

# Tehno-ekonomska analiza pirolitičkog postrojenja za termokemijsku konverziju ostatnog komunalnog ambalažnog otpada nakon separacije

---

**Kruhak, Dominik**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*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:235:481894>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-13**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Dominik Kruhak**

Zagreb, 2020. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider, dipl. ing.

Student:

Dominik Kruhak

Zagreb, 2020. godina

# **Izjava o samostalnosti izrade diplomskog rada**

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

Dominik Kruhak

# **Zahvala**

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Danielu R. Schneideru, na vodstvu tijekom izrade diplomskog rada. Također se zahvaljujem poslijedoktorandu dr. sc. Tihomiru Tomiću na uloženom trudu, korisnim savjetima i kvalitetnoj komunikaciji.

Zahvaljujem se majci Karolini Kruhak na strpljenju, razumijevanju i financiranju studija.

Naposljetku, zahvaljujem se Petru Čajiću, Jurici Rožić i Hani Horvat na pomoći u učenju, rješavanju zadataka i podršci.



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: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dominik Kruhak** Mat. br.: 0035197726

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Tehno-ekonomska analiza pirolitičkog postrojenja za termokemijsku konverziju ostatnog komunalnog ambalažnog otpada nakon separacije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Techno-economic analysis of pyrolytic plant for thermochemical conversion of residual municipal packaging waste after separation**

Opis zadatka:

Sukladno smjernicama EU po pitanju gospodarenja otpadom, države članice uvode sustave primarne separacije komunalnog otpada. Iako ovi sustavi dovode do smanjenja opterećenja na okoliš u vidu smanjenja generiranja miješanog komunalnog otpada, dolazi do stvaranja više različitih frakcija odvojeno skupljenog otpada upitne kvalitete za daljnju primjenu koje se stoga podvrgavaju sekundarnoj separaciji. Jedan od takvih tokova predstavlja ambalažni otpad koji se prikuplja u žutim spremnicima. Sekundarnom separacijom ovakvog otpada nastaju korisne frakcije koje se mogu plasirati na tržište te ostatna frakcija otpada koja zahtjeva daljnju obradu i/ili zbrinjavanje. Ostatnu frakciju čini mješavina različitih materijala visoke energetske vrijednosti koja se može iskoristiti za proizvodnju energije i goriva. Pošto preko 80% ostatne frakcije su organski spojevi, od čega preko 50 posto čine polimerni materijali, ova frakcija predstavlja prikladnu sirovinu za energetske uporabu, tj. proizvodnju goriva putem procesa pirolize. Kako bi se ocijenila tehnološka izvedivost i ekonomska isplativost investiranja u pirolitičko postrojenje za energetske uporabu ovakve ostatne frakcije otpada u realnim okolnostima, potrebno je provesti tehnokoekonomsku analizu opravdanosti instalacije ovakve tehnologije na razini studije slučaja jednog domaćeg poduzeća koje se bavi sekundarnom separacijom komunalnog ambalažnog otpada.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- skupiti podatke o tehnologijama pirolitičke obrade i postojećim postrojenjima
- napraviti pregled podataka o tehnokoekonomskim parametrima postrojenja
- procijeniti kretanja količina odvojeno skupljenog ambalažnog otpada u pretpostavljenom životnom vijeku postrojenja te prema tome odrediti potrebnu veličinu postrojenja
- modelirati tehnološke i ekonomske parametre adekvatnog postrojenja za studiju slučaja
- na temelju rezultata tehnokoekonomske analize i provedene analize osjetljivosti ocijeniti izvedivost ovakve investicije.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

24. rujna 2020.

Datum predaje rada:

26. studenoga 2020.

Predvideni datum obrane:

30.11. – 4.12.2020.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## Sadržaj

Popis slika.....	IV
Popis tablica.....	VI
Popis kratica .....	VI
Popis oznaka .....	IX
Sažetak.....	XI
Summary.....	XII
1. Uvod .....	1
2. Piroliza.....	6
2.1. Temperatura.....	7
2.2. Katalizatori .....	8
2.3. Produkti .....	9
2.4. Prednosti pirolize .....	9
2.5. Nedostaci pirolize .....	13
3. Tehnologija .....	15
3.1. Vrste reaktora .....	15
3.1.1. Kotlasti i polukotlasti reaktori .....	15
3.1.2. Reaktori za pirolizu u fiksnom sloju .....	16
3.1.3. Reaktori za pirolizu u fluidizirajućem sloju .....	17
3.1.4. Konusni reaktori .....	18
3.1.5. Ostali tipovi reaktora [20] .....	18
3.1.5.1. Reaktivni ekstruderi .....	18
3.1.5.2. Mikrovalovima potpomognuti reaktori .....	18
3.1.5.3. Reaktori s plazmom.....	19
3.1.5.4. Tekuće kupke .....	19
3.1.5.5. Rotirajuće sfere .....	19
3.2. Produkti reaktora i usporedba.....	22
3.3. Utjecaj miješane plastike na produkte pirolize [21] .....	26
3.4. Utjecaj miješanog otpada na produkte pirolize [22] .....	28
3.5. Pregled postrojenja.....	29
4. Studija slučaja realnog poslovnog subjekta .....	36
4.1. Općenito .....	36

4.2.	Sličnost realnog poslovnog subjekta i navedenih tehnologija i postrojenja.....	38
4.3.	Ulazni i izlazni ekonomski tokovi .....	38
4.4.	Referentno postrojenje .....	40
4.5.	Tehnički parametri postrojenja .....	43
4.5.1.	Modeliranje kapaciteta .....	44
4.5.2.	Prinos ulja.....	47
4.5.3.	Pirolitički plin i lakše plinovite frakcije.....	47
4.5.4.	Otpadni tok katalizatora, mulja i koksa.....	48
4.5.5.	Voda .....	48
4.5.6.	Električna energija .....	48
4.5.7.	Životni vijek postrojenja .....	48
4.6.	Ekonomski parametri postrojenja .....	48
4.6.1.	Investicija i operativni troškovi .....	48
4.6.2.	Otkupna cijena pirolitičkog ulja .....	50
4.6.3.	Ulazna naknada (Gate fee) .....	50
4.6.4.	Nepredvidivi troškovi .....	51
4.6.5.	Ponderirani prosječni trošak kapitala .....	51
4.6.6.	Diskontna stopa .....	51
4.6.7.	Interna stopa povrata.....	51
4.6.8.	Kredit, kamate i kamatna stopa .....	51
4.6.9.	Amortizacija .....	52
4.6.10.	Porez na dobit.....	53
4.7.	Postupak proračuna ekonomske analize i analize osjetljivosti.....	54
5.	Ekonomska analiza projekta .....	59
5.1.	Ekonomska analiza postrojenja .....	59
5.1.1.	Analiza s donjim iznosom ulazne naknade .....	65
5.1.2.	Analiza s gornjim iznosom ulazne naknade .....	66
5.2.	Analiza osjetljivosti.....	66
5.2.1.	Analiza osjetljivosti s donjim iznosom ulazne naknade .....	66
5.2.2.	Analiza osjetljivosti s gornjim iznosom ulazne naknade .....	70
6.	Isplativi kapaciteti postrojenja .....	74
6.1.	Minimalni kapaciteti postrojenja za donji iznos ulazne naknade .....	74
6.2.	Minimalni kapaciteti postrojenja za srednji iznos ulazne naknade.....	77



6.3.	Minimalni kapaciteti postrojenja za gornji iznos ulazne naknade .....	79
6.4.	Projektiranje i ekonomska analiza isplativih postrojenja .....	82
6.4.1.	Opis donjeg postrojenja.....	84
6.4.2.	Opis srednjeg postrojenja .....	84
6.4.3.	Opis gornjeg postrojenja .....	84
6.5.	Analiza osjetljivosti donjeg, srednjeg i gornjeg postrojenja .....	86
6.5.1.	Analiza osjetljivosti donjeg postrojenja .....	86
6.5.2.	Analiza osjetljivosti srednjeg postrojenja .....	87
6.5.3.	Analiza osjetljivosti gornjeg postrojenja.....	89
7.	Projektiranje optimalnog postrojenja .....	91
7.1.	Analiza osjetljivosti optimalnog postrojenja .....	94
8.	Usporedba postrojenja .....	96
9.	Zaključak .....	98
	Literatura .....	101

## Popis slika

Slika 1. Hijerarhija gospodarenja otpadom [2].....	1
Slika 2. Količine proizvedenog komunalnog otpada u EU, 2017. [3] .....	2
Slika 3. Sastav miješanog komunalnog otpada u RH, 2015. [4] .....	3
Slika 4. Udio produkta s obzirom na temperature [13].....	8
Slika 5. Kotlasti reaktor [11] .....	15
Slika 6. Reaktor za pirolizu u fiksnom sloju [11] .....	17
Slika 7. Reaktor sa pirolizu u fluidizirajućem sloju.....	18
Slika 8. Isplativost postrojenja u ovisnosti o kapacitetu [6].....	34
Slika 9. Nereciklabilna frakcija [31] .....	37
Slika 10. Sastav nereciklabilnog plastičnog otpada [31].....	37
Slika 11. Ulazni i izlazni ekonomski tokovi za recikliranje .....	39
Slika 12. Ulazni i izlazni ekonomski tokovi za recikliranje i pirolizu .....	40
Slika 13. Kretanje kapaciteta postrojenja [t/dan].....	42
Slika 14. Kretanja prinosa ulja [l/t].....	43
Slika 15. Godišnje količine ostatne plastike .....	44
Slika 16. Ukupne godišnje količine plastike .....	45
Slika 17. Stopa recikliranja komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj [38] [39].....	46
Slika 18. Usporedba stope recikliranja komunalnog otpada u RH i ciljeva EU [36] [37] [38] [39].....	47
Slika 19. Dijagram kretanja investicije u ovisnosti o kapacitetu [6] .....	49
Slika 20. Dijagram kretanja pogonskih i operativnih troškova u ovisnosti o kapacitetu [6] ..	50
Slika 21. Poslovni prihodi realnog poslovnog subjekta [45].....	53
Slika 22. Tok novca s donjim iznosom ulazne naknade .....	63
Slika 23. Tok novca s gornjim iznosom ulazne naknade .....	63
Slika 24. Usporedba ekonomskog toka novca za oba iznosa ulazne naknade .....	64
Slika 25. Usporedba financijskog toka novca za oba iznosa ulazne naknade .....	64
Slika 26. Promjena NPV-a promjenom raznih troškova investicije .....	67
Slika 27. Promjena NPV-a promjenom O&M troškova .....	67
Slika 28. Usporedba promjene NPV-a promjenom investicije i O&M troškova .....	68
Slika 29. Promjena NPV-a promjenom otkupne cijene ulja i kapaciteta .....	68
Slika 30. Promjena NPV-a promjenom prinosa ulja.....	69
Slika 31. Promjena NPV-a promjenom raznih troškova investicije .....	70

Slika 32. Promjena NPV-a promjenom O&M troškova .....	71
Slika 33. Usporedba promjene NPV-a promjenom investicije i O&M troškova .....	71
Slika 34. Promjena NPV-a promjenom otkupne cijene ulja i kapaciteta .....	72
Slika 35. Promjena NPV-a promjenom prinosa ulja .....	72
Slika 36. Minimalni kapaciteti postrojenja za donji iznos ulazne naknade .....	75
Slika 37. Iznosi O&M troškova minimalnih kapaciteta za donji iznos ulazne naknade .....	76
Slika 38. Minimalni kapaciteti postrojenja za srednji iznos ulazne naknade .....	78
Slika 39. Iznosi O&M troškova minimalnih kapaciteta za srednji iznos ulazne naknade .....	79
Slika 40. Minimalni kapaciteti postrojenja za gornji iznos ulazne naknade .....	80
Slika 41. Iznosi O&M troškova minimalnih kapaciteta za gornji iznos ulazne naknade .....	82
Slika 42. Promjena NPV-a donjeg postrojenja .....	86
Slika 43. Promjena IRR-a donjeg postrojenja .....	87
Slika 44. Promjena NPV-a srednjeg postrojenja .....	88
Slika 45. Promjena IRR-a srednjeg postrojenja .....	88
Slika 46. Promjena NPV-a gornjeg postrojenja .....	89
Slika 47. Promjena IRR-a gornjeg postrojenja .....	90
Slika 48. Promjena NPV-a optimalnog postrojenja .....	94
Slika 49. Promjena IRR-a optimalnog postrojenja .....	95
Slika 50. Usporedba parametara analiziranih postrojenja .....	97

## Popis tablica

Tablica 1. Oznake plastičnih materijala [8].....	4
Tablica 2. Energetske vrijednosti goriva dobivenih procesom pirolize [15].....	10
Tablica 3. Usporedba polutanata različitih oblika zbrinjavanja jedne tone miješanog komunalnog otpada [17].....	12
Tablica 4. Usporedba reaktora [20].....	19
Tablica 5. Usporedba parametara i dobivenih produkata [11] .....	23
Tablica 6. Maseni udjeli mješavine plastika [21] .....	26
Tablica 7. Dobiveni produkti iz mješavine plastika [21] .....	27
Tablica 8. Postrojenja za pirolitičku obradu otpada [9] [23] [24] [25] [26] [27] [28].....	30
Tablica 9. Stupanj obrade realnog poslovnog subjekta [30] .....	36
Tablica 10. Srednje veličine referentnog postrojenja.....	41
Tablica 11. Godišnje amortizacijske stope za pojedine skupine dugotrajne imovine prema amortizacijskom vijeku za svrhe oporezivanja [43] .....	52
Tablica 12. Postotak poreza na dobit [44].....	53
Tablica 13. Investicijski troškovi postrojenja.....	60
Tablica 14. Troškovi pogona i održavanja postrojenja .....	60
Tablica 15. Tehnički parametri postrojenja.....	61
Tablica 16. Ekonomski parametri postrojenja .....	61
Tablica 17. Isplativost projekta prema standardnim parametrima.....	62
Tablica 18. Minimalni kapaciteti postrojenja za donji iznos ulazne naknade .....	75
Tablica 19. O&M troškovi minimalnih kapaciteta za donji iznos ulazne naknade .....	76
Tablica 20. Minimalni kapaciteti postrojenja za srednji iznos ulazne naknade .....	77
Tablica 21. O&M troškovi minimalnih kapaciteta srednji iznos ulazne naknade.....	79
Tablica 22. Minimalni kapaciteti postrojenja za gornji iznos ulazne naknade.....	80
Tablica 23. O&M troškovi minimalnih kapaciteta za gornji iznos ulazne naknade.....	81
Tablica 24. Tehnički parametri isplativih postrojenja.....	83
Tablica 25. Ekonomski parametri isplativih postrojenja.....	85
Tablica 26. Tehnički parametri optimalnog postrojenja .....	92
Tablica 27. Ekonomski parametri optimalnog postrojenja .....	93

## Popis kratica

<b>Kratica</b>	<b>Puno ime</b>
PS	Polistiren
PP	Polipropilen
PE	Polietilen
HDPE	Polietilen visoke gustoće
LDPE	Polietilen niske gustoće
PET	Polietilen tereftalat
PVC	Polivinil klorid
EU	Europska Unija
RH	Republika Hrvatska
TG	Krivulja termogravimetrijske analize
DTG	Derivacijska krivulja termogravimetrijske analize
FCC	Eng. fluid catalytic cracking
ZSM-5	Eng. Zeolit Socony Mobil-5
HZSM-5	Eng. H formo f Zeolit Socony Mobil-5
HUSY	Eng. Hierarchical H-style ultra-stable Y
HMOR	Eng. H-mordenite
SA-1	Eng. silica alumina 1
SA-2	Eng. silica alumina 2
GWP	Potencijal globalnog zatopljenja (eng. global warming potential)
AP	Potencijal zakiseljavanja (eng. acidification potential)
EP	Eutrofikacijski potencijal (eng. eutrophication potential)
ADP	Potencijal abiotske degradacije (eng. abiotic depletion potential)
ODP	Degradacija ozonskog omotača (eng. ozone layer depletion)
POCP	Potencijal fotokemijske proizvodnje ozona (eng. photochemical ozone creation potential)
CSBR	Konusni reaktor (eng. conical spouted bed reactor)
O&M	Troškovi pogona i održavanja (eng. operation and maintenance)
NPV	Sadašnja vrijednost novca (eng. net present value)

IRR	Unutarnja stopa povrata (eng. internal rate of return)
VOC	Isparljivi organski spojevi (eng. volatile organic compounds)
WACC	Ponderirani prosječni trošak kapitala (eng. weighted average cost of capital)

## Popis oznaka

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
I	kn	Investicija
x	kg/h	Kapacitet postrojenja
T	kn/god	Trošak pogona i održavanja
T <sub>s</sub>	kn/god	Stvarni troškovi pogona i održavanja
T <sub>ks</sub>	kn/god	Troškovi odlaganja katalizatora, koksa i mulja
P	kn/god	Prihodi postrojenja
K <sub>u</sub>	l/t	Prinos ulja
C <sub>u</sub>	kn/l	Otkupna cijena ulja
T <sub>uk</sub>	kn/god	Ukupni troškovi
B <sub>d</sub>	kn/god	Bruto dobit postrojenja
P <sub>o</sub>	kn/god	Porezna osnovica
A	kn/god	Iznos amortizacije
K	kn/god	Kamate
P	kn/god	Porez na dobit
P <sub>d</sub>	%	Porez na dobit
N <sub>d</sub>	kn/god	Neto dobit postrojenja
E <sub>y</sub>	kn/god	Ekonomski tok novca u promatranoj godini
E <sub>y-1</sub>	kn/god	Ekonomski tok novca u prijašnjoj godini
N <sub>d,y</sub>	kn/god	Neto dobit postrojenja u promatranoj godini
S <sub>y</sub>	kn/god	Sadašnja vrijednost novca u promatranoj godini
D	%	Diskontna stopa
NPV	kn	Sadašnja vrijednost novca kroz sve godine
IRR	%	Interna stopa povrata
AK	kn/god	Anuitet kredita

$F_y$	kn/god	Financijski tok novca u promatranjoj godini
$F_{y-1}$	kn/god	Financijski tok novca u prijašnjoj godini



## Sažetak

Tema ovog diplomskog rada je tehno-ekonomska analiza potencijalnog pirolitičkog postrojenja koje bi se izgradilo u sklopu realnog poslovnog subjekta. Predmetno poduzeće bavi se gospodarenjem neopasnim otpadom. Uspješnost njihove obrade kreće se od 70% za plastiku pa do 90% i više za papir, karton, metalni otpad i biorazgradivi otpad. Nakon procesa recikliranja poslovnom subjektu godišnje ostane 985 tona ostatnog otpada, a udio ostatnog otpada pirolitički bi se obrađivao. Od ukupno 985 tona, plastika koja bi se obrađivala iznosi 401,8 tona. Obradivu plastiku čine PS, PP, HDPE, LDPE i ostalo (7). PVC i PET nije poželjno obrađivati zbog loših svojstava u smislu procesa pirolize te ih je potrebno zbrinuti s ostalim otpadnim tokovima. Projekcijom količine nastalog otpada sukladno zahtjevima EU može se uvidjeti da će doći do povećanja količina odvojenog otpada. Sukladno tim zahtjevima, kapacitet potencijalnog postrojenja povišen je na 1 071,6 tona. Ostali parametri, poput prinosa ulja, ulazne naknade i raznih troškova, određeni su pregledom literature. Svi dostupni parametri su zabilježeni i osrednjeni. Tako osrednjenim parametrima i navedenim kapacitetom provedena je ekonomska analiza i analiza osjetljivosti kojima je utvrđena neisplativost projekta. U ostatku rada navedeni su potrebni koraci za projektiranje ekonomski isplativih postrojenja, njihova usporedba te zaključak. Svi proračuni izvršeni su u programu Excel.

Ključne riječi: plastika, piroliza, pirolitičko postrojenje, tehno-ekonomska analiza

## Summary

Theme of this thesis is the techno-economic analysis of a potential pyrolysis plant which would be built by a waste management company. The company's primary objective is waste recycling. Their rate of recycling ranges from 70% for plastics to 90% and more for paper, cardboard, metal and biodegradable waste. After waste goes through recycling process, the company is left with 985 tonnes of non-recyclable waste on a yearly basis. Percentage of said non-recyclable waste would be used in pyrolysis plant for production of pyrolysis oil. Out of 985 tonnes of non-recyclable waste, 401.8 tonnes would be used in pyrolysis process. Those 401.8 consist of PS, PP, HDPE, LDPE and other (7) types of plastic. PVC and PET should not be used in pyrolysis process due to their bad characteristics. Instead, they should be adequately disposed along with other waste outputs. In accordance to EU's municipal solid waste recycling requirements, it was projected that the amount of recycled waste will be increased. Thus, the capacity of a potential pyrolysis plant was increased to 1 071.6 tonnes. Other parameters, like oil yield, gate fee and various expenses, were determined by studying the literature. Found parameters were marked down and averaged. With those parameters and said capacity, economic analysis was carried out. It was determined that the plant capacity does not suffice in order to make the project feasible. In the rest of the thesis, it was shown what needs to be changed in order to design a profitable plant with a conclusion. All calculations were done in programme Excel.

Keywords: plastics, pyrolysis, pyrolysis plant, techno-economic analysis

## 1. Uvod

S povećanjem emisija stakleničkih plinova koje doprinose globalnom zatopljenju, svijet se sve više okreće zelenim tehnologijama i smanjenju potrošnje energije, teži se cirkularnoj ekonomiji te se pronalaze novi načini gospodarenja otpadom – jednim od najvećih problema današnjice. Otpad čine predmeti koje je korisnik odbacio ili ih planira odbaciti.

S obzirom na svojstva, otpad se dijeli na:

1. neopasni otpad
2. opasni otpad
3. inertni otpad

Prema mjestu nastanka može se podijeliti na:

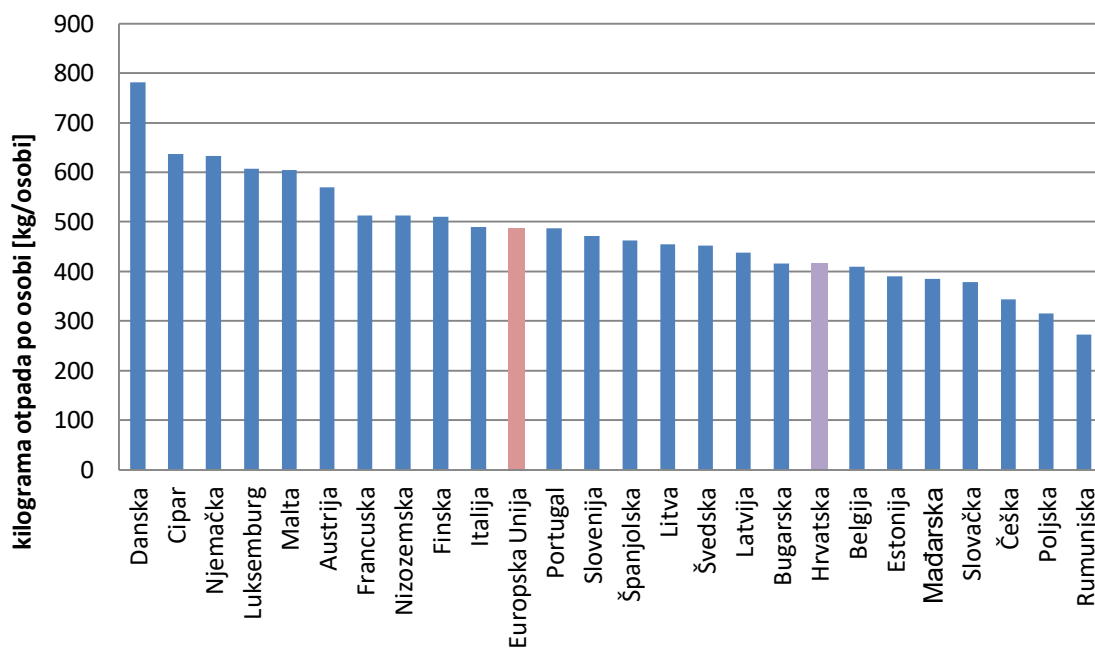
1. komunalni otpad
2. ambalažni otpad
3. građevinski otpad
4. industrijski otpad
5. električni i elektronički otpad
6. otpadna vozila i gume [1]

Neodgovarajuće gospodarenje otpadom može imati nepoželjne posljedice na okoliš i zdravlje ljudi i životinja, stoga je pri gospodarenju otpada potrebno uvažavati hijerarhiju prioriteta.



Slika 1. Hijerarhija gospodarenja otpadom [2]

Godine 2017. u Europskoj Uniji<sup>1</sup> proizvelo se 250 milijuna tona komunalnog otpada, prosječno 478 kg/osobi, što je smanjenje za 3,85% s obzirom na 2007. godinu. Proizvodnja komunalnog otpada značajno varira unutar država članica. Najviše se proizvodi u Danskoj (781 kg/osobi), Cipru (637 kg/osobi) te Njemačkoj (633 kg/osobi), a najmanje komunalnog otpada proizvode države Rumunjska (272 kg/osobi), Poljska (315 kg/osobi) te Češka (344 kg/osobi) [3]<sup>2</sup>.

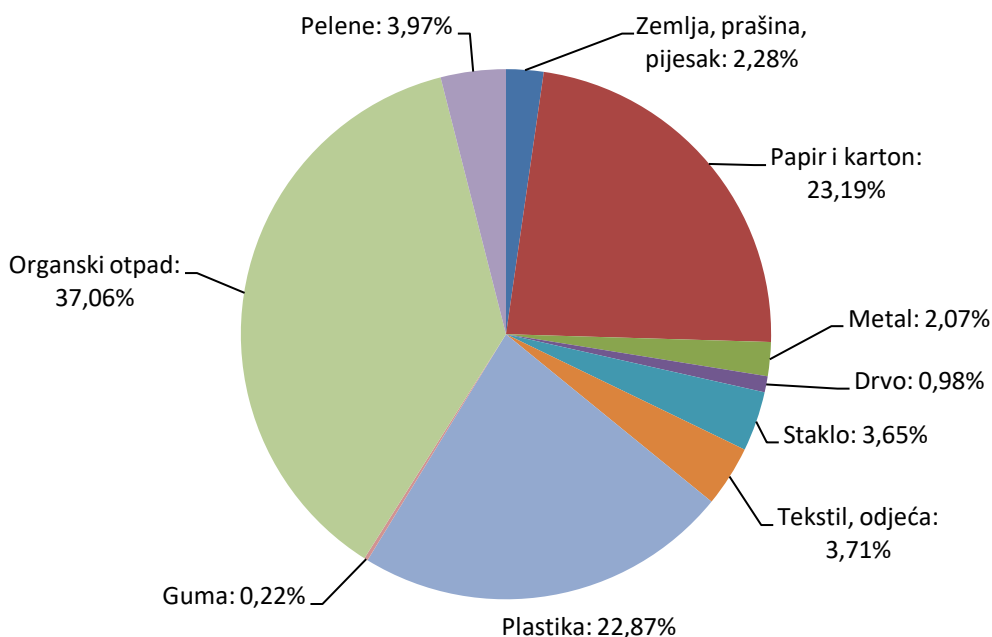


**Slika 2. Količine proizvedenog komunalnog otpada u EU, 2017. [3]**

<sup>1</sup> Europska Unija (28) – 28 zemalja; uključuje i Veliku Britaniju.

<sup>2</sup> 2017. godine podaci o komunalnom otpadu za Irsku, Grčku i Ujedinjeno Kraljevstvo nisu dostupni.

U Republici Hrvatskoj godišnje se proizvede 417 kg/osobi komunalnog otpada, a prosječni sastavi vidljiv je na slici 3.



**Slika 3. Sastav miješanog komunalnog otpada u RH, 2015. [4]**

Od ukupno proizvedenog komunalnog otpada, u Europskoj Uniji proizvedeno je 25 milijuna tona plastičnog otpada krajnjih korisnika<sup>3</sup>. Od ukupno navedenog broja, 26% se reciklira, 36% se energetske oporabljuje, a ostatak se zbrinjava na odlagalištima. Plastični materijali se ne razgrađuju i odloženi u tlu mogu ostati isti i više od 300 godina. Raspadanjem većih dijelova plastike, poput plastičnih vrećica, boca i ribarskih mreža, nastaje mikroplastika, plastični otpad veličine do 5 mm, koji u velikim količina završava u morima i oceanima te narušava njihov ekosustav [5]. Zbog navedenih razloga, Europska Unija želi da se 65% komunalnog i 75% plastičnog otpada reciklira do 2030. godine [6].








<sup>3</sup> eng. post-consumer – odnosi se na plastični otpad koji je nastao u kućanstvu, a plastični proizvod poslužio je primarno namijenjenoj svrsi ili je došao do kraja svog životnog vijeka.

U komunalnom otpadu uglavnom se može pronaći pet vrsta plastičnih materijala [7]:

- polietilen PE
- polipropilen PP
- polistiren PS
- poli(etilen-tereftalat) PET
- poli(vinil-klorid) PVC

Plastični proizvodi označavaju se broječanim oznakama kako bi se njihovo prikupljanje i recikliranje olakšalo [8]:

**Tablica 1. Oznake plastičnih materijala [8]**

Materijal	Oznaka
PET	
HDPE – polietilen visoke gustoće	
PVC	
LDPE – polietilen niske gustoće	
PP	
PS	
Ostali višeslojni (laminirani) materijali	

Plastični otpad koji se ne može ponovno upotrijebiti ni reciklirati moguće je drugačije uporabiti. S energetskeg aspekta, plastični otpad predstavlja izrazito vrijednu sirovinu jer se njegovim spaljivanjem izvlači dio energije koji je utrošen za njegovu proizvodnju te se smanjuju štetni utjecaji na okoliš te količina odloženog plastičnog otpada.

Načini uporabe plastičnog otpada su [1]:

1. materijalna uporaba:
  - recikliranje
2. kemijska uporaba:
  - hidroliza
3. termokemijska uporaba:
  - piroliza
  - hidriranje
  - isplinjavanje
  - spaljivanje

Konvencionalnim metodama mehaničke reciklaže ne mogu se reciklirati svi oblici plastike zbog njihove kontaminacije ostacima hrane, prašinom i zemljom, raznim papirnatim oznakama te polimernim mješavinama zbog čega metode energetske uporabe čine poželjnu alternativu. Unazad nekoliko godina, metode termokemijske uporabe poput pirolize, rasplinjavanja i spaljivanja doživjele su značajan tehnološki napredak u svrhu poboljšanja kvalitete gospodarenja otpadom [1].

## 2. Piroliza

Piroliza (ili otplinjavanje) definira se kao endotermni proces koji koristi toplinu za termičku dekompoziciju ugljični baziranih materijala bez prisustva kisika (nema gorenja). Glavni produkt pirolize je pirolitički plin koji se može koristiti za proizvodnju pare, odnosno struje, i topline. Pirolitički plin je plinovita mješavina ugljičnog monoksida CO, ugljičnog dioksida CO<sub>2</sub>, vodika H<sub>2</sub>, metana CH<sub>4</sub>, vodene pare H<sub>2</sub>O te drugih ugljikovodika i kondenzirajućih spojeva. Kondenzacijom pirolitičkog plina nastaje pirolitičko ulje koje se može koristiti kao gorivo ili kao sirovina za proizvodnju raznih kemikalija i proizvoda. Udio pojedinih produkata pirolize ovisi o tipu reaktora, uvjetima reakcije i vrsti sirovine [9]. Proces pirolize može se odvijati pri različitim temperaturama:

- nistkotemperaturna piroliza ili bubrenje: do 500 °C
- srednjetemperaturna piroliza: od 500 °C do 800 °C
- visokotemperaturna piroliza: od 800 °C

Tijekom procesa pirolize moguća je upotreba katalizatora koji pospješuju kemijske reakcije te snižavaju temperaturu odvijanja procesa pri čemu se smanjuje utrošak energije [10].

Glavni parametri reakcije koji utječu na produkte pirolize su:

- temperatura i tlak
- tip reaktora
- vrijeme odvijanja reakcije
- katalizatori
- tip plina za fluidizaciju

Najveći utjecaj na brzinu odvijanja reakcije ima temperatura o kojoj ovisi udio plina, ulja i ugljeniziranog ostatka kao produktima procesa. Za dobivanje plina procesom pirolize potrebne su temperature više od 500 °C, dok za dobivanje tekućeg produkta idealni raspon temperature iznosi od 300 °C do 500 °C.

Postoje mnoge varijacije tehnologija pirolize, no uglavnom one spadaju u jednu od sljedećih kategorija [9]:



- Termička piroliza – sirovina se zagrijava na temperature između 350 °C i 900 °C bez prisustva katalizatora. Produkt je uglavnom tekućina niskog udjela oktana i plin koji zahtijevaju dodatnu preradu.
- Piroliza s katalizatorima – proces pirolize odvija se uz prisustvo katalizatora. U usporedbi s pirolizom bez uporabe katalizatora, vrijeme reakcije i utrošak energije je niži. Ovakav proces pirolize može koristiti razne vrste polimernih materijala, uključujući i HDPE, LDPE, PP i PS.
- Hidriranje – proces pirolize odvija se uz prisustvo katalizatora i vodika, a proces se odvija na visokim temperaturama i tlakovima (150 °C – 400 °C, vodik na 30 do 100 bara). Ovakav postupak uglavnom se koristi za proizvodnju tekućeg produkta iz raznih oblika plastičnih materijala, uključujući plastiku iz miješanog komunalnog otpada, plastiku kontaminiranu ugljenom i raznim uljima te automobilske gume.

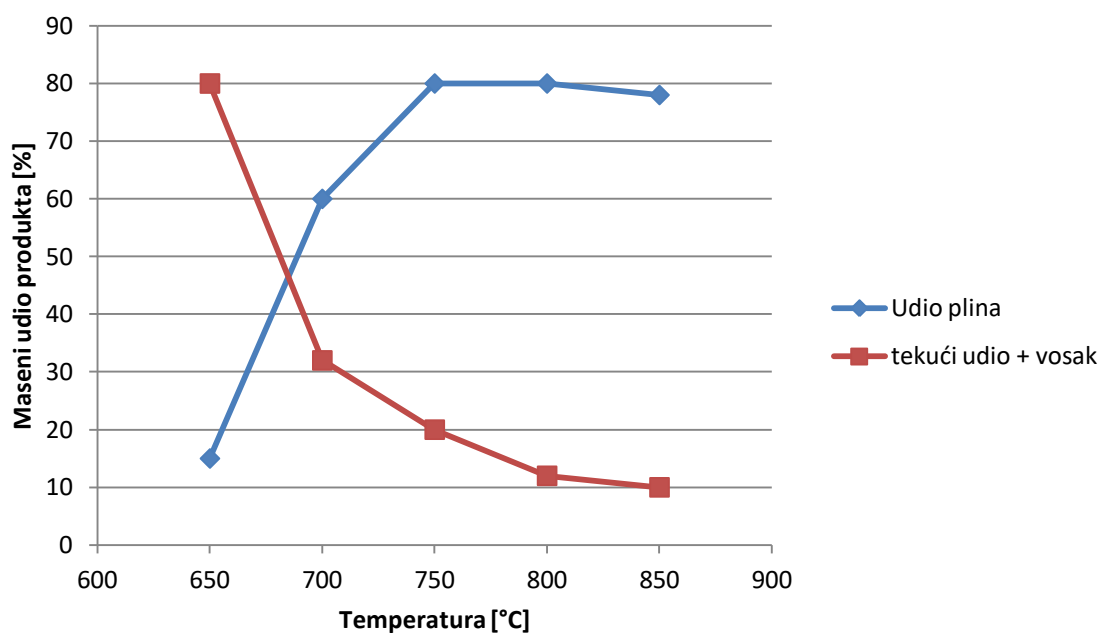
## 2.1. Temperatura

Temperatura je najbitniji parametar u procesu pirolize. Molekule plastike povezane su Van der Waalsovima vezama, sile koje su odgovorne za njihovu strukturu. Kod viših temperatura dolazi do povećanja vibracija molekula uslijed energetske nejednakosti između energije inducirane Van der Waalsovima silama i entalpije C – C veze u polimernom lancu, što u konačnici rezultira pucanjem ugljičnog lanca [11].

Termička degradacija plastike mjeri se termogravimetrijskom analizom. Ishod analize su dva dijagrama. Jedan dijagram daje krivulju termogravimetrijske analize (TG), a drugi dijagram daje derivacijsku krivulju termogravimetrijske analize (DTG). TG krivulja mjeri promjenu mase tvari u funkciji temperature i vremena. Derivacijom TG krivulje dobije se DTG krivulja koja predstavlja ovisnost brzine promjene mase o temperaturi, a pokazuje seriju „vrhova“ koji odgovaraju pojedinim stupnjevima razgradnje tvari [12].

U teoriji, temperatura raspada za određeni tip polimera trebala bi biti konstantna, međutim, u praksi se pokazalo da se ona razlikuje od istraživanja do istraživanja. Razlog tomu je udaljenost senzora temperature, odnosno njihovo pozicioniranje u reaktoru. Pri odvijanju procesa zabilježen je veliki temperaturni gradijent između, npr. donjeg i gornjeg sloja reaktora u krutom sloju te ovisno o poziciji senzora pri mjerenju, oni mogu izmjeriti različite temperature. Sumiranjem više istraživanja zajedno, utvrđeno je da je optimalna temperatura za dobivanje pirolitičkog ulja u rasponu od 350 do 500 °C. Za dobivanje više plina i krutog

ostatka, preporučena temperatura je iznad 500 °C. Ovi kriteriji vrijede za sve vrste plastike [11].



Slika 4. Udio produkta s obzirom na temperature [13]

## 2.2. Katalizatori

Katalizatori ubrzavaju i pospješuju kemijske reakcije tijekom odvijanja procesa pirolize, ne mijenjaju sastav niti reagiraju sa reaktantima. Upotrebom katalizatora smanjuje se temperatura reakcije, povisuje brzina kemijske reakcije, povisuje se efikasnost postrojenja te se povisuje kvaliteta produkta.

Postoje 2 tipa katalizatora, homogeni i heterogeni. Homogeni katalizatori imaju istu fazu kao i reaktanti, a uobičajeni homogeni katalizator za pirolizu plastike je Lewisova kiselina  $AlCl_3$ . Češće u upotrebi su heterogeni katalizatori budući da se tekući produkt može lako odvojiti od krutog katalizatora, što ih čini ekonomski isplativijima. Najčešće korišteni heterogeni katalizatori za pirolizu plastike su: zeoliti, FCC katalizatori i aluminij-silicij slitine.

Zeoliti su mikroporozni kristalni aluminosilikati sa sposobnošću izmjene iona. Ovakav katalizator izgrađen je od različitih omjera silicijeva dioksida  $SiO_2$  i aluminijeva oksida  $Al_2O_3$ , a njihov omjer utječe na kvalitetu produkta pirolize. Najčešće korišteni zeoliti su: HZSM-5, HUSY i HMOR.

FCC katalizatori sastavljeni su od zeolitnih kristala i ne-zeolitne kisele matrice poznate kao silicij-aluminijev oksid povezanih vezivnim sredstvom. FCC katalizatori pretežito se koriste u industriji prerade nafte u svrhu razbijanja težih frakcija nafte na lakše frakcije, poput benzina i ukapljenog naftnog plina. FCC katalizator posebno je zanimljiv jer se već korišteni FCC katalizator može dobiti iz rafinerija. Iako razina kontaminacije ovakvog katalizatora varira, on se i dalje može koristiti u procesu pirolize.

Aluminij-silicij katalizatori predstavljaju skupinu kiselih amorfnih katalizatora, a najčešće korišteni su: SA-1, ZSM-5 i SA-2.

Zaključno, najbolji katalizator za optimalno dobivanje tekućeg produkta je FCC katalizator. Iako su maseni udjeli produkta dobivenih pirolizom HDPE-a i PP-a usporedivi za FCC i aluminij-silicij katalizatore, FCC katalizator ima bolja katalitička svojstva te je ekonomski isplativiji [11].

### 2.3. Produkti

Glavni produkti pirolize su plinovite i tekuće frakcije te kruti ostatak. Plinovitu frakciju, tj. pirolitički plin, čine zaostali plinovi nakon kondenzacije te se mogu koristiti kao izvor energije. Tekuća frakcija, tj. tekuće pirolitičko ulje, smjesa je ugljikovodika po sastavu slična nafti te se može koristiti kao zamjena u proizvodnji teških goriva. Kruti ostatak, tj. čađa, sastoji se od negorivog materijala i znatne količine ugljika. S ekološkog aspekta, kruti ostatak nije poželjno spaljivati zbog emisije polutanata. Sa strane energetske učinkovitosti, kruti ostatak ima veliku ogrjevnu moć, a iskorištavanjem pohranjene energije povisuje se isplativost procesa.

### 2.4. Prednosti pirolize

- 1) Mogućnost korištenja raznih oblika sirovine za dobivanje korisnih produkata

U svrhu dobivanja tekućeg goriva proces pirolize može koristiti različite vrste sirovine: ostaci hrane, razne vrste drva, papir i karton, tekstil, plastika i ostala biomasa. Kada bi se uzeo prosječni komunalni otpad iz Republike Hrvatske, tada bi se potencijalno moglo pirolitički obraditi gotovo 88% sastava.

Iako su tipovi sirovine raznovrsni, o njihovom potencijalnom iskorištavanju ovisi tip reaktora [7].

## 2) Uloga u energetskej tranziciji i održivom razvoju

S okretanjem svijeta održivom razvoju, čišći izvori energije su imperativ, a goriva dobivena procesom pirolize mogu imati značajan doprinos. Goriva dobivena pirolizom zamjenjuju fosilna goriva što smanjuje štetne emisije.

- Uspoređujući nisko-sumporni dizel dobiven procesom pirolize iz otpadne plastike i dizel dobiven konvencionalnim metodama iste kvalitete, piroliza je smanjila emisije stakleničkih plinova za 14%, smanjila potrošnju vode za 58% te smanjila uporabu fosilnih goriva za 96% [14].
- Plinovito gorivo dobiveno procesom pirolize može se pohraniti te iskoristiti u periodima visoke potražnje električne energije, npr. tijekom hladnih zimskih i vrućih ljetnih dana. Tada je cijena električne energije viša pa se isplativost pirolitičkog postrojenja povisuje. Nadalje, sunce i vjetar nisu uvijek dostupni pa se pirolitički plin može koristiti u balansiranju ponude i potražnje elektroenergetskog sustava izgaranjem u plinskim turbinama.
- Moguća implementacija s centraliziranim toplinskim sustavom i kogeneracijskim postrojenjima, sustavima visoke efikasnosti.

Energetske vrijednosti produkata pirolize prikazane su u tablici 2.

**Tablica 2. Energetske vrijednosti goriva dobivenih procesom pirolize [15]**

Produkt	Energetska vrijednost
Pirolitički plin	10 – 15 MJ/Nm <sup>3</sup>
Pirolitičko ulje	15 – 20 MJ/kg
Kruti ostatak	33,6 MJ/kg

## 3) Poželjnija opcija od spaljivanja i odlaganja

Uglavnom se koriste tri metode zbrinjavanja komunalnog otpada: odlaganje, spaljivanje i piroliza. Odlaganje otpada je prema hijerarhijskom slijedu najmanje poželjna opcija, a korištenjem pirolize umjesto odlaganja smanjuje se količina odloženog otpada (ostataka) te se smanjuju emisije stakleničkih plinova i zagađenje okoliša, vode i zraka.

Spaljivanje otpada zahtjeva znatno više temperature za odvijanje procesa. Kako je potrebna prisutnost kisika, takva postrojenja zahtijevaju komplicirane filtre dimnih plinova. Zbog navedenih razloga, postrojenja namijenjena spaljivanju otpada često su veći objekti koji zahtijevaju veću investiciju, imaju više troškove održavanja, zahtijevaju više radnika te više zagađuju okoliš. Kako se piroliza odvija bez prisustva kisika, takav proces proizvodi manje  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  i HCl, a štetni polutanti poput sumpora i teških metala vezani su za kruti ostatak [16].

U tablici 3 navedeni su rezultati LCA analize utjecaja na okoliš nekoliko tehnologija uporabe otpada. Negativne vrijednosti u tablici prikazuju smanjenje utjecaja na okoliš, dok pozitivne pokazuju povećanje. Npr. proces pirolize obradom jedne tone miješanog komunalnog otpada može smanjiti utjecaj na globalno zatopljenje za 358,51 kg  $\text{CO}_2$  ekv ili povećati ga za 167 kg  $\text{CO}_2$  ekv. Iako je moguće procesom pirolize doprinijeti globalnom zatopljenju, piroliza zamjenjuje odlaganje otpada koje doprinosi globalnom zatopljenju u iznosu od 732 do 2 052 kg  $\text{CO}_2$  ekv, što u konačnici dovodi do smanjenja potencijala globalnog zatopljenja.

Odlaganje otpada najgora je mjera s obzirom na potencijal globalnog zatopljenja (GWP – global warming potential), koji je u tom kontekstu nekoliko puta veći od svih ostalih mjera (12 puta viši nego GWP pirolize). Spaljivanja je najopasnija metoda gospodarenja otpadom za ljudsko zdravlje. Ljudska toksičnost spaljivanja je čak 5 puta više od odlaganja [17].

Piroliza i rasplinjavanje dali su slične rezultate u kontekstu emisija. Minimum potencijala globalnog zatopljenja je vrlo sličan, međutim prosječni maksimum je relativno dosta viši. Potencijal zakiseljavanja je gotovo isti dok je eutrofikacijski potencijal nešto povoljniji kod rasplinjavanja. Ostale vrijednosti nisu poznate jer su ih istraživanja prikazala u obliku dijagrama bez brojčanih vrijednosti te zbog potencijalne pogreške one nisu uzete u obzir.

Iako je recikliranje poželjnija opcija, pojedini tipovi plastičnih proizvoda, poput plastičnih filmova, manjih komadića plastike, plastičnih zaštitnih naočala, PVC cijevi, kontaminiranih plastičnih proizvoda i dr., ne mogu se reciklirati zbog kontaminacije, veličine ili otpuštanja opasnih spojeva, međutim mogu se pirolitički obraditi.

Tablica 3. Usporedba polutanata različitih oblika zbrinjavanja jedne tone miješanog komunalnog otpada [17]

Kategorija	Mjerna jedinica	Odlaganje bez energetske uporabe	Odlaganje s energetsom uporabom <sup>4</sup>	Spaljivanje	Piroliza	Rasplinjavanje	Piroliza + rasplinjavanje
Potencijal globalnog zatopljenja (GWP)	kg CO <sub>2</sub> ekv	732 – 2052 (461 – 5476) <sup>5</sup>	240 – 746,46 (240 – 6990)	-109,2 – 850 (-618,5 – 6639,8)	-358,51 – 167 (-358,51 – 1194)	-420,8 – 580	412,13
Potencijal zakiseljavanja (AP)	kg SO <sub>2</sub> ekv	0,14 – 9,71 (0,14 – 9,71)	-1,3 – 11,78 (-1,3 – 43,6)	-1,8 – 2,37 (-1,8 – 38,3)	-4,39 – -0,7 (-4,39 – 1,6)	-5,11 – -0,38	0,25
Eutrofikacijski potencijal (EP)	kg PO <sub>4</sub> ekv	0,066 – 16,4 (0,002 – 132,04)	0 – 2,57 (0 – 37,9)	-1,4 – 1,75 (-1,4 – 129,16)	-1,73 – 0,1	-2,48 – -1,44	1,13
Potencijal abiotske degradacije (ADP)	kg Sb ekv	0 – 1,99 · 10 <sup>-6</sup>	-0,12 – -0,09 (-1,11 – -0,09)	-0,21 – 9,93 · 10 <sup>-6</sup> (-1,15 – 9,93 · 10 <sup>-6</sup> )	-	-	-0,046
Degradacija ozonskog omotača (ODP)	kg CFC-11 ekv	3,86 · 10 <sup>-6</sup> – 0,013	-9,6 · 10 <sup>-6</sup> – 0,0037	-1,9 · 10 <sup>-5</sup> – 5,4 · 10 <sup>-7</sup>	7,02 · 10 <sup>-9</sup>	-	-1,4 · 10 <sup>-5</sup>
Toksičnost za ljude	kg 1,4-DB ekv	47,9 – 182,4	8,15 – 175,7 (-271 – 175,7)	20,6 – 1178,67 (-182 – 1178,67)	-	-	805,57
Fotokemijska oksidacija	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ekv	0,35 – 0,41	0,1 – 0,12 (0,1 – 1,63)	-0,045 – 0,014 (-0,045 – 2,14)	-	-	-0,0024
Potencijal fotokemijske proizvodnje ozona (POCP)	kg C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ekv	0,41 – 1,51	0,38 – 0,39	-0,15 – 0,0091	0,00036 – 4,11	-0,16 – 0,001	-

<sup>4</sup> Odlaganje s energetsom uporabom odnosi se na prikupljanje proizvedenog bioplina s odlagališta.<sup>5</sup> Vrijednosti u zagradama označuju minimalne i maksimalne vrijednosti, odnosno ekstreme. Vrijednosti izvan zagrada su prosječne vrijednosti.

## 2.5. Nedostaci pirolize

### 1) Pretposljednja kategorija prema hijerarhijskom rasporedu

Iako piroliza ima svoje mjesto u gospodarenju otpadom, ona nikako ne smije biti primarni način zbrinjavanja otpada u smislu održivosti. Poželjnije opcije od kemijske uporabe otpada su: sprječavanje nastanka otpada tijekom dizajna proizvoda, ponovna uporaba proizvoda sve do isteka životnog vijeka i recikliranje.

### 2) Maksimalne količine emisija štetnih tvari nisu nužno u granicama sigurnim za ljudsko zdravlje

Piroliza emitira niže količine štetnih tvari u usporedbi s nekim drugim metodama uporabe otpada, one i dalje postoje, a njihove količine može biti štetna po ljudsko zdravlje. Pirolitički postupka može emitirati niz štetnih tvari poput kiselih plinova, dioksina, furana, NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub>, teških metala te razne vrste većih čestica, a njihova dopuštena razina utvrđena je tehnološki izvedivim minimalnim količinama, odnosno, utvrđena je prema raspoloživoj tehnologiji [18].

### 3) Konkurencija obnovljivim izvorima energije

U nekim državama dobivanje energije iz otpada smatra se obnovljivim izvorom energije što ima za posljedicu [19]:

- Varljiva statistika – države koje su dužne povećati udio energije iz obnovljivih izvora mogu klasificirati otpad kao obnovljivi izvor. Tako će upotpuniti traženi zahtjev i istodobno smanjiti odlaganje otpada. Ovakav postupak se pozitivno izražava u statistikama, no temeljni problemi i dalje nisu riješeni. Proizvedena energija i dalje ima određenu količinu emisija, a takav način gospodarenja otpadom nije poželjan, odnosno održiv.
- Smanjena količina investicija u „stvarne“ obnovljive izvore – ako bi se postrojenja koja koriste otpad za dobivanje energije klasificirala kao obnovljivi izvori, tada oni imaju pravo prijaviti se na natječaje za subvencioniranje projekata, što za posljedicu ima smanjenje ulaganja u stvarne oblike obnovljivih izvora energije.

### 4) Energija pohranjena u krutom ostatku

Čađa koja ostane na kraju pirolitičkog procesa ima veliki udio neiskorištenog ugljika (33,6 MJ/kg). Zbog isplativosti postrojenja, pohranjena energija bi se trebala u što većoj mjeri iskoristiti. Negativna strana iskorištavanja energije iz krutog ostatka leži u činjenici da se u krutom ostatku nalaze sumpor i razni teški metali koji se oslobađaju u atmosferu prilikom

visokotemperaturnog procesa. Iako se ovakvim postupkom povisuje isplativost postrojenja, ono ima znatni negativni utjecaj na okoliš te zdravlje živih bića [15].



### 3. Tehnologija

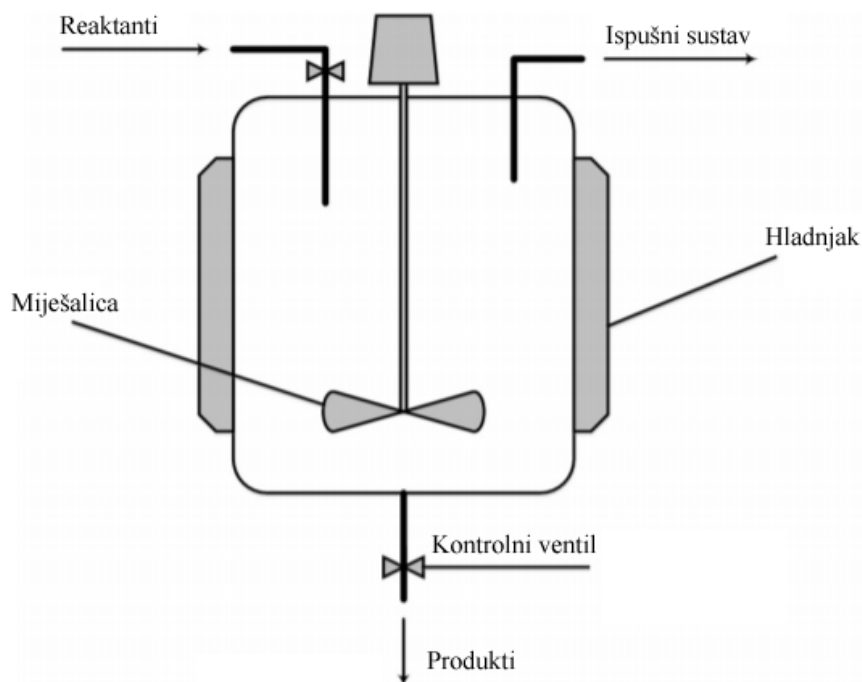
#### 3.1. Vrste reaktora

Kompleksno ponašanje otpadne plastike tijekom procesa pirolize predstavlja veliki izazov pri projektiranju reaktora. Plastika ima nisku toplinsku provodljivost, što otežava ujednačeno zagrijavanje plastike tijekom pirolitičkog postupka. Nadalje, otopljena plastika je ljepljiva, što može izazvati značajne operativne probleme. Navedeni problemi pojavljuju se u manjoj mjeri tijekom proizvodnje pirolitičkog plina, zbog viših temperatura koje ubrzavaju degradaciju.

Reaktor mora biti u mogućnosti prenijeti toplinu visokom brzinom te imati kvalitetnu kontrolu i regulaciju temperature. Takve karakteristike bitne su zbog sprječavanja operativnih problema nastalih uslijed ljepljive prirode plastike.

##### 3.1.1. Kotlasti i polukotlasti reaktori

Kotlasti reaktor predstavlja zatvoreni tip reaktora u kojem tijekom trajanja reakcije nema ulaza ni izlaza reaktanata i produkata. Veliki stupanj pretvorbe plastike u poželjni produkt prednost je ovakvog tipa, što se ostvaruje duljim zadržavanjem reaktanta u reaktoru. Mana ovakvog tipa je velika varijabilnost kvalitete produkta od serije do serije, visoki troškovi rada i nemogućnost masovne obrade plastike.



Slika 5. Kotlasti reaktor [11]

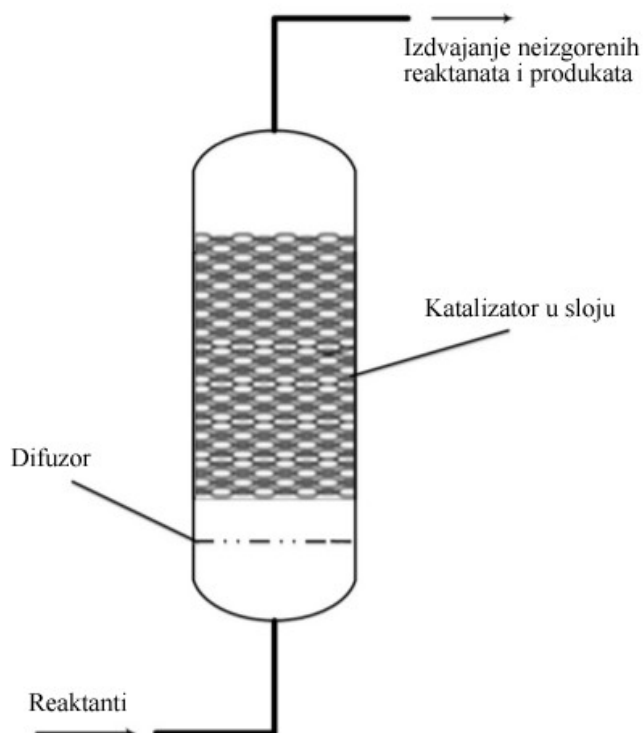
Polukotlasti reaktori dopuštaju dodavanje reaktanata i oduzimanje produkata, što je i jedna od prednosti nad kotlastim reaktorima. Mane su slične zatvorenom tipku reaktora u kontekstu troškova, tako da je ovakva izvedba reaktora pogodnija za manju proizvodnju.

Piroliza se u ovakvim reaktorima odvija pri temperaturama od 300 °C do 800 °C sa i bez katalizatora.

Ovakvi tipovi reaktora najpogodniji su za termičku (bez katalizatora) pirolitičku obradu za dobivanje pirolitičkog ulja budući da se parametri procesa mogu kvalitetno kontrolirati, međutim ne preporučuju se za pirolizu s katalizatorima zbog formiranja koksa na vanjskoj površini katalizatora, što ima veliki utjecaj na kvalitetu produkta. Zbog velikih operativnih troškova, ovakve izvedbe pogodne su za laboratorijske pokuse ili kao manja postrojenja [11] [20].

### 3.1.2. Reaktori za pirolizu u fiksnom sloju

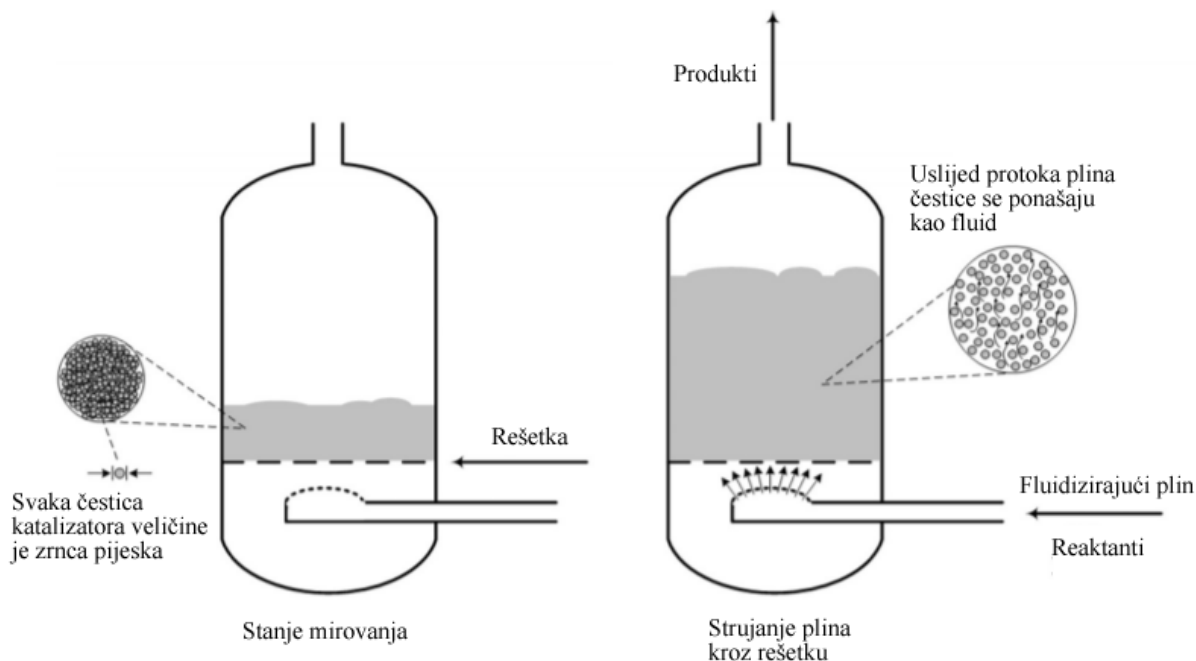
Reaktori za pirolizu u fiksnom jednostavne su konstrukcije, ali zahtijevaju ujednačenost veličina i oblika čestica plastike. Katalizatori u reaktoru posloženi su jedan na drugog, a njihova struktura slična je strukturi paleta. Tijekom procesa pirolize, plastika se zagrijava od 5 do 25 °C/min sve do željene temperature. Brzina reakcije i količina ulazne sirovine ograničeni su lošim svojstvima prijenosa topline plastike. Ovakve reaktore moguće je koristiti kao sekundarne reaktore, no ne postoji mnogo studija o procesima sa sekundarnim reaktorima zbog loše ekonomske isplativosti i činjenice da se dobiveni rezultati ne razlikuju mnogo u usporedbi s jednostupanjskim procesom [11] [20].



**Slika 6. Reaktor za pirolizu u fiksnom sloju [11]**

### 3.1.3. Reaktori za pirolizu u fluidizirajućem sloju

Ovi tipovi reaktora zahtjevnije su konstrukcije od reaktora s fiksnim slojem, ali u usporedbi s njima, pružaju znatne prednosti. Katalizator se u reaktoru polaže na rešetku kroz koju se propuhuje plin podižući katalizator s rešetke. Katalizator se zatim miješa s česticama plastike, pri čemu se zajedno ponašaju kao fluid. Zbog fleksibilnosti koju pružaju (dobro miješanje katalizatora i plastike, mogućnost obrade većih količina sirovine itd.), reaktori za pirolizu u fluidizirajućem sloju pogodni su za komercijalnu uporabu [11] [20].



**Slika 7. Reaktor sa pirolizu u fluidizirajućem sloju**

#### 3.1.4. Konusni reaktori

Konusni reaktori (CSBR) su alternativa reaktorima s fluidizirajućim slojem jer mogu obrađivati čestice plastike raznih oblika, veličina i gustoća. Glavna karakteristika im je intenzivna izmjena topline koja pospješuje reakciju i povećava kvalitetu produkta te mogućnost obrađivanja do 25 kg/h plastike. Nedostaci su otežano prikupljanje produkata i dodavanje katalizatora [11] [20].

#### 3.1.5. Ostali tipovi reaktora [20]

Da bi se ublažio negativni utjecaj niskog prijenosa topline, konstruirani su razni tipovi reaktora za pirolizu.

##### 3.1.5.1. Reaktivni ekstruderi

Reaktivni ekstruderi sastavljeni su cijevnog reaktora i vijčane pomične trake. Prednosti su im lako rukovanje polimerima i fleksibilnost procesa.

##### 3.1.5.2. Mikrovalovima potpomognuti reaktori

U ovim reaktorima materijal sa visokom sposobnošću apsorpcije mikrovalova pomiješan je sa česticama plastike. Ovakav tip zagrijavanja zračenjem ima viši stupanj prijenosa topline, viši stupanj obrade te smanjene troškove. Nisu u široj uporabi zbog nedostatka informacija o dielektričnim svojstvima otpada kroz njegov životni vijek.

### 3.1.5.3. Reaktori s plazmom

Ovakvi tipovi reaktora omogućuju intenzivne prijenose topline i to do  $10^6$  °C/s te postizanje visokih temperatura do 8 000 °C. Pogodni su za proizvodnju pirolitičkog plina.

### 3.1.5.4. Tekuće kupke

Polimerni materijal uronjen je u tekući metal koji mu predaje toplinu potrebnu za otapanje. Zbog bolje izmjene topline nisu potrebni mehanički rotirajući dijelovi za miješanje.

### 3.1.5.5. Rotirajuće sfere

Omogućuje odličnu izmiješanost plastike i katalizatora te povećanu izmjenu topline.

Pregled prednosti i nedostataka reaktora može se vidjeti u tablici 4.

**Tablica 4. Usporedba reaktora [20]**

Tehnologija	Prednosti	Nedostaci
Reaktori s fiksnim slojem	<ul style="list-style-type: none"> <li>- jednostavna konstrukcija</li> <li>- niska investicija</li> <li>- nema ograničenja s obzirom na veličinu čestica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- otežani kontinuirani rad</li> <li>- skaliranje procesa</li> <li>- niski kapacitet</li> <li>- teško kontroliranje pogonskih parametara</li> <li>- lošiji kontakt katalizatora i plastike</li> <li>- loš kontakt plina i plastike</li> <li>- nizak prijenos topline</li> <li>- raznovrsna kvaliteta produkta</li> </ul>
Reaktori s fluidizirajućim slojem	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visok prijenos temperature</li> <li>- ujednačenost temperature procesa</li> <li>- skaliranje procesa</li> <li>- kontinuiranost procesa</li> <li>- dobro kontroliranje pogonskih parametara</li> <li>- dobar kontakt plina i</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visoka investicija</li> <li>- defluidizacija</li> <li>- usitnjavanje materijala na rešetci</li> <li>- ograničenost veličine materijala na rešetci</li> </ul>

	<p>plastike</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- dobra izmiješanost</li> <li>- veliki kapacitet</li> <li>- dobar kontakt katalizatora i plastike</li> <li>- ujednačenost kvalitete produkta</li> <li>- mogućnost dodavanja katalizatora</li> </ul>	
Konusni reaktori	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visok prijenos temperature</li> <li>- ujednačenost temperature procesa</li> <li>- kratko vrijeme zadržavanja čestica u reaktoru</li> <li>- kontinuiranost procesa</li> <li>- veliki kapacitet</li> <li>- dobro kontroliranje pogonskih parametara</li> <li>- dobar kontakt katalizatora i plastike</li> <li>- dobar kontakt plina i plastike</li> <li>- dobra izmiješanost</li> <li>- ujednačenost kvalitete produkta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- skaliranje procesa</li> <li>- usitnjavanje materijala na rešetci</li> <li>- ograničenost veličine materijala na rešetci</li> <li>- otežana cirkulacija katalizatora</li> </ul>
Reaktivni ekstruderi	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dobra kontrola vremena zadržavanja krutih čestica</li> <li>- skaliranje</li> <li>- jednostavna konstrukcija</li> <li>- dobar kontakt katalizatora i plastike</li> <li>- dobra izmiješanost</li> <li>- nema ograničenja s obzirom</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nizak prijenos topline</li> <li>- visoki troškovi održavanja</li> <li>- više rotirajućih dijelova</li> </ul>

	na veličinu čestica	
Reaktori s mikrovalovima	<ul style="list-style-type: none"> <li>- brzo zagrijavanje</li> <li>- niska investicija</li> <li>- jednostavna konstrukcija</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- skaliranje</li> <li>- otežan rad u kontinuiranom režimu</li> <li>- ovisnost o dielektričnim svojstvima otpada</li> <li>- loša izmiješanost</li> <li>- ograničenost veličina čestica</li> </ul>
Tekuća kupka	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visoka izmjena topline</li> <li>- nema ograničenja veličina čestica</li> <li>- dobra kontrola temperature</li> <li>- kontinuirani rad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visoki troškovi materijala zbog korozivnosti soli</li> <li>- pokretanje i obustavljanje pogona</li> <li>- skaliranje</li> </ul>
Rotirajuće sfere	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visoka izmjena topline</li> <li>- dobra izmiješanost</li> <li>- kontinuirani rad</li> <li>- dobar kontakt katalizatora i plastike</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kompleksna konstrukcija</li> <li>- više rotirajućih dijelova</li> <li>- skaliranje</li> <li>- visoki troškovi održavanja</li> </ul>

Reaktor s fiksnim slojem povoljan je u smislu niske investicije i jednostavne konstrukcije, međutim takvi reaktori imaju lošu izmiješanost plastike i katalizatora. Reaktor s fluidizirajućim slojem i reaktivni ekstruder pogodni su za komercijalnu uporabu zbog visoke mogućnosti skaliranja procesa. Njihov nedostatak je viša investicija, odnosno troškovi pogona i održavanja. Konusni reaktor još je jedan reaktor pogodan za komercijalnu uporabu zbog odličnih svojstava izmjene topline, toplinske jednakosti procesa te dodira plastika-katalizator i plastika-plin. Međutim, pri projektiranju postrojenja s ovakvim tipom reaktora treba voditi brigu o lošem skaliranju procesa.

Ostale vrste reaktora se manje upotrebljavaju jer su još u fazi razvoja ili fazi istraživanja.

### **3.2. Produkti reaktora i usporedba**

Najvažniji parametar u proizvodnji pirolitičkog ulja je temperatura. Različite vrste plastike imaju drugačiju temperaturu degradacije koja ovisi o njihovim kemijskim svojostima. Optimalna temperatura za proizvodnju pirolitičkog ulja može znatno varirati ovisno o svojstvima plastike te procesnim uvjetima, poput korištenja drugačijih tipova katalizatora, omjer katalizator/plastika i tipu korištenog reaktora – Tablica 5.



Tablica 5. Usporedba parametara i dobivenih produkata [11]<sup>6</sup>

Vrsta plastike	Reaktor	Procesni parametri				Produkti			Bilješke
		Temperatura [°C]	Tlak	Stupanj zagrijavanja [°C/min]	Trajanje reakcije	Ulje (wt%) <sup>7</sup>	Plin (wt%)	Kruti ostatak (wt%)	
PET	Fiksni	500	-	10	-	21,3	76,9	0	
PET	-	500	1 atm	6	-	38,89	52,13	8,98	
HDPE	Horizontalni čelični	350	-	20	30	80,88	17,24	1,88	
HDPE	Polukotlasti	400	-	7	-	82	16	2	Stupanj miješanja 200 okretaja u minuti FCC katalizator 10 wt%
HDPE	Kotlasti	450	1 atm	-	60	74,5	5,8	19,7	
HDPE	Polukotlasti	450	-	25	-	91,2	4,1	4,7	Stupanj miješanja 200 okretaja u minuti FCC katalizator 20 wt%
HDPE	Fluizidirajući	500	1 atm	-	60	85	10	5	Silicij-aluminij

<sup>6</sup> Svi eksperimenti koristili su dušik kao fluidizirajući medij.<sup>7</sup> wt% -> maseni udio.

									katalizator
HDPE	Kotlasti	550	-	5	-	84,7	16,3	0	
HDPE	Fluizidirajući	650	-	-	20 – 25	68,5	31,5	0	
PVC	Fiksni	500	-	10	-	12,3	87,7	0	
PVC	Kotlasti s vakuumom	520	2 kPa	10	-	12,79	0,34	28,13	+ produkt HCl = 58,2 wt%
LDPE	Kotlasti pod tlakom	425	0,8 – 4,3 MPa	10	60	89,5	10	0,5	
LDPE	Kotlasti	430	-	3	-	75,6	8,2	7,5	+ produkt vosak = 8,7 wt%
LDPE	-	500	1 atm	6	-	80,41	19,43	0,16	
LDPE	Fiksni	500	-	10	20	95	5	0	
LDPE	Kotlasti	550	-	5	-	93,1	14,6	0	
LDPE	Fluizidirajući	600	1 atm	-	-	51	24,2	0	+ produkt vosak = 24,8 wt%
PP	Horizontalni čelični	300	-	20	30	69,82	28,84	1,34	
PP	Kotlasti	380	1 atm	3	-	80,1	6,6	13,3	
PP	Polukotlasti	400	1 atm	7	-	85	13	2	Stupanj miješanja 200 okretaja u minuti

									FCC katalizator 10 wt%
PP	Polukotlasti	450	1 atm	25	-	92,3	4,1	3,6	Stupanj miješanja 50 okretaja u minuti FCC katalizator 20 wt%
PP	-	500	1 atm	6	-	82,12	17,76	0,12	
PP	Kotlasti	740	-	-	-	48,8	49,6	1,6	
PS	Polukotlasti	400	1 atm	7	-	90	6	4	Stupanj miješanja 200 okretaja u minuti FCC kat/polimer = 10
PS	Kotlasti pod tlakom	425	0,31 – 1,6 MPa	10	60	97	2,5	0,5	
PS	Kotlasti	500	-	-	150	96,73	3,27	0	Zn katalizator/polimer = 5
PS	Kotlasti	580	-	-	-	89,5	9,9	0,6	64,9 wt% tekućine sastoji se od stirena

Tablica 5 sumira optimalne temperature za dobivanje maksimalnog prinosa pirolitičkog ulja. Drugi utjecajni parametri su tip reaktora, tlak, stupanj zagrijavanja i trajanje reakcije. Svi izvedeni pokusi koristili su dušikov plin.

PET i PVC pokazali su najmanji doprinosu prinosa ulja, zbog čega ovakvi tipovi plastike nisu previše istraživani u kontekstu pirolize. Nadalje, izgaranjem PET-a nastaju policiklički aromatski ugljikovodici (PAH) i poliklorirani bifenili (PCB), spojevi opasni za ljudsko zdravlje. PVC se ne preporuča za pirolitičku obradu zbog nastajanja klorovodične kiseline.

Optimalna temperatura za dobivanje pirolitičkog ulja je u rasponu od 500 °C do 550 °C za termičku pirolizu. Korištenjem katalizatora, ta temperatura se smanjuje na 450 °C uz koju je količina proizvedenog ulja čak i viša.

Korištenje katalizatora povoljno je u gotovo svim slučajevima, osim kod reakcije PS-a. PS se razlaže jednostavno i brzo bez katalizatora te daje čak 97% masenog udjela ulja. PS je poželjna vrsta plastike za pirolizu. Osim PS-a, visoke masene udjele ulja dali su i LDPE (93,1%), HDPE (84,7%) te PP (82,12%) [11]. Korištenjem katalizatora, maseni udio dobivenog ulja iz HDPE i PP može prijeći 90%.

### 3.3. Utjecaj miješane plastike na produkte pirolize [21]

Tablica 5 prikazuje dobivene produkte pojedinih tipova sirovina. Češće, ulazna sirovina nije samo jedan tip plastike već mješavina više vrsta, stoga je potrebno ispitati ponašanje plastičnih mješavina u procesu pirolize.

Kao primjer ulazne sirovine za analizu odabrana je prosječna mješavina plastika iz europskih kućanstava. Njezin maseni sastav vidljiv je u tablici 6.

**Tablica 6. Maseni udjeli mješavine plastika [21]**

Vrsta plastike	Maseni udio [%]
Polietilen (HDPE)	44,4
Polipropilen (PP)	21,2
Polistiren (PS)	13,3
Polivinil-klorid (PVC)	12,2
Polietilen tereftalat (PET)	8,9

Mješavina je ubačena u testni reaktor i držana na temperaturi od 500 °C u trajanju od jedan sat. Tlak na kraju reakcije dosegao je 18 MPa. Rezultati testa prikazani su u tablici 7. Uz pojedine vrste plastike, u tablici 7 navedene su i DSD<sup>8</sup> (Duales System Deutschland) i Fost Plus<sup>9</sup> mješavine. DSD plastična mješavina je uzorak miješanog plastičnog otpada iz Njemačke, a Fost Plus miješanog plastičnog otpada iz Belgije. Uzorci su po sastavu slični plastičnoj mješavini iz tablice 6, međutim točni maseni udjeli su nepoznati.

**Tablica 7. Dobiveni produkti iz mješavine plastika [21]**

Vrsta plastike	Ulje [wt%]	Plin [wt%]	Koks [wt%]
PE	93	7	0
PP	95	5	0
PS	71	2	27
PVC	-	-	-
PET	15	32	53
Mješavina plastika (simulirano)	48,7	3,7	34,6
Mješavina plastika (računski)	72,3	-	-
DSD mješavina	48,2	2,2	35,1
Fost Plus mješavina	70,6	4,9	17,8

PE i PP pokazali su veliki udio tekuće faze u dobivenim produktima od 93 i 95%. PS također ima visoki prinos ulja od 71%, no tu je i visoki udio koksa što se ne javlja kod PE i PP. PET je pokazao niski prinos ulja od samo 15%, dok je udio dobivenog koksa izrazito visok, 53%. Piroлиза PVC-a nije se mogla završiti zbog korozije reaktorskog diska uslijed formiranja klorovodične kiseline.

U tablici 7 vidljiva je velika razlika između pirolize simuliranog i računskog procesa, uglavnom zbog podcjenjivanja utjecaja PET-a i PVC-a na proces pirolize. DSD i Fost Plus mješavine također daju različite rezultate. DSD u usporedbi s Fost plus mješavinom, sadržava viši udio papira i prljavštine što dovodi do smanjenja prinosa ulja.

<sup>8</sup> Duales System Deutschland GmbH – Njemačka tvrtka koja se bavi zbrinjavanjem otpada.

<sup>9</sup> Fost plus – Belgijska tvrtka koja se bavi zbrinjavanjem otpada.

Za što viši prinos ulja, potrebno je držati razinu nečistoća što nižom. PET i PVC tipovi su plastike koji se ne bi trebali pirolitički obrađivati zbog niske proizvodnje ulja. U slučaju PVC-a, uz niski prinos ulja, javlja se i problem stvaranja klorovodične kiseline.

### 3.4. Utjecaj miješanog otpada na produkte pirolize [22]

Osim korištenja miješane plastike, ulazna sirovina može biti i miješani komunalni otpad. Uz plastiku, u procesu pirolize mogu se koristiti i organske tvari, poput biomase, hrane i papira. Zbog visokog udjela vode i kisika u organskim tvarima, ulje dobiveno pirolizom miješanog otpada ima manju energetska vrijednost od ulja dobivenog pirolizom plastike. Kvaliteta ulja može se unaprijediti zasebnim postupcima poput hidriranja, ili se može integrirati upotreba katalizatora u proces pirolize. Vrste katalizatora koji se koriste su zeoliti, metalni oksidi, bimetalni, dolomiti i drugi, a njihova uporaba značajno povisuje kvalitetu i kvantitetu ulja. Usko grlo ovakvog procesa pirolize je deaktivacija katalizatora formiranjem koksa na površini katalizatora. Ovaj fenomen ispitan je u polu-kotlovskom reaktoru na temperaturi od 440 °C u trajanju od 30 minuta. Prinos ulja smanjen je od 80% masenog udjela na 58%, maseni udio plina povisio se s 18% na 40% dok je maseni udio koksa ostao približno isti. Maseni udio formiranog koksa na površini katalizatora iznosio je 23%.

Koks se na površini katalizatora formira veoma brzo te je moguće katalizator u potpunosti deaktivirati već nakon 60 minuta. Nakon deaktivacije katalizatora, daljnjim provođenjem procesa pirolize nema promjena u masenim udjelima produkta.

Metalni oksidi najčešće su korišteni katalizatori u procesu pirolize s miješanim komunalnim otpadom. Najviše ispitan metalni oksid je aluminijev oksid  $Al_2O_3$  koji ima visoku sposobnost deoksidacije. Njegovim korištenjem smanjuje se udio kisika i vode u pirolitičkom ulju, no aluminijev oksid podložan je brzom deaktivaciji i nije prikladan za korištenje u kiselj atmosferi. Molibdenov trioksid  $MoO_3$  stabilniji je katalizator, ali smanjuje prinos ulja. Ostali manje korišteni katalizatori poput  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $CeO_2$ , dolomita i drugih, imaju svoje prednosti i nedostatke, ali ni jedan ne rješava problem uskog grla hvatanja koksa na površini katalizatora.

Trenutno ne postoji dugoročno aktivni tip katalizatora za proizvodnju pirolitičkog ulja iz miješanog komunalnog otpada. Moguća je regeneracija katalizatora primjenom jakih otapala, međutim takve postupke potrebno je detaljnije ispitati.

### **3.5. Pregled postrojenja**

U tablici 8 nabrojana su neka od postojećih postrojenja u svijetu koja koriste pirolizu za obradu otpada te dobivanja korisnog produkta.

Tablica 8. Postrojenja za pirolitičku obradu otpada [9] [23] [24] [25] [26] [27] [28]

Izvođač	Lokacija	Sirovina	Količina ulazne sirovine [tona/dan]	Temperatura [°C]	Produkt		
					Tekući	Plinoviti	Kruti
	Beč	Biomasa	14,4	450 – 630	11,4 t/dan		
JBI	New York <sup>10</sup>	MSW plastika	44		25 200 l/dan		
R-ONE <sup>11</sup>	Hukou County	Otpadna plastika	2		1,6 t/dan	0,16 t/dan	0,21 t/dan
Nexus Fuels	Atlanta	Plastika krajnjih potrošača	1,8	375 – 415	1 240 – 1 598 l/dan	8 – 12 wt%	5 – 10 wt%
PK Clean	Salt Lake City	Plastika 1 – 7	4,5		4 730 l/dan		5 – 10 wt%
Agilyx	Tigard	Plastika 2 – 7	9,1		6 200 l/dan	7 – 15 wt%	7 – 10 wt%
Envion	Derwood	Plastika	24				2,6 – 6,5 t/dan
Agilyx	Tigard	Plastika	8,2		9 500 l/dan		
Climax	Fairfax	Plastika	16		15 700 l/dan		

<sup>10</sup> JBI – New York – studija isplativosti, nije konkretno postrojenje.

<sup>11</sup> R-ONE se odnosi na raspoloživu tehnologiju, ne na postrojenje.



JB I	Niagara Falls		16				
Veba	Bottrop	Poliolefin			65 MWh/t		
Vaporox	Brazil	Otpadna guma	2,4		41 wt%	12 wt%	38 wt%
Agilyx	Oregon	MSW plastika	9	593	80 wt%	12 wt%	8 wt%
Anhui Orsun Environmental Technologies	Hefei	Plastika 1 – 7, polilaktična kiselina	20				
Blest	Japan	MSW/MRF otpad, poljoprivredni otpad	9,6	400			
Climax Global Energy	South Carolina	MSW/MRF plastika	3	400	75 wt%		
Cynar plc	Irska	MSW/MRF plastika	10		75 – 90 wt% (700 l/t)	5 wt%	5 – 10 wt%
Dynamotive	British Columbia	Biomasa	15	450 – 500	60-75 wt%	10 – 20 wt%	15 – 20 wt%
2Envion	Washington	MRF Plastika	27		70 wt% (357 – 596 l/t)	15 wt%	
GEEP	Ontario	Plastika 1 – 7	16	450 – 500			
GreenMantra Recycling Technology	Ontario	Plastika 1 – 7					

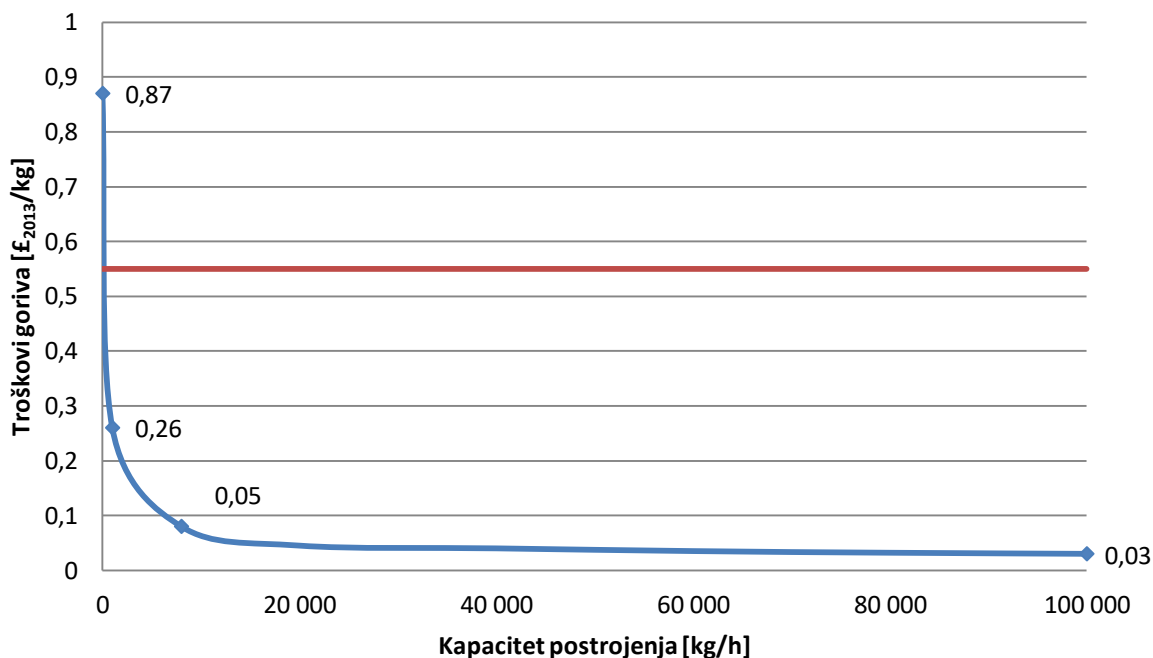
Klean Industries Inc	British Columbia	Plastika 1 – 7	9		90 – 100 wt% (650 – 950 l/t)	0 – 10 wt%	5 wt%
Natural State Research	Connecticut	MSW plastika 3 – 7	0,14				
Niutech Energy Limited	Kina	Plastika 1 – 7					
Plastic Advanced Recycling Corp	Illinois	MSW plastika	30	< 500	50 – 70 wt% ( 17 430 l/dan)	15 – 25 wt%	15 – 25 wt% (4,5 t/dan)
Plastic2Oil	New York	Plastika 1 – 7	19		87 – 91 wt%	8 wt%	1 – 5 wt%
PolyFloe	Ohio	Plastika 3 – 7					13 wt%
Promeco	Italija	Plastika		350	80 wt%		
Vadxx	Ohio	MSW plastika, otpadna guma	60		75 wt%	15 wt%	
Alphakat	Njemačka	Otpadna plastika		390 – 420	11 000 l/dan		
T Technology	Poljska	MSW plastika, otpadna guma	20	400 – 450			
Ventana Cleantech	Indija	MSW plastika	19	500	75 – 80 wt%		
Kemia	Beč	Plastika 1 – 7	5	350			
Vuzeta	Italija	RDF, biomasa, plastika, ulja, poljoprivredni otpad	55				
Enerkem	Quebec	MSW, RDF	48				

Rentech	Colorado	RDF, poljoprivredni otpad, građevinski otpad	400				
Syngas Technology	Minnesota	RDF, poljoprivredni otpad, građevinski otpad, plastika	600		100 000 l/dan		
Thermo-chem Recovery Int'l	Sjeverna Karolina	RDF, plastika	200				
INEOS-Bio	Illinois	Lignocelulozni materijal, materijal na bazi ugljika, plastika, guma	245		68 t/dan		

Tablica 8 i navedeni podaci potvrđuju dosad navedene zaključke. Temperature pirolitičke obrade u postrojenjima uglavnom se kreću u rasponu od 350 °C do 500 °C. Maseni udio dobivenog pirolitičkog ulja kreće se u rasponu od 75 do 90 wt%. Postrojenja proizvode nešto manje od 1 000 litara ulja za svaku tonu otpadne plastike. Postrojenja koja obrađuju svu plastiku navode da PET i PVC nisu preferirani oblici. Postrojenja s višim temperaturama imaju i nešto viši kruti ostatak, odnosno kruti produkt.

Postrojenja obrađuju minimalno 8 tona otpada dnevno ili blizu tom broju. Maksimalni kapacitet kreće se u rasponu od 50 do 60 tona otpadne plastike dnevno, ograničenje nužno zbog loših svojstava prijenosa topline plastike. Postrojenja koja obrađuju troznamenkastu količinu otpada koriste razne vrste otpada te tada plastika nije primarni izvor produkta. Postrojenja s manjim kapacitetom uglavnom su demonstracijska postrojenja (npr. R-ONE; Hukou County, Nexus Fuels, Atlanta, PK Clean; Salt Late City, Agilyx; Tigard, itd.) koja ispituju isplativost postrojenja i njegov utjecaj na okoliš.

Kapacitet postrojenja može biti pokazatelj ekonomske isplativosti projekta. Prema literaturnim izvorima [6] i [29] isplativost postrojenja direktno ovisi o njegovom godišnjem kapacitetu – slika 8.



Slika 8. Isplativost postrojenja u ovisnosti o kapacitetu [6]

Crvena linija na dijagramu označuje točku prijeloma, odnosno točku nakon koje postrojenje postaje ekonomski isplativo. Ona se nalazi između 100 kg/h i 1 000 kg/h, a kako linija strmovito pada između tih dviju vrijednosti, teško ju je točno odrediti. S obzirom na tablicu 8, komercijalna postrojenja imaju minimalni kapacitet od 8,2 t/dan, odnosno 340 kg/h, što odgovara i gore navedenom dijagramu [6].

Mnoga navedena postrojenja mogu se skalirati na znatno više kapacitete te dopuštaju određeni nivo kontaminacije drugim elementima, poput vode, papira, metala i drugih, međutim oni direktno utječu na kvalitetu i količinu produkta. Ova karakteristika postrojenja bitna je zbog činjenice da mnoga postrojenja koriste plastiku koja je bila u dodiru s ostalim tvarima zbog same prirode izvora otpada.

## 4. Studija slučaja realnog poslovnog subjekta

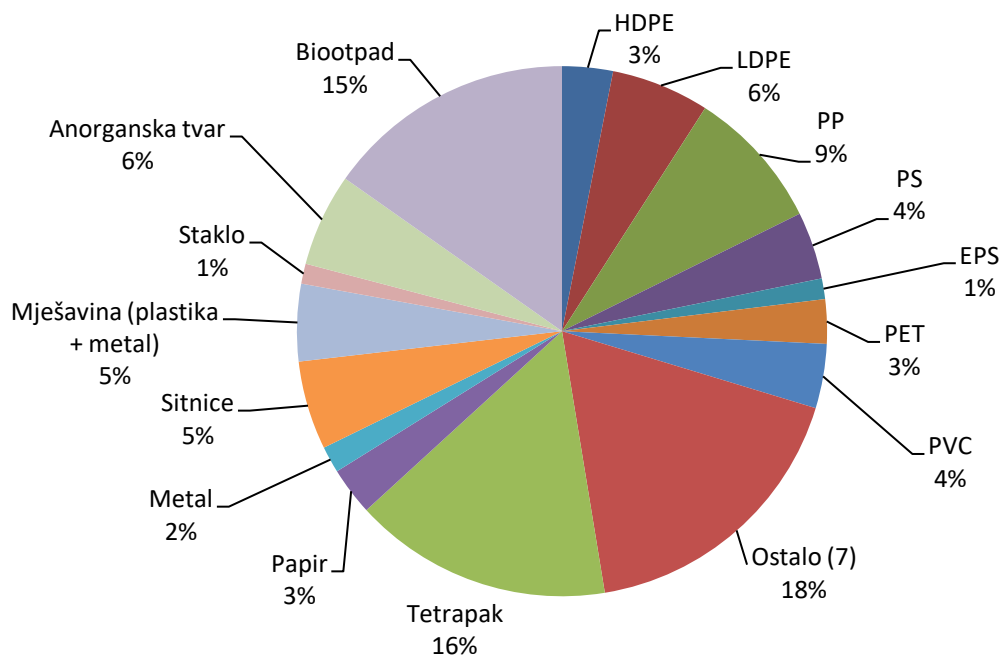
### 4.1. Općenito

Predmet studije slučaja je tvrtka koja želi ostati anonimna, zbog čega će se, za potrebe rada, koristiti naziv „realni poslovni subjekt“. Realni poslovni subjekt je tvrtka koja se bavi gospodarenjem neopasnim otpadom. Tvrtka mjesečno obradi više od 600 tona otpada, odnosno mjesečno obradi više od 400 tona miješane plastike [30]. Uspješnost njihove obrade vidljiva je u tablici 9.

Tablica 9. Stupanj obrade realnog poslovnog subjekta [30]

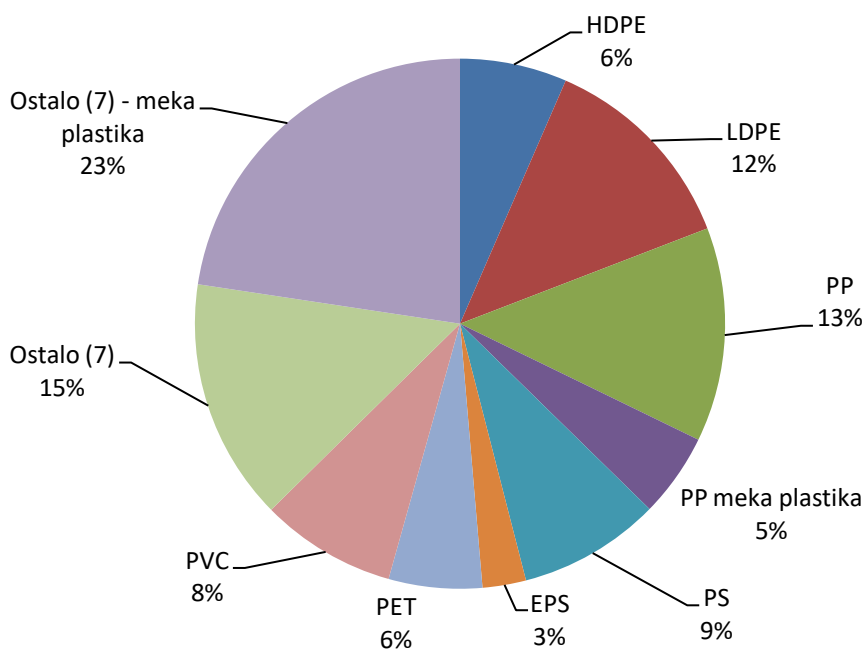
Vrsta otpada	Uspješnost prerade
Otpadna plastika	70%
Papir i karton	95%
Metalni otpad	99%
Biorazgradivi otpad	100%
Industrijski neopasni otpad	75%

Nakon sortiranja otpada iz žutih spremnika, ostatak je neregulirana frakcija, čiji je sastav prikazan na slici 9.



**Slika 9. Nereciklabilna frakcija [31]**

Od ukupno 5081,4 g nereciklabilne frakcije, plastični otpad čini 2409,3 g (47,41%), čiji je sastav:



**Slika 10. Sastav nereciklabilnog plastičnog otpada [31]**

#### 4.2. Sličnost realnog poslovnog subjekta i navedenih tehnologija i postrojenja

Plastični otpad koji nije poželjno reciklirati su PET i PVC (14%). PET i PVC daju najmanji prinos ulja, najviše krutog ostatka koji se nepotrebno može taložiti na katalizatoru te smanjiti kvalitetu produkta, te u slučaju PVC-a, on dodatno proizvodi i klorovodičnu kiselinu. Kako je količina PS-a samo 9%, preporuča se korištenje FCC katalizatora koji ima pozitivan utjecaj na PP, HDPE i LDPE te činjenice da je relativno jeftin.

Od 39 navedenih postrojenja u tablici 8, njih 12 koristi plastiku iz miješanog komunalnog otpada ili iz odvojenog otpada, slično plastici realnog poslovnog subjekta. Spomenuta postrojenja ili obrađuju svu vrstu plastike, u kojem slučaju PET i PVC su u manjim količinama, ili se PET i/ili PVC ne obrađuju. Samo 3/12 postrojenja ima višu toleranciju na PET i PVC. Također, samo dva postrojenja koriste točno specifični oblik plastike (primarno PS, PE i PP).

S obzirom na obradu čestica, njih 8/12 koristi neki oblik pripreme sirovine, primarno mljevenje (7), zatim sušenje (3) te čišćenje (1). Tretiranje i odvajanje kiseline ima samo jedno postrojenje, dok ostala postrojenja ili ne tretiraju kiselinu ili informacija nije dostupna.

Svih 12 postrojenja podnosi neki oblik kontaminacije sirovine, što je važna karakteristika s obzirom da je plastika iz miješanog komunalnog otpada bila u dodiru s ostalim materijalima. Postrojenja podržavaju kontaminaciju: papirom, metalima, biomasom, staklom, prašinom, zemljom te vodom, međutim, postotak se treba držati što nižim budući da ima direktan utjecaj na kvalitetu i količinu nastalih produkta.

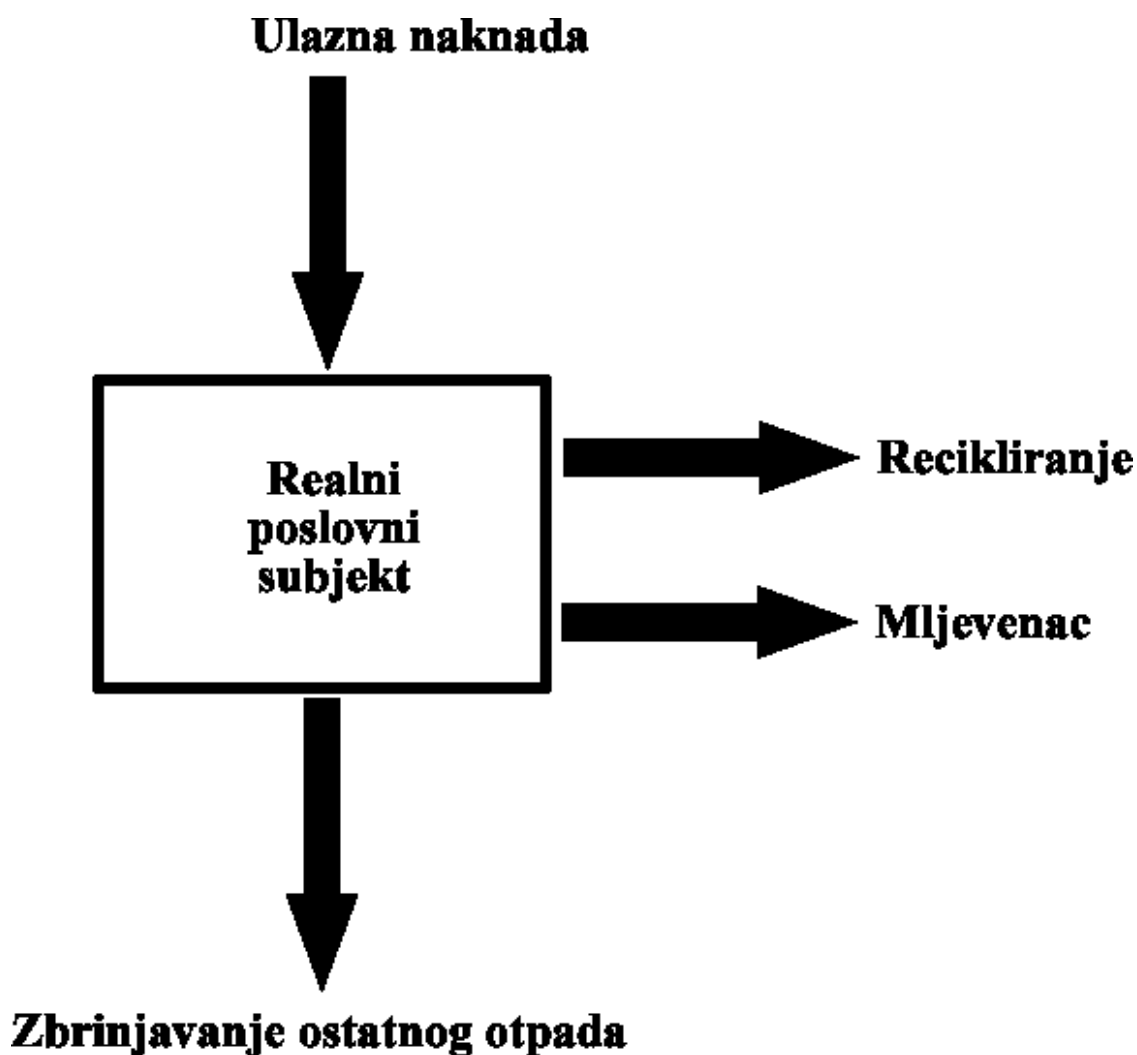
#### 4.3. Ulazni i izlazni ekonomski tokovi

Realni poslovni subjekt prima naknadu za preuzimanje otpada kojeg obrađuje i reciklira. Uz recikliranje otpada, također se proizvodi i mljevenac koji se u većinskoj mjeri izvozi zbog veće isplativosti. Ovi tokovi predstavljaju profit postrojenja.

Mljevenac je produkt dobiven mljevenjem otpadne plastike, veličine primarno 1 – 8 mm. Uloga dobivene mljevine je regranulacija uslijed čega se dobiva regranulat koji se koristi u proizvodnji raznih pripravaka [32].

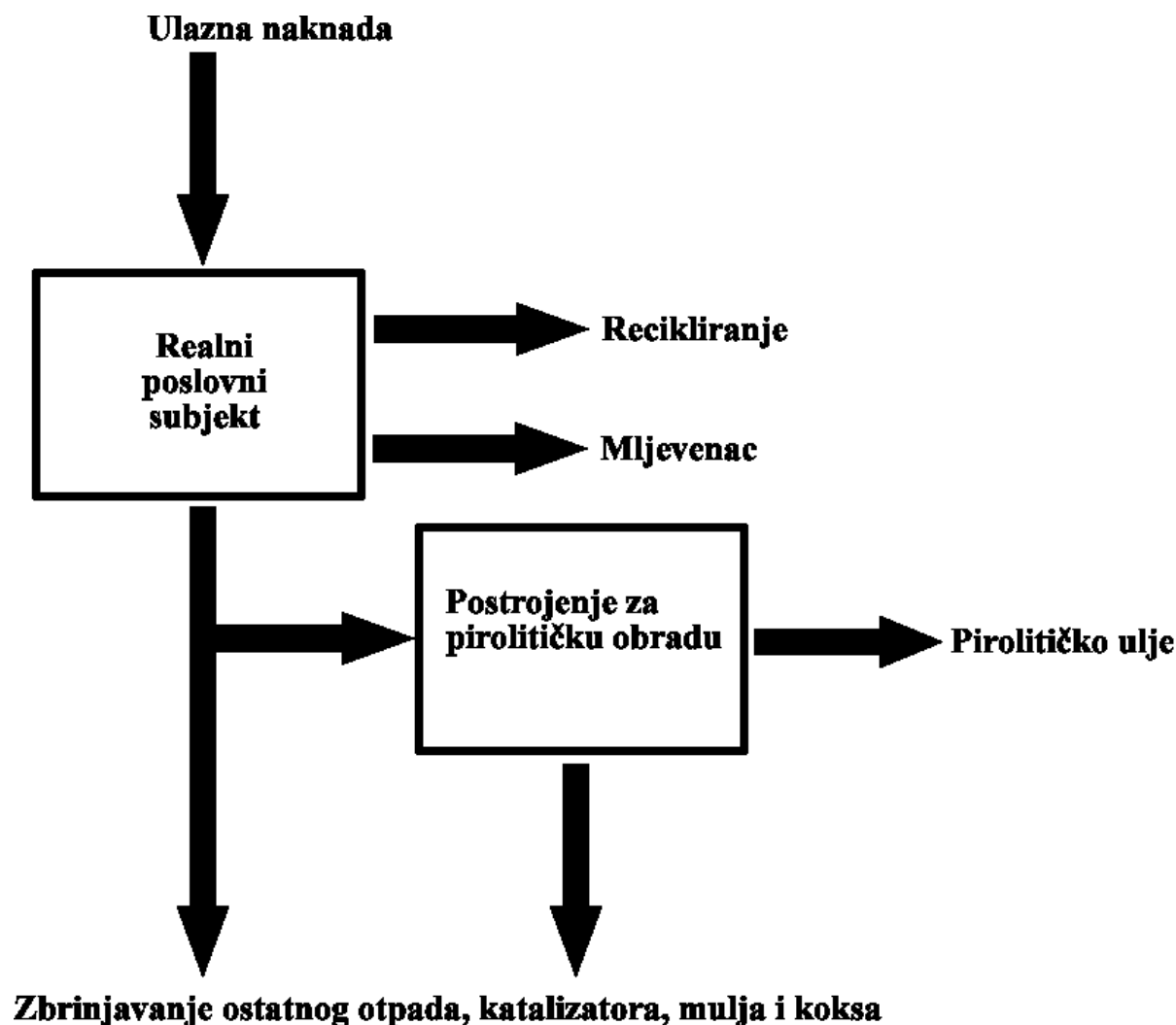
Od preuzetog otpada, dio koji je nemoguće reciklirati potrebno je zbrinuti. Ovaj tok predstavlja rashod postrojenja.





Slika 11. Ulazni i izlazni ekonomski tokovi za recikliranje

Izgradnjom postrojenja za pirolitičku obradu plastičnog otpada, izlazni tokovi bi se promijenili. U tom slučaju, izlazni tok ostatnog otpada razdjelio bi se na dvije grane. Jedna grana, tj. plastika pogodna za pirolitičku obradu, bila bi ulazni tok dok bi druga grana i dalje predstavljala ostatni otpad koji je potrebno zbrinuti. Od strane novoizgrađenog postrojenja, njegov prihod predstavlja pirolitičko ulje, dok bi rashod bio izlazni tok katalizatora, mulja i kokska kojeg je potrebno zbrinuti.



Slika 12. Ulazni i izlazni ekonomski tokovi za recikliranje i pirolizu

#### 4.4. Referentno postrojenje

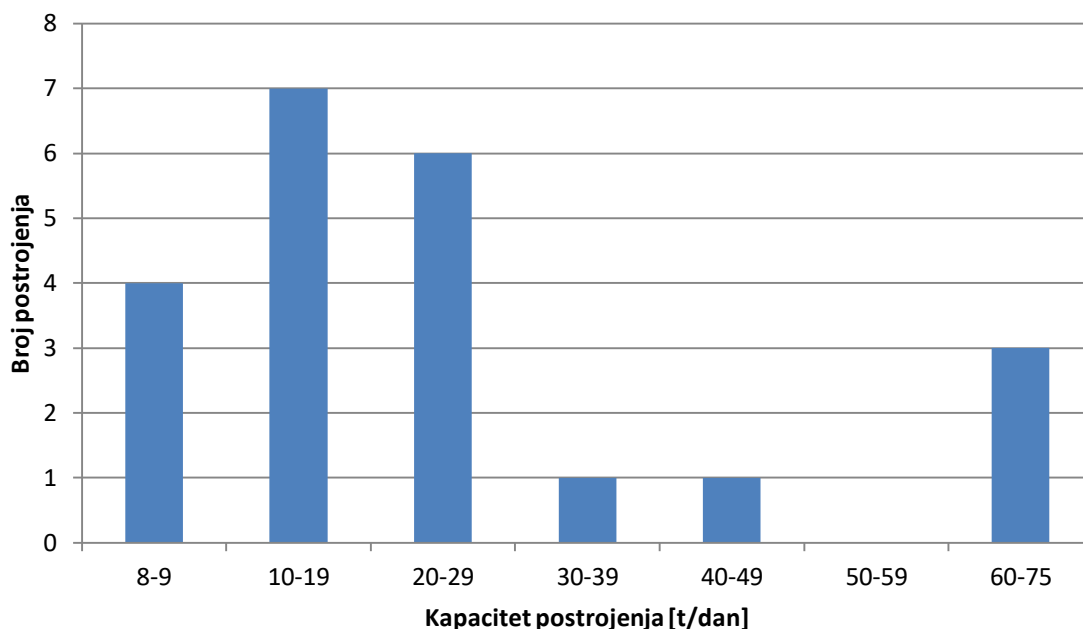
Da bi se mogla ispitati ekonomska isplativost potencijalnog pirolitičkog postrojenja potrebno je definirati referentne veličine, odnosno referentno postrojenje. Referentno postrojenje određeno je prosječnim veličinama sličnih postrojenja iz tablice 8. Tijekom pregleda literature [1], [6], [9], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [33], [34] i [35] u Excel tablicu zabilježene su vrijednosti parametara postrojenja koja obrađuju otpadnu plastiku. Prikupljeni parametri su osrednjeni, a prosječne vrijednosti prikazane su u tablici 10. Zbog nedostatka informacija, vrijednosti pojedinih parametara mogu znatno varirati te je nemoguće utvrditi njihove realne granice i točnost. Takve vrijednosti označene su kosim fontom i fusnotom.

Tablica 10. Srednje veličine referentnog postrojenja

		Iznos	Jedinica	
Kapacitet		29,35	t/dan	
		8 560	t/god	
Ulazi	Potrošnja električne energije	4 014,64	kWh/tona	
	Drugi ulazi	Katalizatori i kemikalije	272,42	t/god
		NaOH <sup>12</sup>	3,42	t/god
		Voda	16 380	m <sup>3</sup> /god
	Dopunska energija	Ulaz toplinske energije <sup>12</sup>	1 087,12	MWh/god
		Toplina za start pogona	10 358	MWh/god
	Izlazi	Energetski produkti	Pirolitičko ulje	840
Plinovite frakcije			131	kg/t
Kruti ostatak			44	kg/t
Ostaci		Ispušni plinovi	24 622	t/god
		Katalizatori i mulj <sup>12</sup>	1 053,58	t/god
Emisije		PM <sup>12</sup>	42,81	t/god
		CO <sub>2</sub>	2 448,16	t/god
		CH <sub>4</sub> <sup>12</sup>	194,17	t/god
		Ugljikovodici <sup>12</sup>	34,24	t/god
		SO <sub>2</sub> <sup>12</sup>	0,344	t/god
		NO <sub>x</sub>	183,04	t/god
		CO <sup>12</sup>	19,40	t/god
		Hg <sup>12</sup>	0,15 <sup>-10</sup>	t/god
		Pb <sup>12</sup>	0,0009	t/god
VOC		6,85	t/god	

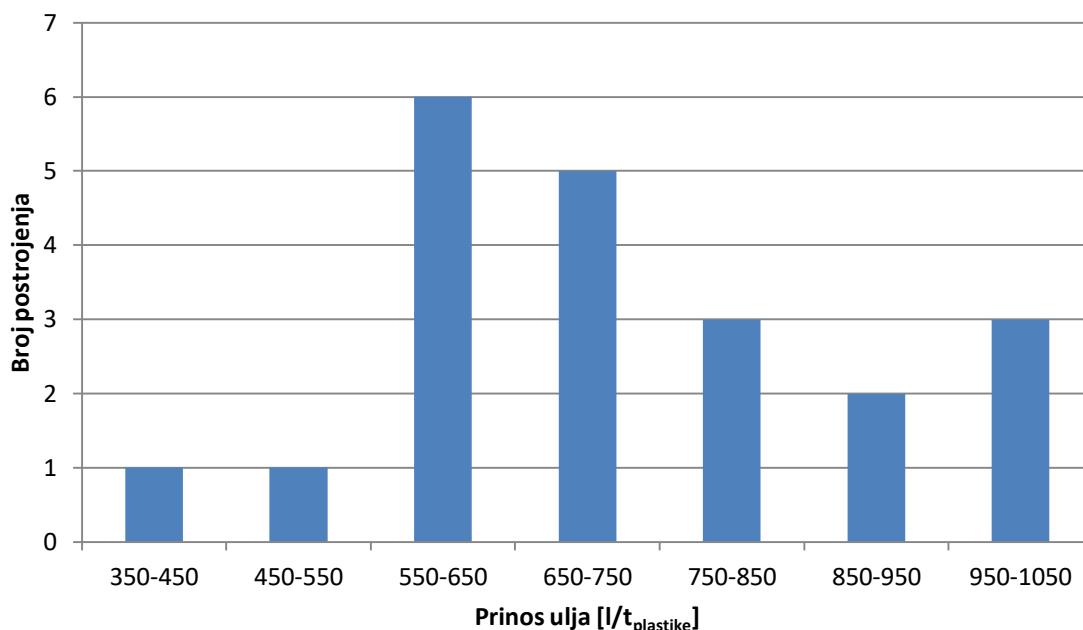
<sup>12</sup> Upitna točnost vrijednosti parametra; zbog nedostatka informacija i/ili širokih granica parametra teško je točno utvrditi realne iznose i granice označenog parametra.

Prosječni kapacitet postrojenja iznosi 29,35 tona na dan, odnosno sa 7 000 pogonskih sati godišnje, kapacitet iznosi 8 560 tona po godini. Većina postrojenja ima kapacitet u rasponu od 10 do 30 tona na dan. Minimalni kapacitet komercijalnih postrojenja iznosi oko 8 tona na dan, a kapacitet većih postrojenja kreće se rasponu od 50 pa do 70+ tona na dan.



**Slika 13. Kretanje kapaciteta postrojenja [t/dan]**

Primarni produkt postrojenja je pirolitičko ulje koje služi kao zamjena za naftu ili neko pogonsko gorivo. Prosječna vrijednost dobivenog ulja iznosi 840 litara po toni obrađene plastike. Vrijednost dobivenog ulja većinom se kreće u rasponu od 550 do 750 litara po toni plastike, a ukupne granice su u rasponu od 350 do 1050 litara po toni. Važno je spomenuti da na prinos ulja znatno utječe uporaba katalizatora i kvaliteta, sastav i kontaminacija sirovine, a takve informacije često nisu poznate. Općenito pravilo je da omjer katalizator:plastika iznosi 1 – 2:10.



**Slika 14. Kretanja prinosa ulja [l/t]**

Osim pirolitičkog ulja, ostali česti produkti su plinovite frakcije i kruti ostatak. Njihov omjer varira ovisno o postrojenju, iznosi otprilike 70:20:10 (ulje, plin, kruti ostatak), a može se kretati od 40:10:40 pa sve do 90:8:2. Plinovite frakcije koje ne kondenziraju mogu se spaljivati u reaktoru postrojenja, a dobivena toplina koristi se u procesu pirolize. Kruti ostatak može se odlagati kao otpad ili koristiti kao zamjena za ugljen. Ako kruti ostatak prođe kroz proces karbonizacije, može se koristiti kao adsorbent ili konvertirati u materijal sličan aktivnom ugljenu koji ima funkciju uklanjanja organskih tvari iz specifičnih otopina [34].

Emisije referentnog postrojenja teško je točno odrediti zbog nedostatka količine informacija. Samo 2/10 vrsta emisija iz tablice 10 ima više od jednog izvora. Ukupni ispušni plinovi referentnog postrojenja iznose 24 622 tona na godinu, odnosno 2,8 tona po toni otpadne plastike. CO<sub>2</sub> čini oko 10% ukupnog iznosa dimnih plinova, a većina otpada na dušik i kisik (zrak).

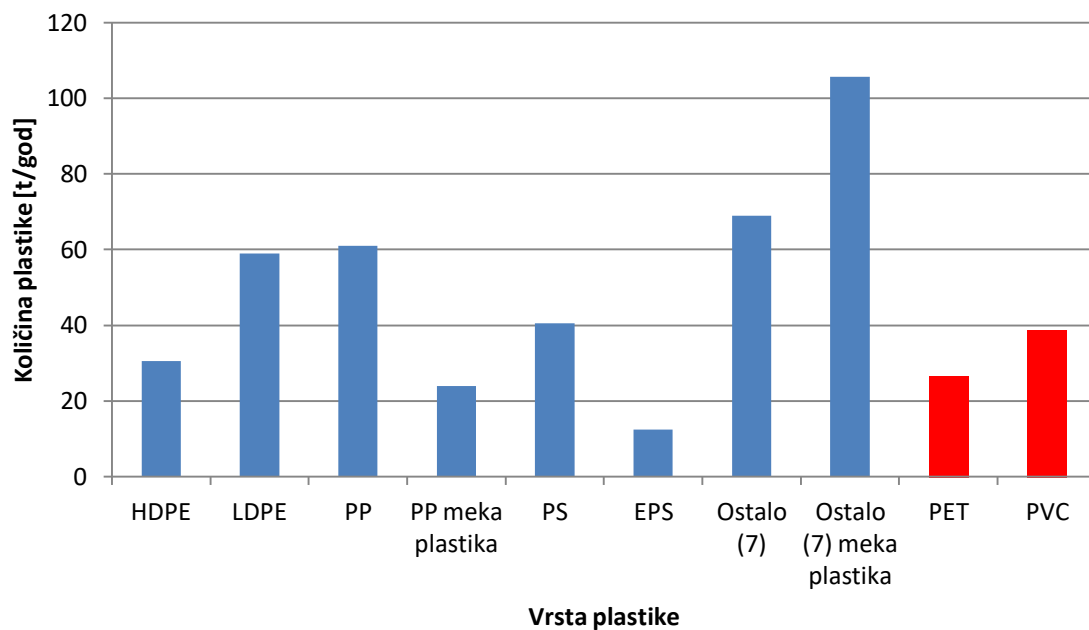
#### **4.5. Tehnički parametri postrojenja**

U sljedećim poglavljima bit će objašnjeni važniji tehnički parametri koji utječu na isplativost postrojenja, te na postupak njihovog određivanja. Ako nije drugačije objašnjeno, vrijednost pojedinog parametra odabrana je prema tablici 10 referentnog postrojenja.

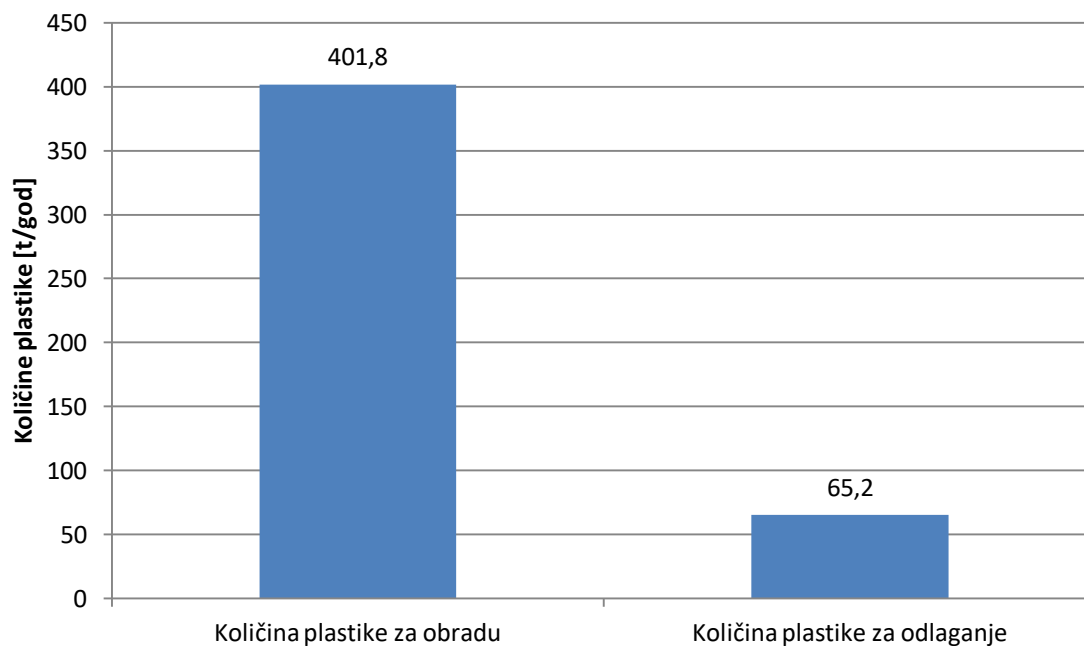
#### 4.5.1. Modeliranje kapaciteta

Kapacitet postrojenja jedan je od važnijih parametara koji utječu na isplativost projekta. Kapacitet postrojenja direktno utječe na veličinu investicije, operativne troškove, ali i prihode budući da se povećava količina produkta i ulazna naknada (gate fee).

Minimalni kapacitet određen je prema količini ostatne plastike prema analizi iz potpoglavlja 4.1. te on iznosi 401,8 tona godišnje (57,4 kg/h). U kapacitet ne ulazi količina PET-a i PVC-a.



Slika 15. Godišnje količine ostatne plastike



**Slika 16. Ukupne godišnje količine plastike**

Međutim, modelirati postrojenja prema ovakvom kapacitetu nije smisleno zbog:

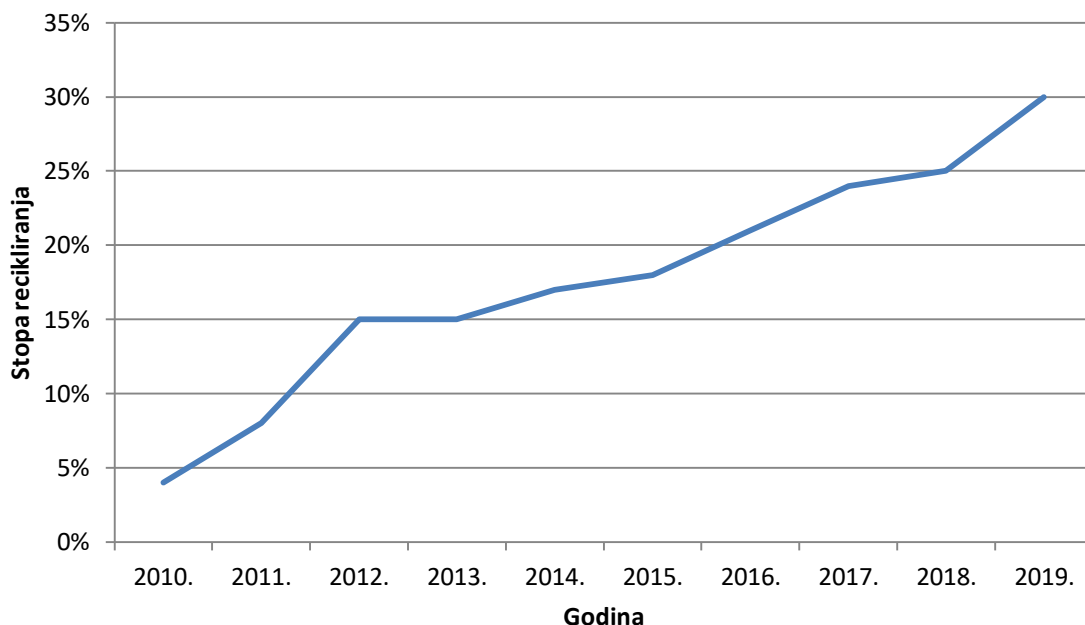
1) Dijagrama troškova iz potpoglavlja 3.5. Prema navedenom dijagramu, da bi postrojenje bilo isplativo, njegov kapacitet mora iznositi oko 330 kg/h (8 t/dan). Tu informaciju potkrepljuje i tablica pregleda postrojenja iz istog potpoglavlja s obzirom da se minimalni kapaciteti komercijalnih postrojenja kreću oko 9 tona po danu. Prema tablici pregleda postrojenja, čak i demonstracijska postrojenja imaju kapacitet gotovo dvostruko veći od kapaciteta koji je trenutno na raspolaganju.

2) Europska Unija s novim paketom mjera o kružnom gospodarstvu planira povisiti stupanj odvajanja i recikliranja ambalažnog otpada. Do 2025. godine, Europska Unija planira reciklirati 55% komunalnog otpada, odnosno svakih 5 godina, taj stupanj povisiti za 5%. Do 2050. godine, stupanj recikliranja komunalnog otpada iznosio bi 80% [36] [37].

Da bi se postigli ciljevi Europske Unije u pogledu recikliranja komunalnog otpada, a istodobno i projektiralo ekonomski isplativo postrojenje, potrebno je povećati količinu godišnji obrađene plastike. To povećanje moguće je modelirati prema:

1) Prema trenutnom povećanju stope recikliranja u Hrvatskoj. Najranija informacija o stopi recikliranja poznata je iz 2010. godine, koja je tada iznosila 4%. Prema Ministarstvu gospodarstva i održivog razvoja, 2019. godine stopa recikliranja Republike Hrvatske za

ukupni komunalni otpad iznosila je 30% [38] [39]. Stoga, Republika Hrvatska nije ispunila tražene zahtjeve Europske Unije u pogledu stope recikliranja u 2020. godini.

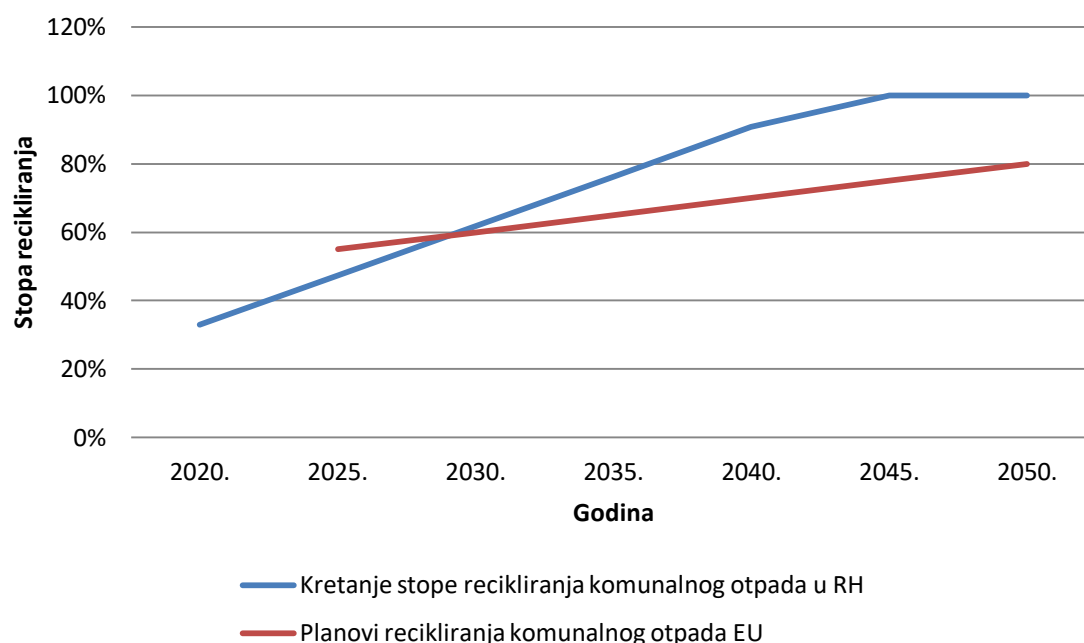


**Slika 17. Stopa recikliranja komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj [38] [39]**

Prema slici 17, u razdoblju od devet godina, stopa recikliranja komunalnog otpada povećala se s 4% u 2010. godini na 30% u 2019. godini, što je prosječno povećanje od 2,89% godišnje. Prema navedenom trendu, stopa recikliranja komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj 2030. godine iznosila bi 61,79% te bi se iste godine ispunili planovi Europske Unije. U teoriji, 2044. godine stopa bi dosegla 100% recikliranja prema navedenom trendu.

2) Prema planovima Europske Unije za odvajanje i recikliranje komunalnog otpada.





**Slika 18. Usporedba stope recikliranja komunalnog otpada u RH i ciljeva EU [36] [37] [38] [39]**

Budući da je nerealno očekivati kontinuirano povećanje stope recikliranja u Republici Hrvatskoj, posebice nakon dostizanja ciljeva Europske Unije, minimalni kapacitet bit će određen prema ciljevima Europske Unije. Linearnim skaliranjem s trenutnih 30% recikliranja komunalnog otpada, odnosno s 401,8 tona otpada godišnje, na 80% recikliranja, dobiva se minimalni kapacitet od 1 071,6 tona godišnje.

#### 4.5.2. Prinos ulja

Prinos ulja odnosi se na količinu dobivenog pirolitičkog ulja po toni otpadne plastike. U analizi osjetljivosti prinos ulja varirat će u iznosu od 340 litara po toni do 1 040 litara po toni, odnosno u granicama minimalnih i maksimalnih vrijednosti pokazanim u tablici 10 pregleda postrojenja.

#### 4.5.3. Pirolitički plin i lakše plinovite frakcije

U reaktoru postrojenja pirolizom plastike dobiva se pirolitički plin. Jedan dio pirolitičkog plina kondenzira u pirolitičko ulje u konenzatoru. Lakše plinovite frakcije koje nisu kondenzirale spaljuju se, a dobivena toplina koristi se u reaktoru. Ovakva energetska uporaba smanjuje potrošnju električne energije.

#### 4.5.4. Otpadni tok katalizatora, mulja i koksa

Ovi tokovi predstavljaju ostatke nakon procesa pirolize koje je potrebno zbrinuti.

#### 4.5.5. Voda

Primarna uloga vode je hlađenje postrojenja. Troškovi vode podijeljeni su na trošak potrošene količine vode i trošak zbrinjavanja otpadnih voda.

#### 4.5.6. Električna energija

Električna energije koristi se za dobivanje topline potrebne u procesu pirolize, rad opreme, osvjetljenje pogona i drugo.

#### 4.5.7. Životni vijek postrojenja

Životni vijek postrojenja određen je prema [34] te on iznosi 30 godina. Životnim vijekom postrojenja određeno je trajanje prihoda i rashoda.

### 4.6. Ekonomski parametri postrojenja

U sljedećim poglavljima bit će objašnjeni ekonomski parametri postrojenja koji utječu na isplativost projekta.

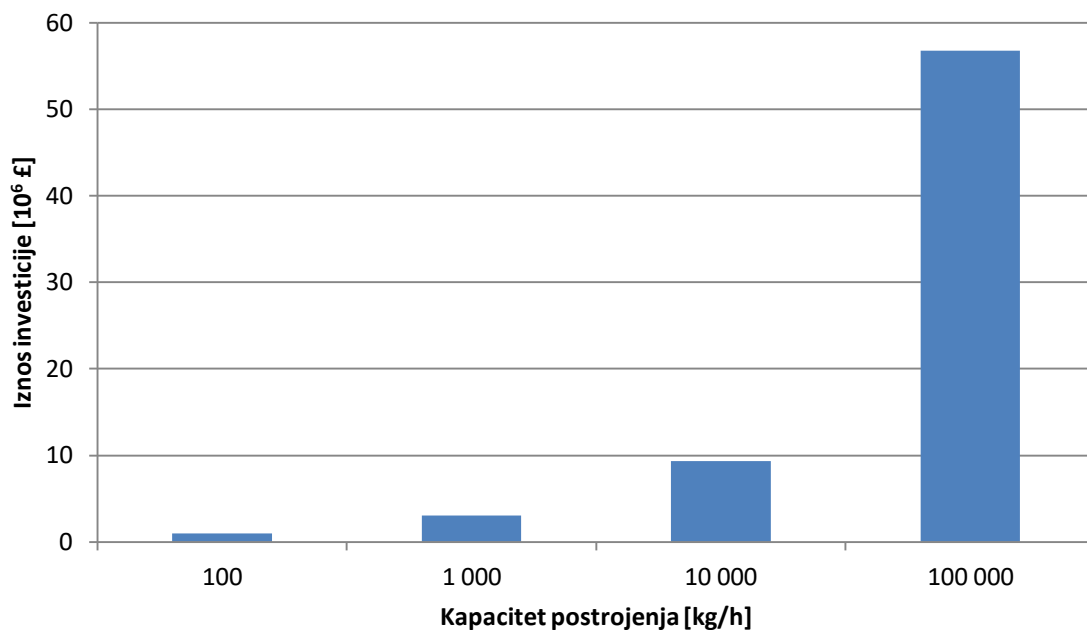
#### 4.6.1. Investicija i operativni troškovi

Investicija i operativni troškovi i troškovi održavanja ekonomski su parametri koji značajno utječu na isplativost projekta. Budući da je odnos investicija:operativni troškovi 10:4 na godišnjoj razini, operativni troškovi i troškovi održavanja utječu na isplativost postrojenja u višoj mjeri. Operativni troškovi premaše visinu investicije već nakon 3 godine [6].

Oba troška određena su prema literaturnom izvoru [6].

- Investicija

Na dijagramu 19 prikazano je kretanje investicije u ovisnosti o kapacitetu postrojenja.



**Slika 19. Dijagram kretanja investicije u ovisnosti o kapacitetu [6]**

Lagrangeovom interpolacijom točaka iz dijagrama 19 dobivena je funkcija investicije te ona glasi:

$$I = 7,61367428034 \cdot 10^{-13} \cdot x^3 - 8,476992143658 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 + 0,000959068 \cdot x + 0,32494 \quad (1)$$

Pri čemu su:

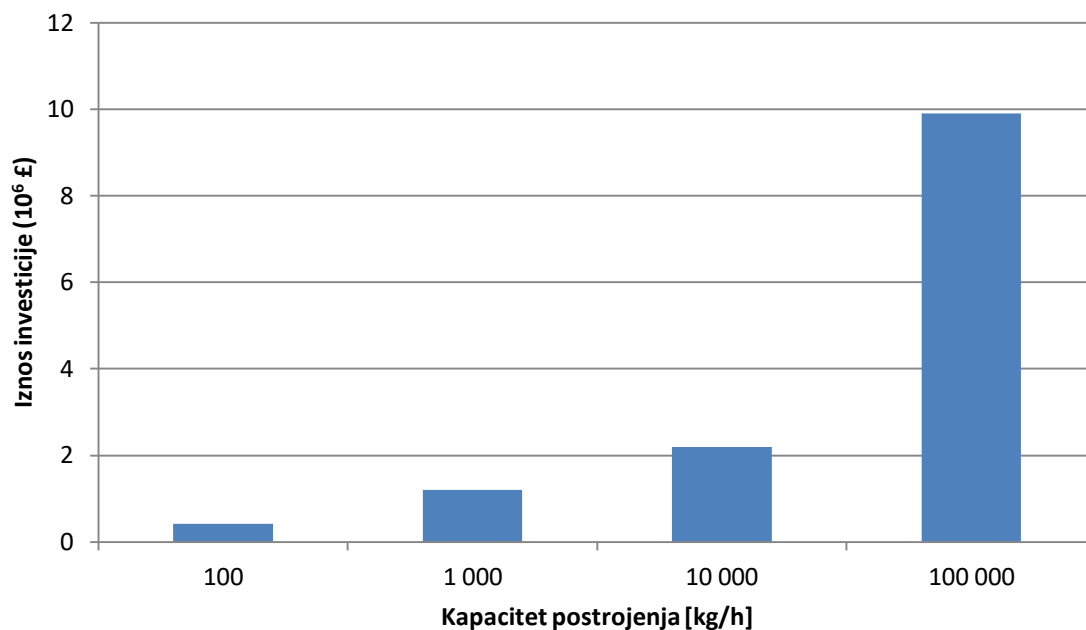
$I$  – investicija postrojenja [kn]

$x$  – kapacitet postrojenja [kg/h]

Investicijski troškovi uključuju troškove opreme, cjevovoda, električnog sustava, izgradnje zgrada, instalacija, građevinske troškove, troškove inženjerstva, radove, legalne troškove, nepredviđene troškove i drugo.

- Operativni troškovi i troškovi održavanja

Na dijagramu 20 prikazano je kretanje pogonskih i operativnih troškova u ovisnosti o kapacitetu postrojenja.



**Slika 20. Dijagram kretanja pogonskih i operativnih troškova u ovisnosti o kapacitetu [6]**

Lagrangeovom interpolacijom točaka iz dijagrama 20 dobivena je funkcija pogonskih i operativnih troškova te ona glasi:

$$T = 1,601511724968 \cdot 10^{-12} \cdot x^3 - 1,795051752088 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 0,00249568 \cdot x + 0,742226 \quad (2)$$

Pri čemu je:

T – trošak pogona i održavanja postrojenja [kn/god]

Operativni troškovi i troškovi održavanja uključuju troškove najma zemljišta, osoblja, troškove vode i struje, odlaganje katalizatora, mulja i koksa te osiguranje.

#### 4.6.2. Otkupna cijena pirolitičkog ulja

Pirolitičko ulje primarno je namijenjeno kao zamjena za naftu. Trenutna cijena nafte kreće se oko 43 \$ po barelu, odnosno 1,73 kuna po litri. Kao poticaj kupcima pirolitičkog ulja, cijena će biti spuštena na 1,6 kuna po litri.

#### 4.6.3. Ulazna naknada (Gate fee)

Ulazna naknada parametar je koji u velikoj mjeri utječe na prihode, a time i na isplativost postrojenja. S obzirom na važnost parametra na ekonomsku isplativost, bitno je točno ga odrediti. Prema literaturnim izvorima [40] i [41] postoji velika razlika između iznosa ulaznih

naknada cementara i spalionica. Ti iznosi kreću se prosječno od 45 EUR/t (341,09 kn/t) do 101,39 EUR/t (768,51 kn/t) te će u ovome radu biti provedena ekonomska analiza za oba ekstrema. Granice ulazne naknade nazivat će se gornji i donji iznos ulazne naknade.

#### 4.6.4. Nepredvidivi troškovi

U investiciju su, uz konkretne troškove, uključeni i nepredvidivi troškovi prema [34]. Nepredvidivi troškovi predstavljaju sve troškove koji se mogu pojaviti tijekom izgradnje postrojenja, a nisu inicijalno uračunati (npr. potreba za dodatnim radnicima, opremom, materijalom, dozvolama i sl.).

#### 4.6.5. Ponderirani prosječni trošak kapitala

Ponderirani prosječni trošak kapitala WACC (eng. weighted average cost of capital) je minimalna prosječna stopa povrata koju mora ostvariti tvrtka da bi zadovoljila svoje vlasnike, investitore, dioničare ili vjerovnike. WACC koriste tvrtke kako bi sve izvore financiranja, koji čine uloženi kapital, svele na jedan trošak te ih prikazale preko jedinstvenog postotka.

#### 4.6.6. Diskontna stopa

Diskontna stopa je kamatna stopa po kojoj se izračunava sadašnja vrijednost novca ako je poznata buduća vrijednost. U smislu isplativosti projekta, diskontna stopa govori kolika mora biti minimalna isplativost projekta da bi ga investitori prihvatili. Za diskontnu stopu u proračunu isplativosti postrojenja uzeta je WACC vrijednost prema [42] te ona iznosi 9,30% za porez na dobit od 12%, odnosno 9,23% ukoliko je porez na dobit 18%.

#### 4.6.7. Interna stopa povrata

Interna stopa povrata (IRR) najmanja je diskontna stopa koja pokazuje isplativost projekta. Kako diskontna stopa nije strogo definirana, projekt će se smatrati neisplativim ako je IRR jednak diskontnoj stopi. U tom slučaju svako minimalno variranje parametara moglo bi uzrokovati neispunjenje zahtjeva investitora. Da se to spriječi i omogući variranje parametara u određenoj mjeri, IRR mora po iznosu biti viši od diskontne stope.

#### 4.6.8. Kredit, kamate i kamatna stopa

Kako je visina raspoložive investicije nepoznata, smatrat će se da je potrebno uzeti kredit. Veličina kredita, kamatna stopa i rok otplate bit će navedeni u ekonomskim tablicama analiziranih postrojenja.

## 4.6.9. Amortizacija

Amortizacija je postupno proporcionalno trošenje materijalne i nematerijalne imovine tijekom njezina vijeka uporabe. U ekonomskoj analizi amortizacija nam služi za raspoređivanje troška nabave imovine i smanjenja iznosa poreza. Amortizacijski vijek trajanja i iznos amortizacije vidljivi su u tablici 11.

**Tablica 11. Godišnje amortizacijske stope za pojedine skupine dugotrajne imovine prema amortizacijskom vijeku za svrhe oporezivanja [43]**

Skupina dugotrajne imovine	Amortizacijski vijek trajanja	Godišnja amortizacija u %	Dvostruka godišnja amortizacija u %
Nematerijalna imovina	4	25%	50%
Računalni programi	2	50%	100%
Računala	2	50%	50%
Materijalna imovina - nekretnine	20	5%	5%
Postrojenja i oprema	4	25%	50%
Alati, inventar i transportna imovina	4	25%	50%
Poljoprivredna oprema i mehanizacija	4	25%	50%
Osobni automobili	5	20%	40%
Ostala nespomenuta dugotrajna imovina	10	10%	20%
Brodovi	20	5%	10%
Biološka imovina - osnovno stado	5	20%	40%
Biološka imovina - višegodišnji nasadi	10	10%	20%
Ulaganja u nekretnine	20	5%	10%

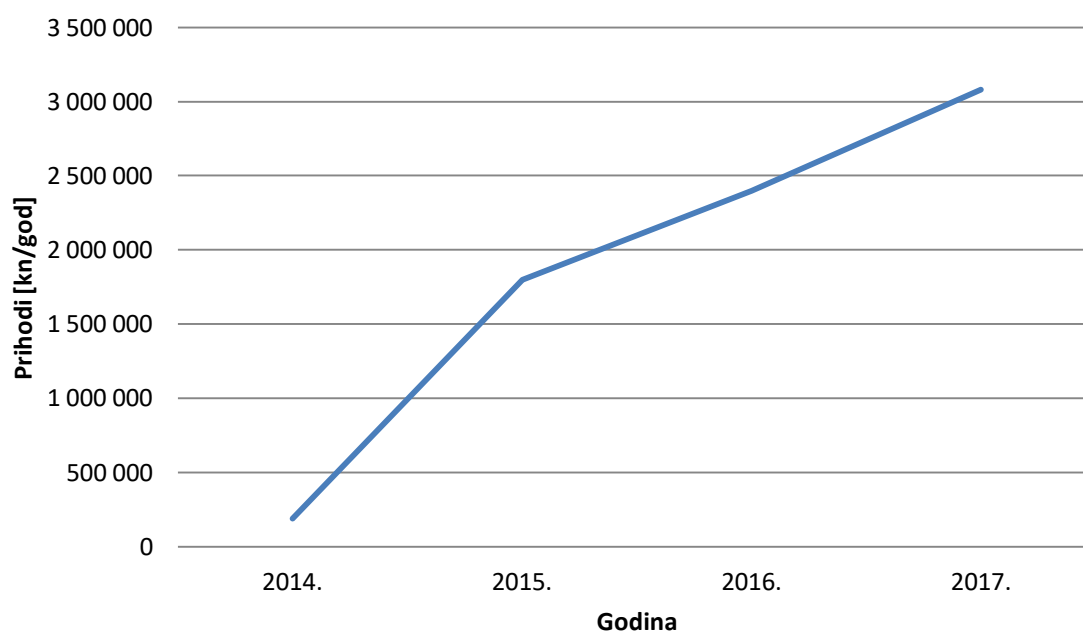
## 4.6.10. Porez na dobit

Porez na dobit iznosi [44]:

**Tablica 12. Postotak poreza na dobit [44]**

Prihod	Porez na dobit
$\leq 7\,500\,000$ kn	12%
$> 7\,500\,000$ kn	18%

Zadnji poznati poslovni prihod realnog poslovnog subjekta iz 2018. godine iznosi 3,08 milijuna kuna [45]. Ako će ukupni prihodi postrojenja za recikliranje i pirolitičkog postrojenja iznositi manje od 7 500 000 kn, porez na dobit iznosit će 12%. U suprotnom, on će iznositi 18%.



**Slika 21. Poslovni prihodi realnog poslovnog subjekta [45]**

#### 4.7. Postupak proračuna ekonomske analize i analize osjetljivosti

Svi proračuni provedeni su u Excelu.

- Investicija

$$I = 7,61367428034 \cdot 10^{-13} \cdot x^3 - 8,476992143658 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 + 0,000959068 \cdot x + 0,32494 \quad (1)$$

Pri čemu su:

I – investicija postrojenja [kn]

x – kapacitet postrojenja [kg/h]

- Operativni troškovi i troškovi održavanja

$$T = 1,601511724968 \cdot 10^{-12} \cdot x^3 - 1,795051752088 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 0,00249568 \cdot x + 0,742226 \quad (2)$$

Pri čemu je:

T – trošak pogona i održavanja postrojenja [kn/god]

Proračun za ekonomski tok novca:

- Prihodi postrojenja

$$P = K_u \cdot C_u \cdot x \quad (4)$$

Pri čemu su:

P – prihodi postrojenja [kn/god]

$K_u$  – prinos ulja [l/t]

$C_u$  – Otkupna cijena ulja [kn/l]

- Ukupni troškovi investicije

$$T_{uk} = I + T_s \quad (5)$$

Pri čemu je:

$T_{uk}$  – ukupni troškovi [kn/god]



- Bruto dobit postrojenja

$$B_d = P - T_{uk} \quad (6)$$

Pri čemu je:

$B_d$  – bruto dobit postrojenja [kn/god]

- Porezna osnovica

$$P_o = B_d - A + K \quad (7)$$

Pri čemu su:

$P_o$  – porezna osnovica [kn/god]

$A$  – iznos amortizacije [kn/god]

$K$  – kamate [kn/god]

- Porez na dobit

$$P = P_o \cdot P_d \quad (8)$$

Pri čemu su:

$P$  – porez na dobit [kn/god]

$P_d$  – porez na dobit [%]

- Neto dobit postrojenja

$$N_d = B_d + P \quad (9)$$

Pri čemu je:

$N_d$  – neto dobit postrojenja [kn/god]

- Ekonomski tok novca

$$E_y = E_{y-1} + N_{d,y} \quad (10)$$

Pri čemu su:

$E_y$  – ekonomski tok novca u promatranoj godini [kn/god]

$E_{y-1}$  – ekonomski tok novca u prijašnjoj godini [kn/god]

$N_{d,y}$  – neto dobit postrojenja u promatranoj godini [kn/god]

- Sadašnja vrijednost novca u promatranoj godini

$$S_y(PV) = \frac{N_{d,y}}{(1+D)^y} \quad (11)$$

Pri čemu su:

$S_y$  – sadašnja vrijednost novca u promatranoj godini [kn/god]

$D$  – diskontna stopa [%]

- Sadašnja vrijednost novca

$$NPV = \sum_0^y S_y \quad (12)$$

Pri čemu je:

$NPV$  – sadašnja vrijednost novca kroz sve godine [kn]

- Interna stopa povrata

$$IRR = \sum_0^y N_{d,y} \quad (13)$$

Pri čemu je:

$IRR$  – interna stopa povrata [%]

Proračun za financijski tok novca:

- Prihodi postrojenja

$$P = K_u \cdot C_u \cdot x \quad (14)$$

- Ukupni troškovi investicije

$$T_{uk} = I + T_s \quad (15)$$

- Bruto dobit postrojenja

$$B_d = P - T_{uk} \quad (16)$$

- Porezna osnovica

$$P_o = B_d - A + K \quad (17)$$

- Porez na dobit

$$P = P_o \cdot P_d \quad (18)$$

- Neto dobit postrojenja

$$N_d = B_d + P + AK \quad (19)$$

Pri čemu je:

AK – anuitet kredita [kn/god]

- Financijski tok novca

$$F_y = F_{y-1} + N_{d,y} \quad (20)$$

Pri čemu su:

$F_y$  – financijski tok novca u promatranoj godini [kn/god]

$F_{y-1}$  – financijski tok novca u prijašnjoj godini [kn/god]

- Sadašnja vrijednost novca u promatranoj godini

$$S_y(PV) = \frac{F_y}{(1+D)^y} \quad (21)$$

- Sadašnja vrijednost novca

$$NPV = \sum_0^y S_y \quad (22)$$

- Interna stopa povrata

$$IRR = \sum_0^y N_{d,y} \quad (23)$$

## **5. Ekonomska analiza projekta**

U ovom poglavlju prikazani su tehnički i ekonomski parametri postrojenja projektiranog prema zahtjevima EU u pogledu stope recikliranja miješanog komunalnog otpada. Kapacitet postrojenja iznosi 1 071,6 tona godišnje, a ostali parametri vidljivi su u tablicama 13 do 16. Osim prikaza parametara, također je provedena ekonomska analiza i analiza osjetljivosti. U slučaju da je projekt isplativ za gornji iznos ulazne naknade, a za donji iznos nije, potrebno je provesti analizu i za vrijednosti između tih granica.

### **5.1. Ekonomska analiza postrojenja**

Podjela početnih troškova i troškova pogona i održavanja određeni su prema [34] te su vidljivi u tablicama 13 i 14. U tablici 15 navedeni su tehnički parametri postrojenja. Tablica 16 pokazuje ekonomske parametre, dok tablica 17 pokazuje ekonomsku analizu za donji i gornji iznos ulazne naknade. Dijagrami 22 i 23 prikazuju ekonomske i financijske tokove novca za donji i gornji iznos ulazne naknade, dok dijagrami 24 i 25 prikazuju usporedbe tih tokova.

Tablica 13. Investicijski troškovi postrojenja

POČETNI TROŠKOVI		
Kategorija troškova	Iznos	Jedinica
Trošak opreme	1 282 848	kn
Instalacija opreme	599 286	kn
Instrumenti i kontrola	458 829	kn
Cjevovodi	870 839	kn
Električni sustav	138 585	kn
Građevine	374 554	kn
Uređenje eksterijera	93 639	kn
Uslužni objekti	624 569	kn
Inženjerstvo	655 470	kn
Građevinarstvo	468 193	kn
Pravni troškovi	65 547	kn
Izvođenje radova	1 259 438	kn
Nepredvidivi troškovi	2 472 058	kn
UKUPNO	9 363 851	kn

Tablica 14. Troškovi pogona i održavanja postrojenja

TROŠKOVI POGONA I ODRŽAVANJA		
Kategorija troškova	Iznos	Jedinica
Najam zemljišta	397 928	kn/god
Troškovi osoblja (3 zaposlenika)	252 000	kn/god
Trošak vode	15 270	kn/god
Trošak električne energije	501 510	kn/god
Odlaganje mulja, katalizatora i koksa	61 406	kn/god
Odlaganje otpadne vode	30 000	kn/god
Održavanje	2 281 889	kn/god
Osiguranje	187 277	kn/god
UKUPNO	3 927 731	kn/god

Tablica 15. Tehnički parametri postrojenja

TEHNIČKI PARAMETRI		
Kategorija	Iznos	Jedinica
Kapacitet postrojenja	153,086	kg/h
	3,67	t/dan
	1 071,6	t/god
Utrošak električne energije	501 510	kWh/god
Utrošak vode	2 036,4	m <sup>3</sup> /god
Radni sati	7 000	h/god
Životni vijek postrojenja	30	god
Prinos pirolitičkog ulja	840	l/t <sub>plastike</sub>

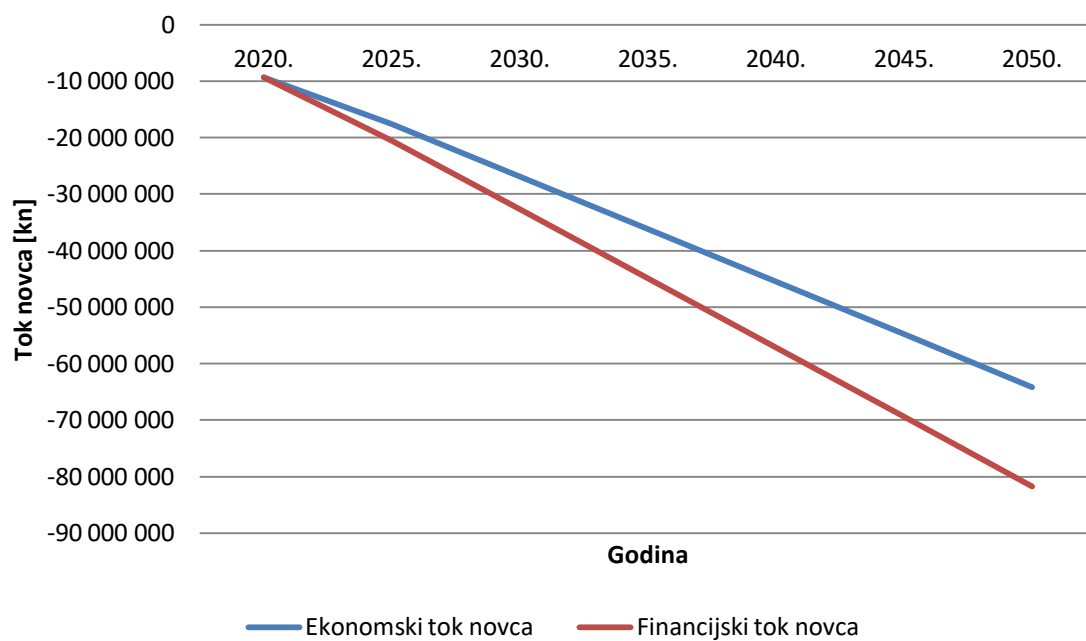
Tablica 16. Ekonomski parametri postrojenja

EKONOMSKI PARAMETRI			
Kategorija	Iznos	Jedinica	
Otkupna cijena proizvedenog ulja	1,6	kn/l	
Ulazna naknada (gate fee)	341,09	768,51	kn/t
Porez na dobit	12	12	%
Diskontna stopa	9,30		%
Kamatna stopa	4,30		%
Vlastiti kapital	50		%
Duljina kredita	10		god

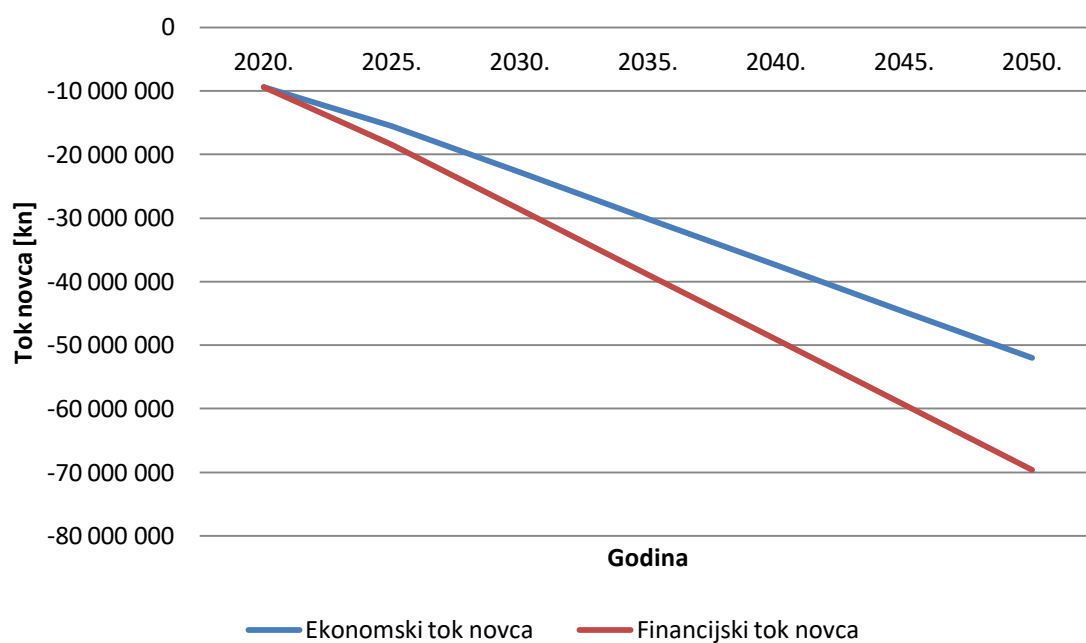
Tablica 17. Isplativost projekta prema standardnim parametrima

<b>REZULTATI</b>			
<b>Kategorija</b>	<b>Iznos</b>		<b>Jedinica</b>
Početni troškovi	9 363 851		kn
Troškovi pogona i održavanja	3 927 731		kn/god
Prihodi od prodaje pirolitičkog ulja	1 440 233		kn/god
Prihodi od ulazne naknade	365 513	823 535	kn/god
<b>Ekonomski tok novca</b>			
Bruto dobit	-73 023 515	-59 282 819	kn
Neto dobit	-64 119 454	-52 027 641	kn
Sadašnja vrijednost novca (NPV)	-27 091 867	-23 058 687	kn
Interna stopa povrata (IRR)	Manje od 0	Manje od 0	
<b>Financijski tok novca</b>			
Bruto dobit	-73 023 515	-59 282 819	kn
Neto dobit	-81 696 214	-75 124 951	kn

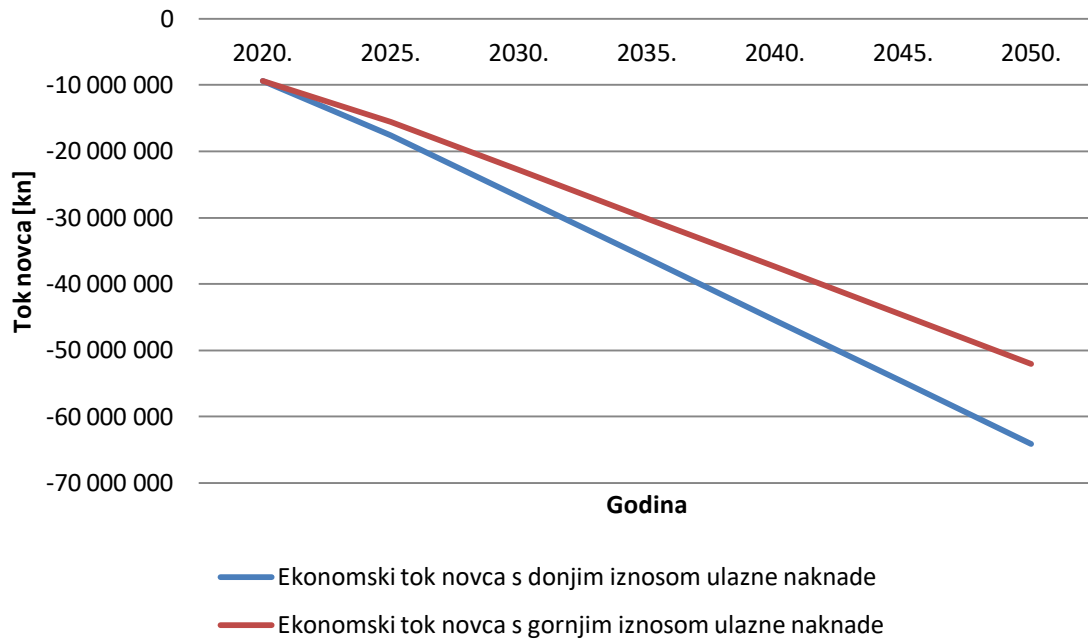




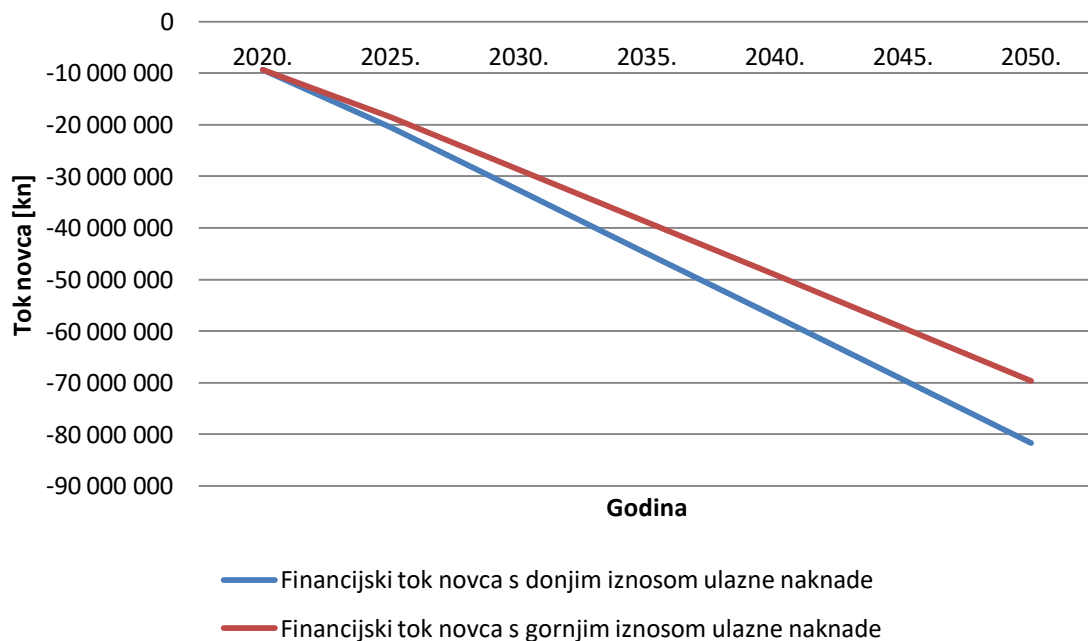
Slika 22. Tok novca s donjim iznosom ulazne naknade



Slika 23. Tok novca s gornjim iznosom ulazne naknade



**Slika 24. Usporedba ekonomskog toka novca za oba iznosa ulazne naknade**



**Slika 25. Usporedba financijskog toka novca za oba iznosa ulazne naknade**

Referentno postrojenje kapaciteta 153,086 kg/h koje radi 7000 h/god godišnje obradi 1 071,6 tona plastičnog otpada. Prosječni prinos ulja iznosi 840 litara po toni obrađene plastike. Otkupna cijena proizvedenog ulja iznosi 1,6 kn/l što je za 7,52% manje od otkupne cijene

nafte. Za proizvodnju ulja godišnje se potroši 501 MWh električne energije i 2 036 m<sup>3</sup> vode. Računski životni vijek postrojenja iznosi 30 godina.

Prihodi od prodaje ulja iznose 1 440 230 kuna godišnje. Prihodi od ulazne naknade iznose 365 512 kuna godišnje za niži iznos ulazne naknade i 823 535 kuna godišnje za viši iznos ulazne naknade. Ukupni godišnji prihodi variraju u iznosu od 1 805 742 kuna do 2 263 768 kuna.

Početni investicijski troškovi postrojenja iznose 9 363 851 kuna. Najveći udio u početnim troškovima imaju nepredvidivi troškovi (26,40%), trošak opreme (13,70%) i izvođenje radova (13,45%). Zajedno ovi troškovi čine 53,55% ukupnog iznosa investicije. Najmanji udio u početnim troškovima su troškovi električnog sustava (1,48%), uređenje eksterijera (1,00%) i pravni troškovi (0,70%).

Troškovi pogona i održavanja iznose 3 927 731 kuna godišnje. Najveći udio u troškovima pogona i održavanja imaju troškovi održavanja opreme i postrojenja (63,10%) trošak električne energije (12,77%) i najam zemljišta (10,13%). Najmanji utjecaj na ukupne troškove imaju troškovi odlaganja mulja, katalizatora i koksa (1,56%), odlaganje otpadne vode (0,76%) i trošak potrošene vode (0,39%).

Budući da ukupni godišnji prihod nije viši od 7 500 000 kuna, porez na dobit iznosi 12%. Diskontna stopa određena je prema WACC-u postrojenja te iznosi 9,30%. Vlastiti kapital određen je sa 50% ukupnog iznosa investicije. Kredit se otplaćuje u periodu od 10 godina s kamatnom stopom od 4,30%.

#### 5.1.1. Analiza s donjim iznosom ulazne naknade

Računanje ekonomskog toka novca s navedenim parametrima s donjim iznosom ulazne naknade u periodu od 30 godina daje bruto dobit u iznosu od -73 023 515 kuna i neto dobit od -64 119 454 kuna. Sadašnja vrijednost novca iznosi -27 091 867 kuna što daje IRR manji od 0.

Računanje financijskog toka novca s navedenim parametrima za donji iznos ulazne naknade u periodu od 30 godina daje bruto dobit u iznosu od -73 023 515 kuna i neto dobit od -81 696 214.

Projekt s navedenim parametrima nije isplativ.

### 5.1.2. Analiza s gornjim iznosom ulazne naknade

Računanje ekonomskog toka novca s navedenim parametrima s gornjim iznosom ulazne naknade naknadom u periodu od 30 godina daje bruto dobit u iznosu od -59 282 819 kuna i neto dobit od -52 027 641 kuna. Sadašnja vrijednost novca iznosi -23 058 687 kuna što daje IRR manji od 0.

Računanje financijskog toka novca s navedenim parametrima za gornji iznos ulazne naknade u periodu od 30 godina da bruto dobit u iznosu od -59 282 819 kuna i neto dobit od -75 124 951.

Projekt s navedenim parametrima nije isplativ.

Kako projekt nije isplativ ni s jednim iznosom ulazne naknade, nije potrebno provjeravati isplativost postrojenja s vrijednostima između tih granica.

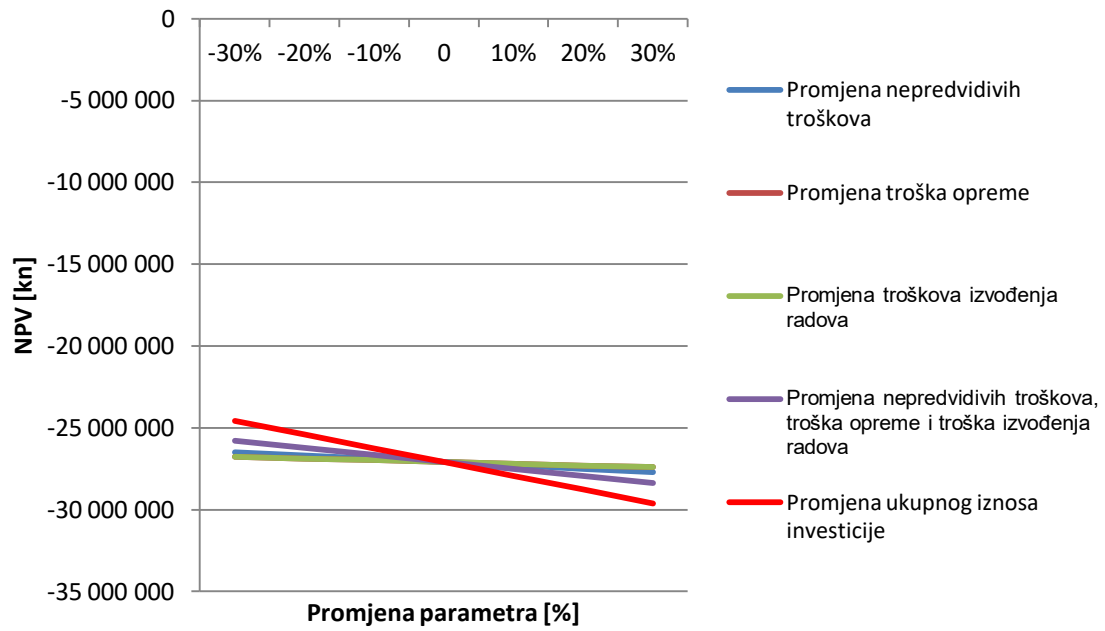
## 5.2. Analiza osjetljivosti

Kako su parametri referentnog postrojenja dobiveni osrednjavanjem vrijednosti iz pregleda postrojenja, njihovi iznosi mogu znatno varirati i imati utjecaj na ekonomsku isplativost projekta. U svrhu provjere utjecaja pojedinih parametara na isplativost projekta, provedena je analiza osjetljivosti onih parametara koji imaju značajniji udio u ukupnim troškovima i prihodima za oba iznosa ulazne naknade.

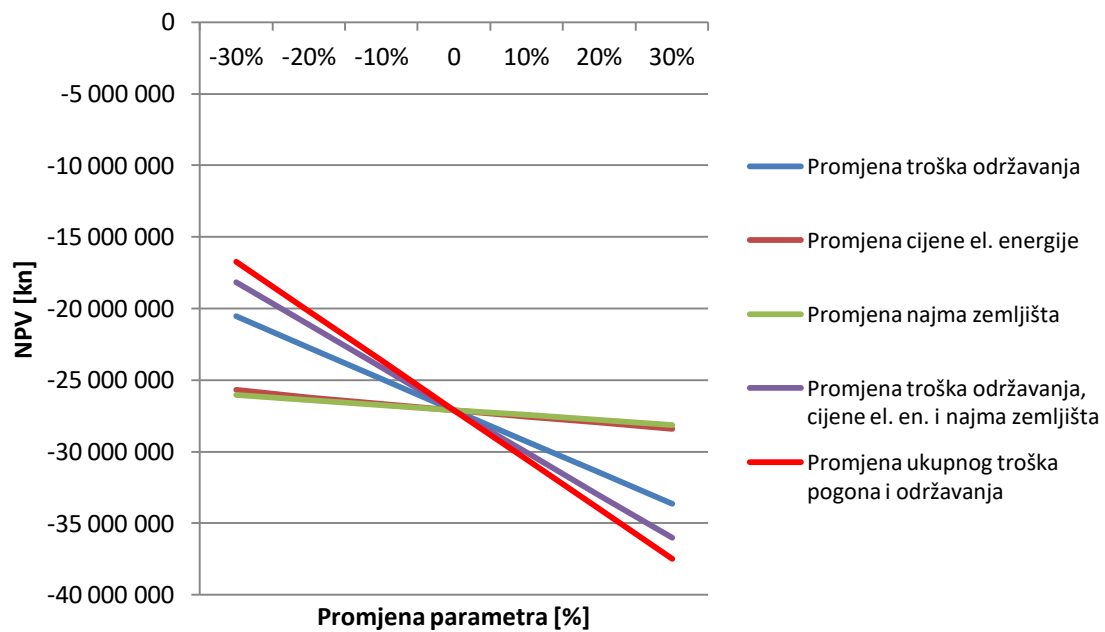
### 5.2.1. Analiza osjetljivosti s donjim iznosom ulazne naknade

U ovom potpoglavlju provedena je analiza osjetljivosti s donjim iznosom ulazne naknade. Parametri koji se mijenjaju navedeni su s postotnom promjenom, dok se ostali smatraju konstantama prema tehničkim i ekonomskim parametrima (tablice 13 – 16 iz poglavlja 5.1.).

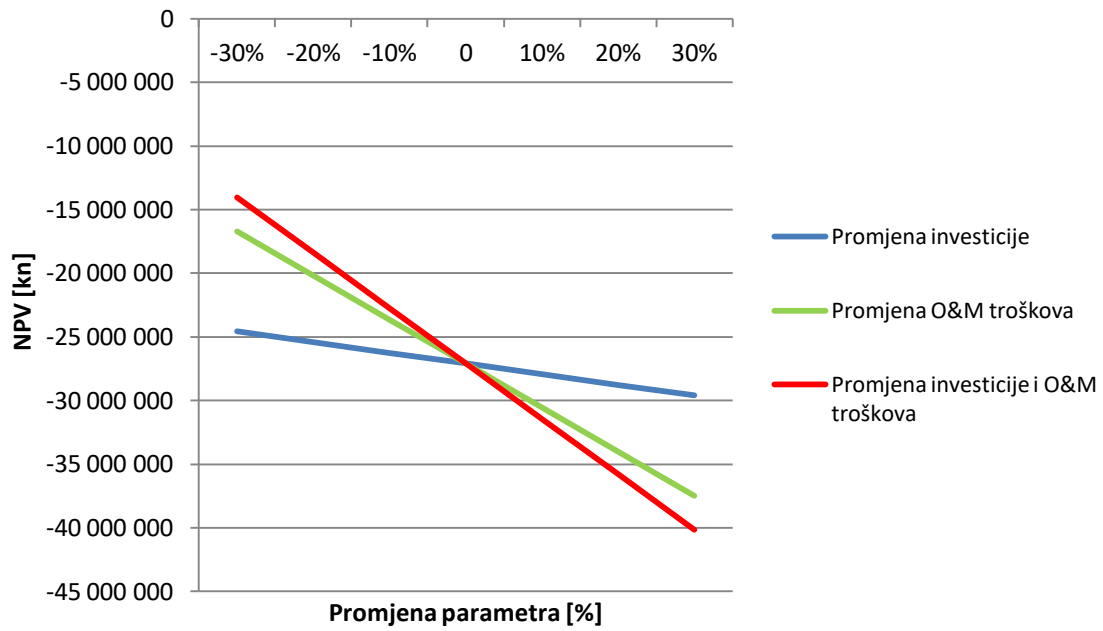
Rezultati analiza osjetljivosti prikazani su dijagramima 26 – 30. Rezultati su podijeljeni u više dijagrama zbog preglednosti. Analiza osjetljivosti provedena je promjenom najviših troškova, njihovog zbroja, ukupnog iznosa investicije i O&M troškova i za promjenu utjecajnijih tehničkih parametra.



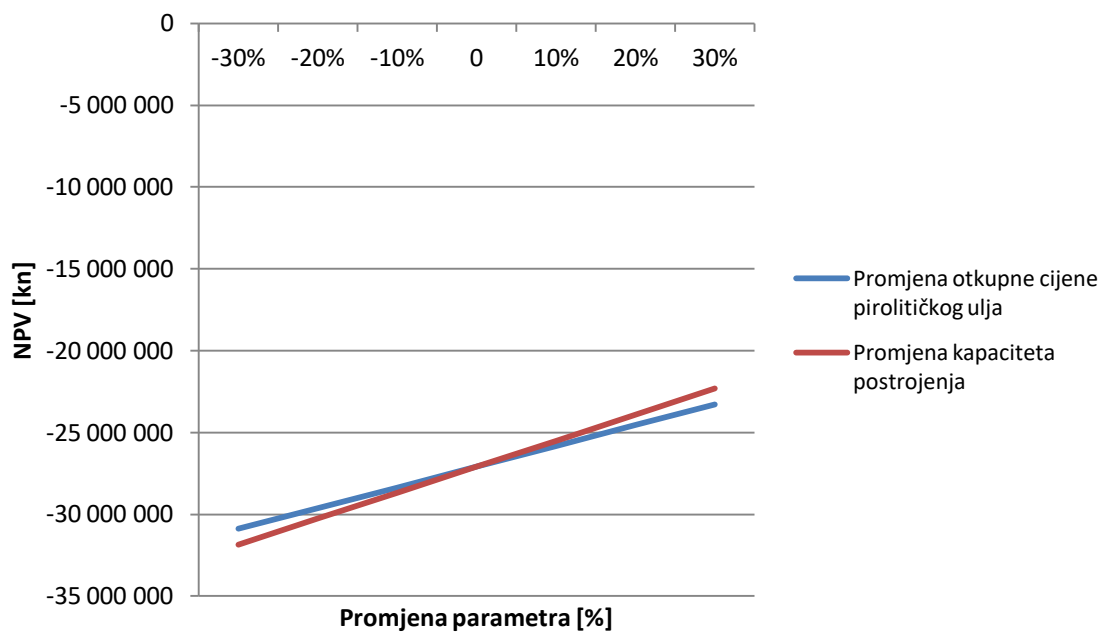
Slika 26. Promjena NPV-a promjenom raznih troškova investicije



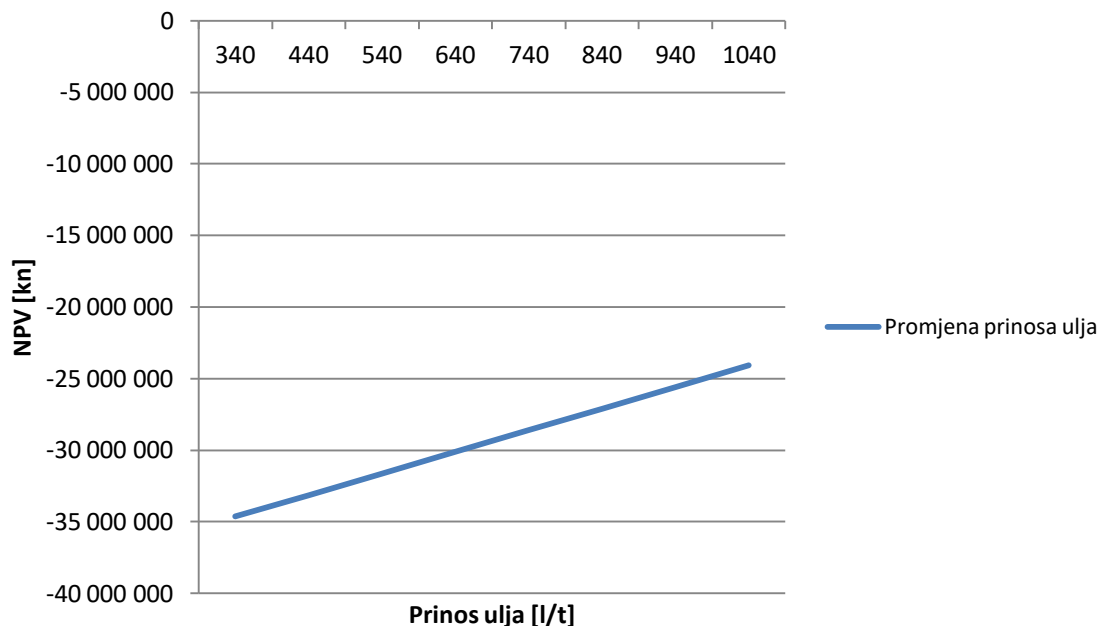
Slika 27. Promjena NPV-a promjenom O&M troškova



Slika 28. Usporedba promjene NPV-a promjenom investicije i O&M troškova



Slika 29. Promjena NPV-a promjenom otkupne cijene ulja i kapaciteta



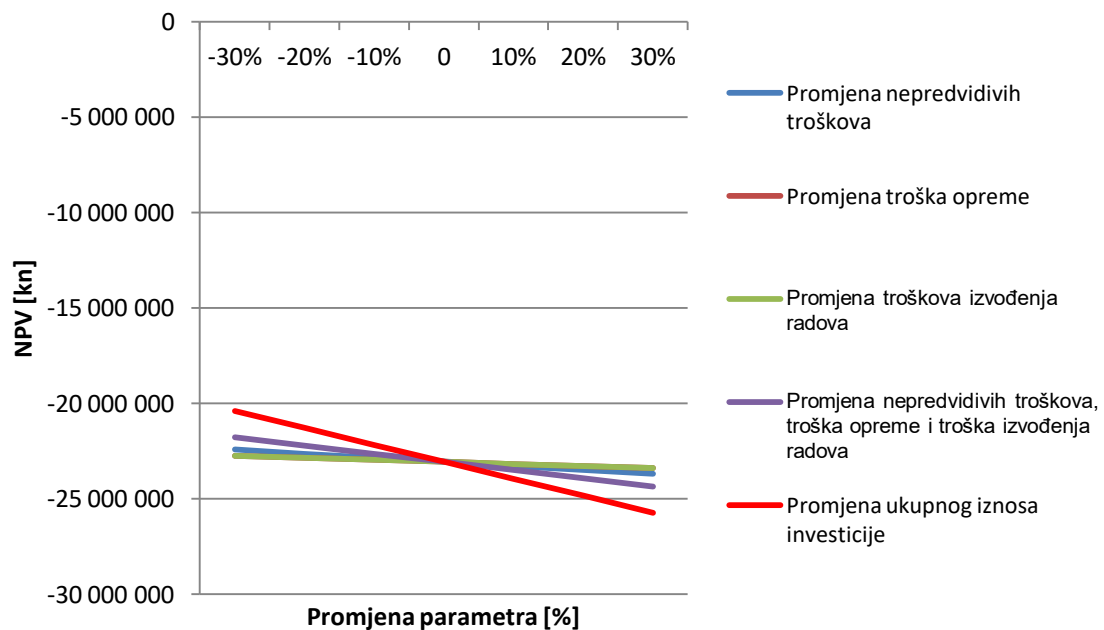
**Slika 30. Promjena NPV-a promjenom prinosa ulja**

Provedenom analizom osjetljivosti pokazano je da značajnijim mijenjanjem parametara referentno postrojenje ne postaje isplativo. Veličina investicije, a tako i njezini konstituenti, nema značajan utjecaj na promjenu NPV-a zbog omjera investicija:O&M troškovi. Najveći utjecaj na isplativost postrojenja ima trošak održavanja postrojenja koji mijenja NPV od –20 535 208 kuna do -33 646 867 kuna. Promjenom ukupnog troška pogona i održavanja NPV postrojenja mijenja se od -16 716 031 kuna do -37 467 703 kuna. Sa strane prihoda, kapacitet postrojenja, otkupna cijena ulja i prinos ulja imaju značajan utjecaj NPV postrojenja. Cijena ulja mijenja NPV od -30 896 505 kuna do -23 287 228 kuna, prinos ulja mijenja NPV od -32 640 752 kuna do -24 072 313 te kapacitet koji mijenja NPV od -31 862 072 do -22 321 660. Međutim, s trenutnim kapacitetom postrojenja i s najvišim parametrima prinosa ulja i otkupne cijene pirolitičkog ulja uz donji iznos ulazne naknade postrojenje ne postaje isplativo. Evidentno je da se mora pronaći kompromis između kapaciteta postrojenja i troškova kako bi projekt postao isplativ.

### 5.2.2. Analiza osjetljivosti s gornjim iznosom ulazne naknade

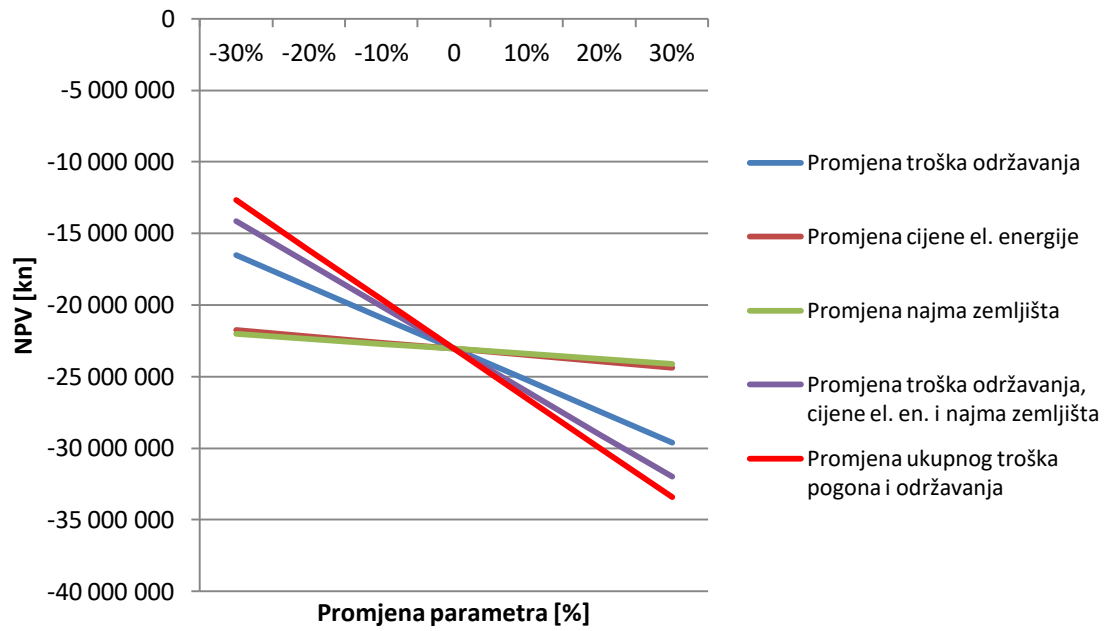
U ovom potpoglavlju provedena je analiza osjetljivosti s gornjim iznosom ulazne naknade. Parametri koji se mijenjaju navedeni su s postotnom promjenom, dok se ostali smatraju konstantama prema tehničkim i ekonomskim parametrima (tablice 13 – 16 iz poglavlja 5.1.).

Rezultati analiza osjetljivosti prikazani su dijagramima 31 – 35. Rezultati su podijeljeni u više dijagrama zbog preglednosti. Analiza osjetljivosti provedena je promjenom najviših troškova, njihovog zbroja, ukupnog iznosa investicije i O&M troškova i za promjenu utjecajnijih tehničkih parametra.

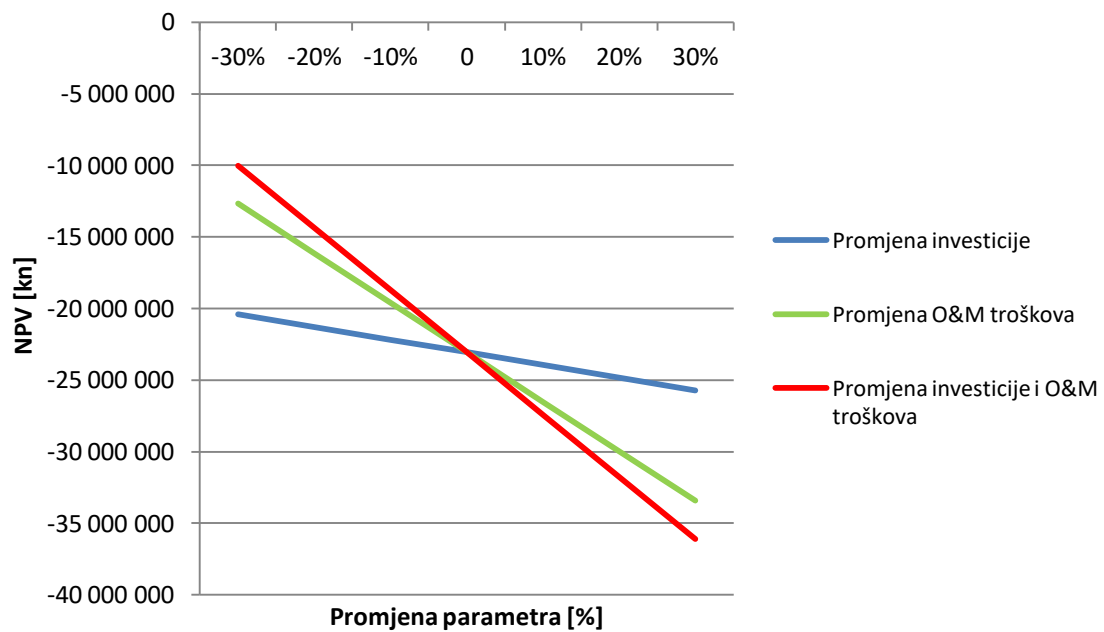


**Slika 31. Promjena NPV-a promjenom raznih troškova investicije**

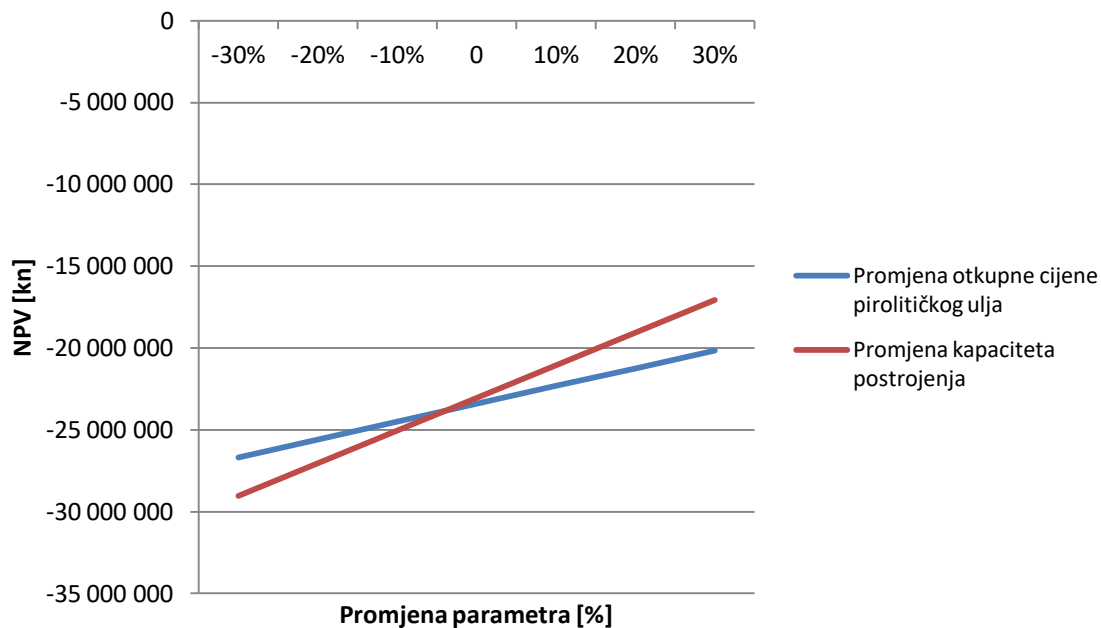




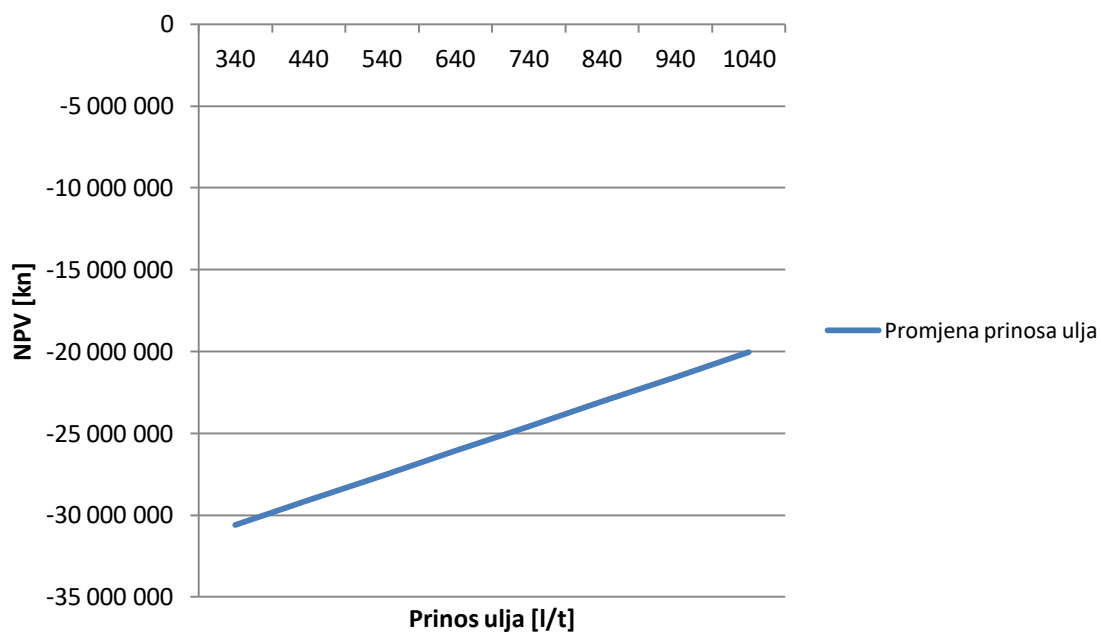
Slika 32. Promjena NPV-a promjenom O&amp;M troškova



Slika 33. Usporedba promjene NPV-a promjenom investicije i O&amp;M troškova



Slika 34. Promjena NPV-a promjenom otkupne cijene ulja i kapaciteta



Slika 35. Promjena NPV-a promjenom prinosa ulja

Provedenom analizom osjetljivosti pokazano je da značajnijim mijenjanjem parametara referentno postrojenje ne postaje isplativo. Veličina investicije, a tako i njezini konstituenti, nema značajan utjecaj na NPV projekta zbog omjera investicija:O&M troškovi. Najveći utjecaj na isplativost postrojenja ima trošak održavanja postrojenja koji mijenja NPV od -16

502 313 kuna do -29 615 061 kuna. Promjenom O&M troškova NPV postrojenja mijenja se od -12 682 851 kuna do -33 434 523 kuna. Sa strane prihoda, kapacitet postrojenja, otkupna cijena ulja i prinos ulja imaju veliki utjecaj na isplativost postrojenja. Cijena ulja mijenja NPV od -26 683 325 kuna do -20 154 047 kuna, prinos ulja mijenja NPV od -30 607 571 kuna do -20 039 139 te kapacitet koji mijenja NPV od -29 038 847 do -17 078 531. Međutim, s referentnim kapacitetom postrojenja i s najvišim parametrima prinosa i otkupne cijene ulja uz gornji iznos ulazne naknade postrojenje ne postaje isplativo. Evidentno je da se mora pronaći kompromis između kapaciteta postrojenja i troškova kako bi projekt postao isplativ.

Kako postrojenje kapaciteta 1 071,6 t/god nije isplativo niti sa donjim ni sa gornjim iznosom naknade za ulaz (gate fee), potrebno je promijeniti parametre. U sljedećim poglavljima biti će pokazano kojim kombinacijama parametara postrojenje postaje isplativo.

## 6. Isplativi kapaciteti postrojenja

Zbog utjecaja ekonomije veličine, isplativost projekta će se probati postići povećanjem njegovog kapaciteta, odnosno povećanjem količine sirovine koju obrađuje, a time i povećanjem proizvodnje. Kapacitet postrojenja potrebno je optimirati tako da postrojenje postane ekonomski isplativo u analiziranom vremenskom periodu, ali i da investicija bude prihvatljiva za financiranje. Tako projektiran kapacitet postrojenja nazvat će se minimalni kapacitet.

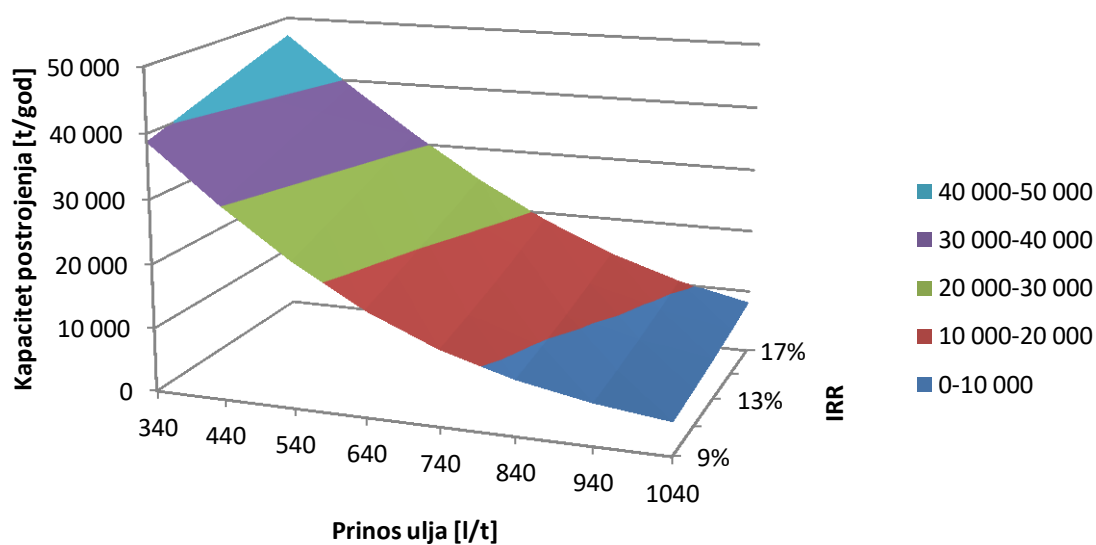
Minimalni kapacitet odredit će se variranjem prinosa ulja i interne stope povrata za tri različite ulazne naknade (donju, gornju i srednju vrijednost). Ostale veličine bit će konstantne i istog iznosa kao u prethodnom poglavlju (poglavlje 5, tablice 13 – 16).

### 6.1. Minimalni kapaciteti postrojenja za donji iznos ulazne naknade

U tablici 18 prikazane su kombinacije prinosa ulja i kapaciteta postrojenja za danu internu stopu povrata za donji iznos ulazne naknade. Tako npr. ako prinos ulja iznosi 840 l/t, a kapacitet postrojenja 10 984 t/god, interna stopa povrata je 13% (s tolerancijama u iznosu od -0,03% do +0,03%). Podaci iz tablice 18 također su grafički prikazani – slika 36. Dobiveni dijagram prikazuje trend promjene IRR-a u ovisnosti o promjeni prinosa ulja i godišnjeg kapaciteta postrojenja. Prikazana površina dijagrama prikazuje minimalne kapacitete, gdje svi iznosi iznad te površine predstavljaju isplative kapacitete, a iznosi ispod prikazane površine predstavljaju postrojenja čiji su kapaciteti neisplativi pri zadanim ostalim parametrima.

**Tablica 18. Minimalni kapaciteti postrojenja za donji iznos ulazne naknade [t/god]**

		Interna stopa povrata				
		9%	11%	13%	15%	17%
Prinos ulja [l/t]	340	38 749	40 871	42 972	45 008	47 033
	440	30 241	32 459	34 645	36 874	38 996
	540	22 707	24 851	27 080	29 287	31 548
	640	16 449	18 378	20 446	22 557	24 711
	740	11 788	13 331	14 992	16 899	18 839
	840	8 584	9 698	10 984	12 495	14 113
	940	6 494	7 287	8 230	9 323	10 555
	1040	5 144	5 712	6 376	7 180	8 091



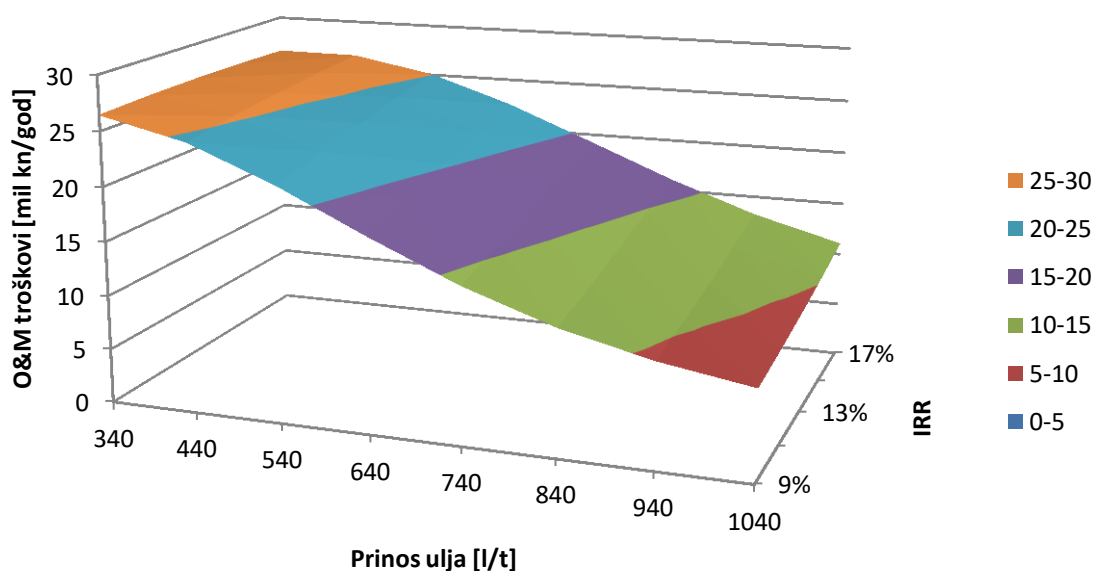
**Slika 36. Minimalni kapaciteti postrojenja za donji iznos ulazne naknade**

U tablici 19 prikazani su pripadajući troškovi pogona i održavanja u ovisnosti o internoj stopi povrata i prinosu ulja, odnosno kapacitetu. Tako npr. ako je prinos ulja 840 l/t, a O&M troškovi postrojenja  $13,58 \cdot 10^6$  kn/god, interna stopa povrata iznosi 13%. Drugim riječima, tablica 19 prikazuje troškove pogona i održavanja za pripadajuće kapacitete. Podaci iz tablice 19 također su grafički prikazani – slika 37. Dobiveni dijagram prikazuje trend promjene IRR-a u ovisnosti o promjeni prinosa ulja i O&M troškova postrojenja. Prikazana površina

dijagrama prikazuje iznos O&M troškova za minimalne kapacitete, gdje svi iznosi iznad te površine predstavljaju isplative kapacitete, a iznosi ispod prikazane površine predstavljaju postrojenja čiji su kapaciteti neisplativi pri zadanim ostalim parametrima.

**Tablica 19. O&M troškovi minimalnih kapaciteta za donji iznos ulazne naknade [ $10^6$  kn/god]**

		Interna stopa povrata				
		9%	11%	13%	15%	17%
Prinos ulja [l/t]	340	26,46	26,64	26,70	26,66	26,53
	440	24,64	25,29	25,81	26,22	26,49
	540	21,49	22,53	23,50	24,32	25,04
	640	17,73	19,00	20,25	21,41	22,47
	740	14,24	15,46	16,70	18,03	19,29
	840	11,49	12,48	13,58	14,81	16,05
	940	9,55	10,30	11,17	12,15	13,22
	1040	8,23	8,79	9,44	10,20	11,05



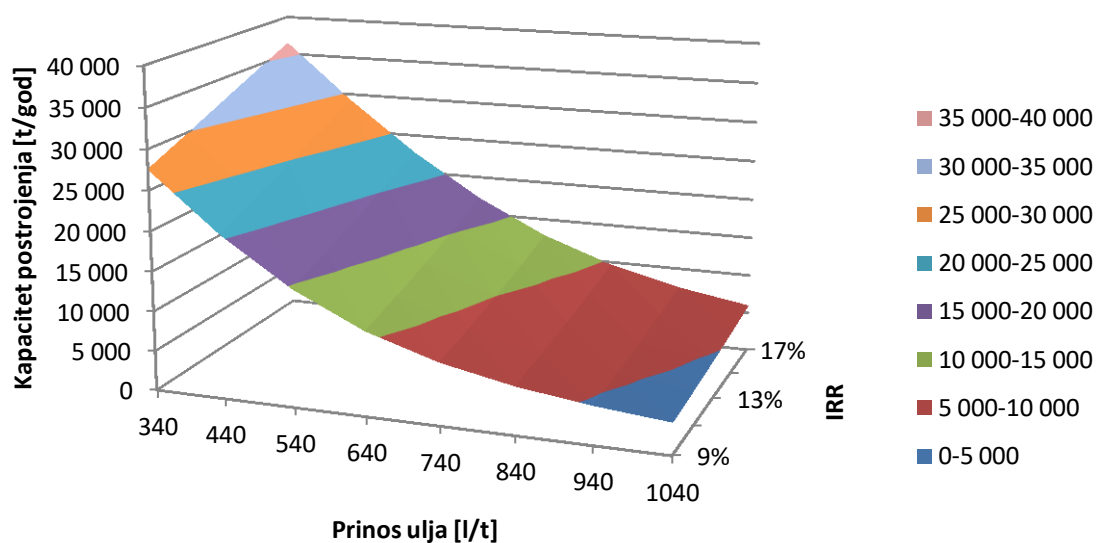
**Slika 37. Iznosi O&M troškova minimalnih kapaciteta za donji iznos ulazne naknade**

## 6.2. Minimalni kapaciteti postrojenja za srednji iznos ulazne naknade

U tablici 20 prikazane su kombinacije prinosa ulja i kapaciteta postrojenja za danu internu stopu povrata za srednji iznos ulazne naknade. Tako npr. ako prinos ulja iznosi 840 l/t, a kapacitet postrojenja je 7 544 t/god, interna stopa povrata je 13%. Podaci iz tablice 20 također su grafički prikazani – slika 38. Dobiveni dijagram prikazuje trend promjene IRR-a u ovisnosti o promjeni prinosa ulja i godišnjeg kapaciteta postrojenja. Prikazana površina dijagrama prikazuje minimalne kapacitete, gdje svi iznosi iznad te površine predstavljaju isplative kapacitete, a iznosi ispod prikazane površine predstavljaju postrojenja čiji su kapaciteti neisplativi pri zadanim ostalim parametrima.

**Tablica 20. Minimalni kapaciteti postrojenja za srednji iznos ulazne naknade [t/god]**

		Interna stopa povrata				
		9%	11%	13%	15%	17%
Prinos ulja [l/t]	340	27 583	29 791	32 041	34 270	36 435
	440	20 478	22 557	24 701	26 951	29 137
	540	14 724	16 513	18 453	20 532	22 611
	640	10 545	11 948	13 513	15 238	17 135
	740	7 780	8 787	9 966	11 273	12 784
	840	5 980	6 698	7 544	8 498	9 634
	940	4 790	5 304	5 905	6 623	7 437
	1040	3 954	4 351	4 801	5 337	5 947



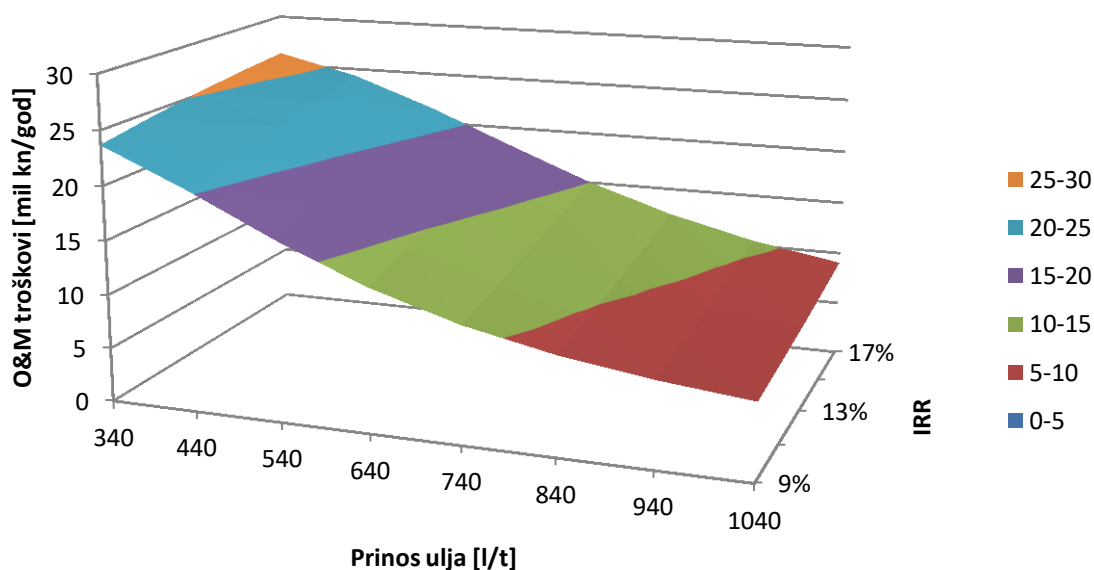
**Slika 38. Minimalni kapaciteti postrojenja za srednji iznos ulazne naknade**

U tablici 21 prikazani su pripadajući troškovi pogona i održavanja u ovisnosti o internoj stopi povrata i prinosu ulja, odnosno kapacitetu. Tako npr. ako je prinos ulja 840 l/t, a O&M troškovi postrojenja  $10,54 \cdot 10^6$  kn/god, interna stopa povrata iznosi 13%. Podaci iz tablice 21 također su grafički prikazani – slika 39. Dobiveni dijagram prikazuje trend promjene IRR-a u ovisnosti o promjeni prinosa ulja i O&M troškova postrojenja. Prikazana površina dijagrama prikazuje iznos O&M troškova za minimalne kapacitete, gdje svi iznosi iznad te površine predstavljaju isplative kapacitete, a iznosi ispod prikazane površine predstavljaju postrojenja čiji su kapaciteti neisplativi pri zadanim ostalim parametrima.



**Tablica 21. O&M troškovi minimalnih kapaciteta srednji iznos ulazne naknade [ $10^6$  kn/god]**

		Interna stopa povrata				
		9%	11%	13%	15%	17%
Prinos ulja [l/t]	340	23,70	24,49	25,18	25,73	26,15
	440	20,27	21,41	22,46	23,44	24,27
	540	16,51	17,77	19,04	20,30	21,44
	640	13,21	14,37	15,60	16,88	18,19
	740	10,76	11,68	12,71	13,82	15,03
	840	9,05	9,74	10,54	11,42	12,43
	940	7,87	8,39	8,98	9,67	10,44
	1040	7,02	7,43	7,88	8,42	9,02



**Slika 39. Iznosi O&M troškova minimalnih kapaciteta za srednji iznos ulazne naknade**

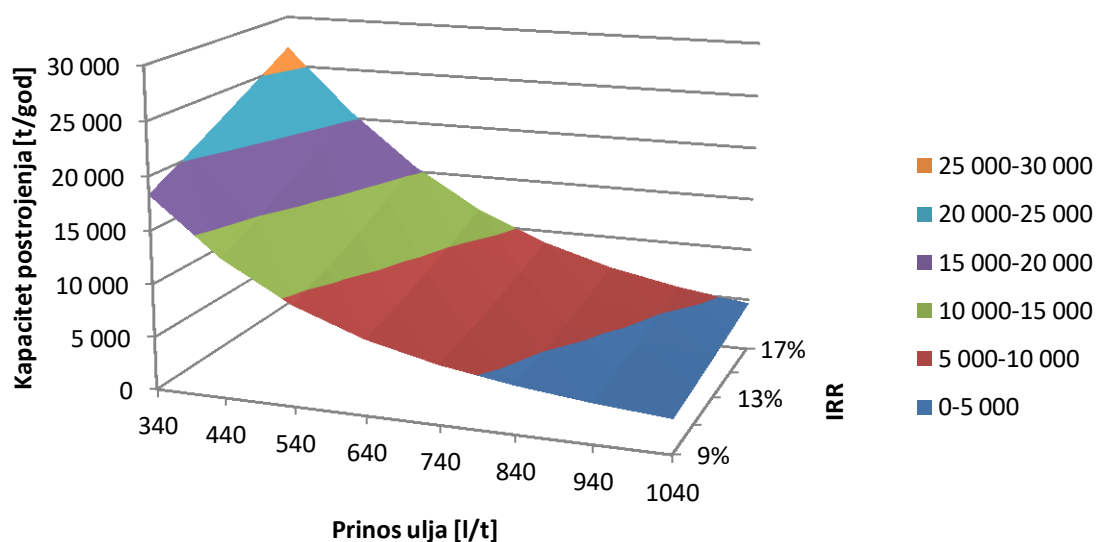
### 6.3. Minimalni kapaciteti postrojenja za gornji iznos ulazne naknade

U tablici 22 prikazane su kombinacije prinosa ulja i kapaciteta postrojenja za danu internu stopu povrata za gornji iznos ulazne naknade. Tako npr. ako prinos ulja iznosi 840 l/t, a kapacitet postrojenja je 5 497 t/god, interna stopa povrata je 13%. Podaci iz tablice 22 također su grafički prikazani – slika 40. Dobiveni dijagram prikazuje trend promjene IRR-a u ovisnosti o promjeni prinosa ulja i godišnjeg kapaciteta postrojenja. Prikazana površina

dijagrama prikazuje minimalne kapacitete, gdje svi iznosi iznad te površine predstavljaju isplative kapacitete, a iznosi ispod prikazane površine predstavljaju postrojenja čiji su kapaciteti neisplativi pri zadanim ostalim parametrima.

**Tablica 22. Minimalni kapaciteti postrojenja za gornji iznos ulazne naknade [t/god]**

		Interna stopa povrata				
		9%	11%	13%	15%	17%
Prinos ulja [l/t]	340	18 335	20 361	22 493	24 647	26 865
	440	13 127	14 777	16 664	18 646	20 628
	540	9 484	10 738	12 173	13 802	15 495
	640	7 083	7 973	9 044	10 234	11 573
	740	5 530	6 172	6 912	7 801	8 809
	840	4 479	4 951	5 497	6 130	6 869
	940	3 740	4 104	4 522	4 994	5 551
	1040	3 204	3 483	3 815	4 190	4 608

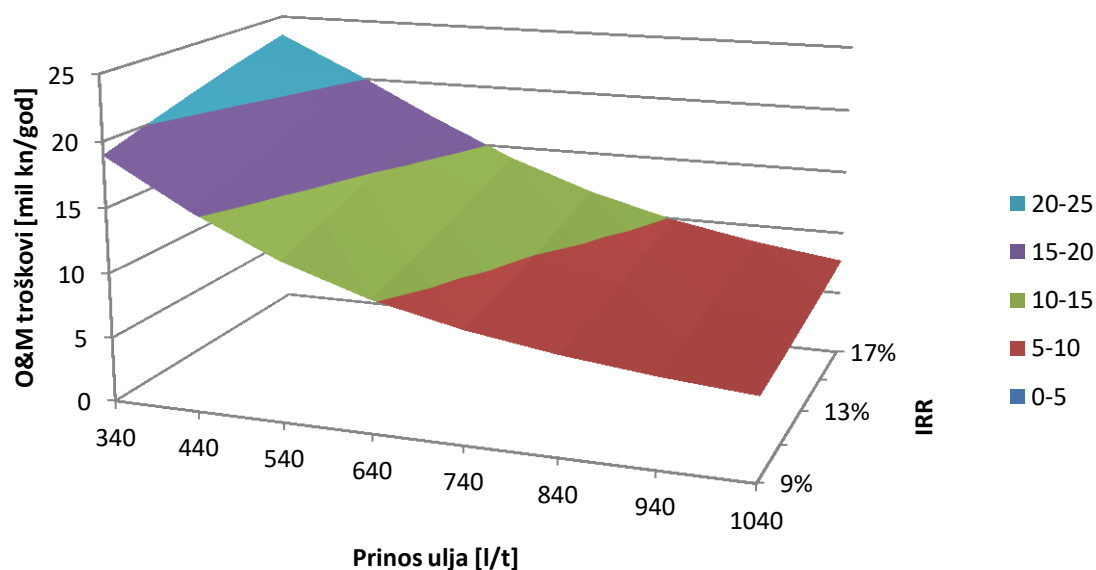


**Slika 40. Minimalni kapaciteti postrojenja za gornji iznos ulazne naknade**

U tablici 23 prikazani su pripadajući troškovi pogona i održavanja u ovisnosti o internoj stopi povrata i prinosu ulja, odnosno kapacitetu. Tako npr. ako je prinos ulja 840 l/t, a O&M troškovi postrojenja  $8,58 \cdot 10^6$  kn/god, interna stopa povrata iznosi 13%. Podaci iz tablice 23 također su grafički prikazani – slika 41. Dobiveni dijagram prikazuje trend promjene IRR-a u ovisnosti o promjeni prinosa ulja i O&M troškova postrojenja. Prikazana površina dijagrama prikazuje iznos O&M troškova za minimalne kapacitete, gdje svi iznosi iznad te površine predstavljaju isplative kapacitete, a iznosi ispod prikazane površine predstavljaju postrojenja čiji su kapaciteti neisplativi pri zadanim ostalim parametrima.

**Tablica 23. O&M troškovi minimalnih kapaciteta za gornji iznos ulazne naknade [ $10^6$  kn/god]**

		Interna stopa povrata				
		9%	11%	13%	15%	17%
Prinos ulja [l/t]	340	18,97	20,20	21,37	22,44	23,41
	440	15,30	16,54	17,87	19,17	20,35
	540	12,29	13,37	14,55	15,82	17,06
	640	10,11	10,94	11,91	12,94	14,06
	740	8,61	9,24	9,95	10,78	11,70
	840	7,56	8,03	8,58	9,20	9,91
	940	6,80	7,18	7,60	8,08	8,63
	1040	6,24	6,53	6,88	7,26	7,69



Slika 41. Iznosi O&M troškova minimalnih kapaciteta za gornji iznos ulazne naknade

#### 6.4. Projektiranje i ekonomska analiza isplativih postrojenja

U ovom poglavlju projektirana su tri isplativa postrojenja prema minimalnim kapacitetima (tablice 18, 20 i 22) iz poglavlja 6. Prvo postrojenje projektirano je za donji iznos ulazne naknade i ono se naziva „donje postrojenje“. Drugo postrojenje projektirano je za srednji iznos ulazne naknade i ono se naziva „srednje postrojenje“. Treće postrojenje projektirano je za gornji iznos ulazne naknade i ono se naziva „gornje postrojenje“.

U tablici 24 navedeni su tehnički parametri triju navedenih postrojenja. Zajednička karakteristika im je unutarnja stopa povrata od 15%. Uz tehničke parametre dana je i okvirna procjena emisija postrojenja.

Tablica 24. Tehnički parametri isplativih postrojenja

			Donje postrojenje	Srednje postrojenje	Gornje postrojenje	Jedinica
		Kapacitet	1 785,00	1 214,00	875,71	kg/h
			42,84	29,14	21,02	t/dan
			12 495	8 498	6 130	t/god
		Radni sati	7 000			h/god
Ulazi	Potrošnja električne energije		5 860,16	3 985,56	3 297,94	MWh
	Drugi ulazi	Katalizatori i kemikalije	397,65	270,45	195,09	t/god
		NaOH	5,00	3,40	2,45	t/god
		Voda	23 909	16 260	11 729	m <sup>3</sup> /god
	Dopunska energija	Ulaz toplinske energije	1 586,87	1 079,25	778,51	MWh/god
		Toplina za start pogona	15 118	10 282	7 417,30	MWh/god
Izlazi	Energetski produkti	Pirolitičko ulje	840			l/t
		Plinovite frakcije	130,87			kg/t
		Koks/kruti ostatak	44,60			kg/t
	Ostaci	Ispušni plinovi	35 941	24 444	17 632	t/god
		Katalizatori i mulj	1 536,37	1 051,20	758,28	t/god
	Emisije	PM	62,49	42,50	30,66	t/god
		CO <sub>2</sub>	3 573,57	2 430,43	1 365,46	t/god
		CH <sub>4</sub>	284,26	193,33	139,46	t/god

	Ugljikovo-	49,98	33,99	24,52	t/god
	dici				
	SO <sub>2</sub>	0,50	0,34	0,25	t/god
	NO <sub>x</sub>	267,18	181,72	131,08	t/god
	CO	28,32	19,26	13,89	t/god
	Hg	$2,2 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	t/god
	Pb	0,0012	0,0008	0,0006	t/god
	VOC	10,00	6,80	4,90	t/god

#### 6.4.1. Opis donjeg postrojenja

Donje postrojenje ima dnevni kapacitet od 42,84 t/dan, tj. 12 495 t/god. Početna investicija iznosi 38,74 milijuna kuna a operativni troškovi 14,81 milijuna kuna godišnje. Većinu prihoda čine prihodi od prodaje ulja u iznosu od 16,79 milijuna kuna godišnje, dok ulazna naknada pokriva prihode u iznosu od 4,26 milijuna kuna godišnje. Sadašnja vrijednost novca na kraju proračunskog vijeka iznosi 18 783 125 kuna što daje internu stopu povrata od 15,03%.

#### 6.4.2. Opis srednjeg postrojenja

Srednje postrojenje ima dnevni kapacitet od 29,14 t/dan, tj. 8 498 t/god. Početna investicija iznosi 29,34 milijuna kuna a operativni troškovi 11,41 milijuna kuna godišnje. Većinu prihoda čine prihodi od prodaje ulja u iznosu od 11,42 milijuna kuna godišnje, dok ulazna naknada pokriva prihode u iznosu od 4,71 milijuna kuna godišnje. Sadašnja vrijednost novca na kraju proračunskog vijeka iznosi 14 109 528 kuna što daje internu stopu povrata od 14,98%.

#### 6.4.3. Opis gornjeg postrojenja

Gornje postrojenje ima dnevni kapacitet od 21,02 t/dan, tj. 6 130 t/god. Početna investicija iznosi 23,33 milijuna kuna a operativni troškovi 9,19 milijuna kuna godišnje. Većinu prihoda čine prihodi od prodaje ulja u iznosu od 8,23 milijuna kuna godišnje, dok ulazna naknada pokriva prihode u iznosu od 4,71 milijuna kuna godišnje. Sadašnja vrijednost novca na kraju proračunskog vijeka iznosi 11 209 772 kuna što daje internu stopu povrata od 14,98%.

U tablici 25 prikazana je detaljnija ekonomska analiza za prethodno definirana tri postrojenja.

Tablica 25. Ekonomski parametri isplativih postrojenja

Kategorija	Donje postrojenje	Srednje postrojenje	Gornje postrojenje	Jedinica
Kapacitet	1 785,00	1 214,00	875,71	kg/h
	42,84	29,14	21,02	t/dan
	12 495	8 498	6 130	t/god
Investicija	38 741 740	29 346 049	23 333 981	kn
O&M troškovi	14 806 484	11 417 061	9 198 616	kn/god
Ulazna naknada	341,09	554,8	768,51	kn/t
Porez na dobit	18			%
Otkupna cijena ulja	1,6			kn/l
Diskontna stopa	9,23			%
Vlastiti kapital	50			%
Iznos kredita	50			%
Kamatna stopa	4,30			%
Rok otplate kredita	10			god
Prihod od prodaje ulja	16 793 280	11 421 312	8 238 720	kn/god
Prihod od ulazne naknade	4 261 920	5 714 690	4 710 966	kn/god
<b>Ekonomski tok novca</b>				
Bruto dobit	148 719 722	112 222 179	89 198 138	kn
Neto dobit	122 809 277	92 672 941	73 659 909	kn
NPV	18 783 125	14 109 528	11 209 772	kn
IRR	15,03	14,98	14,98	%
<b>Financijski tok novca</b>				
Bruto dobit	148 719 722	112 222 179	89 198 138	kn
Neto dobit	50 087 680	37 587 868	29 860 008	kn

### 6.5. Analiza osjetljivosti donjeg, srednjeg i gornjeg postrojenja

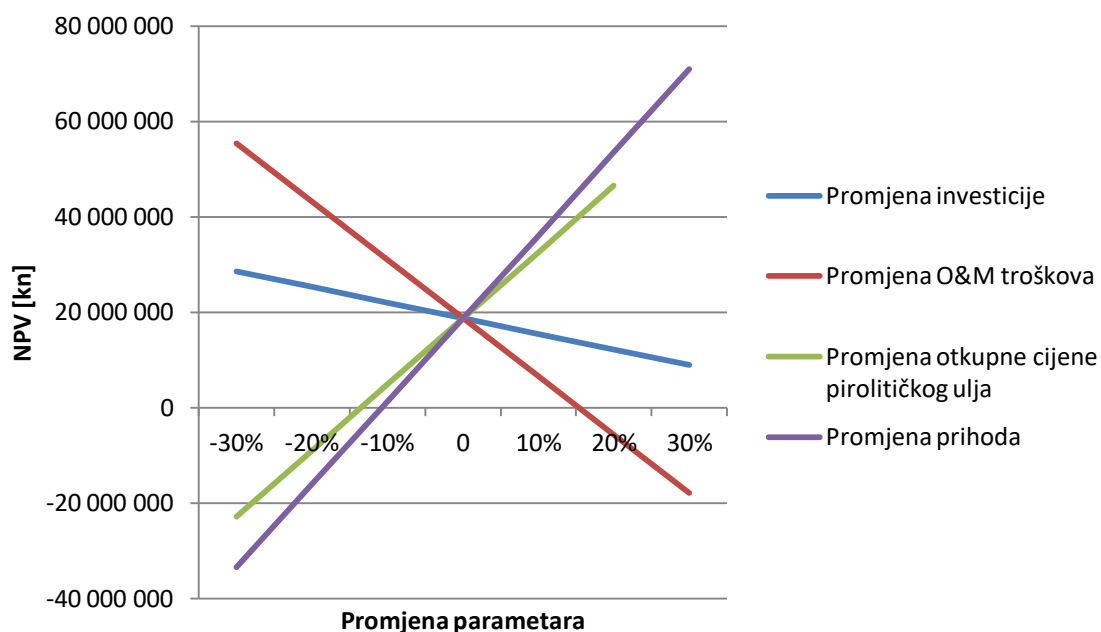
Na dijagramima 42 – 47 prikazane su analize osjetljivosti za donje, srednje i gornje postrojenje. Crvena linija na dijagramima 43, 45 i 47 prikazuju diskontnu stopu, odnosno granicu isplativosti.

#### 6.5.1. Analiza osjetljivosti donjeg postrojenja

Na dijagramima 42 i 43 prikazana je analiza osjetljivost za donje postrojenje. Desno od dijagrama prikazana je legenda parametara koji su se mijenjali. Točka u kojoj se svi pravci sijeku za NPV iznosi 18 783 125 kn te 15,03% za IRR. Promjena iznosa investicije u granicama od -30% do 30% ne uzrokuje neisplativost postrojenja.

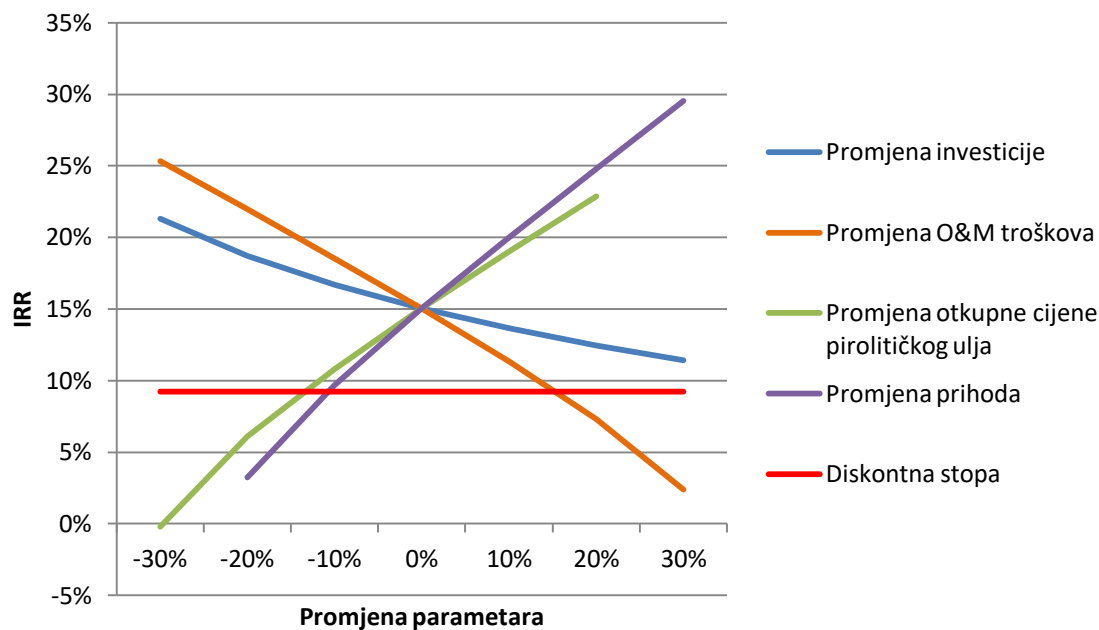
Granica isplativosti donjeg postrojenja postiže se vrijednostima:

- O&M troškova iznosa 17 080 760 kn/god (povećanje za 15,36%),
- prinosa ulja od 726 l/t pri čemu su prihodi od prodaje ulja 14 517 791 kn/god (smanjenje za 13,55%),
- otkupne cijene ulja u iznosu od 1,38 kn/l (smanjenje za 13,55%),
- ili приходima od 18 781 238 kn/god (smanjenje za 10,8%).



Slika 42. Promjena NPV-a donjeg postrojenja





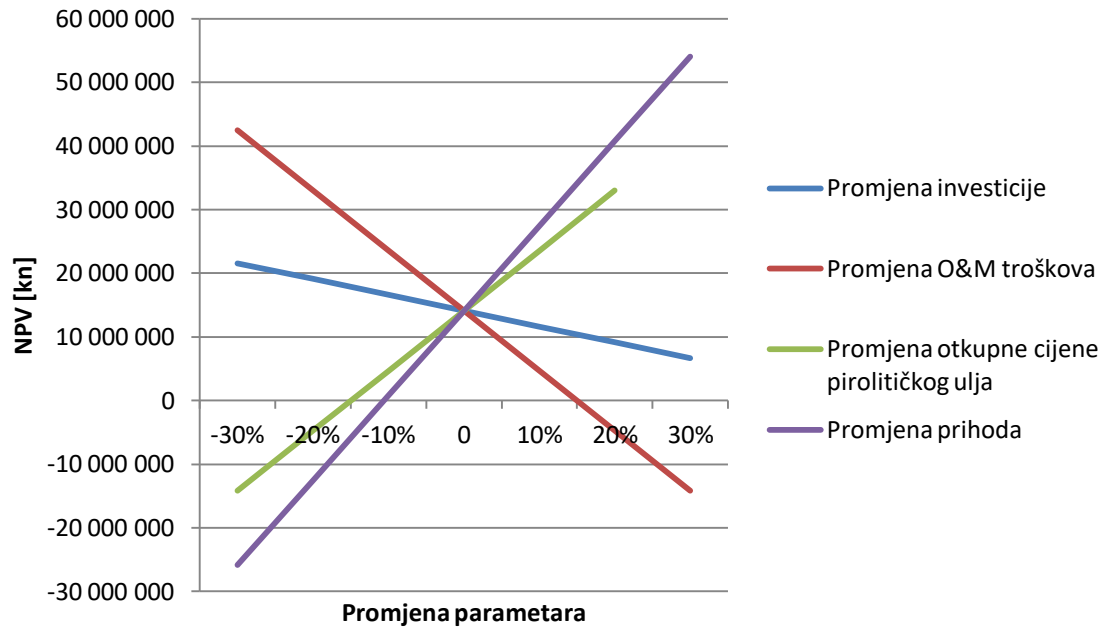
**Slika 43. Promjena IRR-a donjeg postrojenja**

#### 6.5.2. Analiza osjetljivosti srednjeg postrojenja

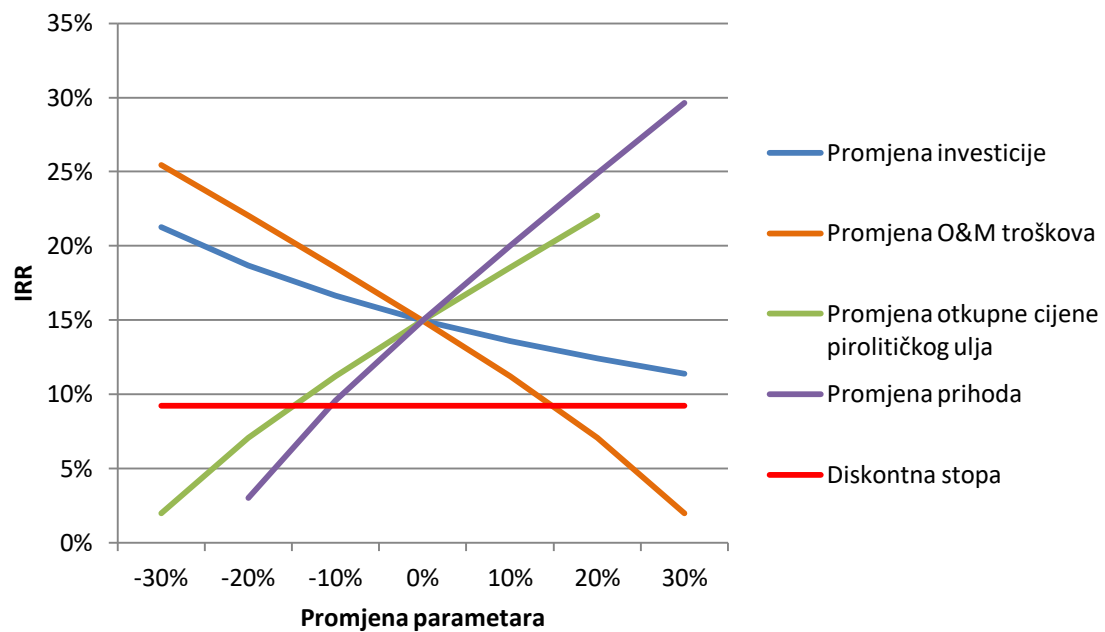
Na dijagramima 44 i 45 prikazana je analiza osjetljivost za srednje postrojenje. Desno od dijagrama prikazana je legenda parametara koji su se mijenjali. Točka u kojoj se svi pravci sijeku za NPV iznosi 14 109 528 kn te 14,98% za IRR. Promjena iznosa investicije u granicama od -30% do 30% ne uzrokuje neisplativost postrojenja.

Granica isplativosti srednjeg postrojenja postiže se vrijednostima:

- O&M troškova iznosa 13 126 196 kn/god (povećanje za 14,97%),
- prinosa ulja od 714 l/t pri čemu su prihodi od prodaje ulja 9 711 542 kn/god (smanjenje za 14,97%),
- otkupne cijene ulja u iznosu od 1,36 kn/l (smanjenje za 14,97%),
- ili prihodima od 14 425 586 kn/god (smanjenje za 10,6%).



Slika 44. Promjena NPV-a srednjeg postrojenja



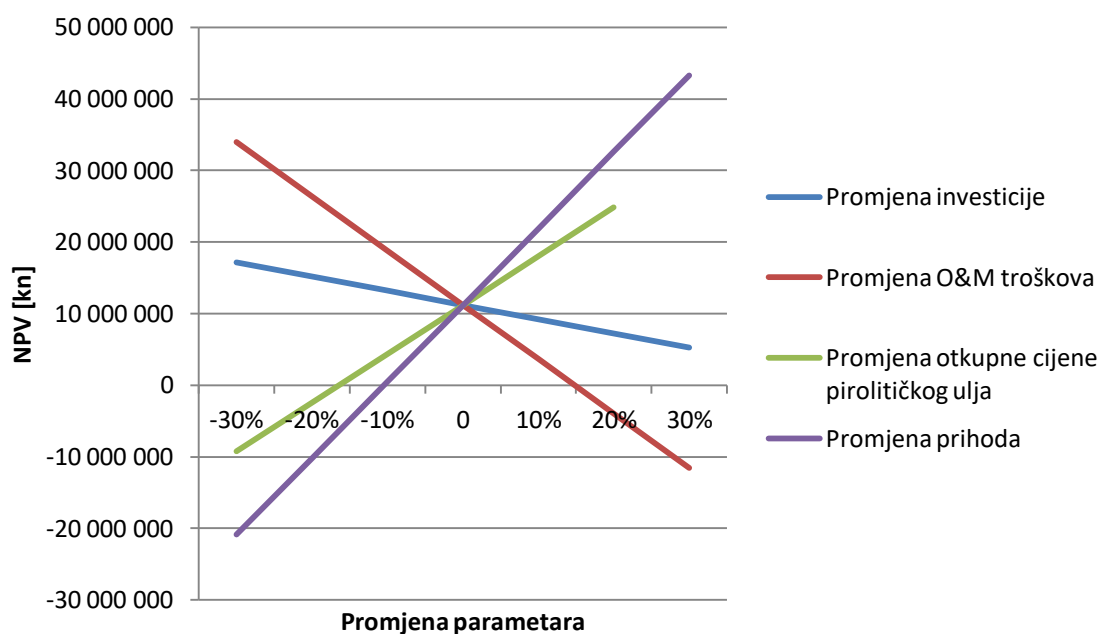
Slika 45. Promjena IRR-a srednjeg postrojenja

### 6.5.3. Analiza osjetljivosti gornjeg postrojenja

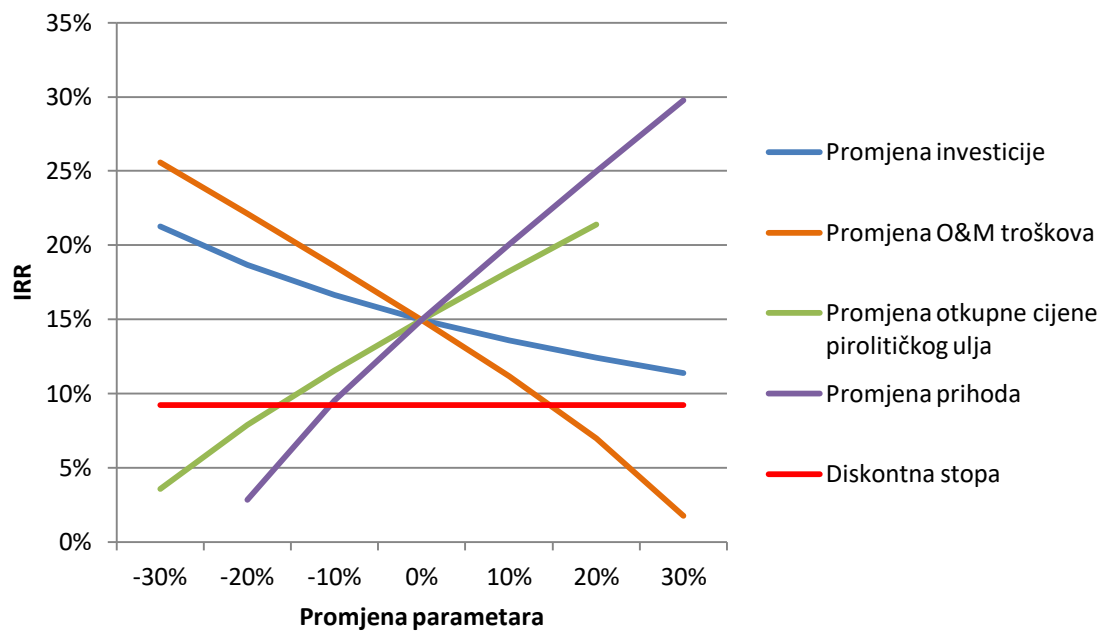
Na dijagramima 46 i 47 prikazana je analiza osjetljivost za gornje postrojenje. Desno od dijagrama prikazana je legenda parametara koji su se mijenjali. Točka u kojoj se svi pravci sijeku za NPV iznosi 11 209 772 kn te 14,98% za IRR. Promjena iznosa investicije u granicama od -30% do 30% ne uzrokuje neisplativost postrojenja.

Granica isplativosti gornjeg postrojenja postiže se vrijednostima:

- O&M troškova iznosa 10 555 411 kn/god (povećanje za 15,25%),
- prinosa ulja od 726 l/t pri čemu su prihodi od prodaje ulja 14 517 791 kn/god (smanjenje za 16,48%),
- otkupne cijene ulja u iznosu od 1,336 kn/l (smanjenje za 16,48%),
- ili приходima od 11 592 559 kn/god (smanjenje za 10,48%).



Slika 46. Promjena NPV-a gornjeg postrojenja



Slika 47. Promjena IRR-a gornjeg postrojenja

## 7. Projektiranje optimalnog postrojenja

Prilikom pregleda postrojenja (poglavlje 3, tablica 8) utvrđeno je da godišnji kapaciteti najmanjih komercijalnih postrojenja u svijetu iznose 2 400 – 2 950 t/god. Kako prilikom proračuna minimalnih isplativih kapaciteta u poglavlju 6 nismo dobili takve iznose (najmanji kapacitet u poglavlju 6 iznosi 3 204 t/god za 9% IRR-a i prinos ulja od 1 040 l/t), lako je zaključiti da smo podcijenili i/ili precijenili određene parametre. Npr. moguće je da je prinos pirolitičkog ulja viši, da se pirolitičko ulje može prodati po višoj cijeni, da je izgradnja postrojenja jeftinija, da su određeni troškovi niži ili nepostojeći, itd.

Stoga će četvrto postrojenje biti projektirano prema optimalnim parametrima i kapacitetom od 10 t/dan (2 917 t/god). Dosad korištene parametre potrebno je smanjiti tako da, uz 10 t/dan, IRR postigne vrijednost od 15%. Jedino ograničenje je da varirani parametri moraju biti unutar granica koje definira dosad korištena literatura. Takvo postrojenje nazvat će se „optimalno postrojenje“.

Za razliku od donjeg, srednjeg i gornjeg postrojenja, optimalno postrojenje ima za 20% manju investiciju i O&M troškove nego što daju funkcije (1) i (2). Do tih promjena može doći zbog nižih nepredviđenih troškova i cijene opreme, niže cijene pogona i održavanja ili druge cijene ljudskog rada. Budući da bi se postrojenje izgradilo u sklopu postojećeg objekta za reciklažu, moguće je da bi trošak najma zemljišta bio niži ili nepostojeći. Nadalje, postojeći reciklažni objekt već raspolaže električnom infrastrukturom i vodenim putovima te se oni ne bi gradili iznova nego samo nadogradili.

Prema literaturnom izvoru [41], maksimalni iznos ulazne naknade kreće se u rasponu od 708,05 kn/t do 874,65 kn/t. Za optimalno postrojenje odabrana je cijena ulazne naknade u iznosu od 847 kn/t, što je za 78,49 kn/t više od ulazne naknade gornjeg postrojenja.

Otkupna cijena ulja povišena je s 1,60 kn/l na 1,65 kn/l te je i dalje niža od otkupne cijene nafte (1,73 kn/l). Kako je maksimalni iznos prinosa ulja 1 040 l/t, za optimalno postrojenje odabran je prinos ulja od 865 l/t.

Tehnički parametri optimalnog postrojenja prikazani su u tablici 26.

Tablica 26. Tehnički parametri optimalnog postrojenja

		Kombinirano postrojenje	Jedinica	
		416,71	kg/h	
		10	t/dan	
		2 917	t/god	
		7 000	h/god	
Ulazi	Potrošnja električne energije	1 368	MWh	
	Drugi ulazi	Katalizatori i kemikalije	92,83	t/god
		NaOH	1,17	t/god
		Voda	5 581,68	m <sup>3</sup> /god
	Dopunska energija	Ulaz toplinske energije	370,46	MWh/god
		Toplina za start pogona	3 529,57	MWh/god
Izlazi	Energetski produkti	Pirolitičko ulje	865	l/t
		Plinovite frakcije	130,87	kg/t
		Koks/kruti ostatak	44,60	kg/t
	Ostaci	Ispušni plinovi	8 390,75	t/god
		Katalizatori i mulj	360,83	t/god
	Emisije	PM	14,59	t/god
		CO <sub>2</sub>	834,26	t/god
		CH <sub>4</sub>	66,36	t/god
		Ugljikovodici	11,67	t/god
		SO <sub>2</sub>	0,12	t/god
		NO <sub>x</sub>	62,38	t/god
		CO	6,61	t/god
		Hg	5 · 10 <sup>-11</sup>	t/god
		Pb	0,0003	t/god
VOC	2,33	t/god		

Tablica 27 prikazuje ekonomske parametre optimalnog postrojenja. Početna investicija iznosi 11,71 milijuna kuna a operativni troškovi 4,75 milijuna kuna godišnje. Većinu prihoda čine prihodi od prodaje pirolitičkog ulja u iznosu od 4,16 milijuna kuna godišnje. Prihodi od ulazne naknade iznose 2,47 milijuna kuna. Sadašnja vrijednost novca na kraju proračunskog vijeka iznosi 5 653 076 kuna što daje internu stopu povrata od 15,00%.

**Tablica 27. Ekonomski parametri optimalnog postrojenja**

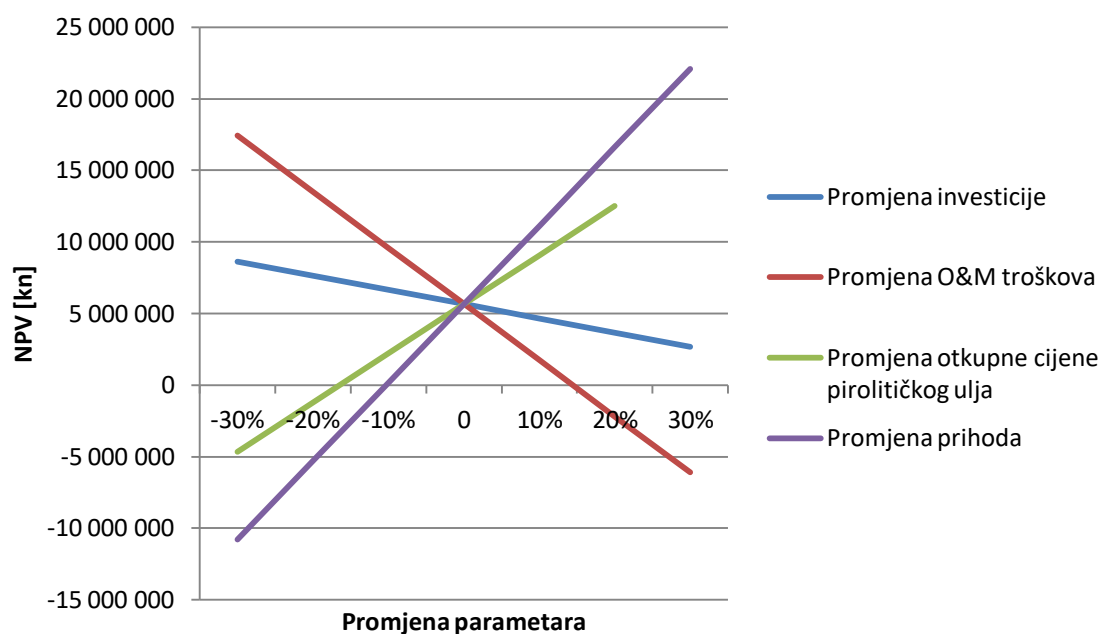
Kategorija	Optimalno postrojenje	Jedinica
Investicija	11 711 733	kn
O&M troškovi	4 748 026	kn/god
Ulazna naknada	847	kn/t
Porez na dobit	18	%
Prodajna cijena ulja	1,65	kn/l
Diskontna stopa	9,23	%
Vlastiti kapital	50	%
Iznos kredita	50	%
Kamatna stopa	4,30	%
Rok otplate kredita	10	god
Prihod od prodaje pirolitičkog ulja	4 163 288	kn/god
Prihod od ulazne naknade	2 470 699	kn/god
<b>Ekonomski tok novca</b>		
Bruto dobit	44 867 115	kn
Neto dobit	37 050 744	kn
NPV	5 653 076	kn
IRR	15,00	%
<b>Financijski tok novca</b>		
Bruto dobit	44 867 115	kn
Neto dobit	15 066 809	kn

### 7.1. Analiza osjetljivosti optimalnog postrojenja

Na dijagramima 48 i 49 prikazana je analiza osjetljivosti optimalnog postrojenja. Desno od dijagrama prikazana je legenda parametara koji su se mijenjali. Točka u kojoj se svi pravci sijeku za NPV iznosi 5 653 076 kn te 15,00% za IRR. Promjena iznosa investicije u granicama od -30% do 30% ne uzrokuje neisplativost postrojenja.

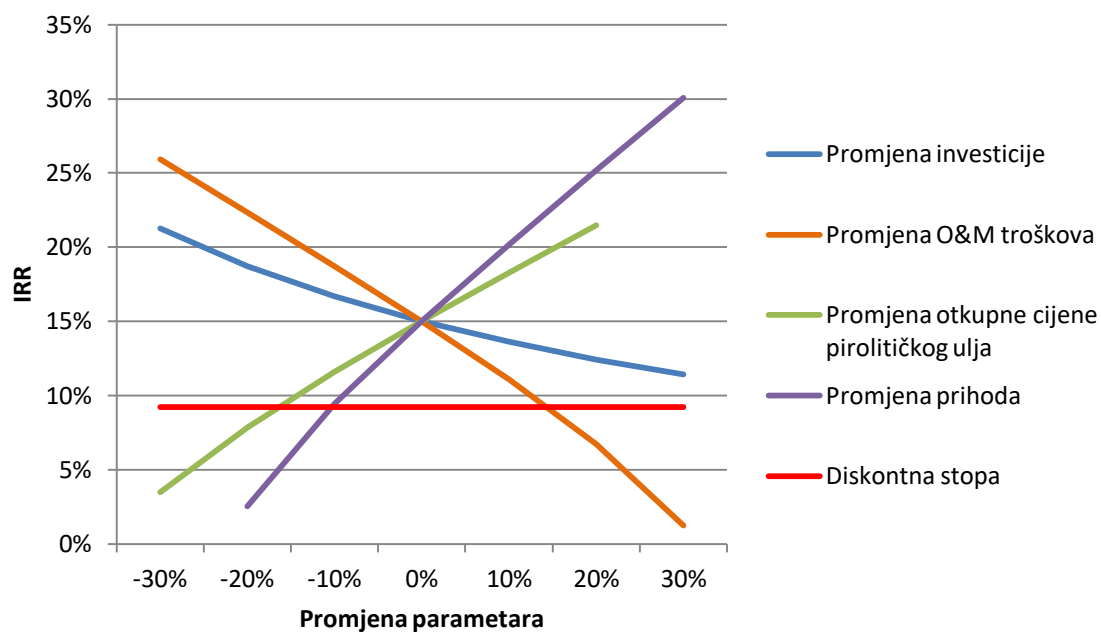
Granica isplativosti optimalnog postrojenja postiže se vrijednostima:

- O&M troškova iznosa 5 433 166 kn/god (povećanje za 14,43%),
- prinosa ulja od 723 l/t pri čemu su prihodi od prodaje ulja 14 517 791 kn/god (smanjenje za 16,45%),
- otkupne cijene ulja u iznosu od 1,378 kn/l (smanjenje za 16,45%),
- ili приходima od 5 949 360 kn/god (smanjenje za 10,32%).



Slika 48. Promjena NPV-a optimalnog postrojenja





Slika 49. Promjena IRR-a optimalnog postrojenja

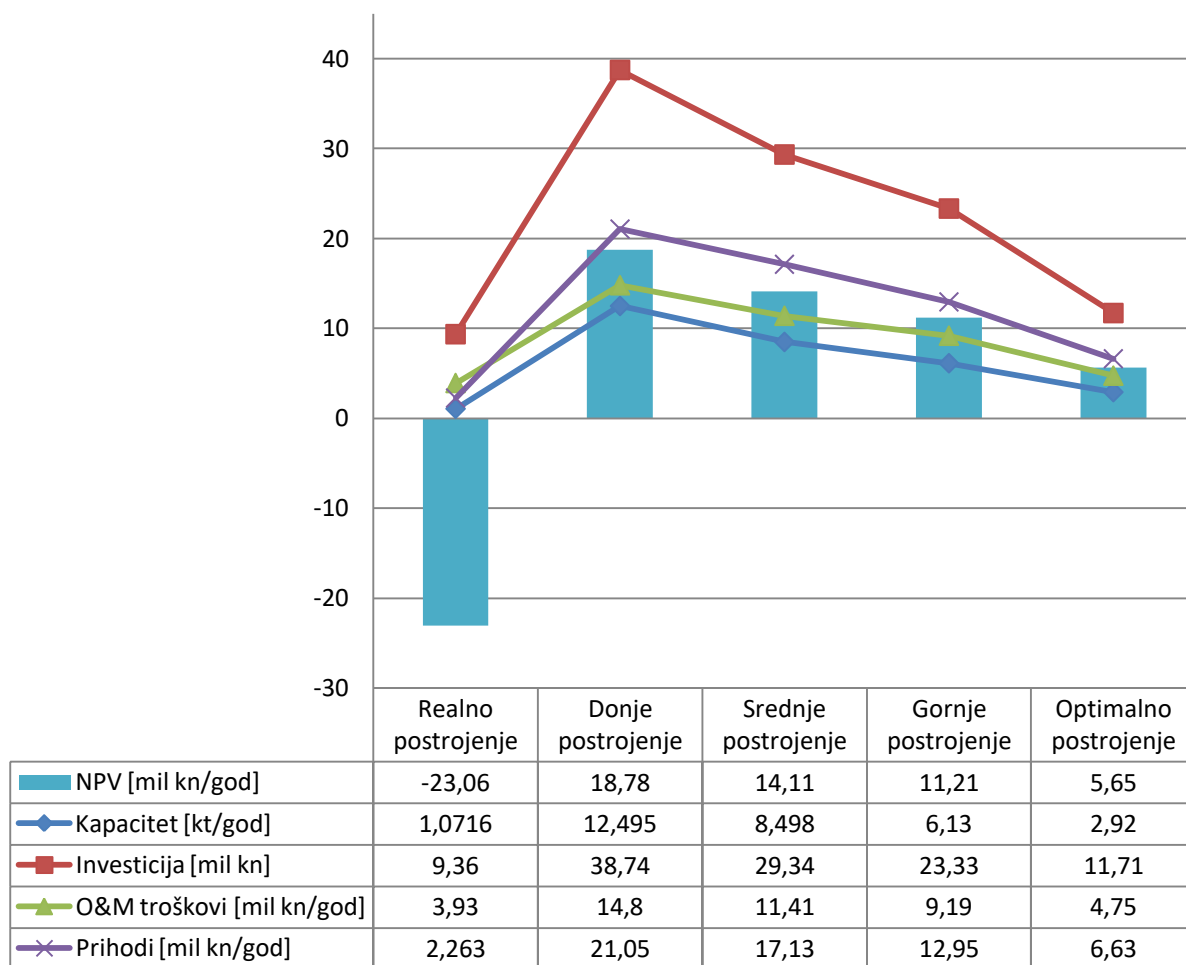
## 8. Usporedba postrojenja

Na slici 40 prikazane su usporedbe glavnih tehničkih i ekonomskih parametara dosad analiziranih postrojenja. Za potrebe analize, postrojenje kapaciteta od 1 071,6 t/god koje je analizirano u 5. poglavlju nazvat će se realno postrojenje. Da bi se brojevi mogli prikazati na istom dijagramu, kapaciteti su prikazani u tisućama tona (kt ili  $10^3$  t), a ekonomski parametri u milijunima kuna ( $10^6$  kn).

Glavni nedostatak realnog postrojenja je premali iznos kapaciteta. Takvo postrojenje nije moguće projektirati da bude ekonomski isplativo niti s iznad prosječnim vrijednostima prinosa ulja, prodajne cijene ulja i ispod prosječnih troškova. Kapacitet realnog postrojenja manji je i od većine demonstracijskih postrojenja u svijetu (poglavlje 3, tablica 8).

Ako bi realno postrojenje projektirali prema optimalnim parametrima, kapacitet je potrebno povisiti minimalno 2,5 puta. Sve vrijednosti optimalnog postrojenja nalaze se u realnim granicama te su teoretski ostvarive. Glavni nedostatak optimalnog postrojenja je veći utjecaj promjene prinosa ulja na IRR, a time i na isplativost projekta. Budući da je iznos ulazne naknade visok (847 kn/t), njezino povećanje ubrzo bi doseglo gornju granicu od 874 kn/t [41]. Tom gornjom granicom ulazne naknade ograničava se mogućnost postrojenja da nadomjesti nedostatak prihoda.

Ako bi realno postrojenje projektirali da bude isplativo prema prosječnim parametrima, tada bi se kapacitet trebao povisiti minimalno 5,7 puta. Točno povećanje kapaciteta ovisi o ulaznoj naknadi prema kojoj kapacitet može varirati od 5,7 do 8,4 puta. Nadalje, ako bi uz ulaznu naknadu varirali i prinos ulja, tada minimalni kapaciteti mogu varirati od 3,8 do 36 puta. Točan minimalni kapaciteti vrlo je teško odrediti zbog nepoznavanja troškova pogona i održavanja, ulazne naknade i prinosa ulja. Glavni nedostatak tako projektiranih postrojenja je početni iznos investicije, koji može biti previsok za investitora, kao i upitnost mogućnosti dobave adekvatnih količina sirovine.



**Slika 50. Usporedba parametara analiziranih postrojenja**

## 9. Zaključak

Odlaganje otpada neefikasan je i neodrživ način zbrinjavanja otpada. Da bi zbrinjavanje otpada okrenuli održivosti i znatno smanjili njegov negativni utjecaj na okoliš, potrebno je slijediti hijerarhiju gospodarenja otpadom. Prema toj hijerarhiji, redoslijedom poželjne opcije su: sprječavanje opada, ponovna uporaba, recikliranje, uporaba i naposljetku zbrinjavanje otpada.

Piroliza je endotermni proces koji koristi toplinu za termičku dekompoziciju ugljični baziranih materijala bez prisustva kisika. Proces pirolize predstavlja jedan od načina energetske uporabe otpada i u hijerarhiji gospodarenja otpadom zauzima pretposljednje mjesto. Glavni produkti pirolize su pirolitički plin, ulje i kruti ostatak/koks. Njihov omjer ovisi o parametrima pirolize, a važniji parametri su: temperatura, tlak, vrijeme reakcije, tip reaktora, katalizatori i vrsta plina za fluidizaciju. Osim navedenih parametara, izlazni produkti znatno ovise o sastavu ulazne sirovine.

Da bi se maksimizirao prinos pirolitičkog ulja procesom pirolize, proces se treba odvijati pri temperaturi od 500 °C. Poželjne vrste plastike za proces pirolize su: HDPE, LDPE, PP i PS. PET i PVC su nepoželjne vrste plastike za uporabu pirolizom zbog niskog prinosa ulja, visokog prinosa krutog ostatka te stvaranja klorovodičnih spojeva. Postoji nekoliko tipova katalizatora koji se koriste u pirolitičkim postrojenjima diljem svijeta, no najučestaliji je FCC zbog dostupnosti i relativno niske cijene. Omjer katalizator:plastika obično se kreće u rasponu od 1 – 2:10. Katalizatori su jako osjetljivi na taloženje koksa na njihovoj površini. Takva pojava može dovesti do deaktivacije katalizatora i smanjenja prinosa ulja. Ova pojava može se smanjiti, ali ne u potpunosti spriječiti, regeneracijom katalizatora i strogom kontrolom kvalitete i sastava ulazne sirovine. Prinos ulja kod većine postrojenja kreće se u rasponu od 550 do 850 l/t. Minimalne i maksimalne granice prinosa iznose 350 i 1 050 l/t. Prinos ulja može znatno varirati zbog: kvalitete sirovine, nečistoća, predobrade, katalizatora, razlike u parametrima, itd.

Realni poslovni subjekt tvrtka je koja se bavi gospodarenjem neopasnim otpadom. Godišnje realnom poslovnom subjektu nakon recikliranja preostane 401,8 tona obradive plastike koja bi se, umjesto odlaganja, pirolitički obrađivala. U tu svrhu projektirano je pirolitičko postrojenje prema tehničkim i ekonomskim parametrima iz literature. Projekcijom povećanja stope recikliranja miješanog komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj, kapacitet postrojenja povišen je na 1 071,6 t/god. Investicija takvog postrojenja iznosi 9 363 851 kn, dok troškovi

pogona i održavanja iznose 3 927 731 kn/god. Obradom 1 071,6 tona plastike godišnje bi se proizvelo 900 144 litara ulja. Prihodi od prodaje ulja iznose 1 440 233 kuna godišnje, dok ulazna naknada stvara prihode od maksimalno 823 535 kuna po godini. Postrojenje projektirano prema prosječnim tehničkim i ekonomskim parametrima kapaciteta 1 071,6 t/god, godišnje stvara gubitak od 1 663 963 kuna. Na kraju proračunskog vijeka trajanja bruto dobit iznosi -73 023 515 kuna, što uz diskontnu stopu od 9,30% daje sadašnju vrijednost novca od -27 091 867 kuna. IRR postrojenja manji je od 0, tako da navedeno postrojenje nije isplativo.

Uz ekonomsku analizu provedena je i analiza osjetljivosti parametara koji značajnije utječu na troškove investicije, pogona, održavanja i prihoda. Investicija i troškovi pogona i održavanja smanjeni su za 30% što nije dovelo do isplativosti postrojenja. Otkupna cijena ulja povećana je za 30%, dok je prinos ulja variran u granicama od 340 do 1 040 l/t. Navedene promjene također nisu dovele do isplativosti postrojenja. Da bi postrojenje od 1 071,6 t/god postalo isplativo pri smanjenju iznosa investicije i O&M troškova za 30% te povećanju otkupne cijene ulja za 30% uz maksimalni iznos prinosa ulja (1 040 l/t), ulazna naknada morala bi iznositi 1 022 kn/t, što je iznad granica definiranim prema literaturi [41]. Niti s vrlo povoljnim tehničkim i ekonomskim parametrima postrojenje takvog kapaciteta nije se moglo projektirati da bude isplativo.

Da bi postrojenje postalo isplativo, glavni parametar koji je potrebno promijeniti je godišnji kapacitet. Točan potreban kapacitet vrlo je teško odrediti zbog ovisnosti o velikom broju parametara. Međutim, s prosječnim parametrima kapacitet postrojenja moguće je odrediti prema ulaznoj naknadi i traženoj unutarnjoj stopi povrata. Npr. ako želimo da IRR postrojenja iznosi 15%, uz ulaznu naknadu od 341,09 kn/t, potrebni kapacitet iznosi 12 495 t/god. Za srednji iznos ulazne naknade od 554,8 kn/t, potrebni kapacitet treba biti 8 498 t/god, dok za gornji iznos ulazne naknade od 768,51 kn/t kapacitet treba biti 6 130 t/god. U usporedbi s realnim postrojenjem, ovi kapaciteti viši su za 5,7 – 11,67 puta. Navedeni kapaciteti godišnje zahtijevaju pogon i održavanje u iznosu od 9,1 do 14,8 milijuna kuna, što je 2,3 – 3,8 puta više od realnog postrojenja. Uočljivo je da trend promjene kapaciteta i O&M troškova ne slijede isti zakon promjene. Isti zaključak vrijedi i za investiciju. Važno je napomenuti da iako su postrojenja viših kapaciteta fleksibilnija, njihov glavni nedostatak je relativno visok iznos investicije.

Osim s prosječnim parametrima, postrojenje se može projektirati prema optimalnim parametrima. Optimalni parametri određeni su tako da su varirani unutar definiranih granica s ciljem smanjenja troškova i povećanja prihoda. Za izgradnju optimalnog postrojenja kapaciteta 2 917 t/god potrebna je investicija u iznosu od 11 711 733 kuna. U usporedbi s realnim postrojenjem, godišnji kapacitet viši je za 2,72 puta, no investicija je viša samo za 25%. S relativno malim povećanjem investicije moguće je projektirati postrojenje značajno većeg kapaciteta.

Iako u ovom radu nije razmatran takav slučaj, do teoretske isplativosti postrojenja može se doći i promjenom cijene ulja. Literaturni izvori [6] i [34] navode da se dobiveno ulje procesom pirolize može koristiti kao zamjena za neko konkretno gorivo. Tako npr. literaturni izvor [34] govori da se dobiveni produkt koristi za proizvodnju topline u kućanstvima. Prema literaturnim izvorima [6] i [34], prodajna cijena ulja iznosi oko 5,50 kn/l. Primjenjujući istu otkupnu cijenu ulja na realno postrojenje, IRR postaje 18,79% dok se NPV povećao od -27 091 867 na 7 855 312 kuna.

Iako realno postrojenje kapaciteta 1 071,6 t/god u sadašnjosti nije isplativo, u budućnosti bi ono moglo postati isplativo uslijed povećanja cijene emitiranog CO<sub>2</sub>. Kako Europska Unija želi Green New Dealom postati CO<sub>2</sub> neutralna do 2050. godine, zasigurno je da će se cijena emisija CO<sub>2</sub> povećavati. Uz povećanje cijena emisija CO<sub>2</sub> i napuštanje fosilnih goriva, razvojem tehnologija gospodarenja otpadom, pirolitička postrojenja postala bi dostupnija i jeftinija, kao što je bilo u slučaju drugih tehnologija poput računala, solarnih panela, vjetroturbina itd. Navedene promjene mogle bi omogućiti da postrojenja značajno manjih kapaciteta posluju profitabilno.

## Literatura

1. Petković K. Komparativna analiza životnog ciklusa tehnologija za energetske uporabe plastičnog otpada [Internet]. Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2019. Dostupno na: <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A5046/datastream/PDF/view>
2. Europska Unija. Hijerarhija gospodarenja otpadom [Internet]. Dostupno na: <http://www.reciklaznodvoriste.solin.hr/index.php/gospodarenje-otpadom/hijerarhija-gospodarenja-otpadom>
3. Eurostat. 480 Kg of Municipal Waste Generated Per Person [Internet]. eurostat. 2018. Dostupno na: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20180123-1>
4. ECOINA d.o.o. za zaštitu okoliša. Jedinstvena metodologija za određivanje sastava i količina komunalnog otpada [Internet]. 2015. Dostupno na: [http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/specificni-dokumenti/publikacije/knjige/Metodologija\\_za\\_odredivanje\\_sastava\\_i\\_kolicina\\_komunalnog\\_otpada.pdf](http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/specificni-dokumenti/publikacije/knjige/Metodologija_za_odredivanje_sastava_i_kolicina_komunalnog_otpada.pdf)
5. Mikroplastika: Izvori, posljedice, rješenja [Internet]. 2018. Dostupno na: <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20181116STO19217/mikroplastika-izvori-posljedice-rjesenja>
6. Fivga A, Dimitriou I. Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment [Internet]. Vol. 149, Energy. 2018. Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218303220>
7. Czajczyńska D, Anguilano L, Ghazal H, Krzyżyńska R, Reynolds AJ, Spencer N, et al. Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. Therm Sci Eng Prog. 2017;3:171–97.
8. Materijali i predmeti koji dolaze u neposredan dodir s hranom [Internet]. 2018. Dostupno na: <https://www.hzjz.hr/sluzba-zdravstvena-ekologija/materijali-i-predmeti-koji-dolaze-u-neposredan-dodir-s-hranom/>
9. RTI International. Environmental and Economic Analysis of Emerging Plastics Conversion Technologies [Internet]. 2012. p. 1–58. Dostupno na: <https://plastics.americanchemistry.com/Sustainability-Recycling/Energy-Recovery/Environmental-and-Economic-Analysis-of-Emerging-Plastics-Conversion-Technologies.pdf>
10. Al-Salem SM, Antelava A, Constantinou A, Manos G, Dutta A. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW) [Internet]. Vol. 197, Journal of

- Environmental Management. 2017. p. 177–98. Dostupno na:  
[https://openresearch.lsbu.ac.uk/download/5a251c690ab5130f7f93f2b41d0b111522712339a4c40c63af34d94c6aa27219/745647/A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste.pdf](https://openresearch.lsbu.ac.uk/download/5a251c690ab5130f7f93f2b41d0b111522712339a4c40c63af34d94c6aa27219/745647/A%20review%20on%20thermal%20and%20catalytic%20pyrolysis%20of%20plastic%20solid%20waste.pdf)
11. Shafferina Dayana Anuar Sharuddin FA, Daud WMAW, Aroua MK. A review on pyrolysis of plastic wastes - ScienceDirect. Dostupno na:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416300619>
  12. Shafferina Dayana Anuar Sharuddin, Faisal Abnisa, Wan Mohd Ashri Wan Daud, Mohamed Kheireddine Aroua. A review on pyrolysis of plastic wastes - ScienceDirect. Dostupno na: [https://bib.irb.hr/datoteka/470659.DIPLOMSKI\\_RAD\\_\\_ANA\\_PAIC.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/470659.DIPLOMSKI_RAD__ANA_PAIC.pdf)
  13. Paić A. Određivanje toplinskih karakteristika mješavina poli(3-hidroksibutirat)/poli(etilen-oksida) [Internet]. Kemijsko-tehnološki fakultet; 2010. Dostupno na: [https://bib.irb.hr/datoteka/470659.DIPLOMSKI\\_RAD\\_\\_ANA\\_PAIC.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/470659.DIPLOMSKI_RAD__ANA_PAIC.pdf)
  14. Paben J. Plastics Recycling Update [Internet]. 2017. Dostupno na: <https://resource-recycling.com/plastics/2017/05/24/study-quantifies-benefits-pyrolysis-technologies/>
  15. Schneider DR. Vrste energetske uporabe otpada. 2020.
  16. Lue S. Principles and advantages of pyrolysis [Internet]. 2019. Dostupno na: <https://www.tomoregreen.com/principles-and-advantages-of-pyrolysis/>
  17. Zhaozhi Zhou, Yuanjun Tang, Yong Chi. Waste-to-energy: A review of life cycle [Internet]. 2017. Dostupno na: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0734242X17730137>
  18. An Industry Blowing smoke [Internet]. Plasma Incineration. 2009. Dostupno na: <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/BlowingSmokeReport.pdf>
  19. Donahue M. Report: Waste Incineration: A Dirty Secret in How States Define Renewable Energy - Institute for Local Self-Reliance [Internet]. 2018. Dostupno na: <https://ilsr.org/waste-incineration-renewable-energy/>
  20. Lopez G, Artetxe M, Amutio M, Bilbao J, Olazar M. Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals. A review [Internet]. Vol. 73, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. p. 346–68. Dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/313128917\\_Thermochemical\\_routes\\_for\\_the\\_valorization\\_of\\_waste\\_polyolefinic\\_plastics\\_to\\_produce\\_fuels\\_and\\_chemicals\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/313128917_Thermochemical_routes_for_the_valorization_of_waste_polyolefinic_plastics_to_produce_fuels_and_chemicals_A_review)
  21. Williams PT, Slaney E. Analysis of products from the pyrolysis and liquefaction of



- single plastics and waste plastic mixtures [Internet]. Vol. 51, Resources, Conservation and Recycling. 2007. p. 754–69. Dostupno na:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092134490700002X>
22. Li Q, Faramarzi A, Zhang S, Wang Y, Hu X, Gholizadeh M. Progress in catalytic pyrolysis of municipal solid waste [Internet]. Vol. 226, Energy Conversion and Management. 2020. p. 113525. Dostupno na:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890420310566>
23. Tsiamis DA, Themelis NJ. Transforming the non-recycled plastics of New York city to synthetic oil [Internet]. 2013 21st Annual North American Waste-to-Energy Conference, NAWTEC 2013. 2013. Dostupno na:  
[https://www.researchgate.net/publication/267602829\\_Transforming\\_the\\_Non-Recycled\\_Plastics\\_of\\_New\\_York\\_City\\_to\\_Synthetic\\_Oil](https://www.researchgate.net/publication/267602829_Transforming_the_Non-Recycled_Plastics_of_New_York_City_to_Synthetic_Oil)
24. Ocean Recovery Alliance. 2015 Plastics-To-Fuel Project Developer's Guide. Ocean Recover Alliance [Internet]. 2015;(June):74. Dostupno na:  
[https://www.oceanrecov.org/assets/files/Valuing\\_Plastic/2015-PTF-Project-Developers-Guide.pdf](https://www.oceanrecov.org/assets/files/Valuing_Plastic/2015-PTF-Project-Developers-Guide.pdf)
25. Trevor Bridle. Waste to energy: Alternative uses for paunch [Internet]. Dostupno na:  
<https://www.ampc.com.au/uploads/cgblog/id83/A.ENV.0101-Final-Report-Pyrolysis-of-Abattior-Waste.pdf>
26. Brian Hayes. Waste Tyre Pyrolysis Plant - draft [Internet]. 2019. Dostupno na:  
<https://kingtigergroup.com/waste-tyre-pyrolysis-plant/>
27. Sikanen L. First Commercial Pyrolysis Oil Plant in Finland – [Internet]. Dostupno na:  
[https://www.cif-ifc.org/wp-content/uploads/2016/10/First-Commercial-Pyrolysis-Oil-Plant\\_-\\_DEMO-2016\\_-\\_Sikanen.pdf](https://www.cif-ifc.org/wp-content/uploads/2016/10/First-Commercial-Pyrolysis-Oil-Plant_-_DEMO-2016_-_Sikanen.pdf)
28. Plastics to oil products [Internet]. Zero Waste Scotland. Dostupno na:  
[https://www.zerowastescotland.org.uk/sites/default/files/Plastics to Oil Report.pdf](https://www.zerowastescotland.org.uk/sites/default/files/Plastics%20to%20Oil%20Report.pdf)
29. Jahirul MI, Rasul MG, Chowdhury AA, Ashwath N. Biofuels production through biomass pyrolysis- A technological review [Internet]. Vol. 5, Energies. 2012. p. 4952–5001. Dostupno na: <https://www.mdpi.com/1996-1073/5/12/4952>
30. Web stranica realnog poslovnog subjekta. 2020.
31. Sastav otpada nakon primarnog odvajanja - Excel tablica realnog poslovnog subjekta. 2020.
32. Pero Perić. Primjena pol(etilen-tereftalata) za pakiranje napitaka osjetljivih na kisik [Internet]. 2008. Dostupno na:

- [http://repositorij.fsb.hr/406/1/13\\_11\\_2008\\_diplomski\\_2007.pdf](http://repositorij.fsb.hr/406/1/13_11_2008_diplomski_2007.pdf)
33. Larrain M, Van Passel S, Thomassen G, Kresovic U, Alderweireldt N, Moerman E, et al. Economic performance of pyrolysis of mixed plastic waste: Open-loop versus closed-loop recycling [Internet]. Vol. 270, Journal of Cleaner Production. 2020. Dostupno na: [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620324896?dgcid=rss\\_sd\\_all](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620324896?dgcid=rss_sd_all)
  34. Isamar Garrido Rodriguez, Valdiviezo LM, Harden T, Huang X. Transforming Non-Recyclable Plastics to Fuel Oil Using Thermal Pyrolysis [Internet]. 2018. Dostupno na: [http://ccnyeec.org/wp-content/uploads/2013/12/GroupH\\_FINALREPORT.pdf](http://ccnyeec.org/wp-content/uploads/2013/12/GroupH_FINALREPORT.pdf)
  35. Yang Y, Wang J, Chong K, Bridgwater A V. A techno-economic analysis of energy recovery from organic fraction of municipal solid waste (MSW) by an integrated intermediate pyrolysis and combined heat and power (CHP) plant [Internet]. Vol. 174, Energy Conversion and Management. 2018. p. 406–16. Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890418308823>
  36. Paket mjera o kružnom gospodarstvu: Novi ciljevi za recikliranje [Internet]. Europski parlament. 2018. Dostupno na: <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20170120STO59356/paket-mjera-o-kruznom-gospodarstvu-novi-ciljevi-za-recikliranje>
  37. U Hrvatskoj je otpad i dalje smeće, Europska komisija nas opominje [Internet]. Dostupno na: <https://www.eu-projekti.info/u-hrvatskoj-je-otpad-i-dalje-smece-europska-komisija-nas-opominje/>
  38. Gospodarenje otpadom u RH; Tematski INFO dan - Program LIFE [Internet]. 2018. Dostupno na: [https://lifeprogramhrvatska.hr/wp-content/uploads/2018/04/Prezentacija-\\_Aleksandar-Rajilić\\_Gospodarenje-otpadom-u-RH.pdf](https://lifeprogramhrvatska.hr/wp-content/uploads/2018/04/Prezentacija-_Aleksandar-Rajilić_Gospodarenje-otpadom-u-RH.pdf)
  39. Najveći porast odvojenoga sakupljanja komunalnog otpada do sada - u 2019. godini za 6 % [Internet]. Središnji državni portal. 2019. Dostupno na: <https://mzoe.gov.hr/vijesti/najveci-porast-odvojenoga-sakupljanja-komunalnog-otpada-do-sada-u-2019-godini-za-6/5987>
  40. Tomić T, Schneider DR. Circular economy in waste management – Socio-economic effect of changes in waste management system structure [Internet]. Vol. 267, Journal of Environmental Management. 2020. Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720304977>
  41. EfW, landfill, RDF [Internet]. letsrecycle.com. 2020. Dostupno na: <https://www.letsrecycle.com/prices/efw-landfill-rdf-2/efw-landfill-rdf-2020-gate-fees/>

42. WACC expert [Internet]. 2020. Dostupno na:  
<http://www.waccexpert.com/?fbclid=IwAR1XTWoXch7No8OgDPVaBIItnbzCzI6nnsI9YGDhZg7oTlpNT0NkbG81xCQ>
43. Amortizacija imovine, amortizacijske stope i rashodovanje [Internet]. VALDEZ. 2020. Dostupno na: <https://www.virtualni-ured.net/racunovodstvo/item/321-stope-amortizacije-otpisa-dugotrajne-imovine.html>
44. Porez na dobit [Internet]. Porezna uprava. 2020. Dostupno na: [https://www.porezna-uprava.hr/HR\\_porezni\\_sustav/Stranice/porez\\_na\\_dobit.aspx](https://www.porezna-uprava.hr/HR_porezni_sustav/Stranice/porez_na_dobit.aspx)
45. FININFO. 2020.