

Isplinjavanje kao rješenje za ostatni industrijski polimerni otpad nakon separacije - Tehno-ekonomska analiza

Brlić, Jelena

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:628922>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Jelena Brlić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Dr. sc. Tihomir Tomić, mag. ing.

Student:

Jelena Brlić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem svojim mentorima, prof. dr. sc. Danielu R. Schneideru i poslijedoktorandu dr. sc. Tihomiru Tomiću na strpljenju, izdvojenom vremenu, pruženoj pomoći i svim korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Želim se zahvaliti projektu "Napredni nositelji energije u oporabi plastičnog otpada - NEOPLAST" (3200) financiranom od Hrvatske zaklade za znanost na ustupljenim podacima i *Pos – Plastu d.o.o.* na korisnim informacijama potrebnim za izradu ovoga diplomskog rada.

Velika hvala mojoj obitelji i prijateljicama na pruženoj potpori i razumijevanju tijekom mojeg školovanja, mojim kolegicama i kolegama na svojoj pruženoj pomoći i strpljenju, a posebno se želim zahvaliti kolegici Polančec jer me natjerala da se vratim na treći kat.

Jelena Brlić



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, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1 | |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 22 - | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Jelena Brlić** JMBAG: 0035205267

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Isplinjavanje kao rješenje za ostatni industrijski polimerni otpad nakon separacije – Tehno-ekonomska analiza**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Gasification as a solution for residual industrial polymer waste after separation - Techno-economic analysis**

Opis zadatka:

U posljednjih 70 godina proizvodnja polimernih materijala na svjetskoj razini porasla je 240 puta te su polimerni materijali zamijenili brojne druge materijale u proizvodnji širokog spektra proizvoda i postali praktički nezamjenjivi u suvremenom svijetu. Sve je to rezultiralo proizvodnjom 61,8 milijuna tona polimernih materijala u 2018. godini na razini EU, ali i dovelo do godišnje proizvodnje od 16,8 milijuna tona polimernog otpada. Dok većina otpadnih materijala ulazi u otpadne tokove nakon potrošnje, veliki dio nastaje i tijekom proizvodnog procesa, odnosno prije nego što je konačni proizvod uopće proizveden, i sastoji se od oštećenih proizvoda, ostataka proizvodnih sirovina i ostalog proizvodni otpada. Stoga, iako su njegove količine manje, industrijski otpad predstavlja bolju sirovinu za različite procese uporabe. Kako bi se potaknulo korištenje različitih tehnologija njegove uporabe, mora se dokazati njihova konkurentnost postojećim rješenjima.

Stoga je u ovome diplomskom radu potrebno ocijeniti tehnno-ekonomsku izvodljivost i opravdanost izgradnje postrojenja za isplinjavanje 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 postojećim tehnologijama i postrojenjima za termokemijsku obradu plastičnog otpada isplinjavanjem kao i njihovim ograničenjima po pitanju materijala koji se može obraditi
- napraviti pregled podataka o tehnno-ekonomskim parametrima postrojenja
- iz sastava ostatnog plastičnog otpada ocijeniti koji dio je prikladan za ovakav način obrade i obrazložiti
- modelirati tehnološke i ekonomske parametre adekvatnog postrojenja za zadanu studiju slučaja
- na temelju tehnno-ekonomske analize i provedene analize osjetljivosti, ocijeniti izvedivost ovakve investicije te odrediti najmanju potrebnu količinu otpada za postizanje isplativosti investiranja u ovakvo postrojenje.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

11. studenoga 2021.

13. siječnja 2022.

17. – 21. siječnja 2022.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof.dr.sc. Daniel Rolph Schneider

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

Dr.sc. Tihomir Tomić

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| POPIS SLIKA | IV |
| POPIS TABLICA..... | VI |
| POPIS KRATICA | VII |
| POPIS OZNAKA | VIII |
| SAŽETAK..... | X |
| SUMMARY | XI |
| 1. Uvod..... | 1 |
| 1.1 Vrste energetske uporabe plastičnog otpada | 4 |
| 1.1.1 Izgaranje | 4 |
| 1.1.2 Proliza | 4 |
| 1.1.3 Isplinjavanje | 5 |
| 2. Polimerni materijali | 6 |
| 3. Isplinjavanje..... | 10 |
| 3.1 Stupanj konverzije ugljika i vodika | 11 |
| 3.2 Vrste isplinjača | 12 |
| 3.2.1 Isplinjač s fiksnim slojem | 12 |
| 3.2.2 Isplinjač s fluidiziranim slojem | 13 |
| 3.2.3 Isplinjač s fontantskim slojem..... | 13 |
| 3.3 Radni uvjeti isplinjavanja | 14 |
| 3.3.1 Omjer agensa za isplinjavanje i goriva | 14 |
| 3.3.2 Radna temperatura..... | 15 |
| 3.3.3 Agensi za isplinjavanje..... | 16 |
| 3.3.4 Radni tlak | 17 |
| 3.3.5 Sirovina | 18 |
| 3.4 Problemi kod isplinjavanja plastičnog otpada | 19 |
| 3.4.1 Tehnike uklanjanja katrana i čišćenja plina | 19 |
| 3.4.2 Isplinjavanje plastike s drugim krutim gorivima..... | 21 |
| 3.5 Isplinjavanje plazmom..... | 22 |
| 3.5.1 Utjecaj radnih uvjeta na isplinjavanje plazmom | 23 |
| 3.6 Utjecaj radne temperature i omjera vodene pare i goriva na produkte isplinjavanja | 24 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4. | Primjeri postrojenja za isplinjavanje otpada | 27 |
| 4.1 | Ulazni i izlazni tokovi procesa isplinjavanja polimernog materijala | 28 |
| 4.1.1 | Ulazni tokovi postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala | 28 |
| 4.1.2 | Izlazni tokovi postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala | 29 |
| 4.1.3 | Emisije u zrak postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala | 31 |
| 4.2 | Tehno-ekonomska analiza postrojenja za isplinjavanje otpada..... | 32 |
| 4.2.1 | Tehnološki aspekti postojećih postrojenja | 32 |
| 4.2.2 | Ekonomski aspekti postojećih postrojenja..... | 35 |
| 5. | Pos – Plast d.o.o..... | 38 |
| 5.1 | Sastav industrijskog plastičnog otpada..... | 39 |
| 5.2 | Ponašanje prisutnih polimernih materijala pri isplinjavanju | 42 |
| 5.3 | Sastav industrijskog plastičnog otpada za isplinjavanje..... | 46 |
| 6. | Tehno-ekonomska analiza odgovarajućeg postrojenja za isplinjavanje | 47 |
| 6.1 | Opis postrojenja..... | 48 |
| 6.1.1 | Tehnički parametri postrojenja..... | 48 |
| 6.1.2 | Zahtjevi za ulaznu sirovinu procesa..... | 49 |
| 6.1.3 | Tehnički parametri procesa | 51 |
| 6.1.4 | Potrebna toplinska energija | 52 |
| 6.1.5 | Produkti procesa isplinjavanja | 56 |
| 6.1.6 | Proizvodnja električne i toplinske energije..... | 57 |
| 6.2 | Rashodi postrojenja | 59 |
| 6.2.1 | Investicijski troškovi..... | 59 |
| 6.2.2 | Operativni troškovi postrojenja..... | 60 |
| 6.2 | Prihodi postrojenja..... | 62 |
| 6.3 | Financiranje projekta | 63 |
| 6.4 | Metoda procjene isplativosti..... | 63 |
| 6.5 | Prihod od naplate naknade za zbrinjavanje otpada..... | 64 |
| 6.5.1 | Utjecaj iznosa naknade na isplativost postrojenja | 65 |
| 6.6 | Isplativost investicije ovisno o kapacitetu postrojenja | 66 |
| 6.6.1 | Utjecaj promjene kapaciteta i cijene naknade za zbrinjavanje otpada na isplativost postrojenja..... | 67 |
| 6.7 | Analiza osjetljivosti | 68 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6.7.1 | Cijena investicije..... | 69 |
| 6.7.2 | Cijena električne i toplinske energije..... | 69 |
| 6.7.3 | Cijena troškova održavanja i radne snage..... | 71 |
| 6.7.4 | Udio sintetskog plina u proizvodu procesa isplinjavanja | 71 |
| 6.7.5 | Donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina..... | 72 |
| 6.8 | Utjecaj promjene parametara na trenutnu raspoloživu količinu otpada..... | 73 |
| 7. | Zaključak..... | 75 |
| | Literatura | 77 |
| | PRILOZI..... | 85 |
| | Prilog I. Podaci postojećih postrojenja korišteni u tehno-ekonomskoj analizi..... | 86 |
| | Prilog II. Dodatni podaci | 90 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Proizvodnja polimernih materijala u milijunima tona [3]..... | 1 |
| Slika 2. Svjetska godišnja proizvodnja plastike prema sektoru potrošnje [5]..... | 2 |
| Slika 3. Distribucija životnog vijeka plastičnih proizvoda po sektoru potrošnje [5] | 2 |
| Slika 4. Hijerarhija gospodarenja otpadom [95] | 3 |
| Slika 5. Identifikacijske oznake polimernih materijala [53] | 7 |
| Slika 6. Svjetska godišnja proizvodnja plastike prema vrsti polimernog materijala u milijunima tona [5] | 9 |
| Slika 7. Primjer postrojenja za isplinjavanje otpada [36]..... | 10 |
| Slika 8. Sheme isplinjača s fiksnim slojem [42] | 12 |
| Slika 9. Sheme isplinjača s fluidiziranim (lijevo i sredina) i fontanskim slojem (desno) [42] | 13 |
| Slika 10. Utjecaj promjene temperature isplinjavanja na udjele plinova i ogrjevnu vrijednost sintetskog plina [33] | 24 |
| Slika 11. Utjecaj promjene omjera VP/G na udjele plinova i ogrjevnu vrijednost sintetskog plina [33] | 24 |
| Slika 12. Utjecaj promjene omjera VP/G na potrošnju energije [33] | 25 |
| Slika 13. Proizvodnja sintetskog plina uz različite omjere PE/PP [33] | 26 |
| Slika 14. Dnevni kapaciteti postojećih postrojenja za isplinjavanje otpada | 34 |
| Slika 15. Raspoloživost postojećih postrojenja za isplinjavanje otpada | 34 |
| Slika 16. Ovisnost investicijskog troška o godišnjem kapacitetu postrojenja za termičko isplinjavanje | 36 |
| Slika 17. Ovisnost investicijskog troška za plinske turbine različitih kapaciteta (72)..... | 37 |
| Slika 18. Primjer granuliranog materijala dobivenog obradom u Pos – Plast-u [16]..... | 38 |
| Slika 19. Uzorci korišteni u FTIR analizi otpada [17] | 40 |
| Slika 20. Tok novca sadašnje vrijednosti postrojenja za isplinjavanje | 64 |
| Slika 21. Tok novca sadašnje vrijednosti postrojenja za isplinjavanje uz prihod od naknade..... | 65 |
| Slika 22. Ovisnost isplativosti postrojenja o iznosu naknade za zbrinjavanje otpada | 66 |
| Slika 23. Ovisnost isplativosti postrojenja o njegovom dnevnom kapacitetu..... | 67 |
| Slika 24. Ovisnost isplativosti postrojenja o iznosu naknade i dnevnom kapacitetu..... | 68 |
| Slika 25. Utjecaj promjene cijene investicije na isplativost postrojenja | 69 |
| Slika 26. Utjecaj promjene cijena električne i toplinske energije na isplativost postrojenja..... | 70 |
| Slika 27. Utjecaj promjene troškova održavanja i radne snage na isplativost postrojenja..... | 71 |

| | |
|---|----|
| Slika 28. Utjecaj promjene udjela sintetskog plina u proizvodu na isplativost postrojenja..... | 72 |
| Slika 29. Utjecaj promjene donje ogrjevne vrijednosti sintetskog plina na isplativost postrojenja | 72 |
| Slika 30. Usporedba toka novca sadašnje vrijednosti postrojenja za isplinjavanje kapaciteta 2 tone dnevno – osnovni i isplativi slučaj | 74 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Glavne reakcije procesa isplinjavanja [42] | 11 |
| Tablica 2. Usporedba različitih agensa za isplinjavanje [42] | 17 |
| Tablica 3. Usporedba katalizatora za kreiranje katrana [42] | 21 |
| Tablica 4. Korištene sirovine u postrojenjima za isplinjavanje otpada | 27 |
| Tablica 5. Podaci o ulaznim tokovima procesa postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala | 29 |
| Tablica 6. Količina proizvedenog sintetičkog plina u postojećim postrojenjima za isplinjavanje polimernih materijala | 29 |
| Tablica 7. Podaci o produktima procesa prerade dobivenog sintetskog plina u postojećim postrojenjima za isplinjavanje polimernih materijala | 30 |
| Tablica 8. Podaci o preostalim izlaznim tokovima procesa postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala | 31 |
| Tablica 9. Podaci o emisijama u zrak postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala | 32 |
| Tablica 10. Tehnički podaci postojećih postrojenja za isplinjavanje otpada | 33 |
| Tablica 11. Produkti postojećih postrojenja za isplinjavanje isključivo polimernih materijala | 35 |
| Tablica 12. Sastav otpada dobiven pomoću FTIR analize [17] | 40 |
| Tablica 13. Rezultati isplinjavanja polietilena | 43 |
| Tablica 14. Rezultati isplinjavanja polipropilena | 43 |
| Tablica 15. Rezultati isplinjavanja mješavine poli(etilen-tereftalata) i polietilena | 44 |
| Tablica 16. Sastav ulazne sirovine procesa isplinjavanja | 46 |
| Tablica 17. Sastav ulazne sirovine | 50 |
| Tablica 18. Sastav sintetskog plina nastalog isplinjavanjem pojedinih polimernih materijala | 50 |
| Tablica 19. Donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina nastalog isplinjavanjem pojedinih polimernih materijala | 50 |
| Tablica 20. Specifični toplinski kapaciteti polimernih materijala | 52 |
| Tablica 21. Radna mjesta i odgovarajuće godišnje bruto plaće | 61 |
| Tablica 22. Ukupni operativni troškovi za prvu godinu | 62 |
| Tablica 23. Godišnji prihodi postrojenja | 62 |

POPIS KRATICA

| | |
|------|--|
| ABS | Akrilonitril butadien stiren (Acrylonitrile butadiene styrene) |
| CPE | Klorirani polietilen (Chlorinated polyethylene) |
| EAA | Etilen-(akrilna kiselina) (Ethylene acrylic acid) |
| EPS | Ekspandirani polistiren (Expanded polystyrene) |
| EVOH | Etilen/vinil-alkohol (Ethylene vinyl alcohol) |
| HDPE | Polietilen visoke gustoće High-density polyethylene |
| LDPE | Polietilen niske gustoće Low-density polyethylene |
| IRR | Unutrašnja stopa povrata |
| NPV | Neto sadašnja vrijednost |
| PE | Polietilen (Polyethylene) |
| PET | Poli(etilen-tereftalat) Polyethylene terephthalate |
| PMMA | Poli(metil-metakrilat) (Polymethyl Methacrylate) |
| PP | Polipropilen (Polypropylene) |
| PS | Polistiren Polystyrene |
| PVC | Poli(vinil-klorid) Polyvinyl chloride |
| TPD | Tona po danu |
| TPG | Tona po godini |
| VP/G | Vodena para/gorivo |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|--------------------------|--------------------------|--|
| A_{zem} | m^2 | potrebna površina za postrojenje |
| C_{CTS} | € | investicijski troškovi za uspostavu centralnog toplinskog sustava |
| C_{inv} | € | investicijski troškovi za postrojenje za isplinjavanje |
| $C_{inv,TPG}$ | €/TPG | investicijski troškovi za postrojenje za isplinjavanje po toni godišnje obrađenog otpada |
| C_p | € | pravni troškovi |
| c_p | $\text{kJ}/(\text{kgK})$ | specifični toplinski kapacitet ulazne sirovine |
| $c_{p,ABS}$ | $\text{kJ}/(\text{kgK})$ | specifični toplinski kapacitet ABS-a |
| $c_{p,PC}$ | $\text{kJ}/(\text{kgK})$ | specifični toplinski kapacitet PC-a |
| $c_{p,PE}$ | $\text{kJ}/(\text{kgK})$ | specifični toplinski kapacitet PE-a |
| $c_{p,PET}$ | $\text{kJ}/(\text{kgK})$ | specifični toplinski kapacitet PET-a |
| $c_{p,PP}$ | $\text{kJ}/(\text{kgK})$ | specifični toplinski kapacitet PP-a |
| $c_{p,z}$ | $\text{kJ}/(\text{kgK})$ | specifični toplinski kapacitet zraka |
| C_{PP} | € | investicijski troškovi za plinsku turbinu i dr. |
| C_{uk} | € | ukupni investicijski troškovi |
| C_{zem} | € | ukupna cijena zemljišta |
| $C_{zem,zž}$ | €/m ² | cijena zemljišta u Zagrebačkoj županiji |
| E_{el} | MWh/god | električna energija dobivena iz sintetskog plina |
| $E_{el,postrojenje}$ | MWh/god | godišnja potrošnja električne energije |
| $E_{el,tržište}$ | MWh/god | električna energija koja se prodaje na tržištu |
| E_{PP} | MWh/god | toplinska energija sadržana u prirodnom plinu |
| $E_{reaktor}$ | MWh/god | toplinska energija koju je potrebno dovoditi reaktoru |
| $E_{reaktor.pokretanje}$ | MWh/god | toplinska energija koju je potrebno dovoditi reaktoru tijekom pokretanja |
| E_s | MWh/god | toplinska energija za zagrijavanje zraka u reaktoru |
| E_t | MWh/god | toplinska energija dobivena iz sintetskog plina |
| $E_{t,tržište}$ | MWh/god | toplinska energija koja se prodaje na tržištu |

| | | |
|------------------|---------------------|---|
| E_{vp} | MWh/god | ukupna toplinska energija koju je potrebno dovoditi za isparivanje vode |
| $E_{vp,reaktor}$ | MWh/god | toplinska energija za pregrijavanje vodene pare u reaktoru |
| $E_{vp,1-2}$ | MWh/god | toplinska energija koju je potrebno dovoditi za zagrijavanje vode |
| $E_{vp,2-3}$ | MWh/god | toplinska energija koju je potrebno dovoditi za isparivanje vode |
| E_z | MWh/god | toplinska energija za zagrijavanje zraka u reaktoru |
| H_d | MJ/kg | donja ogrjevna vrijednost |
| $H_{d,PP}$ | MJ/kg | donja ogrjevna vrijednost prirodnog plina |
| $H_{d,SP}$ | MJ/kg | donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina |
| h_1 | kJ/kg | specifična entalpija pothlađene vode |
| h_2 | kJ/kg | specifična entalpija vrele vode |
| h_3 | kJ/kg | specifična entalpija suhozasićene vodene pare |
| h_4 | kJ/kg | specifična entalpija pregrijane vodene pare |
| n | h/god | broj radnih sati u godini |
| $q_{m,s}$ | kg/dan | maseni protok sirovine |
| $q_{m,NP}$ | t/god | masa dobivenih nusprodukata u godini dana |
| $q_{m,z}$ | kg/dan | maseni protok zraka u danu |
| $q_{m,SP}$ | t/god | masa dobivenog sintetskog plina u godini dana |
| $q_{v,PP}$ | m ³ /dan | volumni protok dimnog plina |
| $q_{m,v}$ | kg/dan | maseni protok vode u danu |
| r | kJ/kg | specifična toplina isparavanja za vodu |
| ΔT | - | temperaturna razlika |
| V_{god} | TPG | godišnji kapacitet postrojenja |
| η_G | % | učinkovitost električnog generatora |
| η_{IT} | % | učinkovitost izmjenjivača topline |
| η_{KC} | % | stupanj konverzije ugljika |
| η_{KH} | % | stupanj konverzije vodika |
| $\eta_{PT,e}$ | % | električna učinkovitost plinske turbine |
| $\eta_{PT,t}$ | % | toplinska učinkovitost plinske turbine |
| τ | % | raspoloživost postrojenja |

SAŽETAK

Tema ovog rada je tehno-ekonomska analiza postrojenja za isplinjavanje kao rješenja za ostatni industrijski polimerni (plastični) otpad nakon separacije. Isplinjavanje je termokemijski proces energetske oporabe materijala kojim se dobiva sintetski plin. U radu je dan opis procesa isplinjavanja plastičnog otpada, utjecaj različitih parametara na takav proces te pregled tehnoloških i ekonomskih parametara postojećih postrojenja za isplinjavanje plastičnog otpada. Tehno-ekonomska analiza provela se za potencijalno postrojenje za isplinjavanje ostatnog industrijskog plastičnog otpada koje bi se izgradilo u sklopu privatnog poduzeća. Privatno poduzeće bavi se recikliranjem, tj. proizvodnjom granulata iz industrijskog plastičnog otpada, a dio otpada koji nije moguće obraditi recikliranjem potrebno je zbrinuti na odgovarajući način. Mogućnost je energetska oporaba procesom isplinjavanja. Pregledom literature utvrđeno je da gotovo svi polimerni materijali kojima raspolaže privatno poduzeće mogu poslužiti kao sirovina u procesu isplinjavanja (PP, PET, PC, ABS i PE). Razlog isključenja ostalih raspoloživih polimernih materijala (EVOH, CPE, EAA i PA) je nedostatak literature koja opisuje ponašanje ovih polimera tijekom procesa isplinjavanja te produkata takvih procesa. Parametri procesa isplinjavanja za potencijalno postrojenje odabrani su prema osrednjenim vrijednostima parametara postojećih postrojenja te prema dostupnoj literaturi. Za postrojenje je uzet nazivni kapacitet od 10 tona dnevno, odnosno 3.390 tona godišnje zbog mogućnosti da se trenutačna raspoloživa količina otpada od 2 tone dnevno poveća u kratkom roku. Proveden je proračun kako bi se dobio uvid u proizvedenu količinu sintetskog plina, odnosno električne i toplinske energije koje se u sklopu postrojenja proizvode iz sintetskog plina te nakon iskorištavanja za vlastite potrebe postrojenja, prodaju na tržištu. Zatim je provedena ekonomska analiza koja je pokazala neisplativost investicije u ovakvo postrojenje. Dan je pregled isplativosti investicije u ovisnosti o kapacitetu postrojenja i iznosu naknade za zbrinjavanje otpada. Analiza osjetljivosti pokazala je kako bi promjena dnevnog kapaciteta, cijene investicije, cijene električne i toplinske energije, cijene troška održavanja i radne snage, količine proizvedenog sintetskog plina i promjena njegove donje ogrjevne vrijednosti utjecala na isplativost postrojenja.

Ključne riječi: isplinjavanje, postrojenje za isplinjavanje, plastični otpad, tehno-ekonomska analiza

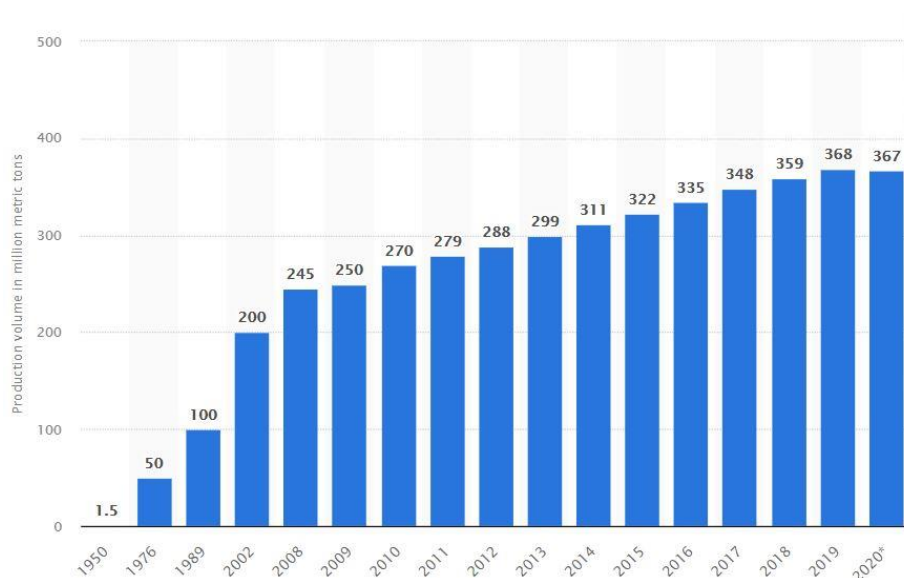
SUMMARY

The subject of this thesis is a techno-economic analysis of a gasification plant as a solution for residual industrial plastic waste after separation. Gasification is a thermochemical process used for energy recovery from materials, product of which is synthetic gas. This thesis gives a description of the gasification process, influence of different parameters on the course of the process and an overview of technical and economic parameters for existing plants for gasification of plastic waste. The techno-economic analysis was carried out for a potential plant which would be constructed for a private company. The private company manufactures granules by recycling industrial plastic waste and there is a need for an according way of disposing the waste not suitable for recycling. Energy recovery by gasification is a possible solution. A review of literature has shown that most of the available waste can be used as fuel in the gasification process (PP, PET, PC, ABS i PE). The reason behind the exclusion of the rest of the available waste is the lack of literature describing the behaviour of this materials during the gasification process and the products of such processes. The parameters for the potential plant have been determined according to averaged values of parameters from existing gasification plants and available literature. Due to the possibility of increasing the capacity from currently available 2 tonnes a day of plastic waste in a short period, it has been determined that the nominal capacity of the gasification plant will be 10 tonnes per day or 3.390 tonnes per year. Necessary calculations have been carried out to determine the amount of produced synthetic gas and the amount of electrical and thermal energy that are produced as a part of the plant from synthetic gas. Electrical and thermal energy are primarily used to cover the energy needs of the plant and the rest is sold at a market price. Economical analysis of the plant showed that an investment wouldn't be profitable. An overview of the influence of the plants daily capacity and the rate of the waste disposal fee on the profitability was given. The sensitivity analysis has shown what effect would changing the daily capacity of the plant, the amount of the investment, the price of electrical and thermal energy, the maintenance and labour cost, the amount of the synthetic gas produced and the value of lower heating value of the synthetic gas have on the profitability of the investment.

Key words: gasification, gasification plant, plastic waste, techno-economic analysis

1. Uvod

Prvi polimerni materijal kojeg su ljudi razvili je celuloid – 60-tih godina 19. stoljeća, a prvi pravi sintetički polimer bakelit izumljen je 1907. godine. Tek tijekom Drugog svjetskog rata usred povećane potražnje za materijalom, potrebe za očuvanjem prirodnih resursa te primijećene svestranosti sintetičkih polimera započinje masovna proizvodnja plastike [5]. Najlon – sintetički polimer sastavljen od poliamidnih vlakana koji je izumljen 1935. godine, poslužio je, između ostalog, za izradu padobrana, užadi, oklopa, podstave za kacige [7]. Pleksiglas – prozirna plastika od poli (metil – metakrilata) [8], zamijenio je staklo na avionima. Tijekom Drugog svjetskog rata, proizvodnja plastike porasla je za 300%, a nakon njegovog završetka, proizvodnja se okrenula prema potrošačkom društvu te nastavila rasti [5,6]. Slika 1. prikaz je proizvodnje plastike u milijunima tona po godinama prema kojem se vidi kontinuirani rast od 1950. godine do 2019. godine. U 2020. godini došlo je do blagog pada zbog obustave proizvodnje uzrokovane pandemijom COVIDA-19 no u narednim godinama se očekuje nastavak porasta godišnje količine proizvedene plastike. Ukoliko se proizvodnja nastavi sadašnjim trendom, 2050. godine proizvesti će se 1,1 milijarda tona plastike iz fosilnih goriva [3,5].

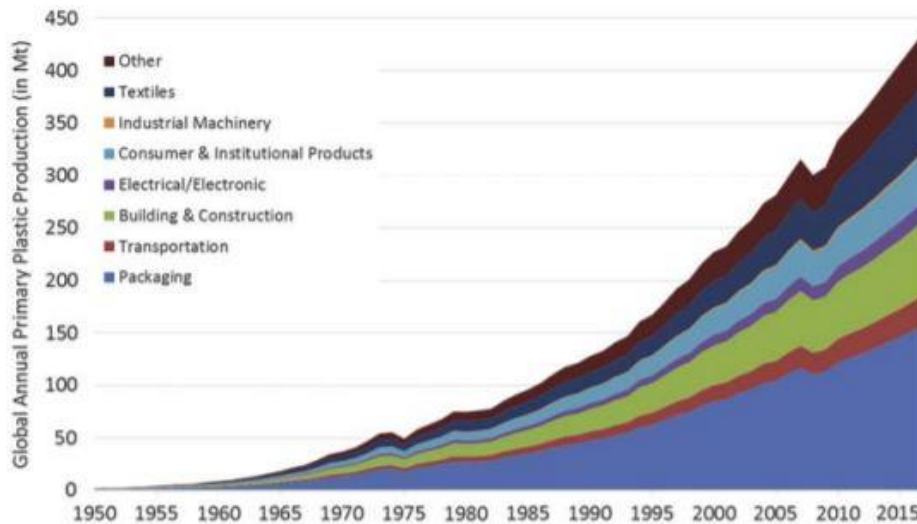


Slika 1. Proizvodnja polimernih materijala u milijunima tona [3]

Polimerni materijali danas se koriste u svim sektorima gospodarstva i za njih se često koristi zajednički naziv - plastika. Značajna je primjena plastike u ambalažiranju, građevinarstvu i

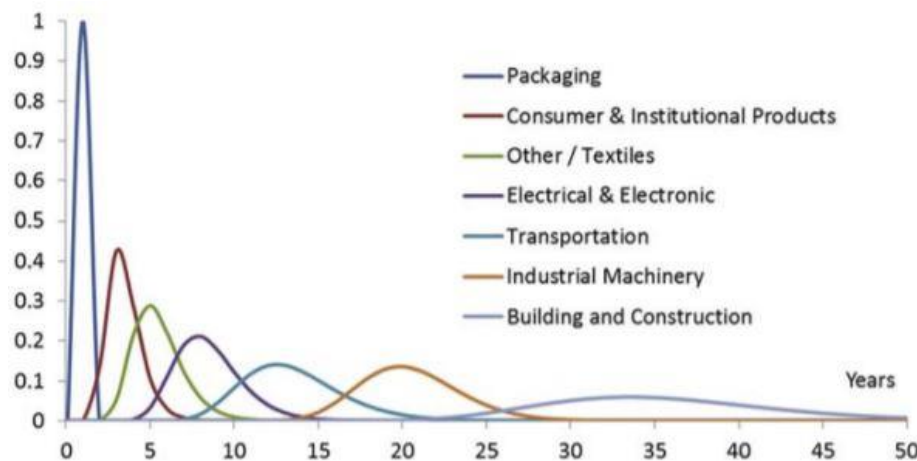
građevinskoj industriji, prometu, električnoj i elektroničkoj opremi, poljoprivredi, tekstilnoj industriji te u izradi namještaja te sportske i medicinske opreme [5].

Slika 2. prikazuje proizvodnju plastike od 1950. do 2017. godine prema sektoru potrošnje. 2017. godine 36% ukupne proizvedene mase otpalo je na ambalažu. Ambalaža se većinski proizvodi od PE, PP i PET – ovi plastomeri čine 90% ukupne plastike koja se koristi kao ambalaža. Građevinarstvo i građevinska industrija iste godine iskoristili su 16% proizvedene mase, a tekstilna industrija 14%. [5].



Slika 2. Svjetska godišnja proizvodnja plastike prema sektoru potrošnje [5]

Plastika se koristi za mnogobrojne svrhe no problem nastaje nakon što se plastični proizvod iskoristi i postaje otpadnim materijalom. Slika 3. prikazuje distribuciju životnog vijeka plastičnih proizvoda po sektorima potrošnje. Plastika koja se koristi kao ambalaža, potrošački proizvod i tekstil ima najkraći životni vijek, 0-10 godina, dok najdulji životni vijek imaju plastični materijali korišteni u sektoru prometa, kao komponente industrijskih strojeva ili u građevini i građevinskom sektoru (i do 50 godina).



Slika 3. Distribucija životnog vijeka plastičnih proizvoda po sektoru potrošnje [5]

Prema Slikama 2. i 3. vidi se da veliki udio proizvedene plastike ima relativno kratak životni vijek. Razni aditivi koji se dodaju pri proizvodnji polimernih materijala kako bi se izmijenila njihova svojstva smanjuju mogućnosti recikliranja. Drugi problem je dugovječnost polimernih materijala, odnosno procjenjuje se da je potrebno između 500 i 1000 godina da bi se razgradili na organske komponente. Usred relativno malog udjela recikliranja i dugovječnosti samih materijala, većina plastičnih materijala završava na odlagalištima ili u prirodi (prema Ujedinjenim narodima, 80% otpada koji se nalazi u morima i oceanima su polimerni materijali) [4].

Prema Agenciji za zaštitu okoliša Sjedinjenih Američkih Država, 2018. godine reciklirano je 8,7% plastičnog otpada, 16,3% je energetske oporabljen, a većina, odnosno 75% je završilo na odlagalištima [94]. Slika 4. prikazuje hijerarhiju gospodarenja otpadom. Prema akcijskom planu za kružno gospodarstvo Europske unije najpoželjnije opcije su sprječavanje nastanka otpada i njegovo ponovno korištenje, zatim slijede recikliranje i drugi postupci obrade poput njegove energetske oporabe. Najmanje poželjna opcija je zbrinjavanje otpada na odlagalištima.



Slika 4. Hijerarhija gospodarenja otpadom [95]

U svijetu se na godišnjoj razini povećava proizvodnja plastike, a uz ograničene mogućnosti recikliranja veliki udio plastičnog otpada koji završava na odlagalištima postoji veliki potencijal za upotrebu tehnologija energetske oporabe otpada.

1.1 Vrste energetske uporabe plastičnog otpada

Svaki postupak ponovne obrade otpada kojim se postiže njegovo ponovno korištenje u materijalne ili energetske svrha naziva se uporaba. Energetska uporaba predstavlja nepovratno uništavanje tvari iz kojih je otpad izrađen, čime se nepovratno gube sirovine [96]. Oporabljen energija može se koristiti za pokrivanje općenitih energetskih potreba ili za pokrivanje energetskih potreba sustava za gospodarenje otpadom i njegove uporabe. Energetska uporaba uključuje različite procese proizvodnje toplinske i električne energije i/ili goriva iz otpada [20]. Primjeri procesa koji se mogu koristiti za energetska uporabu plastičnog otpada su procesi termičke obrade poput izgaranja, pirolize i isplinjavanja.

1.1.1 Izgaranje

Izgaranje je proces potpune termičke degradacije tvari uz dovoljnu količinu kisika kako bi se osigurala oksidacija goriva. To je najstarija i najčešća tehnologija za termičku obradu otpada. Danas se izgaranje otpada odvija uz strogu kontrolu emisija onečišćivača i uz iskorištavanje toplinske energije sadržane u dimnim plinovima za proizvodnju električne i/ili toplinske energije [36].

Karakteristike procesa izgaranja otpadnih materijala su potreban višak zraka kako bi se osiguralo potpuno izgaranje, maksimalne temperature procesa iznad 1000 °C, potpuna oksidacija goriva u CO₂ i vodenu paru uz manje od 3% masenog udjela C u pepelu te gotovo potpuna pretvorba kemijske energije sadržane u gorivu u toplinsku energiju (u pepelu ostaje mali udio nekonvertirane kemijske energije). Postrojenja za spaljivanje otpada moraju raditi prema određenim zahtjevima kako ne bi došlo do onečišćenja okoliša. Neki od tih zahtjeva su obavezno dostizanje temperature dimnih plinova od 850 °C uz unutarnju stijenu komore za izgaranje, dimni plinovi moraju provesti najmanje 2 sekunde na toj temperaturi, a ukoliko otpad sadrži halogenirane organske tvari i kod toga ukupni sadržaj halogena izražen kao klor iznosi više od 1% mase otpada zahtijevana temperatura na kojoj dimni plinovi moraju provesti najmanje 2 sekunde mora dostići najmanje 1100 °C [36].

1.1.2 Piroliza

Piroliza je vrsta termokemijske uporabe materijala te je naprednija tehnologija obrade otpada od izgaranja kojom se organski polimeri bez prisustva kisika razgrađuju u tekuće ulje, ugljenizirani ostatak i plinove. Tekuće ulje i plinove moguće je iskoristiti kao gorivo ili kao sirovinu za proizvodnju kemikalija i tekućih goriva. Općenite karakteristike procesa pirolize su odsustvo

kisika (osim onog sadržanog u gorivu), potrebno je dovoditi toplinsku energiju reaktoru te se proces odvija pri temperaturama između 300 i 800 °C. Kruti ostatak može sadržavati 40% masenog udjela ugljika [98].

1.1.3 Isplinjavanje

Isplinjavanje je, kao i piroliza, proces termokemijske oporabe otpada te naprednija tehnologija obrade otpada od izgaranja. To je postupak parcijalne termičke degradacije tvari u prisustvu kisika, ali s nedovoljnom količinom kisika da bi gorivo u potpunosti oksidiralo. Isplinjavanjem se pretvara više kemijske energije u toplinsku u odnosu na pirolizu [36].

Tema ovog rada je isplinjavanje ostatnog industrijskog plastičnog otpada. U nastavku će detaljnije biti opisana svojstva polimernih materijala, proces isplinjavanja i njegovi parametri te pregled prikupljenih tehno-ekonomskih podataka o postojećim postrojenjima za isplinjavanje otpada s naglaskom na postrojenja za obradu plastičnog otpada. Prikupljeni podaci i literatura poslužiti će za određivanje tehnoloških i ekonomskih parametara prikladnog postrojenja za isplinjavanje plastičnog otpada za poduzeće Pos – Plast d.o.o. Prema tim parametrima napraviti će se tehno-ekonomska analiza postrojenja za isplinjavanje te ocijeniti isplativost i izvedivost takve investicije.

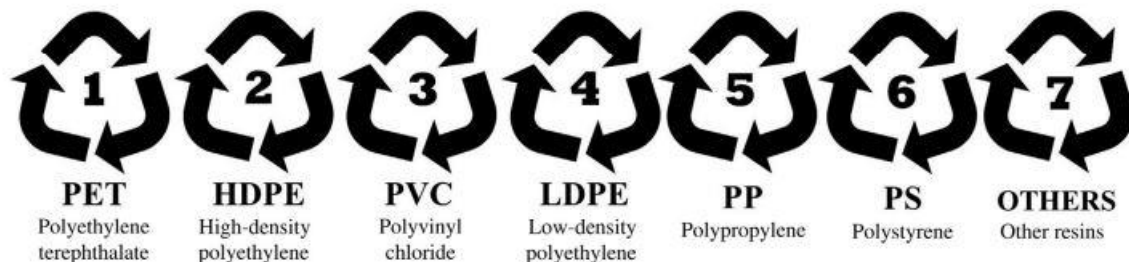
2. Polimerni materijali

Materijali koje nazivamo plastikom ustvari su sintetski polimerni materijali različitih vrsta. Sintetski polimerni materijali proizvode se kemijskim reakcijama (tzv. polimerizacija) od monomera dobivenih uglavnom iz nafte i prirodnoga plina [1]. Fizikalna svojstva polimernih materijala ovise o nizu parametara od kojih su najvažniji: kemijski sastav, pravilnost u rasporedu lanaca makromolekula, molekulska masa, raspodjela molekulskih masa, vrsta i broj ogranaka (grana) itd. Čisti polimeri rijetko su primjenljivi u tehničke svrhe te su uglavnom polimerni materijali dobiveni dodavanjem dodataka ili posebnim postupcima prerade (npr. termomehaničko oblikovanje). Utjecanjem na granatost makromolekula, zatim na veličinu molekulske mase te na uređenost strukture (stupanj kristalnosti) može se u širokim granicama varirati niz svojstava polimera koja su značajna za tehničku primjenu. Uočavanje utjecaja strukture na svojstva vodi i do često primjenjivanog pristupa kvalifikaciji polimera. Polimere se može svrstati u sljedeće skupine prema njihovom ponašanju pri zagrijavanju [2]:

- **Plastomeri** – Materijali linearne strukture s razgranatim makromolekulama koji pri zagrijavanju mekšaju, a pri ponovnom hlađenju vraćaju se u prvobitno stanje (struktura i svojstva se zadržavaju). Na ovoj pojavi temelji se prerada plastomera – prigodni su materijal za postupak recikliranja. Plastomeri su taljivi, topljivi i bubre. Polietilen, polistiren i poli(etilen-teretfalat) primjeri su plastomera koji se često nalaze u sastavu miješanog plastičnog otpada;
- **Elastomeri** – Materijali kojima je zbog rahlo prostorno umrežene strukture posebno izraženo svojstvo elastičnosti, a oblikovati se mogu u omekšanom stanju (prije dovršenog umrežavanja, odnosno vulkanizacije). Elastomeri mogu podnijeti velika rastezanja, a nakon rasterećenja vraćaju se u izvorni oblik te su netaljivi, netopljivi i bubre. Prirodni kaučuk primjer je elastomera;
- **Duromeri** – Materijali gusto prostorno umrežene strukture koji se pri zagrijavanju ne mogu omekšati (misli se na stanje nakon prerade kada je struktura potpuno umrežena, tj kada u materijalu postoje samo primarne veze). Duromeri su netaljivi, netopljivi i ne bubre. Pri zagrijavanju umreženog duromera on ne mekša, nego dolazi do njegovog razlaganja. Primjeri duromera su fenol-formaldehidna smola, epoksidna smola i nezasićeni poliester;
- **Elastoplastomeri** - skupina materijala rahlo prostorno umrežene strukture koja se odlikuje mogućnošću prerade kao u plastomera, a ima izraženo svojstvo elastičnosti kao elastomeri.

Aditivi koji se dodaju čistim polimerima kako bi se izmijenila i/ili poboljšala njihova svojstva uključuju reakcijske tvari (poput umrežavala, dodaci za smanjenje gorivosti), aditive za poboljšanje preradljivosti (npr. punila, toplinski stabilizatori), modifikatori mehaničkih svojstava, modifikatori površinskih svojstava, modifikatori optičkih svojstava, aditivi za produljenje trajnosti proizvoda i ostalo (npr. mirisi). Neki od važnijih dodataka su punila (smanjuju cijenu materijala, modificiraju preradbeni i toplinski svojstva), omekšavala (postizanje savitljivosti), ojačala (povisuju vlačnu čvrstoću i vlačni modul elastičnosti), stabilizatori (smanjuju utjecaj UV-zraka i usporavaju starenje), antistatici (smanjuju elektrostatičko nabijanje), dodatak za samogasivost te bojila i pigmenti [2].

Industrija recikliranja polimera od 1988. godine razvrstava najčešće upotrebljavane polimerne materijale prema jedinstvenoj identifikacijskoj oznaci koja je dodijeljena svakoj vrsti polimera kako bi se olakšao proces sortiranja i dobio kvalitetniji produkt recikliranja [53]. Na primjer, broj 5 dodijeljen je polipropilenu. Na Slici 5. prikazane su identifikacijske oznake polimernih materijala, a u nastavku su detaljnije opisani polimerni materijali s dodijeljenom identifikacijskom oznakom.



Slika 5. Identifikacijske oznake polimernih materijala [53]

- Poli(etilen-tereftalat), PET

Poli(etilen-tereftalat), $(C_{10}H_8O_4)_n$, je aromatski poliester [54]. PET je izvrstan materijal za zaštitu od vlage i vode, propustan za kisik, lagan, polukrut-krut, čvrst i otporan na udarce. Nedostatak mu je što pri visokim tlakovima i temperaturama te dugom vremenu zadržavanja tekućine u spremniku izrađenom od PET-a uzrokuje proizvodnju acetaldehida koji difundira u pohranjenu tekućinu izmjenjujući joj okus. Koristi se za izradu boca za napitke, savitljivu ambalažu za hranu, prijenosnike magnetskih traka, itd. [53]. Proizvodi se stupnjevitom polimerizacijom tereftalne kiseline (ili njezinih estera) i etilen-glikola u taljevini [54].

- Polietilen, PE

Polietilen, $(C_2H_4)_n$, ima jednostavnu linearnu strukturu u izduženim konformacijama koja omogućuje laku kristalizaciju [55] je lako obradljiv, savitljiv i krut, voodootporan, ima dobru

kemijsku otpornost, stabilan, ima svojstvo samogašenja i otpornost na UV-zračenje. Također je mekan, nije upotrebljiv na visokim temperaturama i podložan je ogrebotinama. [53] Visokotlačnim postupkom (tlak od 1500 do 3000 bar, pri temperaturi od 200 °C) dobiva se LDPE (polietilen niske gustoće) – veće granatosti molekula i manje kristalnosti i gustoće. Niskotlačnim postupkom (tlak do 100 bara i temperatura od 60 do 180 °C) dobiva se HDPE (polietilen visoke gustoće) – manja granatost i veća kristalnost i gustoća [55]. LDPE koristi se za izradu skupljajućih folija, vrećica za nošenje, za izolaciju električnih kabela, a HDPE za izradu različitih spremnika (boce i spremnici za prehrambene proizvode, deterdžente, kozmetičke proizvode), igračke, spremnike za benzin, za izradu folija, cijevi i posuđa za kućanstvo [53].

- Poli(vinil-klorid), PVC

Poli(vinil-klorid), $(C_2H_3Cl)_n$, lagan je, snažan, vatrootporan materijal s odličnim izolacijskim svojstvima. Ima nisku permeabilnost i dobru otpornost na atmosferske uvjete te se lako obrađuje. Dugotrajna izloženost suncu uzrokuje izbjeljivanje boja. Koristi se za izradu prozorskih okvira, podnih i zidnih obloga, krovnih ploča, obloga za rezervoare i bazene, cijevi i armature za vodu i kanalizaciju, izolacije, medicinskih proizvoda poput vrećica za krv, cijevi za transfuziju i kirurških rukavica [53]. Dobiva se radikalskom polimerizacijom vinil-klorida, pri temperaturi od 50 do 70 °C, u vodenoj suspenziji, ali i u masi, emulziji i otopini [56].

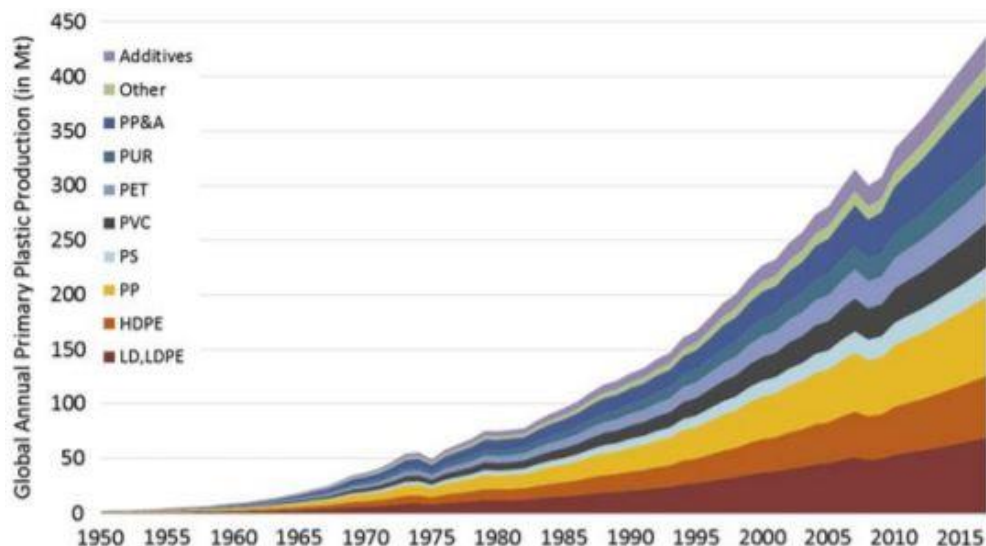
- Polipropilen, PP

Polipropilen, $(C_3H_6)_n$, se sastoji od makromolekula u kojima su metilne skupine duž linearnih lanaca najčešće jednako sterički orijentirane pa se lako stvaraju spiralne, vijčane konformacije, što pogoduje nastajanju kristalne građe, visokoga tališta od 170 °C i materijala dobrih mehaničkih svojstava. Dobiva se koordinativnom polimerizacijom pri niskome tlaku i temperaturi te uz katalizatore [57]. PP je krut, neproziran i savitljiv materijal niske gustoće koji ima dobru električnu otpornost i otpornost na abraziju. Održava stabilnost pri visokim temperaturama i visokoj vlažnosti zraka. Žilav je i lagan uz odličnu kemijsku otpornost te otpornost na atmosferske uvjete. Koristi se u izradi ambalaže, užadi, donjeg rublja, tepiha, pisaćeg pribora, spremnika za višekratnu upotrebu, laboratorijske opreme, zvučnika, čepova za bezalkoholna pića, automobilske dijelove te za novčanice od polimera [53].

- Polistiren, PS

Polistiren, $(C_8H_8)_n$, može biti obični, žilavi ili pjenasti [58], proziran je i čvrst jeftin materijal koji se lako obrađuje. Ima dobru otpornost na abraziju i naprezanja. Ima lošu permeabilnost za kisik i vodenu paru, nisko talište, može biti krhak. Koristi se kao ambalaža za jaja, mliječne proizvode, meso i ribu. Od njega se izrađuju hladnjaci, klima uređaji, električna i vrtna oprema, jednokratni

medicinski materijali poput posuda za kulturu tkiva, epruveta, Petrijeve zdjelice, dijagnostička oprema [53].

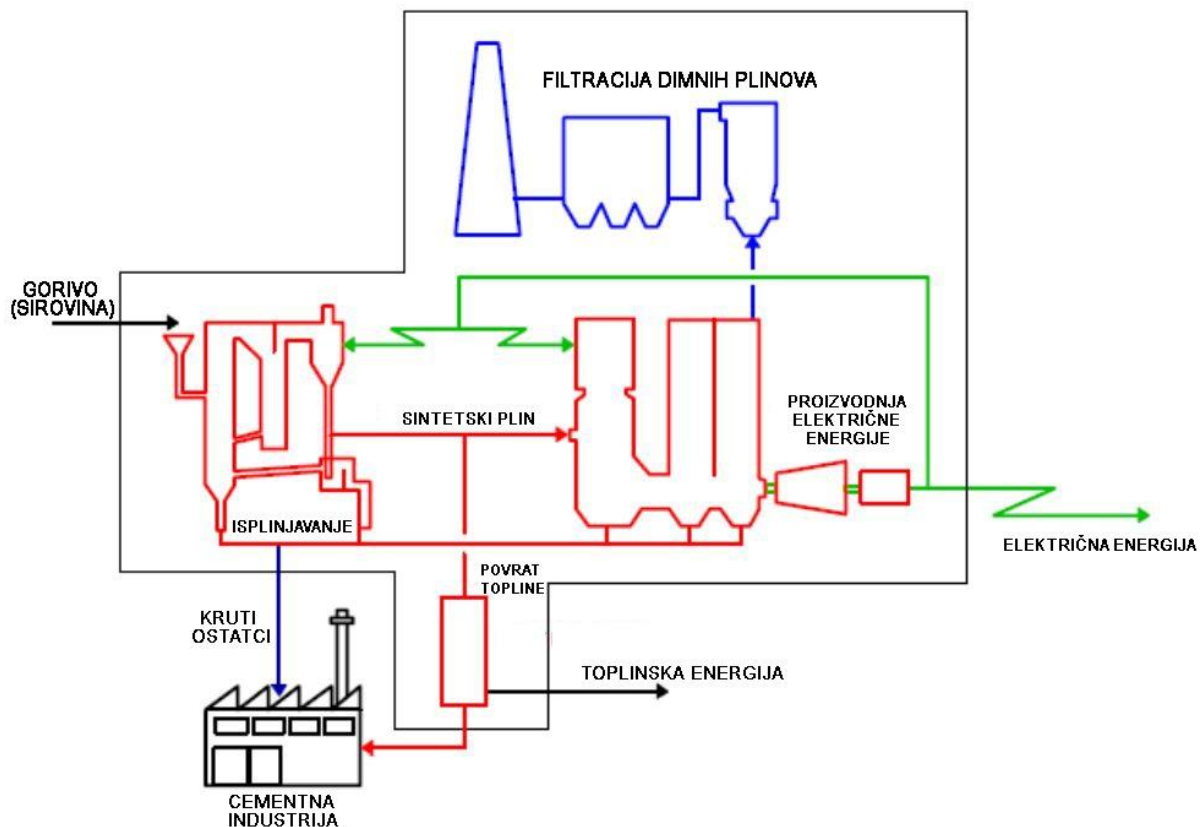


Slika 6. Svjetska godišnja proizvodnja plastike prema vrsti polimernog materijala u milijunima tona [5]

Slika 6. prikazuje svjetsku godišnju proizvodnju plastike prema vrsti polimernog materijala. LDPE, HDPE i PP materijali su koji se proizvode u najvećim količinama. Vidi se da značajan udio u proizvodnji polimernih materijala čine aditivi. Dostupni podaci upućuju da plastični materijali koji nisu izrađeni od vlakana u prosjeku sadržavaju 7% aditiva u ukupnoj masi. Radi se o značajnom udjelu mase konačnog proizvoda. 75% godišnje svjetske proizvodnje aditiva čine plastifikatori, dodaci za smanjenje gorivosti i punila [5].

3. Isplinjavanje

Isplinjavanje je termokemijski proces kojim se kruta sirovina na osnovi ugljika, poput ugljena, pretvara u plinovito gorivo koji se naziva sintetskim plinom. Koraci koji se odvijaju tijekom isplinjavanja su sušenje, devolatilizacija, izgaranje i isplinjavanje. Redoslijed koraka može se razlikovati ovisno o smjeru i mjestu ulaza agensa za isplinjavanje (zrak, kisik, vodena para) [42]. Sintetski plin može se iskoristiti kako bi se dobili proizvodi poput električne energije, vodika, metana, etanola i sintetskog prirodnog plina. Slika 7. prikazuje primjer postrojenja za isplinjavanje otpada u kojem su konačni produkti električna i toplinska energija, a kruti ostaci koriste se u cementnoj industriji [36].



Slika 7. Primjer postrojenja za isplinjavanje otpada [36]

Sintetski plin sastoji se od vodika i ugljikovog monoksida. Međutim, reakcije u isplinjačima su složene te također dolazi do proizvodnje ugljikovog dioksida, metana, katrana, klorovodika, itd. Produkti isplinjavanja ovise o značajkama krutog goriva i uvjetima odvijanja procesa. Pretvorba krutog goriva odvija se pri visokim temperaturama u atmosferi ograničenog kisika. Visoke

temperature omogućavaju odvijanje reakcija, a ograničen kisik sprječava pojavu potpunog izgaranja [42] [62]. U Tablici 1. prikazane su glavne reakcije procesa isplinjavanja.

Tablica 1. Glavne reakcije procesa isplinjavanja [42]

| Reakcija | Vrsta | Toplina reakcije (kJ/mol) | Redni broj reakcije |
|--|-----------------------|---------------------------|---------------------|
| $C + 1/2 O_2 \leftrightarrow CO$ | Reakcije s kisikom | -122 | R1 |
| $CO + 1/2 O_2 \leftrightarrow CO_2$ | | -283 | R2 |
| $H_2 + 1/2 O_2 \leftrightarrow H_2O$ | | -248 | R3 |
| $C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$ | Reakcije s vodom | 136 | R4 |
| $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ | | -35 | R5 |
| $CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$ | | 206 | R6 |
| $C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$ | Boudouardova reakcija | 171 | R7 |
| $C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$ | Reakcije metanacije | -74,8 | R8 |
| $CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$ | | -225 | R9 |
| $CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$ | | -190 | R10 |

3.1 Stupanj konverzije ugljika i vodika

Stupanj konverzije ili učinkovitost konverzije ugljika i vodika jedni su od pokazatelja učinkovitosti procesa isplinjavanja. Stupanj konverzije ugljika može se izračunati pomoću izraza [88]:

$$\eta_{KC} = \frac{C \text{ u sintetskom plinu}}{\text{dovedeni C}}$$

Gdje je:

η_{KC} – stupanj konverzije ugljika, [%].

Dovedeni C odnosi se na količinu ugljika dostupnu u sirovini i agensu za isplinjavanje koji ulaze u reaktor (slučaju da se kao agens za isplinjavanje koristi zrak ili ugljikov dioksid). C u sintetskom plinu odnosi se na količinu ugljika koja je reakcijama procesa isplinjavanja iz sirovine ili agensa prešla u sintetski plin [88]. Za vodik vrijedi isti izraz:

$$\eta_{KH} = \frac{H \text{ u sintetskom plinu}}{\text{dovedeni H}}$$

Gdje se η_{KH} odnosi na stupanj konverzije vodika, dovedeni H na količinu vodika dostupnog u sirovini i agensu za isplinjavanje, a H u sintetskom plinu predstavlja količinu vodika koja je reakcijama procesa isplinjavanja prešla u sintetski plin. Bolji stupnjevi konverzije znače da je veća količina sirovine prešla u plinovito stanje, a stupanj konverzije H također označava i veću ogrjevnu vrijednost sintetskog plina.

3.2 Vrste isplinjača

Postoje mnoge vrste različitih isplinjača odnosno reaktora u kojima se odvijaju reakcije pretvorbe goriva. Prema načinu na koji plin i gorivo dolaze u kontakt u reaktoru, razlikuju se fiksni, fluidizirani i fontanski sloj [42].

3.2.1 Isplinjač s fiksnim slojem

U ovoj vrsti isplinjača, agens za isplinjavanje (odnosno medij, izvor kisika i/ili plin nosilac za uklanjanje produkata reakcije s mjesta reakcije [36]) se kreće kroz fiksni sloj goriva. Prema smjeru strujanja agensa isplinjači s fiksnim slojem se dijele na uzlazne, silazne i unakrsne isplinjače. U silaznim isplinjačima agens, gorivo i proizvedeni sintetski plin kreću se prema dolje te se sintetski plin izvlači pri dnu isplinjača. Koraci procesa isplinjavanja u ovoj vrsti isplinjača su redom sušenje, piroliza, izgaranje pa zatim isplinjavanje. Prednost silaznog isplinjača je smanjena proizvodnja katrana. Razlog tomu je njegova struktura u kojoj se katran krekira dok prolazi kroz područje izgaranja u isplinjaču, nakon procesa pirolize. Suprotno, kod uzlaznih isplinjača plin ne prolazi kroz zonu izgaranja nakon pirolize. Uzlazni isplinjači osmišljeni su tako da se sirovina kreće u suprotnom smjeru od agensa i prolazi redom kroz sušenje, pirolizu, isplinjavanje i izgaranje. Prednosti ove vrste isplinjača su dobro izgaranje čađe, jednostavnost, izvrsna izmjena topline, niska izlazna temperatura sintetskog plina i učinkovito korištenje raspoložive toplinske energije. Unakrsni isplinjači su konstruirani tako da se sirovina unosi u isplinjač pri vrhu reaktora. Točka ubrizgavanja plina, zona izgaranja, zona reakcija redukcije i izlaz sintetskog plina nalaze se na jednakoj visini reaktora [42]. Slika 8. prikazuje sheme konvencionalnih isplinjača s fiksnim slojem.



Slika 8. Sheme isplinjača s fiksnim slojem [42]

3.2.2 Isplinjač s fluidiziranim slojem

U ovoj vrsti isplinjača kruto gorivo se isplinjava u sloju malih čestica, uobičajeno pijeska te uz agense poput zraka, kisika, vodene pare, ugljikovog dioksida ili mješavinom više njih. Sloj isplinjača ponaša se poput fluida pomoću djelovanja fluidizirajućeg plina. Prednosti ove vrste isplinjača su mogućnost velikog protoka sirovine, a u odnosu na isplinjač s fiksnim slojem kontakt između plina i krutine je bolji, poboljšan je prijenos topline i mase te proizvedeni sintetski plin ima veću ogrjevnu vrijednost. Fluidizirani sloj dobro je rješenje za isplinjavanje plastičnog otpada zbog odličnog miješanja plina i krutine i ravnomjerne raspodjele temperature te su za obradu tog otpada upravo takvi isplinjači najčešći. Dostupne su različite tehnologije isplinjavanja s fluidiziranim slojem poput mjehuričastog i cirkulirajućeg fluidiziranog sloja. Najbitnija razlika između tih tehnologija je brzina fluidizacije [42]. Slika 9. prikazuje sheme konvencionalnih isplinjača s fluidiziranim slojem.

3.2.3 Isplinjač s fontanskim slojem

Ova tehnologija je varijantna tehnologije fluidizacije. Glavna razlika između isplinjača s fontanskim slojem i onog s fluidiziranim je dinamičko ponašanje krutih čestica. Agens se u ovu vrstu isplinjača ubacuje prema gore kroz mali otvor smješten u središtu dna reaktora, za razliku od isplinjača s fluidiziranim slojem gdje seagens ubacuje kroz više otvora. Pomicanjem čestica prema gore dolazi do stvaranja ljevka u središtu reaktora. Bitna prednost ljevkastog sloja nad fluidiziranim je mogućnost miješanja sirovina koje su ljepljive, hrapave, ujednačene veličine i osjetljive na toplinu [42]. Slika 9. prikazuje shemu konvencionalnog isplinjača s fontanskim slojem.



Slika 9. Sheme isplinjača s fluidiziranim (lijevo i sredina) i fontanskim slojem (desno) [42]

3.3 Radni uvjeti isplinjavanja

Parametri procesa isplinjavanja plastičnog otpada uvjetuju sastav i kvalitetu sintetskog plina. Temperatura i tlak isplinjavanja, medij za isplinjavanje (tj. agens, oksidant i/ili plin nosilac), brzina protoka plina, brzina protoka sirovine, vrsta isplinjača i svojstva ulaznog goriva (sirovine). Parametri procesa odabiru se prema željenom sastavu sintetskog plina ili ovisno o njegovoj primjeni u drugim procesima. Optimizacija procesa i poboljšanje kvalitete goriva za pojedine primjene izvršavaju se pomnim odabirom tih parametara procesa [42].

3.3.1 Omjer agensa za isplinjavanje i goriva

Pri poboljšanju kvalitete prinosa plina nastalog procesom isplinjavanja plastike, maseni omjer agensa za isplinjavanje i goriva najvažniji je parametar. Omjer agensa i goriva može se protumačiti kao stehiometrijski omjer zraka i goriva pri izgaranju. Xiao i sur. [74] ispitivanjem su došli do zaključka da omjer agensa i goriva ima veći utjecaj na udio plina u produktu i temperaturu reaktora pri isplinjavanju polipropilena nego visina sloja i brzina fluidizacije. No omjer zraka i goriva ne smije biti previsok. Povećanjem tog masenog omjera u isplinjivač dovodi se sve više zraka, potiče se reakcija oksidacije koja se odvija većom brzinom nego reakcije reformacije i krekiranja te posljedično dovodi do veće proizvodnje CO_2 , H_2O , N_2 , a smanjuju se koncentracije CO i H_2 [42].

Preveliki omjer agensa i goriva ima manji utjecaj na smanjenje koncentracije vodika u sintetskom plinu kod isplinjavanja plastike nego kod biomase. Razlog tomu je veći udio hlapljivih tvari u plastici te prema tome veći udio katrana u produktu. Krekiranje i adsorpcija katrana pri višim omjerima održava višu temperaturu procesa u reaktoru, a viša temperatura dovodi do povećanja proizvodnje vodika. Istraživanja su pokazala da dolazi do smanjenja koncentracija metana i težih ugljikovodika usred povećane oksidacije. Obrnuto, pokazalo se da smanjenje omjera poboljšava stvaranje H_2 , CO , CH_4 i drugih ugljikovodika. Posljedično, povećanje omjera agensa i goriva dovodi do smanjenja ogrjevne vrijednosti plina, usred smanjenja koncentracije H_2 , CH_4 i težih ugljikovodika i razrjeđujućeg učinka N_2 [42]. Istraživanje isplinjavanja polipropilena sa zrakom koje su proveli Xiao i sur. [74] pokazalo je da se gornja ogrjevna vrijednost spustila na 5,17 MJ/kg s 11,3 MJ/kg kada se omjer zraka i goriva povećao s 0,2% na 0,45%.

Povećanje omjera agensa i goriva dovodi do povećanja udjela sintetskog plina u produktu isplinjavanja i smanjenja udjela katrana i čađe. Uzrok tomu je povećanje temperature sloja s povećanjem omjera agensa i goriva te će se veća količina plina proizvesti putem koraka pirolize u

isplinjivaču. Visoka temperatura sloja doprinosi kreiranju katrana, proizvodnji laganih ugljikovodika i povećava reakcije čađe kroz reakcije R5 i R7 (navedene u Tablica 1. , tzv. reakcija izmjene vode i plina i Boudouardova reakcija) [42].

Maseni omjer agensa i goriva ne treba biti previsok kako bi se izbjegla proizvodnja sintetskog plina s niskim koncentracijama vodika i ugljikovog monoksida. Smanjenje udjela katrana nakon isplinjavanja može se postići i na druge načine, poput dodavanja aditiva u sloj i termalnim kreiranjem [42].

U Poglavlju 3.6 detaljnije je opisan utjecaj omjera vodene pare kao agensa i goriva na produkte isplinjavanja.

3.3.2 Radna temperatura

Radna temperatura ima velik utjecaj na prinos sintetskog plina u isplinjavanju plastičnog otpada vodenom parom jer su glavne reakcije isplinjavanja endotermne. Iako se povećanjem temperature povećava prinos plina, njegova ogrjevna vrijednost se smanjuje usred smanjenja udjela teških ugljikovodika. Povećanje temperature isplinjavanja potiče reakcije između plina i krutine čime se povećava udio plina u proizvodu, tj. učinkovitost procesa. Smanjuju se udjeli nastalog metana, težih ugljikovodika, katrana i čađe. Isplinjavanjem plastičnog otpada pri visokim temperaturama potiču se Boudouardova reakcija (R7 iz Tablica 1.) i reakcije reformacije (R4, R5, R6) čime se poboljšava proizvodnja vodika i ugljikovog monoksida [42].

Temperatura sloja tj. reaktora ovisi ili o količini agensa dostupnog pri direktnom grijanju ili energiji koja se dovodi iz ložišta pri indirektnom grijanju [42]. U Poglavlju 3.6 detaljnije je opisan utjecaj radne temperature na produkte isplinjavanja.

Pomoću katalizatora utječe se na osjetljivost proizvodnje pojedinih produkata (plin, katran, čađa). Wu i Williams [75] proveli su istraživanje koje je pokazalo da je raspodjela produkata nekatalitičkog procesa pirolize-isplinjavanja mješavine polipropilena i polistirena pomoću vodene pare osjetljivija na temperaturu isplinjavanja nego je to kod katalitičkog isplinjavanja. Kod previsokih temperatura isplinjavanja može postojati potreba za povratom osjetne topline iz sintetskog plina za učinkovitu pretvorbu goriva. Također, isplinjavanje pri visokim temperaturama dovodi do razlaganja težih ugljikovodika usred čega se smanjuje ogrjevna vrijednost sintetskog plina [42].

3.3.3 Agensi za isplinjavanje

Agens za isplinjavanje (medij za isplinjavanje, oksidant i/ili plin nosilac za uklanjanje produkata reakcije s mjesta reakcije [36]) također je važan parametar u isplinjavanju plastičnog otpada. Isplinjavanje se može odvijati u atmosferi zraka, vodene pare, kisika, ugljikovog dioksida te pomoću kombinacije ovih plinova. Zrak je najčešće upotrebljavan medij iz razloga što je on jeftinija i jednostavnija opcija u odnosu na kisik. Dušik ima razrjeđujući učinak na sintetski plin te isplinjavanje zrakom dovodi do sintetskog plina manje kalorijske vrijednosti, a isplinjavanjem čistim kisikom dobiva se čišći plin s većom kalorijskom vrijednosti. Postoji mogućnost isplinjavanja plastičnog otpada sa zrakom koji je obogaćen kisikom jer je proizvodnja čistog kisika skupa i energetski intenzivna. S kisikom obogaćenim zrakom smanjuju se razrjeđujući učinak dušika, emisije NO_x , udio dušika u sintetskom plinu, istovremeno se povećavaju udjeli drugih plinova poput H_2 , CO , CO_2 i CH_4 te se posljedično povećava ogrjevni učinak sintetskog plina. Obogaćivanje kisikom također potiče reakcije izgaranja u procesu isplinjavanja, posljedica čega je oslobađanje više toplinske energije (smanjuje se cijena grijanja reaktora) [42].

Vodena para i ugljikov dioksid su agensi za isplinjavanje koji se koriste za proizvodnju sintetskog plina koji sadrži veće udjele H_2 i CO . Upotrebljavanjem CO_2 kao agensa za isplinjavanje povećava se koncentracija CO u sintetskom plinu, što je korisno za obradu plina Fischer – Tropschovom sintezom kako bi se dobilo tekuće gorivo. Isplinjavanje vodenom parom potiče parno reformiranje čađe i ugljikovodika, povećava kvalitetu sintetskog plina i povišuje njegovu ogrjevnost. Upotreba ugljikovog dioksida kao agensa pri isplinjavanju plastičnog otpada nije česta jer je jedina reakcija na koju CO_2 ima značajan utjecaj je Boudouardova reakcija (R7), dakle potiče se stvaranje CO . Dodavanjem kisika ugljikovom dioksidu poboljšavaju se reakcije oksidacije čime se povećava udio plina u produktu [42].

Kod isplinjavanja vodenom parom nema izravnog nosioca kisika stoga je potreban vanjski izvor topline. Dodatno, korištenje vodene pare zahtjeva postrojenje za njenu proizvodnju. Oporabom topline iz procesa za potrebe proizvodnje vodene pare, smanjuje se potreba za energijom. Na primjer, moguće je proizvoditi paru toplinskom energijom dobivenom hlađenjem sintetskog plina prije čišćenja. Moguća je kombinacija vodene pare i zraka i/ili kisika, isplinjavanje s takvim agensom ne bi zahtijevalo vanjski izvor toplinske energije, a vodena para bi poboljšala kvalitetu sintetskog plina u odnosu na isplinjavanje s zrakom i/ili kisikom kao agensom [42].

U Poglavlju 3.6 detaljnije je opisano isplinjavanje s vodenom parom kao agensom te udjeli produkata takvog procesa, a u Tablici 2. prikazane su prednosti i ograničenja agensa za isplinjavanje navedenih u ovom poglavlju.

Tablica 2. Usporedba različitih agensa za isplinjavanje [42]

| Agens za isplinjavanje | Prednosti | Ograničenja | Sintetski plin |
|------------------------|--|---|---|
| Zrak | Jednostavnost i niska cijena | Razrijeđeni sintetski plin, niska kalorijska vrijednost plina, mogućnost stvaranja NO _x | Značajna količina N ₂ u sintetskom plinu |
| Kisik | Viša kalorijska vrijednost i čišći sintetski plin u odnosu na zrak, potiče reakcije izgaranja u isplinjavanju i smanjuje cijenu predzagrijavanja reaktora | Proizvodnja čistog kisika je skupa i energetske intenzivna | Potiče se stvaranje gorivih plinova uz smanjenje udjela N ₂ u sintetskom plinu |
| Vodena para | Povećanje kvalitete plina i ogrjevne vrijednosti. Poboľšanje reakcija reformacije i reakcija izmjene vode i plina | Potreban je vanjski izvor toplinske energije i postrojenja za proizvodnju vodene pare. Može biti energetske intenzivno. Pojačano formiranje katrana u odnosu na zrak i kisik. | Sintetski plin s povećanim koncentracijama H ₂ i CO |
| Ugljikov dioksid | Izravna konverzija stakleničkog plina (CO ₂), smanjuje cijenu hvatanja i skladištenja ugljika, olakšava prilagodbu omjera H ₂ /CO za različite primjene plina | Potreban je vanjski izvor toplinske energije i katalitička reformacija katrana | Sintetski plin obogaćen CO |

3.3.4 Radni tlak

Promjena radnog tlaka isplinjavanja nema veliki utjecaj na proces isplinjavanja poput drugih parametara. Prednosti visokotlačnog isplinjavanja su povećanje koncentracije metana u sintetskom plinu i protoka u reaktoru. Sintetski plin dobiven visokotlačnim isplinjavanjem može se koristiti za proizvodnju električne struje preko plinske turbine. Kod većine tehnologija ispitanih na laboratorijskom razini, proces isplinjavanja plastičnog otpada odvijao se pri atmosferskom tlaku. Postoje primjeri industrijskih postrojenja koja rade pod povišenim tlakom poput isplinjivača poduzeća SVZ [13]. Kod ovog isplinjivača povišeni tlak imao je značajan utjecaj na reakcije metanacije (R8, R9 i R10; Tablica 1. te na reformiranje metana. Povećanjem tlaka povećava se udio metana u sintetskom plinu, a smanjuje se udio H₂ i CO₂. Visokotlačno isplinjavanje potiče formiranje katrana zbog sprječavanja reakcija reformiranja i kreiranja katrana usred promjene u kemijskoj ravnoteži. Plastični otpad zbog visokog udjela hlapljivih tvari ima sklonost stvaranja katrana [42].

3.3.5 Sirovina

Plastični otpad je izrazito reaktivan, brzo isparava te veliki udio ulazne sirovine isplinjava. Usred brze pretvorbe ugljika koja poboljšava protok u reaktoru, izrazito reaktivna sirovina poput ove može se koristiti u niskotemperaturnom isplinjivaču (pri temperaturama ispod 1000 °C [89]) [42].

Svojstva sirovine su važna pri konstruiranju isplinjivača za plastični otpad. Iz njih se dobivaju naznake o kvaliteti korištenog goriva. Plastični otpad ima vrlo različita svojstva, ovisno o porijeklu plastike, uglavnom su to niska vlažnost i sadržaj pepela te visoki udio hlapljivih tvari. Kemijska analiza plastičnog otpada ima značajan utjecaj na kvalitetu i sastav sintetskog plina koji se dobiva isplinjavanjem tog otpada. Isplinjavanje mješavine PET-a (koji je bogat kisikom) i PE-a pokazalo je da prisustvo kisika ima značajan utjecaj na udio plina u produktu i njegovu ogrjevnu vrijednost, prema Kannan i sur. [76]. Istraživanje je također pokazalo da prisutnost kisika za nepotpunu oksidaciju potiče proizvodnju CO uz povećanje udjela PET-a u mješavini. Reakcije oksidacije povećavaju temperaturu dimnog plina. Povećanje udjela PET-a također dovodi do poticanja reakcije izmjene vode i plina (R5 iz Tablica 1. [42]).

Prisutnost klora u polimernom materijalu (primjer PVC) predstavlja izazov pri isplinjavanju plastičnog otpada. Tijekom procesa isplinjavanja dolazi do proizvodnje klorovodika što ograničava neposrednu upotrebu sintetskog plina jer je potrebno prethodno čišćenje plina. Čišćenje klorovodika je ključno zbog njegovog korozivnog utjecaja, štetnosti, doprinosa u nastanku kiselih kiša te proizvodi halogenirane ugljikovodike [42].

Ukratko, sastav i porijeklo plastičnog otpada značajno utječe na nastanak i kvalitetu sintetskog goriva.

Ostali parametri koji mogu utjecati na produkt isplinjavanja plastičnog otpada su visina sloja, vrijeme zadržavanja u reaktoru te brzina fluidizacije. Učinci ovih parametara međusobno su povezani. Povećanje visine sloja bi produljilo vrijeme zadržavanja potrebnog za reakcije. Rezultat toga bi bilo poboljšano krekiranje katrana, čađe i pretvorba ugljikovodika – povećanje visine sloja povećava udio plina, a smanjuje udjele katrana i čađe u produktu. Prevelika visina sloja dovodi do lošeg kontakta između agensa i sirovine. Povećanje brzine fluidizacije dovodi do povećanja temperaturu sloja usred povećanja broja egzotermnih reakcija te sukladno tomu poboljšano krekiranje katrana. Brzina, poput visine sloja, ne smije biti previsoka. Previsoka brzina bi uzrokovala prebrzo kretanje čađe kroz ciklon u zonu produkta čime se smanjuje konverzija čađe. Također dolazi do smanjena vremena zadržavanja što može smanjiti vrijeme krekiranja katrana i dovesti do većeg udjela katrana u produktu isplinjavanja [42].

U Poglavlju 3.6 detaljnije je opisan utjecaj sastava sirovine (mješavina PE i PP) na sastav sintetskog plina.

3.4 Problemi kod isplinjavanja plastičnog otpada

Općenito kod termo-kemijske konverzije plastičnog otpada problem je stvaranje i nagomilavanje katrana. Stvaranje i nagomilavanje katrana kod isplinjača s fluidiziranim slojem može imati utjecaj na fluidizaciju čestica, spriječiti nesmetan rad isplinjača te postrožiti zahtjeve za čišćenje sintetskog plina [42].

Katrani su općenito organski onečišćivači s molekularnom masom većom od molekularne mase benzena. Tijekom isplinjavanja prekidaju se molekularne veze goriva. Molekule s manjim brojem atoma ugljika su plinovi, a s većim brojem ugljika su primarni katrani. Ti katrani koji nastaju depolimerizacijom tijekom procesa pirolize u isplinjavanju mogu reagirati kako bi nastali sekundarni i tercijarni katrani. Zbog velikog udjela hlapljivih tvari, proizvodnja katrana je veća tijekom isplinjavanja plastičnog otpada nego kod isplinjavanja biomase i ugljena. Sadržaj katrana u plinu ne smije biti izvan raspona od 10 – 50 mg/Nm³ za primjene poput goriva za motore s unutarnjim izgaranjem ili plinske turbine. Katran može uzrokovati probleme poput kondenzacije, polimerizacije složenijih struktura i stvaranja aerosola katrana. Iz tih razloga, uklanjanje katrana važan je korak u isplinjavanju plastičnog otpada [42].

Monoaromatični katrani imaju visoku hlapljivost pa ne uzrokuju problem s kondenzacijom koji bi mogao utjecati na zapaljivost sintetskog plina te zbog toga uzrokuju manje ozbiljne probleme u odnosu na poliaromatične katrane. Katrani s više od 4 aromatična prstena mogu uzrokovati probleme sa zapaljenjem i pri niskoj koncentraciji katrana u sintetskom plinu. Stvaranje katrana intenzivnije je kod isplinjavanja vodenom parom nego kod isplinjavanja pomoću zraka ili kisika. Katrani stvoreni tijekom isplinjavanja biomase pomoću vodene pare mogu se lakše uništiti agensima poput dolomita ili katalizatorima na bazi nikla nego katrani nastali isplinjavanjem zrakom [42].

3.4.1 Tehnike uklanjanja katrana i čišćenja plina

Katran se može uklanjati fizičkim ili kemijskim postupkom. Fizičko uklanjanje katrana odrađuje se upotrebom ispiraća i filtera, a kemijsko uklanjanje se odrađuje termalnim krekiranjem. Visoka temperatura krekiranja postiže se kalciniranim vapnencem/dolomitom ili pomoću katalizatora na

bazi nikla. Uklanjanje katrana u procesu isplinjavanja može se podijeliti u dvije kategorije: primarnu metodu gdje se obrada odvija unutar isplinjača i sekundarnu metodu koja uključuje čišćenje vrućeg plina izvan isplinjača. Sekundarna metoda može se ostvariti preko katalitičkog ili termalnog krekiranja, a i mehaničkim metodama, npr. upotrebom ciklona, elektrostatičnih filtera, vrećastih filtera, keramičkih filtera ili ispirača s vodom. Sekundarne metode su učinkovite u uklanjanju katrana no vrlo su složene te su kapitalni troškovi i troškovi rada visoki. Primarne metode mogu se primijeniti u isplinjavanju otpada te se mogu postići visokotemperaturnim isplinjavanjem (iznad 1000 °C [89]) uz aditive u sloju poput živog vapna (kalcijev oksid), dolomita, olivina, aktiviranog ugljika i katalizatora na bazi nikla. Primarne metode također ne zahtijevaju postupke naknadne obrade tj. pročišćavanja. Iz tog razloga su ove jednostavnije metode više ekonomski isplative. Također se može koristiti kombinacija ove dvije metode kako bi se postigla veća učinkovitost u čišćenju katrana i proizvodnji čistog sintetskog plina. Tablica 3. prikazuje usporedbu djelovanja različitih katalizatora za krekiranje katrana [42].

Klorovodik se zbog svojeg štetnog utjecaja mora ukloniti iz produkta isplinjavanja klorinirane sirovine. HCl se može hvatati pomoću dolomita (reagira s CaO i MgO kako bi nastali CaCl₂ i MgCl₂). Spoj koji se također može koristiti za uklanjanje HCl je natrijev karbonat (Na₂CO₃) [42].

Korištenje aditiva u sloju također potiče proizvodnju H₂ i CO uz smanjenje količine CO₂. Uklanjanje CO₂ aditivima poput CaO pomiče ravnotežu reakcije izmjene vode i plina te potiče reformaciju vodene pare. Iznad temperature od 700 °C CaO gubi sposobnost adsorpcije CO₂ što ograničava njegov učinak. Olivin također povećava koncentracije H₂, CO i CH₄, a smanjuje koncentraciju CO₂ procesima krekiranja i reformiranja, neovisno o tome da li se koristi kao glavni materijal za sloj ili kao dodatak, primjerice, kvarcnom pijesku [42].

Problem defluidizacije i nagomilavanja pri isplinjavanju plastičnog otpada može se riješiti isplinjačem s fontanskim slojem. U njima se mogu obraditi ljepljivi materijali i primjenjuju se za pirolizu i isplinjavanje plastičnog otpada. Koriste se za termalnu konverziju plastičnog otpada koje je teško obraditi s fiksnom ili fluidiziranom sloju, jednostavno se konstruiraju, nema potrebe za razdjelnom pločom, imaju mali pad tlaka, prijenos topline je dobar te smanjuju proizvodnju katrana i čađe [42].

Tablica 3. Usporedba katalizatora za krekiranje katrana [42]

| Katalizator | Sirovina | Agens za isplinjavanje | Učinak |
|--------------------------------------|---|--|--|
| Dolomit | PP [76, 77] | Zrak | Bolji učinak nego olivin, ali uz intenzivnije stvaranje čestica |
| Olivin | PE [78]; PP [76, 77]; HDPE [79]; Mješavina PE, PP, PS, PVC, PMMA i PET [80] | Zrak [76, 77, 80]; Vodena para [79]; Zrak i vodena para [78] | Veća mehanička čvrstoća i otpornost na habanje u odnosu na dolomit, slabo stvaranje čestica |
| Aktivni ugljen | Mješavina PE, PP, PS, PET, PVC i PMMA [81] | Zrak | Bolja adsorcija i sposobnost uklanjanja katrana u odnosu na dolomit |
| Katalizatori na bazi nikla | PP [82]; Mješavina PS, PP i HDPE [83]; Mješavina PE, PET, PS i PP [84]; Mješavina piljevine i PP [85] | Vodena para [82, 83, 85]; CO ₂ [84] | Visoka reaktivnost pri raskidanju ugljikovih veza, poticanje reakcije izmjene plina i vode (R5), smanjenje udjela krutine u produktu i poboljšanje stope isplinjavanja |
| γ-Al₂O₃ | HDPE [79] | Vodena para | Neznatno bolji nego olivin u pogledu udjela katrana i čađe, ali su udjeli plina slični |

3.4.2 Isplinjavanje plastike s drugim krutim gorivima

Stvaranje finog crnog praha u reaktoru i problem pri unosu sirovine u reaktor uzrokovan omekšavanjem plastike koja se zatim lijepi za stijenke cijevi za unos neki su od problema procesa isplinjavanja plastičnog otpada. Upotrebom miješane sirovine (uz plastiku isplinjavaju se biomasa i/ili ugljen) umanjuju se problemi pri unosu sirovine. U takvoj mješavini plastika poboljšava reaktivnost sirovine jer se njena polimerna struktura lako krekira [42]. Kalorijska vrijednost sintetskog plina dobivenog isplinjavanjem ugljena i/ili biomase povećava se dodavanjem plastike. U primjeru isplinjavanja biomase i PE pokazalo se da isplinjavanjem čiste biomase udio plina u produktu iznosi 10%. 10% PE-a u mješavini dovodi do 12% većeg udjela plina, a 40% PE-a u mješavini do 50% većeg udjela plina [86].

3.5 Isplinjavanje plazmom

Prethodna poglavlja odnosila su se na proces termičkog isplinjavanja, a u nastavku slijedi kratki opis procesa isplinjavanja plastičnog otpada plazmom. Isplinjavanje plastičnog otpada plazmom proces je u kojem se plazma generirana električnim lukom koristi za dobivanje sintetskog plina iz sirovine, odnosno plastičnog otpada [42].

Tijekom ovog procesa molekule se razgrađuju do elementarnog stanja. Prednost isplinjavanja plazmom je postizanje vrlo visokih temperatura (plazma generator – baklja može postići temperature od 20.000 °C [36]) i visokog stupnja konverzije tvari. Te visoke temperature osiguravaju razgradnju štetnih spojeva što čini isplinjavanje plazmom ekološki prihvatljivim procesom. Uz sintetski plin, može doći do nastanka pepela i troske (troska uobičajeno nastaje iz anorganskih stvari pri visokim temperaturama plazme). Isplinjavanje plazmom može se podijeliti prema metodi stvaranja plazme ili prema vrsti reaktora. Metode stvaranja plazme uključuju istosmjernu struju, radio frekvenciju i mikrovalove, a najčešće se koristi istosmjerna struja. Kod istosmjerne struje, na elektrode se dovodi visoki napon u plinskom mediju kako bi se plinovi razgradili i uzrokovali stvaranje plazme. Plinovi koji se mogu koristiti kao medij za plazmu su argon, dušik, vodik, ugljikov monoksid, ugljikov dioksid i vodena para. Kod metode radio frekvencije, između elektroda se pušta izmjenična struja, a kod upotrebe mikrovalova koristi se magnetron koji stvara mikrovalni signal. Kada signal dođe u kontakt s plazmenim plinom, plin se ionizira i pretvara u plazmu. Korištenje mikrovalnih signala zahtjeva niži napon u odnosu na istosmjernu i izmjeničnu struju [42].

Poput konvencionalnih termičkih isplinjača, isplinjači plazmom mogu se podijeliti na tri vrste prema reaktoru: plazma reaktor s fiksnim slojem, plazma reaktor s pokretnim slojem i plazma reaktor s prijenosnim slojem. Kod reaktora s fiksnim slojem plazma se ubrizgava u stacionarnu plastiku u reaktoru. Sintetski plin prikuplja se iz gornjeg dijela reaktora, a troska i pepeo skupljaju se pri dnu. Kod pokretnog sloja, plastika se neprekidno unosi ili s vrha ili s dna reaktora, a plazma se ubrizgava u tok sirovine. Kod prijenosnog sloja plastika se ubrizgava kroz plazmeni plin [42].

Isplinjavanje plazmom još nije uhodana tehnologija te su potrebna istraživanja kako bi se skupila dodatna znanja o utjecaju konstrukcijskih značajki postrojenja na same reakcije. Primjeri tih značajki su mehanizam unosa sirovine, prikupljanje sintetskog plina, metoda uklanjanja troske i vrsta korištene plastike. Radni uvjeti koji utječu na isplinjavanje plazme su radna temperatura reaktora, protok plazmenog plina, snaga plazme, vrijeme sadržavanja u reaktoru i korištena vrsta goriva [42].

3.5.1 Utjecaj radnih uvjeta na isplinjavanje plazmom

U odnosu na druge dostupne tehnologije isplinjavanja, plazma proizvodi najveću količinu energije, procesi se mogu odvijati pri vrlo visokim temperaturama, potrebno joj je postrojenje manjih gabarita i ima visok iznos entalpije. Iz tih razloga dovoljan je mali protok plazme za održavanje procesa isplinjavanja. Isplinjavanje plazmom zbog proizvodnje velike količine energije može se postići bez oksidirajućeg medija. Ipak se preporuča korištenje agensa poput kisika, zraka, vodene pare i ugljikovog dioksida kako bi se povisio stupanj konverzije ugljika. Zbog kratkog vremena zadržavanja u reaktoru sastav sintetskog plina nastao isplinjavanjem plazmom trebao bi biti jednostavan i stabilan [42].

Kao i kod konvencionalnog isplinjavanja, medij korišten za proizvodnju plazme značajno utječe na sastav produkta. Istraživanje isplinjavanja plazmom čistog PE pokazalo je da korištenje dušika dovodi do sintetskog plina u kojem najveći udio zauzima H_2 , a pri korištenju vodene pare prevladavajući plinovi su CO i H_2 zbog poboljšanja konverzije ugljika u prisutnosti vodene pare [87]. Dodavanje vodene pare pri isplinjavanju plazmom povećava se udio plina u produktu, udio H_2 , učinkovitost hladnog plina i ogrjevna vrijednost sintetskog plina te se potiče konverzija čađe. Treba obratiti pozornost na temperaturu ispuštanja koja treba biti dovoljno visoka kako bi se izbjegla kondenzacija vodene pare. Osim povećavanja protoka vodene pare, na sastav sintetskog plina utječu tlak i snaga plazme. Povećanjem tlaka povećava se temperatura i gustoća energije [42]. Povećanje tlaka i snage plazme dovodi do većih koncentracija H_2 i CO te povećanog udjela plina, a smanjenog udjela krutine u produktu. To je pokazalo istraživanje kojeg su proveli Tang i Huang [87] gdje se koncentracija H_2 povećala s 13% na 16%, a CO s 6% na 9% kada se snaga povećala s 1600 na 2000 W. Kod povećanja tlaka s 3000 na 8000 Pa, koncentracija H_2 se povećala s 13% na 15%, a CO s 5% na 11%.

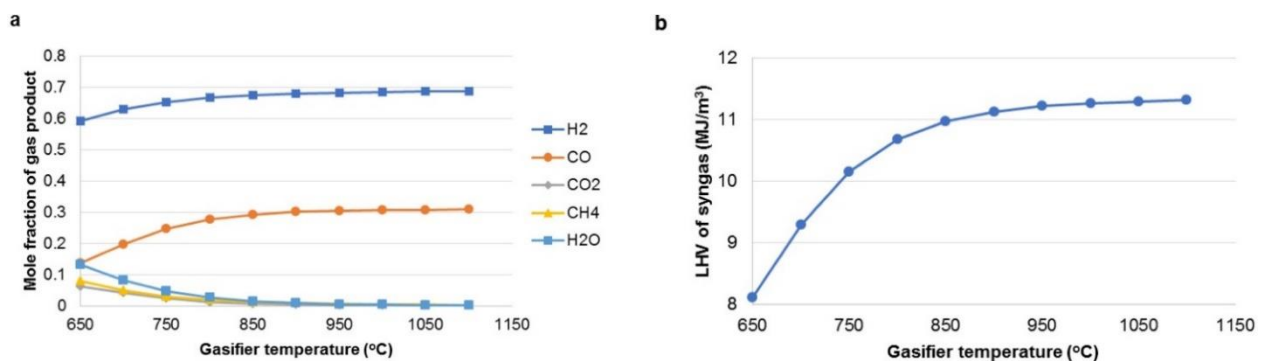
Unatoč tomu što se procesom isplinjavanja plazmom dobiva visokokvalitetan sintetski plin, nedostaci isplinjavanja plazmom su potrebna velika kapitalna ulaganja i velika potrošnja energije [42].

3.6 Utjecaj radne temperature i omjera vodene pare i goriva na produkte isplinjavanja

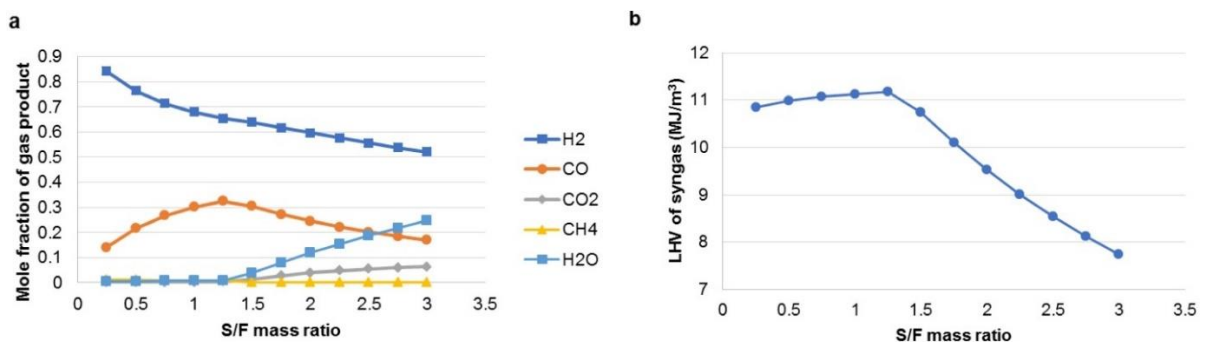
D. Saebea i sur. proveli su istraživanje [33] u kojem su ispitani utjecaji radne temperature isplinjavanja i omjera vodene pare koja služi kao agens i goriva na produkte isplinjavanja mješavine polietilena (PE) i polipropilena (PP).

U prvoj simulaciji isplinjavao se čisti polietilen pri konstantnom omjeru vodene pare i goriva dok se temperatura povećavala s 650 °C na 1100 °C. Prema Slici 10. vidi se da povećanje temperature dovodi do povećanja molarnog udjela vodika (H_2) i ugljikovog monoksida (CO) te do smanjenja molarnog udjela ugljikovog dioksida (CO_2), metana (CH_4) i vode (H_2O) u sintetskom plinu. Također je vidljivo da su pri 900 °C i višim temperaturama udjeli H_2 i CO u sintetskom plinu stabilni te se bitno ne povećavaju te se može reći da je proces isplinjavanja završen pri temperaturi od 900 °C [33].

Donja ogrjevna vrijednost H_d sintetskog plina povećava se pri povećanju temperature isplinjavanja. Razlog tomu je povećanje udjela H_2 i CO iz kojeg se računa H_d . Pri 900 °C H_d iznosi 11,36 MJ/m³ te daljnjim povećanjem temperature njegova vrijednost bitno ne raste (Slika 10.) [33].



Slika 10. Utjecaj promjene temperature isplinjavanja na udjele plinova i ogrjevnu vrijednost sintetskog plina [33]

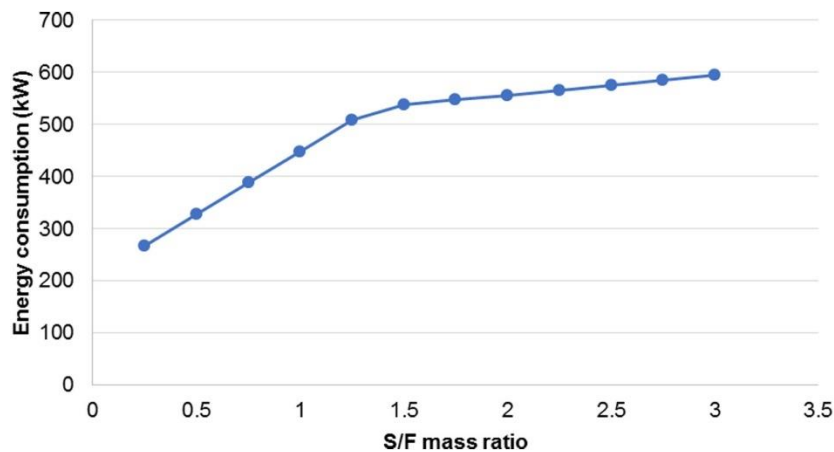


Slika 11. Utjecaj promjene omjera VP/G na udjele plinova i ogrjevnu vrijednost sintetskog plina [33]

Druga simulacija uključivala je isplinjavanje čistog PE s različitim omjerima masenog udjela vodene pare i goriva (PE) – skraćeno VP/G (na Slici 11. S/F – engleski Steam/Fuel). Omjer VP/G se povećavao s 0,25 na 3. Porastom omjera VP/G raste molarni protok H_2 u sintetskom plinu. Molarni protok CO također raste između omjera 0,25 i 1,25, a nakon toga se počinje smanjivati. Višak vodene pare reagira s nastalim CO i stvara se sve više CO_2 . Na Slici 11. rezultati simulacije prikazani su u udjelima te se molarni udio H_2 u sintetskom plinu smanjuje iako se njegov sveukupni protok povećava. Zaključak ispitivanja je da je optimalni omjer VP/G od 1,25 jer se uz njega proizvodi povoljni molarni protok H_2 i CO [33].

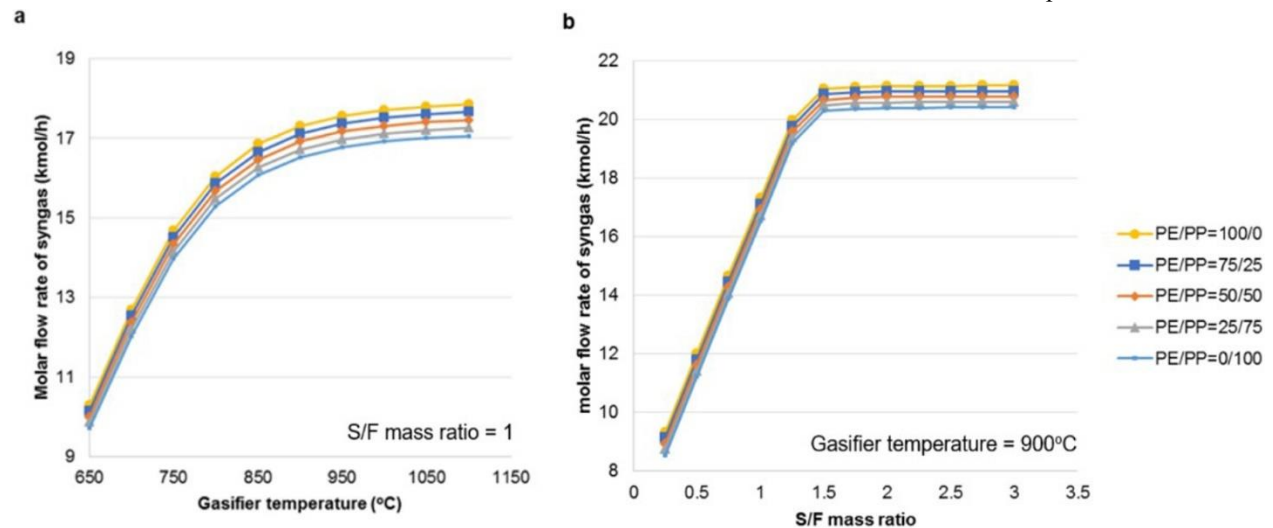
Također se H_d sintetskog plina povećava s omjerom VP/G do maksimalne vrijednosti od otprilike $11,40 \text{ MJ/m}^3$. Maksimalna vrijednost H_d također se dobiva pri omjeru VP/G od 1,25. Daljnjim povećanjem 1,25 H_d sintetskog plina pada usred viška pare u sustavu koja uzrokuje razrjeđivanje H_2 i pretvorbu CO u CO_2 [33].

Promatrao se i utjecaj promjene omjera VP/G na potrošnju energije pri isplinjavanju čistog PE pri temperaturi od $900 \text{ }^\circ\text{C}$. Pokazalo se da povećavanje omjera VP/G s 0,25 na 3 također zahtjeva povećanje energije potrebne za održavanje procesa. Naime, više pare u sustavu zahtjeva više toplinske energije za njenu pripremu tj. isparavanje. Slika 12. prikazuje rezultate simulacije. Omjer od 1,5 kompromis je između proizvodnje sintetskog plina i potrošnje energije [33].



Slika 12. Utjecaj promjene omjera VP/G na potrošnju energije [33]

Treća simulacija ispitivala je utjecaj omjera mase PE/PP na proizvodnju sintetskog plina. Omjeri koji su uzeti u obzir su 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 i 0/100. Uz svaki omjer razmatrala se proizvodnja sintetskog plina pri različitim temperaturama isplinjavanja i pri različitim omjerima VP/G, a rezultati simulacije vide se na Slici 13.



Slika 13. Proizvodnja sintetskog plina uz različite omjere PE/PP [33]

I povišenje temperature isplinjavanja i povećanje VP/G omjera dovodi do povećanja proizvodnje sintetskog plina. Iz ove simulacije važno je uočiti da se pri isplinjavanju različitih omjera PE/PP dolazi do drugačijeg molarnog protoka tj. proizvodnje sintetskog plina. Isplinjavanje čistog PE (omjer 100/0) dovodi do najveće proizvodnje sintetskog plina, a čistog PP do najmanje. To je posljedica većeg udjela vodika i ugljika u PE nego u PP. Pri temperaturi od 900 °C i omjeru VP/G od 1,5 u slučaju isplinjavanja čistog PE proizvodi se 21 kmol/h sintetskog plina s omjerom H_2/CO_2 od 2,1, a u slučaju isplinjavanja čistog PP proizvodi se 20,3 kmol/h sintetskog plina s omjerom H_2/CO_2 od 2,03 (većim omjerom H_2/CO_2 dobiva se kvalitetniji plin s višom H_d), ali razlika nije ocjenjena kao bitna [33].

4. Primjeri postrojenja za isplinjavanje otpada

Prema dostupnoj literaturi prikupljeni su podaci o postrojenjima za isplinjavanje otpada. Dostupni podaci opisuju procese stvarnih komercijalnih i istraživačkih postrojenja ili pretpostavljene slučajeve za razmatrana postrojenja. U nastavku će se za ova postrojenja koristiti zajednički naziv - postojeća postrojenja. U Prilogu I. nalazi se Tablica 1.3 koja prikazuje sve podatke prikupljene prema dostupnoj literaturi o postojećim postrojenjima za isplinjavanje otpada. „Kriterij isključivanja“ korišten je prilikom obrade dostupnih podataka. Njime se iz analize izostavljaju podaci koji značajno odstupaju od ostalih podataka u analiziranom setu kako bi se smanjila greška.

Neka od postojećih postrojenja osim polimernih materijala kao sirovinu koriste automobilske gume, komunalni miješani otpad, otpad od drvenog materijala, građevinski otpad te industrijski i komercijalni otpad. U sljedećoj tablici prikazane su sirovine koje su prihvaćene u postojećim postrojenjima s naglaskom na polimerne materijale.

Tablica 4. Korištene sirovine u postrojenjima za isplinjavanje otpada

| Sastav otpada | HDPE | LDPE | PP | PS | PET | PVC | Drugi polimerni materijali | Ostalo | Napomena |
|-------------------------------|------|------|----|----|-----|-----|----------------------------|--------|---------------------|
| Redni broj postrojenja | | | | | | | | | |
| P1 | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| P2 | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| P3 | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| P4 | + | + | + | + | + | + | + | + | <10% PVC |
| P5 | + | + | + | + | + | + | + | + | <10% PVC |
| P6 | + | + | + | + | + | + | + | + | <10% PVC |
| P7 | + | + | + | + | + | + | + | + | <10% PVC |
| P8 | + | + | | | | | | | |
| P9 | + | + | + | | | | + | | |
| P10 | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| P11 | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| P12 | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| P13 | + | + | + | + | + | + | + | + | Može uzeti 100% PVC |
| P14 | + | + | + | + | + | + | + | | <10% PVC |
| P15 | + | + | + | + | + | + | + | | <2% klora |
| P16 | + | + | + | | | + | | | 40% PVC |
| P17 | | | | | | + | | | |
| P18 | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| P19 | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| P20 | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| P21 | + | + | + | + | + | + | + | + | |

Iz Tablice 4. zaključuje se da se u procesu isplinjavanja kao sirovina mogu prihvatiti svi često korišteni polimerni materijali. HDPE i LDPE korišteni su u svim postrojenjima osim postrojenja broj 16 koji služi za isplinjavanje isključivo PVC otpadnih materijala. Osim HDPE i LDPE najprihvaćeniji polimerni materijal je polipropilen (PP), kojeg je koristilo više od 90% postrojenja. PVC se također prihvaća u velikom broju postrojenja no uz njega su povezana u tablici navedena

ograničenja jer se u sastavu PVC-a nalazi klor te njegovim isplinjavanjem nastaje kiseli klorovodik koji djeluje nagrizajuće prema opremi te je potrebno upotrijebiti sredstvo za njegovu neutralizaciju poput kalcijevog karbonata [10]. PS i PET koriste se u 85% postrojenja za isplinjavanje otpada. Sastav otpada koji se koristi kao sirovina ne utječe bitno na izvodljivost procesa isplinjavanja.

4.1 Ulazni i izlazni tokovi procesa isplinjavanja polimernog materijala

U ovom poglavlju opisani su ulazni i izlazni tokovi procesa isplinjavanja postojećih postrojenja koja isplinjavaju isključivo polimerni materijal. Razlog tomu je bolji uvid u tijek procesa isplinjavanja za kasniju tehno-ekonomsku analizu pretpostavljenog postrojenja koje bi obrađivalo isključivo plastični otpad. Prikazani ekonomski podaci, uz postrojenja za obradu isključivo plastičnog otpada, uključivati će i postrojenja za obradu drugih vrsta otpadnih materijala jer ta vrsta podataka nije toliko osjetljiva na sastav ulazne sirovine koliko npr. produkti procesa i emisije u zrak.

4.1.1 Ulazni tokovi postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala

Tablica 5. prikazuje sažetak prikupljenih podataka o ulaznim tokovima procesa postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala. Prikazane su minimalne i maksimalne vrijednosti, njihova srednja vrijednost te za ulaze koji se javljaju samo u jednom postrojenju je naveden njihov točan iznos.

Uz sirovinu (plastični otpad), u proces isplinjavanja ulazi toplinska energija koja služi za sušenje otpada i zagrijavanje reaktora te električna energija za pogon pumpi, uređaja za usitnjavanje otpada i kontrolnog sustava. Kisik, zrak i vodena para plinovi su koji služe kao izvor kisika i/ili kao plin nosilac za uklanjanje produkata reakcije s mjesta reakcije [36].

Aktivni ugljen i gašeno vapno koriste se za pospješivanje reakcija (katalizatori) i pretvorbe sirovine u CO i H₂. Aktivni ugljen koristi se i za uklanjanje katrana tijekom procesa isplinjavanja u reaktoru [42]. Cho i sur. proveli su istraživanje koje je pokazalo da povećanje količine aktivnog ugljena koji ulazi u proces dovodi do povećanja proizvodnje vodika i do smanjenja proizvodnje katrana [43]. Istraživanje utjecaja gašenog vapna (kalcijev hidroksid, Ca(OH)₂ na isplinjavanje niskokvalitetnog ugljena koje su proveli Wang i sur. pokazalo je da prisutnost gašenog vapna pospješuje izdvajanje hlapivih tvari iz ugljena te razlaganje hlapivih tvari na plinove manjih molekula uz smanjivanje količine preostale čađe. Proizvodnja vodika također je povećana u prisustvu gašenog vapna [44]. Navedeno istraživanje je provedeno na primjeru isplinjavanja

ugljena, ali se zbog sličnosti procesa gašeno vapno može koristiti sa sličnim utjecajem i prilikom isplinjavanja polimernih materijala.

Također, u primjeru jednog postrojenja zabilježeno je miješanje lignita s plastičnim otpadom kao dijelom ulazne sirovine. Pri zagrijavanju i pokretanju procesa isplinjavanja koriste se također drugi energenti poput prirodnog plina i loživog ulja kao dodatna goriva.

Tablica 5. Podaci o ulaznim tokovima procesa postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala

| Ulazni tokovi procesa | | Jedinica | Vrijednosti | | | Srednja vrijednost |
|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------|-------------|---|----------|--------------------|
| | | | Min | - | Max | |
| Količina sirovine | | tona suhog otpada po danu | 1,56 | - | 77,1428 | 43,889 |
| Ostali ulazi | Toplinska energija za sušenje otpada | kWh/tona vlažnog otpada | 126 | | | - |
| | Potrošnja električne energije | kWh/tona suhog otpada | 115,2 | - | 596,61 | 398,893 |
| | Toplinska energija | kWh/tona suhog otpada | 22,1753 | | | - |
| | Kisik | kg/tona suhog otpada | 988,668 | - | 1442,591 | 1079,4686 |
| | Zrak | kg/tona suhog otpada | 2300 | | | - |
| | Aktivni ugljen | kg/tona suhog otpada | 0,4915 | - | 0,5082 | 0,49985 |
| | Vodena para | kg/tona suhog otpada | 300 | - | 1280,344 | 548,5 |
| | Lignit | kg/tona suhog otpada | 1226,693 | | | - |
| | Voda | kg/tona suhog otpada | 1000 | - | 7752,699 | 4603,034 |
| | Gašeno vapno | kg/tona suhog otpada | 6,4407 | - | 6,5574 | 6,499 |
| Dodatna potrošnja goriva | Prirodni plin | kg/tona suhog otpada | 65,849 | | | - |
| | Loživo ulje | kg/tona suhog otpada | 39,254 | | | - |

4.1.2 Izlazni tokovi postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala

Tablica 6. prikazuje sažetak prikupljenih podataka o proizvedenom sintetskom plinu nastalog procesom isplinjavanja u postojećim postrojenjima za isplinjavanje polimernih materijala. Prikazane su minimalne i maksimalne vrijednosti te njihova srednja vrijednost.

Tablica 6. Količina proizvedenog sintetičkog plina u postojećim postrojenjima za isplinjavanje polimernih materijala

| Produkt isplinjavanja | Jedinica | Vrijednosti | | | Srednja vrijednost |
|-----------------------|----------------------|-------------|---|----------|--------------------|
| | | Min | - | Max | |
| Sintetski plin | kg/tona suhog otpada | 95,376 | - | 1740,586 | 1041,764 |

Osnovni produkt isplinjavanja je sintetski plin. Uobičajeno je da se u sklopu postrojenja sintetski plin obrađuje kako bi se dobili drugi korisni produkti ili se iskorištava u energetske svrhe – za proizvodnju električne i/ili toplinske energije. Srednja vrijednost mase dobivenog sintetskog plina iznosi 1.041,764 kg toni suhog otpada.

Tablica 7. prikazuje sažetak prikupljenih podataka o produktima procesa prerade sintetskog plina u postojećim postrojenjima za isplinjavanje polimernih materijala. Prikazane su minimalne i maksimalne vrijednosti, njihova srednja vrijednost te za ulaze koji se javljaju samo u jednom postrojenju je naveden njihov točan iznos.

Tablica 7. Podaci o produktima procesa prerade dobivenog sintetskog plina u postojećim postrojenjima za isplinjavanje polimernih materijala

| Produkti prerade sintetskog plina | | Jedinica | Vrijednosti | | | Srednja vrijednost |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------------|-------------|---|----------|--------------------|
| | | | Min | - | Max | |
| Produkti | Električna struja | kWh/tona suhog otpada | 621,5243 | - | 1694,92 | 1326,45 |
| | Metanol | kg/tona suhog otpada | 698,724 | | | - |
| | Etanol | kg/tona suhog otpada | 553,048 | | | - |
| | Benzin | kg/tona suhog otpada | 318,192 | | | - |
| | Dizel | kg/tona suhog otpada | 215,916 | | | - |
| | Vodik | kg/tona suhog otpada | 50 | | | - |
| Suprodukt prerade | Vodena para | kg/tona suhog otpada | 856,088 | - | 2019,951 | 1616,529 |

Jedan od najčešćih načina transformacije sintetičkog plina je za proizvodnju električne energije. Ona se proizvodi u sklopu postrojenja iz sintetskog plina koji nastaje procesom isplinjavanja najčešće kroz upotrebu plinske turbine. Prosječno se iz tone suhog otpada dobije 1.326,45 kWh struje.

Metanol, etanol, benzin, dizel i vodik produkti su isplinjavanja koji mogu dobiti daljnjom obradom sintetskog plina. Dizel se dobiva Fischer-Tropschovom sintezom, metanol reakcijama ugljikovog monoksida i ugljikovog dioksida s vodikom pri temperaturi od 250 °C i tlaku od 50 bara, a iz pročišćenog metanola koji se dehidrira dobije se CH₂ grupa ugljikohidrata čijim međusobnim povezivanjem nastaje više alkena i aromatskih spojeva nego u Fischer-Tropschovoj sintezi te se produkt može koristiti poput benzina. Etanol se dobiva biološkom konverzijom, tj. procesom fermentacije sintetskog plina gdje posebni sojevi mikroorganizama pretvaraju ugljikov monoksid i vodik u etanol [10].

Vodena para česti je suprodukt proizvodnje drugih primarnih produkata, a ona se uobičajeno dobije zagrijavanjem vode u generatoru pare korištenjem otpadne toplinske energije iz procesa obrade sintetskog plina. Prosječna vrijednost mase vodene pare koja se dobije u postojećim procesima iznosi 1.616,529 kg po suhoj toni otpada.

Tablica 8. prikazuje sažetak prikupljenih podataka o preostalim izlaznim tokovima procesa postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala. Prikazane su minimalne i maksimalne vrijednosti, njihova srednja vrijednost te za ulaze koji se javljaju samo u jednom postrojenju je naveden njihov točan iznos. Suprodukti koji nastaju procesom isplinjavanja, a ne mogu se energetske oporabiti uključuju klorovodik, troska/šljaka, katran pepeo, gips i ostaci sustava za kontrolu zagađenja, oni su tekuće ili krute tvari koje sadržavaju onečišćenja nastala u procesu i ostatak ulazne sirovine koji nije prešao u plinovito stanje, a mogu biti i plin poput klorovodika koji se javlja kod procesa isplinjavanja plastičnog otpada koji sadržava klor (npr. PVC).

Tablica 8. Podaci o preostalim izlaznim tokovima procesa postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala

| Izlazni tokovi procesa | | Jedinica | Vrijednosti | | | Srednja vrijednost |
|------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------|---|----------|--------------------|
| | | | Min | - | Max | |
| Ostaci (nusprodukti) | HCl | kg/tona suhog otpada | 210 | - | 347,667 | 278,833 |
| | Troska/šljaka | kg/tona suhog otpada | 0,8832 | | | - |
| | Katran | kg/tona suhog otpada | 126,898 | | | - |
| | Pepeo | kg/tona suhog otpada | 100,848 | - | 220 | 155,911 |
| | Ostaci sustava za kontrolu zagađenja | kg/tona suhog otpada | 6,949 | - | 17,993 | 14,328 |
| | Gips | kg/tona suhog otpada | 98,135 | | | - |
| Gubici | Toplinski gubici | MWh/tona suhog otpada | 1,1364 | - | 1,7046 | 1,352 |
| | Gubici vode | kg/tona suhog otpada | 50,191 | - | 9715,407 | 3203,918 |

Održavanje postrojenja uključuje redovito čišćenje nusprodukata iz reaktora kako bi se proces mogao normalno odvijati i kako ne bi došlo do oštećenja opreme.

Toplinski gubici odnose se na toplinu koju reaktor nepovratno ispušta u okoliš, a gubici vode na vodu dobivenu obradom sintetskog plina procesima poput Fischer – Tropschove sinteze, dobivanja metanola, pretvorbe metanola u benzin te destilacije razrijeđenog etanola dobivenog biološkom konverzijom [10].

4.1.3 Emisije u zrak postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala

Tablica 9. prikazuje sažetak prikupljenih podataka o emisijama u zrak procesa postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala. Prikazane su minimalne i maksimalne vrijednosti, njihova srednja vrijednost te za ulaze koji se javljaju samo u jednom postrojenju je naveden njihov točan iznos.

Prikupljeni podaci pokazuju da razne inačice procesa isplinjavanja polimernih materijala dovode do emisija PM_{2,5} (fine lebdeće čestice s promjerom manjim od 2,5 μm), ugljikov dioksid, klorovodik, dušikovi oksidi, živa, kadmij, olovo, amonijak, antimon, arsen, titan te dioksini i furani. Do emisija dolazi tijekom pročišćavanja sintetskog plina ili tijekom njegovog iskorištavanja kako bi se dobili drugi produkti poput električne struje. Izmjerene emisije dušikovih oksida, žive, kadmija, olova, amonijaka, antimona, arsena, titana te dioksina i furana povezane su samo s istraživačkim radom u kojem se plastični otpad dobio izdvajanjem iz miješanog komunalnog otpada bez navedenog koraka čišćenja među postupcima predobrade. Pregledom svih dostupnih postojećih i pretpostavljenih postrojenja koja obrađuju različite materijale, a ne isključivo polimerne, vidi se da do sličnih emisija dolazi pri isplinjavanju miješanog komunalnog otpada (Tablica 1.3 u Prilogu I.). Dakle, pri isplinjavanju isključivo polimernih materijala koji su pažljivo separirani od ostalih vrsta otpadnih materijala ili polimernih materijala koji prethodno

nisu korišteni (nova plastika) primijećene su emisije PM_{2,5}, CO₂, CO_{2eq}, dok su emisije HCl-a povezane isključivo s isplinjavanjem sirovine koja sadrži PVC.

Tablica 9. Podaci o emisijama u zrak postojećih postrojenja za isplinjavanje polimernih materijala

| Podaci o emisijama u zrak | | Vrijednosti | | | Srednja vrijednost |
|---|----------------------|-------------|---|-------------|--------------------|
| | | Min | - | Max | |
| PM _{2,5} | kg/tona suhog otpada | 0,01 | - | 0,01288 | 0,01144 |
| CO ₂ | kg/tona suhog otpada | 520 | | | - |
| CO _{2eq} | kg/tona suhog otpada | 318 | | | - |
| HCl | kg/tona suhog otpada | 0,00018 | | | - |
| NO _x izražen kao NO ₂ | kg/tona suhog otpada | 0,0703 | - | 0,07136 | 0,07083 |
| Živa (Hg) | kg/tona suhog otpada | 6,5574E-07 | - | 6,7797E-07 | 6,66855E-07 |
| Kadmij (Cd) | kg/tona suhog otpada | 1,6393E-06 | - | 1,6949E-06 | 0,000001644 |
| Olovo (Pb) | kg/tona suhog otpada | 0,000246 | - | 0,002305 | 0,0012755 |
| NH ₃ | kg/tona suhog otpada | 0,000032787 | - | 0,000033898 | 3,33425E-05 |
| Antimon (Sb) | kg/tona suhog otpada | 3,2787E-06 | - | 0,000015254 | 9,26635E-06 |
| Arsen (As) | kg/tona suhog otpada | 6,5574E-07 | - | 6,7797E-07 | 6,66855E-07 |
| Titan (Ti) | kg/tona suhog otpada | 3,2787E-06 | - | 1,6949E-06 | 2,4868E-06 |
| Dioksini i furani | kg/tona suhog otpada | 6,5574E-12 | - | 6,7797E-12 | 6,66855E-12 |

4.2 Tehno-ekonomska analiza postrojenja za isplinjavanje otpada

U ovom poglavlju analizirati će se tehnološke i ekonomske značajke postojećih postrojenja prema dostupnoj literaturi. Financijski podaci iz dostupne literature izraženi su u eurima (EUR) prema Tablici 1.2 u Prilogu I. Također su novčani iznosi pronađeni u izvorima navedeni s uračunatom inflacijom.

4.2.1 Tehnološki aspekti postojećih postrojenja

Tablica 10. prikazuje dostupne tehničke podatke za postojeća postrojenja. Postrojenja rednog broja 4, 5, 6 i 7 dnevnog kapaciteta od 76,8 tona opisana su za potrebe analize procesa, produkata prerade sintetskog plina i investicijskih i fiksnih troškova te se ne odnose na stvarna postrojenja. Također, postrojenja rednog broja 8, 9, 10, 11 i 12 dio su istraživanja utjecaja sastava sirovine na emisije procesa isplinjavanja. Primjeri komercijalnih postrojenja rednog broja 1 (poduzeća Enerkem), 19 (poduzeća Alter NRG/ Westinghouse Plasma Corporation) i 21 (poduzeća Geoplasma).

Procesi kojima se obrađuje otpad mogu se podijeliti u dvije skupine: termičko isplinjavanje i isplinjavanje plazmom. Procesi termičkog isplinjavanja mogu se dalje podijeliti na različite

sustave poput isplinjavanja u fiksnom sloju, u fluidiziranom sloju, mjehuričastom fluidiziranom sloju, cirkulirajućem fluidiziranom sloju te na kombinaciju termičkog isplinjavanja otpada te kasnijeg pročišćavanja sintetičkog plina dobivenog isplinjavanjem pomoću plazme. Najčešće su varijante procesa u fluidiziranom sloju.

Tablica 10. Tehnički podaci postojećih postrojenja za isplinjavanje otpada

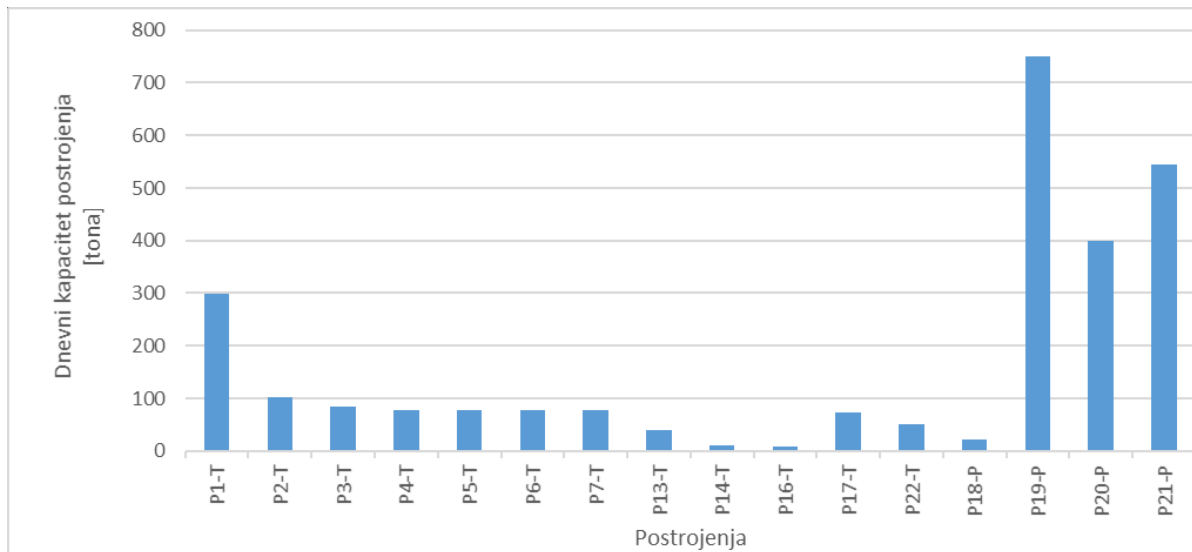
| Poduzeće/R.B. postrojenja | Vrsta procesa | | Agensi za isplinjavanje | Kapacitet (TPD) | Temperatura procesa, °C | Izvor |
|---|------------------------|--|-------------------------|-----------------|--|---------|
| P1 - Enerkem | Termičko isplinjavanje | U mjehuričastom fluidiziranom sloju | Zrak/kisik | 299,376 | - | [9] |
| P2 - Ze-gen | Termičko isplinjavanje | - | - | 68-136 | 1200 | [9] |
| P3 - Plasco | Termičko isplinjavanje | Isplinjavanje + čišćenje produkata plazmom | - | 84,368 | 700 (ispinjavanje); 1200 (čišćenje plina plazmom) | [9][14] |
| P4 | Termičko isplinjavanje | - | Kisik | 76,8 | 1077 | [10] |
| P5 | Termičko isplinjavanje | - | Kisik/vodena para | 76,8 | 1077 | [10] |
| P6 | Termičko isplinjavanje | - | Kisik/vodena para | 76,8 | 1077 | [10] |
| P7 | Termičko isplinjavanje | - | Kisik/vodena para | 76,8 | 1077 | [10] |
| P8 | Termičko isplinjavanje | U fluidiziranom sloju | Zrak/vodena para | 0,72-2,4 | - | [11] |
| P9 | Termičko isplinjavanje | U fluidiziranom sloju | Zrak/vodena para | 0,72-2,4 | - | [11] |
| P10 | Termičko isplinjavanje | U fluidiziranom sloju | Zrak/vodena para | 0,72-2,4 | - | [11] |
| P11 | Termičko isplinjavanje | U fluidiziranom sloju | Zrak/vodena para | 0,72-2,4 | - | [11] |
| P12 | Termičko isplinjavanje | U fluidiziranom sloju | Zrak/vodena para | 0,72-2,4 | - | [11] |
| P13 - Powerhouse | Termičko isplinjavanje | - | - | 40 | 1100 | [12] |
| P14 - Texaco | Termičko isplinjavanje | - | Kisik/vodena para | 10 | 1200-1500 | [13] |
| P15 - Sekundärrohstoff Verwertungs Zentrum | Termičko isplinjavanje | U fiksnom sloju | Zrak/vodena para | - | - | [13] |
| P16 - Akzo Nobel Steam Gasification Process | Termičko isplinjavanje | U cirkulirajućem fluidiziranom sloju | Dušik/vodena para | 4,8-9,6 | 700-900 | [13] |
| P17 - Linde KCA | Termičko isplinjavanje | - | Kisik/vodena para | 72 | 1400-1600 | [13] |
| P18 - InEnTec | Isplinjavanje plazmom | - | Kisik/vodena para | 22,68 | - | [14] |
| P19 - Alter NRG/Westinghouse Plasma Corporation | Isplinjavanje plazmom | - | Zrak | 750 | 900-1000 (temperatura izlaznih plinova) | [14] |
| P20 - Europlasma | Isplinjavanje plazmom | Isplinjavanje + čišćenje produkata plazmom | Zrak | 400 | 1200 | [14] |
| P21 - Geoplasma | Isplinjavanje plazmom | - | Zrak | 544,32 | - | [9] |
| P22 - Ankur Scientific Energy Technologies | Termičko isplinjavanje | - | - | 50 | - | [37] |

Korišteni agensi za isplinjavanje su najčešće vodena para (može se koristiti u 13 od 18 postrojenja za koje su navedeni podaci, odnosno 72%), zrak (može se koristiti u 10 od 18 postrojenja, odnosno 55%), kisik (8 od 18 postrojenja, odnosno 44%) te se u jednom postrojenju uz vodenu paru koristi dušik. Agensi za isplinjavanje prvenstveno ima utjecaj na sastav proizvedenog sintetskog plina. Primjer je vodena para koja se koristi za povećanje udjela H₂ u sintetskom plinu [33, 42]. (Ostali utjecaji agensa za isplinjavanje opisani su u Poglavlju 3.3.3).

Temperature pri kojima se odvijaju procesi isplinjavanja nalaze se u rasponu od 700 do 1600 °C.

Slika 14. prikazuje raspon dnevnih kapaciteta postrojenja za isplinjavanje otpada, tj. srednje vrijednosti dnevnih kapaciteta ukoliko je u izvoru naveden njegov raspon u kojem je moguć rad postrojenja. Kapaciteti obrađenog otpada postojećih postrojenja nalaze se u rasponu od 7,2 tona u danu do 750 tona u danu. Postrojenja označena slovom T predstavljaju termičko isplinjavanje, a ona označena slovom P predstavljaju isplinjavanje plazmom. Može se uočiti da izuzev P18, ostala postrojenja koja isplinjavaju otpad plazmom imaju značajno veći dnevni kapacitet od postrojenja s termičkim isplinjavanjem. Pretpostavlja se da je veći dnevni kapacitet moguć kod postrojenja s

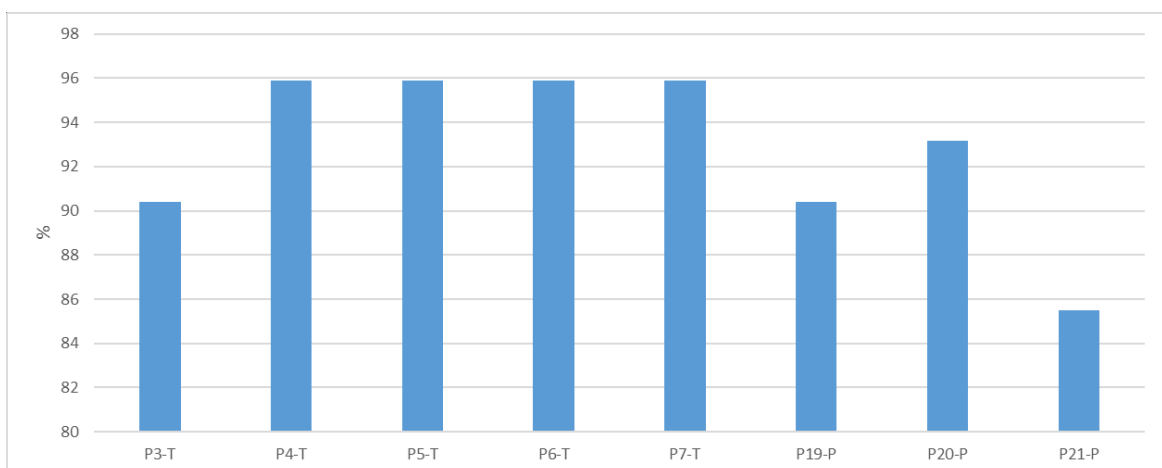
isplinjavanjem plazmom zbog kraćeg potrebnog vremena zadržavanja sirovine u reaktoru usred viših temperatura procesa te je dnevno moguće obraditi veće količine otpada.



Slika 14. Dnevni kapaciteti postojećih postrojenja za isplinjavanje otpada

Godišnji kapaciteti postojećih postrojenja kreću se od 17.000 tona do 247.500 tona otpada. Godišnji kapacitet postrojenja osim o dnevnom kapacitetu ovisi i o raspoloživosti postrojenja.

Slika 15. prikazuje raspoloživost postojećih postrojenja za isplinjavanje otpada u postotcima. Raspoloživost postojećih postrojenja je parametar koji upućuje na broj dana u godini koje postrojenje provede u pogonu. Raspoloživost postojećih postrojenja kreće se između 85% i 96%, a srednja vrijednost iznosi 93%, odnosno prosječno postrojenje provede 339 dana u godini u pogonu, a remont se odrađuje u preostalim 26 dana. Također se može uočiti da postrojenja koja termički isplinjavaju otpad imaju veću raspoloživost od postrojenja koja isplinjavaju plazmom.



Slika 15. Raspoloživost postojećih postrojenja za isplinjavanje otpada

4.2.2 Ekonomski aspekti postojećih postrojenja

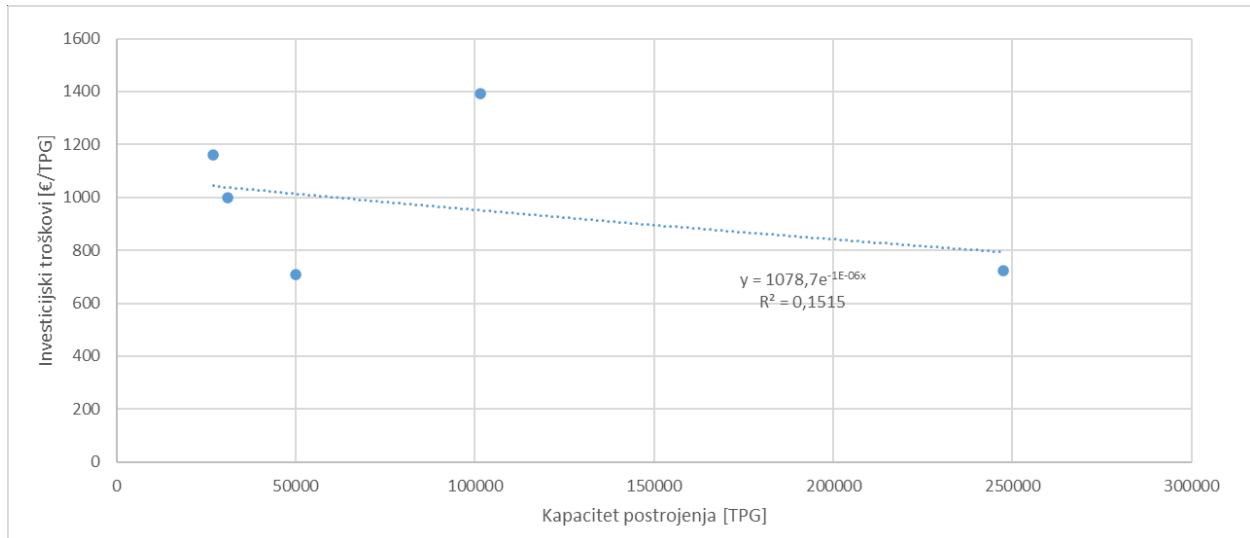
Produkti postojećih postrojenja za isplinjavanje isključivo polimernih materijala koji se mogu prodati na tržištu ili se mogu potencijalno preraditi u sirovinu koja se može prodati na tržištu navedeni su u Tablici 11. sintetski plin naveden je kao produkt 5 postrojenja (45%). Sintetski plin se u sklopu postrojenja obrađuje kako bi se dobili drugi proizvodi. Iz toga slijedi da je električna energija navedena kao produkt 4 postrojenja (36%). Uz električnu energiju javljaju se još vodik, metanol, etanol, dizel i benzin. Moguće je da postrojenje proizvodi više različitih produkata. Vodena para, podaci o čijoj proizvodnji su dostupni za 3 postrojenja, nastaje kao suprodukt pri obradi sintetskog plina. Vodenu paru moguće je iskoristiti kao toplinsku energiju potrebnu za postrojenje ili npr. prodati na tržištu u obliku toplinske energije.

Pretpostavljeni razlog za različite proizvode i kombinacije različitih proizvoda je veće tržište od onog za sintetski plin, na kojem se mogu ostvariti prihodi od njihove prodaje, npr. električne struje, topline dobivene iz vodene pare, etanola, itd.

Tablica 11. Produkti postojećih postrojenja za isplinjavanje isključivo polimernih materijala

| Poduzeće/ R.B. postrojenja | Sintetski plin | Vodik | Metanol | Etanol | Dizel | Benzin | Vodena para | Električna struja |
|---|----------------|-------|---------|---------|---------|---------|-------------|-------------------|
| | kg/tona otpada | | | | | | | kWh/tona otpada |
| P4 | 1740,586 | | | | | | 856,088 | |
| P5 | | | | | 215,916 | | 2019,951 | |
| P6 | | | | | | 318,192 | 1973,548 | |
| P7 | | | | 553,048 | | | | |
| P8 | | | | | | | | 1639,344 |
| P9 | | | | | | | | 1694,92 |
| P13 - Powerhouse | | 50 | | | | | | 1350 |
| P14 - Texaco | 95,376 | | | | | | | |
| P15 - Sekundärrohstoff Verwertungs Zentrum | 200,197 | | 698,724 | | | | | 621,5243 |
| P16 - Akzo Nobel Steam Gasification Process | 900 | | | | | | | |
| P17 - Linde KCA | 1230,896 | | | | | | | |

Dodatno, Haig S. i sur. proveli su istraživanje koje je uključivalo usporedbu tri postrojenja istog ulaznog kapaciteta (P5, P6 i P7) koja sintetski plin dobiven isplinjavanjem plastičnog otpada obrađuju kako bi proizveli dizel, benzin i etanol. Istraživanje je pokazalo da su najmanja ulaganja potrebna za postrojenje koje proizvodi etanol, zatim za postrojenje koje proizvodi benzin, a najveća ulaganja potrebna su za postrojenje čiji je proizvod dizel [10]. U sklopu navedenog istraživanja nije navedeno kolika su ulaganja potrebna za osnovno postrojenje koje proizvodi sintetski plin bez daljnje obrade.



Slika 16. Ovisnost investicijskog troška o godišnjem kapacitetu postrojenja za termičko isplinjavanje

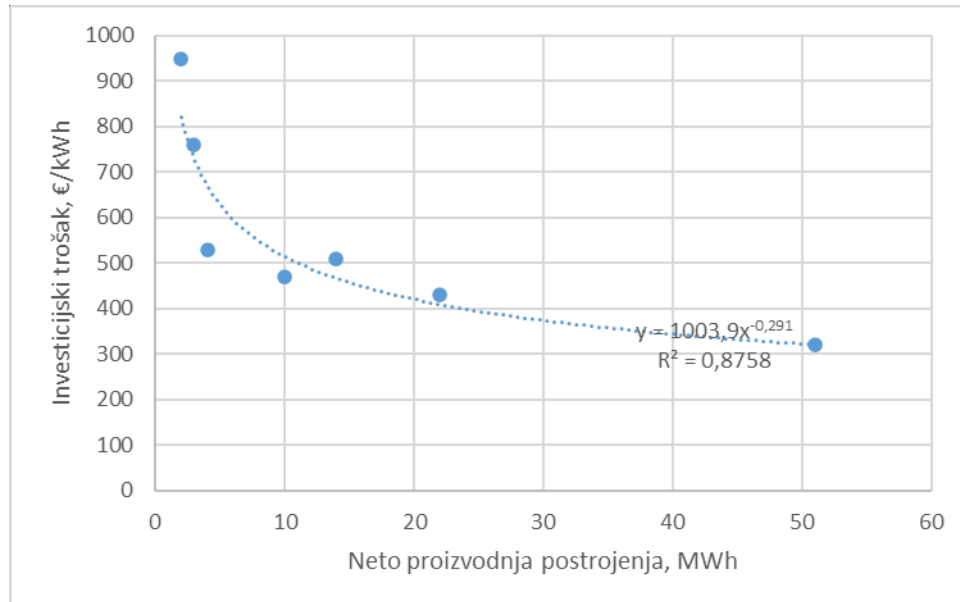
Slika 16. prikazuje ovisnost investicijskog troška o godišnjem kapacitetu postrojenja koji termičkim isplinjavanjem obrađuju otpad te čiji je proizvod isključivo sintetski plin. Funkcijska ovisnost koja povezuje prikupljene podatke o investicijskim troškovima po godišnjem kapacitetu postrojenja prikazuje da povećanje godišnjeg instaliranog kapaciteta postrojenja smanjuje potrebne investicijske troškove.

Usred nedovoljnog broja podataka o investicijskim troškovima postrojenja koja proizvode sintetski plin (uglavnom su u izvorima navedeni podaci za postrojenja s naknadnom transformacijom sintetskog plina te stoga i s drugim krajnjim produktom poput električne energije i etanola), od investicijskih troškova postrojenja koja proizvode električnu energiju iz sintetskog plina oduzimao se pretpostavljeni iznos investicijskog troška za plinsku turbinu pomoću koje se dobiva električna energija. Korišteni podaci uzeti su iz Studije o cijenama opreme iz energetskog sektora u SAD-u autora Pauschert D. [72]. Pri izračunu u obzir su uzete inflacija i valuta. Slika 17. prikazuje funkcijsku ovisnost (1) dobivenu iz dostupnih podataka.

Stoga je za postrojenje P3 iz proizvedene količine električne energije i godišnjeg kapaciteta postrojenja pretpostavljeno je da neto proizvodnja postrojenja iznosi 5 MWh. Investicijski troškovi za plinsku turbinu ovog postrojenja (728,6 €/kWh odnosno 3.643.118 €) oduzeti su od ukupnih investicijskih troškova postrojenja za termičko isplinjavanje otpada čiji je glavni produkt električna energije (34.499.966 €). Dakle, investicijski trošak za postrojenje koje ne prerađuje dobiveni sintetski plin iznosi 30.856.848 € ili 998 €/TPG. Isti postupak proveo se za postrojenje P23 (koje je inačica postrojenja P19 za koju su navedeni investicijski podaci i godišnji kapacitet). Za plinsku turbinu od 30 MWh uzima se investicijski trošak od 435,6 €/kWh, odnosno 12.977.256

€. Kada postrojenje P23 ne bi daljnje prerađivalo dobiveni sintetski plin, investicija bi iznosila 725 €/TPG.

$$c_{inv,PT} = 1.003,9 \cdot x^{-0,291} \quad (1)$$



Slika 17. Ovisnost investicijskog troška za plinske turbine različitih kapaciteta (72)

Sličnim postupkom, kako bi se dobila vrijednost investicijskog troška za postrojenje za isplinjavanje bez naknadnih transformacija, od investicijskog troška za postrojenja koja iz sintetskog plina proizvode etanol oduzeo se investicijski trošak za postrojenje koje proizvodi etanol u iznosu od 654,2 €/m³ [73]. Ovaj postupak je primijenjen za postrojenja P1 i P7 te su dobiveni investicijski troškovi u iznosu od 1.391 €/kWh i 1.160 €/kWh.

5. Pos – Plast d.o.o.

Pos – Plast d.o.o. poduzeće je iz Vrbovca u Republici Hrvatskoj koje je započelo s radom 1990. godine. Poduzeće se u početku bavilo brizganjem proizvoda od plastike te nakon stjecanja iskustva rada s različitim materijalima djelatnost je promijenjena u reciklažu plastičnih proizvoda. Pos-Plast danas se bavi recikliranjem plastike, proizvodnjom mljevenih i granuliranih materijala pogodnih za razne namjene plastičarske industrije, prodajom originalnih materijala te zbrinjavanjem neopasnog otpada u skladu s pravilima struke i važećim pravilima. Poduzeće posjeduje sve potrebne dozvole za gospodarenje neopasnim otpadom te je registrirana za prijevoz, posredništvo, trgovinu, uvoz i izvoz. Slika 18. prikazuje primjer granuliranog materijala kojeg proizvodi poduzeće Pos – Plast d.o.o. [15] [16].

Poduzeće Pos – Plast d.o.o. procesima R3, R12 i R13 oporabljuje plastični otpad [18]. Prema Agenciji za zaštitu okoliša to su sljedeći postupci uporabe otpada [19]:

- R3 – Recikliranje/obnavljanje otpadnih organskih tvari koje se ne koriste kao otapala (uključujući kompostiranje i druge procese biološke pretvorbe);
- R12 – Mij enjeje otpada radi primjene bilo kojeg od postupaka uporabe (R1-R11);
- R13 – Skladištenje otpada prije bilo kojeg od postupaka uporabe R1 do R12 (osim privremenog skladištenja na mjestu nastanka, prije skupljanja).



Slika 18. Primjer granuliranog materijala dobivenog obradom u Pos – Plast-u [16]

Postupak gospodarenja neopasnim otpadom poduzeća Pos – Plast d.o.o. započinje prikupljanjem otpada. Sakupljanje neopasnog plastičnog otpada obavlja se po pozivu, vozilom koje je opremljeno tako da je onemogućeno rasipanje otpada te širenje buke, prašine i mirisa. Neopasni plastični otpad preuzimaju zaposlenici poduzeća na ulazu u objekt uz prateću dokumentaciju te obavljaju vizualni pregled dopremljenog otpada. Vizualnim pregledom osigurava se podudarnost preuzetog otpada s odgovarajućom pratećom dokumentacijom. Poduzeće godišnje preuzima oko 100.000 tona neopasnog plastičnog otpada. Nakon prihvata otpad se razvrstava prema vrstama i brojevima te se skladišti u posebnom prostoru namijenjenom za prihvata i skladištenje neopasnog plastičnog otpada (postupak R13). Zatim se postupkom R12 odstranjuju nečistoće (postupci deambalažiranja, sortiranja te izdvajanja nečistoća). 30.000 tona neopasnog plastičnog otpada prolazi kroz ove procese. Sljedeći je postupak oporabe R3, odnosno obrada/recikliranje otpadne plastike. Sortirani i očišćeni neopasni plastični otpad mehanički se obrađuje uređajima i opremom – usitnjavanjem (mljevenjem) u specijaliziranim mlinovima dobiva se usitnjena plastika koja se koristi kao sirovina za proizvodnju. Plastika se prvo transportira do strojeva koji ju obrađuju (usitnjavanje, mljevenje, rezanje). Veličina na koju se plastika usitnjava ovisi o zahtjevima kupaca, tj. tržišta. Granuliranje ekstruzijom usitnjene plastike (prolazi kroz cijevi u kojima se topi, kroz sita kako bi se odstranile nečistoće te se ponovno reže u granule) obavlja se prema potrebi. 10.000 tona neopasnog plastičnog otpada godišnje prolazi proces mehaničke obrade. Proizvod dobiven nakon mehaničke obrade (granulati plastike) skladišti se u vrećama na paletama u otvorenom skladištu ili se preša i balira na paletama [17].

Uz granulate plastike mehaničkom obradom iz otpadne plastike dobiva se i frakcija koja se ne može razvrstati u dovoljno čisti proizvod. Stoga se razmatra drugi način oporabe te otpadne frakcije, primjerice procesom isplinjavanja. Sljedeće poglavlje posvećeno je opisu njenog sastava zbog njegovog utjecaja na kvalitetu produkta takvog procesa.

5.1 Sastav industrijskog plastičnog otpada

Otpadna plastika koja se ne može mehanički obraditi u Pos-Plast-u d.o.o. analizirana je pomoću FTIR analize (Slika 19. prikazuje uzorke otpada koji su analizirani) te je njen sastav prikazan u Tablici 12.

FTIR (skraćeno od infracrvena spektroskopija s Fourierovom transformacijom) analiza ili FTIR spektroskopija, analitička je metoda ispitivanja koja se koristi za identifikaciju organskih, polimernih i u nekim slučajevima anorganskih materijala odnosno za analizu sastava proizvoda.

Metoda analize sastava proizvoda s FTIR-om koristi infracrveno svjetlo za skeniranje testnih uzoraka i promatranje njihovih kemijskih svojstava [20].



Slika 19. Uzorci korišteni u FTIR analizi otpada [17]

Tablica 12. Sastav otpada dobiven pomoću FTIR analize [17]

| Materijal | Masa (g) | 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 | 91,4004 | 100,00 |

PET i PP zajedno čine 48,07% mase uzorka otpadne frakcije odnosno skoro 50%, a uz PC i ABS čine skoro 90% uzorka. U uzorku se nalaze još polimerni materijali CPE, PE, EVOH, EAA, PA te aluminij i celuloza.

U nastavku teksta slijedi opis polimernih materijala koji se nalaze u uzorku, mogu se upotrijebiti kao sirovina u procesu isplinjavanja, a čija svojstva i primjena nisu navedeni u Poglavlju 2.

- Akrlonitril butadien stiren, ABS

Akrlonitril butadien stiren (ABS), $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$, je termoplastični polimer koji se uobičajeno koristi u procesu injekcijskog prešanja te se koristi u širokom rasponu industrija. Često se koristi zbog niske cijene proizvodnje i lake izrade. Povoljna svojstva ABS-a također uključuju otpornost na udarce, kemijska otpornost te je dobar električni izolator. ABS nastaje polimerizacijom stirena i akrlonitrila u prisutnosti polibutadiena. Mješavina tih materijala i polimera daje ABS-u bolja svojstva (tvrdoća, žilavost, sjaj te svojstva otpornosti) u odnosu na čisti polistiren. Nedostatci ABS-a uključuju nisku otpornost na otapala, lošu otpornost na utjecaj vremenskih prilika, ispušta štetne tvari kada je spaljen, ograničenost u primjeni u prehrambenoj industriji te viša cijena od PS i PE. Primjeri proizvoda koji se proizvode od ABS-a: LEGO kocke, tipke na tipkovnici, mali kućanski aparati, instrumenti, itd. [21].

- Etilen-(akrlna kiselina), EAA

Etilen-(akrlna kiselina) (EAA), $(CH_2CH_2)_n [CH_2CH(CO_2H)]_m$, je kopolimer etilena i akrlne kiseline u obliku bezbojne tekućine koji se lako obrađuje te ima odlična vezivna i brtvena svojstva uz visok stupanj tvrdoće i žilavosti te dobru otpornost na utjecaj vremenskih prilika. Koristi se kao bazni polimer u ljepilima i brtvama, za izradu filma, puhanog filma, ambalažu, ambalažu za zamrznutu hranu, filma za staklenike, filma za vakuumiranje, itd. [22] [23].

- Etilen/vinil-alkohol, EVOH

Etilen/vinil-alkohol (EVOH), $(C_2H_4O-C_2H_4)_n$, je kopolimer etilena i vinil-alkohola. Savitljiv je, proziran te otporan na ugljikovodike, ulja i organska otapala. Npropustan za plinove poput kisika, dušika i ugljikovog dioksida EVOH je prikladan za pakiranje hrane, lijekova, kozmetike i drugih kvarljivih proizvoda. Nedostatak EVOH-a je gubitak svojstva nepropusnosti za plinove pri utjecaju vlage. Upravo zbog tog se najčešće koristi u višeslojnim koekstrudiranim filmovima zajedno s HDPE-om, PP-om i PET-om koji imaju bolju otpornost na utjecaj vlage [24].

- Klorirani polietilen, CPE

Klorirani polietilen (CPE) dobiva se reakcijom kloriranja HDPE polietilena, djelovanjem klora na polietilen, mehanizmom slobodnih radikala uz katalitičko djelovanje UV svjetla ili inicijatora. Sadržaj klora iznosi od 25% do 45%. CPE ima vrlo dobru otpornost na ozon, oksidaciju, abraziju, alkohole te lužine i kiseline, dobru termičku stabilnost te slabo gorenje (zbog prisustva klora). Nedostatak CPE-a je slaba otpornost na aromatska otapala [25]. Proizvodi od CPE-a koriste se za prevlake za žice i kablove, pri izradi krovova, izradi cijevi za automobilsku i druge industrije, pri kalupljenju ubrizgavanjem, ekstruziji, itd. [26].

- Poliamid, PA

Poliamidi (PA) skupina su kristalastih, uglavnom plastomernih materijala kojima ponavljane jedinice sadrže alifatske ili aromatske segmente povezane amidnim vezama ($-\text{CO}-\text{NH}-$) [27]. Alifatski poliamidi visokog su tališta, dobre vlačne čvrstoće, udarne žilavosti i otpornosti prema otapalima, abraziji i umoru materijala. Alifatski poliamidi prvi su sintetski polimeri koji su se primjenjivali kao tekstilna vlakna, a među najvažnijim su vlaknima i danas – primjer poliamidnog vlakna je najlon, a poliamidna vlakna se koriste za izradu čarapa, rublja, ribarskih mreža, prostirača, itd. Aromatski poliamidi poznati su i pod imenom aramidi. Oni se također upotrebljavaju u obliku vlakana, a neka njihova svojstva su otpornost prema visokim temperaturama i gorenju te specifična mehanička svojstva koja omogućuju zaštitu od pušćanih zrna i krhotina projektila. Primjer aromatskog poliamida je kevlar [28].

- Polikarbonat, PC

Polikarbonati (PC), $\text{C}_{15}\text{H}_{16}\text{O}_2$, su linearni poliesteri ugljične kiseline [17]. Polikarbonati su čvrsti, žilavi materijali koji mogu biti prozirni. Lako se obrađuju i oblikuju te se primjenjuju u razne svrhe. Koriste se za izradu elektroničkih, automobilskih i zrakoplovnih komponenti, kao građevinski materijal, izradu predmeta za pohranu podataka (DVD, CD), itd. [29].

5.2 Ponašanje prisutnih polimernih materijala pri isplinjavanju

Industrijski plastični otpad poduzeća Pos – Plast d.o.o. nije homogen nego se sastoji od više različitih vrsta polimernih materijala. Ti polimerni materijali imaju različit kemijski sastav različitim kemijskim i fizičkim svojstvima te se sukladno tomu različito ponašaju pri isplinjavanju. U nastavku je prema dostupnoj literaturi opisano ponašanje polimernih materijala tijekom obrade procesom isplinjavanja te su navedeni produkti takvih procesa i njihova svojstva.

- Polietilen, PE

Istraživanje koje su proveli Erkiaga A. i sur. pokazalo je da isplinjavanje polietilena s vodenom parom pri temperaturama od 850 do 900 °C prikladno za visoke udjele vodika (vodik ima najveću ogrjevnu vrijednost od svih goriva, $H_g = 141 \text{ kJ/kg}$ [32]) u sintetskom plinu i nizak udio katrana. Kao katalizatori koristili su se $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ i olivin. Učinkovitost konverzije ugljika je 91%, a koncentracija vodika u sintetskom plinu je preko 60%. Udio katrana je 6% te se on uglavnom sastoji od monoaromatika (65-75% benzen). Sintetski plin činio je 94% masenog udjela produkata, ogrjevna vrijednost mu iznosi 17,35 MJ/kg, a sastoji se od 60,3% vodika, 28,2% ugljikovog

monoksida, 7,2% metana, 1% ugljikovog dioksida, 3% etilena i 0,3% ostalih ugljikovodika [30].

Tablica 13. prikazuje rezultate istraživanja.

Tablica 13. Rezultati isplinjavanja polietilena

| PE [30] | | |
|---------------------------|--|-------------------------------|
| Donja ogrjevna vrijednost | 43 | MJ/kg |
| Temperatura | 850-900 | °C |
| Vrijeme | 20 | min |
| Katalizatori | Olivin, γ -Al ₂ O ₃ | |
| Produkti isplinjavanja | | |
| Sintetski plin | 0,295 | Nm ³ /100 g goriva |
| Donja ogrjevna vrijednost | 17,35 | MJ/kg |
| | 94% | maseni udio |
| Sastav sintetskog plina | | |
| H ₂ | CO | CH ₄ |
| 60,30% | 28,20% | 7,20% |
| CO ₂ | C ₂ H ₄ | C _x H _y |
| 1,00% | 3,00% | 0,30% |
| Katran | 6% | maseni udio |

- Polipropilen, PP

Prema V. Wilk i H. Hofbauer produkt isplinjavanja polipropilena s vodenom parom pri temperaturi od 855 °C je sintetski plin donje ogrjevne vrijednosti 27,2 MJ/Nm³, odnosno 38,55 MJ/kg (podaci iz istraživanja u Tablici 14). Razlog za isplinjavanje propilena (poput prethodnog primjera istraživanja isplinjavanja polipropilena) pomoću vodene pare, a ne zrakom ili kisikom je veći udio vodika u sintetskom plinu. Veći udio vodika u sintetskom plinu dovodi do njegove veće ogrjevne vrijednosti. Dostupne su također okvirne vrijednosti sastava sintetskog plina – 40% metan, 33% vodik, etilen 12%, ugljikov dioksid 8%, ugljikov monoksid 5% te ostali plinoviti ugljikovodici 2% [31].

Tablica 14. Rezultati isplinjavanja polipropilena

| PP [31] | | |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Donja ogrjevna vrijednost | 43,419 | MJ/kg |
| Temperatura | 855 | °C |
| Vrijeme | - | min |
| Katalizatori | Olivin | |
| Produkti isplinjavanja | | |
| Sintetski plin | 1 | Nm ³ /kg goriva |
| Donja ogrjevna vrijednost | 27,2 | MJ/Nm ³ |
| Sastav sintetskog plina | | |
| H ₂ | CO | CH ₄ |
| 33,00% | 5,00% | 40,00% |
| CO ₂ | C ₂ H ₄ | C _x H _y |
| 8,00% | 12,00% | 2,00% |

- Poli(etilen-tereftalat), PET

U dostupnoj literaturi nije pronađeno ispitivanje samostalnog isplinjavanja PET materijala s potrebnim podacima pa se u nastavku navode podaci iz istraživanja V. Wilk i H. Hofbauer koji su isplinjavali mješavinu 80% PET i 20% PE materijala pomoću vodene pare. Ako bi se iz dostupnog uzorka iz poduzeća Pos-Plast izuzeli svi materijali osim PET i PE, ostaje nam ukupno 26,35 g materijala. S 23,43 g PET bi zauzeo maseni udio od 88% što otprilike odgovara sastavu uzorka koji je ispitan u navedenom istraživanju.

Prisutnost kisika utječe na ogrjevnu vrijednost PET-a i sintetskog plina koji nastaje njegovim isplinjavanjem. Mješavina PET i PE sadrži gotovo 27% kisika. Povećanjem udjela kisika smanjuje se ogrjevna vrijednost sintetskog plina. Sintetski plin sastoji se od 29% ugljikovog dioksida (usporedno, sintetski plin dobiven isplinjavanjem čistog polietilena u sastavu nije imao ugljikov dioksid [30] 27% vodika, 20% ugljikovog monoksida, 15% metana, 8% etilena i 1% ostalih ugljikovodika. Ogrjevna vrijednost dobivenog plina iznosi 16,4 MJ/Nm³, odnosno 16,19 MJ/kg. Podaci su prikazani u Tablici 15.

Tablica 15. Rezultati isplinjavanja mješavine poli(etilen-tereftalata) i polietilena

| 80% PET, 20% PE [31] | | |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Donja ogrjevna vrijednost | 26,337 | MJ/kg |
| Temperatura | 852 | °C |
| Vrijeme | - | min |
| Katalizatori | Olivin | |
| Produkti isplinjavanja | | |
| Sintetski plin | 1 | Nm ³ /100 g goriva |
| Donja ogrjevna vrijednost | 16,4 | MJ/Nm ³ |
| Sastav sintetskog plina | | |
| H ₂ | CO | CH ₄ |
| 27,00% | 20,00% | 15,00% |
| CO ₂ | C ₂ H ₄ | C _x H _y |
| 29,00% | 8,00% | 1,00% |

- Akrlonitril butadien stiren, ABS

Istraživanje koje su proveli I. Nedjalkov i sur. ispitivalo je udjele katrana i čađe koji nastaju isplinjavanjem akrilonitril butadien stirena pri temperaturama od 700 do 900 °C i atmosferskom tlaku. Iz dostupnih rezultata može se zaključiti da udio sintetskog plina koji nastaje ovim procesom kontinuirano raste zajedno s porastom temperature do otprilike 80% na 900 °C [34].

- Polikarbonat, PC

U sklopu istog istraživanja kojeg su proveli I. Nedjalkov i sur. ispitivali su se udjeli katrana i čađe nastali isplinjavanjem polikarbonata pri temperaturama od 700 do 900 °C i atmosferskom tlaku. Kao i kod ABS-a, porastom temperature raste udio sintetskog plina raste do otprilike 85% na 900 °C [34].

Drugo istraživanje koje su izveli B. Bai i sur. pokazalo je da isplinjavanje polikarbonata pri tlaku od 230 bar da stopa konverzije ugljika i vodika dostiže svoj maksimum od 59,1% pri temperaturi od 800 °C. Sastav sintetskog plina pri 800 °C je 35% CO₂, 32% H₂, 29% CH₄ i 4% CO. Drugi dio ovog istraživanja pokazao je da povišenje temperature ima veći utjecaj na uspješnost procesa isplinjavanja od vremena zadržavanja goriva u reaktoru. U prvih 5 minuta procesa reakcije dekompozicije polikarbonata su najintenzivnije te u prvih 10 minuta procesa dolazi do najznačajnijih promjena u sastavu sintetskog plina. Produljenjem procesa nakon 10 minuta uočava se smanjenje količine CO, porast količine H₂ te blagi porast CO₂ te je primijećeno da dulje vrijeme trajanja procesa promiče pretvorbu tekućeg produkta u plinovite i krute produkte [35].

- Poliamid, PA

Pregledom dostupne literature nije pronađeno dovoljno podataka o obradi materijala od poliamida procesom isplinjavanja i produktima takvog procesa te se u sklopu ovog rada ne može zaključiti jesu li ovi materijali prikladni za ovaj oblik obrade. Shodno tomu, poliamid se neće uzeti u obzir, tj. neće biti dio sirovine koja ulazi u proces obrade plastičnog otpada isplinjavanjem.

- Etilen-(akrilna kiselina), EAA i Etilen/vinil-alkohol, EVOH

U dostupnoj literaturi nije pronađeno dovoljno podataka o procesu isplinjavanja etilen-(akrilne kiseline) i etilen/vinil-alkohola i produktima takvih procesa te se ne može zaključiti jesu li materijali od EAA-e i EVOH-a prikladni za ovaj oblik obrade. U daljnjem proračunu postrojenja EAA i EVOH neće biti uzeti u obzir, tj. neće biti dio sirovine koja ulazi u proces isplinjavanja.

- Klorinirani polietilen, CPE

Iako je u poglavlju 4. pokazano da postoje postrojenja koja isplinjavaju PVC otpad u dostupnoj literaturi nema podataka o isplinjavanju kloriniranog polietilena te stoga on, poput PA-a, EAA-a i EVOH-a neće biti dio sirovine koja ulazi u proces obrade plastičnog otpada isplinjavanjem. Može se pretpostaviti sličnost između obrade PVC-a i CPE-a pošto oba materijala u sebi sadrže klor. Prisutnost klora poskupljuje proces jer zahtjeva ispiranje nastalog plina natrijevim hidroksidom kako bi se izbjeglo nastajanje klorovodika koji uzrokuje koroziju materijala reaktora [12].

5.3 Sastav industrijskog plastičnog otpada za isplinjavanje

Nakon analize polimernih materijala koji se nalaze u sastavu industrijskog plastičnog otpada poduzeća Pos – Plast d.o.o., za proces isplinjavanja odabrani su polietilen, polipropilen, poli(etilen-tereftalat), akrilonitril butadien stiren i polikarbonat. Odabrani materijal čini 91,86% masenog udjela plastičnog otpada čiji je sastav utvrđen FTIR analizom.

Tablica 16. prikazuje sastav plastičnog otpada koji ulazi u proces isplinjavanja, tj. sastav ulazne sirovine.

Tablica 16. Sastav ulazne sirovine procesa isplinjavanja

| Materijal | Udio (%) |
|-----------|----------|
| PC | 23,97163 |
| ABS | 20,51733 |
| PET | 25,51022 |
| PP | 26,82047 |
| PE | 3,180336 |

Razlog izostavljanja kloriniranog polietilena, poliamida, etilen-(akrilne kiseline) i etilen/vinil-alkohola u procesu je nedostatak podataka o ponašanju ovih materijala pri isplinjavanju i produkata koji nastaju, međutim prema literaturi može se zaključiti da je proces isplinjavanja prigodan za obradu skoro svih vrsta otpadnog materijala, pogotovo plastičnog [12].

6. Tehno-ekonomska analiza odgovarajućeg postrojenja za isplinjavanje

Ostatni industrijski plastični otpad kojeg preuzima poduzeće Pos – Plast d.o.o. potrebno je zbrinuti na odgovarajući način. Mogućnost je izvedba postrojenja isplinjavanje. Produkti takvog postrojenja mogli bi se prodati na tržištu te bi se na taj način plastičnom otpadu dodijelila vrijednost koja bi odlaganjem bila izgubljena. Za odgovarajuće postrojenje odabrati će se tehnički parametri prema vrijednostima postojećih i pretpostavljenih postrojenja slične ulazne sirovine (obrađuju isključivo polimerne materijale). Korišteni tehnički parametri za postrojenja koja isplinjavaju sve vrste otpada navedeni su u Tablica 1.3 u Prilogu I., a parametri koji se odnose na postrojenja koja isplinjavaju isključivo polimerne materijale sažeti su u Poglavlju 4. za lakši pregled. Ekonomski parametri odabrati će se prema podacima za postojeća postrojenja koji su navedeni u Poglavlju 4. te prema dostupnim izvorima u kojima su navedeni traženi podaci.

Prema dobivenim podacima Pos – Plast d.o.o. trenutačno raspolaže s otprilike 2 tone dnevno ulazne sirovine za proces isplinjavanja tj. prikladnog otpadnog industrijskog plastičnog materijala [17]. U svrhu doprinosa kružnom gospodarstvu Europske unije, Republika Hrvatska obvezala se povećati udio odvojeno prikupljenog otpada te smanjiti udio otpada koji završi na odlagalištima. Naknada za odlaganje otpada mjera je kojom bi se poticalo smanjenje količina otpada koja se odlaže na odlagalište [46]. Takva mjera bila bi poticaj za pronalazak prikladnijeg načina zbrinjavanja proizvedenog otpada i očekuje se njeno skoro uvođenje. Stoga se u narednom periodu očekuje povećanje količina otpadne plastike koja će se umjesto odlaganjem zbrinjavati uporabom. Vlasnicima postrojenja za uporabu otpada poput postrojenja za isplinjavanje u prilog bi išlo uvođenje spomenute naknade za odlaganje jer bi proizvođačima otpada plaćanje naknade za zbrinjavanje otpada (eng. „*gate fee*“) postalo povoljnije nego njegovo odlaganje. Posljedica bi bila lakša nabava većih količina otpada, manja zabrinutost oko nabave sirovine potrebne za održavanje pogona postrojenja te dodatni prihod koji bi utjecao na isplativost postrojenja.

Prema usmenom navodu direktora poduzeća Pos – Plast d.o.o., postoji mogućnost povećanja raspoložive količine ostatnog industrijskog plastičnog otpada (koji u ovom slučaju predstavlja i sirovinu za isplinjavanje) u kratkom roku do otprilike 10 tona po danu.

Parametri postrojenja odrediti će se prema podacima za postojeća postrojenja za isplinjavanje, uz pomoć literature koja opisuje postupke isplinjavanja pojedinih polimernih materijala i/ili njihovih

mješavina te „kriterija isključivanja“ kako bi se isključili podaci koji veličinom odskaku od ostalih u svrhu smanjivanja greške.

6.1 Opis postrojenja

Proces unutar modeliranog postrojenja je termičko isplinjavanje u fluidiziranom sloju uz mješavinu zraka i vodene pare kao agensa za isplinjavanje. Termičko isplinjavanje jeftiniji je proces od isplinjavanja s plazmom, a isplinjavanje u fluidiziranom sloju odabrano je naspram isplinjavanja u fiksnom sloju zbog manje potrebe za čišćenjem reaktora od krutih i tekućih nusprodukata procesa. Mješavina zraka i vodene pare odabrana je kao agens za isplinjavanje jer je izvedba s njom jeftinija od čistog kisika, a ima bolji stupanj konverzije ugljika i vodika nego upotreba zraka. Bolji stupanj konverzije znači bolje odvijanje procesa i veći stupanj iskorištavanja sirovine.

Ostatni industrijski plastični otpad koji je predviđen za isplinjavanje prvo se odvaja od drugog otpada te prolazi kroz proces usitnjavanja. Zatim preko pužnog transportera ulazi u reaktor. Istovremeno u reaktor se upuhuju suhozasićena vodena para i zrak, pri atmosferskom tlaku. Pomoću kontrolnog sustava upravlja se parametrima poput vremena boravka plastičnog otpada u reaktoru i temperature reaktora.

Proizvedeni sintetički plin na mjestu će se iskorištavati za proizvodnju električne energije preko plinske turbine i generatora. Plinska turbina će također osiguravati toplinsku energiju potrebnu za proizvodnju vodene pare i održavanje stalne temperature procesa u reaktoru. Prije ulaska u plinsku turbinu, sintetski plin prolazi kroz filter koji skuplja štetne plinove i čestice. Pri pokretanju procesa koristi se prirodni plin s kojim se zagrijava reaktor na temperaturu od 850 °C.

Reaktor se periodički čisti kako bi se uklonili kruti i tekući ostatci procesa isplinjavanja te se oni zbrinjavaju poput neopasnog komunalnog otpada na lokalnom odlagalištu. Električna i toplinska energija koje se proizvode iz sintetskog plina prvenstveno se troše za potrebe samog postrojenja, a ostatak se prodaje na tržištu.

6.1.1 Tehnički parametri postrojenja

Postrojenje bi radilo kontinuirano sedam dana u tjednu, 24 sata dnevno, a njegov dnevni kapacitet bio bi prethodno navedenih 10 tona. Postrojenje bi radilo 339 dana u godini, a ostala 26 predviđena

su za remont prema srednjoj vrijednosti raspoloživosti postojećih i pretpostavljenih postrojenja u prema Slici 15. u Poglavlju 4.2.1. U satima godišnje radno vrijeme iznosi 8.136 sati, a godišnji kapacitet 3.390 tona. Pretpostavlja se da potrebna površina na području izvan grada za smještaj postrojenja za isplinjavanje, potrebne opreme i plinske turbine za proizvodnju električne i toplinske energije te trafostanice iznosi 1000 m².

Vijek trajanja postrojenja je pretpostavljen i iznosi 25 godina.

Izračun broja radnih sati u godini, godišnjeg kapaciteta i raspoloživost postrojenja prikazan je sljedećim jednadžbama:

$$n = 24 h \cdot 339 = 8.136 \frac{h}{god} \quad (2)$$

$$TPG \text{ (tona po godini)} = 10 * 339 = 3390 \frac{t}{god} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{8.136 \frac{h}{god}}{8.760 \frac{h}{god}} = 0,9288 = 92,88\% \quad (4)$$

Gdje su:

n – broj radnih sati u godini, $[\frac{h}{god}]$;

TPG – godišnji kapacitet postrojenja, $[\frac{t}{god}]$;

τ – raspoloživost postrojenja, [%].

6.1.2 Zahtjevi za ulaznu sirovinu procesa

U prethodnom poglavlju analizirani su polimerni materijali koji se nalaze u uzorku neopasnog plastičnog otpada. Za upotrebu u procesu isplinjavanja su pogodni polipropilen, poli(etilen-tereftalat), polikarbonat, akrilonitril butadien stiren i polietilen. Sastav i donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina koji nastaje isplinjavanjem ovisi o polimernom materijalu koji ulazi u proces. Različiti polimerni materijali imaju i različit sastav, a on utječe na sastav sintetskog plina. Donja ogrjevna vrijednost dobiva se iz sastava sintetskog plina.

Tablica 17. Sastav ulazne sirovine

| Sastav ulazne sirovine |
|--|
| PP (26,82%) + PET (25,51) + PC (23,97%) + ABS(20,52%) + PE (3,18%) |

U sastavu sintetskog plina pojavljuju se ugljikov dioksid, ugljikov monoksid, vodik, metan i drugi ugljikovodici. Ukoliko je u sastavu polimera prisutan klor (npr. PVC), njegovim isplinjavanjem nastaje klorovodik. Poželjno je da polimerni materijal sadrži što veći udio vodika u svojem sastavu jer vodik kao gorivo ima najveću ogrjevnu vrijednost ($H_g = 141 \text{ MJ/kg}$ [32]), a ugljikov dioksid treba izbjegavati pošto je on potpuno oksidiran produkt i ne pridodaje ogrjevnoj vrijednosti sintetskog plina.

Prema prikupljenim podacima iz pojedinih istraživanja, sastav i ogrjevna vrijednost sintetskog plina dobivenog pojedinačnim isplinjavanjem navedenih polimernih materijala ili njihovih mješavina iznose:

Tablica 18. Sastav sintetskog plina nastalog isplinjavanjem pojedinih polimernih materijala

| Vrsta polimera | Sastav sintetskog plina | Izvor |
|----------------------|--|-------|
| PP | CH_4 (40%) + H_2 (33%) + C_2H_4 (12%) + CO_2 (8%) + CO (5%) + C_xH_y (2%) | [31] |
| PET (80%) + PE (20%) | CO_2 (29%) + H_2 (27%) + CO (20%) + CH_4 (15%) + C_2H_4 (8%) + C_xH_y (1%) | [31] |
| PE | H_2 (60,30%) + CO (28,20%) + CH_4 (7,20%) | [30] |
| PC | CO_2 (35%) + H_2 (32%) + CH_4 (29%) + CO (4%) | [35] |

Tablica 19. Donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina nastalog isplinjavanjem pojedinih polimernih materijala

| Vrsta polimera | Donja ogrjevna vrijednost | Plin | Temperatura isplinjavanja | Izvor |
|----------------------|---------------------------|-------------|---------------------------|-------|
| PP | 38,55 MJ/kg | vodena para | 855 °C | [31] |
| PET (80%) + PE (20%) | 16,19 MJ/kg | vodena para | 852 °C | [31] |
| PE | 17,35 MJ/kg | vodena para | 850 - 900°C | [30] |
| PC | 14,7 MJ/kg | - | 800 °C | [35] |

Prilikom izračuna uočeno je da donja ogrjevna vrijednost koja se dobije uvrštavanjem sastava plina i donje ogrjevne vrijednosti plinova koji tvore sintetski plin dobiven isplinjavanjem polietilena ne odgovara donjoj ogrjevnoj vrijednosti navedenoj kao rezultat istraživanja. Izračunom se za PE dobije vrijednost od 27,5 MJ/kg, a u izvoru je navedena vrijednost od 17,35 MJ/kg. Donje ogrjevne vrijednosti PP i mješavine 80% PET i 20% PE dobivene izračunom (37,9 MJ/kg i 15,9 MJ/kg) razlikuju se za otprilike 2% od vrijednosti navedenih u Tablici 19. Donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina dobivenog isplinjavanjem čistog polikarbonata dobivena izračunom iznosi 14,7 MJ/kg prema njegovom sastavu.

Istraživanjem koje je poslužilo kao izvor podataka za isplinjavanje akrilonitril butadien stirena (ABS) naveden je temperaturni raspon pri kojem se odvijao proces (700 – 900 °C) te da pri 900 °C udio sintetskog plina u produktu iznosi 80% [34].

Osim za ABS, maseni udio sintetskog plina u produktu naveden je za polipropilen (PP) i on iznosi 94% pri temperaturi od 855 °C [30]. Istraživanje opisano u Poglavlju 3.6 pokazuje da se udio plinovitih produkata povećava s porastom temperature isplinjavanja te dostiže svoj maksimum oko 900 °C nakon čega se bitno ne povećava te bi se moglo reći da je pri otprilike toj temperaturi proces isplinjavanja završen.

Najveće udjele u sintetskom plinu različitih polimernih materijala čine vodik, metan, ugljikov dioksid i ugljikov monoksid. Prema udjelima ulaznih sirovina i sastavima izlaznih plinova pretpostavit će se sastav sintetskog plina nastao isplinjavanjem ulazne sirovine sastoji od 30% vodika, 25% metana, 24% ugljikovog dioksida, 10% ugljikovog monoksida, 1% C_xH_y (ostali ugljikovodici, prvenstveno C_2H_4 - etilen) i 10% dušika koji je prisutan u ABS-u i zraku koji se uz vodenu paru koristi kao agens za isplinjavanje. Prema tome izračunata donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina iznosi $H_{d,SP} = 14,95$ MJ/kg. Pri ovom izračunu za tehno-ekonomsku analizu, pretpostavljeno je da nema dodatnih međureakcija.

Pretpostavlja se da 80% ukupne mase ulazne sirovine prelazi u plinovito stanje u reaktoru. Ostalih 20% čine kruti i tekući nusprodukti (katran, pepeo, šljaka, čađa).

U reaktor ulazi osušeni plastični otpad koji je usitnjen pomoću postojećih specijaliziranih mlinova i usitnjivača (šredera) koji se koriste u Pos – Plast d.o.o. Poželjna veličina sirovine je promjer od 0,5 do 2 cm kako bi se poboljšao proces izmjene topline u reaktoru i poboljšao proces isplinjavanja.

6.1.3 Tehnički parametri procesa

Tehnički parametri procesa navedeni u ovom poglavlju dobiveni su izračunom srednjih vrijednosti tehničkih parametara postojećih i pretpostavljenih postrojenja za isplinjavanje isključivo polimernih materijala prema Poglavlju 4. i Tablica 1.3 u Prilogu 1. te pomoću podataka dobivenih istraživanjem kojeg su proveli D. Saebea i sur. [33], opisanog u Poglavlju 3.6

Potrebna električna energija za pokretanje pumpi, strojeva za predobradu sirovine (mlinovi, šrederi), kontrolnog sustava i raznih motora iznosi 398,98 kWh po toni otpada. Kao agens za isplinjavanje koristiti će se mješavina zraka i vodene pare. Prema srednjim vrijednostima podataka za postojeća postrojenja po suhoj toni otpada uzet će se 548,5 kg vodene pare. Zbog nedostatka

podataka za zrak, sličnosti agensa i „kriterija isključivanja“ za maseni protok zraka uzeti će se srednja vrijednost potrebnog kisika koji se koristi kao agens za isplinjavanje u postojećim postrojenjima. Dakle u proces ulazi 1.079,47 kg zraka po toni suhog otpada. Dnevno je potrebno 5,485 tona vode (odnosno 5.485 l vode u danu, odnosno 1.859,4 m³ vode godišnje) i 10,8 tona zraka.

Temperatura pri kojem će se proces odvijati, prema osrednjenim vrijednostima postojećih postrojenja i istraživanjima koja opisuju proces isplinjavanja polimernih materijala, iznosi 850 °C, a vodena para ulaziti će u reaktor pri 100 °C. Isplinjavanje se odvija pri atmosferskom tlaku kako bi se smanjili zahtjevi za materijal od kojeg se izrađuju komponente postrojenja koje dolaze u kontakt sa sirovinom i sintetskim plinom.

6.1.4 Potrebna toplinska energija

Potrebna toplota za zagrijavanje 10 tona sirovine s temperature okoliša na temperaturu od 850 °C izračunati će se pomoću specifičnih toplinskih kapaciteta (c_p) prisutne plastike.

Tablica 20. Specifični toplinski kapaciteti polimernih materijala

| Materijal | Specifični toplinski kapacitet (c_p) [J/kg K] | Izvor |
|-----------|--|-------|
| PP | 1920 | [65] |
| PET | 1250 | [65] |
| PC | 1170 - 1250 | [65] |
| ABS | 2001 | [66] |
| PE | 1300 - 2400 | [67] |

$$\begin{aligned}
 c_p &= 26,82\% \cdot c_{p,PP} + 25,51\% \cdot c_{p,PET} + 23,97\% \cdot c_{p,PC} + 20,52\% \cdot c_{p,ABS} \\
 &\quad + 3,18\% \cdot c_{p,PE} \\
 c_p &= 26,82\% \cdot 1,92 \frac{kJ}{kgK} + 25,51\% \cdot 1,250 \frac{kJ}{kgK} + 23,97\% \cdot \frac{1,17 + 1,25}{2} \frac{kJ}{kgK} \\
 &\quad + 20,52\% \cdot 2,001 \frac{kJ}{kgK} + 3,18\% \cdot \frac{1,3 + 2,4}{2} \frac{kJ}{kgK} = 1,5933 \frac{kJ}{kgK}
 \end{aligned} \quad (5)$$

Gdje su:

c_p – specifični toplinski kapacitet ulazne sirovine, [$\frac{kJ}{kgK}$];

$c_{p,PP}$, $c_{p,PET}$, $c_{p,PC}$, $c_{p,ABS}$, $c_{p,PE}$ – specifični toplinski kapacitet pripadajućih polimernih materijala, [$\frac{kJ}{kgK}$].

Prema izračunu slijedi da specifični toplinski kapacitet ulazne sirovine iznosi 1,5933 kJ/(kgK).

Toplinska energija potrebna za proces zagrijavanja ulazne sirovine:

$$E_s = c_p \cdot q_{m,s} \cdot \Delta T = 1,5933 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 10.000 \frac{\text{kg}}{\text{dan}} \cdot (850 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$E_s = 13.224.390 \frac{\text{kJ}}{\text{dan}} = 3.673,44 \frac{\text{kWh}}{\text{dan}} = 3,67344 \frac{\text{MWh}}{\text{dan}} = 1.245,3 \frac{\text{MWh}}{\text{god}} \quad (6)$$

Gdje su:

E_s – toplinska energija potrebna za zagrijavanje sirovine, $\frac{\text{MWh}}{\text{god}}$;

$q_{m,s}$ – maseni protok sirovine u danu, $\frac{\text{kg}}{\text{dan}}$;

ΔT – temperaturna razlika.

Prema proračunu, za 10 tona sirovine specifičnog toplinskog kapaciteta 1,5933 kJ/(kg K) potrebno je dovesti 3,67344 kWh dnevno, odnosno 1.245,3 MWh godišnje.

Također je potrebna toplina za isparivanje vode pri atmosferskom tlaku kako bi se dobila suhozasićena para. Podaci korišteni u izračunu preuzeti su iz toplinskih tablica [68].

$$E_{vp,1-2} = q_v \cdot (h_2 - h_1) = 5.485 \frac{\text{kg}}{\text{dan}} \cdot \left(417,436 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 84,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$E_{vp,1-2} = 1.828.841,61 \frac{\text{kJ}}{\text{dan}} = 508 \frac{\text{kWh}}{\text{dan}} = 0,508 \frac{\text{MWh}}{\text{dan}} \quad (7)$$

$$E_{vp,2-3} = q_{v,dan} \cdot r = 5.485 \frac{\text{kg}}{\text{dan}} \cdot 2.256,47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 12.376.738 \frac{\text{kJ}}{\text{dan}}$$

$$E_{vp,2-3} = 3.438 \frac{\text{kWh}}{\text{dan}} = 3,438 \frac{\text{MWh}}{\text{dan}} \quad (8)$$

$$E_{vp} = E_{vp,1-2} + E_{vp,2-3} = 0,508 \frac{\text{MWh}}{\text{dan}} + 3,438 \frac{\text{MWh}}{\text{dan}}$$

$$E_{vp} = 3,946 \frac{\text{MWh}}{\text{dan}} = 1.337,7 \frac{\text{MWh}}{\text{god}} \quad (9)$$

Gdje je:

$E_{vp,1-2}$ – toplinska energija potrebna za zagrijavanje vode od 20 °C do 100 °C, pri atmosferskom tlaku, $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{god}} \right]$;

$E_{vp,2-3}$ – toplinska energija potrebna za isparivanje vode pri temperaturi od 100 °C, pri atmosferskom tlaku, $\left[\frac{MWh}{god}\right]$;

E_{vp} – ukupna toplinska energija koju je potrebno dovesti kako bi se pri atmosferskom tlaku iz vode (20 °C) dobila suhozasićena para, $\left[\frac{MWh}{god}\right]$;

$q_{m,v}$ – dnevni maseni tok vode/vodene pare koja se koristi za proces isplinjavanja, $\left[\frac{kg}{dan}\right]$;

h_1 – specifična entalpija pothlađene vode pri atmosferskom tlaku i temperaturi od 20 °C, $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$;

h_2 – specifična entalpija vrele vode pri atmosferskom tlaku i temperaturi od 100 °C, $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$;

r – specifična toplina isparavanja za vodu pri atmosferskom tlaku i temperaturi od 100 °C, $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$.

Godišnje je potrebno 1.337.692 kWh toplinske energije za isparavanje vode, odnosno 1.337,7 MWh/god.

Sirovinu te agens za isplinjavanje, odnosno mješavinu zraka i vodene pare u reaktoru potrebno zagrijati na 850 °C kako bi se osigurao proces isplinjavanja pri željenim uvjetima.

Za zagrijavanje suhozasićene vodene pare u pregrijanu paru pri temperaturi od 850 °C pri atmosferskom tlaku potrebno je 2,368 MWh dnevno, odnosno 802,89 MWh godišnje prema sljedećem izračunu:

$$E_{vp,reaktor} = q_v \cdot (h_4 - h_3) = 5.485 \frac{kg}{dan} \cdot \left(4.230,05 \frac{kJ}{kg} - 2.675,57 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$E_{vp,reaktor} = 8.526.322,8 \frac{kJ}{dan} = 2.368,42 \frac{kWh}{dan} = 2,368 \frac{MWh}{dan} = 802,89 \frac{MWh}{god} \quad (10)$$

Gdje su:

h_3 – specifična entalpija suhozasićene vodene pare pri atmosferskom tlaku i temperaturi od 100 °C, $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$;

h_4 – specifična entalpija pregrijane vodene pare pri atmosferskom tlaku i temperaturi od 850 °C, $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$;

$E_{vp,reaktor}$ – toplinska energija potrebna za pregrijavanje vodene pare u reaktoru s 100 °C na 850 °C, pri atmosferskom tlaku, $\left[\frac{kJ}{dan}\right]$;

Za zagrijavanje zraka s temperature okoliša od 20 °C na temperaturu od 850 °C potrebno je 2,675 MWh dnevno, odnosno 906,9 MWh/god prema:

$$E_z = c_{p,z} \cdot q_{m,z} \cdot \Delta T = 1,0749 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 10.795 \frac{\text{kg}}{\text{dan}} \cdot (850 \text{ °C} - 20 \text{ °C})$$

$$E_z = 9.630.942,765 \frac{\text{kJ}}{\text{dan}} = 2.675 \frac{\text{kWh}}{\text{dan}} = 2,675 \frac{\text{MWh}}{\text{dan}} = 906,9 \frac{\text{MWh}}{\text{god}} \quad (11)$$

Gdje su:

E_z – toplinska energija potrebna za zagrijavanje zraka s 20 na 850 °C, $\frac{\text{MWh}}{\text{god}}$;

$c_{p,z}$ – specifični toplinski kapacitet zraka za srednju temperaturu zraka (435 °C), iz Toplinskih tablica [68]; $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$;

$q_{m,z}$ – maseni protok zraka u danu, $\frac{\text{kg}}{\text{dan}}$;

ΔT – temperaturna razlika.

$$E_{reaktor} = E_s + E_{vp} + E_{vp,reaktor} + E_z$$

$$E_{reaktor} = 1.245,3 \frac{\text{MWh}}{\text{god}} + 1.337,7 \frac{\text{MWh}}{\text{god}} + 802,9 \frac{\text{MWh}}{\text{god}} + 906,9 \frac{\text{MWh}}{\text{god}} \quad (12)$$

$$E_{reaktor} = 4.292,8 \frac{\text{MWh}}{\text{god}}$$

Gdje je:

$E_{reaktor}$ – toplinska energija koju je potrebno dovesti reaktoru, $[\frac{\text{kWh}}{\text{god}}]$.

Godišnje je potrebno ukupno 4.292,8 MWh toplinske energije za održavanje procesa.

Pri pokretanju procesa za potrebe zagrijavanja reaktora koristi se prirodni plin. Pretpostaviti će se da je za sva pokretanja godišnje vremenski potrebno 24 sata ili jedan dan u godini.

$$E_{reaktor,pokretanje} = E_s + E_{vp} + E_{vp,reaktor} + E_z$$

$$E_{reaktor,pokretanje} = 3,673 \frac{\text{MWh}}{\text{dan}} + 3,946 \frac{\text{MWh}}{\text{dan}} + 2,368 \frac{\text{MWh}}{\text{dan}} + 2,675 \frac{\text{MWh}}{\text{dan}} \quad (13)$$

$$E_{reaktor,pokretanje} = 12,662 \frac{\text{MWh}}{\text{god}} = 12,662 \frac{\text{MWh}}{\text{god}}$$

Gdje je:

$E_{reaktor,pokretanje}$ – toplinska energija koju je potrebno dovoditi reaktoru tijekom pokretanja, $[\frac{MWh}{god}]$.

Toplina potrebna za zagrijavanje sirovine i zraka u reaktoru te za zagrijavanje i isparivanje vode iznosi 12,662 prema proračunu. Podaci korišteni u proračunu uzeti su iz toplinske tablice [68]. Ogrjevna vrijednost prirodnog plina iznosi 36 MJ/m³ [36]. U nastavku slijedi izračun potrebne količine prirodnog plina za pokretanje procesa.

$$q_{PP} = \frac{E_{reaktor,pokretanje}}{H_{d,PP} \cdot \eta_{PT,t} \cdot \eta_{IT}} = \frac{12,662 \frac{MWh}{dan} \cdot 3600}{36 \frac{MJ}{m^3} \cdot 0,4 \cdot 0,75} = 4.220,67 \frac{m^3}{dan} \quad (14)$$

Odnosno:

$$E_{PP} = \frac{E_{reaktor,pokretanje}}{\eta_{PT,t} \cdot \eta_{IT}} = \frac{12,662 \frac{MWh}{god}}{0,4 \cdot 0,75} = 42,21 \frac{MWh}{god} \quad (15)$$

Gdje su:

$q_{v,PP}$ – volumni protok prirodnog plina, $[\frac{m^3}{dan}]$;

$H_{d,PP}$ – donja ogrjevna vrijednost prirodnog plina, $36 \frac{MJ}{m^3}$;

$\eta_{PT,t}$ – toplinska učinkovitost plinske turbine, 40%;

η_{IT} – učinkovitost izmjenjivača topline, 75%;

E_{PP} – toplinska energija sadržana u prirodnom plinu, $[\frac{MWh}{dan}]$;

Slijedi da je godišnje potrebno 42,21 MWh prirodnog plina.

6.1.5 Produkti procesa isplinjavanja

Produkti procesa isplinjavanja ovise o sastavu ulazne sirovine, o temperaturi procesa, masenom omjeru vodene pare i goriva.

Za sintetski plin koji se proizvodi procesom isplinjavanja ne postoji uspostavljeno tržište nego se najčešće transformira u drugu sirovinu ili energiju (električnu/toplinsku) kako bi se ostvario dobitak.

Za donju ogrjevnu vrijednost sintetskog plina uzima se vrijednost od 16,54 MJ/kg. U reaktor zajedno ulazi 10 tona sirovine (otpadne plastike), 5,485 tona vodene pare i 10,795 tona zraka dnevno, a pretpostavlja se prema podacima navedenim u Poglavlju 6.1 da je udio sintetskog plina u nastalom produktu 80%. Dakle, dnevno se dobije 21,024 tona sintetskog plina, odnosno 7.127,136 tona godišnje, prema sljedećem izračunu:

$$q_{m,SP} = \left(10 \frac{t_s}{dan} + 5,485 \frac{t_{vp}}{dan} + 10,795 \frac{t_z}{dan} \right) \cdot 80\% = 21,024 \frac{t}{dan}$$

$$q_{m,SP,god} = 339 \cdot 21,024 \frac{t}{dan} = 7.127,136 \frac{t}{god} \quad (16)$$

$$q_{m,NP} = \left(10 \frac{t_s}{dan} + 5,485 \frac{t_{vp}}{dan} + 10,795 \frac{t_z}{dan} \right) \cdot 20\% = 5,256 \frac{t}{dan}$$

$$q_{m,NP,god} = 339 \cdot 5,256 \frac{t}{dan} = 1.781,784 \frac{t}{god} \quad (17)$$

Gdje su:

$q_{m,SP}$ – godišnja masa dobivenog sintetskog plina, $[\frac{t}{god}]$;

$q_{m,NP}$ – godišnja masa dobivenih nusprodukata, $[\frac{t}{god}]$;

Također je izračunata masa nusprodukata procesa isplinjavanja. Udio nusprodukata, odnosno materijalnih ostataka procesa, iznosi 20% od ukupne mase ulazne sirovine. Dakle, dnevno se dobije 5,256 tona nusprodukata, odnosno godišnje 1.781,784 tona.

6.1.6 Proizvodnja električne i toplinske energije

Pregledom postojećih postrojenja zaključeno je da će se zbog jednostavnosti iz dobivenog sintetskog plina proizvoditi električna energija pomoću plinske turbine. Električna energija bi se koristila za održavanje procesa, a ostatak bi se prodavao na tržištu prema tržišnoj cijeni.

Sintetski plin nakon pročišćavanja ulazi u plinsku turbinu gdje se komprimira i zatim izgara kako bi se proizvodila mehanička energija. Iz te mehaničke energije preko generatora nastaje električna

energija. Procijenjena učinkovitost plinske turbine iznosi 35%, a generatora električne energije 90% [90]. U nastavku slijedi izračun dobivene električne energije.

$$E_{el} = q_{m,SP,god} \cdot H_{d,SP} \cdot \eta_{PT,e} \cdot \eta_G = 7.127,136 \cdot 10^3 \frac{kg}{god} \cdot 14,95 \frac{MJ}{kg} \cdot 0,35 \cdot 0,90$$

$$E_{el} = 33.563.465 \frac{MJ}{god} = 9.323,18 \frac{MWh}{god} \quad (18)$$

Gdje su:

E_{el} – električna energija dobivena iz sintetskog plina [$\frac{MWh}{god}$];

$H_{d,SP}$ – donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina, 14,95 MJ/kg;

$\eta_{PT,e}$ – električna učinkovitost plinske turbine, 35%

η_G – učinkovitost električnog generatora, 90%

Prema postojećim postrojenjima, godišnja potrošnja električne energije iznositi će 1.352,55 MWh godišnje. Dakle, električna energija koja se može prodati na tržištu iznosi 8.962,2 MWh/god odnosno 2.644 kWh po toni suhog otpada.

$$E_{el,tržište} = E_{el} - E_{el,postrojenje} = 9.323,18 - 1.352,55 = 7.970,64 \frac{MWh}{god} \quad (19)$$

Izlaskom iz plinske turbine sintetski plin je na dovoljno visokoj temperaturi (između 400 °C i 600 °C). Pomoću izmjenjivača topline s isparavanjem radnog medija (voda) iskoristiti će se toplinska energija sadržana u sintetskom plinu, a dobivena vodena para će poslužiti za zagrijavanje vode za dobivanje suhozasićene vodene pare i za sušenje sirovine, a za višak toplinske energije postoji opcija da se proda na tržištu. U nastavku slijedu izračun dobivene toplinske energije. Uzima se toplinska učinkovitost plinske turbine od 40% i učinkovitost izmjenjivača topline od 75% [90].

$$E_t = q_{m,SP,god} \cdot H_{d,SP} \cdot \eta_{PT,t} \cdot \eta_{IT} = 7.127,136 \cdot 10^3 \frac{kg}{god} \cdot 14,95 \cdot 0,4 \cdot 0,75$$

$$E_t = 31.965.205 \frac{MJ}{god} = 8.879,2 \frac{MWh}{god} \quad (20)$$

Gdje su:

E_t – toplinska energija dobivena iz sintetskog plina, [$\frac{MWh}{god}$];

$\eta_{PT,t}$ – toplinska učinkovitost plinske turbine, 40%;

η_{IT} – učinkovitost izmjenjivača topline, 75%.

Toplinska energija u izmjenjivaču topline prelazi na vodu koja se zagrijava, isparava i prelazi u stanje pregrijane pare. Dobivena pregrijana para koristi se za zagrijavanje i sušenje sirovine te za dobivanje vodene pare koja ulazi u reaktor zajedno sa sirovinom. Ostatak toplinske energije prodaje se na tržištu tj. distribuira se preko centralnog toplinskog sustava potrošačima. Prema izračunu na tržištu se može prodati 5.530,77 MWh/godišnje, odnosno 1.632 kWh po toni suhog otpada.

$$E_{t, \text{tržište}} = E_t - E_{\text{reaktor}} = 8.879,2 \frac{\text{MWh}}{\text{god}} - 4.292,8 \frac{\text{MWh}}{\text{god}}$$

$$E_{t, \text{tržište}} = 4.586,4 \frac{\text{MWh}}{\text{god}} \quad (21)$$

Gdje je:

$E_{t, \text{tržište}}$ – toplinska energija koja se prodaje na tržištu, [$\frac{\text{MWh}}{\text{god}}$].

6.2 Rashodi postrojenja

6.2.1 Investicijski troškovi

Slika 16. u Poglavlju 4.2.2 prikazuje ovisnost kapitalnih troškova o godišnjem kapacitetu postojećih postrojenja za isplinjavanje čiji je produkt sintetski plin. Srednja vrijednost investicijskog troška po toni obrađenog otpada za postrojenja koja proizvode sintetski plin godišnje iznosi 996,84 €/TPG. Procjenjuje se da je za dodavanje plinske turbine, generatora električne energije i izmjenjivača topline potrebna dodatna investicija u iznosu od 1.003.900 € (prema [72] i funkciji (1) navedenoj u Poglavlju 4.2.2 za plinsku turbinu neto proizvodnje od 1 MWh). Uspostava centralnog toplinskog sustava za distribuciju toplinske energije koštala bi dodatnih 1.078.500 € za neto proizvodnju toplinske energije od 4.586,4 MWh godišnje [99] za gustoću toplinske potrošnje od 85 TJ/m² prema Paneuropskom termalnom atlasu 5.1 [102]. Ukupna investicija iznosi 4.658.187 €. Uz investicijske troškove za samo postrojenje (oprema i instalacije) dolaze dodatni pravni troškovi koji se procjenjuju na 10.000 € [17] i troškovi vezani za kupnju potrebnog zemljišta. Za cijenu građevinskog zemljišta na području Zagrebačke županije

uzet će se 45,13 € (uračunata inflacija) po metru kvadratnom [63]. Slijedi da ukupni troškovi iznose:

$$C_{inv} = C_{inv,TPG} \cdot V_{god} + C_{PP} + C_{CTS}$$

$$C_{inv} = 996,84 \frac{\text{€}}{TPG} \cdot 3.390 TPG + 1.003.900 \text{ €} + 1.078.500 \text{ €} = 5.461.687 \text{ €} \quad (22)$$

$$C_{zem} = A_{zem} \cdot C_{zem,zž} = 1.000 \text{ m}^2 \cdot 45,13 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 45.130 \text{ €} \quad (23)$$

$$C_{uk} = C_{inv} + C_p + C_{zem} = 5.461.687 \text{ €} + 10.000 \text{ €} + 45.130 \text{ €} = 5.516.817 \text{ €} \quad (24)$$

Gdje su:

$C_{inv,TPG}$ – investicijski troškovi za postrojenje za isplinjavanje po toni godišnje obrađenog otpada, [€/TPG];

V_{god} – godišnji kapacitet postrojenja, [TPG];

C_{PP} – investicijski troškovi za plinsku turbinu i dr., [€];

C_{CTS} – investicijski troškovi za uspostavu centralnog toplinskog sustava, [€];

C_{inv} – investicijski troškovi za postrojenje za isplinjavanje, [€];

$C_{zem,zž}$ – cijena zemljišta u Zagrebačkoj županiji, [€/m²];

A_{zem} – potrebna površina za postrojenje, [m²];

C_{zem} – ukupna cijena zemljišta, [€];

C_p – pravni troškovi, [€];

C_{uk} – ukupni troškovi, [€].

Ukupna cijena investicije iznosi 5.516.817 €.

6.2.2 Operativni troškovi postrojenja

Operativni troškovi postrojenja mogu se podijeliti na varijabilne i fiksne troškove. Varijabilni troškovi ovise o vođenju procesa, a za pretpostavljeno postrojenje oni su sljedeći [17]:

- Troškovi energenata (električna energija, prirodni plin, voda, itd.);
- Trošak zbrinjavanja nusprodukata procesa (ostatci poput katrana, čađe, otpada nastalog čišćenjem filtera, itd.);
- Trošak povezan s prodajom i administracijom.

Cijena vodnih usluga po m³ na području grada Vrbovca iznosi 32,60 kn odnosno 4,33 € [47]. Prirodni plin koji se koristi pri pokretanju procesa kupovat će se po cijeni od 0,032 €/kWh [70]. Zbrinjavanje nusprodukata procesa isplinjavanja provoditi će se po cijeni za zbrinjavanje neopasnog otpada u gradu Vrbovcu od 47,48 €/tona otpada [17]. Uslugu zbrinjavanja pružati će poduzeće KOMUNALAC VRBOVEC d.o.o. Troškovi povezani s prodajom i administracijom (plaće administrativnog osoblja, prijevoz, ispitivanje kvalitete [49]) procjenjuju se na 2% od ukupnih prihoda ostvarenih prodajom električne i toplinske energije.

Fiksni troškovi su [17]:

- Plaća zaposlenika;
- Troškovi održavanja;
- Osiguranje postrojenja.

Broj zaposlenika određen je prema podacima iz dostupne literature [10] za postrojenje godišnjeg kapaciteta od 27.000 tona čiji opis približno odgovara pretpostavljenom postrojenju. Podaci postrojenja mogu se pronaći u Tablica 1.3 u Prilogu 1. Potrebne su tri osobe za upravljanje postrojenjem po smjeni (rad u 3 smjene), dvije osobe za rukovanje sirovinom i proizvodom te jedna osoba zadužena za održavanje. Plaće radnika određene su prema prosječnoj plaći zaposlenih za područje djelatnosti opskrba vodom; uklanjanje otpadnih voda, gospodarenje otpadom te djelatnosti sanacije okoliša u Republici Hrvatskoj za lipanj 2021. (izvor Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske). Osobe zadužene za upravljanjem postrojenja biti će mjesečno plaćene 7.500 kn bruto, osobe zadužene za rukovanje sirovinom 5.000 kn bruto, a osoba zadužena za održavanje 6.000 kn bruto. U plaće su uračunati razni dodaci i bonusi u iznosu od 4% godišnje bruto plaće. Popis potrebnih radnika kao i njihove početne godišnje bruto plaće navedene su u Tablici 21.

Tablica 21. Radna mjesta i odgovarajuće godišnje bruto plaće

| Radno mjesto | Broj radnih pozicija | Početna godišnja bruto plaća + dodaci |
|--------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Upravljanje postrojenjem | 9 | 12.439,74 € |
| Rukovanje sirovinom | 2 | 8.293,16 € |
| Održavanje postrojenja | 1 | 9.951,79 € |
| | Ukupno | 138.495,79 € |

Ukupan fiksni trošak za zaposlenike iznosi 138.495,79 € godišnje, a on je ujedno i najveći operativni trošak. Nakon njega po iznosu slijedi godišnji trošak za održavanje postrojenja (rezervni

dijelovi, čišćenje reaktora) koji se procjenjuje na 3% ukupnog investicijskog troška prema dostupnim podacima za postojeća postrojenja navedenim u Tablici 1.4 u Prilogu I. U cijenu održavanja uključena je cijena korištenog katalizatora (npr. olivin). Cijena osiguranja procjenjuje se na 1% ukupnog investicijskog troška. Tablica 22. prikazuje navedene operativne troškove. Ukupni godišnji operativni troškovi za prvu godinu iznose 472.450,89 €.

Tablica 22. Ukupni operativni troškovi za prvu godinu

| Godišnji operativni troškovi | |
|-------------------------------------|---------------------|
| Trošak energenata | 9.402,00 € |
| Trošak zbrinjavanja nusprodukata | 84.559,10 € |
| Trošak prodaje i administracije | 19.322,00 € |
| Trošak radne snage | 138.495,79 € |
| Trošak održavanja | 165.504,00 € |
| Trošak osiguranja | 55.168,00 € |
| Ukupno | 472.450,89 € |

Godišnji rast troškova održavanja i osiguranja iznositi će 1%, a rast prodaje i administracije, zbrinjavanja nusprodukata, nabave energenata i plaća zaposlenika, odnosno trošak radne snage procjenjuje se na 2%.

6.2 Prihodi postrojenja

Maloprodajna kupovna cijena električne energije iznosi 103,607 €/MWh, odnosno 0,103607 €/kWh. Cijena je određena pomoću podataka dostupnih na internetskim stranicama CROPEX-a, za unutarodnevno tržište [48], osrednjavanjem vrijednosti cijene u periodima od 7.-13.1.2021., 30.4.-6.5.2021., 1.-7.8.2021. te 11.-17.10.2021. Prodajna cijena toplinske energije iznosi 0,23 kn/kWh odnosno 0,0306 €/kWh [100] prema srednjoj vrijednosti cijene toplinske energije za kućanstva i industriju/poslovne potrošače centralnog toplinskog sustava Zagreb, najbližeg centralnog toplinskog sustava. Na području grada Vrbovca nalaze se mnogi potencijalni potrošači toplinske energije, industrijska postrojenja, poslovni potrošači poput velikih trgovina s mješovitom robom i kućanstva. Tablica 23. prikazuje ukupne godišnje prihode postrojenja koji iznose 966.093 €.

Tablica 23. Godišnji prihodi postrojenja

| Godišnji prihodi | |
|-----------------------------|---------------------|
| Prodaja električne energije | 825.878,00 € |
| Prodaja toplinske energije | 140.215,00 € |
| Ukupno | 966.093,00 € |

6.3 *Financiranje projekta*

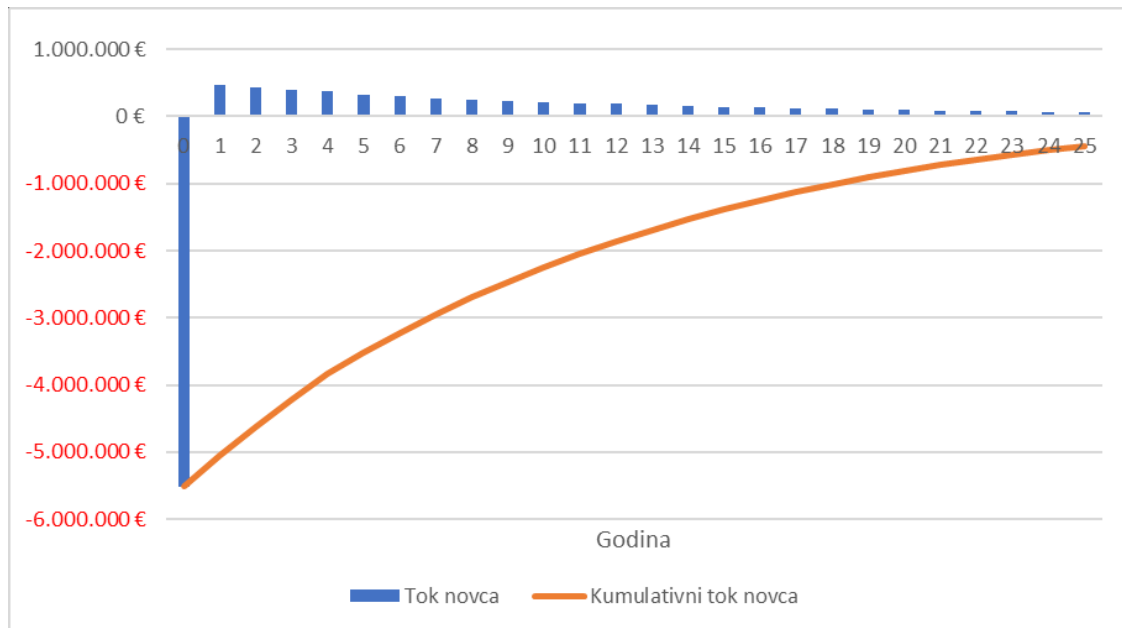
Poduzeće Pos – Plast d.o.o. uložilo bi iz privatnih sredstava 25% novčanih sredstava potrebnih za izgradnju postrojenja za isplinjavanje plastičnog otpada, a za pokrivanje ostalih 75% potreban je kredit. [17] Ukupni investicijski troškovi iznose 5.516.817 €. Dakle, privatna sredstva iznosila bi 1.379.200 €, a iznos kredita iznosio bi 4.137.599 €. Prema Hrvatskoj banci za obnovu i razvitak kamatna stopa iznosila bi 1,5% (pretpostavljeno je da je Pos – Plast d.o.o. tržišno konkurentan), a rok otplate je 14 godina [51].

Za tehničko postrojenje godišnja amortizacijska stopa iznosi 25%, odnosno amortizacijski vijek je 4 godine te je porez na dobit 10% (pretpostavljeno je da poduzeće Pos – Plast d.o.o. u poreznom razdoblju ostvarilo prihod manji od 7.500.000 kn) prema Zakonu o porezu na dobit Republike Hrvatske [52]. Kao diskontna stopa koristiti će se ponderirani prosječni trošak kapitala tj. stopa profitabilnosti potrebna za zadovoljavanje interesa investitora (engleski WACC – Weighted Average Cost of Capital) [61] WACC iznosi 5,86% za poduzeća na području Europe koja proizvode obnovljiva goriva (etanol, pirolitička i sintetska goriva, bioplin i biogoriva te vodik) prema radu kojeg su izradili Franc-Dąbrowska J. i sur. [71]. Pregledom literature za podatke iz 2021. primijećen je vidljivo niži WACC, odnosno diskontna stopa, u odnosu na prijašnje godine, kada je iznosio oko 10% [17].

6.4 *Metoda procjene isplativosti*

Unutrašnja stopa povrata (IRR) metoda je procjene isplativosti projekta. IRR za prijedlog investicije jest ona diskontna stopa koja izjednačava sadašnju vrijednost očekivanih troškova sa sadašnjom vrijednosti očekivanih prihoda, tj. IRR za pojedini projekt je stopa koja izjednačava neto sadašnju vrijednost budućih novčanih tokova projekta na nulu. Ukoliko je IRR veća od važeće diskontne stope, ulaganje u projekt je isplativo [59] [60].

Ekonomska analiza postrojenja za isplinjavanje pokazala je da unutrašnja stopa povrata iznosi 4,89% što je manje od 5,86% koliko iznosi korištena diskontna stopa. Investicija u ovo postrojenje je neisplativa te nakon isteka životnog vijeka od 25 godina, uz prihod od 966.093 € godišnje i rashoda, tj., troškova koji u prvoj godini iznose 472.450,89 € ukupni gubitak iznosi 444.187 €. Slika 20. prikazuje tok novca sadašnje vrijednosti postrojenja za isplinjavanje.



Slika 20. Tok novca sadašnje vrijednosti postrojenja za isplinjavanje

6.5 Prihod od naplate naknade za zbrinjavanje otpada

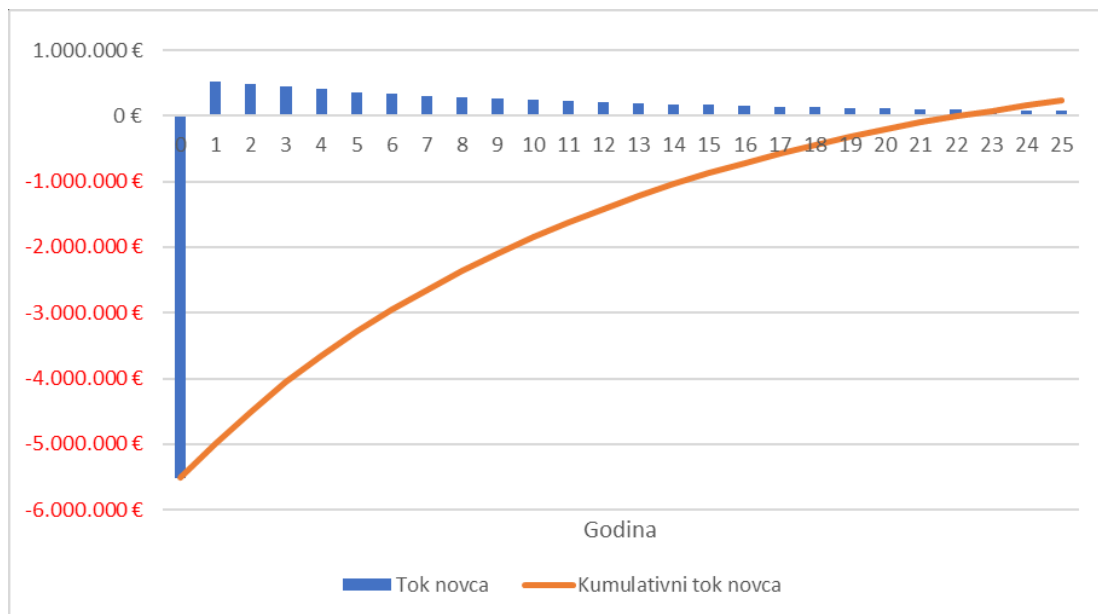
U sklopu ekonomske analize uzet će se u obzir naknada za zbrinjavanje plastičnog otpada. Naplaćivanje naknada za zbrinjavanje plastičnog otpada uobičajena je praksa pri vođenju postrojenja za isplinjavanje otpada (Tablica 1.4 u Prilogu 1. prikazuje naknade za zbrinjavanje otpada, odnosno „gate fee“ za postojeća i pretpostavljena postrojenja). Trenutačne jeftine cijene odlaganja otpada u Republici Hrvatskoj nisu poticajne za razvoj sektora oporabe otpada. U Republici Hrvatskoj dodatna naknada za odlaganje komunalnog otpada još nije uvedena s obzirom da provedbeni propis kojim se između ostalog propisuje način obračuna dodatne naknade za odlaganje komunalnog otpada još nije donesen [91]. Nakon provedbe propisa u sklopu akcijskog plana Europske unije za kružno gospodarstvo, cijene odlaganja otpada će porasti i/ili će količina otpada koja se smije zbrinuti na odlagalištima biti ograničena. Stoga će poduzećima koje proizvode plastični otpad povoljnije će biti plaćanje naknade za alternativno zbrinjavanje tog otpada, primjerice isplinjavanjem, nego plaćati odlaganje.

Takva naknada bila bi dodatni prihod postrojenju uz prodaju energetskih proizvoda. Tehno-ekonomska analiza za postrojenje u vlasništvu poduzeća Pos – Plast d.o.o. provedena je prema zahtjevima poduzeća. Iz tog razloga u prethodnom dijelu analize nema prihoda od naplaćivanja naknade za zbrinjavanje otpada [17]. U nastavku slijedi analiza postrojenja za isplinjavanje istih parametara poput postrojenja osmišljenog za poduzeće Pos – Plast d.o.o. uz dodatni prihod od naplaćivanja naknade za zbrinjavanje otpada kako se istražio utjecaj na isplativost ulaganja u takvo

postrojenje, pošto navedeno postrojenje predstavlja zamjensko rješenje za odlaganje na odlagalištima za proizvođače plastičnog otpada.

Cijena naknade za zbrinjavanje otpada odrediti će se pomoću prosječne cijene zbrinjavanja otpada na odlagalištima u državama članicama Europske unije sličnog bruto domaćeg proizvoda u 2020. godini – Bugarska, Rumunjska, Grčka, Latvija i Slovačka [93]. Prosječna cijena zbrinjavanja otpada na odlagalištu 2013. u tim državama iznosila je 17 € po toni otpada (s uračunatom inflacijom) [92]. Dakle, za cijenu naknade za zbrinjavanje jedne tone plastičnog otpada isplinjavanjem uzet će se 17 € po toni otpada.

Slika 21. prikazuje tok novca sadašnje vrijednosti postrojenja za isplinjavanje uz dodatne prihode ostvarene naplatom naknade za zbrinjavanje otpada u iznosu od 57.630 € godišnje. Unutrašnja stopa povrata iznosi 6,35%, povrat investicije dogodi se nakon 22 godine, a dobit pri isteku životnog vijeka je 231.126 €.

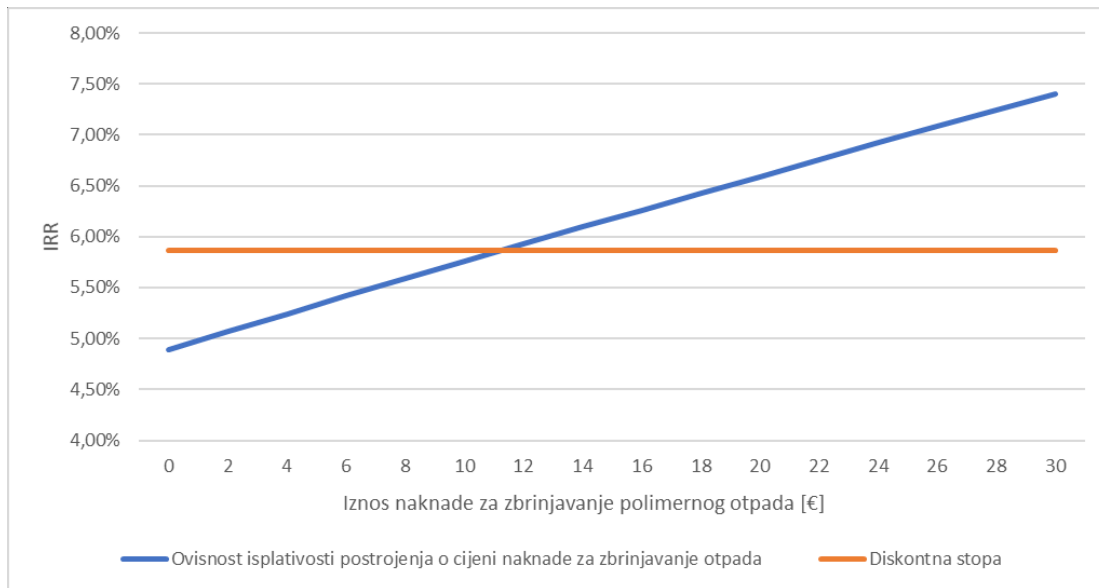


Slika 21. Tok novca sadašnje vrijednosti postrojenja za isplinjavanje uz prihod od naknade

6.5.1 Utjecaj iznosa naknade na isplativost postrojenja

Kao što je spomenuto u prethodnom poglavlju, srednja cijena zbrinjavanja otpada na odlagalištima 2013. godine u zemljama Europske unije sličnog bruto domaćeg proizvoda kao Republika Hrvatska iznosila je 17 € po toni otpada. Uvođenjem novih propisa i/ili poreza za odlaganje otpada očekuje se da je ta cijena u međuvremenu porasla. Porastom cijene odlaganja, cijena naknade za zbrinjavanje isplinjavanjem također može porasti čime bi se ostvario veći utjecaj na isplativost.

Zato će se provesti analiza utjecaja iznosa naknade za zbrinjavanje otpada na isplativost postrojenja. Raspon iznosa koji će se razmatrati je od 0 do 30 € po toni otpada.



Slika 22. Ovisnost isplativosti postrojenja o iznosu naknade za zbrinjavanje otpada

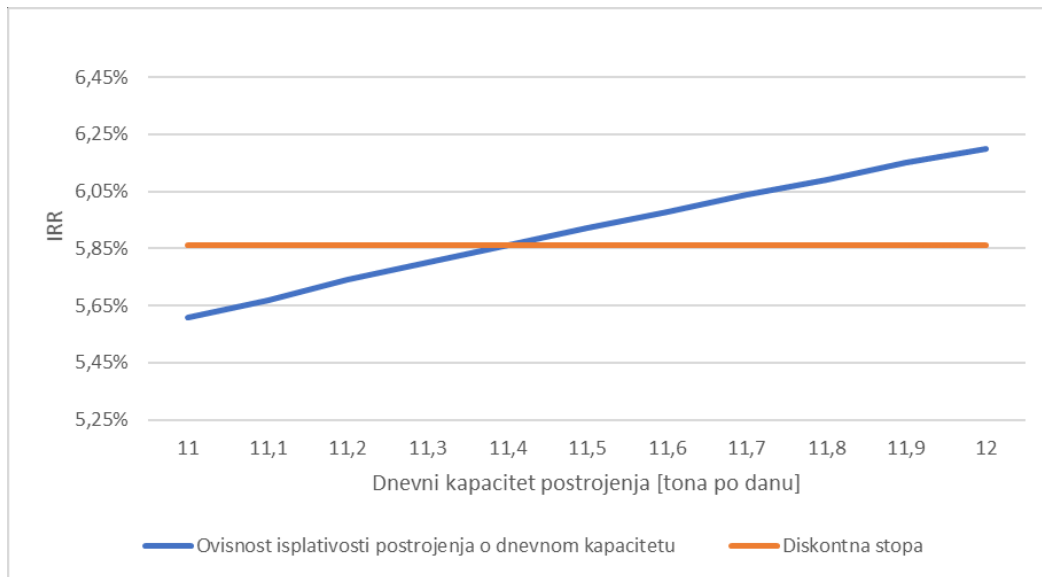
Slika 22. prikazuje ovisnost isplativosti postrojenja o iznosu naknade za zbrinjavanje otpada. Raspon unutrašnje stope povrata kreće se od 4,89% za slučaj bez naknade (0 €) do 7,40% za iznos naknade od 30 € po toni otpada. U tom slučaju dobit pri isteku životnog vijeka postrojenja iznosi 747.541 €. Najmanji iznos naknade pri kojem je postrojenje isplativo na kraju životnog vijeka iznosi 11,20 € po toni otpada.

Trenutačna cijena za zbrinjavanje otpada na odlagalištu za područje grada Vrbovca iznosi 47,48 € po toni otpada. Na području Europske unije cijena spaljivanja otpada u 2022. godini iznosi otprilike 30 € po toni otpada [101] te se predviđa njen rast u budućnosti. Da bi postrojenje bilo tržišno konkurentno cijena naknade za zbrinjavanje tone otpada isplinjavanjem mora biti niža nego druga rješenja za zbrinjavanje otpada. Ukoliko bi cijena naknade za zbrinjavanje otpada iznosila manje od 30 €, postrojenje bi prema trenutačnom stanju bilo tržišno konkurentno i isplativije rješenje za zbrinjavanje otpada u odnosu na spaljivanje i zbrinjavanje na odlagalištu.

6.6 Isplativost investicije ovisno o kapacitetu postrojenja

Postrojenje kapaciteta 10 tona plastičnog otpada dnevno uz zadane tehnološke i ekonomske parametre bez dodatnog prihoda od naplate naknade za zbrinjavanje otpada pokazalo se neisplativo. Provedena je ekonomska analiza kako bi se odredio najmanji potrebni dnevni

kapacitet postrojenja za isplinjavanje ostatnog industrijskog plastičnog otpada, a da je investicija isplativa. Slika 23. prikazuje utjecaj dnevnog kapaciteta postrojenja na njegovu isplativost.



Slika 23. Ovisnost isplativosti postrojenja o njegovom dnevnom kapacitetu

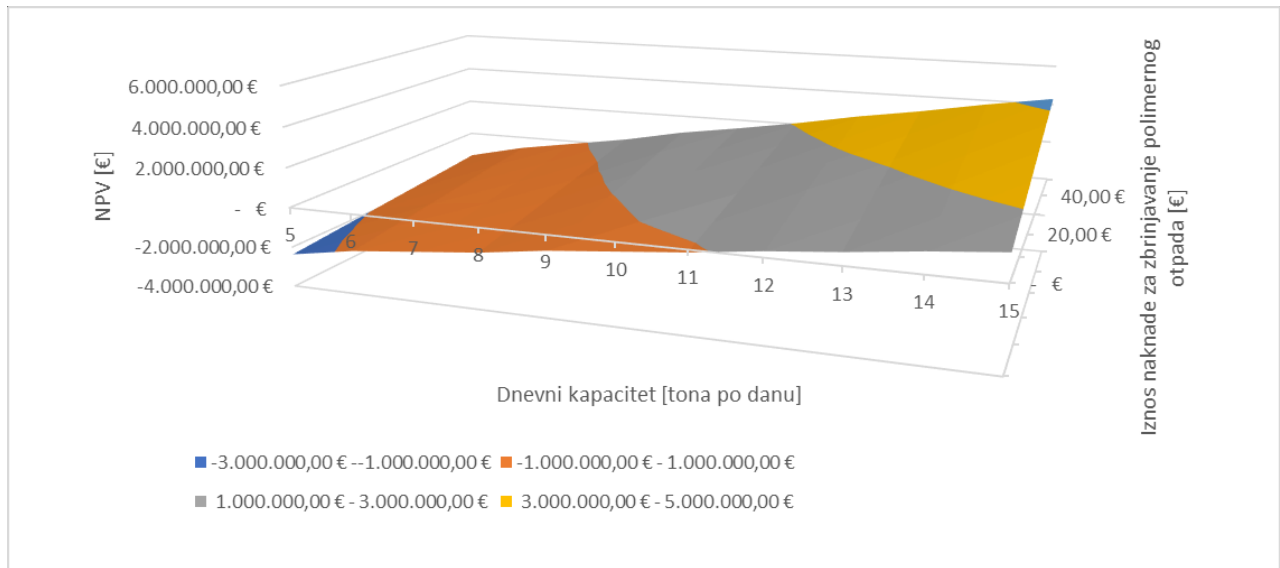
Prema Slici 23. najmanji dnevni kapacitet ovakvog postrojenja za isplinjavanje plastičnog otpada pri kojem je investicija isplativa, bez naplaćivanja dodatne naknade, iznosi 11,4 tone.

6.6.1 Utjecaj promjene kapaciteta i cijene naknade za zbrinjavanje otpada na isplativost postrojenja

Iduća analiza odnosi se na utjecaj promjene dnevnog kapaciteta postrojenja i cijene naknade za zbrinjavanje otpada na isplativost postrojenja. Dnevni kapacitet mijenjat će se između 5 i 15 tona, a cijena naknade za zbrinjavanje tone plastičnog otpada biti će u rasponu od 0 do 50 € (prema cijeni od 47,48 € za zbrinjavanje tone neopasnog otpada u gradu Vrbovcu. Slika 24. prikazuje dijagram na kojem se vidi ovisnost isplativosti postrojenja o promjeni dnevnog kapaciteta postrojenja i cijene naknade za zbrinjavanje otpada. Linija isplativosti nalazi se na granici narančaste i sive površine u dijagramu. U prethodnom poglavlju utvrđeno je da bez naknade, minimalni dnevni kapacitet pri kojem je postrojenje isplativo iznosi 11,4 tone. Pri iznosu naknade od 10 € po toni minimalni dnevni kapacitet postrojenja pri kojem je investicija isplativa iznosi 10,2 tone, a pri iznosu od 50 € po toni najmanji mogući kapacitet pri kojem je postrojenje isplativo iznosi 7,3 tonu.

Za osnovni slučaj postrojenja dnevnog kapaciteta od 10 tona pri iznosu naknade za zbrinjavanje tone plastičnog otpada od 50 € ukupna dobit pri kraju životnog vijeka iznosi 1.524.026 €. Postrojenje dnevnog kapaciteta od 5 tona neće biti isplativo ni s naknadom od 50 € po toni s

ukupnim gubitkom na kraju životnog vijeka postrojenja u iznosu od 1.372.650 €, a postrojenje dnevnog kapaciteta od 15 tona bez naknade kao dodatnog izvora prihoda, na kraju životnog vijeka ima ukupnu dobit koja iznosi 1.311.836 €.



Slika 24. Ovisnost isplativosti postrojenja o iznosu naknade i dnevnom kapacitetu

6.7 Analiza osjetljivosti

U svrhu utvrđivanja utjecaja promjene određenih varijabli na isplativost postrojenja za isplinjavanje ostatnog industrijskog plastičnog otpada provesti će se analiza osjetljivosti. Analiza osjetljivosti provesti će se za postrojenje kapaciteta od 10 tona dnevno koje ostvaruje prihod od prodaje električne i toplinske energije na tržištu te nema dodatni prihod od naknade za zbrinjavanje otpada.

Za određivanje parametara i troškova postrojenja korištene su uprosječene vrijednosti postojećih postrojenja uz „kriterij isključivanja“ kako bi se smanjila greška te različita istraživanja i projekti za detaljnije određivanje parametara poput sastava sintetskog plina i stupanj učinkovitosti te cijene plinske turbine, analiza osjetljivosti poslužiti će za pregled utjecaja tih parametara i cijena na isplativost investiranja u postrojenje za isplinjavanje ostatnog industrijskog plastičnog otpada.

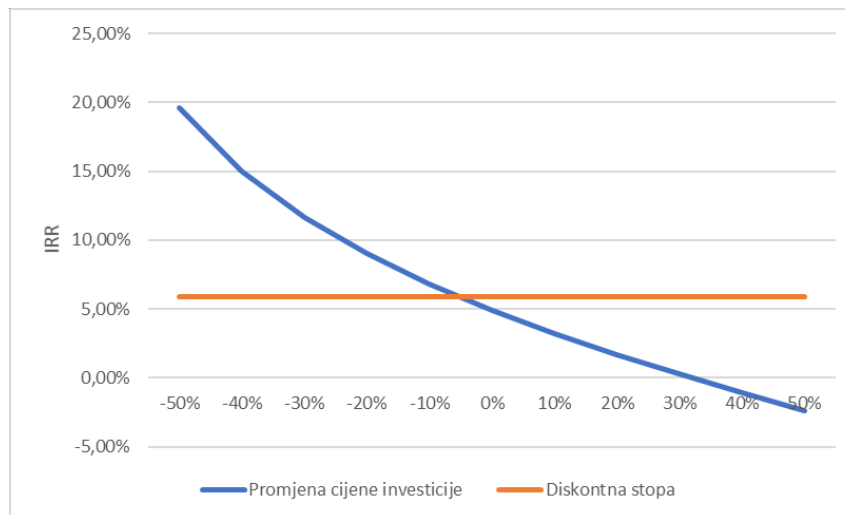
U analizi osjetljivosti razmatrani su sljedeći parametri:

- Cijena investicije;
- Cijena električne energije;
- Cijena toplinske energije;
- Cijena troška održavanja;

- Cijena troška radne snage;
- Količina proizvedenog sintetskog plina;
- Donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina.

6.7.1 Cijena investicije

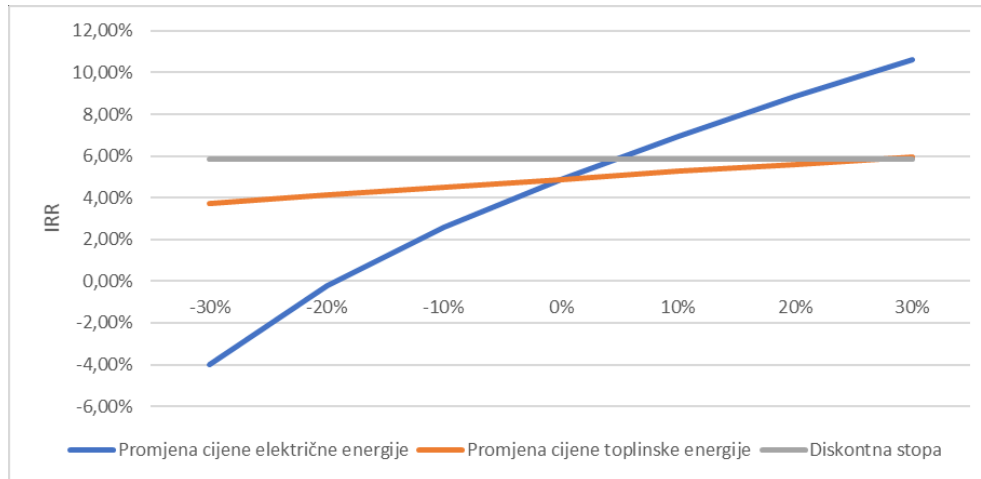
Slika 25. prikazuje utjecaj promjene cijene investicije na isplativost postrojenja za isplinjavanje. Smanjivanjem iznosa investicije za 50%, unutrašnja stopa povrata iznosi 19,57%, a njezinim povećanjem za 50% IRR iznosi -2,42%. Smanjivanje cijene investicije značajnije utječe na isplativost postrojenja nego njezino povećanje. Za cijena investicije koja je manja za 5,5% postrojenje bi bilo isplativo na kraju životnog vijeka. Ukoliko se tehnologija isplinjavanja otpadnih materijala nastavi razvijati te se poveća potražnja za sličnim postrojenjima za uporabu polimernih materijala, u budućnosti bi se investicijski troškovi za ovakvo postrojenje mogli smanjiti.



Slika 25. Utjecaj promjene cijene investicije na isplativost postrojenja

6.7.2 Cijena električne i toplinske energije

Slika 26. prikazuje utjecaj promjene cijena električne i toplinske energije na isplativost postrojenja. Promjena cijene električne energije ima veći utjecaj na isplativost postrojenja nego promjena cijene toplinske energije. Pri smanjenju cijene električne energije za 30%, vrijednost unutrašnje stope povrata pada s 4,89% na -4,01%, a pri smanjenju cijene toplinske energije za 30% IRR pada na vrijednost od 3,75%. Pri porastu cijena za 30%, unutrašnja stopa povrata raste na 10,63% za porast cijena električne energije, a za cijenu toplinske energije na 5,96%. Ukoliko bi cijena električne energije bila veća za 4,6% postrojenje bi bilo isplativo. Isto vrijedi za povećanje cijene toplinske energije od 27,1%.



Slika 26. Utjecaj promjene cijena električne i toplinske energije na isplativost postrojenja

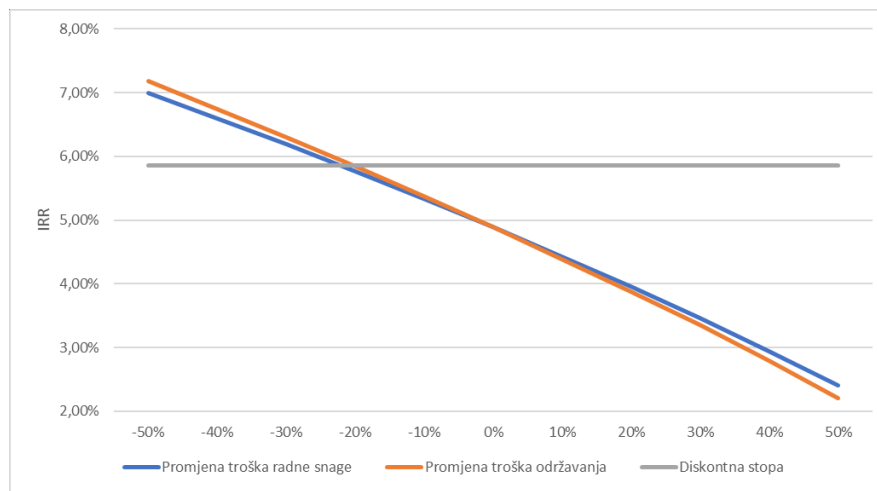
Razlog većeg utjecaja cijene električne energije na isplativost investicije je veća količina električne energije koja se prodaje na tržištu u odnosu na količinu toplinske energije. Nakon što se proizvedu, električna i toplinska energija koriste se za potrebe postrojenja, a ostatak se prodaje na tržištu. Električna energija koristi se za pogon pumpi, kontrolnog sustava i slično, dok se toplinska energija koristi za zagrijavanje reaktora te za proces dobivanja suhozasićene vodene pare – na godišnjoj razini ti procesi troše višestruko veću količinu toplinske energije nego što je količina električne energije koju troše uređaji u sklopu postrojenja (prema izračunu za postrojenje dnevnog kapaciteta od 10 tona u Poglavlju 6.1.6 godišnje je za prodaju na tržištu raspoloživo 7.970,64 MWh električne energije i 4.586,4 MWh toplinske energije).

Cijena po kojoj se prodaje toplinska energija uz koje je investicija isplativa iznosi 0,039 €/kWh. Cijena prirodnog plina na području grada Vrbovca iznosi 0,032 €/kWh [70], a cijena električne energije iznosi 0,15 €/kWh za poduzetništvo, odnosno 0,11 €/kWh za kućanstva (HEP, tarifni model „Bijeli“ u kategoriji srednjeg napona [103, 104]). Drvo kao energent za grijanje košta otprilike 0,031 €/kWh, a loživo ulje 0,72 €/kWh [105]. Usporedbom cijene toplinske energije dobivene iz sintetskog plina za isplativo postrojenje s cijenom toplinske energije dobivene iz drugih izvora može se zaključiti da je proizvedena toplinska energija povoljnija u odnosu na električnu energiju i loživo ulje, dok je skuplja od prirodnog plina i opcije grijanja na drvo.

Ukoliko bi postrojenje naplaćivalo naknadu za zbrinjavanje otpada u iznosu od 17 € po toni, postrojenje bi bilo isplativo s baznom cijenom toplinske energije iznosa 0,031 €/kWh. U tom slučaju bi toplinska energija proizvedena iz sintetskog plina bila povoljnija i od prirodnog plina te bi joj cijena bila jednaka cijeni grijanja na drva.

6.7.3 Cijena troškova održavanja i radne snage

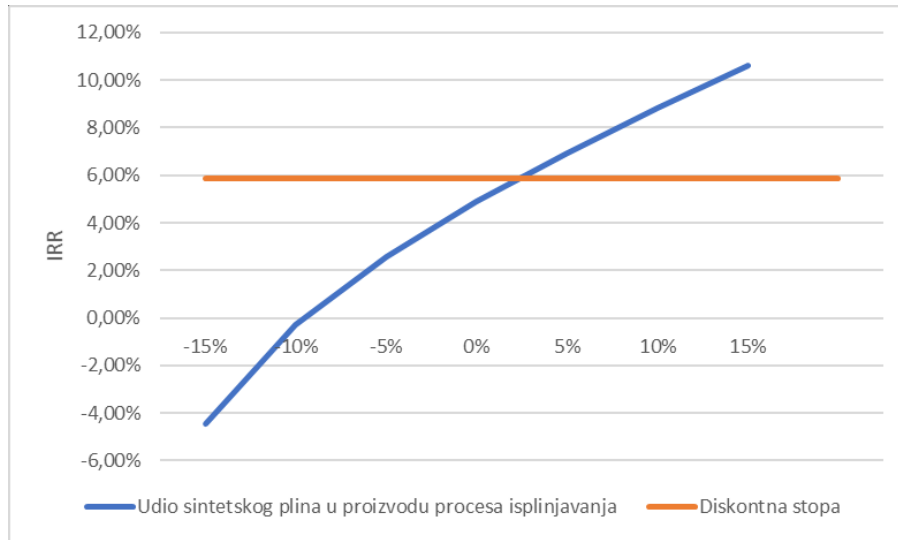
Slika 27. prikazuje utjecaj promjene troškova održavanja i troškova radne snage na isplativost postrojenja. Ovi operativni troškovi veći su u odnosu na druge. Njihovo povećanje odnosno smanjenje ima sličan utjecaj na isplativost postrojenja. Povećanje ovih troškova za 50% dovodi do unutrašnje stope povrata od 2,21% za povećanje troška održavanja, odnosno 2,40% za trošak radne snage. Njihovo smanjenje za 50% znači porast unutrašnje stope povrata s 4,89% na 7,18% za smanjenje troška održavanja, odnosno 7,00% za trošak radne snage. Da su troškovi održavanja manji za 23% investicija bi bila isplativa, isto vrijedi i za niži trošak radne snage.



Slika 27. Utjecaj promjene troškova održavanja i radne snage na isplativost postrojenja

6.7.4 Udio sintetskog plina u proizvodnji procesa isplinjavanja

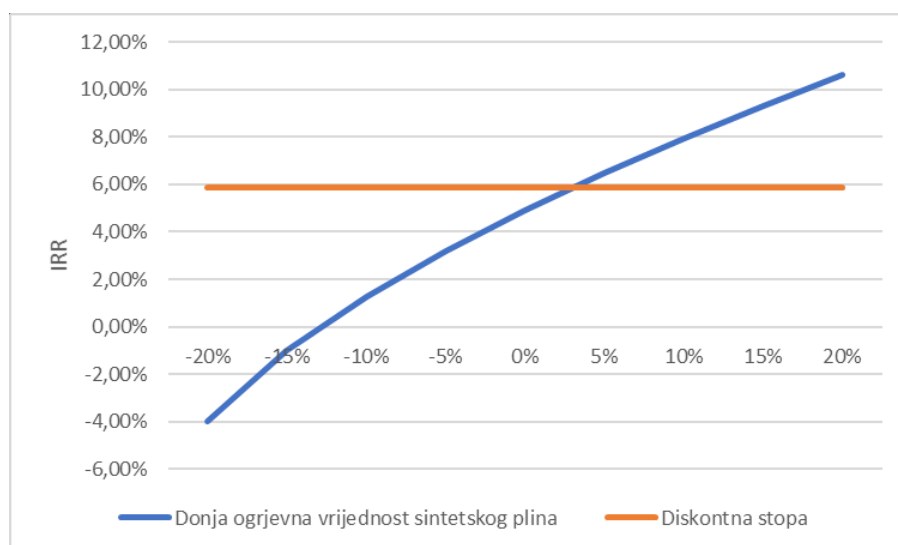
Slika 28. prikazuje utjecaj promjene udjela sintetskog plina u proizvodnji procesa isplinjavanja na isplativost postrojenja. Udio sintetskog plina u proizvodnji osjetljivi je parametar koji ovisi o drugim parametrima poput sastava ulazne sirovine, količine i vrste agensa za isplinjavanje te temperature reaktora. Njegovo povećanje od 15% dovodi do povećanja unutrašnje stope povrata s 4,89% na 10,59%, a smanjenje od 15% smanjuje stopu povrata na -4,47%. Investicija bi bila isplativa za postrojenje koje ima udio sintetskog plina veći za 2,3% u odnosu na bazni slučaj (80% udjela sintetskog plina u proizvodnji).



Slika 28. Utjecaj promjene udjela sintetskog plina u proizvodu na isplativost postrojenja

6.7.5 Donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina

Slika 29. prikazuje utjecaj promjene donje ogrjevnosti sintetskog plina na isplativost postrojenja. Poput udjela sintetskog plina u proizvodu, donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina ovisi o drugim parametrima poput sastava ulazne sirovine, masenog omjera agensa za isplinjavanje i sirovine te temperature procesa. Kada bi donja ogrjevna vrijednost proizvedenog sintetskog plina bila manja za 20%, unutrašnja stopa povrata bi iznosila -3,99%. Uz 20% veću donju ogrjevnost unutrašnja stopa povrata bila bi 10,62%. Povećanjem donje ogrjevnosti sintetskog plina za 3,1% postrojenje za isplinjavanje ostatnog industrijskog plastičnog otpada bilo bi isplativo na kraju životnog vijeka.



Slika 29. Utjecaj promjene donje ogrjevnosti sintetskog plina na isplativost postrojenja

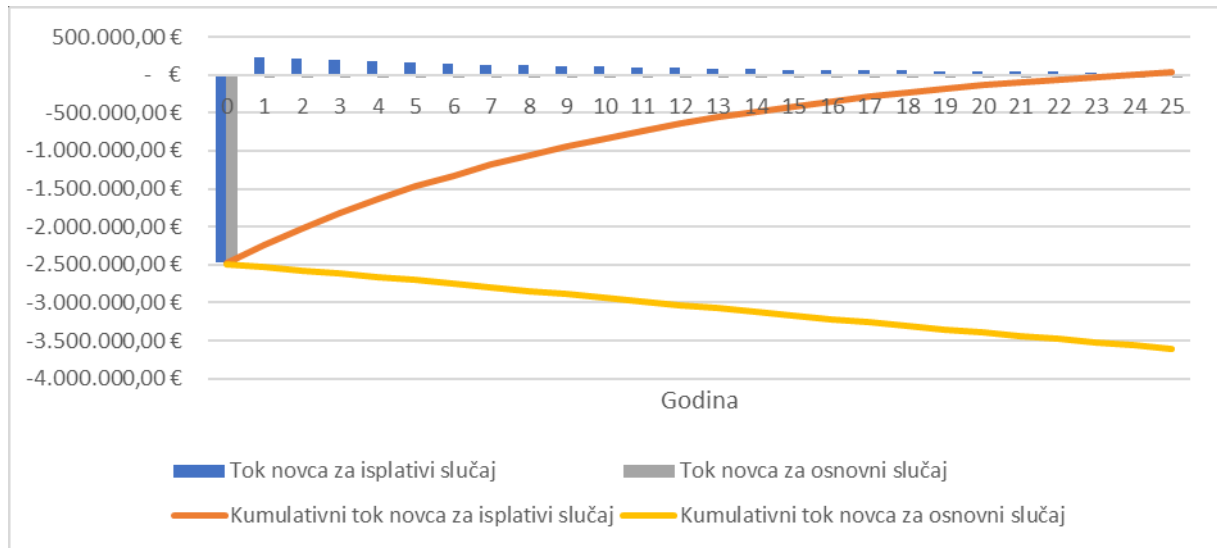
6.8 Utjecaj promjene parametara na trenutnu raspoloživu količinu otpada

Poduzeće Pos – Plast d.o.o. trenutno raspolaže s otprilike 2 tone dnevno ulazne sirovine za proces isplinjavanja. Tehno – ekonomska analiza provela se za postrojenje dnevnog kapaciteta od 10 tona prema navodu da postoji mogućnost povećanja količine ostatnog industrijskog plastičnog otpada. U Poglavlju 6.6 utvrđeno je da je najmanji kapacitet pri kojem je postrojenje za isplinjavanje plastičnog otpada isplativo, bez naplate naknade za zbrinjavanje otpada, iznosi 11,4 tone dnevno. Uz naplatu najveće pretpostavljene naknade u iznosu od 50 € po toni otpada, najmanji dnevni kapacitet uz kojeg se postiže isplativost investicije, odnosno unutrašnja stopa povrata koja je veća od diskontne (5,86%), iznosi 7,3 tone otpada dnevno.

Provesti će se analiza kako bi se ustvrdilo da li je moguće da postrojenje za isplinjavanje kapaciteta od 2 tone dnevno ispuni uvjet isplativosti investicije. Analiza osjetljivosti pokazala je da cijena investicije, cijena električne energije, udio sintetskog plina u proizvodu isplinjavanja i donja ogrjevna vrijednost goriva imaju najznačajniji utjecaj na isplativost postrojenja. Iz tog razloga će se za analizu koristiti navedeni parametri, uz dodatak naknade za zbrinjavanje otpada.

Postrojenje dnevnog kapaciteta od 2 tone na kraju životnog vijeka akumuliralo bi ukupni gubitak u iznosu od 3.865.179 €. Uz dodatni prihod od naknade za zbrinjavanje otpada u iznosu od 50 €, ukupni gubitak bi se smanjio na 3.436.623 €. Povećanje ogrjevne vrijednosti za 20% dovodi do ukupnog gubitka od 3.158.334 €, a povećanje cijene električne energije za 30% rezultira gubitkom od 3.238.745 €. Sličan je slučaj i s promjenom ostalih parametara.

Isplativost bi bila moguća ukoliko bi više parametara bilo drugačije. Na primjer, postrojenje za isplinjavanje dnevnog kapaciteta od 2 tone može biti isplativo na kraju životnog vijeka uz 40% veću cijenu električne energije, 50% veću ogrjevnju vrijednost sintetskog plina, 15% više udjela sintetskog plina u produktu, 10% manju cijenu investicije i iznos naknade za zbrinjavanje otpada od 17 € po toni. Ukupni dobitak na kraju životnog postrojenja u ovom slučaju iznosi 31.949 €. Slika 30. prikazuje usporedbu toka novca sadašnje vrijednosti postrojenja za isplinjavanje kapaciteta od 2 tone dnevno i slučaja u kojem su postignuti uvjeti kako bi postrojenje na kraju životnog vijeka ispunilo uvjet isplativosti.



Slika 30. Usporedba toka novca sadašnje vrijednosti postrojenja za isplinjavanje kapaciteta 2 tone dnevno – osnovni i isplativi slučaj

7. Zaključak

Proces isplinjavanja može se primijeniti kao rješenje za energetske oporabu ostatnog industrijskog plastičnog otpada. Produkt procesa isplinjavanja je sintetski plin, koji se uobičajeno u sklopu postrojenja dodatno obrađuje kako bi se dobili drugi korisni produkti ili se koristi za dobivanje električne i/ili toplinske energije. Pregled postojećih postrojenja pokazao je da se proces isplinjavanja pojavljuje u raznovrsnim inačicama, može se koristiti za oporabu većine otpadnih materijala te se odvija pri temperaturama od 700 – 1600 °C uz prisutnost agensa (zrak, vodena para, kisik). Produkt procesa isplinjavanja, odnosno udio sintetskog plina u produktu i njegov sastav, značajno ovisi o parametrima procesa poput sastava ulazne sirovine, agensa koji se koristi za isplinjavanje, masenog omjera agensa i ulazne sirovine te temperature radnog procesa. Poželjno je da u sastavu sintetskog plina bude što veći udio vodika i ugljikovog monoksida, no zbog realnih uvjeta vođenja procesa česti su značajni udjeli metana, ugljikovog dioksida i drugih plinova.

Podaci o procesima isplinjavanja plastičnih otpada u postojećim postrojenjima poslužili su za postavljanje parametara potencijalnog postrojenja dnevnog kapaciteta 10 tona za ostatni industrijski plastični otpad koje bi se izgradilo u sklopu privatnog poduzeća Pos – Plast d.o.o. Proces isplinjavanja i njegovi produkti uvelike ovise o sastavu ulazne sirovine pa se u proračunu koristila i dostupna literatura koja opisuje procese isplinjavanja polimernih materijala koji bi se koristili kao sirovina u procesu. Odlučeno je da će se u sklopu postrojenja iz sintetskog plina pomoću plinske turbine proizvoditi električna i toplinska energija iz razloga jer je njih jednostavnije plasirati na tržištu nego sintetski plin. Također su prigodne za pokrivanje vlastite potrošnje postrojenja (održavanje stalne temperature reaktora, pogon pumpi, itd.). Za određivanje troškova postrojenja za isplinjavanje korišteni su podaci postojećih postrojenja za isplinjavanje miješanog komunalnog otpada i plastičnog otpada. Dodatno su određene vrijednosti investicije za instalaciju plinske turbine, generatora pare, izmjenjivača topline i uspostavu centralnog sustava grijanja.

S podacima dobivenim pregledom literature i proračunom napravljena je analiza isplativosti postrojenja za isplinjavanje ostatnog industrijskog plastičnog otpada za potrebe poduzeća Pos – Plast d.o.o. Investicija ima unutrašnju stopu povrata od 4,89%. Uz diskontnu stopu od 5,86% investicija je neisplativa. Ukupni gubitak na kraju životnog vijeka iznosi 444.187 €, a postrojenje bi bilo isplativo ukoliko bi njegov dnevni kapacitet iznosio 11,4 tone. Naplaćivanjem naknade proizvođačima plastičnog otpada za njegovo zbrinjavanje u iznosu od 17 € po toni otpada

postrojenje je isplativo s unutrašnjom stopom povrata od 6,35%. Minimalni iznos naknade uz koji je investicija isplativa iznosi 11,20 € po toni otpada. Naknada od 17 € po toni dovoljno je niska u odnosu na cijenu zbrinjavanja otpada na odlagalištu (47,48 € po toni) i cijenu spaljivanja otpada (30 € po toni) da postrojenje bude tržišno konkurentno rješenje za zbrinjavanje otpada.

Analiza osjetljivosti pokazala je koji parametri imaju najveći utjecaj na isplativost investicije u ovakvo postrojenje, a to su donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina, udio sintetskog plina u proizvodu, cijena električne energije i cijena investicije postrojenja. Ukoliko se proces pažljivo kalibrira mogla bi se postići veća donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina i/ili veći udio sintetskog plina u proizvodu čime bi postrojenje na kraju životnog vijeka bilo isplativo. Ukoliko bi došlo do poskupljenja električne energije, ona bi se prodavala po višoj cijeni i time postrojenje postiglo uvjet isplativosti. Također, komercijalizacijom tehnologije isplinjavanja otpada, mogao bi se očekivati pad cijena tehnologije s vremenom. Pad cijena komponenata postrojenja značilo bi manju cijenu investicije, čime bi ovakvo postrojenje za isplinjavanje ostatnog industrijskog plastičnog otpada moglo biti isplativo. Cijena toplinske energije te troškovi održavanja i radne snage nemaju veliki utjecaj na isplativost postrojenja pošto poput ostalih parametara razmatranih u analizi osjetljivosti no ipak bi povećanje cijene toplinske energije, odnosno smanjenje troškova pozitivno utjecalo na prihode postrojenja. Minimalna cijena toplinske energije uz koju je investicija isplativa, 0,039 €/kWh, usporedila se s cijenama drugih izvora toplinske energije poput drva (0,031 €/kWh), prirodnog plina (0,032 €/kWh), električne struje (0,15 €/kWh odnosno 0,11 €/kWh) i loživog ulja (0,72 €/kWh). Za potencijalne potrošače u okolici postrojenja (kućanstva, privatna poduzeća, industrijska postrojenja), otkup toplinske energije postrojenja bio bi isplativiji u odnosu na korištenje električne energije ili loživog ulja za pokrivanje toplinskih potreba.

Provedena je dodatna analiza kojom se uvidjelo da izgradnja postrojenja za trenutni raspoloživi kapacitet ostatnog industrijskog plastičnog otpada kojim raspolaže poduzeće Pos – Plast d.o.o od 2 tone dnevno, može biti isplativa jedino ako se značajnije promjeni više parametara koji su razmatrani u analizi osjetljivosti, poput cijena investicije, donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina, udio sintetskog plina u produktu, cijena električne energije i ako se uvede naknada za zbrinjavanje otpada.

Proces isplinjavanja može se koristiti za energetske oporabu većine otpadnih materijala te se njegov produkt, sintetski plin može iskoristiti na različite načine. Mali je broj postojećih komercijalnih postrojenja za isplinjavanje plastičnog otpada koji uspješno posluju no razvojem tehnologije usred sve veće potrebe za oporabom plastičnog otpada kojom bi se smanjila njena količina na odlagalištima može se očekivati porast konkurentnosti procesa isplinjavanja.

Literatura

- [1] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49183>; pristupljeno 4.11.2021.
- [2] T. Filetin, F. Kovačiček, and J. Indof, *Svojstva i primjena materijala*, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013.
- [3] <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/> pristupljeno 2.11.2021.
- [4] <https://www.bioenergyconsult.com/plastic-wastes-management/>; pristupljeno 4.11.2021.
- [5] https://www.researchgate.net/profile/Mohanraj-Chandran/publication/339905534_Conversion_of_plastic_waste_to_fuel/links/5e982e474585150839e08d12/Conversion-of-plastic-waste-to-fuel.pdf#page=36; pristupljeno 4.11.2021.
- [6] <https://www.sciencehistory.org/the-history-and-future-of-plastics>; pristupljeno 4.11.2021.
- [7] <https://www.britannica.com/science/nylon>; pristupljeno 4.11.2021.
- [8] <https://www.britannica.com/science/acrylic>; pristupljeno 4.11.2021.
- [9] <http://energy.cleartheair.org.hk/wp-content/uploads/2012/05/Environmental-and-Economic-Analysis-of-Emerging-Plastics-Conversion-Technologies.pdf>; pristupljeno 9.11.2021.
- [10] Haig, S., Morrish, L., Morton, R., Onwuamaegbu, U., Speller, P., Wilkinson, S., *Plastics to oil products IFM002 final report*, Zero Waste Scotland
- [11] Ardolino, F., Lodato C., Astrup, T., F., Arena, U., *Energy recovery from plastic and biomass waste by means of fluidized bed gasification: A life cycle inventory model*, *Energy*, 165, pp. 299-314, 2018.
- [12] Ciotti R., Himebaugh E., Serven R.F., Starr R.M., *Assessing the Feasibility of Chemical Recycling for Plastics in Copenhagen*, Copenhagen Solutions Lab, svibanj 2020.
- [13] Tukker, A., de Groot, H., Simons, L., Wiegersma, S., *Chemical Recycling of Plastics Waste (PVC and other resins)*, TNO Institute of Strategy, 1999.
- [14] Ducharme, C., *Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes*, Columbia University, rujan 2010.

- [15] <https://pos-plast.hr/o-nama/>; pristupljeno 22.11.2021.
- [16] <https://pos-plast.hr/>; pristupljeno 22.11.2021.
- [17] D. Bernat, Diplomski rad, Analiza izvedivosti postrojenja za termokemijsku konverziju industrijskog plastičnog otpada, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [18] <https://pos-plast.hr/proizvodi-i-usluge/>; pristupljeno 23.11.2021.
- [19] <http://roo-preglednik.azo.hr/ViewData.aspx?qid=8>; pristupljeno 23.11.2021.
- [20] <https://www.laboratuar.com/hr/testler/kimyasal-testler/ftir-spektroskopi-analizleri/>; pristupljeno 24.11.2021.
- [21] <https://www.plasticextrusiontech.net/resources/what-is-abs-material/>; pristupljeno 24.11.2021.
- [22] <https://www.terchemicals.com/en/productdetail/ethylene-acrylic-acid-copolymer>; pristupljeno 24.11.2021.
- [23] <https://nsb-polymers.de/en/ea-ethylene-acrylic-acid-copolymers/>; pristupljeno 24.11.2021.
- [24] <https://blog.impactplastics.co/blog/what-is-evoh-and-how-is-it-used-in-food-packaging>; pristupljeno 24.11.2021.
- [25] https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/DiMP_3_predavanje_2016_2017%5B3%5D.pdf; pristupljeno 24.11.2021.
- [26] <https://auroraplastics.com/materials/cpe-alloys/>; pristupljeno 24.11.2021.
- [27] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49115>; pristupljeno 24.11.2021.
- [28] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Poliamidi>; pristupljeno 24.11.2021.
- [29] <https://en.wikipedia.org/wiki/Polycarbonate>; pristupljeno 24.11.2021.
- [30] A. Erkiaga, G. Lopez, M. Amutio. J. Bilbao, M. Olazar, Syngas from steam gasification of polyethylene in a conical spouted bed reactor, Fuel 109, pp. 461-469, 2013.
- [31] V. Wilk, H. Hofbauer, Conversion of mixed plastic wastes in a dual fluidized bed steam gasifier, Fuel 107, pp. 787-799
- [32] Kovač A., Presentacija Vodik i gorivni članci, kolegij Vodik i gorivni članci, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za energetska postrojenja, energetiku i okoliš, 2021.

- [33] Saebea D., Ruengrit P., Arpornwichanop A., Patcharavorachot Y., Gasification of plastic waste for synthesis gas production, Energy Reports, Volume 6, Supplement 1, Pages 202-207, veljača 2020.
- [34] Nedjalkov I., Yoshiie R., Nunome Y., Ueki Y., Naruse I., Products of High Temperature Gasification of ABS, PC and PE, Journal of the Combustion Society of Japan Vol.58 No.186 pp. 234-241, 2016.
- [35] Bai B., Liu Y., Meng X., Liu C., Zhang H., Zhang W., Jin H., Experimental investigation on gasification characteristics of polycarbonate (PC) microplastics in supercritical water, Journal of the Energy Institute, 2019.
- [36] Schneider D. R., Prezentacija; 6. Vrste energetske oporabe otpada Tehnologije (termička obrada), Piroлиза i isplinjavanje, Kolegij "Energetska oporaba otpada i otpadnih materijala", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za energetska postrojenja, energetiku i okoliš, 2019.
- [37] Waste to energy in the age of the circular economy, Compendium of case studies and emerging technologies, Asian Development Bank, studeni 2020.
- [38] <https://www.xe.com/currencyconverter/convert/?Amount=1&From=USD&To=EUR>; pristupljeno 2.12.2021.
- [39] https://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm; pristupljeno 2.12.2021.
- [40] <https://inflation.iamkate.com/>; pristupljeno 2.12.2021.
- [41] <https://www.inflationtool.com/euro>; pristupljeno 2.12.2021.
- [42] Al Salem S. M., Plastics to Energy – Fuel, Chemicals and Sustainability Implications, William Andrew (Elsevier), Chennai, 2019., (Gasification of Plastic Solid Waste and Competitive Technologies)
- [43] Cho M.H., Mun T.Y., Choi Y.K., Kim J.S., Two-stage air gasification of mixed plastic waste: Olivine as the bed material and effects of various additives and a nickel-plated distributor on the tar removal, Energy xxx, pp. 1-7, 2014.
- [44] Wang J., Takarada T., Role of Calcium Hydroxide in Supercritical Water Gasification of Low-Rank Coal, Energy and Fuels, pp. 356-362., 2001
- [45] Barišić – Jaman A., Diplomski rad, Analiza mjerenih koncentracija lebdećih čestica (PM2.5 i PM10) u zaštićenim područjima Hrvatske, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera – Kemijski odjel, Osijek, 2016.

[46] <https://www.zakon.hr/z/2848/Zakon-o-gospodarenju-otpadom>; pristupljeno 7.12.2021.

[47] <https://viozz.hr/cjenik>; Excel tablica „Pregled cijena vodnih usluga_NOVA ODLUKA_1_5_19“ za grad Vrbovec, pristupljeno 7.12.2021.

[48] <https://www.cropex.hr/hr/trgovanja/unutardnevno-trziste/rezultati-unutardnevnog-trzista.html>.; pristupljeno 15.12.2021.

[50] https://www.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2021/09-01-01_06_2021.htm; pristupljeno 8.12.2021.

[51] https://www.hbor.hr/kreditni_program/investicije-privatnog-sektora/; pristupljeno 8.12.2021.

[52] Zakon o porezu na dobit (*Redakcijski pročišćeni tekst, 'Narodne novine' br. 177/04, 90/05, 57/06, 146/08, 80/10, 22/12, 148/13, 143/14, 50/16, 115/16, 106/18, 121/19, 32/20, 138/20*), na snazi i primjenjuje se od 1. siječnja 2021.

[53] Al Salem S. M., *Plastics to Energy – Fuel, Chemicals and Sustainability Implications*, William Andrew (Elsevier), Chennai, 2019., *Emissions and Environmental Burdens Associated With Plastic Solid Waste Management*

[54] <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=49147>; pristupljeno 9.12.2021.

[55] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=49145>; pristupljeno 9.12.2021.

[56] <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49251>; pristupljeno 9.12.2021.

[57] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49209>; pristupljeno 9.12.2021.

[58] <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49224>; pristupljeno 9.12.2021.

[59] http://enerpedia.net/index.php/ENERGETSKA_EKONOMIKA#Sada.C5.A1nja_vrijednost_novca; pristupljeno 10.12.2021.

[60] <https://alphacapitalis.com/glossary/interna-stopa-povrata/>; pristupljeno 10.12.2021.

[61] Miloš Sprčić D., *Prezentacija Trošak kapitala, kolegij „Osnove financiranja poduzeća“*, Ekonomski fakultet, Zagreb

[62] <https://netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/intro-to-gasification>; pristupljeno 11.12.2021.

- [63] <https://slobodnadalmacija.hr/vijesti/hrvatska/evo-kako-se-krecu-cijene-gradevinskih-zemljista-u-hrvatskoj-i-tko-najvise-kupuje-najskuplje-je-u-dalmaciji-no-jos-se-mogu-naci-i-kvadrati-po-jedan-euro-na-idilicnim-lokacijama-554243>; pristupljeno 23.12.2021.
- [64] <https://www.cistoca.hr/usluge/cjenik-usluga-1230/1230>; pristupljeno 13.12.2021.
- [65] https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html; pristupljeno 14.12.2021
- [66] <https://eckplastics.com/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs/>; pristupljeno 14.12.2021.
- [67] https://www.wikiwand.com/en/High-density_polyethylene; pristupljeno 14.12.2021.
- [68] Halasz B., Galović A., Boras I., Toplinske tablice, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [69] <https://www.ijf.hr/upload/files/file/PV/2012/9/klemencic.pdf>; pristupljeno 16.12.2021.
- [70] <https://www.plin-vrbovec.hr/index.php/potrosaci/cijene>; pristupljeno 16.12.2021.
- [71] Franc-Dąbrowska J., Mądra-Sawicka M., Milewska A., Energy Sector Risk and Cost of Capital Assessment—Companies and Investors Perspective, *Energies*, 14, 1613, 2021.
- [72] Pauschert D., Study of Equipment Prices in the Power Sector, ESMAP Technical Paper 122/09, 2009.
- [73] <https://farmdocdaily.illinois.edu/2020/01/2019-ethanol-production-profits-just-how-bad-was-it.html>; pristupljeno 23.12.2021.
- [74] Xiao R., Jin B., Zhou H., Zhong Z., Zhang M., Air gasification of polypropylene plastic waste in fluidized bed gasifier, *Energy Convers. Manag.* 48 (3), pp. 778-786., 2007.
- [75] Wu C., Williams P.T., Pyrolysis-gasification of plastics, mixed plastics and real-world plastic waste with and without Ni-Mg-Al catalyst, *Fuel* 89 (10), pp. 3022-3032., 2010.
- [76] Toledo J.M., Aznar M.P., Sancho J.A., Catalytic air gasification of plastic waste (polypropylene) in a fluidized bed. Part II: effects of some operating variables on the quality of the raw gas produced using olivine as the in-bed material, *Ind. Eng. Chem. Res.* 50 (21), pp. 11815-11821., 2011.
- [77] Sancho J.A., Aznar M.P., Toledo J.M., Catalytic air gasification of plastic waste (polypropylene) in fluidized bed. Part I: use of in-gasifier bed additives, *Ind. Eng. Chem. Res.* 47 (4), pp. 1005-1010., 2008.

- [78] Arena U., Zaccariello L., Mastellone M.L., Tar removal during the fluidized bed gasification of plastic waste, *Waste Manag.* 29 (2), pp. 783-791., 2009.
- [79] Erkiaga A., Lopez G, Amutio M., Bilbao J., Olazar M., Syngas from steam gasification of polyethylene in a conical spouted bed reactor, *Fuel* 109, pp. 461-469., 2013.
- [80] Cho M.H., Mun T.Y., Kim J.S., Production of low-tar producer gas from air gasification of mixed plastic waste in a two-stage gasifier using olivine combined with activated carbon, *Energy* 58, pp. 688-694., 2013.
- [81] Kim J.W., Mun T.Y., Kim J.O., Kim J.S., Air gasification of mixed plastic wastes using a two-stage gasifier for the production of producer gas with low tar and a high caloric value, *Fuel* 90 (6), pp. 2266-2272, 2011.
- [82] Wu C., Williams P.T., Hydrogen production by steam gasification of polypropylene with various nickel catalysts, *Appl. Catal., B* 87 (3-4), pp. 152-161., 2009
- [83] Wu C., Williams P.T., Pyrolysis-gasification of plastics, mixed plastics and real-world plastic waste with and without Ni-Mg-Al catalyst, *Fuel* 89 (10), pp. 3022-3032., 2010.
- [84] Saad J.M., Williams P.T., Pyrolysis-catalytic dry (CO₂) reforming of waste plastics for syngas production: influence of process parameters, *Fuel* 193, pp. 7-14., 2017.
- [85] Alvarez J. i sur., Hydrogen production from biomass and plastic mixtures by pyrolysis-gasification, *Int. J. Hydrogen Energy* 39 (21), pp. 10883-10891., 2014.
- [86] Pinto F., Franco C., André R.N., Miranda M., Gulyurtlu I., Cabrita I., Co-gasification study of biomass mixed with plastic wastes, *Fuel* 81 (3), pp. 291-297, 2002,
- [87] Tang L., Huang H., Decomposition of poly-ethylene in radio-frequency nitrogen and water steam plasmas under reduced pressures, *Fuel Process. Technol.* 88, pp. 549-556., 2007.
- [88] Vasseur C., Bougaran G., Garnier M., Hamelin J., Leboulanger C., Le Chevanton M., Mostajir B., Sialve B., Steyer J.P., Fouilland E., Carbon conversion efficiency and population dynamics of a marine algae–bacteria consortium growing on simplified synthetic digestate: First step in a bioprocess coupling algal production and anaerobic digestion, *Bioresource Technology* 119, pp. 79-87., 2012.
- [89] Hayashi J., Kudo S., Kim H.S., Norinaga K., Matsuoka K., Hosokai S., Low-Temperature Gasification of Biomass and Lignite: Consideration of Key Thermochemical Phenomena, Rearrangement of Reactions, and Reactor Configuration, *Energy Fuels* 28, 1, pp. 4-21., 2014.

- [90] Baratieri M., Baggio P., Bosio B., Grigante M., Longo G.A., The use of biomass syngas in IC engines and CCGT plants: A comparative analysis, *Applied Thermal Engineering* 29, pp. 3309-3318., 2009.
- [91] <http://www.fzoeu.hr/hr/naknada-za-odlaganje-komunalnog-otpada/1421>; pristupljeno 28.12.2021.
- [92] <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/typical-charge-gate-fee-and>; pristupljeno 28.12.2021.
- [93] https://european-union.europa.eu/principles-countries-history/key-facts-and-figures/life-eu_hr; pristupljeno 28.12.2021.
- [94] <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data>; pristupljeno 1.1.2022.
- [95] <http://www.reciklaznodvoriste.solin.hr/index.php/gospodarenje-otpadom/hijerarhija-gospodarenja-otpadom>; pristupljeno 1.1.2022.
- [96] <https://www.fzoeu.hr/hr/obrada/8357>; pristupljeno 1.1.2022.
- [97] Schneider D. R., Tomić T., Prezentacija; Uloga energetske uporabe otpada u cirkularnoj ekonomiji, Kolegij “Energetska uporaba otpada i otpadnih materijala”, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za energetska postrojenja, energetiku i okoliš, 2019.
- [98] Havočić D, Diplomski rad, Matematički model procesa pirolize plastičnog otpada, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [99] Dorotić H., Pukšec T., Schneider D. R., Duić N., Evaluation of district heating with regard to individual systems - Importance of carbon and cost allocation in cogeneration units, *Energy*, 221, 119905, 2021.
- [100] <https://www.hep.hr/toplinarstvo/krajnji-kupci/cijene-30/30>; pristupljeno 7.1.2022.
- [101] Warringa G., Waste Incineration under the EU ETS - An assessment of climate benefits, Project no. 20121-18, Delft, CE Delft, 2021.
- [102] *Pan-European Thermal Atlas (PETA) 5.1*
<https://euf.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=8d51f3708ea54fb9b732ba0c94409133>; pristupljeno 7.1.2022.
- [103] <https://www.hep.hr/elektra/poduzetnistvo/tarifne-stavke-cijene-1578/1578>; pristupljeno 8.1.2022.

[104] <https://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547>; pristupljeno 8.1.2022.

[105] <https://www.servis-perkovic.hr/financijska-usporedba-energenata>; pristupljeno 8.1.2022.

PRILOZI

I. Podaci postojećih postrojenja korišteni u tehno-ekonomskoj analizi

II. Dodatni podaci

III. CD-R disk

Prilog I. Podaci postojećih postrojenja korišteni u tehno-ekonomskoj analizi

Tablica priloga 1.1 prikazuje konverzijske faktore korištene prilikom pretvorbe 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 |
| Galon | 1 gal | = | 3,7854 | l |
| Mega Joule | 1 MJ | = | 0,000278 | MWh |

Tablica priloga 1.2 prikazuje tečajevne valuta korištene u ekonomskoj analizi. Tečaj valuta preuzet je 30.11.2021. iz dostupnog izvora [38].

Tablica priloga 1.2 Tečajevi valuta [38]

| | | | | |
|---|---------------------------|---|------------|----------------|
| 1 | USD (\$) - Američki dolar | = | 0,88475661 | EUR (€) - Euro |
| 1 | GBP (£) - Britanska funta | = | 1,1761222 | EUR (€) - Euro |
| 1 | HRK (kn) - Hrvatska kuna | = | 0,13290322 | EUR (€) - Euro |

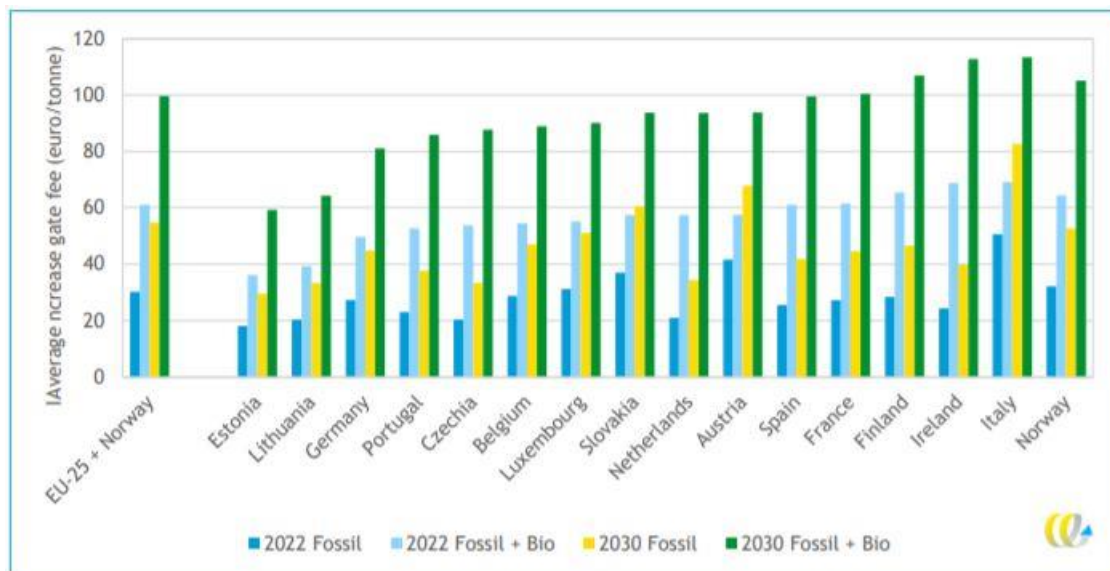
Iduće tri tablice prikazuju ulazne i izlazne tokove postrojenja, njihove parametre i podatke o troškovima, podaci su prikupljeni pregledom dostupne literature. *

* Navedeni financijski podaci navedeni u Tablici 1.4 u Prilogu I. vrijede za kapacitet postrojenja na godišnjoj razini, dok su u većini slučajeva ulazni i izlazni tokovi procesa iskazani u toni po danu. Može postojati razlika između tih podataka jer se analize ulaznih i izlaznih tokova odrađuju za manje uzorke prije same izgradnje postrojenja, čiji se iznos investicije računa za potrošnju sirovine na godišnjoj razini. Također, postrojenje P23 prisutno u Tablici 1.4 u Prilogu I. pojavljuje se samo u ekonomskoj analizi pošto je on usporedni slučaj investicijskog troška postrojenja P19.

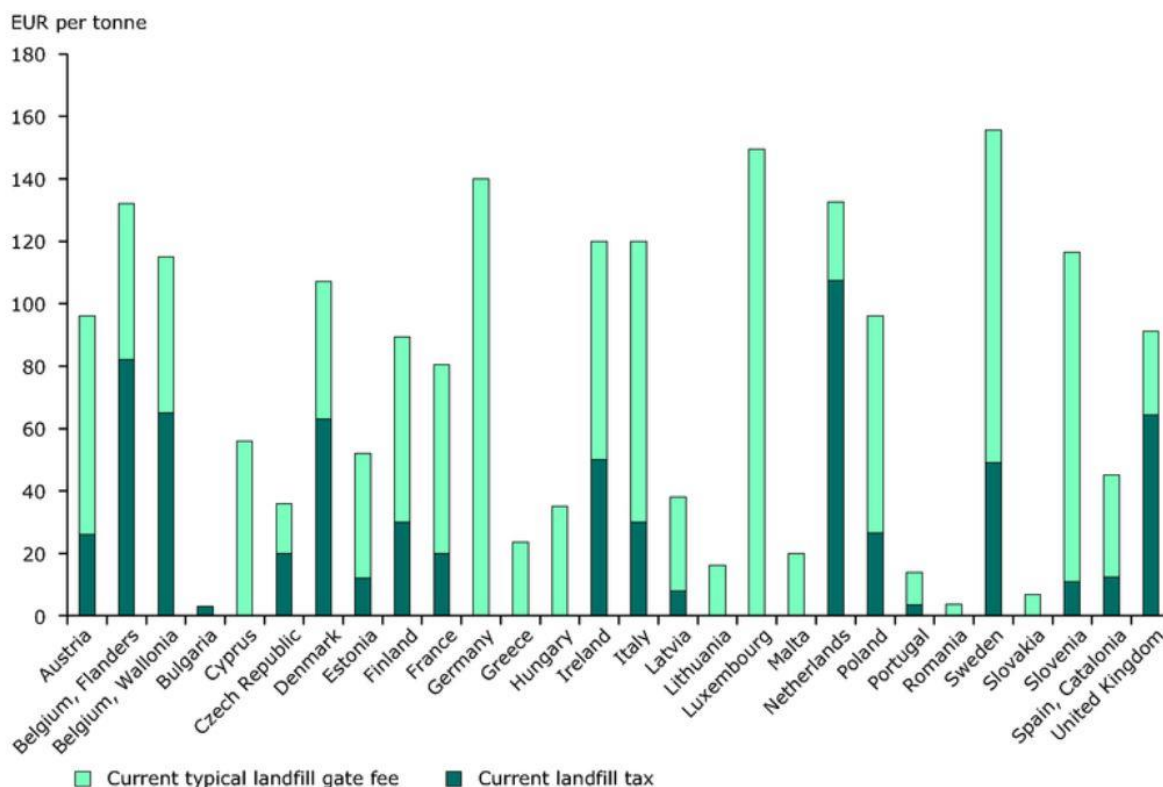
Prilog II. Dodatni podaci**Tablica 2.1 Cijene toplinske energije za centralni toplinski sustav u Zagrebu [100]**

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

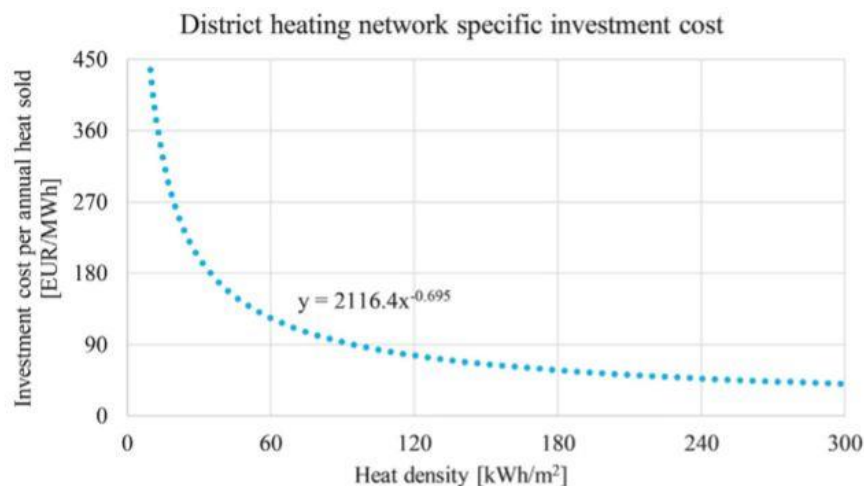
Navedene cijene/tarife/naknade su u primjeni od 01.09.2014.
Na navedene cijene/tarife/naknade obračunava se PDV.
* Naknada za djelatnost kupca toplinske energije naplaćuje se krajnjim kupcima spojenim na zajedničko mjerilo toplinske energije
**PTV - potrošna topla voda



Slika 2.1 Cijene spaljivanja otpada u Europi [101]



Slika 2.2 Cijene naknade za zbrinjavanje otpada u Europskoj Uniji 2013. godine



Slika 2.3. Specifična cijena investicije za infrastrukturu centralnog toplinskog sustava kao funkcija toplinske gustoće [99]

| Kategorija/ naponska razina | | Tarifni model | Tarifni element | | | | | |
|-----------------------------|---------------|-----------------------|-----------------|----------|----------|-------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | | Radna energija | | | Radna snaga | Prekomjerna jalova energija | Naknada za obračunsko mjesto |
| | | | JT | VT | NT | | | |
| | | | [kn/kWh] | [kn/kWh] | [kn/kWh] | [kn/kW] | [kn/kvarh] | [kn/mj] |
| | | Tarifne stavke | | | | | | |
| Poduzetništvo | Visoki napon | Bijeli | - | 1,0693 | 0,6255 | 14,00 | 0,16 | 68,00 |
| | Srednji napon | Bijeli | - | 1,1458 | 0,6616 | 26,00 | 0,15 | 66,00 |
| | Niski napon | Plavi | 1,2892 | - | - | - | 0,15 | 41,30 |
| | | Bijeli | - | 1,4785 | 0,8338 | - | 0,15 | 41,30 |
| | | Crveni | - | 1,1930 | 0,6782 | 38,50 | 0,15 | 41,30 |
| | | Žuti (javna rasvjeta) | 0,9963 | - | - | - | - | 14,70 |
| | VN-OPS* | Bijeli | - | 1,0293 | 0,6055 | - | - | - |

Slika 2.4. Tarifne stavke za kupce kategorije poduzetništvo, za prva dva mjeseca korištenja zajamčene opskrbe (jedinstveni račun - energija i naknada za korištenje mreže); u primjeni od 1. listopada 2021. godine:

| Kategorija | | Tarifni model | Tarifni element | | | | | |
|------------------|-------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|-----------------------------|---|
| | | | Radna energija | | | Radna snaga | Prekomjerna jalova energija | Naknada za obračunsko mjesto i Naknada za opskrbu |
| | | | JT | VT | NT | | | |
| | | | [kn/kWh] | [kn/kWh] | [kn/kWh] | [kn/kW] | [kn/kvarh] | [kn/mj] |
| | | Tarifne stavke | | | | | | |
| Kućanstvo | Niski napon | Plavi | 0,77 (0,87) | - | - | - | - | 17,40 (19,66) |
| | | Bijeli | - | 0,84 (0,95) | 0,41 (0,46) | - | - | 17,40 (19,66) |
| | | Crveni | - | 0,70 (0,79) | 0,34 (0,38) | 38,50 (43,51) | - | 48,70 (55,03) |
| | | Crni | 0,37 (0,42) | - | - | - | - | 6,20 (7,01) |

Slika 2.5. Tarifne stavke za kupce kategorije kućanstvo (jedinstveni račun - energija i naknada za korištenje mreže); u primjeni od 1. siječnja 2019. godini (HEP)