



# Usporedba dobiti energije kogeneracijskoga postrojenja i proizvodnje drvnih peleta

Zdravko Pandur, Marin Bačić, Kruno Lepoglavec

## Nacrtač – Abstract

U radu se prikazuje proces proizvodnje toplinske i električne energije u kogeneracijskom postrojenju te proces proizvodnje drvnih peleta. Cilj je ovoga rada analizirati dobit energije (EROI) od energenata koji nastaju kao proizvod sadržan u toplinskoj i električnoj energiji te energiji koja je sadržana u drvnim peletima. Prema dobivenim rezultatima proizvodnja samo električne energije iz drvene biomase u kogeneracijskom postrojenju nije isplativa s energijske točke gledišta jer je dobivena električna energija tek 1,43 puta veća od uložene energije drva ( $EROI_{el} = 1,43 : 1$ ). Dobivena je toplinska energija 4,38 puta veća od uložene energije drva ( $EROI_{topl} = 4,38 : 1$ ), dok je dobivena energija kod proizvedenih drvnih peleta 4,81 puta veća od uložene energije drva ( $EROI_{pel} = 4,81 : 1$ ). Takav dobitak energije u proizvodnji toplinske energije u kogeneracijskom postrojenju i drvnih peleta energijski je isplativ, ali je višestruko nepovoljniji u odnosu na upotrebu drvene sječke, a posebice u odnosu na upotrebu kratko cijepanoga drva u kotlovnima za dobivanje samo toplinske energije. Drvo je obnovljiv izvor energije i njegovom ekonomičnom upotrebom može se stvoriti značajan energijski dobitak, ali zbog trenda upotrebe obnovljivih izvora energije i sve veće potrebe za električnom energijom takav je način dobivanja električne energije financijski isplativ, iako on nije opravdan s gledišta energijske isplativosti.

*Ključne riječi:* EROI, toplinska energija, električna energija, drveni peleti, drvena sječka, energijska isplativost

## 1. Uvod – Introduction

Posljednjih godina sve se više govori o zelenim i obnovljivim izvorima energije koji bi trebali ne samo zamijeniti glavninu današnjih izvora energije već i sačuvati okoliš, odnosno smanjiti učinak stakleničkih plinova (Goleš 2014). Glavni izvori energije još uvijek su neobnovljivi dobiveni iz fosilnih goriva – ugljena, nafte i naftnih derivata, prirodnoga plina te nuklearna energija. Osnovni su nedostaci neobnovljivih izvora energije što oni onečišćuju okoliš i što je njihova količina ograničena. Najviše obnovljivih izvora nalazi se u energiji Sunca, vjetra i vode, a jedan manji dio dobiva se iz biomase (brojnih i raznovrsnih proizvoda iz biljnoga i životinjskoga svijeta) odnosno ostataka iz poljoprivredne i šumarske proizvodnje (Raguzin 2011). Biomasa je najsloženiji oblik obnovljive energije. Kao sirovina koja sadrži šumsku i poljoprivrednu tvar, biomasa nastaje tijekom proizvodnih procesa u različitim industrijama ili od otpada, npr. komunalnoga otpada, pročišćavanjem

voda i kanalizacijskoga mulja, a može se i uzgajati u obliku energetske nasade (Posavec i dr. 2016). Za konačni proizvod – energiju biomasa može poslužiti kao obnovljiv izvor za proizvodnju električne energije, toplinske energije i goriva za transport. Često se naziv *bioenergija* upotrebljava za energetske sustave na biomasu koji služe za proizvodnju topline i/ili struje, a naziv *biogoriva* za tekuća ili plinovita goriva za transport. Bioenergija također može biti upotrijebljena za apsorpcijske hladnjake, dakle za hlađenje, a ujedno se može smatrati i oblikom Sunčeve energije koja je pohranjena fotosintezom u biljkama (Šegon i dr. 2014).

Šumarska struka gospodari određenom količinom obnovljivih izvora energije u obliku drvene biomase u koju se mogu svrstati sve vrste i oblici energijskoga drva prema normi HRN EN 14961-1:2010 (drvena sječka, iver, kora, svežnjevi, drvena prašina, peleti, briketi ...). Šumska se biomasa sastoji od ostataka i otpada koji nastaju tijekom redovitoga gospodarenja šumama. Konačni se proizvod izrađuje pre-

tvaranjem šumskih ostataka kemijskim ili drugim fizikalnim procesima. Šumska biomasa koja se upotrebljava u sustavima za grijanje varira od ogrjevnoga drva do raznih proizvoda dobivenih obradom drva i drvnih ostataka poput briketa, peleta i drvene sječke. Biomasa iz drvene industrije ostaci su piljenja, drobljenja i sl. i može biti upotrijebljena kao gorivo u vlastitim kotlovima ili kao sirovina za proizvodnju briketa, peleta i slično. Takva je biomasa mnogo bolja od šumske biomase jer ima manji postotak mokrine drva. S ekonomskoga gledišta također ima prednost zbog manjih operativnih troškova koji su uključeni u industriji kao trošak održavanja i gospodarenja otpadom (Šegon i dr. 2014).

Razvoj upotrebe biomase trebao bi slijediti neka osnovna načela, poput visoke učinkovitosti konverzije, konkurentnosti i održivosti. Iskustvo dokazuje da upotreba biomase u proizvodnji topline na najbolji način udovoljava navedenim načelima. Biomasa za proizvodnju topline može se upotrijebiti u malim jedinicama, poput pojedinačnih kuća, u projektima ugovorne prodaje topline, za područne toplane i u industriji. U svakom slučaju, opskrba visokokvalitetnom biomasom, bez obzira na to radi li se o ogrjevnom drvu, drvnoj sječki ili prerađenom drvu, od ključne je važnosti za brz rast toga tržišta (Plevnik 2015).

Biomasa u svom ciklusu od proizvodnje do njezine upotrebe za energetske svrhe ima nulti nivo proizvodnje CO<sub>2</sub>, odnosno ima zatvoreni ciklus kruženja ugljika. Količina CO<sub>2</sub> koja nastaje pri preradi biomase u energetske svrhe putem fotosinteze i Sunčeve energije ponovno se apsorbira u rastu sirovina iz kojih biomasa nastaje. Energija se u sirovini (biljkama, drveću) nalazi u kemijskom obliku i ta se energija oslobađa pri upotrebi biomase u energetske svrhe, bilo prilikom prirodnoga raspadanja ili prilikom izgaranja. Uobičajeno je da se biomasa smatra CO<sub>2</sub> neutralnim gorivom, ali pri njezinoj pretvorbi u energetske svrhe nastaju dodatne količine CO<sub>2</sub> zbog upotrebe fosilnih goriva u transportu, obradi i uzgoju biomase (Pandur 2013). Iako je biomasa CO<sub>2</sub> neutralno gorivo, količina stakleničkih plinova koja se smanji u atmosferi upotrebom biomase u odnosu na fosilna goriva ovisi o učinkovitosti pretvorbe biomase u krajnji energent kojim se koriste korisnici. Izgorijevanje se smatra najučestalijim načinom dobivanja bioenergije. Izgorijevanje biomase odnosno oslobađanje toplinske energije moguće je iskoristiti u proizvodnji električne energije ili izravno za grijanje. Postoji i postupak koji se naziva plinofikacija, a kojim se biomasa pretvara u plin, koji zatim služi izravno kao plin ili također za dobivanje drugih

oblika energije (električna energija). Tradicionalnom fosilnomu dizelskomu gorivu ekvivalent je biodizel, koji je moguće dobiti iz ekstrahiranih ulja (u raznim oblicima biomase) (Filipović 2018).

### 1.1 Energijski povrat uloženoga – *Energy return on investment (EROI)*

Povrat je energije u odnosu na uloženu energiju (EROI) odnos dobivene energije iz procesa proizvodnje energije i energije koja je potrebna za izdavanje, rast i sl. u novi oblik energije. EROI je najčešće primjenjivan u odnosima energije potrebne za traženje i proizvodnju naftnih destilata ili u procesima uzgoja i prerade biomase (kukuruz, šećerna trska i sl.) te proizvodnje biogoriva (Hall i dr. 2009).

Odnos dobivenoga i uloženoga u proizvodnji energije ključan je čimbenik održive globalne energetske opskrbe. Prema zakonima fizike energija ne može biti proizvedena a da se pri tom dio energije ne utroši, a omjeri u kojima se to događa ključni su pokazatelj učinkovitosti procesa u kojem se proizvodnja odvija (Biočina 2010).

Pojam EROI se ne smije poistovjećivati s korisnošću pretvorbe, što se često sreće u literaturi, npr. proizvodnja (pretvorba) jednoga tipa goriva u drugi (proizvodnja benzina iz sirove nafte, ili proizvodnja električne energije iz dizelskoga goriva). EROI se često naziva i kao procjena energetske dobiti, energijska bilanca ili kao analiza neto energije.

Zagovornici EROI-a vjeruju da analiza neto energije nudi mogućnost realnoga sagledavanja prednosti i nedostataka proizvodnje određenoga tipa goriva te daje smjernice za mogućnosti proizvodnje i tržišta energenata u budućnosti. Također se napominje da EROI sam po sebi nije nužno dovoljan kriterij za prosudbu, iako ima naklonost većine, pogotovo u slučaju kada jedan energent ima mnogo veći ili manji EROI u odnosu na neki drugi. Osim toga, važno je uzeti u obzir sadašnju i buduću potencijalnu potrebu za određenim energentom te moguću promjenu EROI-a u slučaju povećane potražnje određenoga energenta (Pandur 2013).

EROI se jednostavno izračunava pomoću ovoga izraza (Murphy i Hall 2010):

$$\text{EROI} = \frac{\text{dobivena energija}}{\text{uložena energija}}$$

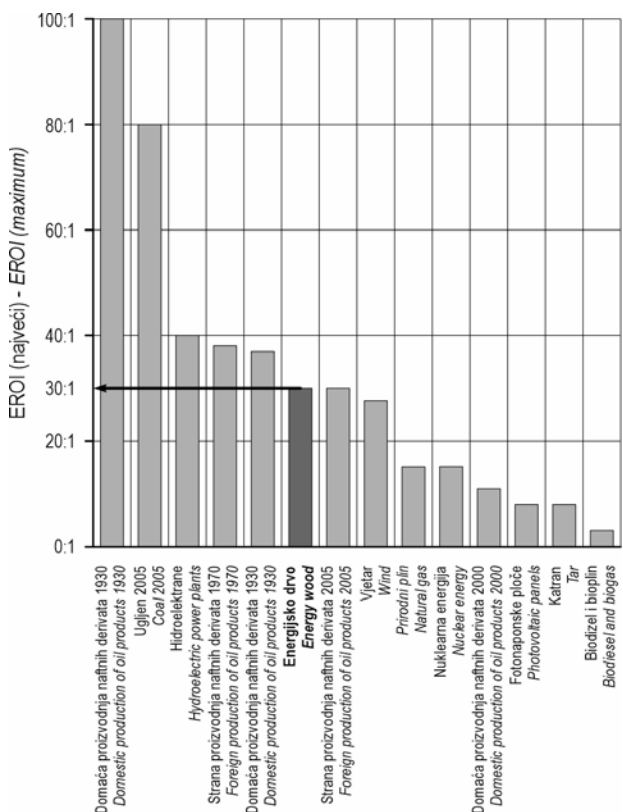
Brojnik i nazivnik u istim su mjernim jedinicama pa je dobiveni rezultat bez dimenzijskih veličina, npr. 30 : 1, koji se izražava kao »trideset prema

jedan«. To znači da smo u procesu proizvodnje npr. drvnoga iverja energijske vrijednosti 30 J (džula) uložili 1 J energije počevši od energije potrebne za proizvodnju strojeva korištenih u procesu pridobivanja drvene sječke, pogonskoga goriva za strojeve i naravno energije čovjeka uložene u cijeli proces.

Opći kriterij koji se primjenjuje u aktualnoj raspravi o EROI-u i o proizvodnji energije jest traženje odgovora na pitanje je li energija koja se vraća kao gorivo veća od energije uložene u dobivanje toga goriva, odnosno je li EROI veći od 1,0 : 1,0. Ako je dobivena energija veća od uložene, tada je to glavni argument da taj projekt proizvodnje energenta treba napraviti, ili obrnuto, ako je uložena energija veća od dobivene, treba ga odbaciti. Tako Farrell i dr. (2006.) iz sveobuhvatnih istraživanja navode da se višak energije (*energy surplus*), odnosno EROI u proizvodnji etanola od kukuruza kreće u rasponu od 1,2 do 1,6 jedinica dobivene za svaku uloženu jedinicu energije. Daljnji aspekti nalažu da se uzme u obzir da u takvoj proizvodnji sva dobivena energija nije sadržana samo u bioetanolu, već i u nusproizvodu koji se mogu upotrijebiti kao hrana za stoku. S druge strane, uložena energija ne uzima u obzir osiromašenje tla hranivima u proizvodnji kukuruza. Stoga postoji mišljenje da većina dobivenih vrijednosti EROI-a, uključujući i taj navedeni primjer, trenutačno ima veći odnos dobivene i uložene energije, ali kad bi se uzeli u obzir svi parametri, taj bi se odnos smanjio (Hall i dr. 2009).

Isti autori navode da je u SAD-u i danas energijski dobitak iz fosilnih goriva od 80 : 1 za ugljen, odnosno do 11–18 : 1 za plin i naftu iz domaćih nalazišta. Na svjetskoj razini taj odnos za naftu i plin iznosi 20 : 1, što u prenesenom znači da je jedna litra nafte potrebna za dobivanje 20 litara koje se doprema do društva (npr. do benzinske crpke). Takav energijski dobitak od 20 : 1 dovoljan je za pokretanje i napredak ljudske civilizacije te veliko industrijsko širenje. Dio toga energijskoga dobitka služi za daljnje dobivanje iste energije, dok jedan dio služi i u poljoprivredi pa tako nastaje golem dobitak energije u obliku hrane dopremljene do društva. To omogućuje ljudima i kapitalu da stvaraju energijski dobitak izvan energetskega sektora, odnosno takav velik energetski dobitak omogućuje razvoj naše civilizacije sa svih gledišta, i dobrih i loših. Loše su vijesti da je nedostatak nafte započeo nakon njezina prvoga otkrića i korištenja, dok je istoj toj nafti bilo potrebno 100 i više milijuna godina za nastanak. Zbog smanjivanja zalih nafta njezina je cijena počela rasti i sve se više nafte troši za traženje novih nalazišta. Samim time njezin se energijski dobitak smanjuje i društvo tra-

ži načine u razvoju tehnologije da je nadomjesti, pa se može reći da su nedostatak nafte i razvoj novih tehnologija u stalnoj utrci s vremenom. EROI je u SAD-u tijekom 1930-ih za naftu iznosio 100 : 1, 1970-ih 30 : 1, 2000-ih 11–18 : 1, a za svijet oko 20 : 1.



Slika 1. Vrijednost EROI-a kod nekih procesa dobivanja energije (Izvor: Hall i Day 2009)

Fig. 1 EROI value for some processes of energy production (Source: Hall, C.A.S., Day, J.W. 2009)

Prema slici 1 odnos dobivene i uložene energije za energijsko drvo iznosi 30 : 1, što znači da je jedna litra nafte potrebna da bi se iz energijskoga drva (biomase) dobila količina energije ekvivalentna energiji 30 litara nafte. Ali ako se doda emisija CO<sub>2</sub>, pri čemu se smatra da je pri izgorijevanju biomase emisija CO<sub>2</sub> jednaka nuli jer ga biomasa tijekom rasta veže u procesu fotosinteze, energijsko drvo u povoljnijem odnosu prema fosilnim gorivima (Pašičko i dr. 2009).

## 1.2 Kogeneracijsko postrojenje – Cogeneration plant

Kogeneracija ili suproizvodnja (engl. *Combined Heat and Power – CHP*) istodobna je proizvodnja dva korisnih oblika energije (električne i toplinske)

u jedinstvenom procesu. Toplinska energija koja ostaje neiskorištena u konvencionalnoj elektrani (ili se ispušta u okoliš uz negativne učinke), upotrebljava se za potrebe u raznim proizvodnim procesima ili, što je češći slučaj, za grijanje pojedinačnih građevina ili čak cijelih naselja. Toplinska energija može služiti za proizvodnju pare, zagrijavanje vode ili zraka. Ukupna učinkovitost kogeneracije iznosi od 70 do 85 % (od 27 do 45 % električne energije i od 40 do 50 % toplinske energije), za razliku od konvencionalnih elektrana u kojima je ukupna učinkovitost od 30 do 51 % (električne energije). Uz to su smanjeni gubici u mreži, zagušenja u prijenosu i štetan učinak na okoliš, a povećana je kvaliteta napona i pouzdanost opskrbe električnom energijom (Goleš 2014).

U procesu iskorištavanja drvene biomase za energiju proizvodnja se drvene sječke pokazala najprihvatljivijom opcijom. Porast upotrebe drvene sječke u EU-u i promjene zakonskoga okvira u RH potaknuli su razvoj tržišta energijskim drvom, čime se stvara potpuno nova gospodarska djelatnost koja generira nova radna mjesta. Otvaranje novih radnih mjesta i povećanje energetske neovisnosti RH dovoljni su razlozi da se ulaže u razvoj i istraživanje mogućnosti uporabe biomase (Gavran 2018). Osnovna ideja nekih projekata gradnje kogeneracijskoga postrojenja na šumsku biomasu (sječku) u RH za proizvodnju električne energije za isporuku u javnu elektroenergetsku mrežu i toplinske energije za pokrivanje potreba proizvodnje peleta pokrenuta je zbog poticajnih okvira za takva ulaganja. Radi se o poticajnom okviru koji je započeo donošenjem odgovarajućih predzakonskih propisa 2007. godine.

Kogeneracijska su se postrojenja dugo razvijala u energetske intenzivnoj industriji u kojoj postoje ujednačene potrebe za toplinskom i električnom energijom. Najčešći kogeneracijski procesi za takve primjene tradicionalno su parnoturbinski ciklus koji omogućuje upotrebu otpadne pare za procesnu toplinu. Intenzivan razvoj u posljednja dva desetljeća omogućio je razvitak velikoga broja dostupne opreme, stoga je danas primjena različitih kogeneracijskih postrojenja pogodna za različite sustave (Raguzin 2011).

Osnovne su cjeline svakoga kogeneracijskoga sustava ove (Raguzin 2011):

- ⇒ uređaj za dobavu i pripremu goriva
- ⇒ postrojenje za proizvodnju električne energije
- ⇒ sustav za korištenje otpadnom toplinom
- ⇒ sustav ispušnih (dimnih) plinova
- ⇒ upravljački i kontrolni sustav.

Kogeneracijsko se postrojenje, u pogledu priključka i pogona u odnosu na distribucijsku mrežu, najčešće izvodi za paralelan rad s električnom distributivnom mrežom, podmirujući pritom vlastite potrebe za električnom energijom, pri čemu se mogući viškovi predaju u vanjsku mrežu. Kogeneracijsko postrojenje može raditi i u odvojenom (otočnom) pogonu, kada isključivo podmiruje potrošnju električne energije na objektu (kompleksu). Moguće su i kombinacije paralelnoga pogona uz mogućnost odvojenoga pogona (Raguzin 2011).

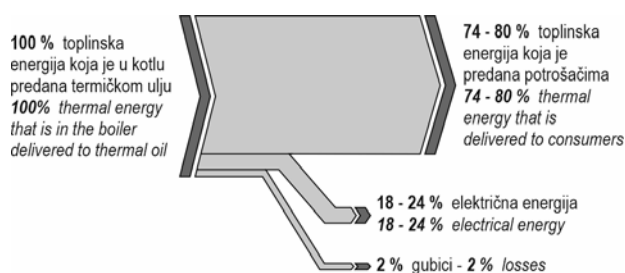
Cilj je ovoga rada analiza dobiti energije kogeneracijskoga postrojenja koje upotrebljava drvenu sirovinu za proizvodnju električne energije (za isporuku u javnu elektroenergetsku mrežu) i toplinske energije (za pokrivanje potreba u procesu proizvodnje drvnih peleta).

## 2. Materijal i metode – *Material and methods*

### 2.1. Kogeneracijsko postrojenje Lika Energo Eko d.o.o. – *Cogeneration plant Lika Energo Eko Ltd.*

Kogeneracijsko postrojenje na biomasu Lika Energo Eko d.o.o. u Udbini izgrađeno je potkraj 2011. godine, a u punom je pogonu od svibnja 2012. godine. To postrojenje ima status povlaštenoga proizvođača električne energije iz obnovljivih izvora. Najisplativijim, prema njihovim početnim istraživanjima, pokazalo se ulaganje u postrojenje za proizvodnju električne snage do 1 MW. U skladu s tim donesena je odluka o gradnji kogeneracijskoga postrojenja električne snage 0,95 MW i toplinskoga učinka 4,1 MW uz pogon za proizvodnju drvnih peleta.

Uz kogeneracijsko postrojenje tvrtka Moderator d.o.o. izgradila je i postrojenje za proizvodnju peleta kapaciteta 5 t/h. Toplinska energija iz kogeneracijskoga postrojenja energetska je osnova za proizvodnju peleta, dok zadovoljavanje sirovinskom osnovom tvrtka postiže drvnim sortimentima iz okolnih šumarija.



**Slika 2.** Pojednostavljena shema tokova energije u kogeneracijskom postrojenju

**Fig. 2** Simplified scheme of energy flows in a cogeneration plant

Bruto električna učinkovitost u takvim oblicima postrojenja iznosi do 24 %, dok opća energetska učinkovitost iznosi do 98 %.

## 2.2 Priprema i obrada šumske biomase – Preparation and processing of forest biomass

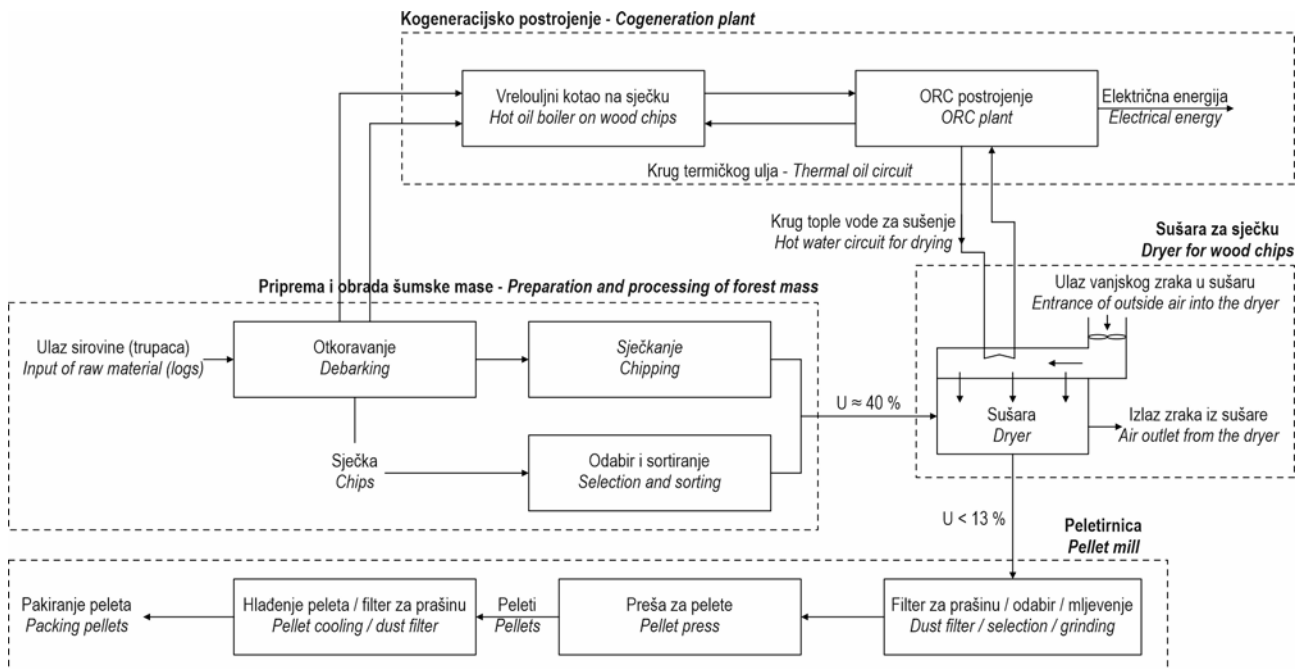
Godišnja je potrošnja postrojenja Lika Energo Eko d.o.o. oko 73 000 tona drvene sirovine. Na jednoj strani pogona obavlja se iveranje radi dobivanja iverja koje služi izravno kao energent u kotlu kogeneracijskoga postrojenja, dok se na suprotnoj strani pogona otkoravaju trupci nakon čega slijedi iveranje. Kora koja se dobije otkoravanjem služi kao energent u kogeneracijskom postrojenju, a trupci bez kore iveraju se radi dobivanja drvene sječke kao sirovine za proizvodnju peleta. Takva se drvena sječka bez kore prosušuje, dodatno usitnjava i otprašuje kako bi bila pogodna za proizvodnju peleta.

## 2.3 Vrelouljni kotao i ORC postrojenje – Hot oil boiler and ORC plant

Kao što je vidljivo na pojednostavljenoj shemi procesa u kogeneracijskom postrojenju na šumsku biomasu (slika 3), sustav se sastoji od dviju glavnih komponenti: vrelouljni kotao na sječku i ORC postrojenje.

Toplina proizvedena u vrelouljnom kotlu na biomasu prenosi se u ORC modul preko kruga ter-

mičkoga ulja. Upotreba termičkoga ulja kao medija za prijenos topline omogućuje rad kotla s nižim radnim tlakom (za razliku od parnih kotlova) i bez promjene faza radnoga medija (isparavanje). ORC postrojenje proizvodi električnu energiju i nisko-temperaturnu toplinu u zatvorenom termodinamičkom ciklusu prema organskom Rankinovu ciklusu (ORC) (Plevnik 2012). Vrelouljni je kotao potpuno automatizirana jedinica za zagrijavanje termičkoga ulja s kontroliranom cirkulacijom. Termičko ulje kao medij za prijenos toplinske energije ostvaruje visoku radnu temperaturu (do 320 °C), uz niski radni tlak (do 10 bara). ORC kao tehnologija uspješno se primjenjuje za mala kogeneracijska postrojenja na biomasu nazivne snage između 200 kW pa preko 2 MW, te se kao takva pokazuju odličnim rješenjem za manje lokalne zajednice bogate biomasom bilo kojega oblika. ORC je varijacija Rankinova ciklusa u kojem se umjesto vode kao radni medij upotrebljava organski fluid (ulje). Zbog relativno niske temperature isparavanja organskoga fluida moguće je iskorištavanje niskoentalpijskih izvora topline (biomasa, otpadna toplina, geotermalna i Sunčeva energija). ORC tehnologija može pretvoriti toplinsku energiju relativno niske temperature u električnu energiju i može imati važnu ulogu u povećanju energetske učinkovitosti novih ili postojećih aplikacija (Čehajić i dr. 2014, Hinić 2020).



**Slika 3.** Pojednostavljena shema procesa u kogeneracijskom postrojenju na šumsku biomasu (Lika Energo Eko d.o.o. i pogon za proizvodnju peleta Moderator d.o.o.)

**Fig. 3** Simplified scheme of the process in a biomass-fired cogeneration plant (Lika Energo Eko Ltd. and Moderator Ltd. pellet production plant)

Oblik i konstrukciju turbogeneratora, koji je instaliran u poduzeću Lika Energo Eko d.o.o., projektira i razvija tvrtka Turboden (Italija). Standardne jedinice koje ta tvrtka proizvodi imaju snagu od 200 kW do 10 MW (uz soluciju na zahtjev kupca do 15 MW).

## 2.4 Proizvodnja drvnih peleta – Wood pellet production

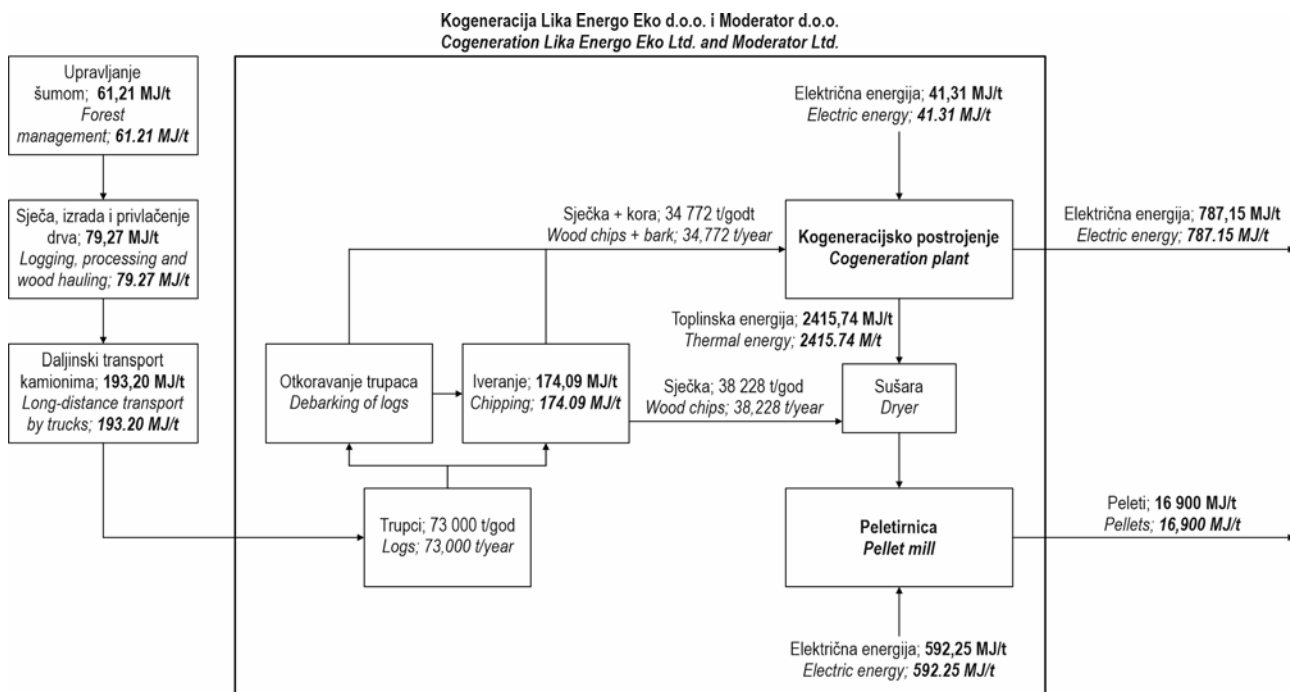
Početak proizvodnje drvnih peleta obuhvaća proces već spomenutoga otkoravanja trupaca kako bi se odvojila nečistoća (kora) koja ne ulazi u sastav peleta. Trupci se bez kore iveraju, a dobivena se sječka prevozi do sušare. U sušari se koristi dio topline iz kogeneracijskoga postrojenja kako bi se udio vode u sječki smanjio s 40 – 60 % na približno 10 %. Nakon sušenja drvna sječka ide na doradu pomoću postupka finoga mljevenja te se transportira do matrice s valjcima za prešanje peleta. U tom dijelu postrojenja dodaje se vodena para koja služi kao pripomoć drvnomu škrobu u sječki radi povezivanja drvene tvari. Nakon prešanja dobiveni proizvod, tj. drveni pelet, ponovno se prevozi, ovaj put na hlađenje, kako bi se u što kraćem roku počeo pakirati u vreće od 15 kg ili prema posebnim zahtjevima u *big-bag* vreće od 1 tone (Tomljanović 2014).

Drvni se pelet svrstava u obnovljive izvore energije. Svojevite je peleta da izgorijevaju čišće od drva, što znači i manji udio pepela, a također zahtijevaju i puno manje prostornoga volumena (mali udio vlage), što ih čini izuzetno pogodnima za transport i skladištenje.

## 3. Rezultati i rasprava – Results and discussion

Na temelju prikupljenih osnovnih podataka o utrošku i proizvodnji energije u kogeneracijskom postrojenju Lika Energo Eko d.o.o. te podataka o proizvodnji drvene mase kao energenta potrebnoga za rad kogeneracije analizirana je dobit energije u proizvodnji električne i toplinske energije izravno iz kogeneracije te energije sadržane u proizvedenom peletu poduzeća Moderator d.o.o. koje otkupljuje svu toplinsku energiju proizvedenu u poduzeću Lika Energo Eko d.o.o.

Oba spomenuta poduzeća posluju na istom mjestu u Udbini i godišnja količina drvene mase koja im je potrebna za proizvodnju iznosi 73 000 tona. Ta je količina sadržana u obliku višemetarskoga ogrjevnoga drva, odnosno sortimenata koji svojom tehničkom kvalitetom ne mogu zadovoljiti standarde pilanske industrije. Vrsta drva koja se koristi u po-



Slika 4. Shematski prikaz toka energije u kogeneracijskom postrojenju Lika Energo Eko d.o.o. i u poduzeću Moderator d.o.o.

Fig. 4 Schematic representation of energy flow in cogeneration plant Lika Energo Eko Ltd. and Moderator Ltd. company

dužecima su sortimenti obične bukve i obične jele/smreke u omjeru 2 : 1.

Utrošak energije za proizvodnju, u konačnici, električne energije odnosno toplinske energije za proizvodnju peleta u ovom se slučaju promatra od samoga početka, odnosno šume gdje se proizvodi drvena masa. Prikaz energije (uložene i dobivene) po svim prikazanim sastavnicama izražen je u MJ/t (megadžul po toni).

Kao što je prikazano na shematskoj slici 4, u izračun je uložene energije uključena i energija utrošena za upravljanje/gospodarenje šumom u iznosu od 61,21 MJ/t. To je iznos koji u sebi sadrži svu onu energiju koja se utroši za uobičajeno gospodarenje šumom, što znači da je u tom iznosu sadržana energija utrošena u poslove uzgojnih radova u šumi, zaštite šume, gradnje i održavanja prometnica u šumi te energija sredstava za prijevoz ljudi (osobni automobili, kombi vozila). Taj je iznos preuzet iz istraživanja koje provodi Pandur (2013). Prema tomu autoru navedeni su i iznosi utroška energije za sječu, izradu i privlačenje drva (79,27 MJ/t) te daljinski transport kamionskim skupovima u krugu do 50 km (193,2 MJ/t).

Kao što je već spomenuto, ukupna godišnja količina koja se kamionskim skupovima dopremi na pomoćno stovarište kogeneracije i peletare iznosi 73 000 tona. Jedan dio te količine ide na otkoravanje (za proizvodnju peleta ne upotrebljava se kora, već se kora šalje u kotao kogeneracije). Radi se o količini od 13 772 tone kore na godišnjoj razini koja se pribraja količini drva u iznosu 21 000 tona, što ukupno daje količinu od 34 772 tone godišnje potrebe kogeneracije za proizvodnju energije. Ostatak količine od 38 228 tona služi za proizvodnju peleta (Lovrak 2013).

U proizvodnji peleta trupci se bez kore iveraju samohodnim dizelskim iveračima i iver se dodatno usitnjava u mlinu. Tako usitnjena drvena masa nakon toga ide u trakastu sušaru koja svu toplinsku energiju dobiva iz kogeneracijskoga postrojenja. Prije prešanja osušena drvena masa (udio je vode ispod 13 %) ide na otprašivanje/selekciju/rafiniranje. Proizvedeni peleti prije pakiranja prolaze hlađenje i otprašivanje. Ukupna količina električne energije koja se upotrebljava u pogonu peletare iznosi 592,25 MJ/t (Lovrak 2013). Sve pogonske sastavnice peletare uzimaju električnu energiju iz strujne mreže, osim iverača koji upotrebljava dizelsko pogonsko gorivo za koji Pandur (2013) navodi jedinični utrošak energije u iznosu 174,09 MJ/t.

Za pogon kotla kogeneracije uzima se kora dobivena otkoravanjem i drvni sortimenti koji se iveraju

samohodnim dizelskim iveračima. Ukupna potrebna količina drvene mase na godišnjoj razini iznosi 34 772 tone. Za svoj rad kogeneracija koristi električnu energiju u iznosu od 41,31 MJ/t (Lovrak 2013). Jedinični utrošak energije iverača iznosi 174,09 MJ/t (Pandur 2013).

**Tablica 1.** EROI kogeneracijskoga postrojenja i peletare

**Table 1** EROI of cogeneration plant and pellet plant

Proizvod Product	Energetska vrijednost, MJ/t Energy value, MJ/t		EROI
	Dobivena Gained	Uložena Invested	
Električna energija Electrical energy	787,15	551,08	1,43
Toplinska energija Heat energy	2415,74	551,08	4,38
Pelet Pellet	16 900	3514,76	4,81
Kogeneracija ukupno (električna energija + pelet) Cogeneration total (electrical energy + pellet)	17 687,15	3556,07	4,97

Konačni proizvodi kogeneracijskoga postrojenja Lika Energo Eko d.o.o. su električna energija u iznosu od 787,15 MJ/t koju kao povlaštenu proizvođač prodaje državnomu poduzeću Hrvatska elektroprivreda d.d. i toplinska energija u iznosu od 2 415,74 MJ/t koju prodaje poduzeću Moderator d.o.o. (tablica 1). Električna i toplinska energija dobivene su na temelju potrošnje drvene sirovine u iznosu od 34 772 t/godišnje. Ukupna energija potrebna za proizvodnju električne i toplinske energije kogeneracijskoga postrojenja (uložena energija) iznosi 551,08 MJ/t (prema shemi na slici 3). Odnos dobivene i uložene energije – EROI u proizvodnji električne energije iznosi samo 1,43, što je vrlo mala energetska dobit. Mnogi autori (Farell i dr. 2006, Hall i dr. 2009, Murphy i Hall, 2010) navode da kod iznosa manjega od dva smisao proizvodnje energije postaje upitan.

Odnos dobivene i uložene energije – EROI u proizvodnji toplinske energije u istraživanom kogeneracijskom postrojenju iznosi 4,38, dok ukupno gledajući kogeneracijsko postrojenje s proizvedenom i električnom i toplinskom energijom taj odnos dobivene i uložene energije iznosi 4,97.

U proizvodnji peleta odnos dobivene i uložene energije iznosi 4,81. Taj iznos približno odgovara vrijednosti od 4,43 koju u svojoj studiji navode Danon i Furtula (2015). Furtula (2014) na primjeru proizvodnje peleta dobivanjem toplinske energije iz kogeneracijskoga postrojenja zaključuje da kod udjela vode u drvnjoj sječki u iznosu od 20 % odnos



dobivene i uložene energije iznosi preko 7. Također Furtula i dr. (2017) u opsežnom istraživanju navode iznos od 1,9, pri čemu napominju da ključnu ulogu u konačnom iznosu uložene energije ima udio vode u drvnoj sječki za čije je isparavanje potrebna velika količina toplinske energije.

Pandur (2013) napominje da je energetska vrijednost drvene sječke oko 25 puta veća od energije utrošene za njezinu proizvodnju i zbog takva odnosa dobivene i uložene energije drvna se sječka smatra okolišno prihvatljivim izvorom energije. Prema ovom istraživanju odnos dobivene i uložene energije u proizvodnji električne i toplinske energije (zajedno) u kogeneracijskom postrojenju višestruko je manji (5:1) pa se postavlja pitanje je li takav način proizvodnje energije energijski isplativ.

U ovom radu kod jediničnoga utroška energije nije uključena energija potrebna za izgradnju i dopremu strojeva kogeneracijskoga postrojenja (kotao s pripadajućom opremom i ORC postrojenje s pripadajućom opremom) te peletare (mlin, sušara, sustav za otprašivanje, prešanje, hlađenje i pakiranje). U izračun je uključena samo električna energija koju ta postrojenja upotrebljavaju u proizvodnji.

#### 4. Zaključci – Conclusions

Prema rezultatima dobivenim u ovom istraživanju može se zaključiti da je proizvodnja energije (električne i toplinske) u kogeneracijskom postrojenju na granici energijske isplativosti ( $EROI_{uk} = 4,97 : 1$ ).

Samo proizvodnja električne bez korištenja toplinske energije nema opravdanja ( $EROI_{el} = 1,43 : 1$ ), dok je  $EROI_{topl} = 4,38 : 1$ . Na temelju toga potvrđuje se teza da je glavni proizvod u kogeneracijskom postrojenju toplinska energija, dok je električna energija nusprodukt.

Odnos dobivene i uložene energije u proizvodnji peleta također je na granici energijske isplativosti ( $EROI_{pel} = 4,81 : 1$ ). Taj se odnos može povećati isključivo upotrebom prosušene drvene sječke (s udjelom vode ispod 20 %) kojoj je potrebno malo toplinske energije za sušenje.

Kada bi se u izračun uložene energije uključila i energija potrebna za izgradnju i dopremu strojeva kogeneracijskoga postrojenja (kotao s pripadajućom opremom i ORC postrojenje s pripadajućom opremom) te peletare (mlin, sušara, sustav za otprašivanje, prešanje, hlađenje i pakiranje), odnos bi dobivene i uložene energije bio još i manji.

Drvo je obnovljiv izvor energije i njegovim ekonomičnim korištenjem može se stvoriti značajan

energijski dobitak, ali zbog trenda upotrebe obnovljivih izvora energije i sve veće potrebe za električnom energijom takav je način dobivanja električne energije financijski isplativ, iako on nije opravdan s gledišta energijske isplativosti.

#### 5. Literatura – References

- Čehajić, N., S. Halilčević, I. Softić, 2014: Primjena organskog Rankinovog ciklusa (ORC) i prikladni radni fluidi. Tehnički glasnik, 8(3): 229–237.
- Danon, G., M. Furtula, 2015: Contribution to the reduction of GHG emission in the pellet production. Proceedings of 2<sup>nd</sup> International scientific conference 'Wood technology & product design', 2015, Ohrid, Republic of Macedonia, str. 32–43.
- Farrell, A. E., R. J. Pelvin, B. T. Turner, 2006: Ethanol can contribute to energy and environmental goals. Science, 311(5760): 506–508. <https://doi.org/10.1126/science.1121416>
- Filipović, D., 2018: Analiza dobiti energije u kogeneracijskom postrojenju. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, str. 1–27.
- Furtula, M., 2014: The impact of ecological and energy factors on more efficient use of solid wood fuels in Serbia. Doctoral Thesis, University of Belgrade, Faculty of Forestry, 175 str.
- Furtula, M., G. Danon, V. Bajić, D. Lukačev, 2017: Energy consumption and equivalent emission of CO<sub>2</sub> at wood pellets production in Serbia. Thermal Science, 21(5): 1905–1915. <https://doi.org/10.2298/TSCI170220099F>
- Gavran, I., 2018: Potencijal nadzemne biomase klonova topole. Diplomski rad. Šumarski fakultet, Zagreb, 29 str.
- Hall, C. A. S., S. Balogh, D. J. Murphy, 2009: What is the minimum EROI that a sustainable society must have? Energies, 2(1): 25–47. <https://doi.org/10.3390/en20100025>
- Hall, C. A. S., J. W. Day, 2009: Revisiting the Limits to Growth After Peak Oil. American Scientist, 97(3): 230–237. <https://doi.org/10.1511/2009.78.230>
- Hinić, V., 2020: Organski Rankineov ciklus. Završni rad, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet, 30 str.
- Lovrak, Ž., 2013: Kogeneracija Lika Energo Eko d.o.o. 4. Međunarodna energetska konferencija »Drvena biomasa – strateški izazov energetske politike zemalja JIE«, 2. 12. 2013, Zagreb, 23–35.
- Murphy, D. J., C. A. S. Hall, 2010: Year in review – EROI or energy return on (energy) invested. Annals of the New York Academy of Sciences, 1185(1): 102–118. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x>
- Pandur, Z., 2013: Primjena komercijalnog sustava za praćenje rada strojeva u istraživanju izvoženja drva forvarderom. Disertacija, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 312 str.



Plevnik, A., 2012: Završni rad [sic!]. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 36 str.

Plevnik, A., 2015: Bioenergana u prehrambenoj industriji. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 66 str.

Posavec, S., Ž. Zečić, K. Beljan, N. Šimunović, 2016: Izračun profitabilnosti i optimizacija kogeneracijskoga po-

strojenja korištenjem drvne sječke. Nova mehanizacija šumarstva, 37: 77–86.

Raguzin, I., 2011: Model analize troškova i dobiti uporabe biomase u proizvodnji električne energije. Magistarski rad, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 63 str.

Šegon, V., T. Šimek, A. Orandini, M. Marchetti, 2014: Priručnik za učinkovito korištenje biomase. Hrvatski šumarski institut, Jastrebarsko, 32 str.

---

## Abstract

---

### *Comparison of Energy Gain of a Cogeneration Plant and Production of Wood Pellets*

*The paper presents the process of heat and electricity production in a cogeneration plant and the process of wood pellet production. The aim of this work is to analyze the energy gain – EROI for energy products generated as a product contained in thermal and electrical energy and the energy contained in wood pellets. According to the obtained results, the production of only electrical energy from wood biomass in a cogeneration plant is not profitable from an energy point of view, since the obtained electrical energy is only 1.43 times higher than the input wood energy ( $EROI_{el} = 1.43 : 1$ ). The obtained thermal energy is 4.38 times higher than the input energy of wood ( $EROI_{topl} = 4.38 : 1$ ), while the energy obtained from the produced wood pellets is 4.81 times higher than the input energy of wood ( $EROI_{pel} = 4.81 : 1$ ). Such an energy gain in the production of thermal energy in a cogeneration plant and production of wood pellets is energetically profitable, but it is many times less favorable compared to the use of wood chips, and especially compared to the use of short-cut wood in boilers to obtain only thermal energy. Wood is a renewable source of energy and its economic use can create a significant energy gain, but due to the trend of using renewable energy sources and the increasing need for electricity, such a way of obtaining electricity is financially profitable, although it is not justified from the point of view of energy profitability.*

*Keywords: EROI, thermal energy, electrical energy, wood pellets, wood chips, energy profitability*

---

#### Adrese autorâ – Authors' addresses:

Izv. prof. dr. sc. Zdravko Pandur \*  
e-pošta: zpandur@sumfak.unizg.hr  
Dr. sc. Marin Bačić  
e-pošta: mbacic1@sumfak.unizg.hr  
Izv. prof. dr. sc. Kruno Lepoglavec  
e-pošta: klepoglavec@sumfak.unizg.hr  
Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet šumarstva i drvne tehnologije  
Svetošimunska cesta 23  
10 000 Zagreb  
HRVATSKA

Primljeno (Received): 20. 10. 2023.

Prihvaćeno (Accepted): 8. 11. 2023.

\*Glavni autor – Corresponding author