

# Analiza izvedivosti postrojenja za termokemijsku konverziju industrijskog plastičnog otpada

---

**Bernat, Domagoj**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*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:235:118929>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-09**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Domagoj Bernat**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Domagoj Bernat

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Danielu R. Schneideru i poslijedoktorandu dr. sc. Tihomiru Tomiću na pruženoj pomoći, izdvojenom vremenu i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada. Također bi se zahvalio *Pos – Plast-u d.o.o.* na korisnim informacijama i materijalima koji su mi pomogli pri izradi ovog rada.

Veliko hvala mojim roditeljima na pruženoj potpori i razumijevanju od prvog dana mojeg školovanja te mojim sestrama koje su uvijek bile tu za mene.

Domagoj Bernat



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 / 21 - 6 / 1	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Domagoj Bernat** Mat. br.: 0035204873

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza izvedivosti postrojenja za termokemijsku konverziju industrijskog plastičnog otpada**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Feasibility analysis of thermochemical conversion plant for industrial plastic waste**

Opis zadatka:

Posljednjih desetljeća EU je razvila snažno gospodarstvo čime je omogućila svojim građanima izuzetno visok životni standard. Ovakav nagli razvoj gospodarstva doveo je do sve veće industrijske proizvodnje koja uzrokuje kontinuirano povećanje potrošnje sirovina te dovodi do situacije da potražnja za sirovinama premašuje njihovu domaću proizvodnju. Stoga je EU danas ovisna o uvozu materijalnih sirovina i energenata. S druge strane, ovakva industrijska proizvodnja dovodi do sve većeg generiranja otpada koji se većinom odbacuje bez uporabe čime se velika količina potencijalnih sirovina nepovratno gubi. Jedan od tokova otpada koji nastaje u industrijskim procesima je plastični otpad koji je lako materijalno oporabiti, međutim ukoliko dođe do miješanja različitih vrsta polimernih materijala, njegova materijalna uporaba postaje vrlo zahtjevna. Jedan od načina uporabe ovakvih tokova je njihova termokemijska konverzija u goriva gdje je danas najzanimljivija konverzija u tekuća goriva. U ovome diplomskom radu potrebno je ocijeniti tehnno-ekonomsku izvodljivost i opravdanost izgradnje postrojenja za termokemijsku konverziju industrijskog plastičnog otpada na realnom primjeru – primjeru ostatnog otpadnog toka iz jednog poduzeća za sekundarnu separaciju i uporabu industrijskog plastičnog otpada, a koji se sastoji od mješavine polimernih materijala koje nije moguće jednostavno separirati za daljnju materijalnu uporabu.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- skupiti podatke o tehnologijama termokemijske obrade, kao i o postojećim postrojenjima za obradu plastičnog otpada, te njihovim ograničenjima po pitanju materijala koji se može obraditi
- napraviti pregled podataka o tehnno-ekonomskim parametrima postrojenja
- iz dobivenog sastava ostatnog dijela plastičnog otpada ocijeniti koji dio je prikladan za ovakav način obrade i obrazložiti zašto
- modelirati tehnološke i ekonomske parametre adekvatnog postrojenja za studiju slučaja
- na temelju rezultata tehnno-ekonomske analize i provedene analize osjetljivosti, ocijeniti izvedivost ovakve investicije te odrediti najmanju potrebnu količinu otpada za isplativost investiranja u ovakvo postrojenje.

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

Zadatak zadan:  
12. studenoga 2020.

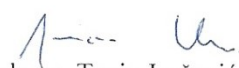
Datum predaje rada:  
14. siječnja 2021.

Predvideni datum obrane:  
18. – 22. siječnja 2021.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## Sadržaj

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. Općenito o plastičnom otpadu .....	6
2.1. Podjela polimernih materijala .....	7
2.2. Vrste i upotreba plastike .....	7
2.3. Oporaba plastičnog otpada.....	9
2.3.1. Materijalna oporaba .....	10
2.3.2. Kemijska oporaba .....	10
2.3.3. Energetska oporaba.....	12
3. Piroliza.....	13
3.1. Temperatura .....	13
3.2. Tlak .....	14
3.3. Vrijeme boravka.....	14
3.4. Fluidizirajući plin.....	14
3.5. Tipovi reaktora.....	15
3.5.1. Šaržni i polušaržni reaktor .....	15
3.5.2. Reaktor za pirolizu u fiksnom sloju .....	16
3.5.3. Reaktor za pirolizu u fluidiziranom sloju .....	17
3.5.4. Konusni reaktor.....	17
3.6. Katalizatori.....	18
3.6.1. Usporedba termalne i katalitičke pirolize .....	19
4. Postojeća postrojenja za pirolizu plastičnog otpada .....	20
4.1. Ograničenja postrojenja s obzirom na plastični otpad .....	22
4.1.1. Zahtjevi za predobradu ulazne otpadne plastike .....	24
4.2. Tehno-ekonomska analiza parametara postojećih postrojenja za pirolizu.....	25
4.2.1. Tehnološke osnove postojećih postrojenja .....	25
4.2.2. Ulazni i izlazni tokovi postojećih postrojenja za pirolizu.....	27

4.2.3.	Ekonomska analiza postojećih postrojenja za pirolizu .....	31
5.	Pos-Plast d.o.o. ....	34
5.1.	Sastav industrijskog plastičnog otpada .....	35
5.1.1.	Industrijski otpad pogodan za pirolizu.....	38
5.1.2.	Dijelovi ostatnog plastičnog otpada koji nije pogodan za pirolizu.....	41
6.	Tehno – ekonomska analiza adekvatnog postrojenja za pirolizu .....	45
6.1.	Opis procesa.....	46
6.1.1.	Sastav ulazne sirovine procesa.....	47
6.1.2.	Tehnički podaci o postrojenju.....	48
6.1.3.	Tehnički podaci o procesu .....	49
6.1.4.	Energetski proizvodi procesa .....	49
6.1.5.	Emisije .....	54
6.2.	Podaci o troškovima.....	54
6.2.1.	Investicijski troškovi postrojenja .....	54
6.2.2.	Operativni troškovi postrojenja.....	56
6.2.3.	Prihodi.....	57
6.2.4.	Uvjeti financiranja .....	57
6.3.	Pokazatelji isplativosti ulaganja.....	58
6.3.1.	Isplativosti investicije s dodatnim izvorom prihoda .....	60
6.3.2.	Minimalni iznos pristojbi za zbrinjavanja otpada .....	62
6.4.	Analiza osjetljivosti.....	66
6.5.	Dodatna analiza planiranog kapaciteta postrojenja.....	70
7.	ZAKLJUČAK.....	73
	LITERATURA.....	75
	PRILOZI.....	80
	Prilog 1. Podaci stvarnih pilot i komercijalnih postrojenja korištenih za tehno - ekonomsku analizu .....	81
	Prilog 2. Ograničenja sastava ulazne sirovine postrojenja za pirolizu .....	87
	Prilog 3. Kretanje cijene sirove nafte u razdoblju od 2010. do 2020. godine na svjetskom tržištu.....	89

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Prikaz "hijerarhije gospodarenjem otpada" [3] .....	2
Slika 2. Globalno postupanje s otpadom u 2016. godini [1] .....	3
Slika 3. Globalni sastav otpada u 2016. godini [1] .....	3
Slika 4. Odvojeno sakupljeni komunalni otpad u 2018. god. u RH [4] .....	4
Slika 5. Proizvodnja plastike u svijetu od 1950. do 2018. godine [9].....	6
Slika 6. Prikaz udjela vrste plastike u ukupnoj proizvodnji plastike u EU za 2018. god. [1]....	9
Slika 7. Šaržni reaktor s miješalicom [16] .....	16
Slika 8. Reaktor za pirolizu u fiksnom sloju [16] .....	16
Slika 9. Reaktor za pirolizu u fluidizirajućem sloju [16] .....	17
Slika 10. Konusni reaktor za pirolizu [16] .....	18
Slika 11. Prikaz standardnog procesa za dobivanje goriva iz plastične sirovine [20] .....	20
Slika 12. Faze komercijalnog razvoja [20].....	21
Slika 13. Grafički prikaz ulaznih sirovina u postojećim postrojenjima .....	24
Slika 14. Dnevni kapaciteti postojećih postrojenja za pirolizu .....	25
Slika 15. Produkti dobiveni nakon mehaničke obrade u Pos-Plastu-u [26] .....	34
Slika 16. Prikaz uzoraka korištenih u FTIR analizi Pos-Plast otpada .....	35
Slika 17. Shema kontinuiranog postrojenja za pirolizu tvrtke Beston [37] .....	47
Slika 18. Ovisnost investicijskih troškova postrojenja za pirolizu o dnevnom kapacitetu .....	55
Slika 19. Tok novca sadašnje vrijednosti postrojenja - slučaj I .....	59
Slika 20. Tok novca sadašnje vrijednosti postrojenja - slučaj II .....	60
Slika 21. Tok novca sadašnje vrijednosti postrojenja - slučaj I i II - dodatni prihod.....	62
Slika 22. Utjecaj promjene cijene pristojbe za zbrinjavanje plastičnog otpada na isplativost postrojenja - slučaj I .....	63
Slika 23. Utjecaj promjene cijene pristojbe za zbrinjavanje plastičnog otpada na isplativost postrojenja - slučaj II .....	63
Slika 24. Prikaz isplativosti postrojenja ovisno o promjeni kapaciteta i iznosa pristojbe - slučaj I.....	65
Slika 25. Prikaz isplativosti postrojenja ovisno o promjeni kapaciteta i iznosa pristojbe - slučaj II .....	65
Slika 26. Utjecaj promjene cijene investicije na isplativost postrojenja .....	67
Slika 27. Utjecaj promjene cijene sirove nafte na isplativost postrojenja.....	68
Slika 28. Utjecaj promjene različitih parametra na isplativost postrojenja.....	69



---

Slika 29. Utjecaj promjene prinosa sintetskog ulja na isplativost postrojenja .....	69
Slika 30. Usporedba postrojenja različitih kapaciteta .....	71
Slika 31. Prikaz ovisnosti NPV o dnevnom kapacitetu postrojenja .....	72

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Ulazne sirovine i ograničenja za postojeća postrojenja za pirolizu .....	23
Tablica 2. Tehnička karakteristike postojećih postrojenja za pirolizu .....	26
Tablica 3. Analiza ulaznih i izlaznih postojećih postrojenja za pirolizu.....	29
Tablica 4. Analiza proizvoda termalne pirolize .....	30
Tablica 5. Analiza proizvoda katalitičke pirolize.....	31
Tablica 6. Prikaz parametara koji utječu na ekonomski sustav postrojenja za pirolizu [20] ...	31
Tablica 7. Ekonomska analiza postojećih postrojenja za pirolizu .....	32
Tablica 8. Sastav otpada dobiven pomoću FTIR analize .....	36
Tablica 9. Svojstva pirolitičkog sintetskog ulja, benzina i dizela [30] .....	39
Tablica 10. Prinos produkata pirolizom polikarbonata [31] .....	40
Tablica 11. Prinos i sastav produkta određenih vrsta plastika procesom pirolize.....	43
Tablica 12. Konačni sastav industrijskog plastičnog otpada za pirolizu.....	44
Tablica 13. Sastav ulazne sirovine za pojedini slučaj .....	47
Tablica 14. Ogrjevna vrijednost pojedinih vrsta plastika.....	48
Tablica 15. Tehnički podaci procesa.....	49
Tablica 16. Prikaz referentnih vrijednosti prinosa produkata za slučaj I i II .....	50
Tablica 17. Prinos produkata za slučaj I na temelju stvarnih postrojenja .....	51
Tablica 18. Prinos produkata za slučaj II na temelju stvarnih postrojenja.....	51
Tablica 19. Energetski proizvodi pirolize .....	51
Tablica 20. Svojstva sintetskog ulja.....	52
Tablica 21. Ogrjevna vrijednost ulaznih sirovina .....	53
Tablica 22. Prosječne vrijednosti emisija ispuštenih u zrak.....	54
Tablica 23. Investicijski troškovi postrojenja za pirolizu .....	56
Tablica 24. Operativni troškovi postrojenja za pirolizu.....	57
Tablica 25. Amortizacija [50] .....	58

---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$C$	€	trošak opreme/usluge
$E_{po}$	MJ	kemijska energija pohranjena u plastičnom otpadu
$E_{su}$	MJ	kemijska energija pohranjena u sintetskom ulju iz procesa pirolize
$H_{d,po}$	MJ/kg	donja ogrjevna vrijednost plastičnog otpada
$H_{d,sn}$	MJ/kg	donja ogrjevna vrijednost sirove nafte
$m_{po}$	kg/god	godišnja količina plastičnog otpada
$V$	t/d	kapacitet postrojenja
$V_{su}$	l/god	godišnji prinos sintetskog ulja
$\eta_{uk,pir}$	%	iskoristivost postrojenja za pirolizu
$\tau$	-	godišnja raspoloživost postrojenja
$\rho_{sn}$	kg/l	gustoća sirove nafte
$X_{pir}$	%	stupanj konverzije otpada u gorivo

---

**SAŽETAK**

Tema ovog rada je termokemijska oporaba, tj. proces pirolize plastičnog otpada čiji produkt je sintetsko ulje, koje se koristi za dobivanje energije ili za proizvodnju kemikalija. U radu je dan pregled tehnoloških i ekonomskih parametara postojećih postrojenja za pirolizu plastičnog otpada. Sastav prihvatljive otpadne plastike najčešće čine PP, HDPE i LDPE dok je PS i ostala plastika nešto manje prisutna. Brojna ograničenja su postavljena za PVC i PET zbog posljedica koje imaju na proces pirolize i na konačne produkte te ih je potrebno izdvojiti iz ulazne sirove za proces. Cilj ovog rada je analiza izvedivosti potencijalnog pirolitičkog postrojenja za termokemijsku konverziju industrijskog plastičnog otpada koje bi se izgradilo u sklopu predmetne tvrtke. Predmetna tvrtka bavi se reciklažom industrijske plastike iz koje proizvode visoko kvalitetne granulate koje prodaju na tržištu. Prihvatljivi dio ostatnog industrijskog plastičnog otpada koje nije moguće mehanički reciklirati obrađivao bi se procesom pirolize. Trenutno na godišnjoj razini ima oko 365 tona plastične sirovine koja bi se mogla pirolitički obraditi te je zbog mogućnosti povećanja količina prihvatljivog plastičnog otpada kapacitet postrojenja povećan na 1825 tona. U okviru ovog rada napravljen je pregled literature te su prikupljeni parametri o ulaznim i izlaznim tokovima te troškovima postojećih postrojenja za pirolizu plastičnog otpada. Svi prikupljeni parametri su osrednjeni te zajedno s nazivnim kapacitetom korišteni su u provedenoj tehnokonomskoj analizi i analizi osjetljivosti koja je provedena za dva slučaja ulazne sirovine. Provedenim proračunom utvrđena je neisplativost projekata u oba slučaja. Provedenom dodatnom analizom pokazalo se da uvođenjem pristojbe za zbrinjavanje otpada, porastom cijene sirove nafte ili smanjenjem cijene investicije ova tehnologija može postati ekonomski isplativa. U ostatku rada provedena je i analiza kapaciteta postrojenja kako bi se uvidio njezin utjecaj na ekonomsku isplativost projekta.

Ključne riječi: plastični otpad, piroliza, postrojenje za pirolizu, tehnokonomska analiza

---

**SUMMARY**

The diploma thesis theme is thermochemical recovery, i.e., the process of pyrolysis of plastic waste which product is a synthetic oil used to obtain energy or produce a chemical. The thesis gives an overview of technological and economic parameters of existing plants for pyrolysis of plastic waste. The acceptable waste plastics for pyrolysis usually consists of PP, HDPE and LDPE, while PS and other plastics are somewhat less present. Many restrictions have been set for PVC and PET due to the final products' quality after the pyrolysis process. Thus, input raw materials require separation before the pyrolysis process. The aim of this thesis is to analyse the potential of pyrolysis plant for thermochemical conversion of industrial plastic waste that was built within the company request. The company is engaged in recycling industrial plastics from which high-quality granules are produced and sold on the market. An acceptable portion of residual industrial plastic waste that cannot be mechanically recycled would be treated by a pyrolysis process. There are currently about 365 tons of plastic raw materials per year that could be pyrolytically processed, due to the possibility of increasing the amount of acceptable plastic waste, plant capacity can be increased to 1825 tons per year. Within this paper, a review of the available literature was made, which considers collecting the parameters of input and output flows and existing plants' costs for plastic waste pyrolysis. All collected parameters were averaged together with the nominal capacities and used in the techno-economic and sensitivity analysis for two cases of input raw materials. The conducted budget determined the unprofitability of the projects in both cases. An additional analysis showed that by introducing a waste disposal fee, increasing the price of crude oil or reducing the investment cost, this technology could become economically viable. In the rest of the work, an analysis of the plant's capacity was conducted to see its impact on the project's economic viability.

Key words: plastics waste, pyrolysis, pyrolysis plant, techno - economic analysis

## 1. UVOD

Ubrzanim načinom života ljudska populacija sve manje pažnje posvećuje okolišu i postupcima kojima svakodnevno utječemo na njega. Zbog toga se raznim propisima i smjernicama želi probuditi svijest ljudi na koji način svakim danom utječemo na održivost okoliša kakav danas poznajemo. Iz dana u dan u svijetu se proizvodi sve više otpada, zbog toga gospodarenje otpadom postaje jedno od glavnih predmeta na koju se stavlja velika važnost. U svijetu se godišnje stvara oko 2 milijarde tona čvrstog komunalnog otpada s time da se očekuje da će do 2050. godine količina globalnog komunalnog otpada porasti na 3,40 milijardi tona godišnje [1]. Prikupljanje otpada presudna je stavka za održavanje zacrtanih ciljeva vezanih uz gospodarenje otpadom, no veliku ulogu u tomu ima razvijenost pojedine države. Zemlje sa srednjim i visokim dohotkom u većini slučajeva imaju univerzalno prikupljanje otpada što se ne može reći za zemlje s niskim dohotkom. Veliku ulogu ima i obrazovanje i stav ljudi oko gospodarenja otpadom što je također usko vezano uz razvijenost pojedine zemlje. Pravilno gospodarenje otpadom ključno je za stvaranje održivog društva, ali i dalje ostaje izazov za mnoge zemlje u razvoju. Učinkovito gospodarenje otpadom je veliki financijski uteg za proračune pojedinih država i gradova, zbog toga je potrebno osmisliti integrirani sustav koji će biti učinkovit, transparentan i socijalno izvediv.

Pod pojmom otpad podrazumijevaju se stvari ili predmeti koje je vlasnik odbacio, namjerava odbaciti ili ih mora odbaciti. Ovisno o svojstvima, otpad se može podijeliti na opasni, neopasni ili inertni, a prema mjestu nastanka razlikuje se komunalni otpad, industrijski otpad, građevinski otpad, ambalažni otpad, otpadna vozila i gume te električni i elektronički otpad.

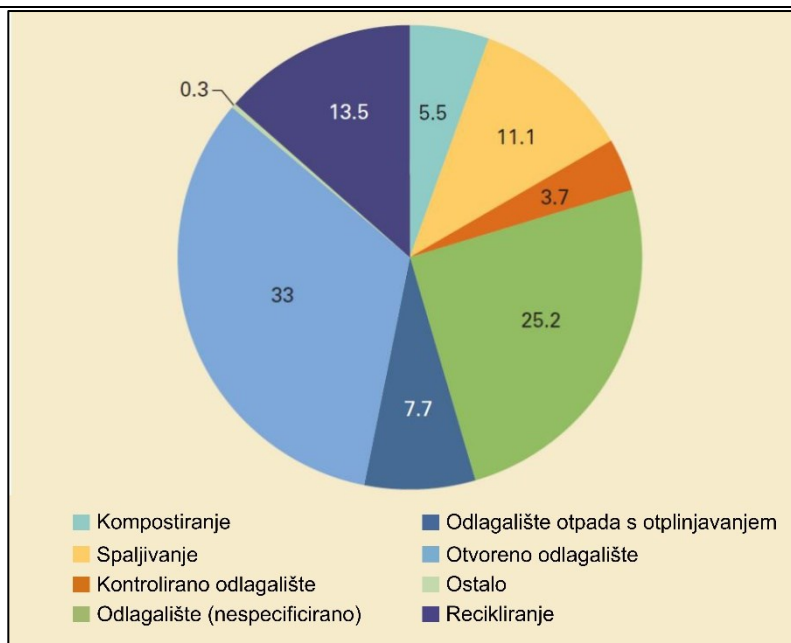
Kako bi se izbjeglo nestručno gospodarenje otpadom koje može rezultirati onečišćenjima zraka, tla i vode, tj. kako bi se izbjegli dodatni ekološki problemi, postupno se postavljaju rigorozniji uvjeti za izgradnju i korištenje odlagališta otpada te se potiče razvoj novih i učinkovitijih metoda recikliranja otpada. Iz tog razloga definirana je „hijerarhija gospodarenjem otpada“, koja pokazuje različite mogućnosti gospodarenjem otpada [2], a prikazana je na Slika 1.



**Slika 1. Prikaz "hijerarhije gospodarenjem otpada" [3]**

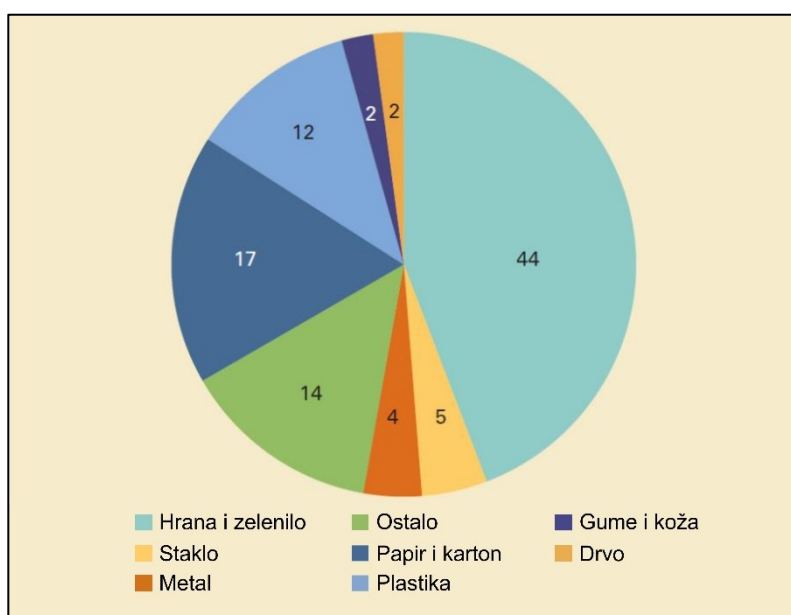
Najčešće mjere za smanjenje količina otpada su prvenstveno sprječavanje nastanka otpada ponovnim korištenjem, priprema za ponovnu upotrebu i recikliranje. Pod pojmom recikliranje podrazumijeva se sakupljanje, izdvajanje, prerada i izrada novih proizvoda iz iskorištenih materijala. Recikliranje postaje složenije i skuplje kada je otpadni materijal izrađen od više vrsta materijala ili prikupljanje otpada nije pravilno provedeno, u tim slučajevima je potrebno uložiti veću količinu energije u reciklažu materijala nego što je potrebno za njegovu izradu od primarnog materijala. Za otpad koji nije moguće reciklirati i na takav način ga ponovno iskoristiti kao mogućnost se javlja kemijska uporaba. Kemijskom uporabom se dobivaju sirovine poput goriva ili kemikalija koje se mogu iskoristiti kao polazne sirovine za druge procese. Energiju pohranjenu u otpadu moguće je tehnički uporabiti spaljivanjem čime se proizvede električna i toplinska energija. Preostali dio otpada zbrinjava se na odlagalištima poštujući hijerarhiju gospodarenjem otpada.

Na Slika 2. prikazano je postupanje s otpadom na globalnoj razini u 2016. godini. Može se zaključiti da se većina otpada trenutno baca ili odlaže na neki oblik odlagališta. Otprilike se 37 % otpada odlaže se na odlagališta, od čega se 8 % odlaže na sanitarna odlagališta sa sustavima za prikupljanje odlagališnog plina, dok se na otvorenim nekontroliranim smetlištima baca oko 31 % otpada [1]. Od ostalog otpada 19 % se reciklira i kompostira, a 11 % otpada se spaljuje [1].



**Slika 2. Globalno postupanje s otpadom u 2016. godini [1]**

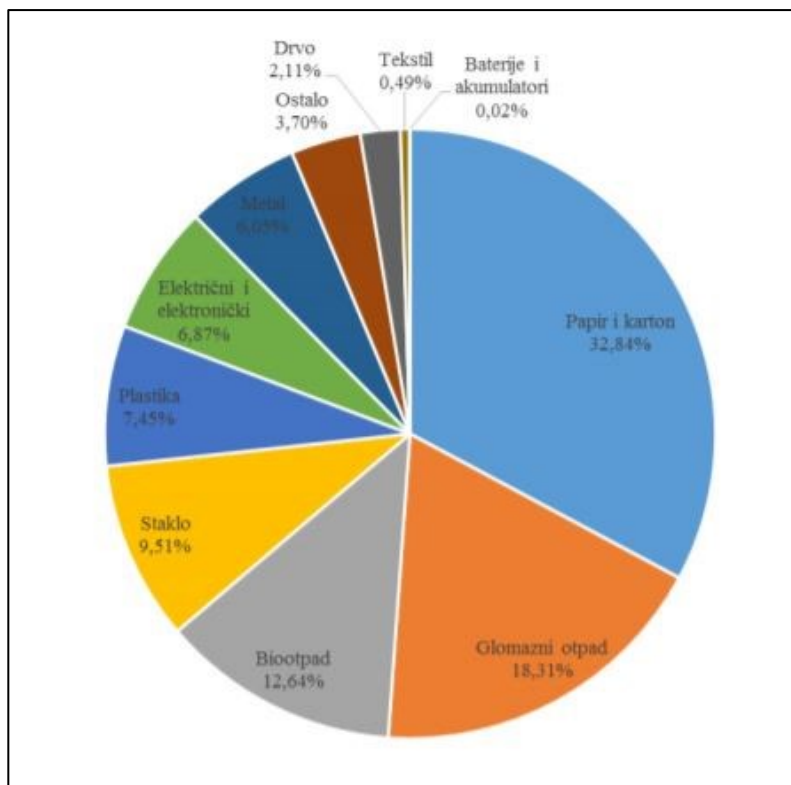
Sastav globalnog otpada za 2016. godinu prikazan je na Slika 3. Organski otpad čini najveći dio proizvedenog otpada u svijetu, a slijede ga papir i plastika. Plastika čini oko 12 % ukupnog proizvedenog otpada u svijetu, dok je udio plastike u prikupljenom komunalnom otpadu u Hrvatskoj 7,5 % za 2018. godinu (Slika 4.). Udjeli plastike u ukupnom otpadu možda nisu veliki, ali kada se ti postoci pretvore u masu proizvedenog otpada dolazimo do značajnih količina plastike koju svakodnevno bacamo.



**Slika 3. Globalni sastav otpada u 2016. godini [1]**



Za razliku od drugih komponenata otpada plastika predstavlja jedan od većih problema prilikom zbrinjavanja, zbog svoje strukture. Plastika je sintetički materijal koji se već desetljećima koristi za izradu različitih proizvoda i može vrlo efikasno zamijeniti prirodne materijale i sirovine. U svakodnevnom životu postala je nezamjenjiva zbog osobina kao što su niska cijena i laka prerada. Lako se može obojiti i otporna je na vodu i različite kemikalije.



**Slika 4. Odvojeno sakupljeni komunalni otpad u 2018. god. u RH [4]**

Plastika se ne razgrađuje i prirodno se ne raspada kao ostale komponente otpada već se samo usitnjava što predstavlja veliki problem po pitanju okoliša. To je najviše izraženo u morima i oceanima gdje komadići plastike ugrožavaju sveukupan morski ekosustav te ju je zbog toga teško ukloniti iz mora. Ljudskim nemarom i nebrigom u Tihom oceanu se stvorio tkz. otok smeća (eng. „*Great Pacific Garbage Patch*“) koji je gotovo u potpunosti sačinjen od sitnih komadića plastike, koja se naziva mikroplastika [5]. Mikroplastika nije uvijek vidljiva golim okom.

S druge strane, odlaganje plastike na odlagalište nije trajno rješenje zbog toga što plastični materijal ostaje nepromijenjen i do 500 godina, a i tada se neće potpuno razgraditi jer petrokemijski proizvodi nisu potpuno biorazgradivi i kemikalije ostaju u tlu. Iz ova dva podatka o plastici može se zaključiti da o plastičnom otpadu treba brinuti i nakon njegovog korištenja i da uporaba istoga predstavlja veliki problem današnjeg vremena.

---

Za proizvodnju plastičnog materijala koriste se sirovine nafte i plina, te zbog toga predstavlja vrijednu sirovinu s energetske strane. Moguće uporabe plastičnog otpada su [6]:

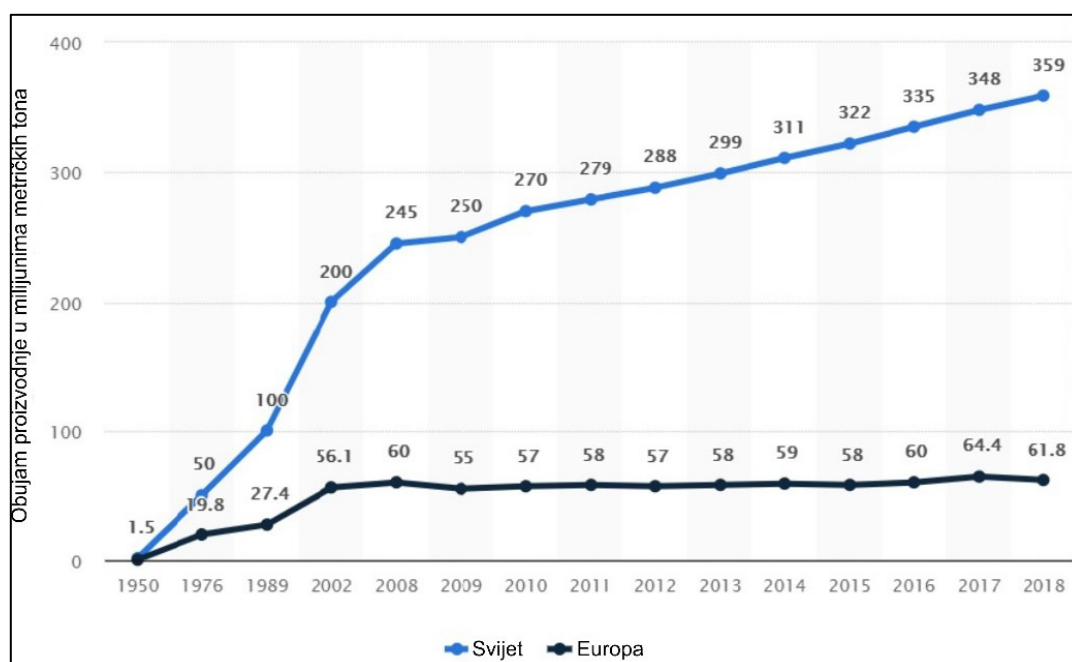
- materijalna uporaba,
- kemijska uporaba,
- energijska uporaba.

Materijalno recikliranje je najprihvatljiviji način uporabe plastičnog otpada. Postupak je predstavljen i komercijaliziran diljem svijeta 1970-ih godina. Recikliranje se može primijeniti za istovrsne polimere (npr. PE, PP, PS i sl.), dok onečišćeni otpad zahtjeva dodatne pripreme, kao što su razvrstavanje i pranje [7]. Za uspješnu uporabu, osim pozitivne bilance materijala, energije i troškova, treba voditi računa i o pronalaženju tržišta za reciklate. Jedan od glavnih problema koji se javljaju kod recikliranja je heterogenost i degradacija plastičnog otpada. Kako sav plastični otpad nije prikladan za recikliranje, shodno tome prateći hijerarhiju gospodarenjem otpadom sljedeće rješenje je kemijska uporaba. Kemijska uporaba podrazumijeva napredne tehnološke postupke koji pretvaraju polimerne materijale u manje molekule, najčešće kapljevine i plinove. Produkti kemijskog recikliranja se dokazano mogu koristiti kao gorivo, a tehnologija koja stoji iza uspjeha je proces depolimerizacije. Kemijska uporaba se ističe po tome što omogućava obradu heterogenog i onečišćenog plastičnog otpada, kojeg je teško razvrstati. Energijskom uporabom se spaljuje plastični otpad u kontroliranim uvjetima koji se više ni na jedan način ne može iskoristiti, radi smanjenja njegovoga obujma na odlagalištima. Pri izgaranju otpada, neizbježan nusprodukt su štetne emisije plinova koje su usko povezane s načinom izgaranja. Jedino o čemu treba voditi računa da je uporaba otpada ekonomski i ekološki prihvatljiva te da se tijekom same uporabe potroši manje resursa nego prilikom primarne proizvodnje.

U prvom dijelu rada opisane su vrste plastičnog otpada te moguće metode uporabe plastike. Tema ovoga rada je termokemijska uporaba, tj. piroliza industrijskog plastičnog otpada. Detaljno su opisani parametri postojećih postrojenja za pirolizu u svijetu. Pregledom literature prikupljeni su podaci o ulaznim i izlaznim tokovima postojećih postrojenja za pirolizu plastičnog otpada. Iz prikupljenih podataka dobivene su uprosječene vrijednosti koje su korištene za modeliranje tehnoloških i ekonomskih parametara adekvatnog postrojenja za pirolizu industrijskog plastičnog otpada na primjeru tvrtke Pos - Plast d.o.o. Na temelju rezultata tehnokonomске analize i analize osjetljivosti ocijenjena je izvedivost investicije.

## 2. Općenito o plastičnom otpadu

Svijet bez plastike danas je nezamisliv, ali njezina primjena i proizvodnja krenula je tek pedesetih godina prošlog stoljeća te je od tada proizvodnja plastike u neprekidnom porastu. Od tog vremenu plastika je zamijenila većinu ostalih umjetnih materijala. Široko primjenu ima u pakiranju i proizvodnji proizvoda, uključujući elektroničku, građevinsku i automobilsku industriju. To proizlazi iz njezinih povoljnih svojstava: niska razgradivost, dugovječnost, kemijska stabilnost, pogodnost materijala za višestruku upotrebu i nizak utrošak energije za proizvodnju i uporabu materijala. Prilikom proizvodnje plastike minimalna su onečišćenja vode i zraka, a prikladna je za višekratnu upotrebu te je zbog toga zamijenila upotrebu nekih prirodnih resurse (drvo, metal). Proizvodnja plastike u svijetu 1950. godine bila je oko 1,5 milijuna tona godišnje, da bi sadašnja svjetska proizvodnja plastike bila oko 359 milijuna tona godišnje (Slika 5.). Dok se samo u Europskoj uniji proizvodi oko 61,8 milijuna tona plastike godišnje (60 % plastike iskorištava se za ambalažu i u građevinskoj industriji) dok je u Aziji proizvedeno 51 % svjetske plastike u 2018. godini [8].



Slika 5. Proizvodnja plastike u svijetu od 1950. do 2018. godine [9]

S druge strane posljedica velike proizvodnje plastike rezultiralo je prikupljanjem 29,1 milijun tona plastičnog otpada unutar Europske unije tijekom 2018. godini. Od te količine plastičnog otpada u EU se 32,5 % recikliralo, 42,6 % energetske oporabio, a 24,9 % zbrinulo na odlagalištima [8]. Treba naglasiti da je izvoz plastičnog otpada izvan EU u razdoblju od 2016. do 2018. godine pao za 39 % zbog Kineske obustave uvoza plastičnog otpada.

## 2.1. Podjela polimernih materijala

Pod pojmom plastika se zapravo podrazumijevaju polimerni materijali koji su tehnički upotrebljive tvari kojima osnovu čini polimer te se rijetko sastoje samo od polimera u izvornom obliku, već obično sadrže brojne dodatke za poboljšavanje svojstava. Polimeri koji se koriste kod procesa prerade mogu se obzirom na ponašanje pri povišenim temperaturama podijeliti na:

- **Plastomere (termoplasti)** koji imaju linearnu i/ili razgranatu strukturu te su taljivi i topljivi. Zagrijavanjem omekšavaju te prelaze iz krutine u taljevinu, hlađenjem ponovno prelaze u krutinu, a da pritom ne mijenjaju svojstva. Zbog ove osobine pogodni su za ponovno korištenje, tj. recikliranje [10]. Prednost im je što su otporni na djelovanje velikog broja kemikalija, a glavni predstavnici su: polietilen, polistiren, polipropilen, poli(vinil-klorid).
- **Duromere (umjetne smole)** koji imaju gusto umreženu strukturu te veliku čvrstoću, tvrdoću i toplinsku postojanost. Zagrijavanjem ne prelaze u taljevinu zbog njihove umrežene strukture, netopljivi su i ne bubre [10]. Duromeri koji se najčešće koriste u praksi su amino i fenolne smole, epoksidi i nezasićeni poliesteri. Koriste se kao konstrukcijski materijali za uređaje, kao ljepila i kompozitni materijali.
- **Elastomere (gume)** koji imaju slabo umreženu strukturu na sobnoj temperaturi su izrazito elastični i mogu podnijeti značajne deformacije. Elastomeri su netaljivi i netopljivi, ali bubre [10].
- **Elastoplastomere** koji su posebna vrsta polimera (slabo su prostorno umrežene strukture). Imaju elastična svojstva kao elastomeri pri sobnim temperaturama, a pri povišenim temperaturama ponašaju se poput plastomera. Elastoplastomeri su taljivi, topljivi i bubre [10].

## 2.2. Vrste i upotreba plastike

Danas postoji stotinjak plastičnih materijala koji su u svakodnevnoj upotrebi. Neki se plastični predmeti koriste nekoliko godina, dok je nekim plastičnim proizvodima životni vijek manji od dana (plastična vrećica). Na Slika 6. prikazan je dijagram koji prikazuje koliko je koje vrste plastike bilo zastupljeno u proizvodnji plastičnih materijala u Europskoj uniji tijekom 2018. godine. Tri najzastupljenija materijala u ukupnoj proizvedenoj plastici bili su polipropilen s 19,3 %, a slijede ga polietilen niske gustoće i polietilen visoke gustoće s udjelima od 17,5 % odnosno 12,2 %. Ove vrste plastike su isto tako najzastupljenije u sastavu komunalnog otpada

uz još poli(vinil-klorid), poli(etilen-tereftalat) i polistiren. U nastavku su ukratko opisane pojedine vrste plastike i njihova primjena.

- **Polipropilen, PP**

Polipropilen se proizvodi lančanom polimerizacijom monomera propilena. Polipropilen je po svojstvima jako sličan HDPE, ali ima veću tvrdoću, vlačnu čvrstoću i toplinsku postojanost [11]. Koristi se za izradu spremnika, posuda, boca koje se mogu sterilizirati, cijevi za korozivne tvari i prozirnih folija.

- **Polietilen visoke gustoće, HDPE**

Polietilen visoke gustoće je termoplastični polimer proizveden od monomera etilena, te je dugački linearni polimerni lanac koji ima visoka svojstva čvrstoće. HDPE karakterizira otpornost na vodu i kemikalije, lakoća čišćenja i jednostavnost varenja. S odličnim omjerom čvrstoće i gustoće, HDPE se koristi u proizvodnji plastičnih boca, čaša, cjevovoda otpornih na koroziju i različitih vrsta plastične građe.

- **Polietilen niske gustoće, LDPE**

Polietilen niske gustoće je termoplastični polimer proizveden od monomera etilena. LDPE ima više grananja u strukturi od HDPE-a, pa zbog toga je njegova vlačna čvrstoća manja, a elastičnost veća u odnosu na HDPE. Zbog svoje čvrstoće i fleksibilnosti LDPE najčešće se koristi za izradu različitih folija i vrećica za samoposluživanje.

- **Polistiren, PS**

Polistiren nastaje polimerizacijom monomera stirena  $(C_8H_8)_n$ . Polistiren je svestrana plastika koja se koristi za proizvodnju širokog spektra proizvoda. Kao tvrda, čvrsta plastika koristi se za ambalažu hrane i laboratorijsko posuđe. U kombinaciji s raznim bojama, aditivima ili drugom plastikom, polistiren se koristi za izradu uređaja, automobilskih dijelova, igračaka i razne opreme. Od polistirena se također proizvodi pjenasti materijal (stiropor), nazvan ekspanzirani ili ekstrudirani polistiren, koji je cijenjen zbog svojih izolacijskih svojstava [12].

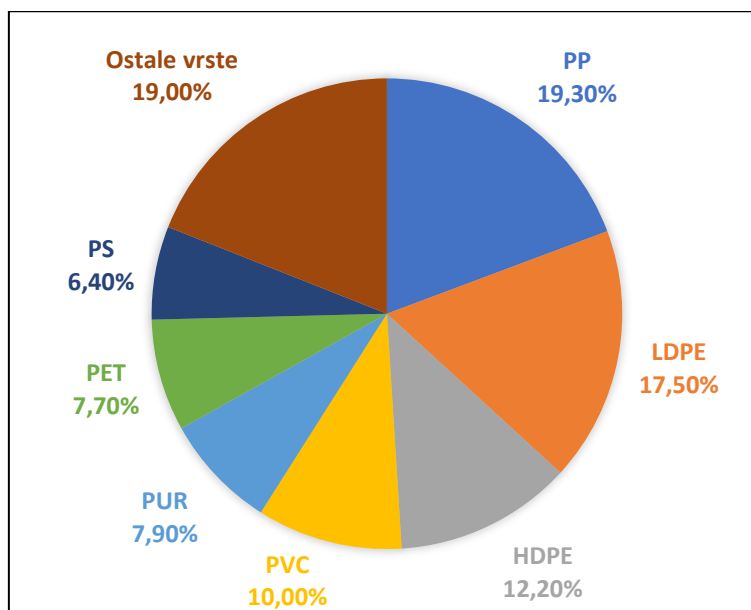
- **Poli(vinil-klorid), PVC**

Poli(vinil-klorid) nastaje polimerizacijom monomera  $-CH_2 - CHCl -$  te se sastoji od 56 % klora i 44 % ugljika. Uglavnom se PVC-u tijekom proizvodnog postupka dodaju dodaci poput plastifikatora i sredstva protiv starenja kako bi se poboljšala otpornost na toplinu, žilavost i plastičnost [11]. PVC najčešću primjenu ima za okvire prozora, cijevi,

boce, ambalažu kozmetike i kao izolator električnih kabela. Potencijalno mogu biti otrovni pa se PVC uglavnom ne koristi za skladištenje hrane i lijekova.

- **Poli(etilen-tereftalat), PET**

Poli(etilen-tereftalat) plastomerni je materijal koji nastaje stupnjevito polimerizacijom tereftalne kiseline i etil-glikola [11]. PET je poznat po izvrsnoj kombinaciji svojstava poput mehaničke, toplinske i kemijske otpornost kao i dimenzijskoj stabilnosti. Zbog jeftine proizvodnje, PET ima široku uporabu: folije, filmovi, boce, konstrukcijski materijal u brodogradnji, građevinarstvu, kemijskoj industriji, industriji vozila i elektro industriji.



Slika 6. Prikaz udjela vrste plastike u ukupnoj proizvodnji plastike u EU za 2018. god. [1]

### 2.3. Oporaba plastičnog otpada

Kako bi sačuvali okoliš kakvog danas poznajemo i kako ne bi dalje uništavali okoliš oko sebe svjesnim ili ne svjesnim postupcima potrebno je veću brigu i energiju uložiti u stručniju i kvalitetniju uporabu otpadne plastike. Kako bi to postigli svaki pojedinac treba krenuti od sebe i pravilno rukovati s plastičnim otpadom koji proizvede. Na taj način kasnija uporaba samog otpada će biti jednostavnija i učinkovitija te će se smanjiti količina otpadne plastike koja završi nepotrebno na odlagalištima otpada, a u najgorem slučaju i u prirodi. Kada se odluči odbaciti plastični materijal i kada nemamo druga rješenja za ponovnu upotrebu, nastali plastični otpad je nužno je oporabiti, te se kao mogućnosti javljaju: materijalna, kemijska i energijska uporaba.

### **2.3.1. Materijalna oporaba**

Najjednostavniji i najrašireniji trenutno način oporabe polimernih materijala je mehaničko recikliranje, a pridonosi zaštiti okoliša i smanjenju nastajanja otpada. Glavni cilj mehaničkog recikliranja je proizvesti novi materijal ili proizvod od polimernog otpada ili iz mješavine čistog i otpadnog polimera [13]. Kada se plastični otpad prikupi i doveze u postrojenje za mehaničko recikliranje otpadu se prvo kontrolira kvaliteta, nakon toga slijedi sortiranje (prema vrsti i boji), zatim se pere i usitnjava. Dobiveni granulirani materijal se zagrijava te mu se prema potrebi dodaju aditivi i čisti polimeri od kojih nastaje novi proizvod procesom ekstrudiranja. Jednim ovakvim postupkom materijalne oporabe otpadna plastika se reciklira u regenerate, folije i ambalaže.

### **2.3.2. Kemijska oporaba**

Kako svu otpadnu plastiku nije moguće mehanički reciklirati, a sljedeći hijerarhiju gospodarenja otpada, javljaju se i druge tehnologije s ciljem iskorištavanja pohranjene energije u samom plastičnom otpadu. Kemijska oporaba je postupak kojim se polimerni otpad pretvara u polaznu sirovinu, monomer, sirovinu za dobivanje drugih kemikalija ili goriva [13]. Iz plastičnog otpada se također moraju ukloniti sve primjese kako ne bi došlo do ometanja tijekom procesa razgradnje. Posebnu važnost treba posvetiti ekonomskoj isplativosti kemijske oporabe čiji troškovi mogu biti izrazito veliki, zbog toga su potrebni velike količine otpadne plastike i dobro organiziran sustav prikupljanja otpada. Kemijska razgradnja postiže se djelovanjem toplinske ili mehaničke energije ili pod utjecajem kemikalija, uz dodatak katalizatora. Postupci kemijske oporabe su: hidroliza, hidriranje, rasplinjavanje i piroliza.

#### **2.3.2.1. Hidroliza**

Hidroliza je kemijska reakcija tijekom koje voda reagira s jednim spojem pri čemu nastaju dva ili više novih spojeva. Ovim postupkom kemijske oporabe polimer se depolimerizira do monomera. Postupak hidrolize pogodan je proces depolimerizacije poliestera uz prisustvo katalizatora. Isto tako hidroliza je pogodna za kemijsku oporabu PUR-pjene i PET-a [13]. Na samu kvalitetu i iskoristivost polimera tijekom hidrolize znatno ulogu ima temperatura.

#### **2.3.2.2. Hidriranje**

Hidriranje je adiranje (kemijsko vezanje) vodika na nezasićene organske spojeve, kao na primjer adicija vodika na dvostruke C = C veze [13]. Proces hidriranja se provodi tako da polimer degradira na produkte nižih molekulskih masa, koji postupkom hidriranja prelaze u

kapljevita goriva. Postupak se provodi pri visokim tlakovima i temperaturama (450 – 500 °C) uz prisustvo vodika. Postupak se zasniva na cijepanju veza makromolekula, na mjestima dvostruke veze, gdje nastaju slobodni radikali koji reagiraju s vodikom, daljnjim cijepanjem polimernih lanaca dolazi do stvaranja zasićenih alkana. Kvaliteta hidriranja procjenjuje se udjelom nastalih zasićenih alkana [13]. Drugi značajan faktor kvalitete za daljnju petrokemijsku preradu je, izdvajanje većeg dijela heteroatoma (klora, kisika, dušika, sumpora) uslijed cijepanja, budući da oni sprečavaju hidriranje [13]. Produkti hidriranja su benzin, dizelsko ulje i drugi petrokemijski proizvodi koji se mogu koristiti kao pogonska goriva.

### 2.3.2.3. Rasplinjavanje

Rasplinjavanje je proces termokemijske razgradnje plastičnog otpada na alkane pri visokim temperaturama, djelomičnom oksidacijom, tj. nepotpunim izgaranjem nastali alkani prelaze u sintetski plin. Cijeli proces rasplinjavanja može se podijeliti u više faza: zagrijavanje i kreiranje nakon kojih slijedi oksidacija i rasplinjavanje. Kao sredstvo prilikom rasplinjavanja koristi se: kisik, zrak, dimni plinovi i vodena para, pojedinačno ili u kombinaciji [13]. Korišteno sredstvo za rasplinjavanje ima značajnu ulogu kakvog sastava i svojstava će biti dobiveni sintetski plin. Dobiveni sintetski plin se ovisno o sastavu i toplinskoj vrijednosti dijeli na [13]:

- slabi vodeni plin,
- sintetizirani redukcijски plin,
- gradski jaki plin,
- bogati sintetizirani plin.

Dobiveni sintetski plin se može koristiti kao sirovina ili gorivo u kemijskoj industriji za proizvodnju vodika, metanola, amonijaka, octene kiseline. Prednost rasplinjavanja u odnosu na pirolizu je u tome što je to fleksibilniji postupak. Ali s druge strane sintetski plinovi dobiveni rasplinjavanja sadrže značajne količine katrana. Stoga je za rasplinjavanje otpadne plastike potreban vrlo učinkovit sustav pročišćavanja plinova kako bi se ona dalje mogla koristiti kao pogonsko gorivo.

Vrste reaktora pogodne za rasplinjavanje plastičnog otpada su: reaktor za rasplinjavanje u fiksnom sloju, reaktor za rasplinjavanje u fluidizirajućem sloju, konusni reaktor i plazma reaktor.

Ovaj rad bavi se primjenom tehnologije pirolize u industriji pa će ona biti detaljnije opisana u zasebnom poglavlju.



### 2.3.3. Energetska uporaba

Energijska uporaba ili spaljivanje otpadne plastike je najzastupljeniji postupak iskorištavanja plastičnog otpada u Europskoj Uniji. Prilikom spaljivanja otpadne plastike dolazi do oslobađanja produkata potpunog ili nepotpunog izgaranja te topline koja se koristi grijanje za vode ili proizvodnju električne energije. Spaljivanje plastičnog otpada je poželjniji oblik uporabe nego odlaganje plastičnog otpada na odlagalište. Šira javnost ima značajan utjecaj na prihvaćanje spaljivanja plastičnog otpada, ali i otpada općenito u spalionicama. Mišljenje je da se takvim načinom uporabe otpadne plastike nastaju velike količine štetnih emisija. Prava istina je da odlaganjem otpada na odlagališta omogućujemo proizvesti nekoliko puta veće emisije stakleničkih plinova, te riskiramo potencijalno zagađenje podzemnih voda i tla oko samog odlagališta. Problem kod spaljivanja plastičnog otpada je mogućnost stvaranja dioksina i furana, te pojave korozije ako otpad sadrži klor kao što je slučaj kod poli(vinil-klorida). Zbog zabrinutosti javnosti zbog štetnih emisije koje dolaze iz spalionica na otpad, Europska unija izdala je 2000. godine „Direktiva 2000/76/EZ Europskog parlamenta i vijeća o spaljivanju otpada“ [14]. Direktivom su regulirane granične vrijednosti ispuštenih emisija iz spalionica otpada tijekom njezina rada, ali i smjernice za pravilan i kontroliran rad spalionica. Iako prilikom spaljivanja dolazi do stvaranja štetnih emisija, te se emisije mogu držati unutar propisanih vrijednosti kada se spaljivanje provodi u kontroliranim uvjetima i pri visokim temperaturama. Kada govorimo u temperaturama pri kojima se vrši spaljivanje otpada, to su temperature iznad 850°C, odnosno iznad 1100 °C ukoliko otpad sadrži više od 1 % masenog udjela halogenih tvari [15]. Visoke temperature tijekom spaljivanja otpada u spalionicama osiguravaju efikasno izgaranje štetnih halogenih tvari. Treba naglasiti da polimerni materijali imaju visoke ogrjevne vrijednosti koje se kreću od 18 do 45 MJ/kg [13]. Mogućnosti kod spaljivanja plastičnog otpada su široke, on se može spaljivati samostalno ili može biti pomiješan zajedno s komunalnim otpadom ili gorivom iz otpada te se na taj način uporabiti u spalionicama.

### 3. Piroliza

Piroliza je termokemijski proces u kojem se organska tvar na povišenoj temperaturi u inertnoj atmosferi razlaže na produkte manje molekulske mase. Tijekom same pirolize dolazi do cijepanja dugih polimernih lanaca pri čemu nastaju plin, pirolitičko ulje i ugljenizirani ostatak. U nekim postrojenjima produkti pirolize se jednostavno separiraju na tekuće, plinske i čvrste produkte, dok neka postrojenja imaju posebne sustave za odvajanje (destilacijske kotlove) u koje se dodaju tekuće i plinske smjese. Tekući produkti koji su sastavom slični dizelu mogu se obraditi na isti način kao u rafinerijama. Nekondenzirani plinovi sadrže ugljikovodike i manje količine vodika i ugljičnog monoksida. Plinovi se mogu koristiti kao gorivo, ali i koristiti za zagrijavanje reaktora pirolize, ili ako je količina nastalih plinova mala onda se odvođe na baklju gdje izgaraju. Čestice pepela se mogu nalaziti u plinovima koji ne kondenziraju, tako da većina komercijalnih procesa ima pročišćivače za čišćenje plinova. Na pirolizu utječu mnogi parametri: temperatura, tlak, vrijeme zadržavanja, katalizatori, tip reaktora te vrsta plina za fluidiziranje i njegova brzina. Ovisno o ovim parametrima dobivaju se različiti prinosi produkata pirolize.

Ovisno o temperaturi na kojoj se odvija proces pirolize razlikuju se [13]:

- Niskotemperaturna piroliza ili bubrenje (do 500 °C)
- Srednjotemperaturna piroliza (od 500 do 800 °C)
- Visokotemperaturna piroliza (više od 800 °C)

#### 3.1. Temperatura

Temperatura je jedna od najznačajnijih radnih parametara u pirolizi jer je s njom određena reakcija pucanja polimernih lanaca. Ponašanje toplinske razgradnje plastike može se izmjeriti pomoću termogravimetrijskog analizatora. Mnoge studije su provedene s ciljem otkrivanja utjecaja temperature pirolize na razgradnju plastike. Kada se proučavala termička razgradnja PET-a zaključilo se da se ona odvija na temperaturama između 350 - 520 °C, dok se za HDPE maksimalna razgradnja odvija na temperaturi oko 467 °C [16]. Ove temperature treba uzeti u obzir prilikom provođenja pirolize kako bi se osiguralo najoptimalniji prinos ulja. Za razliku od PET-a i HDPE-a razgradnja PVC-a se odvija u dva temperaturna raspona. Prvo temperaturno područje je između 260 - 385 °C gdje se ostvaruje veći gubitak mase (oko 60 %), dok je drugo temperaturno područje između 385 - 520 °C u kojem je gubitak mase oko 20 % [16]. Razgradnja LDPE – a odvija se između 360 - 550 °C, dok je maksimalni prinos ulja oko 480 °C [16]. Što se tiče PP i PS oni maksimalni prinos ulja ostvaruju pri temperaturama oko 447 °C odnosno

425 °C [16]. Najveći utjecaj na brzinu odvijanja reakcije ima temperatura o kojoj ovisi udio plina, ulja i ugljeniziranog ostatka u konačnom produktu procesa. Za dobivanje plina potrebne su temperature više od 500 °C dok se za dobivanje tekućeg produkta optimalni temperaturni raspon kreće od 300 do 500 °C.

### 3.2. Tlak

Radni tlak utječe kako na postupak pirolize tako i na njezine produkte. Vrelište produkata pirolize povećavaju se na višem tlaku, pa su u tom slučaju teški ugljikovodici dalje depolimeriziraju, umjesto da isparavaju na zadanoj radnoj temperaturi. Tlak ima veliki utjecaj na proizvodnju plina pri višim temperaturama. Povećavanjem tlaka uz držanje konstantne temperature na kojoj se odvija piroliza povećava se prinos plinovitih produkata, a smanjuje se prinos tekućih. Prosječna molekulska masa plinskog proizvoda također se smanjuje s porastom tlaka. Vrlo malo komercijalnih postrojenja koristi povišeni tlak, većina postrojenja radi na ili malo iznad atmosferskog tlaka [17].

### 3.3. Vrijeme boravka

Vrijeme boravka različito se definira ovisno na kakav se način piroliza odvija. U brzom pirolizi ili u kontinuiranom procesu pirolize, odnosi se na vrijeme kontakta plastike s zagrijanim površinama reaktora. S druge strane prilikom spore pirolize i pirolize koja se odvija u šaržnom reaktoru, vrijeme zadržavanja označuje trajanje od trenutka kada se sirovina počinje zagrijavati pa sve do trenutka uklanjanja produkata pirolize. Duže vrijeme zadržavanja pogoduje daljnjoj konverziji primarnih proizvoda, čime se dobivaju stabilniji produkti, poput nekondenzirajućih plinova. U sporom pirolizi, dugo zadržavanje potiče proces karbonizacije i proizvodi više ugljeniziranih produkata. Osim u šaržnom reaktoru, vrijeme boravka se teško može izravno kontrolirati, ali se može regulirati mijenjanjem drugih radnih parametara kao što su brzina punjenja sirovine u reaktor, brzina protoka fluidizirajućeg plina i brzina ispuštanja produkata [16][17].

### 3.4. Fluidizirajući plin

Fluidizirajući plin je inertni plin, poznat kao i plin nosilac, koji služi samo za transport isparenih produkata bez sudjelovanja u pirolizi. Postoje mnoge vrste fluidizirajućih plinova koji se mogu koristiti za plastičnu pirolizu kao što je dušik, helij, argon, etilen, propilen i vodik [16]. Svaka vrsta fluidizirajućeg plina ima različitu reaktivnost ovisno o svojoj molekularnoj masi. Korištenjem lakšeg plina moguće je proizvesti veliku količinu kondenziranog proizvoda kao

što je tekuće ulje. Osim toga, također je uočeno da je reaktivnost fluidizirajućeg plina utječe na stvaranje koksa. Od svih plinova, dušik je najčešće korišten kao fluidizirajući plin u pirolizi otpadne plastike jer je njime lakše i sigurnije rukovati nego s plinovima visoke reaktivnosti poput vodika i propilena zbog opasnosti od zapaljenja [16][17].

### 3.5. Tipovi reaktora

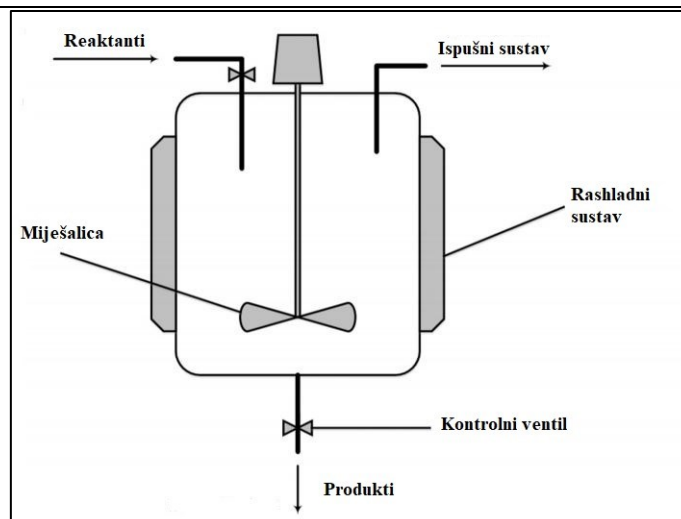
O vrsti reaktora koji se izabere za pirolizu ovisi izmiješanost plastičnog otpada i katalizatora, vrijeme zadržavanja sirovine u reaktoru, prijenos topline između reaktora i sirovine te efikasnost samog procesa. Proces pirolize može se odvijati na dva načina [16]:

- Diskontinuirano: - šaržni i polušaržni reaktor,
- Kontinuirano: - reaktori za pirolizu u fiksnom sloju,  
- reaktor za pirolizu u fluidizirajućem sloju,  
- konusni reaktor.

#### 3.5.1. Šaržni i polušaržni reaktor

Šaržni reaktor (Slika 7.) je u osnovi zatvoreni tip reaktora kod kojeg nema dotoka niti odljeva kako reaktanta tako i produkata za vrijeme trajanja reakcije, ali je omogućena izmjena topline [16]. Visoka konverzija u šaržnom reaktoru može se postići duljim ostavljanjem reaktanta u reaktoru, što je jedna od njegovih prednosti. Ugradnjom miješalice unutar reaktora omogućuje se kvalitetniji proces pirolize unutar reaktora. Kvaliteta produkata koji se dobivaju pirolizom u ovakvom tipu reaktora ovise o kvaliteti svake pojedine serije sirovine korištene u procesu. Također za šaržni reaktor vezani su visoki troškovi rada, ali i poteškoće pri velikoj proizvodnji [16].

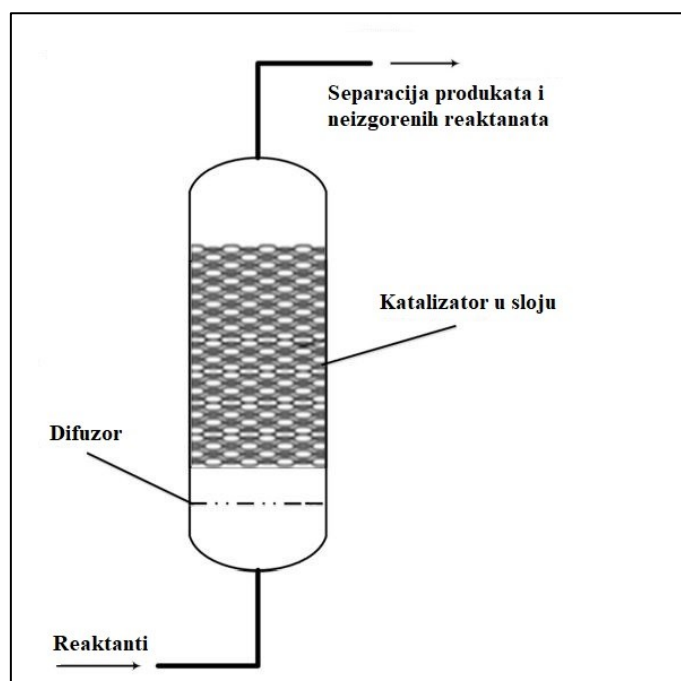
U polušaržnom reaktoru omogućeno je dodavanje reaktanta i odvajanje produkata tijekom procesa pirolize, što ga čini fleksibilnijim od šaržnog, ali i dalje ima visoke operativne troškove [16]. Šaržne i polušaržne reaktore istraživači koriste tijekom laboratorijskih pokusa zbog svojeg jednostavnog dizajna, ali i mogućnosti jednostavnog kontroliranja radnim parametrima [16].



Slika 7. Šaržni reaktor s miješalicom [16]

### 3.5.2. Reaktor za pirolizu u fiksnom sloju

Reaktor s fiksnim slojem prikazan je na Slika 8. jednostavne je konstrukcije te se njime lako upravlja, ali potrebno je voditi računa o veličini i obliku čestica plastike koja se kao sirovina ubacuje u reaktor kako ne bi došlo do začepljenja dovoda [16].

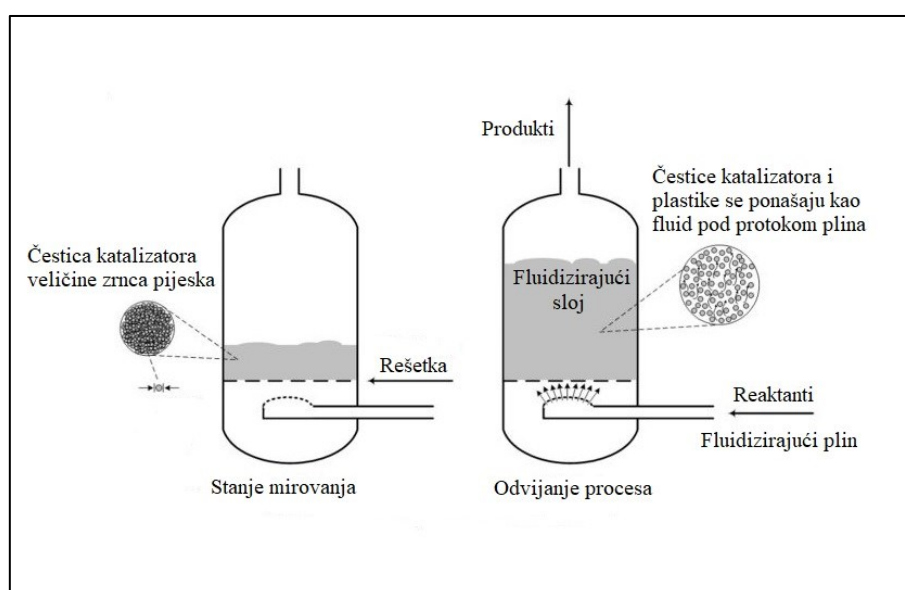


Slika 8. Reaktor za pirolizu u fiksnom sloju [16]

U nekim sustavima reaktori s fiksnim slojem koriste se samo kao sekundarni reaktor za pirolizu jer su produkti iz primarne pirolize uglavnom u tekućoj i plinovitoj fazi koje su prikladnije za reakcije u fiksnom sloju.

### 3.5.3. Reaktor za pirolizu u fluidiziranom sloju

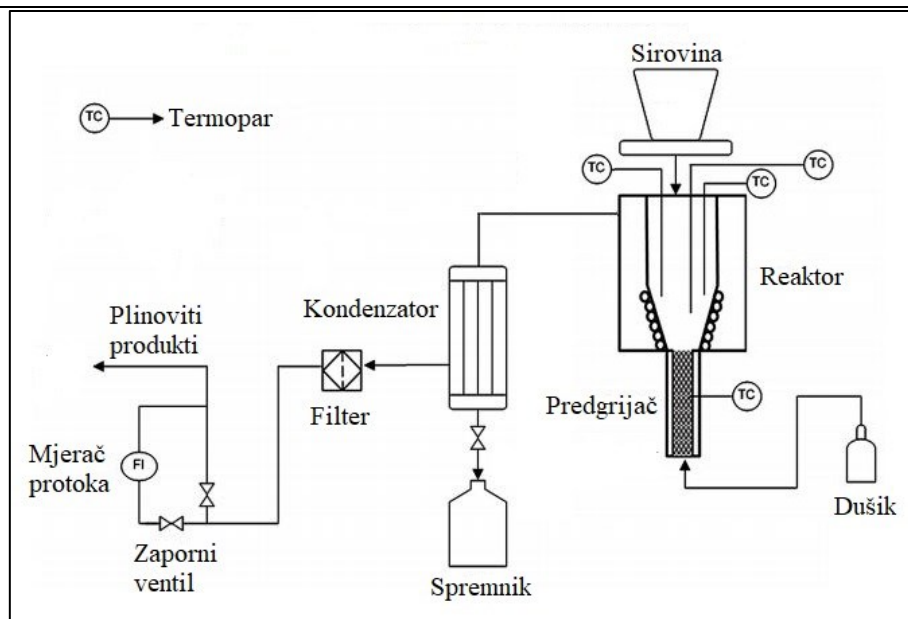
Na Slika 9. nalazi se reaktor s fluidizirajućem slojem koji se koristi u većini komercijalnih postrojenja za pirolizu. Za razliku od reaktora s fiksnim slojem u ovom tipu reaktora je poboljšano miješanje katalizatora i čestica plastike pomoću fluidizirajućeg plina koji podiže katalizator s rešetke i miješa ga s česticama plastike [16]. Prednosti reaktora s fluidizirajućim slojem su homogenost temperature i sastava. Reaktor s fluidiziranim slojem se preporuča za izvođenje katalitičke plastične pirolize, budući da se katalizator može ponovno koristiti više puta bez potrebe za pražnjenjem reaktora, s obzirom na to da je katalizator vrlo skupa tvar u industriji.



Slika 9. Reaktor za pirolizu u fluidizirajućem sloju [16]

### 3.5.4. Konusni reaktor

Konusni reaktor ili CSBR (eng. „conical spouted bed reactor“) omogućuje dobru izmiješanost čestica bez obzira na velike razlike u veličini i gustoći čestica (Slika 10.) [16]. Unutar konusnog reaktora ostvaruje se visok prijenos topline između faza. Dodavanje katalizatora i prikupljanje produkata su problema koji ga čine manje konkurentnijim na tržištu. Osim toga, njegov komplicirani dizajn koji zahtijeva upotrebu mnogih pumpi u sustavu čini ga nepovoljnim zbog visokih operativnih troškova.



Slika 10. Konusni reaktor za pirolizu [16]

### 3.6. Katalizatori

Katalizatori ubrzavaju kemijsku reakciju te se široko koriste u industriji i istraživanjima. Katalitička razgradnja posebno je zanimljiva za dobivanje proizvoda od velikog komercijalnog interesa kao što su automobilsko gorivo i  $C_2 - C_4$  olefine, koji imaju veliku potražnju u petrokemijskim industrijama. Korištenjem katalizatora smanjuje se potrebna energija za pokretanje procesa, što ubrzava brzinu reakcije. Posljedica svega toga je smanjenje temperature pirolize, a to je vrlo bitno jer proces pirolize zahtijeva velike količine toplinske energije što ometa njegovu komercijalnu primjenu. Osim toga, mnogi istraživači su katalizatore koristili i za nadogradnju proizvoda radi poboljšanja raspodjele ugljikovodika kako bi se dobili tekući produkti koji imaju slična svojstva kao i komercijalna goriva, poput benzina i dizela [16].

Postoje dvije vrste katalizatora homogeni i heterogeni. Homogeni katalizatori su u istoj fazi kao i reaktanti te se prilikom pirolize plastike obično koristi Lewisova kiselina poput  $AlCl_3$  [16]. Međutim, najčešći tip katalizatora koji se koristi je heterogeni jer se smjesa tekućih proizvoda može lako odvojiti od čvrstog katalizatora [16]. Stoga je heterogeni katalizator ekonomski poželjniji, jer su različiti katalizatori prilično skupi i poželjna je njihova ponovna upotreba. Razlike u katalitičkoj aktivnosti ovih krutina povezane su s njihovim kiselim svojstvima, posebno čvrstoćom i brojem kiselih mjesta. Svojstva katalizatora kao što su veličina čestica i raspodjela veličina pora, također imaju presudnu ulogu u njihovoj izvedbi zbog toga što kontroliraju katalitičku aktivnost [18]. Najčešće korišteni heterogeni katalizatori prilikom procesa pirolize plastike su: zeoliti, FCC katalizator, aluminij-silicij slitine i aktivni ugljen.

Zeoliti su kristalni mikroporozni aluminosilikati sa sposobnošću izmjene iona. Kristalna struktura sastoji se od spojenih tetraedara silicija i aluminijskih. Vrsta zeolita ovisi o omjeru silicijeva dioksida i aluminijske oksida u kristalnoj rešetci. Na isti način omjer  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  određuje stupanj reaktivnosti zeolita koji utječe na konačni produkt pirolize. Najčešće korišteni zeoliti prilikom katalitičke pirolize plastike su: HZSM-5, HUSY i HMOR [16].

Aluminij-silicij katalizatori predstavljaju skupinu kiselih amorfnih katalizatora od kojih su najčešće korišteni: SA-1, SA-2, i ZSM-5. Koncentracija kiseline u određuje se molnim omjerom  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ . Za razliku od zeolita, jačina kiseline u aluminij-silicij katalizatoru određuje se suprotno u kojoj visoki omjer  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  ukazuje na jaču kiselost [16].

FCC katalizatori sastoje se od zeolita i silicij-aluminijske oksida povezanih vezivom. FCC katalizator obično se koristi u industriji rafiniranja nafte za razbijanje teških frakcija nafte te ga je moguće naknadno odvojiti i ponovo koristiti [16]. Upotreba FCC katalizatora prilikom pirolize plastike omogućuje maksimiziranje proizvodnje sintetskog ulja.

### **3.6.1. Usporedba termalne i katalitičke pirolize**

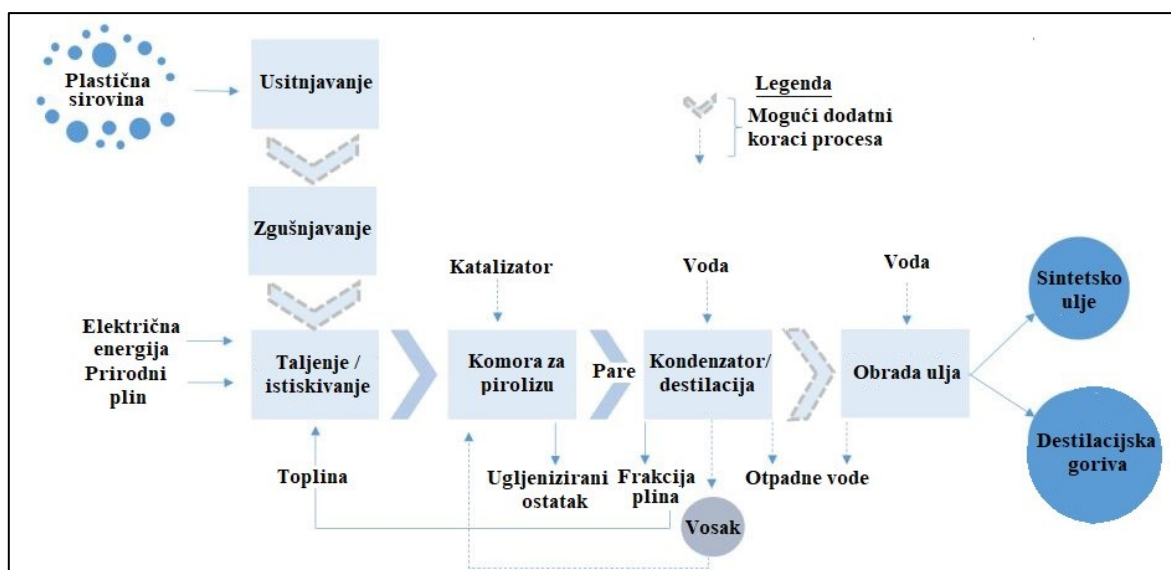
Termalna piroliza zahtjeva visoke temperature zbog niske toplinske vodljivosti polimera, što nije poželjno te se kao rješenje za smanjenje reakcijskih potreba nameće katalitička piroliza. Katalitička piroliza je alternativa za oporabu čistog ili miješanog plastičnog otpada. Prednosti katalitičke pirolize u odnosu na termalnu su [18]:

- niže vrijednosti temperature koje su potrebne za razgradnju polimernih materijala te ukupna manja potrošnja energije,
- povećani prinosi produkata s većom dodatnom vrijednošću,
- povećanje selektivnosti procesa,
- brže reakcije pucanja,
- sprječavanje stvaranja nepoželjnih produkata,
- dobivanje tekućih produkata nižeg vrelišta.



#### 4. Postojeća postrojenja za pirolizu plastičnog otpada

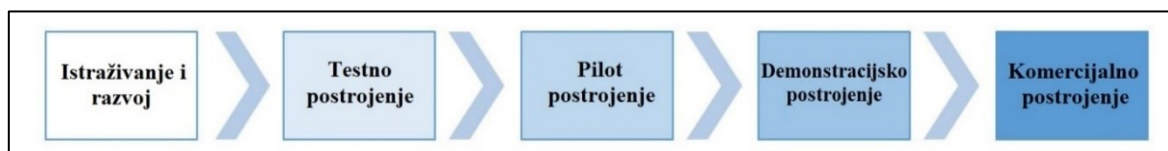
Krajem prošlog stoljeća izrađena su prva komercijalna postrojenja koja koriste pirolizu kao tehnologiju za recikliranje plastičnog otpada. Značajan napredak u komercijalizaciji postignut je tek u ovom stoljeću kada su izgrađena prva postrojenja koja su pokazale pozitivne rezultate. Glavni dobavljači tehnologije su Cynar u Europi, Agilyx u SAD-u, Toshiba Corporation u Japanu i Pyrocrat Systems LLP u Indiji [19]. Postojeća postrojenja za pirolizu plastičnog otpada koja se koriste rade na sličnim principima. Pomoću termičke razgradnje složene molekule polimera razgrađuju se na kraće lance ugljikovodika kroz postupak poznat kao depolimerizacija. Piroliza se koristi za pretvorbu otpadne plastike u sintetsko ulje, a uključuje dopremanje plastične sirovine u komoru za pirolizu u kojima je izložena visokim temperaturama u rasponu od 430 - 550 °C za stvaranje pare. Dobivene pare se zatim kondenziraju u sintetsko ulje i frakcije koje ne kondenziraju (plinska frakcija). Ovisno o tehnologiji koju postrojenje posjeduje, sintetsko ulje se može odvojiti na licu mjesta i to obično frakcijskom destilacijom na laka, srednja i teška destilacijska goriva. Ako postrojenje ne obavlja frakcijsku destilaciju onda se dobiveno sintetsko ulje prodaje rafineriji na daljnju preradu. Sekundarni nusproizvodi mogu obuhvaćati ugljenizirani ostatak, plinsku frakciju i vosak (Slika 11.). Kvaliteta i količina produkata iz procesa pirolize ovise najviše o sirovini (količini i sastavu) i tehnologiji. Ovisno o tipu postrojenja tijekom procesa mogu se dodati različiti katalizatori i voda. To su dodatne mogućnosti koja neka postrojenja imaju kako bi poboljšali svoje procese i na taj način povećali kvalitetu produkata pirolize.



Slika 11. Prikaz standardnog procesa za dobivanje goriva iz plastične sirovine [20]

Tijekom razvoja komercijalnih postrojenja kojima je za cilj proizvesti sintetsko ulje, dizel ili benzin iz plastičnog otpada, dobavljači opreme prolaze kroz nekoliko razvojnih faza (Slika 12.). Prema tome postrojenja se mogu klasificirati prema stupnju razvoja i prema radnom statusu. Kada se govori o podijeli prema stupnju razvoja postrojenja za obradu plastičnog otpada ona se dijele na [20]:

- **Testno postrojenje** – laboratorijsko postrojenje, tj. osnovna infrastruktura koja za cilj ima testirati koncept odnosno samu ideju.
- **Pilot postrojenje** – model komercijalnog postrojenja malog opsega s ciljem demonstriranja dokaza o konceptu, ispitivanje različitih sirovina i procjene prinosa ulja i same kvalitete proizvoda. Pilot sustavi se mogu koristiti za testiranje različitih izmjena na samom dizajnu postrojenja kako bi se ispitala učinkovitost ili tijek samog procesa.
- **Demonstracijsko postrojenje** – sustav komercijalnih razmjera s ciljem demonstriranja dokaza o konceptu, ispitivanje različitih sirovina, procjena prinosa ulja i kvalitete proizvoda na komercijalnim razinama. Pokazna postrojenja za dobivanje ulja iz plastike mogu postati komercijalni sustavi nakon testiranja i optimizacije.
- **Komercijalno postrojenje** – kompletna infrastruktura izgrađena prema projektom kapacitetu prema ponudi izvođača. Cilj komercijalnih postrojenja je proizvesti tekući naftni proizvod koji će se prodavati kupcima radi postizanja profitabilnosti.



**Slika 12. Faze komercijalnog razvoja [20]**

Izgrađeni sustavi također mogu imati različiti radni status te se mogu podijeliti na kontinuirani i nekontinuirani rad [20]. Nekontinuirani rad javlja se kod pilot i demonstracijskih postrojenja koji rade u prekidima s obzirom na njihovu namjenu da testiraju različite moguće ulaze i izlaze [20]. Operativni troškovi takvih postrojenja mogu biti veći u usporedbi s komercijalnim postrojenjima. Jednom kada je komercijalno postrojenje dizajnirano, izgrađeno i financirano, a osigurani su ugovori o opskrbi sirovinom i prodaji proizvedenih proizvoda, ono može neko vrijeme raditi s prekidima u radu kako bi se testirala sirovina i izvršila poboljšanja procesa prije postizanja kontinuiranog rada. To se naziva fazom puštanja postrojenja u pogon. Sustavi komercijalnih razmjera moraju biti ekonomski samoodrživa da bi se mogla smatrati

komercijaliziranim sustavom, tj. u ovom slučaju moraju svoju zaradu ostvariti od prodaje krajnjih proizvoda [20].

Tijekom dosadašnjeg razvoja i implementacije postrojenja za pirolizu plastičnog otpada uočene su glavne prepreke zbog kojih neka postrojenja odustaju od komercijalizacije [21]:

- nedostatak potrebne kvalitete,
- varijabilnost ulazne sirovine,
- rukovanje talinom od plastike,
- smanjenje unosa topline zbog stvaranja koksa i taloženja na površinama izmjenjivača topline,
- začepljenja uzrokovana kalcijevim kloridom i anorganskim tvarima,
- začepljenja uzrokovana voskovima i međuproduktima velike molekulske mase,
- skupa čišćenja zbog koksa i začepljenja,
- produkti slabije kvalitete zbog nečistoća, heteroatoma i nestabilnih kemijskih spojeva,
- nizak prinos produkata,
- problemi kod projektiranja postrojenja kod povećavanja kapaciteta.

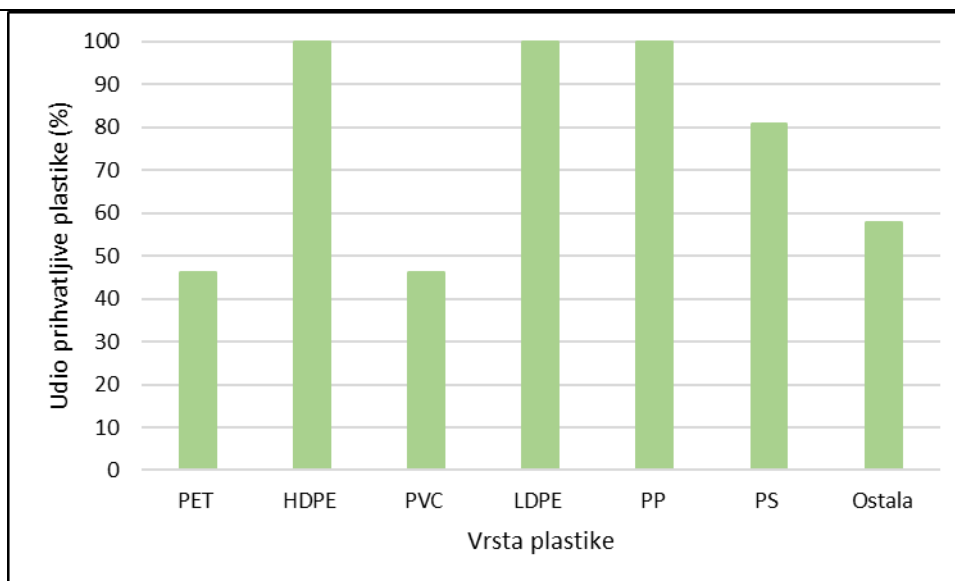
#### 4.1. Ograničenja postrojenja s obzirom na plastični otpad

Pored odabrane tehnologije kojom će se plastični otpad oporabiti u sintetsko ulje, na kvalitetu i količinu dobivenih produkata jednaki utjecaj ima i sastav plastičnog otpada. Postojeća postrojenja velikom većinom oporabljaju plastiku iz miješanog komunalnog otpad u kojem se mogu pronaći sve vrste plastika (Slika 6.). Kako sami miješani komunalni otpad varira od regije do regije tako se i sami sastav otpadne plastike mijenja što ima utjecaj na količinu i kvalitetu završnog proizvoda. Kako bi postrojenja bila konkurentna i zadržavala određenu kvalitetu svojih proizvoda postavljeni su zahtjevi po pitanju ujednačenosti i kvaliteti sastava plastičnog otpada. Pregledom literature (Prilog 1., Tablica priloga 1.3. i Tablica priloga 1.4.) sakupljani su zahtjevi i ograničenja vezana uz sastav sirovine postavljena od strane postrojenja za pirolizu plastičnog otpada te su izdvojena i prikazana u Tablica 1. (Oznake su sukladno oznakama u Prilog 1.)

Tablica 1. Ulazne sirovine i ograničenja za postojeća postrojenja za pirolizu

Vrste plastike (sastav sirovine)	PET [1]	HDPE [2]	PVC [3]	LDPE [4]	PP [5]	PS [6]	Ostala [7]	Dodatna ograničenja sastava
R.B. post.								
P1	+	+	+	+	+	+	+	PET u malim količinama i PVC < 10 %
P2	+	+	+	+	+	+	+	-
P3	+	+	+	+	+	+	+	-
P4		+		+	+			PVC < 4 %
P5		+		+	+	+		-
P6		+		+	+			PE i PP (80-70 %) PS (15-30 %) PET < 3-5 % i PVC < 2-4 %
P7		+		+	+			Onečišćenja < 4 %, pepeo < 4,5 %, klora < 2,5 %
P8	+	+	+	+	+	+	+	-
P9	+	+	+	+	+	+	+	-
P10	+	+	+	+	+	+	+	-
P11	+	+	+	+	+	+	+	-
P12		+		+	+	+		PET < 2 % i PVC ~ 0 %
P13	+	+	+	+	+	+	+	-
P14		+		+	+	+		Ne prihvaća PET i PVC
P15		+		+	+	+		-
P16		+		+	+			40 % PE i 60 % PP
P17	+	+	+	+	+	+	+	Potrebno je ukloniti neplastičnu masu
P18		+		+	+	+		PET < 2 % i PVC < 1 %
P19		+		+	+	+	+	Ne prihvaća PET i PVC
P20		+		+	+			Male količine PET, ne prihvaća PVC i najlon
P21	+	+	+	+	+	+	+	-
P22	+	+	+	+	+	+	+	PET + PVC < 40 %
P23		+		+	+	+	+	Izbjegavati PET, PVC i najlon
P24		+		+	+	+	+	PET < 15 % i PVC < 1 %
P25		+		+	+	+		PET ~ 0 % i PVC < 5 %
P27	+	+	+	+	+	+	+	85 % (PP+PE+PS) i 15 % (ABS+PET+PVC i o.p.)

Na temelju podataka iz Tablica 1. može se zaključiti kako sva postojeća postrojenja iz literature prihvaćaju i oporabljuju HDPE, LDPE i PP. To proizlazi iz toga što te vrste polimera daju proizvode bolje kvalitete i imaju veliki prinos goriva. Nešto manje zastupljeniji polimer je polistiren koju prihvaća oko 80 % i ostala plastika koju prihvaća skoro 60 % postrojenja (Slika 13.). Treba naglasiti da polistiren ima najveći prinos goriva oko 80 - 90 % dok se ta brojka za HDPE, LDPE i PP kreće između 60 - 80 % [20][22]. Postrojenja koja oporabljuju otpadnu plastiku pomoću pirolize najmanje prihvaćaju dvije vrste plastike, a to su PET i PVC.



**Slika 13. Grafički prikaz ulaznih sirovina u postojećim postrojenjima**

Za PET i PVC su postavljena različita dodatna ograničenja kako bi se smanjio njihov utjecaj na sami proces pirolize. U nekim postrojenjima kako je navedeno PET i PVC se ne prihvaćaju kao ulazna sirovina dok postrojenja koja prihvaćaju ovu vrste plastike imaju ograničenja da udio PET-a i PVC-a ne smije biti veći od 5 %. Jedan od razloga zašto su ovakva ograničenja za PET i PVC što je njihov prinos goriva oko 30 % te je znatno niži od ostalih [22]. Tijekom pirolize veliki dio PET plastike završi u obliku ugljeniziranog ostatka koji predstavlja problem prilikom izmjene topline u komori za pirolizu zbog lijepljenja po stijenkama izmjenjivača, ali i prilikom njegovog čišćenja. Osim toga PET sadrži kisik koji može potaknuti da reakcija pirolize pretvori u izgaranje [20]. Pirolizom PET-a nastaju policiklični ugljikovodici i derivati bifenila koji su štetni za ljudsko zdravlje i okoliš [23]. S druge strane PVC sadrži klor koji se tijekom postupka pirolize pretvara u plin klorovodik i dioksine, koji mogu uzrokovati koroziju na samom postrojenju za pirolizu, ali i sustavu izgaranja u kojim će se konačni proizvod koristiti [20]. Većina sustava projektirana je za hvatanje i uklanjanje klorovodika i drugih kiselina koje bi mogle biti prisutne zbog aditiva u otpadnoj plastičnoj sirovini.

#### **4.1.1. Zahtjevi za predobradu ulazne otpadne plastike**

Za razliku od drugih tehnologija koja oporabljaju miješani komunalni otpad, tehnologija koja koristi pirolizu zahtjeva prethodno sortiranje kako bi se otpadna plastika izolirala od ostalih tokova otpada. Postupak započinje uklanjanjem neplastične mase kao što su staklo, papir, metal koji nisu poželjni u toku sirovine koja odlazi na danju obradu. Nakon toga se plastični otpad usitnjava kako bi se dobila što ravnomjernija veličina čestica. Veličina čestica utječe na prijenos

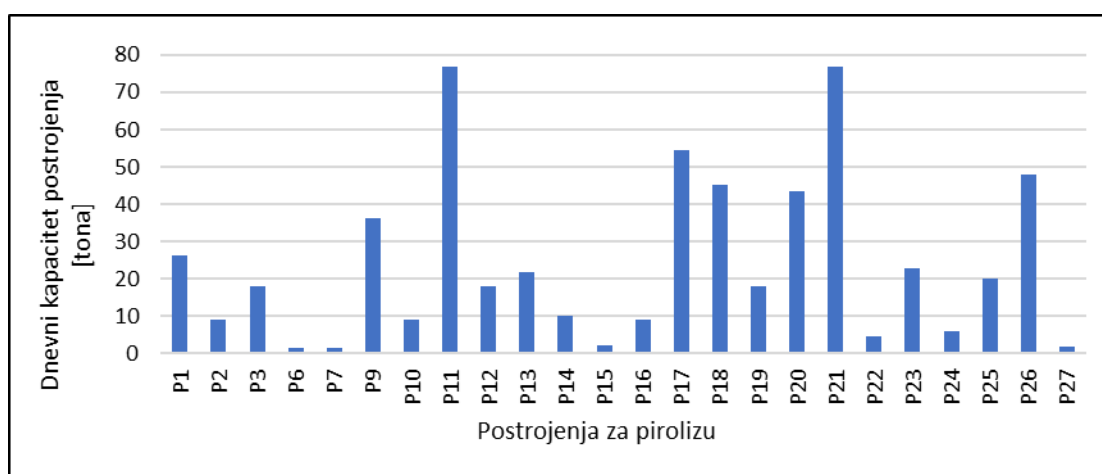
mase i topline u reaktoru za pirolizu jer zagrijavanje većih čestica traje dulje nego zagrijavanje manjih. Postrojenja imaju različite zahtjeve za veličinom čestica, u nekim je potrebno da čestice budu manje od 1 cm dok u nekim slučajevima veličina čestice može biti i do 5 cm. Neke tehnologije zahtijevaju da se čestice plastike nakon usitnjavanja osuše kako bi se smanjio sadržaj vlage u sirovini koja je u nekim postrojenjima dozvoljena do 5 %. To proizlazi iz toga što vlaga ili voda u sirovini utječu na krajnji proizvod, ali isto tako zahtjeva potrošnju više energije tijekom samog procesa. Prije ulaska sirovine u komoru za pirolizu neke tehnologije zahtijevaju da se plastika zagrije i djelomično rastali.

Postrojenja mogu i ne moraju poduzeti prethodno sortiranje i preradu otpadne plastike na licu mjesta, sve ovisi o njihovom poslovnom modelu. Neka postrojenja nabavljaju plastičnu sirovinu od dobavljača koji pripremaju ciljanu vrstu plastike prije isporuke, što obično rezultira povećanim troškovima sirovine.

## 4.2. Tehno-ekonomska analiza parametara postojećih postrojenja za pirolizu

### 4.2.1. Tehnološke osnove postojećih postrojenja

Tipični kapaciteti postrojenja za termokemijsku konverziju plastičnog otpada kreću se u rasponu od 9 - 50 tona po danu kao što se može vidjeti iz Priloga 1. u Tablica priloga 1.3. i Tablica priloga 1.4., iako postoje i postrojenja manjih kapaciteta od 1 do 5 tona po danu (Slika 14.). Kompanija Blest nudi postrojenja koji obrađuju manje od 1 tone po danu otpadne plastike, dok kompanije Polyfuel i Pyrocrat Systems LLP nude tehnologije od 3, 6 i 12 tona po danu [20].



Slika 14. Dnevni kapaciteti postojećih postrojenja za pirolizu

Treba istaknuti da kompanija Klean Industries ima u ponudi postrojenje čak od 150 tona po danu [20]. Kapaciteti postrojenja za pirolizu su manjeg kapaciteta u odnosu na druge sustave

za uporabu komunalnog otpada, poput spalionica i postrojenja za rasplinjavanje koji obično obrađuju više od 200 tona po danu [20].

Veličina zemljišta za izgradnju postrojenja isto ima veliki utjecaj na kapitalne troškove. Potrebna površina za postrojenje kreće se od 280 m<sup>2</sup> za modularna postrojenja malog kapaciteta od 2,72 tona po danu (skraćeno TPD) pa sve do 1860 m<sup>2</sup> za postrojenja od 54,4 TPD (Tablica 2.). Broj ljudi za normalan rad postrojenja ovisi o veličini postrojenja, automatizaciji posla i odabiru tehnologije. Za normalan rad postrojenja PK Clean potrebno je 2-3 radnika u smjeni dok Agilyx u svome postrojenju ima 31 zaposlenika. Treba naglasiti da ove kompanije imaju i sortirnice pa je potreban veći broj radnika u odnosu na kompanije koje imaju samo postrojenje za pirolizu u koje dolazi samo prihvatljiva ulazna sirovina za pirolizu.

**Tablica 2. Tehnička karakteristike postojećih postrojenja za pirolizu**

Dobavljači tehnologije	Kapacitet (TPD)	Broj potrebnih zaposlenih za komercijalni rad postrojenja	Raspoloživost postrojenja (%)	Potrebna površina za postrojenje (m <sup>2</sup> )	Vrijeme potrebno za implementaciju sustava (mj.)	Izvor
<b>Proizvođači sintetskog ulja</b>						
Agilyx	45,36	31	92	1600	12-15	[20]
MK Aromatic Limited	10	-	82	-	-	[20]
PK Clean	9,072	2-3 ljudi/smjena	90	280	6 za opremu	[20]
	18,144	4-5 ljudi/smjena				
Pyrocrat Systems LLP	2,72	10	82	250	3 - 4	[20]
	5,44	12		500		
	10,66	12		750		
Envion	26,3088	-	-	-	-	[24]
Climax	18,144	-	-	-	-	[24]
<b>Proizvođači destiliranih goriva</b>						
Golden Renewables	21,7728	20	90	464,5	4 za opremu	[20]
JBI	18,144-27,216	-	75	418	-	[20] [24]
Vadxx	54,432	16 radnika, 1 inženjer, 1 direktor	90	1860	9 - 12 za opremu i izgradnju	[20]
Nexus Fuels	45,36	20	96+	-	9-12	[20]
Cynar	20	10 radnika, 2 nadzornika	82	783	18 za opremu i izgradnju	[20] [25]

Jedan od bitnijih parametara svakog postrojenja je njegova raspoloživost o kojoj ovisi naposljetku uspješnost poslovanja. Iz Tablica 2. vidljivo je da se raspoloživost postrojenja kreće u rasponu od 75 % do 96 % te da je prosječna raspoloživost postrojenja oko 87 %. Ovo nam

govori da postrojenja kroz cijelu godinu prosječno rade oko 320 dana te da su oko mjesec i pol dana u remontu.

#### **4.2.2. Ulazni i izlazni tokovi postojećih postrojenja za pirolizu**

Tijekom prikupljanja podataka o postojećim postrojenjima za termokemijsku konverziju plastičnog otpada cilj je bio modelirati materijalne i energetske tokove postrojenja koji se koriste za obradu toka plastičnog otpada. Stoga su najvažniji podaci o materijalnim i energetskim ulaznim i izlaznim tokovima, tj. proizvodnji i potrošnji uključujući ne samo korisne tokove nego i nusproizvode, otpadne tokove i štetne emisije za okoliš. Pretraživanjem literature prikupljeni su parametri o postojećim postrojenjima te su nastavku dati ulazni i izlazni tokovi:

##### **•Potrošnja energenata i proizvodnja**

Tijekom termokemijske konverzije, tj. pirolize plastičnog otpada troše se najčešće energenti kao što su prirodni plin i električna energija koji služe za zagrijavanje reaktora za pirolizu, rad pumpi za cirkuliranje radnih tvari i vode za hlađenje proizvoda te u konačnici za obradu istih proizvoda. Treba naglasiti da se jedan dio energenata troši na nusprodukte kao što je pročišćavanje dimnih plinova, voda i otpadnih tokova. U nekim slučajevima pored prirodnog plina i električne energije za dobivanje energije potrebne za sami proces koriste se nekondenzirajući plinovi iz procesa, nafta i toplina iz drugih procesa. Najučestaliji energenti koji se još koriste tijekom procesa, a nisu namijenjeni za proizvodnju energije su razni katalizatori i kemikalije, dušik, NaOH i voda.

Kako je već istaknuto produkti pirolize ovise o ulaznoj sirovini, tipu reaktora i konceptu odvijanja procesa. Pregledom literature uočeno je da se kao najučestaliji produkti termokemijske konverzije plastičnog otpada navode sintetsko ulje, vosak (teže frakcije), lake frakcije, plinske frakcije, benzin i dizel.

##### **•Onečišćenje vode**

Tijekom pirolize postrojenja koriste vodu za hlađenje kondenzirajućih para pirolitičkog plina u tekući naftni proizvod na kraju procesa ili za kondicioniranje sintetskog ulja. Kondicioniranje ulja obuhvaća različite procese za stabiliziranje krajnjih proizvoda od hlapljivih tvari kako bi bili što kvalitetniji za tržište. Postupci kondicioniranja ulja koji se koriste u termokemijskim sustavima uključuju: frakcioniranje, destilaciju, hidrogeniranje i vodene tretmane [20]. Zbog



ovih postupaka potrebno je pratiti zagađenje voda koje mogu imati utjecaj na okoliš neadekvatnim zbrinjavanjem.

#### •Nepoželjni nusprodukti

Osim korisnih produkata pirolize kao što su sintetsko ulje i nekondezirajući plinovi, tijekom procesa nastaju i kruti ostaci kao što su ugljenizirani ostaci, čvrsti ostaci, potrošeni katalizatori i kemikalije, ostaci za spaljivanje i neopasni kruti otpad. Nepoželjni nusproizvodi sadrže aditive i onečišćene, poput vlakana i stakla koji u sustav ulaze kao dio sirovine. Neka postrojenja istražuju alternativne primjene za ugljenizirani ostatak, uključujući upotrebu prilikom izgradnji cesta ili kao prekrivni materijal. Ugljenizirani ostatak bi se mogao spaljivati u spalionicama ili na licu mjesta kako bi se iskoristila energija pohranjena u njemu. MK Aromatics Limited jedini je prijavio uspješnu prodaju tretiranog (uklanjanje metala) ugljeniziranog ostatka koji se iskorištava kao punilo za elektrode u Indiji [20].

#### •Onečišćenje zraka

Većina emisija koje se emitiraju u zrak tijekom termokemijske konverzije plastičnog otpada potječu od proizvodnje toplinske energije koja je potrebna za proces. Izvor jednog dijela emisija može biti i spaljivanjem nekondenzirajućih plinova na baklji, u slučaju ako se nekondezirajući plinovi ne koriste za proizvodnju električne energije kako bi se smanjila potreba za osnovnim energentom za dobivanje toplinske energije. U najvećoj mjeri to su emisije PM, CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, ugljikovodici, NO<sub>x</sub>, Pb, VOC i NH<sub>3</sub> dok neka postrojenja emitiraju još i emisije kao što su metan, živa, HCl, HF, TOC, HAP i dioksini i furani.

U Tablica 3. predočeni su referentni podaci postojećih postrojenja za termokemijsku konverziju otpadne plastike koji proizlaze iz prikupljene literature. Spektar referentnih podataka proizlazi iz uspoređivanja postojećih komercijalnih i demonstracijskih postrojenja u svijetu. Iz prikupljene literature prikupljen je široki niz tehničkih podataka o postojećim postrojenjima koji su detaljno dani u Prilogu 1. u Tablica priloga 1.3. i Tablica priloga 1.4. Prilikom kreiranja podataka prikazanih u Tablica 3. korišten je „kriterij isključivanja“, odnosno izostavljeni su podaci koji značajno odstupaju od ostalih podataka u analiziranom setu podataka. Na taj način dobiven je bolji uvid u tehničke podatke postojećih postrojenja, tj. relevantnije srednje vrijednosti prikupljenih podataka.

Tablica 3. Analiza ulaznih i izlaznih postojećih postrojenja za pirolizu

Ulazni i izlazni tokovi procesa		Jedinica	Vrijednosti			Srednja vrijednost		
			Min.		Max.			
Ulaz	Potrošnja energije		kWh/tona	16,499	-	992,1	330,20	
	Ostali ulazi	Katalizatori i kemikalije	kg/tona	0,278	-	39,25	15,04	
		NaOH	kg/tona	0,167	-	0,4	0,28	
		Voda	l/tona	50	-	2000	851,72	
		Voda za hlađenje	l/tona	66,67	-	600,86	321,61	
	Dodatno gorivo		Priradni plin	MWh/tona	0,0013	-	1,28	0,430
Izlaz	Energetski proizvodi	Sintetsko ulje	kg/tona	513,53	-	893,79	756,78	
		Vosak-teže frakcije	kg/tona	100	-	510	290,59	
		Lake frakcije	kg/tona	175	-	700	434	
		Plinska frakcija	kg/tona	60	-	312,07	124,66	
		Benzin	kg/tona	10	-	11,5	10,75	
		Dizel	kg/tona	718,06	-	900	804,51	
	Ostaci	Ugljenizirani ostatak	kg/tona	50	-	180	90,02	
		Čvrsti ostaci	kg/tona	80	-	200	140	
		Ostatak spaljivanja	kg/tona	1	-	66	33,5	
		Neopasni kruti otpad	kg/tona	10	-	130	74,05	
	Gubici vode			l/tona	47		1669	607
	Podaci o emisijama u zraku	PM	kg/tona	0,00267	-	0,0891	0,037	
		CO <sub>2</sub>	kg/tona	250	-	450	370,34	
		CO <sub>2eq</sub>	kg/tona	56,22	-	582,43	222,78	
		Ugljikovodici	kg/tona	2	-	4	2,743	
		SO <sub>2</sub>	kg/tona	0,007	-	2	0,515	
NO <sub>x</sub> kao NO <sub>2</sub>		kg/tona	0,0182	-	1,66	0,68		
CO		kg/tona	0,145	-	0,93	0,525		
Pb		kg/tona	0,001	-	0,01	0,0055		
VOC		kg/tona	0,0085	-	0,8	0,257		
NH <sub>3</sub>		kg/tona	0,005	-	0,006	0,0055		

Postojeća postrojenja koja su obuhvaćena literaturom (Prilog 1., Tablica priloga 1.3. i Tablica priloga 1.4.) koriste različite tehnologije pirolize plastičnog otpada te se isto tako međusobno razlikuju prema dobivenim proizvodima procesa. Određena postrojenja koriste termalnu pirolizu prilikom konverzije otpadne plastike (Tablica 4.) dok postrojenja obuhvaćena Tablica 5. koriste katalitičku pirolizu za dobivanje konačnih produkata. Bez obzira na korištenu tehnologiju pirolize većina postrojenja kao konačni proizvod ima sirovo sintetsko ulje koje kao takvo prodaje na tržište, s druge strane, postoji mogućnost obrade sirovog sintetskog ulja na lake frakcije i teže frakcije (vosak). Važno je istaknuti kako postoje i postrojenja koja provode destilaciju dobivenog sintetskog ulja u vrijednije konačne proizvode kao što su dizel i benzin. Pored sintetskog ulja koji je ciljani produkt pirolize, neka postrojenja kao dodatni produkt imaju i plinovitu frakciju koju iskorištavaju za proizvodnju toplinske energije potrebnu za pirolizu ili jednostavnije, spaljuju na baklji. Tvrtnke Cynar, PK Clean, RES Polyflow i Vadxx proizvedene plinske frakcije iskorištavaju na licu mjesta za dobivanje toplinske energije, dok će tvrtka MK

Aromatics Limited u budućim tehnologijama iskorištavati nekondenzirajuće plinove za potrebe procesa [20].

**Tablica 4. Analiza proizvoda termalne pirolize**

R.B.post.	Sintetsko ulje	Lake frakcije	Teže frakcije	Dizel	Plinska frakcija	Ukupno:			
						Tekući proizvod	Plinoviti proizvod		
Jedinica (kg/tona)									
P1	628,62				150-200	628,62	150-200		
P2	893,79					893,79	0,00		
P3	744,82	150-200				919,82	0,00		
P6		340	510		150	850	150		
P7		265	448		147	713	147		
P8	822				90	822	90		
P9	800				100	800	100		
P10				253,24	150	253,24	150		
P11				718,1		718,1	0,00		
P12	886,7				60	886,7	60		
P13	673,89				150	673,89	150		
P14				900		900	0,00		
P15	858				78,5	858,00	78,50		
P16	598				312,1	598	312,1		
P17		690			180	690	0,00		
P18	832,79		30		80	862,788	80,00		
<b>Referentna vrijednost:</b>						Min.	Max.	Min.	Max.
						253,24	919,82	60	312,1
<b>Srednja referentna vrijednost:</b>						754,25		135,7	

Iz analize proizvoda dobivenih pomoću termalne pirolize može se vidjeti da su količine tekućih i plinovitih frakcija istih redova veličina bez obzira na različite izvedbe postrojenja. Postrojenje koje koristi tehnologiju termalne pirolize prosječno proizvodi približno 754 kg tekuće frakcije i 136 kg plinovite frakcije po toni otpadne plastike.

S druge strane analizom proizvoda dobivenih katalitičkom pirolizom (Tablica 5.) ustanovljeno je da su tekući i plinoviti produkti isto istog reda veličina. Prosječna količina korištenih katalizatora tijekom procesa je oko 15 kg po toni otpadne plastike. Važno je naglasiti da ta brojka ovisi o kvaliteti i sastavu ulazne sirovine, ali da je upotreba katalizatora za pojedina postrojenja dodatna opcija. U prosjeku svako katalitičko postrojenje proizvede 766 kg tekuće frakcije i 139 kg plinovite frakcije po toni ulazne sirovine.

Tablica 5. Analiza proizvoda katalitičke pirolize

R. B. post.	Sintetsko ulje	Lake frakcije	Teže frakcije	Benzin	Dizel	Plinska frakcija	Količina katalizatora i kemikalija	Ukupno:			
								Tekući proizvod		Plinoviti proizvod	
Jedinica (kg/tona)											
P19				11,5	850	80	0,278	861,5		80	
P20	780,18					99,8	Nepoznata količina	780,18		99,80	
P21	650,48					102,43		650,48		102,43	
P22	886,7						Opcija- ovisi o sirovini	886,7		0,00	
P23	744,83					175	Nepoznata količina	744,83		175	
P24		700					11	700		0	
P25	513,53		100			150	Nepoznata količina	613,53		150	
P26				10	750		0,4	760		0	
P27	794,11		104,35			88,7	39,25	898,46		88,7	
<b>Referentna vrijednost</b>								Min.	Max.	Min.	Max.
								613,5	898,5	80,00	175
<b>Srednja referentna vrijednost</b>							15,043	766,19		139,19	

#### 4.2.3. Ekonomska analiza postojećih postrojenja za pirolizu

Na poslovanje postrojenja za termokemijsku konverziju plastičnog otpada utječu brojni faktori kao što su kapitalni troškovi, troškovi rada i održavanja i prihodi. Razni parametri utječu na te iste faktore koji su prikazani u Tablica 6.

Tablica 6. Prikaz parametara koji utječu na ekonomski sustav postrojenja za pirolizu [20]

Kapitalni troškovi	Troškovi rada i održavanja	Prihodi
Kapacitet postrojenja	Količina i trošak dodatka u procesu (voda, struja, katalizatori)	Prinos sintetskog ulja
Veličina zemljišta za postrojenje	Sirovina i troškovi prijevoza	Tržišna cijena naftnih proizvoda
Infrastrukturni zahtjevi	Zbrinjavanje ugljeniziranog ostatka	Mogućnost naknade za prihvaćanje otpadne plastike
Predobrada na licu mjesta	Zbrinjavanje otpadnih voda	
Poslovni plan	Troškovi prijevoza goriva	
Tehnologija	Troškovi održavanja	
Način financiranja	Osiguranje	
	Naknade i bonusi	

Kapitalni troškovi jako ovise o dobavljaču opreme i lokaciji postrojenja. Iz tog razloga kapitalni troškovi postrojenja kreću se od 1,8 mil. € pa sve do 16,2 mil. € za opremu i instalaciju iste ili od 133 € do 1455 € po toni godišnjeg kapaciteta, ukupni pregled kapitalnih troškova svih postrojenja dan u Tablica 7. Na troškove u velikoj mjeri ovisi da li je predobrada unutar

postrojenja, zatim kapacitet postrojenja, tehnologija, poslovni model i troškovi lokalnog razvoja.

Fiksni troškovi rada i održavanja uključuju održavanje postrojenja, nabavu energenata i zbrinjavanje ostatka procesa koji čine većinu troškova, međutim, varijabilni troškovi kao što nabava i prijevoz sirovine i prijevoz goriva također mogu imati značaj utjecaj na troškove rada i održavanja. Troškovi rada i održavanja za postojeća postrojenja kreću se u rasponu 0,141 - 0,396 €/litri, a ukupni pregled troškova rada i održavanja postrojenja za pirolizu dan je u Tablica 7. Dobavljači tehnologije tvrde da bi se troškovi rada i održavanja smanjila za 50 % kada bi sirovinu nabavljali besplatno [20].

**Tablica 7. Ekonomska analiza postojećih postrojenja za pirolizu**

Dobavljači tehnologije	Kapacitet (TPD)	Kapitalni troškovi (Mil. €)	Kapitalni troškovi (€)/TPG	Troškovi rada i održavanja (€/litri)	Izvor
<b>Proizvođači sintetskog ulja</b>					
Agilyx	45,36	10,80-11,75	583-630	-	[20]
MK Aromatic Limited	10	3,18	864	0,22-0,28	[20]
PK Clean	9,072	> 1,8	> 495	0,141-0,198	[20]
	18,144				
Pyrocrat Systems LLP	2,72	238.692 TPD	133-252	0,396	[20]
	5,44	356.855 TPD		0,232	
	10,66	529.250 TPD		0,148	
Envion	26,3088	6,84 ili 229.116 TPD	621	16-54*po toni plastike	[24]
Climax	9,072	204.057 TPD	-	-	[24]
<b>Proizvođači destiliranih goriva</b>					
Golden Renewables	21,7728	4,5-5,4	776-931	0,169	[20]
JBI	18,144-	4,5-7.2 ili ~479.127 TPD	744-1191	-	[20]
	27,216				[24]
Vadxx	54,432	15,3-16,2	694-741	-	[20]
Nexus Fuels	45,36	8,10-10,8	419-513	-	[20]
Cynar	20	8,79	1455	-	[20]
					[25]

Poslovni modeli se razlikuju ovisno o razini sudjelovanja koju dobavljač tehnologije ima u radu postrojenja. U ranim fazama razvoja postrojenja dobavljači teže ka visokom stupnju uključenosti u rad i razvoj postrojenja kako bi se osigurao komercijalni rad [20]. Dostupni poslovni modeli uključuju [20]:

- javno privatno partnerstvo,
- zajedničko upravljanje (partnerstvo),
- prodaja i servis opreme,

- licenciranje i obuka radnika,
- vlastiti razvoj tehnologije.

## 5. Pos-Plast d.o.o.

Tvrtka Pos - Plast d.o.o nalazi se u Vrbovcu i vrlo je aktivna u reciklaži plastičnog otpada u posljednjih 15 godina. Današnja tvrtka je na samim počecima bila obiteljski obrt, koja se bavila brizganjem plastike. S vremenom su promijenili način poslovanja te obrt mijenja naziv u Pos - Plast d.o.o. Kako je tvrtka rasla i stjecala iskustvo rada s različitim materijalima, promijenili su djelatnost i pokrenuli reciklažu plastičnih proizvoda. Danas koriste najmoderniju tehnologiju te izrađuju visokokvalitetne granulate (Slika 15.) pogodne za razne namjene plastičarske industrije, koje prodaju na domaćem i stranom tržištu. Poduzeće se trenutno bavi reciklažom plastike, izradom mljevenih i granuliranih materijala, prodajom originalnih materijala, otkupom i zbrinjavanjem neopasnog otpada. Uz sve navedeno preuzimaju ostatke ili otpatke iz proizvodnje koje treba zbrinuti propisano zakonskim regulativama. Tvrtka posluje prema propisima te tako posjeduje dozvole za gospodarenje neopasnim otpadom (R3) što uključuje prijevoz, posredništvo, izvoz i uvoz neopasnog otpada.



**Slika 15. Produkti dobiveni nakon mehaničke obrade u Pos-Plastu-u [26]**

Tehnološki proces gospodarenjem neopasnim otpadom unutar Pos-Plast-a d.o.o. kreće s prikupljanjem samog otpada. Sakupljanje i interventno sakupljanje obavlja se po pozivu, opremljenim vozilom na način da je spriječeno rasipanje otpada te širenje buke, prašine ili mirisa. Nakon toga slijedi prihvrat neopasnog otpada koji se dovozi teretnim vozilom na ulaz u građevinu. Zaposlenici Pos - Plast-a d.o.o. preuzimaju prateću dokumentaciju o otpadu te se obavlja vizualni pregled dopremljenog otpada. Vizualnim pregledom otpada utvrđuje se da li otpad koji se preuzima odgovara pratećoj dokumentaciji. Godišnje se prihvati oko 100.000 tona neopasnog otpada. Prihvaćeni otpad skladišti se po vrstama i ključnim brojevima u prostoru namijenjenim za prihvrat i skladištenje neopasnog otpada. Nakon toga slijedi odstranjivanje

nečistoća postupkom R12 (deambalažiranje, sortiranje, izdvajanje nečistoća), godišnje 30.000 tona neopasnog otpada prođe kroz ovaj proces. Potom slijedi uporaba postupkom R3 koja je namijenjena za obradu/recikliranje otpadne plastike. Sortirana i očišćena otpadna plastika se mehanički obrađuje uređajima i opremom namijenjenoj mehaničkoj obradi. Cilj mehaničke obrade je usitnjavanje (mljevenje) otpadne plastike u specijaliziranim mlinovima radi dobivanja usitnjene plastike, odnosno sirovine za proizvodnju plastike. Godišnje oko 10.000 tona otpadne plastike prođe kroz mehaničku obradu. Plastika se otprema do strojeva koji vrše obradu (usitnjavanje, mljevenje, rezanje). Razina do koje će se plastika usitnjavati ovisi o zahtjevima kupaca, odnosno tržišta. Usitnjeni materijal se prema potrebi dodatno granulira ekstruzijom tj. prolaskom kroz cijev gdje se topi, zatim kroz sita radi odstranjivanja nečistoća te se ponovno reže u granule. Nakon mehaničke obrade otpad, tj. dobiveni proizvod, se skladišti u jumbo vrećama (granulati plastike) na paletama na otvorenom skladištu ili se preša i balira na paletama.

Tijekom same mehaničke obrade otpadne plastike iz industrije pored dobivenih granula, nastaje i frakcija koja se ne može razvrstati u dovoljno čisti proizvod. U sljedećem poglavlju će biti opisan sastav takve otpadne frakcije, koji je važan zbog daljnjeg odabira načina uporabe same frakcije.

### 5.1. Sastav industrijskog plastičnog otpada

Sastav otpada koji se ne može mehanički obraditi u Pos - Plast-u d.o.o. dobiven je pomoću FTIR analize te je prikazan u Tablica 8. Za otpad od kojeg se ne može dobiti dovoljno čista frakcija koja bi se prodavala na tržištu, potrebno je naći novi oblik uporabe. Na Slika 16. prikazani su uzorci koji su se koristili tijekom FTIR analize.



Slika 16. Prikaz uzoraka korištenih u FTIR analizi Pos-Plast otpada



Kao rješenje se nudi korištenje postupka pirolize pomoću kojeg bi se dobili vrjedniji produkti koji bi se mogli dalje prodavati na tržištu. Sastav otpada koji bi ulazio u pirolizu u Pos - Plast d.o.o. je drugačijeg sastava nego je to prikazano na Slika 6., koja prikazuje vrste plastike koje se koriste u proizvodnji plastičnih materijala u EU. Razlog tome je što Pos - Plast d.o.o. prihvaća i skuplja prvenstveno industrijski otpad, a s druge strane, što je još važnije taj otpad je već prošao kroz procese odstranjivanja nečistoća i mehaničku obradu. Iz Tablica 8. možemo vidjeti kako PP i PET plastika čine gotovo 50 % uzorka otpada, a zajedno s PC i ABS čine gotovo 90 % otpada za koji trenutno ne postoji uporaba. U ostatku uzoraka još se pojavljuju različiti polimeri poput: klorirani polietilen (CPE), polietilen (PE), poliamid (PA), EVOH i EAA. Uz polimere u uzorku se u malim količinama pronađeni aluminij i celuloza.

**Tablica 8. Sastav otpada dobiven pomoću FTIR analize**

Materijal	Masa (gram)	Masa (%)
PC	20,125	22,02
ABS	17,225	18,85
PET	21,4167	23,43
CPE	2,95	3,23
PP	22,5167	24,64
PE	2,67	2,92
PA	0,2	0,22
EVOH	0,93	1,02
EAA	0,267	0,29
Al	0,4	0,44
Celuloza	2,7	2,94
Ukupno	91,4	100,00

U nastavku će biti opisane ostale vrste plastike i njihova primjena koja nije uzeta u obzir u poglavlju 2.2., a pojavljuje se u otpadu koji bi se mogao pirolitički obraditi.

- **Polikarbonat, PC**

Polikarbonati (PC) su linearni poliesteri ugljične kiseline koji pripadaju skupini termoplastičnih polimera koji u svojoj kemijskoj strukturi sadrže karbonatne skupine (-O-(C=O)-O-) [11]. PC pokazuju dobru otpornost na temperaturu i otpornost na udarce. Koriste se u proizvodnji jakih i žilavih materijala, a neke vrste su prozirne pa zbog toga imaju široku primjenu u nekim granama industrije. Primjenu imaju kao građevinski materijal za ostakljenje i

pokrivne ploče, za neke dijelove u automobilskoj i elektro industriji, kao i za izradu raznih sportskih rekvizita i pomagala.

- **Akrilonitril budatien stiren, ABS**

Akrilonitril budatien stiren poznatiji pod nazivom ABS je neprozirni termoplastični i amorfni polimer [27]. ABS se najčešće polimerizira postupkom emulzije (smjese nekoliko proizvoda). ABS je dobiven polimerizacijom stirena i akrilonitrila u prisutnosti polibutadiena. Udjeli mogu varirati od 15 % do 35 % akrilonitrila, od 5 % do 30 % butadiena i od 40 do 60 % stirena [27]. Ova kombinacija polimernih lanaca čini ABS jačim od čistog polistirena. ABS ima snažnu otpornost na korozivne kemikalije i fizičke utjecaje. Različite kombinacije u sastavu ABS-a mogu se koristiti za izmjenu otpornosti na udarce, žilavosti i otpornosti na toplinu. Ima nisku točku taljenja što ga čini posebno jednostavnim za upotrebu u procesu injekcijskog prešanja ili za dobivanje proizvoda 3D printanjem. ABS je relativno jeftin, cijena mu se obično kreće između PP i PC. Koristi se za proizvodnju tipkovnica, kućišta računala, zidne utičnice i igračke.

- **Klorirani polietilen, CPE**

Klorirani polietilen (CPE) dobiva se reakcijom kloriranja HDPE, djelovanjem klora na polietilen, mehanizmom slobodnih radikala uz katalitičko djelovanje UV svjetla ili inicijatora [28]. Kloriranjem ispod ili iznad tališta ili korištenjem oba načina dobiva se različita struktura CPE. Svojstva CPE nalaze se između polietilena i poli(vinil-klorida), a udio klora u PE lancu utječe na svojstva nastalog polimera. U kloriranom polietilenu sadržaj klora se kreće u rasponu od 25 do 45 % [28]. Prednosti CPE su vrlo dobra otpornost na ozon, oksidaciju, abraziju, alkohol, lužine i kiseline. Ima dobru termičku stabilnost i slabo gori zbog prisutnosti klora.

- **Poliamid, PA**

Poliamidi (PA) su kristalasti, uglavnom plastomerni materijali kojima ponavljane jedinice sadrže alifatske ili aromatske segmente povezane amidnim vezama ( $-\text{CO}-\text{NH}-$ ) [11]. Neke od značajki poliamida su: otpornost na starenje pod utjecajem visokih temperatura i tokom dugih vremenskih perioda, velika snaga i krutost, odlična dielektrična svojstva, dobra otpornost na abraziju i izvanredna kemijska otpornost. Široku primjenu imaju u automobilskoj industriji (kutije za zračne jastuke, rešetka prednje maske i ručice na vratima), u elektroničkoj industriji (prekidači, razvodni uređaji niskog napona) te u svakodnevnoj primjeni kao folija za pakiranje.

---

- **Etilen-(vinil-alkohol), EVOH**

Etilen/vinil-alkohol (EVOH) je kristalasti kopolimer. EVOH sastoji se od ponavljanih jedinica etilena i vinil-alkohola. Ovaj polimerni materijal se primjenjuje kada je postavljen zahtjev da proizvod bude nepropustan za plinove i ugljikovodike. Zbog tih svojstava, sve se više koristi u industriji pakiranja hrane i lijekova s ciljem sprečavanja prodora kisika i vlage, odnosno produljenja roka trajanja pakiranog sadržaja, ali i sprečavanja prolaska aromatskih spojeva zbog čega može doći do gubitka mirisa upakiranog proizvoda ili apsorpcije nepoželjnih mirisa iz okoliša.

- **Etilen-(akrilna kiselina), EAA**

Etilen-(akrilna kiselina) (EAA) je kopolimer etilena i akrilne kiseline koji nudi izvrsno prijanjanje na podloge bez potrebe za temeljnim premazima, uključujući metalnu foliju, papir i podloge za pakiranje. Kombinacijom etilena i akrilne kiseline dobiva se EAA kopolimer koji pokazuje dobru otpornost na kiselinu, ulje i masnoću, a istovremeno pružaju izvrsnu otpornost na kidanje i abraziju. EAA se primjenjuje za ambalažu, pakiranje smrznute hrane i vreće za led.

### **5.1.1. Industrijski otpad pogodan za pirolizu**

Kako je već ranije istaknuto količina i kvaliteta dobivenih produkta putem pirolize ovise o sastavu sirovine i odabranoj tehnologiji. Kvaliteta produkata dobivenih pomoću pirolize treba biti što veća kako bi bili konkurentniji na tržištu. S druge strane, količina proizvedenog proizvoda isto tako treba biti što veća kako bi postrojenje moglo isplativo poslovati. Problem koji se javlja kod svakog postrojenja za termokemijsku konverziju plastičnog otpada je varijabilnost sastava ulazne sirovine. Ulazna sirovina je koja će se oporabiti pirolizom u Pos - Plastu d.o.o. je ostatni dio plastičnog otpada koji je prošao kroz fazu odstranjivanja nečistoća, usitnjavanje, ali i dio plastike koja nije moguće mehanički oporabiti ili proizvedeni granulati poslije mehaničke uporabe ne zadovoljavaju kvalitetom. Kako unutar ostatnog dijela plastičnog otpada postoje vrste plastike koje bi mogle imati loš utjecaj na kvalitetu proizvoda pirolize potrebno je odrediti dijelove prikladne za ovakav način obrade. U osnovi, različite vrste plastike imaju različiti sastav te iz toga proizlazi različiti prinos tekućeg goriva kada se različite vrste plastičnog otpada podvrgavaju postupku pirolize.

### • Polipropilen, PP

Kao ulazna sirovina za pirolizu polipropilen je prikladna vrsta plastike koja ima dobar prinos sintetskog ulja sa svojstvima sličnim benzinu i dizelu. Termokemijskom konverzijom polipropilena prinos sintetskog ulja kreće se do skoro 80 % ovisno u uvjetima procesa. To je razlog što je PP lako razgradivi poliolefin zbog svoje granaste strukture. Drugi razlog može biti veći udio tercijarnih ugljika prisutnih u polipropilenskim lancima, što pospješuje cijepanje C-C veza [29]. Udio ugljeniziranog ostatak je do 5 - 6 %, a ostatak proizvoda javlja se u obliku plinske frakcije [30]. Povišenjem temperature pirolize polipropilena smanjuje se prinos nekondezirajućih plinova i ugljeniziranog ostatka dok se prinos sintetskog ulja povećava. Iz Tablica 9. možemo vidjeti da gustoća sintetskog ulja dobivenog iz polipropilena kreće se od 790,3 do 796,9 kg/m<sup>3</sup> što je malo više od gustoće benzina (715 - 780 kg/m<sup>3</sup>), a nešto manje od gustoće dizela (815 - 860 kg/m<sup>3</sup>). Nadalje, kinematička viskoznost je još jedan važan parametar koji utječe na performanse dizelskog goriva. Viskoznost sintetskog ulja dobivenog na 400 °C je 1,5398 mm<sup>2</sup>/s što je niže od standardne kvalitete za dizelsko gorivo [30]. Ogrjevna vrijednost sintetskog ulja iznosi 44,95 MJ/kg i zadovoljava oba standarda za benzin i dizel.

**Tablica 9. Svojstva pirolitičkog sintetskog ulja, benzina i dizela [30]**

Parametri	Jedinica	Sintetsko ulje	Benzin	Dizel	Metoda testiranja (ASTM)
Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	796,9	715-780	815-860	D 1259
Kinematička viskoznost	mm <sup>2</sup> /s	1,5398	nije navedeno	2-4,5	D 445
Ogrjevna vrijednost	MJ/kg	44,95	min. 44,56	min. 44,7	D 240

Intiaz A. i sur. proveli su studiju [29] kojom je pokazano da je sintetsko ulje dobiveno pirolizom PP obogaćeno ugljikovodicima u rasponu od C<sub>13</sub>-C<sub>16</sub> (33,04 %) i C<sub>17</sub>-C<sub>20</sub> (24,97%), što ukazuje da je frakcija obogaćena dizelskim ugljikovodicima. Dalje, oko 50 % frakcije ulja PP bilo je obogaćeno ugljikovodicima iz nafte (C<sub>6</sub>-C<sub>16</sub>). Iz ovih podataka može se vidjeti da je polipropilen sirovina pogodna za termokemijsku konverziju kojom se dobiva visokokvalitetni proizvod.

### • Polikarbonat, PC

Studija provedena od Antonakoue E.V. i sur. pokazala je da termalna i katalitička piroliza polikarbonata u reaktoru s fiksnim slojem ima prinos sintetskog ulja do 60 %, nekondenzirajućih plinova oko 20 % te do 25 % ugljeniziranog ostatka [31]. Tijekom studije

korištene su razne vrste katalizatora, a po količini prinosa produkata istaknule su se dvije vrste ZSM-5 i silikalit (Tablica 10.).

**Tablica 10. Prinos produkata pirolizom polikarbonata [31]**

Analiza proizvoda (%)	Prinos tekuće frakcije	Prinos plinske frakcije	Prinos ugljeniziranog ostatka
Bez-katalizatora	57,03	18,46	24,5
ZSM-5	57,47	19,06	23,47
Silikat	58,32	20,32	21,36

Komponenta fenola je dominantna u proizvedenoj tekućoj frakciji (>70 %) čak i u produktu ne katalitičkog procesa, što ukazuje da je i termalna piroliza obećavajući proces za proizvodnju fenolnih spojeva iz polikarbonata. Katalizator ZSM-5 pokazuje nešto manji pad proizvodnje fenola (66,73 %), dok silikat potiče proizvodnju fenola u tekućoj frakciji (78,46 %) [31]. Fenolni spojevi se smatraju vrstom kemijskih proizvoda visoke dodane vrijednosti koji se mogu koristiti za sintezu ljepila i fenolnih smola. Isto tako fenolni spojevi spadaju u ugljikovodike koji su sastavni dio goriva i zemnog ulja. Udio fenolnih spojeva u konačnom produktu pirolize je od velikog značaja zbog toga što povećavaju vrijednost produktu. Korištenje pirolize PC vrlo je obećavajući proces koji ima potencijal za proizvodnju korisnih proizvoda visoke vrijednosti, koji mogu naći primjenu u petrokemijskoj industriji.

#### • Polietilen, PE

Oporabom polietilena postupkom pirolize ima za rezultat veliki prinos sintetskog ulja. Imtiaz A. i sur. su proveli studiju kojom su pokazali da je prinos sintetskog ulja polietilena visoke gustoće bio oko 81 %, dok je prinos plinske frakcije i ugljeniziranog ostatka bio oko 17 %, odnosno 2 % [29]. Gustoća i kinematička viskoznost dobivenog sintetskog ulja iz HDPE su neznatno veće nego standardne vrijednosti za dizelskog goriva. Sintetsko ulje HDPE obogaćeno je ugljikovodicima u rasponu od C<sub>6</sub>-C<sub>16</sub> (32,56 %) i C<sub>13</sub>-C<sub>16</sub> (30,8 %), što ukazuje da je frakcija obogaćena ugljikovodicima iz područja nafte niskog vrelišta. Oko 63 % ugljikovodika nalazi se u rasponu benzin i dizel goriva [29].

Količina sintetskog ulja dobivenog pirolizom LDPE je nešto veća nego iz HDPE što se očituje u smanjenju dobivene frakcije plina [32]. Korištenjem zeolitnih katalizatora HZSM5 i HUSY tijekom pirolize polietilena dolazi do smanjenja prinosa sintetskog ulja. Katalizator HZSM5 tijekom pirolize smanjuje prinos sintetskog ulja od polietilena za oko 60 %, a katalizator HUSY uzrokuje pad prinosa za oko 40 % [32]. Katalizatori imaju utjecaj na

komponente sintetskog ulja te njihovim korištenjem dolazi do povećavanja aromatskog sastava u samom produktu pirolize, te time imaju sličniji sastav s konvencionalnim gorivima na tržištu. Aromatski spojevi spadaju u nezasićene prstenaste ugljikovodike koji izgaraju vrlo polagano i stoga sprječavaju detonacije. Niži predstavnici aromata su prisutni u malim količinama u sirovoj nafti i lakim frakcijama benzina, dok aromatski spojevi s dvije aromatske jezgre nalaze se u srednjim i težim frakcijama nafte [33].

### 5.1.2. *Dijelovi ostatnog plastičnog otpada koji nije pogodan za pirolizu*

- **Akrilonitril budatien stiren, ABS**

Prisutnost heteroatoma u produktima pirolize kao što je dušik koji potječe iz ABS-a uzrokuje probleme povezane sa stvaranjem štetnih spojeva kao što su cijanovodična kiselina (HCN) ili dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ). Studija provedena od strane Brebu M. i sur. [34] pokazuje da je prosječni prinos sintetskog ulja pirolizom ABS-a na  $450^\circ\text{C}$  oko 60-65 %, dok je prinos ugljeniziranog ostatka 30 %. Treba istaknuti da je udio dušika u sintetskom ulju oko 30 mg/mL, što je izrazito visoki udio dušika u sintetskom ulju (~4 %) [34]. Du An-Ke i sur. proveli su studiju [35] kojom je pokazano da prinos tekuće frakcije pirolizom ABS-a na  $550^\circ\text{C}$  iznosi 87 %, a prinos ugljeniziranog ostatka je 10 %. U njihovom slučaju udio dušika u tekućoj frakciji iznosi 60 mg/mL, odnosno 8 %. Udio dušika u tekućoj frakciji dobivenoj pirolizom industrijske otpadne plastike bio bi znatno niži od ovih vrijednosti, ali bi svojim udjelom smanjio kvalitetu produkta. Prosječni udio dušika u gorivu kreće se u malim iznosima od 0,1-0,5 %. Iz prikazanog se može zaključiti da je količina dušika u tekućem produktu nekoliko puta veća od normalne što može izazvati nepoželjne posljedice. Postupci za uklanjanje dušika iz goriva su skupi i zahtjevni te bi predstavljali dodatnu prepreku u cijelom procesu [35]. Povećanim sadržajem dušika u gorivu prilikom izgaranja povećavala bi se količina stvorenog gorivnog  $\text{NO}_x$ -a koji bi se ispuštao u atmosferu. Prilikom same pirolize ABS-a dolazi do stvaranja HCN-a koji se pojavljuje u tekućoj i plinovitoj frakciji produkata. HCN je otrovan i u malim količinama te predstavlja opasnost prilikom ispuštanja u okolinu putem izgaranja plinske ili tekuće frakcije dobivene pirolizom ABS-a. Iako prinos sintetskog ulja pirolizom ABS-a iznosi od 60-87 %, ABS će se odvojiti iz ostatnog dijela plastičnog otpada prije termokemijske konverzije zbog svog štetnog utjecaja na okoliš.

---

- **Klorirani polietilen, CPE**

Kada su u pitanju neželjeni sastojci, klor je jedna od ključnih komponenti, jer klorirane komponente mogu uzrokovati značajnu koroziju tijekom skladištenja, transporta i izgaranja, ali i tijekom samog procesa pirolize. Udio klora u kloriranom polietilenu kreće se u rasponu od 25 % do 45 % ovisno o željenim svojstvima proizvoda. Klorirane komponente mogu naštetiti djelovanju katalizatora tijekom pirolize i danjoj primjeni sintetskog ulja dobivenim postupkom pirolize [36]. Tijekom termičke razgradnje CPE-a stvaraju se otrovni i korozivni spojevi, posebno velika količina klorovodika u plinovitim frakcijama i organski spojevi klora u sintetskom ulju. HCl se može lako ukloniti raznim sorpcijskim postupcima iz plinskih frakcija dok su problem organski spojevi klora u sintetskom ulju jer je njihovo uklanjanje teško i značajno pogoršava dugotrajnu uporabu i stabilnost proizvoda. Kako bi prisutnost klora i HCl smanjila kvalitetu krajnjih proizvoda pirolize, ali i dovela u pitanje korištenja tekuće i plinske frakcije dobivene pirolizom, klorirani polietilen će se izdvojiti iz toka industrijskog plastičnog otpada.

- **Poli(etilen-tereftalat), PET**

Prinos sintetskog ulja iz PET-a je oko 30 % što je osjetno niži prinos ulja od svih promatranih vrsta plastika prihvatljivih za pirolizu [22]. Veći dio PET plastike ostane u obliku ugljeniziranog ostatka nakon pirolize, koji može uzrokovati probleme prilikom izmjene topline u komori za pirolizu zbog lijepljenja po stijenkama izmjenjivača [20]. Posljedica toga bi bila veća potrošnja energenata za proizvodnju toplinske energije, opasnost od pregrijavanja reaktora i češći prekidi rada postrojenja zbog potrebe za čišćenjem unutrašnjosti reaktora kako bi bio omogućen normalan rad. Pored toga PET sadrži kisik koji nije poželjan tijekom procesa pirolize zbog toga što je potrebna inertna atmosfera kako ne bi došlo do zapaljenja plastike u samom reaktoru [23]. Pirolizom PET-a nastaju policiklični ugljikovodici i derivati bifenila koji su štetni za ljudsko zdravlje i okoliš. Zbog tih razloga poli(etilen-tereftalat) će se izdvojiti iz ulazne sirovine. S tim postupkom se osigurava viša kvaliteta produkta sintetskog ulja, ali se i smanjuje mogućnost zastoja postrojenja zbog problema koje može uzrokovati PET plastika tijekom procesa pirolize u reaktoru.

- **Ostali**

Ostala plastika koja se nalazi u malim količinama u industrijskom plastičnom otpadu poput poliamida, EVOH i EAA također nije najbolji izbor ulazne sirovine za pirolizu, zbog čega se niti ona neće podvrgavati samom procesu pirolize. Aluminijski i celulozni su potrebni ukloniti iz

ulazne sirovine jer neplastične mase poput papira, stakla i metala nisu poželjne u sastavu ulazne sirovine koja ide na daljnju obradu postupkom pirolize. Njihovim prisustvom povećava se količina krutog ostatka poslije pirolize, ali isto tako smanjuje vrijednost ugljeniziranog ostatka koji bi se potencijalno mogao prodavati na tržištu.

U Tablica 11. prikazan je sažet prikaz prinosa i sastava određenih vrsta plastika koje su opisane u prethodnom poglavlju (Poglavlje 5.). Prikazani prinosi u Tablica 11. iskazani su postotkom, koji označava prinos određenog produkta u kilogramu po kilogramu plastike koja ulazi u proces.

**Tablica 11. Prinos i sastav produkta određenih vrsta plastika procesom pirolize**

Vrsta plastike	Temperatura reakcije (°C)	Prinos sintetskog ulja (%)	Prinos plinske frakcije (%)	Prinos ugljeniziranog ostatka (%)	Sastav prednost/nedostatak	Izvor
PP	250	57	29	14	Povećani udio parafina i olefina, svojstva slična benzinu i dizelu	[29] [30]
	300	70	29	1		
	350	68	30	2		
	400	63	31	6		
PE	300	31	36	33	Povećani udio parafina i olefina, svojstva slična dizelskom gorivu	[29]
	350	81	17	2		
	400	54	45	1		
PC	600	60	15	25	Povećani udio fenola, povećani udio ugljeniziranog ostatka	[31]
PET	800	30-40	40	20-30	Povećava udio kisika u produktima, povećava mogućnost zapaljenja plastike tijekom pirolize, stvaranje policikličnih ugljikovodika i derivata bifenila	[23]
ABS	450	60	10	30	Povećava udio dušika u produktima, mogućnost stvaranja HCN-a i NO <sub>x</sub> -a	[34]

Nakon odabira prihvatljivog dijela ostatnog plastičnog otpada za proces pirolize, ulazni sastav čine polipropilen, polikarbonat i polietilen kako je prikazano u Tablica 12. Uspoređujući sastav ukupnog ostatnog dijela industrijskog plastičnog otpada iz Pos - Plasta d.o.o. (Tablica 8.) i konačnog sastava, samo 49,58 % plastičnog otpada je trenutno prihvatljivo za proces pirolize kojim bi se osigurao normalan rad postrojenja, ali i kvalitetniji produkti samog procesa.



**Tablica 12. Konačni sastav industrijskog plastičnog otpada za pirolizu**

Sastav sirovine	Udio (%)
Polipropilen	49,70
Polikarbonat	44,42
Polietilen	5,89

## 6. Tehno – ekonomska analiza adekvatnog postrojenja za pirolizu

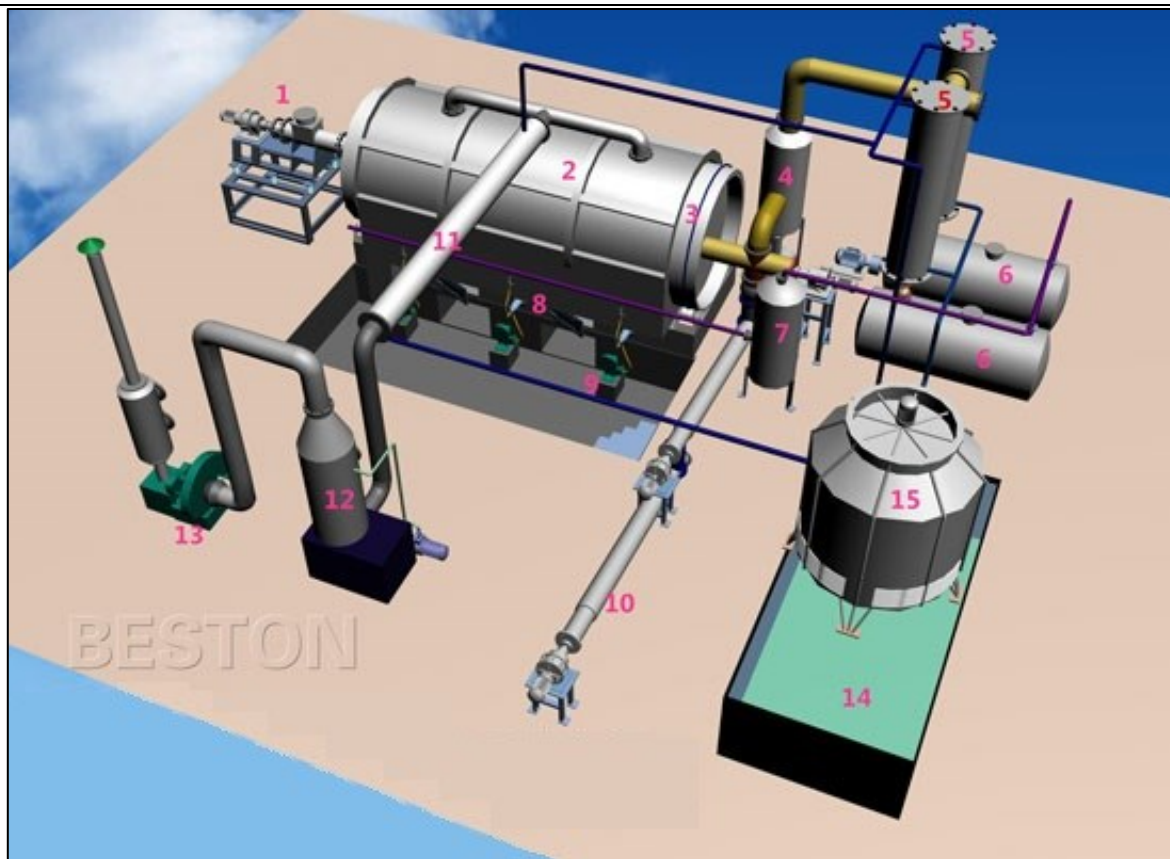
U ovom poglavlju će biti opisano adekvatno postrojenje za pirolizu industrijskog plastičnog otpada. Tehnički parametri odabrani su na temelju uprosječenih vrijednosti postojećih komercijalnih i eksperimentalnih postrojenja čija ulazna sirovina odgovara sastavu plastičnog otpada koji bi se obrađivao u Pos - Plast-u d.o.o. Detaljnim pregledom literature prikupljen je veliki niz tehničkih parametara postojećih postrojenja koji su dani u Prilogu I. Prilikom formiranja parametara postrojenja korišten je „kriterij isključivanja“ pojedinih podataka kako bi se dobile relevantnije vrijednosti prikupljenih podataka. Troškovi postrojenja odabrani su na temelju izvješća proizvođača opreme, ekonomske analize budućih te postojećih postrojenja za pirolizu. Trenutno Pos - Plast d.o.o. raspolaže s oko 1 tone na dan prihvatljive otpadne industrijske plastike koja bi se mogla obraditi pomoću procesa pirolize. Pooštravanjem regulative i zakona vezanih uz zbrinjavanje otpadne plastike u koju ulazi i industrijska otpadna plastika, rezultirati će povećanjem količina plastike koju je sve teže i skuplje zbrinuti na odgovarajući način. Rast cijena zbrinjavanja prisilit će tvrtke koje proizvode otpadnu plastiku na ponovnu upotrebu iste ili da kvalitetnije postupaju s njom. U tom slučaju jeftinije će biti tvrtkama koje proizvode otpadnu plastiku platiti naknadu za otkup plastike („gate fee“) nego da plaćaju njezino skupo odlaganje. Tvrtke poput Pos - Plast-a d.o.o. lakše će doći do većih količina i kvalitetnije plastike uz mogući prihod od naknade za otkup iste. Pos - Plast d.o.o. trenutno ima oko 1 tonu po danu prihvatljive plastike koja se ne može iskoristiti za proizvodnju granula, a koja se može oporabiti pirolizom. Prema usmenom navodu direktora tvrtke, Pos - Plast d.o.o. svojim načinom poslovanja može u kratkom roku povećati raspoložive količine sirovine za pirolizu, ali isto tako i nabaviti samo određenu vrstu, tj. prikladnu plastiku za pirolizu kako bi sastav ulazne sirovine osigurao optimalni prinos i kvalitetu sintetskog ulja. Zbog mogućnosti prilagodbe opsega posla, a time i količine plastičnog otpada, u nastavku će biti opisano postrojenje kapaciteta 5 tona na dan, te će se provesti usporedba dva moguća sastava ulazne sirovine kako bi se utvrdilo koji je slučaj isplativiji. Odabrano postrojenje radit će na principu termičke pirolize, tj. neće se dodavati katalizatori u procesu. To proizlazi iz toga što u proces ulazi samo prihvatljiva plastika visoke kvalitete i čistoće, te korištenjem katalizatora proces postaje kompleksniji i skuplji s malom garancijom unaprjeđenja cijelog procesa.

## 6.1. Opis procesa

Prije samog početka procesa potrebno je odvojiti otpadnu plastiku odgovarajuće kvalitete te ju je potrebno mehanički usitniti. Nakon toga plastika se preko automatskog dodavača, koji se sastoji od lijevka i pužnog transportera, uvodi u reaktor za pirolizu. Pužni transporter se zagrijava kako bi se prolaskom plastike kroz njega ona omekšala i smanjila potrebno vrijeme boravka u reaktoru. Vrijeme boravka plastike u reaktoru ovisi o ulaznom sastavu plastičnog otpada te se regulira pomoću kontrolnog sustava kako bi se osigurala potpuna piroliza. Prilikom rada postrojenja potrebno je osigurati inertnu atmosferu, koja se osigurava strujanjem dušika kroz reaktor. Zagrijana plastična mješavina ulazi u reaktor koji se pri pokretanju zagrijava izgaranjem prirodnog plina u ložištu, a u normalnom radu reaktor se zagrijava izgaranjem plinske frakcije dobivene procesom. Reaktor se nalazi unutra kućišta kako bi se smanjili toplinski gubici. Kada se u reaktoru postigne odgovarajuća temperatura, dolazi do stvaranja plina. Proizvedeni plin iz reaktora odlazi u razdjelnik gdje se ugljenizirani ostatak odvaja u spremnik za kruti ostatak. Proizvedeni plin se dalje odvodi do uljnog kondenzatora u kojem kondenzira u tekući proizvod odnosno sintetsko ulje te se pohranjuje u spremnik. Za hlađenje kondenzatora koristi se voda koja tijekom cijelog procesa ne dolazi u kontakt s uljem te je tako spriječeno zagađenje otpadnih voda. Nekondenzirajući plinovi, tj. plinska frakcija prolazi kroz vodenu brtvu gdje se vrši pročišćavanje plina kako bi se uklonili mogući uzročnici oštećenja ložišta tijekom izgaranja tako dobivenog plina. Višak dobivenog plina spaljuje se na termičkom oksidatoru. Termički oksidator je uređaj u kojem pri kontroliranim uvjetima izgara višak plina koji najčešće sadrži hlapljive organske spojeve, CO i hlapljive HAP-ove pretvarajući ih u CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O kako ne bi bile premašene emisije štetnih tvari u okoliš. Vrući dimni plinovi odlaze u kondenzator gdje se hlade te se dalje odvede u sustav za otklanjanje čestica nakon kojeg se pomoću ventilatora ispuštaju u atmosferu.

Postrojenje za pirolizu sastoji se od sljedećih komponenti [37], koje se mogu vidjeti na shemi kontinuiranog postrojenja na Slika 17.:

- |                        |                                    |                                   |
|------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 - automatski dodavač | 6 - spremnik ulja                  | 11 - dimni kondenzator            |
| 2 - kućište            | 7 - vodena brtva                   | 12 - sustav za uklanjanje čestica |
| 3 - reaktor            | 8 - ložište                        | 13 - ventilator                   |
| 4 - razdjelnik         | 9 - dovod zraka                    | 14 - spremnik vode                |
| 5 - kondenzator        | 10 - sustav automatskog pražnjenja | 15 - rashladni toranj             |



Slika 17. Shema kontinuiranog postrojenja za pirolizu tvrtke Beston [37]

### 6.1.1. Sastav ulazne sirovine procesa

O sastavu ulazne sirovine ovisi kvaliteta i količina dobivenog sintetskog ulja. Treba naglasiti da otpadna plastika koja dolazi u Pos - Plast d.o.o. nema velikih onečišćenja i zagađivača kao što ima otpadna plastika iz komunalnog otpada koja se obrađuje u većini postrojenja za pirolizu u svijetu. U sklopu ovog rada razmotrit će se dva slučaja (Tablica 13.).

Tablica 13. Sastav ulazne sirovine za pojedini slučaj

	Sastav ulazne sirovine
Slučaj I	PP (49,70 %) + PC (44,42 %) + PE (5,89 %)
Slučaj II	PP (50 %) + PE (50 %)

U prvom slučaju ulazna sirovina je sačinjena od prihvatljivog dijela industrijske ostatke plastike koja ostaje Pos - Plast-u d.o.o. nakon mehaničke uporabe koja se nije mogla iskoristiti za proizvodnju granula. Sirovina je u tom slučaju sastavljena od polipropilena, polikarbonata i polietilena, čije se prinosi produkata i udjeli u sirovini mogu vidjeti u Tablica 11. i Tablica 12. Otpadna industrijska plastika se ručno odvaja na pojedine vrste prije mehaničke uporabe u Pos - Plastu d.o.o. te je ista pretpostavka uzeta i za drugi slučaj. U drugom slučaju ulazna sirovina

je samo poželjni plastični otpad za pirolizu koji se sastoji od 50 % polietilena (LDPE, HDPE, LLDPE i folija od polietilena) i 50 % polipropilena (PP i PP+C (polipropilen s adhezijom ugljika)) koji imaju najbolji prinos sintetskog ulja [38]. U Tablica 14. prikazane su ogrjevne vrijednosti pojedinih vrsta plastika koje ulaze u sastav ulazne sirovine u promatranim slučajevima.

**Tablica 14. Ogrjevna vrijednost pojedinih vrsta plastika**

Vrsta plastike	Ogrjevna vrijednost (MJ/kg)	Izvor
Polipropilen	46	[13]
Polietilen	46,5	[13]
Polikarbonat	31	[39]

U Prilogu 2. su navedena su ograničenja za ostale vrste plastike koje se mogu pojaviti u ulaznoj sirovini. Dodatno ograničenje za ulaznu sirovinu je udio vlage te ona u oba slučaja iznosi maksimalno 5 %.

#### 6.1.1.2. Predobrada

Nakon što se prihvatljiva otpadna plastika izdvoji od ostalog sastava, koji nije prikladan za pirolizu, sirovina odlazi na mehaničko usitnjavanje pomoću mlinova na čestice veličine 0,5 - 2 cm. Potrebno je što ravnomjernija veličina čestica kako bi se sve čestice ravnomjerno zagrijavale i kako bi proces pirolize tekao kontinuirano. Za usitnjavanje će se koristiti postojeći mlinovi i šrederi za plastiku koje posjeduje Pos - Plast d.o.o.

#### 6.1.2. Tehnički podaci o postrojenju

Kapacitet adekvatnog postrojenja je 5 tona po danu, rad postrojenja odvija se kontinuirano, 24 sata dnevno, sedam dana u tjednu. Na temelju podataka iz literature navedene u Prilogu 1., u Tablica priloga 1.6. prikazani su godišnji sati rada postrojenja za pirolizu te je za analizu pretpostavljeno da predmetno postrojenje radi 8.040 sati godišnje odnosno 335 dana u godini. Iz navedenih podataka može se izračunati da postrojenje na godišnjoj razini obradi 1.675 tona plastičnog otpada. Postrojenje radi mjesec dana kontinuirano s jednim danom pauze potrebnim za održavanje postrojenja. Te se na godišnjoj razini odvija jedan remont cijelog postrojenja u trajanju od 20 dana. Za smještaj postrojenja, potrebne opreme i spremnika za skladištenja sintetskog ulja potrebno je 200 m<sup>2</sup>. Vijek trajanja postrojenja je dobiveno na temelju osrednjavanja podataka iz Priloga 1., iz Tablica priloga 1.6., te iznosi 25 godina.

### • Raspoloživost postrojenja

Kako na godišnjoj razini postrojenje radi 8.040 sati pomoću jednadžbe (1) može se izračunati godišnja raspoloživost postrojenja ( $\tau$ ) te ona za oba slučaja iznosi:

$$\tau = \frac{8040 \frac{h}{god}}{8760 \frac{h}{god}} \cdot 100 = 91,78 \% \quad (1)$$

#### 6.1.3. Tehnički podaci o procesu

Tehnički podaci o procesu su dobiveni osrednjavanjem podataka za stvarna pilot postrojenja i komercijalnih postrojenja za pirolizu dana u Prilogu 1., Tablica priloga 1.3. i Tablica priloga 1.4. Tijekom izračunavanja podataka korišten je „kriterij isključivanja“ kojim su izostavljeni podaci koji znatno odstupaju od ostalih podataka u analiziranom setu.

Prilikom obrade jedne tone plastičnog otpada potrebno je 316,57 kWh električne energije koja se koristi za rad raznih motora, mlinova, šredera, pumpi i kontrolnog sustava. Kao fluidizirajući plin koristi se dušik za stvaranje inertne atmosfere te je njegova potrošnja 45,3 kg po toni otpadne plastike. Tijekom pirolize jedne tone sirovine potrebno je 1361 litara vode, koja služi za hlađenje kondenzirajućih plinova i dimnih plinova te su gubici vode oko 610 litara po toni obrađene sirovine. Kao dodatno gorivo u pirolizi koristi se prirodni plin za zagrijavanje reaktora kod hladnog starta, tj. pokretanje postrojenja kada nema dovoljno nekondenzirajućih plinova iz procesa. Potrebe za prirodnim plinom su 554 kWh po toni otpadne plastike, te je pretpostavka da potreba za prirodnim plinom iznosi 15 % na godišnjoj razini. Svi tehnički podaci o procesu prikazani su u Tablica 15.

**Tablica 15. Tehnički podaci procesa**

	Energent	Iznos	Jedinica
Ulaz	Potrošnja električne energije	316,57	kWh/tona
	Dušik	45,3	kg/tona
	Voda	1361	l/tona
	Prirodni plin	554	kWh/tona
Izlaz	Gubici vode	610	l/tona

#### 6.1.4. Energetski proizvodi procesa

Kako energetski proizvodi pirolize ovise o sastavu ulazne plastike tako će i njihovi prinosi biti različiti za oba slučaja. Referentne vrijednosti prinosa za pojedine slučajeve ulazne sirovine (Tablica 16.) izračunati su na temelju podataka iz Tablica 11. i Tablica 13. u kojima su dani

prinosi i udjeli pojedine plastike koja se nalazi u ulaznim sirovinama u predmetnim slučajevima. Referentne vrijednosti prinosa za slučaj I i II (Tablica 16.) izračunati su na temelju prinosa pojedine vrste plastike, a preuzete su iz znanstvenih istraživanja u laboratoriju. Kako je već ranije naglašeno, proces pirolize ovisi o brojnim parametrima, kao što su temperatura, tlak, vrijeme zadržavanja, tip reaktora za pirolizu te vrsti plina za fluidiziranje i njegovoj brzini. Zbog utjecaja tih parametara moguć je drugačiji prinos iste plastike u drugačijim uvjetima rada, odnosno postrojenjima. Kod pirolize više vrsta plastike može također doći do promjene prinosa zbog međusobnog utjecaja plastika tijekom pirolize.

**Tablica 16. Prikaz referentnih vrijednosti prinosa produkata za slučaj I i II**

	Prinos sintetskog ulja (%)	Prinos plinske frakcije (%)	Prinos ugljeniziranog ostatka (%)
PP	68	30	2
PC	60	15	25
PE	81	17	2
Referentna vrijednost za slučaj I	<b>63</b>	<b>24</b>	<b>13</b>
Referentna vrijednost za slučaj II	<b>75</b>	<b>23</b>	<b>2</b>

Iz tog razloga prinosi dobiveni iz znanstvenih istraživanja (Tablica 16.) će poslužiti samo kao referentna vrijednost prilikom odabira prinosa produkata iz dokumentacije stvarnih postrojenja (Prilog 1., Tablica priloga 1.3. i Tablica priloga 1.4.). Prilikom analize parametara stvarnih postrojenja u obzir su uzeti i sastavi ulaznih sirovina za slučaj I i II, te je uzeto u obzir da ima što više sličnosti u sastavu ulaznih sirovina i odabranih stvarnih postrojenja. U Tablica 17. i Tablica 18. prikazana su odabrana postrojenja za slučaj I i II zajedno s prinosima za sintetsko ulje i plinsku frakciju. Prinos ugljeniziranog ostatka je izračunat pomoću zakona očuvanje mase, tj. da je na 1000 kg ulazne sirovine potrebno imati 1000 kg produkta, te je prinos ugljeniziranog ostatka izračunat oduzimanjem dobivenih srednjih prinosa za sintetsko ulje i plinsku frakciju od 1 tone ulazne sirovine za slučaj I i II. U Tablica 19. su prikazani prinosi sintetskog ulja, plinske frakcije i ugljeniziranog ostatka za oba slučaja.

Tablica 17. Prinos produkata za slučaj I na temelju stvarnih postrojenja

Postrojenje	P3	P9	P11	P13	P17	P21	P25	Srednja vrijednost	Jedinica
Prinos sintetskog ulja	744,8	800	718,1	673,9	690	650	613	698,6	kg/tona
Prinos plinske frakcije	175	100	-	150	180	102,4	150	122,5	kg/tona

Tablica 18. Prinos produkata za slučaj II na temelju stvarnih postrojenja

Postrojenje	P1	P6	P7	P8	P12	P14	P15	P16	P18	Srednja vrijednost	Jedinica
Prinos sintetskog ulja	628,6	850	713	822	886,7	900	858	598	862,8	791	kg/tona
Prinos plinske frakcije	175	150	147	90	60	-	78,5	312	80	136,5	kg/tona

Tablica 19. Energetski proizvodi pirolize

Energetski proizvodi	Slučaj	Količine proizvoda		Na godišnjoj razini
Sintetsko ulje	I	689,6 kg/tona	830,7 litara/tona	1.391.442,50 litara
	II	791 kg/tona	913,4 litara/tona	1.529.945,00 litara
Plinska frakcija	I	122,5 kg/tona	173,4 m <sup>3</sup> /tona	29.0419,23 m <sup>3</sup>
	II	136,5 kg/tona	193,2 m <sup>3</sup> /tona	323.610,00 m <sup>3</sup>
Ugljenizirani ostatak	I	178,9 kg/tona		299.657,50 kg
	II	72,4 kg/tona		121.270,00 kg

Iz Tablica 19. se može zaključiti kako je u drugom slučaju veći prinos sintetskog ulja (10 %) što odgovara kvalitetnijoj i prihvatljivijoj ulaznoj sirovini u proces. Dobiveno sintetsko ulje ima svojstva slična sirovoj nafti te ga rafinerije i kemijske industrije otkupljuju za daljnju preradu. Zbog nedostatka točnog sastava sintetskog ulja dobivenog procesom pirolize, u Tablica 20. prikazane su prosječne vrijednosti svojstva sintetskog ulja koji se dobiva pirolizom u tvrtki BioFabrik [38], zajedno s pretpostavljenim svojstvima sintetskog ulja za slučaj I i II koji će se kasnije koristiti u daljnjem proračunu. Za slučaj I uzeta su svojstva sintetskog ulja koja se dobiva tvrtka BioFabrik [38] u kojoj je ulazni sastav sličan ulaznom sastavu u slučaju I. Za slučaj II pretpostavljena su svojstva za sirovu naftu [40] koja imaju bolja svojstva nego sintetsko ulje u slučaju I što odgovara kvalitetnijoj ulaznoj sirovini u tom slučaju. Prinos plinske frakcije je u oba slučaja jednak te tipična ogrjevna vrijednost iznosi 10 – 20 MJ/m<sup>3</sup> [15]. Za daljnji proračun uzeta je srednja ogrjevna vrijednost plinske frakcije od 15 MJ/m<sup>3</sup> odnosno 4,17



kWh/m<sup>3</sup>. Tijekom normalnog rada postrojenja izgaranjem proizvedenog plina zadovoljava se pokrivanje potreba procesa (zagrijavanje reaktora) bez unosa vanjske energije, tj. korištenja prirodnog plina. Višak proizvedene plinske frakcije se spaljuje na termičkom oksidatoru. U prvom slučaju veći je udio nusproizvoda ugljeniziranog ostatka (10 %), koji treba na prikladan način zbrinuti.

Tablica 20. Svojstva sintetskog ulja

Svojstva	Prosječne vrijednosti [38]	Svojstva Slučaj I [38]	Svojstva Slučaj II [40]	Jedinica
Gustoća	0,8-0,9	0,841	0,866	g/cm <sup>3</sup>
Ogrjevna vrijednost	40-44	41,5	42,7	MJ/kg
Viskoznost	5-10	7,6	11,5 (pri 15 °C)	mm <sup>2</sup> /s @50 °C
Točka paljenja	>60	>65	63	°C
Cetanski broj	30-60	60,3	-	
Udio sumpora	10-50	50	-	ppm
Udio fosfata	30-50	24,4	-	ppm
Udio vode	200-800	772	<1000	ppm
Udio nečistoća	50-150	60	-	mg/kg

#### • Stupanj konverzije otpada u gorivo

Stupanj konverzije otpada u gorivo ( $X_{pir}$ ) može se izraziti kao omjer mase sintetskog ulja koji nastaje pirolizom i mase plastičnog otpada koja predstavlja ulaznu sirovinu u proces. Prethodno izračunata masa plastičnog otpada koja se obradi na godišnjoj razini u oba slučaja iznosi 1.675 tona dok su prinosi sintetskog ulja za pojedini slučaj dani u Tablica 19., a svojstva sintetskih ulja korištenih u daljnjem proračunu u Tablica 20. Prema jednadžbi (2) stupanj konverzije otpada u gorivo za slučaj I iznosi 69,86 %, dok za slučaj II (jednadžba (3)) stupanj konverzije iznosi 79,1 %.

$$X_{pir,slučaj I} = \frac{V_{su,sl I} \cdot \rho_{su,sl I}}{m_{po}} = \frac{1.391.442,50 \frac{l}{god} \cdot 0,841 \frac{kg}{l}}{1.675.000 \frac{kg}{god}} \cdot 100 = 69,86 \% \quad (2)$$

$$X_{pir,slučaj II} = \frac{V_{su,sl II} \cdot \rho_{su,sl II}}{m_{po}} = \frac{1.529.945,00 \frac{l}{god} \cdot 0,866 \frac{kg}{l}}{1.675.000 \frac{kg}{god}} \cdot 100 = 79,1 \% \quad (3)$$

gdje je:

$V_{su}$	- godišnji prinos sintetskog ulja	[l/god]
$\rho_{su}$	- gustoća sintetskog ulja	[kg/l]
$m_{po}$	- godišnja količina plastičnog otpada	[kg/god]

### • Iskoristivost postrojenja

Pomoću omjera kemijske energije sadržane u tekućem proizvodu dobivenog pirolizom (sintetsko ulje,  $E_{su}$ ) i kemijske energije pohranjene u plastičnom otpadu ( $E_{po}$ ) može se izraziti ukupna iskoristivost postrojenja ( $\eta$ ). Vrijednosti prinosa, gustoće i ogrjevne vrijednosti sintetskog ulja korištene u izračunu iskoristivosti postrojenja nalaze se u Tablica 19. i Tablica 20. Ogrjevne vrijednosti plastičnog otpada za pojedine slučajeve izračunate su u Tablica 21. prema podacima o sastavu (Tablica 13) i ogrjevnih vrijednosti plastike (Tablica 14).

**Tablica 21. Ogrjevna vrijednost ulaznih sirovina**

	Sastav sirovine	Ogrjevna vrijednost ulazne sirovine (MJ/kg)
<b>Slučaj I</b>	PP (49,70 %) + PC (44,42 %) + PE (5,89 %)	39,37
<b>Slučaj II</b>	PP (50 %) + PE (50 %)	46,25

Prema jednadžbi (4) ukupna iskoristivost postrojenja za slučaj I iznosi 73,64 %, dok za slučaj II ukupna iskoristivost postrojenja iznosi 73,03 % prema jednadžbi (5).

$$\eta_{uk,pir,slučaj\ I} = \frac{E_{su,sl\ I}}{E_{po,sl\ I}} = \frac{V_{su,sl\ I} \cdot \rho_{su,sl\ I} \cdot H_{d,su,sl\ I}}{m_{po} \cdot H_{d,po,sl\ I}} = \frac{1.391.442,50 \frac{l}{god} \cdot 0,841 \frac{kg}{l} \cdot 41,5 \frac{MJ}{kg}}{1.675.000 \frac{kg}{god} \cdot 39,37 \frac{MJ}{kg}} \cdot 100 = 73,64 \% \quad (4)$$

$$\eta_{uk,pir,slučaj\ II} = \frac{E_{su,sl\ II}}{E_{po,sl\ II}} = \frac{V_{su,sl\ II} \cdot \rho_{su,sl\ II} \cdot H_{d,su,sl\ II}}{m_{po} \cdot H_{d,po,sl\ II}} = \frac{1.529.945,00 \frac{l}{god} \cdot 0,866 \frac{kg}{l} \cdot 42,7 \frac{MJ}{kg}}{1.675.000 \frac{kg}{god} \cdot 46,25 \frac{MJ}{kg}} \cdot 100 = 73,03 \% \quad (5)$$

gdje je:

$H_{d,su}$	- donja ogrjevna vrijednost sintetskog ulja	[MJ/kg]
$H_{d,po}$	- donja ogrjevna vrijednost plastičnog otpada	[MJ/kg]

### 6.1.5. Emisije

Emisije ispuštene u zrak dolaze iz dimnih plinova koji se pročišćavaju nakon izgaranja plina u ložištu i termičkog oksidatora. Prosječne količine ispušnih emisija u zrak prikazane su u Tablica 22., a dobivene su osrednjavanjem vrijednosti za emisije stvarnih postrojenja iz Priloga 1., Tablica priloga 1.3. i Tablica priloga 1.4. Iako proces proizvodi otpadne vode, tijekom procesa nema direktnog kontakata vode sa sintetskim plinom ili uljem te se smatra da proces ne ispušta emisije u vodu.

**Tablica 22. Prosječne vrijednosti emisija ispuštenih u zrak**

Emisija	Količina	Jedinica
Ukupne praškaste tvari (krute čestice)	0,037	kg/tona
Ugljikov dioksid (CO <sub>2</sub> )	370,34	kg/tona
Ugljikov monoksid (CO)	0,525	kg/tona
Ugljikovodici	2,743	kg/tona
Sumporov dioksid (SO <sub>2</sub> )	0,515	kg/tona
Dušikovi spojevi izraženi kao NO <sub>2</sub>	0,68	kg/tona
Olovo i njegovi spojevi (Pb)	0,006	kg/tona
Hlapljivi organski spojevi (VOC)	0,257	kg/tona
Amonijak (NH <sub>3</sub> )	0,006	kg/tona

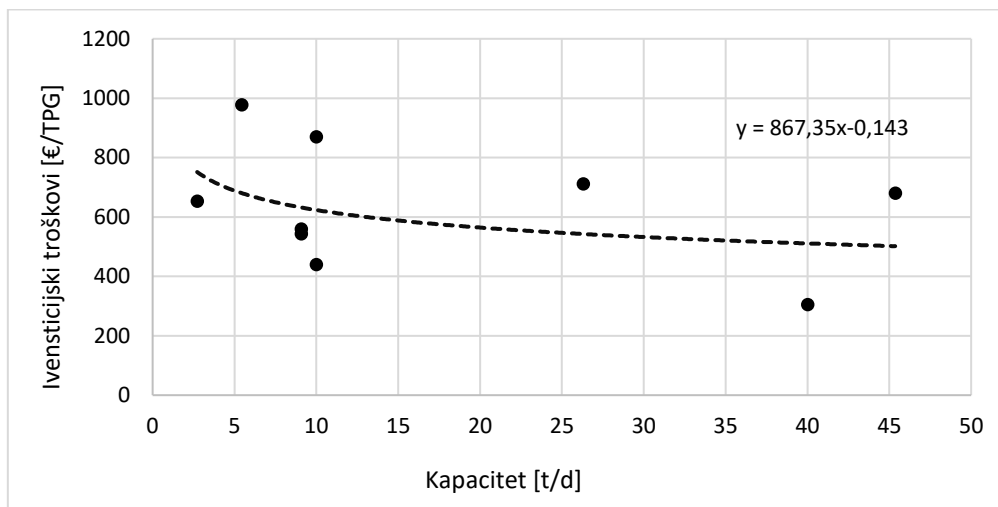
## 6.2. Podaci o troškovima

Podaci o troškovima prikupljeni su pregledom literature prikazani su u Prilogu 1., Tablica priloga 1.5. i Tablica priloga 1.6. bit će iskazani u eurima te pretvoreni u sadašnju vrijednost. Troškovi pirolitičkog postrojenja mogu se podijeliti na investicijske i operativne, dok jedini prihodi postrojenja dolaze od prodaje sintetskog ulja.

### 6.2.1. Investicijski troškovi postrojenja

Slika 18. prikazuje ovisnost investicijskih troškova postrojenja (dijelove postrojenja i njihovu ugradnju) po toni godišnjeg kapaciteta o dnevnom kapacitetu postrojenja modeliranih na temelju podataka. Iz podataka koji su prikupljeni pregledom literature (Prilog 1., Tablica priloga 1.5.) dobivena je funkcijska ovisnost investicijskih troškova postrojenja po godišnjim kapacitetima koja nam pokazuje kako cijena investicijskih troškova postrojenja pada s povećavanjem dnevnog, tj. godišnjeg instaliranog kapaciteta postrojenja. Za predmetni slučaj, dnevni kapacitet postrojenja je 5 tona te iz toga proizlazi da su investicijski troškovi postrojenja

689,04 € po toni godišnjeg kapaciteta. Kako godišnji kapacitet postrojenja iznosi 1825 tona proizlazi da su ukupni investicijski troškovi postrojenja za pirolizu 1.257.490 €.



**Slika 18. Ovisnost investicijskih troškova postrojenja za pirolizu o dnevnom kapacitetu**

U investicijske troškove ubrajaju se još pravni troškovi, inženjering, mjerenja i troškovi pripreme projekta i građevinski radovi što je prikazano u Tablica 23. Pravni troškovi procijenjeni su na 10.000 € [41], dok su troškovi inženjeringa, mjerenja i pripreme projekta (jednadžba (6)) i troškovi građevinskih radova (jednadžba (7)) izračunati korištenjem pravila „6/10“ za procjenu troškova, prema kojem s porastom kapaciteta postrojenja troškovi ne rastu proporcionalno [42]. Iz tog slijedi da za postrojenje dnevnog kapaciteta 5 tona troškovi inženjeringa, mjerenja i pripreme projekta iznose 40.407,28 €, što je vidljivo iz jednadžbe (6), a iz podataka izvještaja o postrojenju sličnih parametara, ali većeg kapaciteta (10 t/d), troškovi iznose 61.245,98 € [41]. Trošak građevinskih radova procijenjen je na 50.203,00 € prema jednadžbi (7) i podacima iz dokumenta [41].

$$C_{B,inž} = C_{A,inž} \cdot \left(\frac{V_B}{V_A}\right)^{\frac{6}{10}} = 61.245,98 \cdot \left(\frac{5 \frac{t}{d}}{10 \frac{t}{d}}\right)^{\frac{6}{10}} = 40.407,28 \text{ €} \quad (6)$$

$$C_{B,građ} = C_{A,građ} \cdot \left(\frac{V_B}{V_A}\right)^{\frac{6}{10}} = 76.093,5 \cdot \left(\frac{5 \frac{t}{d}}{10 \frac{t}{d}}\right)^{\frac{6}{10}} = 50.203,00 \text{ €} \quad (7)$$

gdje je:

$C_{A,inž}$  - trošak inženjeringa, mjerenja i pripreme projekta za postojeće postrojenje [€]  
[41]

$C_{A,građ}$  - trošak građevinskih radova za postojeće postrojenje [41] [€]

$C_{B,inž}$	- trošak inženjeringa, mjerenja i pripreme projekta za novo postrojenje	[€]
$C_{B,građ}$	- trošak građevinskih radova za novo postrojenje	[€]
$V_A$	- kapacitet postojećeg postrojenja [41]	[t/d]
$V_B$	- kapacitet novog postrojenja	[t/d]

**Tablica 23. Investicijski troškovi postrojenja za pirolizu**

<b>Trošak postrojenja</b>	1.257.490,00 €
<b>Pravni troškovi</b>	10.000,00 €
<b>Inženjering, mjerenja i troškovi pripreme projekta</b>	40.407,28 €
<b>Građevinski troškovi</b>	50.203,00 €
<b>Ukupni investicijski troškovi (suma)</b>	<b>1.358.100,28 €</b>

### 6.2.2. Operativni troškovi postrojenja

Operativni troškovi postrojenja mogu se podijeliti u dvije grupe, a to su fiksni i varijabilni troškovi. U fiksne operativne troškove se ubrajaju troškovi radne snage, troškovi održavanja, osiguranje postrojenja i ostali troškovi čiji iznosi direktno ne ovise o proizvodnji. Trošak radne snage, tj. plaće zaposlenika procijenjene su na 7.500 kn bruto mjesečno, na osnovi prosječnih plaća u Hrvatskoj koje se bave sličnim djelatnostima za 2019. godinu [43]. Kada se uz plaću uzmu u obzir razni dodaci i bonusi tijekom godine, godišnja plaća zaposlenika iznosi 12.220 €. Uz zaposlenike potrebno je uračunati i jednog voditelja postrojenja s prosječnom plaćom od 10.000 kuna bruto mjesečno što na godišnjoj razini, uz dodatke, iznosi 16.120 €. Za troškove održavanja uzeto je da iznose 5 % ukupnog investicijskog troška, prema osrednjenim podacima iz Priloga 1., iz Tablica priloga 1.6. u kojima su navedeni realni parametri postrojenja za pirolizu. Na godišnjoj razini cijena osiguranja je procijenjena na 1 % ukupnog investicijskog troška (prema podacima u Prilogu 1. iz Tablica priloga 1.6.) isto kao i ostali troškovi.

Drugi dio operativnih troškova su varijabilni troškovi koji direktno ovise o samoj proizvodnji, a čine ih troškovi energenata (električna energija, prirodni plin, voda), trošak zbrinjavanja ugljeniziranog ostatka i troškovi vezani uz prodaju i administraciju. Cijena električne energije za kupce iz kategorije poduzetništvo od strane HEP-a iznosi 0,11 €/kWh (za tarifni model „Bijeli“ u kategoriji srednjeg napona) [44]. Prirodni plin bi se nabavljao kroz distribucijski sustav tvrtke PLIN Vrbovec d.o.o., te bi cijena iznosila 0,037 €/kWh [45], dok cijena vode iznosi 2,96 €/m<sup>3</sup> [46]. Cijena zbrinjavanja ugljeniziranog ostatka koji ostaje kao nusprodukt pirolize iznosi 47,48 €/t, a cijena zbrinjavanja je ista kao za odlaganje neopasnog otpada u gradu Vrbovcu [47]. Troškovi vezani uz administraciju i prodaju sintetskog ulja kao što su reklamiranje i ispitivanje kvalitete proizvoda proizvoljno su definirani na 1 % ukupnih

prihoda od prodaje sintetskog ulja na godišnjoj razini zbog nedostatka sličnih procjena u prikupljenoj literaturi. Operativni troškovi postrojenja prikazani su u Tablica 24., dok je godišnji rast plaća zaposlenika, troškova održavanja, cijena energenata i troškova zbrinjavanja ostatka iz pirolize procijenjen na 1 %.

**Tablica 24. Operativni troškovi postrojenja za pirolizu**

Operativni troškovi	Slučaj I	Slučaj II
Troškovi radne snage	52.780,00 €	
Troškovi održavanja	58.327,13 €	
Osiguranje	5.147,47€	
Ostali troškovi	3.022,51€	
Trošak električne energije	67.905,01€	
Trošak prirodnog plina	13.581,00 €	
Trošak vode	13.581,00 €	
Trošak zbrinjavanja ugljeniziranog ostatka	14,228,49 €	5.759,55 €
Trošak prodaje i administracije	3.628,24 €	4.041,66 €
<b>Ukupni operativni troškovi (suma)</b>	<b>232.200,84€</b>	<b>224.145,32 €</b>

### 6.2.3. *Prihodi*

Jedini prihodi postrojenja za pirolizu dolaze od prodaje tekućeg produkta, tj. sintetskog ulja na tržište koja bi se dalje koristila kao gorivo ili za proizvodnju kemikalija. Tijekom analize uzeta je pretpostavka da sintetsko ulje postiže cijenu sirove nafte na tržištu zbog sličnosti svojstva sintetskog ulja i sirove nafte. Cijena sirove nafte na tržištu se trenutno kreće oko 50 \$ po barelu, što bi litri sirove nafte ispalo 0,26 € [48]. Ukupni godišnji prihod postrojenja za pirolizu u slučaju I iznosi 362.823,62€, dok on u slučaju II iznosi 404.165,53 €.

### 6.2.4. *Uvjeti financiranja*

Novčana sredstva za izgradnju postrojenja za pirolizu u Pos - Plastu d.o.o. bi se s 25 % osigurala iz privatnih sredstava, dok bi ostalih 75 % bilo osigurano putem kredita. Prema navedenim uvjetima od ukupnih investicijskih troškova projekta koji iznose 1.358.100,28 €, privatna sredstava bi iznosila 339.525,08 €, dok bi iznos kredita bio 1.018.575,20 €. Kamatna stopa za ovakve projekte iznosi 2 %, a rok otplate je 14 godina, sukladno informacijama HBOR-a [49]. Prema navedenim uvjetima godišnja rata kredita postrojenja za pirolizu iznosila bi 84.136,32 €. U ekonomskoj analizi projekta korištena je linearna amortizacija s amortizacijskim stopama navedenim u Tablica 25.

Tablica 25. Amortizacija [50]

Amortizacija imovine	Amortizacijska stopa (%)	Amortizacijski vijek trajanja (godina)
Oprema (postrojenje za pirolizu)	25	4
Priprema projekta	20	5
Instalacija i građevinski radovi	10	10

Prema navedenim amortizacijskim stopama iznos godišnje amortizacije za postrojenje za pirolizu iznosi 314.372,50 €, dok je za pripremu projekta amortizacija 8.081,46 € odnosno za instalaciju i građevinske radove je ona 5.020,30 €.

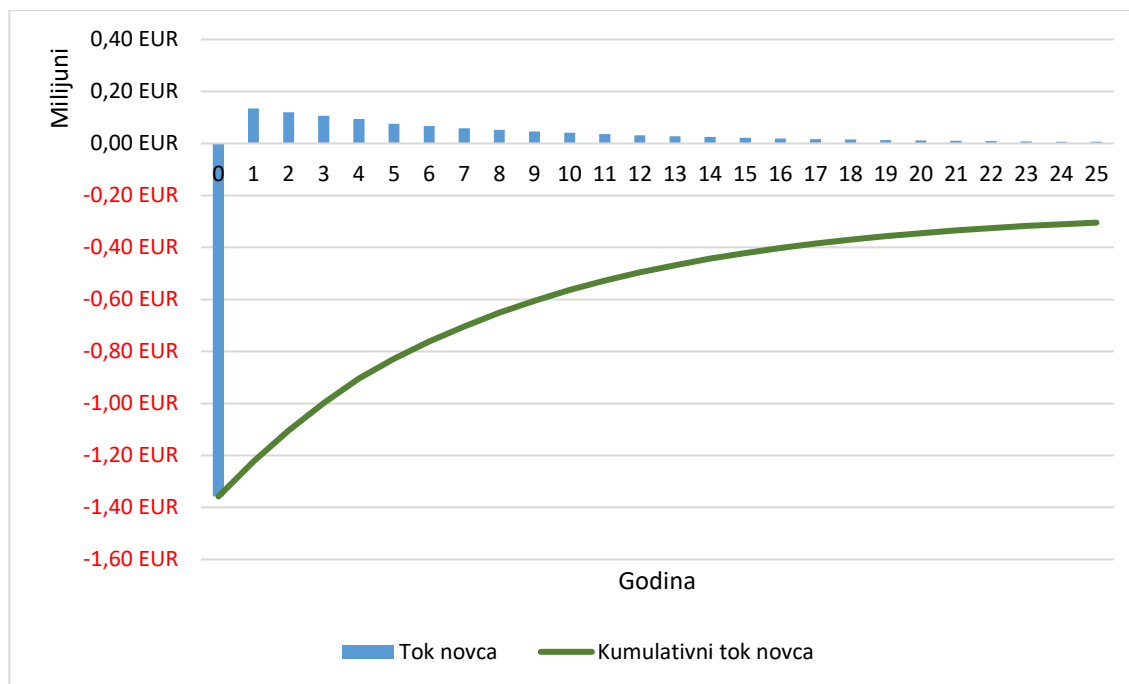
U proračunu je korišten porez na dobit u iznosu od 12 % [51], dok korištena diskontna stopa iznosi 11 %. Diskontna stopa je određena pomoću ponderiranog prosječnog troška kapitala (eng. „Weighted average cost of capital“, WACC) iz kemijskog sektora i sektora nafte i plina za područje Republike Hrvatske [52]. WACC se obično naziva trošak kapitala tvrtke odnosno to je minimalni povrat koji tvrtka mora zaraditi na postojećoj imovinskoj osnovi kako bi zadovoljila svoje vjerovnike i vlasnike.

### 6.3. Pokazatelji isplativosti ulaganja

Ekonomski pokazatelji neto sadašnja vrijednost (NPV, „*net present value*“) i unutarnja stopa povrata (IRR, „*internal rate of return*“) mogu poslužiti pri ocjenjivanju isplativosti postrojenja. NPV vraća neto vrijednost protoka novca izraženu u trenutnoj vrijednosti novca. S obzirom na vremensku dimenziju vrijednosti novca, novac koji posjedujemo danas vrijedi više od novca koji će se zaraditi sutra. Pomoću NPV se može izračunati trenutna vrijednost za svaki niz tokova novca i zbraja ih da bi se dobila neto sadašnja vrijednost. IRR se temelji na NPV-u, tj. unutarnja stopa povrata je diskontna stopa pri kojoj je sadašnja vrijednost svih tokova novca nekog projekta jednaka nuli. U slučaju da je unutarnja stopa povrata veća od pretpostavljene diskontne stope u proračunu, projekt je profitabilan i prihvaća se.

Nakon provedenog proračuna postrojenja za pirolizu koji dnevno obrađuje 5 tona ulazne sirovine, a koja se u ovom slučaju sastoji od PP, PC i PE (slučaj I) unutarnja stopa povrata iznosi 5,59 %, što je manje od korištene diskontne stope (11 %), te je prema tome takvo postrojenje neisplativo. Drugim riječima, ukupni investicijski troškovi ovakvog postrojenja iznose 1.358.100,28 €, dok godišnji operativni troškovi iznose 232.200,84 €. Plaće zaposlenika, troškovi održavanja i trošak električne energije čine najveći dio operativnih troškova s udjelom od 76 %. Prinos sintetskog ulja u ovom slučaju je 830,7 litre po toni plastičnog otpada odnosno

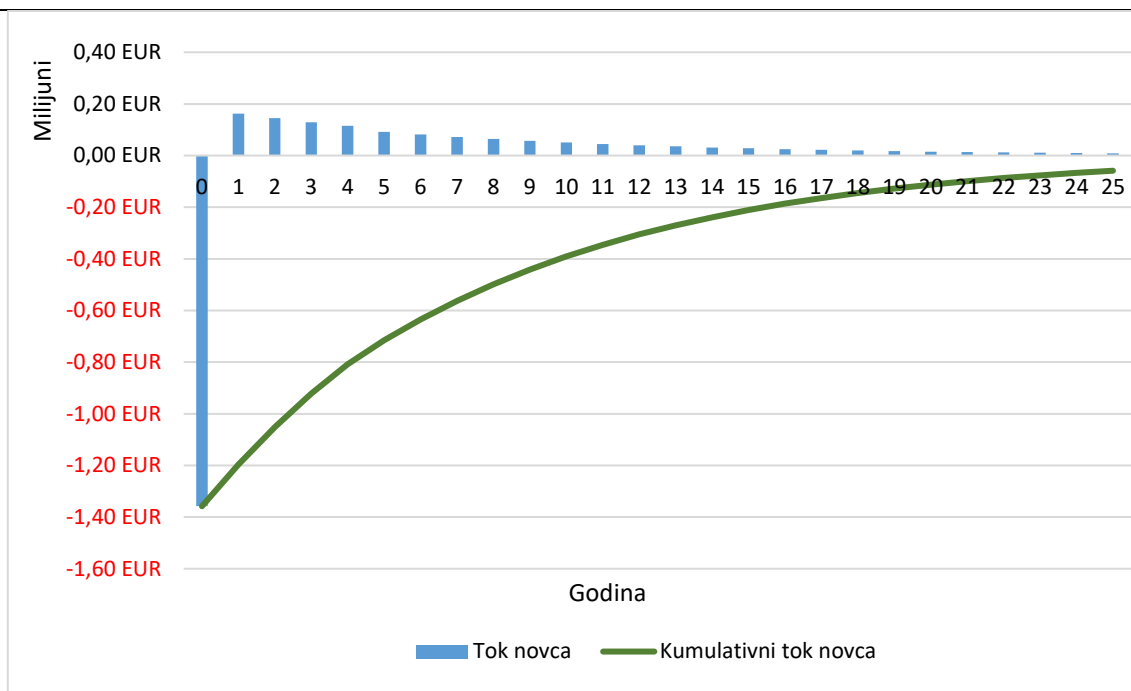
na godišnjoj razini proizvede se 1.391.442,50 litara sintetskog ulja što donosi godišnji prihod od 362.823,62 €. Iz navedenog se može zaključiti da ukupni gubitak postrojenja u slučaj I na kraju životnog vijeka iznosi 448.035,74 €. Na Slika 19. prikazan je dijagram koji prikazuje sadašnju vrijednost toka novca za svaku godinu vijeka trajanja projekta, te liniju kumulativnog toka novca sadašnje vrijednosti.



**Slika 19. Tok novca sadašnje vrijednosti postrojenja - slučaj I**

Postrojenje za pirolizu kapaciteta 5 tona na dan u kojem se ulazna sirovina sastoji od PP i PE (slučaj II) pokazao se po provedenom proračunu također neisplativim jer IRR iznosi 10,34 %, što je malo manje od korištene diskontne stope, te ukupan gubitak nakon isteka životnog vijeka postrojenja iznosi 58.783,76 €. Investicijski troškovi iznose jednako za oba slučaja, dok su operativni troškovi manji za 9.644,80 € na godišnjoj razini u slučaju II. To proizlazi iz toga što se u slučaju II proizvodi manje ugljeniziranog ostatka kojeg je potrebno adekvatno zbrinuti. Kako su postrojenja za pirolizu kapacitetom ista u slučaju I i II, povećanje prinosa sintetskog ulja u slučaju II proizlazi zbog kvalitetnije ulazne sirovine, te približava projekt bliže isplativosti. Prinos sintetskog ulja u slučaju II iznosi 913,4 litre po toni plastičnog otpada iz čega slijedi da se na godišnjoj razini proizvede 1.529.935,00 litara sintetskog ulja koje bi se na tržištu prodavalo po cijeni sirove nafte, te donijelo prihod od 404.165,53 €. Na dijagramu na Slika 20. prikazan je tok novca sadašnje vrijednosti i linija kumulativnog toka novca sadašnje vrijednosti postrojenja u kojemu sastav ulazne sirovine čine PP i PE.





**Slika 20. Tok novca sadašnje vrijednosti postrojenja - slučaj II**

Nakon provedenih proračuna za pirolitička postrojenja koja obrađuju jednaku količinu plastičnog otpada, tj. 5 tona plastičnog otpada po danu može se zaključiti koliki utjecaj ima sastav ulazne sirovine na konačnu isplativost postrojenja. Iako su oba proračuna pokazala neisplativost projekta, odabirom kvalitetnije ulazne sirovine koja se sastoji od PP i PE (slučaj II) projekt se približio granici isplativosti u odnosu kada se ulazna sirovina sastoji od PP, PC i PE (slučaj I). Povećan prinos sintetskog ulja u slučaju II u odnosu na slučaj I donosi na godišnjoj razini i veći prihod, koji iznosi 56.226,31 €. Ostali parametri postrojenja su isti u oba slučaja osim količine ugljeniziranog ostatka koji ostaje kao nusprodukt procesa. Ova razlika u prinosu uzrokuje na kraju životnog vijeka postrojenja razliku unutarnje stope povrata u predmetnim slučajevima od 6,59 % što nije nikako zanemarivo. Postrojenje za pirolizu kojemu se ulazna sirovina sastoji od PP i PE na temelju provedene analize ima potencijal, a kroz analizu osjetljivosti će se analizirati na koji način i u kojim uvjetima projekt ulazi u sferu isplativog.

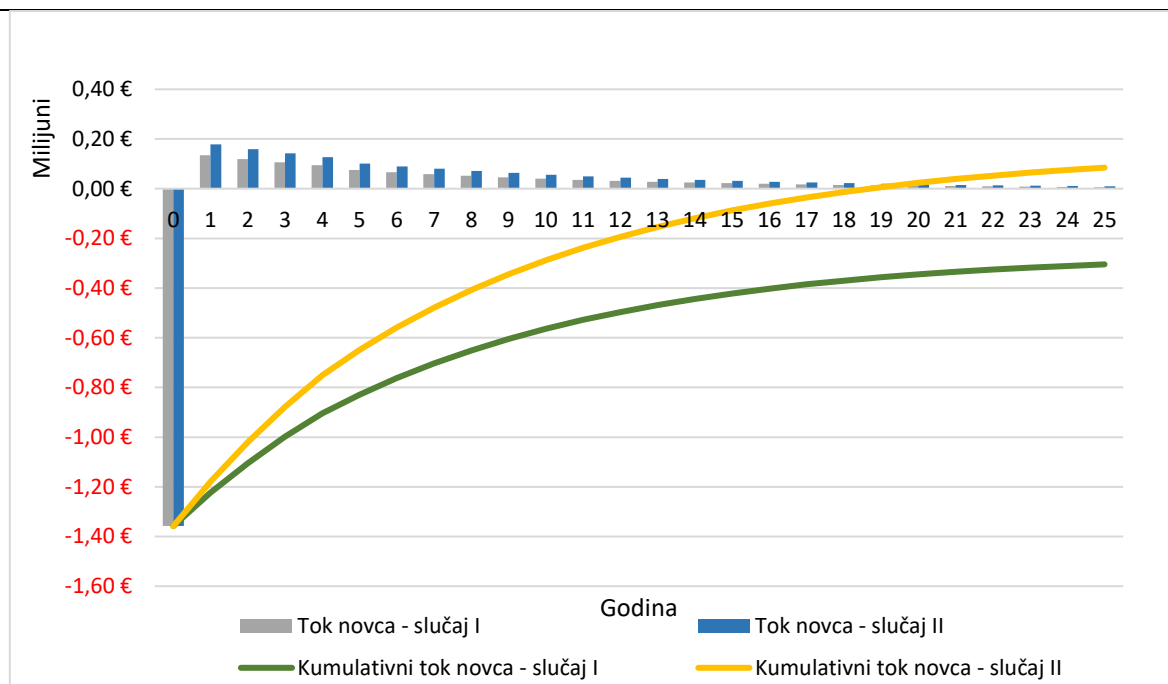
### **6.3.1. Isplativosti investicije s dodatnim izvorom prihoda**

U slučaju pooštavanja zakona i regulativa vezanih uz zbrinjavanje plastičnog otpada, otvara se mogućnost za dodatnu zaradu postrojenja koja se bave oporabom plastičnog otpada ukoliko se uvede naplata pristojbi za zbrinjavanje tog istog plastičnog otpada. U prvom dijelu proračuna analizirano je postrojenje građeno od strane Pos - Plast d.o.o i analiza je provedena prema njihovim zahtjevima, stoga u proračunu nema dodatnog prihoda od naplaćivanja

pristojbe za zbrinjavanje otpada. U ovom dijelu rada će se analizirati neovisno postrojenje istih radnih parametara kao u baznim slučajevima, koja su u mogućnosti naplaćivati i tržišnu pristojbu za zbrinjavanje otpada, a koja bi bila dodatni prihod postrojenju te bi omogućilo isplativije poslovanje. U slučaju uvođenja nove zakonske regulative, tvrtkama koje bi morale zbrinuti plastični otpad na odgovarajući način bilo bi jeftinije plaćati pristojbu za zbrinjavanje tvrtkama koje se bave njezinom oporabom nego odlagalištima jer će zbrinjavanje plastičnog otpada odlaganjem u budućnosti biti znatno skuplje ili čak zabranjeno. Cijena plastičnog otpada kreće se u rasponu od 0 € do 28 € po toni ([53],[54]), a u proračunu je procijenjena na 11 € po toni otpada iz razloga što su u RH niže cijene odlaganja plastičnog otpada.

Uvođenjem dodatnog izvora prihoda od naplate pristojbe za zbrinjavanje otpada (11 €/t), postrojenja za pirolizu kapaciteta 5 TPD u kojem se ulazna sirovina sastoji od PP, PC i PE (slučaj I) provedene dodatne analize pokazale su da je postrojenje i dalje neisplativo. Unutarnja stopa povrata za takav scenarij iznosi 7,44 % što je za 1,85 % više nego u baznom slučaju, tj. bez prihoda od naplate pristojbe za zbrinjavanje otpada. Drugim riječima, pored glavnog prihoda od prodaje sintetskog ulja, koji na godišnjoj razini iznosi 362.823,62 €, postrojenje upriličava dodatnih 18,592,50 € godišnje od naplate pristojbe za zbrinjavanje 1.675 tona plastičnog otpada koji se oporabi pirolizom. Ukupni gubitak postrojenja na kraju životnog vijeka iznosi 304.626,06 €. Na Slika 21. prikazan je dijagram koji prikazuje sadašnju vrijednost toka novca za svaku godinu vijeka trajanja projekta, te liniju kumulativnog toka novaca sadašnje vrijednosti za slučaj I.

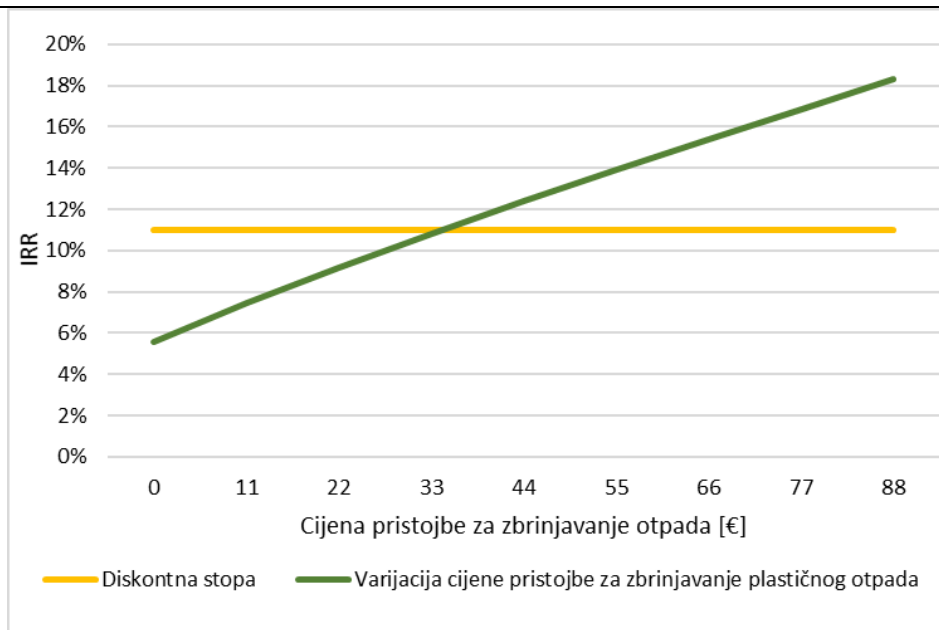
Postrojenje kapaciteta 5 TPD u kojem se ulazna sirovina sastoji od PP i PE (slučaj II), koji se u baznom slučaju pokazao neisplativ (IRR=10,34 %), pored glavnog izvora zarade od prodaje sintetskog ulja imao bi dodatni prihod od naplate pristojbe za zbrinjavanje plastičnog otpada (11 €/t). U tom slučaju pored godišnjeg prihoda od prodaje sintetskog ulja u iznosu od 404.165,53 €, postrojenje bi na godišnjoj razini zaradilo i dodatnih 18,592,50 € od naplate pristojbe za zbrinjavanje 1.675 tona plastičnog otpada koje obradi procesom pirolize. Nakon provedenog proračuna u kojem je uzet u obzir i dodatni prihod od naplate pristojbe za zbrinjavanje otpada, postrojenje za pirolizu (slučaj II) pokazalo se isplativo jer IRR iznosi 11,93 % što je više od korištene diskontne stope. Ukupna dobit postrojenja na isteku životnog vijeka iznosi 84.625,92 €. Na Slika 21. prikazan je dijagram koji prikazuje sadašnju vrijednost toka novca (slučaj II) za svaku godinu vijeka trajanja projekta, te liniju kumulativnog toka novaca sadašnje vrijednosti. Povrat investicije u postrojenje za pirolizu u ovom slučaju je nakon 19 godina.



Slika 21. Tok novca sadašnje vrijednosti postrojenja - slučaj I i II - dodatni prihod

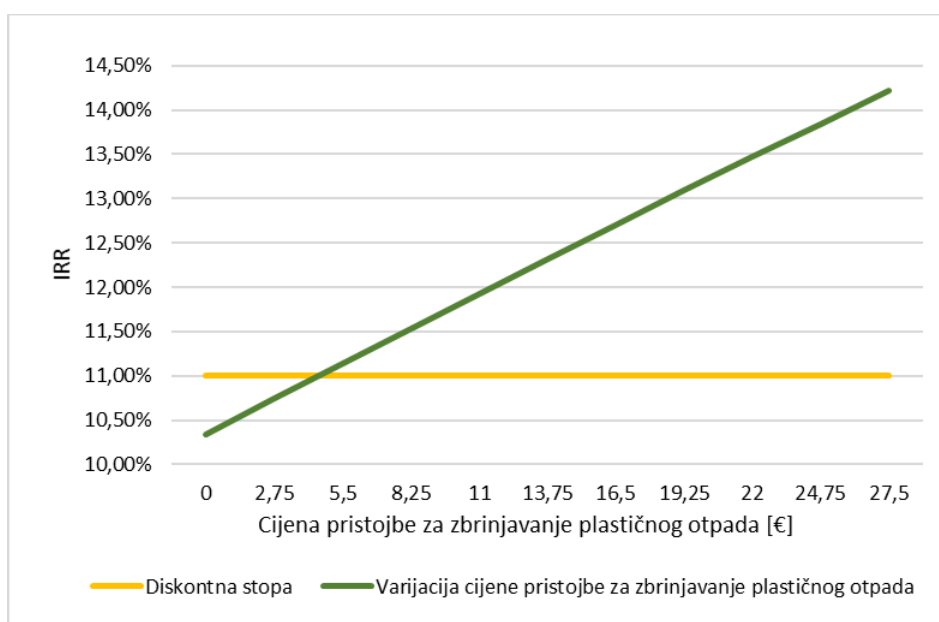
### 6.3.2. Minimalni iznos pristojbi za zbrinjavanja otpada

Komercijalna postrojenja za pirolizu u svijetu rade na principu naplaćivanja usluga zbrinjavanja otpada koja im predstavlja dodatni izvor financiranja uz prodaju sintetskog ulja te omogućuje profitabilno poslovanje. Slične pristojbe za zbrinjavanje otpada postoje za odlagališta te za spalionice otpada. Uvođenjem dodatnog prihoda od pristojbi za zbrinjavanje plastičnog otpada (tj. dodatnog financiranja) pored primarnog prihoda postrojenja za pirolizu od prodaje sintetskog ulja, potrebno je definirati minimalni iznos pristojbe za zbrinjavanje otpada za koji bi investicija bila isplativa u slučaju I i slučaju II. Iz dijagrama na Slika 22. može se vidjeti da kada bi naknada za zbrinjavanje otpada iznosila 34,40 € po toni obrađenog otpada, postrojenje za pirolizu (slučaj I) bi postalo isplativo, tj. to je minimalni iznos pristojbe za zbrinjavanje otpada za koju je unutrašnja stopa povrata jednaka korištenoj diskontnoj stopi.



**Slika 22. Utjecaj promjene cijene pristojbe za zbrinjavanje plastičnog otpada na isplativost postrojenja - slučaj I**

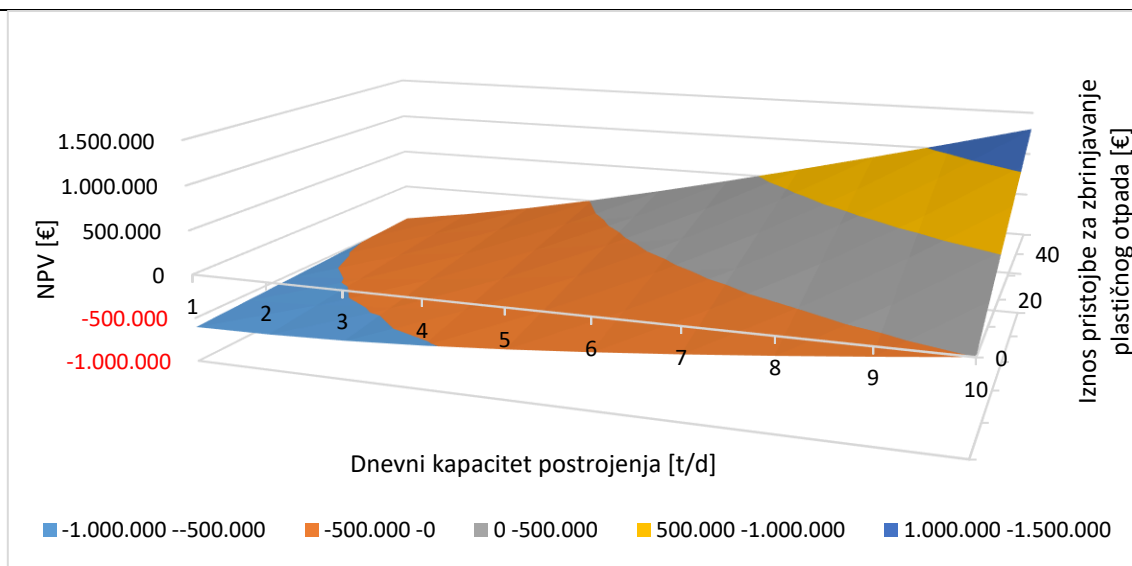
Za slučaj II, naknada za zbrinjavanje otpada trebala bi iznositi minimalno 4,50 €/t da bi unutarnja stopa povrata bila jednaka korištenoj diskontnoj stopi i da bi investicija bila isplativa. Iz dijagrama na Slika 23. može se vidjeti da kada postrojenje nema dodatni prihod od pristojbe za zbrinjavanje plastičnog otpada, unutarnja stopa povrata odgovara baznom slučaju za postrojenje kapaciteta 5 TPD kojemu se ulazna sirovina sastoji od PP i PE (slučaj II). U slučaju porasta pristojbe na 27,5 €/t, unutarnja stopa povrata postrojenja iznosila bi 14,2 %.



**Slika 23. Utjecaj promjene cijene pristojbe za zbrinjavanje plastičnog otpada na isplativost postrojenja - slučaj II**

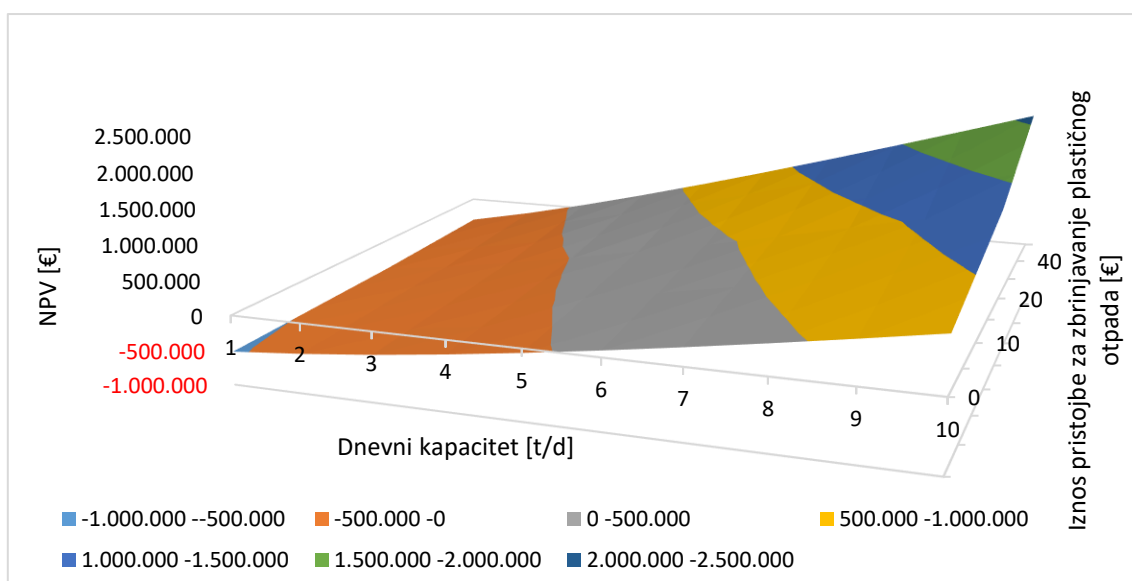
Izračunati minimalni iznosi pristojbe za zbrinjavanje otpada koji bi se oporabio pirolizom za slučaj I i II uspoređen je s cijenama drugih načina zbrinjavanja otpada. Cijena zbrinjavanja otpada na odlagalištu na području Vrbovca iznosi 47,48 €/t [47], dok se naknada za spaljivanje otpada u spalionicama kreće od 40 € do 166 € po toni otpada [54],[55]. Iz navedenog, može se zaključiti kako iznos minimalne pristojbe za zbrinjavanje otpada za slučaj I (34,40 €/t), za koju je postrojenje za pirolizu isplativo malo niža od cijene zbrinjavanja otpada na odlagalištu, ali je znatno niža od prosječne vrijednosti naknade za spaljivanje otpada u spalionici. Za slučaj II, minimalni iznos pristojbe iznosi 4,50 €/t što je nekoliko puta manje u usporedbi s cijenom zbrinjavanja otpada na odlagalištu ili naknadom za spaljivanje otpada u spalionici. Niži iznos pristojbe za zbrinjavanje otpada koji bi se oporabio pirolizom, omogućio bi postrojenju za pirolizu (slučaj II) konkurentnost na tržištu po pitanju zbrinjavanja otpada, te bi se tvrtkama isplatilo plaćati znatno nižu pristojbu iako bi na taj način mogli zbrinuti samo otpad koji se sastoji od PP i PE.

U ovom dijelu rada analizirao se utjecaj različitih kapaciteta postrojenja i različitih iznosa dodatnog financiranja u obliku pristojbe za zbrinjavanje otpada na isplativost investiranja u postrojenje za pirolizu za slučaj I i II. Raspon u kojem je razmatrana moguća promjena veličine postrojenja je od 1 do 10 tona po danu (TPD), dok je iznos pristojbi za zbrinjavanje otpada razmatran u rasponu od 0 do 50 € po toni obrađenog otpada. Na Slika 24. i Slika 25. prikazani su dijagrami iz kojih se može vidjeti ovisnost isplativosti postrojenja za pirolizu za slučaj I i II o promjeni dnevnog kapaciteta postrojenja i promjeni iznosa pristojbe za zbrinjavanje plastičnog otpada. Linija isplativosti za oba slučaja nalazi se između narančastog i sivog područja na dijagramima (Slika 24. i Slika 25.), tj. to je linija koja označava neto sadašnju vrijednost postrojenja jednaku nuli. Područje desno od narančaste plohe predstavlja profitabilno područje za oba slučaja. Za slučaj I može se vidjeti da za postrojenje od 10 TPD može biti isplativo bez dodatnog financiranja u obliku pristojbe za zbrinjavanje otpada, dok pri iznosu pristojbe od 50 €/t postrojenje kapaciteta 3,95 TPD može biti isplativo.



**Slika 24. Prikaz isplativosti postrojenja ovisno o promjeni kapaciteta i iznosa pristojbe - slučaj I**

Postrojenje za pirolizu (slučaj II) kapaciteta 5,4 TPD je isplativo bez dodatnog financiranja, dok bi za iznos pristojbe za zbrinjavanje otpada od 50 €/t omogućila isplativost postrojenju dnevnog kapaciteta od 2,74 tone.



**Slika 25. Prikaz isplativosti postrojenja ovisno o promjeni kapaciteta i iznosa pristojbe - slučaj II**

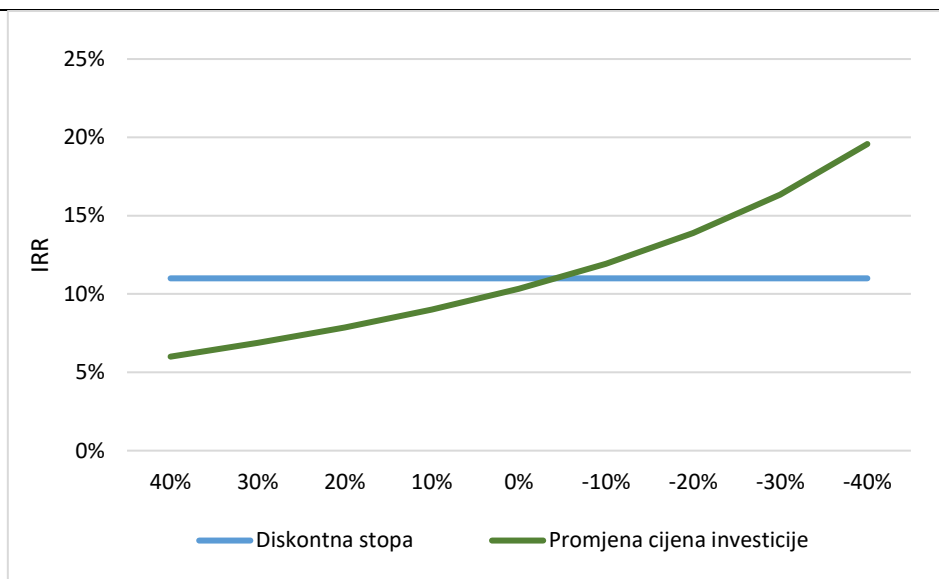
Analiza vezana uz isplativost investicije samo o promjeni kapaciteta postrojenja biti će opisana detaljnije u zasebnom poglavlju.

#### 6.4. Analiza osjetljivosti

Analiza osjetljivosti predstavlja jednostavnu metodu koja se koristi za lociranje i procjenu mogućih rizika koji utječu na profitabilnost projekata. U ovom dijelu rada želi se kroz analizu osjetljivosti prikazati što je potrebno da postrojenje za pirolizu bude isplativo bez pristojbe za zbrinjavanje otpada, tj. da jedini prihod postrojenja bude od prodaje sintetskog ulja na tržištu. Analiza osjetljivosti će se provesti na razini postrojenje kojemu se ulazna sirovina sastoji od PP i PE (slučaj II), tj. postrojenje koje prethodnim proračunom pokazalo neisplativim s iznosom IRR-a od 10,34 %, odnosno nešto manje od korištene diskontne stope. Prikupljeni podaci koji su korišteni u proračunu proizlaze iz rada različitih postrojenja za pirolizu te dostupnih, dokumenata i projekata koji su sa svim predmetnim literaturnim navodima navedeni u Prilogu 1. Korišten je „kriterij isključivanja“ za prikupljene podatke kako bi se smanjila greška, te su se takvi podaci na kraju uprosječili. Zbog mogućnosti variranja parametara i promjena uprosječenih vrijednosti korištenih u ovome radu od aktualnih vrijednosti koje vrijede za pirolitička postrojenja, promjenom različitih parametara i cijena želi se analizom osjetljivosti prikazati njihov utjecaj na isplativost ulaganja u postrojenje za pirolizu industrijskog plastičnog otpada. Korišteni parametri za analizu osjetljivosti su sljedeći:

- cijena investicije,
- cijena sirove nafte,
- cijena troškova održavanja,
- cijena električne energije,
- promjena prinosa sintetskog ulja.

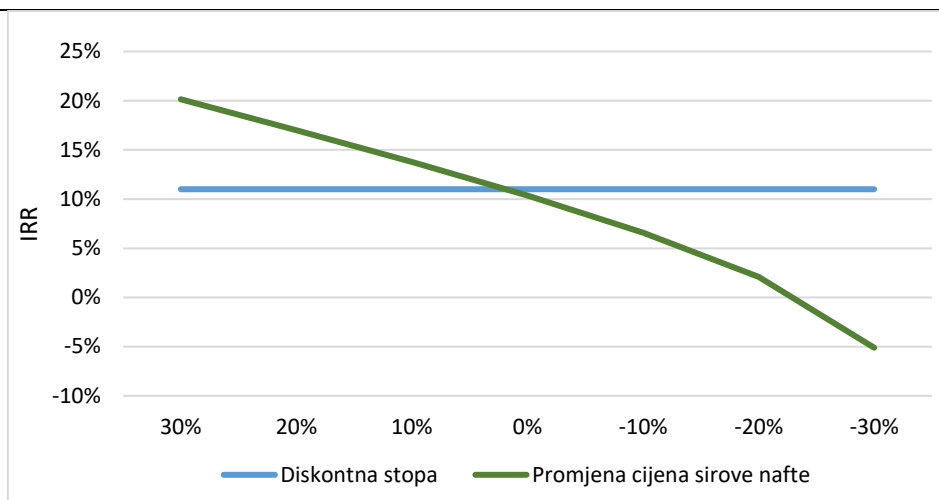
Utjecaj promjene cijene investicije postrojenja za pirolizu na unutarnju stopu povrata može se vidjeti na Slika 26. Kako je za bazni slučaj IRR bio 10,34 % vidimo da snižavanjem cijene investicije za 3 % projekt postaje isplativ, te snižavanjem troškova postrojenja za 40 % u odnosu na bazni slučaj IRR iznosi 24,7 %. S druge strane povećanjem troškova IRR se značajnije smanjuje te on iznosi 2,8 % kada se cijena investicije smanji za 40 %. U budućim godinama uslijed razvoja i usavršavanja tehnologije pirolize može se očekivati pad investicijskih troškova što će osigurati dodatnu profitabilnost projekta ove vrste.



**Slika 26. Utjecaj promjene cijene investicije na isplativost postrojenja**

Cijena sirove nafte je trenutno 50 \$ po barelu što je za 20 do 30 % niža cijena nego prijašnjih godina (u Prilogu 3., Slika priloga 3.1. prikazuje dijagram kretanja cijene sirove nafte u razdoblju od 2010. do 2020. godine). Cijena sirove nafte vrlo je važna kod analize, ali i za rad pirolitičkih postrojenja zbog toga što glavna zarada takvih postrojenja dolazi od prodaje sintetskog ulja, koje se na tržištu prodaje po cijeni sirove nafte. Padom kvalitete sintetskog ulja, rafinerije će morati raditi dodatnu obradu ulja, te će zahtijevati nižu otkupnu cijenu. Na Slika 27. prikazan je dijagram koji pokazuje utjecaj cijene sirove nafte na isplativost postrojenja za pirolizu. Iz dijagrama se može vidjeti da povećanjem cijene nafte od samo 2 % čini projekt isplativim, isto tako može se vidjeti da povećavanje cijene sirove nafte ima veliki utjecaj na profitabilnost postrojenja pa tako kada se cijena sirove nafte poveća za 30 %, IRR iznosi 20 %. Iz dijagrama na Slika 26. i Slika 27. može se zaključiti da promjena cijena nafte ima veći utjecaj na profitabilnost postrojenja nego od promjene cijene investicije. Na primjer da se cijena sirove nafte poveća za 20 %, IRR iznosi 16,9 %, dok s druge strane smanjenjem cijene investicije za 20 %, IRR bi iznosio 15,9 %.

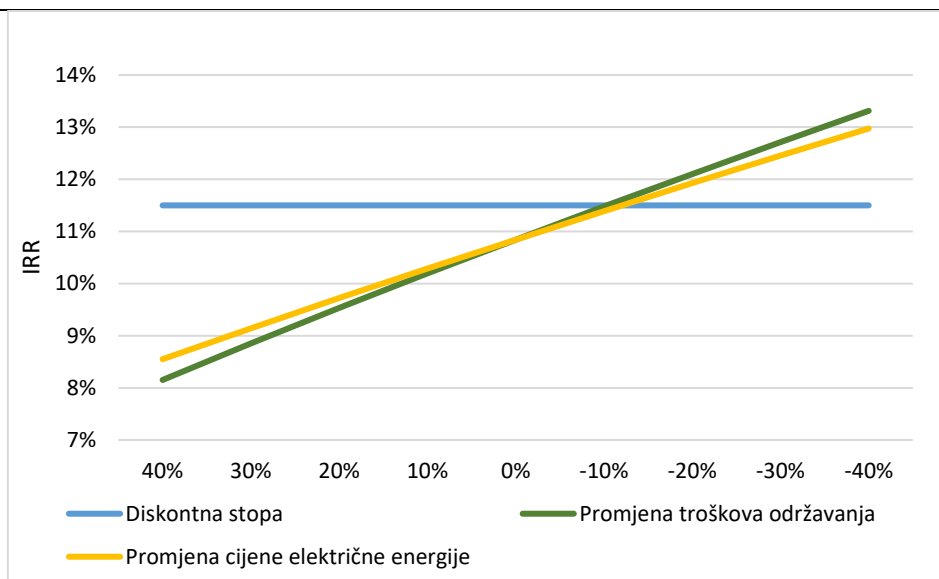




**Slika 27. Utjecaj promjene cijene sirove nafte na isplativost postrojenja**

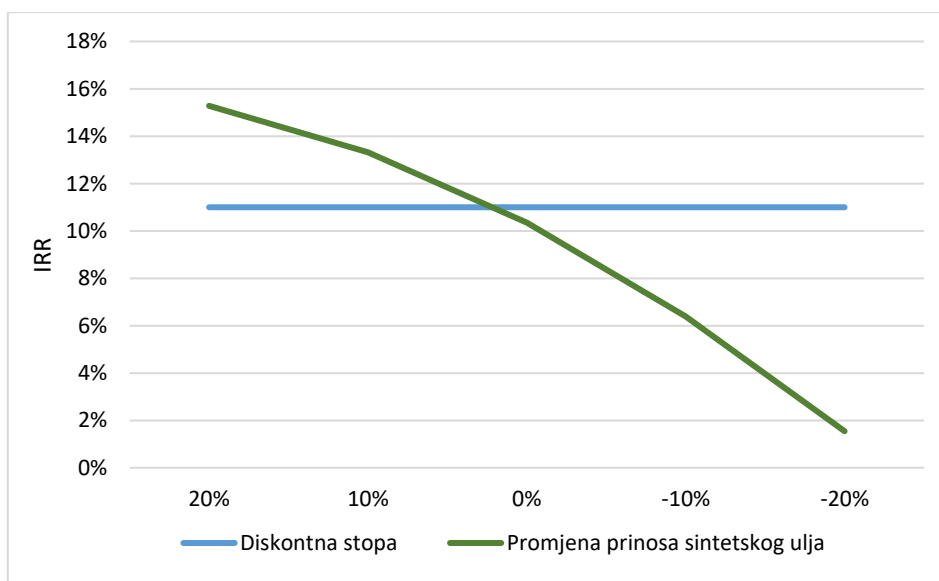
Ako bi se na tržištu povećala cijena sirove nafte za samo 10 %, tj. porasla otkupna cijena sintetskog ulja, a širenjem tehnologije pala cijena investicije za 10 % unutarnja stopa povrata iznosila bi 16,5 %, te bi se povrat investicije bio 9,5 godina.

Promjena operativnih troškova, kao što su cijena električne energije i troškovi održavanja, može utjecati na isplativost postrojenja za pirolizu. Iz dijagrama na Slika 28. može se zaključiti da se unutarnja stopa povrata linearno mijenja promjenom cijena električne energije i održavanja. Malo veći utjecaj na IRR imaju troškovi održavanja u odnosu na cijenu električne energije, ali oba parametra imaju manji utjecaj na profitabilnost projekta od cijene sirove nafte i investicije. U slučaju da se troškovi održavanja smanje za 11 % ili cijena električne smanji za 13 %, unutrašnja stopa povrata iznosila bi više od diskontne stope te bi ovakvi projekti bili isplativi. Kada bi se cijena električne energije i troškovi održavanja smanjili za 20 %, unutrašnja stopa povrata iznosila bi 12,6 %, te bi ukupna dobit postrojenja na kraju životnog vijeka bila 151.941,34 €.



**Slika 28. Utjecaj promjene različitih parametra na isplativost postrojenja**

Kako je već ranije istaknuto u radu, prinos sintetskog ulja ovisi o raznim faktorima od sastava ulazne sirovine, tj. vrsti plastike pa sve do korištene tehnologije i njezinih parametara tijekom procesa pirolize. Na Slika 29. prikazan je dijagram ovisnosti unutarnje stope povrata o promjeni prinosa sintetskog ulja. Loše vođenje procesa i smanjena kvaliteta ulazne sirovine ima za rezultat smanjeni prinos sintetskog ulja koji uzrokuje smanjenje IRR, tj. dovodi postrojenje za pirolizu u kategoriju neisplativih projekata. Iz dijagrama sa Slika 29. se može zaključiti da padom prinosa sintetskog ulja za samo 20 % unutarnja stopa povrata pada ispod 2 %. Zbog toga u proces mora ići odgovarajuća plastika i proces se mora voditi u optimalnim uvjetima.



**Slika 29. Utjecaj promjene prinosa sintetskog ulja na isplativost postrojenja**

Iz prikazanih dijagrama u analizi osjetljivosti vidljivo je da najveći utjecaj na profitabilnost postrojenja za pirolizu ima smanjenje troškova investicija, povećanje cijene sirove nafte (odnosno otkupne cijene sintetskog ulja) i povećanje prinosa sintetskog ulja, stoga će u budućnosti jačim razvojem tržišta vezanog uz pirolizu i njegovim širenjem isplativost ove vrste postrojenja biti sve veća.

### 6.5. Dodatna analiza planiranog kapaciteta postrojenja

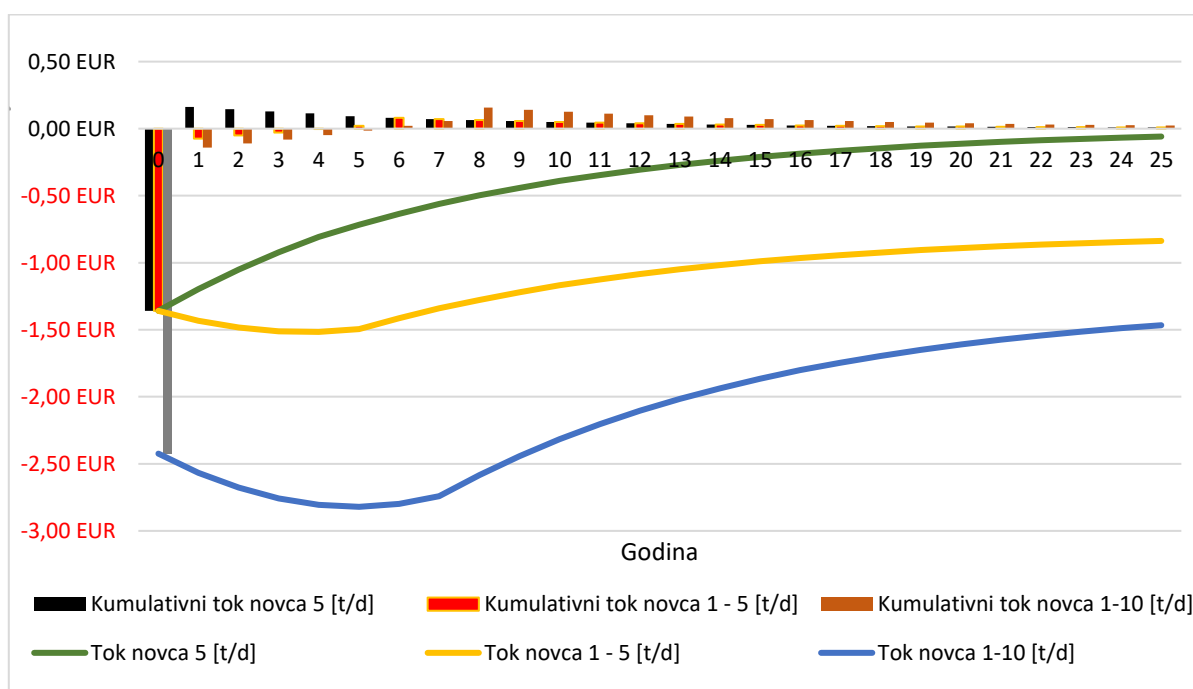
U ovom dijelu rada analizirano je na koji način promjena planiranog kapaciteta postrojenja utječe na isplativost projekta, te koja je najmanja potrebna količina otpadne plastike za isplativost investiranja u ovakvo postrojenje. Raspon u kojem je razmatrana moguća promjena veličine postrojenja je od 1 do 10 tona po danu (TPD).

Da se količina otpadne industrijske plastike zadrži na 1 toni po danu, koliko trenutno Pos - Plast d.o.o. raspolaže na dnevnoj razini i da se količina prihvatljive otpadne plastike za pirolizu ne mijenja, te se investicijski i operativni troškovi skaliraju prema baznom scenariju za postrojenje od 1 TPD, ukupni gubitak tog postrojenja na kraju životnog vijeka bi iznosio - 520.297,85 €. Najveći trošak u tom slučaju su plaće zaposlenika koje čine 56,5 % ukupnih operativnih troškova. U slučaju da se investicijski troškovi takvog postrojenja smanje za 35 %, a cijena sirove nafte poraste za 50 % unutarnja stopa povrata bi iznosila 11,4 % što bi postrojenje u tom slučaju učinilo isplativim. Imajući u vidu sve parametre čiji se utjecaj promatrao u analizi osjetljivosti postrojenje od 1 TPD bilo bi isplativo (IRR=12,6 %) kada bi se investicijski troškovi za takvo postrojenje smanjili za 30 %, cijena električne energije i troškovi održavanja smanjili za 25 %, a istovremeno rast prinosa i cijene sirove nafte bude 10 % odnosno 30 %.

Postrojenje kapaciteta od 5 TPD opisano je u baznom slučaju te je analizom osjetljivosti prikazan utjecaj različitih parametara na isplativost postrojenja. Kada bi se pooštrila regulativa i zakoni vezani uz zbrinjavanje otpada na odgovarajući način te omogućila jednostavnija nabava Pos- Plastu d.o.o. većih količina prihvatljivog plastičnog otpada, tako da one narastu na količinu od 10 TPD, te kada bi se izgradilo postrojenje adekvatnog kapaciteta, dobit postrojenja na kraju životnog vijeka bila bi 778,975,12 €, tj. IRR bi iznosio 15,6 % (investicijski i operativni troškovi skalirani za postrojenje od 10 TPD). Postrojenje za pirolizu od 10 TPD bilo bi isplativo u slučaju da cijena investicijskih troškova poraste za 20 % (IRR=11,1 %) ili da cijena sirove nafte padne za 10 % (IRR=12,0 %).

Kako je već prije navedeno Pos - Plast d.o.o. trenutno ima oko 1 TPD prihvatljivog plastičnog otpada za pirolizu, ali je svojim načinom rada u mogućnosti kroz određeno vrijeme postepeno povećavati proizvodnju, a time i količinu raspoložive sirovine za pirolizu. Iz tog razloga želi se prikazati kakav utjecaj ima kontinuirani rast obrađenog otpada u odnosu na rad s maksimalnim kapacitetom postrojenja po pitanju isplativosti projekta. U tom slučaju fiksni operativni troškovi i investicijski troškovi vezani su uz kapacitet postrojenja, dok su varijabilni operativni troškovi vezani uz količinu ulazne sirovine u proces.

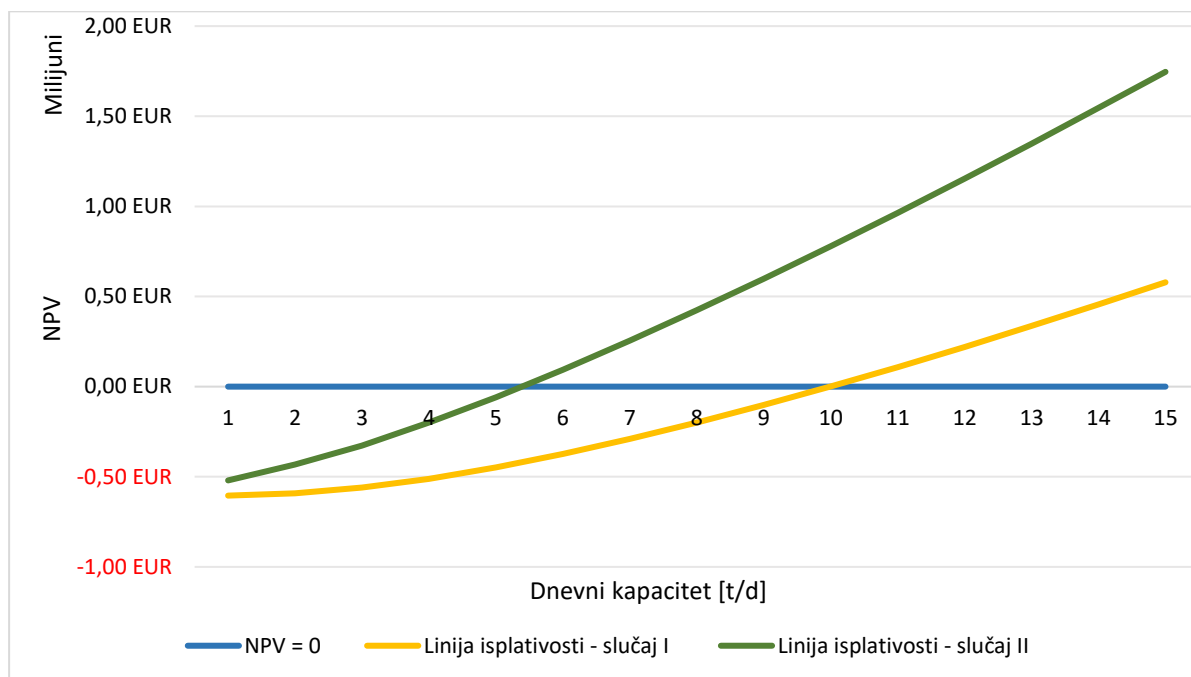
Na primjer kada se količina ulazne sirovine u proces kontinuirano mijenja od 1 TPD do 5 TPD u razdoblju od 6, godina odnosno s godišnjim povećanjem količine sirovine od 31 %, postrojenje nije isplativo. Za takvo postrojenje unutrašnja stopa povrata iznosi 4,0 % što je manje od korištene diskontne stope, te ukupni gubitak postrojenja na kraju životnog vijeka iznosi 837.255,22 €. U drugom slučaju da se količina ulazne sirovine u proces postepeno povećava od 1 TPD do 10 TPD u razdoblju od 8 godina, tj. stopom od 33 % na godišnjoj razini, postrojenje također nije isplativo. Unutrašnja stopa povrata za takav slučaj iznosi 5,2 %, a ukupni gubitak na kraju životnog vijeka postrojenja iznosi 1.466.215,99 €. Usporedba takvih postrojenja s baznim postrojenjem od 5 TPD prikazana je na Slika 30.



Slika 30. Usporedba postrojenja različitih kapaciteta

Iz dijagrama na Slika 31. može se zaključiti o ovisnosti neto sadašnje vrijednosti projekta i različitim dnevnim kapacitetima postrojenja. Točka u kojoj linija neto sadašnje vrijednosti presjeca apscisu odgovara najmanjoj potrebnoj dnevnoj količini otpada za koju se isplati

investirati u adekvatno postrojenje za pirolizu. Najmanja potrebna količina plastičnog otpada na dnevnoj razini pri kojoj se investicija u postrojenje isplati, a kojemu se ulazna sirovina sastoji od PP, PC i PE (slučaj I), iznosi 10.000 kg odnosno na godišnjoj razini 3.350 tona plastičnog otpada. Za slučaj II u kojemu se ulazna sirovina sastoji od PP i PE najmanja potrebna količina otpadne plastike na dnevnoj razini iznosi 5.394 kg odnosno na godišnjoj razini iznosi 1.807 tona plastičnog otpada pri kojoj se investicija u opisano postrojenje isplati.



Slika 31. Prikaz ovisnosti NPV o dnevnom kapacitetu postrojenja

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je termokemijski način oporabe industrijskog plastičnog otpada postupkom pirolize. Proces pirolize odvija se pri visokim temperaturama u inertnoj atmosferi, te se iz plastičnog otpada dobiva sintetsko ulje, koje se može koristiti kao izvor energije ili sirovina za proizvodnju kemikalija. Kako se radi o tehnologiji koja još uglavnom nije dostigla komercijalnu razinu, količina dostupnih podataka o radu postrojenja za pirolizu je ograničena i postoji mogućnost da ti podaci variraju u odnosu na stvarno stanje. Prikupljeni podaci o parametrima pilot postrojenja i komercijalnih postrojenja (Prilog 1.) korišteni su u proračunu kojim se analizirala isplativost postrojenja za pirolizu. Prilikom definiranja podataka za proračun korišten je „kriterij isključivanja“, odnosno izostavljani su podaci koji značajno odstupaju od ostalih podataka u analiziranom setu. Na taj način dobiven je bolji uvid u tehničke podatke postojećih postrojenja, tj. relevantnije srednje vrijednosti prikupljenih podataka.

Proračun analize isplativosti postrojenja proveden je za tvrtku Pos - Plast d.o.o. koja na dnevnoj bazi ima oko 1 tone po danu prihvatljive plastike koju nije moguće iskoristiti za proizvodnju granula, a koja se može uporabiti pirolizom. Kako tvrtka Pos - Plast d.o.o. svojim načinom poslovanja može u kratkom vremenskom roku povećati raspoložive količine i sastav ulazne sirovine za pirolizu, iz tog razloga je analiziran kapacitet 5 tona na dan, te je provedena usporedba dva sastava ulazne sirovine kako bi se utvrdilo koji slučaj je isplativiji. Treba naglasiti da je odabrani kapacitet postrojenja za pirolizu od 5 tona na dan manji od prosjeka trenutnih pilot i komercijalnih postrojenja za pirolizu prikupljenih u literaturi, ali u ponudi ima postrojenja za pirolizu koja dnevno obrađuju od 1 do 5 tona plastičnog otpada.

U slučaju I ulazna sirovina za pirolizu sastojala se od PP, PC i PE, koji su odabrani kao prihvatljivi dijelovi ostatne industrijske plastike koja se nije mogla mehanički reciklirati. S druge strane za slučaj II ulazna sirovina sastojala se od PP i PE, koji imaju najbolji prinos i kvalitetu sintetskog ulja koji se dobije kao produkt procesa pirolize. Na temelju provedene tehno-ekonomske analize postrojenja za pirolizu kapaciteta 5 TPD ispostavilo se da su oba slučaja neisplativa. Za slučaj I unutarnja stopa povrata iznosi 5,59 %, dok za slučaj II ona iznosi 10,34 %. Razlika unutarnje stope povrata za slučaj I i slučaj II iznosi 4,75 % što proizlazi iz povećanog prinosa sintetskog ulja u slučaju II zbog kvalitetnije ulazne sirovine.

U slučaju strožih zakona i regulativa vezanih uz zbrinjavanje plastičnog otpada (primjerice zabrana odlaganja), otvara se mogućnost za dodatno financiranje postrojenja koja se bave uporabom plastičnog otpada ako se uvede sustav naplata pristojbi za zbrinjavanje tog istog

plastičnog otpada. Nakon provedenog proračuna u kojem je uzet u obzir i dodatni prihod od naplate pristojbe za zbrinjavanje otpada (11 €/t), postrojenje za pirolizu (slučaj I) pokazalo se i dalje neisplativo (IRR=7,44 %), dok se postrojenje u slučaju II pokazalo isplativim s unutarnjom stopom povrata od 11,93 %. Za slučaj I i II izračunati su i minimalni iznosi pristojbe za zbrinjavanje otpada za koju bi investicija bila isplativa. Za slučaj I, postrojenje za pirolizu postaje isplativo prema baznom proračunu kada pristojba za zbrinjavanje otpada iznosi minimalno 34,40 €/t, dok za slučaj II minimalna pristojba iznosi 4,50 €/t za koju je postrojenje isplativo. Izračunate minimalne cijene pristojbi za zbrinjavanje otpada manje su od trenutnih cijena zbrinjavanja otpada na odlagalištu ili naknada za spaljivanje otpada.

Iz provedene analize osjetljivosti vidljivo je da na značajan porast isplativosti postrojenja za pirolizu ima smanjenje troškova investicija, povećanje cijene sirove nafte i povećanje prinosa sintetskog ulja. Cijena električne energije i troškovi održavanja nemaju veliki utjecaj na profitabilnost postrojenja kao troškovi investicije, cijena sirove nafte i prinos sintetskog ulja, ali bi se snižavanjem tih troškova pomoglo u smanjenju operativnih troškova i time omogućili uspješnije poslovanje. Može se zaključiti da se pri dodatnom razvoju tržišta vezanog uz pirolizu i njegovim širenjem, isplativost ove vrste postrojenja bitno povećava u budućnosti.

U sklopu rada provedena je i dodatna analiza planiranog kapaciteta postrojenja kako bi se pokazao utjecaj kapaciteta na isplativost projekta. Raspon u kojem je razmatrana moguća promjena veličine postrojenja je od 1 do 10 tona po danu (TPD). Postrojenje za pirolizu dnevnog kapaciteta 1 tone pokazalo se neisplativim, dok se postrojenje kapaciteta 10 TPD pokazalo isplativim, s iznosom unutarnje stope povrata od 15,6 %. Najmanja potrebna količina otpadne plastike na dnevnoj razini pri kojoj se isplati investicija u predmetno postrojenje za bazni proračun iznosi 10.000 kg za slučaj I, dok je za slučaj II potrebno najmanje 5.394 kg plastičnog otpada dnevno.

Na kraju se može zaključiti, da piroliza, kao tehnologija termokemijske oporabe plastičnog otpada, nudi rješenje za zbrinjavanje ove vrste otpada koju nije moguće mehanički reciklirati. Razvojem tehnologije, doći će do pada cijene postrojenja za pirolizu, a to će rezultirati konkurentnošću pirolize u području zbrinjavanja plastičnog otpada. Drugi parametar koji znatno utječe na isplativost ove vrste tehnologije je cijena sirove nafte, za koju se može smatrati da će se u skoroj budućnosti vratiti na prijašnju vrijednost, ako ne i veću, te će se i tako povećati isplativost investiranja u tehnologiju pirolize.

---

**LITERATURA**

- [1] “What a waste,” *Dairy Industries International*, 2018. <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/index.html>.
- [2] Europski Parlament, “Direktiva 2008/98/EZ o otpadu i stavljanju izvan snage određenih direktiva,” *Službeni List Eur. unije*, vol. 15, no. 34, p. 126, 2008.
- [3] “Web-stranica Hrvatske agencije za okoliš i prirodu (HAOP).” <http://www.haop.hr/hr/tematska-podrucja/otpad-registri-oneciscavanja-i-ostali-sektorski-pritisci/gospodarenje-otpadom/o>.
- [4] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, “Izvešće o komunalnom otpadu za 2018. godinu,” vol. Zagreb, p. 156, 2019.
- [5] “Web-stranica National geographic society,” *American Cartographer*. <https://www.nationalgeographic.org/>.
- [6] M. Šercer, D. Opsenica, and G. Barić, *Oporaba plastike i gume*. Zagreb: Mtg-topgraf d.o.o., 2000.
- [7] S. M. Al-Salem, P. Lettieri, and J. Baeyens, “Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review,” *Waste Manag.*, vol. 29, no. 10, pp. 2625–2643, 2009.
- [8] P. Europe and EPRO, “Plastics - the Facts 2019,” 2019.
- [9] Statista, “Statista - The Statistics Portal for Market Data, Market Research and Market Studies,” 2019. <https://www.statista.com/>.
- [10] T. Filetin, F. Kovačićek, and J. Indof, *Svojstva i primjena materijala*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2006.
- [11] “Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje,” *Leksikografski zavod Miroslav Krleža*, 2020. <https://www.enciklopedija.hr/>.
- [12] “Web stranica Chemical Safety Facts.” <https://www.chemicalsafetyfacts.org/>.
- [13] Z. HRNJAK-MURGIĆ, *Gospodarenje polimernim otpadom*. Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, 2016.
- [14] “DIREKTIVA 2000/76/EZ EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA o spaljivanju otpada.” Europska Unija, pp. 148–153, 2000.
- [15] D. R. Schneider, “Skripta iz kolegija Energetska uporaba otpada i otpadnih materijala.”
- [16] S. D. Anuar Sharuddin, F. Abnisa, W. M. A. Wan Daud, and M. K. Aroua, “A review on pyrolysis of plastic wastes,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 115, pp. 308–326, 2016.



- 
- [17] F. Gao, "Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels," *Univ. Canterbury*, 2010.
- [18] D. Almeida and M. de F. Marque, "Thermal and Catalytic Pyrolysis of Polyethylene Plastic Waste," *Polimeros*, vol. 26, no. 1, pp. 1–8, 2015.
- [19] H. Punkkinen, A. Oasmaa, and J. Laatikainen, *Thermal conversion of plastic-containing waste : A review*. 2017.
- [20] The American Chemistry Council, "2015 Plastics-To-Fuel Project Developers Guide," *Ocean Recover. Alliance*, no. June, p. 74, 2015.
- [21] S. Ramesohl, L. Vetter, R. Meys, and S. Stegerž, "CHEMICAL PLASTICS RECYCLING – POTENTIALS AND DEVELOPMENT PROSPECTS." IN4climate.NRW GmbH, 2020.
- [22] S. Arnold, "Conversion technology: A complement to plastic recycling," *Res. Rep.*, no. April, pp. 1–20, 2011.
- [23] C. Park *et al.*, "Pyrolysis of polyethylene terephthalate over carbon-supported pd catalyst," *Catalysts*, vol. 10, no. 5, pp. 1–12, 2020.
- [24] American Chemistry Council and RTI International, "Environmental and Economic Analysis of Emerging Plastics Conversion Technologies Final Project Report Prepared for American Chemistry Council 700 2," no. 0212876, p. 65, 2012.
- [25] Ricardo-AEA, *Case Study 3 Cynar Plastics to Diesel*, no. 1. 2013, p. 8.
- [26] "Web stranica Pos-Plast d.o.o." <http://www.pos-plast.hr/Onama.html>.
- [27] "Web stanica Plastika info.com." <http://www.plastikainfo.com/>.
- [28] "Web stranica Viachemical." <http://viachemical.com/chlorinated-polyethylene-cpe-characteristics-and-application/>.
- [29] I. Ahmad *et al.*, "Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products," *Int. J. Green Energy*, vol. 12, no. 7, pp. 663–671, 2015.
- [30] M. Martynis, Mulyazmi, E. Winanda, and A. N. Harahap, "Thermal Pyrolysis of Polypropylene Plastic Waste into Liquid Fuel: Reactor Performance Evaluation," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 543, no. 1, 2019.
- [31] E. V. Antonakou *et al.*, "Catalytic and thermal pyrolysis of polycarbonate in a fixed-bed reactor: The effect of catalysts on products yields and composition," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 110, pp. 482–491, 2014.
- [32] A. Marcilla, M. I. Beltrán, and R. Navarro, "Thermal and catalytic pyrolysis of

- polyethylene over HZSM5 and HUSY zeolites in a batch reactor under dynamic conditions,” *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 86, no. 1–2, pp. 78–86, 2009.
- [33] A. Jukić, “Sirova nafta – sastav i svojstva,” Zagreb.
- [34] M. Brebu, M. A. Uddin, A. Muto, Y. Sakata, and C. Vasile, “The role of temperature program and catalytic system on the quality of acrylonitrile-butadiene-styrene degradation oil,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 63, no. 1, pp. 43–57, 2002.
- [35] A. K. Du, Q. Zhou, J. M. N. Van Kasteren, and Y. Z. Wang, “Fuel oil from ABS using a tandem PEG-enhanced denitrogenation-pyrolysis method: Thermal degradation of denitrogenated ABS,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 92, no. 1, pp. 267–272, 2011.
- [36] B. Fekhar, L. Gombor, and N. Miskolczi, “Pyrolysis of chlorine contaminated municipal plastic waste: In-situ upgrading of pyrolysis oils by Ni/ZSM-5, Ni/SAPO-11, red mud and Ca(OH)<sub>2</sub> containing catalysts,” *J. Energy Inst.*, vol. 92, no. 5, pp. 1270–1283, 2019.
- [37] “Business Plan for Pyrolysis Plant - Plastic/Tyre Recycling Plant.” <https://wastepyrolysisplant.net/>.
- [38] “BIOFABRIK , The White Refinery, informativni materijal.”
- [39] “Web stranica Valenteshop.ru.” <https://valenteshop.ru/hr/teplota-sgoraniya-prirodnogogaza-kdzh-kg-gazovoe-toplivo/>.
- [40] P. A. S. Inc., “A comparison of the properties of diluted bitumen crudes with other oils,” pp. 1–26, 2013.
- [41] L. M. Valdiviezo, “Transforming Non-Recyclable Plastics to Fuel Oil Using Thermal Pyrolysis,” 2018.
- [42] M. A. Tribe and R. L. W. Alpine, “Scale economies and the ‘0.6 rule,’” *Eng. Costs Prod. Econ.*, vol. 10, no. 1, pp. 271–278, 1986.
- [43] “PROSJEČNE MJESEČNE NETO I BRUTO PLAĆE ZAPOSLENIH za svibanj 2019,” *Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske.* [https://www.dzs.hr/Hrv\\_Eng/publication/2019/09-01-01\\_05\\_2019.htm](https://www.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2019/09-01-01_05_2019.htm).
- [44] “Web stranica tvrtke Hrvatska elektroprivreda Elektra d.o.o.” <https://www.hep.hr/elektra/poduzetnistvo/25>.
- [45] “Web stranica tvrtke Plin Vrbovec d.o.o. za distribuciju i opskrbu plinom.” <https://plin-vrbovec.hr/>.
- [46] “Web stranica Vodoopskrba i odvodnja Zagrebačke županije d.o.o.” <https://viozz.hr/>.

- 
- [47] “Web stranica Komunalac Vrbovec d.o.o.” <https://www.komunalac-vrbovec.hr/>.
- [48] “Web stranica Crude Oil Prices Today,” 2017. <http://www.macrotrends.net/2566/crude-oil-prices-today-live-chart>.
- [49] “Web stranica Hrvatska banka za obnovu i razvoj.” <https://www.hbor.hr/>.
- [50] “Web stranica Narodne novine e.” [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2001\\_06\\_54\\_872.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2001_06_54_872.html).
- [51] “Web stranica Ministarstva financija Republike Hrvatske.” <https://www.porezna-uprava.hr/>.
- [52] WaccExpert, “Web stranica WACC Expert - calculate your WACC!,” 2015. <http://www.waccexpert.com/>.
- [53] I. Benson, “Web stranica Resource.co,” *Resource*, 2019. <https://resource.co/article/mrf-gate-fees-increases-show-no-sign-abating>.
- [54] “Web stranica Letsrecycle.com,” 2020. <https://www.letsrecycle.com/prices/plastics/plastic-bottles/plastic-bottles-2020/>.
- [55] I. Palmer, “Web stranica Warp.org.uk,” 2015. <http://www.wrap.org.uk/content/latest-gate-fees-trends-revealed-wrap>.
- [56] “Web stranica Veba Oil Bottrop Germany - Feedstock Recycling.” <https://www.notorecycling.us/plastics/veba-oil-bottrop-germany.html>.
- [57] U. Arena and M. L. Mastellone, *Fluidized Bed Pyrolysis of Plastic Wastes*. 2006.
- [58] F. Perugini, M. L. Mastellone, and U. Arena, “A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes,” *Environ. Prog.*, vol. 24, no. 2, pp. 137–154, 2005.
- [59] D. A. Tsiamis and N. J. Themelis, “Transforming the non-recycled plastics of New York city to synthetic oil,” *2013 21st Annu. North Am. Waste-to-Energy Conf. NAWTEC 2013*, no. March, pp. 1–118, 2013.
- [60] S. Edwards, M. Kelleher, U. Valiante, G. Love, and S. Grushack, “Successful Plastic Packaging Management Programs and Innovations.” 2020.
- [61] Closed Loop Partners, “Accelerating Circular Supply Chains for Plastics: Keep Materials in Play and Grow Markets,” 2019.
- [62] S. Haig, L. Morrish, R. Morton, U. Onwuamaegbu, P. Speller, and W. Simon, “Plastics to oil products,” *Xionconsulting*, pp. 1–155, 2015.

- 
- [63] Strum Consulting, “Pyrolysis Plant Environmental Assessment Registration,” 2018.
- [64] S. Singh and B. Cosic, “APPENDIX D AIR MODELLING REPORT,” 2018.
- [65] A. Fivga and I. Dimitriou, “Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment,” *Energy*, vol. 149, pp. 865–874, 2018.
- [66] L.-M.-U. M. Technische Universität München, “ENRETEC Energy Recovery Technologies,” *e-conversion - Propos. a Clust. Excell.*, 2018.
- [67] Pyrocrat Systems, “Harnessing Technology to generate Quality Fuel from polymer waste.”
- [68] K. Sun, V. Scholar, and P. A. C. T. Bourtsalas, “Summary of Plastic-to-Oil Plants Recent Years,” *Dep. Earth Environ. Eng. Columbia Univ.*, 2020.
- [69] G. Yu, C.-Y. Hung, and I. Hung, “An Optimized Pyrolysis Technology with Highly Energy Efficient Conversion of Waste Plastics into Clean Fuel While Substantially Reducing Carbon Emission,” *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, vol. 9, no. 4, pp. 95–99, 2018.
- [70] M. Ghodrati, J. Abascal Alonso, D. Hagare, R. Yang, and B. Samali, “Economic feasibility of energy recovery from waste plastic using pyrolysis technology: an Australian perspective,” Springer Berlin Heidelberg, 2019. doi: 10.1007/s13762-019-02293-8.
- [71] I. Petersson and A. Svensson, “Regional plastic waste recycling through pyrolysis – a techno-economic evaluation,” 2019.
- [72] Ulises Raymundo Gracida Alvarez, “Towards Sustainable Production of Chemicals and Fuels From the Fast Pyrolysis of Waste Polyolefin Plastics,” 2019.
- [73] “Economic performance of pyrolysis of mixed plastic waste: 2 open-loop versus closed-loop recycling.”
- [74] J. N. Sahu *et al.*, “Feasibility Study for Catalytic Cracking of Waste Plastic to Produce Fuel Oil with Reference to Malaysia and Simulation using ASPEN Plus,” *Environ. Prog. Sustain. Energy*, pp. 676–680, 2012.
- [75] R. W. J. Westerhout, M. P. Van Koningsbruggen, A. G. J. Van Der Ham, J. A. M. Kuipers, and W. P. M. Van Swaaij, “Techno-economic evaluation of high temperature pyrolysis processes for mixed plastic waste,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 76, no. 3, pp. 427–439, 1998.

**PRILOZI**

- I. Podaci stvarnih pilot i komercijalnih postrojenja korištenih za tehno - ekonomsku analizu
- II. Ograničenja sastava ulazne sirovine postrojenja za pirolizu
- III. Kretanje cijene sirove nafte u razdoblju od 2010. do 2020. godine na svjetskom tržištu
- IV. CD-R disc

## Prilog 1. Podaci stvarnih pilot i komercijalnih postrojenja korištenih za tehno - ekonomsku analizu

U Tablici priloga 1.1. prikazani su konverzijski faktori prilikom pretvorbe u SI jedinice.

**Tablica priloga 1.1. Konverzijski faktori**

Naziv	Oznaka	=	Oznaka
Funta	1 lb	=	0,4536 kg
Kratka tona	1 tona	=	0,9072 m.tona
Funta po kratkoj toni	1 lb/tona	=	0,500 kg/m. tona
Milijun britanskih termalnih jedinica	1 MMBTU	=	0,2933 MWh
Tisuću britanskih termalnih jedinica	1 MBTU	=	0,0003 MWh
Britanska termalna jedinica	1 BTU	=	0,0003 kWh
Galon	1 gal	=	3,7854 l
Američki barel	1 barrel	=	42,00 gal
Mega joule	1 MJ	=	0,0003 MWh

U Tablici priloga 1.2. prikazani su tečajevi valuta korištenih u ekonomskoj analizi.

**Tablica priloga 1.2. Tečajevi valuta**

Valuta	Oznaka	=	Oznaka	Valuta
Američki dolar	1 USD	=	0,84 EUR	Euro
Britanska funta	1 GBP	=	1,11 EUR	Euro
Kuna	1 HRK	=	0,13 EUR	Euro

U sljedećim tablicama priloga prikazani su podaci o ulaznim i izlaznim tokovima postrojenja za pirolizu prikupljenih pregledom literature.

Tablica priloga 1.3.

Literatura	Jedinica	[24]	[20],[24]	[24]	[24],[56]	[24]	[57]	[58],[16]	[58]	[59]	[59],[60],[61]	[62]	[20]	[20]	
R.B. postrojenja		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	
Tvrtka		Envion	Aglyx	Climax	Veba	BP	BP Chemicals	BP process	Veba process	Aglyx	Climax Global Energy Inc.	Pyrolysis	Cynar	Golden Renewables	
Lokacija		Derwood, MD	Tigard, OR	Fairfax, SC	Bottrop, Njemačka		Grangemouth, Škotska	Hamburg		Portland, OR	Barrowell County, SC		Bristol, UK	Yonkers, NY, USA	
Tip depolimerizacije		Termalna piroliza	Termalna piroliza				Termalna piroliza	Termalna piroliza		Termalna piroliza	Termalna piroliza		Termalna piroliza	Termalna piroliza	
Kapacitet	tona/ danu	26,31	9,072	18,144	581,52		1,2	1,2		36,29	9,07	76,80	18,14	21,8	
Zahtjevi za sirovinu		Velikina čestica < 4 cm i rastopljena plastika	Ustrijena/nljevena plastika	Ustrijena i isjeckana plastika	Velikina čestica < 1 cm		Ustrijena plastika i uklanjanje neplastične mase			Ustrijena, granulirana ili peletizirana plastika	Ustrijena plastika	Potrebno je osušiti plastiku	Velikina čestica <3cm Potrebno je ukloniti neplastičnu masu	Očišćeno, osušena i ustrijena plastika	
Tip sirovine(% sastav, ako je dostupno )		HDPE, PP, LDPE, PE, PET, PVC i ostala plastika	HDPE, PP, LDPE, PE, PET, PVC i ostala plastika	100% plastika	Poliolefini (PE,PP)		Poliolefini (80-70%) PS (15-30%)	Poliolefini (PE,PP)	Poliolefini (PE,PP)	PET, HDPE, PVC LDPE, PP, PS i ostala plastika	Komunalni plastični otpad (preferirana plastika od #3-7, može prihvatiti sve vrste)	Komunalni plastični otpad	HDPE, LDPE, PP, PS	PVC, LDPE,PP, PS i ostala plastika	
Ograničenja sastava		PET i PVC (< 10%) u mali količinama			PVC < 4%		PET < 3-5% PVC < 2-4%	Onečišćenja <4%, pepeo <4.5%, klora <2.5%					PVC ~0% PET < 2%		
Anorganska materija sirovine		<%	100	100	100	4,5									
Sadržaj vlage u sirovini		<%	2		0-5	1		0,5-1	1			5			
Učinkovitost energetske oporabe		%	30-80	82-85	75		80	85					96		
Potrebna toplina za sušenje		kWh/mokratona										126			
UZAZ	Količina sirovine	tone po danu	26,3088	9,072	18,144				1		27,22	72,7		19,60	
		Potrošnja energije	kWh/tona	529,10	992,1	992,1	220,5	0,0331		58,89	266,67	35,83	352,74	16,50	+
	Ostali ulazi	Kisik	kg/tona						60						
		Katalizatori i kemikalije	kg/tona												
		CaO	kg/tona				0,00005		46	1					
		Amonijak	kg/tona												
		Pijesak	kg/tona					0,000002	8,5						
		Vodlik	kg/tona				1			11					
		E-plin	kg/tona				11								
		Dušik	kg/tona			minimalna količina									
		NaOH	kg/tona												
		HCl	kg/tona				1								
		Voda	l/tona	414,38				1669,05		2000		+		+	
		Zrak	kg/tona									+			
		Voda za hlađenje	l/tona	532		600,86			40000						
	Dodatna potrošnja goriva	Priradni plin	MWh/tona		Dodatno	0,00132				1,28					za pokretanje
		OFF-gas	MWh/tona												
		Nafta	MWh/tona			+			0,036						
		Para	MWh/tona				2,31481E-05			0,031					
		Toplina	MWh/tona										127,77		
		Toplina za pokretanje	MWh/tona										1,58		
		Sintetski plin	MWh/tona									+			
		Sintetsko ulje	MWh/tona	11,96	12,61		64,66				7,1		9,93		
		Vosak-teže frakcije	kg/tona						510	448		800			
		Lake frakcije (tekućine)	kg/tona			150-200	0,015	0,00005	340	265		911,32		1043,18	792,81
	Energetski proizvodi	Frakcija plina	kg/tona	100-250				0,000035	150	147	90	100	150	60	150
			MWh/tona									2,64	1,94		
		Dušik	kg/tona												
Koks		MWh/tona													
Benzin		kg/tona													
Dizel		kg/tona													
		l/tona											718,06		
		MWh/tona									297,93				
													8,98		

Tablica priloga 1.3. nastavak:

		Jedinica	Envion	Aglyx	Climax	Veba	BP	BP Chemicals	BP process	Veba process	Aglyx	Climax Global Energy Inc.	Pyrolysis	Cynar	Golden Renewables	
IZLAZ	Energetski priloživi	CaO/CaCl <sub>2</sub>	kg/tona						57							
		Pijesak	kg/tona						76							
		Toplina	MWh/tona													
		CaCl <sub>2</sub>	kg/tona			1					4,1					
		OFF_gas	kg/tona													
		HCl	kg/tona								5					
	Ostaci	Ugljenizirani ostatak	kg/tona		100							100	100	102,43	50	50
			MWh/tona									1,65	0,821	0,42		
		Čvrsti ostaci	kg/tona	80					200							
		Vosak	l/tona													
		Potrošeni katalizatori i kemikalije	kg/tona													
		Katalizatori i mulj	MWh/tona													
	Ostaci	Potrošeni SCR katalizator	kg/tona													
		Anorganski talog	kg/tona	150												
		Ostatak spaljivanja	kg/tona				1				66					
		Neopasni kruti otpad	kg/tona				10,00				50			80,25		
		Filterirani vosak za spaljivanje	kg/tona						0,000015		46					
			MWh/tona											0,95		
	Gubitak topline															
	Gubici vode															
	Gubici vode		l/tona													
	<b>Podaci o emisijama u atmosferu</b>															
	PM		kg/tona	zanemarivo	neregulirano	10										
		Dnevni prosjek	mg/mm <sup>3</sup>													
		Prosjek na pola sata	mg/mm <sup>3</sup>													
	CO <sub>2</sub>		kg/tona	3,7-9,25	436,36	250				345						
	CO <sub>2eq</sub>		kg/tona									582,43	279,74	58,71		
	Metan(CH <sub>4</sub> )		kg/tona	13-32,5	-											
	HCl	periodično(u trajanju od min.sat vremena)	mg/mm <sup>3</sup>												15	
	HF	periodično(u trajanju od min.sat vremena)	mg/mm <sup>3</sup>												2	
	Ugljikovodici		kg/tona			4	2				2,23					
	Sumporov dioksid (SO <sub>2</sub> )		kg/tona		neregulirano			0,0000005		2						
		periodično(u trajanju od min.sat vremena)	mg/mm <sup>3</sup>												75	
N <sub>2</sub> O		kg/tona														
NO <sub>x</sub> kao NO <sub>2</sub>		kg/tona	18,1-45,25	0,8	minimalna količina		0,0000001		0,3							
		ppm			minimalna količina											
	Dnevni prosjek	mg/mm <sup>3</sup>												300		
	Prosjek na pola sata	mg/mm <sup>3</sup>												600		
CO		kg/tona	1,8-4,5	0,5	minimalna količina											
		ppm														
	Dnevni prosjek	mg/mm <sup>3</sup>												75		
	Prosjek na pola sata	mg/mm <sup>3</sup>												150		
TOC	Dnevni prosjek	mg/mm <sup>3</sup>												15		
	Prosjek na pola sata	mg/mm <sup>3</sup>												30		
Hg	periodično(u trajanju od min.sat vremena)	mg/mm <sup>3</sup>												0,05		
Pb		kg/tona	0,001													
Cd		mg/mm <sup>3</sup>												0,05		
VOC		kg/tona	zanemarivo	0,8	minimalna količina											
HAP		kg/tona														
Dioksini i furani	periodično(u trajanju od min.sat vremena)	mg/mm <sup>3</sup>												0,1		
NH <sub>3</sub>		kg/tona				0,005				0,006						



Tablica priloga 1.4.

Literatura	Jedinica	[63],[64]	[65]	[41]	[66]	[20]	[24],[60],12	[59]	[62]	[20]	[20]	[67]	[68]	[24]	[69]		
R.B. postrojenja		P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27		
Tvrtka		Sustane Technologies	Pyrolysis system	NRP Pyrolysis Process	RES Polyflow	Nexus Fuels, LLC	JBI (Plastic2Oil)	JBI Inc.'s "Plastic2Oil" Process	Catalytic depolymerisati on	PK Clean	Vadxx	Polyfuel	PARC Plastic Advanced Recycling Corporation	H.Smart	R-ONETM (Regenerated Oil & New Energy)		
Lokacija		Sherwood, Canada			Perry, Ohio	Atlanta, GA, USA	Niagara Falls, NY			Salt Lake City, UT, USA	Akron, OH		Jiangsu, China		Hukou, Taiwan		
Tip depolimerizacije				Termalna piroliza	Termalna piroliza	Termalna piroliza	Katalitička piroliza	Katalitička piroliza		Katalitička piroliza	Katalitička piroliza	Katalitička piroliza	Katalitička piroliza				
Kapacitet	tona/dan	10	2,4	9,07	54,432	45,36	18,144	43,54	76,80	4,54	23	3,(6,12)	15,20	48,0816	2		
Zahtjevi za sirovinu		Očišćena i usitnjena plastika (6 mm)					Odvajanje od plastike (PET i PVC) i onečišćenja	Usitnjena i omeđana plastika	Potrebno je osušiti plastiku	Očišćena i usitnjena plastika	Veličina čestica < 5 cm						
Tip sirovine(% sastav, ako je dostupno )		HDPE, LDPE, PP i PS	PE, PP i PS	60% PP, 40% PE	Kruta i film plastika #1-7	HDPE, LDPE, PP i PS	Komunalna i postindustrijska otpadna plastika	HDPE, LDPE, PP	Komunalni plastični otpad	PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS i ostala plastika	HDPE, LDPE, PP, PS, ostala plastika, gume i EPDM	HDPE, LDPE, PP, PS, ABS i ostala plastika	PP, PE, PS, otpadne gume i uljni mulj		85% (PP+PE+PS) 15% (ABS+PET+PVC i ostale plastike)		
Ograničenja sastava		Neprihvatljivo PET i PVC			Potrebno je ukloniti neplastičnu masu	PVC < 1% i PET <2%	Ne prihvaća PET i PVC	Ne prihvaća PVC, najlon i male količine PET		PET+PVC < 40%	Izbjegavati PET, PVC i najlon	PVC < 1% PET < 15%	PVC < 5% PET ~0%				
Anorganska materija sirovine		<%						5									
Sadržaj vlage u sirovini		<%	1					10		5			5				
Učinkovitost energetske oporabe		%						92				95					
Potrebna toplina za sušenje	kWh/mokratona									126							
UJAZ	Količina sirovine	tone po danu	10	2,4	54,43			43,55	72,7		23	3					
		kWh/tona		411,6		513,28		0,3	29,85	16,50	211,98	967,28					
	Ostali ulazi	kg/tona														250	
		Kisik															
		Katalizatori i kemikalije						0,278	+	24,29	opcija-ovisi o sirovini		11	opcija-ovisi o sirovini	0,4	39,25	
		CaO															
		Amonijak															
		Pijesak															
		Vodik															
		E-plin															
		Dušik				45,36				+							0,4
		NaOH											0,167				
		HCl															
		Voda	l/tona		50				125,18			6018,32					
		Zrak	kg/tona		4,7												
		Voda za hlađenje	l/tona							86,93				66,67			
		Dodatna potrošnja goriva	Priradni plin	MWh/tona						0,009	za pokretanje		za pokretanje	za pokretanje			
	OFF-gas		MWh/tona			180				+			+			+	
	Nafta		l/tona													16,07	
	Para		MWh/tona														
	Toplina		MWh/tona														
	Toplina za pokretanje		MWh/tona								0,84						
	Sintetski plin		MWh/tona						0,06								
	Sintetsko ulje		MWh/tona		10,55	8,19			7,71	7,81						794,11	
	Vozak-teže frakcije		kg/tona		858	598,00		832,79		780,18	650,48		1043,18	876,27		604,15	953,73
	Lake frakcije (tekućine)		kg/tona				690	30							100		
	Plinovite frakcije		kg/tona		78,5	312,07	180	80	80	99,8	102,43		175	700	150		88,7
Dušik	MWh/tona				2,15				1,27	0,84							
Koks	kg/tona			45,36					0,074								
Benzin	kg/tona							11,5	27,21					10			
Dizel	kg/tona		900					850						750			
	l/tona																
	MWh/tona																

Tablica priloga 1.4. nastavak:

		Jedinica	Sustane Technologies	Pyrolysis system	NRP Pyrolysis Process	RES Polyflow	Nexus Fuels, LLC	JB1 (Plastic2Oil)	JB1 Inc.'s "Plastic2Oil" Process	Catalytic depolymerisation	PK Clean	Vadxx	Polyfuel	PARC Plastic Advanced Recycling Corporation	H.Smart	R-ONETM (Regenerated Oil & New Energy)	
IZLU	Energija, proizvod	CaO/CaCl <sub>2</sub>	kg/tona														
		Pijesak	kg/tona														
		Toplina	MWh/tona		1,156												
		CaCl <sub>2</sub>	kg/tona														
		OFF-gas	kg/tona														
		HCl	kg/tona														
	Ostaci	Ugljenizirani ostatak	kg/tona		70	52,62		57,21	68			75	100	180	125		
		Čvrsti ostaci	MWh/tona			0,35											
		Vosak	kg/tona														
		Potrošene katalizatori i kemikalije	l/tona						poslovna tajna							30	104,35
		Katalizatori i mulj	kg/tona								199,58						
			MWh/tona								1,80						
	Ostaci	Potrošeni SCR katalizator	kg/tona													0,1	
		Anorganski talog	kg/tona														
		Ostatak spaljivanja	kg/tona														
		Neopasni kruti otpad	kg/tona				130		2,5							0,005	
		Filtrirani vosak za spaljivanje	kg/tona														
	Gubitak topline	MWh/tona															
	Gubici vode	l/tona			47				113,56							1669,05	
	<b>Podaci o emisijama u atmosferu</b>																
	PM	Dnevni prosjek	kg/tona	0,089					0,019								0,0027
		Prosijek na pola sata	mg/mm <sup>3</sup>								15						
	CO <sub>2</sub>	Dnevni prosjek	mg/mm <sup>3</sup>								45						
		Prosijek na pola sata	kg/tona													450	
	CO <sub>2eq</sub>		kg/tona						0,145	136,81	56,22		0,59				
	Metan(CH <sub>4</sub> )		kg/tona														
	HCl		kg/tona						0,00015								
	HF	periodično(u trajanju od min.sat vremena)	mg/mm <sup>3</sup>														
		periodično(u trajanju od min.sat vremena)	mg/mm <sup>3</sup>														
	Ugjikovodici		kg/tona						0,00017								
Sumporov dioksid (SO <sub>2</sub> )	Dnevni prosjek	kg/tona	0,011					0,007								0,040	
	periodično(u trajanju od min.sat vremena)	ppm							0,02								
N <sub>2</sub> O	Dnevni prosjek	mg/mm <sup>3</sup>						0,15									
	Prosijek na pola sata	kg/tona	1,659					1,205							0,1	0,018	
NO <sub>x</sub> kao NO <sub>2</sub>	Dnevni prosjek	ppm							15,1								
	Prosijek na pola sata	mg/mm <sup>3</sup>															
CO	Dnevni prosjek	kg/tona	0,930					0,145							0,03		
	Prosijek na pola sata	ppm							3,1								
TOC	Dnevni prosjek	mg/mm <sup>3</sup>															
	Prosijek na pola sata	mg/mm <sup>3</sup>															
Hg	Dnevni prosjek	kg/tona															
	periodično(u trajanju od min.sat vremena)	mg/mm <sup>3</sup>															
Pb		kg/tona						0,01									
Cd		mg/mm <sup>3</sup>															
VOC		kg/tona	0,121					0,0085							0,1		
HAP		kg/tona						0,00017									
Dioksini i furani		mg/mm <sup>3</sup>															
NH <sub>3</sub>		kg/tona															

Tablica priloga 1.5. Kapitalni troškovi postrojenja za pirolizu

Postrojenje	Kapacitet (tona/dan)	Kapitalni troškovi(€)/TPG	Literatura
Pyrocrat Systems LLP	2,72	653,95	[20]
Pyrocrat Systems LLP	5,44	977,68	[20]
Climax	9,072	559,41	[20]
PK Clean	9,072	543,43	[20]
MK Aromatic Limited	10	870,00	[20]
NRP New York	10	440,12	[41]
Envion	26,31	712,08	[20]
NPR Australia	40	305,92	[70]
Agilyx	45,36	680,89	[20]

Tablica priloga 1.6. Parametri realnih postrojenja za pirolizu

Literatura	Životni vijek postrojenja (god)	Godišnji rad postrojenja (h)	Održavanje (%)	Osiguranje (%)
[41]	30	8472	3	1,5
[65]	20	7012	10	-
[71]	30	-	-	-
[70]	25	7884	6,9	3,2
[72]	20	8400	-	-
[73]	-	8000	4	1,5
[74]	-	8400	-	-
[75]	-	8000	5	1

**Prilog 2. Ograničenja sastava ulazne sirovine postrojenja za pirolizu**

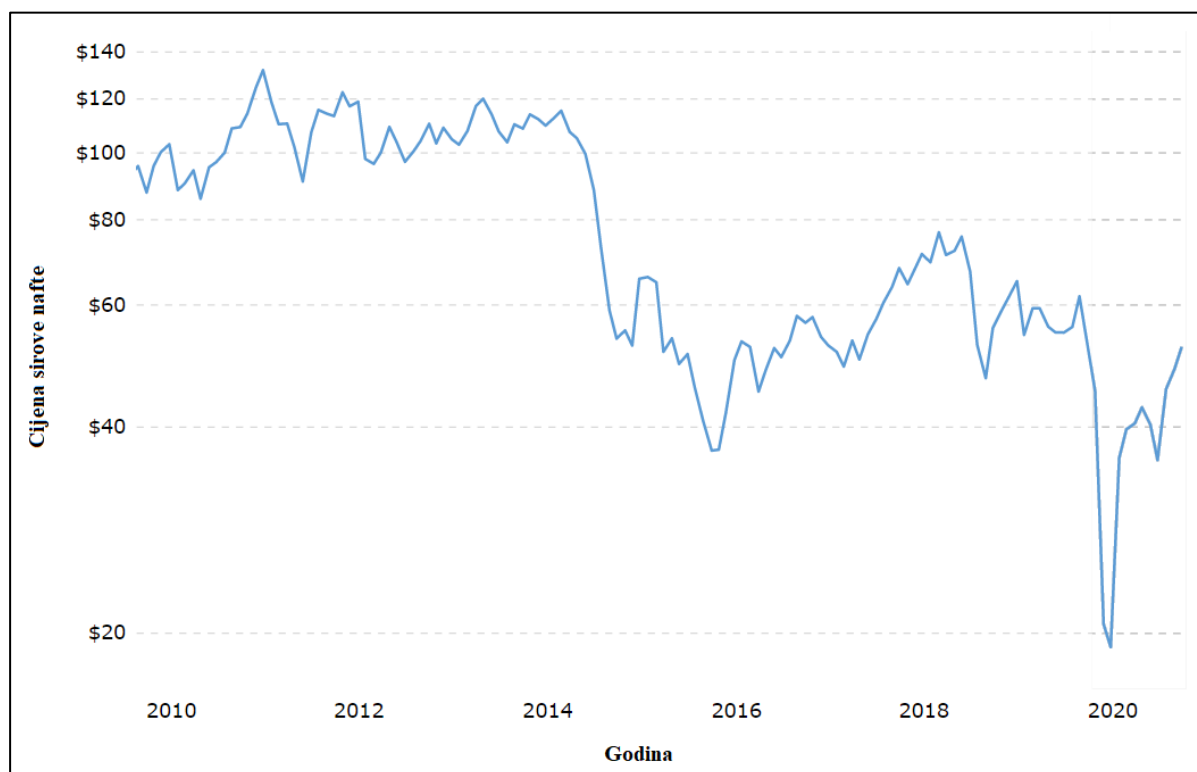
U sljedećoj tablici iskazana su ograničenja sastava ulazne sirovine postrojenja za pirolizu tvrtke BioFabrik.

Tablica priloga 2.1. Ograničenja sastava [38]

Short name	Name	Limit (%)
	Mercury-containing mixtures	0
Chlorosulfonated PE	Sulfur-containing plastic	0,01
PES, PPSU, PSU, PPS	Sulfur-containing plastic	0,01
FEP, ETFE, PCTFE, PTFCE, PFA, PTFE, PVDF, PVF	Fluorine-containing plastic	0,014
Polyacrylonitrile, polyacrylic	Nitrogen-containing plastic	1
PVC, chlorinated / chlorosulfonated PE	Chlorine-containing plastic	1
Cellulose ethers	Cellulose ethers	1
Epoxy resins	Epoxy resins	1
AAS, ABS, AES, ASA, MBS	Aldehyde / carboxylic acid / ester-former (aromatic hydrocarbons, ketones, aldehydes, esters)	1
UP	Polyester resins	1
SAN, SBR, SMS, SMA	Styrene polymers	1
ABS, aminoplasts, polyamide / PA / OPA, polyimide, polyurethane / PU / PUR foams, nitrogen-containing epoxy resins, wool	Nitrogen-containing plastic	2

Tablica priloga 2.1. nastavak [38]:

Short name	Name	Limit (%)
Phenolic plastics / PF	Aldehyde / carboxylic acid / ester-former (aromatic hydrocarbons, ketones, aldehydes, esters)	2
Polycarbonate / PC	Aldehyde / carboxylic acid / ester-former (aromatic hydrocarbons, ketones, aldehydes, esters)	5
PET, PETB, PBTP PBT	polyterephthalates	5
BUNA, PS, AAS, ABS, AES, ASA, BS, MBS, PPMS	Styrene polymers	5
Polymethylmethacrylate (PMMA), Polyoxymethylene (POM)	Aldehyde / carboxylic acid / ester-former (aromatic hydrocarbons, ketones, aldehydes, esters)	7
Polyether ketone / PEEK	Aldehyde / carboxylic acid / ester-former (aromatic hydrocarbons, ketones, aldehydes, esters)	10
Glass fiber	Glass fiber	0
EVOH	Ethylene-vinyl alcohol copolymer	2
	Inertmaterialien	5
	Water	5

**Prilog 3. Kretanje cijene sirove nafte u razdoblju od 2010. do 2020. godine na svjetskom tržištu**

Slika priloga 3.1. Kretanje cijene sirove nafte u razdoblju od 2010. do 2020. godine [48]