

Analiza isplativosti centraliziranog toplinskog sustava na biomasu i komunalni otpad u Zagrebu

Tomić, Tihomir

Master's thesis / Diplomski rad

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:274422>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tihomir Tomić

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Tihomir Tomić

Zagreb, 2014.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Tihomir Tomić

ZAHVALA

Zahvaljujem se svim svojim nastavnicima i profesorima na pruženom znanju tijekom školovanja i temeljima za moj daljnji akademski, stručni i znanstveni napredak.

Zahvaljujem i prof. dr. sc. Danielu R. Schneideru, prof. dr. sc. Željku Bogdanu, doc. dr. sc. Goranu Krajačiću, Tomislavu Pukšecu i Stjepku Katuliću na savjetima i pruženoj pomoći prilikom izrade ovoga rada.

Posebno bih se želio zahvaliti svom mentoru prof. dr. sc. Nevenu Duiću i Borisu Ćosiću na vremenu i trudu uloženoj u mentorstvo ovoga rada te na korisnim savjetima i informacijama koje su mi uvelike pomogle prilikom pisanja ovoga rada.

Osim toga, želio bih se zahvaliti i svojim roditeljima, majci Marjani i ocu Mladenu na pruženoj potpori te strpljenju i razumijevanju koje su imali za mene tijekom svih ovih godina školovanja.

Tihomir Tomić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tihomir Tomić** Mat. br.: 0035163215

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza isplativosti centraliziranog toplinskog sustava na biomasu i komunalni otpad u Zagrebu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Economic viability of district heating system with biomass and municipal solid waste in the City of Zagreb**

Opis zadatka:

Zadatak ovog diplomskog rada je analiza isplativosti centraliziranog toplinskog sustava u Zagrebu koji kao pogonsko gorivo koristi šumsku biomasu ili komunalni otpad te njegova usporedba s postojećim centraliziranim sustavom u Zagrebu. Na osnovu dostupnih podataka iz literature o potencijalu šumske biomase i komunalnog otpada u Zagrebu i bližoj okolini odrediti će se veličina postrojenja za koju će se vršiti analiza isplativosti.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Napraviti opsežan pregled literature o korištenim tehnologijama, investicijskim i operativnim troškovima te cijenama toplinske i električne energije u postojećim centraliziranim toplinskim sustavima na fosilna goriva, šumsku biomasu i komunalni otpad u Hrvatskoj i EU.
2. Analizirati podatke o trošku rada i cijeni toplinske energije postojećeg centraliziranog toplinskog sustava u Zagrebu.
3. Izračunati unutarnju stopu povrata za investiciju na odabranoj lokaciji, uz zadanu cijenu investicije, troška šumske biomase i komunalnog otpada i otkupnu cijenu toplinske energije.
4. Napraviti usporednu analizu troškova proizvodnje toplinske energije iz centraliziranog toplinskog sustava na šumsku biomasu, komunalni otpad i TE-TO Zagreb.
5. Napraviti analizu utjecaja promjene vrijednosti otkupne cijene šumske biomase, komunalnog otpada i cijene toplinske energije na internu stopu povrata na investiciju.

Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
25. rujna 2014.

Rok predaje rada:
27. studenog 2014.

Predviđeni datumi obrane:
3., 4. i 5. prosinca 2014.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS SLIKA	5
POPIS TABLICA.....	7
POPIS OZNAKA	10
SAŽETAK.....	12
SUMMARY	12
1. UVOD.....	15
2. CILJ RADA	18
2.1. Izvori podataka.....	19
2.2. Metodologija	19
3. O CENTRALIZIRANIM TOPLINSKIM SUSTAVIMA (CTS).....	22
3.1. Razvoj centraliziranih toplinskih sustava	22
3.2. Centralizirani toplinski sustavi danas	24
3.2.1. Ekonomski fenomeni iza CTS-a	26
3.2.2. Energetska osnova iza CTS-a	27
4. ELEMENTI CTS-a.....	29
4.1. Izvori toplinske energije.....	29
4.1.1. Pregled najboljih tehnologija	29
4.1.1.1. Fosilna goriva.....	29
4.1.1.2. Biomasa.....	31
4.1.1.3. Komunalni otpad.....	31
4.1.1.4. Izvori energije za pokrivanje toplinskih potreba	32
4.1.2. Usporedba tehnologija	33
4.2. Distribucijski sustavi.....	35
4.2.1. Investicijski i operativni troškovi.....	37
4.3. Potrebe za toplinskom energijom.....	40
4.3.1. Toplinske potrebe industrijskog sektora	40

4.3.2.	Toplinske potrebe ostalih sektora	42
4.3.2.1.	Grijanje prostora	42
4.3.2.2.	Priprema potrošne tople vode (PTV)	43
5.	PREGLED CTS-A U ZEMLJAMA EUROPSKE UNIJE	45
5.1.	Biomasa.....	47
5.1.1.	Austrija.....	47
5.1.1.1.	ORC kogeneracijsko postrojenje na drvenu biomasu u gradu Admont, Austrija [22].....	47
5.1.1.2.	ORC kogeneracijsko postrojenje na drvenu biomasu u gradu Lienz, Austrija.. ..	48
5.1.1.3.	Postrojenje područnog grijanja Gresten, Austrija [22]	50
5.1.2.	Finska.....	51
5.1.2.1.	Keuruun Lämpövoima Oy, Varissaari CHP postrojenje [22].....	51
5.1.2.2.	Jyväskylän Energia Oy, Korpilahti postrojenje sustava područnog grijanja [22].....	52
5.1.2.3.	Kokkolan Voima Oy, kogeneracijsko postrojenje u gradu Kokkola [58] ...	53
5.1.2.4.	Forssan Energia, kogeneracijsko postrojenje u gradu Forssa [58]	53
5.1.2.5.	Salmi Voima Oy, kogeneracijsko postrojenje u gradu Iisalmi [58].....	54
5.1.3.	Rumunjska	54
5.1.3.1.	Kogeneracijsko postrojenje na drvenu biomasu Holzindustrie Schweighofer Sebes [22]	54
5.1.3.2.	Kogeneracijsko postrojenje na biomasu u regiji Suceava [23].....	55
5.1.3.3.	Sustavi financirani u sklopu Sawdust 2000 projekta [22]	55
5.1.4.	Slovačka.....	56
5.4.1.	Postrojenje područnog grijanja Banská Bystrica, Slovakia [22]	56
5.1.5.	Danska.....	57
5.1.5.1.	Kogeneracijsko postrojenje u gradu Assenf Fjernvarme [24].....	57
5.2.	Otpad.....	57

5.2.1.	Orginalno Afval Energie Bedrijf (AEB) postrojenje, Amsterdam, Nizozemska [25].....	57
5.2.2.	Issy les Moulineaux postrojenje, Paris, Francuska [25]	58
5.2.3.	Reno Nord postrojenje, Aalborg, Danska [25]	60
5.2.4.	ASM Brescia ‘Termoutilizzatore postrojenje, Brescia, Italija [25]	61
5.2.5.	Lidköping postrojenje, Lidköping, Švedska [26]	62
5.2.6.	Sysav Malmö postrojenje za termičku obradu otpada	65
5.3.	Fosilna goriva.....	66
5.3.1.	Pimlico District Heating Undertaking (PDHU) - CTS u Londonu [28]	66
5.3.2.	Levice Combined Cycle Power Plant, Levice, Slovačka [46]	67
5.3.3.	Viborg kogeneracijsko postrojenje, Viborg, Danska [47]	68
5.3.4.	Pleven kogeneracijsko postrojenje, Bugarska [46].....	68
5.3.5.	CTS - Zagreb.....	69
5.3.5.1.	TE-TO Zagreb.....	70
5.3.5.2.	EL-TO Zagreb.....	72
5.3.5.3.	Cijene toplinske energije u CTS Zagreb.....	75
6.	KOMUNALNI OTPAD	78
6.1.	Mehaničko biološka obrada	83
6.2.	Sastav i karakteristike otpada.....	84
6.3.	Komunalni otpad u Gradu Zagrebu	87
6.4.	Cijena otpada.....	88
7.	BIOMASA.....	89
7.1.	Dostupna biomasa za potrebe kogeneracijskog postrojenja na području Grada Zagreba	90
7.2.	Cijena drvene sječke	94
8.	ODABIR TEHNOLOGIJE, VELIČINE I PARAMETARA POSTROJENJA PREMA RASPOLOŽIVOJ SIROVINI	96
8.1.	Usporedba i analiza podataka o kogeneracijskim postrojenjima za termičku obradu otpada u CTS-u	96
8.1.1.	Investicijski troškovi postrojenja za TOO	97

8.1.2.	Pogonski troškovi i troškovi održavanja postrojenja za TOO	100
8.1.3.	Učinkovitost postrojenja za TOO	103
8.2.	Usporedba i analiza podataka o kogeneracijskim postrojenjima na biomasu u CTS-u 106	
8.2.1.	Investicijski troškovi postrojenja na biomasu.....	106
8.2.2.	Pogonski troškovi i troškovi održavanja postrojenja na biomasu.....	109
8.2.3.	Učinkovitosti postrojenja na biomasu.....	113
8.3.	Postrojenje za TOO CTS-a u Gradu Zagrebu	116
8.4.	Postrojenje na biomasu CTS-a u Gradu Zagrebu.....	118
9.	EKONOMSKA ANALIZA	123
9.1.	Postrojenje za TOO CTS-a u Gradu Zagrebu	123
9.1.1.	Izračun unutarnje stope povrata investicije.....	123
9.1.2.	Analiza osjetljivosti	126
9.2.	Postrojenje na biomasu CTS-a u Gradu Zagrebu.....	130
9.2.1.	Izračun unutarnje stope povrata investicije.....	130
9.2.2.	Analiza osjetljivosti	133
9.3.	Cijena toplinske energije.....	136
10.	ZAKLJUČAK.....	138
11.	POPIS LITERATURE.....	145
	PRILOZI.....	153

POPIS SLIKA

Slika 1. Idejna skica jednostavnog CTS-a [10]	22
Slika 2. Generacije CTS-a [13], [14].....	23
Slika 3. Osnovni energetske tokovi u CTS-u [11]	25
Slika 4. Prikaz razvoja distribucijskih sustava [11]	36
Slika 5. Ovisnost prosječnog promjera cijevi o linearnoj toplinskoj gustoći [40]	37
Slika 6. CTS kao veza između toplinskih izvora i potrošača [20]	40
Slika 7. Potreba za toplinskom energijom po temperaturnim nivoima u industriji [21]	41
Slika 8. Međusobni odnosi djelatnosti u centralnom toplinskom sustavu [30].....	75
Slika 9. Kompozicija proizvedenog otpada, EU-27, 2008. god. [37]	78
Slika 10. Kompozicija otpada na odlagalištima u Kaliforniji [39]	80
Slika 11. Proizvodnja ne mineralnog otpada u zemljama EU-27 po godinama [37]	82
Slika 12. Shema procesa unutar postrojenja za MBO	83
Slika 13. Ovisnost investicijskih troškova o veličini postrojenja za TOO.....	98
Slika 14. Specifični investicijski troškovi u odnosu na veličinu postrojenja za TOO	99
Slika 15. Ovisnost pogonskih troškova o veličini postrojenja za TOO	101
Slika 16. Specifični pogonski troškovi u odnosu na veličinu postrojenja za TOO	102
Slika 17. Kretanje ukupne učinkovitosti postrojenja za TOO u funkciji kapaciteta	104
Slika 18. Učinkovitosti razmatranih postrojenja za TOO u funkciji kapaciteta.....	105
Slika 19. Ovisnost investicijskog troška o električnoj snazi postrojenja na biomasu	108
Slika 20. Ovisnost specifične investicije o električnoj snazi kogeneracijskog postrojenja ...	109

Slika 21. Ovisnost broja sati rada osoblja o veličini postrojenja na biomasu	111
Slika 22. Ovisnost ukupnih operativnih troškova i troškova održavanja o veličini postrojenja na biomasu.....	111
Slika 23. Ovisnost specifičnih operativnih troškova i troškova održavanja o veličini postrojenja na biomasu.....	112
Slika 24. Kretanje ukupne učinkovitosti energetske pretvorbe u funkciji veličine postrojenja na biomasu.....	114
Slika 25. Usporedni prikaz učinkovitosti razmatranih postrojenja na biomasu.....	116
Slika 26. Odnos proizvodnje električne i toplinske energije postrojenja na biomasu.....	120
Slika 27. Utjecaj promjene cijene toplinske energije i naknade za zbrinjavanje otpada na IRR postrojenja za TOO	128
Slika 28. Utjecaj promjene investicijske cijene i operativnih troškova i troškova održavanja na unutarnju stopu povrata investicije postrojenja za TOO	129
Slika 29. Utjecaj promjene cijena otkupa sekundarnih sirovina na unutarnju stopu povrata investicije postrojenja za TOO	130
Slika 30. Utjecaj promjene cijene toplinske energije i cijene drvene sječke na IRR postrojenja na biomasu.....	135
Slika 31. Utjecaj promjene investicijske cijene i operativnih troškova i troškova održavanja na unutarnju stopu povrata investicije postrojenja na biomasu	136
Slika 32. Usporedba učinkovitosti postrojenja.....	141
Slika 33. Usporedba proizvodnje električne energije.....	141
Slika 34. Usporedba prihoda i rashoda postrojenja.....	142

POPIS TABLICA

Tablica 1. Raster iskorištavanja goriva po tehnologijama [17].....	34
Tablica 2. Usporedni prikaz tehničkih karakteristika tehnologija [17].....	35
Tablica 3. Cijena instalacije toplinskih distribucijskih cijevi [41].....	38
Tablica 4. Ovisnost iznosa investicije o faktoru e [40].....	38
Tablica 5. Prosječna cijena toplinske energije po državama [71].....	45
Tablica 6. Cijena električne energije po državama [72].....	46
Tablica 7. Izvod iz tehničkih karakteristike postrojenja Lienz I [24]	50
Tablica 8. Izlazni materijali iz postrojenje Reno Nord [25].....	61
Tablica 9. Ekonomski podatci za postrojenje Reno Nord [25]	61
Tablica 10. Prihodi od proizvodnje postrojenja Lidköping [26].....	64
Tablica 11. Prihodi od otkupa sirovina postrojenja Lidköping [26]	64
Tablica 12. Troškovi pogona i održavanja postrojenja Lidköping [26].....	65
Tablica 13. Troškovi zbrinjavanja ostataka i emisija postrojenja Lidköping [26].....	65
Tablica 14. Godišnja potrošnja i proizvodnja energije PDHU [28].....	66
Tablica 15. Specifikacije blokova TE-TO Zagreb [33].....	71
Tablica 16. Podatci o električnoj učinkovitosti i utrošku energenata pojedinih blokova [35].	72
Tablica 17. Proizvodnja toplinske i električne energije TE-TO Zagreb po godinama [29].....	72
Tablica 18. Specifikacije blokova EL-TO Zagreb [33].....	73
Tablica 19. Podatci o energetskej pretvorbi u EL-TO Zagreb 1/2 [35]	74
Tablica 20. Podatci o energetskej pretvorbi u EL-TO Zagreb 2/2 [35]	74

Tablica 21. Proizvodnja toplinske i električne energije u EL-TO Zagreb [29].....	74
Tablica 22. Cjenik CTS-a Zagreb	76
Tablica 23. HEP Toplinarstvo d.o.o. - Godišnje izvješće za 2013. godinu [29].....	77
Tablica 24. Proizvodnja otpada po zemljama [37].....	79
Tablica 25. Sastav komunalnog otpada u Španjolskoj regiji Castilla y León [48]	81
Tablica 26. Sastav miješanog komunalnog otpada i GIO u regiji Castilla y León, Španjolska [48]	84
Tablica 27. Udio vlage u miješanom komunalnom otpadu i GIO [48].....	85
Tablica 28. Ogrjevne vrijednosti frakcija otpada i udio nezapaljivog materijala [48].....	86
Tablica 29. Ogrjevne vrijednosti miješanog komunalnog otpada i GIO [48].....	86
Tablica 30. Podatci vezani za proizvodnju drveta u Gradu Zagrebu i Zagrebačkoj županiji [69]	92
Tablica 31. Podatci o raspoloživoj drvnjoj sječki po županijama.....	94
Tablica 32. Cijene šumske biomase prema potpisanim ugovorima Hrvatskih Šuma [66]	94
Tablica 33. Prikaz investicijskih troškova postrojenja.....	97
Tablica 34. Prikaz investicijskih troškova postrojenja svedenih na 2014. godinu.....	98
Tablica 35. Prikaz pogonskih troškova i troškova održavanja troškova postrojenja za TOO 100	
Tablica 36. Usporedni prikaz ukupnih učinkovitosti razmatranih postrojenja.....	103
Tablica 37. Električne i toplinske učinkovitosti razmatranih postrojenja za TOO	105
Tablica 38. Investicijski troškovi razmatranih postrojenja.....	107
Tablica 39. Investicijski troškovi postrojenja iz uzorka svedeni na vrijednost novca 2014. godine	107

Tablica 40. Usporedni prikaz pogonskih troškova i troškova održavanja razmatranih postrojenja na biomasu.....	110
Tablica 41. Usporedni prikaz ukupnih učinkovitosti razmatranih postrojenja na biomasu	114
Tablica 42. Električne i toplinske učinkovitosti razmatranih postrojenja na biomasu.....	115
Tablica 43. Izračun potrebnih vrijednosti postrojenja za TOO.....	117
Tablica 44. Tehno-ekonomski podatci za razmatrano postrojenje za TOO.....	118
Tablica 45. Odnos proizvodnje električne i toplinske energije postrojenja na biomasu.....	119
Tablica 46. Izračun ukupne učinkovitosti postrojenja na biomasu	120
Tablica 47. Izračun specifičnih investicijskih troškova postrojenja na biomasu.....	121
Tablica 48. Izračun specifičnih pogonskih troškova postrojenja na biomasu.....	121
Tablica 49. Tehno-ekonomski podatci za razmatrano postrojenje na biomasu	122
Tablica 50. Prikaz cijena, prihoda i rashoda postrojenja za TOO.....	124
Tablica 51. Struktura investicijskih troškova i amortizacijski periodi postrojenja za TOO ..	125
Tablica 52. Ekonomski tok novca postrojenja za TOO	125
Tablica 53. Utjecaj promjene cijene toplinske energije i naknade za zbrinjavanje otpada na IRR postrojenja za TOO.....	127
Tablica 54. Prikaz cijena, prihoda i rashoda postrojenja na biomasu	131
Tablica 55. Struktura investicijskih troškova i amortizacijski periodi postrojenja na biomasu	132
Tablica 56. Ekonomski tok novca postrojenja na biomasu.....	132
Tablica 57. Utjecaj promjene cijene toplinske energije i cijene drvene sječke na IRR postrojenja na biomasu.....	134

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
CTS	-	Centralizirani toplinski sustav
OIE	-	Obnovljivi izvori energije
EU	-	Europska unija
TOO	-	Termička obrada otpada
ORC	-	Organski Rankinov Ciklus
TP	-	Toplinska pumpa
DP	-	Dimni plinovi
PTV	-	Potrošna topla voda
PK	-	Parni krug
PT	-	Plinska turbina
EE	-	Električna energija
TP	-	Tehnološka para
OT	-	Ogrjevna toplina
MBO	-	Mehaničko biološka obrada
GIO	-	Gorivo iz otpada
GIS	-	Geografski informacijski sustav
DHS	-	District heating systems
WtE	-	Waste to energy
CHP	-	Combined heat and power
O&M	-	Operating and maintenance costs
MSW	-	Municipal solid waste
IRR	-	Internal rate of return
EC	-	European Commission
BAT	-	Best available technology
ORC	-	Organic Rankine Cycle
BFBC	-	Bubbling fluidised bed combustion
RDF	-	Refuse-derived fuel
FAO	-	UN Food and Agriculture Organisation

Oznaka	Jedinica	Opis
t	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura
da	m	Prosječan promjer cijevi
Qs/L	GJ/m	Linearna toplinska gustoća
e	-	Faktor izgrađenosti
V_{pd}	m^3	Volumen drvene sječke u punim kubnim metrima drveta
$etat$	m^3	Drvena zaliha predviđena Šumskogospodarskom osnovom
$Y_{\dot{s}o}$	%	Udio šumskog ostatka
V_{ds}	m^3	Nasipni volumen drvene sječke
m_{ds}	kg	Masa drvene sječke
ρ_{ns}	Kg/m^3	Nasipne gustoće drvene sječke
C_{goriva}	€	Cijena goriva postrojenja na biomasu
$C_{sječke}$	€	Cijena drvene sječke na šumskome putu
$C_{prijevoz}$	€	Cijena prijevoza
B_C	€/t	Prosječna cijena sirovine na lokaciji postrojenja
c_B	€/t	Cijena sječke od šumskih ostataka na šumskom putu
T_P	€/t/km	Specifični trošak prijevoza sirovine
U_i	km	Prosječna udaljenost između lokacije biomase i i postrojenja
K_{Bi}	tona	Ukupna količina biomase dovezene s područja i
P_B	tona	Ukupna godišnja uporaba sirovine u postrojenju
c_{inv}	€/t ili €/MW	Specifični investicijski trošak
c_{oio}	€/t ili €/MW	Specifični operativni trošak i trošak održavanja
C_{inv}	€	Ukupni investicijski trošak
C_{oio}	€	Ukupni operativni trošak i trošak održavanja
η_{uk}	%	Ukupna učinkovitost postrojenja
q_m	t/god	Kapacitet postrojenja
P_{uk}	MW_{uk}	Ukupna snaga
P_{el}	MW_e	Električna snaga

Indeksi:

uk	-	Ukupno
e	-	Električno
t	-	Toplinsko

SAŽETAK

Uporaba centraliziranih toplinskih sustava (CTS) (eng. *district heating systems (DHS)*) je jedan od načina na koji Europska unija nastoji dostići postavljene ciljeve o smanjenju potrošnje primarne energije te diversifikaciji energetske izvora. Ovakvi sustavi omogućuju iskorištavanje različitih izvora energije za zadovoljavanje energetske potreba stambenih zgrada, poslovnih objekata i industrije, a među njima su i energija dobivena energetskom oporabom otpada te goriva koja je teško uporabiti za pogon malih toplinskih kotlova (u ovu grupu danas većinom spada biomasa).

U ovome radu je dan pregled 26 energetske postrojenja koja opskrbljuju postojeće CTS-e u zemljama EU. Posebna pozornost se poklonila postrojenjima za termičku obradu otpada (TOO) (eng. *waste to energy (WtE) plants*) i postrojenjima na biomasu te, da bi se dao cjelovit pregled i omogućila usporedba, dan je pregled i postojećih postrojenja na fosilna goriva.

Podatci potrebni za provođenje ekonomske analize mogu se aproksimirati iz tehničkih i ekonomskih podataka postojećih energetske postrojenja. Tako dobiveni podatci i količina komunalnog otpada u Gradu Zagrebu određuju proizvodnju toplinske energije koja definira sva razmatrana postrojenja. Dobiven iznos unutarnje stope povrata investicije (eng. *internal rate of return (IRR)*) je 13,45% za postrojenje za TOO te 17,84% za postrojenje na biomasu. Iz ovih vrijednosti i diskontne stope od 9% može se zaključiti da je investicija u oba postrojenja isplativa te da je, ukoliko se ne uzima u obzir vrijednost rješavanja problema otpada, isplativije investirati u postrojenje na biomasu.

Provedena analiza osjetljivosti pokazuje da je isplativost investicije u postrojenje za TOO najosjetljivija na promjenu iznosa naknada za zbrinjavanje otpada (eng. *gate fee*), dok je isplativost investicije u postrojenje na biomasu najosjetljivija na promjenu otkupne cijene toplinske energije. Što se tiče cijene proizvodnje toplinske energije, njen se iznos u ovome radu definiran preko cijene korištenog goriva čime se dolazi do cijena proizvedene toplinske energije od 0,0121 €/kWh za postrojenje na biomasu, -0,0396 €/kWh za postrojenje za TOO te 0,0363 €/kWh za postrojenja CTS-a Zagreb.

Ključne riječi: Centralizirani toplinski sustav (CTS), postrojenje za termičku obradu otpada (TOO), kogeneracijsko postrojenje, miješani komunalni otpad, biomasa, ekonomska analiza, Grad Zagreb.

SUMMARY

The use of district heating systems (DHS) is one of the ways in which the European Union is trying to reach set goals of reducing primary energy consumption and diversification of energy sources. These systems allow the use of different energy sources to meet the energy demands of residential buildings, commercial buildings and industry. Thermal energy produced in waste to energy (WtE) plants and fuels that are difficult to use to drive small heat boilers (biomass is classified in this group) are some of them.

A review of 26 district heating plants that supply the existing DHS in the EU Member States is given in this paper. Special attention is given to WtE power plants and biomass powered plants. In order to give a comprehensive overview and enable comparison, an overview of the existing plants powered by fossil fuels is added.

The data needed to conduct economic analysis can be approximated from the technical and economic data of existing power plants. By means of calculated data and the amount of municipal waste in the City of Zagreb, production of thermal energy that defines all examined plants is determined. Calculated values of the internal rate of return (IRR) are 13.45% for the WtE plant and 17.84% for biomass powered plant. From the values of calculated IRR and a discount rate of 9% it can be concluded that investment in both plants is profitable and that, when value of solution of waste problem is not taken into account, investment in biomass powered plant is more profitable.

Carried out sensitivity analysis shows that the profitability of investments in the WtE plant is most sensitive to changes of gate fees, while the profitability of investments in biomass powered plant is most sensitive to changes in prices of thermal energy. As for the cost of heat production, they are defined through the price of fuel. This methodology of calculation leads to the price of the produced heat of 0.0121 €/kWh for biomass powered plants, -0.0396 €/kWh for WtE plants and 0.0363 €/kWh for district heating plants in DHS Zagreb.

Key words: District heating system (DHS), waste to energy (WtE) plants, cogeneration, municipal solid waste (MSW), biomass, economic analysis, the City of Zagreb.

1. UVOD

Izazovi s kojima se Europska unija već desetljećima suočava na području energetike uključuju pitanja kao što su sve veća ovisnost o uvoznim energentima te stoga i nestabilne cijene energenata, nedovoljna diversifikacija energetske izvora, rast globalne potražnje za energentima, prijetnje klimatskih promjena, spori napredak u pogledu energetske učinkovitosti, itd. Europska unija se proteklih desetljeća s ovim pitanjima suočava kroz razne zakonodavne akte i međunarodne ugovore, kojima nastoji postići integrirano energetske tržište, sigurnost opskrbe energijom i održivost energetske sektora.

Prekretnicu u energetske i klimatske politici Europske unije označava 2007. godina. Tako je 10. siječnja 2007. Europska Komisija izdala priopćenje za javnost kojim predlaže donošenje integriranog paketa mjera kojima bi se smanjile emisije stakleničkih plinova [1]. Odobrenje cilja smanjenja emisija stakleničkih plinova od strane Europske komisije dobiveno je 8/9. ožujka 2007. godine [2].

U siječnju 2008. godine, Europski povjerenik za energetiku Andris Piebalgs predstavio je *Energy Efficiency Action Plan and Climate Action: Energy for a Changing World*, kao dio manifestacije Europskog tjedna održive energetike, *EU Sustainable Energy Policy - Partners for Sustainable Energy* [1]. Ovaj paket prijedloga demonstrira da ciljevi koji su dogovoreni tijekom 2007. godine, između vođa država EU27, nisu samo dostizivi, nego da i predstavljaju veliku ekonomsku priliku za Europu. Dokument izlaže strategiju po kojoj će svaka zemlja članica biti u stanju ostvariti [3]:

- 20% smanjenje ukupne potrošnje energije u odnosu na temeljnu projekciju u 2020. godini;
- 20% smanjenje emisije stakleničkih plinova u 2020. godini u odnosu na 1990. godinu;
- 20% obnovljivih izvora energije u bruto neposrednoj potrošnji u 2020. godini.

Europska komisija prihvaća ovaj paket prijedloga i smjernica na sjednici 13.-14. ožujka 2008. godine [4]. Europski je parlament o klimatskom i energetske paketu Europske komisije održao diskusiju od 11. - 18. prosinca 2008. godine kada je došlo i do njegovog definitivnog usvajanja [5].

Veliku ulogu u smanjenju ukupne potrošnje primarne energije igra sektor zgradarstva. Zgrade, sa udjelom od 40%, su jedan od najvećih potrošača finalne energije u Europskoj uniji [6]. Stoga se može zaključiti da ovaj sektor ima jako dobre predispozicije za uvođenje mjera povećanja energetske učinkovitosti s ciljem smanjenja energetske potrošnje. Jedan od načina povećanja energetske učinkovitosti i smanjenja potrošnje energije u sektoru zgradarstva je uporaba kogeneracijskih postrojenja za zadovoljavanje potreba za grijanjem i hlađenjem.

Važnost kogeneracije u smanjenu potrošnje primarne energije je uočila i Europska unija te je 25. listopada 2012. godine usvojena *Energy Efficiency Directive 2012/27/EU* koja se bavi pitanjima energetske učinkovitosti. Ova direktiva uspostavlja zajednički okvir mjera za poticanje energetske učinkovitosti u EU, kako bi se osiguralo dostizanje postavljenog cilja o smanjenju potrošnje primarne energije za 20% te kako bi se utro put za daljnja poboljšanja energetske učinkovitosti. Naknadno, u studenom iste godine, Europska komisija je izdala smjernice o Članku 14 "*Promotion of efficiency in heating and cooling*" iste direktive. Opći cilj Članka 14. Direktive 2012/27/EU je poticanje identifikacije ekonomski isplativog načina povećanja energetske učinkovitosti prvenstveno kroz korištenje visokoučinkovitih kogeneracija, učinkovitog područnog grijanja i hlađenja i uporabu industrijske otpadne topline. Prema ovoj direktivi, države članice su dužne identificirati potencijal za primjenu visokoučinkovite kogeneracije i učinkovitog područnog grijanja i hlađenja te analizirati potencijalne troškove i koristi koji proizlaze iz tih potencijala. Također, države članice su dužne poduzeti odgovarajuće korake kako bi osigurale razvoj identificiranih potencijala, ako je identificirana potencijalna ekonomska isplativost. [7]

Direktiva 2012/27/EU također definira pojam visokoučinkovite kogeneracije, učinkovitog područnog grijanja i hlađenja i učinkovitog individualnog grijanja i hlađenja. Učinkovito grijanje i hlađenje obuhvaća uporabu toplinske energije iz kogeneracija i obnovljivih izvora energije, uporabu otpadne topline iz industrijskih procesa za zadovoljavanje toplinskih i rashladnih potreba i generalno sve načine grijanja i hlađenja koji omogućavaju uštedu primarne energije u odnosu na bazni scenarij. [7]

Praćenjem napretka u ispunjavanju postavljenih ciljeva klimatskim i energetske paketa Europske unije vidljivo je da je Europska unija na putu ispunjenja ciljeva o smanjenju emisija stakleničkih plinova te povećanja udjela obnovljivih izvora energije, međutim, unatoč

smanjenju postavljenog cilja po pitanju smanjenja potrošnje energije, ovaj posljednji cilj vjerojatno neće biti ispunjen. [9]

Iako je izvjesno da Europska unija ovom postojećom dinamikom neće dostići sve postavljene ciljeve, potrebno je i dalje ići u dogovorenom i zacrtanom smjeru kako bi se uklonio ili smanjio utjecaj nepovoljne energetske, ekološke, ali sve više i političke, situacije u svijetu. Na tom putu smisao nalazi i ovaj diplomski rad čiji je cilj odgovoriti na pitanje isplativosti tehnologija za proširenje mreže centraliziranog toplinskog sustava u Gradu Zagrebu što se nadovezuje na Članak 14. Direktive o energetskej učinkovitosti.

2. CILJ RADA

Nakon kratkog opisa pojma centraliziranih toplinskih sustava (CTS) te pregleda njihovog razvoja, kao i prikaza što su to CTS-i danas, dan je usporedni pregled karakteristika tehnologija koje se koriste za zadovoljavanje toplinskih potreba korisnika CTS-a te toplinskih distribucijskih sustava koji omogućuju povezivanje energetske postrojenja s krajnjim korisnicima toplinske energije koji se razlikuju po temperaturnom nivou energije koju koriste. Ovo istraživanje je omogućilo postavljanje pitanja koje će definirati glavni cilj ovoga rada, a to je pitanje isplativosti proširenja postojećeg centraliziranog toplinskog sustava u Gradu Zagrebu s postrojenjima koji kao gorivo koriste komunalni otpad i biomasu.

Ovo pitanje proizlazi iz potrebe za zbrinjavanjem miješanog komunalnog otpada te iz potrebe za proširenjem i unaprjeđenjem centraliziranog toplinskog sustava u Gradu Zagrebu. U cilju zadržavanja dogovorenog smjera u kojem ide Europska unija, traži se način kako ove dvije potrebe zadovoljiti uz što manji utjecaj na okoliš, uz što manji utrošak primarne energije te uz što veću diversifikaciju energetske izvora. Uporabom miješanog komunalnog otpada za pogon kogeneracijskog postrojenja za opskrbu centraliziranog toplinskog sustava toplinskom energijom zadovoljava se potreba za zbrinjavanjem komunalnog otpada te potreba za toplinskom energijom stanovništva te se istovremeno omogućuje diversifikacija energetske izvora te smanjenje utroška primarne energije kroz energetske uporabu sekundarne sirovine tj. otpada. Kao alternativa korištenju postrojenja na otpad je dano postrojenje na biomasu koje, za razliku od prethodnog rješenja, omogućuje uporabu obnovljivog izvora energije u postrojenju većeg stupnja učinkovitosti. U ovome slučaju je problem zbrinjavanja komunalnog otpada potrebno riješiti nekom od drugih tehnologija.

Osim odgovaranja na glavno pitanje, ovaj rad će dati odgovor i na pitanje osjetljivosti investicije u takva postrojenja, tj. kretanje indikatora isplativosti u funkciji promjene tržišnih vrijednosti poput cijene goriva, naknade za zbrinjavanje otpada te investicijskih i pogonskih troškova, kao i na pitanje cijene toplinske energije u usporedbi proizvodnjom toplinske energije iz postojećeg sustava.

2.1. Izvori podataka

Analize koje su napravljene u ovome radu bilo je moguće napraviti tek po opsežnom pregledu literature koja se bavi područjima kako proizvodnje i distribucije toplinske energije tako i područjem definiranja toplinskih potreba. Pregledana literatura se većinom bavi europskom legislativom, proizvodnjom i distribucijom toplinske energije, toplinskim potrebama, energetske učinkovitosti u CTS-ima i razvojem CTS-a. Podatci potrebni za definiranje trendova, na bazi kojih su definirani parametri razmatranih postrojenja u ovome radu, izvučeni su iz velikog broja izvora te se kreću od znanstvenih radova, preko podataka iz publikacija ili službenih internetskih stranica proizvođača i/ili operatora, baza podataka te web stranica i publikacija institucija pojedinih država te godišnjih i financijskih izvješća, članaka u časopisima i brošura. Ostali podatci poput cijena i količina energenata i produkata te količina otpada i biomase dobiveni su iz različitih izvora koji uključuju službene stranice poduzeća, izvješća agencija i inspekcijaskog nadzora te ostale relevantne literature.

2.2. Metodologija

Nakon opsežnog pregleda literature i baza podataka, prikupljeni podatci o energetskim postrojenjima na otpad, biomasu i fosilna goriva su analizirani i sortirani te unijeti u excel tablicu. Na bazi prikupljenih podataka i originalnih izvora podataka dan je pregled svih postrojenja za koje je bila dostupna dovoljna količina podataka kako bi ih se moglo upotrijebiti u daljnjim razmatranjima. Po danom pregledu, podatci su preračunati u konzistentni oblik potreban za usporednu analizu i njihovu daljnju grafičku analizu.

Na osnovi podataka o godišnjoj proizvodnji otpada u Gradu Zagrebu odabrana je veličina postrojenja koja će se razmatrati u ovome radu, tj. da bi bila omogućena ekonomska usporedba postrojenja razmatrano postrojenje na biomasu je imalo jednaku izlaznu toplinsku i električnu snagu kao i broj sati rada. Na osnovi tako dobivenih podataka o veličini postrojenja određena je tehnologija na kojoj će se postrojenja bazirati.

Zbog devalvacije vrijednosti novca s vremenom, kako bi se iznosi troškova napravljenih u različitim periodima mogli međusobno uspoređivati, svi troškovi su svedeni na vrijednost novca u referentnoj godini. Za referentnu godinu, na koju se u ovome radu svode troškovi, je uzeta godina pisanja ovoga rada (2014.). Kao godina investicije, od koje će se na iznos

investicije pripisivati stopa inflacije u narednim godinama, uzeta je godina koja je u literaturi navedena kao godina puštanja u pogon ili kao godina izgradnje razmatranog postrojenja. Ukoliko godina izgradnje nije navedena smatrano je da je su izražene cijene svedene na godinu objave rada te se ta godina uzimala kao početna godina prilikom svođenja troškova na sadašnju vrijednosti. U literaturi izraženi troškovi su svedeni na sadašnju vrijednost tako što su se na godišnjoj razini uvećavali za iznos prosječne godišnje inflacije, u državi u kojoj se postrojenje nalazi, za svaku sljedeću godinu od godine investicije ili godine objave rada. Ukoliko se lokacija postrojenja ne može zaključiti na osnovu danih podataka, za preračunavanje vrijednosti troškova su primijenjene prosječne godišnje stope inflacije za EU28.

Tako preračunati podatci o investicijskim troškovima su unijeti u dijagram u ovisnosti o veličini postrojenja koja je za postrojenja za termičku obradu otpada definirana na bazi godišnjeg kapaciteta obrade otpada, dok je za postrojenje na biomasu definirana u ovisnosti o električnoj snazi postrojenja. Ova je razlika uvedena zbog veće ovisnosti troškova o pojedinim veličinama. Što se tiče operativnih troškova i troškova održavanja, oni su u grafičkim prikazima prikazani u ovisnosti o godišnjem kapacitetu obrade otpada, za postrojenje za termičku obradu otpada (TOO), dok je u slučaju postrojenja na biomasu dana ovisnost ovih troškova u funkciji ukupne snage postrojenja. Što se tiče ukupne učinkovitosti razmatranih postrojenja, njihov je grafički prikaz za pojedinu vrstu postrojenja dan u istoj ovisnosti kao i pogonski troškovi.

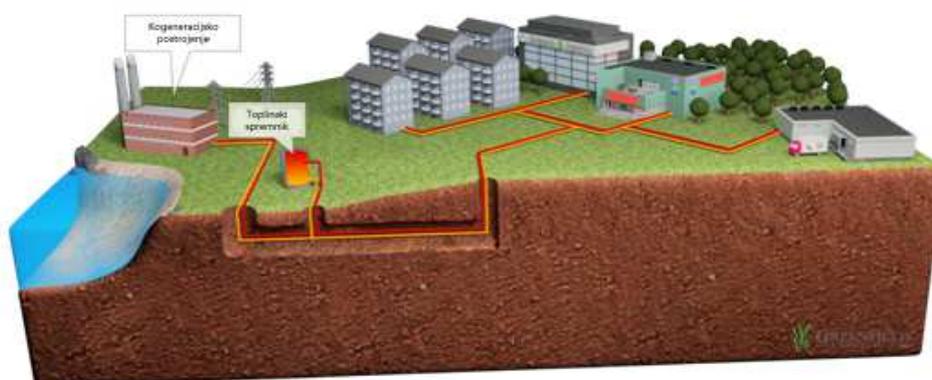
Na grafičkim prikazima vrijednosti su aproksimirane funkcijama koristeći metodu najmanjih kvadrata. Koristeći na taj način definiranu funkciju moguće je sve prethodne veličine odrediti za postrojenja različitih veličina, pa su na taj način definirane karakteristike razmatranih postrojenja. Točnost ove metode raste s brojem podataka koje se koristi za konstrukciju funkcije metodom najmanjih kvadrata.

Po definiranju razmatranih postrojenja uporabom ekonomskih podataka iz različitih izvora definirana je unutarnja stopa povrata investicije te je na taj način provedena njihova ekonomska analiza i usporedba. Nakon izračuna unutarnje stope povrata investicije prikazana je osjetljivost investicije tj. ovisnost promjene vrijednosti unutarnje stope povrata u funkciji promjene cijena energenata i otkupne cijene toplinske energije, kao i u funkciji promjene troškova.

Na posljertku dana je i usporedba troškova proizvodnje toplinske energije. Cijena toplinske energije, odnosno trošak proizvodnje toplinske energije, se uglavnom izračunava kada ne postoji definirana, tj. regulirana, cijena otkupa toplinske energije. Trošak proizvodnje toplinske energije u kogeneracijskim postrojenjima je veličina koju nije jednostavno izračunati te postoje različiti načini njenog određivanja. U ovome radu, za izračun troškova proizvodnje je korištena metodologija koja definira da je cijena proizvedene toplinske energije jednaka specifičnoj cijeni goriva izraženoj po jedinici energije. Prema ovoj metodologiji, ekonomski gledano, proizvedena toplinska energija smanjuje trošak goriva.

3. O CENTRALIZIRANIM TOPLINSKIM SUSTAVIMA (CTS)

Glavna uloga sustava područnog grijanja (eng. *district heating systems (DHS)*) ili centraliziranih toplinskih sustava (CTS) je učinkovit transport toplinske energije u urbanim područjima. Oni omogućuju zadovoljavanje postojećih energetske potreba stambenih zgrada i poslovnih objekata energijom iz centraliziranih energetskih izvora.



Slika 1. Idejna skica jednostavnog CTS-a [10]

Transport energije između energetskog izvora i potrošača se odvija posredstvom cijevnog distribucijskog sustava. Uporabom centraliziranih toplinskih sustava energetske potrebe većeg broja potrošača mogu se zadovoljiti manjim utroškom primarne energije nego što je to slučaj uporabom konvencionalnih, individualnih tehnologija. Centralizirani toplinski sustavi se prvenstveno koriste za zadovoljavanje energetske potreba kućanstava i poslovnih objekata za grijanje i hlađenje i pripremu potrošne tople vode (PTV) te za zadovoljavanje energetske potreba industrijskih procesa [11].

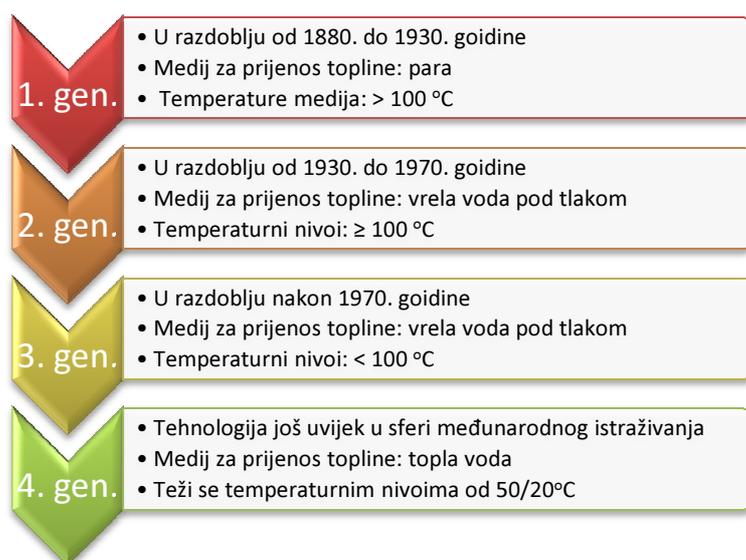
3.1. Razvoj centraliziranih toplinskih sustava

Koncept cijevnog grijanja je vrlo star. Prije više od 2000 godina cijevni su sustavi korišteni u antičkom Rimu za grijanje nastambi i kupališta. U novija vremena Sir William Cook u Mančesteru, Ujedinjeno Kraljevstvo, demonstrirao je 1945. godine sustav parnog grijanja za

zgrade pomoću sustava cijevnih zavojnica. Prvo grijanje koje je za transfer topline koristilo vodu, u zgradi, je izvedeno u Sjedinjenim Američkim Državama 1830. godine, dok je parno grijanje izvedeno 1844. u zgradi Eastern Hotel-a u Bostonu. Razvoj toplovodnog, vrelovodnog i parnog grijanja doveo je do predstavljanja prvoga radijatora od lijevanog željeza 1860. godine [12].

Paralelno s razvojem centraliziranih toplinskih sustava u Sjedinjenim Američkim Državama, razvijao se i sektor područnog grijanja u Europi. Na prijelazu u 19. stoljeće počela se pojavljivati distribucija toplinske energije posredstvom ukopanih cjevovoda u institucijama poput bolnica i državnih zgrada u nekoliko Europskih gradova. Puštanje u pogon parnog sustava centraliziranog grijanja u Dresdenu, Njemačka, početkom 20. stoljeća, obilježava se kao uspostava prvog centraliziranog toplinskog sustava u Europi. Nedugo nakon toga, tijekom 20-tih godina 20. stoljeća, počelo je puštanje u pogon prvih komercijalnih sustava područnog grijanja, pretežito u Njemačkim gradovima. Ova njemačka inicijativa, ponukana uspjehom Birdsill Holly-a u SAD-u, ubrzo se širi i u ostale države starog kontinenta. Tako da su se, osim već uspostavljenih centraliziranih toplinskih sustava u Dresdenu, Hamburgu, Kielu i Berliu, novi centralizirani sustavi pojavili i u Copenhagenu (1925. g.), Parizu (1930. g.), Utrechtu (1927. g.), Zurichu (1933. g.) i Brnu (1930. g.) [14].

U ovim prvim generacijama CTS, od 1880. do 1930. godine, distribucija toplinske energije se odvijala uporabom niskotlačne pare kao prijenosnim medijem, na relativno visokim temperaturama ($t > 100^{\circ}\text{C}$) [Slika 2] [14].



Slika 2. Generacije CTS-a [13], [14]

Drugu generaciju CTS-a (1930. - 1970. g.) obilježava uporaba vrele vode pod tlakom kao medija za prijenos toplinske energije ($t \geq 100^{\circ}\text{C}$). Od 1970-tih pa u novije vrijeme počela je implementacija centraliziranih toplinskih sustava treće generacije. Ovu generacija distribucije toplinske energije preuzela je stlačenu vrelu vodu kao prijenosni medij od druge generacije, ali je došlo do smanjenja njene temperature ($t < 100^{\circ}\text{C}$) [14].

Smanjivanje temperatura prijenosnog medija je nastavljeno i dalje s ciljem smanjenja toplinskih gubitaka u distribucijskoj mreži, a paralelno se razvijaju i materijali za toplinsku izolaciju cjevovoda s istim ciljem. Ovaj je razvoj doveo moderne CTS-e na rub četvrte generacije s temperaturama medija za dobavu toplinske energije na razini od 60°C [14].

3.2. Centralizirani toplinski sustavi danas

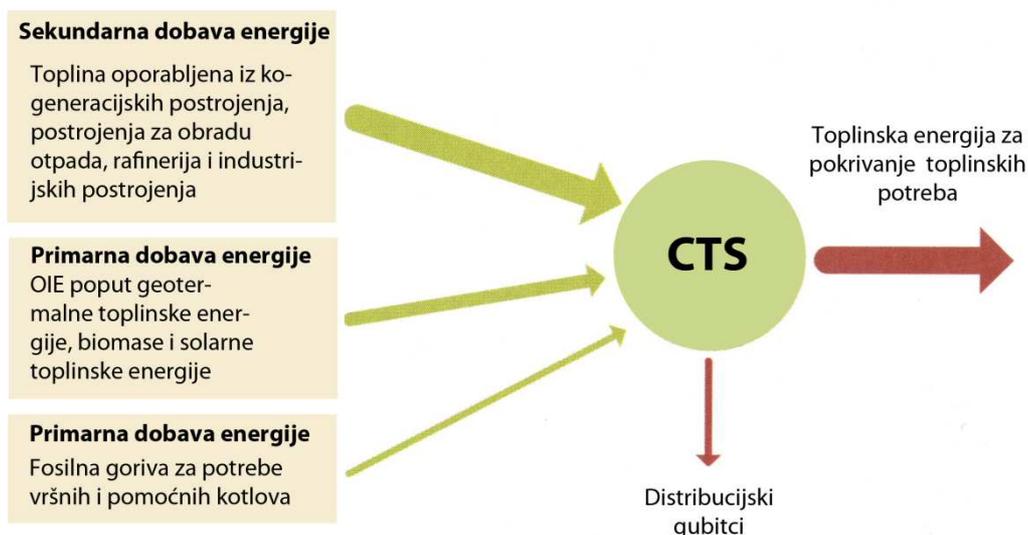
U današnje vrijeme osnovna ideja iza centraliziranih toplinskih sustava je iskorištavanje lokalno dostupnog goriva ili topline, koja bi inače bila izgubljena, za zadovoljavanje lokalnih potreba potrošača za toplinskom energijom. U ovakvom načinu razmatranja centraliziranih toplinskih sustava, toplinska distribucijska cijevna mreža se može gledati kao lokalno tržište energijom. Ova ideja zahtijeva ispunjavanje triju elemenata koji su nužni za uspostavu kompetitivnog CTS-a [11]:

- Raspoloživ izvor toplinske energije koji je jeftin i pogodan za iskorištavanje u CTS-u
- Postojanje potražnje za toplinskom energijom
- Postojanje cijevnog sustava koji spaja izvor i potrošače toplinske energije

Da bi se smanjili investicijski i operativni troškovi i osigurala kompetitivnosti centraliziranog toplinskog sustava, nužno je da prethodno navedena tri elementa budu lokalno distribuirana. Ovakva sinergija koja proizlazi iz spoja lokalnih ponuđača i potrošača toplinske energije predstavlja glavnu pokretačku snagu razvoja centraliziranih toplinskih sustava.

Osnovni energetske tokovi u centraliziranim toplinskim sustavima, prema osnovnoj ideji, sažeti su u prikazu na slici 3.

Temeljna ideja CTS-a



Slika 3. Osnovni energetske tokovi u CTS-u [11]

U prikazu na slici 3. iskazana je razlika između tehnologija koje pružaju energetske ulaz. Direktna uporaba obnovljivih izvora energije (OIE) ili fosilnih goriva za proizvodnju toplinske energije za CTS je označena kao "primarna dobava energije", zbog toga što nije bilo prethodnih korisnika ovoga energetske ulaza. Toplina dobivena iz kogeneracijskih postrojenja, postrojenja za termičku obradu otpada i industrijskih procesa je označena kao "sekundarna dobava energije". Ova oznaka im je dodijeljena zbog toga što su njihovi odgovarajući primarni energetske procesi, iz kojih je toplinska energija i dobivena, proizvodnja električne energije, zbrinjavanje otpada i proizvodnja sirovina ili proizvoda [11].

Usporedbom prikazane situacije s ilustracijom na slici 3. sa stvarnim stanjem stvari u centraliziranim toplinskim sustavima u državama Europske unije, može se vidjeti određeni konflikt izazvan činjenicom da danas veliki dio toplinske energije dolazi iz primarne dobave uz uporabu fosilnih goriva [11].

Danas se može definirati pet aktualnih, pogodnih i strateških lokalnih izvora toplinske energije i goriva za proizvodnju toplinske energije za CTS [11]:

- Iskoristiva toplinska energija nastala kao suprodukt proizvodnje električne energije u termoelektranama - kogeneracijska postrojenja (eng. *Combined heat and power (CHP)*)

- Iskoristiva toplinska energija dobivena spaljivanjem otpada (eng. *Waste-to-energy plants*)
- Iskoristiva otpadna toplina iz industrijskih postrojenja
- Goriva koja je teško uporabiti za pogon malih, individualnih, toplinskih kotlova (u ovu grupu danas većinom spada biomasa poput drvnog otpada, slame, itd.)
- Prirodni geotermalni toplinski izvori

Osim prethodno navedenih izvora toplinske energije, danas se u centraliziranim toplinskim sustavima, kako je već i prije spomenuto, često mogu naći i toplovodni kotlovi na fosilna goriva koji se isključivo koriste za potrebe CTS-a. Osim toga, kao izvor energije za sustave područnog grijanja sve više se spominju i polja solarnih kolektora i toplinske pumpe.

Daljnji razvoj CTS ide u smjeru njegove integracije s drugim sustavima tj. uspostave pametnih energetske sustava. Pojam pametnih energetske sustava obuhvaća integraciju različitih sustava kao i iskorištavanje fleksibilnosti u energetskej potrebi te skladištenja energije. Zbog sve većeg udjela obnovljivih izvora energije, čija je proizvodnja stohastičke naravi, dolazi do prevelike proizvodnje električne energije u određenim satima. Jedan od načina da se ova energija iskoristi je primjenom *Power to Heat* tehnologija koje omogućavaju transformaciju takve jeftine električne energije u toplinsku te njenu pohranu i iskorištavanje u sustavima područnog grijanja. U ovome slučaju se CTS-i koriste za balansiranje energetske proizvodnje i potreba. Osim toga, upotreba toplinskih spremnika kao dijela CTS-a omogućuje fleksibilniju proizvodnju u kogeneracijskim postrojenjima što rezultira manjom uporabom vršnih kotlova te omogućava iskorištavanje fluktuacija na tržištu električne energije za povećanje financijske koristi. Kombiniranje ovih dviju tehnologija je samo jedan, ali važan, korak u uspostavi pametnih energetske sustava te se u ovome području od CTS-a puno očekuje.

3.2.1. Ekonomski fenomeni iza CTS-a

Proizvodnja toplinske energije kao suprodukta nekoj drugoj djelatnosti predstavlja primjer ekonomije opsega (eng. *Economy-of-scope*). Ekonomija opsega je izraz za fenomen smanjivanja prosječnih, specifičnih, proizvodnih troškova koji se može postići ako postrojenje proizvodi više međusobno usko povezanih proizvoda te na taj način ostvaruje smanjenje

troškova proizvodnje u odnosu na proizvodnju svakog proizvoda u zasebnom postrojenju [15]. U ovu kategoriju spada proizvodnja toplinske energije: u kogeneracijskim postrojenjima (gdje je toplinska energija suprodukt proizvodnje električne energije), u postrojenjima za termičku obradu otpada (gdje je toplinska energija produkt obavljanja djelatnosti zbrinjavanja otpada), u industrijskim postrojenjima na račun rekuperacije otpadne topline (gdje je otpadna toplinska energija nusprodukt proizvodnog procesa).

Osim što je primjer ekonomije opsega, ovakav način proizvodnje toplinske energije predstavlja i primjer ekonomije veličine (eng. *Economy-of-size*). Ekonomije veličine je fenomen smanjivanja prosječnih, specifičnih, proizvodnih troškova koji se postižu povećanjem obima proizvodnje. Ovaj je fenomen prisutan kod svake centralizirane proizvodnje, pa tako i kod svih načina proizvodnje toplinske energije za potrebe CTS, međutim s vremenom gubi na značaju zbog pojave sve učinkovitijih malih uređaja za zadovoljavanje individualnih toplinskih potreba. Osim kod proizvodnje ovaj je fenomen prisutan i kod distribucije toplinske energije. Naime, distribucija je ekonomski više isplativa u velikim gradovima u odnosu na male. Ova opservacija proizlazi iz činjenice da kapacitet distribucijske mreže raste proporcionalno s kvadratom promjera cijevi, dok su toplinski gubitci i troškovi izravno proporcionalni s promjerom distribucijske cijevi [11] i [16].

Osim ovih prvenstveno ekonomskih fenomena koji idu na ruku većim centraliziranim toplinskim sustavima, postoji još atributa koji se mogu pripisati ovakvim sustavima, poput manjeg utjecaja na okoliš i povećane sigurnosti dobave energije [11].

3.2.2. Energetska osnova iza CTS-a

Osim toga, fundamentalni smisao centraliziranih toplinskih sustava može biti objašnjen na sljedeći način: logika koja stoji iza uporabe sekundarne otpadne toplinske energije iz energetskeg postrojenja za potrebe snabdijevanja CTS toplinskom energijom potječe iz direktne primjene drugog zakona termodinamike. Najveći dio eksergije koja je sadržana u svakom pojedinom gorivu je iskorišten za pogon industrijskog postrojenja za proizvodnju sirovina i/ili proizvoda ili za proizvodnju električne energije u kogeneracijskom postrojenju. Preostali dio eksergije se iskorištava za opskrbu toplinskom energijom objekata koji su spojeni na distribucijsku mrežu. Na ovaj način se eksergija sadržana u gorivu prvenstveno iskorištava za procese koji zahtijevaju dovođenje visokotemperaturne topline, dok se nisko

temperaturna toplinska energije, koja nastaje kao su ili nus-produkt primarnog procesa, iskorištava u CTS-u. Kada se goriva koriste direktno za snabdijevanje niskotemperaturnih energetske potreba, kao što je, na primjer, zagrijavanje prostora ili potrošne tople vode, većina korisne eksergije sadržane u gorivu je, u toplovodnom kotlu, nepovratno izgubljeno [11].

Iz prethodno navedenog proizlazi i dugoročni plan da energetske sustavi moraju osigurati maksimalnu iskoristivost eksergije svakog goriva kako bi se maksimizirala korist dobivena uporabom resursa i minimizirao utjecaj na okoliš. Iz eksergijske analize može se uvidjeti mogući energetske doprinos centraliziranih toplinskih sustava u smanjenju potrošnje primarne energije.

4. ELEMENTI CTS-a

Kako je već rečeno u poglavlju 2. ovoga rada, za uspostavu kompetitivnog CTS-a neophodno je postojanje triju elemenata:

- Raspoloživ izvor toplinske energije koji je jeftin i pogodan za iskorištavanje u CTS-u.
- Postojanje potražnje za toplinskom energijom.
- Postojanje cijevnog sustava koji spaja izvor i potrošače toplinske energije.

4.1. Izvori toplinske energije

Postoji velik broj tehnologija koje se koriste kao izvori toplinske energije u današnjim centraliziranim toplinskim sustavima te je nemoguće ukratko sažeti karakteristike svake pojedine tehnologije. Osim toga, lokalno raspoloživi izvori toplinske energije, odnosno goriva za proizvodnju toplinske energije za uporabu u centraliziranim toplinskim sustavima uvelike određuju i tehnologije koje se mogu razmatrati kao izvor toplinske energije u sustavu područnog grijanja. Osim vrste dostupnog goriva, u odabiru tehnologije sudjeluje i faktor kvalitete, tj. sastava, lokalno raspoloživog goriva, što ima veću težinu ukoliko se radi o biomasi ili otpadnim sirovinama. Stoga je u nastavku ovoga poglavlja dan pregled tehničkih parametara, poput okvirnih vrijednosti kapaciteta i postizivih učinkovitosti, kod najboljih dostupnih tehnologija, prema Danskom Tehnološkom Institutu i upravnom odboru Ecoheat4cities projekta [17], za iskorištavanje pojedinih vrsta goriva za potrebe snabdijevanja CTS-a toplinskom energijom.

4.1.1. Pregled najboljih tehnologija

4.1.1.1. Fosilna goriva

U Europskoj Uniji fosilna goriva nisu najbolji izbor za razmatranje prilikom izgradnje novoga postrojenja zbog ovisnosti o uvoznim energentima, kao i zbog emisija CO₂ koje nastaju prilikom izgaranja ovih goriva. Unatoč tome, radi mogućnosti usporedbe napravljen je pregled najboljih dostupnih tehnologija (eng. *Best available technology (BAT)*) za svako

pojedino fosilno gorivo. Za određivanje najbolje dostupne tehnologije uzete su u obzir emisije štetnih plinova i čestica te učinkovitost proizvodnje električne i toplinske energije [17].

Ugljen:

U praksi se najboljom tehnologijom za izgradnju novih ugljenom loženih, velikih, CHP postrojenja pokazala tehnologija izgaranja ugljene prašine (eng. *pulverised coal combustion*) sa superkritičnim parametrima pare (tlakom pare 240 - 260 bar i temperaturom 560 - 570 °C). Ovakva postrojenja mogu raditi s visokom električnom učinkovitošću od 43 - 45%, kada parna turbina radi u kondenzacijskom režimu rada, i s visokom ukupnom učinkovitošću od ~ 90% u protutlačnom režimu rada. Ovaj proces, kako i samo ime govori, je primarno zamišljen za izgaranje ugljena, međutim može se primijeniti i za druga goriva poput drvenih peleta i prirodnog plina. Tipična snaga ovakvih postrojenja je na razini 400 - 1000 MW_e [17].

Prirodni plin, lako lož ulje i ostala tekuća/plinska goriva:

Plinske turbine se mogu koristiti u isključivo turbinskim postrojenjima ili u kombiniranim, tzv. kombi, postrojenjima. U postrojenjima s kombiniranim ciklusom, toplinska energija ispušnih plinova plinske turbine se odvodi u kotao utilizator gdje se odvija prijenos topline s ispušnih plinova na vodu, sekundarnog, parnog kruga. Kombinirani ciklus se može voditi kao kogeneracijsko postrojenje, a sekundarni parni krug može biti dizajniran kao sustav s turbinskim oduzimanjima pare ili s protutlačnom turbinom.

Neto električna učinkovitost najboljeg dostupnog kogeneracijskog postrojenja s kombiniranim ciklusom je do 60%, dok ukupna učinkovitost u protutlačnom režimu dostiže 82 - 89%. Tipična snaga ovakvih postrojenja s turbinskim oduzimanjem pare iznosi 100 - 400 MW_e, dok su potpuno protutlačne izvedbe nešto manje i imaju instaliranu električnu snagu na razini 10 - 100 MW_e [17].

Što se tiče isključivo turbinskih postrojenja koja rade kao kogeneracijska postrojenja, ona postižu neto električnu učinkovitost od 35 - 44%, dok se njihova ukupna učinkovitost kreće na razini od 80 - 85% za turbine reda veličine 40 - 125 MW_e [17]. Na tržištu se mogu naći i manje plinske turbine, ali njihova električna učinkovitost pada kako im se smanjuje kapacitet.

Ukoliko je potrebno kogeneracijsko postrojenje manje instalirane snage, npr. u rasponu do 10 MW_e, onda se tu ističu plinski motori s unutarnjim izgaranjem. Ovakvi motori omogućuju

dostizanje električnog stupnja učinkovitosti od 40 - 45%, dok je njihova ukupna dostiziva učinkovitost na razini 88 - 96% [17].

Sve prethodno navedene tehnologije se mogu koristiti, uz smanjen stupanj učinkovitosti, i s ostalim plinovitim gorivima kao što su bioplina, deponijski plin i sintetski plin.

4.1.1.2. *Biomasa*

Kogeneracijska postrojenja na biomasu kao ulaznu sirovinu mogu koristiti čitav spektar biomase poput: drvnih ostataka iz drvne industrije, drvene sječke, slame, treseta i energetskih usjeva. Ukoliko je sadržaj vlage u korištenoj biomasu veći od 30 - 35%, potrebno je koristiti kondenzacijske kotlove za spaljivanje takve biomase. Od prethodno navedenih vrsta biomase, drvo i slama se mogu dopremati i u obliku peleta. Ako se u kogeneracijskom postrojenju koriste drvene pelete, moguće je za njihovo izgaranje koristiti isto postrojenje koje se koristi za izgaranje ugljena, a koje je prethodno već spomenuto [17].

Za izgaranje biomase u kogeneracijskim postrojenjima srednjih kapaciteta postoje različite tehnologije ložišta, tj. parnih kotlova. Kod ovakvih postrojenja, koja se baziraju na parno-turbinskoj tehnologiji srednjih kapaciteta (10 - 50 MW), moguće je postići stupanj neto električne učinkovitosti na razini od oko 29%, dok se stupanj ukupne učinkovitosti kreće između 93% i 102%, ovisno je li sustav dizajniran tako da omogućava iskorištavanje latentne topline kondenzacije vlage iz dimnih plinova [17]. Kogeneracijska postrojenja manjih kapaciteta postižu manju neto električnu učinkovitost, te se ona za postrojenja od 0,6 do 4,3 MW instalirane snage, ložena drvnom sječkom, kreće na razini od 25% [18].

4.1.1.3. *Komunalni otpad*

Komunalni otpad, ali i drugi zapaljivi otpad, može biti energetski oporabljiva njegovim spaljivanjem u kogeneracijskim postrojenjima temeljenim na tehnologiji protutlačne parne turbine. Ova postrojenja se razlikuju od postrojenja baziranih na istoj tehnologiji, koja koriste druge vrste goriva, po naprednijem sustavu pročišćavanja dimnih plinova. Veličina kogeneracijskih postrojenja za spaljivanje komunalnog otpada se uobičajeno kreće na razini od 100 do 120 MJ/s, odnosno 100 - 120 MW ulazne toplinske energije, što odgovara kapacitetu spaljivanja komunalnog otpada od ~ 35 tona po satu. Ove brojke uvelike ovise o vrsti i sastavu otpada koji je korišten. Što se tiče ukupnog stupnja učinkovitosti energetske

pretvorbe, ona se kreće na neto razini od oko 98%, dok je neto električna učinkovitost na razini od 24% [17] i [18].

4.1.1.4. Izvori energije za pokrivanje toplinskih potreba

U prethodnom tekstu dan je pregled najboljih tehnologija za iskorištavanje dostupnih goriva za energetski učinkovitu suproizvodnju električne i toplinske energije. Međutim, potrebe za toplinskom energijom za uporabu u centraliziranim sustavima moguće je zadovoljiti uporabom energenata isključivo za generiranje topline. U ovu grupaciju spadaju toplinski kotlovi na plinovita i tekuća goriva, toplinski kotlovi na biomasu, toplinski kotlovi na komunalni otpad te uporaba ostalih obnovljivih izvora energije za snabdijevanje toplinskih potreba CTS-a.

Što se tiče plinskih kotlova, njihova toplinska snaga se kreće u rasponu od 500 kW_t pa do 10 MW_t i imaju stupanj učinkovitosti u području od 97 - 105%. Učinkovitosti iznad 100%, svedene na donju ogrjevnu vrijednost goriva, postižu se kondenzacijom vlage iz dimnih plinova. Uporabom kondenzacijskih kotlova maksimalna teoretska učinkovitost kod plinskih kotlova iznosi 111%, dok je kod uporabe lož ulja maksimalna učinkovitost na razini 108% [17].

Toplinski kotlovi, za centralizirane toplinske sustave, na biomasu mogu kao gorivo koristiti drvenu sječku ili otpadno drvo iz drvne industrije. Ovakvi kotlovi mogu sagorijevati drvenu biomasu sa udjelom vlage do 63%, ovisno o tehnologiji. Kao što je slučaj i kod kogeneracijskih postrojenja na biomasu, ukoliko je sadržaj vlage u korištenoj biomasi veći od 30 - 35%, potrebno je koristiti kondenzacijske kotlove za spaljivanje takve biomase. U dobro konstruiranim sustavima područnog grijanja, gdje je temperaturna povratnog medija na razinama ispod 40°C, mogu se postići stupnjevi učinkovitosti od preko 110%. Toplinski kapaciteti ovakvih postrojenja kreću se na razini do 50 MW_t [17].

Kada se govori o spaljivanju komunalnog otpada u svrhe generiranja toplinske energije za sustav područnog grijanja, dolazi se do toplovodnih kotlova toplinskih kapaciteta od 15 do 50 MW_t. Ovakvi kotlovi postižu stupanj učinkovitosti transformacije energije od 96% [17].

Kod ostalih obnovljivih izvora energije koji se koriste za osiguravanje dovoljne količine toplinske energije za CTS, najzastupljeniji su solarna toplinska postrojenja i geotermalna postrojenja.

Za zadovoljavanje toplinskih potrebe centraliziranog toplinskog sustava pomoću energije sunčevog zračenja, potrebna je velika površina solarnih kolektora. Ovdje se govori o površinama kolektora od preko 1000 m². Jedan takav veliki toplinski solarni sustav s poljem solarnih kolektora i kratkotrajnim toplinskim spremnikom zapremnine od 0,1 do 0,3 m³ po m² instaliranih solarnih kolektora, može zadovoljiti od 10% pa do 25% godišnjih toplinskih potreba CTS-a [17].

Geotermalna energija se u zadnje vrijeme, tamo gdje je dostupna, sve više razmatra za uporabu u područnom grijanju. To je zbog toga što je to toplinska energija relativno niske temperature te je kao takva pogodna za uporabu u nisko-temperaturnim sustavima kao što su CTS. Toplinska energija koja se dobiva iz dubokih bušotina je uobičajeno na temperaturnom nivou od oko 30 - 70 °C.

Ako je toplinski izvor temperature iznad 50°C može se upotrijebiti Organski Rankinov Ciklus (eng. *Organic Rankine Cycle (ORC)*) za generiranje električne energije. Kako učinkovitost svakog Rankin-ovog ciklusa ovisi o temperaturi toplinskih spremnika, važno je napomenuti da učinkovitost ORC sustava na nižim temperaturnim nivoima iznosi ispod 10% [17].

Osim obnovljivih izvora energije i fosilnih goriva, ako izvor toplinske energije za snabdijevanje CTS-a može poslužiti i električna energija.

4.1.2. Usporedba tehnologija

Bazirano na prethodnom pregledu tehnologija, moguće je napraviti raster tehnologija koje se mogu primijeniti za iskorištavanje određenog goriva i/ili resursa. Ovakav raster je prikazan je sljedećom tablicom [Tablica 1.].

Tablica 1. Raster iskorištavanja goriva po tehnologijama [17]

		Ugljen	Drveni peleti	Drvena sječka	Slama	Prirodni plin	UNP	Bioplin	Odlagališni plin	Vodik	Miješani kom. otpad	ELLU	Metanol	Električna energija
1.	Postrojenje s tehn. izgaranja ugljene prašine	X	X			X								
2.	Sustav plinske turbine, veliki					X	X	X				X		
3.	Sustav plinske turbine, srednji					X	X	X				X		
4.	Sustav plinske turbine, mali					X	X	X				X		
5.	Kombinirani ciklus, oduzimanje pare					X	X	X				X		
6.	Kombinirani ciklus, protutlačni					X	X	X				X		
7.	Plinski motori					X	X	X	X					
8.	Kogeneracijsko postrojenje za TOO										X			
9.	Energana na biomasu, srednja, sječka			X										
10.	Energana na biomasu, srednja, slama				X									
11.	Plinski motor, isplinjavanje biomase			X	X									
12.	SOFC vodikov članak					X							X	
13.	Toplinska pumpa, velika, zrak													X
14.	Toplinska pumpa, velika, toplinski izvor 35 °C													X
15.	Absorpcijska TP, velika, kondenzacija DP													X
16.	Absorpcijska TP, velika, geotermalna													X
17.	Električni kotao													
18.	Postrojenje za TOO - CTS postrojenje										X			
19.	Toplovodni kotao za CTS - sječka			X										
20.	Toplovodni kotao za CTS - plin					X						X		
21.	Geotermalno područno grijanje													
22.	Solarno područno grijanje													

U sljedećoj tablici [Tablica 2.] dan je usporedni prikaz veličina postrojenja, toplinskih i električnih učinkovitosti te projekcija kretanja vrijednosti učinkovitosti zbog napretka tehnologija u budućnosti.

Tablica 2. Usporedni prikaz tehničkih karakteristika tehnologija [17]

	Električna snaga	Toplinska snaga	Ukupna efikasnost [%]			Električna efikasnost [%]			Dodatna el. energ.
			2010	2020	2050	2010	2020	2050	
1. Postrojenje s tehn. izgaranja ugljene prašine	400-1000		-	-	-	43-45	46-51	52-55	Approx. 4 %
2. Sustav plinske turbine, veliki	40-125		80-85	-	-	35-44	42-50	-	
3. Sustav plinske turbine, srednji	5-40		80-85	-	-	36-40	36-42	-	
4. Sustav plinske turbine, mali	0,1-5		80-85	-	-	28-35	-	-	
5. Kombinirani ciklus, oduzimanje pare	100-400		-	-	-	55-58	59-64	-	
6. Kombinirani ciklus, protutlačni	10-100		82-89	91	-	41-55	48-56	-	
7. Plinski motori	1-10		88-96	88-96		40-45	43-48	-	
8. Kogeneracijsko postrojenje za TOO	20		99	97		22-26	30	-	Approx. 4%
9. Energana na biomasu, srednja, sječka	10-100					33-34	40	-	
10. Energana na biomasu, srednja, slama	10-100		93-102			29			
11. Plinski motor, isplinjavanje biomase	1-20		103	105		35-40	37-45		
12. SOFC vodikov članak	1		90			44-47	55-65		
13. Toplinska pumpa, velika, zrak		1-10	280	290	320				
14. Toplinska pumpa, velika, toplinski izvor 35 °C		1-10	360	370	380				
15. Absorpcijska TP, velika, kondenzacija DP		2-15	170	175	185				
16. Absorpcijska TP, velika, geotermalna		5-10	170	175	180				
17. Električni kotao		1-25	99	99	99				
18. Postrojenje za TOO - CTS postrojenje		50	96	98					- Approx. 4%
19. Toplovodni kotao za CTS - sječka		1-50	108	108					
20. Toplovodni kotao za CTS - plin		0,5-10	97-105	97-105					
21. Geotermalno područno grijanje		15							Approx. 5-10%
22. Solarno područno grijanje		-							

4.2. Distribucijski sustavi

Tijekom povijesnog razvoja tehnologija distribucije toplinske energije u CTS-ima upotrebljavane su razne konstrukcije. Neke od tih konstrukcija doživjele su neuspjeh zbog prijevremenog zakazivanja ili nedovoljne energetske učinkovitosti, dok su neke od njih pokazale svoju robusnost tijekom desetljeća korištenja.

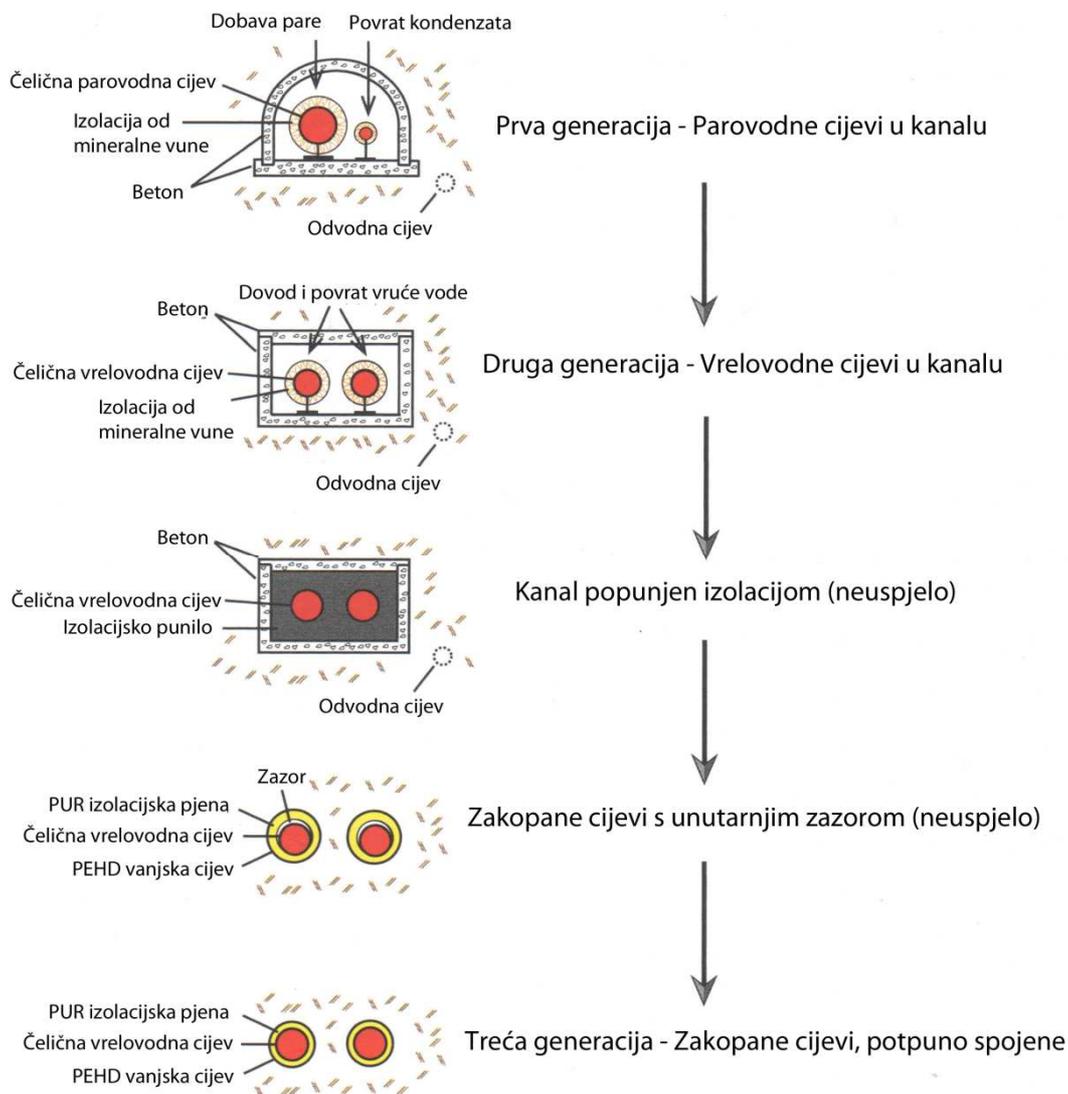
Većina cjevovoda, za distribuciju toplinske energije u centraliziranim toplinskim sustavima, je instalirano podzemno. Uz takav način instalacije postoji još i specifične instalacije cijevi kao što su nadzemne instalacije, instalacija cijevi u tunelima i cijevi unutar zgrada [11].

Glavni ciljevi prilikom razvoja tehnologija za nove distribucijske sustave su [11]:

- Smanjenje investicijskog troška
- Smanjenje potrebnog prostora
- Smanjenje potrebnog vremena za instalaciju
- Smanjenje operacijskih troškova

Kao što je već navedeno u poglavlju 3.1. ovoga rada, moguće je prema vrsti i temperaturi medija za prijenos toplinske energije jasno definirati tri generacije CTS. Tako se i

distribucijski sustavi mogu podijeliti na tri generacije. Na sljedećoj slici [Slika 4.] može se vidjeti slikovni prikaz razvoja distribucijskih sustava.



Slika 4. Prikaz razvoja distribucijskih sustava [11]

Iz podataka o razvoju CTS-a iznesenih u poglavlju 3.1. i podataka koji se mogu iščitati prethodne slike [Slika 4.] može se zaključiti da su povećanje energetske učinkovitosti i smanjenje glavni pokretači smanjenja temperature medija u distribucijskoj mreži i konstrukcijskog poboljšavanja distribucijske mreže te poboljšavanja njene toplinske izolacije.

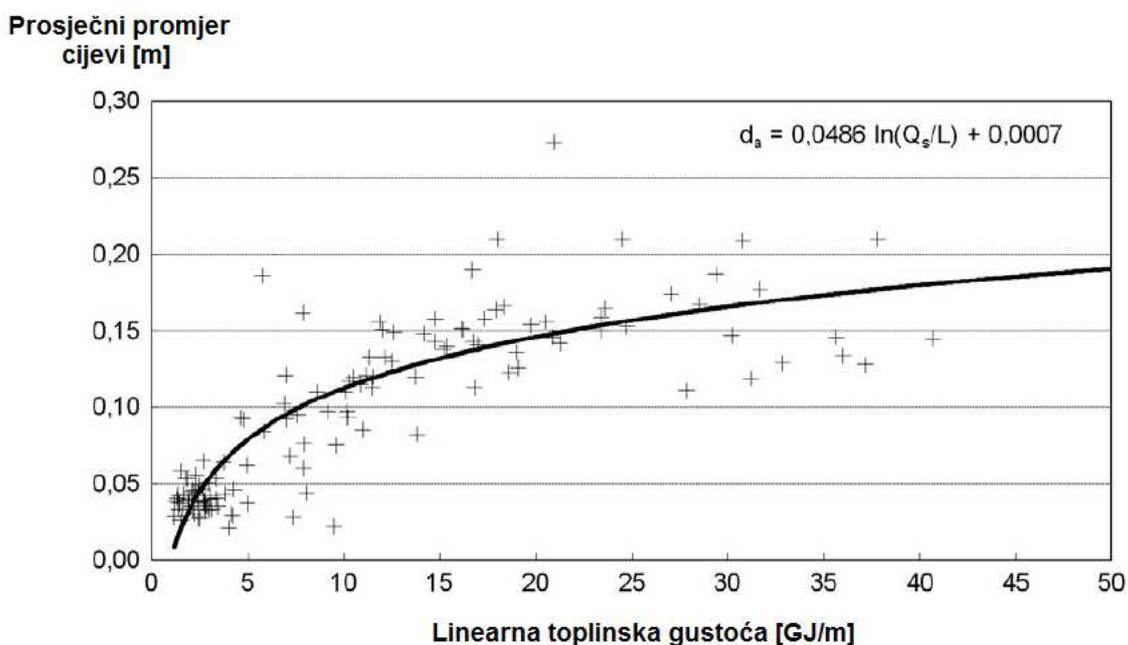
4.2.1. Investicijski i operativni troškovi

Investicijski troškovi u distribucijsku mrežu centraliziranog toplinskog sustava se sastoje od troškova nabavke cijevi i troškova povezanih za njeno postavljanje. Osim troškova same mreže tu su još i troškovi pumpi za osiguravanje prisilne cirkulacije medija te podstanice koje transformiraju toplinsku energiju viših parametara, koja se distribuira cjevovodima, u toplinsku energiju temperaturnog nivoa potrebnog za zadovoljavanje potreba krajnjeg korisnika, međutim ovi navedeni dijelovi mogu se smatrati dijelom investicije u samo postrojenje za dobavu energije ili trošak budućeg kupca toplinske energije.

Bez planiranja cijele distribucijske mreže, investicijski troškovi distribucijske mreže se mogu prikazati kao trošak po dužnom metru mreže ili trošak po toplinskom kapacitetu mreže.

Tako se prosječan promjer cijevi u distribucijskoj mreži CTS-a može procijeniti koristeći podatke iz već postojećih sustava. Usporedbom podataka za 134 Švedske toplinske distribucijske mreže dobivena je ovisnost prikazana jednadžbom (1) i dijagramom na idućoj slici [Slika 5.] [40].

$$d_a = 0,0486 \times \ln\left(\frac{Q_s}{L}\right) + 0,0007 \quad (1)$$



Slika 5. Ovisnost prosječnog promjera cijevi o linearnoj toplinskoj gustoći [40]

Dijeljenjem godišnje toplinske energije koja se isporučuje distribucijskim sustavom s duljinom sustava dođe se do linearne toplinske gustoće, a onda i do prosječnog promjera cijevi. Iz ovog podatka može se pomoću podataka o cijenama polaganja cijevi srednjeg promjera doći do okvirne investicijske cijene mreže. U tablici [Tablica 3.] prikazan je primjer cijena polaganja cijevi različitih promjena za potrebe toplinske distribucijske mreže po duljini rova za 2007. godinu u Velikoj Britaniji.

Tablica 3. Cijena instalacije toplinskih distribucijskih cijevi [41]

Promjer	Cijena [£/m]	Cijena [€/m]
DN 20	270	338,82
DN 25	279	350,12
DN 32	288	361,41
DN 40	311	390,28
DN 50	324	406,59
DN 65	342	429,18
DN 80	360	451,77
DN 100	387	485,65
DN 125	423	530,83
DN 150	504	632,47
DN 200	657	824,47
DN 250	774	971,30
DN 300	900	1.129,42

* 1 £ = 1,2549067 €

Osim ovoga načina, ukoliko se ne zna duljina mreže, do procjene investicijskih troškova u distribucijski sustav se može doći i koristeći podatak o izgrađenosti prostora e (eng. *plot ratio*), prema kojem je prostor podijeljen, kako je prikazano u radu Persson, U. i Warner, S. [40]. Faktor izgrađenosti e predstavlja omjer građevinskog i sveukupnog zemljišta određenog prostora. Tako dobiveni podatci o cijeni su prikazani u sljedećoj tablici [Tablica 4].

Tablica 4. Ovisnost iznosa investicije o faktoru e [40]

Prostor	Faktor izgrađenosti e	Prosječna investicijska cijena [€/GJ]
Centar grada	$e \geq 0,5$	1,2
Gradska periferija	$0,3 \leq e < 0,5$	1,6
Gradska zelena zona	$0 \leq e < 0,3$	1,8

Investicijski troškovi u jednu toplinsku distribucijsku mrežu dani su na primjeru sustava puštenog u pogon 2007. godine u Austriji. Tamo je za dostavu 2.275 kW toplinske energije do 45 potrošača položeno 2.600 metara toplinske mreže na prostoru s linearnom toplinskom gustoćom od 1,3 MWh/m/god (4,68 GJ/m/god). Cijena toplovodne mreže je iznosila 736.000 €, a toplinskih podstanica 182.000 € [42].

Još je jedan primjer projekta financiranog od strane Europske unije je sustav područnog grijanja u gradu Florina u Grčkoj. Ovaj projekt uključuje polaganje predizoliranog dvocijevnog cijevnog sustava DN450 između termo postrojenja u Meliti u duljini rova od 15.570 m te izrade podzemnog dvocijevnog toplovodnog distribucijskog sustava u gradu Florina uporabom predizoliranih cijevi pomjera od DN25 pa do DN500 u ukupnoj duljini rova od 52.000 m. Odobrena investicija u ovu toplinsku mrežu za dobavu 104 MW_t, uključujući i izmjenjivače topline u termo postrojenju u Meliti, iznosi 55.800.000 € [43] i [44].

Što se tiče operativnih troškova, njihov glavni dio čini električna energija za pogon cirkulacijskih pumpi koje služe za održavanje prisilne cirkulacije medija u cjevovodima. U studijama se fiksni troškovi određuju na razini 0,5% investicijske cijene mreže, dok se potrošnja električne energije procjenjuje na razini od 8 kWh_e/MWh_t, za decentralizirane, pa do 12 kWh_e/MWh_t, za centralizirane sustave. Postoje još i gubici vezani uz gubitak vode uz sustavu koje se u radu treba nadoknaditi svježom vodom [41].

Utrošak električne energije za pogon distribucijske mreže može se vidjeti na primjeru *Pimlico District Heating Undertaking (PDHU)*, CTS-a u Londonu s godišnjim toplinskim opterećenjem od ~ 50.000 MWh. Duljina distribucijske mreže ovoga CTS-a iznosi 7.866 m te opskrbljuje 3.256 rezidencijalnih i 55 komercijalnih objekata toplinskom energijom. Ukupni izmjereni godišnji toplinski gubitak koji se generira zbog zagrijavanje zemlje oko cjevovoda kreće se na razini od 5,7%. Za pogon distribucijskih pumpi u PDHU distribucijskoj mreži utroši se 513 MWh električne energije godišnje, što ispada 10,26 kWh_e/MWh_t [28].

Prema podacima Ludza Bio-Energy J/S Co. za CTS sustav u gradu Ludza, 2010. godine je u distribucijski sustav isporučeno 32.636 MWh toplinske energije uz toplinske gubitke na razini 11,1%. Utrošak električne energije za pogon distribucijskih pumpi je iste godine iznosio 401,8 MWh, iz čega se dobije utrošak od 12,31 kWh_e/MWh_t [45].

4.3. Potrebe za toplinskom energijom

Potrebe za toplinskom energijom, zbog specifičnosti uporabe toplinske energije, potrebno je sagledati posebno za industriju i posebno za ostale sektore.



Slika 6. CTS kao veza između toplinskih izvora i potrošača [20]

4.3.1. Toplinske potrebe industrijskog sektora

Industrijske potrebe za toplinskom energijom obuhvaćaju jako široki raspon u ovisnosti o karakteristikama industrijskog procesa. Svaki industrijski proces zahtijeva različite količine i temperaturni nivo toplinske energije.

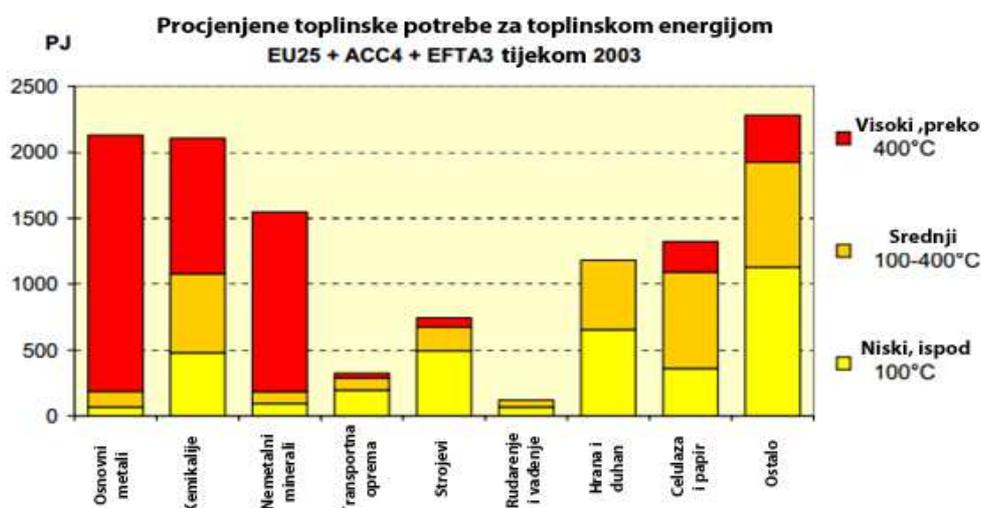
Za opisivanje kvalitete toplinske energije koja je potrebna u različitim granama industrije može se upotrijebiti temperatura na kojoj je toplinska energija isporučena, pa se tako mogu definirati tri temperaturna nivoa [21]:

- Niski temperaturni nivo - definiran je temperaturama do 100 °C. Ovaj temperaturni nivo odgovara uobičajenim zahtjevima za grijanje prostora. Toplinska energija ovoga

nivoa se koristi u nisko-temperaturnim energetske procesima kao što su: pranje, ispiranje i priprema hrane. Dio ove energije se također koristi i za grijanje industrijskih zgrada kao i za pripremu PTV.

- Srednji temperaturni nivo - definiran je temperaturnim rasponom od 100 °C do 400 °C. Ova toplinska energija se uobičajeno isporučuje u obliku vodene pare, kao energetskog nositelja. Često se koristi u svrhe isparavanja i sušenja.
- Visoki temperaturni nivo - definiran je temperaturama preko 400°C. Ovo je visokovrijedna energija koja je potrebna za proizvodnju sirovina kao što su metali, keramike, stakla, itd. Ove se temperature postižu pomoću vrućih dimnih plinova, električnom indukcijom, itd.

Na slici [Slika 7.] prikazana je potreba za toplinskom energijom po temperaturnim nivoima za određene industrijske grane.



Slika 7. Potreba za toplinskom energijom po temperaturnim nivoima u industriji [21]

Prema prethodnoj slici [Slika 7.], kemijska, ne metalna mineralna i industrija sivih metala imaju najveće zahtjeve za toplinskom energijom visokog temperaturnog nivoa. Ostale grane industrije koriste više toplinske energije srednjeg i niskog temperaturnog nivoa. U zbroju, visokotemperaturne potrebe dominiraju sa 43% ukupne potrošnje toplinske energije u

industriji, dok srednje i niže potrebe zauzimaju ostatak od 30% odnosno 27% toplinskih potreba [21].

Iz ove podjele je vidljivo da što se tiče industrijskih toplinskih potreba, centralizirani toplinski sustavi mogu zadovoljiti toplinske potrebe dijela industrije opskrbljujući ju s toplinom niskog temperaturnog nivoa, ukoliko se radi o CTS koji kao medij za prijenos topline koriste vruću vodu, odnosno toplinom srednjeg temperaturnog nivoa, ukoliko se radi o parnim centraliziranim toplinskim sustavima.

4.3.2. Toplinske potrebe ostalih sektora

U ovu grupu spadaju toplinske potrebe stambenih, javnih i komercijalnih zgrada. Osim industrijskih toplinskih potreba, koja ima specifične toplinske potrebe koje su vezane uz proizvodni proces, toplinske potrebe svih ostalih potrošača se mogu podijeliti u dvije osnovne kategorije: toplinske potrebe za grijanje prostora i toplinske potrebe za pripremu potrošne tople vode. Iz prethodno navedenog se da zaključiti da su ove toplinske potrebe usko vezane uz toplinske bilance zgrada [11].

Toplinske potrebe zgrada u području gdje se planira uvođenje centraliziranog toplinskog sustava je važan parametar za ocjenu isplativosti takvog projekta. Za razliku od industrijskih potreba, gdje je potrebno veliku količinu topline dovesti samo jednom potrošaču, kod stambenog i uslužnog sektora je toplinski konzum distribuiran po većem prostoru. U ovakvim uvjetima potrebno je procijeniti je li na određenom području gustoća toplinskog konzuma dovoljno velika da bi se opravdalo ulaganje u distribucijsku mrežu. Stoga je moguće reći da su CTS isplativiji u gradskim područjima, te ako je izvor toplinske energije jeftin, i u prigradskim. Ukoliko je gustoća toplinskog konzuma premala za uvođenje centraliziranih toplinskih sustava može se razmotriti uvođenje drugih mrežnih sustava koji imaju manje troškove, poput plinovoda [21].

4.3.2.1. Grijanje prostora

Pod ovim terminom se smatra proces dovođenja topline za zagrijavanje zatvorenog prostora, u vrijeme kada je vanjska temperatura niža od željene unutarnje temperature, s ciljem stvaranja pogodnih temperaturnih uvjeta za ugodan boravak ljudi. Prema tome, dvije su najvažnije varijable koje utječu na potrebnu količinu toplinske energije koja se mora dovesti

za održavanje željene temperature prostora, a to su: vanjska temperatura i željena unutarnja temperatura. Povećanjem željene unutarnje temperature prostora i/ili smanjenjem vanjske temperature dolazi do povećanja potrebne toplinske snage za zagrijavanje prostora, pošto dovedena toplinska energija mora kompenzirati toplinske gubitke prostora kroz njegovu vanjsku ovojnicu. Ukratko, potrebna toplina koju je potrebno dovoditi prostoru je opisana sljedećom jednadžbom (2).

$$\begin{aligned}
 &\text{Toplinska potreba} = \\
 &= \quad \text{Toplinski gubici kroz zidove, krov, pod i vanjsku stolariju} \\
 &\quad + \text{Gubici zbog ventilacije} \\
 &\quad - \text{Različiti toplinski dobitci}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Prvi faktor ove jednadžbe, toplinski gubici kroz zidove, krov, pod i vanjsku stolariju, ovisi o površini elemenata, koeficijentu provođenja topline elementa i temperaturnoj razlici između unutarnje i vanjske temperature. Gubici zbog ventilacije označavaju gubitke proizašle zbog zamjene dijela zagrijanog unutarnjeg zraka vanjskim hladnim zrakom. Ovi su gubici ovisni o brzini izmjene zraka, temperaturi vanjskog zraka te o postojanju i vrsti, sustava rekuperacije topline.

Što se tiče toplinskih dobitaka, oni se mogu podijeliti na unutarnje toplinske dobitke i solarne toplinske dobitke. Unutarnji toplinski dobitci predstavljaju zbroj toplinskih dobitaka koji proizlaze iz uporabe kućanskih i uredskih aparata i uređaja te samog ljudskog metabolizma. Solarni dobitci predstavljaju ulazak toplinske energije u prostor putem sunčevog zračenja. Ovi dobitci prvenstveno ovise o položaju i orijentaciji objekta te položaju staklenih površina.

4.3.2.2. Priprema potrošne tople vode (PTV)

Toplinska snaga za pripremu potrošne tople vode (PTV) - P_{PTV} je funkcija potrošnje vode i željene temperature PTV te se može iskazati u obliku jednadžbe kao:

$$\begin{aligned}
 P_{PTV} = &\text{maseni protok PTV} \times \text{specifični toplinski kapacitet vode} \\
 &\times (\text{temperatura tople vode} - \text{temperatura hladne vode})
 \end{aligned} \tag{3}$$

Uobičajena temperatura potrošne tople vode je na razini od 55 °C. Ova temperaturna razina PTV je dovoljno visoka za zadovoljavanje higijenskih potreba čovjeka, za razlaganje prehrambenih masnoća prilikom pranja posuđa te za izbjegavanje rasta bakterija iz porodice *Legionella* čije kolonije rastu pri temperaturama od 20 do 45 °C. Osim toga, navedena temperatura je dovoljno niska kako bi se izbjeglo nastajanje opekline na ljudskoj koži, za što je potrebna temperatura vode od iznad 65 °C. Ovaj temperaturni nivo također pogoduje izbjegavanju precipitaciji kamenca.

5. PREGLED CTS-A U ZEMLJAMA EUROPSKE UNIJE

Danas su CTS-i rasprostranjeni po cijeloj Europi, međutim brzina njihove ekspanzije se uvelike razlikuje od države do države. Iako je u nekim državama udio rasprostranjenosti sustava na razini od 40 do 60%, u nekim Skandinavskim i Baltičkim državama, centralizirani toplinski sustavi pokrivaju samo 13% Europskog tržišta toplinskom energijom za zgradarstvo u rezidencijalnom sektoru. Udio za industrijski sektor se kreće na razini od 9%.

Ukupna duljina distribucijske toplinske mreže u Europskim zemljama je na razini 200.000 km i ostvaruje godišnje prihode na od ~ 30 milijardi eura godišnje.

Kako bi se dao pregled cijene energenata po državama, u sljedećim tablicama su dane cijene toplinske [Tablica 5.] i električne [Tablica 6.] energije u pojedinim državama.

Tablica 5. Prosječna cijena toplinske energije po državama [71]

Država	Cijena [Eur/GJ]
Austrija	13.96
Bugarska	10.70
Češka	19.1
Danska	27.8
Estonija	15.42
Finska	14.8
Francuska	18.28
Njemačka	20.28
Mađarska	9.3
Island	3.14
Japan	57.53
Korea	12.2
Latvija	15.35
Litva	18.6
Norveška	16
Poljska	10.73
Rumunjska	14.54
Slovačka	20.14
Slovenija	15.05
Švedska	20.63
Švicarska	22.5
SAD	8.64

Tablica 6. Cijena električne energije po državama [72]

Država	Cijena za kućanstva [€/kWh]		Cijena za industriju [€/kWh]	
	bez poreza	s porezom	bez poreza	s porezom
EU28	0,1385	0,2047	0,0917	0,1527
EU27	0,1388	0,2053	0,0917	0,1528
Euro zona	0,1368	0,2178	0,0909	0,1635
Belgija	0,1673	0,2097	0,0916	0,1283
Bugarska	0,0689	0,1628	0,0736	0,1752
Češka	0,1049	3,5200	0,0819	2,7538
Danska	0,1317	2,2699	0,0830	1,8159
Njemačka	0,1435	0,2981	0,0844	0,2071
Estonija	0,0967	0,1307	0,0794	0,1100
Irska	0,2008	0,2407	0,1288	0,1500
Grčka	0,1204	0,1767	0,1090	0,1510
Španjolska	0,1771	0,2252	0,1185	0,1507
Francuska	0,1064	0,1585	0,0743	0,1157
Hrvatska	0,1004	1,0004	0,0903	0,9112
Italija	0,1539	0,2446	0,1080	0,2000
Cipar	0,1861	0,2291	0,1672	0,2070
Latvija	0,0860	0,1365	0,0903	0,1417
Litva	0,0893	0,4593	0,0958	0,4881
Luksemburg	0,1431	0,1738	0,0949	0,1067
Mađarska	0,0946	36,8927	0,0836	35,0540
Malta	0,1601	0,1681	0,1861	0,1954
Nizozemska	0,1306	0,1821	0,0771	0,1247
Austrija	0,1321	0,2021	0,0827	0,1306
Poljska	0,1107	0,5934	0,0777	0,4237
Portugal	0,1268	0,2175	0,1029	0,1427
Rumunjska	0,0910	0,5759	0,0753	0,4852
Slovenija	0,1152	0,1630	0,0754	0,1056
Slovačka	0,1224	0,1507	0,1107	0,1382
Finska	0,1070	0,1563	0,0664	0,0910
Švedska	0,1264	1,7611	0,0702	0,7922
Velika Britanija	0,1826	0,1575	0,1246	0,1271
Lihtenštajn	0,1393	0,1870	0,1359	0,1825
Norveška	0,1173	1,3682	0,0649	0,8260
Crna Gora	0,0866	0,1031	0,0734	0,0873
Makedonija	0,0418	4,8394	0,0419	5,4812
Srbija	0,0499	7,0214	0,0507	7,1325
Turska	0,0955	0,3537	0,0720	0,2598
BiH	0,0676	0,1550	0,0652	0,1494

U nastavku je dan pregled postrojenja na biomasu, komunalni otpad i fosilna goriva koja se koriste za snabdijevanje postojećih centraliziranih toplinskih sustava toplinskom energijom. Posebna pozornost se pridala ekonomskim parametrima postrojenja koji su se mogli naći pregledom literature.

5.1. Biomasa

5.1.1. Austrija

5.1.1.1. ORC kogeneracijsko postrojenje na drvnu biomasu u gradu Admont, Austrija [22]

U Austrijskom gradu Admont, u Austrijskoj pokrajini Styria, 1999. godine je pušteno u pogon kogeneracijsko postrojenje na drvnu biomasu bazirano na tehnologiji organskog Rankin-ovog ciklusa (ORC). Ovo je postrojenje instalirano u sklopu Europskog projekta, *European demonstration project*, u STIA tvornici za preradu drveta.

Postrojenje se sastoji od dva kotla na biomasu, od čega je jedan kotao koji zagrijava termalno ulje (nominalne snage 3,2 MW_t) za pogon ORC postrojenja, a drugi je toplovodni kotao (nominalne snage 4,0 MW_t). Kao gorivo za pogon ovoga postrojenja koristi se otpadna drvna sirovina iz drvne industrije: drvna piljevina i kemijski netretiran drveni ostatak. Svaki od kotlova u sustavu obrade dimnih plinova ima ugrađen precipitacijski filter za čestice i sustav za kondenzaciju vlage iz dimnih plinova.

Tehničke karakteristike postrojenja navedene su u nastavku:

- Potrošnja biomase: 5,000 tona
- Nominalni kapacitet uljnog kotla: 3.2 MW_t
- Nominalni kapacitet toplovnog kotla: 4.0 MW_t
- ORC proces:
 - Nominalna električna snaga: 0.4 MW_e
 - Nominalna toplinska snaga: 2.25 MW_t
- Potrošnja električne energije: 10-13 W/kW
- Toplinska učinkovitost – toplovodni kotao: 89 %
- Toplinska učinkovitost – uljni kotao: 75 %
- Toplinska učinkovitost - ORC proces: 80 %
- Električna učinkovitost - ORC proces: 18 %

- Ukupna učinkovitost postrojenja: 98 %
- Gubitci: 2 %

Investicijski troškovi za izgradnju ovoga ORC kogeneracijskog postrojenja na biomasu iznosili su ~ 3.200.000,00 €, od čega je 890.000,00 € financirano putem nacionalnog zajma preko *Austrian Kommunalkredit AG*, a 576.991,00 € financijskih sredstava je odobreno od strane Europske komisije. Ostatak projekta je financiran putem vlastitog kapitala i bankarskih kredita. Ovi troškovi ne uključuju toplovodni kotao.

Ukupni godišnji operativni troškovi i troškovi održavanja (eng. *operation and maintenance costs (O&M)*) iznose ~ 381.000,00 €, od čega su:

- Troškovi za gorivo 256.000,00 €/god (67%)
- Troškovi osoblja 34.000,00 €/god
- Troškovi održavanja 50.000,00 €/god
- Troškovi dodatne energije 26.000,00 €/god
- Ostali troškovi (administracija, osiguranje, itd.) 10.000,00 €/god

Prihodi ovoga projekta ostvaruju se na račun prodaje toplinske energije drvnoj industriji i samostanu te na račun prodaje proizvedene električne energije.

5.1.1.2. ORC kogeneracijsko postrojenje na drvnu biomasu u gradu Lienz, Austrija

ORC kokeneracijsko postrojenje *Lienz I*, u gradu Lincu u pokrajini *Eastern Tyrol* u Austriji, pušteno je u pogon 2003. godine. Postrojenje je upravljano od strane poduzeća *Stadtwärme Lienz Produktions- und Vertriebs-GmbH*. Zbog velike zainteresiranosti okolnih zajednica za područnim grijanjem odlučeno je da se izgradi i drugo postrojenje, *Lienz II*, te da se proširi postojeća mreža područnog grijanja. Kao dio cijelog sustava, instaliran je i sustav solarnih kolektora [22].

Tehničke karakteristike postrojenja navedene su u nastavku [22]:

- Kotlovi proizvođača *Kohlbach GmbH*:
 - Nominalni kapacitet toplovodnog kotla: 7 MW_t
 - Nominalni kapacitet uljnih kotlova 6 i 8,5 MW_t
- Ukupni instalirani toplinski kapacitet: 44.5 MW_t
- Električni kapacitet: 2.5 MW_e

- Površina solarnih panela: 630 m²
- Proizvedena električna energija: 11 GWh/god
- Proizvedena toplinska energija: 74 GWh/god
- Duljina distribucijske mreže CTS-a: 53 km
- Spojeni kapacitet: 47.3 MW
- Broj spojenih potrošača: 882
- Ukupni investicijski trošak: 41.000.000,00 €

Za proizvodnju toplinske energije upotrebljuje se drvena sječka (šumska i iz industrije), kora drveća, piljevina i drvo. Svakodnevno se u postrojenju usitni 25.000 m³ drveta u drvenu sječku te se dodatno kamionima doveze 80.000 m³ drvene sječke [22].

Investicijski troškovi u ova postrojenja, uključujući i troškove distribucijske mreže, iznose ~ 24.800.000,00 € za postrojenje Lienz I i ~ 16.000.000,00 €, za postrojenje Lienz II [22].

Postrojenje Lienz I:

Što se tiče ORC kogeneracijskog dijela postrojenja Lienz I, njegova instalirana toplinska snaga je deklarirana na 4,959 MW_t, a električna na 1,1 MW_e. Ukupna godišnja učinkovitost postrojenja je 88%, od čega je 14,5% otpada na električnu, a 73,5% na toplinsku učinkovitost. Faktor opterećenja ovog postrojenja je na razini 5.000 sati godišnje te u tom razdoblju potroši 34.485 MWh toplinske energije u obliku ulaznog goriva generirajući 5.500 MWh električne energije i 27.879 MWh toplinske energije u obliku vruće vode za potrebe CTS-a temperature između 80 i 90°C [24].

Osim ORC ciklusa, postrojenje Lienz I sadrži i kotao na biomasu nazivne toplinske snage 7 MW_t te vršni kotao snage 18 MW_t. Ukupne tehničke karakteristike, kako su navedene u izvješću [24], prikazane su u sljedećoj tablici [Tablica 7.].

Tablica 7. Izvod iz tehničkih karakteristike postrojenja Lienz I [24]

Parametar	Jedinica	Iznos
Kogeneracijsko postrojenje:		
Snaga dovedena gorivom	[kW _{NCV}]	6,897
Električna snaga	[kW _{el}]	1,100
Toplinska snaga	[kW _{th}]	4,969
Sati rada pri punom opterećenju	[h/a]	5,000
Godišnja električna učinkovitost	[%]	14.5
Godišnja ukupna učinkovitost	[%]	88.0
Proizvodnja električne energije	[kWh _{el} /a]	5,500,000
Proizvodnja toplinske energije	[kWh _{th} /a]	27,879,310
Energija dovedena gorivom	[kWh _{NCV} /a]	37,931,034
Energija goriva za proizvodnju topline	[kWh _{NCV} /a]	31,681,034
Energija goriva - dodatna za suproizvodnju	[kWh _{NCV} /a]	6,250,000
Toplovodni kotao na biomasu:		
Energija dovedena gorivom	[kWh _{NCV} /a]	36,164,106
Nominalni kapacitet	[kW]	7,000
Proizvodnja toplinske energije	[kWh/a]	31,824,413
Specifična potrošnja električne energije	[kWh _{el} /MWh _{th}]	13.0
Potrošnja električne energije	[kWh/a]	413,717
Vršni kotao:		
Nominalni kapacitet	[kW]	18,000
Proizvodnja toplinske energije	[kWh _{th} /a]	2,487,655
Cijelo kogeneracijsko postrojenje:		
Energija dovedena gorivom	[kWh _{NCV} /a]	74,095,141
Ukupna proizvodnja električne energije	[kWh _{el} /a]	5,500,000
Ukupna proizvodnja toplinske energije	[kWh _{th} /a]	62,191,379
Distribucijski gubitci	[%]	13.0
Prodana toplinska energija	[kWh _{th} /a]	54,106,500

Ekonomski parametri postrojenja Lienz I, prikazani su u nastavku [24]:

- Ukupni investicijski troškovi: 8.989.858,00 €
- Troškovi ulaznih sirovina: 979.233,00 €/god
- Operativni troškovi: 1.248.422,00 €/god
- Ostali troškovi: 71.641,00 €/god

5.1.1.3. Postrojenje područnog grijanja Gresten, Austrija [22]

Centralizirani toplinski sustav u mjestu Gresten u Austriji primjer je ruralnog CTS-a. Pušten je u pogon 1996. godine snabdijeva se toplinskom energijom iz dvaju kotlova na drvenu biomasu (od 1,5 i 3,5 MW_t) rezervnog kotla na lož ulje (od 1,5 MW_t) i viška proizvedene

topline iz kogeneracijskog postrojenja poduzeća Cycle Energy koje je u mogućnosti dobiti do 5 MW toplinske energije u CTS.

Dva kotla na biomasu, od 1,5 i 3,5 MW_t troše 2.000 tona drvene sječke godišnje te opskrbljuju 10 km toplinske distribucijske mreže i 300 m industrijske distribucijske mreže toplinskom energijom. Promjer cjevovoda u mrežama je 150 mm.

Ukupni investicijski trošak u CTS iznosi 5.319.000,00 €, od čega je 1.194.000,00 € subvencionirano. Specifikacije ukupnog investicijskog troška su:

- Trošak za građevine: 835.000,00 €
- Trošak za distribucijsku mrežu: 3.565.000,00 €
- Trošak za opremu (kotlove): 864.000,00 €

Prema dostupnim podacima, ukupna cijena toplinske energije se sastoji od:

- Cijena toplinske energije (bez poreza): 0,049 €/kWh
- Fiksne cijene priključka (bez poreza): 30 € po instaliranom kW po godini
- Troška mjerne opreme (bez poreza): 85 €/godišnje

Prethodno navedene cijene su podložne godišnjim promjenama baziranim na indeksu potrošačkih cijena, indeksu cijena drveta i indeksu cijena nafte.

5.1.2. Finska

5.1.2.1. Keuruun Lämpövoima Oy, Varissaari CHP postrojenje [22]

Više od 40 godina stari 11 MW_t kotao na biomasu, u mjestu Keuruun Lämpövoima Oy u Finskoj, više nije bio dostatan za snabdijevanje toplinskih potreba centraliziranog toplinskog sustava stoga se krenulo u izgradnju novog kogeneracijskog postrojenja. Novo postrojenje, snage 5 MWe i 15 MW_t, pušteno je u pogon krajem 2010. godine.

Postrojenje je ljeti pogonjeno isključivo drvnom biomasom dok se u zimskim mjesecima upotrebljuje i treset. Ukupni udio drvene biomase u potrošnji goriva iznosi oko 84%. Kada temperatura padne ispod -20 °C, pali se vršni kotao na lož ulje.

Investicija u novo kogeneracijsko postrojenje iznosila je ~ 27.000.000,00 €, pri čemu je Ministarstvo zapošljavanja i ekonomije poduprla investiciju s 5,4 milijuna eura. Tehnologija

koja je upotrijebljena za izgradnju ovog postrojenja je parna turbina s kotlom s izgaranjem u fluidiziranom sloju te rekuperacijom topline iz dimnih plinova. Zbog rekuperacije toplinske energije iz dimnih plinova, izlazna temperatura dimnih plinova je na razini od 40 °C.

CTS zapošljava poslovođu i osam radnika na puno radno vrijeme na poslovima upravljanja proizvodnim postrojenjem i održavanju distribucijske mreže. Ovo postrojenje isporučuje toplinsku energiju 35 km dugačkom distribucijskom sustavu. Cijena tako isporučene toplinske energije iznosi nešto preko 80 €/MWh (uključujući porez), što je za oko 5 do 10% iznad državnog prosjeka. Obzirom da ukupna instalirana toplinska snaga u ovome postrojenju iznosi preko 20 MWt, ovo postrojenje je uključeno u sustav trgovanja emisijama Europske Unije.

Ukupna potrošnja goriva 2011. godine iznosila je 60 GWh u obliku drvene biomase, 12 GWh u obliku treseta i oko 0,4 GWh lakog lož ulja, dok je godišnja proizvodnja ovog postrojenja na razini od 65 GWh toplinske i 10 GWh električne energije.

5.1.2.2. Jyväskylä Energia Oy, Korpilahti postrojenje sustava područnog grijanja [22]

Jyväskylä Energia postrojenje za snabdijevanje centraliziranog toplinskog sustava toplinskom energijom se nalazi u Korpilahti i pušteno je u pogon krajem 2010. godine. Ovo se postrojenje sastoji od 3 MWt kotla na drvnu sječku i treset te 5 MWt vršnog kotla na lož ulje koji se također koristi za vrijeme ljetnih mjeseci kada nema dovoljno velikog opterećenja za kotao na biomasu.

Ovo postrojenje toplinskom energijom opskrbljuje školske zgrade, zdravstvene ustanove i ostale javne zgrade, kao i nekoliko industrijskih postrojenja. Za sada je samo nekoliko kućanstava i blokova zgrada spojeno na sustav centralizirane opskrbe toplinskom energijom pa je toplinski kapacitet sustava tek napola iskorišten. Duljina postojeće distribucijske mreže iznosi oko 15 km.

Ukupni investicijski trošak ovog postrojenja je oko 2 milijuna eura te je javna potpora investitoru iznosila oko 20% ukupnog troška. Za proizvodnju toplinske energije, pri sadašnjem opterećenju, postrojenje troši od 4 do 6 GWh goriva godišnje dok će se pri punom opterećenju ta potrošnja poduplati. Cijena toplinske energije kreće se na razini od 55 €/MWh uključujući porez. Uz ovu cijenu, potrošačima se naplaćuje dodatna naknada koja ovisi o volumenu grijanog prostora koja za manje samostojeće kuće iznosi oko 25 € mjesečno.

5.1.2.3. Kokkolan Voima Oy, kogeneracijsko postrojenje u gradu Kokkola [58]

Kokkola Voima Oy kogeneracijsko postrojenje opskrbljuje grad Kokkola toplinskom energijom. Danas, oko 60% zgrada u gradu Kokkola je spojeno na CTS te im se godišnje iz distribucijskog sustava isporuči ~ 200 GWh toplinske energije. U planu je proširenje pokrivenosti grada centraliziranim toplinskim sustavom te se očekuje povećanje toplinskog konzuma na 280 GWh toplinske energije godišnje.

Kogeneracijsko postrojenje Kokkola Voima Oy je u komercijalni pogon pušteno u prosincu 2001. godine. Snaga ovoga postrojenja iznosi 20 MW električne energije i 50 MW toplinske energije te je planirano vrijeme pogona 5.000 - 6.000 sati godišnje, od čega je 4.000 sati na parcijalnom opterećenju.

Ovo postrojenje kao gorivo koristi drvenu sječku, koru drveta, piljevinu i slamu, koje izgara u barbutažnom fluidiziranom sloju (eng. *bubbling fluidised bed combustion (BFBC)*). Izgaranjem biomase proizvodi se 27 kg/s vodene pare koja se odvodi u protutlačnu turbinu snage 21 MW. Osim toga, ovo postrojenje je opremljeno i toplinskim spremnikom volumena 3.200 m³ i kapaciteta 50 MW_t koje omogućuje pogon postrojenja u punom pogonu za vrijeme dana, kada je cijena električne energije viša, bez obzira na toplinsko opterećenje. Ukupni stupanj učinkovitosti ovoga postrojenja iznosi 89%.

Investicijski troškovi u ovo kogeneracijsko postrojenje iznosili su 26.900.000 eura u 2001. godini što dovodi do specifične investicije od 1.346 €/kW_e.

5.1.2.4. Forssan Energia, kogeneracijsko postrojenje u gradu Forssa [58]

Forssan Energia kogeneracijsko postrojenje sagrađeno je 1996. godine i od tada opskrbljuje grad Forssa električnom i toplinskom energijom. Godine 1999. ovo je postrojenje proizvelo 4.102 GWh električne i 147,1 GWh toplinske energije.

Drvena biomasa se u ovome postrojenju spaljuje u barbutažnom fluidiziranom sloju što razvija maksimalnu toplinsku snagu od 71,7 MW_t i proizvodi vodenu paru koja se u mehaničku energiju pretvara u 17,2 MW protutlačnoj turbini. Ukupni stupanj učinkovitosti ovoga postrojenja iznosi 91%, dok se električna učinkovitost kreće na razini od 24%.

Ukupna investicija u ovo postrojenje pogonjeno isključivo drvnom biomasom (drvena sječka i drveni otpad) iznosila je 17.100.000 eura. Ako se zna da je toplinska snaga ovoga postrojenja

48 MW_t, a električna 17,2 MW_e, može se doći do specifične investicije od 994 €/kW_e. Investicija je djelomično potpomognuta od strane finskog Ministarstva trgovine i industrije koje je za tu namjenu izdvojilo 1,7 milijuna eura. Što se tiče podataka o troškovima održavanja, prema dostupnim podacima oni na godišnjoj razini iznose između 50.000 € i 67.200 €.

5.1.2.5. *Salmi Voima Oy, kogeneracijsko postrojenje u gradu Iisalmi [58]*

Kogeneracijsko postrojenje Salmi Voima Oy opskrbljuje grad Iisalmi električnom i toplinskom energijom od 2002. godine. Snaga ovoga postrojenja iznosi 14,7 MW_e i 30 MW_t te godišnje isporučuje 60 - 70 GWh električne energije u električnu mrežu i 150 - 185 GWh toplinske energije u distribucijski sustav CTS-a. Planirano godišnje vrijeme rada ovoga postrojenja iznosi oko 5.000 sati.

Ovo postrojenje se sastoji od dvaju kotlova na biomasu, toplinske snage 15 MW_t, u kojima se u fluidiziranom sloju spaljuje slama te drvena biomasa poput piljevine, drvne sječke i kore drveta. Biomasa izgara u barbutažnom fluidiziranom sloju (eng. *bubbling fluidised bed combustion (BFBC)*) te se proizvedena para odvodi u protutlačnu turbinu. Ukupni stupanj učinkovitosti ovoga postrojenja doseže 93%, dok je električna učinkovitost na razini od 31%.

Investicijski troškovi u ovo kogeneracijsko postrojenje iznosili su 21.000.000 što dovodi do specifične investicije od 1.429 €/kW_e. Za izgradnju ovoga postrojenja odobrena je od strane MTI subvencija u iznosu od 13%, tj. 2,7. milijuna eura.

5.1.3. *Rumunjska*

5.1.3.1. *Kogeneracijsko postrojenje na drvnu biomasu Holzindustrie Schweighofer Sebes [22]*

Ovo kogeneracijsko postrojenje na drvnu biomasu pušteno je u pogon 2010. godine i danas je najveće kogeneracijsko postrojenje u Rumunjskoj. Izgrađeno je u sklopu pogona drvne industrije čiju drvnu biomasu koristi za pogon. Ukupna snaga kogeneracijskog postrojenja iznosi 43,5 MW od čega 32,6 MW_t otpada na proizvodnju toplinske energije, a 10,9 MW_e na proizvodnju električne energije.

Postrojenje se sastoji od dvaju parnoturbinskih postrojenja. Postrojenje CHPP I je nazivne snage 11 MW (8.6 MW_t + 2,4 MW_e), dok CHPP II postrojenje ima nazivnu snagu od 32,5

MW ($24.0 \text{ MW}_t + 8.5 \text{ MW}_e$). Biomasa koja se koristi u ovim postrojenjima je sljedeća: drvena sječka, kora, grane i ostali otpad iz drvne industrije. Proizvedena toplinska energija se djelomično koristi za potrebe drvne industrije, a djelomično za opskrbu rezidencijalnih potrošača.

Ukupna investicija u ova postrojenja (CHPP I i CHPP II) iznosi 30 milijuna eura, od čega je 85% iznosio privatni kapital, a 15% je financirano od strane Fonda za okoliš.

5.1.3.2. Kogeneracijsko postrojenje na biomasu u regiji Suceava [23]

Ovo kogeneracijsko postrojenje je sagrađeno od strane Austrijske tvrtke Holzindustrie Schweighofer i počelo je s radom 2009. godine. Postrojenje je bazirano na izgaranju biomase na rešetci i protutlačne turbine. Nazivna snaga postrojenja iznosi $4,9 \text{ MW}_e$ i 17 MW_t te za proizvodnju troši $40 \text{ m}^3/\text{h}$ biomase, većinom ostatka iz drvne industrije.

Proizvedena toplinska energija se koristi za potrebe drvne industrije ta za opskrbu 7.000 stanova toplinskom energijom.

Investicija u ovo postrojenje je iznosila 20 milijuna €.

5.1.3.3. Sustavi financirani u sklopu Sawdust 2000 projekta [22]

Sljedeći centralizirani toplinski sustavi su instalirani kao dio projekta *Sawdust 2000* koji je implementiran kao dio *Joint Implementation* projekta između Rumunjske i Danske kroz *Danish Environmental Protection Agency (DEPA)*. Ovaj projekt zagovara korištenje drvnog ostatka (piljevine) kao zamjenu za fosilna goriva.

Postrojenje područnog grijanja u gradu Gheorghieni:

Toplinska snaga kotla kod ovog postrojenja iznosi 9 MW. Za proizvodnju toplinske energije postrojenje troši 0,56 tona biomase (drvne piljevine i/ili drvene sječke) po MWh proizvedene toplinske energije. Godišnja proizvodnja toplinske energije ovoga CTS-a iznosi 40 GWh te se s njom opskrbljuje 3.600 stanova, 14 javnih zgrada i 118 poslovnih objekata u gradu Gheorghieni.

Ukupna investicija za ovo postrojenje je iznosila 2.800.000,00 €. U financiranju su sudjelovali *Joint Implementation Programme - DEPA* sa 22%, *EU Phare 2001 Programme Romanian*

Ministry of Development sa 48%, Special Fund for the Energy System Development - Ministry of Economy and Trade sa 20%, dok je lokalna samouprava sudjelovala sa 10%.

Operacijski troškovi ovoga postrojenja iznose 105 RON/MWh (~ 24,5 €/MWh).

Postrojenje područnog grijanja u gradu Intorsura Buzaului:

Instalirana toplinska snaga kotla kod ovog postrojenja iznosi 7 MW. Za proizvodnju toplinske energije postrojenje troši 0,496 tona biomase (drvne piljevine i/ili drvne sječke) po MWh proizvedene toplinske energije. Godišnja proizvodnja toplinske energije ovoga CTS-a iznosi 8,05 GWh te se s njom opskrbljuje 2000 stanova, 9 javnih zgrada i 57 poslovnih objekata u gradu Intorsura Buzaului.

Ukupna investicija za ovo postrojenje je iznosila 2.700.000,00 €. Operacijski troškovi ovoga postrojenja iznose 91 RON/MWh (~ 21,4 €/MWh).

5.1.4. Slovačka

5.1.4.1. Postrojenje područnog grijanja Banská Bystrica, Slovakia [22]

Centralizirani toplinski sustav koji se nalazi u regiji Banská Bystrica u Slovačkoj sastoji se od plinske turbine snage 5,2 MW_e, dva kotla na biomasu snage 4 MW_t i plinskog kotla snage 8,8 MW_t. Ova postrojenja opskrbljuju sustav centraliziranog grijanja vrućom vodom temperaturnog režima 130/70 °C zimi i 90/60 °C ljeti.

Investicija u, prethodno navedena, dva kotla na biomasu završena je 2001. godine. Stupanj učinkovitosti pretvorbe energije u ovim kotlovima je 88%, a godišnja proizvodnja topline iznosi 157 TJ. Kao gorivo se koristi drva sječka čija je maksimalna potrošnja u ovim kotlovima 3,7 tona/satu te godišnja potrošnja iznosi 20.263 tone.

Investicija u ove kotlove je iznosila 4,4 milijuna eura.

5.1.5. Danska

5.1.5.1. Kogeneracijsko postrojenje u gradu Assenf Fjernavarme [24]

Kogeneracijsko postrojenje u gradu Assenf Fjernavarme u Danskoj služi za opskrbu lokalnog CTS-a toplinskom energijom. Ovo kogeneracijsko postrojenje na biomasu postrojenje pušteno u pogon 1999. godine.

Ovo postrojenje radi na tehnologiji parno-turbinskog postrojenja s protutlačnom turbinom. Drvna biomasa (drvna sječka, drvni otpad iz drvne industrije i piljevina) s udjelom vlage od 5% pa do 55% se pomoću dva pneumatska dobavljača goriva upuhuju u komoru za izgaranje parnog kotla.

Električna snaga kogeneracije iznosi 4.700 kW_e, dok je nominalna toplinska snaga 14.000 kW_t. Uz 5.500 sati rada pri punom opterećenju godišnje, proizvedena godišnja količina električne energije iznosi 25,85 GWh/god te je istovremeno proizvedeno i 82,25 GWh/god toplinske energije te se za to utroši 117,5 GWh/god energije u obliku goriva te 2,34 GWh/god električne energije. Godišnja korisna toplina prodana kupcima je na razini 74,025 GWh/god.

Ovo postrojenje proizvodi električnu energiju i toplinsku energiju za CTS koji radi u temperaturnom režimu 75/36 °C. Ukupna godišnja učinkovitost energetske pretvorbe iznosi 92%, od čega električna učinkovitost iznosi 22%, a toplinska 70%.

Na upravljanju i održavanju kogeneracijskog postrojenja je tijekom godine zaposleno prosječno 4,5 ljudi.

Investicijski trošak ovakvog postrojenja iznosi 17.024.000,00 €. Što se tiče operativnih troškova, oni iznos 418.854,00 €/godišnje, od čega su troškovi održavanja su na razini 215.000,00 €/god. Troškovi ulaznih sirovina su na razini 2.361.569,00 €/god, dok su ostali ne specificirani troškovi na razini 176.000,00 €/god.

5.2. Otpad

5.2.1. Orginalno Afval Energie Bedrijf (AEB) postrojenje, Amsterdam, Nizozemska [25]

Orginalno Afval Energie Bedrijf (AEB) postrojenje je sagrađeno u Amsterdamu 1969. godine. Prva nadogradnja je obavljena 1993. godine kada je izvršena modernizacija sustava

pročišćavanja dimnih plinova. Postrojenje je dograćeno s dva nova, suvremena, bloka 2007. godine.

Postrojenje sada posjeduje sedam linija za spaljivanje otpada i energetske oporabljuje sav kućanski, industrijski i komercijalni otpad Amsterdama i 27 susjednih općina što u zbroju iznosi 1.370.000 tona otpada godišnje te je ovo je postrojenje za termičku obradu otpada (eng. *waste-to-energy plant (WtE plant)*) trenutno među najvećima na svijetu. Korištena tehnologija za spaljivanje otpada je tehnologija horizontalne pomične rešetke hladene vodom.

Svaka od dvije novougrađene linije za spaljivanje ima toplinski kapacitet od 93,3 MW_t. Ako se uzme u obzir da je prosječna ogrjevna vrijednost ulaznog otpada 10 MJ/kg, ovo odgovara nominalnom protoku otpada od 33,6 tona/h tj. ukupno 1.600 tona/danu. U usporedbi s drugim postrojenjima za termičku obradu otpada, ovo su jako velike jedinice što omogućava lagano apsorpiranje fluktuacija u sastavu spaljivanog otpada što smanjuje utjecaj kvalitete otpada na rad kotlova.

Dva kotla su konstruirana za isporuku toplinske snage od 93,6 MW_t i proizvedu paru stanja 130 bar i 440 °C sa učinkovitosti energetske pretvorbe od 87,14%. Jedna parna turbina i generator su spojeni na dva kotla kako bi iz ukupnog protoka pare mogli isporučiti 66 MW_e električne energije. Tijekom ispitivanja za vrijeme primopredaje postrojenja postignuta je stupanje električne učinkovitosti postrojenja od 30,6%. Ukupno vrijeme raspoloživosti dvaju novih blokova iznosi > 90%. U dostupnim materijalima nije navedena količina topline koja se isporučuje mreži područnog grijanja osim da se uz električnu energiju koja se isporučuje u električnu mrežu manja količina toplinske energije isporučuje u mrežu područnog grijanja.

Investicijski trošak u ovo postrojenje je iznosio ~ 370 milijuna €. Deprecijacijski period je definiran na 15 godina, dok je životni vijek postrojenja 20 godina. Iznos od 80 milijuna eura je financiran zelenim kreditima dok je 170 milijuna eura financirano kreditom Europske investicijske banke (eng. *European Investment Bank (EIB)*).

5.2.2. *Issy les Moulineaux postrojenje, Paris, Francuska [25]*

Issy les Moulineaux postrojenje za termičku obradu otpada, upravljano od strane TIRU Group, je locirano na obali rijeke Sene, nekoliko kilometara od samog centra Pariza, Francuska. Postrojenje je pušteno u pogon 2007. godine i obrađuje 460.000 tona krutog

komunalnog otpada godišnje što ga čini najveći postrojenjem za termičku obradu otpada u francuskoj.

Da bi se uklopilo u okoliš, postrojenje je ukopano 31 metar pod zemlju te je stoga njegova najveća točka na visini od samo 21 metar iznad zemlje. Krov postrojenja je izveden kao "zeleni krov" te je u sklopu postrojenja posađeno puno drveća i ostalog zelenog bilja kako bi se uklopilo u okolinu.

Postrojenje za termičku obradu otpada je dvolinijski vodom hlađeni kotao za spaljivanje otpada na rešetci koji proizvedenom parom opslužuje konvencionalni parni krug. Dvije linije za spaljivanje imaju toplinski kapacitet od 170 MW_t i proizvode paru koja se iskorištava za proizvodnju električne energije u kondenzacijskoj parnoj turbini proizvođača Alstom snage 52 MW_e . Turbina ima sustav za oduzimanje pare niskih parametara koja se koristi za snabdijevanje 80.000 kućanstava toplinskom energijom putem CTS-a. Za potrebe hlađenja kondenzator koristi se voda iz rijeke Sene.

Turbinski električni generator ima nazivnu električnu snagu od 52 MW_e , ali je ova snaga dostupna samo kada se para ne oduzima za potrebe područnog grijanja. Maksimalna električna učinkovitost od 30% je visoka, međutim ona otpada s količinom oduzete pare.

Realni pogonski podatci za 2011. godinu su:

- Otpada obrađeno: 459.722 tone
- Proizvedena električna energija: 132.336 MWh
- Isporučena električna energija: 87.684 MWh
- Proizvedena toplinska energija: 513.331 MWh

Obzirom da nisu dostupni podatci o ogrjevnoj vrijednosti korištenog goriva, nije moguće izračunati stvarnu učinkovitost postrojenja, međutim prema prethodnim podacima električna učinkovitost postrojenja se može procijeniti na razini od 10%, a toplinska na razini od 40%, što daje ukupnu učinkovitost postrojenja od ~ 50%.

Što se tiče proizvodnje nusprodukata spaljivanja otpada, u 2011. godini je proizvedeno:

- 85,583 tona pepela
- 7,226 tona sivih metala
- 726 tona obojenih metala

Raspoloživost postrojenja u 2011. godini se kretala na razini 79,4% za liniju 1 i 81,2% za liniju 2.

Ukupna investicija u ovo postrojenje je iznosila 604 milijuna eura. Ovaj iznos uključuje i reciklažni centar. Ovaj je iznos vrlo visok, u usporedbi s investicijskim troškovima koja se mogu očekivati za standardnija postrojenja koja ne moraju zadovoljit tako visoke estetske kriterije koji bi se kretali na razini od ispod 50% prethodno navedene investicije.

5.2.3. Reno Nord postrojenje, Aalborg, Danska [25]

Postrojenje za termičku obradu otpada u Aalborgu, Danska je upravljano od strane Interessentskabet Reno-Nord (I/S Reno-Nord) i zaduženo je za termičku obradu otpada od 225.000 stanovnika.

Ovo se postrojenje sastoji od četiri linije za termičku obradu otpada. Linije 1 i 2 su sagrađene između 1978 i 1980 i sastoje se od dvije Vølund rotacijske komore za spaljivanje otpada kapaciteta 8 tona otpada po satu. Ove linije opskrbljuju Aalborg Fjernvarmforsyning CTS toplinskom energijom. Linija 3 je sagrađena 1991. godine i ima kapacitet 12,5 tona otpada po satu te služi za proizvodnju električne i toplinske energije. Ova je linija opremljena s Babcock and Wilcox Vølund BS-W rešetkom za spaljivanje otpada.

Godine 1999. sagrađena je četvrta linija za termičku obradu otpada s kogeneracijskim sustavom za deklariranim kapacitetom 20 tona otpada sa satom, a minimalnom ogrjevnom vrijednošću od 12 MJ/kg i godišnjim kapacitetom od 160.000 tona. Ovo je postrojenje za sagorijevanje otpada koristi se Babcock and Wilcox Vølund DynaGrate, kosa, pomična, zrakom hlađena rešetka te je opremljeno s sustavom za regeneraciju latentne topline. Stupanj učinkovitosti generatora pare je 92%. S puštanjem u pogon četvrte linije, linije 1 i 2 su prestale s radom.

Linija 4 ovoga postrojenja za termičku obradu otpada može isporučiti 17,918 MW_e električne energije i 43,412 MW_t toplinske energije u distribucijske sustave Aalborga. Ova električna energija se koristi za opskrbu 16.000 kućanstava, dok je toplinska energija dostatna za zadovoljavanje potreba 30.000 kućanstava. Ukupna učinkovitost energetske pretvorbe otpada ovog procesa iznosi 97%, a električna učinkovitost iznosi 27%. Godišnja raspoloživost ovog postrojenja je na razini 8.000 sati.

Prema dobivenim podacima, prosječna ukupna godišnja učinkovitost postrojenja prelazi 40%.

Izlazni materijali ovoga postrojenja prikazani su u sljedećoj tablici [Tablica 8.].

Tablica 8. Izlazni materijali iz postrojenje Reno Nord [25]

Material		2007	2008	2009	2010	2011
Pepeo	tona	35,119	23,670	48,314	12,614	30,132
Željezo iz pepela	tona	2,277	2,753	2,377	1,462	2,223
Ne magnetski materijali	tona	483	753	549	278	695
Željezo i otpadni metal	tona	10	35	47	29	0
Plastika za reciklažu	kg	600	270	240	540	0
Papir	kg	142	1,114	3,325	4,025	4,650
Leteći pepeo	tona	2,274	2,616	2,902	1,862	2,921
Otpad nastao filtracijom	tona	415	271	242	196	357
Gips	tona	104	249	323	126	201
Ostatci filtracije	tona	162	0	247	931	0

Od ekonomskih podataka za ovo postrojenje, jedino su dostupni podatci o tarifama za spaljivanje otpada koji se mogu vidjeti u tablici [Tablica 9.].

Tablica 9. Ekonomski podatci za postrojenje Reno Nord [25]

Opis stavke	Cijena/toni (Danska kruna)	Cijena/toni (Eura) *
Komunalni otpad	598.00	80,34
Glomazni otpad / Reciklažni centri	410.00	55,08
Industrijski otpad	410.00	55,08
Specijalni otpad	665.00	89,34
Trenutno sagorijevanje - pakirano u kutije	665.00	89,34
Naplata po kutiji - max. 300kg po kutiji	60.00 / pc.	8,06
* 1 Danska kruna = 0,13 €		

5.2.4. ASM Brescia 'Termoutilizzatore postrojenje, Brescia, Italija [25]

ASM Brescia 'Termoutilizzatore postrojenje za termičku obradu otpada je izgrađeno 1998. godine i danas je jedno od glavnih postrojenja za opskrbu grada Brescia toplinskom energijom za potrebe centraliziranog toplinskog sustava.

Ovo postrojenje ima tri linije, dvije su za sagorijevanje kućanskog otpada i u pogonu su od 1998. godine, a treća je dograđena 2004. godine i pogoni se biomasom. Toplinska snaga

ovoga postrojenja na biomasu je 100 MW_t te je među najvećim postrojenjima za sagorijevanje biomase na svijetu.

U 2011. godini ovo je postrojenje za svoj pogon potrošilo 796.000 tona otpada i biomase te je proizvelo 747.000 GWh toplinske i 602.000 GWh električne energije. Od proizvedene toplinske energije ~ 55% je isporučeno distribucijskom sustavu grada Brescia. Time su zadovoljene potrebe više od 200.000 kućanstava za električnom i više od 60.000 kućanstava za toplinskom energijom.

Specificirana električna učinkovitost postrojenja je iznad 27%, dok stvarne vrijednosti ovise o donjoj ogrjevnoj vrijednosti goriva i stupnju kogeneracije.

Glavne karakteristike postrojenja za termičku obradu otpada su:

- Godišnji kapacitet obrade otpada: 800.000 tona/god
- Godišnja proizvodnja pepela: 150.000 tona/god
- Godišnja količina otpada iz sustava za pročišćavanje DP: ~ 20.000 tona/god
- Električna snaga: 100 MWe
- Godišnja proizvodnja električne energije (2008. god): 570 MWh
- Godišnja proizvodnja toplinske energije (2008. god): 568 MWh

Izgaranje otpada se odvija na pomičnoj kosoj rešetci. Otpad koji se izgara ima donju ogrjevnu vrijednost u rasponu od 6.300 pa do 13.800 kJ/kg. Grad Brescia ima sustav odvojenog skupljanja otpada za reciklirajući otpad, bio otpad i ostali otpad. Udio recikliranja otpada u ovome gradu je na razini 40%.

Investicijski trošak za ovo postrojenje je procijenjen na 320 milijuna funti (401,57 milijuna €). (1 £ = 1.25490673 €)

5.2.5. Lidköping postrojenje, Lidköping, Švedska [26]

Lidköping postrojenje za termičku obradu otpada je glavno postrojenje za opskrbu grada Lidköping-a toplinskom energijom putem toplinskog distribucijskog sustava. Ovo je postrojenje smješteno na obali najvećeg jezera u Švedskoj, jezera Lidköping.

Postrojenje se sastoji od dva 20 MW i jednog 8 MW kotla na lož ulje te dvaju 17 MW kotlova za spaljivanje otpada. Maksimalni toplinski kapacitet ovoga postrojenja je 82 MW_t. Kao pomoćni kotlovi tu su i dva električna kotla koja se rijetko koriste.

Postrojenje je pušteno u pogon 1985. godine sa dvije linije za spaljivanje otpada i bio-goriva. Ove linije koriste kotlove koji spaljuju otpad u barbutažnom fluidiziranom sloju (eng. *bubbling fluidised bed combustion (BFBC)*). Tijekom godina je postrojenje unaprjeđivano i dograđivano da bi danas doseglo prethodno spomenutu instaliranu toplinsku snagu.

Danas ovo postrojenje termički obrađuje 70.000 tona otpada i biomase te proizvodi 200 GWh toplinske energije za potrebe CTS-a godišnje. Više od pola godišnje termički obrađene sirovine čini kućanski i industrijski otpad (prosječne ogrjevne vrijednosti 11,2 MJ/kg) dok je ostatak otpadno drvo. Maksimalna količina otpada koju ovo postrojenje godišnje smije spaliti je dozvolama ograničena na 50.000 tona. Kako bi se taj broj usporedio s potrebama, prema podacima iz 1998. godine, količina otpada koju proizvodi 36.833 građana grada Lidköping proizvede godišnje 11.000 tona otpada godišnje, od čega se 8.000 tona godišnje termički obrađuje.

Godine 1998 su u ovom postrojenju, klasificirano prema vrsti, obrađene sljedeće količine otpada:

- Kućanski i industrijski otpad: 45.496 tona
- Drvni otpad: 21.184 tone

dok su količine izlaznih sirovina:

- Pepeo: 3.752 tone
- Otpad nastao pročišćavanjem DP: 5.339 tona
- Metal: 1.095 tona

Na poslovima upravljanja poduzećem, upravljanja proizvodnjom i održavanja ovog postrojenja radi 36 osoba, od kojih je 28 zaduženo za poslove vezane uz proizvodnju. Početkom 2000. godine došlo je do drastičnog povećanja cijena zbrinjavanja otpada, te je od tada naknada koju ovo postrojenje naplaćuje za termičku obradu otpada iznosi 250 SEK/toni (27, 29 €/toni) za kućanski otpad i 350 SEK/toni (38,20 €/toni) za industrijski otpad, dok je naknada za odlaganje otpada na razini 260 SEK/toni (28, 38 €/toni) uvećana za 250 SEK/toni (27, 29 €/toni) deponijskog plina. (1 SEK = 0,109149615 €)

Ukupna učinkovitost ovog postrojenja je na razini od 88%, sa energetsom proizvodnjom 198 GWh toplinske energije iz 225 GWh goriva.

Kada je postrojenje izgrađeno (1984. godine) investicijski troškovi za postrojenje sa dvije linije za spaljivanje otpada, dva kotla na lož ulje i pripadajuće građevinske radove su iznosili 104 milijuna SEK (11,35 milijuna eura). Kako je postrojenje tijekom godina nadograđivano i mijenjano nemoguće je procijeniti današnju vrijednosti osim navesti poznate troškove za pojedine ugrađene komponente. Pa je tako cijena uređaja za baliranje, i prateće opreme, iznosila 6 milijuna SEK (0,65 milijuna eura), a troškovi vezani uz novi mlin instaliran 1999. godine su iznosili 10 milijuna SEK (1,09 milijuna eura).

Što se tiče ekonomske bilance postrojenja, nije bilo moguće izdvojiti operativne troškove i troškove održavanja linija za termičku obradu otpada od ostatka postrojenja stoga su u nastavku navedeni za cijelo postrojenje. Prihodi i rashodi ovog postrojenja su navedeni u sljedećim tablicama [Tablica 10.], [Tablica 11.], [Tablica 12.] i [Tablica 13.].

Tablica 10. Prihodi od proizvodnje postrojenja Lidköping [26]

Prihodi	SEK	EUR (milijuna €)
Prihodi od proizvodnje:		
<i>Proizvodnja</i>	234 GWh	
<i>Prodajna cijena</i>	0,33 SEK/kWh	
<i>Prihod od proizvodnje</i>	77 MSEK	8,40455

Tablica 11. Prihodi od otkupa sirovina postrojenja Lidköping [26]

Prihodi	SEK	EUR (milijuna €)
Prihodi od otkupa otpada:		
<i>Komunalni otpad</i>	22.369 tona	
<i>Naknada za komunalni otpad</i>	250 SEK/toni	
<i>Industrijski otpad</i>	20.445 tona	
<i>Naknada za industrijski otpad</i>	350 SEK/toni	
<i>Ukupni prihod od otkupa otpada</i>	13 MSEK	1,41895

Tablica 12. Troškovi pogona i održavanja postrojenja Lidköping [26]

Troškovi	SEK	EUR (milijuna €)
Ostala goriva:	25 MSEK	
Pogon i održavanje:		
<i>Osooblje</i>	7 MSEK	
<i>Kemikalije</i>	2 MSEK	
<i>Električna energija</i>	4,5 MSEK	
<i>Pijesak</i>	1 MSEK	
<i>Baliranje (200 SEK/t)</i>	1 MSEK	
<i>Ostalo</i>	21,5 MSEK	2,346725

Tablica 13. Troškovi zbrinjavanja ostataka i emisija postrojenja Lidköping [26]

Troškovi	SEK	EUR (milijuna €)
Trošak zbrinjavanja ostataka:		
<i>Formirani ostatak</i>	9.091 tona	
<i>Cijena zbrinjavanja ostataka</i>	200 SEK/MWh	
<i>Ukupni trošak zbrinjavanja</i>	1,8 MSEK	0,19647
Trošak emisija NOx:	1,2 MSEK	0,13098

Ukupna toplinska učinkovitost ovog postrojenja je 88% [27].

5.2.6. Sysav Malmö postrojenje za termičku obradu otpada

Sysav postrojenje za termičku obradu otpada smješteno je u gradu Malmö u Švedskoj te zbrinjava komunalni i industrijski otpad od 620.000 ljudi. Ukupna količina energije koju proizvede je na razini od 1.000 GWh [59].

Godine 2001. instalirana je nova linija za termičku obradu otpada na pomičnoj rešetci s kapacitetom od 200.000 tona godišnje. Ova linija godišnje proizvede 540.000 MWh toplinske energije za potrebe CTS-a te 135.000 MWh električne energije [59].

Investicijski trošak za izgradnju nove linije je 2001. godine iznosio 107 milijuna eura, iz čega proizlazi specifični investicijski trošak od 535 eura po toni kapaciteta linije. Što se tiče

operacijskog troška, prema dostupnim izvorima podataka, on iznosi 46 €/toni otpada. Prosječna naknada koju ovo postrojenje naplaćuje za zbrinjavanje tone otpada iznosi 80 €/toni [60].

5.3. Fossilna goriva

5.3.1. Pimlico District Heating Undertaking (PDHU) - CTS u Londonu [28]

Pimlico District Heating Undertaking (PDHU) je centralizirani toplinski sustav u Londonu s godišnjim toplinskim opterećenjem od ~ 50.000 MWh. Ovaj se sustav sastoji od dvaju kogeneracijska plinska motora električne snage 1,6 MWe, tri plinska kotla toplinske snage 8 MWt i toplinskog spremnika zapremnine 2500 m³.

Izmjerena energetska učinkovitost instaliranih plinskih kotlova se kreće na razini od 90% pri punom opterećenju te se smanjuje do 83% kako se opterećenje smanjuje. Što se tiče učinkovitosti kogeneracijskih plinskih kotlova, njihova se električna učinkovitost kreće na razini od 40% u cijelom području rada motora, dok se toplinska učinkovitost mijenja od 33% pa do 28% ovisno o opterećenju.

Ukupna toplinska energija isporučena od strane cijelog postrojenja, u godini dana, iznosi 50.188 MWh te je za to utrošeno 74.411 MWh prirodnog plina (bazirano na gornjoj ogrjevnoj vrijednosti plina). Iz toga proizlazi da je ukupni gubitak energetske konverzije na razini 18,7%.

Energetske transformacije u svakom pojedinom uređaju prikazane su u tablici [Tablica 14.].

Tablica 14. Godišnja potrošnja i proizvodnja energije PDHU [28]

	Potrošnja goriva (MWh)	Toplinska energija (MWh)	Električna energija (MWh)	Ukupna učinkovitost (%)
Kotao 1	16.093	13.856	–	86
Kotao 2	14.676	12.125	–	82
Kotao 3	18.568	15.599	–	84
CHP 1	14.378	4.768	6.018	75
CHP 2	10.726	4.334	3.790	76

Toplinski spremnik ima toplinski kapacitet od 87 MWh u temperaturnom režimu rada u kojem radi distribucijski sustav (90/60 °C). Godišnja toplinska učinkovitost spremnika je 93,3%.

Ukupna potrošnja električne energije po pojedinim segmentima CTS-a je:

- Za pogon kotlova i kogeneracijskih motora: 314 MWh/godišnje
- Za pogon distribucijskih pumpi: 513 MWh/godišnje

Duljina distribucijske mreže ovoga CTS-a iznosi 7.866 m te opskrbljuje 3.256 rezidencijalnih i 55 komercijalnih objekata toplinskom energijom. Ukupni izmjereni godišnji toplinski gubitak koji se generira zbog zagrijavanje zemlje oko cjevovoda kreće se na razini od 5,7%.

Troškovi održavanja kogeneracijskih plinskih motora kreću se na razini od 14 £/h (17,57 €/h) po motoru, dok je ukupan trošak goriva u promatranoj godini iznosio 1.912.274 £/h (2.399.712,64 €/h). (1 £ = 1.25490673 €)

5.3.2. Levice Combined Cycle Power Plant, Levice, Slovačka [46]

U gradu Levice u Slovačkoj je 2007. godine pušteno u pogon kombi kogeneracijsko postrojenje snage 80 MW_e. Postrojenje se sastoji od dvaju Rolls Royce plinsko-turbinskih generatora od kojih je svaki snage 30 MW_e, dvaju kotlova utilizatora, jedne kondenzacijske parne turbine snage 20 MW_e te dvaju pomoćnih motora s unutarnjim izgaranjem.

Ovo postrojenje isporučuje toplinsku energiju u obliku pare i vruće vode industrijskim pogonima u Levice industrijskoj zoni te opskrbljuje 37.000 stanovnika grada Levice toplinskom energijom za grijanje. Ukupna godišnje isporučena toplinska energija se kreće na razini 580 TJ/god.

Ovo postrojenje je otvorilo radna mjesta za 56 novih ljudi, od čega je 30 zaposleno u samome poduzeću dok 26 ljudi radi na poslovima kao vanjski kooperanti. Iznos ukupne investicije u ovo postrojenje je iznosio ~ 60 milijuna eura, od čega je ugovor s tvrtkom Rolls Royce iznosio ~ 20 milijuna eura.

5.3.3. Viborg kogeneracijsko postrojenje, Viborg, Danska [47]

Potrebe za toplinskom energijom grada Viborg u Danskoj pokriva kombi kogeneracijsko postrojenje pušteno u pogon 1996. godine. Postrojenje se sastoji od plinsko-turbinskog postrojenja snage 42 MWe i parno-turbinskog snage 16 MWe. Centralizirani toplinski sustav se sastoji od distribucijske mreže dužine 12 km i pokriva 75 - 80% toplinske potrebe grada od čega kogeneracijsko postrojenje pokriva 95%. Broj priključenih potrošača je na razini od 10.000. Temperaturni nivo u gradskoj distribucijskoj mreži je 95/55 °C.

Ovo postrojenje ima električnu snagu od 58 MW_e i toplinsku snagu od 58 MW_t te godišnje prodaje 270.000 MWh toplinske i 282.200 MWh električne energije. Za vrijeme pogona utrošak prirodnog plina je na razini 131 MJ/s i transformira se s ukupnom učinkovitosti od 88% dok je učinkovitost pretvorbe u električnu energiju 44%.

Prema danskom zakonu, područne samouprave ne smiju ostvarivati dobit od proizvodnje toplinske energije u CTS, stoga ekonomska bilanca mora iznositi 0. U slučaju zarade, ona mora biti vraćena potrošačima kroz korekciju tarifa za toplinsku energiju. U nastavku su navedeni ekonomski parametri postrojenja:

- Prihodi od prodaje toplinske energije: 74 milijuna DKK (9,94 milijuna €)
- Prihodi od prodaje električne energije: 111 milijuna DKK (14,91 milijun €)
- Trošak kupovine goriva: 114 milijuna DKK (15,31 milijun €)
- Operativni troškovi i troškovi održavanja: 28 milijuna DKK (3,76 milijuna €)
- Financijski troškovi: 26 milijuna DKK (3,49 milijuna €)
- Amortizacija: 27 milijuna DKK (3,63 milijuna €)
- Godišnja bilanca: 0 DKK (0 €)

(1 DKK = 0.134318421 €)

5.3.4. Pleven kogeneracijsko postrojenje, Bugarska [46]

Kombi plinsko postrojenje u gradu Pleven u Bugarskoj sastoji se od plinske turbine, kotla utilizatora i parne turbine. Ukupna snaga postrojenja iznosi 108 MW, od čega je 32 MW električna snaga, a ostatak, 76 MW je toplinska snaga. Ukupna učinkovitost postrojenja iznosi 84%, a ako se gleda samo električna, ona je na maksimalnoj razini od 38%, ovisno o radnim

parametrima i opterećenju. Ukupna godišnja energetska proizvodnja ovoga postrojenja iznosi 227.000 MWh električne i 381.000 MWh toplinske energije.

Obzirom da je 2008. godine završena adaptacija ovoga postrojenja te je ugrađena plinska turbina i kotao utilizator, na već postojeći parni sustav, dostupno je više podataka o njihovim tehničkim karakteristikama:

- Električna snaga plinsko-turbinskog dijela: 32.056 kW_e
- Potrošnja prirodnog plina plinske turbine: 9.670 kJ/kWh
- Kapacitet izmjenjivača topline: 10,4 MW bez dodatnih gorionika te 9,8 MW s dodatnim gorionicima
- Ukupna učinkovitost: 84,15% bez dodatnih gorionika te 88,26% s dodatnim gorionicima

Investicijski troškovi za novu plinsku turbinu i kotao utilizator iznosili su 37.000.000,00 €.

5.3.5. CTS - Zagreb

Toplinska energija za potrebe CTS-a Grada Zagreba se dobavlja iz dvaju kogeneracijskih postrojenja: TE-TO Zagreb i EL-TO Zagreb. Ukupna instalirana toplinska snaga ovih postrojenja iznosi 1.420 MW. Proizvodni kapaciteti centraliziranog toplinskog sustava Grada Zagreba su u vlasništvu poduzeća HEP-Proizvodnja d.o.o. dok je toplinski distribucijski sustav u vlasništvu HEP- Toplinarstva. Iako su te dvije tvrtke zasebne pravne osobe obje su dio HEP Grupe d.d. [29].

Prema podacima za 2013. godinu ukupna proizvodnja toplinske energije u CTS-u Grada Zagreba je bila 1.466.204 MWh ogrjevnne topline u obliku vrele vode, dok je proizvodnja tehnološke pare iznosila 559.441 tonu. U 2013. godini je prodano 1.315.079 MWh toplinske energije u obliku vrele vode te 451.495 tona pare. Ova količina proizvedene toplinske energije distribuirana je do 91.376 kupaca. Iz ovih podataka se može izračunati da je gubitak toplinske energije u 2013, baziran na razlici između proizvedene i prodane energije, u vrelovodnoj mreži CTS-a Grada Zagreba iznosio 10,31%, a u parovodnoj 19,3% [30].

Ukupna duljina toplinske distribucijske mreže u Gradu Zagrebu iznosi 260 km te se sastoji od 2.600 toplinskih podstanica. Od 260 km mreže, 44 km je distribucijska parovodna mreža prve

generacije, a 216 km je distribucijske vrelovodne mreže druge generacije sa temperaturnim režimom (polaz/povrat) 120/70 °C [30].

Parovodna mreža na području Grada Zagreba nema instaliran sustav povrata kondenzata i uzrokuje velike toplinske gubitke koji iznose i do 20%. Što se tiče vrelovodne mreže, ona generira godišnje gubitke na razini 10 do 12% koji su prihvatljivi, ali veći od europskog prosjeka koji iznosi 6 - 7% [31]. Vrelovodni sustav je većinski napravljen kao cjevovodni sustav u kojem su polazna i povratna čelična cijev izolirana mineralnom vunom i položene u betonski kanal [32]. Prilikom obnove, u novije vrijeme, stare cijevi se zamjenjuju s tvornički predizoliranim cijevima koje se ukopavaju direktno u zemlju [30].

Ukupni prihodi koje je HEP-Toplinarstvo ostvarilo u 2013. godini iznosili su 768 milijuna kuna čemu je CTS pridonio sa 95%. [30]

5.3.5.1. TE-TO Zagreb

Kogeneracijsko postrojenje TE-TO Zagreb nalazi se u Zagrebačkoj gradskoj četvrti Žitnjak i izgrađeno je 1962. godine. Ukupna duljina toplinskog distribucijskog sustava koju opslužuje TE-TO Zagreb iznosi 128 km vrelovoda (s pripadajućih 1.599 toplinskih podstanica) i 23 km parovoda (s pripadajućih 36 toplinskih podstanica) [32].

Samo proizvodno postrojenje sastoji se od 8 blokova ukupne snage 440 MWe i 850 MWt. Specifikacije blokova su navedene u sljedećoj tablici [Tablica 15.].

Tablica 15. Specifikacije blokova TE-TO Zagreb [33]

Naziv	Snaga	Vrsta/tip	Gorivo	Izgrađeno
Blok C	120 MW _e / 200 MW _t	kogeneracijski blok	g1 i g3	1979.
Blok D	58 MW _t	pom.parna kotlovnica PK-3	g1 i g3	1985.
Blok E	58 MW _t	vrelvodni kotao VK-3	g1	1977.
Blok F	56 MW _t	vrelvodni kotao VK-4	g1	1978.
Blok G	116 MW _t	vrelvodni kotao VK-5	g1 i g3	1982.
Blok H	116 MW _t	vrelvodni kotao VK-6	g1 i g3	1990.
Blok K	208 MW _e /140 MW _t (71+71+66 MW _e)	kombi kogen. blok s dvije plinske turbine i parnom turbinom	g1 i g2	2003.
Blok L	112 MW _e /110 MW _t (75+37 MW _e)	kombi kogen. blok s plinskom i pranom turbinom	g1	2009.

* g1: prirodni plin

* g2: ekstra lako loživo ulje

* g3: teško loživo ulje

Prema podacima iz inspekcijskih izvještaja TE-TO Zagreb je tijekom 2009. godine za proizvodnju 1.553 GWh električne energije na pragu postrojenja, 204 GWh tehnološke pare i 868 GWh toplinske ogrjevne energije potrošio ukupno 93.814 t mazuta, 325.000.000 m³ zemnog plina i 137 t ekstra lakog lož ulja (ELLU). Ogrjevne vrijednosti navedenih goriva su sljedeće: 40.193 kJ/kg za mazut, 33.338 kJ/m³ za zemni plin i 42.000 kJ/kg za ELLU [34].

Ukupna učinkovitost pretvorbe energije TE-TO Zagreb izračunata iz prethodno navedenih podataka o potrošnji energenata i proizvedenoj električnoj energiji za 2009. godinu iznosi 87,2 %, električna učinkovitost je 51,6 %, a toplinska 35,6%.

Podatci o električnoj učinkovitosti energetske pretvorbe pojedinih blokova te potrošnje energije goriva za proizvodnju pare, toplinske i električne energije navedeni su u tablici [Tablica 16.].

Tablica 16. Podatci o električnoj učinkovitosti i utrošku energenata pojedinih blokova [35]

	Jedinica	Blok C	Blok K	Kotlovi
Električna snaga	Mw _e	110,00	214,00	0,00
Električna učinkovitost	%	32,00	52,20	85,00
Utrošak za proizvodnju EE	MJ _b /kWh _e	11,25	6,90	-
Snaga proizvodnje TP	t/h	65,00	140,00	80,00
Utrošak za proizvodnju TP	MJ _B /t	1,43	1,43	4,24
Snaga proizvodnje OT	MWt	200,00	80,00	300,00
Utrošak za proizvodnju OT	MJ _B /kWh _t	1,91	1,38	3,36

* EE - električna energija

* TP - tehnološka para

* OT - ogrjevna toplina

Proizvodnja toplinske i električne energije za ostale godine se može vidjeti u sljedećoj tablici [Tablica 17.].

Tablica 17. Proizvodnja toplinske i električne energije TE-TO Zagreb po godinama [29]

	2009.	2010.	2011.	2012.	2013.
Toplinska energija [MWh]	865.717	939.610	880.046	849.649	859.344
Tehnološka para [t]	251.448	256.889	258.827	255.523	249.128
Električna energija [GWh]	1.553	2.028	2.057	1.936	1.363

Od ekonomskih podataka jedino su dostupni podatci o ukupnoj investiciji za blok L. Blok L je najnoviji blok čija je izgradnja završena 2009. godine. To je plinski blok s kombiniranim ciklusom koji se sastoji od plinske turbine čiji ispušni plinovi dovode toplinsku energiju krugu parne turbine. U izgradnju ovog bloka uloženo je 98,8 milijuna eura [36].

5.3.5.2. EL-TO Zagreb

Kogeneracijsko postrojenje EL-TO Zagreb nalazi se u gotovo u samom središtu Grada Zagreba. Ukupna duljina toplinskog distribucijskog sustava koju opslužuje TE-TO Zagreb iznosi 88 km vrelovoda (s pripadajućih 910 toplinskih podstanica) i 21 km parovoda (s pripadajućih 89 toplinskih podstanica) [32].

Samo proizvodno postrojenje sastoji se od 6 blokova ukupne snage 86,8 MWe i 439 MWt te proizvodi dodatnih 160 t/h tehnološke pare. U sljedećoj tablici [Tablica 18.] navedene su specifikacije blokova.

Tablica 18. Specifikacije blokova EL-TO Zagreb [33]

Naziv	Snaga	Vrsta/tip	Gorivo	Izgrađeno
Blok 1	11 MW _e /45 MW _t	kogeneracijski blok	g1, g2	1970.
Blok 2	30 MW _e /125 MW _t	kogeneracijski blok	g1, g2	1980.
Blok 3	2 x 23,9 MW _e / 100 MW _t	kogeneracijski blok s dvije plinske turbine	g1	1998.
Blok 4	64 MW _t	pom.parni kotao	g1, g2	1971.
Blok 5	116 MW _t	pom. vrel. kotao	g1, g2	1991.
Blok 6	116 MW _t	pom. vrel. kotao	g1, g2	2010.

* g1: prirodni plin

* g2: ekstra lako loživo ulje

Prema podacima iz inspekcijskih izvještaja EL-TO Zagreb je tijekom 2009. godine za proizvodnju 365 GWh električne energije na pragu postrojenja, 3.287.061 GJ tehnološke pare i toplinske ogrjevne energije potrošio ukupno 37.907 t mazuta i 131.886.996 m³. Preračunato u ukupnu energiju unesenu gorivom, 2009. godine EL-TO Zagreb je ukupno potrošio 1.530.180 GJ mazuta i 4.396.894 GJ plina [34].

Ukupna učinkovitost pretvorbe energije EL-TO Zagreb izračunata iz prethodno navedenih podataka o potrošnji energenata i proizvedenoj električnoj energiji za 2009. godinu iznosi 77,6 %, električna učinkovitost je 22,17 %, a toplinska 55,46 %.

Podatci o električnoj učinkovitosti energetske pretvorbe pojedinih blokova te potrošnje energije goriva za proizvodnju pare, toplinske i električne energije navedeni su u sljedećim tablicama [Tablica 19] i [Tablica 20]. Podatci su sortirani po režimu rada.

Tablica 19. Podatci o energetskej pretvorbi u EL-TO Zagreb 1/2 [35]

	Jedinica	Blok 1 17 bar	Blok 1 7 bar	Blok 1 2,5 bar	Blok 2 17 bar	Blok 2 7/2,5 bar
Električna snaga	MWe	-	-	12,50	-	-
Električna učinkovitost	%	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
Utrošak za proizvodnju EE	MJB/kWhe	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Snaga proizvodnje TP	t/h	35,00	-	-	150,00	-
Utrošak za proizvodnju TP	MJB/t	2,43	-	-	2,23	-
Snaga proizvodnje OT	MWt	26,80	7,30	38,30	111,80	14,00
Utrošak za proizvodnju OT	MJB/kWh _t	3,18	2,91	2,53	2,87	2,37

Tablica 20. Podatci o energetskej pretvorbi u EL-TO Zagreb 2/2 [35]

	Jedinica	Blok 3		Kotlovi
		PK	PT	
Električna snaga	MW _e	-	50,00	-
Električna učinkovitost	%	0,36	0,36	-
Utrošak za proizvodnju EE	MJB/kWhe	10,00	10,00	-
Snaga proizvodnje TP	t/h	122,00	-	80,00
Utrošak za proizvodnju TP	MJB/t	1,56	-	4,24
Snaga proizvodnje OT	MW _t	87,00	15,00	300,00
Utrošak za proizvodnju OT	MJB/kWh _t	2,04	0,00	3,24

* PK - parni krug

* EE - električna energija

* PT - plinska turbina

* TP - tehnološka para

* OT - ogrjevna toplina

Proizvodnja toplinske i električne energije za ostale godine se može vidjeti u tablici [Tablica 21.].

Tablica 21. Proizvodnja toplinske i električne energije u EL-TO Zagreb [29]

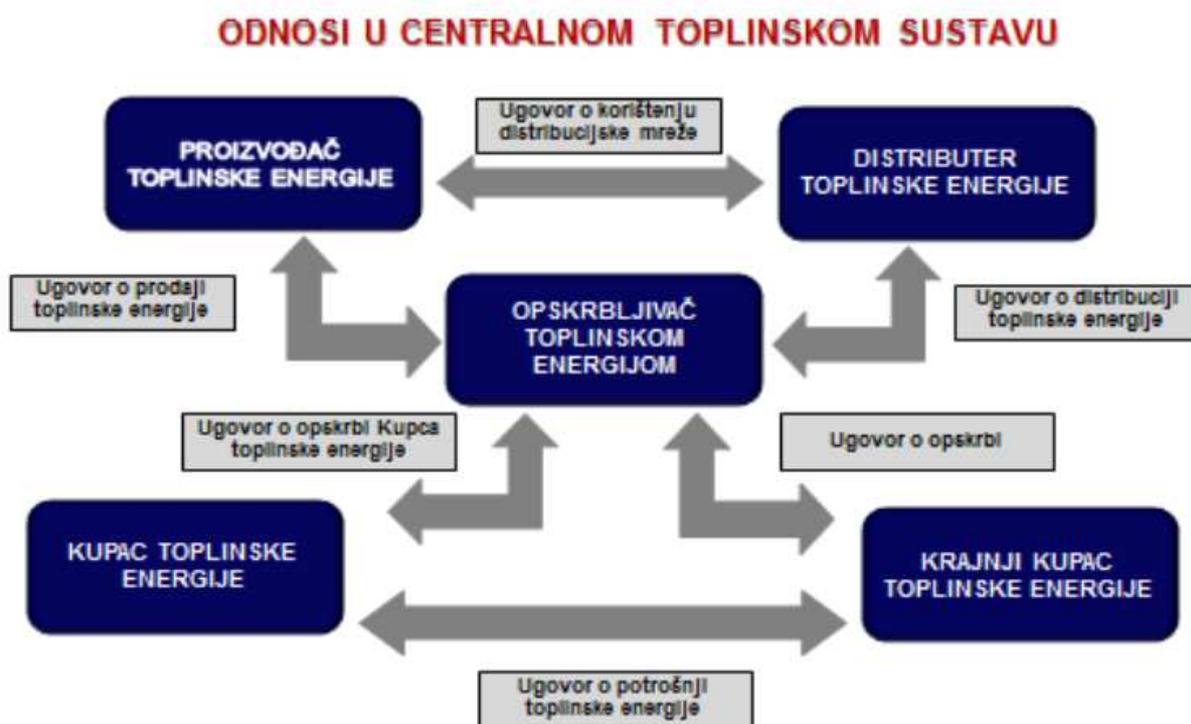
	2009.	2010.	2011.	2012.	2013.
Toplinska toplina [MWh]	613.630	647.865	644.929	622.665	606.860
Tehnološka para [t]	1.085.985	348.375	345.129	317.665	306.451
Električna energija [GWh]	353	369	359	366	356

5.3.5.3. Cijene toplinske energije u CTS Zagreb

Zakonom o tržištu toplinske energije (NN 80/13, 14/14, 102/14) određena je obveza razdvajanja djelatnosti u toplinarstvu, tako je sektor toplinarstva razdvojen na [30]:

- Produkciju
- Distribuciju
- Opskrbu
- Kupca

Produkcija, opskrba i kupac su tržišne djelatnosti dok je distribucija regulirana javna djelatnost. Na slici [Slika 8.] se mogu vidjeti odnosi prethodno navedenih djelatnosti u centralnom toplinskom sustavu.



Slika 8. Međusobni odnosi djelatnosti u centralnom toplinskom sustavu [30]

Prema ovoj podjeli sektora toplinarstva podijeljene su i cijene koje krajnji kupac plaća za isporučenu toplinsku energiju. Cijene toplinske energije u CTS-u Zagreb definirane su cjenikom HEP-Toplinarstva [Tablica 22.].

Tablica 22. Cjenik CTS-a Zagreb

HEP-TOPLINARSTVO d.o.o.							
CJENIK - CENTRALNI TOPLINSKI SUSTAV (CTS) - ZAGREB							
Naziv djelatnosti	Naziv tarifne stavke i naknade	Iznosi naknada i tarifnih stavki (TS) po tarifnim grupama (Tg) i tarifnim modelima (TM)					
		KUĆANSTVA (Tg1) / vrela/topla voda (TM1)		INDUSTRIJA I POSLOVNI POTROŠAČI (Tg2)/ vrela/topla voda (TM2)		INDUSTRIJA I POSLOVNI POTROŠAČI (Tg2) / tehnološka para (TM3)	
PROIZVODNJA TOPLINSKE ENERGIJE	Tarifna stavka Energija	0,1525	kn/kWh	0,3050	kn/kWh	232,5521	kn/t
DISTRIBUCIJA TOPLINSKE ENERGIJE	Tarifna stavka Energija	0,0175	kn/kWh	0,0350	kn/kWh	55,7079	kn/t
PROIZVODNJA TOPLINSKE ENERGIJE	Tarifna stavka Snaga	2,30	kn/kW/mj.	5,86	kn/kW/mj.	3.980,57	kn/t/h/mj.
DISTRIBUCIJA TOPLINSKE ENERGIJE	Tarifna stavka Snaga	3,45	kn/kW/mj.	6,17	kn/kW/mj.	4.194,64	kn/t/h/mj.
OPSKRBA TOPLINSKOM ENERGIJOM	Naknada za djelatnost opskrbe toplinskom energijom	7,02	kn/mj.	7,02	kn/mj.	7,02	kn/mj.
KUPAC TOPLINSKE ENERGIJE	Naknada za djelatnost kupca* za krajnje kupce s pripremom PTV** u toplinskoj podstanci	0,69	kn/m ² /mj.	0,69	kn/m ² /mj.	-	
	Naknada za djelatnost kupca* za krajnje kupce bez pripreme PTV** u toplinskoj podstanci	0,50	kn/m ² /mj.	0,50	kn/m ² /mj.	-	

Navedene cijene/tarife/naknade su u primjeni od 01.09.2014.
 Na navedene cijene/tarife/naknade obračunava se PDV.
 * Naknada za djelatnost kupca toplinske energije naplaćuje se krajnjim kupcima spojenim na zajedničko mjerilo toplinske energije
 **PTV - potrošna topla voda

Ukupna naknada za utrošenu energiju kroz vrelu/toplu vodu koju plaćaju fizičke osobe iznosi 0,17 kn/kWh, dok naknada za snagu iznosi 5,75 kn/kW mjesečno. Ova naknade se dijele između proizvođača i distributera toplinske energije. Uz ove naknade, fizičke osobe plaćaju još i naknadu opskrbljivaču u iznosu od 7,02 kn/mj te kupcu toplinske energije 0,5 kn/m² stana mjesečno ukoliko se ne koristi usluga pripreme PTV, te 0,69 kn/m² ukoliko se koristi.

Za pravne osobe ukupna naknada za utrošenu energiju kroz vrelu/toplu vodu iznosi 0,34 kn/kWh, dok naknada za snagu iznosi 12,03 kn/kW mjesečno. Ostale naknade su po iznosu i načinu obračuna jednake kao za fizičke osobe, tj. kućanstva.

Što se tiče pravnih osoba koje koriste tehnološku paru, naknada za utrošenu energiju je 288,26 kn/t, dok je naknada za snagu 8.175,21 kn/t/h mjesečno. Naknada za opskrbu je jednaka kao i u prethodnim slučajevima, dok naknada za kupca u ovome slučaju ne postoji. Navedene cijene su formirane 01. rujna 2014.

Što se tiče ostalih ekonomskih podataka vezanih uz CTS Zagreb i njegove proizvodne jedinice oni nisu bili dostupni za vrijeme pisanja ovoga rada. Jedini ekonomski pokazatelji koji su bili dostupni su podatci iz godišnjeg izvješća HEP grupe koji su dani na razini cijelog HEP-Toplinarstva d.o.o. [Tablica 23.].

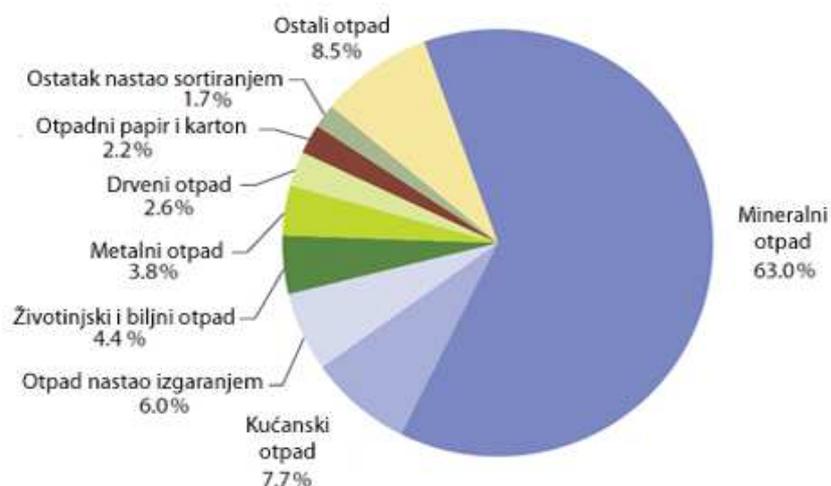
Tablica 23. HEP Toplinarstvo d.o.o. - Godišnje izvješće za 2013. godinu [29]

	2013. godina	2012. godina
	u tisućama kuna	u tisućama kuna
Prihodi od prodaje toplinske energije kupcima izvan HEP Grupe	763.461	585.485
Prihod od prodaje električne energije povlaštenim kupcima	11.134	10.571
Prihodi od prodaje toplinske energije i ostali prihodi - povezana društva	4.899	3.954
Prihod od restorana	585	573
Ostali prihodi iz poslovanja	45.917	49.463
	825.996	650.046
Utrošeni energenti, materijal i rezervni dijelovi	(96.413)	(102.625)
Troškovi usluga	(22.131)	(25.137)
Troškovi osoblja	(49.946)	(50.171)
Trošak amortizacije	(59.933)	(57.906)
Troškovi nabave energije i ostali troškovi-povezana društva	(703.214)	(818.538)
Ostali rashodi iz poslovanja	(70.266)	(52.783)
	(1.001.903)	(1.107.160)
Gubitak iz osnovne djelatnosti	(175.907)	(457.114)
Financijski prihodi	9.335	8.121
Financijski rashodi	(18.400)	(14.637)
Neto financijski rashodi	(9.065)	(6.516)
Gubitak prije oporezivanja	(184.972)	(463.630)
Porez na dobit	-	-
Gubitak tekuće godine	(184.972)	(463.630)

6. KOMUNALNI OTPAD

Prema Europskoj Direktivi 2008/98/EC, članku 3(1) otpad je definiran kao "svaka tvar ili predmet koju posjednik odbacuje ili namjerava ili mora odbaciti". Tako definiran otpad predstavlja ogroman gubitak resursa u obliku materijala i energije. Osim toga odlaganje tolike količine otpada ima ozbiljan utjecaj na okoliš. Odlaganje otpada na odlagalištima i izgaranje otpada su najrasprostranjeniji načini zbrinjavanja otpada. Odlaganje na odlagalištima zauzima prostor te izaziva zagađenje zraka, vode i tla, dok izgaranje otpada može uzrokovati štetne emisije u atmosferu [37].

U 2008. godini, iz kućanstava i ekonomskih aktivnosti, u zemljama Europske unije (EU-27), ukupno je proizvedeno 2.615 milijuna tona otpada iz čega se dobiva podatak da je svaki stanovnik Europske unije proizveo 5.2 tone otpada u godini dana. Na dijagramu [Slika 9.] se može vidjeti kompozicija proizvedenog otpada [37].



Slika 9. Kompozicija proizvedenog otpada, EU-27, 2008. god. [37]

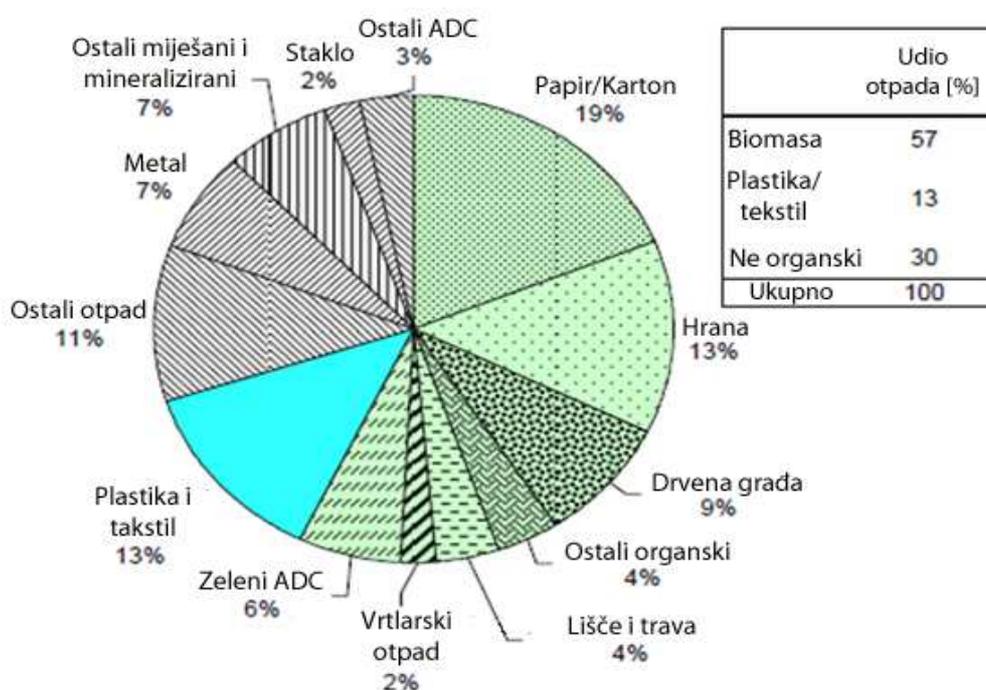
Komunalni otpad je miješani otpad generiran od strane cijele zajednice te se sastoji od kućanskog otpada, komercijalnog otpada (generiranog od strane trgovina, hotela, itd.) i otpada generiranog od strane javnih institucija (škola, bolnica, itd.). Osim komunalnog otpada razlikuju se još industrijski i poljoprivredni otpad [38].

Prema prethodno izrečenoj definiciji komunalnog otpada, prema podacima za 2008. godinu, u EU-27 zemljama je generirano 549.880.000 tona komunalnog otpada što predstavlja proizvodnju od 1,1 tone po stanovniku godišnje. Postoji značajna razlika u proizvodnji otpada po državama članicama Europske unije koja se kreće od 660 kg po stanovniku Latvije pa do 37,5 tona po stanovniku Bugarske, stoga je u Tablica 24. prikazana masa generiranog otpada po državama Europe [37].

Tablica 24. Proizvodnja otpada po zemljama [37]

	Otpad iz ekonomskih aktivnosti i kućanstava		Poljoprivreda, šumarstvo i ribolov	Rudarstvo i vađenje	Proizvodnja	Energetika	Građenje i rušenje	Ostale ekonomske aktivnosti	Kućanstva
	Ukupno	od toga opasan							
EU-27 (!)	2615 220	97 680	45 050	726 740	342 710	90 880	859 490	328 930	220 950
Belgija	48 622	5 919	288	503	10 090	1 087	15 442	16 753	4 459
Bugarska	286 093	13 043	754	267 559	3 447	7 655	1 829	1 943	2 907
Češka	25 420	1 510	255	167	5 293	1 920	10 651	3 959	3 176
Danska	15 155	420	41	2	1 454	1 358	5 674	4 111	2 514
Njemačka	372 796	22 323	1 351	28 288	52 322	11 708	197 207	46 515	35 405
Estonija	19 584	7 538	240	7 198	3 772	5 424	1 099	1 412	440
Irska	23 637	743	19	2 061	4 026	292	:	15 095	1 677
Grčka	68 644	253	:	38 152	5 703	11 181	6 828	2 826	3 954
Španjolska	149 254	3 649	11 356	25 716	19 369	4 872	44 926	18 584	24 431
Francuska	345 002	10 893	1 313	1 195	21 640	1 004	252 980	37 559	29 311
Italija	179 034	6 655	349	1 263	43 086	3 090	69 732	29 043	32 472
Cipar	1 843	24	127	505	138	2	431	207	433
Latvija	1 495	67	75	3	501	20	12	278	606
Litva	6 835	116	1 288	3	2 758	51	412	961	1 363
Luksemburg	9 592	199	2	10	673	1	8 282	347	276
Mađarska	20 080	671	468	272	4 789	3 050	5 240	2 795	3 466
Malta	1 499	55	3	0	17	0	1 099	212	169
Nizozemska	99 591	4 724	3 464	270	15 824	1 318	59 477	9 757	9 482
Austrija	56 309	1 330	459	678	13 077	569	31 390	6 317	3 819
Poljska	140 340	1 469	1 350	33 666	56 746	19 541	6 930	15 228	6 879
Portugal	36 480	3 368	160	1 891	9 001	255	8 085	11 932	5 157
Rumunjska	189 311	524	17 035	140 677	11 064	7 058	318	4 695	8 464
Slovenija	5 038	153	132	55	1 735	354	1 376	673	714
Slovačka	11 472	527	789	151	4 469	1 151	1 302	1 838	1 772
Finska	81 793	2 163	2 739	31 796	16 948	1 531	24 455	2 648	1 674
Švedska	86 169	2 063	314	58 702	11 927	1 508	3 310	6 014	4 393
Velika Britanija	334 127	7 285	681	85 963	22 837	4 885	100 999	87 223	31 539
Lihtenštajn	0,35	0,01	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,30	0,00
Norveška	10 427	1 336	184	113	3 689	46	1 498	2 531	2 365
Hrvatska	4 172	221	19	34	1 727	136	129	2 127	:
Makedonija	1 362	6	:	:	1 362	:	:	:	:
Turska	64 770	1 024	:	:	10 741	25 525	:	50	28 454

Organski otpad predstavlja otprilike 70% svog komunalnog otpada i to većinom u obliku papira, vrtnog otpada, otpada od hrane te drugog organskog otpada uključujući plastiku. Sav taj organski otpad nije biorazgradiv. Udio biorazgradivog organskog otpada u sveukupnom organskom otpadu je ~ 76% tj. biorazgradivi otpad predstavlja ~ 53% sveukupno proizvedenog komunalnog otpada. Ovi postotci se razlikuju od države do države, ali se uvijek nalaze u istom području. Tako, na primjer, udio organskog otpada na odlagalištima u Kaliforniji iznosi 70%, dok je ukupnu postotak biorazgradivog otpada na razini od 57% [Slika 10.]. Iz ovih podataka je vidljivo da organski otpad predstavlja najznačajniji dio komunalnog otpada te smanjenjem njegove proizvodnje i njegovom oporabom rješavamo dobar dio problema vezanih za zbrinjavanje komunalnog otpada [38] i [39].



Slika 10. Kompozicija otpada na odlagalištima u Kaliforniji [39]

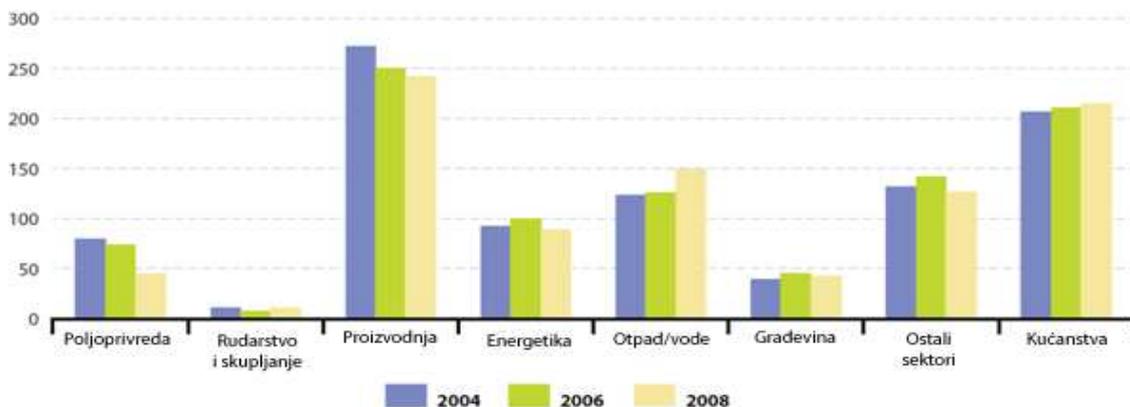
Iz eksperimentalnih podataka o sastavu ulaznog miješanog komunalnog otpada u 10 postrojenja za mehaničko biološku obradu (MBO) otpada (eng. *mechanical-biological treatment plants (MBT plants)*) u regiji Castilla y León, Španjolska, došlo se do preciznijih informacija o sastavu komunalnog otpada. Dobiveni podatci su prikazani u sljedećoj tablici [Tablica 25.] [48].

Tablica 25. Sastav komunalnog otpada u Španjolskoj regiji Castilla y León [48]

Kategorija otpada	Sastav miješanog komunalnog otpada	
	Prosječna vrijednost [%]	Standardna devijacija [%]
Organska tvar	56.26	7.44
Papir	13.80	5.52
Plastika:	10.67	3.08
- HDPE	0.75	0.39
- PET	1.46	0.52
- LDPE	5.56	1.72
- Miješana	2.90	2.07
- PVC	0.00	0.01
Staklo	3.28	1.45
Sivi metali	2.46	1.35
Obojeni metali	0.50	0.46
Celuloza	4.06	1.90
Tetrapak	1.18	0.37
Tekstil	3.57	2.03
Drvo	1.33	1.06
Guma	0.24	0.62
Baterija	0.01	0.04
Vrtni otpad	1.84	2.10
Elektronika	0.12	0.23
Građevinski otpad	0.69	1.04

Europska komisija je to uvidjela još 1999. godine kada je uvela Europsku Direktivu o odlaganju otpada (Direktiva 99/31/EC) koja je stupila na snagu 2001. godine. Ona zahtijeva smanjenje biorazgradivog dijela komunalnog otpada za 25%, od količine koja je odlagana 1995. godine, unutar pet godina, 50% unutar osam godina i 65% u roku od petnaest godina od stupanja na snagu. Osim toga u članku 6(a) direktive je određeno da sav otpad koji se deponira mora biti obrađen, s izuzetkom inertnih materijala, što je primoralo države na obradu i oporabu većine komunalnog otpada [39].

Ako se pogleda kretanje proizvodnje različitih vrsta otpada u EU-27 državama, koje se može vidjeti na slici 3. vidljivo je da je proizvodnja komunalnog otpada (pogotovo onoga iz kućanstava) raste iz godine u godinu te je razvoj mjera održivog gospodarenja svim, a pogotovo komunalnim otpadom, neophodan [37].



Slika 11. Proizvodnja ne mineralnog otpada u zemljama EU-27 po godinama [37]

Neki od najraširenijih načina zbrinjavanja miješanog komunalnog otpada te udovoljavanja odredbama Europske unije su mehaničko-biološka obrada i termička obrada komunalnog otpada. Upotrebom ovih dvaju tehnologija može se istovremeno, kroz anaerobnu digestiju i uporabu proizvedenog bioplina u energetskim postrojenjima ili kroz direktno spaljivanje miješanog komunalnog otpada, ili goriva nastalog separacijom otpada, udovoljiti europskim propisima i proizvesti toplinska i električna energija kao suprodukti zbrinjavanja otpada. U ovome smjeru idu i planovi Republike Hrvatske po pitanju rješavanja problema otpada. Planom gospodarenja otpadom koji je donesen 2007. godine, Vlada Republike Hrvatske se obvezala slijediti ciljeve europske unije po pitanju zbrinjavanja otpada. Plan se bazira na mreži centara za zbrinjavanje otpada, a jedna od tehnologija koja je predložena, a i najviše razmatrana za primjenu u većini županija RH, je mehaničko biološka obrada (MBO) otpada. Jedan od produkata MBO je i sekundarno gorivo iz otpada (GIO) (eng. *refuse-derived fuel (RDF)*) koje se može iskoristiti kao sekundarno gorivo za spaljivanje u termoelektranama, industrijskim energanama, cementarama i energanama na otpad (tzv. spalionicama otpada). Jedina iznimka, po pitanju primjene tehnologije za zbrinjavanje komunalnog otpada je Grad Zagreb gdje se kao solucija predlaže postrojenje za termičku obradu otpada (TOO) na području zagrebačkog naselja Resnik [49].

6.1. Mehaničko biološka obrada

Mehaničko biološka obrada otpada je najviše razmatrana tehnologija za zbrinjavanje komunalnog otpada u RH. Miješani komunalni otpad je ulazna sirovina postrojenja za mehaničko biološku obradu otpada. U postrojenjima za MBO otpada metali i inertni materijali se separiraju za recikliranje, a organski dio otpada se izdvaja za daljnju stabilizaciju kroz procese kompostiranja, s ili bez procesa digestije. Ovaj postupak, također, iz ulaznog otpada posebno izdvaja energetski visoko vrijednu frakciju koja se u najvećem dijelu sastoji od suhog papira, plastike i tekstila. Ova frakcija otpada se po Planu gospodarenja otpadom naziva gorivom iz otpada (GIO). Shema procesa unutar postrojenja za MBO može se vidjeti na slici [Slika 12.] [50].



Slika 12. Shema procesa unutar postrojenja za MBO

Količina GIO koja se može proizvesti iz jedne tone miješanog komunalnog otpada varira u ovisnosti o načinu prikupljanja otpada, vrsti procesa predobrade otpada te zahtjevima za

kvalitetom nastalog GIO. Na temelju dostupnih podataka iz Finske, Njemačke i Italije, procijenjene količine nastalog GIO iz miješanog komunalnog otpada su na razini 30% [50].

6.2. Sastav i karakteristike otpada

Ogrjevna vrijednost otpada se određuje iz podataka o sastavu otpada, udjelu vlage i ogrjevnoj vrijednosti pojedinačnih komponenti otpada kako je pokazano na idućem primjeru. Prema podacima iz 10 MBO postrojenja u regiji Castilla y León, Španjolska, došlo se do informacija o sastavu miješanog komunalnog otpada i količini dobivenog GIO iz komunalnog otpada u Španjolskoj. Sastav miješanog komunalnog otpada, i GIO koji se iz njega može dobiti separacijom visokokaloričnih faza goriva, u Španjolskoj može se vidjeti u sjedećoj tablici [Tablica 26.] [48].

Tablica 26. Sastav miješanog komunalnog otpada i GIO u regiji Castilla y León, Španjolska [48]

Kategorija otpada	Sastav komunalnog otpada		Sastav GIO	
	Prosjek [%]	Stan.dev. [%]	Prosjek [%]	Stan.dev. [%]
Organska tvar	56.26	7.44	23.71	7.84
Papir	13.80	5.52	27.91	4.73
Plastika:	10.67	3.08	24.50	4.25
- HDPE	0.75	0.39	0.99	0.73
- PET	1.46	0.52	1.87	0.85
- LDPE	5.56	1.72	10.93	3.29
- Miješana	2.90	2.07	10.62	3.41
- PVC	0.00	0.01	0.08	0.19
Staklo	3.28	1.45	0.48	0.45
Sivi metali	2.46	1.35	3.10	1.99
Obojeni metali	0.50	0.46	0.61	0.51
Celuloza	4.06	1.90	5.76	2.33
Tetrapak	1.18	0.37	2.16	1.77
Tekstil	3.57	2.03	8.65	3.76
Drvo	1.33	1.06	2.18	1.37
Guma	0.24	0.62	0.03	0.10
Baterija	0.01	0.04	0.00a	0.00
Vrtni otpad	1.84	2.10	0.14	0.37
Elektronika	0.12	0.23	0.34	0.50
Građevin. otpad	0.69	1.04	0.48	0.45

U Španjolskoj udio energetske visoko vrijedne frakcije u otpadu iznosi 66,7% ukupnog volumena miješanog komunalnog otpada. Kada se bazi uzoraka dobije udio pojedine frakcije otpada te izmjeri njegova masa, može se doći i do masenog udjela GIO u ukupnoj masi otpada te on iznosi 42%.

U sljedećim tablicama može se vidjeti udio vlage u miješanom komunalnom otpadu i GIO te ogrjevne vrijednosti njihovih frakcija [Tablica 27.], kao i udio nezapaljivog materijala [Tablica 28.], dobivenih na temelju prethodno spomenute studije u Španjolskoj [48].

Tablica 27. Udio vlage u miješanom komunalnom otpadu i GIO [48]

Kategorija otpada	Udio vode u komunalnom otpadu		Udio vode u GIO	
	Prosjek [%]	Stan.dev. [%]	Prosjek [%]	Stan.dev. [%]
Organska tvar	58.33	1.43	42.26	8.20
Papir	55.59	3.18	16.72	1.31
Plastika:	22.31	3.08	15.14	4.25
- HDPE	17.07	1.46	25.56	2.74
- PET	8.27	0.75	7.31	0.10
- LDPE	34.57	6.58	24.58	15.69
- Miješana	7.23	2.91	5.84	0.10
Staklo	1.12	0.58	1.05	1.61
Metali	2.64	2.54	2.52	1.73
Celuloza	6.64	3.19	5.10	2.21
Tetrapak	32.87	2.69	29.74	16.52
Tekstil	46.00	2.39	28.45	9.86
Drvo	5.55	4.90	4.70	3.80
Građevin. otpad	0.12	0.58	0.13	0.08

Tablica 28. Ogrjevne vrijednosti frakcija otpada i udio nezapaljivog materijala [48]

Kategorija otpada	Gornje ogrjevne vrijednosti		Nezapaljivi materijal	
	Prosjek [%]	Stan.dev. [%]	Prosjek [%]	Stan.dev. [%]
Organska tvar	14,905.0	282.8	1.82	0.45
Papir	14,739.9	2654.7	9.56	3.06
Plastika:				
- HDPE	45,670.4	443.6	0.65	0.42
- PET	22,995.0	16.1	0.20	0.25
- LDPE	41,269.5	3043.3	2.09	1.43
- Miješana	41,203.8	2820.9	2.87	2.53
Celuloza	45,552.0	330.9	0.15	0.02
Tetrapak	23,557.1	154.5	10.21	2.53
Tekstil	21,298.2	5226.0	2.84	1.61
Drvo	18,825.0	20.3	1.25	0.04

Iz prethodno navedenih udjela pojedinih sirovina u sastavu otpada, udjela vlage u otpadu te ogrjevnih vrijednosti svake sirovine, od koje se sastoji otpad, pojedinačno dobije se ogrjevna vrijednost otpada. U idućoj tablici [Tablica 29.] dane se ogrjevne vrijednosti miješanog komunalnog otpada i GIO.

Tablica 29. Ogrjevne vrijednosti miješanog komunalnog otpada i GIO [48]

	Komunalni otpad	GIO
Gornja ogrjevna vrijednost (kJ/kg otpada)	10.159,8	18.280,8
Gornja ogrjevna vrijednost (kJ/kg suhog otpada)	18.973,1	23.444,6
Gornja ogrjevna vrijednost (kJ/kg suhog otpada bez mineralnih ostataka)	26.518,9	26.948,7
Donja ogrjevna vrijednost (kJ/kg otpada)	8.325,9	16.660,7
Donja ogrjevna vrijednost (kJ/kg suhog otpada)	17.677,1	22.061,2
Donja ogrjevna vrijednost (kJ/kg suhog otpada bez mineralnih ostataka)	24.990,2	25.409,9
Udio vlage (%)	46,46	22,07
Udio nezapaljivog materijala (% suhog otpada)	15,23	10,10
Specifična masa (kg/m ³)	208,0	130,8

Prosječna ogrjevna vrijednost prikupljenog komunalnog otpada se razlikuje od slučaja do slučaja. Prema Međunarodnoj energetskej agenciji (eng. *International Energy Agency (IEA)*) ogrjevna vrijednost miješanog komunalnog otpada se kreće u rasponu od 8 do 12 MJ/kg [53], dok se u pojedinim znanstvenim radovima i drugim izvorima upotrebljavaju ili navode vrijednosti prosječne ogrjevnosti miješanog komunalnog otpada od 10 [52] i [54], više od 10 [55] ili na razini od 11 - 12 MJ/kg [56].

6.3. Komunalni otpad u Gradu Zagrebu

Zbog nastalih problema s zbrinjavanjem komunalnog otpada koji proizlaze iz odredaba Europske unije, Grad Zagreb već neko vrijeme traži način zbrinjavanja komunalnog otpada. sljedeći Plan gospodarenja otpadom Republike Hrvatske, čelnici Grada Zagreba su kao najbolju tehnologiju za osiguravanje trajnog rješenja ovoga problema identificirali postrojenje za termičku obradu otpada (TOO) (eng. *waste-to-energy plant (WtE plant)*).

Sada kada je, prema rješenju Ministarstva zaštite okoliša, na gradsko odlagalište otpada Prudinec u gradskom naselju Jakuševac zabranjeno odlagati bilo kakav otpad osim komunalnog, a i to samo do 2018. godine, traži se brzo rješenje problema otpada. Zadnje predloženo rješenje gradske uprave je izgradnja postrojenja za termičku obradu otpada u gradskom naselju Resnik.

Prema posljednjem Izvješću o komunalnom otpadu za 2012. godinu, kojega godišnje izdaje Agencija za zaštitu okoliša, u Gradu Zagrebu je 2012. godine bilo 780.000 stanovnika obuhvaćeno sustavom sakupljanja otpada te je preuzeto 295.302,873 tone otpada što odgovara količini od 378,59 kg otpada po stanovniku. Od tog iznosa otpada 221.966,13 tona je klasificirano kao miješani komunalni otpad dok je 73.336,74 tone proizvedenog ostalog komunalnog otpada, među koje spada i primarno separirani komunalni otpad [51].

Iz prethodno navedenih iznosa proizvedenog otpada može se zaključiti da svako razmatrano rješenje za rješavanje problema otpada u Gradu Zagrebu treba imati minimalni godišnji kapacitet obrade od 221.966,13 tona.

6.4. Cijena otpada

Za razliku od drugih energenata za pogon energetskih postrojenja, cijena otpada je negativna, tj. postrojenje za termičku obradu otpada ostvaruje prihod na račun naknade za zbrinjavanja otpada (eng. gate fee) koju prima po toni obrađenog otpada. Iznos naknade za zbrinjavanje otpada u zemljama EU kreće se od 46 pa do 174 €/t [57] te je za potrebe ovoga rada uzeta srednja vrijednost od 110 €/t.

7. BIOMASA

Prema članku 2. direktive Europske unije i Vijeća Europe broj 2003/30/EC, biomasa je definirana kao "biorazgradivi dijelovi proizvoda, otpada ili ostataka iz poljoprivrede, šumski otpad i otpad srodnih industrija kao i biorazgradivi dijelovi industrijskog i gradskog otpada". S obzirom da je isplativost ulaganja u postrojenje na biomasu izravno ovisno o mogućnosti neprekinutog pogona tj. što većim brojem radnih sati, za financijsku održivost projekta iznimno je značajno osigurati kontinuiranu opskrbu biomasom. U nastavku ovoga rada pozornost će biti dana drvnoj biomasi koja je pogodnija za izgaranje zbog niskog zašljakivanja što dovodi do smanjenja pogonskih troškova. Za pogon kogeneracijskog postrojenja načelno se mogu koristiti različite vrste drvene biomase: drveni ostatak (s pilane ili tvornice namještaja, šumski ostatak) ili namjenski uzgojeno brzorastuće drvo. Kod donošenja odluke o vrsti goriva potrebno je u obzir uzeti različite parametre kao što su [63]:

- nabavna cijena
- sigurnost opskrbe
- kvaliteta goriva
- održivost opskrbe

Za učinkovito iskorištavanje biomase potrebno je kvalitetu isporučene biomase održavati konstantnom, tj. unutar određenih granica, pri čemu su najvažniji parametri: Sadržaj vlage, veličina komada odnosno čestica te sadržaj ostalih materijala u obliku uključaka odnosno zagađenja. Većina tehnologija omogućava izgaranje sječke vlažnosti i preko 50%. Ograničenja postoje samo kod nekih tehnologija rasplinjavanja [63].

Godišnja potrošnja drvene sječke ovisit će o:

- veličini i konfiguraciji postrojenja
- vrsti tehnologije primarne pretvorbe biomase
- učinkovitosti procesa
- načinu vođenja pogona
- vrsti i vlažnosti korištenog goriva

Ekvivalentan volumen biomase izražen u kubičnim metrima ovisit će o prosječnoj gustoći vlažnog drveta koja se kreće u rasponu 0,75 do 0,9 t/m³.

Kako bi vlasnik postrojenja osigurao sigurnu i kontinuiranu dobavu biomase može poduzeti sljedeće mjere [63]:

- potpisivanje dugoročnog ugovora s tvrtkom za prikupljanje, iveranje i prodaju šumske biomase,
- potpisivanje ugovora s drvno-prerađivačkom tvrtkom o otkupu viškova drvnog ostatka (piljevine i komadnog drveta)
- zakup šumske površine s pravom korištenja šumske biomase,
- uzgoj brzorastućih nasada.

7.1. Dostupna biomasa za potrebe kogeneracijskog postrojenja na području Grada Zagreba

Ovaj rad će se ograničiti na razmatranje samo jednog izvora biomase za pogon energetskog postrojenja, a to je šumska biomasa, tj. preciznije ostatak koji nastaje nakon sječe drveta.

Količina sječke koja je dostupna za pogon postrojenja na nekoj lokaciji ovisi o poziciji postrojenja i cijeni koju je vlasnik postrojenja spreman platiti. Ova je ovisnosti vezana uz cijenu prijevoza sječke te je detaljnije opisana u sljedećem poglavlju.

Zbog ovisnosti cijene o transportu, u ovome poglavlju će se razmatranje količine dobavljive sječke ograničiti na Grad Zagreb, Zagrebačku županiju i okolne županije. Drvna sječka se proizvodi iz drvnih ostataka (panjeva te sitne granjevine do promjera većeg od 7 cm) te je stoga dostupna količina drvene sječke u punim kubnim metrima drveta (V_{pd}) na nekom području proporcionalan je s etatom (etat) tog područja i udjelu šumskog ostatka ($Y_{šo}$) kako je opisano jednadžbom (4).

$$V_{pd} \text{ (m}^3\text{)} = \text{etat (m}^3\text{)} \times Y_{šo} \text{ (\%)} \quad (4)$$

Etat označava planiranu drvnu zalihu za sječenje predviđena Šumskogospodarskom osnovom područja [69], tj. količinu drvene mase koju je dopušteno iskorištavati u gospodarske svrhe. Predviđeni godišnji etat se određuje svake godine. Udio šumskog ostatka za prosječne šume

iznosi od 12 do 15%, gdje se za bjelogorične šume nalazi u nižem dijelu raspona u odnosu na crnogorične. U ovome radu će biti uzeto da je udio šumskog ostatka 12% etata [67]. Na taj se način, upotrebljavajući jednadžbu (4), može doći do količina ostatne šumske biomase u punim metrima kubnim drveta (V_{pd}). Kako je gustoća sječke puno manja od drveta, da bi se izračunao nasipni volumen drvene sječke (V_{ds}) potrebno je količinu ostatne šumske biomase u punim metrima kubnim drveta uvećati 2,5 puta koliko iznosi razlika u volumenima punog drveta i sječke, kako je prikazano jednadžbom (5) [68].

$$V_{ds} = 2,5 \times V_{pd} \text{ [m}^3\text{]} \quad (5)$$

Prethodna jednadžba vrijedi za bjelogorično drvo.

Za preračun između mase goriva, tj. drvene sječke (m_{ds}), i njenog volumena (V_{ds}), prema jednadžbi (6), potrebno je odrediti iznos nasipne gustoće sječke (ρ_{ns}). Nasipna gustoća sječke iznosi između 250 i 400 kg/m³, ovisno o načinu dobivanja i sadržaju vlage [67]. U ovome radu će se za nasipnu gustoću uzeti srednja vrijednost od 325 kg/m³.

$$m_{ds} = \rho_{ns} \times V_{ds} \text{ [kg]} \quad (6)$$

Na temelju podataka iz Atlasa šumske biomase [69] dobiveni su podatci prikazani u sljedećoj tablici [Tablica 30.].

Tablica 30. Podatci vezani za proizvodnju drveta u Gradu Zagrebu i Zagrebačkoj županiji [69]

	Površina šuma i šumskog zemljišta [km ²]	Ukupna površina gospodarskih šuma [km ²]	Udio privatnih šuma [%]	Udio državnih šuma [%]	Ukupna drvena zaliha gospodarskih šuma [m ³]	Prosječni godišnji etat za sve drvene sortimente [m ³]
G. Zagreb:	20.560,08	17.137,86	55,30	44,70	3.956.401,00	56.026,00
Zagrebačka ž.	113.651,8	101.474,3	58,56	41,44	775.503,00	320.419,0
Bedenica	678,93	669,77	92,80	7,20	145.377,00	1.314,00
Bistra	2.714,52	2.392,56	50,40	49,60	18.646,00	9.742,00
Brckovljani	1.901,72	1.725,96	27,90	72,10	12.875,00	6.537,00
Brdovec	566,37	514,32	74,80	25,20	3.355,00	1.203,00
Dubrava	3.541,32	3.389,70	44,50	55,50	26.128,00	14.188,00
Dubravica	667,66	655,61	98,20	1,80	3.909,00	1.227,00
Dugo selo	1.209,80	1.109,83	33,30	66,70	8.092,00	3.962,00
Farkasevec	3.419,64	3.210,09	1,50	98,50	21.630,00	16.257,00
Gradec	2.804,09	2.784,75	26,20	73,80	20.563,00	13.375,00
Ivanić grad	4.367,10	3.804,41	13,40	86,60	29.470,00	16.754,00
Jakovlje	1.394,61	1.357,57	70,90	29,10	9.351,00	3.241,00
Jastrebarsko	9.358,05	8.075,68	40,80	59,20	41.572,00	27.416,00
Klinča Sela	3.117,26	2.960,71	79,30	20,70	12.788,00	6.163,00
K. Ivanić	2.775,28	2.545,02	4,20	95,80	19.932,00	13.309,00
Krašić	3.074,51	2.475,29	55,30	44,70	12.420,00	5.603,00
Kravarско	3.309,39	3.252,12	62,00	38,00	18.550,00	7.911,00
Križ	5.395,80	4.542,08	4,70	95,30	31.865,00	19.347,00
Luka	427,04	421,81	100,00	0,00	2.498,00	774,00
M. Gorica	357,60	340,35	89,10	10,90	2.104,00	699,00
Orle	404,82	135,71	99,10	0,90	781,00	311,00
Pisarovina	5.318,37	5.122,33	60,60	39,40	25.124,00	11.631,00
Pokupsko	5.861,63	5.817,39	70,80	29,20	28.311,00	11.805,00
Preseka	1.508,42	1.452,73	84,70	15,30	11.634,00	3.569,00
Pušća	483,06	460,93	89,90	10,10	2.841,00	940,00
Rakovec	949,91	935,71	98,20	1,80	7.651,00	2.278,00
Rugvica	1.344,77	832,92	46,20	53,80	5.936,00	2.911,00
Samobor	13.449,98	11.340,36	61,10	38,90	68.475,00	33.727,00
Stupnik	977,43	860,51	0,90	99,10	4.724,00	3.111,00
S. Nedjelja	309,71	297,56	97,00	3,00	1.783,00	566,00
S. I. Zelina	6.607,43	6.448,61	84,60	15,40	39.173,00	14.741,00
V. Gorica	13.384,54	12.127,31	19,40	80,60	83.061,00	40.857,00
Vrbovec	3.010,84	2.918,13	88,60	11,40	23.506,00	7.136,00
Zarešić	1.323,81	1.256,57	88,30	11,70	7.792,00	2.601,00
Žumberak	7.636,37	5.239,89	32,40	67,60	23.586,00	15.213,00

U prethodnoj tablici [Tablica 30.] dan je pregled podataka vezanih za proizvodnju drveta u Gradu Zagrebu i Zagrebačkoj županiji. Podatci su dobiveni korištenjem podataka iz Atlasa šumske biomase. Atlas šumske biomase temelji se na povezivanju prostornih i statističkih podataka o potrošnji i proizvodnji drvne biomase te prikaza rezultata pomoću geografskog informacijskog sustava - GIS-a. Korištena metodologija preuzeta je iz modela WISDOM - *Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping*, koji je razvijen od strane Organizacije Ujedinjenih naroda za prehranu i poljoprivredu (eng. *UN Food and Agriculture Organisation - FAO*). WISDOM model u osnovi predstavlja geo-bazu podataka koja omogućava analizu i planiranje razvoja cjelokupnog šumarskog sektora, a do sada je primijenjen je u većem broju zemalja uključujući i Hrvatsku. Geo-baza organizirana je na nivou hrvatskih općina, a uključuje podatke o korištenju biomase za grijanje u domaćinstvima, površini šuma i šumskog zemljišta, ukupnoj drvnoj zalihi gospodarskih šuma, prosječnom godišnjem etatu i druge [69].

Iz pregleda podataka vezanih za proizvodnju drveta u Gradu Zagrebu i Zagrebačkoj županiji [Tablica 30.] može se zbrajanjem podataka po općinama doći do ukupnog etata na području Grada Zagreba i Zagrebačke županije koji iznosi $56.026,00 \text{ m}^3$ za područje Grada Zagreba te $320.419,00 \text{ m}^3$ za područje Zagrebačke županije.

Upotrebom jednadžbe (4) dolazi se do dostupna količina drvne sječke od $6.723,12 \text{ m}^3$ na području Grada Zagreba, te $38.450,28 \text{ m}^3$ na području Zagrebačke županije, izraženo u punim metrima kubnim drveta. Koristeći jednadžbu (5) može se dobiti i ukupni volumen sječke od $16.807,80 \text{ m}^3$ za područje Grada Zagreba i $96.125,70 \text{ m}^3$ za Zagrebačku županiju te prema jednadžbi (6) dobije se dostupna masa drvne sječke koja za Grad Zagreb iznosi $5.462,54$ tone godišnje, a za Zagrebačku županiju $31.240,85$ tona godišnje.

Na isti način se došlo i do podataka za ostale županije koje okružuju Grad Zagreb i Zagrebačku županiju. Svi podatci dobiveni na ovaj način prikazani su u tablici [Tablica 31.].

Tablica 31. Podatci o raspoloživoj drvnjoj sječki po županijama

Županija	Etat [m3]	Količina drvene sječke - Vpd [m3 punog drveta)	Volumen drvene sječke - Vds [m3]	Masa drvene sječke [56]
Grad Zagreb	56.026,00	6.723,12	16.807,80	5.462,54
Zagrebačka	320.419,00	38.450,28	96.125,70	31.240,85
Karlovačka	551.474,00	66.176,88	165.442,20	53.768,72
Sisačko - moslavačka	645.907,00	77.508,84	193.772,10	62.975,93
Bjelovarsko - bilogorska	479.093,00	57.491,16	143.727,90	46.711,57
Koprivničko - križevačka	244.066,00	29.287,92	73.219,80	23.796,44
Varaždinska	86.494,00	10.379,28	25.948,20	8.433,17
Krapinsko - zagorska	105.651,00	12.678,12	31.695,30	10.300,97
Ukupno:	2.489.130,00	298.695,60	746.739,00	242.690,18

7.2. Cijena drvene sječke

Cijena šumske drvene sječke, prema potpisanim ugovorima Hrvatskih Šuma s otkupljivačima, u prosjeku iznosi 251,75 kn/t što iznosi 32,87 €/t na šumskome putu [66]. Detaljniji pregled cijena se može vidjeti u tablici [Tablica 32.]. (7,66 kn = 1 €)

Tablica 32. Cijene šumske biomase prema potpisanim ugovorima Hrvatskih Šuma [66]

Vrste drveta	Cijena drvene sječke [kn/t]	Cijena VM ogrjevnog drveta [kn/t]
Bukva, Grab	270,00	222,00
Hrast, Ostale tvrde listače	263,00	216,00
Meke listače	245,00	201,00
Četinjače	229,00	188,00

Cijena goriva za postrojenje na drvenu sječku (C_{goriva}) se sastoji od dvije komponente, cijene same sječke na šumskome putu ($C_{sječke}$) i cijene prijevoza ($C_{prijevoz}$), kako je opisano jednadžbom (7).

$$C_{goriva} = C_{sječke} + C_{prijevoz} \text{ [€]} \quad (7)$$

Dok je cijena sječke neovisna o poziciji energetskog postrojenja na biomasu, cijena prijevoza ovisi o njegove udaljenosti od izvora biomase. Potrebna udaljenost s koje se mora dovoziti drvena sječka uvelike ovisi o veličini postrojenja.

Cijena biomase na ulazu u postrojenje može se izračunati na način prikazan jednadžbom (8) [67].

$$B_c = \sum_{i=1}^n \frac{[c_B + (T_p \times U_i)] \times K_{Bi}}{P_B} \quad (8)$$

Gdje je:

B_C : Prosječna cijena sirovine na lokaciji postrojenja [€/t]

c_B : Cijena sječke od šumskih ostataka na šumskom putu ili u šumariji [€/t]

T_P : Specifični trošak prijevoza sirovine [€/t/km]

U_i : Prosječna udaljenost između lokacije biomase s područja i i postrojenja [km]

K_{Bi} : Ukupna količina biomase dovezene s područja i [tona]

P_B : Ukupna godišnja uporaba sirovine u postrojenju [tona]

Za potrebe ovoga rada prosječna cijena sirovine za postrojenje na lokaciji Zagreb, Resnik je izračunata upotrebom već gotovog modela za izračun cijene biomase na pragu postrojenja [70]. Uz cijenu drvene sječe na šumskome putu od 32€/t te potrebnu količinu od 90.000 tona sječke godišnje, dobivena cijena na pragu postrojenja iznosi 41,23 €/t.

8. ODABIR TEHNOLOGIJE, VELIČINE I PARAMETARA POSTROJENJA PREMA RASPOLOŽIVOJ SIROVINI

Kako bi se mogla napraviti usporedna analiza proizvodnje toplinske energije iz postrojenja baziranih na različitim gorivima, potrebno je na određeni način doći do parametara postrojenja koja odgovaraju zahtjevima određene lokacije. U ovome radu će se do potrebnih parametara za daljnju ekonomsku analizu doći usporedbom analizom i određivanjem trendova kod već postojećih sustava kao i upotrebljavajući metode i podatke upotrebljavane u objavljenim znanstvenim radovima kako bi nadomjestili određeni manjak ekonomskih podataka koje vlasnici komercijalnih sustava ne objavljuju.

8.1. Usporedba i analiza podataka o kogeneracijskim postrojenjima za termičku obradu otpada u CTS-u

U prethodnim poglavljima ovoga rada dana je opsežan pregled već postojećih postrojenja koja se koriste za dobavu toplinske energije u već postojećim CTS. Prema tim prikupljenim podacima, o već postojećim postrojenjima čiji je pregled dan u poglavlju 5. ovoga rada, te studijama slučaja i podataka danih u okviru pojedinih znanstvenih radova [61] i [62] mogu se uočiti kretanja određenih veličina, kao što su investicijska cijena, troškovi pogona i održavanja, učinkovitosti energetske pretvorbe, itd., u ovisnosti o veličini postrojenja. Osim toga moguće je vidjeti koje se tehnologije najviše koriste za konstrukciju takvih postrojenja. Radi osiguranja veće točnosti podataka korišteni su samo podatci o postrojenjima s prostora Europske unije, kao i podatci iz studija slučaja koji su se bavili postrojenjima na prostoru EU.

Prema tim podacima, vidljivo je da se ovakva postrojenja kapaciteta ~ 220.000 tona otpada godišnje, uobičajeno izvode kao postrojenja s izgaranjem otpada na rešetci u spoju s kondenzacijskom turbinom. Osim toga, zbog rigoroznih standarda po pitanju utjecaja na okoliš u Europskoj uniji jednu od važnijih komponenata ovog sustava predstavlja i sustav za pročišćavanje dimnih plinova.

8.1.1. Investicijski troškovi postrojenja za TOO

Što se tiče investicijskih troškova postrojenja u ovome radu, za lakšu usporedbu ovi su troškovi prikazani u svom apsolutnom obliku te svedeni na specifične vrijednosti po toni kapaciteta postrojenja. Specifične vrijednosti investicijskih troškova se kreću na razini od 318,12 €/t pa do 656,52 €/t ovisno od kapaciteta postrojenja. Usporedni prikaz investicijskih troškova se može vidjeti u sljedećoj tablici [Tablica 33].

Tablica 33. Prikaz investicijskih troškova postrojenja

Kapacitet [t _{otpada} /god]	Godina izgradnje	Investicijska cijena [€]	Specifična investicija [€/t]	Referenca
40.000	2006*	24.248.000,00	606,20	[62]
100.000	2010*	56.000.000,00	560,00	[61]
200.000	2001	107.000.000,00	535,00	[59],[60]
300.000	2006*	95.437.000,00	318,12	[62]
460.000	2007	302.000.000,00	656,52	[25]
800.000	2004	401.570.000,00	501,96	[25]

* Godina objave rada

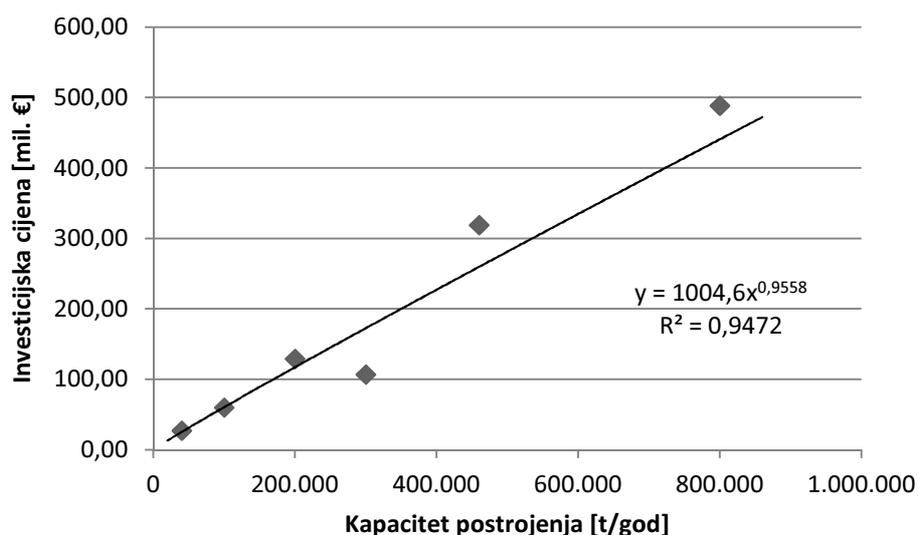
Obzirom da se godine izgradnje razlikuju, a s time i vrijednost novca, da bi se iznosi troškova mogli uspoređivati potrebno ih je svesti na vrijednost novca referentne godine. Za referentnu godinu, na koju će se u daljnjem radu svoditi svi troškovi, je uzeta godina pisanja ovoga rada (2014.). Kao godina investicije, od koje će se na iznos investicije pripisivati stopa inflacije u narednim godinama, uzeta je godina puštanja u pogon ili godina izgradnje razmatranog postrojenja navedena u literaturi. Ukoliko godina izgradnje nije navedena smatrano je da je su izražene cijene svedene na godinu objave rada te se ta godina uzimala kao početna godina prilikom svođenja troškova na sadašnju vrijednosti.

Izraženi troškovi su svedeni na sadašnju vrijednost tako što su se na godišnjoj razini uvećavali za iznos prosječne godišnje inflacije, u državi u kojoj se postrojenje nalazi, za svaku sljedeću godinu od godine investicije ili godine objave rada. Ukoliko se lokacija postrojenja ne može zaključiti na osnovu danih podataka, za preračunavanje vrijednosti troškova su primijenjene prosječne godišnje stope inflacije za EU28. Na taj način preračunati investicijski troškovi postrojenja iz uzorka navedeni su u sljedećoj tablici [Tablica 34.].

Tablica 34. Prikaz investicijskih troškova postrojenja svedenih na 2014. godinu

Kapacitet [t/god]	Investicijska cijena svedena na sadašnju vrijednost [€]	Specifična investicija svedena na sadašnju vrijednost [€/t]
40.000	27.171.173,76	679,28
100.000	59.995.787,04	599,96
200.000	129.155.831,59	645,78
300.000	106.942.234,85	356,47
460.000	318.900.240,12	693,26
800.000	488.295.762,53	610,37

Ukoliko ove vrijednosti prikazemo u dijagramu može se vidjeti trend kretanja investicijske cijene u funkciji kapaciteta postrojenja [Slika 13.].

**Slika 13. Ovisnost investicijskih troškova o veličini postrojenja za TOO**

U prethodnom dijagramu [Slika 13.] može su uočiti da investicijska cijena većine postrojenja prati trend koji najbolje aproksimira eksponencijalna funkcija (9):

$$C_{inv} = 1004,6 \times q_m^{0,9558} \quad (9)$$

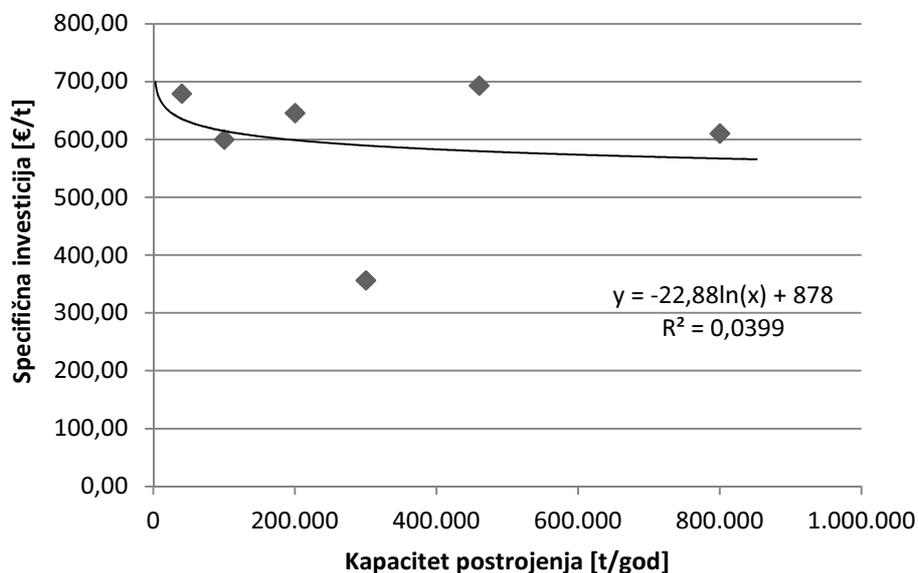
gdje je:

q_m : godišnji kapacitet postrojenja [t/god]

C_{inv} : iznos ukupne investicije [€].

Ova je funkcija definirana metodom najmanjih kvadrata kojom su aproksimirane vrijednosti zadane podacima iz prethodno spomenutih izvora.

Ukoliko se ti investicijski troškovi svedu na specifične investicijske troškove tako da se ukupni investicijski troškovi podijele s godišnjim kapacitetom postrojenja za termičku obradu otpada dobivaju se rezultati iz sljedećeg dijagrama [Slika 14.].



Slika 14. Specifični investicijski troškovi u odnosu na veličinu postrojenja za TOO

U dijagramu ovisnosti specifične investicije o godišnjem kapacitetu može se zamijetiti nešto veće rasipanje vrijednosti unutar ovoga uzorka. U slučaju većeg rasipanja vrijednosti poželjno bi bilo u postupak razmatranje trenda ponoviti s većim brojem podataka. Ove vrijednosti su aproksimirane logaritamskom funkcijom (10):

$$c_{inv} = -22,88 \times \ln(q_m) + 878 \quad (10)$$

gdje je:

q_m : godišnji kapacitet postrojenja [t/god]

c_{inv} : iznos specifične investicije [€/t].

Ova funkcija je također izvedena upotrebom metode najmanjih kvadrata.

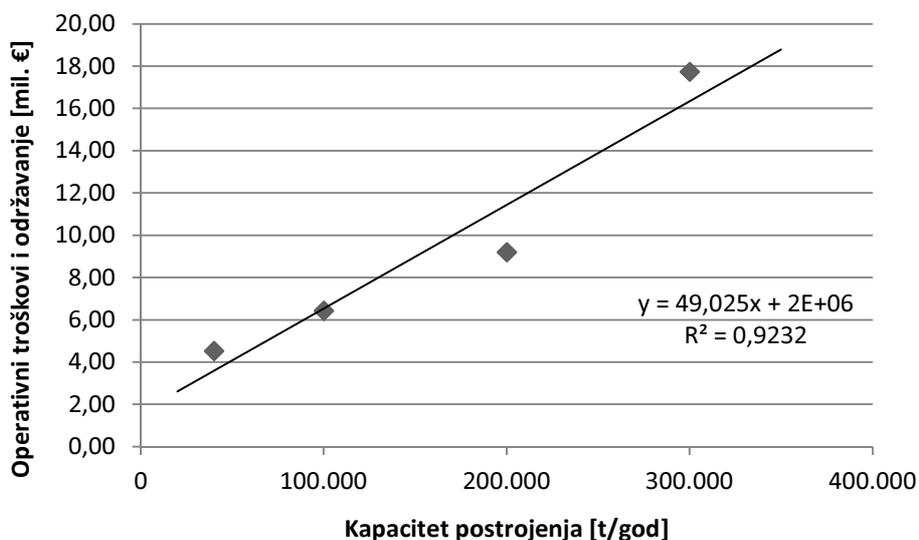
8.1.2. Pogonski troškovi i troškovi održavanja postrojenja za TOO

Pogonskih troškovi i troškovi održavanja su neophodni za ekonomsku analizu postrojenja te su prikazani u svom apsolutnom obliku i u obliku specifične vrijednosti po toni kapaciteta postrojenja. Specifične vrijednosti pogonskih troškovi i troškovi održavanja u ovome uzorku se kreću na razini od 46,00 €/t pa do 113,20 €/t ovisno od kapaciteta postrojenja. Usporedni prikaz investicijskih troškova se može vidjeti u tablici [Tablica 35.].

Tablica 35. Prikaz pogonskih troškova i troškova održavanja troškova postrojenja za TOO

Kapacitet [t/god]	Operativni troškovi i održavanje [€]	Specifični operativni troškovi i održavanje [€/t]	Referenca
40.000	4.528.021,00	113,20	[62]
100.000	6.427.360,00	64,27	[61]
200.000	9.200.000,00	46,00	[59],[60]
300.000	17.734.043,00	59,11	[62]

Ukoliko ove prethodno prikazane vrijednosti prikažemo u dijagramu može se vidjeti trend kretanja troškova u funkciji kapaciteta postrojenja [Slika 15.].



Slika 15. Ovisnost pogonskih troškova o veličini postrojenja za TOO

Kao što se može vidjeti, u slučaju operativnih troškova i troškova održavanja broj postrojenja za koje je bilo dostupnih podataka je relativno malen, ali i na samo četiri podatka može se izračunati trend. U ovome slučaju trend porasta ukupnih operativnih troškova i troškova održavanja kogeneracijskog postrojenja je aproksimiran, upotrebom metode najmanjih kvadrata, linearnom funkcijom (11):

$$C_{oio} = 49,025 \times q_m + 2 \times 10^6 \quad (11)$$

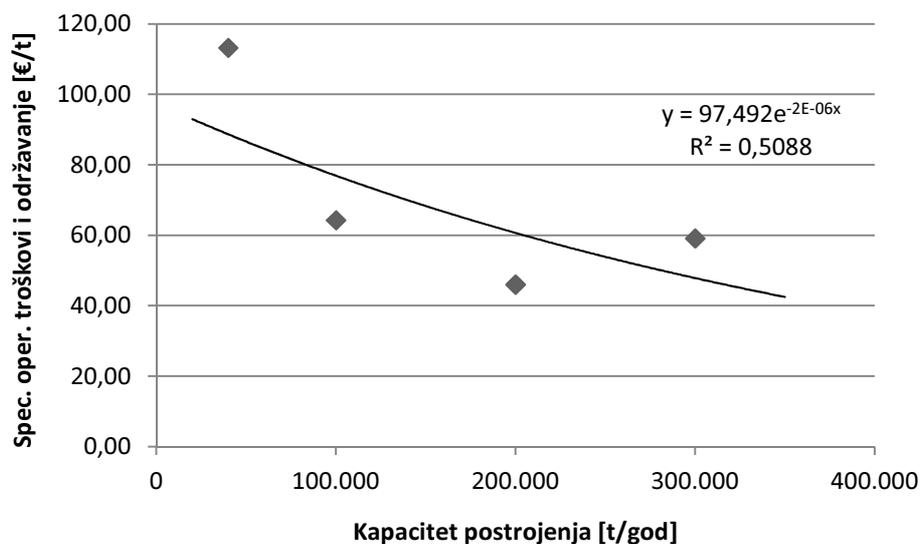
gdje je:

q_m : godišnji kapacitet postrojenja [t/god]

C_{oio} : iznos ukupne operativnih troškova i troškova održavanja [€].

Moguće je uvidjeti da ova funkcija relativno dobro aproksimira dostupne podatke.

Ukoliko se te ukupne troškove svede na specifične pogonske troškovi i troškove održavanja kogeneracijskih postrojenja, tako da se investicijski troškovi podijele s godišnjim kapacitetom postrojenja za termičku obradu otpada, dolazi se do podataka prikazanih u sljedećem dijagramu [Slika 16.].



Slika 16. Specifični pogonski troškovi u odnosu na veličinu postrojenja za TOO

U prethodnome dijagramu, koji pokazuje ovisnost operativnog troška i troška održavanja svedenog na godišnji kapacitet postrojenja, može se uočiti da je nešto teže uvidjeti trend zbog većega rasipanja u operativnim troškovima postrojenja koja su u uzorku. Ova bi se problem mogao riješiti povećanjem broja razmatranih postrojenja, međutim podatci o operativnim troškovima postrojenja za termičku obradu otpada su u većini slučajeva nedostupni i vlasnici postrojenja ih ne objavljuju. Međutim, i iz raspoloživih podataka se metodom najmanjih kvadrata došlo do reprezentativne funkcije koja aproksimira trend smanjenja specifičnih operativnih troškova s povećanjem kogeneracijskog postrojenja. Funkcija koja se dobila kao aproksimativna funkcija je eksponencijalna funkcija (12):

$$c_{oio} = 97,492 \times e^{-2E-06 \times q_m} \quad (12)$$

gdje je:

q_m : godišnji kapacitet postrojenja [t/god]

c_{oio} : iznos specifičnih operativnih troškova i troškova održavanja [€/t].

8.1.3. Učinkovitost postrojenja za TOO

Za bilo kakvu ocjenu energetskog postrojenja neophodno je poznavati učinkovitost energetske pretvorbe energije goriva koju omogućava. Kako je učinkovitost svakog parnoturbinskog postrojenja ovisi o parametrima pare na ulazu u turbinu, može se pretpostaviti da će ukupna učinkovitost energetske pretvorbe rasti s kapacitetom postrojenja.

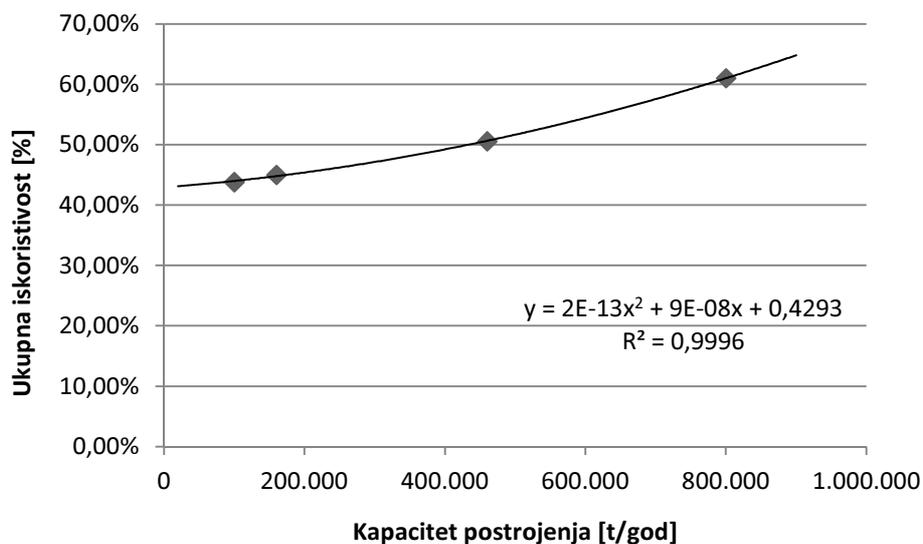
U dostupnim izvorima podataka za postrojenja za termičku obradu otpada učinkovitost postrojenja su rijetko eksplicitno navedene pa su za potrebe ovoga rada izračunate iz godišnje količine toplinske energije unesene gorivom (otpadom) u postrojenje te godišnjim proizvedenim količinama toplinske i električne energije. U postrojenjima koja su u ovome slučaju razmatrana ukupne učinkovitosti energetske pretvorbe se kreću od 43,82% pa do 61,01%, ovisno o veličini postrojenja. Usporedni prikaz ukupnih učinkovitosti razmatanih postrojenja se može vidjeti u sljedećoj tablici [Tablica 36.].

Tablica 36. Usporedni prikaz ukupnih učinkovitosti razmatanih postrojenja

Kapacitet [t/god]	Godina izgradnje	Ukupna učinkovitost [%]	Referenca
800.000	2004	61,01%	[25]
460.000	2007	50,56%	[25]
160.000	1999	45,00%	[25]
100.000	2010*	43,82%	[61]

* Godina objave znanstvenog rada

Ukoliko ove prethodno prikazane vrijednosti prikažemo u dijagramu može se vidjeti trend kretanja ukupne učinkovitosti energetske pretvorbe u funkciji kapaciteta postrojenja [Slika 17.].



Slika 17. Kretanje ukupne učinkovitosti postrojenja za TOO u funkciji kapaciteta

Iako je broj dostupnih podataka dosta malen, iz prethodnog dijagrama [Slika 17.] se može vidjeti da ovdje nema rasipanja podataka te da svi slijede trend koji je odlično aproksimiran polinomom drugoga reda (13):

$$\eta_{uk} = 2 \times 10^{-13} \times q_m^2 + 9 \times 10^{-8} \times q_m + 0,4293 \quad (13)$$

gdje je:

q_m : godišnji kapacitet postrojenja [t/god]

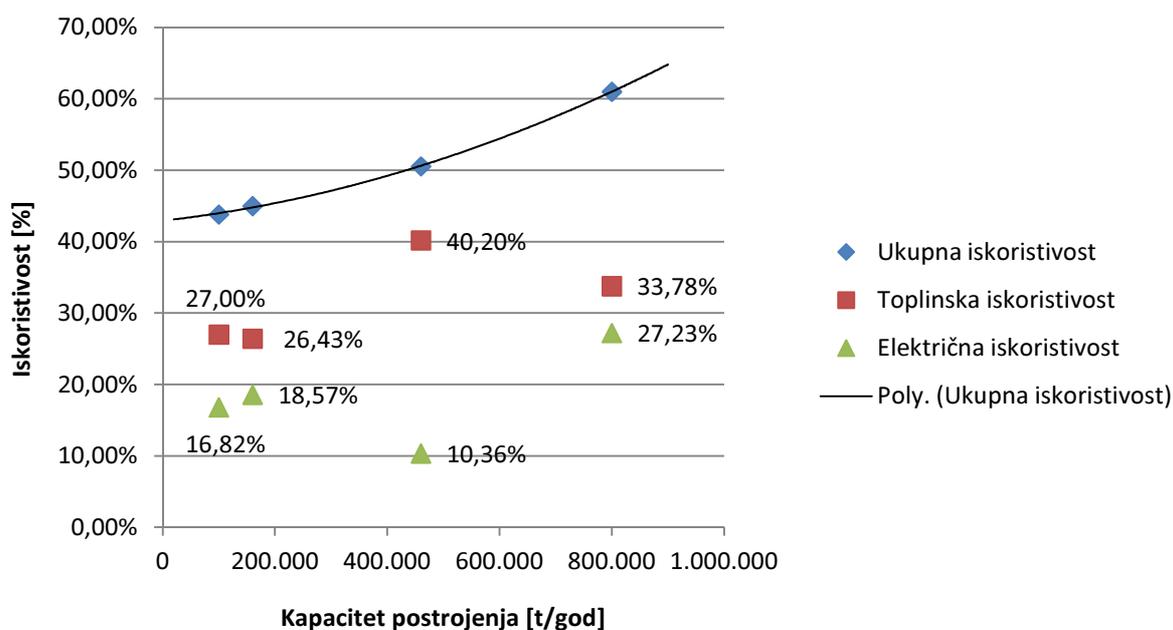
η_{uk} : iznos ukupne učinkovitosti energetske pretvorbe [%].

Što se tiče zasebne električne i toplinske učinkovitosti, njihove vrijednosti, za ista postrojenja, su navedene u tablici [Tablica 37.].

Tablica 37. Električne i toplinske učinkovitosti razmatranih postrojenja za TOO

Kapacitet [t/god]	Električna učinkovitost [%]	Toplinska učinkovitost [%]	Ukupna učinkovitost [%]	Referenca
800.000	27,23%	33,78%	61,01%	[25]
460.000	10,36%	40,20%	50,56%	[25]
160.000	18,57%	26,43%	45,00%	[25]
100.000	16,82%	27,00%	43,82%	[61]

Kako bi se lakše vidjelo kretanje i uočio eventualni trend kretanja električne i toplinske učinkovitosti kogeneracijskog postrojenja, ove su vrijednosti prikazane u dijagramu zajedno s iznosom ukupnog stupnja učinkovitosti postrojenja [Slika 18].

**Slika 18. Učinkovitosti razmatranih postrojenja za TOO u funkciji kapaciteta**

Uvidom u raspored točaka koje predstavljaju toplinsku i električnu učinkovitost u dijagramu na slici [Slika 18.] može se zaključiti da ovdje ne postoji neki trend u odnosu tih dvaju učinkovitosti. Ovo se i moglo očekivati jer se svako postrojenje konstruira prema zahtjevima investitora te odnos dobivene toplinske i električne energije, a s time i toplinske električne učinkovitost postrojenja varira od postrojenja do postrojenja.

8.2. Usporedba i analiza podataka o kogeneracijskim postrojenjima na biomasu u CTS-u

Prema prikupljenim podacima, o već postojećim postrojenjima čiji je pregled dan u poglavlju 5. ovoga rada, te studijama slučaja i podataka danih u okviru pojedinih znanstvenih radova [24] i [63] mogu se uočiti kretanja određenih veličina, kao što su investicijska cijena, troškovi pogona i održavanja, učinkovitosti energetske pretvorbe, itd., u ovisnosti o veličini postrojenja. Osim toga moguće je vidjeti koje se tehnologije najviše koriste za konstrukciju takvih postrojenja. Radi osiguranja veće točnosti podataka korišteni su samo podatci o postrojenjima s prostora Europske unije, kao i podatci iz studija slučaja koji su se bavili postrojenjima na prostoru EU.

Prema tim podacima, vidljivo je da se ovakva postrojenja većinom izvode kao postrojenja s izgaranjem biomase na rešetci ili u fluidiziranom sloju. Ovaj zaključak najviše ovisi o veličini postrojenja koja, kako će se vidjeti u nastavku rada, iznosi oko 40 MW ukupne instalirane snage. Prednost postrojenja na biomasu je u tome što ne moraju zadovoljiti tako rigorozne standarde zaštite okoliša i ljudi, kao što je slučaj s postrojenjima za TOO, što uvelike smanjuje cijenu investicije te troškove pogona i održavanja.

8.2.1. Investicijski troškovi postrojenja na biomasu

Što se tiče investicijskih troškova postrojenja u uzorku kogeneracijskih postrojenja na biomasu, za lakšu usporedbu ovi su troškovi prikazani u svom apsolutnom obliku te svedeni na specifične investicijske troškove po MW električne snage postrojenja. Specifične vrijednosti investicijskih troškova svedenih na MW električne snage kreću se na razini od 1.345 €/MW_e pa do 5.500 €/MW_e ovisno od električne snage postrojenja. Usporedni prikaz investicijskih troškova se može vidjeti u sljedećoj tablici [Tablica 38.].

Tablica 38. Investicijski troškovi razmatranih postrojenja

Ukupna snaga [MW]	Električna snaga [MW _e]	Toplinska snaga [MW _t]	Godina izgradnje	Investicijska cijena [€]	Specifična investicija [€/MW _e]	Referenca
7,20	1,20	6,00	2009	6.600.000,00	5.500,00	[63]
14,70	2,70	12,00	2009*	11.070.000,00	4.100,00	[63]
16,16	4,10	12,06	2006	18.813.403,00	4.588,63	[24][63]
18,70	4,70	14,00	1999	17.024.000,00	3.622,13	[24]
20,00	5,00	15,00	2010	27.000.000,00	5.400,00	[22]
21,90	4,90	17,00	2009	20.000.000,00	4.081,63	[23]
24,00	5,00	19,00	2008*	20.440.000,00	4.088,00	[63]
43,50	10,90	32,60	2010	30.000.000,00	2.752,29	[22]
44,70	14,70	30,00	2002	21.000.000,00	1.428,57	[58]
70,00	20,00	50,00	2001	26.900.000,00	1.345,00	[58]

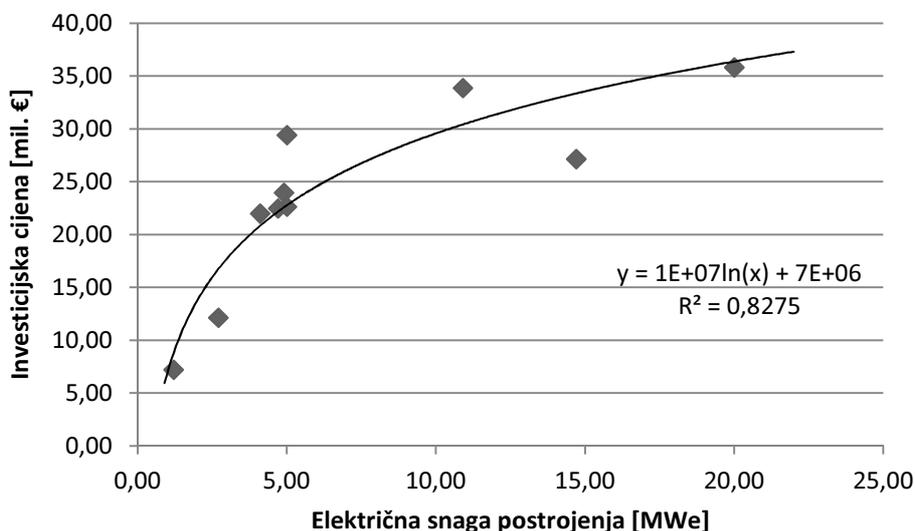
* Godina objave rada

Kao što se može vidjeti, postrojenja su puštena u pogon različitih godina te je i u ovome slučaju iznose troškova, da bi ih se moglo uspoređivati, potrebno svesti na vrijednost novca referentne godine. U sljedećoj tablici [Tablica 39.] navedeni su investicijski troškovi postrojenja iz uzorka, svedeni na vrijednost novca 2014. godine.

Tablica 39. Investicijski troškovi postrojenja iz uzorka svedeni na vrijednost novca 2014. godine

Ukupna snaga [MW]	Električna snaga [MW]	Toplinska snaga [MW]	Investicijska cijena svedena na sadašnju vrijednost [€]	Specifična investicija svedena na sadašnju vrijednost [€/MWe]
7,20	1,20	6,00	7.213.435,61	6.011,20
14,70	2,70	12,00	12.135.157,89	4.494,50
16,16	4,10	12,06	21.987.987,21	5.362,92
18,70	4,70	14,00	22.475.705,93	4.782,07
20,00	5,00	15,00	29.416.749,26	5.883,35
21,90	4,90	17,00	23.956.936,59	4.889,17
24,00	5,00	19,00	22.630.808,81	4.526,16
43,50	10,90	32,60	33.869.373,12	3.107,28
44,70	14,70	30,00	27.147.198,75	1.846,75
70,00	20,00	50,00	35.817.496,94	1.790,87

Ove se vrijednosti mogu prikazati u obliku dijagrama pri čemu se može uočiti postojanje trenda kretanja investicijske cijene u funkciji električne snage postrojenja [Slika 19.].



Slika 19. Ovisnost investicijskog troška o električnoj snazi postrojenja na biomasu

U prethodnom dijagramu [Slika 19.] može su uočiti da investicijska cijena većine postrojenja prati trend koji najbolje aproksimira logaritamska funkcija (14):

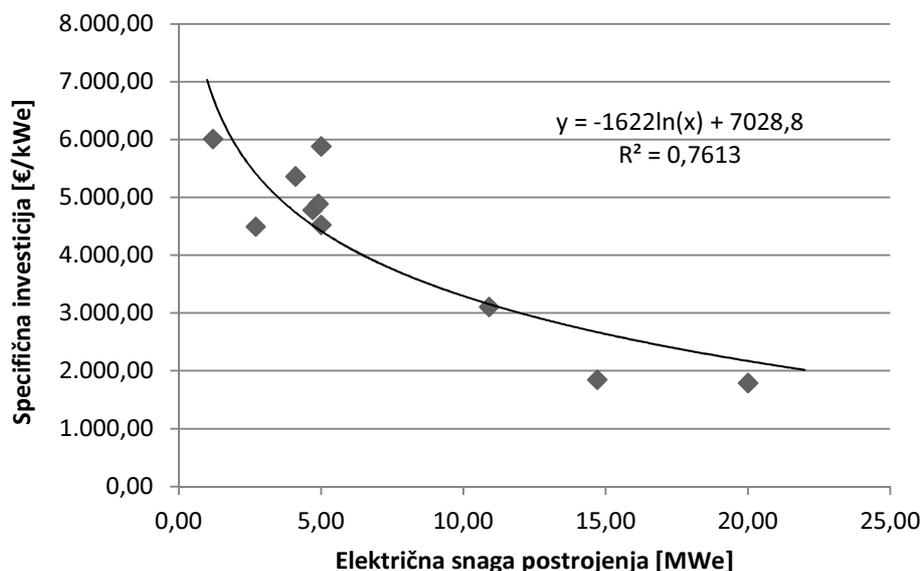
$$C_{inv} = 1 \times 10^7 \times \ln(P_{el}) + 7 \times 10^6 \quad (14)$$

gdje je:

P_{el} : električna snaga postrojenja [MW_e]

C_{inv} : iznos ukupne investicije [€].

Specifični investicijski troškovi u funkciji veličine postrojenja dobiveni su iz apsolutnih investicijskih troškova njihovim dijeljenjem s električnom snagom postrojenja za termičku obradu otpada. Grafički prikaz tako dobivenih rezultata može se vidjeti na sljedećem dijagramu [Slika 20.].



Slika 20. Ovisnost specifične investicije o električnoj snazi kogeneracijskog postrojenja

U dijagramu ovisnosti specifične investicije o električnoj snazi kogeneracijskog postrojenja [Slika 20.] može se zamijetiti da podatci iz uzorka prate trend koji je opisan logaritamskom funkcijom (15):

$$c_{inv} = -1622 \times \ln(P_{el}) + 7028,8 \quad (15)$$

gdje je:

P_{el} : električna snaga postrojenja [MW_e]

c_{inv} : iznos specifičnih investicijskih troškova [€/kWe].

Ova funkcija je također izvedena upotrebom metode najmanjih kvadrata.

8.2.2. Pogonski troškovi i troškovi održavanja postrojenja na biomasu

U nastavku ovoga rada dani su operativni troškovi, isključujući troškove goriva, i troškovi održavanja kogeneracijskih postrojenja na biomasu. Oni su prikazani u svom apsolutnom obliku i u obliku specifične vrijednosti po MW električne snage postrojenja. Specifične

vrijednosti pogonskih troškovi i troškovi održavanja po, kW ukupne snage postrojenja, u ovome uzorku se kreću na razini od 13,05 €/kW pa do 29,31 €/kW, ovisno od veličine postrojenja. Usporedni prikaz pogonskih troškova i troškova održavanja dan je sljedećom tablicom [Tablica 40.].

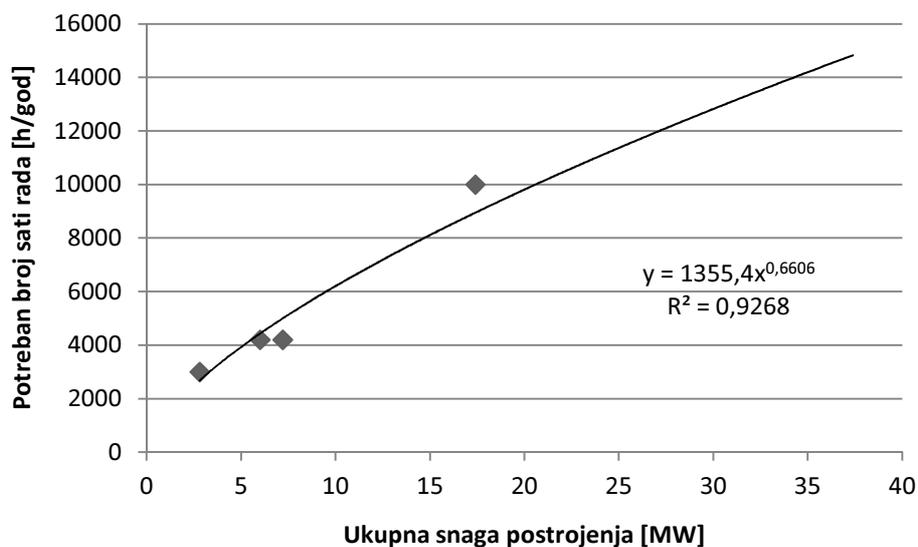
Tablica 40. Usporedni prikaz pogonskih troškova i troškova održavanja razmatranih postrojenja na biomasu

Ukupna snaga [MW]	Električna snaga [MW]	Toplinska snaga [MW]	Operativni troškovi i održavanje [€]	Specifični operativni troškovi i održavanje [€/kW _{uk}]	Referenca
7,20	1,20	6,00	211.004,46*	29,31	[63]
14,70	2,70	12,00	358.948,34*	24,42	[63]
16,16	4,10	12,06	794.157,00	49,13	[24][63]
18,70	4,70	14,00	594.854,00	31,81	[24]
20,00	5,00	15,00	721.817,76*	36,09	[22]
21,90	4,90	17,00	592.504,83*	27,06	[23]
24,00	5,00	19,00	613.116,73*	25,55	[63]
43,50	10,90	32,60	909.284,73*	20,90	[22]
44,70	14,70	30,00	699.709,77*	15,65	[58]
70,00	20,00	50,00	913.360,17*	13,05	[58]

* Izračunati podatci

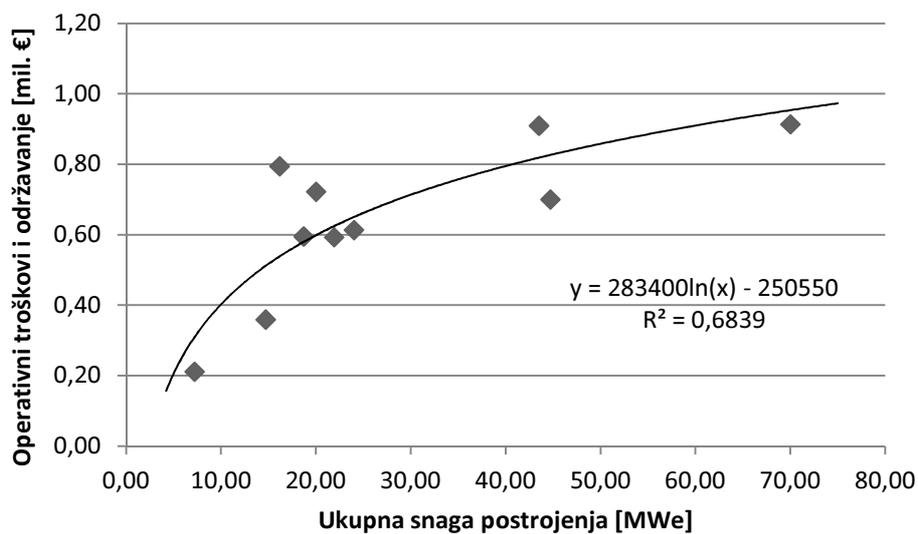
U tablici navedeni operativni troškovi s oznakom "*" su dobiveni na bazi izračuna [63] iz podataka o investicijskim troškovima i godišnje proizvedenoj toplinskoj energiji te troška osoblja, čija će metodologija biti opisana u nastavku, dok su ostali dobiveni na temelju podataka iz izvora.

Izračun operativnih troškova i održavanja baziran je na metodologiji koja je korištena u radu Lončar, D.; Krajačić, G. i Vujanović, M. [63], gdje su oni izračunati kao zbroj fiksnih i varijabilnih pogonskih troškova te troškova osoblja. Pogonski troškovi postrojenja definirani kao 2,2% investicije u fiksnom dijelu, te 0,14 €/MWh_t u varijabilnom dijelu (sveden na ekvivalentnu toplinsku energiju utrošenog goriva). Što se tiče troškovi osoblja, oni su dobiveni umnoškom potrebnog godišnjeg broja sati rada osoblja i cijene sata rada za koju je uzeta vrijednost od 12 €/h. Potreban godišnji broj radnih sati osoblja za pogon postrojenja je dobiven ekstrapolacijom iz podataka za četiri postrojenja [Slika 21.] [63].



Slika 21. Ovisnost broja sati rada osoblja o veličini postrojenja na biomasu

Ukoliko vrijednosti ukupnih operativnih troškova i troškova održavanja prikazane vrijednosti prikažemo u dijagramu, može se uočiti trend kretanja troškova u funkciji ukupne snage postrojenja [Slika 22.].



Slika 22. Ovisnost ukupnih operativnih troškova i troškova održavanja o veličini postrojenja na biomasu

Kao što se može vidjeti, u slučaju operativnih troškova i troškova održavanja, skupljeni podatci relativno dobro definiraju trend promjene operativnih troškova s promjenom veličine postrojenja. U ovome slučaju, upotrebom metode najmanjih kvadrata, podatci se mogu aproksimirati logaritamskom funkcijom (16):

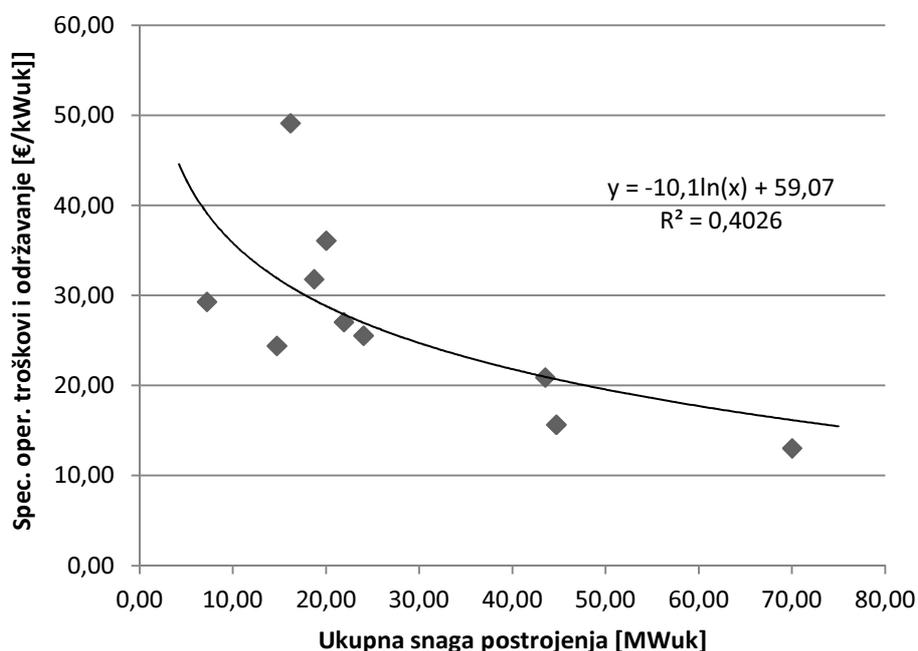
$$C_{oio} = 283400 \times \ln(P_{uk}) - 250550 \quad (16)$$

gdje je:

P_{uk} : ukupna snaga postrojenja [MW_{uk}]

C_{oio} : iznos ukupnih operativnih troškova i troškova održavanja [€].

Ukoliko se te ukupne troškove svede na specifične pogonske troškovi i troškove održavanja, dijeljenjem investicijskih troškova s ukupnom snagom kogeneracije, dolazi se do podataka prikazanih u sljedećem dijagramu [Slika 23.].



Slika 23. Ovisnost specifičnih operativnih troškova i troškova održavanja o veličini postrojenja na biomasu

U prethodnome dijagramu, koji pokazuje ovisnost operativnog troška i troška održavanja svedenog na ukupnu snagu postrojenja, trend kretanja vrijednosti je aproksimiran logaritamskom funkcijom (17):

$$c_{oio} = -10,1 \times \ln(P_{uk}) + 59,07 \quad (17)$$

gdje je:

P_{uk} : ukupna snaga postrojenja [MW_{uk}]

c_{oio} : iznos specifičnih operativnih troškova i troškova održavanja [€/kW_{uk}].

8.2.3. Učinkovitosti postrojenja na biomasu

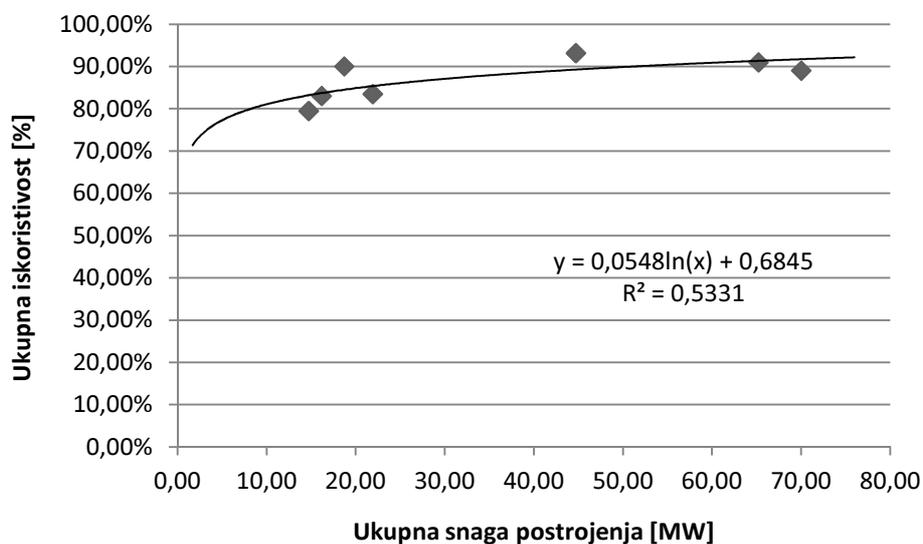
Obzirom da je glavna zadaća svakog energetskog postrojenja na tržištu ostvariti prihod prodajom proizvedene energije, jedan od najvažnijih parametara je stupanj učinkovitosti energetske pretvorbe. Kao i kod svakog parnoturbinskog postrojenja očekuje se da će ukupna učinkovitost među razmatranim postrojenjima rasti s povećanjem ukupne snage postrojenja. Ova je pretpostavka kod kogeneracijskih točna ukoliko razmatrana postrojenja stavljaju prioritet na proizvodnju istog energenta koji je u ovome slučaju toplinska energija.

Ovisno o dostupnim informacijama, učinkovitosti postrojenja na biomasu su uzete kako su navedene u samim izvorima ili izračunate iz godišnje količine toplinske energije unesene gorivom (biomasom) u postrojenje te godišnjim proizvedenim količinama toplinske i električne energije. U postrojenjima koja su u ovome slučaju razmatrana ukupne učinkovitosti energetske pretvorbe se kreću od 83,00% pa do 93,13%, ovisno o veličini postrojenja. Usporedni prikaz ukupnih učinkovitosti razmatranih postrojenja se može vidjeti u sljedećoj tablici [Tablica 41.].

Tablica 41. Usporedni prikaz ukupnih učinkovitosti razmatanih postrojenja na biomasu

Ukupna snaga [MW]	Električna snaga [MW]	Toplinska snaga [MW]	Ukupna učinkovitost	Referenca
14,70	2,70	12,00	79,46%	[63]
16,16	4,10	12,06	83,00%	[24][63]
18,70	4,70	14,00	90,00%	[24]
21,90	4,90	17,00	83,46%	[23]
44,70	14,70	30,00	93,13%	[58]
65,20	17,20	48,00	90,93%	[58]
70,00	20,00	50,00	89,00%	[58]

Iz prethodno navedenih vrijednosti prikazanih u dijagramu [Slika 24.] može se uočiti trend kretanja ukupne učinkovitosti energetske pretvorbe u funkciji veličine postrojenja.



Slika 24. Kretanje ukupne učinkovitosti energetske pretvorbe u funkciji veličine postrojenja na biomasu

U prethodnom dijagramu [Slika 24.] može se vidjeti da se vrijednosti ukupnih učinkovitosti iz uzorka mogu aproksimirati logaritamskom funkcijom (18):

$$\eta_{uk} = 0,0548 \times \ln(P_{uk}) + 0,6845 \quad (18)$$

gdje je:

P_{uk} : ukupna snaga postrojenja [MW_{uk}]

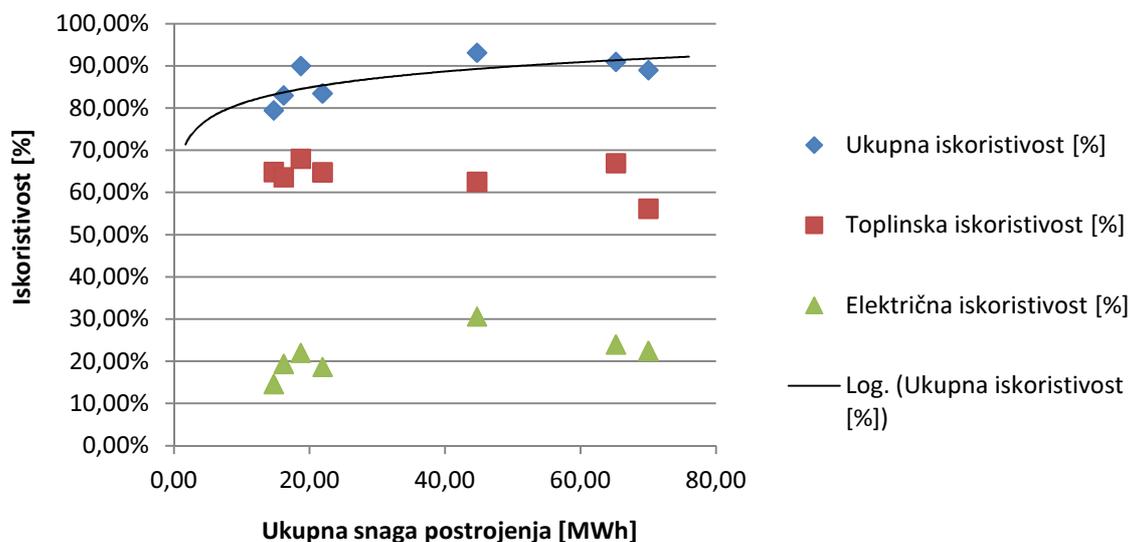
η_{uk} : iznos učinkovitosti ukupne energetske pretvorbe [%].

Što se tiče zasebne električne i toplinske učinkovitosti, njihove vrijednosti, su navedene u tablici [Tablica 42.].

Tablica 42. Električne i toplinske učinkovitosti razmatranih postrojenja na biomasu

Ukupna snaga [MW]	Električna snaga [MW]	Toplinska snaga [MW]	Električna učinkovitost [%]	Toplinska učinkovitost [%]	Ukupna učinkovitost [%]
14,70	2,70	12,00	14,60%	64,86%	79,46%
16,16	4,10	12,06	19,40%	63,60%	83,00%
18,70	4,70	14,00	22,00%	68,00%	90,00%
21,90	4,90	17,00	18,67%	64,79%	83,46%
44,70	14,70	30,00	30,63%	62,50%	93,13%
65,20	17,20	48,00	23,99%	66,95%	90,93%
70,00	20,00	50,00	22,47%	56,18%	89,00%

Kako bi se lakše vidjelo kretanje i uočio eventualni trend kretanja električne i toplinske učinkovitosti kogeneracijskog postrojenja, ove su vrijednosti prikazane u dijagramu zajedno s iznosom ukupnog stupnja učinkovitosti postrojenja [Slika 25.].



Slika 25. Usporedni prikaz učinkovitosti razmatranih postrojenja na biomasu

Uvidom u raspored točaka koje predstavljaju toplinsku i električnu učinkovitost u dijagramu [Slika 25.] može se uvidjeti da se u ovome prikazu ne može lagano uočiti trend ovisnosti u odnosu tih dvaju učinkovitosti. Međusobna ovisnost će se definirati pomoću odnosa električne i toplinske energije u sljedećim poglavljima.

8.3. Postrojenje za TOO CTS-a u Gradu Zagrebu

Uzimajući u obzir količinu otpada koju je potrebno zbrinuti po zatvaranju odlagališta otpada Prudinec u gradskom naselju Jakuševac 2018. godine, koja na godišnjoj razini iznosi ~222.000 tona miješanog komunalnog otpada koje dolazi s područja Grada Zagreba, neophodno je osmisliti trajni sustav zbrinjavanja miješanog komunalnog otpada. Prema odluci Grada Zagreba, planirana tehnologija za rješavanje ovoga problema je termička obrada otpada te se ovaj rad zbog toga i bazira na toj vrsti postrojenja.

Veličina postrojenja koja će se razmatrati u ovome radu kretati će se na razini od 230.000 tona miješanog komunalnog otpada godišnje. Ako se uzmu u obzir činjenice kao što je smanjenje broja stanovnika u Republici Hrvatskoj i kretanje prema sve većem udjelu primarnog

odvajanja otpada, tj. smanjenju produkcije miješanog komunalnog otpada, ne bi trebalo biti potrebno razmatrati postrojenja većeg kapaciteta.

Bazirajući se na podacima o postojećim postrojenjima za TOO u zemljama europske unije te na podacima iz studija slučaja moguće je doći do svih potrebnih parametara za ekonomsku analizu takvoga postrojenja. Pa tako upotrebljavajući jednadžbu (10), za postrojenje kapaciteta 230.000 t/god dobiva se specifični investicijski trošak od 595,53 €/t. Na isti način, upotrebljavajući prethodno izvedene jednadžbe dolazimo do podataka navedenih u sljedećoj tablici [Tablica 43.].

Tablica 43. Izračun potrebnih vrijednosti postrojenja za TOO

Kapacitet postrojenja - q_m [t/god]	Jednadžba	Specifični investicijski trošak - c_{inv} [€/t]
230.000	$c_{inv} = -22,88 \times \ln(q_m) + 878$	595,53

Kapacitet postrojenja - q_m [t/god]	Jednadžba	Specifični operativni trošak i održavanje - c_{oio} [€/t]
230.000	$c_{oio} = 97,492 \times e^{-2E-06q_m}$	61,55

Kapacitet postrojenja - q_m [t/god]	Jednadžba	Ukupna učinkovitost postrojenja - η_{uk} [%]
230.000	$\eta_{uk} = 2E-13 \times q_m^2 + 9E-08 \times q_m + 0,4293$	46,06

Što se tiče odnosa proizvodnje električne i toplinske energije pošto on nije definiran nikakvim odnosima te je specifičan za svako postrojenje, za njegov iznos je uzeta srednja vrijednost odnosa kod razmatranih postrojenja za TOO u CTS-ima koja iznosi 0,53. Iz ovoga odnosa i ukupne učinkovitosti postrojenja mogu se izračunati i toplinska i električna učinkovitost postrojenja. U ovom radu toplinska učinkovitost postrojenja je 30,18%, a 15,87% električna učinkovitost. Uz donju ogrjevnu vrijednost goriva od 10 MJ/kg te ukupni godišnji broj sati rada postrojenja dolazi se do svih potrebnih podataka za ekonomsku analizu postrojenja. Izračunati podatci su prikazani u sljedećoj tablici [Tablica 44.].

Tablica 44. Tehno-ekonomski podatci za razmatrano postrojenje za TOO

Razmatrano postrojenje za TOO:	
Kapacitet postrojenja [t/god]:	230.000,00
Specifična investicija [€/t]:	595,5273046
Specifični godišnji operativni troškovi [€/t]:	61,55
Ukupni stupanj učinkovitosti (η_{uk}) [%]:	46,06%
Odnos električne i toplinske energije:	0,53
Toplinska učinkovitost (η_t) [%]:	30,18%
Električna učinkovitost (η_e) [%]:	15,87%
Ukupni broj sati rada godišnje [47]:	7.500
Donja ogrjevna vrijednost otpada - Hd [MJ/kg]:	10,00
Toplinski kapacitet ložišta [MW_t]:	85,19
Ukupna snaga [MW_{uk}]:	39,23
Toplinska snaga [MW_t]:	25,71
Električna snaga [MW_e]:	13,52
Energija unesena gorivom [MWh/god]:	638.888,89
Proizvedena toplinska energija [MWh/god]:	192.846,05
Proizvedena električna energija [MWh/god]:	101.413,40
Investicija [€]:	136.971.280,06
Godišnji operativni trošak [€]:	14.155.374,19

8.4. Postrojenje na biomasu CTS-a u Gradu Zagrebu

Da bi se omogućila kvalitetnija ekonomska analiza te usporedba postrojenja baziranih na različitim gorivima, postrojenja moraju imati neku dodirnu točku. Kako se u ovome radu energetska postrojenja promatraju u kao dio CTS-a logično je da se kao dodirna točka definira količina proizvedene toplinske energije. Sljedeći tu pretpostavku referentna veličina postrojenja se dobila na bazi definirane toplinske snage postrojenja za TOO, pošto ono uz opskrbu CTS-a toplinskom energijom pruža i uslugu zbrinjavanja kompletnog otpada s područja Grada Zagreba, te se na bazi njegove izlazne toplinske snage modeliralo

kogeneracijsko postrojenje na biomasu. Iz tako zadanih podataka, da bi se došlo do parametara postrojenja na biomasu potrebno je odrediti odnos proizvodnje električne i toplinske energije. U ovome slučaju je taj odnos ekstrapolira iz podataka o toplinskoj i električnoj snazi postojećih postrojenja. Za ovu ekstrapolaciju korišteni su podatci iz sljedeće tablice [Tablica 45.].

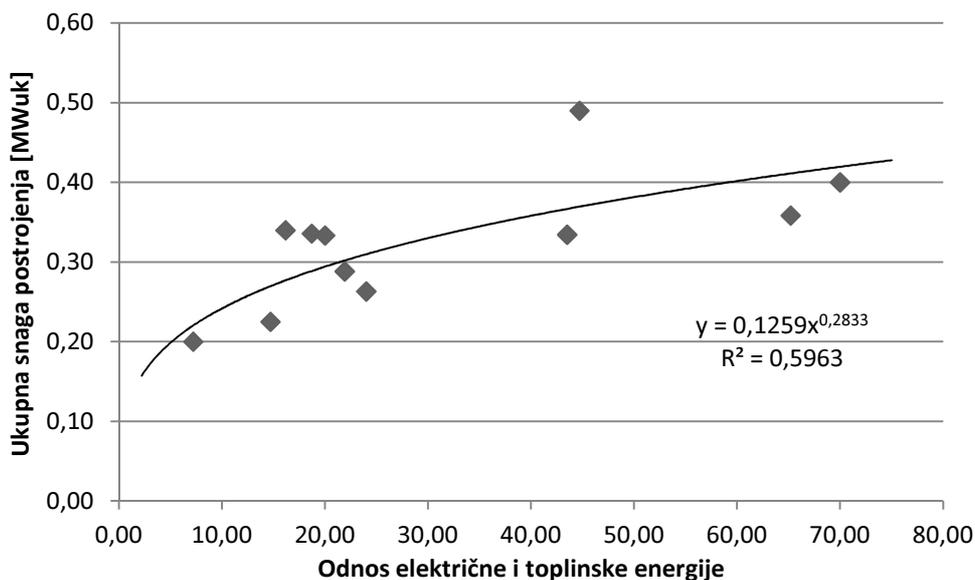
Tablica 45. Odnos proizvodnje električne i toplinske energije postrojenja na biomasu

Ukupna snaga - Puk [MW]	Električna snaga - Pel [MW]	Toplinska snaga - Pt [MW]	Odnos električne i toplinske energije - r	Referenca
7,20	1,20	6,00	0,200	[63]
14,70	2,70	12,00	0,225	[63]
16,16	4,10	12,06	0,340	[24][63]
18,70	4,70	14,00	0,336	[24]
20,00	5,00	15,00	0,333	[22]
21,90	4,90	17,00	0,288	[23]
24,00	5,00	19,00	0,263	[63]
43,50	10,90	32,60	0,334	[22]
44,70	14,70	30,00	0,490	[58]
65,20	17,20	30,00	0,573	[58]
70,00	20,00	50,00	0,400	[58]

Iznos odnosa električne i toplinske energije dobiven je primjenom jednadžbe .

$$r = \frac{P_{el}}{P_t} \quad (19)$$

Ako se prethodno navedeni odnosi prikažu u dijagramu [Slika 26.], iz njih je moguće ekstrapolirati funkciju koja najbolje opisuje kretanje odnosa električne i toplinske energije o veličini postrojenja.



Slika 26. Odnos proizvodnje električne i toplinske energije postrojenja na biomasu

Upotrebljavajući podatak o prethodno navedenoj ukupnoj snazi postrojenja i uz pretpostavku istog godišnjeg broja sati rada od 7.500 godišnje te ako se uzme donja ogrjevnu vrijednost drvene sječke od 3,4 kWh/kg [63], potreban je još samo podatak o ukupnoj učinkovitosti postrojenja kako bi se dobila potrebna količina drvene sječke.

Do podatka o ukupnoj učinkovitosti se dolazi upotrebom jednadžbe $\eta_{uk} = 0,0548 \times \ln(P_{uk}) + 0,6845$ (18), kako je prikazano u tablici [Tablica 46.].

Tablica 46. Izračun ukupne učinkovitosti postrojenja na biomasu

Ukupna neto snaga - P_{uk} [MW _{uk}]	Jednadžba	Ukupna učinkovitost postrojenja - η_{uk} [%]
34,54	$\eta_{uk} = 0,0548 \times \ln(P_{uk}) + 0,6845$	87,96%

Ukupna potrebne količine drvene sječke za pogon ovakvog postrojenja iznosi 86.627,32 tona godišnje. Ako ovaj podatak usporedimo s navedenom količinom dostupne drvene sječke u

okolnim županijama, koja je izračunata u poglavlju 7. ovoga rada, može se zaključiti da je dostupno dovoljno sječke za pogon ovakvoga postrojenja.

Uz definiranu električnu i toplinsku snagu postrojenja, na osnovi odnosa električne i toplinske energije, od 7,83 MW_e te 25,72 MW_t može se pristupiti upotrebi prethodno izvedenih jednadžbi trendova kako bi se došlo do specifičnih troškova investicije te troškova pogona. Ovi izračuni prikazani su u sljedećim tablicama [Tablica 47.] i [Tablica 48.].

Tablica 47. Izračun specifičnih investicijskih troškova postrojenja na biomasu

Električna snaga - P _{el} [MW _e]	Jednadžba	Specifični investicijski trošak - c _{inv} [€/kW _e]
8,83	$c_{inv} = -1622 \times \ln(P_{el}) + 7028,8$	3.495,87

Tablica 48. Izračun specifičnih pogonskih troškova postrojenja na biomasu

Ukupna neto snaga - P _{uk} [MW _{uk}]	Jednadžba	Specifični operativni trošak i održavanje - c _{oio} [€/kW _{uk}]
34,54	$c_{oio} = -10,1 \times \ln(P_{uk}) + 59,07$	23,29

U tablici [Tablica 49.] dan je pregled svih dobivenih parametara postrojenja, na osnovi prethodno izračunatih podataka.

Tablica 49. Tehno-ekonomski podatci za razmatrano postrojenje na biomasu

Razmatrano postrojenje na biomasu:	
Kapacitet postrojenja [t/god]:	86.627,32
Specifična investicija [€/kW _e]:	3.495,87
Specifični godišnji operativni troškovi [€/kW _{uk}]:	23,29
Ukupni stupanj učinkovitosti (η_{uk}) [%]:	87,96%
Odnos električne i toplinske energije:	0,34
Toplinska učinkovitost (η_t) [%]:	65,47%
Električna učinkovitost (η_e) [%]:	22,49%
Ukupni broj sati rada godišnje [47]:	7.500
Donja ogrjevna vrijednost sječke - H _d [kWh/kg]:	3,4
Toplinski kapacitet ložišta [MW _t]:	39,27
Ukupna snaga [MW _{uk}]:	34,54
Toplinska snaga [MW _t]:	25,71
Električna snaga [MW _e]:	8,83
Energija unesena gorivom [MWh/god]:	294.532,90
Proizvedena toplinska energija [MWh/god]:	192.846,05
Proizvedena električna energija [MWh/god]:	66.223,33
Investicija [€]:	30.867.784,92
Godišnji operativni trošak [€]:	804.629,83

9. EKONOMSKA ANALIZA

U nastavku rada biti će dana ekonomska analiza pogona kogeneracijskih postrojenja za TOO i postrojenja na biomasu. Ekonomska analiza postrojenja će biti dana kroz izračun unutarnje stope povrata (eng. *Internal rate of return (IRR)*) investicije koja predstavlja iznos diskontne stope koja izjednačava neto sadašnju vrijednost s nulom.

9.1. Postrojenje za TOO CTS-a u Gradu Zagrebu

9.1.1. Izračun unutarnje stope povrata investicije

Što se prihodovne strane tiče, primarni prihodi koje ovo postrojenje ostvaruje, ostvaruju se na račun naknade za zbrinjavanje otpada (eng. *gate fee*) te prodaje električne i toplinske energije u energetske sustave. Iznos naknade za zbrinjavanje otpada u zemljama EU kreće se od 46 €/t pa do 174 €/t [57] te je za potrebe ovoga rada uzeta srednja vrijednost od 110 €/t. Za cijenu toplinske energije je uzet iznos izračunat na temelju vrijednosti iz cjenika HEP-Toplinarstva d.o.o. za grad zagreb (čiji je izvod dan tablicom [Tablica 22.]). Uzeta vrijednost je vrijednost izračunata iz tarifne stavke energija za kućanstva i industriju i poslovne potrošače čiji je doprinos konačnoj cijeni jednak udjelu pojedinog sektora u ukupnoj potrošnji energije u CTS Zagreb [30]. Što se tiče cijena otkupa električne energije ona je određena prema Tarifnom sustavu za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije [64]. Prema Tarifnom sustavu, pošto je ukupna učinkovitost energetske pretvorbe ispod 50% upotrebljava se referentna cijena električne energije "RC" čiji je iznos definiran kao "cijena jednaka iznosu važeće tarifne stavke za radnu energiju po jedinstvenoj dnevnoj tarifi za opskrbu električnom energijom u okviru univerzalne usluge, tarifni model Plavi čiji je iznos određen člankom 39. stavkom 2. točkom 1.". Period na koji se potpisuje ugovor o otkupu električne energije po ovim tarifama je 14 godina te će se na toj vremenskoj bazi i izračunavati ekonomska isplativost investicije.

Uz te prihode, moguće je ostvariti i prihode od prodaje sekundarnih metala koji se separiraju iz nastalog pepela. Iz podataka iz znanstvenog rada, Schneider, D.R., Lončar, D. i Bogdan, Ž.[61], o izlaznoj količini aluminijskog i željeznog može se dobiti iznos prinosa tih metala po toni

obrađenog otpada. Tako izračunat prinos željeza iznosi 0,024 tona po toni otpada, dok prinos aluminijske 0,004 tone po toni otpada. Cijena otkupa sekundarnih sirovina je uzeta od lokalnih otkupljivača [65].

Što se tiče ukupnih rashoda, oni su jednaki troškovima pogona i održavanja postrojenja, te ovisno o načinu financiranja, anuitetu za otplatu investicijskih troškova postrojenja. Obzirom da se u ovome radu ekonomska analiza provodi metodom izračuna unutarnje stope povrata, neće biti provedeno financiranje kredita nego će ukupni investicijski trošak biti samo amortizirani po godinama eksploatacije postrojenja kako bi se umanjio iznos plaćenog poreza na dobit. Sve uzete cijene, prihodi i rashodi prikazani su u sljedećoj tablici [Tablica 50].

Tablica 50. Prikaz cijena, prihoda i rashoda postrojenja za TOO

Troškovi:	
Ukupni investicijski troškovi [€]:	136.971.280,06
Troškovi pogona i održavanja [€/god]:	14.155.374,19
Prihodi:	
Količina obrađenog otpada [t/god]:	230.000,00
Naknada za zbrinjavanje otpada [€/t]:	110,00
Prihod od naknade za zbrinjavanje otpada [€/god]:	25.300.000,00
Prinos sekundarnog željeza [t/t _{otpada}]:	0,0240
Prinos sekundarnog aluminijske [t/t _{otpada}]:	0,0040
Količina sekundarnog željeza [t/god]:	5.520,00
Količina sekundarnog aluminijske [t/god]:	920,00
Cijena sekundarnog željeza [€/t]:	105,26
Cijena sekundarnog aluminijske [€/t]:	657,89
Prihod od prodaje sekundarnog željeza [€/god]:	581.052,63
Prihod od prodaje sekundarnog aluminijske [€/god]:	605.263,16
Proizvedena električna energija [MWh/a]:	101.413,40
Proizvedena toplinska energija [MWh/a]:	192.846,05
Prodajna cijena električne energije [€/kWh]:	0,0770
Prodajna cijena toplinske energije [€/kWh]:	0,0281
Prihod od prodaje električne energije [€/god]	7.811.214,71
Prihod od prodaje toplinske energije [€/god]	5.413.410,08

Investicijski troškovi su razbijeni na temelju primjera postrojenja [61] na povezive elemente na koje se može primijeniti isti amortizacijski period [Tablica 51].

Tablica 51. Struktura investicijskih troškova i amortizacijski periodi postrojenja za TOO

	Udio u investicijskim troškovima	Iznos	Amortizacija [god]
Ukupni investicijski troškovi [€]:	1	136.971.280,1	
Infrastruktura i spremište otpada [€]:	0,08171	11.191.259,12	20
Komponente postrojenja [€]:	0,56306	77.122.372,61	15
Projektiranje [€]:	0,03552	4.865.764,834	5
Izgradnja [€]:	0,12433	17.030.176,92	20
Elektro-mehaničke instalacije [€]:	0,08881	12.164.412,08	15
Ostali investicijski troškovi [€]:	0,10657	14.597.294,5	15

Za izračun unutarnje stope povrata investicije uzet je period trajanja ugovora o otkupu električne energije od 14 godina, dok je stopa poreza na dobit 20%. Za ocjenu isplativosti investicije pretpostavljen je kredit HBOR-a s kamatnom stopom od 4% te diskontna stopa u iznosu od 9%. Ekonomski tok novca ovakve investicije prikazan je u sljedećoj tablici [Tablica 52].

Tablica 52. Ekonomski tok novca postrojenja za TOO

God	Bruto dobit	Amortizacija po godinama	Porezna osnovica	Porez	Tok novca
0	-136.971.280,06 €				-136.971.280,06 €
1	25.555.566,39 €	9.309.830,05 €	16.245.736,34 €	3.249.147,27 €	22.306.419,12 €
2	25.555.566,39 €	9.309.830,05 €	16.245.736,34 €	3.249.147,27 €	22.306.419,12 €
3	25.555.566,39 €	9.309.830,05 €	16.245.736,34 €	3.249.147,27 €	22.306.419,12 €
4	25.555.566,39 €	9.309.830,05 €	16.245.736,34 €	3.249.147,27 €	22.306.419,12 €
5	25.555.566,39 €	9.309.830,05 €	16.245.736,34 €	3.249.147,27 €	22.306.419,12 €
6	25.555.566,39 €	8.336.677,08 €	17.218.889,31 €	3.443.777,86 €	22.111.788,53 €
7	25.555.566,39 €	8.336.677,08 €	17.218.889,31 €	3.443.777,86 €	22.111.788,53 €
8	25.555.566,39 €	8.336.677,08 €	17.218.889,31 €	3.443.777,86 €	22.111.788,53 €
9	25.555.566,39 €	8.336.677,08 €	17.218.889,31 €	3.443.777,86 €	22.111.788,53 €
10	25.555.566,39 €	8.336.677,08 €	17.218.889,31 €	3.443.777,86 €	22.111.788,53 €
11	25.555.566,39 €	8.336.677,08 €	17.218.889,31 €	3.443.777,86 €	22.111.788,53 €
12	25.555.566,39 €	8.336.677,08 €	17.218.889,31 €	3.443.777,86 €	22.111.788,53 €
13	25.555.566,39 €	8.336.677,08 €	17.218.889,31 €	3.443.777,86 €	22.111.788,53 €
14	25.555.566,39 €	8.336.677,08 €	17.218.889,31 €	3.443.777,86 €	22.111.788,53 €
				IRR:	13,45%

Bruto dobit iz prethodne tablice [Tablica 52.] je dobivena kao razlika godišnjih prihoda i rashoda postrojenja (20).

$$\text{Bruto dobit} = \text{Prihod} - \text{Rashod} \quad (20)$$

Stavke prihod i rashod su izračunate na bazi prihoda i troškova prikazanih u prethodnom dijelu ovoga poglavlja [Tablica 50.]. Tako je prihod definirani prema jednadžbi (21),

$$\begin{aligned} \text{Prihod} = & \text{Prihod od naknade za zbrinjavanje otpada} \\ & + \text{Prihod od podaje sekundarnih sirovina} \\ & + \text{Prihod od prodaje električne energije} \\ & + \text{Prihod od prodaje toplinske energije} \end{aligned} \quad (21)$$

dok je u ovome slučaju rashod jednak troškovima pogona i održavanja.

Unutarnja stopa povrata ove investicije iznosi 13,45%. Za razmatrani period povrata investicije od 14 godine i diskontnu stopu od 9%, ovaj iznos unutarnje stope povrata je dosta dobar te se izgradnja ovakvog postrojenja može smatrati isplativom. Međutim, postoje razni faktori koji utječu na isplativost projekta. U nastavku ćemo razmotriti utjecaj promjene nekih od cijena i naknada na promjenu unutarnje stope povrata investicije

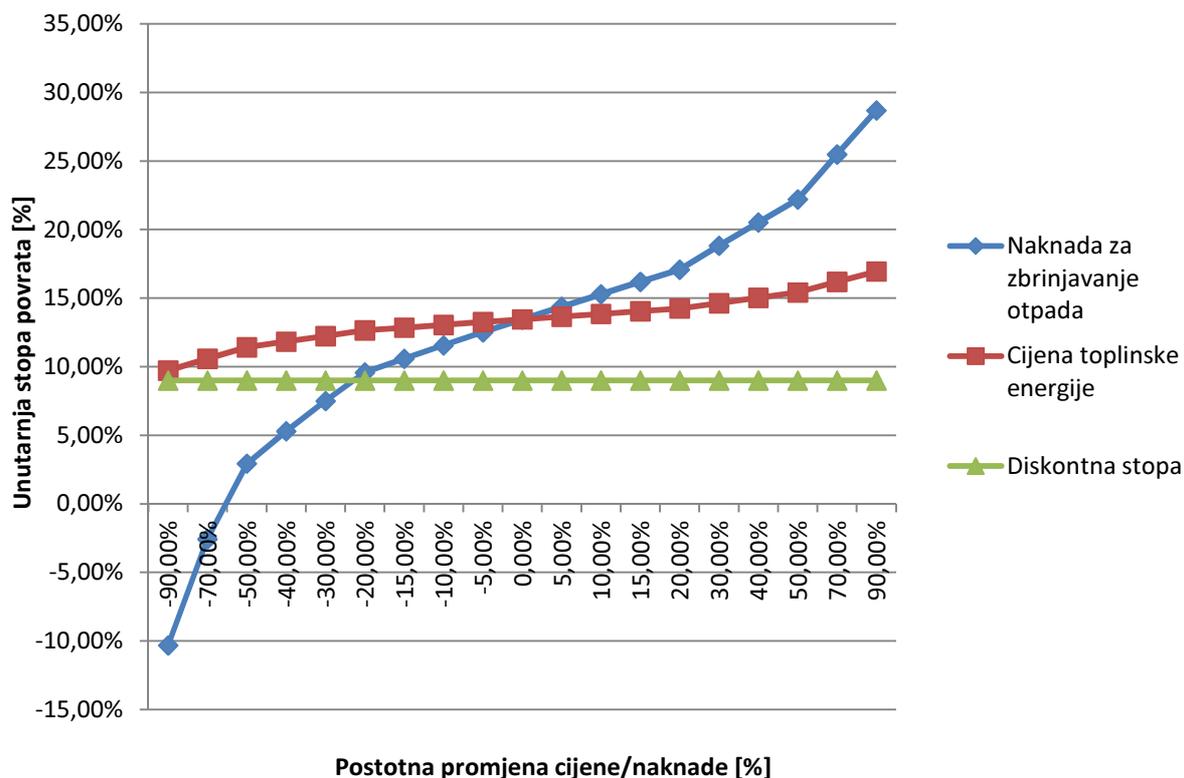
9.1.2. Analiza osjetljivosti

Obzirom da je primarna namjena postrojenja za termičku obradu otpada upravo zbrinjavanje i energetska uporaba komunalnog otpada logično je da je naknada za zbrinjavanje jedan od glavnih parametara isplativosti investicije te će sigurno biti sagledan utjecaj promjene iznosa ove naknade na ekonomsku isplativost postrojenja. Kako se cijeli ovaj rad bazira na postrojenjima koji su dio centraliziranih toplinskih sustava druga veličina čiji će se utjecaj na isplativost promatrati je cijena toplinske energije. Tablicom [Tablica 53.] prikazan je utjecaj promjene prethodno navedenih veličina, u rasponu od +90% pa do -90%, na unutarnju stopu povrata investicije.

Tablica 53. Utjecaj promjene cijene toplinske energije i naknade za zbrinjavanje otpada na IRR postrojenja za TOO

Promjena cijene/naknade	Promjena IRR u funkciji promjene cijene toplinske energije	Promjena IRR u funkciji promjene naknade za zbrinjavanje otpada
-90,00%	9,72%	-10,31%
-70,00%	10,58%	-2,57%
-50,00%	11,42%	2,93%
-40,00%	11,83%	5,30%
-30,00%	12,24%	7,50%
-20,00%	12,65%	9,57%
-15,00%	12,85%	10,57%
-10,00%	13,05%	11,55%
-5,00%	13,25%	12,51%
0,00%	13,45%	13,45%
5,00%	13,65%	14,38%
10,00%	13,85%	15,29%
15,00%	14,05%	16,19%
20,00%	14,24%	17,07%
30,00%	14,64%	18,82%
40,00%	15,03%	20,52%
50,00%	15,42%	22,20%
70,00%	16,18%	25,48%
90,00%	16,94%	28,68%

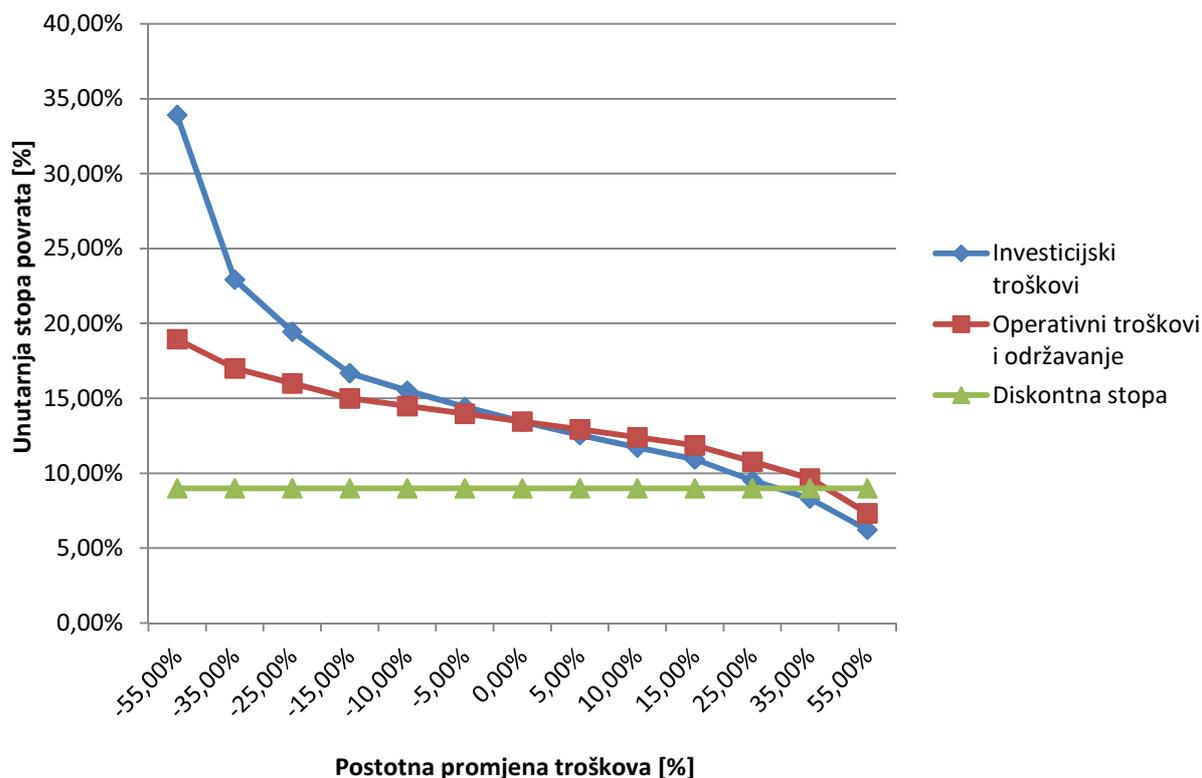
Za lakši prikaz kretanja i usporedbu, prethodno navedene promjene prikazane su u dijagramu [Slika 27.].



Slika 27. Utjecaj promjene cijene toplinske energije i naknade za zbrinjavanje otpada na IRR postrojenja za TOO

Kao što se može vidjeti, utjecaj promjene iznosa naknade za zbrinjavanje otpada ima puno veći utjecaj na isplativost investicije od promjene cijene toplinske energije. Ovo je logična promjena ako se uzme u obzir iznos naknade i količinu godišnje obrađenog otpada. Osim toga, može se vidjeti da prilikom smanjenja ove naknade, ili subvencije, za više od 20% postrojenje za termičku obradu otpada, u slučaju diskontne stope od 9%, ne može biti isplativo. Što se tiče promjene cijene toplinske energije, ona u slučaju ovoga postrojenja ima relativno malen utjecaj na promjenu unutarnje stope povrata investicije ali ukoliko postrojenje ne bi ostvarivalo prihod od prodaje toplinske energije investicija bi u ovom slučaju bila samo marginalno isplativa.

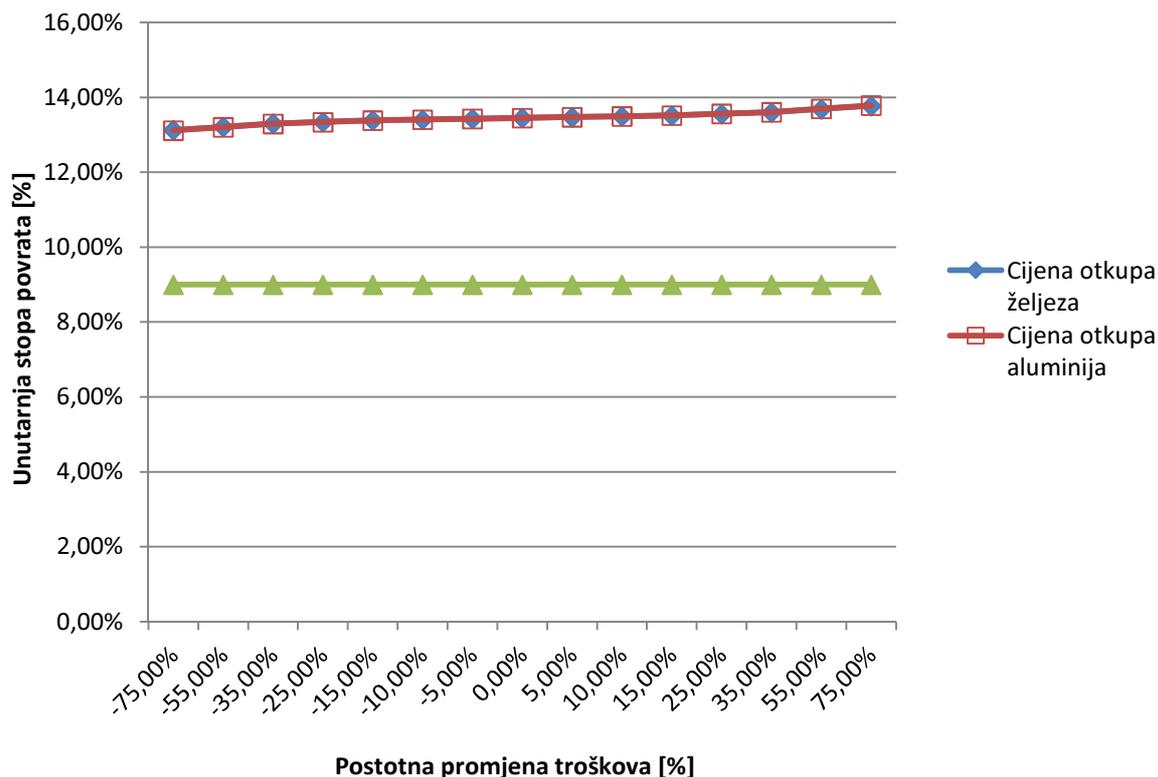
U ovome poglavlju ćemo još ukratko sagledati utjecaj promjene investicijske cijene i operativnih troškova i troškova održavanja na isplativost postrojenja, koja se može vidjeti na sljedećem dijagramu [Slika 28.].



Slika 28. Utjecaj promjene investicijske cijene i operativnih troškova i troškova održavanja na unutarnju stopu povrata investicije postrojenja za TOO

Kao što se može vidjeti, veći utjecaj na promjenu unutarnje stope povrata investicije ima promjena investicijskih troškova u odnosu na utjecaj promjene operativnih troškova i troškova održavanja, međutim prilikom povećanja troškova bilo koje od ove dvije vrijednosti za više od 35% investicija postaje neisplativa.

Osim toga, postrojenje za TOO ima još jedan prihod, a to je prihod od prodaje sekundarnih sirovina. U ovome slučaju je razmatran utjecaj promjene otkupne cijene željeza i aluminija na isplativost investicije [Slika 29].



Slika 29. Utjecaj promjene cijena otkupa sekundarnih sirovina na unutarnju stopu povrata investicije postrojenja za TOO

Prema prethodnoj slici se lako može uočiti da je utjecaj promjene obaju cijena vrlo sličan po iznosu i skoro pa zanemariv. Promjena cijene otkupa željeza i aluminija za -75% uzrokuje smanjenje unutarnje stope povrata investicije za svega 0,32% odnosno 0,34%.

9.2. CTS postrojenje na biomassu Gradu Zagrebu

9.2.1. Izračun unutarnje stope povrata investicije

Što se prihodovne strane tiče, primarni prihodi koje ovo postrojenje ostvaruje je na račun prodaje električne i toplinske energije u energetske sustave. Iznos cijene drvene sječke s prijevozom na lokaciji postrojenja (Zagreb, Resnik) je za potrebe ovoga rada izračunata upotrebom već gotovog modela za izračun cijene biomase na pragu postrojenja [70]. Uz cijenu drvene sječke na šumskome putu od 32 €/t te potrebnu količinu od 90.000 tona sječke godišnje, dobivena cijena na pragu postrojenja iznosi 41,23 €/t. Što se tiče otkupne cijene toplinske energije, ona je izračunata na temelju vrijednosti iz cjenika HEP-Toplinarstva d.o.o. za grad zagreb (čiji je izvod dan tablicom [Tablica 22.]). Uzeta vrijednost je vrijednost

izračunata iz tarifne stavke energija za kućanstva i industriju i poslovne potrošače čiji je doprinos konačnoj cijeni jednak udjelu pojedinog sektora u ukupnoj potrošnji energije u CTS Zagreb [30]. Što se tiče cijena otkupa električne energije ona je određena prema Tarifnom sustavu za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije [64]. Prema Tarifnom sustavu, pošto je ukupna učinkovitost energetske pretvorbe iznad 50% upotrebljava referentna cijena električne energije "RC" uvećana za korekcijski faktor 1,2. Period na koji se potpisuje ugovor o otkupu električne energije po ovim tarifama je 14 godina te će se na toj vremenskoj bazi i izračunavati ekonomska isplativost investicije.

Što se tiče rashoda ovoga postrojenja, oni su jednaki troškovima pogona i održavanja postrojenja te, ovisno o financiranju, anuitetu za otplatu investicijskih troškova postrojenja. Obzirom da se u ovome radu ekonomska analiza provodi metodom izračuna unutarnje stope povrata, neće biti provođeno financiranje kredita nego će ukupni investicijski trošak biti samo amortizirani po godinama eksploatacije postrojenja kako bi se umanjio iznos plaćenog poreza na dobit. Sve uzete cijene, prihodi i rashodi prikazani su u sljedećoj tablici [Tablica 54.].

Tablica 54. Prikaz cijena, prihoda i rashoda postrojenja na biomasu

Troškovi:	
Ukupni investicijski troškovi [€]:	30.867.784,92
Troškovi pogona i održavanja [€/god]:	804.627,32
Potrebna količina biomase [t/god]:	86.627,30
Cijena drvene sječke [€/t]:	41,23
Godišnji trošak za gorivo [€/god]:	3.571.644,53
Prihodi:	
Proizvedena električna energija [MWh/a]:	66.223,33
Proizvedena toplinska energija [MWh/a]:	192.846,05
Prodajna cijena električne energije [€/kWh]:	0,0924
Prodajna cijena toplinske energije [€/kWh]:	0,0281
Prihod od prodaje električne energije [€/god]	6.120.903,31
Prihod od prodaje toplinske energije [€/god]	5.413.410,08

Investicijski troškovi su razbijeni na temelju primjera postrojenja [63] na povezive elemente na koje se može primijeniti isto amortizacijsko razdoblje [Tablica 55.].

Tablica 55. Struktura investicijskih troškova i amortizacijski periodi postrojenja na biomasu

	Udio u investicijskim troškovima	Iznos	Amortizacija [god]
Ukupni investicijski troškovi [€]:	1	30.867.784,92	
Infrastruktura i spremište otpada [€]:	0,0660	2.037.273,80	20
Komponente postrojenja [€]:	0,4590	14.168.313,28	15
Projektiranje [€]:	0,0470	1.450.785,89	5
Izgradnja [€]:	0,2550	7.871.285,15	20
Elektro-mehaničke instalacije [€]:	0,0740	2.284.216,08	15
Ostali investicijski troškovi [€]:	0,0990	3.055.910,71	15

Za izračun unutarnje stope povrata investicije uzet je period trajanja ugovora o otkupu električne energije od 14 godina, dok je stopa poreza na dobit 20%. Za ocjenu isplativosti investicije je također pretpostavljena diskontna stopa od 9%. Ekonomski tok novca ovakve investicije prikazan je u sljedećoj tablici [Tablica 56.].

Tablica 56. Ekonomski tok novca postrojenja na biomasu

God	Bruto dobit	Amortizacija po godinama	Porezna osnovica	Porez	Tok novca
0	-30.867.784,92 €				-30.867.784,92 €
1	7.158.039,02 €	2.086.147,80 €	5.071.891,22 €	1.014.378,24 €	6.143.660,78 €
2	7.158.039,02 €	2.086.147,80 €	5.071.891,22 €	1.014.378,24 €	6.143.660,78 €
3	7.158.039,02 €	2.086.147,80 €	5.071.891,22 €	1.014.378,24 €	6.143.660,78 €
4	7.158.039,02 €	2.086.147,80 €	5.071.891,22 €	1.014.378,24 €	6.143.660,78 €
5	7.158.039,02 €	2.086.147,80 €	5.071.891,22 €	1.014.378,24 €	6.143.660,78 €
6	7.158.039,02 €	1.795.990,62 €	5.362.048,40 €	1.072.409,68 €	6.085.629,34 €
7	7.158.039,02 €	1.795.990,62 €	5.362.048,40 €	1.072.409,68 €	6.085.629,34 €
8	7.158.039,02 €	1.795.990,62 €	5.362.048,40 €	1.072.409,68 €	6.085.629,34 €
9	7.158.039,02 €	1.795.990,62 €	5.362.048,40 €	1.072.409,68 €	6.085.629,34 €
10	7.158.039,02 €	1.795.990,62 €	5.362.048,40 €	1.072.409,68 €	6.085.629,34 €
11	7.158.039,02 €	1.795.990,62 €	5.362.048,40 €	1.072.409,68 €	6.085.629,34 €
12	7.158.039,02 €	1.795.990,62 €	5.362.048,40 €	1.072.409,68 €	6.085.629,34 €
13	7.158.039,02 €	1.795.990,62 €	5.362.048,40 €	1.072.409,68 €	6.085.629,34 €
14	7.158.039,02 €	1.795.990,62 €	5.362.048,40 €	1.072.409,68 €	6.085.629,34 €
				IRR:	17,84%

Bruto dobit iz prethodne tablice [Tablica 56.] je dobivena kao razlika godišnjih prihoda i rashoda postrojenja (20).

$$\text{Bruto dobit} = \text{Prihod} - \text{Rashod} \quad (22)$$

Stavke prihod i rashod su izračunate na bazi prihoda i troškova prikazanih u prethodnom dijelu ovoga poglavlja [Tablica 54.]. Tako je prihod definirani prema jednadžbi (23),

$$\begin{aligned} \text{Prihod} = & \text{Prihod od prodaje električne energije} \\ & + \text{Prihod od prodaje toplinske energije} \end{aligned} \quad (23)$$

dok je rashod definiran jednadžbom (24).

$$\text{Rashod} = \text{Troškovi pogona i održavanja} + \text{Godišnji trošak za gorivo} \quad (24)$$

Unutarnja stopa povrata ove investicije iznosi 17,84%. Za razmatrani period povrata investicije od 14 godine i diskontnu stopu od 9%, ovaj iznos unutarnje stope povrata je vrlo dobar te se izgradnja ovakvog postrojenja može smatrati vrlo isplativom. Međutim, postoje razni faktori koji utječu na isplativost projekta. U nastavku ćemo razmotriti utjecaj promjene nekih od cijena i naknada na promjenu unutarnje stope povrata investicije

9.2.2. Analiza osjetljivosti

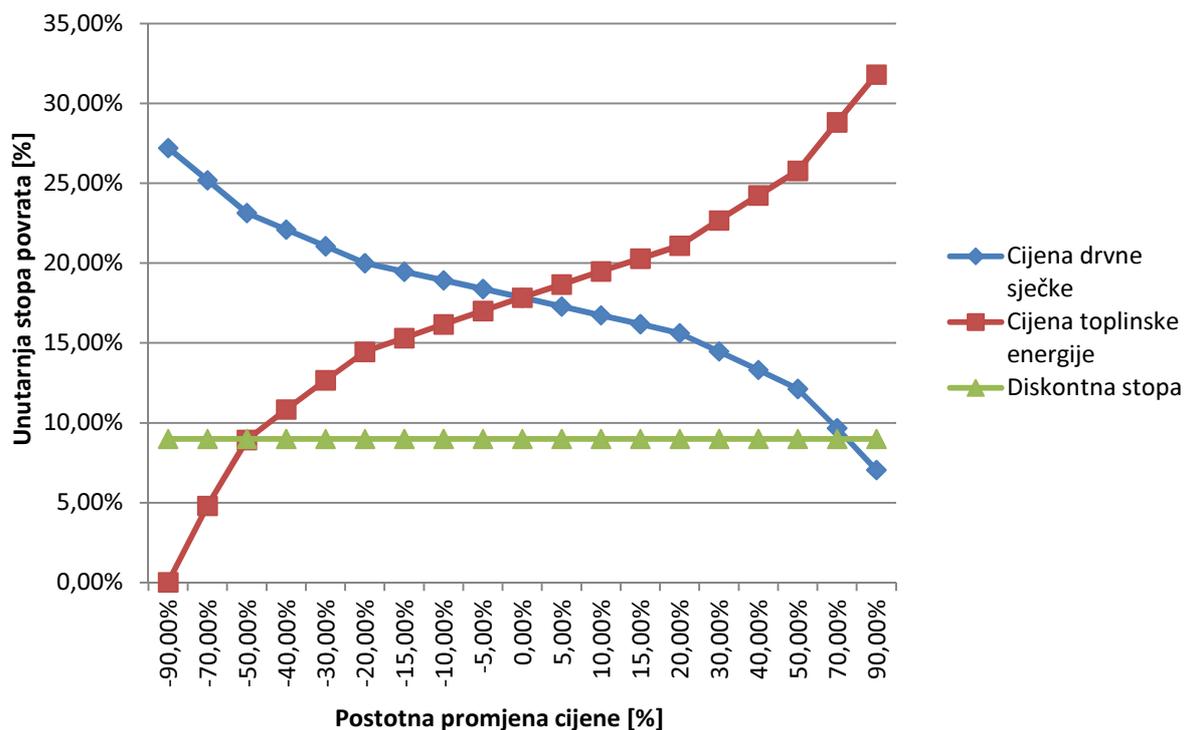
Za razliku od postrojenja za termičku obradu otpada postrojenje na biomasu mora plaćati za pogonsko gorivo te ono predstavlja i najveći pogonski trošak postrojenja. Kako se cijeli ovaj rad bazira na postrojenjima koji su dio centraliziranih toplinskih sustava druga veličina čiji će se utjecaj na isplativost promatrati je cijena toplinske energije. U sljedećoj tablici [

Tablica 57.] prikazan je utjecaj promjene prethodno navedenih veličina, u rasponu od +90% pa do -90%, na unutarnju stopu povrata investicije.

Tablica 57. Utjecaj promjene cijene toplinske energije i cijene drvene sječke na IRR postrojenja na biomasu

Promjena cijene	Promjena IRR u funkciji promjene cijene toplinske energije	Promjena IRR u funkciji promjene cijene drvene sječke
-90,00%	0,02%	27,21%
-70,00%	4,80%	25,19%
-50,00%	8,93%	23,15%
-40,00%	10,84%	22,11%
-30,00%	12,67%	21,06%
-20,00%	14,44%	20,00%
-15,00%	15,31%	19,46%
-10,00%	16,16%	18,93%
-5,00%	17,01%	18,39%
0,00%	17,84%	17,84%
5,00%	18,66%	17,29%
10,00%	19,48%	16,74%
15,00%	20,29%	16,18%
20,00%	21,09%	15,62%
30,00%	22,68%	14,48%
40,00%	24,24%	13,32%
50,00%	25,78%	12,13%
70,00%	28,82%	9,67%
90,00%	31,81%	7,06%

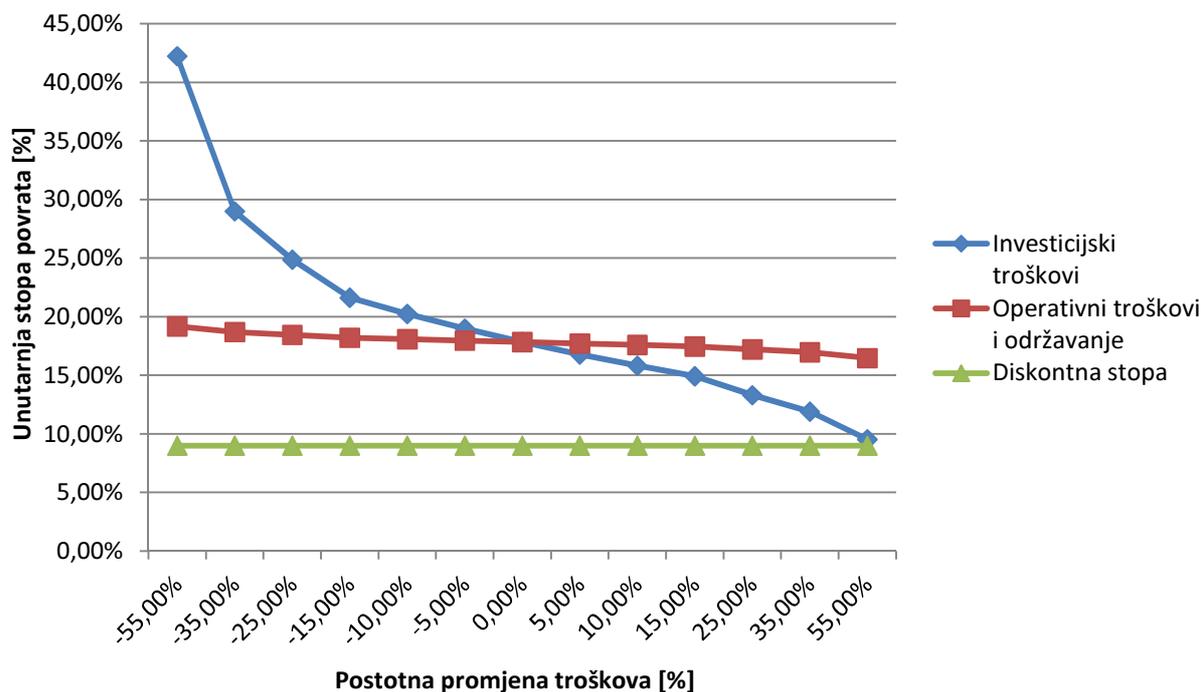
Za lakši prikaz kretanja i usporedbu, prethodno navedene promjene prikazane su u dijagramu [Slika 30.].



Slika 30. Utjecaj promjene cijene toplinske energije i cijene drvne sječke na IRR postrojenja na biomasu

Kao što se može vidjeti, utjecaj promjene iznosa cijene sječke je nešto manji od utjecaja promjene cijene toplinske energije na isplativost postrojenja na biomasu pa tako smanjenje cijene toplinske energije za više od 50%, u slučaju diskontne stope od 9%, dovodi do neisplativosti investicije, do čega također dolazi prilikom povećanja cijene drvne sječke za više od 70%. Ovako mala osjetljivost ove investicije proizlazi iz visoke povlaštene cijene otkupa električne energije.

U ovome poglavlju ćemo još ukratko sagledati utjecaj promjene investicijske cijene i operativnih troškova i troškova održavanja na isplativost postrojenja, koja se može vidjeti na dijagramu [Slika 31.].



Slika 31. Utjecaj promjene investicijske cijene i operativnih troškova i troškova održavanja na unutarnju stopu povrata investicije postrojenja na biomasu

Kao što se može vidjeti utjecaj promjene investicijskih troškova na unutarnju stopu povrata investicije je puno veći od utjecaja promjene operativnih troškova i troškova održavanja, čiji je utjecaj vrlo malen. Tako povećanje investicijskih troškova za više od 55% dovodi do neisplativosti postrojenja dok u tom području promjena operativnih troškova i troškova održavanja uzrokuje smanjenje unutarnje stope povrata investicije za svega 1,4%.

9.3. Cijena toplinske energije

Cijena toplinske energije, odnosno trošak proizvodnje toplinske energije, se uglavnom izračunava kada ne postoji definirana, tj. regulirana, cijena otkupa toplinske energije. Iako ona u ovome slučaju postoji, te je navedena u nastavku ovoga poglavlja, cijena toplinske energije iz razmatranih postrojenja će biti zasebno definirana. Cijenu toplinske energije je u slučaju kogeneracijskih postrojenja vrlo teško izračunati zbog pitanja što je to trošak proizvodnje toplinske energije. Ovaj se trošak može definirati na više načina, a jedan od njih je da se

cijena proizvedene toplinske energije definira kao vrijednost jednaka specifičnoj cijeni goriva izraženoj po jedinici energije. Prema ovoj metodologiji, ekonomski gledano, proizvedena toplinska energija smanjuje trošak goriva.

U ovome radu je korištena cijena biomase od 41,23 €/toni što uz ogrjevnu vrijednost od 3,40 kWh/kg [63] se dolazi do cijene goriva, a stoga i toplinske energije iz kogeneracijskog postrojenja na biomasu, od 0,0121 €/kWh.

Što se tiče cijene toplinske energije iz postrojenja za TOO, sljedeći prethodno navedenu metodologiju uz korištenu cijenu otpada, koja je jednaka negativnom iznosu naknade za zbrinjavanje otpada od 110 €/toni, i ogrjevnu vrijednost otpada od 2,78 kWh/kg dolazi se do cijene goriva, a stoga i toplinske energije iz kogeneracijskog postrojenja za TOO, od -0,0396 €/kWh. Negativna vrijednost je rezultat same namjene ovog postrojenja, a to je zbrinjavanje otpada te se zbog toga dolazi do negativne cijene goriva te stoga i toplinske energije.

Što se tiče cijene toplinske energije u CTS-u Grada Zagreba tj. iz postrojenja TE-TO i EL-TO ona je definirana reguliranom cijenom koja je napisana u cjeniku toplinske energije HEP-Toplinarstva d.o.o. [Tablica 22.]. Upotrebljavajući tečaj od 7,66 kn za 1 € cijene toplinske energije iznose 0,020 €/kWh za kućanstva te 0,040 €/kWh za poslovne korisnike. Ako se ove vrijednosti svedu na jednu vrijednost po vrijednostima udjela u potrošnji toplinske energije pojedinih sektora [30] dolazi se do iznosa od 0,028 €/kWh. Ovaj iznos se može usporediti i s cijenom definiranom na način na koji je definirana cijena toplinske energije iz postrojenja za TOO i postrojenja na biomasu putem cijene glavnog energenta, tj. plina koji se koristi u tim postrojenjima i koja iznosi 0,0363 €/kWh.

10. ZAKLJUČAK

Jedan od načina na koji se Europska unija suočava s izazovima na području energetike je upotreba kogeneracijskih postrojenja te učinkovitog područnog grijanja, što je posebno definirao Člankom 14. Direktive o energetske učinkovitosti. Izazovi na području energetike koji se postavljaju pred Europsku uniju obuhvaćaju pitanja kao što su sve veća ovisnost o uvoznim energentima te time i nestabilnost cijena energenata, nedovoljna diversifikacija energetske izvora, rast globalne potražnje za energentima, prijetnje klimatskih promjena, spori napredak u pogledu energetske učinkovitosti, itd. Neki od identificiranih lokalnih resursa, koji su sagledani u ovome radu kojima bi se mogla smanjiti energetske ovisnost o uvoznim energentima kroz njihovu upotrijebiti kao lokalnih izvora toplinske energije u CTS-ima su otpad i biomasa.

Glavna uloga sustava područnog grijanja (eng. *distric heating systems (DHS)*) ili centraliziranih toplinskih sustava (CTS) je efikasan transport toplinske energije za zadovoljavanje energetske potreba stambenih zgrada i poslovnih subjekata u urbanim područjima. U današnje vrijeme osnovna ideja centraliziranih toplinskih sustava je iskorištavanje lokalno dostupnog goriva ili topline, koja bi inače bila izgubljena, za zadovoljavanje lokalnih potreba potrošača. U ovakvom načinu razmatranja centraliziranih toplinskih sustava, toplinska distribucijska cijevna mreža se može gledati kao lokalno tržište energijom. Ova ideja zahtijeva ispunjavanje triju elemenata koji su nužni za uspostavu kompetitivnog CTS:

- Raspoloživ izvor toplinske energije koji je jeftin i pogodan za iskorištavanje u CTS-u
- Postojanje potražnje za toplinskom energijom
- Postojanje cijevnog sustava koji spaja izvor i potrošače toplinske energije

Pod raspoloživim izvorima toplinske energije za iskorištavanje u CTS-u nalaze se postrojenja koja iskorištavaju različita goriva. Tako se razlikuju postrojenja koja iskorištavaju fosilna goriva, biomasu, komunalni otpad, solarnu i geotermalnu energiju ali i električnu energiju. Svaka od tehnologija ima svoje karakteristike, prednosti i nedostatke.

Što se tiče distribucijskih sustava ovdje je napravljen veliki napredak tijekom godina čime su smanjeni troškovi investicije i pogona. Danas je investicijska cijena ovakvih sustava definirana prvenstveno linearnom toplinskom gustoćom te faktorom izgrađenosti područja.

Potražnja za toplinskom energijom postroji u zgradarstvu i u industriji. Ove se potrebe prvenstveno razlikuju po potrebnom temperaturnom nivou za njihovo zadovoljavanje.

CTS-i su rasprostranjeni po cijeloj Europi međutim i obuhvaćaju ukupnu duljinu distribucijske mreže od ~ 200.000 km. Iako su prisutni u svim dijelovima Europe, pokrivaju samo 13% europskog tržišta toplinskom energijom za zgradarstvo u rezidencijalnom sektoru, dok se udio u industrijskom sektoru kreće na razini od 9%. Iz ovih dvaju podataka se može vidjeti da postoji još značajan prostor za daljnje širenje ovakvih sustava. Osim toga, ukoliko se ovakvi sustavi gledaju s financijske strane, oni u europskim zemljama ostvaraju godišnje prohode na razini od 30 milijardi eura. Što se tiče cijena toplinske energije, one se uvelike razlikuju od države do države [Tablica 5.] te se kreću u rasponu od 3,14 €/GJ pa do 58,53 €/GJ.

Prilikom razmatranja investiranja u određeno energetska postrojenje, na određenoj lokaciji, potrebno je razmotriti isplativost takve investicije u odnosu na vrstu postrojenja tj. provesti preinvesticijsku studiju po čijim rezultatima će se donijeti potrebne odluke. Tehno-ekonomsku analizu je moguće provesti na više načina. Jedan od njih uključuje detaljnije razrađivanje tehničkih karakteristike svakog postrojenja čija se isplativost želi analizirati te modeliranje svakog postrojenja koje je investitoru interesantno. Drugi pristup koji omogućava provođenje tehno-ekonomske analize nad većim brojem razmatranih postrojenja bazira se na proučavanju postojećih podataka o postrojenjima koja su već u pogonu. Prednost ovoga pristupa se bazira na korištenju realnih pogonskih i ekonomskih podataka, za razliku od tvorničkih dok je glavna mana u tome što je dostupnost takvih podataka za razmatrana postrojenja često ograničena.

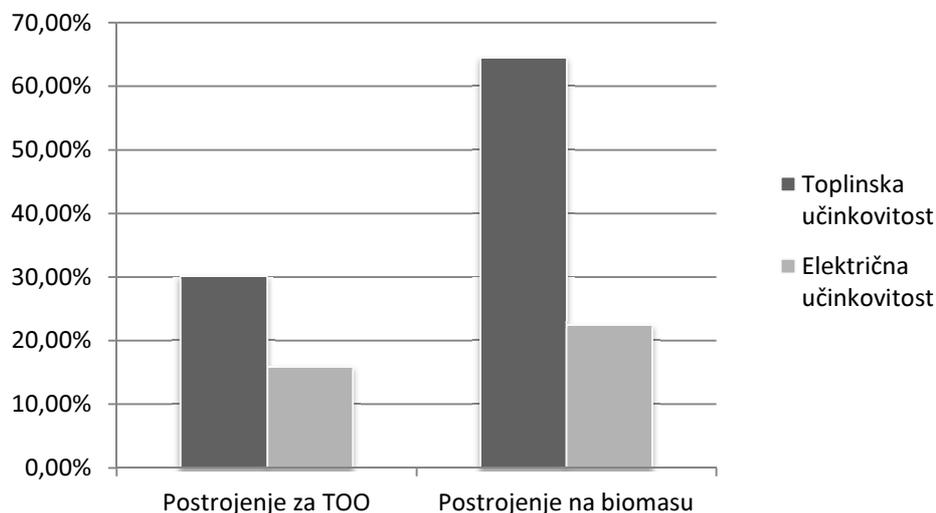
Na svaki CTS je spojeno barem jedno energetska postrojenje koje ga opskrbljuje toplinskom energijom. Iako se tako dolazi do velikog broja energetskih postrojenja, ograničen je broj onih za koje su dostupni ekonomski podatci koji su potrebni da bi se provela tehno-ekonomska analiza njihove isplativosti, jer se takvi podatci većinom smatraju poslovnim tajnama.

Na temelju pribavljenih tehničkih i ekonomskih podataka o već postojećim postrojenjima na određenom razmatranom području može se njihovom aproksimacijom doći do krivulje koja ih najbolje opisuje. Ukoliko je takva krivulja konstruirana u ovisnosti o veličini postrojenja, uvrštavanjem podataka o veličini razmatranog postrojenja dolazi se do tehničkih i ekonomskih podataka za razmatrano postrojenja. Ovom metodologijom se dolazi do rezultata koji su ekstrapolirani iz skupljenih podataka o postojećim postrojenjima te njihova točnost ovisi o točnosti skupljenih podataka. Osim o točnosti ulaznih podataka, točnost dobivenih podataka ovom metodologijom uvelike ovisi i o broju ulaznih podataka. Povećavanjem broja ulaznih podataka smanjuje se utjecaj specifičnih faktora koji su utjecali na konstrukciju postojećih postrojenja, kao što su potrebe za zadovoljavanje nekog drugog cilja poput: potrebe za smanjenjem utjecaja na krajobraz, prilagodbe lokaciji izgradnje (poput izgradnje uz rijeku radi omogućavanja dostave goriva riječnim putem), većim zahtjevima za smanjenim utjecajem na okoliš postrojenja ili potrebe za posebnim arhitektonskim karakteristikama zgrade.

U ovome radu su razmatrane dvije različite tehnologije kogeneracijskih postrojenja od kojih jedna dobiva potrebnu energiju putem spaljivanja otpada, a druga spaljivanjem drvene sječke. Iako se na prvi pogled može zaključiti da su u ovim vrstama postrojenja korištene iste tehnologije velika se razlika može uočiti usporedbom tehnoloških i ekonomskih parametara. Kako su oba postrojenja definirana kao dio CTS-a, za polaznu točku prilikom definiranja razmatranih postrojenja uzeta je jednaka proizvodnja toplinske energije. Iako ostali parametri postrojenja nisu jednaki za oba razmatrana postrojenja interpretacija dobivenih rezultata u ovome radu i njihova usporedba može dati uvid u njihove karakteristike i dati odgovor na pitanje isplativosti tehnologije kogeneracijskog postrojenja kao dijela CTS-a, tj. ukoliko je naglasak stavljen na proizvodnju toplinske energije.

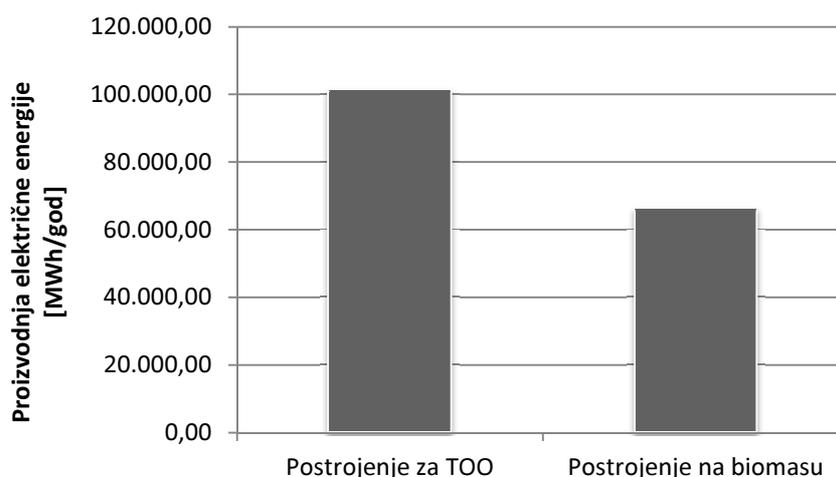
Usporedbom tehničkih karakteristika postrojenja za TOO i postrojenja na biomasu s jednakom godišnjom proizvodnjom toplinske energije od ~ 193.000 MWh može se uočiti da postrojenje za TOO ima ~ 47% manju ukupnu učinkovitost energetske pretvorbe u odnosu na postrojenja na biomasu. To proizlazi iz manje ogrjevne vrijednosti otpada kao goriva te strožih pogonskih zahtjeva i pravila o utjecaju na okoliš i zdravlje ljudi.

Odnos proizvodnje električne i toplinske energije ovisi o vrsti postrojenja te se uvelike razlikuje. Ovaj je odnos kod postrojenja za TOO 0,53, a kod postrojenja na biomasu 0,34. Ovime su definirane i električne i toplinske učinkovitosti razmatranih postrojenja [Slika 32.].



Slika 32. Usporedba učinkovitosti postrojenja

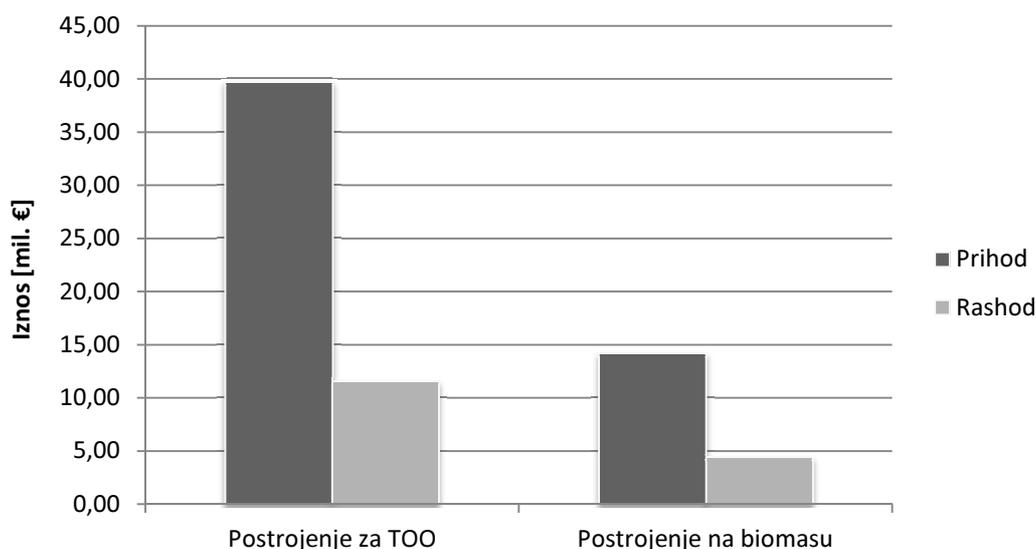
Iz ovih podataka se može zaključiti da se, kod jednake proizvodnje toplinske energije, proizvodnja električne energije ovih postrojenja razlikuje tj. količina proizvedene električne energije uz jednak broj sati rada pri punom opterećenju je kod postrojenja na biomasu 35% manja od proizvedene električne energije postrojenja za TOO [Slika 33.].



Slika 33. Usporedba proizvodnje električne energije

Iz podataka o rashodovnoj strani postrojenja iznesenih u ovome radu, ukoliko je naglasak stavljen na proizvodnju toplinske energije, postrojenje na biomasu je uvelike isplativije od postrojenja za TOO. Naime, prema izračunatim podacima, investicijski trošak u postrojenje na biomasu je na razini od 30,9 milijun eura, dok je kod postrojenja za TOO od 136,9 milijuna, dok su njihovi pripadajući pogonski troškovi, uključujući trošak goriva, na razini od 4,4 milijuna eura, odnosno 14,2 milijuna eura. Ovdje treba naglasiti da se ne radi o postrojenjima iste veličine te da je električna snaga postrojenja na biomasu 8,8 MW_e, dok je kod postrojenja za TOO ona 13,5 MW_e.

Prihodovna strana ovih postrojenja se uvelike razlikuje. Dok postrojenje na biomasu prihod ostvaruje samo na račun prodaje toplinske i električne energije, postrojenje za TOO ostvaruje još i kroz prodaju sekundarnih sirovina (aluminija i željeza). Osim toga stavka gorivo, u slučaju postrojenja za TOO se nalazi u prihodovnoj strani pošto ovo postrojenje pruža uslugu zbrinjavanja otpada koju i naplaćuje. Usporedba prihodovne strane i rashoda ovih dvaju postrojenja se može vidjeti na sljedećem dijagramu [Slika 34.].



Slika 34. Usporedba prihoda i rashoda postrojenja

Ukoliko se razmotre podatci o iskorištenom gorivu za energetska proizvodnja može se uočiti da je za istu proizvodnju toplinske energije potrebno 230.000 tona miješanog komunalnog otpada ili 86.600 tona šumske drvene sječke. Ova razlika proizlazi iz razlike u ogrjevnoj vrijednosti korištenih energetskih sirovina kao i iz razlike u učinkovitosti postrojenja.

Kako bi se jednoznačno usporedile investicije u ova dva postrojenja potrebno je usporediti njihove unutarnje stope povrata. One su u ovome slučaju izračunate za period od 14 godina koliko traje povlaštena cijena otkupa električne energije iz kogeneracijskih postrojenja te iznose 17,84 % za postrojenje na biomasu, a 13,45% za postrojenje za TOO. Na temelju ovih podataka moguće je dati odgovor na pitanje isplativosti proširenja postojećeg centraliziranog toplinskog sustava u Gradu Zagrebu s postrojenjima koji kao gorivo koriste komunalni otpad i biomasu. Prema izračunatim stopama, u uvjetima za koje je napravljena analiza te definiranoj diskontnoj stopi od 9%, investicija u oba postrojenja može biti isplativa. Usporedbom vrijednosti dobivenih stopa jednoznačno bi se moglo reći da je isplativije investirati u postrojenje na biomasu. Međutim, ovaj zaključak nije lako donijeti ako se u obzir uzme i rješavanje problema otpada koje se rješava izgradnjom postrojenja za TOO koji bi u drugome slučaju trebalo riješiti na drugi način. Da bi se dao jednoznačan odgovor na ovo pitanje morala bi se provesti opsežnija analiza koja bi uzimala u obzir i sustav gospodarenja i zbrinjavanja otpada te cijenu alternativnog načina njegova zbrinjavanja.

Utjecaj pojedinih veličina na iznos unutarnje stope povrata se najbolje može vidjeti iz rezultata analize osjetljivosti koja je napravljena kao dio ovoga rada. Iz ovih podataka je vidljivo da isplativost postrojenja za TOO najviše ovisi o iznosu naknade za zbrinjavanje otpada dok je ovisnost o prodajnoj cijeni toplinske energije relativno mala. Iz ovoga je vidljivo da je, s ekonomske strane, glavna zadaća ovoga postrojenja zbrinjavanje otpada. Što se tiče ovisnosti isplativosti postrojenja na biomasu, ona je više ovisna o cijeni toplinske energije nego o cijeni goriva, te je ova ovisnost znatno veća nego u slučaju postrojenja za TOO. Međusobnom usporedbom rezultata ovih analiza se također može doći i do zaključka da postrojenje na biomasu ima malu ovisnost isplativosti o promjeni operativnih troškova i troškova održavanja, dok je ona kod postrojenja za TOO izraženija. Osim toga, isplativost investicije u postrojenje na biomasu je manje osjetljivo na promjenu cijena i troškova te se investicija u postrojenje ove vrste može smatrati sigurnijom. Ova stabilnost proizlazi prvenstveno iz visoke povlaštene otkupne cijene električne energije.

Iako se trošak proizvodnje, tj. proizvodna cijena toplinske energije uglavnom izračunava kada ne postoji regulirana otkupna cijena u sklopu ovoga rada je napravljena usporedba postrojenja na bazi ove vrijednosti. Pa je tako prema cijeni korištenog goriva definirana cijena proizvedene toplinske energije od 0,0121 €/kWh za postrojenje na biomasu, -0,0396 €/kWh

za postrojenje za TOO te 0,0363 €/kWh za postrojenja CTS-a Zagreb. Ovdje se odmah može uočiti negativna vrijednost cijene toplinske energije iz postrojenja za TOO. Negativna vrijednost je rezultat same namjene ovog postrojenja, a to je zbrinjavanje otpada te se zbog toga dolazi do negativne cijene goriva a time i toplinske energije. Ove se vrijednosti mogu usporediti i s definiranom cijenom proizvedene toplinske energije u CTS-u Zagreb koja iznosi 0,028 €/kWh. Ovom usporedbom se može vidjeti da je, prema ovoj metodi, cijena toplinske energije iz ovdje razmatranih postrojenja niža od definirane cijene, dok je proizvodnja toplinske energije u postojećim postrojenjima viša. Ovo se može objasniti time što je toplinska energija u Republici Hrvatskoj još uvijek socijalna kategorija čija se cijena ne prilagođava uvjetima na tržištu.

11. POPIS LITERATURE

- [1] ManagEnergy: COM(2007) 1 FINAL: Energy for a changing world - an energy policy for europe Podatci ostupni na: <http://www.managenergy.net/resources/881#.VGTfMPlwv8b>; Datum zadnjeg pristupa: 12.10.2014.
- [2] European Commission: BRUSSELS EUROPEAN COUNCIL 8/9 MARCH 2007 PRESIDENCY CONCLUSIONS; Podatci ostupni na: http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/en/ec/93135.pdf ; Datum zadnjeg pristupa: 12.10.2014.
- [3] Council of the European Union: Climate Action - Energy for a Changing world; Podatci ostupni na: http://ec.europa.eu/energy/strategies/2008/2008_01_climate_change_en.htm; Datum zadnjeg pristupa: 12.10.2014.
- [4] European Commission: BRUSSELS EUROPEAN COUNCIL 13/14 MARCH 2008 PRESIDENCY CONCLUSIONS; Podatci ostupni na: http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/en/ec/99410.pdf; Datum zadnjeg pristupa: 12.10.2014.
- [5] European Parliament: Press release; Podatci ostupni na: <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+IM-PRESS+20081208BKG44004+0+DOC+XML+V0//EN>; Datum zadnjeg pristupa: 12.10.2014.
- [6] EUR-Lex: Pristup zakonodavstvu Europske unije: COM(2011) 109 final on Energy Efficiency Plan 2011; Podatci ostupni na: http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:441bc7d6-d4c6-49f9-a108-f8707552c4c0.0002.03/DOC_1&format=PDF; Datum zadnjeg pristupa: 12.10.2014.
- [7] Districtenergy: European Commission Guidance on efficient district heating cooling & CHP; Podatci ostupni na: http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:441bc7d6-d4c6-49f9-a108-f8707552c4c0.0002.03/DOC_1&format=PDF; Datum zadnjeg pristupa: 12.10.2014.

- [8] The coalition for Energy Savings: Energy efficiency deal halves 20% target gap; Podatci ostupni na: <http://energycoalition.eu/energy-efficiency-deal-halves-20-target-gap>; Datum zadnjeg pristupa: 12.10.2014.
- [9] Martínez, A; Valero, S.; Velasco, E.; Senabre, C.: Energy intensity of the economy as a variable to measure the energy efficiency of a country: comparison between European member states; *Renewable Energy and Power Quality Journal*; ISSN 2172-038 X, No. 12, April 2014
- [10] Greenfield consulting LTD, Podatci ostupni na: <http://greenfieldconsulting.fi/community-energy/district-heating-and-chp/>, Datum zadnjeg pristupa: 14.10.2014.
- [11] Frederiksen, S.; Warner, S.: *District Heating and Cooling*; Studentlitteratur; Lund, Sweden; 2013.
- [12] Skupina autora: *District Heating Handbook: A Design Guide*; International District Heating Association; Washington, D.C., USA; 1983.
- [14] Persson, U.: *Realise the Potential!: Cost Effective and Energy Efficient District Heating in European Urban Areas*; Thesis for the degree of licentiate of engineering; Chalmers University of Technology; Gothenburg, Sweden; 2011.
- [15] Sikavica, P.; Bahtijarević-Šiber, F.: *Leksikon Menadžmenta*; Masmmedia; Zagreb, Hrvatska; 2001.
- [16] Rasmussen, S.: *Production Economics: The Basic Theory of Production Optimisation*; Springer; 2013.
- [17] *Ecoheat4cities project report: DHC Technologies, Today and Tomorrow*; Danish Technological Institut and Ecoheat4cities Steering committee; Denmark, 2012.
- [18] Danish Energy Agency and Energinet.dk: *Technology Data for Energy Plants: Generation of Electricity and District Heating, Energy Storage and Energy Carrier Generation and Conversion*; Denmark; 2012.
- [19] Andrews, D.; Krook Riekkola, A.; Tzimas, E.; Serpa, J.; Carlsson, J.; Pardo-Garcia, N.; Papaioannou, I.: *Background Report on EU-27 District Heating and Cooling Potentials, Barriers, Best Practice and Measures of Promotion*; European Commission

- Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport; Publications Office of the European Union; Luxembourg; 2012.
- [20] Skupina autora: Central and Eastern European District Heating Outlook; KPMG Energy & Utilities Centra of Excellence Team; Budapest, Hungary; 2009.
- [21] Werner, S.; Constantinescu, N.: ECOHEATCOOL Work package 1: The Europea Heat Market, Final Report; Euroheat & Power; Brussels, Belgium; 2006.
- [22] PromoBio projekt; Fact sheets; Podatci dostupni na: http://www.promobio.eu/tiedostot/tiedotteet/Fact%20sheet_admont_be2020_final1.pdf; Datum zadnjeg pristupa: 15.10.2014.
- [23] BIO-HEAT projekt: BIO-HEAT success story (potential future src to dh chains): Holzindustrie Schweighofer - Romanian cogeneration power plant in Radauti (Romania); Podatci dostupni na: http://bio-heat.eu/fileadmin/dateiverwaltung/BIO-HEAT_D3.1_Summary_07_RO.pdf; Datum zadnjeg pristupa: 18.10.2014.
- [24] Obernberge, I.: Techno-economic evaluation of selected decentralised CHP applications based on biomass combustion in IEA partner counties, BIOS Bioenergiesysteme GmbH, Gratz, Austria, 2004.
- [25] Wood, S.; Fanning, M.; Venn, M.; Whiting, K.: Review of state-of-the-art waste-to-energy technologies, Stage two: Case studies, Department of Environment and Conservation: Waste Management Branch; Perth, Australia; 2013.
- [26] Åström, J. Case study: IEA Bioenergy Task 23: Lidköping Waste-to-Energy Plant: Review of state-of-the-art waste-to-energ technologies; SYCON ENERGIKONSULT AB, Process & Värme department; 1999.
- [27] Granatstein, D.L.: Technoeconomic Assessment of Fluidized Bed Combustors as Municipal Solid Waste Incinerators: A Summary of Six Case Studies; CANMET Energy Technology Centre (CETC), Natural Resources Canada; Nepean (Ottawa), ON, Canada
- [28] Martin-Du Pana, O.; Eamesa,P; Rowleya,P.; Bouchlaghemc, D.; Susman, G.: REVIEW Current and future operation scenarios for a 50,000 MWh district heating

- system; Architectural Engineering and Design Management; DOI: 10.1080/17452007.2014.899889]
- [29] HEP d.d.; Podatci dostupni na: <http://www.hep.hr/hep/novosti/default.aspx>; Datum zadnjeg pristupa: 19.10.2014.
- [30] Krklec, R.: Prezentacija sa konferencije "Budućnost centraliziranih toplinskih sustava u Republici Hrvatskoj": Zahtjevi tržišta te dugoročna strategija centralnih toplinskih sustava ; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb; 2014.
- [31] Krklec, R.: Usmena korespodencija
- [32] Čulig-Tokić, D.: Comparative analysis of the district heating systems in Croatia and Denmark, Master's thesis; Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture; Zagreb; 2013.
- [33] Jukić, P.; Majcen, A.: Prezentacija s Zagrebačkog energetskeg tjedna: Pravci razvoja izvora topline centralnog toplinskog sustava (CTS) Grada Zagreba; Zagreb; 2011.
- [34] Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva, Uprava za inspekcijske poslove: Godišnje izvješće o koordiniranim inspekcijskim nadzorima u području okoliša za 2010. godinu; Zagreb, 2011.
- [35] Bogdan, Ž.: Opravdanost izgradnje spojne vrelovodne stanice vrelovoda Zagreb istok - zapad; Centar za transfer tehnologije - CTT; Zagreb, 2000.
- [36] Poslovni dnevnik: U rad pušteno novo postrojenje TE-TO Zagreb; 28.06.2011.; Podatci dostupni na: <http://www.poslovni.hr/vijesti/u-rad-pusteno-novo-postrojenje-te-to-zagreb-182183>; Datum zadnjeg pristupa: 20.10.2014.
- [37] Eurostat: Europe in figures: Eurostat yearbook 2012, European Commission, Eurostat, 2012
- [38] Verma, S.: Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes; Fu Foundation School of Engineering & Applied Science, Columbia University, 2002 (Doktorski rad)
- [39] Rapport, J.; Zhang, R.; Jenkins, B.M.; Williams, R.B.: Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste, Department of

- Biological and Agricultural Engineering, University of California, for California Environmental Protection Agency, 2008.
- [40] Persson, U.; Werner, S.: Heat distribution and the future competitiveness of district heating; *Applied Energy* 88 (2011) 568–576
- [41] Poyry Energy Limited for London Borough of Barking and Dagenham: Establishing a community heating network in Barking town centre: The technical study and business case; London Borough of Barking and Dagenham
- [42] Ehrig, R.; Kristöfel, C.; Pointner, C.: Operating figures, quality parameters and investment costs for district heating systems; AFO - Activating Private Forest Owners to Increase Forest Fuel Supply
- [43] European Commission: Document: State aid SA.33621 (2012/N) – Greece District Heating Network Infrastructure of Florina; Brussels; 2012.
- [44] The free library: PROJECT: "District heating Florina - Project:" Pipelines of Florina - Florina Distribution Network - Pump; Podatci dostupni na: <http://www.thefreelibrary.com/PROJECT%3A+%22District+heating+Florina+~+Project%3A%22+Pipelines+of+Florina...-a0356259430>; Datum zadnjeg pristupa: 22.10.2014.
- [45] Vigants, G.; Blumberga, D.: Modelling of the District Heating System's Operation; *Scientific Journal of Riga Technical University*; Volume 6; 2011.
- [46] SETatWork Good Practice Case Studies; Podatci dostupni na: <http://www.setatwork.eu/gp.htm#gps>; Datum zadnjeg pristupa: 22.10.2014.
- [47] Combined Heat and Power in Denmark. Cases overview; Podatci dostupni na: <http://www.statensnet.dk/pligtarkiv/fremvis.pl?vaerkid=329&repid=0&filid=14&iarkiv=1>; Datum zadnjeg pristupa: 22.10.2014.
- [48] Montejo, C.; Costa, C.; Ramos, P.; Carmen Márquez, M.: Analysis and comparison of municipal solid waste and reject fractions as fuels for incineration plants; *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 2135 - 2140

- [49] Vlada Republike Hrvatske: Plan gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj za razdoblje 2007. – 2015. godine; Narodne novine 85/2007; 2007.
- [50] Gendebien, A.; Leavens, A.; Blackmore, K.; Godley, A.; Lewin, K.; Whiting, K.J.; Davis, R.: General Environment: Refuse derived fuel, current practice and perspectives (b4-3040/2000/306517/mar/e3) - Final report; European Commission – Directorate, 2003.
- [51] AZO – Agencija za zaštitu okoliša: Izvješće o komunalnom otpadu za 2012. godinu; Zagreb; 2014.
- [52] Schneider D. R., Bogdan, Ž.: "Analysis of a sustainable system for energy recovery from municipal waste in Croatia", Management of Environmental Quality: An International Journal, Vol. 22 Iss: 1 (2011) pp.105 - 120
- [53] International Energy Agency (IEA): Municipal Solid Waste and its Role in Sustainability - A Position Paper; IEA Bioenergy; ExCo 2003:02
- [54] Malek, S.: Prezentacija s konferencije "ISWA BEACON 2010: Public Private Partnership and Hazardous Waste in Developing Countries in SEE, Middle East and Mediterranean Region": Waste incineration in Slovenia: a life cycle assessment of environmental impacts; Novi Sad, Srbija; 2010.
- [55] Bandyopadhyay, S.: State Space Model for Accounting Smart City Heating by Municipal Solid Waste Management - reviewed paper; Proceedings REAL CORP 2014 Tagungsband, Vienna, Austria (2014) 641 - 652
- [56] United Nations Environment Programme (UNEP): Solid waste management; 2005.; Podatci dostupni na: <http://www.unep.org/ietc/informationresources/solidwastemanagementpublication/tabid/79356/default.aspx>
- [57] Watkins, E.; Hogg, D.; Mitsios, A.; Mudgal, S.; Neubauer, A.; Reisinger, H.; Troeltzsch, J.; Acoleyen, M.V.: Use of economic instruments and waste management performances; Bio Intelligence Service S.A.S.; Paris, France; 2012.
- [58] Kirjavainen, M.; Sipila, K.; Savola, T.; Salomon, M.; Alakangas, E.: Small-scale biomass CHP technologies - situation in Finland, Denmark and Sweden - OPRT Report 12; VTT Protessec for European Commission; Espoo, Finska; 2004.

- [59] Friothers AG: Waste-to-Energy Plant Sysav Malmö, enhancing the overall Energy Efficiency with 2 Unitop® 28C heat pump units; Podatci dostupni na: http://www.friothers.com/webautor-data/41/sysave006_uk.pdf
- [60] ENEM - Epem S.A. Environmental planning and management: Waste Control: Database of Waste Management Technologies; Podatci dostupni na: <http://www.epem.gr/waste-c-control/database/html/costdata-00.htm#Incineration>
- [61] Schneider, D.R.; Lončar, D.; Bogdan, Ž.: Cost Analysis of Waste-to-Energy Plant; *Strojarstvo* (0562-1887) 52 (2010), 3; 369-378
- [62] European Commission: Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration; 2006; Podatci dostupni na: <http://eippeb.jrc.es/pages/FActivities.htm>
- [63] Lončar, D.; Krajačić, G.; Vujanović, M.: Podrška developerima - primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvenu biomasu; Centar za transfer tehnologije - CTT; Zagreb; 2009.
- [64] Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije; *Narodne novine* broj 133/2013
- [65] Metalmoneta, cijene otkupa, Podatci dostupni na: <http://www.metalmoneta.hr/>; Datum zadnjeg pristupa: 06.11.2014.
- [66] Pavelić, I.; Kuric, D.: Realizacija projekata i investicija u energetska postrojenja na drvenu biomasu; Prezentacija s znanstveno-stručnog skupa "Obnovljiva toplina: Ključ za energetska zaokret"; 8. hrvatski dani biomase; Našice; 2013.
- [67] Ćosić, B.: Analiza potencijala izgradnje energetskih postrojenja loženih različitim tipovima biomase u Hrvatskoj i odabir lokacija, Zagreb, 2008.
- [68] Ćosić, B., Stanić, Z., Duić, N.: Geographic distribution of economic potential of agricultural and forest biomass residual for energy use: Case study Croatia, *Energy* 36 (2011) 2017-2028
- [69] Šumska biomasa: GIS atlas šumske biomase, Podatci dostupni na: <http://www.metalmoneta.hr/>; Datum zadnjeg pristupa: 08.11.2014.

- [70] Ćosić, B.; Ban, M.; Perković, L. Lončar, D.; Duić, N.: Optimal Location of Biomass Power Plants for District Heating: the Case of Sisak-Moslavina County; Digital Proceedings of the 1st South East European Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems / Ohrid, Macedonia, 2014. 48-48
- [71] Euroheat & Power: Statistics overview; Podatci dostupni na: <http://www.euroheat.org/>; Datum zadnjeg pristupa: 09.11.2014.
- [72] Eurostat: Podatci dostupni na: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>; Datum zadnjeg pristupa: 10.11.2014.

PRILOZI

I. CD-R disc