

Analiza dobiti energije u kogeneracijskom postrojenju

Filipović, Dubravko

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:545401>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



ŠUMARSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU
ŠUMARSKI ODSJEK
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ
TEHNIKA, TEHNOLOGIJA I MANAGEMENT U ŠUMARSTVU

DUBRAVKO FILIPOVIĆ

**ANALIZA DOBITI ENERGIJE U KOGENERACIJSKOM
POSTROJENJU**

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB, 2018.

ŠUMARSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU
ŠUMARSKI ODSJEK

**ANALIZA DOBITI ENERGIJE U KOGENERACIJSKOM
POSTROJENJU**

DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij: Tehnika, tehnologija i management u šumarstvu

Predmet: Okolišno prihvatljive tehnologije

Ispitno povjerenstvo:

1. doc. dr. sc. Zdravko Pandur
2. prof. dr. sc. Željko Zečić
3. prof. dr. sc. Marijan Šušnjar

Student: Dubravko Filipović

JMBAG: 0058200483

Broj indeksa: 766/16

Datum odobrenja teme: 20. travnja 2018.

Datum predaje rada: 21. rujna 2018.

Datum obrane rada: 28. rujna 2018.

Zagreb, rujna 2018.

Dokumentacijska kartica

Naslov	Analiza dobiti energije u kogeneracijskom postrojenju
Title	Energy gain analysis in the cogeneration plant
Autor	Dubravko Filipović
Adresa autora	Bjelovarska 6, Đurđevac 48350
Mjesto izrade	Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave	Diplomski rad
Mentor	doc. dr. sc. Zdravko Pandur
Izradu rada pomogao	doc. dr. sc. Zdravko Pandur
Godina objave	2018.
Obujam	I - IV + 27 stranica + 20 slika + 3 tablice + 18 navoda literature
Ključne riječi	EROI, kogeneracijsko postrojenje, peleti
Key words	EROI, CHP, pellets
Sažetak	U ovom diplomskom radu, napraviti će se kratki pregled i analiza dobiti energije na primjeru kogeneracijskog postrojenja, pri čemu će se u izračun uključiti ulazni parametri (utrošak energije) počevši od energije sirovina (drvo), strojeva, vozila i samog kogeneracijskog postrojenja. Dobivena energija je u obliku električne i toplinske odnosno u obliku energije proizvedenih peleta. Stavljanjem u odnos dobivene i uložene energije dobit će se uvid dobiti energije takvim načinom korištenja energijskog drva.

	IZJAVA O IZVORNOSTI RADA	OB ŠF 05 07
		Revizija: 1
		Datum: 21.09.2018.

„Izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mogega rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

vlastoručni potpis

Dubravko Filipović

U Zagrebu, 21. rujna 2018. godine

Kazalo sadržaja

Kazalo sadržaja	I
Popis slika.....	II
Popis tablica	III
Predgovor	IV
1. Uvod.....	1
1.1 Energijski povrat uloženog – EROI (Energy return on investment)	2
1.2 Kogeneracijska postrojenja.....	5
2. Cilj istraživanja	6
3. Materijali i metode istraživanja.....	7
3.1 Upotreba biomase u radu kogeneracijskog postrojenja.....	7
3.2. ORC-postrojenje	9
4. Faza pripreme i obrade šumske biomase	11
4.1. Proizvodnja drvnih peleta	15
4.2. Princip rada pelet preše	17
5. Rezultati istraživanja	21
6. Zaključci.....	25
7. Literatura.....	26

Popis slika

- Slika 1. Vrijednost EROI-a kod nekih procesa dobivanja energije
- Slika 2. Kogeneracijsko postrojenje Lika Energo Eko u Udbini
- Slika 3. Pojednostavljena shema tokova energije u kogeneracijskom postrojenju
- Slika 4. Pojednostavljena shema procesa u kogeneracijskom postrojenju na šumsku biomasu (Lika Energo Eko d.o.o. i pogon za proizvodnju peleta Moderator d.o.o.)
- Slika 5. Primjer turbogeneratorskog agregata
- Slika 6. Termodinamički proces ORC ciklusa
- Slika 7. Dvozupni trupac na vagu
- Slika 8. Skladištenje sječke
- Slika 9. Iverak Europe Chippers C1175T
- Slika 10. Korač modela Peterson 4800E
- Slika 11. Doziranje sječke u vrelouljni kotao
- Slika 12. Vrelouljni kotao postrojenja
- Slika 13. Mjerna skica vrelouljnog kotla
- Slika 14. Prikaz gorionika i kontrola rada vrelouljnog kotla
- Slika 15. Trakasta sušara
- Slika 16. Presjek preše
- Slika 17. Dijelovi plosnate preše
- Slika 18. Konsolidiranje i hlađenje peleta
- Slika 19. Pakiranje i otprema peleta
- Slika 20. Shematski prikaz toka energije u kogeneracijskom postrojenju Lika Energo Eko d.o.o.

Popis tablica

Tablica 1. Karakteristike drvnih peleta

Tablica 2. Načini pakiranja dobivenih drvnih peleta

Tablica 3. EROI kogeneracijskog postrojenja i peletare

Predgovor

Zahvaljujem mentoru doc.dr.sc. Zdravku Panduru na strpljenju, pomoći, vodstvu i izuzetnoj suradnji tijekom izrade ovog rada, oko odabira literature i stručnim savjetima prilikom izrade diplomskog rada.

Također, zahvaljujem se svim svojim prijateljima te kolegama s fakulteta koji su svojim prisustvom uljepšali moje studentsko razdoblje.

Zahvaljujem svojoj djevojci koja je uvijek bila tu uz mene i podržavala me kroz godine studiranja.

Na kraju, najveću zaslugu za sve što sam postigao pripisujem svojim roditeljima, sestri i bratu. Bez njihove bezuvjetne potpore ne bi danas bio tu gdje jesam. Hvala što ste vjerovali u mene i omogućili mi da završim ovaj fakultet u nekom prihvatljivom razdoblju.

1. Uvod

Energija u današnjem svijetu privlači sve veći fokus prvenstveno sa strane pokretanja svih tehnoloških stvari. Sve se više govori o alternativnim izvorima energije koji bi trebali ne samo zamijeniti današnje izvore energije, nego i sačuvati okoliš, odnosno smanjiti efekt stakleničkih plinova (smanjiti emisiju CO₂) (Goleš 2014). Kao što je poznato glavni izvori današnjice su neobnovljivi izvori energije u koje svrstavamo ugljen, naftu, prirodni plin i nuklearnu energiju. Ugljen, naftu i prirodni plin još nazivamo i fosilnim gorivima. Osnovni problemi kod neobnovljivih izvora energije su što oni onečišćuju okoliš te što ih ima u ograničenim količinama. Sagorijevanje fosilnih goriva dovodi do oslobađanja CO₂ (ugljičkovog dioksida) koji se smatra stakleničkim plinom. Struka smatra ovaj plin jednim od glavnih uzroka globalnog zatopljenja. Nuklearna energija opasna je zbog radioaktivnosti, odnosno zbog tvari, koje ostaju radioaktivne godinama i za njih je potrebno posebno skladištenje. Naš fokus tj. fokus šumarske struke ostaje ipak kod bioenergije koju svrstavamo u obnovljive izvore energije. Ostale oblike obnovljive energije pronalazimo u energiji Sunca, vjetra i vode. Glavne prednosti obnovljivih oblika energije su njihovi potencijali koji su golemi, a uza sve to ono najvažnije je da ne zagađuju okolinu u tolikoj mjeri kao neobnovljivi oblici energije. Kada govorimo o bioenergiji, mislimo na biomasu, odnosno na brojne proizvode biljnog i životinjskog svijeta koje čini njihova materija.

Pojam biomasa (grč. *bios* – život, lat. *massa* - tijelo) odnosi se na organsku tvar jednog ili više organizama ili njihovih dijelova. Neka osnovna podjela biomase odnosila bi se na drvenu biomasu i ostalu biomasu (biljnog porijekla) te organsku biomasu. Većina biljne biomase proizvodi se iz biljaka poljoprivrednog i šumskog porijekla. U drvenu biomasu možemo svrstati sve vrste i oblike energijskog drva prema normi HRN EN 14961-1:2010 (drvena sječka, iver, kora, svežnjavi, drvena prašina, peleti, briketi...).

Daljnji razvoj 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 koristiti u malim jedinicama, poput pojedinačnih kuća, u projektima ugovorne prodaje topline, za područne toplane te 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 ovog tržišta. Biomasa u svom ciklusu od proizvodnje do njene upotrebe za energetske svrhe ima nulti nivo proizvodnje CO₂, odnosno ima zatvoreni CO₂ krug. Količina CO₂ koja nastaje prilikom prerade biomase u energetske

svrhe putem fotosinteze i sunčeve energije ponovo se apsorbira u rastu sirovina iz kojih biomasa nastaje. Energija se u sirovini (biljkama, drveću) nalazi u kemijskom obliku i ta se energija oslobađa prilikom korištenja biomase u energetske svrhe, bilo prilikom prirodnog raspadanja ili prilikom izgaranja. Uobičajeno je da se biomasa smatra CO₂ neutralno gorivo, ali prilikom njene pretvorbe u energetske svrhe nastaju dodatne količine CO₂ zbog korištenja fosilnih goriva u procesima transporta, obrade i uzgoja biomase. Iako je biomasa CO₂ neutralno gorivo, količina stakleničkih plinova koja se smanji u atmosferi korištenjem biomase u odnosu na fosilna goriva ovisi o efikasnosti procesa pretvorbe biomase u krajnji energent koji koriste krajnji korisnici. Bitno je spomenuti i poljoprivredne ostatke u obliku slame, kukuruzovine, oklasaka, stabljika, koštica itd. Postoje i oblici uzgoja šumske i poljoprivredne vegetacije specijalno za potrebe korištenja za proizvodnju bioenergije (npr. kulture brzorastućih vrsta drveća i poljoprivredni usjevi poput uljane repice). Također, u opis biomase svrstavaju se i životinjski otpad i ostaci u obliku anaerobne fermentacije (izmeta) i spaljivanja (stelja). Najčešće se ipak koristi drvena biomasa koja nastaje kao otpad ili sporedni proizvod odnosno ostaci koji se više ne mogu iskoristiti. Ovakav oblik biomase koristi kao gorivo u postrojenjima za proizvodnju električne i toplinske energije. Moguće su i prerade u plinovita i tekuća goriva za primjenu u vozilima i kućanstvima. Proizvodnja energije iz biomase specifična je po razbijanju kemijske konstrukcije jedinice biomase. U trenutku razbijanja kemijske konstrukcije dolazi do oslobađanja energije pohranjene u molekulama. Energetski sadržaj produkta biomase predstavlja količinu oslobođenu po jedinici težine ili volumena. Različiti produkti dobiveni ovim postupkom imaju i različite energetske sadržaje, a svaki od njih moguće je koristiti na drugačiji tj. specifičan način. Sagorijevanje smatramo najučestalijim načinom dobivanja bioenergije. Sagorijevanje biomase odnosno oslobađanje toplinske energije moguće je iskoristiti u proizvodnji električne energije ili kao direktno korištenje za grijanje. Postoji i postupak koji se naziva plinifikacija, a kojim se biomasa pretvara u plin, koji se zatim koristi izravno kao plin ili također za dobivanje drugih oblika energije (električna energija). Ekvivalent tradicionalnom fosilnom dizel gorivu predstavlja biodizel, koji je moguće dobiti iz ekstrahiranih ulja (u raznim oblicima biomase).

1.1 Energijski povrat uloženog – EROI (Energy return on investment)

Povrat energije u odnosu na uloženu energiju - EROI je odnos dobivene energije iz procesa proizvodnje energije i energije koja je potrebna za izdvajanje, rast i sl. u novi oblik energije. EROI je najčešće primjenjivan u odnosima energije potrebne za traženja i proizvodnju

naftnih destilata ili u procesima uzgoja i prerade biomase (kukuruz, šećerna trska i sl.) te proizvodnje biogoriva (Hall i dr. 2009).

Odnos dobivenog i uloženog u procesu proizvodnje energije ključan je faktor 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 efikasnosti procesa u kojem se proizvodnja odvija (Biočina 2010).

Pojam EROI se ne smije poistovjećivati sa korisnošću pretvorbe, što se često sreće u literaturi, što je npr. proizvodnja (pretvorba) jednog tipa goriva u drugi (proizvodnja benzina iz sirove nafte, ili proizvodnja električne energije iz dizelskog 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 realnog sagledavanja prednosti i nedostataka proizvodnje određenog tipa goriva te daje smjernice za mogućnosti proizvodnje i tržišta energenta u budućnosti. Isto tako napominje se 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 određenog energenta.

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

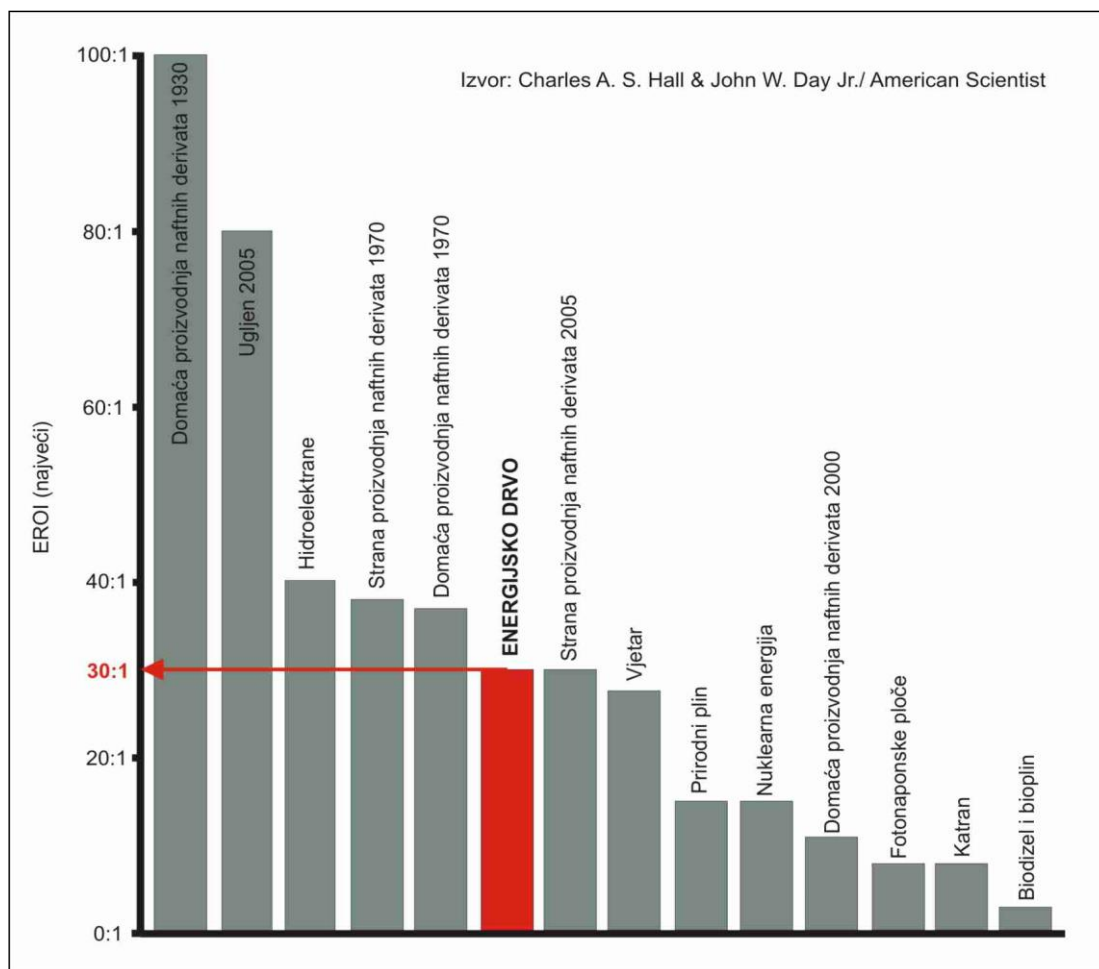
$$EROI = \frac{\text{Dobivena energija}}{\text{Energija potrebna za proizvodnju dobivene energije}}$$

Brojnik i nazivnik su u istim mjernim jedinicama pa je dobiveni rezultat bezdimenzijska veličina, npr. 30 : 1, koji se izražava kao „trideset prema jedan“. To znači da smo u procesu proizvodnje npr. drvnog iverja energijske vrijednosti 30 J (Joule) uložili 1 J energije počevši od energije potrebne za proizvodnju strojeva korištenih u procesu pridobivanja drvne sječke, pogonskog goriva za strojeve i naravno energije čovjeka uložene u cijeli proces.

Opći kriterij koji se koristi u aktualnoj raspravi o EROI-u i proizvodnji energije je taj da li je energija koja se vraća kao gorivo veća od energije uložene u procesima dobivanja 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 bi taj projekt proizvodnje energenta trebalo napraviti ili obrnuto, ako je uložena energija veća od dobivene da bi ga trebalo odbaciti. Tako Farrell i dr. (2006.) iz

sveobuhvatnih istraživanja navode da se *višak energije (energy surplus)*, odnosno EROI kod proizvodnje etanola iz kukuruza kreće u rasponu od 1,2 do 1,6 jedinica dobivene za svaku uloženu jedinicu energije. Daljnji aspekti nalažu da prilikom takve proizvodnje, sva dobivena energija nije sadržana samo u bioetanolu već i u nusproizvodima koji se mogu koristiti kao hrana za stoku. S druge strane, uložena energija ne uzima u obzir osiromašenje tla hranjivima prilikom proizvodnje kukuruza. Stoga postoji mišljenje da većina dobivenih vrijednosti EROI-a, uključujući i ovaj navedeni primjer, trenutno imaju veći odnos dobivene i uložene energije, ali kad bi uzeli u obzir sve parametre taj odnos bi se 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. benzinska crpka). Takav energijski dobitak od 20 : 1 dovoljan je za pokretanje i napredak ljudske civilizacije te veliko industrijsko širenje. Dio tog energijskog dobitka koristi se za daljnje dobivanje iste energije dok se jedan dio koristi i u poljoprivredi čime se dobiva ogroman dobitak energije u obliku hrane dopremljene do društva. To omogućuje ljudima i kapitalu da stvaraju energijski dobitak izvan energetskog sektora, odnosno takav ogroman energetski dobitak omogućava razvoj naše civilizacije sa svih gledišta, i dobrih i loših. Loše vijesti su da je nedostak nafte započeo nakon njenog prvog otkrića i korištenja dok je istoj toj nafti bilo potrebno 100 i više milijuna godina za nastanak. Zbog smanjivanja zaliha nafte, njena cijena je počela rasti i sve se više nafte troši za traženje novih nalazišta. Samim time njen energijski dobitak se smanjuje i društvo traži načine kroz razvoj 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-tih za naftu iznosio 100 : 1, 1970-tih 30 : 1, 2000-tih 11-18 : 1, a za svijet oko 20 : 1.



Slika 1. Vrijednost EROI-a kod nekih procesa dobivanja energije

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 energijskog drva (biomase) dobila količina energije ekvivalentna energiji 30 litara nafte. Ali ako se doda emisija CO₂, pri čemu se smatra da je kod sagorijevanja biomase emisija CO₂ jednaka nuli jer biomasa tijekom rasta isti veže u procesu fotosinteze, energijsko drvo je u povoljnijem odnosu spram fosilnih goriva (Pašičko i dr. 2009).

1.2 Kogeneracijska postrojenja

Kogeneracija ili suproizvodnja (engl. Combined Heat and Power ili CHP) je istodobna proizvodnja dva korisna oblika energije (električne i toplinske) u jedinstvenom procesu. Toplinska energija koja ostaje neiskorištena u konvencionalnoj elektrani (ili se ispušta u okoliš uz negativne učinke), koristi se za potrebe u raznim proizvodnim procesima ili, što je češći slučaj, za grijanje pojedinačnih građevina ili čak cijelih naselja. Toplinska energija može se

koristiti 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 gdje 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).

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

Osnovne cjeline svakog kogeneracijskog sustava (Raguzin 2011) predstavljaju:

- 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 postrojenje se, 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. Jasno, kogeneracijsko postrojenje može raditi i u odvojenom (otočnom) pogonu, kada isključivo podmiruje potrošnju električne energije na objektu (kompleksu). Moguće su i kombinacije paralelnog pogona uz mogućnost odvojenog pogona (Raguzin 2011).

2. Cilj istraživanja

Cilj rada je analiza dobiti energije kogeneracijskog postrojenja, koje koristi drvenu sirovinu za proizvodnju električne energije (za isporuku u javnu elektroenergetsku mrežu) i toplinske energije (za pokrivanje potreba proizvodnje peleta).

3. Materijali i metode istraživanja

3.1 Upotreba biomase u radu kogeneracijskog postrojenja

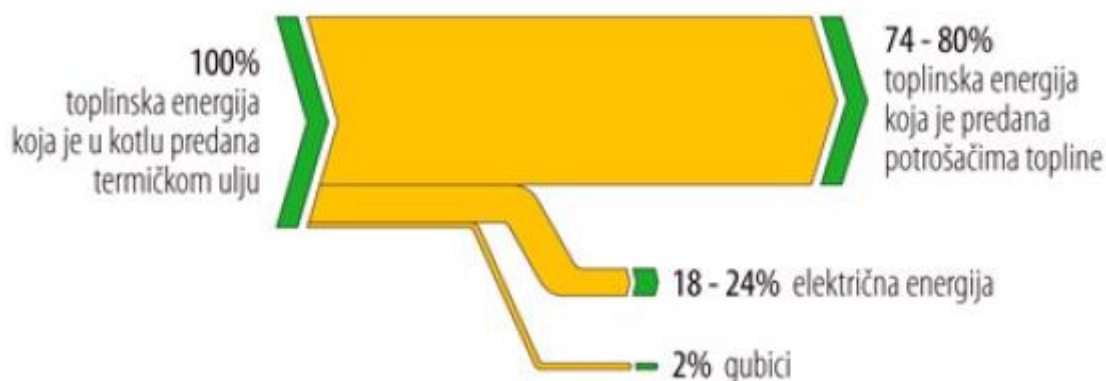
U procesu iskorištavanja drvene biomase za energiju, proizvodnja drvene sječke se pokazala najprihvatljivijom opcijom. Porast upotrebe drvene sječke u EU i promjene zakonskog okvira u RH potakli su razvoj tržišta energijskim drvom, čime se stvara potpuno nova gospodarska djelatnost koja generira nova 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 kogeneracijskog 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.

U svom istraživanju imao sam prilike sudjelovati u pregledu kogeneracijskog postrojenja na biomasu Lika Energo Eko d.o.o. u Udbini, koje je izgrađeno potkraj 2011., a u punom pogonu je od svibnja 2012. godine. Postrojenje Lika Energo Eko d.o.o. steklo je status povlaštenog proizvođača električne energije iz obnovljivih izvora. Najisplativijim, prema njihovim istraživanjima, pokazalo se ulaganje u postrojenje snage do 1 MW. U skladu sa navedenim, donešena je odluka o gradnji kogeneracijskog postrojenja električne snage 0,95 MW te toplinskog učinka 4,1 MW uz pogon za proizvodnju drvnih peleta.



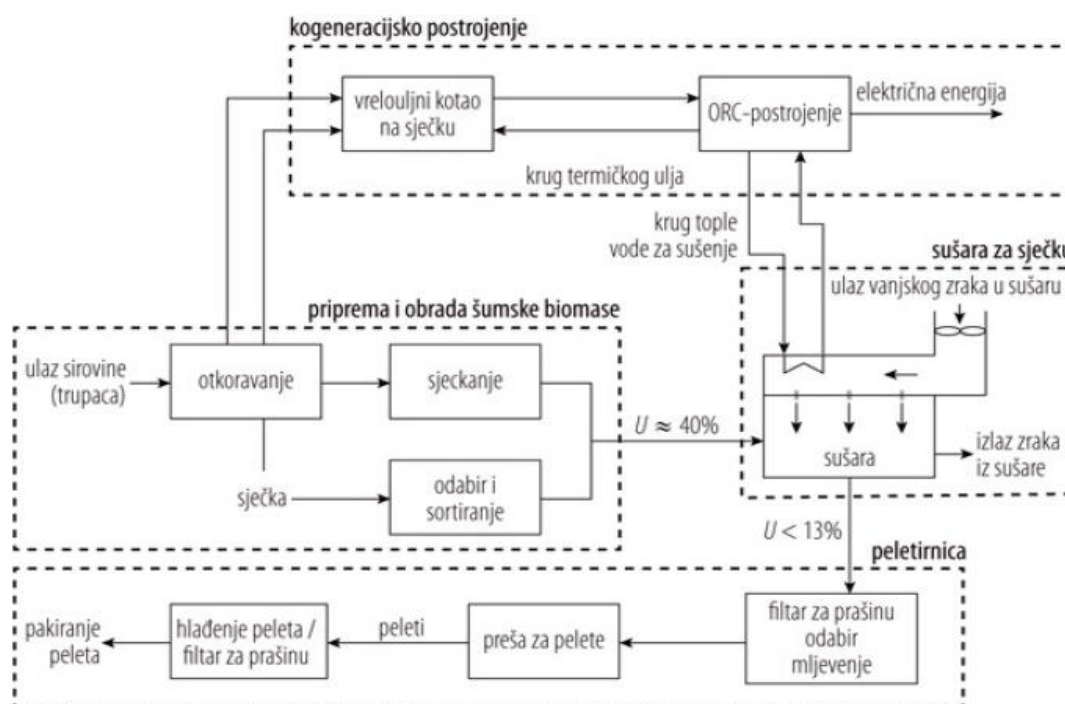
Slika 2. Kogeneracijsko postrojenje Lika Energo Eko u Udbini

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



Slika 3. Pojednostavljena shema tokova energije u kogeneracijskom postrojenju

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

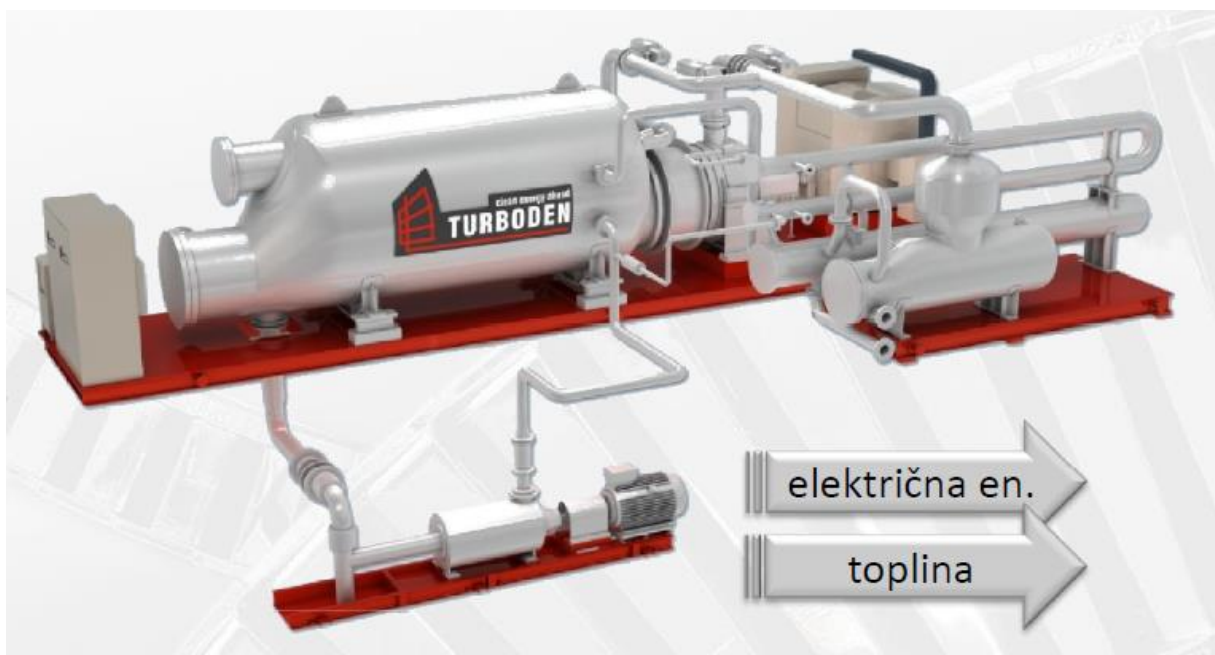


Slika 4. Pojednostavljena shema procesa u kogeneracijskom postrojenju na šumsku biomasu
(Lika Energo Eko d.o.o. i pogon za proizvodnju peleta Moderator d.o.o.)

3.2. ORC-postrojenje

Kao što je vidljivo na pojednostavljenoj shemi procesa u kogeneracijskom postrojenju na šumsku biomasu, sustav se sastoji od dvije glavne komponente: vrelouljni kotao na sječku i ORC-postrojenje. Zbog boljeg razumijevanja cijelog ciklusa bitno je detaljnije opisati ORC-postrojenje, uz praćenja iskaza dobivenih energija.

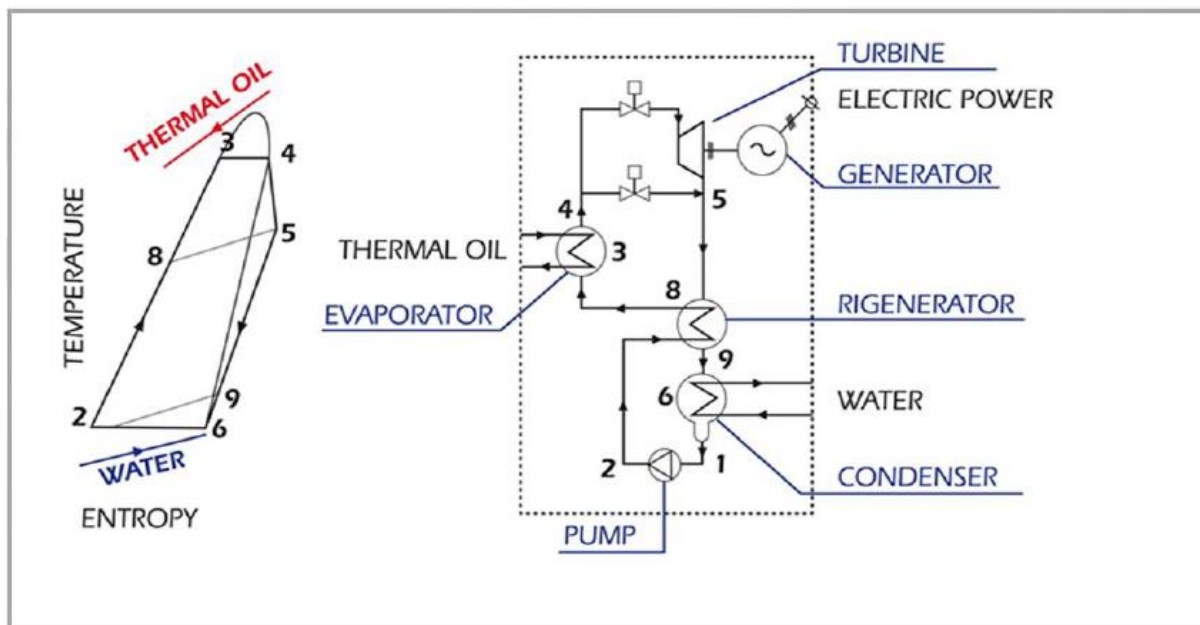
Oznaka ORC-postrojenja znači kako se radi o turbogeneratoru čiji se rad temelji na Organskom Rankinovom Ciklusu. Ova oprema tj. tehnologija proizvodi električnu i toplinsku energiju iz obnovljivih izvora te iz otpadne topline u industrijskim procesima. Ovaj oblik i konstrukciju turbogeneratora projektira i razvija tvrtka Turboden. Standardne jedinice koje ova tvrtka proizvodi su snage od 200 kW do 10 MW (uz soluciju na zahtjev kupca do 15MW).



Slika 5. Primjer turbogeneratora

Turbogenerator koristi temperaturu vrelog ulja za zagrijavanje i isparavanje odgovarajuće radne organske tekućine u isparivaču ($8 \rightarrow 3 \rightarrow 4$) (slika 6). Para organske radne tekućine pokreće turbinu ($4 \rightarrow 5$), koja je direktno povezana sa električnim generatorom sa elastičnom spojkom. Ispuštena para prolazi kroz regenerator ($5 \rightarrow 9$) gdje grije organsku tekućinu ($2 \rightarrow 8$). Para se tada kondenzira u kondenzator (kojeg hladi protok vode) ($9 \rightarrow 6 \rightarrow 1$).

Organska tekućina se u konačnici pumpa u regenerator i potom u isparivač u kojem isparava, zatvarajući time niz radnji unutar zatvorenog kruga.



Slika 6. Termodinamički proces ORC ciklusa

Prednosti Turbodenovih ORC turbogenerators:

Tehničke prednosti:

- visoka učinkovitost ciklusa
- vrlo visoka učinkovitost turbine (do 90%)
- niska razina mehaničkog stresa turbine zahvaljujući niskoj obodnoj brzini
- niski broj okretaja turbine omogućava direktan prijenos elektro-generatora; nije potreban reduktor smanjenja broja okretaja
- nema erozije lopatica budući je odsutna vlažnost
- nema potrebe za vodom: nema potrebe za kemijskim tretmanom vode

Operativne prednosti/rezultati

- jednostavne procedure pokretanja i zaustavljanja (start-stop)
- automatske i kontinuirane operacije
- nije potrebna prisutnost radnika
- tihi rad
- visoka pouzadnost (Admont – preko 70,000 sati rada, pouzdanost > 98%)
- parcijalni, odnosno rad na snazi do 10% nominalne snage

- visoka efikasnost i kod rada na niskoj snazi
- niski nivo zahtjevnost za upravljanje i održavanje: oko 3-5 sati/tjedno
- dugi vijek rada

U poduzeću Lika Energo Eko d.o.o. prvo je Turbodenovo postrojenje Hrvatskoj i u sklopu svoga rada koriste ORC model Turboden 10 CHP split i Turboden T3 CHP.

4. Faza pripreme i obrade šumske biomase

Ova faza obuhvaća ulaz sirovine (trupaca) u proces otkoravanja nakon kojeg slijedi sjeckanje tj. dobije se drvna sječka koja ulazi u proces odabira i sortiranja. Sirovina je gotovo uvijek spremna za korištenje, jer se nalazi u sklopu užeg područja oko kogeneracijskog postrojenja.



Slika 7. Dovoz trupaca na vagu

Godišnja potrošnja postrojenja Lika Energo Eko iznosi oko 73.000 tona, što varira zbog dostupnosti biomase. Proizvodnja sječke izvodi se u blizini skladišta sječke pomoću sjeckalice/iverača modela Europe Chippers C1175T.



Slika 8. Skladištenje sječke



Slika 9. Iverač Europe Chippers C1175T

Iverač je kapaciteta do 180 m³/h. Upravo je iverač ili sjeckalica prvo stajalište pogona koje pokreće drvena biomasa. Kod slučaja jelovog drva, biomasa mora proći kroz proces otkoravanja, a također je bitno za naglasiti da drvena masa jele u nekim slučajevima mora proći kroz cjepač zbog svojih velikih dimenzija (nemogućnost prolaska kroz iverač). Proces otkoravanja obavlja se pomoću korača modela Peterson 4800E. Osnovna zadaća iverača je proizvodnja sječke koju je dozvoljeno koristiti u procesu kao energent za izgaranje u ložištu.



Slika 10. Korač modela Peterson 4800E

Drvena sječka se zatim doprema u spremnike odakle se vrši proces doziranja sječke u vrelouljni kotao. Doziranje olakšavaju hidraulični podni gurači koji guraju sječku sa dna spremnika.



Slika 11. Doziranje sječke u vrelouljni kotao

Vrelouljni kotao na drvenu sječku iduća je stanica kogeneracijskog postrojenja. Toplina proizvedena u kotlu na biomasu prenosi se u ORC modul preko kruga termo ulja. Korištenje termo ulja kao medija za prijenos topline omogućuje rad kotla s nižim radnim tlakom (za razliku od parnih kotlova) i bez promjene faza radnog medija (isparavanje). ORC postrojenje proizvodi električnu energiju i niskotemperaturnu toplinu u zatvorenom termodinamičkom ciklusu prema Organskom Rankinovom Ciklusu (ORC) (Plevnik 2012), koji je ranije spomenut i opisan. Vrelouljni kotao je potpuno automatizirana jedinica za zagrijavanje termičkog ulja s kontroliranom cirkulacijom. Najvažniji dio kotla predstavlja cilindrično savijena cijevna spirala koju, posredstvom cirkulacijske pumpe, cirkulira termičko ulje i zagrijava se. Termičko ulje kao medij za prijenos toplinske energije ostvaruje vrlo visoke radne temperature (do 320°C), uz niske radne tlakove (do 10 bara).

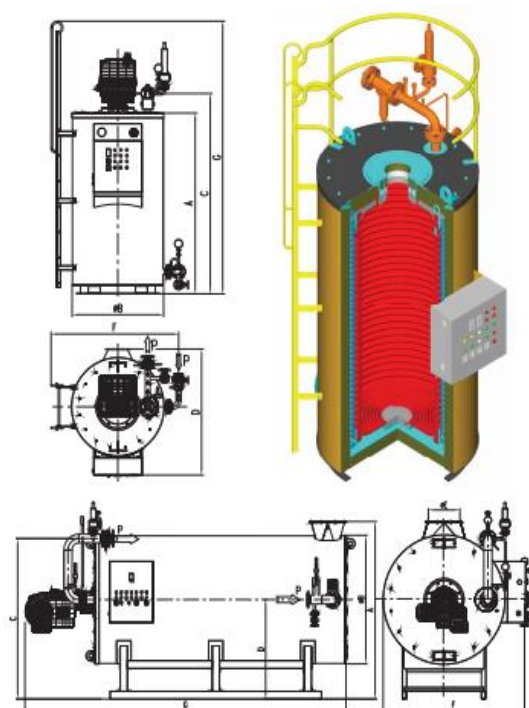
Karakteristike i prednosti vrelouljnih kotlova općenito:

- radna temperatura do 320°C
- radni tlak do 10 bar - nazivni tlak NP16
- područje kapaciteta: 75 kW do 5000 kW
- loženje: plin, lako ulje, kombinirano
- nema opasnosti zbog porasta tlaka
- točna regulacija izlazne temperature
- nije potreban sustav za kemijsku pripremu
- nema toplinskih gubitaka zbog tople kondenzacije
- nema opasnosti od korozije niti taloženja u sustavu
- niski troškovi održavanja,
- tihi rad,
- jednostavni za upravljanje, potpuno automatiziran rad

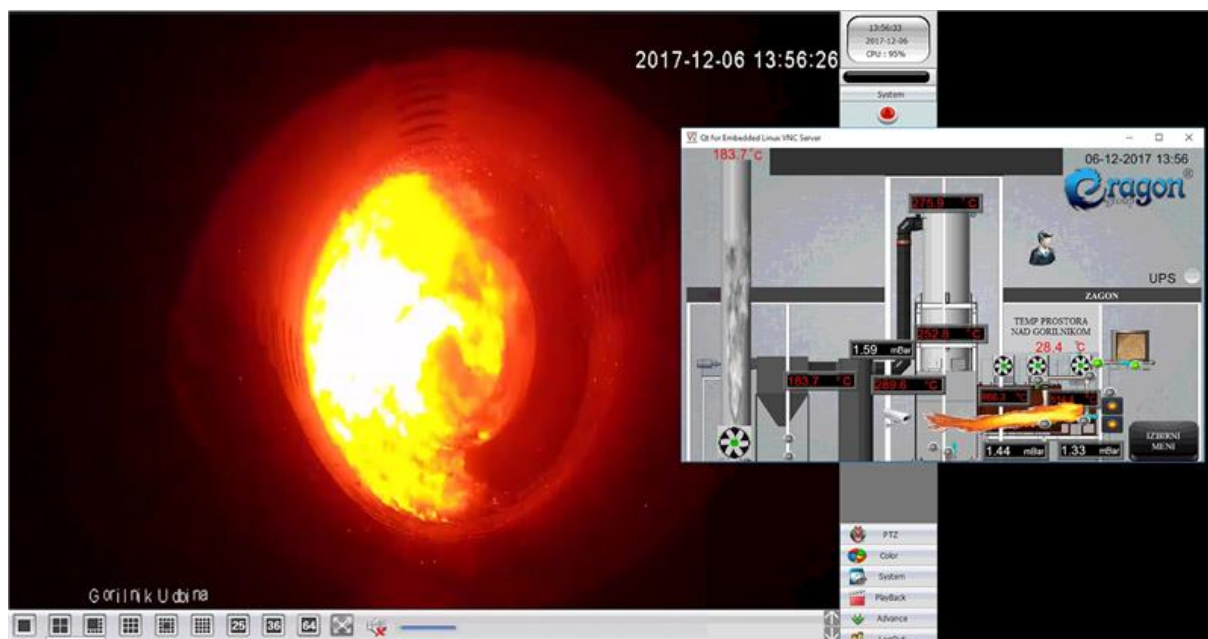
Vrelouljni kotao u kogeneracijskom postrojenju Lika Energo-Eko jedan je od modela/sistema slovenske tvrtke Eragon group d.o.o.



Slika 12. Vrelouljni kotao postrojenja



Slika 13. Mjerna skica vrelouljnog kotla



Slika 14. Prikaz gorionika i kontrola rada vrelouljnog kotla

4.1. Proizvodnja drvnih peleta

Početak proizvodnje drvnih peleta obuhvaća proces već spomenutg otkoravanja drvnih trupaca kako bi se odvojile nečistoće koje bi ušle su sastav peleta. Otkoreni trupci nakon procesa sjeckanja transportiraju se do sušare. Dobivena toplina iz kogeneracijskog postrojenja iskorištva se u procesu sušenja drvene sječke. Namjena topline je spuštanje vlažnosti sječke sa 60 – 80% na 10%. Nakon procesa sušenja, drvena sječka ide na doradu pomoću postupka finog mljevenja te se transportira na prešanje peleta. Prešanje obuhvaća prevođenje fino mljevene drvene sječke preko valjka i matrice preše za pelet. U ovom dijelu postrojenja dodaje se vodena para koja služi kao pripomoć drvnom škrobu u sječki, zbog povezivanja drvene tvari. Nakon prešanja, dobiveni proizvod tj. drvni pelet ponovo ide na transport, ovoga puta 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. Bitno je za naglasiti kako u cjelokupnom procesu proizvodnje drvnog peleta nema dodatka aditiva ili dodatnih veziva.

Proces proizvodnje peleta Moderator d.o.o. sastoji se od (Tomljanović 2014):

- Sekcije pripreme sirovine, otkoravanje, sjeckanje,
- Sekcije skladištenja materijala, mokrog mljevenja,
- Sekcije sušenja,
- Sekcije finog mljevenja,
- Sekcije prešanja, hlađenja i prosijavanja,
- Sekcije pakiranja i paletiziranja,
- Sekcije za nadzor i automatiku

Početni dio proizvodnje peleta obuhvaća proces sušenja drvene sječke. Nakon što prođe obradu drvna sječka dolazi u sekciju sušenja. Karakteristika ove sekcije je što se ovaj proces odvija u trakastoj sušari. Trakasta sušara napravljena je od metalnih ploča, zvarjenih na posebnu konstrukciju. Unutar komore nalazimo više traka po kojima se drvna sječka giba. Sušenje toplim zrakom podrazumijeva kao izvor toplinu vode ili paru nekog kotlovskog postrojenja, u posebnim slučajevima otpadnu toplinu nekog tehnološkog procesa. Uz trakaste sušare, postoje još fluidizirajuće te podne (deponijske) sušare.



Slika 15. Trakasta sušara

Drvni pelet svrstavamo u obnovljive izvore energije. Proces izrade obuhvaća sušenje i prešanje drvene sječke na temperaturi od cca. 80 °C (bez dodatnih primjesa i veziva). Svojstvo peleta je da sagorijevaju čišće od drva, što znači i manji udio pepela, a isto tako zahtijevaju i puno manje prostornog volumena (mali udio vlage), što ih čini izuzetno pogodnima za transport i skladištenje.

Konačni dobiveni proizvod drvni pelet ima osnovne karakteristike:

Tablica 1. Karakteristike drvnih peleta

Promjer:	6 mm
Sastav:	70% bukva ; 30% jela - smreka
Vlažnost:	manje od 8%
Kalorična vrijednost:	5,3 kWh/kg
Udio pepela:	manje od 0,9%

Tablica 2. Načini pakiranja dobivenih drvnih peleta

Pakiranje:	Način pakiranja:	Težina*:
Paleta: 110 x 110 cm	70 ili 78 vreća po 15 kg	cca. 1050 kg / 1170 kg
Paleta: 80 x 120 cm (Europaleta)	72 vreće po 15 kg	cca. 1080 kg
Big - Bag	rasuto stanje	cca. 1000 kg

Težina palete cca. 25kg

Karakteristike sekcije prešanja vezane su za dvije preše, od kojih je svaka potencijalnog kapaciteta 3,5 t/h.

4.2. Princip rada pelet preše

Nakon sušenja, usitnjavanja i ujednačavanja vlage ulazne sirovine, obavlja se proces peletiranja na preši za pelet. Najvažniji radni dio preše je matrica sa potisnim valjcima. Postoje dva tipa matrica: u obliku prstena i plosnate matrice. Ove vrste matrica optimizirane su za proizvodnju energetskih peleta od drveta (Tokmakčija 2016).

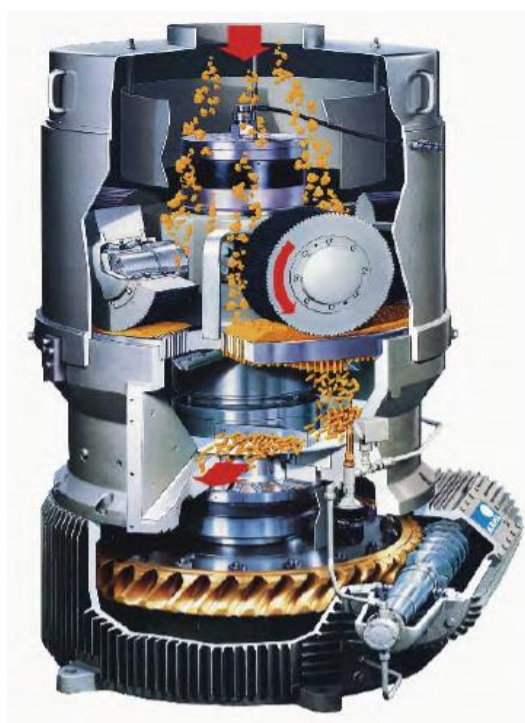
Sirovina ulazi u prostor za prešanje i podjednako mora biti raspoređena po otvorima matrice. Na matrici se stvara tanak sloj od sirovine okretanjem valjaka ili matrice. Kod prekomjernog kotrljanja valjaka stvara se snažan pritisak i dolazi do začepljenja otvora u matrici. Tako iz matrice izlazi beskonačna nit sirovine koja se mora presijecati nožem na

željenu duljinu. Noževi mogu biti stacionarni ili pokretni u zavisnosti od toga da li se matrica pokreće ili ne. Kada sirovina prođe ovaj proces nastaje pelet. Kod izvedbe sa ravnom matricom u oba slučaja matrica je postavljena horizontalno. Važne karakteristične veličine kod proizvodnje peleta su odnos prešanja, broj rupa u matrici i otuda upotreba otvorene unutrašnje površine matrice. Kod odnosa prešanja podrazumijeva se odnos između presjeka izbušene rupe i duljine kanala za prešanje materijala. On se određuje u zavisnosti od vrste sirovine koja se preša, kako bi se u kanalu za prešanje stvorilo odgovarajuće trenje (Tokmakčija 2016).

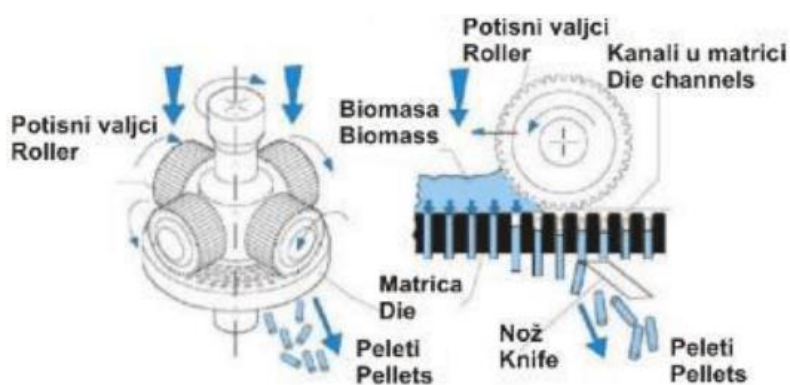
Kod procesa peletiranja drvene biomase (strugotine ili piljevine) odnosi za prešanje obično se kreću između 1:3 i 1:5. Kako bi presjek rupa bio u čvrstoj vezi sa željenim promjerom peleta, može se mijenjati odnos za prešanje samo preko duljine kanala, odnosno debljine matrice. Sirovina sa malom snagom vezivanja zahtjeva dulje kanale za prešanje, odnosno sirovina sa velikom snagom za vezivanje zahtjeva kraće kanale. Temperatura sirovine također raste sa povećanjem duljine kanala, a također se povećava i tvrdoća peleta. Uglavnom su matrice izvedene za točno određenu vrstu sirovina i ne mogu se koristiti za drugu vrstu biomaterijala (Tokmakčija 2016).

Parametri prešanja (Tokmakčija 2016) za jednu vrstu sirovina su:

- Debljina matrice
- Duljina kanala za prešanje
- Broj otvora, forma otvora, presjek otvora
- Širina puta za kretanje valjaka
- Broj valjaka, presjek, širina i vanjska površina valjka
- Forma valjka za prešanje (cilindrični ili konusni) kod preše sa ravnom matricom



Slika 16. Presjek preše



Slika 17. Dijelovi plosnate preše

Posljednji dio cjelokupne proizvodnje odnosi se na procese koji obuhvaćaju konsolidiranje (filter zaprašinu) i hlađenje dobivenih peleta te pakiranje i samu otpremu peleta.



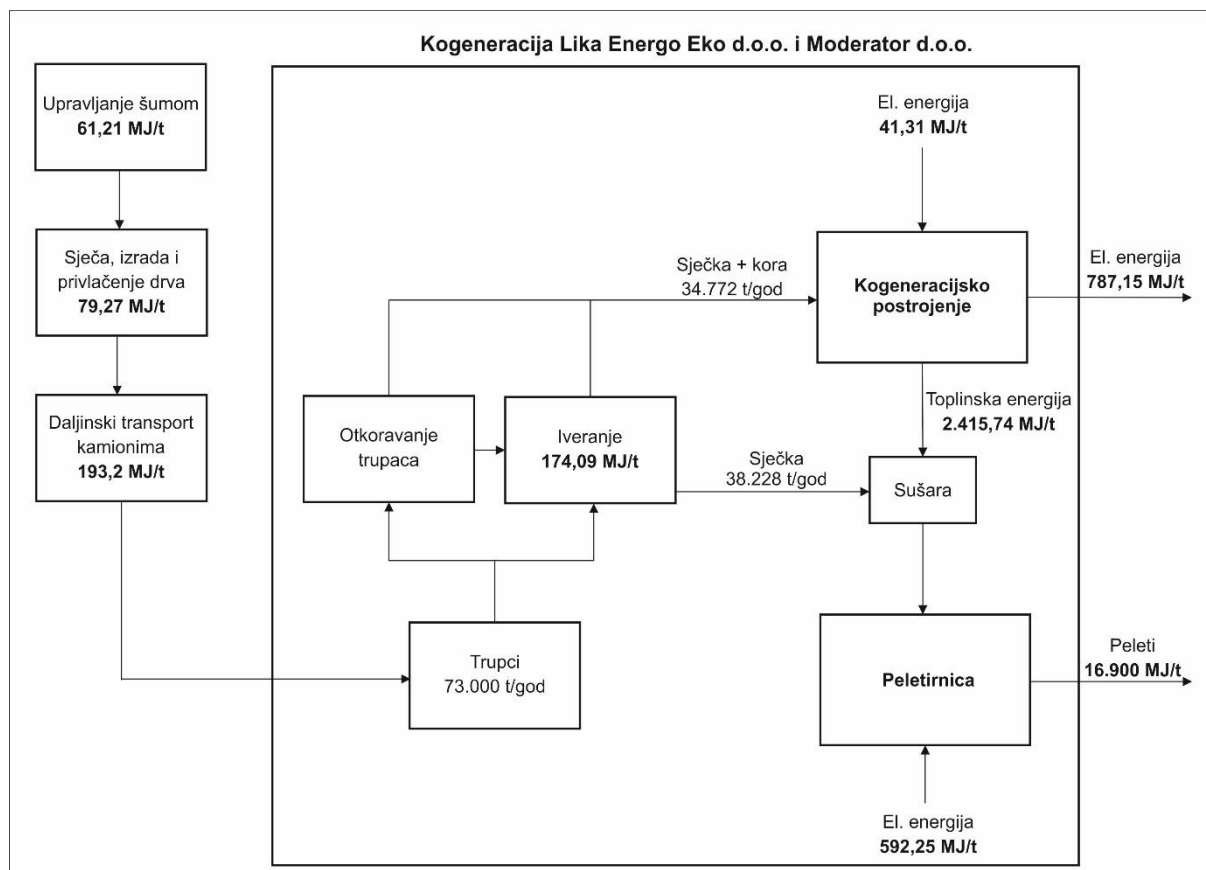
Slika 18. Konsolidiranje i hlađenje peleta



Slika 19. Pakiranje i otprema peleta

5. Rezultati istraživanja

Na temelju prikupljenih osnovnih podataka o utrošku i proizvodnji energije vezanih uz kogeneracijsko postrojenje Lika Energo Eko d.o.o. te podataka vezanih uz proizvodnju drvene mase kao energenta neophodnog za rad kogeneracije, napravljena je analiza dobiti energije kod proizvodnje električne i toplinske energije direktno iz kogeneracije, odnosno energije sadržane u proizvedenim peletima poduzeća Moderator d.o.o. koje otkupljuje svu toplinsku energiju proizvedenu u poduzeću Lika Energo Eko d.o.o.



Slika 20. Shematski prikaz toka energije u kogeneracijskom postrojenju Lika Energo Eko d.o.o.

Oba spomenuta poduzeća posluju na istom mjestu u Udbini i godišnja količina drvene mase koja im je neophodna za proizvodnju iznosi 73.000 tona. Navedena količina sadržana je u obliku višemetarskog ogrijevnog drva, odnosno sortimenata koji svojom tehničkom kvalitetom ne mogu zadovoljiti standarde pilanske industrije. Vrsta drva koja se koristi u poduzećima 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 slučaju promatra se od samog početka, odnosno šume gdje se proizvodi drvena masa. Prikaz energije (uložene i dobivene) po svim prikazanim sastavnicama izražen je u MJ/t (mega joul po toni).

Kao što je prikazano na shematskom prikazu na slici 20. u izračun uložene energije uključena je 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 kroz poslove uzgojnih radova u šumi, zaštite šume, gradnje i održavanja prometnica u šumi te energija sredstava za prijevoz ljudi (osobni automobili, kombi vozila). Navedeni iznos preuzet je iz istraživanja koje provodi Pandur (2013).

Prema istraživanjima istog autora nevedeni 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 koristi se kora, već se kora koristi u kotlu kogeneracije). Radi se o količini od 13.772 tone kore na godišnjoj razini koja se pribraja količini drveta u iznosu 21.000 tona što ukupno daje količinu od 34.772 tone godišnje potrebe kogeneracije za proizvodnju energije. Ostatak količine od 38.228 tone koristi se za proizvodnju peleta (Lovrak, 2013).

Kod proizvodnje peleta trupci bez kore se 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 kogeneracijskog postrojenja. Prije prešanja, osušena drvena masa (udio vode je ispod 13%) ide na otprašivanje/selekciju/rafiniranje. Proizvedeni peleti prije pakiranja prolaze proces hlađenja i otprašivanja. Ukupna količina električne energije koja se koristi u pogonu peletare iznosi 592,25 MJ/t (Lovrak, 2013). Sve pogonske sastavnice peletare koriste električnu energiju iz strujne mreže, osim iverača koji koristi dizelsko pogonsko gorivo za koji Pandur (2013) navodi jedninični utrošak energije u iznosu 174,09 MJ/t.

Za pogon kotla kogeneracije koristi se kora dobivena otkoravanjem i drvni sortimenti koji se iveraju samohodnim dizelskim iveračima. Ukupna potrebna količina drvne 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 3. EROI kogeneracijskog postrojenja i peletare

Proizvod	Energetska vrijednost (MJ/t)		EROI
	Dobivena	Uložena	
Električna energija	787,15	551,08	1,43
Toplinska energija	2415,74	551,08	4,38
Pelet	16900	3514,76	4,81
Kogeneracija –			
ukupno (el. en. + pelet)	17687,15	3556,07	4,97

Konačni proizvodi kogeneracijskog postrojenja Lika Energo Eko d.o.o. su električna energija u iznosu od 787,15 MJ/t koju kao povlašteni proizvođač prodaje Hrvatskoj Elektroprivredi i toplinska energija u iznosu od 2.415,74 MJ/t koju prodaje poduzeću Moderator d.o.o. (tablica 3). Navedene električna i toplinska energija dobivene su na temelju potrošnje drvne sirovine u iznosu od 34.772 t/godišnje. Ukupna energija potrebna za proizvodnju električne i toplinske energije kogeneracijskog postrojenja (uložena energija) iznosi 551,08 MJ/t (prema shemi na slici 20). Odnos dobivene i uložene energije - EROI kod proizvodnje električne energije iznosi svega 1,43 što je vrlo nisko. Brojni autori (Farell i dr. 2006, Hall i dr. 2009, Murphy i Hall, 2010) navode da kod iznosa manjeg od 2 smisao proizvodnje energije postaje upitan.

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

Kod proizvodnje 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

kogeneracijskog postrojenja zaključuje da kod udjela vode u drvnoj sječki u iznosu od 20%, odnos dobivene i uložene energije iznosi preko 7. Isto tako 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 ispravljanje se koristi velika količina toplinske energije.

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

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

6. Zaključci

Prema rezultatima dobivenim u ovom istraživanju može se donijeti zaključak da je energijska isplativost proizvodnje energije (električne i toplinske) u kogeneracijskom postrojenju na granici ($EROI_{uk} = 4,97 : 1$).

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

Odnos dobivene i uložene energije kod proizvodnje peleta je isto na granici energetske isplativosti ($EROI = 4,81 : 1$). Taj odnos se može povećati isključivo korištenjem prosušene drvene sječke (sa udjelom vode ispod 20%) kod koje se malo toplinske energije koristi za njeno sušenje.

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

7. Literatura

1. Danon, G., Furtula, M., 2015: Contribution to the reduction of GHG emission in the pellet production. Second international scientific conference “Wood technology & product design“, 2015, Ohrid, Republic of Macedonia, 32-43.
2. Farrell, A.E., Pelvin, R.J., Turner, B.T., 2006: Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science* 311, 506-508.
3. 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, 1-175.
4. Furtula, M., Danon, G., Bajić, V., Lukačev, D., 2017: Energy Consumption and Equivalent Emission of CO₂ at Wood Pellets Production in Serbia. *Thermal Science*, 21(5), 1905-1915.
5. Posavec, S., Zečić Ž., Beljan, K., Šimunović N., 2016: Izračun profitabilnosti i optimizacija kogeneracijskog postrojenja korištenjem drvene sječke, *Nova mehanizacija šumarstva*, 77-86.
6. Gavran, I., 2018: Potencijal nadzemne biomase topole, Šumarski fakultet, Zagreb, str. 1-29.
7. Hall, C.A.S., Balogh, S., Murphy, D. J., 2009: What is the minimum EROI that a sustainable society must have? *Energies* 2, 25-47.
8. 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, Hotel Westin, 23-35.
9. Međimorec, D., 2014: Biomasa za bioenergiju – web str.:
<http://www.obnovljivi.com/energija-biomase/404-biomasa-za-bioenergiju?showall=1>
10. Murphy, D.J., Hall, C.A.S., 2010: Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 1185, Ecological Economics Reviews, 102–118.
11. Pandur, Z., 2013: Primjena komercijalnog sustava za praćenje rada strojeva u istraživanju izvoženja drva forvarderom. Disertacija, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 1–312.
12. Raguzin, I., 2011: Model analize troškova i dobiti uporabe biomase u proizvodnji električne energije. Magistarski rad, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, str. 1-115.
12. Tonček J., 2016: Pogon elektrane na biomasu Slavonija OIE d.o.o. kogeneracijsko

- postrojenje. Završni rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, str. 1-55.
13. Zečić, Ž., Vusić D., 2016: Predavanja i vježbe iz kolegija Šumski proizvodi. Šumarski fakultet sveučilišta u Zagrebu (.ppt prezentacije).
14. Plevnik, A., 2015: Bioenergana u prehrambenoj industriji, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, str. 1-64.
15. Plevnik, A., 2012: Završni radn, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, str. 1-36.
16. Vašiček, D., 2014: Poslovni plan poduzeća Moderator d.o.o., Ekonomski fakultet, Rijeka, str. 1-49.
17. Tokmakčija, M., 2016: Kogeneracijsko postrojenje za proizvodnju električne energije i drvnog peleta, Karlovac, str 1-46.
18. Web str. – brošura vrelouljnih kotlova:
http://www.kotlovi.hr/_Data/Files/Brosura_Vrelouljni.pdf