

# Izračun profitabilnosti i optimizacija kogeneracijskoga postrojenja korištenjem drvene sječke

Stjepan Posavec, Željko Zečić, Karlo Beljan, Nenad Šimunović

## Nacrtak – Abstract

Primjena biomase u energetici za šumarstvo je jedinstvena prilika. Ono ne samo da osigurava cijenu i tržište za proizvod koji se smatra tehnički najlošijim (prostorno drvo), već omogućuje i znatno učinkovitije iskorištavanje i intenzivnije njegovanje šuma. Razni radovi na njezi šuma, kao što su čišćenje i prve prorede, te uzgojni radovi u degradiranim sastojinama mogli bi postati isplativi s obzirom na to da postoji lokalno tržište i stalna, dugoročna potražnja za drvnom biomasom. Također, sadnja brzorastućih kultura i njihovo uspostavljanje na neobraslom šumskom zemljištu moglo bi povećati atraktivnost ulaganja u šumarstvo jer su stopa i razdoblje povrata puno kraći nego u klasičnom šumarstvu. U radu je korišten programski paket razvijen u tvrtki Lega d.o.o. kako bi se obavio optimizacijski izračun za dva tipa kogeneracijskih postrojenja »Combined Heat and Power« (CHP) i »Organic Rankine Cycle« (ORC), te je izvedena poredbena raščlamba rezultata optimizacijskoga izračuna. Prilikom donošenja odluke o ulaganju u dugoročne investicijske projekte provodi se ocjena financijske učinkovitosti ulaganja, odnosno budžetiranje kapitala. Površina koja zadovoljava godišnje potrebe postrojena izračunata je na temelju godišnjega prinosa kulture, godišnjih potreba za sječkom, duljine ophodnje, ogrjevne vrijednosti sječke i ogrjevne vrijednosti vrbe uzgojene u kulturama kratke ophodnje.

Ključne riječi: biomasa, proizvodnja energije, isplativost, kogeneracija, budžetiranje kapitala

## 1. Uvod i problematika – Introduction and problem statement

Nepredvidivost kretanja cijena energenata, ovisnost o uvozu i posljedice klimatskih promjena dovode obnovljive izvore energije i energetska neovisnost u središte nacionalnih energetske strategija. Republika Hrvatska trenutno uvozi preko 50 % svojih energijskih potreba. U hrvatskoj bilanci potrošnje primarne energije nafta i naftni derivati sudjeluju s oko 50 %, a prirodni plin s oko 25 %. Udio uvoza u potpunom zadovoljavanju energetske potreba dodatno će rasti u budućnosti jer će domaća proizvodnja nafte i prirodnoga plina opadati zbog iscrpljenja ležišta (NN 152/08). Drugi je značajni izazov pred kojim se nalazi energetski sektor smanjenje emisija stakleničkih plinova. Ratifikacijom Protokola iz Kyota 2007. godine i prihvaćanjem Sporazuma iz Dohe 2012. godine Republika Hrvatska preuzela je ove obveze:

- ⇒ udio od 20 % obnovljivih izvora energije u bruto neposrednoj potrošnji energije do 2020. godine, uključujući i velike hidroelektrane
- ⇒ 10 % udjela obnovljivih izvora energije u svim oblicima prijevoza
- ⇒ 35 % udjela obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije, uključujući i velike hidroelektrane do 2020. godine
- ⇒ smanjenje neposredne potrošnje energije za 10 % do 2020. godine u odnosu na prosječnu potrošnju u razdoblju od 2001. do 2005.
- ⇒ smanjenje emisija stakleničkih plinova za 20 % u odnosu na razdoblje od 2001. do 2005.

Istraživanja UNDP-a (Program Ujedinjenih naroda za razvoj) pokazuju da bi se u Republici Hrvatskoj do 2020. godine uporabom biomase moglo osigurati približno 5,5 tisuća izravnih »zelenih« radnih mjesta (broj zaposlenih u proizvodnji opreme i održavanju

postrojenja) te još dodatnih 55 tisuća neizravnih »zele-nih« radnih mjesta u pratećim djelatnostima i industriji (UNDP 2013, Dundović 2011). Tako bi intenzivna primjena biomase u energetici pridonijela rješavanju većine problema energetskoga sektora, ali i istodobno razvoju tehnologije, industrije, poljoprivrede i šumarstva, rastu broja zaposlenih, razvoju konkurentnosti i regionalnomu razvitku. Pojam biomasa razumijeva širok raspon organskoga materijala i definira se kao »biorazgradiv dio proizvoda, otpada i ostataka biološkoga podrijetla iz poljoprivrede (uključujući tvari biljnoga i životinjskoga podrijetla), šumarstva i s njima povezanih proizvodnih djelatnosti uključujući ribarstvo i akvakulturu te biorazgradiv udio industrijskoga i komunalnoga otpada« (Europski parlament i vijeće 2009). Na razini Europske unije biomasa je najvažniji obnovljivi izvor energije, te bi njezin udio u primarnoj energetskoj proizvodnji trebao porasti s 15 % na 22 % do 2050. godine. U tom slučaju biomasa bi uz nuklearnu energiju i sve ostale obnovljive izvore trebala biti treći najveći izvor primarne energije u Europskoj uniji (Europska komisija 2013). U Republici Hrvatskoj predviđa se uporaba 26 PJ (petadžul) iz biomase do 2020. godine. Dio te biomase trebao bi se upotrebljavati u elektranama na biomasu ukupne snage oko 85 MW (Ministarstvo gospodarstva 2013). Također, kruta biomasa koja obuhvaća drvenu biomasu i biomasu iz poljoprivrede trebala bi činiti 64,5 % energije iz obnovljivih izvora koja će se koristiti za grijanje i hlađenje. Domac i dr. (2001) predviđaju da bi se iz biomase i otpada do 2020. moglo osigurati približno 15 % ukupne primarne potrošnje energije u Republici Hrvatskoj.

Drvena se biomasa može razvrstati na niz tipova, no za potrebe ovoga rada pažnja će se posvetiti isključivo drvnoj biomasu. Pod pojmom drvena biomasa razumijeva se obujam stabla ili sastojine koji se ne može koristiti za proizvodnju tehničkih sortimenata ili u industrijskoj preradi te se zato koristi za dobivanje energije. Stoga taj pojam obuhvaća ogrjevno drvo, granjevinu i sitno drvo (drvo čiji je promjer manje od 7 cm na debljem kraju), otpad nastao prilikom sječe, otpad i ostatke nastale prilikom prerade drva u drvnoj industriji, ali i drvo iz degradiranih ili opožarenih sastojina. Ipak, glavni izazov uporabe biomase nije toliko u njezinoj raspoloživosti, koliko u održivom gospodarstvu šumama. Također, ključno je osigurati kvalitetnu pretvorbu biomase i isporuku na tržište u obliku kvalitetnoga i modernoga proizvoda koji će zadovoljavati sve tehničke i kvalitativne zahtjeve kupca.

Kogeneracija je naziv za tehnologiju istodobne proizvodnja električne i toplinske energije u jedinstvenom procesu (NN 130/09). Prednosti su kogeneracijskih sustava, u odnosu na elektrane i toplane (sustave

odvojene opskrbe), značajno manji gubici koji nastaju prilikom zasebne proizvodnje toplinske ili električne energije. Za istu količinu primarne energije (fosilnoga goriva, biomase ili drugoga primarnoga izvora) kogeneracijsko postrojenje isporučit će u nekim slučajevima i do 40 % više električne i toplinske energije nego sustav s odvojenom opskrbom (Lončar i dr. 2009). Zakonom o energiji (NN 102/15) Republika Hrvatska proglasila je kogeneracijska postrojenja objektima od interesa za Republiku Hrvatsku. Korištenje se kogeneracija stimulira do 2020. godine te se predviđa izgradnja kogeneracijskih jedinica ukupne snage u protutlačnom radu od barem 300 MW, od čega bi 100 MW bilo instalirano u obliku mirkokogeneracija i malih kogeneracijskih jedinica. Veći dio te snage odnosi se na industrijske kogeneracijske jedinice, a manji na kogeneracijske jedinice u centraliziranim toplinskim sustavima (Ministarstvo gospodarstva 2013). Primjena kogeneracijskih postrojenja u industriji može značajno pridonijeti smanjenju potrošnje primarne energije na nacionalnoj razini jer industrija sudjeluje u neposrednoj potrošnji preko 20 % (NN 152/08). Industrijski sektor ostvaruje korist izbjegavanjem dviju glavnih neizvjesnosti: kretanje cijene nafte i ostalih energenata. Na nacionalnoj se razini puno očekuje od primjene kogeneracije i u proizvodnji električne energije. Do kraja 2020. godine najmanji udio električne energije proizveden iz kogeneracijskih postrojenja u ukupnoj neposrednoj potrošnji električne energije trebao bi biti 4 %. Osim u proizvodnji električne energije očekuje se da će kogeneracijska postrojenja značajno pridonijeti podizanju učinkovitosti u proizvodnji energije za grijanje i hlađenje. Značenje je toga sektora veliko jer udjelom od 8,2 % uvelike pridonosi planiranomu ukupnomu smanjenju potrošnje od 20 % (Ministarstvo gospodarstva 2013). Glavni instrument kojim se stimulira primjena kogeneracija jest uvođenje posebnoga tarifnoga sustava kojim se određuje povlaštena cijena električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora u kogeneracijskim postrojenjima (NN 133/13). Također, investicijska klima za izgradnju kogeneracijskih jedinica pokušava se stvoriti razvojem konkurencije na tržištu električne energije i uspostavom sheme trgovanja emisijskim jedinicama. U slučaju viših cijena emisijskih jedinica CO<sub>2</sub> i visokih cijena fosilnih goriva do izražaja će doći znatno povoljnija proizvodnja električne energije u kogeneracijskoj jedinici u odnosu na proizvodnju električne energije u termoelektrani (NN 130/09).

### 1.1 Budžetiranje kapitala šumarske tvrtke *Capital budgeting in a forest company*

Glavni je cilj svake tvrtke ili dioničkoga društva maksimizacija njegove vrijednosti, odnosno maksimi-

zacija vrijednosti dioničara društva ili vlasnika tvrtke (Birgham i Davis 2013). Posljedično, jedan od glavnih zadataka menadžera je odabir kvalitetnih investicija koje će ostvariti odgovarajuću stopu povrata te tako povećati vrijednost tvrtke i ostvarivanje razvojnih ciljeva (Brealy i dr. 2011). Pojam investicija uobičajeno opisuje ulaganje materijalnih ili nematerijalnih vrijednosti (poput znanja) u sadašnjosti radi ostvarivanja pozitivnih učinaka u budućnosti. Iz opisa je vidljivo da je glavno obilježje investiranja odgođeno uživanje koristi s obzirom na to da uloženi kapital donosi korist tek nakon određenoga razdoblja. Prilikom donošenja odluke o ulaganju u dugoročne investicijske projekte provodi se ocjena financijske učinkovitosti ulaganja, odnosno budžetiranje kapitala. Postupak budžetiranja kapitala obuhvaća pronalaženje investicijskih prilika, prognozu novčanih tokova projekta i ocjenu njihove financijske učinkovitosti primjenom kriterija financijskoga odlučivanja. Osnovne su značajke budžetiranja kapitala: koncept novčanih tokova, diskontna stopa kao oportunitetni trošak ulaganja tvrtke, rizik i neizvjesnost te vremenska vrijednost novca (Orsag i Dedi 2011). Prilikom donošenja odluke o investiciji investitor se koristi metodama financijskoga odlučivanja. Primjenom metoda dobivaju se odgovarajući rezultati koji se uspoređuju s kriterijima postavljenim pred projekt (npr. željena stopa povrata). Odluka o investiciji donosi se na temelju usporedbe vrijednosti dobivenih pokazatelja i postavljenih kriterija. Tablica 2 prikazuje podjelu metoda financijskoga odlučivanja (Orsag i Dedi 2011).

U sklopu investicijske studije često se provode tehničko-tehnološke i tehničko-ekonomske analize. Tehničko-tehnološka analiza prikazuje osnovne dijelove proizvodnoga procesa, daje prikaz mogućih tehnoloških rješenja i njihovih značajki. Cilj je identificirati tehnološki proces koji će se primjenjivati u investicijskom projektu, odnosno odabrati tehnologiju koja će ostvarivati kapacitet u skladu s planom uz najmanje troškove. Glavni rizici povezani s procjenom financijske učinkovitosti investicijskih projekata vezani su uz budućnost i neizvjesnost koju ona donosi. Primjena matematičkih modela jedan je od načina na koji se pokušava umanjiti neizvjesnost planiranja budućega poslovanja, predvidjeti vrijednost ekonomskih ili tehničkih pokazatelja u promijenjenim uvjetima, odabrati optimalne tehničke procese te provesti racionalizaciju troškova proizvodnje putem optimizacije rada.

Cilj je ovoga rada analizirati dva tipa kogeneracijskih postrojenja (*CHP* i *ORC*). Analiza se odnosi na usporedbu troškova proizvodnoga procesa i vrijednosti proizvedene energije. Također, prikazana je

potrebna površina zemljišta za proizvodnju drvne biomase koja bi služila kao pogonsko gorivo kogeneracijskomu postrojenju.

## 2. Materijal i metoda rada – *Materials and methods*

Suvremeni su optimizacijski programi »vjerne kopije realnog poslovnog sustava namijenjene potpori pri donošenju poslovnih odluka« (Medarac 2013). Radi se o programskim paketima koji sadrže matematičke opise (modele) svih elemenata postrojenja i sve odnose potrebne za termodinamički proračun komponenata postrojenja. Na taj način programski paket može simulirati čitavo postrojenje i njegov rad u bilo kojim zadanim uvjetima (Bogdan i dr. 2002). Jezgru programskoga paketa čini optimizacijski algoritam koji, ovisno o zadanim tržišnim uvjetima, određuje plan angažiranja raspoloživih izvora radi postizanja najmanjega troška proizvodnje. Značenje primjene računalnih programa kao podrške pri odlučivanju i planiranju poslovnih odluka za kogeneracijska je postrojenja veliko, a dinamika isporuke toplinske energije ne podliježe zakonima tržišta na isti način koji vrijedi za električnu energiju (Bogdan i dr. 2001). U radu je korišten programski paket razvijen u tvrtki Lega d.o.o. kako bi se obavio optimizacijski izračun za dva tipa kogeneracijskih postrojenja i poredbena raščlamba rezultata optimizacijskoga izračuna. Odabir tehnologija koje se mogu primjenjivati u kogeneracijskim postrojenjima na biomasu odrađen je na temelju pregleda stručne literature. Konačni izbor značajki (konfiguracije) istraživanih kogeneracijskih postrojenja obavljen je na temelju dvaju kriterija:

- ⇒ raspona primjene tehnologije
- ⇒ ekonomske zrelosti tehnologije.

Uporabom programskoga paketa simuliran je rad dvaju različitih tipova kogeneracijskoga postrojenja te primjenom ekonomskih funkcija određena maksimizacija dobiti. Optimizacijski izračun koristi se za postrojenja izlazne električne snage 1 MW<sub>e</sub>, dok se izlazna toplinska snaga namijenjena prodaji mijenja u rasponu od 1 do 6 MW<sub>t</sub>. Kao izlazni parametri optimizacijskoga izračuna dobivaju se tehnički i ekonomski pokazatelji rada za navedene uvjete. Na temelju ekonomskih pokazatelja rada postrojenja provedena je poredbena raščlamba i odabrana ona konfiguracija postrojenja i režim rada koji generira najveću dobit uz istodobno zadovoljavanje uvjeta (ograničenja) scenarija.

Iznos godišnjih potreba postrojenja za drvnom biomasom, koji se dobije kao jedan od tehničkih parametara optimizacijskoga izračuna, poslužit će za izračun

veličine površine koja zadovoljava godišnje potrebe odabranoga postrojenja za biomasom prema Sučiću (2008). Drvna biomasa koja se iskorištava u bioenergetskim postrojenjima pridobiva se iz šumskih sastojina ili kultura kratkih ophodnji, stoga će se potrebna veličina površine izračunati za oba slučaja. Količina šumske biomase koja se može pridobiti iz šumske sastojine ovisi o nizu sastojinskih čimbenika (razmjer dobnih razreda, strukturi vlasništva, dominantnoj vrsti, uzgojnom obliku i sl.). Za slučaj kad se postrojenje opskrbljuje iz kulture kratkih ophodnji uzet će se podaci o prinosu kultura kratkih ophodnji korišteni u sklopu projekta BEE (Kajba i dr. 2010). Ako se postrojenje opskrbljuje sječkom iz kulture kratke ophodnje, izračun se izvodi na temelju podataka o prinosu kultura kratkih ophodnji uporabljenih u projektu BEE. U sklopu projekta utvrđeno je da se prinos vrbovih kultura kratkih ophodnji u istočnoj Hrvatskoj kreće u rasponu od 8 do 22 t DM/ha. Visina prinosa ovisi o tipu tla i o primjeni agrotehničkih mjera tijekom uzgoja kulture (Kajba i dr. 2010). Za izračun površine kulture koja zadovoljava godišnje potrebe postrojenja i ukupne površine kulture koristit će se prinos od 12 t DM/ha/god. (»DM – masa suhe drvne tvari«) jer se uzgoj kultura kratke ophodnje preporučuje isključivo na šumskom zemljištu i niskoproduktivnim (marginalnim) poljoprivrednim tlima kako bi se izbjegao sukob između korištenja zemljišta za proizvodnju goriva umjesto za proizvodnju hrane. Također, relativno je niski prinos odabran za plansku veličinu jer primjena agrotehničkih mjera dovodi do značajnoga porasta troškova (Kajba i dr. 2010).

### 2.1 Izbor konfiguracije i optimizacija analiziranih postrojenja – *The selection of configuration and optimization of analyzed plants*

U sklopu rada provodi se optimizacija i poredbena raščlamba dvaju tipova kogeneracijskoga postrojenja. Prije pristupanja optimizaciji i analizi izlaznih pokazatelja potrebno je definirati konfiguraciju postrojenja. Odabir glavnih značajki kogeneracijskih postrojenja: tehnologije primarne pretvorbe biomase i tehnološkoga procesa, proveden je na temelju pregleda stručne literature (Lončar i dr. 2009). Ekonomska zrelost i raspon primjene tehnologije predstavljaju kriterije na temelju kojih je napravljen izbor. Kao objekt istraživanja određena su:

- ⇒ kogeneracijsko postrojenja s izravnim izgaranjem biomase na rešetki u parnom ciklusu (CHP)
- ⇒ kogeneracijsko postrojenja s izravnim izgaranjem biomase na rešetki u organskom Rankinovu ciklusu (ORC).

Izravno izgaranje biomase na rešetki izabrano je kao primarna tehnologija pretvorbe biomase u oba postrojenja jer je tehnologija izravnoga izgaranja krute biomase dominantna tehnologija u kogeneracijskoj proizvodnji električne i toplinske energije iz biomase, dok se od tehnologije rasplinjavanja biomase značajniji doprinos očekuje tek u budućnosti (Lončar i dr. 2009). Ložišta s izgaranjem biomase na rešetki, za razliku od ložišta s izgaranjem u mjhuričastom sloju, pogodnija su za primjenu u postrojenjima manje toplinske snage (<10 MW<sub>t</sub>) te predstavljaju razvijenu, tržišno zrelu i dugo vremena standardnu tehnologiju izgaranja biomase koja se nalazi u ponudi većine proizvođača energetske opreme. Druga je bitna značajka za konfiguriranje kogeneracijskoga postrojenja izbor implementiranoga tehnološkoga procesa. Konfiguracija u ORC-u karakteristična je za postrojenja niže i niže srednje snage, a konfiguracija u ciklusu CHP za postrojenja srednje i više srednje snage.

Matematičko programiranje ili optimizacija naziv je za granu matematike koja proučava maksimizaciju ili minimizaciju određene funkcije. Postupkom optimizacije traži se najpovoljnije rješenje određenoga problema s obzirom na određeni kriterij ili skup ograničenja (Čerić 2004). Metode matematičkoga programiranja primjenjuju se također i za određivanje optimalnoga pogonskoga režima kogeneracijskih postrojenja. Određivanje optimalnoga pogonskoga režima kompleksan je problem zbog brojnosti i međuovisnosti tržišnih čimbenika (varijabilne cijene goriva, promjene otkupne cijene električne i toplinske energije, zahtjevi za brzim izmjenama opterećenja, uvođenje emisijskih poreza), stoga se za njegovo određivanje primjenjuju specijalizirani računalni programi. Za provođenje optimizacijskoga izračuna potrebno je definirati cilj optimizacije te uvjete i polazne parametre pomoću kojih se definira scenarij i postavlja okvir rada postrojenja. Glavna je svrha postupka optimizacije smanjivanje troškova proizvodnje za opisani scenarij. Kao izlazi iz modela, odnosno kao rezultat optimizacijskoga izračuna, dobiveni su tehnički i ekonomski parametri postrojenja za zadani scenarij.

### 2.2 Polazni parametri optimizacijskoga izračuna *Input parameters for optimization calculation*

Polazni su parametri osnovni ulaz u matematički model pomoću kojega se izračunavaju sve ostale ulazne veličine korištene u daljnjem radu matematičkoga modela. Tablica 1 prikazuje ulazne parametre korištene u ovom radu. Veličine su ulaznih parametara određene na temelju stručnoga mišljenja i postavljenoga modela tvrtke Lega d.o.o. Prinos kulture izražen je u tonama suhe tvari koja ima veću ogrjevnu vrijednost

od vrbova drva s udjelom vlage od 22 % (Francescato i dr. 2008), stoga će se prinos suhe tvari preračunati u prinos vrbove biomase s udjelom vlage 22 %. Najveći utjecaj na ogrjevnu vrijednost biomase ima sadržaj vlage te udio pepela u biomasi. Zbog toga je osnovni cilj zadržati što manju vlažnost sirove šumske biomase koja se koristi u energetskim postrojenjima kao pogonsko gorivo. Tako se vlažnost u velikim postrojenjima nastoji zadržati ispod 50 %, dok se kod malih postrojenja nastoji zadržati do 40 % (Kallio i Leinonen 2005). Prema rezultatima projekta BIOEN uskladišteno iverje ima mokrinu  $W$  od 20 do 30 % (Domac i dr. 2001).

**Tablica 1.** Polazni parametri optimizacijskoga izračuna

**Table 1** Input parameters in optimization calculation

Parametri – Parameters	Jed. mjere Unit measure	Vrijednost Value
Sastav drvne sječke – Structure of wood chips	%	100
Hrast – Oak	%	38
Bukva – Beech	%	34
Grab – Hornbeam	%	9
Joha – Alder	%	19
Udio vlage u sječki – Moisture share in chips	%	22*
Toplinska vrijednost – Thermal value	MJ/t	13,92
Udio ind. ostatka – Share of industrial residue	%	10
Cijena topline – Price of heat	kn/MWh	136
Sati rada – Work hours	h/god	8000
Broj zaposlenih – Number of employees		6
Bruto plaća – Gross salary	kn/mj.	8000
Vrijednost CHP kogen. Value of CHP cogeneration	mil. kn	50,88
Vrijednost ORC kogen. Value of ORC cogeneration	mil. kn	28,94
Tečaj EUR 19. 3. 2015. Exchange rate of EUR March 19, 2015	kn/€	7,648
Cijena ind. ostatka – Price of industrial residue	€/t	30
Cijena šumske sječke – Price of wood chips	€/t	50

\* Izvor – Source (Francescato i dr. 2008)

Kao cilj optimizacijskoga izračuna postavljena je maksimizacija dobiti postrojenja uz istodobno postizanje maksimalne učinkovitosti postrojenja. Optimizacijski će se izračun provoditi u skladu s ekonomskom funkcijom cilja s obzirom na to da se prilikom donošenja investicijske odluke u prvi plan postavlja pitanje izbora tehnologije postrojenja koja će tijekom eksploatacijskoga razdoblja omogućiti ekonomski op-

timalan pogon te tako osigurati željenu profitabilnost investicije bez stvaranja dodatnih troškova (Lončar i dr. 2009, Kuhl-Thalfeldt i Valtin 2007). U radu se razlikuju scenariji po izlaznoj toplinskoj snazi, odnosno optimizacijski se izračun radi za postrojenja izlazne električne snage 1 MW<sub>e</sub>, dok se izlazna toplinska snaga namijenjena prodaji mijenja u rasponu od 1 do 6 MW<sub>t</sub>. Ostale su odrednice scenarija definirane ulaznim parametrima i tehničkim značajkama konfiguracija postrojenja. Kriteriji s obzirom na koje se vrši optimizacija definirani su karakteristikama scenarija, oni daju osnovne uvjete koje mora zadovoljiti rad kogeneracijskoga postrojenja, te tako postavljaju okvir za pronalaženje optimalnoga režima rada u skladu s definiranim ciljem. Ostvarivanjem prava na prodaju proizvedene električne energije po poticajnoj cijeni značajno raste ostvarena dobit postrojenja, stoga uvjeti na temelju kojih proizvođač ostvaruje pravo na poticajnu cijenu predstavljaju kriterije korištene za optimizaciju rada odabranih postrojenja. Visina poticajne otkupne cijene električne energije i uvjeti koje proizvođač mora zadovoljiti definirani su »Tarifnim sustavom za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije« (NN 133/13).

Ukupna godišnja energetska učinkovitost obnovljivoga izvora energije ( $\eta_k$  OIE) definirana je izrazom (NN 127/2010):

$$\eta_k \text{ OIE} = (3600 - Eu) + \frac{Hk}{Q} \quad (1)$$

Gdje je:

- $\eta_k$  OIE ukupna godišnja učinkovitost postrojenja
- $Eu$  proizvedena električna energija, MWh
- $Hk$  proizvedena korisna toplina, MJ
- $Q$  primarna energija goriva, MJ.

Uvjet za ostvarivanje prava na poticajnu cijenu najznačajnije je ograničenje koje mora zadovoljiti rad planiranoga postrojenja. Stoga je ovaj uvjet postavljen kao glavni kriterij u skladu s kojim će se izraditi poredbeno raščlamba ekonomskih pokazatelja rada postrojenja dobivenih optimizacijskim izračunom. Ugovor o otkupu električne energije proizvedene iz proizvodnih postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije i kogeneracijskih postrojenja sklapa se na vrijeme od 14 godina, stoga je navedeno razdoblje maksimalno razdoblje povrata investicije. Visina poticajne cijene ( $c$ ), koja je utvrđena sklopljenim ugovorom o otkupu električne energije, korigira se svake godine u odnosu na utvrđenu korigiranu poticajnu cijenu iz prethodne godine primjenom indeksa potrošačkih cijena koji objavljuje Državni zavod za statistiku za prethodnu kalendarsku godinu za sve sklopljene valjane ugovore o

otkupu električne energije. Prva korekcija cijena primjenjuje se u kalendarskoj godini koja slijedi godinu u kojoj je ugovor o otkupu električne energije sklopljen. Godišnje potrebe postrojenja za drvnom biomasom dobivene su matematičkim modeliranjem za svaki režim rada postrojenja kao jedan od tehničkih pokazatelja. Godišnje su potrebe postrojenja izražene u 1000 t/god. te strukturirane prema izvoru na šumsku sječku i drveni ostatak. Kao polazna vrijednost za izračun površine potrebne za opskrbljivanje postrojenja koristit će se samo godišnje potrebe za šumskom sječkom onoga postrojenja koje je na temelju poredbene raščlambe ekonomskih pokazatelja rada utvrđeno kao najisplativije. Budući da je drvenu sječku moguće pridobivati iz dvaju u potpunosti različitih izvora (šumskih sastojina i kultura kratke ophodnje), potrebna površina za opskrbu postrojenja izračunat će se za oba slučaja.

### 3. Rezultati – Results

U ovom poglavlju prikazani su rezultati optimizacijskoga izračuna prema ekonomskoj funkciji cilja, maksimizacijom dobiti kogeneracijskih postrojenja za *CHP* i *ORC* kogeneracije na šumsku sječku uz dodatak 10 % industrijskoga drvnog ostatka za 1 MW<sub>e</sub> izlazne električne snage kojom se električna energija isporučuje u elektroenergetski sustav (EES). Izračunata je izlazna snaga topline namijenjene prodaji od 1, 2, 3, 4, 5 i 6 MW<sub>t</sub>. Rezultati su izračuna podijeljeni na ekonomske i tehničke pokazatelje te su prikazani u odnosu na konfiguraciju postrojenja.

#### 3.1 Poredba rezultata za *CHP* i *ORC* kogeneracije *Comparison of results for CHP and ORC cogeneration*

Poredba rezultata izračuna za *CHP* i *ORC* kogeneracije obavljena je za dva temeljna kriterija kojima se stječe, određuje i provjerava status povlaštenoga proizvođača električne energije iz obnovljivih izvora, a to su:

- ⇒ dobit odnosno gubitak u tisućama eura mjesečno (1000 €/mj) jer će investitor uložiti samo u postrojenje čija konfiguracija osigurava pokriće svih troškova rada, otplatu anuiteta kredita za investiciju i uza sve to pozitivan poslovni rezultat odnosno dobit. Ako rezultati ekonomske analize pokažu gubitak, od investicije se odustaje.
- ⇒ ukupna učinkovitost postrojenja pokazuje da li odabrano postrojenje zadovoljava uvjet ukupne godišnje učinkovitosti veće od 50 %. Zadovoljavanjem toga uvjeta ostvaruje se pravo na otkup proizvedene električne energije po povlaštenoj cijeni.

Na temelju istih kriterija odabrat će se postrojenje za koje će se izračunati veličina površine koja zadovoljava potrebe postrojenja za šumskom sječkom. Rezultati poredbene raščlambe izračunatih varijanti režima rada promatranih kogeneracijskih postrojenja na obnovljive izvore energije prikazani su u tablici 2. Poticajna je cijena izračunata prema važećem tarifnom sustavu (NN 127/2010).

**Tablica 2.** Poredbena raščlamba ključnih parametara kogeneracijskih postrojenja

**Table 2** The comparison analysis of the key parameters of cogeneration plants

Toplina Heat	$E_{\text{CHP}}$	$E_{\text{ORC}}$	$E_{\text{min}}$	Dobit <sub>CHP</sub> Profit <sub>CHP</sub>	Dobit <sub>ORC</sub> Profit <sub>ORC</sub>
MW <sub>t</sub>	%	%	%	1000 €/mj	1000 €/mj
1	43,55	23,91	50	32,14	25,77
2	55,78	35,88	50	42,28	38,57
3	64,9	47,86	50	52,15	51,37
4	71,96	59,84	50	61,83	64,18
5	77,59	71,81	50	71,41	76,98
6	82,19	83,84	50	80,9	89,83

Iz tablice 2 vidljivo je da ni jedno kogeneracijsko postrojenje ne zadovoljava uvjet efikasnosti ( $\eta_{\text{OIE}} = 50\%$ ) kod malih izlaznih snaga pa prema tomu u tim uvjetima ne mogu ostvariti uvjet povlaštenosti, što automatski generira gubitak u poslovanju i investicija nije prihvatljiva. Parno *CHP* kogeneracijsko postrojenje dostiže granični slučaj kod izlazne toplinske snage od 1,7 MW<sub>t</sub>, a *ORC* tek pri izlaznoj toplinskoj snazi od 3,2 MW<sub>t</sub>. U čitavom području rada *CHP* postrojenje ima veću efikasnost, a *ORC* ga dostiže tek kod izlazne toplinske snage od 5,6 MW<sub>t</sub>.

Na temelju prikazanih rezultata i definiranih kriterija određeno je da će se za *ORC* postrojenje s izlaznom električnom snagom 1 MW<sub>e</sub> i izlaznom toplinskom snagom 6 MW<sub>t</sub> izračunati veličina površine koja zadovoljava potrebe postrojenja za šumskom sječkom. Kriterij za odabir postrojenja s navedenim karakteristikama bila je ostvarena dobit. Navedeno postrojenje prema modelu tvrtke Lega d.o.o. ostvaruje najveću dobit od svih ostalih konfiguracija. Prema modelu tvrtke Lega d.o.o. (koji uključuje godišnje prinose, površinu, snagu postrojenja i ostale parametre) ukupne godišnje potrebe ovoga postrojenja za šumskom sječkom iznose 15 763,37 tona.

### 3.2 Veličina kulture kratke ophodnje koja zadovoljava godišnje potrebe postrojenja

*Size of short rotation plantation that meets annual needs of the plant*

Površina koja zadovoljava godišnje potrebe postrojenja izračunata je na temelju godišnjega prinosa kulture, godišnjih potreba za sječkom, duljine ophodnje, ogrjevne vrijednosti sječke i ogrjevne vrijednosti vrbe uzgojene u kulturama kratke ophodnje. Izračunu veličine potrebne površine za opskrbu postrojenja sječkom iz kulture kratke ophodnje pristupa se preko potreba postrojenja za primarnom energijom jer se ogrjevna vrijednost sječke definirana ulaznim parametrima značajno razlikuje od ogrjevne vrijednosti vrbe uzgojene u kulturi kratke ophodnje. Navedeno se odnosi isključivo na udio vode. Iz rezultata je vidljivo da je ukupna površina kulture neovisna o duljini ophodnje s obzirom na to da je pretpostavljen jednolik godišnji prinos tijekom čitave duljine ophodnje. Tablica 3 i 4 prikazuju rezultate izračuna.

**Tablica 3.** Prinosi kulture kratke ophodnje u odnosu na duljinu ophodnje

**Table 3** Short rotation plantation yields in relation to the length patrols

Ophodnja <i>Rotation period</i>	Ukupni prinos suhe tvari <i>Total dry matter yield</i>	Prinos biomase <i>Biomass yield</i> M = 22 %	Prinos primarne energije <i>Primary energy yield</i>
Godine – Years	t/ha	t/ha	MJ/ha
2	24	27,27	376.778
5	60	68,18	941.945

Vrijednosti u tablici 3 dobivene su na temelju dosadašnjih istraživanja Kajbe i dr. (2010) te Francescata i dr. (2008).

**Tablica 4.** Površina kulture koja zadovoljava godišnje potrebe postrojenja

**Table 4** Plantation surface that meets annual needs of plants

Potrebna površina za godišnju opskrbu postrojenja <i>Surface required for the annual supply of plants</i>	
Ophodnja, god. <i>Rotation period, years</i>	Površina, ha <i>Area, ha</i>
2	582,37
5	232,95

Iz tablice 1 vidljivo je kako ogrjevna vrijednost sječke iznosi 13,92 MJ/kg, a ukupne godišnje potrebe ovoga postrojenja za šumskom sječkom iznose 15 763,37 tona (izlazni parametar modela tvrtke Lega d.o.o.). Množenjem tih vrijednosti dobiveno je 219 426 110,46 MJ potrebne energije za cijelo postrojenje. U tablici 3 prikazane su vrijednosti prinosa primarne energije za dvogodišnju i petogodišnju ophodnju. Stavljanjem u odnos potrebe energije za cijelo postrojenje i prinosa kulture dobivene su vrijednosti prikazane u tablici 4.

## 4. Zaključak – Conclusion

Ciljevi i odrednice energetske politike na razini Europske unije dramatično su se promijenili u posljednjih petnaestak godina. Razne gospodarske i političke krize te katastrofalne posljedice klimatskih promjena istaknule su važnost potrajnoga gospodarenja resursima i omogućile proboj ideje održivoga razvoja iz znanstvenih krugova u nacionalne strateške dokumente. Ugradnja ideje održivoga razvoja u razvojne politike ne pridonosi samo sprečavanju negativnih posljedica na okoliš, već istodobno pridonosi gospodarskomu i društvenomu razvoju. Ublažavanje klimatskih promjena, potreba za čistom i lokalno proizvedenom energijom, te zaštita i potrajno upravljanje prirodnim resursima istaknuti su kao najznačajniji izazovi koji se nalaze pred modernim društvom. Republika Hrvatska u sklopu svoje nove energetske strategije opredijelila se za intenzivnije korištenje obnovljivih izvora energije i poticanje energetske učinkovitosti. Te bi mjere trebale pridonijeti smanjenju energetske ovisnosti koja je zbog izrazite volatilnosti cijene energenata jedan od glavnih problema Republike Hrvatske. Šumarstvo, poljoprivreda, energetika i turizam smatraju se gospodarskim djelatnostima koje su najviše pogođene i najosjetljivije na klimatske promjene, stoga je proizvodnja »čiste« energije iz šumske biomase jedinstvena prilika za šumarstvo i energetski sektor. Intenzivno korištenje šumske biomase za proizvodnju energije omogućilo bi znatno učinkovitije iskorištavanje i intenziviralo njegu šuma. Razni radovi na njezi te uzgojni radovi u degradiranim sastojinama mogli bi postati isplativi jer bi se osiguralo lokalno tržište i stalna potreba za drvom iz tih radova. Također, s povećanom njegovom šuma porastao bi i godišnji prirast, što bi značajno povećalo ponor ugljika. Istodobno se energetskomu sektoru osigurava trajni izvor domaćega, ekološki prihvatljivoga energenta.

U radu je korišten računalni model kako bi se optimizacijskim izračunom dobili ekonomski i tehnički parametri CHP i ORC kogeneracijskoga postrojenja.

Izračunom je utvrđeno da postrojenja u svim uvjetima mogu generirati dobit, no da pri niskoj izlaznoj toplinskoj snazi ne zadovoljavaju uvjet o ukupnoj energetske učinkovitosti postrojenja. Nezadovoljavanjem toga uvjeta gubi se pravo na otkup proizvedene električne energije po poticajnoj cijeni, što ima značajne posljedice na poslovni rezultat postrojenja jer u strukturi prihoda postrojenja najveći udio zauzimaju prihodi od prodane električne energije. Stoga u slučaju nezadovoljavanja uvjeta o energetske učinkovitosti ukupan rad, a time i investicija u postrojenje postaju neisplativi. Nadalje, izračunom je utvrđeno da *CHP* postrojenje ima veću iskoristivost od *ORC* postrojenja u gotovo čitavom rasponu izlazne toplinske snage, no da unatoč tomu ostvaruje veću dobit od *ORC* postrojenja samo pri nižoj izlaznoj toplinskoj snazi. Ti rezultati potvrđuju pretpostavku da se kogeneracijsko postrojenje mora dimenzionirati u skladu s ukupnim potrebama i dinamikom potrošnje toplinskoga konzuma bez obzira na to što se najveći prihodi ostvaruju prodajom električne energije.

U slučaju opskrbe postrojenja šumskom sječkom iz kulture kratkih ophodnji ukupna površina kulture koja trajno može zadovoljavati godišnje potrebe postrojenja iznosi približno 582 ha za dvogodišnju ophodnju, odnosno 232 ha za petogodišnju ophodnju. Ta je površina velika, pogotovo kad se uzme u obzir da se uzgoj vrbovih kultura kratkih ophodnji najviše istražuje i planira u istočnoj Hrvatskoj gdje su poljoprivredne površine često vrlo rascjepkane i usitnjene. Uspostavu vrbovih kultura kratkih ophodnji na tako velikom zemljištu otežava i to što se one trebaju uspostavljati samo na marginalnom poljoprivrednom zemljištu. Zbog toga u slučaju uspostave kulture realno se može očekivati da čitava kultura neće biti objedinjena na istoj lokaciji, već da će površine koje zadovoljavaju godišnje potrebe postrojenja biti raštrkane na manjim udaljenostima. U slučaju nedostatka zemljišta i poteškoća s njegovim okrupnjavanjem preporučuje se planiranje uzgoja s dužom ophodnjom jer se tako uživa veća količina biomase s iste površine. Ako se postrojenje opskrbljuje drvnom sječkom iz šumskih sastojina, u većini je slučajeva potreban godišnji etat po površini između 10 000 ha i 12 000 ha kako bi se zadovoljile godišnje potrebe postrojenja za šumskom sječkom.

Zaključno, na temelju prikazanih rezultata vidljivo je da računalni programi namijenjeni optimizaciji rada kogeneracijskih postrojenja mogu služiti i za planiranje izvora opskrbe energetske postrojenja. Optimizacijskim izračunom mogu se dobiti godišnje potrebe postrojenja za šumskom sječkom, što je posebno korisno u slučaju velikoga broja planiranih postrojenja

na istom području. U tom se slučaju mogućnosti zadovoljavanja potreba svih postrojenja za gorivom mogu utvrditi na temelju usporedbe izračunatih godišnjih potreba postrojenja za drvnom sječkom s planom sječe za opskrbno područje ili s rezultatima analize raspoloživosti biomase na istom području. Tako bi se jednostavno i brzo moglo odrediti je li opskrba postrojenja moguća i dugoročno održiva na određenom području.

## 5. Literatura – References

- Birgham, E. F., P. R. Daves, 2013: Intermediate Financial Management (11<sup>th</sup> edition), South – Western Cengage Learning, Mason, Ohio, Sjedinjene Američke Države, 1168 str.
- Bogdan, Ž., N. Šerman, D. Lončar, 2002: Računalom podržano planiranje proizvodnje složenog kogeneracijskog postrojenja. Zbornik radova 5. međunarodnog znanstvenostručnog savjetovanja Energetska i procesna postrojenja. *Energetika Marketing* 44: 17–25.
- Bogdan, Ž., N. Šerman, M. Baburić, 2001: Cost Optimization of EL–TO Zagreb Cogeneration Plant, zbornik radova 23<sup>rd</sup> International Conference on Information Technology Interfaces, Pula, 343–349.
- Brealey, R. A., S. C. Myers, A. Franklin, 2001: Principles of corporate finance (10<sup>th</sup> edition), McHraw–Hill Irwin, New York, Sjedinjene Američke Države, 875 str.
- Čerić, V., M. Varga, 2004: Informacijska tehnologija u poslovanju. Sveučilišni udžbenik, Ekonomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Element, Zagreb, 87–103.
- Domac, J., M. Beronja, S. Fijan, B. Jelavić, V. Jelavić, N. Krajnc, D. Kajba, T. Krička, V. Krstulović, H. Petrić, I. Raguzin, S. Risović, L. Staničić, H. Šunjić, 2001: Bioen Program korištenja energije biomase i otpada. Nove spoznaje i provedba, 144 str.
- Dundović, J., 2011: Šesti Hrvatski dani biomase, Hrvatsko-austrijski gospodarski skup »Biomasa i bioplin (električna i toplinska energija)«. *Šumarski list* 137(9–10): 238–241.
- Europska komisija, 2013: EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050 reference scenario 2013, str 46. <http://ec.europa.eu/transport/media/publications/doc/trendsto-2050-update-2013.pdf> (Pristupljeno 6. lipnja 2015.)
- Europski parlament i Vijeće, 2009: Direktiva 2009/28/EZ Europskog pralamenta i Vijeća od 23. travnja o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora, te o izmjeni i kasnijem stavljanju izvan snage direktiva 2001/77/EZ i 2003/30/EZ, Službeni list Europske unije, L140/16, 39–84.
- Francescato, E., V. Antonini, T. L. Bergomi, 2008: Priručnik o gorivima iz drvne biomase (proizvodnja, zahtjevi kvalitete, trgovina). REGEA – Regionalna energetska agencija Sjeverozapadne Hrvatske. Zagreb, 79 str.



[http://www.biomassradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/pdf\\_vsebine/Handbook/handbook\\_CRO.pdf](http://www.biomassradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/pdf_vsebine/Handbook/handbook_CRO.pdf) (Pristupljeno 2. lipnja 2015.)

Kajba, D., J. Domac, V. Šegon, 2010: Biomass energy Europe illustration case for Croatia. Projekt Biomass Energy Europe, D6.1, Aneks 2, 20 str.

Kallio, M., A. Leinonen, 2005: Production technology of forest chips in Finland, project report BIO–SOUTH EIE, Technical research Centre of Finland, 64 str.

Kuhi-Thalfeldt, R., J. Valtin, 2007: Economic analysis of a biogas–fuelled cogeneration power plant. Zbornik radova doctoral school of energy– and geo–technology, Kuressaare, Estonia, 164–168.

Lončar, D., G. Krajačić, M. Vujanović, 2009: Podrška developrima – primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvnu biomasu, Centar za transfer tehnologije – CTT. Zagreb, 147 str.

[oie.mingo.hr/UserDocsImages/BIOCHP\\_HR.pdf](http://oie.mingo.hr/UserDocsImages/BIOCHP_HR.pdf) (Pristupljeno 7. lipnja 2015.)

Medarac, I., H. Medarac, 2013: Komparacija postrojenja na drvnu biomasu i bioplinskih postrojenja primjenom matematičkih modela, prezentacija. Seminar Mogućnosti primjene obnovljivih izvora energije, Zagreb, 28. veljače.

Ministarstvo gospodarstva Republike Hrvatske, 2013: Nacionalni akcijski plan za obnovljive izvore energije do 2020. godine – prijedlog, 118 str.

<http://files.hrote.hr/files/PDF/Dokumenti/NAP/Nacionalni%20akcijski%20plan%20za%20OIE%20do%202020..pdf> (Pristupljeno 1. lipnja 2015.)

Orsag, S., L. Dedi, 2011: Budžetiranje kapitala– Procjena investicijskih projekata. Drugo prošireno izdanje, Masmedia, Zagreb, 416 str.

Program Ujedinjenih naroda za razvoj (UNDP) u Hrvatskoj, 2013: Tranzicija prema niskougljičnom razvoju Republike Hrvatske, okvir za izradu Strategije niskougljičnog razvoja– sažetak, 50 str.

[http://mzoip.hr/doc/tranzicija\\_prema\\_niskougljicnom\\_razvoju\\_hrvatske.pdf](http://mzoip.hr/doc/tranzicija_prema_niskougljicnom_razvoju_hrvatske.pdf) (Pristupljeno 19. lipnja 2015.)

Strategija enegetskog razvoja Republike Hrvatske, 2008: Službeni list Republike Hrvatske, NN 152/08.

Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske, 2009: Službeni list Republike Hrvatske, NN 130/09.

Sučić, Ž., 2008: Raspoloživi potencijal šumske biomase i kako ga koristiti. Prezentacija, Toplifikacija naselja na obnovljive izvore energije, Sisak. <http://www.sumari.hr/biomasa/urhsisak2008/1–3Sucic.pdf> (Pristupljeno 19. lipnja 2015.)

Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije, 2010: Službeni list Republike Hrvatske, NN 127/2010.

Zakon o energiji, 2015: Službeni list Republike Hrvatske, NN 102/15.

---

## Abstract

---

### *Calculation of Profitability and Optimization of Cogeneration Plant Using Wood Chips*

*Use of biomass in the energy sector is a unique opportunity for forestry. In addition to ensuring the price and the market for the product that is considered the lowest quality from the technical aspect (long wood), it enables a considerably more effective exploitation and a more intensive caring for forests. Diverse works of caring for forests, such as pollarding and the first tending, as well as silvicultural activities in degraded stands could become cost–effective, since there is a local market and a continuous long–term demand for wood biomass. Moreover, the planting of fast–growing forest cultures and their establishment on uncovered forest land could increase the attractiveness of investment into forestry, since the rate of return and the period of return on investment is significantly shorter compared with classical forestry. The program package developed by Lega d.o.o. was used in the paper in order to perform optimization calculation for two types of cogeneration plants (CHP and ORC), and hence a comparative analysis of the results of optimization calculation was performed. Evaluation of cost–effectiveness of investment or capital budgeting was performed upon reaching a decision on involvement into long–term investment projects. The surface that met the annual requirements of the plant was calculated based on the annual yields of forest culture, annual requirements for wood chips, the length of the rotation period, calorific value of wood chips, as well as calorific value of willow grown in short rotation cultures.*

*Keywords: biomass, energy production, cost–effectiveness, cogeneration, capital budgeting*

---

Adrese autorâ – *Authors' addresses:*

Izv. prof. dr. sc. Stjepan Posavec \*  
e-pošta: sposavec@sumfak.hr  
dr. sc. Karlo Beljan  
e-pošta: kbeljan@sumfak.hr  
Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu  
Zavod za izmjeru i uređivanje šuma  
Svetošimunska 25  
10 000 Zagreb  
HRVATSKA

Prof. dr. sc. Željko Zečić  
e-pošta: zzeccic@sumfak.hr  
Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu  
Zavod za šumarske tehnike i tehnologije  
Svetošimunska 25  
10 000 Zagreb  
HRVATSKA

Nenad Šimunović, mag. ing. silv.  
e-pošta: neno.simunovic@gmail.com  
Naselje Slavonija I 2/2  
35000 Slavonski Brod  
HRVATSKA

\* Glavni autor – *Corresponding author*

Primljeno (*Received*): 19. 9. 2016.

Prihvaćeno (*Accepted*): 21. 10. 2016.