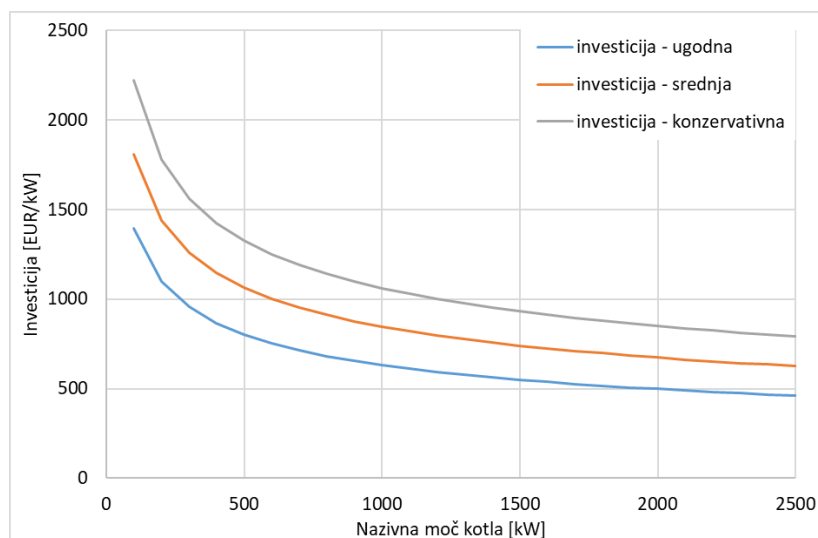
- 67.268 EUR v primeru upoštevanega prihranka zunanje nabave toplote
- 77.268 EUR v primeru neupoštevanja prihranka zunanje nabave toplote (čisti stroški, brez prihrankov).

V čistih stroških, brez upoštevanega prihranka največji delež zavzame strošek goriva (interna cena priprave surovine) ter strošek osebja. Sledi vzdrževanje, zavarovanje in lastna raba električne energije – ti segmenti stroškov že nakazujejo kje je možna optimizacija ekonomike.



Ocenjeni stroški obratovanja za bale (OPEX)

Za oceno investicije je bila uporabljena ocena 1.021 EUR/kW inštalirane moči, kar za obravnavani sistem pomeni skupno investicijo v višini približno 680.642 EUR. Ta vrednost vključuje kotel, osnovno infrastrukturo, skladiščne kapacitete in manipulativne površine ter morebiten enostavni sistem za naknadno obdelavo dimnih plinov (zgolj filtriranje). Za oceno investicije je v izračunu mogoča drsna prilagoditev stroška glede na nelinearno povečevanje investicije z velikostjo sistema. Odvisnost investicije od inštalirane moči je prikazana na spodnji sliki za tri scenarije, kjer v trenutnih izračunih uporabljamo srednjo vrednost.



Specifična investicija EUR/kW inštalirane moči

Iz strukture stroškov je razvidno, da projekt ni izrazito kapitalsko intenziven, temveč je v večji meri odvisen od obratovalnih stroškov. To pomeni, da dolgoročna uspešnost sistema temelji predvsem na učinkoviti organizaciji dobave biomase, optimizaciji logistike in zmanjševanju operativnih stroškov.

Ocena razpoložljive toplote

Sistem v izračunu je trenutno dimenzioniran na razpoložljivo surovino. Energijske bilance so v tem primeru sledeče:

Vhodna moč goriva	666,7	kW
Izkoristek kotla	0,85	
Moč kotla	566,7	kW
Toplota	2.266.666,7	kWh

Na strani rabe toplote je potrebno oceniti kolikšna velikost sistem zadošča za ogrevanje idejno zasnovanih površin – 3000 m² stavb z specifično letno rabo energije 50 kWh/m²/leto.

Pri oceni smiselne velikosti sistema za oskrbo stavb s toploto je mogoče uporabiti dva osnovna pristopa:

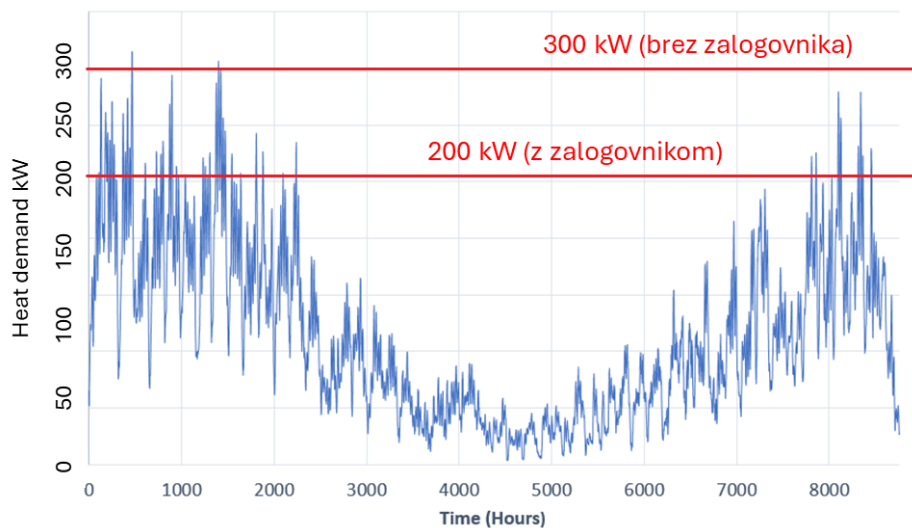
- dimenzioniranje na podlagi vršne toplotne moči in
- dimenzioniranje na podlagi kumulativne letne rabe toplote.

Oba pristopa sta koristna, vendar opisujeta različna vidika delovanja sistema in ju je zato potrebno ustrezno interpretirati.

Prvi pristop temelji na vršni toplotni moči objekta. Ta predstavlja največji trenutni odjem toplote, ki se pojavi v najbolj neugodnih zimskih razmerah, ko so zunanje temperature najnižje, toplotne izgube stavbe pa največje. V obravnavanem primeru je bila uporabljena predpostavka specifične vršne potrebe približno 100 W/m², kar za objekt površine 3000 m² pomeni največji odjem 300 kW. Tak pristop je pomemben predvsem z vidika tehnične zanesljivosti sistema, saj zagotavlja, da je instalirana moč dovolj velika za pokrivanje koničnih obremenitev brez potrebe po dodatnem vršnem viru – torej v scenariju 100% samooskrbe. Če se sistem dimenzionira izključno na osnovi vršne moči, je mogoče oceniti, kolikšno ogrevano površino je mogoče neposredno in zanesljivo oskrbovati v vseh obratovalnih režimih. Trenutno v tem kontekstu ni upoštevan hranilnik toplote, ki bi zahtevano vršno moč predvidoma znižal za okvirno 30% (200 kW).

Drugi pristop temelji na kumulativni letni rabi toplote, izraženi v kWh/leto. Pri tem se izhaja iz letne specifične potrebe po toploti, ki je bila v obravnavanem primeru ocenjena na približno 50 kWh/m²a, skupno 150.000 kWh/leto. Ta pristop omogoča oceno, kolikšno skupno površino bi bilo mogoče oskrbovati z razpoložljivo letno količino proizvedene toplote, ne glede na to, ali sistem zmore samostojno pokrivati vršne obremenitve. Če se uporabi ta metoda, so ocenjene možne ogrevane površine bistveno večje, saj letna energijska bilanca upošteva dejstvo, da se največje toplotne potrebe pojavljajo le v omejenem delu leta, medtem ko je večino časa dejanski odjem bistveno nižji od vršne moči.

Razlika med obema pristopoma je torej v tem, da dimenzioniranje na vršno moč podaja realno tehnično zmogljivost sistema za neposredno oskrbo objektov, medtem ko dimenzioniranje na podlagi kumulativne toplote podaja teoretični letni energijski potencial sistema. Prvi pristop je primernejši za določanje potrebne nazivne moči kotla in pomožnih sistemov, drugi pa za oceno skupnega energijskega učinka sistema in potenciala oddaje toplote večjemu številu objektov, če so vršne potrebe pokrite z dodatnimi viri ali akumulacijo.



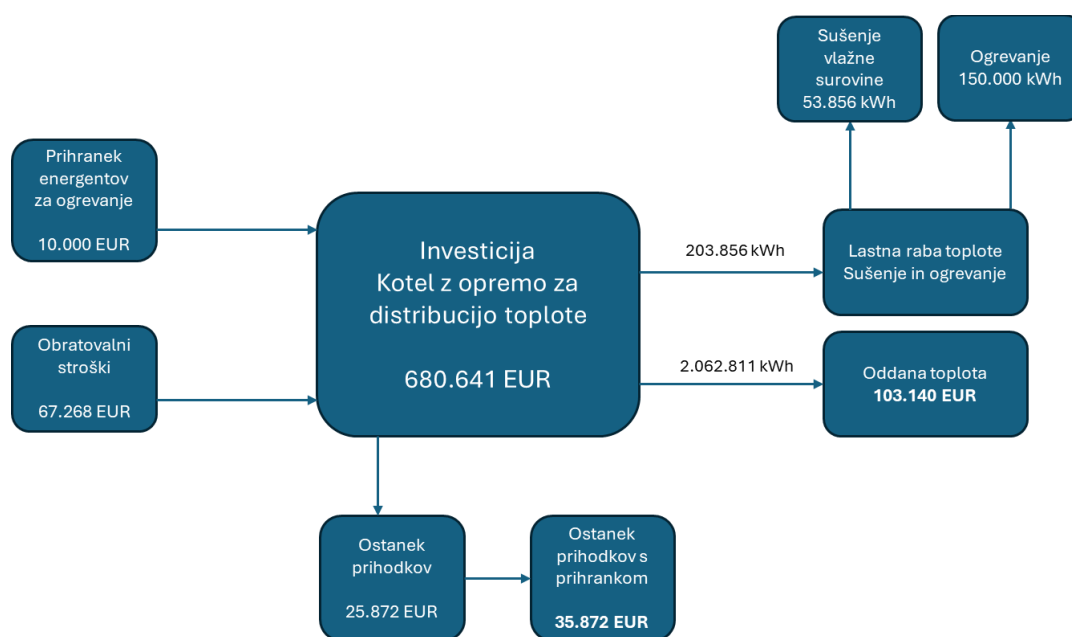
Predviden diagram odjema toplote

V obravnavanem primeru to pomeni, da je iz tehničnega vidika za zanesljivo samooskrbno ogrevanje smiselno izhajati iz dimenzioniranja na vršno moč, medtem ko dimenzioniranje na osnovi letne količine toplote služi predvsem kot pokazatelj, da sistem razpolaga z bistveno večjim energijskim potencialom, kot ga zahteva zgolj neposredna oskrba osnovnih objektov. V obravnavanem primeru sistem z 567 kW moči ustreza kriteriju vršne moči in bi teoretično lahko ogreval vsaj dvakratnik trenutne idejne površine (6.000 – 8.000 m²), v kolikor je ocenjen tudi vpliv zalogovnika (brez zalogovnika je možna površina za ogrevanje 5.667 m²) zato je ta pogoj izpolnjen. Pomembna predpostavka za preliminarni preračun ekonomike pa je, da je vsa preostala toplota, ki se ne porablja za ogrevanje v vsakem trenutku uspešno oddana zunanjim odjemalcem. V praksi to pomeni mikro daljinsko ogrevanje ali priklop na osnovne veje mestnega sistema daljinskega ogrevanja, ali dobava toplote zunanjim odjemalcem po kakršnemkoli drugem modelu. To hkrati potrjuje, da je za ekonomsko učinkovito delovanje sistema pomembno zagotoviti tudi dodatni odjem toplote oziroma smiselno rabo presežkov.

En. učinkovitost stavb	50	kWh/m ² /leto
Idejna površina	3.000	m ²
Raba toplote za stavbe	150.000	kWh/leto
Možna površina (brez vršne moči)	45.333	m ²
Zahtevana vršna moč (100 W/m²)	300	kW
Možna površina (z vršno močjo)	5.667	m ²

Enostavna doba vračanja

Na podlagi izhodišč, ocenjenih stroškov in razpoložljive toplote je mogoče izračunati enostavno dobo vračanja investicije v sistem. Na shemi modela je predstavljen preliminarni denarni tok, izračunan na podlagi zgornjih predpostavk. Dodatno je upoštevano tudi dodatno sušenje 1/3 surovine, ki se kosi v poznih mesecih in zato dosega do 34% vsebnost vlage. Ta interna raba toplote predstavlja okvirno tretjino koristne toplote za ogrevanje idejnih površin (3000 m²).



Model z denarnim tokom

V izhodiščnem stanju, ki predpostavlja 600 t/leto surovine, kjer ima 1/3 (200 t/leto) vlažnost 34%, preostanek pa 9%, interni strošek priprave surovine 30 EUR/balo, znaša enostavna doba vračanja (ROI) 19,0 let. Ker je pričakovan velik vpliv stroška priprave surovine in tudi velikosti sistema (ki je neposredno povezan z razpoložljivo surovino) je bila opravljena analiza občutljivosti glede na strošek priprave surovine ter njeno letno količino.

Rezultati so predstavljeni v obliki tabele in pripadajočega površinskega diagrama, ki omogoča vizualno interpretacijo vpliva obeh parametrov na dobo vračanja.

		Strošek bale [EUR]										
		18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Letna količina surovine [kg]	400000	18,0	19,2	20,6	22,1	24,0	26,1	28,7				
	420000	17,3	18,4	19,6	21,0	22,7	24,7	27,0	29,8			
	440000	16,6	17,6	18,8	20,1	21,6	23,4	25,5	28,1			
	460000	16,0	16,9	18,0	19,3	20,7	22,4	24,3	26,6	29,5		
	480000	15,4	16,3	17,4	18,5	19,9	21,4	23,3	25,4	28,0		
	500000	14,9	15,8	16,8	17,9	19,2	20,6	22,3	24,3	26,7	29,7	
	520000	14,5	15,3	16,3	17,3	18,5	19,9	21,5	23,4	25,6	28,3	
	540000	14,1	14,9	15,8	16,8	17,9	19,3	20,8	22,5	24,6	27,2	
	560000	13,8	14,5	15,4	16,3	17,4	18,7	20,1	21,8	23,8	26,2	29,1
	580000	13,4	14,2	15,0	15,9	17,0	18,1	19,5	21,1	23,0	25,2	28,0
	600000	13,1	13,8	14,6	15,5	16,5	17,7	19,0	20,5	22,3	24,4	27,0
	620000	12,8	13,5	14,3	15,2	16,1	17,2	18,5	19,9	21,6	23,7	26,1
	640000	12,6	13,2	14,0	14,8	15,8	16,8	18,0	19,4	21,1	23,0	25,3
	660000	12,3	13,0	13,7	14,5	15,4	16,4	17,6	19,0	20,5	22,4	24,6
	680000	12,1	12,7	13,4	14,2	15,1	16,1	17,2	18,5	20,0	21,8	24,0
	700000	11,9	12,5	13,2	14,0	14,8	15,8	16,9	18,1	19,6	21,3	23,3
	720000	11,7	12,3	13,0	13,7	14,5	15,5	16,5	17,7	19,2	20,8	22,8
	740000	11,5	12,1	12,7	13,5	14,3	15,2	16,2	17,4	18,8	20,4	22,3
	760000	11,3	11,9	12,5	13,2	14,0	14,9	15,9	17,1	18,4	20,0	21,8
	780000	11,2	11,7	12,3	13,0	13,8	14,7	15,6	16,8	18,1	19,6	21,3
800000	11,0	11,6	12,2	12,8	13,6	14,4	15,4	16,5	17,7	19,2	20,9	
820000	10,9	11,4	12,0	12,6	13,4	14,2	15,1	16,2	17,4	18,9	20,5	
840000	10,7	11,2	11,8	12,5	13,2	14,0	14,9	15,9	17,1	18,5	20,2	
860000	10,6	11,1	11,7	12,3	13,0	13,8	14,7	15,7	16,9	18,2	19,8	
880000	10,4	11,0	11,5	12,1	12,8	13,6	14,5	15,5	16,6	17,9	19,5	
900000	10,3	10,8	11,4	12,0	12,7	13,4	14,3	15,3	16,4	17,7	19,2	
920000	10,2	10,7	11,2	11,8	12,5	13,2	14,1	15,0	16,1	17,4	18,9	
940000	10,1	10,6	11,1	11,7	12,3	13,1	13,9	14,8	15,9	17,2	18,6	
960000	10,0	10,5	11,0	11,6	12,2	12,9	13,7	14,7	15,7	16,9	18,4	
980000	9,9	10,3	10,9	11,4	12,1	12,8	13,6	14,5	15,5	16,7	18,1	
1000000	9,8	10,2	10,7	11,3	11,9	12,6	13,4	14,3	15,3	16,5	17,9	

Dobe vračanja (v letih) v odvisnosti od stroška surovine (bale) in letne količine surovine

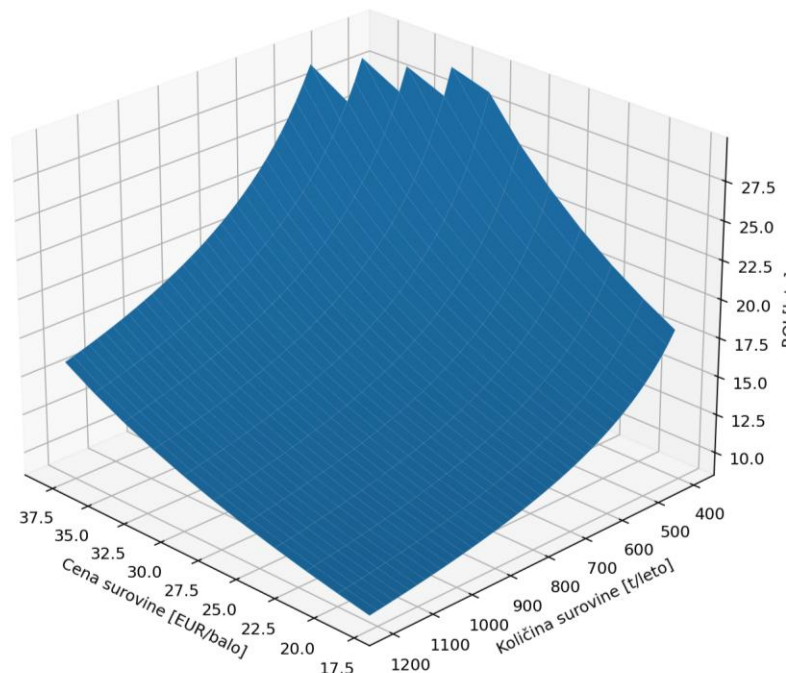
Rezultati analize jasno kažejo, da je doba vračanja investicije izrazito občutljiva na oba analizirana parametra, pri čemer ima najmočnejši vpliv razpoložljiva količina biomase. Z naraščanjem količine biomase se ROI sistematično zmanjšuje, kar je neposredna posledica izrazitega zmanjševanja specifične investicije (večji kot je sistem za energetske rabo, nižja je investicija v smislu EUR/kW inštalirane moči), medtem ko se večja letna proizvodnja toplote in s tem višji prihodki linearno povečujejo. Ta trend potrjuje, da je visoka izkoriščenost sistema in tudi velikost sistema ključni pogoj za ekonomsko upravičenost investicije.

Pri nizkih količinah surovine se sistem torej sooča z bistveno slabšo ekonomiko, saj fiksni stroški investicije in obratovanja ostajajo relativno visoki, medtem ko prihodki zaradi omejene proizvodnje toplote ne zadoščajo za hitro vračilo investicije. V takšnih primerih doba vračanja presega sprejemljive meje, kar pomeni, da projekt brez dodatnih ukrepov ni ekonomsko upravičen.

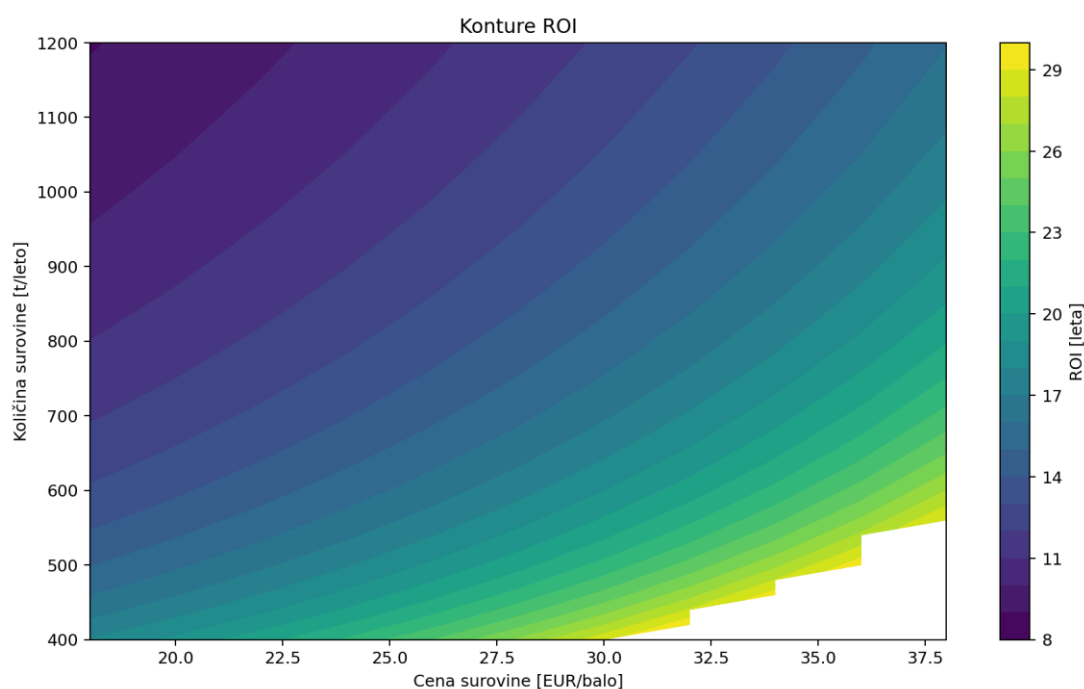
Drugi pomemben parameter je cena biomase. Analiza kaže, da se ROI z naraščanjem stroška bale povečuje, pri čemer je vpliv posebej izrazit v območju nižjih količin biomase. V praksi to pomeni, da je sistem dvojno občutljiv: tako na količino razpoložljive surovine kot tudi na njeno ceno. Interval stroška biomase približno 20–25 EUR/balo predstavlja območje, kjer projekt dosega še sprejemljive ekonomske rezultate.

Sprejemljive dobe vračanja so pri takšnih sistemih običajno med 12-15 let, kar je sicer mogoče doseči z zniževanje investicije iz naslova nepovratnih sredstev ali drugih zunanjih virov, najenostavnejši pristop pa se v tem trenutku izkazuje kot zagotovitev dodatnih količin travinja (npr. dodatnih 200 ton/leto) ter optimizacija stroškov priprave surovine do npr. 26 EUR/balo, kar bi privedlo do enostavne dobe vračanja 13,6 let.

Pomembna ugotovitev analize je tudi interakcija med obema parametroma. Pri večjih količinah biomase se vpliv cene delno omili, saj večji obseg proizvodnje omogoča boljše razporeditev fiksnih stroškov. Nasprotno pa pri manjših količinah biomase že manjše spremembe cene goriva povzročijo izrazite spremembe ROI, kar kaže na večjo ranljivost manjših sistemov v takšnih pogojih, kar je razvidno tudi iz nelinearne odvisnosti na spodnjih dveh diagramih.



Dobe vračanja (v letih) v odvisnosti od stroška surovine in letne količine surovine



Dobe vračanja (v letih) v odvisnosti od stroška surovine in letne količine surovine

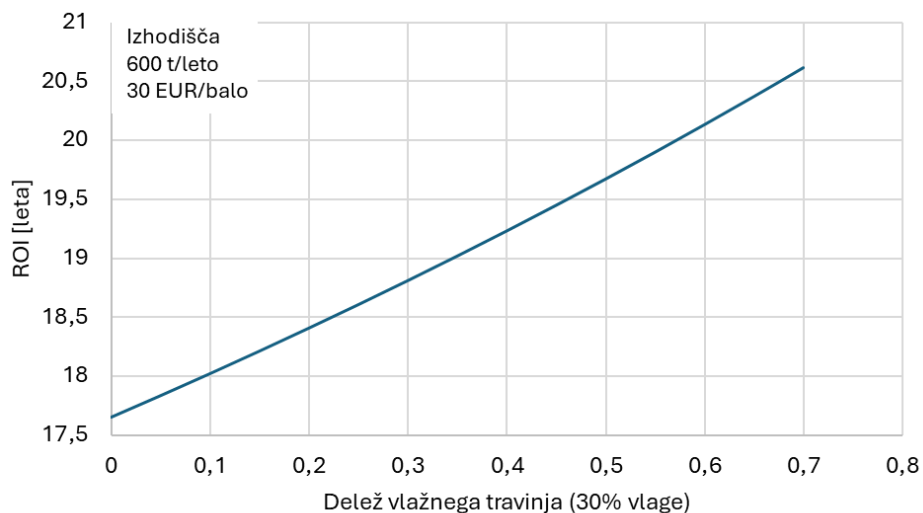
Rezultati analize imajo neposredne implikacije za nadaljnje načrtovanje sistema. V prvi vrsti potrjujejo, da je zagotovitev stabilne in zadostne količine biomase ključni pogoj za ekonomsko uspešnost projekta. Brez tega tudi ugodna investicijska struktura ne more zagotoviti sprejemljive dobe vračanja. Prav tako analiza poudarja pomen nadzora nad stroški surovine. Ker ta predstavlja največji delež obratovalnih stroškov, je optimizacija dobavne verige, organizacije košnje in logistike ključnega pomena za izboljšanje ekonomike sistema. Dodatno rezultati potrjujejo, da je vključitev lastne rabe toplote eden izmed najpomembnejših dejavnikov za izboljšanje finančnega rezultata, saj neposredno povečuje učinkovitost izrabe proizvedene energije. Na podlagi analize dobe vračanja je mogoče zaključiti, da projekt energetske izrabe travne biomase preliminarno dosega ekonomsko sprejemljive rezultate predvsem v pogojih:

- zadostne razpoložljivosti biomase,
- nadzorovanih stroškov goriva,
- visoke stopnje izkoriščenosti sistema.

Za natančnejšo oceno dobe vračanja je potrebno pridobiti ponudbe uveljavljenih dobaviteljev sistemov za izrabo alternativnih virov biomase in nato izračun optimirati predvsem s CAPEX vrednostjo in obratovalnimi stroški, ki jih dobavitelji običajno podajo v zelo natančnih intervalih.

Vpliv deleža sušene surovine

Izhodiščno stanje za analizo predpostavlja 600 t/leto surovine, kjer ima 1/3 (200 t/leto) vlažnost 34%, preostanek pa 9%. Ker energija za sušenje predstavlja pomemben delež porabljene toplote je bila opravljena tudi analiza občutljivosti glede na delež vlažne surovine. Vpliv na ROI je prikazan v spodnjem diagramu.



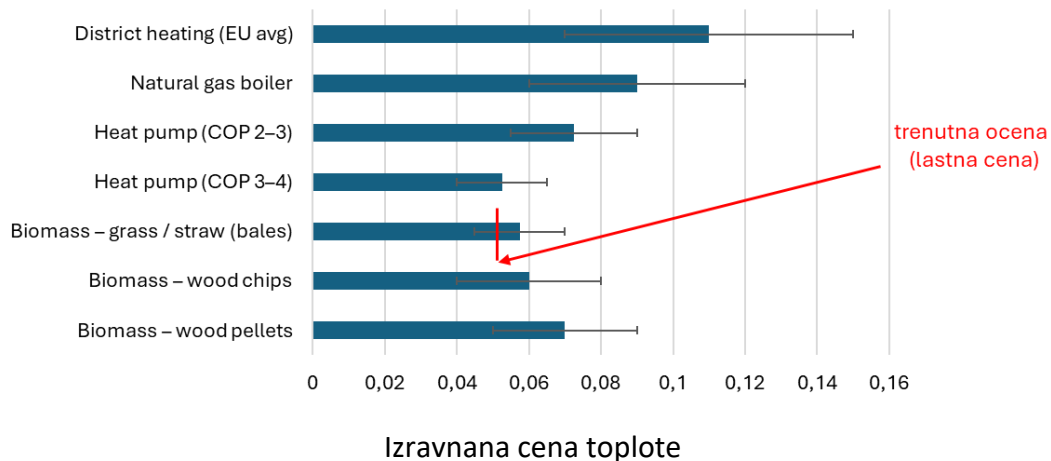
Vpliv deleža vlažnega travinja na dobo vračanja

Upoštevana poraba energije je 0,18 kWh/kg vode, rezultati pa nakazujejo, da je vpliv sicer pomemben, vendar neizrazit v primerjavi z velikostjo sistema in stroškom priprave surovine.

Izravnana cena toplote

Za dopolnitev ekonomske analize je bil izveden izračun izravnane cene toplote (LCOH), ki predstavlja povprečni strošek proizvodnje toplote skozi celotno življenjsko dobo sistema. LCOH vključuje investicijske in obratovalne stroške ter omogoča neposredno primerjavo

različnih tehnologij na enotni osnovi. V obravnavanem primeru LCOH predstavlja interno proizvodno ceno toplote, kar pomeni, da ne vključuje dodatnih stroškov, kot so omrežnine, davki, regulativne dajatve ali marže. Zaradi tega je potrebno rezultate interpretirati kot strošek na ravni proizvajalca, ne kot končno ceno za uporabnika.



Iz rezultatov izhaja, da se ocenjeni LCOH za energetska izrabo travne biomase giblje v območju približno 0,045–0,065 EUR/kWh, kar je primerljivo z drugimi tehnologijami na proizvodnje toplote. V tem okviru travna biomasa dosega podobne vrednosti kot sistemi na lesno biomaso in v določenih primerih tudi nižje vrednosti kot alternativni energenti. Pri tem je pomembno poudariti, da je LCOH za biomasne sisteme in travinje podan kot interna cena, medtem ko LCOH za toplotno črpalko, plin in daljinsko ogrevanje predstavlja LCOH z vsemi dajatvami, torej strošek za končnega uporabnika. Kljub temu je mogoče oceniti dodatne dajatve tudi za biomasne sisteme. Ti vključujejo predvsem:

- omrežnine,
- davke,
- regulativne prispevke,
- morebitne stroške distribucije toplote.

Če se upošteva dodatno povečanje stroška toplote za približno 0,015 EUR/kWh, kar predstavlja realistično oceno teh dodatnih komponent, se LCOH iz travne biomase poveča na približno 0,06–0,08 EUR/kWh.

Tudi ob upoštevanju teh dodatnih stroškov sistem ostaja konkurenčen v primerjavi z drugimi tehnologijami, To potrjuje, da ima projekt robustno ekonomsko osnovo tudi ob bolj konservativni interpretaciji stroškov. Pomembno je tudi, da sistem ni neposredno odvisen od volatilnosti cen električne energije ali fosilnih goriv, kar predstavlja dodatno prednost z vidika dolgoročne stabilnosti stroškov.

Pri tem pa je potrebno poudariti, da LCOH ne zajema vseh vidikov projekta, zlasti ne investicijskega tveganja, operativne kompleksnosti in okoljskih zahtev. Zato ga je smiselno uporabljati kot dopolnilni kazalnik, ki skupaj z ROI in drugimi parametri omogoča celovito oceno projekta.

3.7 Vpliv predhodne obdelave surovine na ekonomiko

V nadaljevanju je obravnavana tudi možnost energetske izrabe travne biomase v alternativnih oblikah goriva, in sicer kot peleti in briketi. Namen je vzpostaviti primerjalni okvir med tremi osnovnimi scenariji – kurjenje bal, kurjenje peletov in kurjenje briketov – ter opredeliti ključne razlike v fizikalnih lastnostih goriva, tehnoloških zahtevah in stroškovni strukturi. Tak pristop omogoča neposredno nadgradnjo obstoječega ekonomskega modela in izračun kazalnikov (ROI, LCOH) za vse tri oblike goriva na enotni osnovi.

Osnovna razlika med obravnavanimi gorivi izhaja iz stopnje predelave biomase. Medtem ko bale predstavljajo minimalno obdelano surovino, so peleti in briketi produkt dodatne mehanske obdelave (mletje in stiskanje), kar vpliva tako na fizikalne lastnosti kot tudi na celotno dobavno verigo. Ena ključnih razlik med obravnavanimi oblikami goriva je nasipna gostota, ki bistveno vpliva na skladiščenje, transport in način doziranja goriva. Pri balah je nasipna gostota nizka (tipično v območju 80–150 kg/m³), kar pomeni, da je za shranjevanje določene količine energije potreben velik volumen skladišča. Posledično so večji tudi logistični tokovi, saj je za transport enake količine energije potrebnih več voženj.

Pri peletih je nasipna gostota bistveno višja (približno 600–700 kg/m³), kar omogoča bolj kompaktno skladiščenje in učinkovitejši transport. Briketi predstavljajo vmesno rešitev, z nasipno gostoto približno 400–600 kg/m³. Višja gostota pomeni tudi bolj enakomerno in

predvidljivo doziranje goriva v kotel. Ocena vpliva na transport je sicer dvoplastna – briketiranje in/ali peletiranje se lahko izvaja na lokaciji naprave za energetske rabo, ali pa dislocirano. V prvem primeru je ugoden vpliv peletiranja in briketiranja na transport izničen, v drugem primeru pa je skrit v ceni priprave surovine.

Pomemben vidik je tudi način manipulacije z gorivom. Bale zahtevajo ročno doziranje, medtem ko peleti omogočajo popolnoma avtomatizirano doziranje s pomočjo vijačnih transporterjev in silosov. Briketi so glede tega med obema skrajnostma, saj omogočajo delno avtomatizacijo, niso pa briketi uveljavljena oblika goriva za širšo, avtomatizirano rabo, gre za nišno rešitev, ki je primarno namenjena npr. sistemom na lesno biomaso, kjer se briketu uporabljajo kot nadomestek polen – torej omogočajo energetske rabo razsutih materialov v kuriščih za trdna lesna goriva. V tehničnem smislu so peleti najboljša rešitev, saj obstajajo uveljavljeni sistemi za avtomatsko doziranje, so tudi najenostavnejši za transport (sipki material).

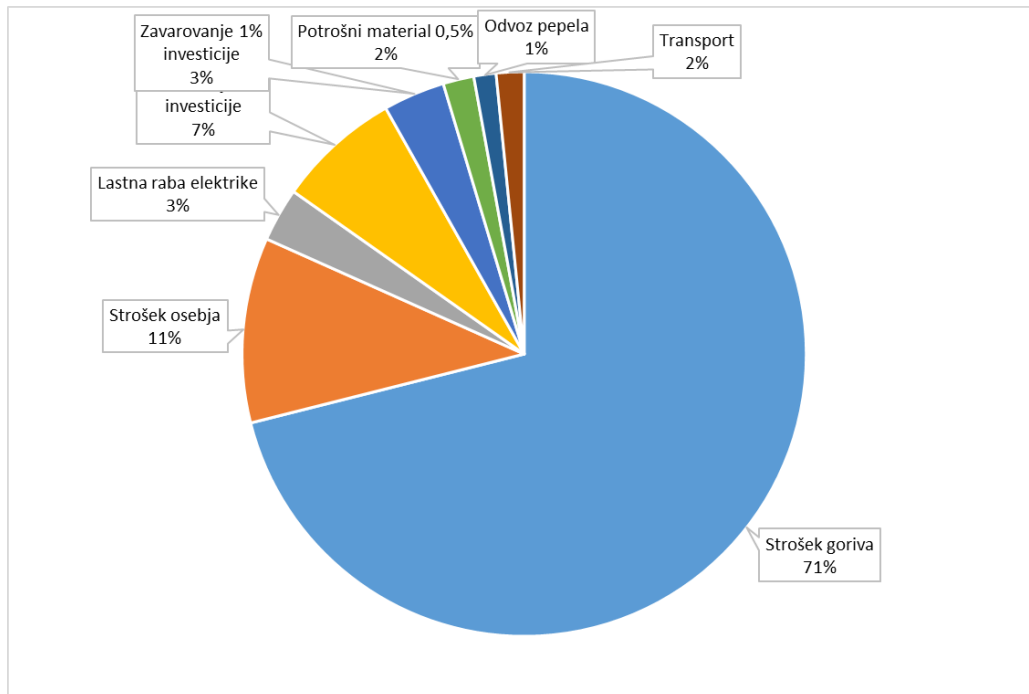
Peletiranje

Vpliv na obratovalne stroške

Uporaba pelet najpomembneje vpliva na strukturo obratovalnih stroškov. Pri sistemih na bale pomemben delež predstavljajo stroški dela, saj je ravnanje z balami praviloma ročno in zahteva stalno prisotnost operaterja. Dodatno se pojavi tudi strošek sušenja biomase, ki zmanjšuje neto izkoristek sistema, ki je bil upoštevan v predhodni analizi. Pri peletih se zaradi avtomatizacije doziranja stroški dela zmanjšajo, prav tako odpade potreba po sušenju na lokaciji. Poleg tega višja nasipna gostota omogoča učinkovitejši transport, kar lahko zmanjša transportne stroške na enoto energije, vendar je to v analiziranem primeru izničeno, saj temelji na predpostavki, da se ustrezno poveča strošek surovine, ki vključuje tudi strošek peletiranja (to je lahko interni strošek, ali strošek zunanjega izvajalca).

Posledično se sistem premakne iz modela z nižjimi vhodnimi stroški goriva in višjimi operativnimi zahtevami (bale) v model z višjimi stroški goriva, vendar nižjo operativno kompleksnostjo (peleti). Strošek peletiranja travne biomase je bil za potrebe analize ocenjen

na 45 EUR/t, kar ob upoštevanju kurilne vrednosti (4,44 kWh/kg) ustreza 0,01 EUR/kWh. Ta strošek predstavlja dodatno obremenitev vhodne surovine, vendar hkrati omogoča odpravo določenih obratovalnih stroškov, kot so sušenje biomase in del stroškov dela, ter izboljšuje logistično učinkovitost sistema.

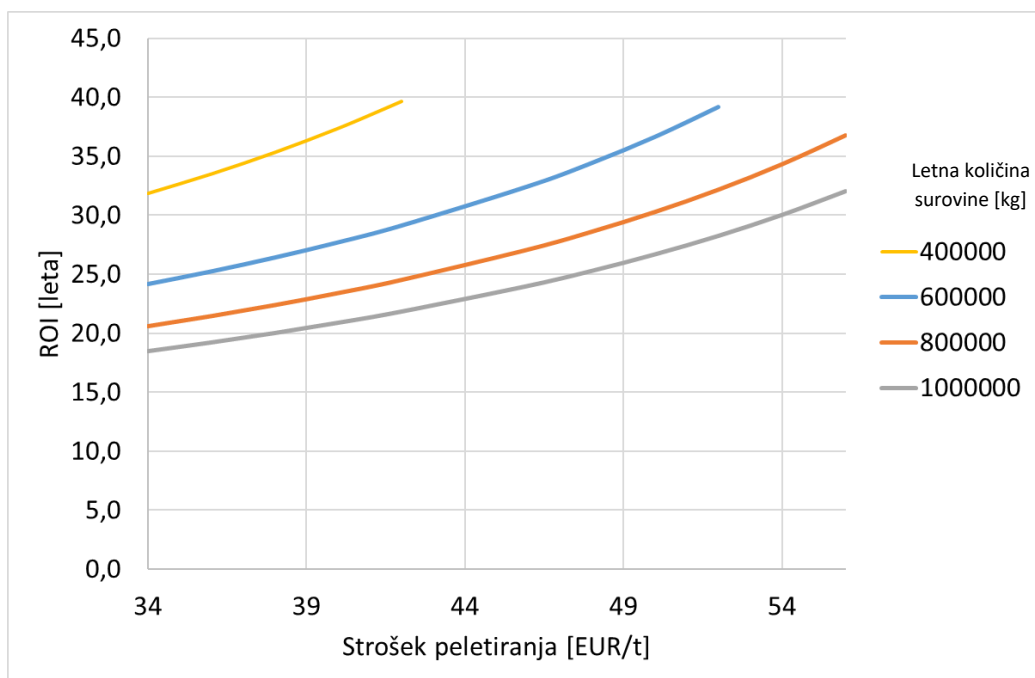


Struktura obratovalnih stroškov z upoštevanim peletiranjem v strošku goriva in zmanjšanim stroškom osebja

Enostavna doba vračanja

Z upoštevanim prihrankom na energentih, ki jih nadomešča toplota iz kotla na pelete je enostavna doba vračanja v primeru peletiranja bistveno višja kot pri uporabi bal. V izhodiščnem strošku (45 EUR/t) peletiranja je enostavna doba vračanja 31,56 let, namesto 19 let kot je v primeru uporabe bal neposredno. Ostala izhodišča za izračun sicer ostajajo nespremenjena – upoštevana je srednja investicijska zahtevnost za napravo, saj se sestava goriva ne spremeni bistveno, prav tako je potencialno potrebno odstranjevanje trdnih delcev iz dimnih plinov, dodatno pa sistemi z avtomatskim doziranjem peletov predstavljajo naprednejšo rešitev, kjer strošek dozirnega sistema in upravljalnega sistema nadomesti strošek morebitnega sušilnega sistema, ki je bil upoštevan v predhodnem primeru. Zato se spremembe v investiciji v veliki meri kompenzirajo. Kljub temu je na sliki spodaj prikazana tudi

občutljivost enostavne dobe vračanja na višino investicije, v kolikor so pridobljene konkretne ponudbe dobaviteljev.



Enostavna doba vračanja v primeru uporabe pelet z upoštevanim stroškom peletiranja.

Strošek peletiranja [EUR/t]

Letna količina surovine [kg]	Strošek peletiranja [EUR/t]										
	34	36	38	40	42	46	48	50	52	54	56
400000	31,9	33,5	35,3	37,4	39,7	42,8	46,2	49,9	53,9	58,2	62,8
420000	30,7	32,2	33,9	35,9	38,0	41,1	44,5	48,2	52,1	56,2	60,6
440000	29,6	31,1	32,7	34,5	36,5	39,5	42,9	46,5	50,3	54,3	58,6
460000	28,7	30,1	31,6	33,3	35,2	38,8	42,7	46,4	50,2	54,1	58,3
480000	27,9	29,2	30,7	32,3	34,1	38,4	42,3	46,0	49,8	53,6	57,6
500000	27,1	28,4	29,8	31,3	33,1	37,1	40,6	44,3	48,1	51,8	55,7
520000	26,4	27,6	29,0	30,5	32,1	36,0	39,3	43,0	46,7	50,4	54,3
540000	25,8	27,0	28,3	29,7	31,3	35,0	38,2	41,8	45,5	49,2	53,0
560000	25,2	26,3	27,6	29,0	30,5	34,1	37,2	40,7	44,3	47,9	51,6
580000	24,7	25,8	27,0	28,3	29,8	33,2	36,5	39,9	43,4	46,9	50,5
600000	24,2	25,2	26,4	27,7	29,1	32,5	35,7	39,1	42,5	45,9	49,4
620000	23,7	24,7	25,9	27,1	28,5	31,7	34,7	38,1	41,4	44,8	48,2
640000	23,3	24,3	25,4	26,6	28,0	31,1	34,2	37,5	40,8	44,1	47,5
660000	22,9	23,9	24,9	26,1	27,4	30,5	33,3	36,5	39,7	42,9	46,1
680000	22,5	23,5	24,5	25,7	26,9	29,9	32,6	35,8	38,9	42,0	45,2
700000	22,1	23,1	24,1	25,2	26,5	29,4	31,9	35,0	38,1	41,1	44,3
720000	21,8	22,7	23,7	24,8	26,0	28,9	31,5	34,4	37,4	40,4	43,5
740000	21,5	22,4	23,4	24,4	25,6	28,4	30,9	33,8	36,7	39,6	42,6
760000	21,2	22,1	23,0	24,1	25,2	27,9	29,5	31,3	33,2	35,5	38,1
780000	20,9	21,8	22,7	23,7	24,9	27,5	29,0	30,8	32,7	34,9	37,4
800000	20,6	21,5	22,4	23,4	24,5	27,1	28,6	30,3	32,2	34,3	36,8
820000	20,3	21,2	22,1	23,1	24,2	26,7	28,2	29,8	31,7	33,8	36,2
840000	20,1	20,9	21,8	22,8	23,9	26,4	27,8	29,4	31,2	33,3	35,6
860000	19,9	20,7	21,6	22,5	23,6	26,0	27,4	29,0	30,8	32,8	35,1
880000	19,6	20,4	21,3	22,3	23,3	25,7	27,1	28,6	30,4	32,3	34,6
900000	19,4	20,2	21,1	22,0	23,0	25,4	26,7	28,3	30,0	31,9	34,1
920000	19,2	20,0	20,8	21,8	22,8	25,1	26,4	27,9	29,6	31,5	33,6
940000	19,0	19,8	20,6	21,5	22,5	24,8	26,1	27,6	29,2	31,1	33,2
960000	18,8	19,6	20,4	21,3	22,3	24,5	25,8	27,3	28,9	30,7	32,8
980000	18,6	19,4	20,2	21,1	22,0	24,3	25,5	27,0	28,6	30,4	32,4
1000000	18,5	19,2	20,0	20,9	21,8	24,0	25,3	26,7	28,2	30,0	32,0
1020000	18,3	19,0	19,8	20,7	21,6	23,8	25,0	26,4	27,9	29,7	31,7
1040000	18,1	18,8	19,6	20,5	21,4	23,5	24,8	26,1	27,6	29,4	31,3
1060000	18,0	18,7	19,4	20,3	21,2	23,3	24,5	25,9	27,4	29,1	31,0
1080000	17,8	18,5	19,3	20,1	21,0	23,1	24,3	25,6	27,1	28,8	30,6
1100000	17,7	18,4	19,1	19,9	20,8	22,9	24,1	25,4	26,8	28,5	30,3
1120000	17,5	18,2	18,9	19,8	20,6	22,7	23,8	25,1	26,6	28,2	30,0
1140000	17,4	18,1	18,8	19,6	20,5	22,5	23,6	24,9	26,3	27,9	29,7
1160000	17,2	17,9	18,6	19,4	20,3	22,3	23,4	24,7	26,1	27,7	29,5
1180000	17,1	17,8	18,5	19,3	20,1	22,1	23,2	24,5	25,9	27,4	29,2
1200000	17,0	17,6	18,4	19,1	20,0	21,9	23,0	24,3	25,7	27,2	28,9

Enostavna doba vračanja v odvisnosti od letne količine surovine in stroška peletiranja

Sistemi na pelete so sicer prevladujoča tehnologija v majhnih kurilnih napravah namenjenim individualni rabi, kjer je manipulacija surovine in njena homogenost izjemnega pomena. V industrijskih sistemih se tipično uporablja surovina v manj stroškovno zahtevnih oblikah, saj je glede na velik delež obratovalnih stroškov smiselno sistem optimirati, da so obratovalni stroški čim nižji (razmerje med obratovalnimi in investicijskimi stroški je običajno višje, zato se največji prihranki lahko pridobijo na obratovalnih stroških). S tega stališča je peletiranje v velikih sistemih dokaj neobičajno, razen če gre za izjemno zahtevno surovino.

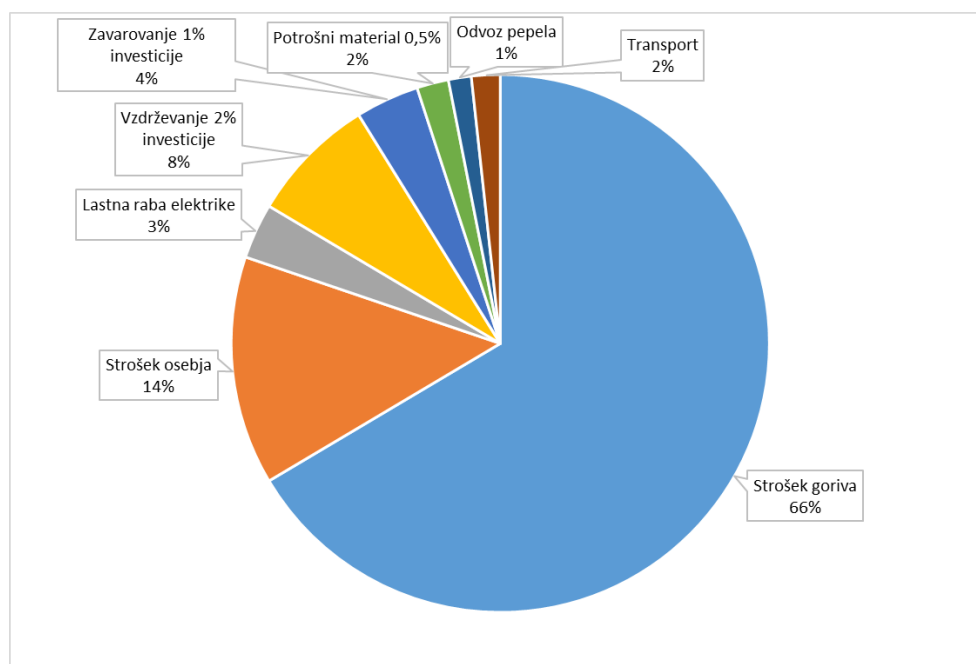
Briketiranje

Briketiranje predstavlja vmesno rešitev med balami in peleti, tako z vidika tehnologije kot tudi stroškov. Hkrati pa briketi omogočajo določeno stopnjo izboljšanja logistike in manipulacije v

primerjavi z balami. Vendar pa briketi ne dosegajo enake stopnje avtomatizacije kot peleti, kar pomeni, da se stroški dela ne zmanjšajo v enaki meri. Iz tega sledi, da briketiranje predstavlja kompromisno rešitev: izboljšuje operativne vidike sistema v primerjavi z balami, vendar ne prinaša vseh prednosti peletov, hkrati pa ohranja del njihovih slabosti. Ekonomika takšnega sistema je zato pričakovano boljša kot pri peletih, vendar še vedno slabša kot pri neposredni uporabi bal, zlasti v primerih, kjer je surovina cenovno ugodna.

Vpliv na obratovalne stroške

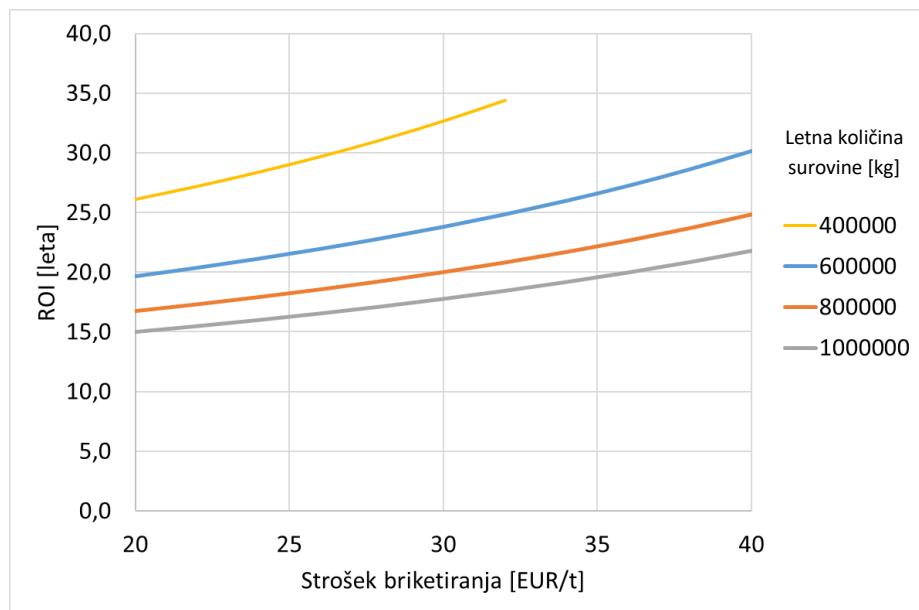
Strošek briketiranja travne biomase je bil ocenjen na približno 25–35 EUR/t, kar ustreza približno 0,006–0,008 EUR/kWh glede na kurilno vrednost biomase. V primerjavi s peletiranjem predstavlja briketiranje nekoliko cenejši postopek, saj zahteva manj intenzivno obdelavo materiala. Posledično je povečanje stroška goriva nižje, vendar je zaradi večjih dimenzij goriva in nekoliko nižje homogenosti potrebno upoštevati tudi omejitve pri avtomatizaciji in doziranju, kar predstavlja višji strošek osebja, ki pa je še vedno nižji kot pri uporabi balirane surovine, saj so sistemi za doziranja briketov pol-avtomatski ali avtomatski.



Struktura obratovalnih stroškov v primeru uporabe briketirane surovine.

Enostavna doba vračanja

Enostavna doba vračanja je v primeru briketirane surovine in ob upoštevanju 600t letne količine travinja, ter predpostavljeni ceni briketiranja 30 EUR/t, 23,8 let. Vrednost je sicer nižja kot pri peletirani surovini, vendar še vedno presega smiselno konzervativno vrednost 15 let. Ker je briketiranje fiksen strošek v ceni goriva, je tudi nadaljnja optimizacija primera težavna, saj se morebitni prihranki pri košnji in spravilu travinja proporcionalno zmanjšajo, zato je nižanje dobe vračanja zahtevnejše kot v primeru uporabe bal.



Enostavna doba vračanja za različne količine surovine in različne cene briketiranja

Na dobo vračanja je tako mogoče vplivati predvsem z velikostjo sistema oziroma količino razpoložljive surovine – pri količini 1000 t/leto se v primeru stroška briketiranja 20 EUR/t, doba vračanja zniža na 15 let, kar predstavlja sprejemljivo dobo, vendar so v tem primeru upoštevane izrazito optimistične vrednosti briketiranja.

Širša občutljivost je prikazana na spodnji sliki, kjer je razvidna visoka občutljivost dobe vračanja na razpoložljivo količino surovine. Ob dvakratnem povečanju surovine, iz 600 na 1200 t/leto je mogoče dobo vračanja znižati za dvakrat.

Strošek briketiranja [EUR/t]

Letna količina surovine [kg]	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
400000	25,1	27,2	28,4	29,7	31,1	32,7	34,4	36,3	38,5	38,9	39,4
420000	25,1	26,1	27,2	28,5	29,8	31,3	32,9	34,6	36,6	38,9	39,4
440000	24,2	25,2	26,3	27,4	28,7	30,0	31,5	33,2	35,0	37,1	39,4
460000	23,5	24,4	25,4	26,5	27,6	28,9	30,4	31,9	33,7	35,6	37,8
480000	22,8	23,6	24,6	25,6	26,7	28,0	29,3	30,8	32,4	34,2	36,3
500000	22,1	23,0	23,9	24,9	25,9	27,1	28,4	29,8	31,3	33,1	35,0
520000	21,6	22,4	23,2	24,2	25,2	26,3	27,5	28,9	30,4	32,0	33,8
540000	21,0	21,8	22,7	23,6	24,5	25,6	26,8	28,1	29,5	31,0	32,8
560000	20,5	21,3	22,1	23,0	23,9	25,0	26,1	27,3	28,7	30,2	31,8
580000	20,1	20,8	21,6	22,5	23,4	24,4	25,5	26,6	27,9	29,4	31,0
600000	19,7	20,4	21,2	22,0	22,9	23,8	24,9	26,0	27,3	28,6	30,2
620000	19,3	20,0	20,7	21,5	22,4	23,3	24,3	25,4	26,6	28,0	29,4
640000	19,0	19,6	20,3	21,1	21,9	22,9	23,8	24,9	26,1	27,4	28,8
660000	18,6	19,3	20,0	20,7	21,5	22,4	23,4	24,4	25,5	26,8	28,2
680000	18,3	18,9	19,6	20,4	21,1	22,0	22,9	23,9	25,0	26,2	27,6
700000	18,0	18,6	19,3	20,0	20,8	21,6	22,5	23,5	24,6	25,8	27,0
720000	17,7	18,3	19,0	19,7	20,4	21,3	22,1	23,1	24,1	25,3	26,5
740000	17,5	18,1	18,7	19,4	20,1	20,9	21,8	22,7	23,7	24,8	26,1
760000	17,2	17,8	18,4	19,1	19,8	20,6	21,4	22,4	23,3	24,4	25,6
780000	17,0	17,6	18,2	18,8	19,5	20,3	21,1	22,0	23,0	24,0	25,2
800000	16,8	17,3	17,9	18,6	19,3	20,0	20,8	21,7	22,6	23,7	24,8
820000	16,5	17,1	17,7	18,3	19,0	19,7	20,5	21,4	22,3	23,3	24,5
840000	16,3	16,9	17,5	18,1	18,8	19,5	20,3	21,1	22,0	23,0	24,1
860000	16,1	16,7	17,3	17,9	18,5	19,2	20,0	20,8	21,7	22,7	23,8
880000	16,0	16,5	17,0	17,7	18,3	19,0	19,7	20,6	21,4	22,4	23,4
900000	15,8	16,3	16,9	17,4	18,1	18,8	19,5	20,3	21,2	22,1	23,1
920000	15,6	16,1	16,7	17,3	17,9	18,6	19,3	20,1	20,9	21,8	22,9
940000	15,4	16,0	16,5	17,1	17,7	18,3	19,1	19,8	20,7	21,6	22,6
960000	15,3	15,8	16,3	16,9	17,5	18,1	18,8	19,6	20,4	21,3	22,3
980000	15,1	15,6	16,2	16,7	17,3	18,0	18,6	19,4	20,2	21,1	22,1
1000000	15,0	15,5	16,0	16,5	17,1	17,8	18,5	19,2	20,0	20,9	21,8
1020000	14,9	15,3	15,8	16,4	17,0	17,6	18,3	19,0	19,8	20,6	21,6
1040000	14,7	15,2	15,7	16,2	16,8	17,4	18,1	18,8	19,6	20,4	21,4
1060000	14,6	15,1	15,5	16,1	16,6	17,3	17,9	18,6	19,4	20,2	21,1
1080000	14,5	14,9	15,4	15,9	16,5	17,1	17,8	18,5	19,2	20,0	20,9
1100000	14,3	14,8	15,3	15,8	16,4	17,0	17,6	18,3	19,0	19,8	20,7
1120000	14,2	14,7	15,1	15,7	16,2	16,8	17,4	18,1	18,9	19,7	20,5
1140000	14,1	14,5	15,0	15,5	16,1	16,7	17,3	18,0	18,7	19,5	20,4
1160000	14,0	14,4	14,9	15,4	15,9	16,5	17,1	17,8	18,5	19,3	20,2
1180000	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,4	17,0	17,7	18,4	19,2	20,0
1200000	13,8	14,2	14,7	15,2	15,7	16,3	16,9	17,5	18,2	19,0	19,8

Enostavna doba vračanja v odvisnosti od letne količine surovine in stroška briketiranja

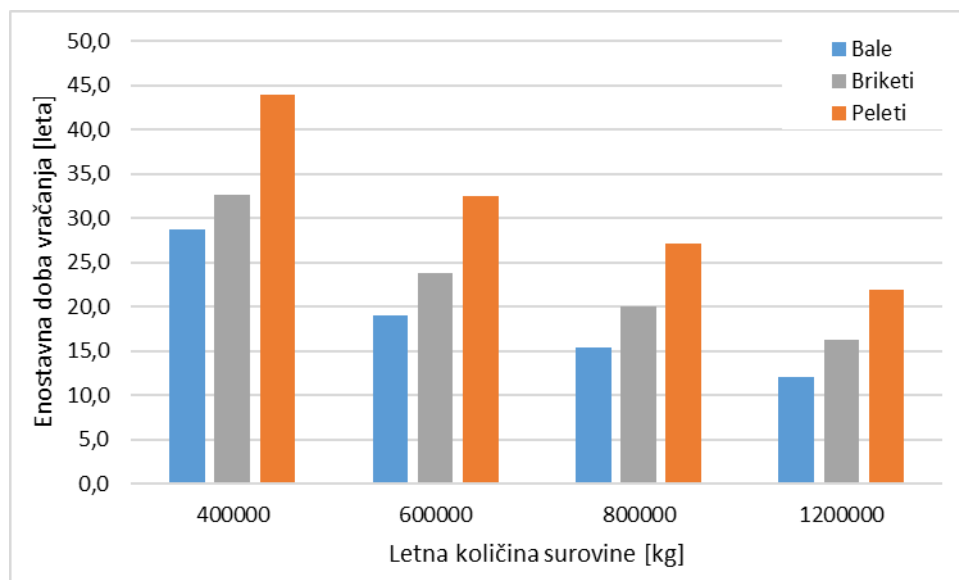
Primerjava vpliva pred-obdelave surovine na ekonomiko

Na podlagi izvedene analize je mogoče oblikovati primerjalno oceno treh scenarijev rabe travne biomase. Vsaka oblika goriva predstavlja drugačno kombinacijo investicijskih zahtev, obratovalnih stroškov in tehnološke zahtevnosti, kar se neposredno odraža v ekonomskih kazalnikih sistema.

Pri uporabi balirane biomase sistem temelji na nizkih vhodnih stroških goriva, vendar zahteva večjo operativno vključenost, večje skladiščne kapacitete in dodatno energijo za sušenje. Kljub

tem omejitvam se takšen pristop izkaže kot ekonomsko najugodnejši, saj dodatni stroški obdelave niso prisotni. Gre za najugodnejši scenarij, kar je skladno s širše prepoznanimi dejstvi, da so za rentabilnost in kratko dobo vračanja pomembni predvsem nizki obratovalni stroški, ki pa glede na svojo strukturo nujno zahtevajo najnižjo možno ceno goriva. Gre za smernice, ki so tipične za industrijske sisteme za pridobivanje energije.

Peletiranje sicer omogoča visoko stopnjo avtomatizacije in boljšo logistiko, vendar se ti učinki ne odražajo v izboljšani ekonomiki, saj dodatni strošek priprave goriva bistveno poveča obratovalne stroške sistema. Posledično je doba vračanja investicije daljša. Briketiranje predstavlja vmesno rešitev, ki delno izboljša logistiko in zmanjša operativno zahtevnost, vendar ne dosega vseh prednosti peletov. Ekonomika takšnega sistema je zato pričakovano med obema skrajnostma.



Enostavna doba vračanja za različne oblike predobdelave in razpoložljivo letno količino

Neposredna raba bal je z vidika stroškov goriva torej najugodnejša rešitev, obenem pa peleti omogočajo najbolj avtomatizirano in trajno delovanje. Briketi predstavljajo kompromis med stroškovno učinkovitostjo in operativno enostavnostjo, hkrati pa niso zelo razširjeni za rabo na večjih skalah. Razlike v investicijskih stroških med sistemi niso ključne; odločilni vpliv imajo obratovalni stroški.

Na podlagi teh ugotovitev je mogoče zaključiti, da je za obravnavani primer neposredna raba balirane biomase najbolj smiselna rešitev z vidika ekonomike, medtem ko so peleti in briketi primernejši v primerih, kjer so ključni dejavniki avtomatizacija, logistika ali standardizacija goriva, vendar je s temi dvema oblikami predobdelave doseganje nizkih (<15 let) dob vračanja mogoče le ob izdatnem povečanju letnih količin surovine ter zasledovanju najnižjih stroškov obdelave (peletiranja in briketiranja).

Tehnični vidik predobdelave

Z vidika tehničnih lastnosti goriva je potrebno poudariti, da predobdelava travne biomase v pelete ali brikete ne vpliva bistveno na njeno kemijsko sestavo, zlasti ne na vsebnost pepela. Ta ostaja primerljiva ne glede na obliko goriva (bale, peleti ali briketi), kar pomeni, da ključni izzivi, povezani z zgorevanjem travne biomase – predvsem nizko tališče pepela, nagnjenost k žlindranju ter povečano nastajanje finih delcev – ostajajo prisotni v vseh primerih. Posledično so tudi stroški ravnanja s pepelom primerljivi; v okviru analize je bil za vse scenarije upoštevan strošek odvoza pepela v višini 100 EUR/t, pri čemer se skupna količina pepela med različnimi oblikami goriva bistveno ne razlikuje.

Kljub temu pa predobdelava vpliva na način obvladovanja teh izzivov. Uporaba peletov ali briketov omogoča uporabo bolj standardiziranih in tehnološko razvitih kotlovskih sistemov, kjer je nadzor nad zgorevanjem bistveno boljši kot pri kurjenju bal. Sistemi za pelete v razredu več sto kW, kot so npr. industrijski kotli z avtomatskim doziranjem in regulacijo zraka (λ -regulacija), omogočajo natančnejše uravnavanje procesa zgorevanja, bolj homogeno temperaturno polje ter učinkovitejše odstranjevanje pepela. Pri tem je ključno, da so takšni sistemi ustrezno prilagojeni za goriva z višjo vsebnostjo pepela (proizvajalci pogosto uporabljajo izraz agro-peleti), kar vključuje robustnejše rešetke, izboljšane sisteme za odstranjevanje pepela ter tudi že vgrajene sisteme za zajem trdnih delcev iz dimnih plinov.

Na drugi strani standardni sistemi za lesne pelete (npr. komercialni kotli tipa HERZ BioFire) sicer niso primarno namenjeni travni biomasi, vendar jih je v praksi najverjetneje možno prilagoditi za uporabo travnih peletov, predvsem z ustreznimi sistema odstranjevanja pepela.

Takšne prilagoditve omogočajo izkoriščanje prednosti široko dostopnih in preverjenih tehnologij, hkrati pa širijo izrazito omejeno izbiro sistemov na bale.

Sklepno lahko ugotovimo, da predobdelava biomase ne odpravlja temeljnih izzivov, povezanih s pepelom, vendar omogoča njihovo učinkovitejše obvladovanje preko uporabe tehnološko naprednejših in bolje nadzorovanih sistemov zgorevanja, kar pa ima za posledico bistveno daljše dobe vračanja.

3.8. Pregled aktualne zakonodaje in pravnih okvirjev za izvedbo projekta

Glede na Zakon o varstvu okolja (<https://pisrs.si/api/datoteke/integracije/471327649>) – ZVO-2 odpadki prenehajo biti odpadki, ko so reciklirani ali drugače predelani in če so izpolnjeni ti pogoji: 1. predelano snov ali predmet je treba uporabiti za specifične namene, 2. za predelano snov ali predmet obstaja trg ali povpraševanje, razen ko predelovalec odpadkov predelano snov ali predmet uporabi sam, 3. predelana snov ali predmet izpolnjuje tehnične zahteve za specifične namene ter zadosti predpisom in standardom, ki se uporabljajo za proizvode, razen v primeru zasipanja, in 4. uporaba predelane snovi ali predmeta ne bo škodljivo vplivala na zdravje ljudi in okolje ter ne bo poslabševala kakovosti okolja. Merila za uporabo pogojev iz prejšnjega odstavka se določijo s predpisom Vlade.

Za pepel sežiga biomase so tako za uporabo v kmetijstvu točke 1–3 enostavno izpolnjene, za 4 pa bi bila potrebna še kakšna dodatna raziskava, da bi se potrdilo, da ne prihaja do izpustov, ki bi bili nezaželeni. Pa vendar že meritve vsebnosti kovin pokažejo, da temu po vsej verjetnosti ne bi smelo biti tako, tudi če bi se vse izlužile, ker pri JZ KPLB ne gre za bioremediacijo. Težava pa je podroben predpis vladi, ki pa trenutno še ni na voljo za pepel.

V Nemčiji to dobro rešuje Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) oziroma Düngemittelverordnung (DüMV), kjer je pepel odpadne biomase lahko dan na trg kot gnojilo, če ustreza opredelitvi dopustnih snovi, izpolnjuje določene mejne vrednosti za vsebnost težkih kovin (npr. Cd, Cr, Hg, Pb...), je zagotovljena opredelitev sestave proizvajalca, je zagotovljena sledljivost njegovega izvora... To nakazuje, da bi bil verjetno najbolj smiseln 1. korak torej poskus zagotovitve predpisa Vlade, kar pa seveda zahteva čas oziroma vložek, vsekakor pa bi šlo

spremljati neposredno nemško zakonodajo, ki je že na področju urejena. Tu bi se verjetno lahko na ZVO-2 naslonili s podobnim pripravljenim predpisom Vlade, kakšnih posebnih razlik pa prav tako ne bi šlo za pričakovati, glede na podobnosti v državah.

Tudi pri uporabi lastnega pepela ZVO-2 načeloma prepoveduje odlaganje ustvarjenih odpadkov v okolje. Prav tako ni dovoljena uporaba lastnih odpadkov na tleh brez ustreznega postopka predelave ali dovoljenja. Če gre za majhne količine pepela iz neobdelanega nebarvanega lesa (primer JZ KPLB), če se uporablja na svojem lastnem vrtu/polju, brez trženja, brez škodljivih okoljskih vplivov..., država praviloma tega ne obravnava kot uradno dejavnost ravnanja z odpadki. Vendar dejansko pravno gledano posebne izjeme v ZVO-2 glede količine ni – če bi prišlo do onesnaženja (tal/vode), bi bila odgovornost na uporabniku.

3.9. Surovinska izraba biomase za proizvode

Na podlagi prikazanih izsledkov vrednotenja bio-oglja (<https://www.alpine-space.eu/project/alps4greenc/>) je bil vzorec JZ KPLB primerjan z vidika osnovnih fizikalno–kemijskih lastnosti surovine, možne energijske vrednosti in vsebnosti posamičnih elementov in morebitnih strupenih kovin. Vsebnost vlage bio-oglja tako znaša približno 4 %, delež preostalega pepela pa < 20 %, kar kaže na obstojen ogljikov proizvod z zmernim negorljivim deležem. Elementarno vrednotenje vzorca je pokazalo visok delež ogljika (c 80 %), medtem ko so vsebnosti prisotnega vodika, dušika in žvepla nizke, kar potrjuje visoko stopnjo redukcije. Izračunani kurilni vrednosti (zgornja, c 30 MJ/kg; spodnja, tudi c 30 MJ/kg) nakazujeta dobro energijsko raven proizvedene snovi. Bio-ogljje izkazuje tudi dobro sposobnost zadrževanja vezane vode (c 3 g/g), plinov na površini in rahlo lužni odziv (pH c 9), kar je pomembno z vidika končne uporabe v tleh. Ionska izmenjalna moč (c 20 mEq/100 g) kaže na primerno sposobnost vezave. Vsebnosti težkih kovin (As, Cd, Hg, Pb idr.) so nizke. Vsebnosti poli-aromatskih ogljikovodikov so pom. mejo zaznave, primerne za gnojila.



Bio-ogljje

Izsledki ločevanja travinja kot trajnostnega vira biomase kažejo, da obravnavana obnovljiva surovina predstavlja smiselno surovinsko osnovo za ločitev osnovnih gradnikov, predvsem celuloze, pa tudi lignina. Travinje kot obnovljiva ligno-celulozna surovina je vsebovala približno 30–45 % celuloze, 20–30 % hemi-celuloze in 15–25 % lignina, pri čemer se deleži lahko razlikujejo glede na vrsto, rastišče in čas njene košnje, kar se je pri nas odražalo že pri vzorčenju. Izvedeno ločevanje gradnikov je omogočilo učinkovito ločevanje vlakninskega (celulozne) dela surovine od deleža vsebovanega lignina, s čimer so bili pridobljeni medsebojno jasno opredeljeni snovni tokovi. Celulozni del vira predstavlja ključni obnovljivi

gradnik za nadaljnjo surovinsko rabo, zlasti v proizvodnji običajnega papirja, vlakninskih končnih proizvodov in drugih bio-osnovanih snovi, medtem ko pridobljeni delež lignina odpira možnosti njegove uporabe v bio-izvirajočih vezivnih sestavih, premazih in kot surovina za nadaljnjo kemijsko predelavo. Izsledki potrjujejo, da je travinje kot sorazmerno dostopen, obnovljiv in predvidljiv vir primerno za postopek ločevanja gradnikov, je zanimivo in predstavlja ustrezno surovinsko osnovo za razvoj trajnostnih verig dodane vrednosti.

4. Interpretacija rezultatov

4. 1. Analiza goriva tj. vzorcev sena iz območja KPLB

Najprej smo primerjali proksimativno vrednotenje vzorcev. V vrednotenju sta bila obravnavana dva vzorca mrve: neobdelana vlažna (1) / suha (2). Vzorec 1 je imel visoko vsebnost vlage z vrednostjo 76 % z razmeroma velikim razpršenjem (± 9 %). Izmerjene vrednosti vlage pri vzorcu 1 so se gibale približno znotraj 67 %–84 %. Vzorec 2 je imel bistveno nižjo vsebnost (različno od 1), povprečno 9,0 % z zelo majhnim odklonom ($\pm 0,3$ %).

V splošnem je bilo ugotovljeno, da mora biti travinje za stiskanje primerno pripravljeno, in sicer razsežnosti posamezne rastline ne smejo presegati 20 cm, vsebnost vezane vlage pa ne sme presegati 15 %. Poglavlje 3. 1. Analiza goriva tj. vzorcev sena iz območja KPLB na kaže vsebnost vlage vzorca 1 76%, kar je znatno preveč, po sušenju pa pridemo na 9 % kar je ustrezno. Slednje bi poleg stiskanja dovolilo s stališča vsebnosti vlage tudi sežig neposredno. Če primerjamo vzorca s peleti, ki so bili pripravljene s pridobivanjem travnate surovine, kjer je travinje prihajalo z pokošenih mokrotnih travnikov Cerknškega jezera, ugotovimo, da so vrednosti primerljive, saj je pri slednjih vsebnost 8,1 %. Primerna energetska surovina tako ne vsebuje zemlje, gnilobe ali plesni, vsebnost vezane vlage pa mora biti pod 15 %, kar je opaženo tako pri vzorcu 2 kot peletih, vzorec 1 pa posledično ni ustrezen zaradi visokih 76 %.

Tudi v primerjavi z briketi (Poročilo o preskusu Gozdarskega inštituta Slovenije z dne 20. 10. 2020) so vrednosti vzorca 2, ki je bil sušen, primerljive, zakaj govorimo o 9 % glede na 8,25 %, kar je prav tako sprejemljivo. Pri tem gre zaključiti, da je vzorec sušene mrve, ki je bil dostavljen s stališča vsebnosti vlage povsem ustrezen v primerjavi z briketi, kar pomeni, da to ni izključitveni dejavnik uporabe (sežig). Vzorec 1 pa, kot je rečeno, zaradi vlage ni primeren.

Sledilo je vrednotenje vsebnosti pepela. Vrednotena sta bila dva vzorca mrve: neobdelana vlažna (1) / suha (2). Povprečna vsebnost pepela v vzorcu 1 je znašala 14,2 % z odklonom $\pm 0,6$ %. Izmerjene vrednosti pepela pri vzorcu 1 so bile razmeroma enakomerne, saj so se gibale okoli 14 %. Vzorec 2 je imel bistveno nižjo povprečno vsebnost pepela, in sicer 1,37 % $\pm 0,07$ %. Izsledki kažejo na razliko v sestavi negorljivega dela med (vlažno/suho) mrvo.

Če primerjamo vzorca s peleti (Life Tršca), pri slednjih pepel ni bil neposredno določen, pa vendar ga lahko ocenimo preko razlike glede na Organsko snov (93 %), tako da so vrednosti nekje med mrvo 1/2, torej okoli 7 %, tako da je načeloma biomasa sušene trave še ustrežnejša. V priporočilu z briketi (c 11,39 % pepela) pa še bolj, saj želimo čim nižje vrednosti.

Sledilo je ultimativno vrednotenje biomase. Vrednotenje je obsegalo določitev podrobne sestave (C, H, N, O in S) dveh različno vlažnih vzorcev pokošene mrve. Vrednotenja so bile izvedene z običajno vsestransko napravo, pri čemer so bile za vsak vzorec mrve opravljene štiri primerljive ponovitve. Največji utežni delež pri obeh vzorcih mrve predstavlja kisik (okoli 50 %), sledita ogljik (41–43 %), vodik (5,8–6,2 %) in dušik. Dušik je prisoten v nekoliko manjših količinah, žveplo pa je pri vzorcu 2 pod mejo zaznave naprave. Izsledki so skladni s pričakovanji, saj gre za isto vrsto biomase, ki se razlikuje predvsem po stopnji sušenja vzorcev. Razmerja med kisikom, ogljikom in vodikom pa prav tako odražajo običajno sestavo biomase, ki je zgrajena iz celuloze, lignina in hemi-celuloze, razmerja pa se ne da opredeliti.

Če primerjamo vzorca s peleti (Life Tršca), pri slednjih podrobna sestava ni bila neposredno določena. Ob upoštevanju, da travinje vsebuje približno 93 % poročane organske snovi (Life Tršca), je moč ugotoviti, da to organski del vzorca večinoma sestavljajo celuloza (okoli 35–45 %), hemi-celuloza (25–35 %) in lignin (10–20 %). Celuloza, hemi-celuloza in sladkorji so bogati z ogljikom, kisikom in vodikom, pri čemer O predstavlja približno 45–50 %, C 40–44 % in H 5–7 % njune teže. Lignin ima nekoliko višji delež ogljika (okoli 60 %), vezi C–C in nižjo vsebnost kisika (30–35 %), vodik pa je zastopan z okoli 5–6 %. Če te ocenjene vrednosti prenesemo na celotno organsko snov uporabljenega travinja, lahko ocenimo, da prevladuje kisik (okoli 50 %), sledi ogljik (približno 42 %) in vodik (nekako 6 %). Takšna podrobna sestava je skladna z izmerjenim elementnim vrednotenjem vzorcev travinja, splošno sprejetimi vrednostmi za različne ligno-celulozne odpadke in poročili. Vidimo tudi zelo lepo ujemanje z našima vzorcema mrve, tako da so tudi razmerja za celulozo, lignin in hemi-celulozo dokaj podobna. Pri briketih (Poročilo o preskusu Gozdarskega inštituta Slovenije z dne 20. 10. 2020) je bila vsebnost vrednotenega ogljika 43,95 %, vodika 5,60 %, dušika 1,52 %, žvepla pa je bilo 0,15 %. Umeščanje v različne kakovostne razrede pove, da je glede na žveplo to lahko A, glede na N pa B. Če primerjamo mrvo Ljubljanskega barja z briketi, je prav tako moč zaključiti, da je sestava zelo podoba oziroma verjetno nekje znotraj odklopa pri vzorčenju ali pa ponovitvah.

Načeloma je za izboljšanje kurilne vrednosti bolje, da je vsebnost ogljika ali vodika čim višja, kisika pa nižja, zakaj slednji znižuje toploto, ki se sprosti, pa vendar na to ne moremo vplivati. Vsaj ne bistveno. Žveplo je predvsem težavno zaradi dolgoročnega rjavenja kovin, pa vendar je moč opaziti, da vsebnosti niso previsoke, tako da so ustrezne za neka običajna kurišča. Zaključek je, da je sestava C, H, N, O in S za sežig ustrezna, primerljiva pa je s peleti ali briketi.

Za sežig je nadalje pomembno vrednotenje kurilne vrednosti, delno povezano že s C, H, N, O in S. V delu je bila določena zgorevalna toplota mrve v vlažnem, osnovnem in suhem stanju. Pri vzorcu 1 v osnovnem (vlažnem) stanju izsledki niso ustrezni zaradi nepopolnega zgorevanja mrve, zato niso primerljivi. Ostali narejeni poskusi so znotraj negotovosti same naprave, kar kaže na dobro ponovljivost vrednotenja kljub neenakomernosti zgradbe vzorcev. Suhi vzorec mrve 1 je imel povprečno zgorevalno vrednost $16,1 \pm 0,4$ kJ/g, preizkušane 2 pa $17,5 \pm 0,5$ kJ/g v osnovnem-, $18,6 \pm 0,4$ kJ/g v njegovem posušenem stanju in šlo je dejansko za povečanje sušine. Za zanesljivejše opazovanje gorenja pa so primernejši poskusi v kurišču z večjimi oblikovanimi vzorci (peleti, briketi...), kar je bilo tudi preizkušeno.

V okviru dejavnosti nalog Life Tršca so bili prav tako uspešno izdelani prvi obnovljivi peleti za steljo iz travinja Cerknškega jezera. Notranjski park je že od leta 2017 proučeval možnosti za krožno izrabo ostankov, travinja in trsja, ki na Cerknškem jezeru vsako tekoče leto ostaja kot odmrla kakovostna biomasa. Čeprav v poročilu ni zaslediti vrednotenja kurilne vrednosti, se slednjo da oceniti iz podrobne opredelitve sestave, seveda zgolj za popolnoma suhe vzorce. Upošteva se slednje (in 93 % vsebovanega organskega dela) pridemo do ravni kurilne vrednosti 15–16 kJ/g, kar je popolnoma poravnano s tistimi, ki smo jih opredelili za mrvo Ljubljanskega barja. Pri slednjih z delnim povečanjem sušine lahko celo izboljšamo ravni kurilne vrednosti za okvirno 2 kJ/g, lahko pa je to povezano tudi s pepelom, ki ga je manj.

Pri briketih (Poročilo o preskusu Gozdarskega inštituta Slovenije z dne 20. 10. 2020) so ravni kurilnih vrednosti v okvirih od 14,5 kJ/g (spodnja dobavljenih) ali 16,3 kJ/g (nižja posušenih dostavljenih) do 17,5 kJ/g za zgornjo, torej tisto, ki ne upošteva toplote, potrebne za izparevanje. Tudi to je popolnoma poravnano s tistimi, ki smo jih opredelili za mrvo Ljubljanskega barja. Pri slednjih z delnim povečanjem sušine lahko celo izboljšamo ravni kurilne vrednosti za okvirno 1 kJ/g, lahko pa je to povezano tudi s pepelom, ki ga je manj. Pa

vendar so tovrstne razlike tako majhne, da do njih lahko pride tudi zaradi časa, kraja in načina pridobivanja biomase, poleg tega pa pri peletih ali briketih tudi na račun proizvodnje. Načeloma so vrednosti ustrezne, s torefakcijo pa bi jih lahko celo nekoliko povečali.

Glede izsledkov so kurilne vrednosti biomase iz travinja/trsja (15–16 kJ/g) primerljive z mrvo Ljubljanskega barja/briketi od drugod. Vrednotenja kažejo ponovljivost/skladnost z objavami/izsledki. S sušino se vrednosti zanesljivo izboljšajo za približno 1–2 kJ/g. Razlike med vzorci so majhne, posledica naravne raznolikosti/postopkov obdelave. Mrva je ustrezna.

Preglednica v poglavju 3. 1. Analiza goriva tj. vzorcev sena iz območja KPLB prikazuje utežne deleže izbranih prisotnih (težkih) kovin v dveh vzorcih mrve, izražene v $\mu\text{g/g}$. Kadmij oziroma svinec v obeh obravnavanih vzorcih nista bila zaznana, saj sta njuni določeni vrednosti pod mejo zaznave obeh. Kalij, natrij in silicij so prisotni v večjih vsebovanih deležih, pri čemer so med vzorcema opazne razlike. Vzorec 2 vsebuje občutno več cinka, natrija in silicija v primerjavi z mrvo 1. Izsledki omogočajo zelo jasno primerjavo snovne sestave, kovin in razlik v vsebnosti posameznih zvrsti med obema vzorcema mrve. Sprememba vrednosti kovin je lahko na račun vzorčenja mrve, odstranjevanja glavnine vode, morda pa tudi sušenja (aerosoli). Nevarnih težkih kovin pa skorajda ni, kar pa je seveda najbolj bistveno za izrabo.

Izdelava peletov travinja znotraj Life Tršca je poteka v več stopnjah priprave, pri čemer je bilo ključno ohraniti naravno sestavo surovine, omejiti predpripravo in doseči končne lastnosti, ki so za steljo najprimernejše. Če primerjamo vsebnosti kovin peletov, lahko ugotovimo, da je tudi pri slednjih kadmij pod $0,1 \mu\text{g/g}$, kalija v obliki K_2O je nekoliko več, $9500 \mu\text{g/g}$, pa vendar je K zgolj neko merilo gnojenja ali slanosti, natrij pa ni bil pomejen, ker prav tako ni težaven. Tudi pri Life Tršca je svinec nizek, zakaj vrednosti so pod $0,9 \mu\text{g/g}$, kar je ustrezno, ker je Pb eden izmed bolj običajnih onesnažil, kadar je govora o kovinah, ki bi bile lahko morda težavne. Silicij ni bil pomejen, vrednost za cink pa je bila pod mejno, torej $23 \mu\text{g/g}$, kar tudi pove, da to ni težavno, v kolikor bi bila izraba naprej mišljena kot surovinska ali energetska.

Pri briketih (Poročilo o preskusu Gozdarskega inštituta Slovenije z dne 20. 10. 2020) vsebnost kovin ni bila določana, v splošnem pa je moč predvidevati, da slednja ni presežena, ker do nasprotnega pride predvsem, če je vir uporabljene biomase od kod, kjer je onesnaženje znano.

Govoriti bi tako morali o opuščeni rudarskih krajih ali pa znanih odlagališčih anorganskih gospodarskih odpadkov, kar pa v primeru briketov ni bilo, kar uporabo olajša.

Sledilo je še SEM–EDX vrednotenje (kovin). V vzorcih prisotnost žvepla lahko nakazuje morebitne prispevke ostankov iz gume ali snovi, ki vsebujejo sulfate, nastale med zgorevanjem. Znatno delež aluminija, kalcija in magnezija, spremenljiva vsebnost silicija ter železo lahko kažejo na prisotnost oksidov, hidroksidov in poznanih gradbenih snovi, kot so različni cementni, silikatni ali pepelni gradniki. Dosledno visoka vsebnost prisotnega kisika podpira prevlado oksidiranih snovi pepela. Fosfor je bil zaznan v vseh preiskovanih vzorcih, kar je lahko povezano z dodatki, ki vsebujejo P spojine, gradniki iz biomase ali ostanki različnih gnojil. Kalij je prisoten v dokaj znatnih količinah, kar nakazuje prispevke pepela iz biomase ali drugih alkalijsko bogatih snovi, značilnih za ostanke zgorevanja mrve. Natrij, klor in halogeni (Br/I) so prisotni le v manjših ali sledovih, kar kaže omejeno prisotnost kloridov.

Sledovi bakra, mangana in železa lahko nakazujejo manjše prispevke sestavi iz kovinskih ali drugih ne-travnatih nečistoč, medtem ko barij, cink in stroncij niso bili zaznani nad mejo zaznave naprave. Aluminij je prisoten le v sledovih, oblika ni kovinska in verjetno je povezan z alumino-silikatnimi deli vzorca. Celotna podrobna sestava odraža prej raznoliko mešanico, v kateri prevladujejo kovinske, oksidirane in pepelne snovi vzorca namesto prevladujočih kovinskih odpadkov. Ogljik je bil namensko izpuščen iz podrobnega vrednotenja sestave, saj je bil vzorec nameščen na ogljikovi lepilni podlagi; vključitev C neposredno bi zato povzročila umetno povišane odzive prisotnega C, popačila oštevilčene vrednosti izsledkov, hkrati pa imamo C tako določen poprej, SEM–EDX pa je tako namenjen predvsem reševanju ostalega.

Snov	Mesto 1	Mesto 2	Mesto 3	Mesto 4	Mesto 5	Mesto 6
Al	0.3	0.2	0.3	0.1	0.2	0
Ba	0	0	0	0	0.9	0
Ca	10.7	9.7	8.9	16.6	10.7	7.3
Cl	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0
Cu	0.3	0	0.4	0	0.4	0.4
Fe	0.2	0.3	0.3	0.5	0.6	0
K	7.1	6.8	7.2	6.5	8.7	24.4
Mg	13.7	6.2	4.9	7.7	6.7	5.3

Mn	0.4	0.5	0.2	0.7	0.7	0.2
Na	0	0	0.3	0.2	0.3	0.2
O	56.6	54.9	58.7	54.2	53.5	53.8
P	2.4	2.5	1.7	3.6	5.4	1
S	5.6	2.8	2.1	3	2.4	6.3
Si	2.5	15.8	14.8	6.8	8.8	1.2
Zn	0	0	0	0	0.6	0

Temperatura taljenja pepela je bila določena z ogrevanjem vzorcev pepela, pridobljenega s popolnim sežiganjem trave. Pepel je bil pomešan, podvržen trenju in oblikovan v običajni preskusni vzorec, ki je bil ogrevan v peči od temperature 20 °C do 1700 °C s hitrostjo 10 K/min. Med segrevanjem smo opazovali spremembe oblike vzorca/beležili značilne temperaturne točke. Za vzorca je bilo taljenje določeno približno pri 1100 °C ± 20 °C.

4. 2. Evalvacija goriva za rabo v kotlih, kuriščih in kogeneracijskih enotah

Kljub temu, da gre za biomasno trdno gorivo se travinje v več ključnih lastnostih razlikuje od uveljavljenih biomasnih goriv, za katere je prilagojena večina naprav za energetske rabo. Ključne razlike so v sestavi organskega deleža ter v prisotnosti in koncentraciji anorganskih snovi. S stališča sestave organskega deleža je travinje pretežno sestavljeno iz celuloze, medtem ko lignocelulozni peleti poleg celuloze vsebuje tudi lignin (pomembna komponenta za obstojnost npr. peletov) in znaten delež ekstraktivov (smol). Prav slednji dve komponenti sta pri energetski izrabi pomembni za tvorbo izpustov onesnažil (trdnih delcev, saj), kar travinje v oziru na sestavo organskega deleža postavlja v prednostni položaj. Nasprotno, lahko enega večjih izzivov predstavljajo anorganske komponente, saj je prisotnost pepela v travinju tipično bistveno višja kot v lignocelulozni biomasi. Odvisno od sestave anorganskega deleža, se lahko med uporabo v napravah za termično rabo pričnejo pojavljati obloge na vročih komponentah in tudi vroča korozija, kar lahko omejuje življensko dobo naprav in/ali njihovo zmogljivost.

Anorganski elementi v trdnih biogorivih pomembno vplivajo na potek zgorevanja, nastanek pepela, tvorbo oblog na površinah toplotnih izmenjevalcev ter dolgoročno obratovalno zanesljivost kotlov in peči. Med najpomembnejše elemente z vidika obratovanja sodijo alkalijske kovine (K, Na), klor (Cl), žveplo (S), silicij (Si), kalcij (Ca), magnezij (Mg), železo (Fe) in fosfor (P), saj sodelujejo v reakcijah, ki določajo tališče pepela, nastanek depozitov na vročih komponentah ter so zavržjo tega ključni vzrok visokotemperaturne in nizkotemperaturne korozije.

Eden ključnih dejavnikov pri zgorevanju biomase je obnašanje alkalijskih kovin, zlasti kalija (K), ki predstavlja izziv predvsem v nizkokvalitetni lignocelulozni biomasi. Kalij pri zmerno visokih temperaturah prehaja v plinasto stanje (okrog 700°C) ter nato kondenzira na hladnejših površinah kotla – vrelišča kalijevih spojin so običajno nižja od ostalih anorganskih snovi. Dodatno lahko ob prisotnosti klora (Cl) nastajajo alkalijski kloridi (npr. KCl), ki so posebej problematični zaradi svoje visoke korozivnosti, hkrati pa zaradi odlaganja na hladnejše površine preprečujejo stik materiala sten s kisikom, kar v daljših obdobjih povzroči redukcijo zaščitnega oksida na površinah uporabljenih kovin v kotlih. V obravnavanih vzorcih je klor prisoten v zelo nizkih koncentracijah, kar bistveno zmanjšuje verjetnost nastajanja kloridnih

depozitov in s tem tveganje za pospešeno degradacijo kovinskih površin. S tega stališča tudi kombinirana prisotnost kalija in klora ne predstavlja posebnega izziva.

Pomemben mehanizem nastajanja žlindre in trdnih oblog predstavlja tudi interakcija alkalijskih kovin s silicijem (Si). Kalij in natrij lahko reagirata s silicijevim dioksidom ter tvorita alkalijske silikate, ki so glavni vzrok sintranja pepela, nastajanja klinkerja in lepljenja pepela na rešetkah ter stenah kurišča. Četudi sama korozivnost teh spojin ne predstavlja posebnega izziva, je žlindranje in aglomeracija pepela pomembno za obratovalno zanesljivost. Morebitni večji skupki pepela namreč onemogočajo njegovo odvajanje z rešetke, kar običajno zahteva zaustavitev naprave za hladno čiščenje rešetke. V analiziranih vzorcih so koncentracije silicija nizke do zmerne, hkrati pa tudi vsebnosti alkalijskih kovin niso izrazito povišane, kar kaže na zmanjšano tveganje za nastanek taljenih silikatnih faz ter s tem nižjo verjetnost žlindranja in problematičnega nalaganja pepela.

Kalcij (Ca) in magnezij (Mg) imata v pepelu pogosto stabilizacijsko vlogo, saj tipično tvorita stabilne okside, hkrati pa dvigujeta pH pepela in s tem zmanjšujeta možnost korozije. Na tej podlagi običajno zvišujeta temperaturo taljenja pepela in delno izravnavata neugodne učinke alkalijskih kovin. Njuna prisotnost lahko prispeva k tvorbi bolj stabilnih mineralnih faz in k manjši lepljivosti pepela, kar olajša odstranjevanje pepela iz kurišča in toplotnih izmenjevalcev. V obravnavanih vzorcih torej ne predstavljata posebnega tveganja.

Fosfor (P) lahko vpliva na lastnosti pepela preko tvorbe fosfatnih spojin, ki v kombinaciji z alkalijskimi kovinami v določenih primerih znižujejo tališče pepela. Fosfor je značilen predvsem za kmetijske ostanke in biomaso iz območja ker je prisotno gnojenje. V analiziranih vzorcih njegova vsebnost ni na ravni, ki bi bistveno povečevala tveganje za žlindranje, lahko pa vpliva na reaktivnost pepela in njegovo potencialno nadaljnjo uporabo (npr. vračanje hranil v tla).

Sledi kovin, kot so železo (Fe), mangan (Mn), baker (Cu) in cink (Zn), lahko katalitsko vplivajo na oksidacijske procese in na oprijemanje oblog, vendar so v obravnavanih koncentracijah njihovi vplivi na korozijo, nalaganje pepela in emisije zanemarljivi. Prav tako ne predstavljajo tveganja z vidika emisij strupenih kovin ali ravnanja s pepelom. Na splošno interakcije anorganskih elementov v analiziranih vzorcih ne kažejo na visoko tveganje za izrazito

nalaganje oblog, žilindranje ali korozijo, zlasti v primerjavi z npr. nizkokakovostnimi kmetijskimi ostanki. Kombinacija nizke vsebnosti klora, zmerne prisotnosti alkalijskih kovin, nizkih koncentracij silicija in potencialno stabilizacijskega vpliva kalcija in magnezija nakazuje na relativno ugodno sestavo pepela ter obvladljiva tveganja v dostopnih tehnologijah zgorevanja. Kljub temu je potrebno upoštevati, da so vplivi anorganskih snovi močno odvisni od temperature zgorevanja, zasnove kurišča ter obratovalnih pogojev. Njihov vpliv je lahko izrazitejši v visokotemperaturnih pečeh, kompaktnih izmenjevalnikih toplote ter v napravah, ki niso posebej prilagojene za zgorevanje biomase. Za dolgoročno zanesljivo obratovanje je zato priporočljivo ugotovitve preveriti z morebitnim dobaviteljem tehnologije in z določanjem tališča pepela, predvsem če je predvidena uporaba goriva v sistemih z večjimi toplotnimi obremenitvami.

4. 3. Preverba ekonomske učinkovitosti projekta

Študija energetske izrabe travne biomase z območja Krajinskega parka Ljubljansko barje (KPLB) je pokazala, da razpoložljiva količina biomase, ocenjena na približno 600 t/leto, omogoča stabilno obratovanje sistema nazivne moči 567 kW. Ob predpostavljenem obratovanju 4000 ur/leto in izkoristku sistema 85 % to ustreza letni proizvodnji toplote v velikosti okvirno 2,0 GWh, kar zadostuje za oskrbo večjih javnih objektov ali kombinacije več manjših porabnikov. Pri dimenzioniranju sistema je bilo ugotovljeno, da pristop na osnovi vršne moči (100 W/m^2) določa realno oskrbovalno sposobnost sistema, medtem ko kumulativna letna raba toplote za objekt 3000 m^2 ($50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) kaže bistveno večji teoretični energijski potencial.

Investicijski stroški sistema so bili ocenjeni na približno 680.000 EUR, kar ustreza specifični investiciji 1021 EUR/kW in vključuje kotlovski sistem, skladišče, manipulativne površine ter osnovno infrastrukturo. Letni obratovalni stroški znašajo 67.268 EUR/leto, pri čemer največji delež predstavlja strošek goriva (30 EUR/balo), sledijo stroški dela (20.000 EUR/leto), vzdrževanje (2 % investicije), zavarovanje (1 %) ter transport biomase (0,075 EUR/km/balo). Posebnost sistema je tudi notranja raba toplote za sušenje dela biomase (50.000 kWh/leto), kar zmanjšuje količino toplote za prodajo, vendar hkrati omogoča obratovanje s celotno količino surovine.

Ekonomska analiza je bila izvedena z uporabo dveh ključnih kazalnikov: enostavne dobe vračanja (ROI) in niveliranega stroška toplote (LCOH). Rezultati kažejo, da znaša LCOH približno 0,045–0,065 EUR/kWh, kar predstavlja interno proizvodno ceno toplote brez upoštevanja davkov, omrežnin in drugih dajatev. Tudi ob konservativnem povečanju za približno 0,015 EUR/kWh, ki predstavlja realno oceno dodatnih stroškov, sistem ostaja cenovno konkurenčen v primerjavi z alternativnimi tehnologijami, zlasti v lokalnih okoljih brez razvite distribucijske infrastrukture.

Analiza ROI je pokazala, da je doba vračanja v izhodiščnem scenariju 19 let, pri čemer je ključni dejavnik razpoložljivost biomase in njena cena. Pri višjih količinah biomase in nižjih stroških goriva se ROI bistveno izboljša, medtem ko pri nižjih količinah hitro preseže 20 let. Pomembna ugotovitev je tudi, da vključitev lastne rabe toplote (nadomeščanje obstoječega ogrevanja) lahko skrajša dobo vračanja za več let in predstavlja enega ključnih elementov za ekonomsko upravičenost projekta.

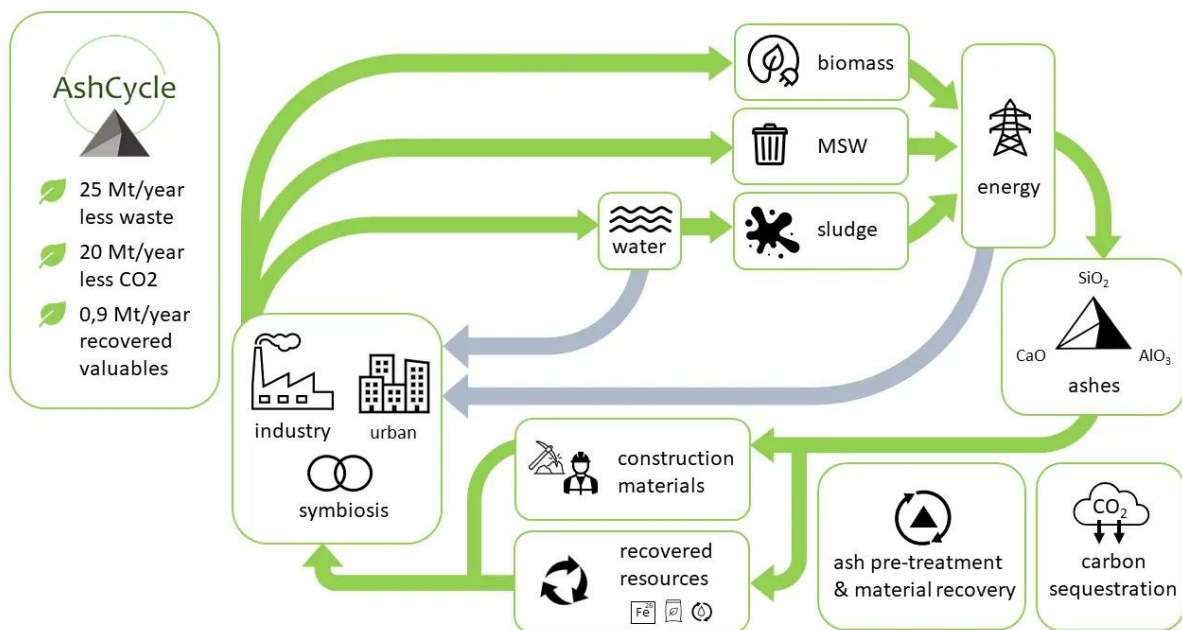
Na tehnični ravni analiza potrjuje, da je energetska izraba travne biomase izvedljiva, vendar povezana s specifičnimi izzivi, kot so višja vsebnost pepela, povečane emisije trdnih delcev ter potencialni problemi z obratovanjem kotlov. Ti vidiki zahtevajo ustrezno izbiro tehnologije in potencialno vključitev dodatnih sistemov za čiščenje dimnih plinov – predvsem filtrov, ki pa so dobavljivi na trgu.

Skupno gledano rezultati kažejo, da ima projekt realen potencial za implementacijo, vendar je njegova uspešnost močno odvisna od stabilne dobavne verige biomase, optimizacije obratovalnih pogojev ter ustrezne tehnične zasnove sistema. Pred nadaljnjo investicijsko odločitvijo je zato nujna podrobnejša analiza v sodelovanju s proizvajalci opreme, ki bo omogočila natančnejšo opredelitev tehničnih rešitev, stroškov in okoljskih vplivov.

4.4. Pregled aktualne zakonodaje in pravnih okvirjev za izvedbo projekta

Za številne odpadne snovi tako zakonodaja še ni pripravljena, pa vendar je v Scoping possible further EU-wide end-of-waste and by-product criteria (<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b02130d2-a022-11ec-83e1-01aa75ed71a1/language-en>) nekako opisana pot, kako zagotoviti ustrezno ponovno uporabo, ki pa je odvisna od odpadkov in različnih stranskih odmetov pri predelavi. Pepel bi moral verjetno biti podvržen podobnemu.

Da je pepel še vedno izziv nakazuje tudi projekt AshCycle, Integration of Underutilized Ashes into Material Cycles by Industry-Urban Symbiosis, kjer je razvidno, da je še veliko različnih vprašanj. Kot omenjeno v poglavjih poprej, ta niso zgolj tehnična, temveč tudi zakonodajna. K temu prispeva raznorodnost same surovine, to pa se odraža tudi na pepelu, ki ni enak.



Projekt AshCycle

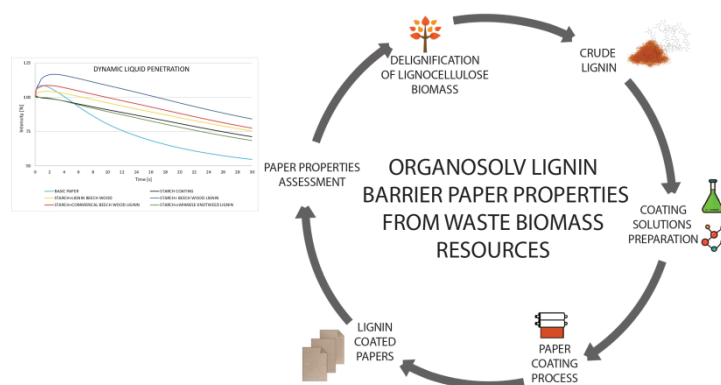
AshCycle tako opaža, da se pepel od sežiganja biomase, trdnih komunalnih odpadkov in blata iz čistilnih naprav premalo uporablja. V Evropi približno 25 milijonov ton letno konča, večinoma na odlagališčih kljub uporabnosti. Posledično se izgubi veliko kovin, hranil, redko zemeljskih elementov in industrijsko dragocenih mineralov, ki jih pepel vsebuje. Projekt AshCycle, ki ga financira EU, raziskuje nove metode za pridobivanje uporabnih elementov, ki

jih vsebuje pepel. Pridobljene surovine bodo predelane v obliko, primerno za industrijsko uporabo. Izsledki omenjenega projekta bi bili lahko tudi ustrezna podlaga za pripravo ustreznih predpisov poleg že prej omenjenega nemškega Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) oziroma Düngemittelverordnung (DüMV). Uporaba je torej lahko omejena na lastno presojo.

4.5. Surovinska izraba biomase za proizvode

Razlaga izsledkov obdelave kaže, da bio-ogljje predelanega vzorca JZ KPLB izkazuje lastnosti, ki so primerljive oziroma v posameznih značilnostih vrednotenja boljše od vrednosti, običajno poročanih za ogljje iz travinja v različnih strokovnih člankih. Nizka vsebnost vlage (c 4 %) potrjuje ustrezno toplotno obdelavo, manj kisika in odpornost samega proizvoda, medtem ko delež preostalega pepela (< 20 %) ostaja v zgornjem, vendar še sprejemljivem razponu območij za običajno travniško biomaso, ki zaradi svoje oksidne sestave praviloma vsebuje več negorljivih ostankov kot pogoste lesne surovine. Visok delež ogljika (c 80 %) kaže na dobro pretvorbo surovine, odstranitev kisika in veliko stopnjo nastajanja vmesnih proizvodov, kar je ključno za dolgoročno obstojnost nastalega C v tleh, njegovo počasno sproščanje in možnost celokupnega ponora CO₂, kar je bistveno drugače od npr. sežiga.

Nizke vsebnosti vodika, dušika in žvepla dodatno potrjujejo ustrezno toplotno pretvorbo, dokončanje le-te in celokupno zmanjšano tveganje za izpuste neželenih plinov ob morebitni energijski rabi. Kurilna vrednost proizvoda okoli 30 MJ/kg presega običajne vrednosti številnega travniškega bio-ogljja (pogosto 20–30 MJ/kg), kar nakazuje dobro energijsko kakovost same snovi. Rahlo bazična vrednost pH (c 9) je skladna z objavami za bio-ogljje travniških surovin, določitev je ponovljiva in kaže na možen ugoden vpliv na bolj kislta tla. Sposobnost zadrževanja vode (c 3 g/g), ponovljivost in ionska izmenjevalna moč (c 20 mEq/100 g) potrjujejo primernost za izboljšanje talnih lastnosti, zlasti v smislu zadrževanja kovin, hranil in vlage. Nizke vsebnosti vrednotenih težkih kovin, oksidov in strupenih poli-aromatskih ogljikovodikov pod zakonsko mejo zaznave še dodatno potrjujejo ustreznost.



Razklop travinja kot možnost surovinske izrabe

Izsledki potrjujejo, da travinje predstavlja obnovljiv vir ligno-celulozne biomase, primerno za ločevanje osnovnih gradnikov, kot so celuloza, hemi-celuloza in lignin. Vrednosti – približno 30–45 % celuloze, 20–30 % hemi-celuloze in 15–25 % lignina – so skladne z objavami za travinje v različnih zemljepisnih območjih, pri čemer so odstopanja pogosto posledica vrste trav, rastišča in košnje. Razlike so bile pri nas opažene že pri vzorčenju, kar poudarja ponovljivost pri pridobivanju za uporabo.

5. Viri

Bergonzoli s sodelavci, An Innovative System for Maize Cob and Wheat Chaff Harvesting: Simultaneous Grain and Residues Collection, *Energies*, 2020, 10.3390/en13051265.

Buonomano s sodelavci, Advanced Energy Technologies, Methods, and Policies to Support the Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, *Energy Reports*, 2022, 10.1016/j.egyr.2022.06.164.

Eionet, Share of Energy Consumption from Renewable Sources in Europe, 2022. Available online: <https://www.eea.europa.eu/ims/share-of-energy-consumption-from#:~:text=Witha22.1%25shareof> (accessed in 2026).

Eurostat, Energy Statistics—An Overview, 2022. Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Primary_energy_production (accessed in 2026).

IAEA, Nuclear Technology, In the New Crusaders, Routledge: London, UK, 2020.

Kantola s sodelavci, Long-term Yields in Annual and Perennial Bioenergy Crops in the Midwestern United States, *GCB Bioenergy*, 2022, 10.1111/gcbb.12956.

Landis s sodelavci, Biomass and Biofuel Crop Effects on Biodiversity and Ecosystem Services in the North Central US, *Biomass and Bioenergy*, 2018, 10.1016/j.biombioe.2018.03.013.

Latterini s sodelavci, Effectiveness of Three Terminating Products on Reducing the Residual Moisture in Dwarf Castor Plants: A Preliminary Study of Direct Mechanical Harvesting in Central Greece, *Agronomy*, 2022, 10.3390/agronomy12010146.

Latterini s sodelavci, Evaluating the Suitability of a Combine Harvester Equipped with the Sunflower Header to Harvest Cardoon Seeds: A Case Study in Central Italy, *Agronomy*, 2020, 10.3390/agronomy10121981.

McGowan s sodelavci, Soil Organic Carbon, Aggregation, and Microbial Community Structure in Annual and Perennial Biofuel Crops, *Agron. J.*, 2019, 10.2134/agronj2018.06.0410.

Pari s sodelavci, Herbaceous Oil Crops, a Review on Mechanical Harvesting State of the Art, *Agriculture*, 2020, 10.3390/agriculture10090309.

Pari s sodelavci, Pappi of Cardoon (*Cynara Cardunculus* L.): The Use of Wetting during the Harvesting Aimed at Recovering for the Biorefinery, *Ind. Crop. Prod.*, 2017, 10.1016/j.indcrop.2017.07.032.

Prochnow s sodelavci, Bioenergy from Permanent Grassland – A Review: 2. Combustion, Bioresource Technology, 2009, 10.1016/j.biortech.2009.05.069.

Robertson s sodelavci, Cellulosic Biofuel Contributions to a Sustainable Energy Future: Choices and Outcomes, Science, 2017, 10.1126/science.aal2324.

Sacristán s sodelavci, Lignocellulosic Biomass Production and Persistence of Perennial Grass Species Grown in Mediterranean Marginal Lands, Agronomy, 2021, 10.3390/agronomy11102060.

Scordia s sodelavci, Towards Identifying Industrial Crop Types and Associated Agronomies to Improve Biomass Production from Marginal Lands in Europe, GCB Bioenergy, 2022, 10.1111/gcbb.12987.

Stefanoni s sodelavci, Mechanical Harvesting of Castor Bean (*Ricinus Communis* L.) with a Combine Harvester Equipped with Two Different Headers: A Comparison of Working Performance, Energies, 2022, 10.3390/en15162999.

Stefanoni s sodelavci, Perennial Grass Species for Bioenergy Production: The State of the Art in Mechanical Harvesting, Energies, 2023, 10.3390/en16052303.

Suardi s sodelavci, Admixing Chaff with Straw Increased the Residues Collected without Compromising Machinery Efficiencies, Energies, 2020, 10.3390/en13071766.

Suardi s sodelavci, Equipping a Combine Harvester with Turbine Technology Increases the Recovery of Residual Biomass from Cereal Crops via the Collection of Chaff, Energies, 2020, 10.3390/en13061572.

Wang s sodelavci, Optimization of Harvest and Logistics for Multiple Lignocellulosic Biomass Feedstocks in the Northeastern United States, Energy, 2020, 10.1016/j.energy.2020.117260.

Zahorec s sodelavci, Perennial Grass Bioenergy Cropping Systems: Impacts on Soil Fauna and Implications for Soil Carbon Accrual, GCB Bioenergy, 2022, 10.1111/gcbb.12898.

6. Priporočila

Pri načrtovanju morebitne izrabe presežne biomase iz travnikov JZ KPLB za energetska oskrbo bodočih načrtovanih stavb JZ KPLB (ali drugih) je ključno upoštevati kakovost same surovine, saj vrednotenja vzorcev mrve kažejo, da je vsebnost vlage glavni dejavnik primernosti. Vlažni vzorci mrve z > 70 % vlage niso primerni za sežiganje ali stiskanje, medtem ko predhodno posušena biomasa z vsebnostjo okoli 10 % izkazuje ustrezno kurilno vrednost/nizko vsebnost pepela, kar jo uvršča med primerne energetske surovine, primerljive s peleti/briketi. Sestava C, H, O, N in S potrjuje lastnosti ligno-celulozne surovine, nizke vsebnosti dušika, žvepla in različnih težkih kovin pa zmanjšujejo tveganje za rjavenje, nastanek strupenih izpustov ter onesnaženje (pepela), kar omogoča (varno/trajnostno) rabo.

Pri načrtovanju je treba upoštevati sestavo anorganskih snovi, zlasti vseh kovin 1. skupine, kalcija, magnezija, silicija in fosforja, ki vplivajo na samo tališče pepela, tvorbo oblog peči in žilindranje v kuriščih ali so-proizvodnih enotah izrabe. Izsledki kažejo, da so vsebnosti teh snovi nizke do zmerne, kar zmanjšuje tveganja za morebitne izvedbene težave, obratovalne motnje in pogoste zaustavitve. Prisotnost Cl je majhna, kar zmanjšuje učinek neželenega rjavenja, nizke vsebnosti prisotnih težkih kovin pa ne predstavljajo tveganja za izpuste ali rabo pridobljenega pepela v omejene kmetijske namene. Kalij/natrij sicer lahko reagirata s silicijem/tvorita silikate, vendar nizke vsebnosti/obratni vpliv kalcija/magnezija omogočata rabo, prav tako pa prisotnost P prispeva k (možni) ponovni uporabi pepela kot hranila za tla.

Gospodarnost izvedbe projekta temelji na ustrezni predpripravi biomase, ki lahko vključuje sušenje, mletje in stiskanje, saj se s tem izboljšajo kurilna vrednost, sestavna enovitost in lažje rokovanje z gorivom, kar omogoča bolj učinkovito rabo v obstoječih tržnih kotlih ali so-prirejenih proizvodnih enotah. Izdelava različnih vzorcev, peletov in bio-ogljja iz travinja JZ KPLB kaže, da je mogoče doseči visoke kurilne vrednosti 15–20 MJ/kg brez stiskanja, po njem in do 30 MJ/kg pri bio-ogljju, kar potrjuje energetska primernost surovine, hkrati pa nizke vrednosti vlage, nizka vsebnost različnih strupenih kovin in ponovljiva sestava pepela zagotavljajo dolgoročno vzdržnost obratovanja, zelo majhen vpliv na okolje in samozadostnost pri toploti, druge surovinske izrabe pa so možne, a verjetno ne prvenstvene.

Pri načrtovanju je nujno upoštevati vse evropske trajnostne zahteve, zlasti Direktivo (EU) 2023/2413 Evropskega Parlamenta in Sveta (RED III), ki določa meje dovoljenih izpustov, trajnost uporabljene biomase in prepoved prekomerne rabe zaščitene travnišč (https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302413).

Na podlagi izvedene preliminarne ekonomske analize je tudi mogoče zaključiti, da ima energetska izraba travne biomase z območja KPLB realen tehnični in ekonomski potencial, vendar je njena upravičenost izrazito odvisna od razpoložljivosti surovine, stabilnosti dobavne verige ter stopnje izkoriščenosti sistema. Rezultati kažejo, da je proizvodna cena toplote konkurenčna drugim tehnologijam že na interni ravni, ob upoštevanju dodatnih stroškov pa ostaja primerljiva z alternativnimi rešitvami. Kljub temu specifične lastnosti goriva, predvsem z vidika emisij in obnašanja pepela, predstavljajo tehnične izzive, ki zahtevajo ustrezno izbiro in dimenzioniranje tehnologije. Izvedena analiza zato potrjuje smiselnost nadaljnega razvoja projekta, pri čemer je za sprejem investicijske odločitve nujna podrobnejša tehnično-ekonomska obravnava v sodelovanju z dobavitelji tehnologije in ob upoštevanju realnih obratovalnih pogojev ter razmišljanje v smeri povečevanja količin travinja ter optimizacije cene priprave surovine, kar bi lahko znižalo enostavno dobo vračanja na manj kot 14 let. V kolikor se uvede pred-obdelava surovine s peletiranjem ali briketiranjem, se enostavne dobe vračanja znatno podaljšajo, predvsem iz naslova bistvenega povečanja obratovalnih stroškov. To odraža značilnost večjih sistemov, kjer je nujna optimizacija stroška goriva, ki v obratovalnih stroških predstavlja največji delež. V kolikor so tehnične možnosti zagotovljene je peletiranje in briketiranje v trenutnem analiziranem primeru stroškovno bistveno manj optimalno kot bale, ima pa pomembno prednost – razširi nabor možnih dobaviteljev/proizvajalcev sistema za energetske rabo ter skoraj v celoti avtomatizira delovanje.