Komparativna analiza životnog ciklusa tehnologija za energetsku oporabu plastičnog otpada

Petković, Kristina

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:235:838874

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Kristina Petković

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

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

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Danielu R. Schneideru te poslijedoktorandu dr. sc. Tihomiru Tomiću na pomoći, strpljenju i korisnim savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Kristina Petković

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, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Kristina Petković** Mat. br.: 0035199185

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Komparativna analiza životnog ciklusa tehnologija za energetsku oporabu plastičnog otpada**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparative analysis of the life cycle of technologies for energy recovery of plastic waste**

Opis zadatka:

Sukladno smjernicama EU, potrebno je razmotriti usklađenost razmatranih sustava gospodarenja otpada s ciljevima cirkularne ekonomije, pri čemu se naglasak stavlja na analizu životnog ciklusa. Za sve razmatrane tehnologije i proizvodne lance unutar sustava gospodarenja otpadom, potrebno je provesti procjenu utjecaja životnog ciklusa (LCA). S energetskog aspekta, plastični otpad je vrlo vrijedna sirovina koji se, uz konvencionalne tehnologije termičke energetske oporabe, može energetski oporabiti u procesima pirolize i isplinjavanja. Ove tehnologije kao produkt daju tekuća i plinovita goriva, koja se mogu koristiti za naknadne energetske transformacije ili kao ulazna sirovina u industriji.
Stoga je, prilikom razmatranja implementacije ovih tehnologija, potrebno provesti analizu s aspekta procjene životnog ciklusa s ciljem usporedbe mogućih rješenja problema plastičnog otpada te iznalaženja rješenja s najmanjim sveukupnim utjecajem na okoliš. U ovome radu će se koristiti LCI baza Ecoinvent kao i OpenLCA program za modeliranje životnih ciklusa te usporedbu tehnologija za energetsku oporabu plastičnog otpada. S obzirom da tehnologije pirolize i isplinjavanja plastičnih materijala nisu zastupljene u korištenoj LCI bazi, prije provođenja LCA analize potrebno je modelirati njihove LCI setove na bazi podataka iz dostupne literature.
U okviru diplomskog rada potrebno je:

- napraviti pregled literature o tehnologijama za pirolizu i isplinjavanje,
- prikupiti dostupne podatke o ulaznim i izlaznim tokovima postrojenja za pirolizu i isplinjavanje plastičnog otpada,
- modelirati LCI setove za tehnologije pirolize i isplinjavanja na bazi prikupljenih podataka,
- provesti usporednu LCA analizu tehnologija za energetsku oporabu plastičnog otpada.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
2. svibnja 2019.	4. srpnja 2019.	10., 11. i 12. srpnja 2019.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA VI
SAŽETAK VII
SUMMARY VIII
1. UVOD 1
2. EU SMJERNICE 6
2.1. UN: Program održivog razvoja do 2030. godine 6
2.2. Cirkularna ekonomija 6
2.3. Plastika u kružnom gospodarstvu 8
3. PLASTIČNI OTPAD 9
3.1. Podjela polimernih materijala 9
3.2. Sastav plastičnog otpada 10
3.3. Oporaba plastičnog otpada 12
3.3.1. Materijalna oporaba 12
3.3.2. Energijska oporaba 13
3.3.3. Kemijska oporaba 14
3.3.3.1. Hidroliza 14
3.3.3.2. Hidriranje 14
4. PIROLIZA 15
4.1. Kotlasti i polukotlasti reaktori 16
4.2. Reaktor za pirolizu u fiksnom sloju 17
4.3. Reaktor za pirolizu u fluidizirajućem sloju 17
4.4. Konusni reaktor 18
4.5. Katalizatori 19
4.6. Produkti 19
5. ISPLINJAVANJE 20
5.1. Reaktor za isplinjavanje u fiksnom sloju 22
5.2. Reaktor za isplinjavanje u fluidizirajućem sloju 22
5.3. Konusni reaktor 24
5.4. Plazma reaktor 24
6. LCA - PROCJENA ŽIVOTNOG CIKLUSA 26
6.1. Faze procjene životnog ciklusa 26
6.1.1. Definiranje svrhe i opsega analize 27
6.1.2. Prikupljanje i analiziranje podataka 27
6.1.3. Određivanje utjecaja na okoliš 28
6.1.4. Interpretacija 29
6.2. Dodatni analitički modeli 30

6.3. LCA računalni programi 31
6.4. LCI baze podataka 32
6.5. Metode procjene utjecaja na okoliš 32
6.5.1. CML 2001 (baseline) 33
6.5.2. Eco-indicator 99 35
7. MODELIRANJE LCI SETOVA 37
7.1. Definiranje cilja i granica analize 37
7.2. Sakupljanje podataka 38
7.2.1. Praćeni parametri 38
7.2.2. LCI setovi 39
7.2.3. Prilagodba setova za LCA analizu 42
7.2.3.1. LCI piroliza 42
7.2.3.2. LCI isplinjavanje 46
8. USPOREDNA LCA ANALIZA 49
8.1. Analizirani scenariji gospodarenja plastičnim otpadom 49
8.2. Prikaz modeliranih sustava 51
9. REZULTATI I RASPRAVA 54
9.1. Rezultati CML metoda 54
9.1.1. Apsolutni rezultati 54
9.1.1.1. Pregled utjecaja pojedinih faza scenarija 56
9.1.2. Rezultati usporedne analize 63
9.1.2.1. Usporedba s referentnim scenarijem 63
9.1.2.2. Relativna usporedba 66
9.2. Rezultati Eco-indicatora 67
9.2.1. Pregled utjecaja pojedinih faza scenarija 70
10. ZAKLJUČAK 75
LITERATURA 78
PRILOZI 82
PRILOG I. Podaci iz realnih postrojenja korišteni za formiranje LCI setova 83

POPIS SLIKA

Slika 1. Hijerarhija gospodarenja otpadom[2] 1
Slika 2. Kuznetsova krivulja po pitanju otpada[3] 2
Slika 3. Procijenjeni sastav miješanog komunalnog otpada u RH, 2015.[4] 3
Slika 4. Odvojeno sakupljeni komunalni otpad u 2017. po vrstama[5] 3
Slika 5. Linearna ekonomija[8] 7
Slika 6. Cirkularna ekonomija[8] 7
Slika 7. Proces proizvodnje i uporabe plastičnih proizvoda i mogućnosti oporabe[6] 12
Slika 8. Kotlasti reaktor s miješalicom[15] 16
Slika 9. Reaktor za pirolizu u fiksnom sloju[15] 17
Slika 10. Reaktor za pirolizu u fluidizirajućem sloju[15] 18
Slika 11. Konusni reaktor[15] 18
Slika 12. Reaktor za isplinjavanje u barbutažnom fluidiziranom sloju[17] 22
Slika 13. Reaktor za rasplinjavanje u cirkulirajućem fluidiziranom sloju[17] 23
Slika 14. Dvojni reaktori s fluidizirajućim slojevima[17] 23
Slika 15. Konusni reaktor za isplinjavanje[16] 24
Slika 16. Plazma reaktor[18] 24
Slika 17. Konfiguracija konusnog reaktora i reaktora s fiksnim slojem[16] 25
Slika 18. Konfiguracija konusnog reaktora i reaktora s fluidizirajućim slojem[16] 25
Slika 19. Životni ciklus proizvoda 26
Slika 20. LCA faze[19] 26
Slika 21. Granice LCA analize promatranih tehnologija[13] 37
Slika 22. Procesni podaci piroliza 44
Slika 23. Procesni podaci isplinjavanje 48
Slika 24. Shema toka scenarija I i II 50
Slika 25. Scenarij III 50
Slika 26. Scenarij IV 51
Slika 27. Modeliranje pirolize 51
Slika 28. Modeliranje isplinjavanja 52
Slika 29. Modeliranje spalionice 52
Slika 30. Modeliranje odlaganja 53
Slika 31. Prikaz apsolutnih rezultata CML a). 55
Slika 32. Prikaz apsolutnih rezultata CML b) 55
Slika 33. Isplinjavanje – štetan utjecaj na ljude 57
Slika 34. Isplinjavanje – iscrpljivanje resursa 58
Slika 35. Piroliza – iscrpljivanje resursa 59
Slika 36. Piroliza – acidifikacija 60
Slika 37. Piroliza – fotokemijsko onečišćenje 61
Slika 38. Spaljivanje – klimatske promjene 62
Slika 39. Spaljivanje – eutrofikacija 62
Slika 40. Odlaganje – ekotoksičnost vode 63
Slika 41. Usporedba isplinjavanje CML 64
Slika 42. Usporedba piroliza CML 64
Slika 43. Usporedba spaljivanje CML 65
Slika 44. Relativna usporedba CML 66

Slika 45. Prikaz svih kategorija utjecaja Eco-indicator 68
Slika 46. Prikaz rezultata po pojedinim kategorijama utjecaja Eco-indicator 69
Slika 47. Usporedba indikatora svih tehnologija.....70
Slika 48. Isplinjavanje – ukupni indikator 71
Slika 49. Piroliza – ukupni indikator 72
Slika 50. Spaljivanje – ukupni indikator.....73
Slika 51. Odlaganje – ukupni indikator.....74

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sustav označavanja plastičnih pakiranja[12] 10
Tablica 2. CML 2001 baseline kategorije utjecaja[28] 33
Tablica 3. Eco-indicator 99 kategorije utjecaja[28] 36
Tablica 4. Raspon vrijednosti piroliza 39
Tablica 5. Raspon vrijednosti isplinjavanje 40
Tablica 6. Analiza proizvoda pirolize 43
Tablica 7. Konačni LCI set piroliza 45
Tablica 8. Konačni LCI set isplinjavanje 46
Tablica 9. Prikaz rezultata CML 54
Tablica 10. Rezultati LCA analize korištenjem Eco-indicatora 67

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
LCA	-	eng. *Life Cycle Analysis* – procjena utjecaja životnog ciklusa
LCI	-	eng. *Life Cycle Inventory* – inventar životnog ciklusa
RDF	-	eng. *refuse derived fuel* – gorivo dobiveno iz otpada
SRF	-	eng. *solid recovered fuel* – kruta obnovljena goriva
PE	-	polietilen
PP	-	polipropilen
PS	-	polistiren
PET	-	poli(etilen-tereftalat)
PVC	-	poli(vinil-klorid)
HDPE	-	polietilen visoke gustoće
LDPE	-	polietilen niske gustoće
CSBR	-	eng. *conical spouted bed reactor* – konusni reaktor
FCC	-	eng. *fluid catalytic cracking* – fluid katalitičko krekiranje
ELCA	-	eng. *exergetic life cycle assessment* – eksergijska procjena životnog ciklusa
LCC	-	eng. *life cycle cost* – troškovna procjena životnog ciklusa
SLCA	-	eng. *social life cycle assessment* – procjena socijalnog utjecaja
3E	-	eng. *environment–energy–economy* – integrirana ekološka i ekonomska procjena životnog ciklusa
LCSA	-	eng. *life cycle sustainability assessment* – procjena održivosti životnog ciklusa
LCIA	-	eng. *Life Cycle Impact Assessment* – procjena utjecaja na okoliš
S-LCA	-	eng. *Simplified LCA* – pojednostavljena LCA metoda

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je gospodarenje plastičnim otpadom. Plastični otpad vrlo je vrijedna sirovina s energetskog aspekta te njegovo konačno odlaganje na odlagalištu čini nepovratnu štetu na okoliš. Plastični otpad moguće je energetski oporabiti konvencionalnim tehnologijama termičke energetske oporabe poput spaljivanja i tehnologijama kemijske oporabe. Fokus ovog rada postavljen je na tehnologije kemijske oporabe plastičnog otpada: pirolizu i isplinjavanje. Produkti predmetnih tehnologija su tekuća i plinovita goriva, koja se mogu koristiti za naknadne energetske transformacije ili kao ulazna sirovina u industriji. Sukladno smjernicama EU i modelu cirkularne ekonomije potrebno je razmotriti predmetne tehnologije s naglaskom na analizi životnog ciklusa (LCA analiza, eng. *Life Cycle Analysis*). Dostupne LCI baze podataka ne opisuju predmetne tehnologije energetske oporabe plastičnog otpada te je u okviru ovog rada najprije izvršen detaljan pregled literature te su prikupljeni podaci o ulaznim i izlaznim tokovima postojećih postrojenja za pirolizu i isplinjavanje plastičnog otpada. Na temelju prikupljenih podataka izrađeni su LCI (eng. *Life Cycle Inventory*) setovi podataka razmatranih tehnologija koji opisuju sve ulazne tokove kao što su npr. potrebna električna energija, gorivo i materijali te sve izlazne tokove koji obuhvaćaju korisnu proizvedenu energiju i korisne produkte, ali i nusprodukte kao što su pepeo, šljaka i štetne emisije prema okolišu. Formirani LCI setovi upisani su u računalni program OpenLCA i integrirani u bazu podataka Ecoinvent povezivanjem s dostupnim europskim i lokalnim LCI setovima iz baze. U sklopu rada provedena je usporedna LCA analiza životnih ciklusa predmetnih tehnologija energetske oporabe plastičnog otpada te uobičajeno korištenih rješenja za zbrinjavanje generiranog plastičnog otpada poput njegove termičke obrade u spalionicama otpada s kogeneracijskom proizvodnjom električne i toplinske energije te odlaganja na uređena odlagališta otpada. Provedena je ekološka analiza koja je uključivala utjecaj rada pojedinih sustava s ciljem boljeg razumijevanja pozitivnih učinaka i negativnih ekoloških posljedica koji mogu proizići iz komercijalizacije tehnologija pirolize i isplinjavanja otpadne plastike u usporedbi s postojećim tehnologijama gospodarenja plastičnim otpadom te pronalaženjem rješenja s najmanjim sveukupnim utjecajem na okoliš.

Ključne riječi: gospodarenje otpadom, plastični otpad, piroliza, isplinjavanje, cirkularna ekonomija, LCA, LCI

SUMMARY

Subject of this thesis is plastic waste management. From energetic point of view, plastic waste is quite valuable feedstock and its final disposal at the landfill presents irreversible damage to the environment. Plastic waste can be energetically recovered by chemical recovery techniques and conventional thermal energy recovery technologies such as incineration. The focus of this paper is on the chemical recovery of plastic waste: pyrolysis and gasification. Products of considered technologies are liquid and gaseous fuels, which can be used for subsequent energy transformations or as input feedstock in the industry. According to EU guidelines and model of circular economy it is necessary to validate the considered technologies with an emphasis on life cycle analysis (LCA). The available LCI databases do not include processes pyrolysis and gasification. Therefore, comprehensive survey of literature was carried out to gather all available data about input and output flows of existing facilities with implemented concerned technologies. Based on collected data, LCI (Life Cycle Inventory) datasets for technologies pyrolysis and gasification were created which encompass all input streams, such as the required electrical energy, fuel and materials, and all outflows that include useful energy and useful products, as well as by-products such as ash, slag and harmful emissions to the environment. Formed LCI sets are entered in the OpenLCA software and integrated into the Ecoinvent database by linking to the available European and local LCI sets from the base. Within this paper, a comparative life cycle analysis of the concerned technologies for energy recovery of plastic waste and commonly used solutions for the disposal of generated plastic waste, such as its thermal treatment in waste incinerators with cogeneration production of electrical and thermal energy, and disposal on regulated waste disposal sites has been carried out. An ecological analysis which involved the impacts of the operation of certain systems was carried out with the aim of better understanding the positive effects and negative environmental consequences that may arise from the commercialization of pyrolysis and gasification technologies compared to the existing waste management technologies and by finding solutions with the least overall impact on the environment.

Key words: waste management, plastic waste, pyrolysis, gasification, circular economy, LCA, LCI

1. UVOD

Gospodarenje otpadom jedno je od glavnih pitanja današnjeg društva zbog toga što je razvoj modernog društva popraćen povećanjem količine proizvedenog otpada. Otpad čine tvari ili predmeti koje je vlasnik odbacio, namjerava ili ih mora odbaciti. Ovisno o svojstvima, otpad se može podijeliti na opasni, neopasni i inertni, a prema mjestu nastanka razlikuje se:

- Komunalni otpad
- Industrijski otpad
- Ambalažni otpad
- Građevinski otpad
- Električki i elektronički otpad
- Otpadna vozila i gume

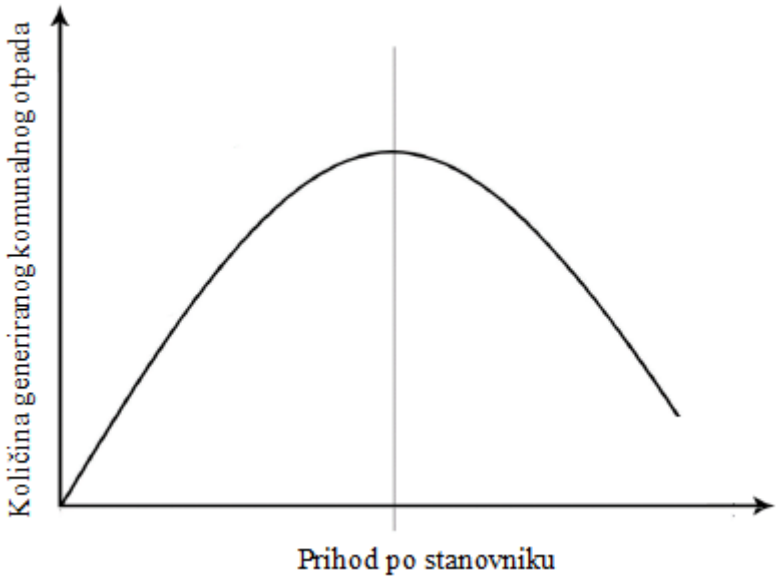
Neodgovarajuće gospodarenje otpadom može rezultirati onečišćenjem zraka, vode i tla, tj. moguć je utjecaj na okoliš i kvalitetu života ljudi te ono predstavlja bitno ekološko pitanje današnjice.[1] Zbog toga je gospodarenju otpadom nužno pristupiti uvažavajući hijerarhiju prioriteta (Slika 1.).

Slika 1. Hijerarhija gospodarenja otpadom[2]

Najprihvatljivije je otpadom gospodariti na način da se što je više moguće smanji njegovo stvaranje, primjerice ponovnim korištenjem proizvoda ili produljenjem životnog vijeka proizvoda.

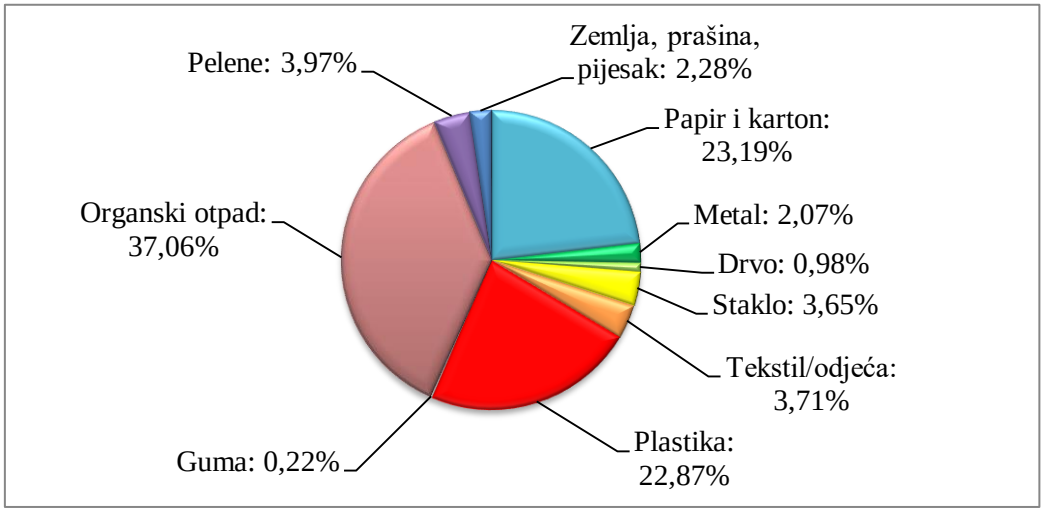
Recikliranje podrazumijeva svaki postupak kojim se otpadni materijal ponovo prerađuju u proizvode, materijale ili tvari, za izvornu ili za neku drugu svrhu. Energiju pohranjenu u otpadu krajnje je moguće tehnički oporabiti spaljivanjem čime se proizvode električna i toplinska energija te kemijskom oporabom čime se stvaraju polazne sirovine za dobivanje drugih kemikalija ili goriva. Preostali dio otpada zbrinjava se na odlagalištima te se hijerarhijskim principom otpadom gospodari na održiv način.

Pojam gospodarenje otpadom podrazumijeva sljedeće aktivnosti: skupljanje, prijevoz, obrada, oporaba i konačno odlaganje, uključujući praćenje te regulaciju navedenih postupaka kao i naknadno održavanje lokacija zbrinjavanja. Skupljanje otpada je prijenos/prijevoz otpada s mjesta korištenja i/ili privremenog odlaganja na mjesto obrade, zbrinjavanja ili odlagališta. Razlikuje se sustav prikupljanja miješanog komunalnog otpada i odvojeno (selektivno) prikupljanje otpada po vrstama. Komunalni otpad, prikupljen uglavnom iz kućanstava, sastoji se od plastike, papira, metala, tekstila, organskog otpada, kože, gume, stakla, keramike i raznih drugih materijala. Sastav otpada ovisi o tipu zajednice, njezinim prihodima i životnim stilovima te stupnju industrijalizacije i komercijalizacije. Općenito, količina generiranog komunalnog otpada raste s visinom dohotka, što opisuje Kuznetsova krivulja po pitanju otpada (engl. *waste Kuznets curve hypothesis - WKC*). WKC krivulja (Slika 2.) indicira da gospodarski rast, odnosno prihod po stanovniku, ima negativan utjecaj na okoliš, tj. na generiranje komunalnog otpada, do određene točke nakon koje se utjecaj smanjuje.[3]

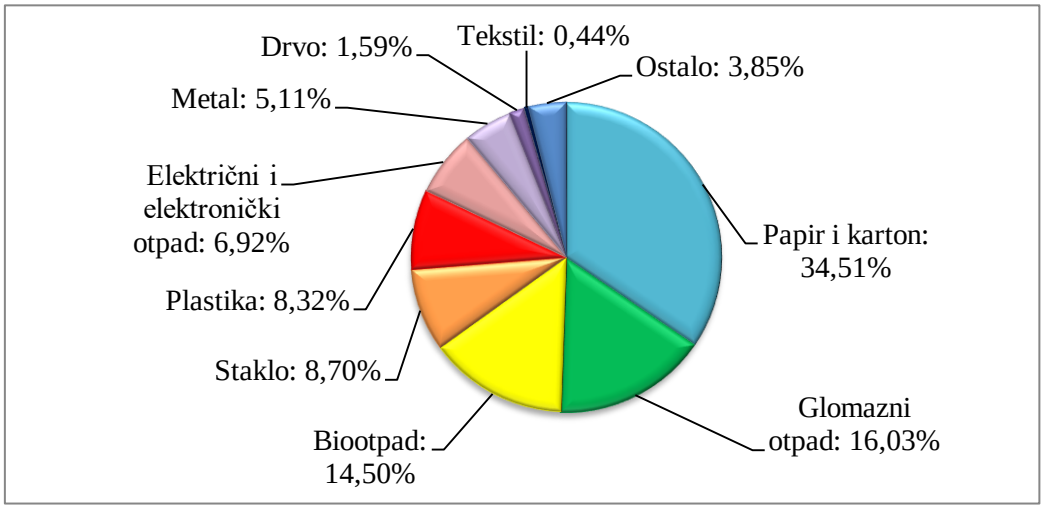


Slika 2. Kuznetsova krivulja po pitanju otpada[3]

Na proizvodnju otpada utjecaj imaju i godišnja doba te se na primjer, tijekom ljeta stvara više otpada od hrane i manje papira. Plastika čini značajan udio prikupljenog komunalnog otpada u svijetu pa tako i u Republici Hrvatskoj (Slika 3.) i (Slika 4.).



Slika 3. Procijenjeni sastav miješanog komunalnog otpada u RH, 2015.[4]



Slika 4. Odvojeno sakupljeni komunalni otpad u 2017. po vrstama[5]

Plastični materijali se ne razgrađuju i prirodno se ne raspadaju već se samo usitnjavaju što predstavlja veliki ekološki problem prvenstveno u morima i oceanima. Usitnjeni komadići plastike narušavaju cjelokupni morski ekosustav zbog toga što ih je teško ukloniti iz mora te ih često morske životinje progutaju što u sve većem broju slučajeva dovodi do njihovog uginuća.

Plastični otpad zbrinut u tlu može ostati isti i do 300 godina, stoga je gospodarenje njime važno pitanje današnje civilizacije. Plastični otpad vrlo je vrijedna sirovina s energetskog aspekta zbog toga što su glavne sirovine za proizvodnju plastike nafta i plin te njegovo nepovratno odlaganje na odlagalištu čini nepovratnu štetu na okoliš, a uz to predstavlja i ekonomski gubitak. Moguće oporabe plastičnog otpada su:[6]

- Materijalna oporaba: -recikliranje
- Kemijska oporaba: -piroliza
  -hidroliza
  -hidriranje
  -isplinjavanje
- Energijska oporaba: -spaljivanje

Sukladno hijerarhiji zbrinjavanja otpada najpoželjniji oblik oporabe plastičnog otpada je materijalno recikliranje. Za kvalitetno recikliranje nužan je dobro organiziran sustav prikupljanja odvojenog plastičnog otpada jer plastični materijali moraju biti gotovo potpuno istog sastava da bi se mogli zajedno reciklirati, a potrebno je i kontrolirati količinu nečistoća u sirovini za recikliranje. Zbog toga, sav plastični otpad nije prikladan za recikliranje te su sljedeća rješenja uvažavajući hijerarhiju gospodarenja otpadom kemijska i energijska oporaba plastike. Glavni ciljevi oporabe plastike su: smanjenje uporabe resursa, smanjenje količine otpada i zaštita okoliša te su oni vrlo često suprotstavljeni. Oporaba otpada mora biti ekološki i ekonomski opravdana te treba voditi računa da je potrošnja resursa usred oporabe manja od one kod primarne proizvodnje kako bi cijeli sustav oporabe imao smisla.

Značajan tehnološki napredak i nagli porast svjetskog stanovništva posljednjih dvjestotinjak godina popraćeni su nekontroliranim iscrpljivanjem zemljinih resursa i velikim opterećenjem okoliša u obliku onečišćenja te je takav daljnji razvoj neodrživ. Rješenje je održivi razvoj koji podrazumijeva zadovoljenje potreba današnjice na način da se očuva okoliš i da se ne ugrožavaju potrebe budućih generacija. Model cirkularne ekonomije gospodarenja otpadom ključan je za ostvarivanje održivog razvoja te je sukladno smjernicama Europske unije u sklopu Okvirne direktive o otpadu nužno razmotriti usklađenost različitih načina gospodarenja otpadom s postavljenim ciljevima održivog razvoja uz sagledavanje utjecaja na razini cijelog životnog ciklusa.

Stoga je za sve razmatrane tehnologije i proizvodne lance unutar sustava gospodarenja otpadom, potrebno provesti procjenu utjecaja životnog ciklusa (eng. *Life Cycle Analysis* – LCA). LCA je tehnika za procjenu utjecaja na okoliš tijekom svih faza života proizvoda od vađenja sirovina do obrade materijala, proizvodnje, distribucije, uporabe, popravaka i održavanja, te odlaganja ili recikliranja. Procjene životnog ciklusa mogu pomoći u izbjegavanju uskog pogleda na pitanja okoliša te je Europska komisija ocijenila LCA analizu kao „najbolji okvir za procjenu potencijalnih utjecaja proizvoda na okoliš“.[3]

Ovaj rad se bavi kemijskom oporabom plastičnog otpada i to postupcima pirolize i isplinjavanja te njihovom analizom i vrednovanjem životnih ciklusa. Upotrebom LCA analize moguće je modelirati životne cikluse procesa pirolize i isplinjavanja te pronaći i usporediti moguća rješenja njihove implementacije u sustav gospodarenja otpadnom plastikom te na taj način pronaći rješenje s najmanjim sveukupnim štetnim utjecajem na okoliš. Dostupne LCI baze podataka ne opisuju predmetne tehnologije energetske oporabe plastičnog otpada te je u okviru ovog rada najprije izvršen detaljan pregled literature te su prikupljeni podaci o ulaznim i izlaznim tokovima postojećih postrojenja za pirolizu i isplinjavanje plastičnog otpada (Prilog I.). Na temelju prikupljenih podataka izrađeni su LCI (eng. *Life Cycle Inventory*) setovi podataka za razmatrane tehnologije te je uz korištenje ostalih LCI setova iz baze Ecoinvent, u programu OpenLCA, provedena usporedna analiza životnih ciklusa predmetnih tehnologija energetske oporabe plastičnog otpada te uobičajeno korištenih rješenja za zbrinjavanje generiranog plastičnog otpada poput njegove termičke obrade u spalionicama otpada s kogeneracijskom proizvodnjom električne i toplinske energije te odlaganja na uređena odlagališta otpada.

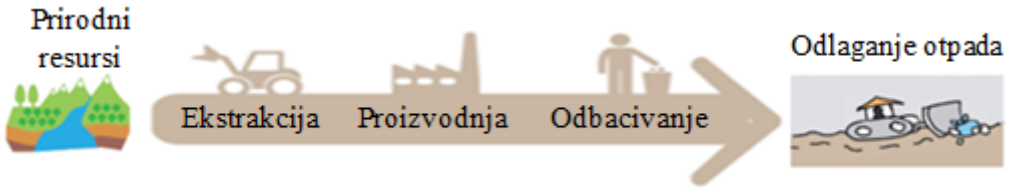
2. EU SMJERNICE

2.1. UN: Program održivog razvoja do 2030. godine

Održivi razvoj temeljni je koncept daljnjeg napretka čovječanstva kako bi se osiguralo zadovoljavanje potreba sadašnje generacije, bez ugrožavanja mogućnosti budućih generacija da zadovolje svoje potrebe. Na konferenciji Ujedinjenih naroda o održivom razvoju održanoj u New Yorku 25. rujna 2015. godine svjetski čelnici složili su se oko toga te je usvojen program „Promijeniti svijet: program održivog razvoja do 2030." (eng. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*) s ciljem okončanja siromaštva, zaštite planeta, osiguranja zaštite ljudskih prava te zajamčenim napretkom za sve. Programom su propisani zajednički ciljevi održivog razvoja te će sukladno dogovoru sve zemlje morati dati svoj doprinos za ostvarivanje postavljenih ciljeva sukladno stupnju razvoja i mogućnostima, pa tako i Europska unija koja je imala jednu od vodećih uloga prilikom donošenja plana. Jedan od postavljenih ciljeva je osiguranje održivih oblika proizvodnje i potrošnje koji podrazumijevaju djelotvorno korištenje resursa i održivo gospodarenje otpadom. Nužno je ispravno upravljanje svim oblicima otpada tijekom čitavog njihovog životnog ciklusa uz povećanje stupnja prerade i ponovne upotrebe radi smanjenja količine nastalog otpada kako bi se smanjilo onečišćenja zraka, vode i tla, odnosno kako bi se što više umanjili negativni utjecaji na okoliš i zdravlje ljudi.[7]

2.2. Cirkularna ekonomija

Europska unija obvezala se na provedbu programa Ujedinjenih naroda za održivi razvoj te je sukladno tome 14. lipnja 2018. godine izglasan paket zakona „Akcijski plan cirkularne ekonomije" (eng. *Circular Economy Action Plan*) koji uključuje poticajne mjere za: europsku tranziciju ka kružnom gospodarstvu, poticanje globalne konkurentnosti i održivog gospodarskog rasta te stvaranje novih radnih mjesta. Dosadašnje gospodarstvo temeljilo se na principu „uzmi, proizvedi, odbaci", tj. na linearnoj ekonomiji (Slika 5.) te je na taj način velika količina iskorištenih resursa završavala kao otpad na odlagalištima što predstavlja neodrživo i neučinkovito gospodarenje resursima, a rješenje se vidi u implementaciji cirkularne ekonomije (Slika 6.).



Slika 5. Linearna ekonomija[8]

Slika 6. Cirkularna ekonomija[8]

Cirkularna ekonomija je model gospodarstva koje je u većoj mjeri kružno i u kojem je cilj da se vrijednost proizvoda, materijala i resursa što je dulje moguće zadržavaju u gospodarstvu uz minimiziranje stvaranja otpada na način da se „zatvori krug“. „Zatvaranje kruga“ moguće je s materijalne i energetske stane. „Zatvaranje petlje“ na materijalnoj strani podrazumijeva smanjenje uporabe primarnih sirovina i energije potrebne za njihovu ekstrakciju i transformaciju. Uporabom energije i energenata oporabljenih iz otpada za zadovoljavanje energetskih potreba „zatvara“ se krug energetskom povratnom petljom.

Akcijski plan Europske unije sastoji se od 54 mjera za „zatvaranje kruga" životnog ciklusa proizvoda: od proizvodnje i potrošnje do gospodarenja otpadom i tržišta sekundarnih sirovina.

2.3. Plastika u kružnom gospodarstvu

Plastika je jedan od ključnih prioriteta cirkularne ekonomije pa se stoga EU obvezala izraditi strategiju za suočavanje s izazovima koje plastika predstavlja s naglaskom na analizu životnog ciklusa. U sklopu akcijskog plana usvojena je „Europska strategija za plastiku u kružnom gospodarstvu" (eng. *A European Strategy for Plastics in a Circular Economy*). Strateška europska vizija upravljanja plastikom vrlo je ambiciozna, a za njenu uspješnost nužno je djelovanje svih sudionika u vrijednosnom lancu plastike, uključujući proizvođače, dizajnere plastike, trgovce, potrošače i subjekte koji se bave recikliranjem. Potrebne su inovacije i zajednička vizija kako bi se plastikom gospodarilo na održivi način što dovodi do povećanja konkurentnosti, otvaranje novih radnih mjesta i tranziciji na niskougljično gospodarstvo što je u skladu sa energetskim i klimatskim strateškim ciljevima EU.

Potrebno je provesti promjene u proizvodnji i upotrebi plastike kako bi se pospješilo recikliranje plastike te se očekuje da će se do 2030. godine više od polovice nastalog plastičnog otpada reciklirati, a do onda je potrebno osigurati i mogućnost recikliranja sve plastične ambalaže. U narednim godinama stupit će na snagu zabrane korištenja plastike za jednokratnu upotrebu pa je zato potrebno podržati inovativna rješenja pronalaženja alternativnih proizvoda. Kako bi se osigurala veća stopa recikliranja neophodna su ulaganja i poboljšanja sustava odvojenog prikupljanja plastičnog otpada te širenje i osuvremenjivanje kapaciteta za razvrstavanje i recikliranje uz poticanje tržišta za recikliranu i obnovljivu plastiku.

Neophodna su ulaganja u istraživanje i inovacije radi smanjenja količine nastalog plastičnog otpada i bacanja otpada u okoliš. Inovativna rješenja podrazumijevaju npr. napredno razvrstavanje, kemijsko recikliranje i poboljšan dizajn polimera. Kemijsko recikliranje obuhvaća razne tehnologije kemijske oporabe plastike uz proizvodnju alternativnih sirovina čime se smanjuje upotreba fosilnih resursa. Radi razumijevanja utjecaja na okoliš potrebno je provesti analizu životnog ciklusa alternativnih tehnologija kako bi se utvrdile stvarne koristi za okoliš, a razvoj inovacija i istraživanje alternativa bit će podupirani novčanim sredstvima Europske unije.[9]

3. PLASTIČNI OTPAD

Plastika je materijal velike potražnje zbog svojih povoljnih svojstava: visoka kemijska stabilnost i niska razgradivost, dugovječnost proizvoda, nizak utrošak energije za proizvodnju materijala i proizvoda te oporabu i pogodnosti materijala za višekratnu upotrebu. Primjena plastike ima širok raspon: ambalaža, poljoprivreda, automobilska i građevinska industrija. Plastika je relativno novi materijal koji se počeo primjenjivati 50-ih godina prošlog stoljeća te je od tada proizvodnja plastike u neprekidnom porastu. Plastika je neotrovan materijal tijekom čije je proizvodnje onečišćenje zraka i vode neznatno te se njezinom primjenom u suvremenoj civilizaciji smanjila uporaba resursa. Sadašnja svjetska proizvodnja plastike je oko 322 milijuna tona godišnje, s 57 milijuna tona godišnje plastike proizvedene u Europskoj uniji. S povećanjem proizvodnje plastike raste problem količine plastičnog otpada. Neizbježno je da će većina plastike završiti u tokovima otpada te se u EU generira više od 25 milijuna tona otpadne plastike svake godine. Otprilike 26% plastičnog otpada u EU se reciklira, 35% se energetski oporabljuje (najčešće spaljivanjem), a 38% se zbrinjava na odlagalištima.[10]

3.1. Podjela polimernih materijala

Prema ponašanju pri povišenim temperaturama polimerni materijali mogu se podijeliti na: plastomere, duromere i elastomere. Pod pojmom plastika podrazumijevaju se plastomeri i duromeri.

Plastomeri (termoplasti) su sintetski ili modificirani prirodni polimerni materijali linearnih i granatih makromolekula. Plastomeri su taljivi i topljivi te se mogu uzastopno prerađivati bez značajnijih promjena osnovnih svojstava.

Duromeri ili duroplasti su polimerni materijali s gusto prostorno umreženim molekulama zbog čega su netaljivi i netopljivi te ne bubre.

Elastomeri ili gume su polimerni materijali s rijetko prostorno umreženim molekulama, netaljivi su i netopljivi, ali bubre.

Posebnu vrstu polimera čine elastoplastomeri (termoplastična guma) koji su taljivi i topljivi te bubre.[6]

3.2. Sastav plastičnog otpada

Među više od stotinjak proizvedenih plastičnih materijala, većinski sastav u komunalnom otpadu čine svega njih pet:[11]

- Polietilen PE
- Polipropilen PP
- Polistiren PS
- Poli(etilen-tereftalat) PET
- Poli(vinil-klorid) PVC

Radi olakšavanja sakupljanja i razvrstavanja plastičnog otpada plastični proizvodi označuju se brojčanim oznakama (Tablica 1).

Tablica 1. Sustav označavanja plastičnih pakiranja[12]

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

- **Polietilen PE**

Polietilen je ugljikovodik i jedan od najpoznatijih polimera koji se proizvodi polimerizacijom etilena CH_2-CH_2. Ovisno o strukturi i svojstvima razlikuje se više vrsta polietilena od kojih su najzastupljenije u sastavu otpada: polietilen visoke gustoće (eng. high *density polyethylene* – HDPE) i polietilen niske gustoće (eng. *low density polyethylene* – LDPE). Polietilen je otporan na vodu i velik broj kemikalija, a pri sobnoj temperaturi je netopljiv i bubri samo nakon duljeg izlaganja. Ovisno o gustoći, razne vrste polietilena primjenjuju se za proizvodnju ambalaže te za izradu elektromehaničkog, montažnog i drugog pribora i komponenata. Najpoznatija primjena polietilena niske gustoće, LDPE, je sveprisutna plastična vrećica.[11]

- **Polipropilen PP**

Polipropilen je plastomer linearnih makromolekula te jedan od najlakših polimernih materijala s visokim talištem od 170 °C što omogućuje njegovu primjenu u širokom području temperatura. Koristi se u proizvodnji cijevi, laboratorijskog posuđa, spremnika, armature, kućišta i tepiha.

- **Polistiren PS**

Polistiren je sintetski aromatski polimer izrađen od monomera stirena te je jedan od najčešćih plastičnih materijala. Najčešće se primjenjuje u obliku ekspandiranih i ekstrudiranih pjena poznatih pod imenom stiropor. Koristi se u mnogim sektorima kao što su građevinarstvo, elektronika, zaštitna ambalaža, igračke i drugo. Nažalost, polistiren predstavlja ozbiljnu prijetnju okolišu jer nije biorazgradiv te ga čak životinje ne prepoznaju kao umjetni materijal i često ga konzumiraju.

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

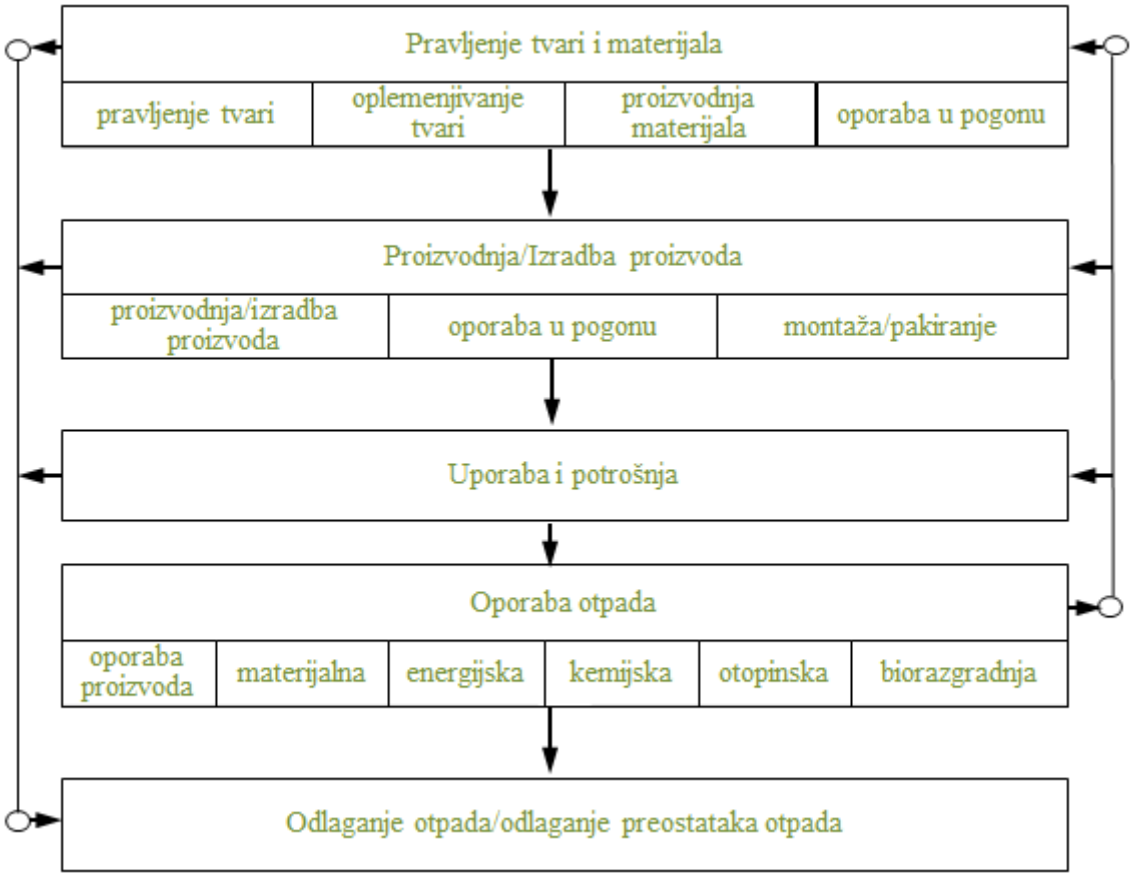
Poli(etilen-tereftalat) je linearni poliester tereftalne kiseline i etilen glikola. Zbog svojih pogodnih svojstava kao što su relativno visoko talište, odlična mehanička svojstva te kemijska i toplinska postojanost PET je najčešće proizvođena plastika na svijetu. PET ima širok raspon primjena kao što su bankovne kartice, filmovi, vlakna, trake i boce.

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

Poli(vinil-klorid) plastomerni je materijal koji se sastoji od makromolekula s ponavljajućim –CH_2-$CHCl$- jedinicama. PVC se sastoji od 57% klora i 43% ugljika. Najvažnije aplikacije PVC-a su cijevi, spojnice, profili, kruti film, limovi, kabeli i boce.[6]

3.3. Oporaba plastičnog otpada

Iako se plastika proizvodi i koristi svega sedamdesetak godina, kontinuirani rast proizvodnje rezultirao je velikim količinama proizvedenog plastičnog otpada kojeg treba adekvatno zbrinuti i oporabiti. Slika 7. prikazuje proces proizvodnje i upotrebe plastičnih proizvoda. Nakon korištenja, plastičnim materijalima nužno je gospodariti prema hijerarhijskom redoslijedu te ih je moguće oporabiti: materijalno, energijski i kemijski.



Slika 7. Proces proizvodnje i uporabe plastičnih proizvoda i mogućnosti oporabe[6]

3.3.1. Materijalna oporaba

Materijalna oporaba najpoznatiji je i najrašireniji oblik ponovne upotrebe polimernih materijala te je tako moguće oporabiti oko 80% plastomera. Nakon odbacivanja plastičnog proizvoda moguće ga je reciklirati taljenjem tako da se otpadni materijal ponovo prerađuje u proizvode, materijale ili tvari, za izvornu ili za neku drugu svrhu.

Razlikuju se tri oblika oporabe: taljenje čistih plastomera odvojenih po vrstama, taljenje posebnih skupina onečišćenih plastomera i taljenje raznovrsnih plastomera. Plastičnom otpadu prvo se kontrolira kvaliteta, potom se razvrstava prema vrsti i boji te pere i ekstrudira u regranulate te se proizvode regenerati, folije i ambalaža.

3.3.2. Energijska oporaba

Plastika je u pravilu gorivi materijal te energijska oporaba plastičnog otpada podrazumijeva iskorištavanje energije akumulirane u plastici njezinim spaljivanjem. Javno mišljenje o spalionicama otpada je većinom negativno zbog straha od štetnih emisija, tj. negativnog utjecaja na okoliš i zdravlje ljudi. Međutim, zbog konačnog raspoloživog prostora odlagališta poticajno je spaliti otpad koji nije moguće više nikako iskoristiti. Plastični otpad može se spaljivati sam ili pomiješan s drugim otpadom, uključujući komunalni otpad i gorivo iz otpada (GIO). Gorivo iz otpada ovisno o kvaliteti može biti RDF (eng. *refuse derived fuel –RDF*), koji uključuje biorazgradivi materijal i plastiku te SRF (eng. *solid recovered fuel –SRF*) koji se sastoji od papira, kartona, drva, tekstila i plastike. Spaljivanje je najučestaliji postupak oporabe plastičnog otpada pri čemu se oslobađaju produkti potpunog ili nepotpunog izgaranja te toplina koja se koristi za grijanje vode i/ili proizvodnju električne energije. Spaljivanje otpada provodi se pod kontroliranim uvjetima i pri visokim temperaturama iznad 850°C, odnosno iznad 1100 °C ukoliko otpad sadrži više od 1% masenog udjela halogenih tvari. Visoka temperatura nužna je radi učinkovitog sagorijevanja štetnih halogenih tvari. Pravilnim vođenjem procesa emisije spalionica održavaju se u propisanim graničnim vrijednostima te tada oporaba plastičnog otpada nije štetna za ljude i okoliš.[12]

Postupci energijske oporabe plastičnog otpada su:

- Spaljivanje plastičnog otpada: - spaljivanje na rešetci
  - spaljivanje u fluidiziranom sloju
  - spaljivanje u rotacijskoj peći
- Uporaba plastičnog otpada u cementnim pećima
- Energijska obrada plastičnog otpada zajedno s muljem

3.3.3. Kemijska oporaba

Uslijed konačno dostupnog prostora za odlaganje te negativne javne predodžbe o spalionicama otpada razvijaju se i druge tehnologije s ciljem oporabe energije pohranjene u plastičnom otpadu koja bi se nepovratno izgubila odlaganjem na odlagalištu. Kemijska oporaba plastičnog otpada podrazumijeva napredne tehnološke procese tijekom kojih se mijenja molekularna struktura materijala te nastaju najčešće tekućine i plinovi koji se mogu koristiti kao polazne sirovine u petrokemijskoj industriji ili kao gorivo. Troškovi kemijske oporabe plastičnog otpada su visoki, a za ekonomsku opravdanost implementacije postupaka potrebni su veliki kapaciteti, tj. velika količina odvojenog plastičnog otpada što podrazumijeva dobro organiziran sustav prikupljanja otpada. Postupci kemijske oporabe plastičnog otpada su:

- Hidroliza
- Hidriranje
- Piroliza
- Isplinjavanje

3.3.3.1. Hidroliza

Hidroliza je postupak razgradnje kemijske tvari u reakciji s vodom uz nastajanje dvije ili više nove kemijske vrste. Hidroliza kao postupak kemijske oporabe posebno je pogodna za primjenu kod poliuretanskih pjena čijom razgradnjom nastaju polioli i diizocijanati. Oporaba hidrolizom pogodna je za recikliranje PET-a čime nastaju tereftalna kiselina i etilen glikol.

3.3.3.2. Hidriranje

Hididranje je postupak kemijske oporabe plastičnog otpada pri visokom tlaku (400 bar) i temperaturi (500°C) uz prisustvo vodika pri čemu nastaju plin, ulje i koks. Makromolekule reagiraju s vodikom na mjestu slabih veza odnosno na mjestu *C-C* dvostrukih veza pri čemu dolazi do zasićenja odnosno stvaraju se zasićeni alkani. Kvaliteta dobivenog produkta ovisna je o udjelu zasićenih ugljikovodika.[6]

Ovaj rad bavi se analizom pirolize i isplinjavanja pa su oni podrobnije opisani u zasebnim poglavljima.

4. PIROLIZA

Piroliza je termokemijska razgradnja organskog materijala na povišenim temperaturama bez prisutnosti kisika ili zraka pri čemu nastaju plin, ulje i ugljenizirani ostatak (koks). Glavni produkt pirolize je plinska mješavina ugljičnog monoksida *CO*, vodika H_2 i ugljikovodika C_nH_m koja se naziva sintetski plin koji se može koristiti kao gorivo za proizvodnju električne i/ili toplinske energije. Kondenzacijom sintetskog plina nastaje sintetsko ulje koje se može koristiti kao gorivo ili kao polazna sirovina za proizvodnju raznih kemikalija i proizvoda. Udio pojedinih produkata pirolize ovisi o izvedbi reaktora, uvjetima reakcije i vrsti sirovine.[13] Ovisno o temperaturi na kojoj se odvija proces pirolize razlikuju se:[6]

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

Prilikom procesa pirolize moguća je upotreba katalizatora koji pospješuju kemijske reakcije i omogućavaju odvijanje procesa pri nižim temperaturama čime je omogućen manji utrošak energije potreban za kemijsku oporabu. Upotrebom katalizatora omogućava se dobivanje visokokvalitetnih produkata pirolize.[14]

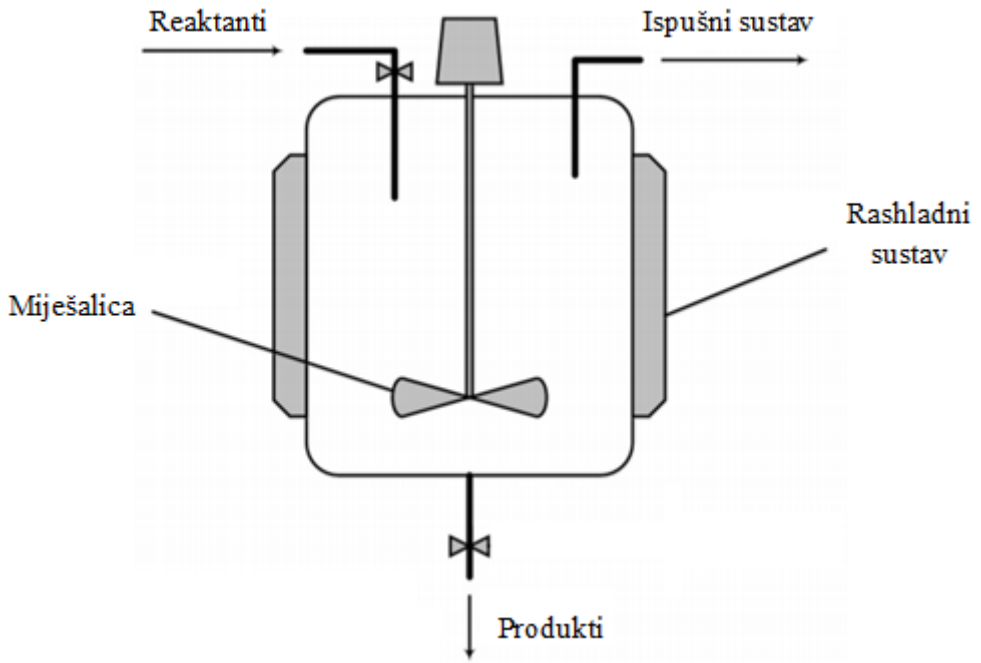
Glavni parametri reakcije koji utječu na produkte pirolize su: temperatura, tip reaktora, tlak, vrijeme odvijanja reakcije, katalizatori, tip plina za fluidiziranje i njegova brzina. Kontrolom navedenih parametra i njihovog međusobnog odnosa moguće je dobiti željeni proizvod odgovarajuće kvalitete. Najveći utjecaj na brzinu odvijanja reakcije ima temperatura o kojoj ovisi udio plina, ulja i ugljeniziranog ostatka u konačnom produktu procesa. Za dobivanje plina potrebne su temperature više od 500 °C dok se za dobivanje tekućeg produkta optimalni temperaturni raspon kreće od 300 do 500 °C.

Tip reaktora ima važan utjecaj na miješanje plastičnog otpada i katalizatora, vrijeme zadržavanja reaktanata u reaktoru, prijenos topline između reaktora i reaktanata te na učinkovitost postizanja željenog produkta pirolize. Proces pirolize može se odvijati na dva načina:[15]

- Diskontinuirano: - kotlasti i polukotlasti reaktori
- Kontinuirano: - reaktori za pirolizu u fiksnom i fluidizirajućem sloju
  - konusni reaktor

4.1. Kotlasti i polukotlasti reaktori

Kotlasti reaktor (Slika 8.) zatvoreni je tip reaktora kod kojeg se za vrijeme trajanja reakcije s okolinom ne razmjenjuju reaktanti dok je moguća izmjena topline, tj. za vrijeme trajanja reakcije nema ulaska i izlaska produkta i reaktanata iz reaktora. Reaktor može biti opremljen i miješalicom koja pospješuje proces pirolize unutar reaktora. Prednost kotlastog reaktora je mogućnost postizanja velikog stupnja konverzije produljenjem vremena zadržavanja reaktanata u reaktoru, dok je mana ovog tipa reaktora ovisnost kvalitete krajnjeg produkta o kvaliteti svake pojedine serije sirovine korištene u procesu. Uz to, nedostatak su i veliki operativni troškovi i otežanost proizvodnje u velikim razmjerima.

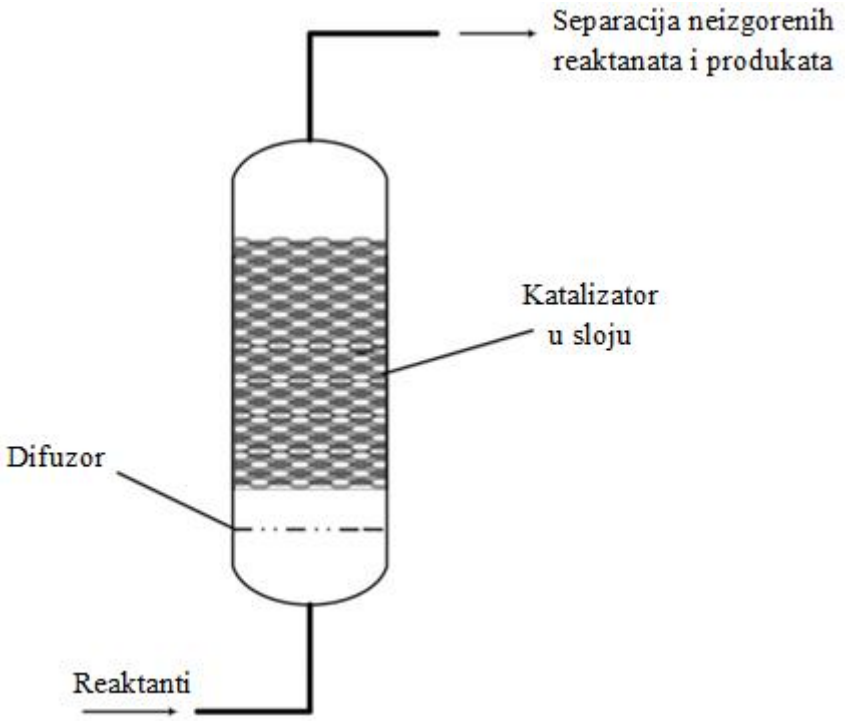


Slika 8. Kotlasti reaktor s miješalicom[15]

Poboljšanje kotlastog reaktora je polukotlasti koji omogućava dodavanje reaktanata i odvajanje produkta tijekom procesa pirolize. Usprkos većoj fleksibilnost od kotlastog reaktora, nedostaci polukotlastog su također veliki operativni troškovi i nemogućnost velike proizvodnje. Kotlasti i polukotlasti reaktori pogodni su za laboratorijska istraživanja radi jednostavne konstrukcije i mogućnosti lakog upravljanja parametrima reakcije. Reaktori s diskontinuiranim vođenjem procesa nisu pogodni za dodavanje katalizatora zbog mogućeg formiranja koksa čime se smanjuje udio željenog produkta.[15]

4.2. Reaktor za pirolizu u fiksnom sloju

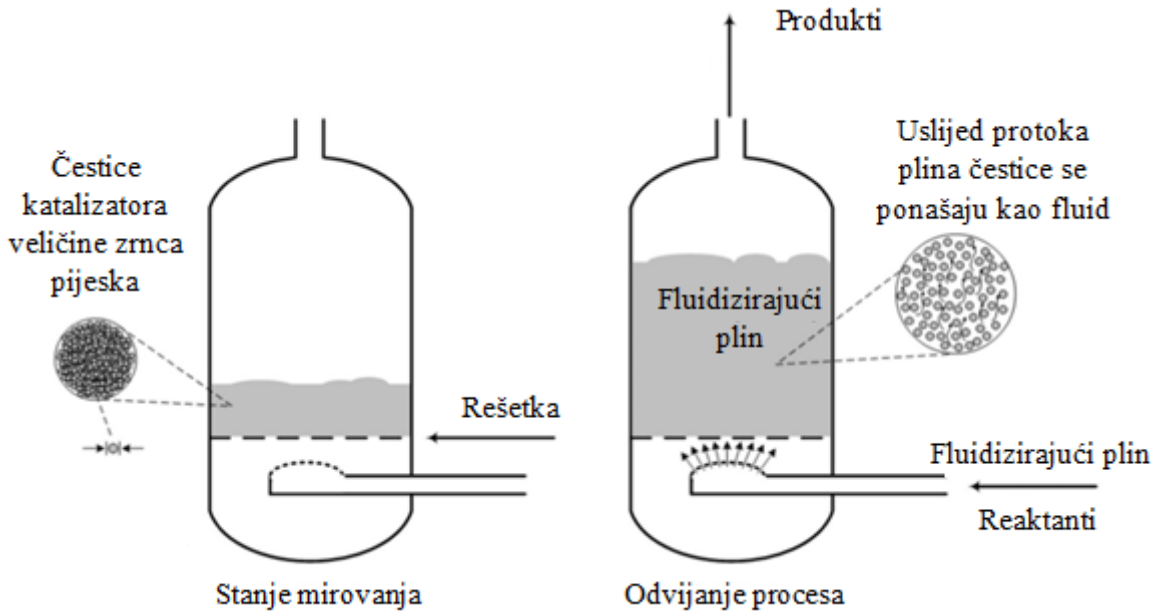
Reaktor za pirolizu u fiksnom sloju (Slika 9.) jednostavne je konstrukcije te zahtjeva uniformnost u veličini i obliku čestica plastike kako bih se izbjegli problemi prilikom ulaska reaktanata u reakcijski prostor. Loša izmiješanost plastike i katalizatora predstavlja nedostatak ovog tipa reaktora, međutim moguće ih je koristiti kao sekundarni reaktor (Slika 17.) pri čemu su tada reaktanti produkti primarnog reaktora koji su većinom plinovi i tekućine koji su pogodniji za reakcije u fiksnom sloju od krute sirovine.



Slika 9. Reaktor za pirolizu u fiksnom sloju[15]

4.3. Reaktor za pirolizu u fluidizirajućem sloju

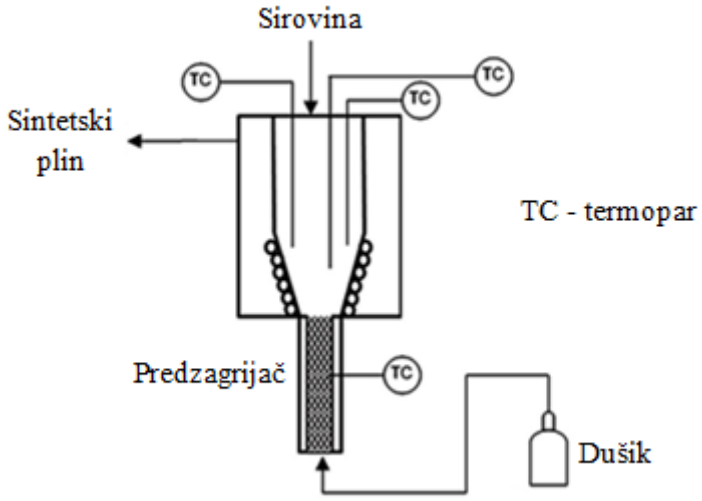
Slika 10. prikazuje reaktor za pirolizu u fluidizirajućem sloju u kojem se čestice katalizatora nalaze na rešetci te se uslijed protoka fluidizirajućeg plina dižu i miješaju s česticama plastike te se zajedno ponašaju kao fluid. Time se rješava nedostatak pirolize u fiksnom sloju jer je ostvareno bolje miješanje katalizatora i plastike. Reaktor s fluidizirajućim slojem omogućava fleksibilniju proizvodnju te je ekonomski pogodan za komercijalnu upotrebu.[15]



Slika 10. Reaktor za pirolizu u fluidizirajućem sloju[15]

4.4. Konusni reaktor

Konusni reaktor (Slika 11.) ili CSBR reaktor (eng. *conical spouted bed reactor*) omogućava dobru izmiješanost čestica katalizatora i plastike te je moguće odvijanje procesa s različitim veličinama i oblikom čestica plastike. Nedostatci CSBR reaktora su otežano dodavanje i iskorištenje katalizatora te prikupljanje produkata.[15]



Slika 11. Konusni reaktor[15]

4.5. Katalizatori

Razlikuju se dvije vrste katalizatora: homogeni i heterogeni. Homogeni su katalizatori u istoj fazi kao i reaktanti te se za pirolizu plastike obično koristi klasična Lewiseva kiselina $AlCl_3$. Puno češće koriste se heterogeni katalizatori zbog toga što ih je lakše separirati od nastalih produkata što je vrlo ekonomski poželjno jer su katalizatori poprilično skupi. Najčešće korišteni heterogeni katalizatori prilikom procesa pirolize plastike su: zeoliti, FCC katalizator, aluminij-silicij slitine i aktivni ugljen.

Zeoliti su kristalni mikroporozni aluminosilikati sa sposobnošću izmjene iona. Kristalna struktura sastoji se od spojenih tetraedara silicija i aluminija. Omjer silicijeva dioksida SiO_2 i aluminijeva oksida Al_2O_3 u kristalnoj rešetci određuje stupanj reaktivnosti i vrstu zeolita. Najčešće korišteni zeoliti prilikom katalitičke pirolize plastike su: HZSM-5, HUSY i HMOR.

FCC katalizatori koriste se u procesu fluid katalitičkog krekiranja (eng. *fluid catalytic cracking*), a sastoje se od zeolita i matrice ne-zeolitne kiseline poznate kao silicij-aluminijev oksid povezanih vezivom. FCC katalizator obično se koristi u industriji rafiniranja nafte za razbijanje teških frakcija nafte te ga je moguće naknadno odvojiti i ponovo koristiti. Upotreba FCC katalizatora prilikom pirolize plastike omogućuje maksimiziranje proizvodnje sintetskog ulja. Aluminij-silicij katalizatori predstavljaju skupinu kiselih amorfnih katalizatora od kojih su najčešće korišteni: SA-1, SA-2, i ZSM-5.[15]

4.6. Produkti

Glavni produkti pirolize su tekuće i plinovite frakcije. Plinovitu frakciju čine zaostali plinovi nakon kondenzacije te oni mogu služiti kao izvor energije procesa. Tekuća frakcija, tj. proizvedeno sintetsko ulje je smjesa je ugljikovodika u rasponu od C_5-C_{20} čiji udio ovisi o parametrima reakcije. Nastalo sintetsko ulje po svojstvima je slično sirovoj nafti te se može koristiti kao alternativna sirovina u proizvodnji raznih naftnih proizvoda. Reakcija pirolize plastike rezultira nastajanjem i ugljeniziranog ostatka koji je zbog niskog sadržaja sumpora pogodan za upotrebu kao gorivo, na primjer u izgaranju s ugljenom ili drugim otpadom. Međutim, nastoji se minimizirati nastajanje koksa pravilnim podešavanjem parametra reakcije.

5. ISPLINJAVANJE

Isplinjavanje ili rasplinjavanje je termokemijsko razlaganje plastičnog otpada pri čemu dolazi do djelomične oksidacije ugljikovodika uslijed nedovoljne količine kisika za odvijanje potpunog izgaranja. Kao sredstva za isplinjavanje služe: kisik, zrak, dimni plinovi i vodena para i to pojedinačno ili u kombinaciji. Sumarne kemijske reakcije rasplinjavanja dane su izrazima (1) i (2):

$$C_nH_m + \frac{n}{2}O_2 \leftrightarrow nCO + \frac{m}{2}H_2 \quad \textbf{(1)}$$

$$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + \left(\frac{m}{2} + n\right)H_2 \quad \textbf{(2)}$$

Proces se može podijeliti na stupnjeve: zagrijavanje i krekiranje te oksidaciju i isplinjavanje. Ugljikovodici se najprije zagrijavaju pomiješani s kisikom i vodenom parom, uslijed čega isparavaju te dolazi do krekiranja ugljikovodika na ugljik, metan i ugljikovodikove radikale. U fazi oksidacije i rasplinjavanja pri temperaturi zapaljenja jedan dio ugljikovodika reagira s kisikom pri čemu nastaju ugljikov dioksid CO_2 i voda H_2O. Kada se potroši sav kisik preostali ugljikovodici reagiraju endotermno s ugljikovim dioksidom i vodenom parom. Isplinjavanjem nastaje sintetski plin koji se sastoji uglavnom od ugljičnog monoksida CO i vodika H_2. Nastali sintetski plin je ovisno o sastavu i energetskoj vrijednosti moguće podijeliti na više skupina:

- Slabi vodeni plin *4 600 – 12 500 kJ/m_n^3*
- Sintetizirani redukcijski plin *12 500 kJ/m_n^3*
- Gradski jaki plin *16 700 – 20 000 kJ/m_n^3*
- Bogati sintetizirani prirodni plin *25 000 – 37 000 kJ/m_n^3*

Nastali sintetski plin moguće je koristiti kao gorivo za proizvodnju toplinske i/ili električne energije te kao polaznu sirovinu za proizvodnju raznih kemikalija. Ovisno o korištenom sredstvu za isplinjavanje, moguće je usmjeriti proces prema proizvodnji plinskog goriva s određenog sastava i svojstava.

Korištenjem zraka proizvodi se plin niske energetske vrijednost zbog visokog udjela dušika u zraku. Korištenjem vodene pare proizvodi se sintetski plin bogat vodikom, dok se korištenjem čistog kisika proizvodi plin visoke energetske vrijednosti, međutim operativni troškovi ovog postupka su visoki. Nusprodukti procesa isplinjavanja su metan i ugljenizirani ostatak, a kako bi se spriječio nastanak pepela omjer atoma kisika i ugljika mora biti veći od jedan.[6] Upotrebom katalizatora smanjuje se potrebna temperatura za odvijanje reakcije i stvaranje koksa. Korišteni katalizatori su: olivini, silicijev dioksid, aktivni ugljen, kvarcni pijesak, dolomiti i zeoliti.[16]

Moguća podjela procesa isplinjavanja:[13]

- Visokotemperaturno isplinjavanje – temperature mogu doseći čak 1200 °C
- Niskotemperaturno isplinjavanje – temperature između 600 i 875 °C, a glavni produkt je sintetski plin koji se koristi kao gorivo za proizvodnju električne energije
- Plazma isplinjavanje – pomoću plazma plamenika stvara se ionizirani plazma plin temperature od nekoliko tisuća stupnjeva celizijevih kojim se tada tretira sirovinski plastični otpad

Svojstva plastičnih materijala kao što su: mala toplinska provodljivost, ljepljivost, hlapljivi sadržaj i značajan nastanak katrana predstavljaju izazov za provedbu procesa isplinjavanja plastičnog otpada te onemogućuju laku implementaciju već dobro istraženih postupaka isplinjavanja drugih materijala kao što su biomasa i ugljen. Zbog toga, reaktor za isplinjavanje plastičnog otpada mora zadovoljiti sljedeće kriterije:[16]

- Osiguranje dobrog prijenosa topline radi brze depolimerizacije plastike
- Dobra kontrola operativnih uvjeta radi sprječavanja problema s ljepljivošću reaktanata
- Optimalno vrijeme zadržavanje reaktanata u reaktoru radi krekiranja katrana

Vrste reaktora pogodne za isplinjavanje plastičnog otpada su:

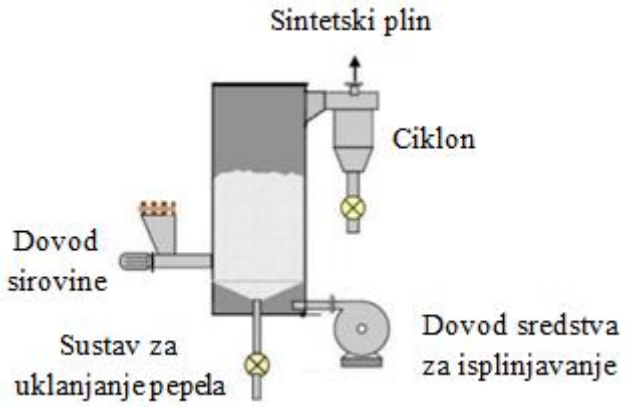
- Reaktor za isplinjavanje u fiksnom sloju
- Reaktor za isplinjavanje u fluidizirajućem sloju
- Konusni reaktor
- Plazma reaktor

5.1. Reaktor za isplinjavanje u fiksnom sloju

Reaktor za isplinjavanje u fiksnom sloju koristi se zbog jednostavnosti konstrukcije i proizvodnog postupka iz čega proizlaze i niski investicijski troškovi. Nedostaci ovog tipa reaktora su: otežan rad u kontinuiranom načinu rada, loš prijenos topline i loš kontakt između čestica plastičnog otpada i sredstva za rasplinjavanje te ograničenje na proizvodnju malih razmjera.

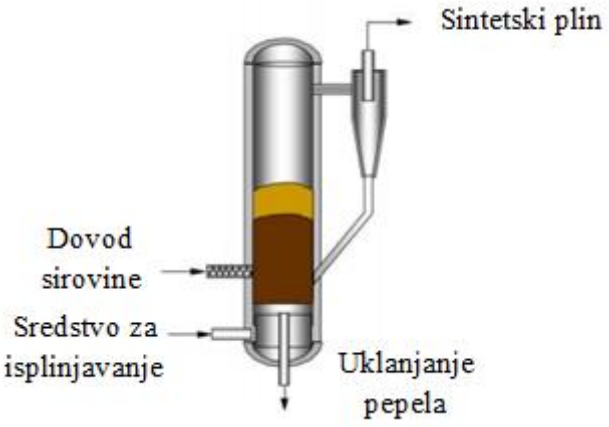
5.2. Reaktor za isplinjavanje u fluidizirajućem sloju

Reaktori za isplinjavanje plastičnog opada u fluidizirajućem sloju mogu biti: barbutažni i cirkulirajući, a mogući je i spoj dva reaktora s fluidizirajućim slojevima. Najčešće je korišten reaktor s barbutažnim slojem (Slika 12.) zbog: velike brzine prijenosa topline i mase, dobrog kontakta između plastike i plina, dobre mogućnosti kontroliranja temperature i fleksibilnosti procesa te mogućnosti kontinuirane proizvodnje. Glavni nedostaci reaktora s barbutažnim slojem su visoki investicijski troškovi i ograničenje veličina čestica u sloju i sirovine. Kao sredstvo za rasplinjavanje najčešće se koristi zrak.



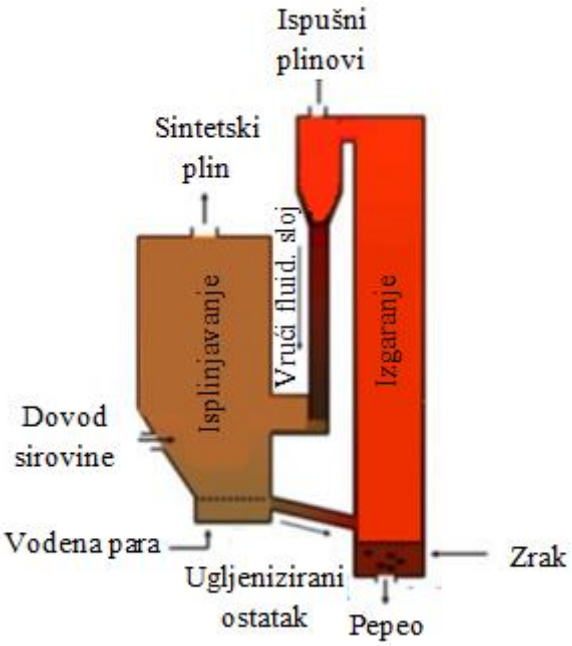
Slika 12. Reaktor za isplinjavanje u barbutažnom fluidiziranom sloju[17]

Slika 13. prikazuje reaktor za rasplinjavanje u cirkulirajućem sloju. Sirovina se dovodi u donji dio reaktora, a proizvedeni plin pročišćuje se u ciklonu gdje se odvaja većina krutih čestica koje se zatim vraćaju na dno reaktora. Radna temperatura obično ne prelazi 900 °C kako bi se izbjeglo taljenje pepela i lijepljenje.[17]



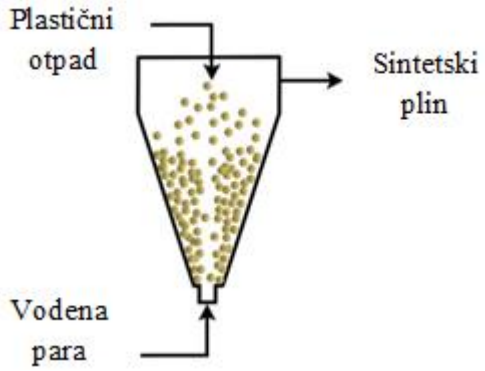
Slika 13. Reaktor za rasplinjavanje u cirkulirajućem fluidiziranom sloju[17]

Slika 14. prikazuje spoj dva reaktora za rasplinjavanje s fluidizirajućim slojevima. Sirovina se dovodi u reaktor za rasplinjavanje i pretvara u sintetski plin uz korištenje vodene pare kao sredstva za rasplinjavanje. Preostali kruti ostatak se spaljuje u reaktoru za izgaranje, a vrući materijal sloja se reciklira natrag u rasplinjač. Prednost ovakvog sustava je u tome što u proizvedenom sintetskom plinu nema dušika što eliminira potrebu postojanja skupog sustava za odvajanje dušika.[17]



Slika 14. Dvojni reaktori s fluidizirajućim slojevima[17]

5.3. Konusni reaktor

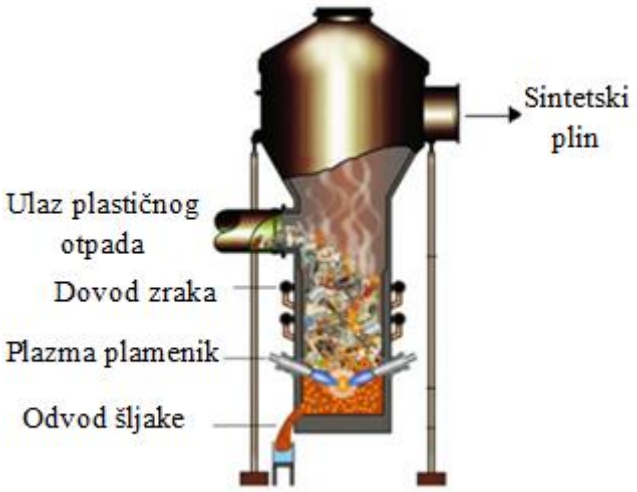


Slika 15. Konusni reaktor za isplinjavanje[16]

Slika 15. prikazuje konusni reaktor za isplinjavanje kod kojeg sredstvo za isplinjavanje, vodena para ulazi u reaktor s donje strane, a sirovina s gornje. Prednosti ovog tipa reaktora su: dobar prijenos topline i tvari, dobro miješanje i dobar kontakt između čestica plastike i plina.[16]

5.4. Plazma reaktor

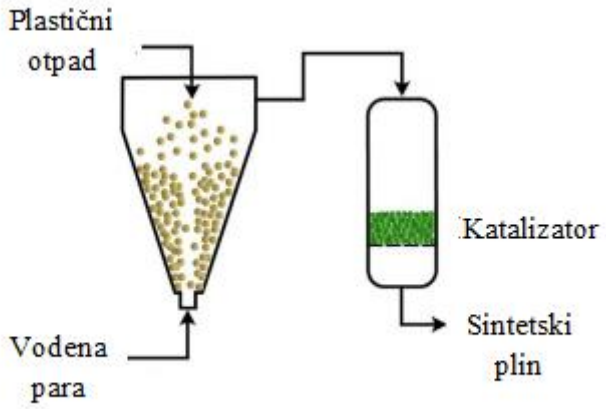
Plazma reaktori za isplinjavanje (Slika 16.) koriste plazma plamenik kod kojeg visokonaponska struja prolazi između dviju elektroda te se stvara električni luk koji ionizira plin u plazmu.



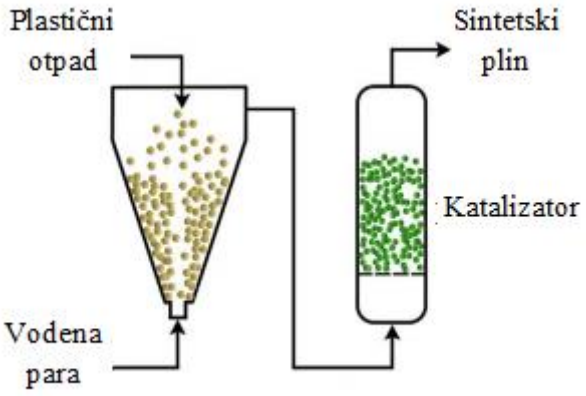
Slika 16. Plazma reaktor[18]

Plazma na temperaturi od čak nekoliko tisuća stupnjeva celzijevih reagira s plastičnim otpadom pri čemu nastaje sintetski plin.[13] Plazma rasplinjači obično rade pri atmosferskom tlakom te ih karakterizira mogućnost vrlo visoke razgradnje dolaznog otpada, a samim time i uništavanje štetnih i toksičnih spojeva, ali i veliki utrošak energije za održavanje plazme i visoki operativni troškovi.[18]

Moguće je povezati više reaktora radi optimiziranja vođenja procesa i poboljšanja kvalitete konačnog proizvoda. Slika 17. i Slika 18. prikazuju neke od mogućih konfiguracija povezivanje različitih reaktora u zajednički proizvodni ciklus.



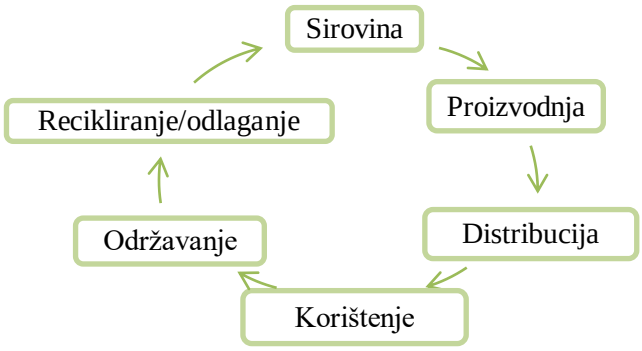
Slika 17. Konfiguracija konusnog reaktora i reaktora s fiksnim slojem[16]



Slika 18. Konfiguracija konusnog reaktora i reaktora s fluidizirajućim slojem[16]

6. LCA - PROCJENA ŽIVOTNOG CIKLUSA

Procjena životnog ciklusa (eng. *Life Cycle Analysis – LCA*) je tehnika za procjenu i utvrđivanje ukupnog utjecaja na okoliš određenog sustava uključujući sve faze proizvodnog ciklusa: od dobivanja sirovine za proizvodnju, proizvodnje, distribucije, korištenja, održavanja i servisa te odlaganja ili recikliranja (Slika 19.).

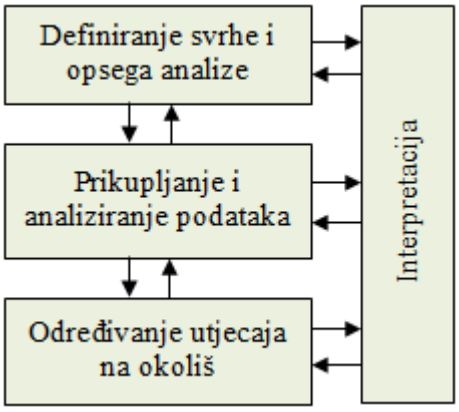


Slika 19. Životni ciklus proizvoda

6.1. Faze procjene životnog ciklusa

LCA proces se sastoji od četiri faze sukladno normi ISO 14040 (Slika 20.):

- Definiranje svrhe i opsega analize (eng. *goal and scope definition*)
- Prikupljanje i analiziranje podataka (eng. *inventory analysis*)
- Određivanje utjecaja na okoliš (eng. *impact assessment*)
- Interpretacija (eng. *interpretation*)



Slika 20. LCA faze[19]

6.1.1. Definiranje svrhe i opsega analize

Prvi korak LCA analize je utvrđivanje svrhe i očekivanih rezultata istraživanja, određivanje granica i pretpostavki te razine detaljnosti procjene. Potrebno je dobro i jednoznačno definirati predmet analize kako bi nivo dubine i detaljnosti provedene procjene bili dovoljni za postizanje definiranog cilja. LCA analiza može biti različitog opsega, tj. granice promatranog sustava se postavljaju ovisno o postavljenom cilju analize. Granice su način definiranja opsega LCA analize, a sustav obuhvaća sve unutar granica, uključujući procese, materijale, sirovinu i energiju. Različiti opsezi LCA analize su:[20]

- **„od vrata do vrata" (eng. *gate to gate*)** – najjednostavnija procjena, uključuje analizu od prijema sirovina, spremnih za uporabu, do kraja proizvodnje, kada je proizvod, usluga ili aktivnost spremna za korištenje, ali bez razmatranja distribucije ili korištenja;
- **„od kolijevke do vrata" (eng. *cradle to gate*)** – promatranje proizvodnog procesa do gotovog proizvoda uključujući i prethodne faze kao što su eksploatacija i dopremanje sirovine;
- **„od kolijevke do groba" (eng. *cradle to grave*)** – procjena svih stadija životnog vijeka proizvoda uključujući eksploataciju sirovine iz okoliša, proizvodnju, distribuciju, korištenje i na kraju vraćanje materijala nazad u okoliš (odlaganje);
- **„od vrata do groba" (eng. *gate to grave*)** – procjena životnog ciklusa proizvoda nakon korištenja sve do odlaganja;
- **„od kolijevke do kolijevke" (eng. *cradle to cradle*)** – najsloženija procjena koja se koristi radi minimiziranje utjecaja proizvoda na okoliš primjenom održive cirkularne proizvodnje.

6.1.2. Prikupljanje i analiziranje podataka

Sljedeći korak LCA analize je faza prikupljanja i analiziranja podataka LCI (eng. *Life Cycle Inventory)*. LCI faza podrazumijeva utvrđivanje i popisivanje svih ulaznih i izlaznih tokova iz sustava kao što su: potrebna i proizvedena energija, ulazne sirovine i ispuštanja u okoliš povezana sa svakom fazom proizvodnje i upotrebe koji su potrebni za izračun utjecaja.

Analiza inventara životnog ciklusa obuhvaća sljedeće korake:

- **Prikupljanje i obrada podataka**

Potrebno je prikupiti podatke iz svih pojedinačnih procesa životnog ciklusa proizvoda, a izvori podataka mogu biti: baze podataka, podaci iz literature, podaci dobiveni od proizvođača/laboratorija i izmjereni odnosno izračunati podaci. Prikupljeni podaci mogu biti kvantitativne i kvalitativne prirode.

- **Redefiniranje odnosno prilagodba granice sustava**

LCA je iterativni postupak te je nakon početnog prikupljanja podataka moguće poboljšati odnosno prilagoditi granice sustava na način da se npr. isključe pojedini materijalni tokovi ili uključe novi procesi u promatrani opseg analize.

- **Vrednovanje podataka**

Tijekom procesa prikupljanja podataka potrebno je validirati podatke kako bi se poboljšala ukupna kvaliteta podataka, a samim time i kvaliteta provedene analize.

- **Alokacija**

Proizvodni procesi često rezultiraju s više proizvoda te je tada nužno raspodijeliti ukupne utjecaje na različite proizvode. Alokacija je podjela i pripisivanje protoka materijala i energije kao i pripadajućih ispuštanja u okoliš pojedinom proizvodu ili nusproduktu procesa. Moguće provedbe alokacije su: [21]

  - Fizička alokacija – ulazni i izlazni podaci procesa dodijeljeni su svim njegovim proizvodima proporcionalno njihovoj masi ili energiji
  - Ekonomska alokacija – ulazni i izlazni podaci procesa dodijeljeni su svim njegovim proizvodima prema njihovoj tržišnoj vrijednosti
  - Uzročna alokacija – alokacija prema ručno unesenim željenim faktorima raspodjele

6.1.3. Određivanje utjecaja na okoliš

Na temelju podataka prikupljenih u LCI fazi provodi se procjena utjecaja na ljudsko zdravlje i okoliš (eng. *Life Cycle Impact Assessment – LCIA*).

LCIA dio analize provodi se kroz sljedeće faze: [22]

- **Izbor i definicija kategorija utjecaja**

  Utvrđivanje relevantnih kategorija utjecaja na okoliš kao što su: globalno zatopljenje, zakiseljavanje tla, eutrofikacija, potencijal oštećenja ozonskog sloja i drugi.

- **Klasifikacija**

  Pripisivanje rezultata iz LCI faze pojedinim kategorijama djelovanja.

- **Karakterizacija**

  Modeliranje doprinosa pojedinih ulaznih i izlaznih podataka iz LCI faze pojedinim kategorijama utjecaja pomoću konverzijskih faktora.

- **Normalizacija, grupiranje i ocjenjivanje**

  Neobavezni dio LCIA analize, provodi se kako bi se olakšalo tumačenje rezultata. Normalizacija podrazumijeva izražavanje potencijalnih utjecaja na način da se mogu uspoređivati, grupiranje je sortiranje pojedinih utjecaja, a ocjenjivanje podrazumijeva određivanje najznačajnijih potencijalnih utjecaja na okoliš.

- **Elaboriranje rezultata**

Za procjenu utjecaja razvijene su razne metode koje su dane u poglavlju 6.5.

6.1.4. Interpretacija

Posljednja faza LCA analize je interpretacija (eng. *Life Cycle Interpretation*) koja podrazumijeva vrednovanje rezultata i mogućnost odabira optimalnog rješenja s najmanjim negativnim utjecajem na zdravlje ljudi i okoliš. Faza interpretacije rezultata sastoji se od tri koraka:[21]

- Identifikacija ključnih ekoloških problema i pitanja na temelju rezultata faza LCI i LCIA
- Procjena rezultata koja uključuje kompletnost, osjetljivost i dosljednost
- Zaključci, preporuke i izvještaji

6.2. Dodatni analitički modeli

Upotrebom LCA metode moguće je modelirati razne tehnologije kemijske oporabe otpada te identificirati njihov utjecaj na okoliš te tako pronaći optimalno rješenje. Moguće je proširiti područje analize tako da se uz utjecaj na okoliš sagledaju utjecaji na gospodarstvo i društvo. S tim ciljem razvijeni su dodatni pristupi procjeni životnog ciklusa:[23]

- **ELCA**

  Eksergijska procjena životnog ciklusa (eng. *exergetic life cycle assessment*) prati tokove materijala i energije izražene u istoj jedinici uz praćenje učinkovitosti pojedinih faza procesa. Moguće je odrediti gdje nastupaju gubici eksergije i kako minimizirati ireverzibilnost.

- **LCC**

  Troškovna procjena životnog ciklusa (eng. *life cycle cost*) prati sve novčane tokove tokom životnog ciklusa kao što su: investicijski i operativni troškovi, troškovi dekomisije i projicirani prihodi. Kombinirajući LCA i LCC moguće je optimizirati ekološke i ekonomske parametre proizvodnog ciklusa kako bi on bio financijski i ekološki izvediv i održiv.

- **SLCA**

  Procjena socijalnog utjecaja (eng. *social life cycle assessment*) posebno je bitna kod projektiranja novih postrojenja. Socijalni pritisak često ometa izdavanje dozvola, izgradnju i rad postrojenja zbog toga što se ljudi boje štetnih utjecaja te razvijaju stav „ne u mom dvorištu“ (eng. *not in my backyard*). Socijalni utjecaj teško je procijeniti zbog velikog broja utjecajnih čimbenika, kvantitativnog i kvalitativnog karaktera. Neki od pokazatelja socijalnog utjecaja su: mogućnost lokalnog zapošljavanja, uvjeti rada, uključujući sigurnost i utjecaj na zdravlje.

- **3E**

  Integrirana ekološka, energetska i ekonomska procjena životnog ciklusa (eng. *environment–energy–economy*) prati ekonomsko opterećenje, utjecaj na okoliš i potrošnju energije određenog sustava.

- **LCSA**

  Procjena održivosti životnog ciklusa (eng. *life cycle sustainability assessment*) je model trenutno u razvoju koji bi trebao integrirati LCA, LCC i SLCA.

6.3. LCA računalni programi

Začeci LCA sežu u 1960-e kada je zabrinutost zbog ograničenja sirovina i resursa potaknula interes za pronalaženje načina kumulativnog obračunavanja potrošnje energije i projektiranja budućih zaliha resursa. Proračun utjecaja može se provoditi ručno, ali je uobičajeno i praktičnije koristiti računalne programe. Neki od najpoznatijih LCA računalnih programa su:

- **GaBi**

  GaBi je računalna aplikacija razvijena od strane međunarodne kompanije Thinkstep koja omogućuje provedbu LCA analize. Za korištenje aplikacije potrebna je licenca te je ona prvenstveno namijenjena poslovnom sektoru.

- **SimaPro**

  Računalni program SimaPro razvijen je od strane nizozemske tvrtke PRé Consultant te je dostupan u više verzija ovisno o potrebama korisnika. Program omogućuje analizu životnog ciklusa proizvoda i usporedbu više proizvoda, a moguće je i provesti procjenu neizvjesnosti i osjetljivosti rezultata pomoću Monte Carlo metode.[24]

- **Gemis**

  Gemis je javno dostupan računalni program razvijen 1989. Od strane instituta IINAS, a uključuje bazu podataka i modele za analizu materijalnih i energetskih tokova.[25]

- **OpenLCA**

  OpenLCA je program otvorenog koda za procjenu životnog ciklusa i održivosti, koji je razvijen od strane njemačke kompanije GreenDelta. Dostupan je besplatno, bez troškova licenciranja, a izvorni kod se može mijenjati prema potrebama korisnika. Razne aplikacije programa su u područjima: LCA i LCC procjene, praćenje ugljičnog i vodenog otiska, integriranoj politici proizvoda i deklaraciji o zaštiti okoliša.[26]

- **Umberto**
- **eBalance**
- **EIME**
- **Quantis Suite**
- **Teaam 5**
- **Regis**

6.4. LCI baze podataka

Inventar životnog ciklusa (LCI) je faza prikupljanja podataka LCA analize, koja podrazumijeva izravno obračunavanje svega što je uključeno u sustav. Sastoji se od detaljnog praćenja svih ulaznih i izlaznih tokova, uključujući sirovine, energente, materijale, vodu te emisije u zrak, vodu i zemlju. LCI faza analize je izuzetno složena i može uključivati na desetke pojedinačnih procesnih jedinica u lancu opskrbe i stotine praćenih parametra. Provedba analize životnog ciklusa uvelike ovisi o dostupnosti i kvaliteti podataka, a izvori podataka mogu biti: baze podataka, podaci iz literature, podaci dobiveni od proizvođača/laboratorija i izmjereni odnosno izračunati podaci. LCI baze podataka su organizirani skupovi LCI setova kritički pregledanih, konzistentnih i transparentnih podataka te njihovo korištenje uvelike olakšava i skraćuje LCI fazu analize. Baze podataka mogu biti javno dostupne dok je za neke potrebno imati licencu, a neke poznatije dostupne baze podataka su: [24]

- Ecoinvent
- ELCD (European reference Life Cycle Database)
- GaBi
- U.S. Life Cycle Inventory Database
- CPM LCA Database

6.5. Metode procjene utjecaja na okoliš

Na temelju podataka prikupljenih u LCI fazi provodi se procjena utjecaja na ljudsko zdravlje i okoliš. Utjecaji na okoliš modeliraju se prema različitim pristupima koji ovise o sveobuhvatnoj znanstvenoj pozadini ekoloških mehanizama povezanih s učincima na okoliš, a rezultati procjene iskazuju se razumljivim indikatorima utjecaja. Najpoznatije metode procjene utjecaja na okoliš su: [27]

- CML
- Eco-indicator
- EDIP
- EPS

U ovom radu korištene su prve dvije navedene metode te su one pobliže objašnjene.

6.5.1. CML 2001 (baseline)

Prva korištena metoda je CML 2001 (baseline). CML metoda razvijena je na Sveučilištu Leiden u Nizozemskoj 2001. godine, a prema broju praćenih kategorija utjecaja razlikuju se osnovni (eng. *baseline*) i ne-osnovni pristup. CML metoda procjene utjecaja na okoliš i ljude omogućuje karakterizaciju i razvrstavanje više od tisuću spojeva prema stupnju u kojem doprinose popisu kategorija utjecaja na okoliš. Tablica 2. prikazuje kategorije utjecaja koje pokriva CML 2001 baseline metoda.[28]

Tablica 2. CML 2001 baseline kategorije utjecaja[28]

Kategorija utjecaja		Ime u metodi
Acidifikacija		*Acidification potential - average Europe*
Klimatske promjene		*Climate change - GWP100*
Iscrpljivanje resursa	konačne rezerve	*Depletion of abiotic resources - elements, ultimate reserves*
	fosilna goriva	*Depletion of abiotic resources - fossil fuels*
Ekotoksičnost	slatkovodna voda	*Freshwater aquatic ecotoxicity - FAETP inf*
	morska voda	*Marine aquatic ecotoxicity - MAETP inf*
	tlo	*Terrestrial ecotoxicity - TETP inf*
Eutrofikacija		*Eutrophication - generic*
Toksičnost		*Human toxicity - HTP inf*
Oštećenje ozonskog omotača		*Ozone layer depletion - ODP steady state*
Fotokemijsko onečišćenje zraka		*Photochemical oxidation - high NO_x*

- **Acidifikacija**

Kiseli plinovi: amonijak (NH_3), dušikovi oksidi (NO_x) i sumporovi oksidi (SO_x) u atmosferi reagiraju s vodenom parom te se otapaju, a posljedica su kisele kiše koje uzrokuju oštećenja ekosustava. Kisele kiše pogubne su za vegetaciju, životinje i ljudsko zdravlje. Potencijal acidifikacije izražava se pomoću ekvivalentnih kilograma sumporovog dioksida ($kg\ SO_{2eq}$).

- **Klimatske promjene**

Spojevi: vodena para, ugljikov dioksid, metan, freoni, didušikov oksid, ozon i sumporov heksafluoird najčešći su stakleнički plinovi. Stakleнički plinovi uzrokuju efekt staklenika čija je posljedica globalno zatopljenje, odnosno klimatske promjene. Potencijal globalnog zagrijavanja (eng. *Global Warming Potential*) opisuje utjecaj jedinične mase pojedinog plina na globalno povećanje temperature.

GWP potencijal definiran je kao omjer apsorbiranja Sunčevog infracrvenog zračenja 1 kg određenog stakleničkog plina i učinkovitosti apsorbiranja 1 kg referentnog plin u točno određenom vremenskom razdoblju. Jedinica potencijala obično je ekvivalentni kilogram ugljikovog dioksida ($kg\ CO_{2eq}$), a promatrano vremensko razdoblje najčešće je 100 godina (GWP100).

- **Iscrpljivanje resursa**

Ova kategorija utjecaja odnosi se na potrošnju resursa uključujući fosilna goriva, minerale, metale, vodu, itd. Pokazatelj utjecaja iskazuje se u ekvivalentnim kilogramima antimona ($kg\ Sb_{eq}$).

- **Ekotoksičnost**

Na oštećenje ekosustava utječe ispuštanje opasnih tvari kao što su teški metali, a procjena ekološke toksičnosti provodi se kroz tri čimbenika: zagađenje slatkovodne i morske vode i zagađenje tla. Potencijali su izraženi pomoću referentne jedinice, ekvivalentnog kilograma 1,4-diklorbenzena ($kg\ 1{,}4\text{-}DCB_{eq}$).

- **Eutrofikacija**

Emisije amonijaka, nitrata, dušikovih oksida i fosfora u zrak ili vodu utječu na eutrofikaciju, koja podrazumijeva povećanje koncentracije kemijskih hranjivih tvari u ekosustavu što dovodi do povećane produktivnosti, tj. prekomjernog rasta biljaka, što uzrokuje ozbiljno smanjenje kvalitete vode i populacije životinja. Potencijal eutrofikacije izražava se u ekvivalentnom kilogramu fosfatnog iona ($kg\ PO_{4eq}^{3-}$).

- **Toksičnost**

Procjena štetnog utjecaja na ljude provodi se preko izračunatog indeksa koji odražava potencijalnu štetu koju jedinica kemikalije ispušta u okoliš, a temelji se na inherentnoj toksičnosti spoja i njegovoj potencijalnoj dozi. Potencijalno opasne kemikalije uključuju arsen, natrijev dikromat i vodikov fluorid. Ova kategorija utjecaja mjeri se u ekvivalentnim kilogramima 1,4-diklorbenzena ($kg\ 1{,}4\text{-}DCB_{eq}$).

- **Oštećenje ozonskog omotača**

Freoni, haloni i klorofluorougljikovodici glavni su uzroci oštećenja ozonskog omotača. Oštećenje ozonskog omotača smanjuje njegovu sposobnost da spriječi ultraljubičasto zračenje koje ulazi u Zemljinu atmosferu te na taj način povećava količinu kancerogenog zračenja koja dopire do Zemljine površine.

Potencijal oštećenja ozonskog omotača izražava se u ekvivalentnim kilogramima freona 11 (*kg $CFC\text{-}11_{eq}$*).

- **Fotokemijsko onečišćenje zraka**

Ozon u stratosferi je koristan, ali na razini tla u visokim koncentracijama toksičan je za ljude. Prizemni ozon nastaje reakcijom hlapivih organskih spojeva i dušikovih oksida u prisutnosti topline i sunčeve svjetlosti. Potencijal stvaranja fotokemijskog ozona izražava se s ekvivalentnim kilogramom etilena (*kg C_2H_{4eq}*).[28]

6.5.2. Eco-indicator 99

Prethodno opisana metoda koristi se za provedbu sveobuhvatnog opsega LCA analize s praćenjem svih kategorija utjecaja. Sveobuhvatne LCA vrlo su korisne jer omogućavaju pronalazak proizvoda ili procesa s najmanjim utjecajem na okoliš, međutim takve procjene su dugotrajne i skupe. Zbog toga su razvijene pojednostavljene LCA metode (eng. *Simplified LCA – S-LCA*) koje omogućavaju bržu i jednostavniju interpretaciju rezultata i pronalazak optimalnog rješenja. S-LCA analizu moguće je provesti koristeći Eco-indicator 99 metodu. Eco-indicator 99 omogućava izražavanje rezultata procjene ekološkog utjecaja u jednom brojčanom indikatoru te je jedna od najčešće korištenih metoda procjene utjecaja na okoliš. Praćene kategorije utjecaja su: kvaliteta ekosustava, utjecaj na ljudsko zdravlje i iscrpljivanje resursa (Tablica 3.). Metoda uključuje normalizaciju i ocjenjivanje prema težinskom faktoru pojedinih utjecaja te se kao krajnji rezultat dobiva indikator utjecaja na okoliš izražen u bodovima (eng. *point – Pt*), a obično se koriste mili bodovi (*mPt*). Skala je definirana tako da *1 Pt* predstavlja tisućiti dio godišnjeg utjecaja na okoliš prosječnog Europljana. Dobiven indikator je bezdimenzijski i služi za usporednu procjenu utjecaja te je izvan opsega analize njegova kvantitativna vrijednost bezvrijedna, a unutar analize veća vrijednost indikatora upućuje na veći utjecaj na okoliš promatranog sustava. Težinski faktori mogu biti: prosječni (eng. *avarage – A*), ravnopravni (eng. *egalitarian – E*), hijerarhijski (eng. *hierarchist – H*) i individualni (eng. *individualist – I*). Metoda razlikuje tri različite kulturne perspektive:

- Hijerarhijska (eng. *'Hierarchist-H*) – srednjoročna perspektiva, uključuje znanstveno utvrđene činjenice
- Individualna (eng. *Individualist-I*) – kratkoročna perspektiva, uključuje samo provjerene utjecaje

- Jednolika (eng. *Egalitarian-E*) – dugoročna perspektiva utemeljena na načelu predostrožnosti.

Ovisno o perspektivi i težinskim faktorima utjecaja razlikuju se različite izvedbe ove metode, a najrelevantnije su:[29]

- Eco-indicator 99 (H, A)
- Eco-indicator 99 (E, E)
- Eco-indicator 99 (I, I)

Tablica 3. Eco-indicator 99 kategorije utjecaja[28]

Kategorija utjecaja		**Ime u metodi**
Kvaliteta ekosustava	Prenamjena zemljišta	*Ecosystem Quality - Land conversion (PDF·m^2)*
		Ecosystem Quality - Land conversion (PDF·m^2·year)
	Acidifikacija i eutrofikacija	*Ecosystems Quality - Acidification and Eutrophication*
	Ekotoksičnost	*Ecosystems Quality - Ecotoxicity*
	Ukupna kvaliteta ekosustava	*Ecosystems-total*
Ljudsko zdravlje	Kancerogeni utjecaj	*Human Health - Carcinogenics*
	Klimatske promjene	*Human Health - Climate change*
	Ionizirajuće zračenje	*Human health - Ionising radiation*
	Oštećenje ozonskog omotača	*Human health - Ozone layer depletion*
	Respiratorni problemi uzrokovani anorganskim tvarima	*Human Health - Respiratory effects caused by inorganic substances*
	Respiratorni problemi uzrokovani organskim tvarima	*Human Health - Respiratory effects caused by organic substances*
	Ukupan utjecaj na ljudsko zdravlje	*Human Health-total*
Iscrpljivanje resursa	Fosilni resursi	*Resources - fossil fuels*
	Minerali	*Resources - minerals*
	Ukupno iscrpljivanje resursa	*Resources-total*

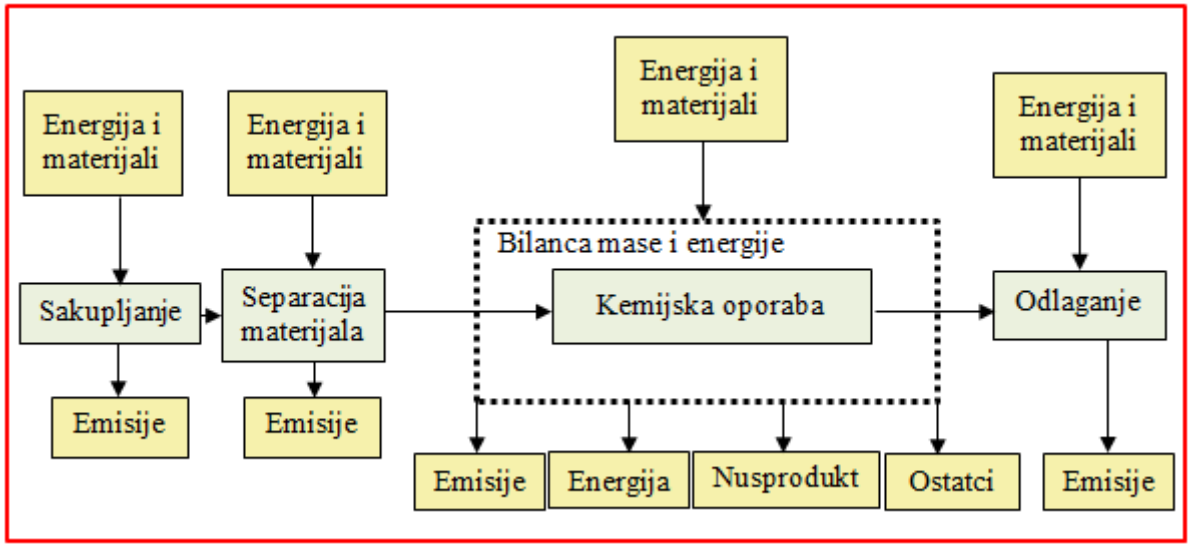
U okviru ovog rada korištena je Eco-indicator 99 (H,A) metoda, koja je srednjoročna i upotrebljava prosječne težinske faktore.

7. MODELIRANJE LCI SETOVA

7.1. Definiranje cilja i granica analize

Najprije je potrebno definirati svrhu i opseg provedbe analize. Cilj analize je procijeniti posljedice koje tehnologije kemijske oporabe plastičnog otpada imaju na okoliš i zdravlje ljudi. Nadalje, cilj je bolje razumijevanje pozitivnih učinaka i negativnih ekoloških posljedica koji mogu proizići iz komercijalizacije tehnologija pirolize i isplinjavanja otpadne plastike u usporedbi s postojećim tehnologijama gospodarenja plastičnim otpadom.

Slika 21. prikazuje opseg provedene analize. Prilikom sakupljanja podataka o predmetnim tehnologijama i formiranja LCI setova, granica tehnologija određena je prema „gate to gate" načelu te obuhvaća: predmetnu tehnologiju, sve ulazne tokove kao što su npr. potrebna električna energija, gorivo i materijali te sve izlazne tokove koji obuhvaćaju korisnu proizvedenu energiju i korisne produkte, ali i nusprodukte kao što su pepeo, šljaka i štetne emisije prema okolišu.



Slika 21. Granice LCA analize promatranih tehnologija[13]

Daljnja LCA procjena bila je provedena analizirajući cjelokupni sustav gospodarenja plastičnim otpada te je ovisno o promatranom scenariju sadržavala različite faze (Poglavlje 8.1.).

7.2. Sakupljanje podataka

LCI baze podataka ne sadržavaju setove podataka za promatrane tehnologije pirolize i isplinjavanja otpadne plastike te ih je bilo potrebno formirati kako bi se provela usporedna LCA analiza različitih načina gospodarenja plastičnim otpadom.

7.2.1. Praćeni parametri

Sakupljanje podataka, odnosno pregled literature te konačno formiranje LCI setova najdugotrajnija je faza same LCA analize. Pregledom literature sakupljeni su podaci o predmetnim tehnologijama te su praćeni ulazni i izlazni tokovi dati u nastavku:

- **Potrošnja energije i proizvodnja**

  Prilikom energetske konverzije otpada troši se energija potrebna za zagrijavanje reaktanata, pripremu i rad pumpi za cirkuliranje radnih medija kroz sustav te za obradu produkata i pročišćavanje dimnih plinova, vode i krutih ostataka.

  Produkti konverzije ovise o tipu reaktora i načinu vođenja procesa.

- **Zagađenje zraka: emisije onečišćujućih čestica i stakleničkih plinova**

  Glavnina emisija u zrak proizlazi od proizvodnje toplinske energije potrebne za odvijanje konverzija. Glavni proizvodni produkt procesa može biti električna energija pa je potrebno uključiti emisije koje nastaju izgaranjem goriva, npr. sintetskog plina (dobivenog isplinjavanjem ili pirolizom).

- **Zagađenje vode**

  Predmetne tehnologije koriste vodu kao reaktant u procesu i kao sredstvo za hlađenje (kod rasplinjavanja za hlađenje komponenata prilikom izgaranja sintetskog plina) te je potrebno pratiti zagađenje vode.

- **Preostali kruti otpad**

  Tehnologije energetske konverzije plastičnog otpada rezultiraju s krutim ostacima kao što su: pepeo, šljaka, talog, itd. Ostatne krute ostatke potrebno je adekvatno zbrinuti.

Funkcionalna jedinica prilikom prikupljanja podataka o tehnologijama je jedinica mase plastičnog otpada (metrička tona plastike).

7.2.2. LCI setovi

Tablica 4. i Tablica 5. prikazuju relevantne setove podataka tehnologija energetske oporabe plastike koji proizlaze iz sveukupnog pregleda literature. Uspoređivana su različita postojeća komercijalna i eksperimentalna postrojenja te je temeljem toga formiran raspon praćenih relevantnih parametara. Detaljnim pregledom literature skupljen je veliki niz tehničkih parametara postojećih postrojenja koji su dani u Prilogu I., prema kojima su izrađeni relevantni rasponi LCI vrijednosti.

Prilikom formiranja setova korišteni su svi dostupni podaci, tj, nije korišten „kriterij isključivanja“ pojedinih podataka (eng. *cut-off criteria*) što je sukladno s korištenom Ecoinvent bazom podataka.

Tablica 4. Raspon vrijednosti piroliza

Glavne pretpostavke						
Ulazna sirovina		mješavina otpadne plastike				
Energetska vrijednost sirovine		9,052535675				MWh/tona
Osnovni dizajn		sirovina je samo plastika, ulje/vosak glavni proizvodi				
Pretpostavljeni proizvod procesa		loživo ulje				
Parametar			**Jedinica**	**Vrijednost**		
Ulazni i izlazni tokovi procesa						
Ulaz	Potrošnja energije		kWh/tona	0,0331	-	992,0802
	Ostali ulazi (npr. voda, kisik, itd.)	Katalizatori i kemikalije	kg/tona	0,4000	-	39,3500
		Kalcij-oksid (*CaO*)	kg/tona	5,00E-05	-	46,0000
		Voda	l/tona	50,0000	-	6018,320
	Dodatno gorivo	Prirodni plin	MWh/tona	0,0013	-	1,2833
Izlaz	Energetski proizvod (npr. sintetski plin, etanol, vodik, struja, para)	Sintetski plin	MWh/tona			0,0647
		Sintetsko ulje	kg/tona	598,00	-	893,79
		Lake frakcije (tekućine)	kg/tona	5,00E-05	-	340,0000
		Plinovite frakcije	kg/tona	3,50E-05	-	312,0716
		Benzin	kg/tona	10,0000	-	11,5000
		Dizel	kg/tona	718,0570	-	900,0000
	Ostaci (npr. pepeo, ugljenizirani ostatak, itd.)	Ugljenizirani ostatak	kg/tona	50,0000	-	102,4287
		Kruti ostaci	kg/tona	80,0000	-	200,0000
		Potrošene kemikalije	kg/tona	0,1000	-	30,0000
		Anorganski talog	kg/tona			150,0000
		Neopasni kruti otpad	kg/tona	5,00E-03	-	50,0000
		Voskasti filtar za spaljivanje	kg/tona	1,50E-05	-	46,0000
	Gubici vode		l/tona	47,0000	-	1669,080

Nastavak Tablica 4.:

Parametar		Jedinica	Vrijednost		
IZlaz	**Emisije u zrak**				
	Krute čestice (*PM*)	kg/tona	0,0027	-	0,2000
	Ugljikov dioksid (CO_2)	kg/tona	250,0000	-	481,0000
	Metan (CH_4)	kg/tona	13,0000	-	32,5000
	Klorovodik (*HCl*)	kg/tona			0,0002
	Ugljikovodici	kg/tona	1,70E-04	-	4,0000
	Sumporov dioksid (SO_2)	kg/tona	5,00E-07	-	0,1667
	Dušikov oksid (N_2O)	kg/tona	1,50E-01	-	0,7667
	NO_x izraženi kao NO_2	kg/tona	1,00E-07	-	45,2500
	Ugljikov monoksid (*CO*)	kg/tona	1,45E-01	-	4,5000
	Živa (*Hg*)	kg/tona			1,76E-11
	Olovo (*Pb*)	kg/tona	1,00E-04	-	1,00E-02
	Hlapivi organski spojevi (*VOC*)	kg/tona	8,50E-03	-	0,8000
	Amonijak (NH_3)	kg/tona	5,00E-03	-	6,00E-03
Cijena					
Trošak po projektnom kapacitetu		$/tona na dan	32352,83	-	440924,5

Tablica 5. Raspon vrijednosti isplinjavanje

Glavne pretpostavke					
Ulazna sirovina	miješana otpadna plastika				
Energetska vrijednost sirovine	9,052535675				MWh/tona
Osnovni dizajn	sirovina je samo plastika, sintetski plin glavni proizvod				
Pretpostavljeni proizvod procesa	električna energija				
Parametar			Jedinica	Vrijednost	
Ulazni i izlazni tokovi procesa					
Ulaz	Potrošnja energije		kWh/tona	383,3157 -	665,2587
	Ostali ulazi (npr. voda, kisik, itd.)	Kisik	kg/tona	1102,43 -	1442,59
		Katalizatori i kemikalije	kg/tona		53,5
		Dizel za predobradu	l/tona		0,2086
		Sredstvo za čišćenje i hlađenje plina	kg/tona		5
		Aktivni ugljen za čišćenje i hlađenje plina	kg/tona	0,491525 -	0,5082
		Feldspati za čišćenje i hlađenje plina	kg/tona		0,4173
		Toplinska energija	kWh/tona		22,1753
		Vodena para	kWh/tona		105,5966
		Voda	l/tona	2253,259 -	6768,12
		Hidratizirano vapno	kg/tona	6,40625 -	6,5574

Nastavak Tablica 5.:

Parametar			Jedinica	Vrijednost		
Ulaz: Dodatno gorivo		Prirodni plin	kWh/tona			1560
Izlaz	Energetski proizvodi	Električna energija	kWh/tona	621,5243	-	2288
		Para	kg/tona	954,593	-	2864,84
	Materijalni nusprodukti	Zaostali plin	kg/tona			214
		Sumpor	kg/tona			1,5
		Soli	kg/tona	4,5	-	6,5
		Šljaka	kg/tona	12	-	212
	Ostaci (npr. pepeo, ugljenizirani ostatak, itd.)	Ugljenizirani ostatak	kg/tona			148,66
		Šljaka	kg/tona	0,883218	-	15
		Katran	kg/tona			141,4995
		Kruti ostaci rasplinjača	kg/tona	15	-	60
		Potrošene kemikalije i katalizatori	kg/tona			1,695
		Pepeo	kg/tona	20,06335	-	220
		Kruti ostaci sustava za pročišćavanje dim.pl.	kg/tona	6,875	-	7,0492
		Anorganski talog	kg/tona			22,5
		Neopasni kruti otpad	kg/tona			6,5
	Emisije u zrak					
	Krute čestice (*PM*)		kg/tona	5,00E-03	-	1,77E-01
	Krute čestice (*PM10*)		kg/tona			3,50E-04
	Krute čestice (*PM2,5*)		kg/tona	1,00E-02	-	6,69E-02
	Fosilni ugljikov dioksid (CO_{2fosil})		kg/tona	172,5	-	2828,125
	Metan (CH_4)		kg/tona	0,0001	-	0,945
	Klorovodik (*HCl*)		kg/tona	1,80E-04	-	1,04E-01
	Sumporov dioksid (SO_2)		kg/tona	0,058	-	0,19
	Sumporovi oksidi (*SO*)		kg/tona	0,000025	-	1,03E-01
	Dušikov oksid (N_2O)		kg/tona	0,0005	-	0,1975
	NO_x izraženi kao NO_2		kg/tona	0,0625	-	0,555
	Ugljikov monoksid (*CO*)		kg/tona	0,065	-	0,73
	Živa (*Hg*)		kg/tona	3,00E-07	-	1,70E-06
	Kadmij (*Cd*)		kg/tona	2,55E-07	-	2,27E-05
	Olovo (*Pb*)		kg/tona	3,60E-06	-	8,52E-03
	Hlapivi organski spojevi (*VOC*)		kg/tona	0,02	-	0,45
	Opasni zagađivači zraka (*HAP*)		kg/tona			0,05
	Amonijak (NH_3)		kg/tona	3,13E-05	-	3,45E-05
	Dioksini i furani		kg/tona	3,45E-12	-	6,82E-12
	Acetaldehidi		kg/tona			0,03
	Nemetanski organski spojevi (*TNMOC*)		kg/tona			0,1
	Antimon (*Sb*)		kg/tona	5,31E-07	-	3,52E-04

Nastavak Tablica 5.:

Parametar		Jedinica	Vrijednost		
Izlaz	Arsen (*As*)	kg/tona	6,56E-07	-	1,56E-06
	Titan (*Ti*)	kg/tona	1,69E-06	-	3,28E-06
	Krom (*Cr*)	kg/tona	9,38E-05	-	9,89E-04
	Željezo (*Fe*)	kg/tona	1,29E-03	-	4,66E-03
	Bakar (*Cu*)	kg/tona	2,59E-05	-	1,31E-02
	Cink (*Zn*)	kg/tona			6,25E-05
	Emisije u vodu				
	Otpadne vode	l/tona	2503,62	-	5841,78
Cijena					
Trošak po projektnom kapacitetu		$/tona na dan	388732,39	-	550173,50

7.2.3. Prilagodba setova za LCA analizu

Formirani LCI setovi upisuju se u računalni program OpenLCA koristeći bazu podataka Ecoinvent koja se sastoji od „*Unit process*“ (UPR) setova za tehnologije (*gate to gate* granica) i „*System process*“ setova (*cradle to gate* granica). Ulazni i izlazni podaci predmetnih tehnologija upisuju se na način da se povezuju s najbližim proizvodima tj. izlazima drugih tehnologija iz baze. Za povezivanje se koriste europski i lokalni UPR i LCI podaci koji modeliraju tržišta pojedinih materijala i/ili usluga te procese gospodarenja otpadom. Svaki pojedini ulaz i izlaz povezan je s lokalnom tržišnom aktivnošću razmatranog proizvoda. UPR LCI skup podataka „tržišne aktivnosti“ prikuplja sve aktivnosti s istim referentnim proizvodom na određenom području te uključuje utjecaje svih potrebnih međuaktivnosti koje prethode uporabi pojedinog proizvoda na određenoj lokaciji, uključujući: proizvodnju, transport, preradu i transformacije. Usporedna LCA analiza provedena je koristeći srednje vrijednosti praćenih parametara te je formirane setove potrebno prije upisa prilagoditi.

7.2.3.1. LCI piroliza

Pregledom literature (Prilog I.) ustanovljeno je postojanje različitih postrojenja za pirolizu plastičnog otpada koja se razlikuju prema krajnjom produktu procesa. Pojedina postrojenja proizvode sirovo sintetsko ulje te ga bez daljnje obrade prodaju na tržištu, s druge strane, moguća je lokalna obrada sintetskog ulja te razdvajanje na lake i teže frakcije. Pregledom literature ustanovljeno je postojanje i postrojenja koja lokalno destiliraju proizvedeno sintetsko ulje radi proizvodnje benzina i dizela.

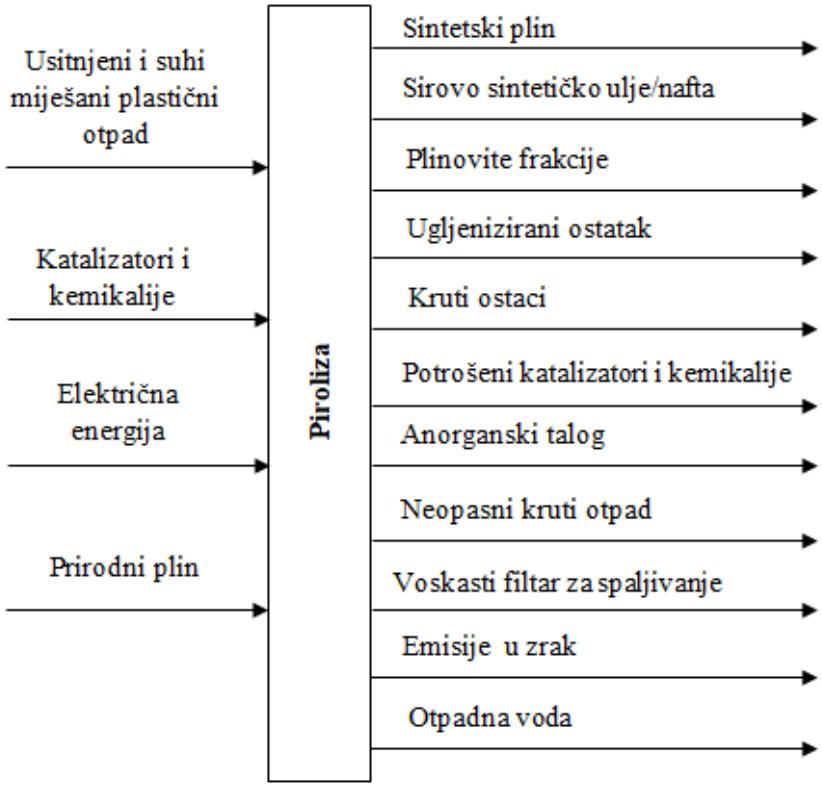
Tablica 6. prikazuje rezultate provedene usporedne analize produkata promatranih postrojenja s implementiranom tehnologijom pirolize, a oznake su sukladne oznakama u prilogu (Tablica priloga 2. i Tablica priloga 3.).

Tablica 6. Analiza proizvoda pirolize

Oznaka	Sintetsko ulje	Lake frakcije	Plinovite frakcije	Benzin	Dizel	Ukupno:	
						Tekući proizvod	Plinoviti proizvod
	kg/tona						
P1	893,79					893,79	0,00
P2	628,63		100-250			628,63	100-250
P3	744,83	150-200				919,83	0,00
P4				11,5	850,00	861,50	0,00
P5				10,0	750,00	760,00	0,00
P6		0,02				0,02	0,00
P7		0,00	3,5E-05			0,00	3,50E-05
P8		340,00	150,00			850,00	150,00
P9		265,00	147,00			713,00	147,00
P10	822,00		90,00			822,00	90,00
P11	780,18		99,79			780,18	99,79
P12	800,00		100,00			800,00	100,00
P13			150,00			0,00	150,00
P14					718,06	718,06	0,00
P15	650,48		102,43			650,48	102,43
P16	886,70		60,00			886,70	60,00
P17	673,89		150,00			673,89	150,00
P18	886,70					886,70	0,00
P19	744,83		175,00			744,83	175,00
P20					900,00	900,00	0,00
P21						0,00	0,00
P22	794,11					794,11	0,00
P23	598,00		312,07			598,00	312,07
Referentne vrijednosti:						Min. / Max.	Min. / Max.
						598,00 / 919,83	3,5E-05 / 312,07
Srednja referentna vrijednost:						758,91	156,04

Analizom je ustanovljeno da su količine tekućih, plinovitih i krutih frakcija sukladne uspoređujući različita postrojenja, tj. količina proizvedenih proizvoda istog je reda veličine. Zbog toga je pretpostavljeno da postrojenje za pirolizu proizvodi tekuće gorivo koje je po svojstvima slično sirovoj nafti jer u sebi sadrži sve frakcije koje se mogu naknadno izdvojiti te je tako definiran konačan LCI set podataka za pirolizu.

U poglavlju 4.5. opisani su mogući katalizatori koje se mogu koristi u procesu pirolize otpadne plastike te je u daljnjoj analizi usvojeno da se kao katalizatori koriste zeoliti. Modeliranje sustava izvršeno koristeći srednje vrijednosti formiranih setova, Tablica 7. prikazuje konačan LCI set tehnologije, a Slika 22. predstavlja grafički prikaz modeliranog seta.



Slika 22. Procesni podaci piroliza

Tablica 7. Konačni LCI set piroliza

Ulazni i izlazni tokovi procesa					
			modelirano u openLCA	Jedinica	Iznos
Ulaz	Ulazna sirovina	Posušena i usitnjena plastika	waste plastic, mixture	tona	1,00
	Potrošnja energije	Električna energija	electricity, medium voltage	kWh/tona	496,06
	Ostali ulazi (npr. voda, kisik, itd.)	Katalizatori i kemikalije	zeolite, powder	kg/tona	19,88
		Voda	water, turbine use, unspecified natural origin	l/tona	3034,16
	Dodatno gorivo	Prirodni plin	natural gas, high pressure	MWh/tona	0,64
Izlaz	Energetski proizvod (npr. sintetski plin, etanol, vodik, struja, para)	Sintetski plin	synthetic gas	MWh/tona	0,06
		Nafta	petroleum	kg/tona	758,91
		Plinovite frakcije	natural gas, high pressure	kg/tona	156,04
	Ostaci (npr. pepeo, čađa, itd.)	Ugljenizirani ostatak	carbon black	kg/tona	76,21
		Kruti ostaci	process-specific burdens, residual material landfill	kg/tona	140,00
		Potrošene kemikalije	waste zeolite	kg/tona	15,05
		Anorganski talog	refinery sludge	kg/tona	150,00
		Neopasni kruti otpad	process-specific burden, sanitary landfill	kg/tona	25,00
		Voskasti filter za spaljivanje	hazardous waste, for incineration	kg/tona	23,00
	Gubici vode		waste water, average	l/tona	858,04
	Emisije u zrak				
	Krute čestice (*PM*)		Particulates, > 2.5 um, and < 10um	kg/tona	0,1013
	Ugljikov dioksid (CO_2)		Carbon dioxide, fossil	kg/tona	365,50
	Metan (CH_4)		Methane, fossil	kg/tona	22,75
	Klorovodik (*HCl*)		Hydrogen chloride	kg/tona	1,50E-04
	Ugljikovodici		Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	kg/tona	2,00
	Sumporov dioksid (SO_2)		Sulfur dioxide	kg/tona	0,0833
	Dušikov oksid (N_2O)		Dinitrogen monoxide	kg/tona	0,46
	NO_x izraženi kao NO_2		Nitrogen oxides	kg/tona	22,63
	Ugljikov monoksid (*CO*)		Carbon monoxide, fossil	kg/tona	2,32
	Živa (*Hg*)		Mercury	kg/tona	1,76E-11
	Olovo (*Pb*)		Lead	kg/tona	5,05E-03
	Hlapivi organski spojevi (*VOC*)		NMVOC, non-methane volatile organic compounds	kg/tona	0,4043
	Amonijak (NH_3)		Ammonia	kg/tona	5,50E-03

7.2.3.2. LCI isplinjavanje

Tablica 8. prikazuje konačan LCI set tehnologije isplinjavanje.

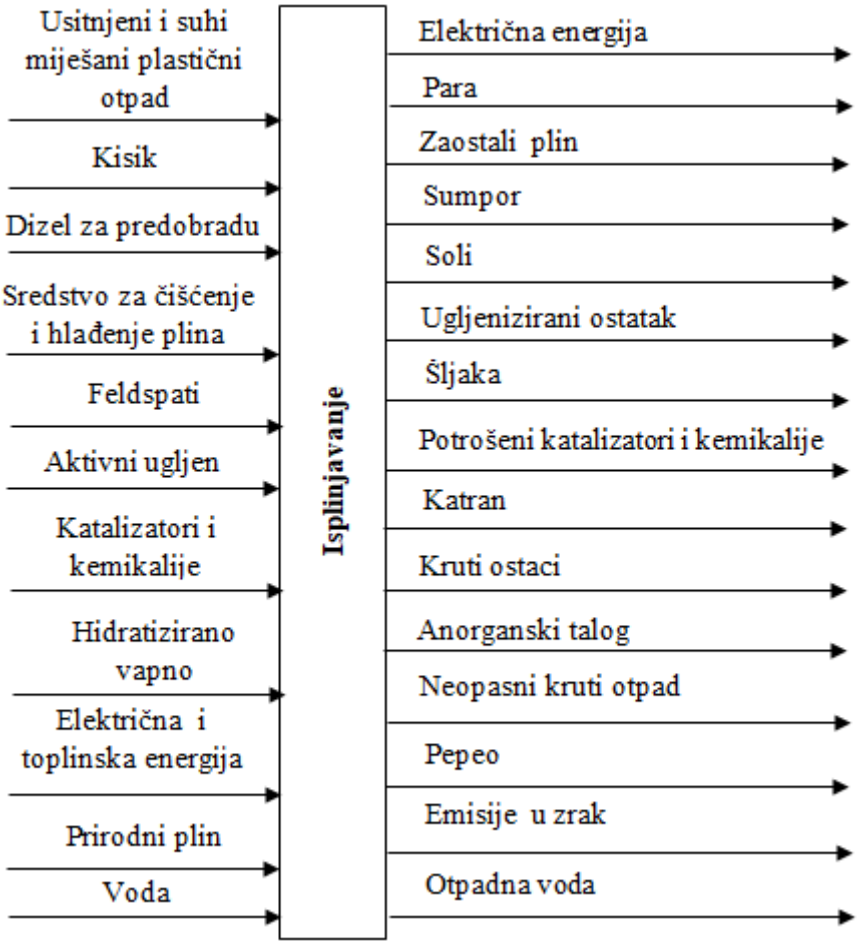
Tablica 8. Konačni LCI set isplinjavanje

Ulazni i izlazni tokovi procesa					
			modelirano u openLCA	Jedinica	Iznos
Ulaz	Ulazna sirovina	Posušena i usitnjena plastika	waste plastic, mixture	tona	1,00
	Potrošnja energije		electricity medium voltage	kWh/tona	524,29
	Ostali ulazi	Kisik	oxygen	kg/tona	1272,51
		Katalizatori i kemikalije	zeolite, powder	kg/tona	53,50
		Dizel za predobradu	diesel	l/tona	0,21
		Sredstvo za čišćenje i hlađenje plina	sodium hydroxide, without water, in 50%solution state	kg/tona	5,00
		Aktivni ugljen	activated carbon, granular	kg/tona	0,50
		Feldspati	feldspar	kg/tona	0,42
		Toplinska energija	heat, from steam, in chemical industy	kWh/tona	127,77
		Voda	water, turbine use, unspecified natural origin	l/tona	5002,98
		Hidratizirano vapno	lime, hydrated, loose weight	kg/tona	6,48
	Dodatno gorivo	Prirodni plin	natural gas, high pressure	kWh/tona	1560,00
Izlaz	Energetski proizvodi	Električna energija	electricity medium voltage	kWh/tona	1454,76
		Para	steam, in chemical industry	kg/tona	1909,71
	Materijalni nusprodukti	Zaostali plin	refinery gas	kg/tona	214,00
		Sumpor	sulfur	kg/tona	1,50
		Soli	salt tailing from potash mine	kg/tona	5,50
		Šljaka	ground granulated blast furnace slag	kg/tona	112,00
	Ostaci	Ugljenizirani ostatak	carbon black	kg/tona	148,66
		Šljaka	blast funace slag	kg/tona	7,94
		Katran	coal tar	kg/tona	141,50
		Kruti ostaci	process-specific burdens, residual material landfill	kg/tona	44,46
		Potrošene kemikalije i katalizatori	waste zeolite	kg/tona	1,70
		Pepeo	fly ash and scrubber sludge	kg/tona	120,03
		Anorganski talog	refinery sludge	kg/tona	22,50
		Neopasni kruti otpad	process-specific burden, sanitary landfill	kg/tona	6,50

Nastavak Tablica 8.:

		modelirano u openLCA	Jedinica	Iznos
Izlaz	Emisije u zrak			
	Krute čestice (*PM*)	Particulates, > 2.5 um, and < 10um	kg/tona	9,08E-02
	Krute čestice (*PM10*)		kg/tona	3,50E-04
	Krute čestice (*PM2,5*)	Particulates, < 2,5 um	kg/tona	3,85E-02
	Fosilni ugljikov dioksid (CO_{2fosil})	Carbon dioxide, fossil	kg/tona	1500,31
	Metan (CH_4)	Methane, fossil	kg/tona	4,73E-01
	Klorovodik (*HCl*)	Hydrogen chloride	kg/tona	5,22E-02
	Sumporov dioksid (SO_2)	Sulfur dixide	kg/tona	1,24E-01
	Sumporovi oksidi (*SO*)	Sulfur oxides	kg/tona	5,17E-02
	Dušikov oksid (N_2O)	Dinitrogen monoxide	kg/tona	9,90E-02
	NO_x izraženi kao NO_2	Nitrogen oxides	kg/tona	3,09E-01
	Ugljikov monoksid (*CO*)	Carbon monoxide, fossil	kg/tona	3,98E-01
	Živa (*Hg*)	Mercury	kg/tona	1,00E-06
	Kadmij (*Cd*)	Cadmium	kg/tona	1,15E-05
	Olovo (*Pb*)	Lead	kg/tona	4,26E-03
	Hlapivi organski spojevi (*VOC*)	VOC, volatile organic compounds	kg/tona	2,35E-01
	Opasni zagađivači zraka (*HAP*)	Hazardous Air Pollutants (HAPs), unspecified	kg/tona	5,00E-02
	Amonijak (NH_3)	Ammonia	kg/tona	3,29E-05
	Dioksini i furani	Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	kg/tona	5,13E-12
	Acetaldehidi	Acetaldehyde	kg/tona	0,03
	Nemetanski organski spojevi (*TNMOC*)	NMVOC, non-methan volatile organic compunds, unspecified origin	kg/tona	0,1
	Antimon (*Sb*)	Antiomony	kg/tona	1,76E-04
	Arsen (*As*)	Arsenic	kg/tona	1,11E-06
	Titanij (*Ti*)	Tittanium	kg/tona	2,49E-06
	Krom (*Cr*)	Chromium	kg/tona	5,41E-04
	Željezo (*Fe*)	Iron	kg/tona	2,98E-03
	Bakar (*Cu*)	Copper	kg/tona	6,55E-03
	Cink (*Zn*)	Zinc	kg/tona	6,25E-05
	Emisije u vodu			
	Otpadne vode	Water, waste	kg/tona	4172,70

Uobičajena praksa je, što je ustanovljeno pregledom literature (Prilog I.), da su postrojenja za isplinjavanje projektirana na način da se dobiveni sintetski plin odmah lokalno koristi za proizvodnju električne energije koja je glavni proizvod postrojenja te je tako isplinjavanje modelirano i u okviru ovog rada. Modeliranje isplinjavanja izvršeno je koristeći srednje vrijednosti formiranog seta iz prethodnog poglavlja. Korišteni katalizatori modelirani su kao zeoliti. Razlika konačnog seta u odnosu na formirani raspon vrijednosti (Tablica 5.) je ta što su kruti ostaci rasplinjača i kruti ostaci sustava za počišćivanje dimnih plinova modelirani zajedno kao kruti ostaci (*process-specific burdens, residual material landfill*). Slika 23. je grafički prikaz formiranog LCI seta isplinjavanja.



Slika 23. Procesni podaci isplinjavanje

8. USPOREDNA LCA ANALIZA

Korištenjem formiranih LCI setova moguće je modelirati životne cikluse predmetnih tehnologija kemijske oporabe plastičnog otpada te pronaći i usporediti moguća rješenja njihove implementacije u sustav gospodarenja otpadnom plastikom te na taj način pronaći rješenje s najmanjim sveukupnim utjecajem na okoliš. U okviru ovog rada modeliranje tehnologija pirolize i isplinjavanja plastičnog otpada provedeno je u otvorenom (javno dostupnom) računalnom programu OpenLCA, koristeći također javno dostupnu LCI bazu Ecoinvent. Provedena je cjelokupna LCA analiza koristeći CML 2001 (baseline) metodu te pojednostavljena LCA procjena utjecaja na okoliš koristeći Eco-indicator 99 (H,A) metodu. U oba slučaja korištena je fizička alokacija. Provedena je usporedna analiza različitih scenarija gospodarenja plastičnim otpadom. Analiza uključuje samo rad pojedinih sustava, a isključuje utjecaje izgradnje potrebnih postrojenja. Tehnologije gospodarenja otpadom izolirane su tako da plastični otpad u granice analize ulazi sa svojim fizičkim i kemijskim svojstvima te bez opterećenja (eng. *burden free*). Stoga se analiza sustava može opisati kao *gate to grave* odnosno *gate to cradle* analiza, ovisno o tome je li otpadna plastika zbrinuta na odlagalištu ili energetski oporabljena u novi proizvod/energent.

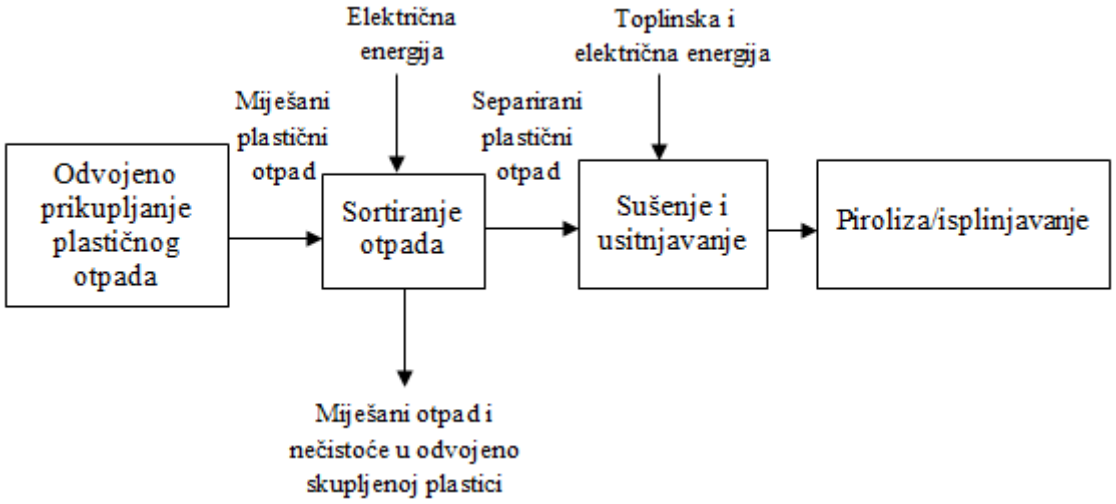
8.1. Analizirani scenariji gospodarenja plastičnim otpadom

U okviru ovog rada provedena je usporedna analiza alternativnih tehnologija gospodarenja plastičnim otpadom: piroliza i isplinjavanje te konvencionalnih načina gospodarenja otpadom: spaljivanje i odlaganje. Modeliranje cjelokupnih sustava provedeno je koristeći procese dostupne u Ecoinvent bazi te novoformirane LCI setove za pirolizu i isplinjavanje. Prvi korak svih analiziranih procesa je sustav odvojenog prikupljanja plastičnog otpada, bilo kućanskog ili iz komercijalnih djelatnosti.

Analizirani su sljedeći scenariji:

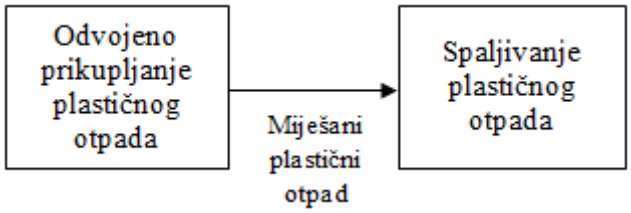
- Scenarij I – implementacija tehnologije isplinjavanja plastičnog otpada
- Scenarij II – implementacija tehnologije pirolize plastičnog otpada
- Scenarij III – konvencionalno spaljivanje plastičnog otpada
- Scenarij IV – sanitarno odlaganje plastičnog otpada (referentni scenarij)

Slika 24. prikazuje scenarije implementacije predmetnih tehnologija. Ulaznu sirovinu tehnologija, tj, plastični otpad potrebno je najprije usitniti i osušiti.



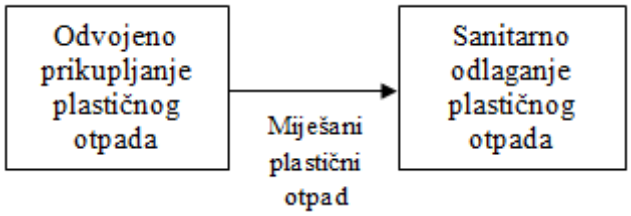
Slika 24. Shema toka scenarija I i II

Slika 25. prikazuje scenarij s spalionicom. Sustav je modeliran na bazi postojećih LCI podataka iz Ecoinvent baze te podataka o postojećoj modernoj spalionici otpada u danskom gradu Sønderborg. Tehnički parametri postrojenja vezani uz energetsku oporabu modelirani su prema spalionici otpada u Sønderborgu. Radi se o modernom kogeneracijskom postrojenju ukupne učinkovitosti 90,5%, od čega učinkovitost proizvodnje električne energije iznosi 16,6%.[30] Emisije postrojenja opisane su putem podataka iz LCI baze koristeći tehnologiju „*treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration with fly ash extraction | waste plastic, mixture | Cutoff, U*“ koja predstavlja spalionicu svog komunalnog otpada, ali podaci opisuju spaljivanje samo plastičnog dijela otpada.



Slika 25. Scenarij III

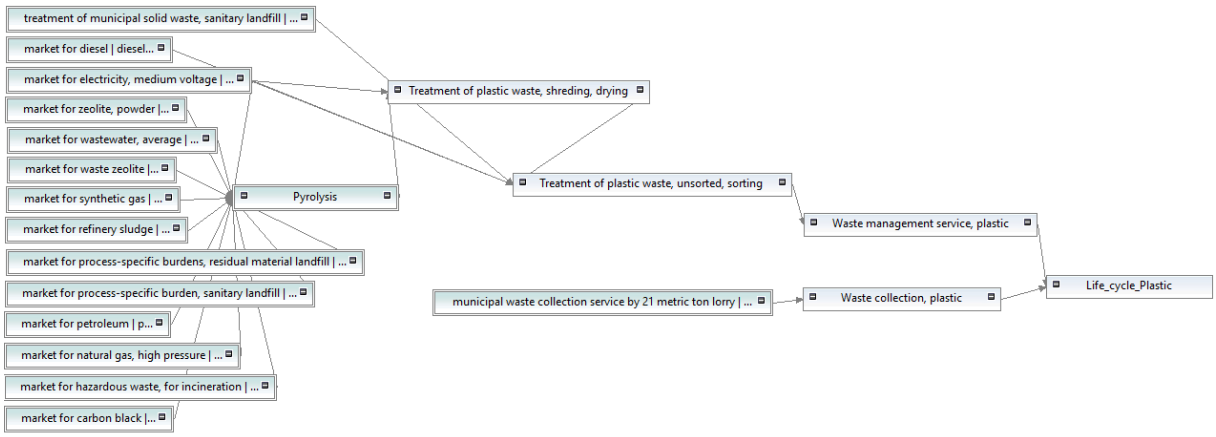
Slika 26. prikazuje sanitarno odlaganje plastičnog otpada koje je modelirano tehnologijom „*treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill | waste plastic, mixture | Cutoff, U*“, a uključuje temeljne i pokrovne brtvene slojeve, sustav za otplinjavanje te drenažni sustav za prikupljanje i obradu procjednih voda. Temeljni brtveni sloj sprječava istjecanje procjednih voda u temeljno tlo, a zadaća pokrovnog sloja je spriječiti procjeđivanje oborinskih voda u tijelo odlagališta i nekontroliranu emisiju plinova u okoliš.[31]



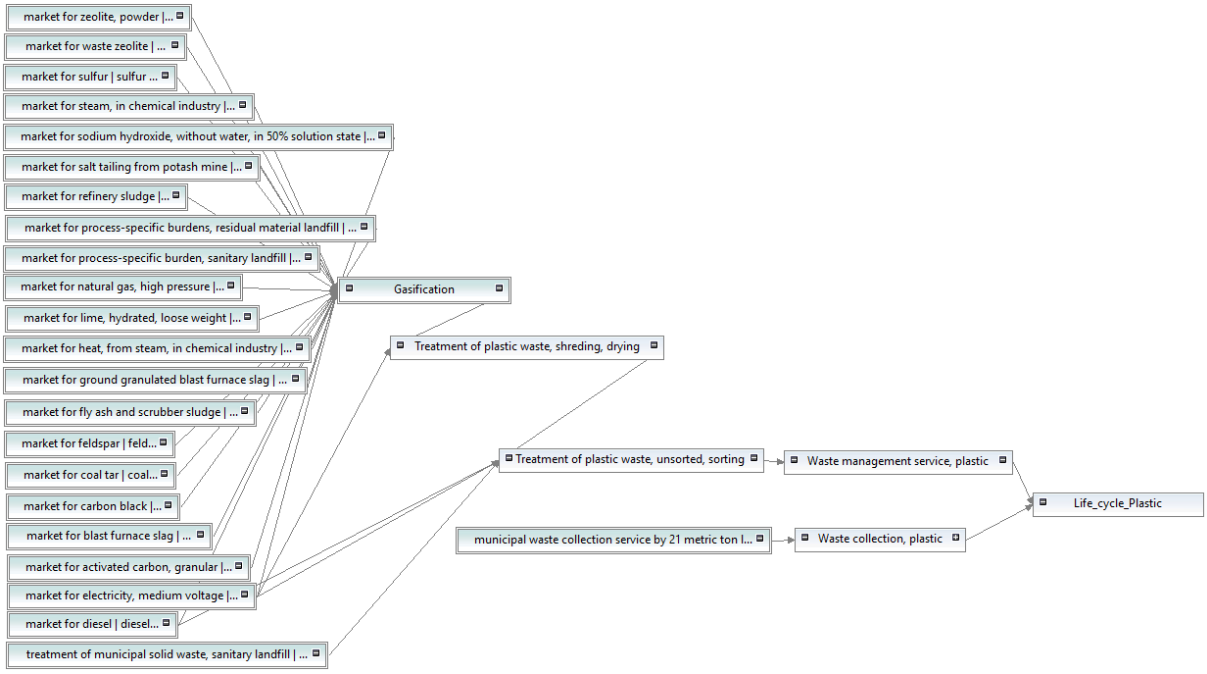
Slika 26. Scenarij IV

8.2. Prikaz modeliranih sustava

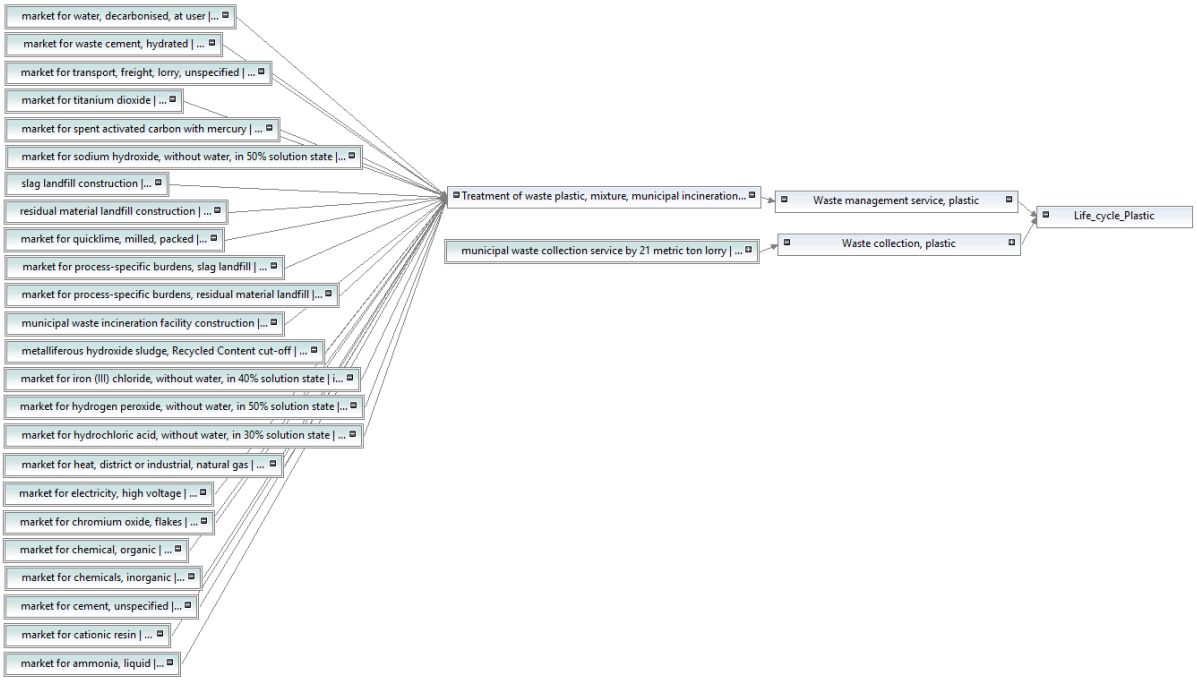
Slike u nastavku prikazuju način modeliranja scenarija u programu OpenLCA, tj. način povezivanja s okolnim tehnologijama, što je izvedeno koristeći u bazi dostupne europske i lokalne UPR i LCI podatke.



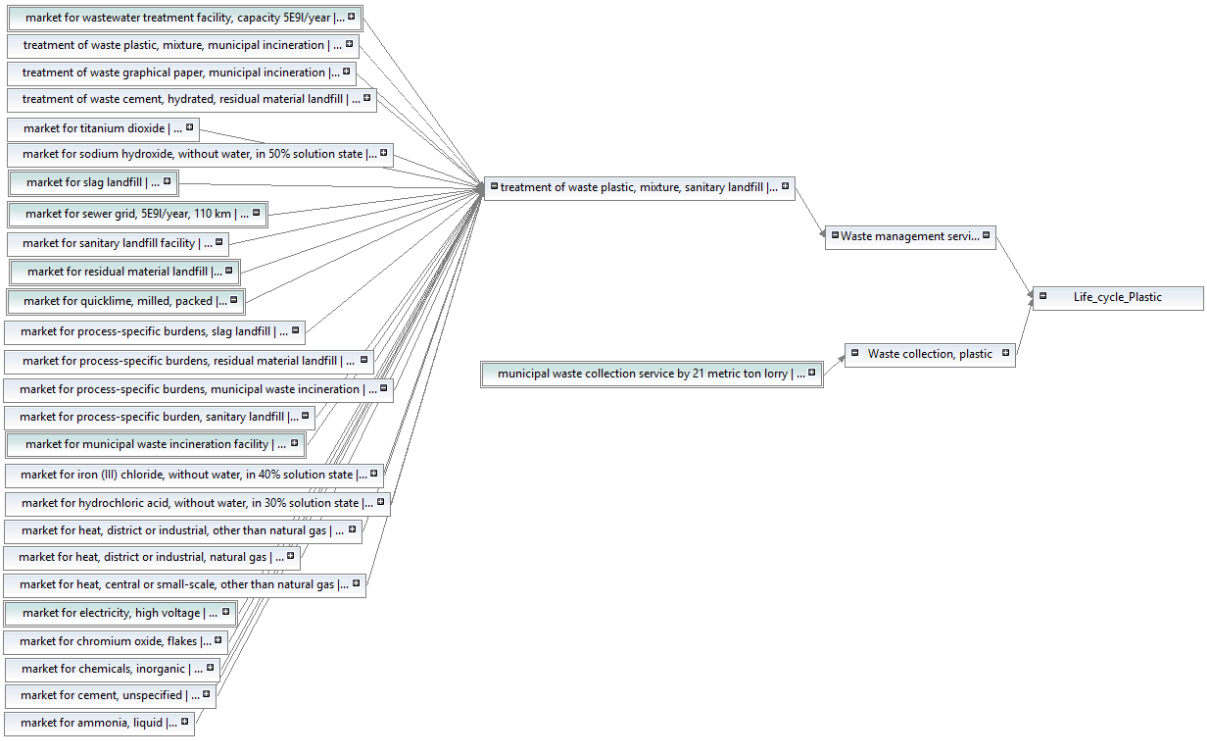
Slika 27. Modeliranje pirolize



Slika 28. Modeliranje isplinjavanja



Slika 29. Modeliranje spalionice



Slika 30. Modeliranje odlaganja

9. REZULTATI I RASPRAVA

Slijedi pregled rezultata provedenih LCA analiza koristeći CML 2001 (baseline) metodu te Eco-indicator 99 (H,A) metodu. Razmatranje multifunkcionalnosti, alokacije utjecaja te koristi proizvodnje sekundarnih materijalnih i energetskih tokova provedeno je koristeći metodu proširenja sustava što podrazumijeva da se utjecaji na okoliš povezani s razmatranim aktivnostima gospodarenja otpadom uzimaju u obzir tako da se uspoređuju s izbjegnutim utjecajima koji se odnose na smanjenje potrošnje materijalnih sirovina i primarne energije. Proizvodnja sekundarnih proizvoda promatranih procesa vrednovana je kao izbjegnuta potrošnja primarnih proizvoda, odnosno vrednovana je izbjegnuta proizvodnja nafte, plina te električne i toplinske energije. Povoljan utjecaj izbjegnute proizvodnje ovisi o postojećem energetskom miksu koji zamjenjuje, što je definirano prilikom povezivanja ulaznih i izlaznih tokova s lokalnim tržištima. Rezultati se interpretiraju tako da negativna vrijednost pojedinog indikatora ili kategorije utjecaja označava povoljno djelovanje promatranog sustava na promatranu kategoriju utjecaja, a veća pozitivna vrijednost predstavlja veći štetni utjecaj u usporedbi s tehnologijama, odnosno energetskim miksom koje zamjenjuje.

9.1. Rezultati CML metoda

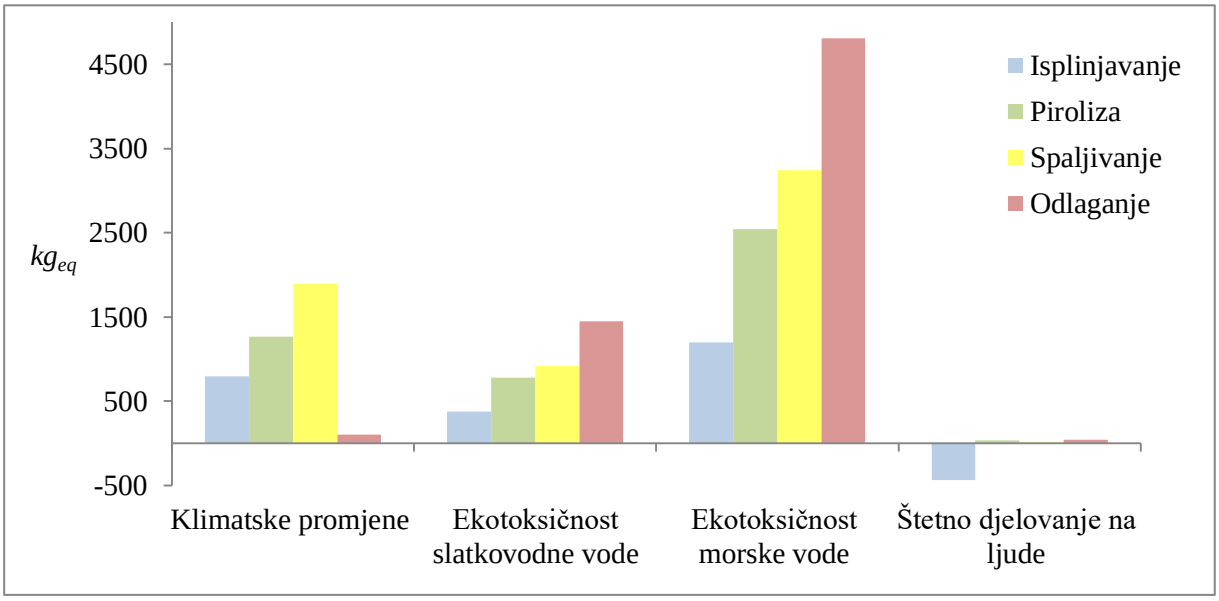
9.1.1. Apsolutni rezultati

Tablica 9. daje prikaz rezultata provedene LCA analize.

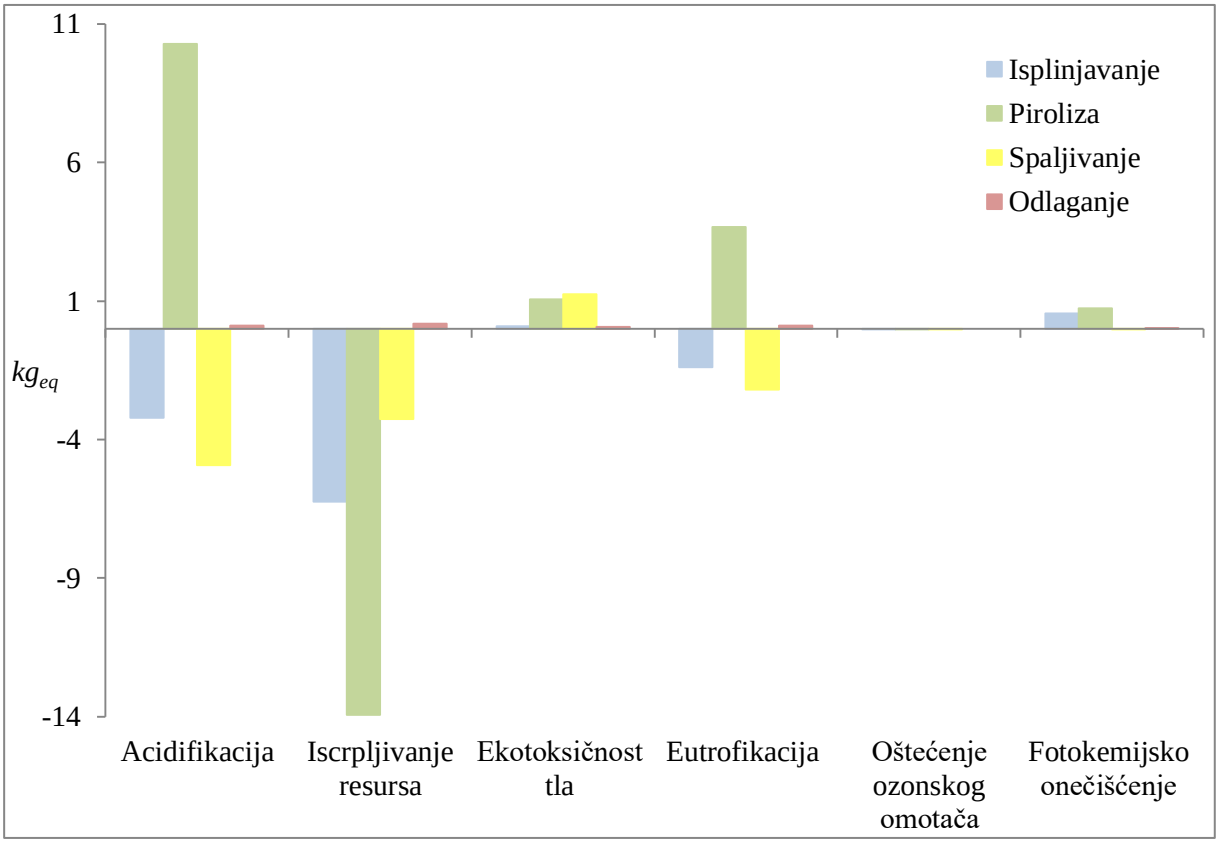
Tablica 9. Prikaz rezultata CML

Kategorija utjecaja	Isplinjavanje	Piroliza	Spaljivanje	Odlaganje
Acidifikacija [*kg SO_{2eq}*]	-3,2026	10,2877	-4,9311	0,1274
Klimatske promjene [*kg CO_{2eq}*]	792,2331	1262,8063	1895,5868	103,8144
Iscrpljivanje resursa [*kg Sb_{eq}*]	-6,2471	-13,9280	-3,2632	0,1784
Ekotoksičnost slatke vode [*kg 1,4-DCB_{eq}*]	372,9950	781,8909	916,9292	1446,6588
Ekotoksičnost morske vode [*kg 1,4-DCB_{eq}*]	1199,8544	2544,6306	3242,0956	4809,1071
Ekotoksičnost tla [*kg 1,4-DCB_{eq}*]	0,0815	1,0722	1,2526	0,0758
Eutrofikacija [*kg $P0_4^{3-}{}_{eq}$*]	-1,3761	3,6673	-2,1936	0,1209
Štetno djelovanje po ljude [*kg 1,4-DCB_{eq}*]	-438,0138	29,8831	0,7746	40,6631
Oštećenje ozonskog omotača [*kg CFC-11_{eq}*]	-8,2850E-05	-3,13E-04	-4,3281E-6	4,1488E-6
Fotokemijsko onečišćenje [*kg C_2H_{4eq}*]	0,5640	0,7494	-0,0078	0,0217

Slika 31. i Slika 32. prikazuju grafički prikaz rezultata LCA analize.



Slika 31. Prikaz apsolutnih rezultata CML a).



Slika 32. Prikaz apsolutnih rezultata CML b)

S aspekta klimatskih promjena najveći potencijal globalnog zagrijavanja ima spaljivanje, a slijede redom piroliza, isplinjavanje, i odlaganje. Velik potencijal povezan je s emisijama koje nastaju spaljivanjem otpada, odnosno spaljivanjem sintetskog plina radi proizvodnje električne energije kod isplinjavanja, a za loš rezultat pirolize najzaslužnije su visoke emisije metana i ugljikovog dioksida što je vidljivo iz formiranog LCI seta.

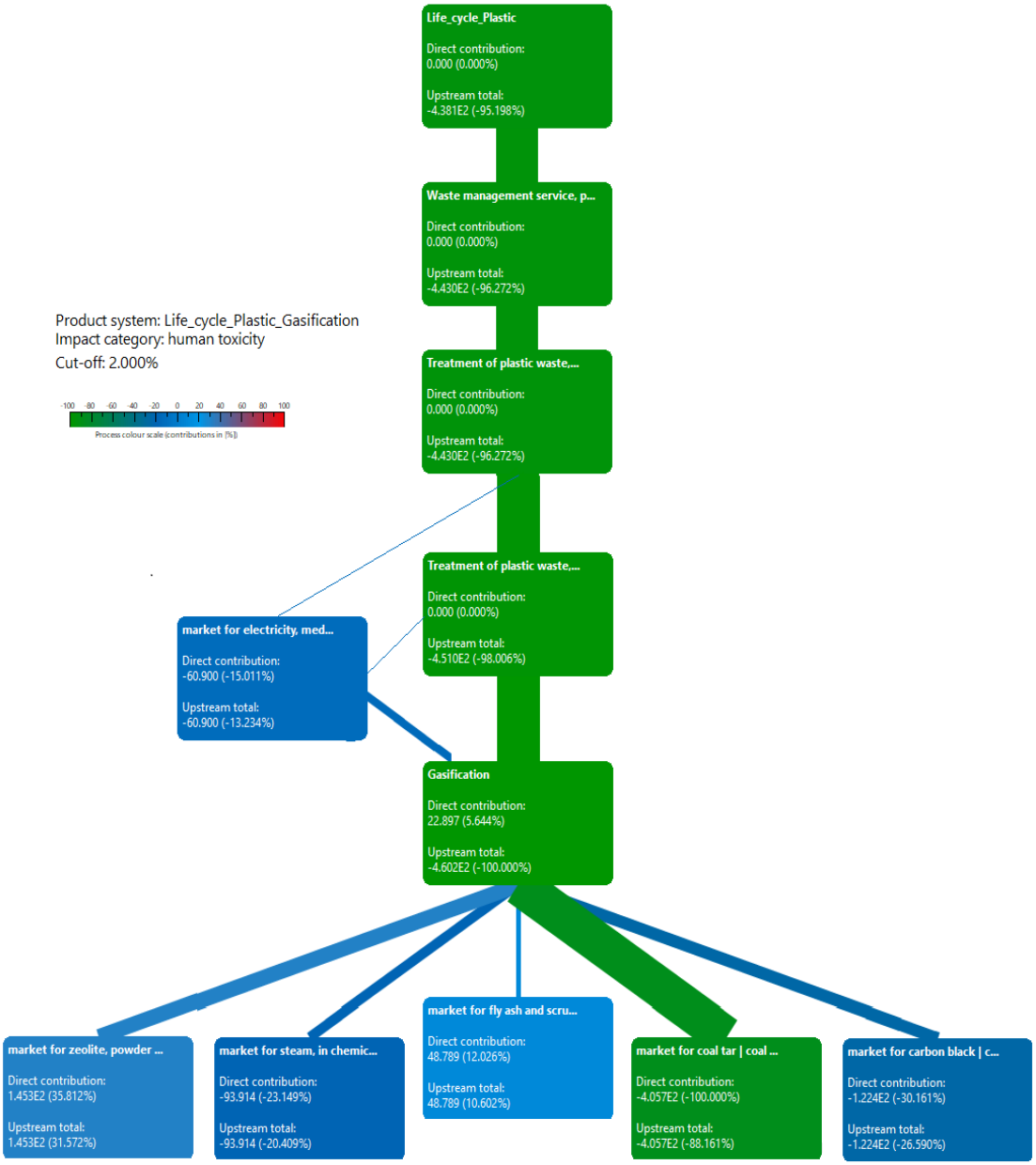
Najveći štetan utjecaj na vodu ima sanitarno odlaganje otpada, a implementacija tehnologije isplinjavanja sveukupno povoljno djeluje na ljudsko zdravlje jer su utjecaji izbjegnute proizvodnje negativni.

Implementacija tehnologije pirolize u sustav gospodarenja otpadnom plastikom ima najveći potencijal zakiseljenja (acidifikacije), što je povezano s velikim emisijama dušikovih oksida tijekom samog procesa pirolize što je vidljivo iz formiranog LCI seta. Sve tehnologije osim odlaganja pozitivno djeluju na iscrpljivanje resursa, jer u konačnici dovode do smanjenja potrošnje resursa. Tijekom procesa pirolize evidentirana je povećana emisija dušikovih oksida i amonijaka u usporedbi s drugim promatranim tehnologijama te očekivano najveći štetan utjecaj na eutrofikaciju ima upravo piroliza. Sve promatrane tehnologije osim odlaganja pozitivno utječu na oštećenje ozonskog omotača, a utjecaj alternativnih tehnologija pirolize i isplinjavanja na stvaranje prizemnog ozona znatno je veći od potencijala konvencionalnih tehnologija spaljivanja i odlaganja.

9.1.1.1. Pregled utjecaja pojedinih faza scenarija

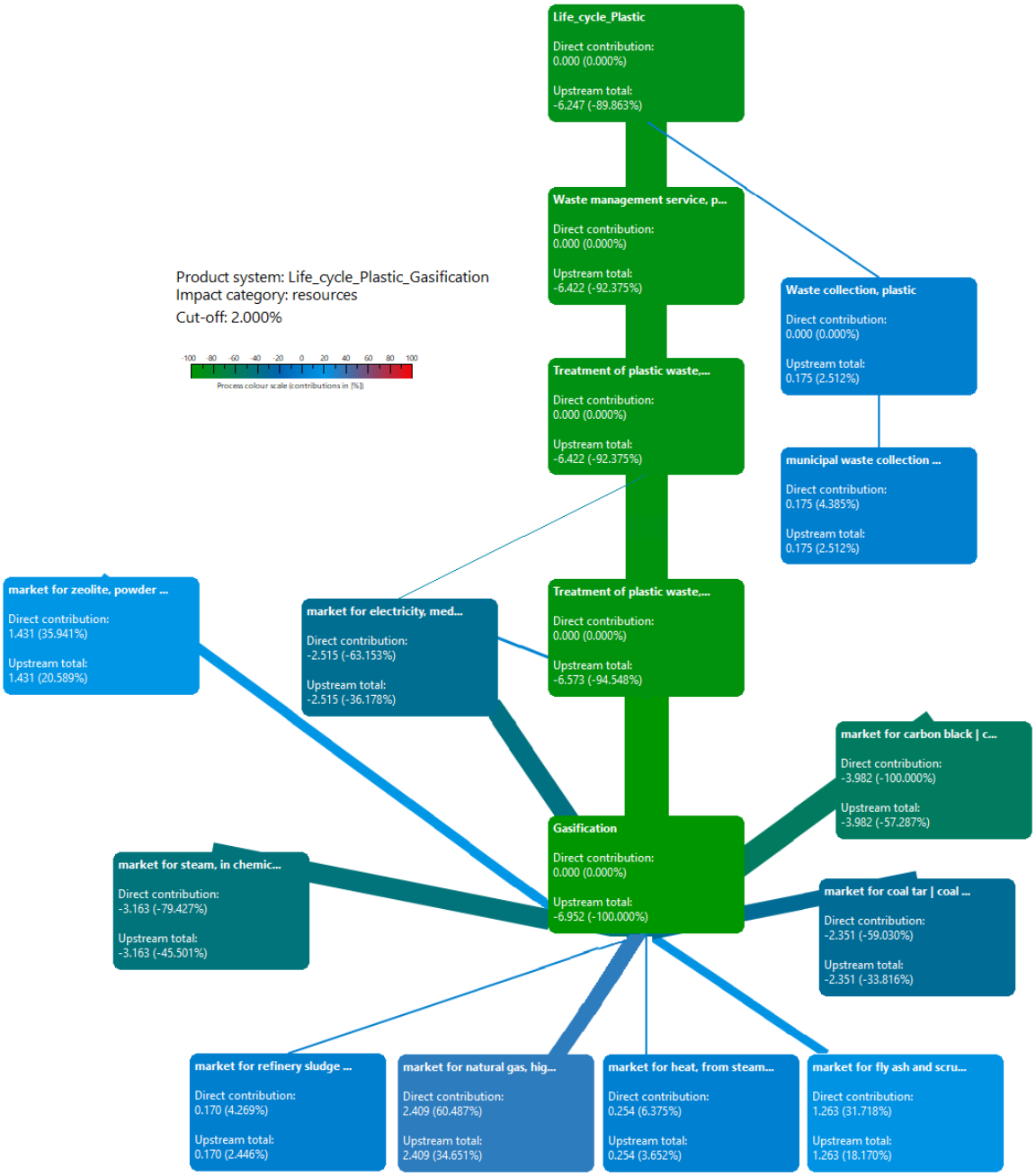
Slijedi grafički prikaz doprinosa utjecajima po pojedinim fazama promatranih scenarija. Pomoću programa OpenLCA moguće je konstruirati Sankeyeve dijagrame koji predstavljaju grafički prikaz rezultata promatranog modela. Sankeyev dijagram omogućava pregled doprinosa pojedinih faza promatranog scenarija po promatranoj kategoriji utjecaja. Sankeyevi dijagrami konstruirani su s određenim „*cut-off*“ kriterijem, što znači da se u prikazu zanemaruju tokovi koji imaju cjelokupni doprinos manji od postavljene granice. U nastavku su prikazani Sankeyevi dijagrami najznačajnijih kategorija utjecaja po pojedinim tehnologijama za koje vrijedi ista logika interpretacije, negativna vrijednost predstavlja bolji rezultat, a pozitivna lošiji. Debljina poveznih linija u dijagramima sukladna je postotnom doprinosu.

Rezultati analize pokazuju da je po pitanju štetnog djelovanja na ljude scenarij s isplinjavanjem optimalno rješenje. Slika 33. prikazuje doprinos pojedinih faza scenarija promatranoj kategoriji utjecaja. Izuzetno dobar rezultat isplinjavanja u odnosu na druge tehnologije posljedica je izbjegnute proizvodnje primarnih proizvoda, koji uključuju: električnu i toplinsku energiju te koks i katran.



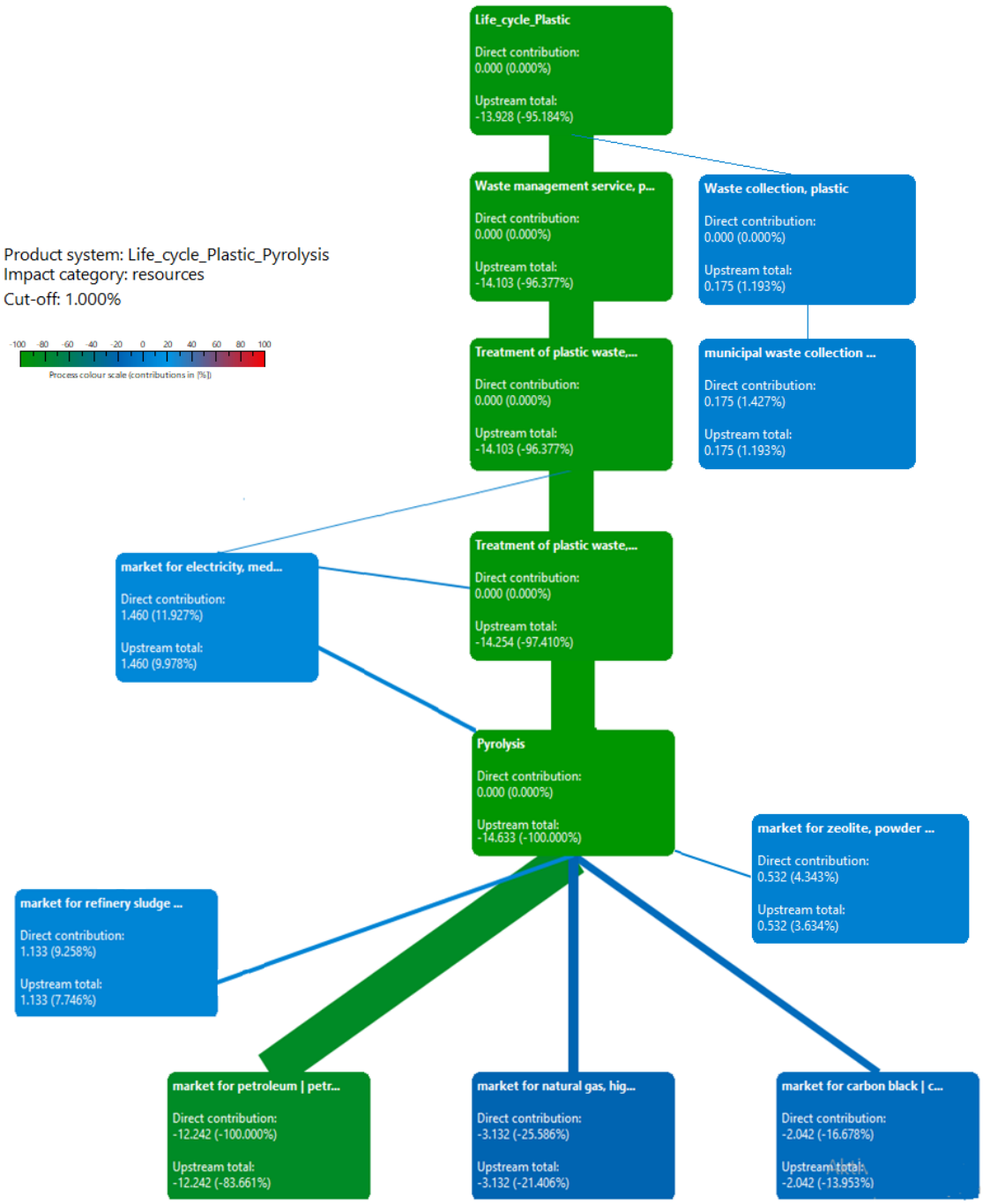
Slika 33. Isplinjavanje – štetan utjecaj na ljude

Scenarij s isplinjavanjem pokazuje dobar rezultat u usporedbi s drugim tehnologijama u kategoriji iscrpljivanje resursa, što je posljedica značajnog doprinosa izbjegnute proizvodnje električne i toplinske energije te koksa i katrana (Slika 34.).



Slika 34. Isplinjavanje – iscrpljivanje resursa

Međutim, promatrajući kategoriju iscrpljivanje resursa najprihvatljivije rješenje je piroliza. Slika 35. prikazuje doprinos promatranoj kategoriji utjecaja te je uočljivo da je i ovom slučaju za dobar rezultat zaslužna izbjegnuta proizvodnja primarnih proizvoda: nafte, plina i koksa.

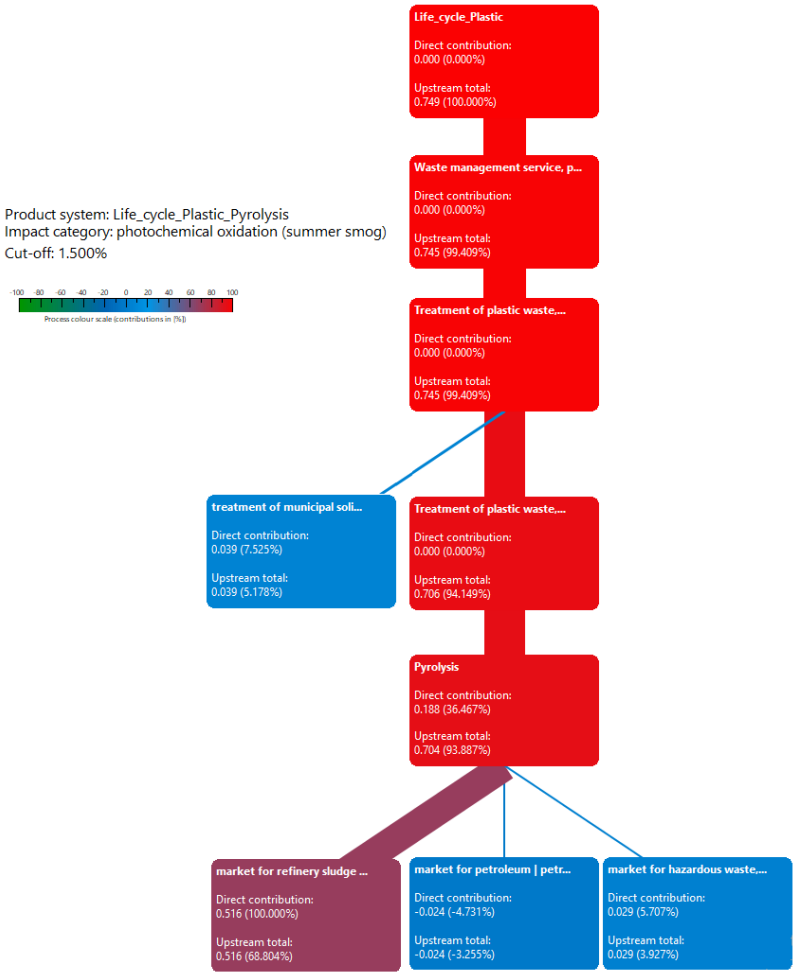


Slika 35. Piroliza – iscrpljivanje resursa

Slika 36. prikazuje doprinos pojedinih faza scenarija uz implementaciju tehnologije pirolize kategoriji utjecaja acidifikacije. Na acidifikaciju najviše utječu emisije sumpornog dioksida i dušikovih oksida, a za loš rezultat promatranog scenarija najzaslužnije su emisije dušikovih oksida tijekom samog procesa pirolize što je vidljivo i na dijagramu. Kao što je već ranije spomenuto, tijekom samog procesa pirolize evidentirane su emisije dušikovih oksida koje nastaju uslijed izgaranja pogonskog goriva.

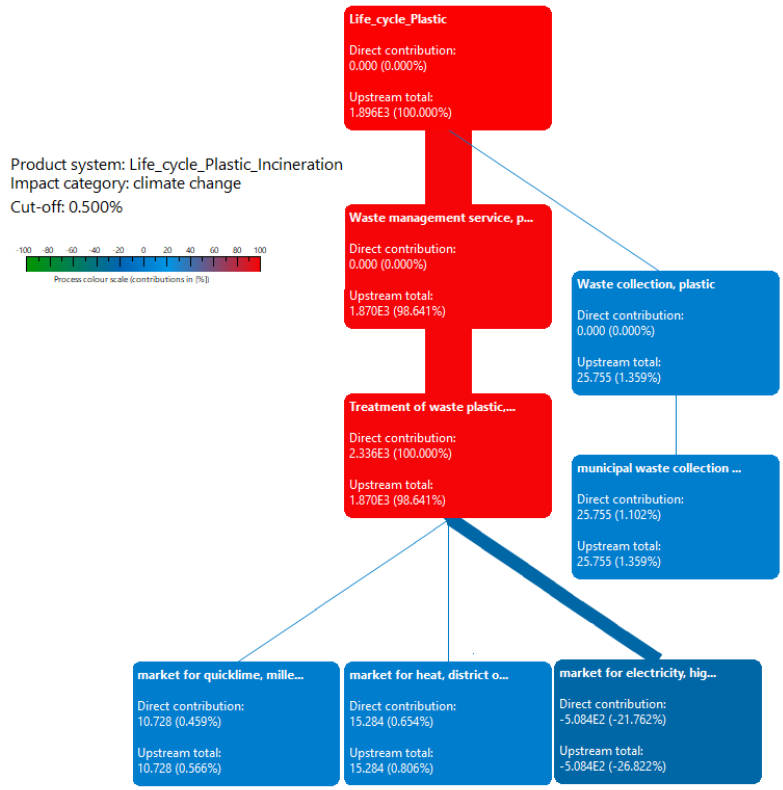
Slika 36. Piroliza – acidifikacija

Utjecaj alternativnih tehnologija pirolize i isplinjavanja na stvaranje prizemnog ozona znatno je veći od potencijala konvencionalnih tehnologija spaljivanja i odlaganja. Štetan utjecaj alternativnih tehnologija posljedica je emisija hlapivih organskih spojeva i ugljikovog monoksida uslijed zbrinjavanja nastalog taloga u predmetnim procesima i emisijama samog procesa pirolize što je prikazano na primjeru pirolize (Slika 37.).

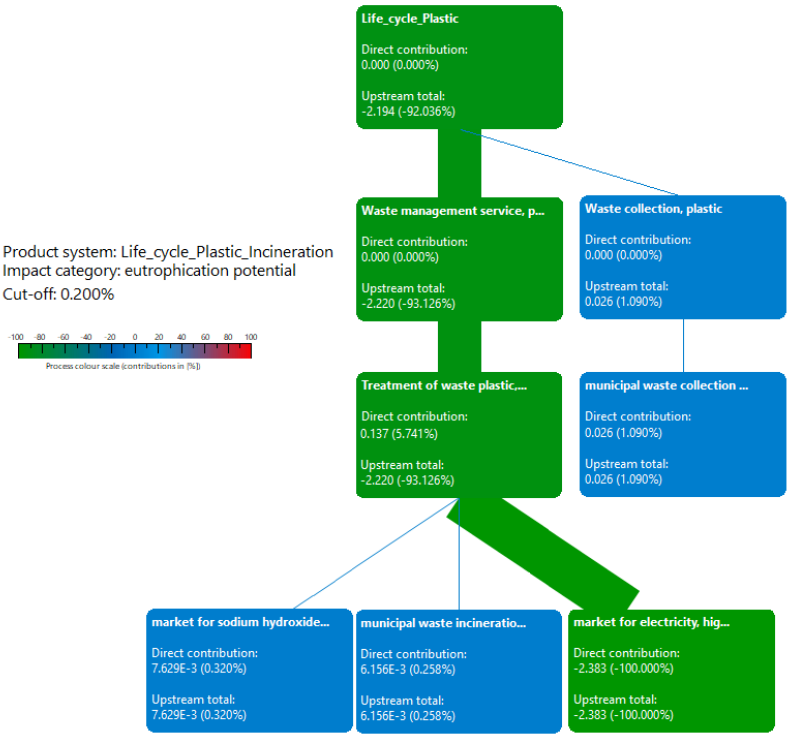


Slika 37. Piroliza – fotokemijsko onečišćenje

Što se tiče scenarija sa spaljivanjem, konstruiran je dijagram koji prikazuje doprinos kategoriji klimatskih promjena (Slika 38.) zbog toga što predmetni scenarij pokazuje najveći štetan utjecaj na klimatske promjene što je posljedica dimnih plinova koji nastaju u fazi spaljivanja otpada što nije moguće kompenzirati utjecajima izbjegnute proizvodnje električne energije. S druge stane, spaljivanje ostvaruje najbolje rezultate po pitanju eutrofikacije, što je proizlazi iz izbjegnute proizvodnje električne energije (Slika 39.).

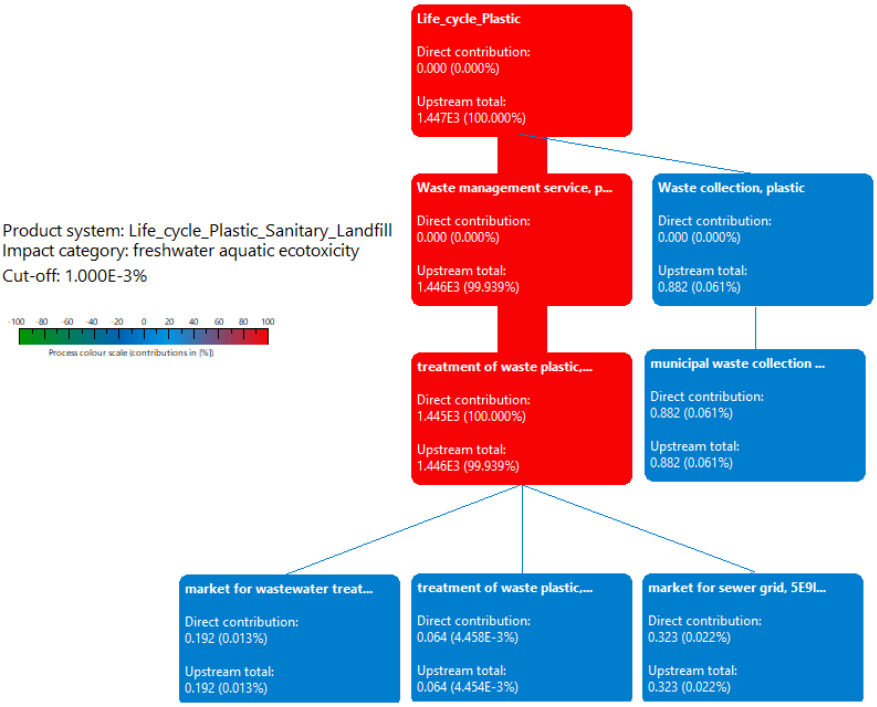


Slika 38. Spaljivanje – klimatske promjene



Slika 39. Spaljivanje – eutrofikacija

Scenarij sa sanitarnim odlagalištem otpada ima najštetniji utjecaj na vode, što je povezano s događajima na samom odlagalištu (Slika 40.), odnosno ispuštanjem štetnih onečišćenja u podzemne vode i okoliš.



Slika 40. Odlaganje – ekotoksičnost vode

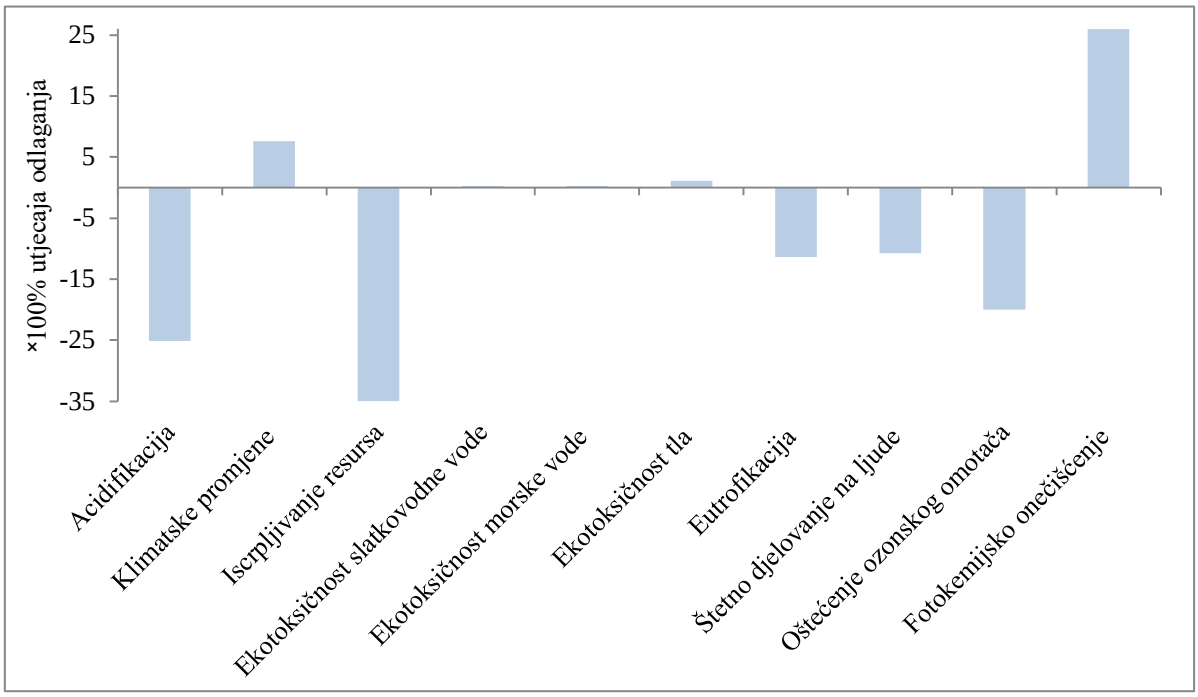
9.1.2. Rezultati usporedne analize

9.1.2.1. Usporedba s referentnim scenarijem

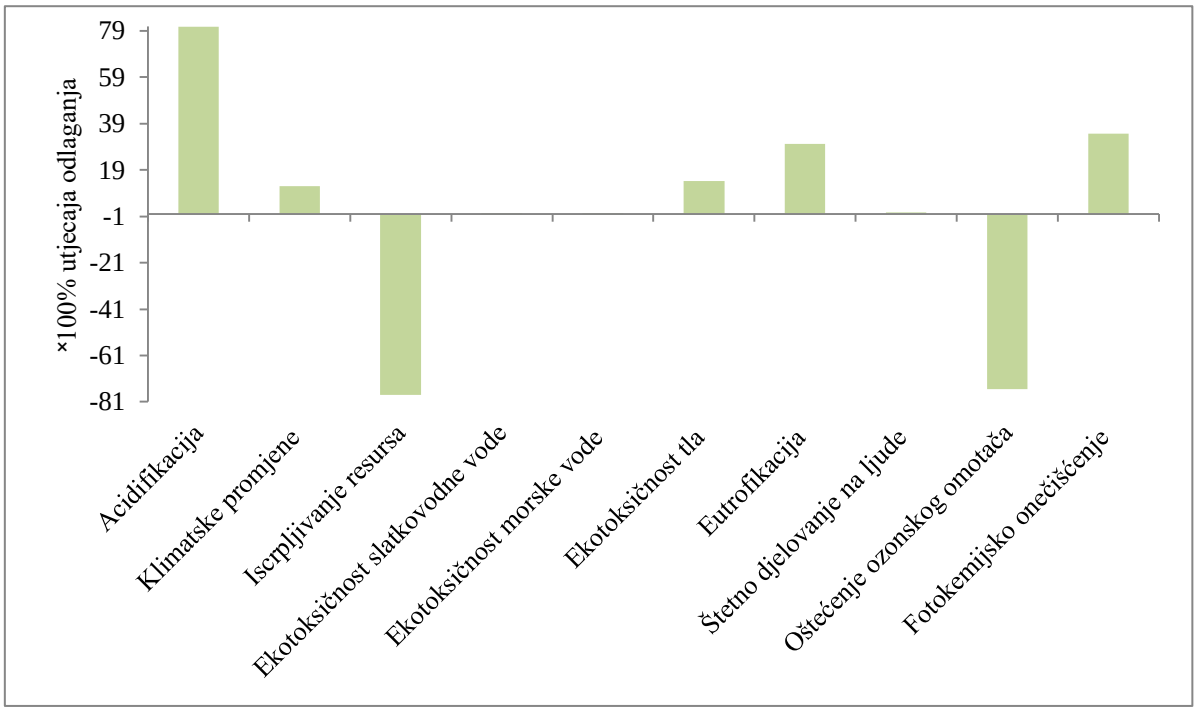
Grafovi u nastavku prikazuju relativnu usporedbu pojedinih scenarija s referentnim scenarijem, odnosno sa scenarijem sa sanitarnim odlaganjem plastičnog otpada. Indikatori utjecaja scenarija sanitarno odlaganje postavljeni su na 100% dok su pokazatelji utjecaja ostalih scenarija računati obzirom na scenarij IV. Promatrane tehnologije ocjenjene su kao bolje od sanitarnog odlaganja ukoliko je relativno promatrana kategorija utjecaja manja od 100%.

Slika 41. prikazuje usporedbu isplinjavanja i konvencionalnog odlaganja plastičnog otpada. Implementacija isplinjavanja u odnosu na odlaganje pozitivno djeluje na čitav sustav u svim promatranim kategorijama utjecaja osim djelovanja na klimatske promjene, fotokemijsko onečišćenje i ekotoksičnost tla.

Lošiji potencijal globalnog zagrijavanja i fotokemijskog onečišćenja povezani su s emisijama radi proizvodnje električne energije, a utjecaj na ekotoksičnost tla je neznatno veći (7,61%).



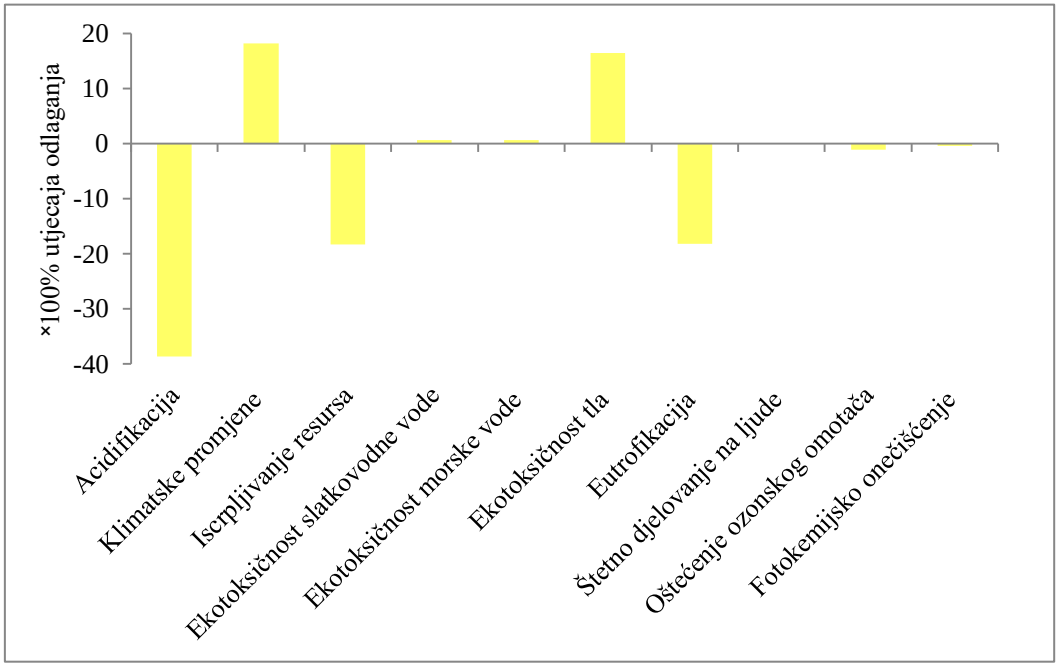
Slika 41. Usporedba isplinjavanje CML



Slika 42. Usporedba piroliza CML

Slika 42. prikazuje usporedbu procesa pirolize i odlaganja. U odnosu na odlaganje piroliza je lošija u sljedećim kategorijama: acidifikacija, klimatske promjene, zagađenje tla, eutrofikacija i fotokemijsko onečišćenje.

Slika 43. prikazuje rezultate usporedbe scenarija sa spaljivanjem i sanitarnog odlaganja te je vidljivo da je spaljivanje bolja opcija po svim kategorijama osim utjecaja na klimatske promjene (emisije stakleničkih plinova uslijed proizvodnje električne energije) i ekotoksičnosti tla.

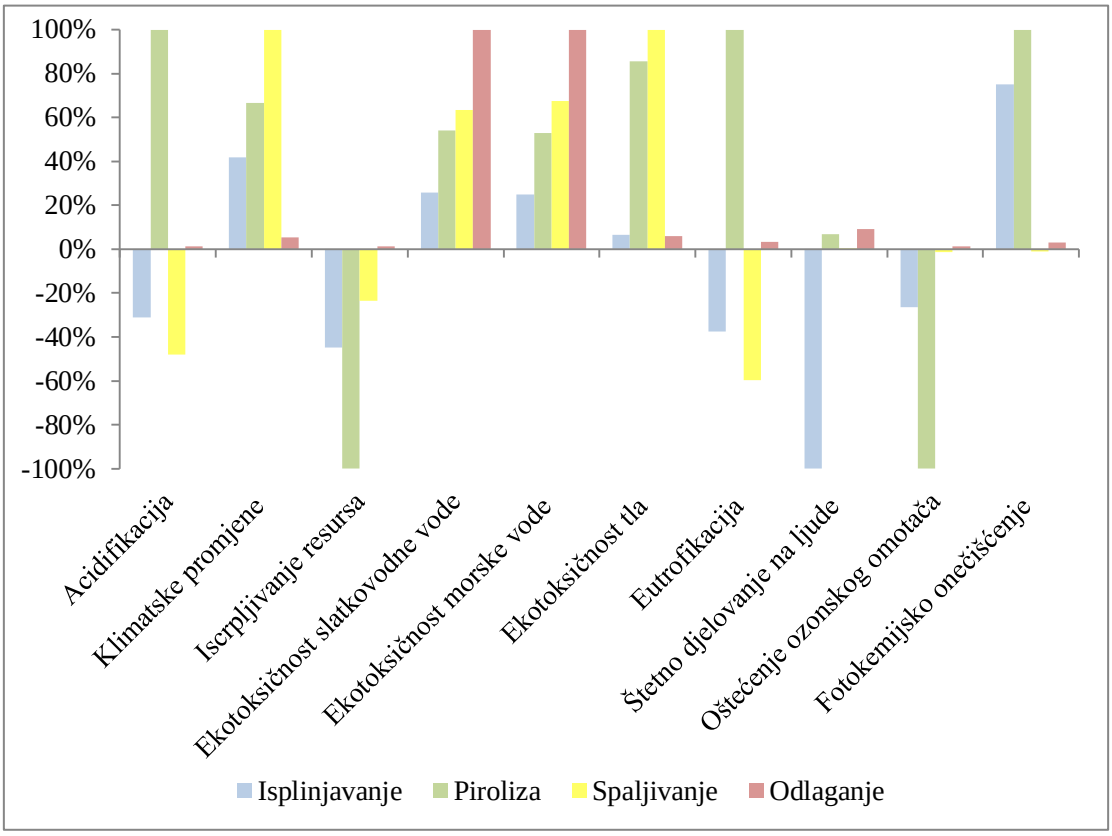


Slika 43. Usporedba spaljivanje CML

Zajednička karakteristika svih tehnologija energetske oporabe plastičnog otpada (piroliza, isplinjavanje i spaljivanje) uspoređenih sa sanitarnim odlaganjem je što pozitivno djeluju na smanjenje iskorištavanja resursa, zagađenje voda, oštećenje ozonskog omotača te se implementacijom njih smanjuje sveukupno štetno djelovanje na ljude.

9.1.2.2. Relativna usporedba

Slika 44. prikazuje relativnu usporedbu svih scenarija na način da je tehnologija s maksimalnom apsolutnom vrijednošću rezultata po pojedinim indikatorima označena s 100% (odnosno -100%) te se prema njoj računaju relativni indikatori preostalih tehnologija.



Slika 44. Relativna usporedba CML

Relativnom usporedbom svih scenarija moguće je odrediti koji je najbolji, odnosno najlošiji po pojedinoj promatranoj kategoriji utjecaja. Piroliza je najgora promatrana tehnologija s aspekta acidifikacije i eutrofikacije, a najbolja sa stajališta iskorištenja resursa i smanjenja oštećenja ozonskog omotača. Sve promatrane tehnologije pospješuju klimatske promjene i imaju štetan utjecaj na sve praćene ekosustave. Isplinjavanje i piroliza imaju najveće potencijale za stvaranje fotokemijskog smoga što je ocjenjeno kao loše za implementaciju ovih procesa.

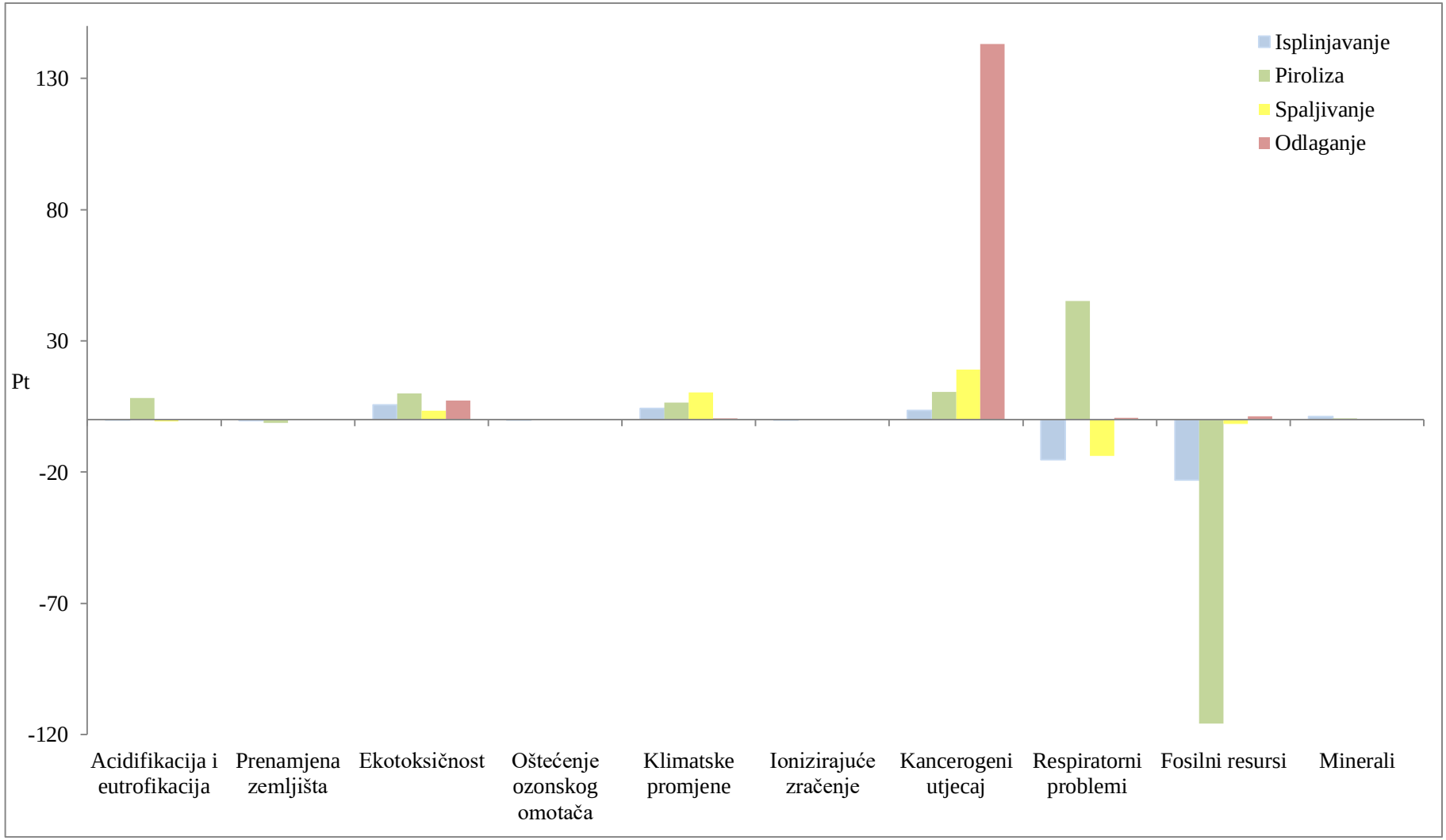
9.2. Rezultati Eco-indicatora

Rezultati prethodno provedene LCA analize ne omogućuju jednostavno i jednoznačno ocjenjivanje optimalnog scenarija. Korištenjem Eco-indicatora te provedbom pojednostavljenje LCA analize moguće je vrlo jednostavno validirati razmatrane scenarije i evidentirati koje je rješenje najbolje. Tablica 10. prikazuje rezultate pojednostavljene LCA analize.

Tablica 10. Rezultati LCA analize korištenjem Eco-indicatora

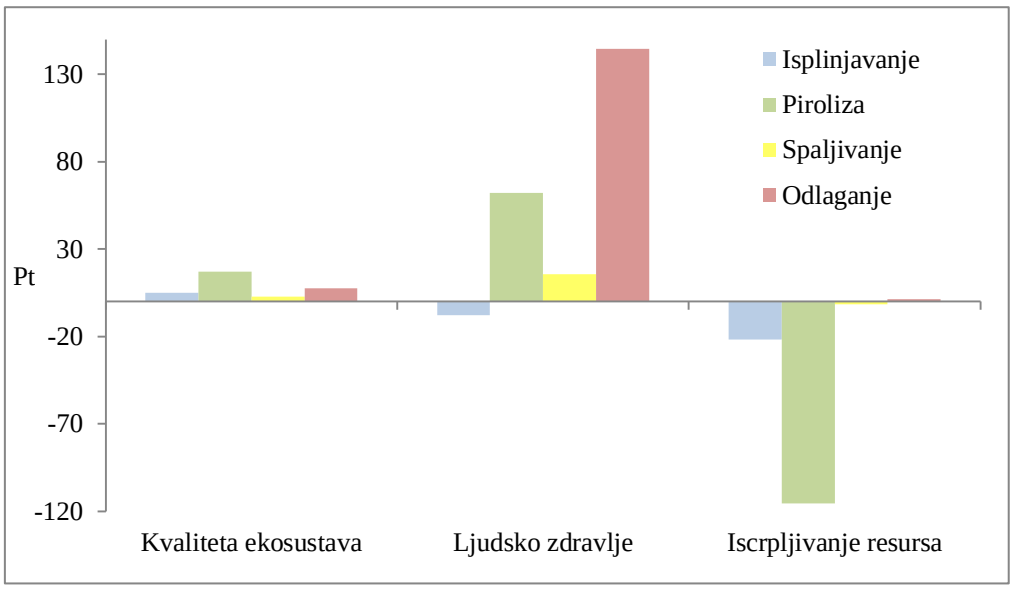
Kategorija utjecaja		**Jedinica**	**Isplinjavanje**	**Piroliza**	**Spaljivanje**	**Odlaganje**
Kvaliteta ekosustava	Acidifikacija i eutrofikacija	bod [Pt]	-0,237923	8,177251	-0,733310	0,078544
	Prenamjena zemljišta		-0,357910	-1,260685	0,000072	0,023640
	Ekotoksičnost		5,540704	10,017188	3,456021	7,291606
	Ukupno:		4,944871	16,933754	2,722784	7,393789
Ljudsko zdravlje	Oštećenje ozonskog omotača		-0,001753	-0,009762	-0,000505	0,000129
	Klimatske promjene		4,221698	6,457799	10,366159	0,512432
	Ionizirajuće zračenje		-0,073226	-0,034214	-0,083156	0,000952
	Kancerogeni utjecaj		3,444323	10,482532	19,083273	143,187419
	Respiratorni problemi		-15,226906	45,108642	-13,755938	0,759938
	Ukupno:		-7,635864	62,004998	15,609833	144,460869
Iscrpljivanje resursa	Fosilni resursi		-23,004562	-115,83634	-1,594577	1,251764
	Minerali		1,192032	0,469567	-0,023061	0,003727
	Ukupno:		-21,812529	-115,36678	-1,617637	1,255491
Ukupan indikator utjecaja			-24,503522	-36,428025	16,714979	153,110150

I u ovom slučaju rezultati se interpretiraju na način da pozitivna vrijednost predstavlja lošiji utjecaj na okoliš, a negativna vrijednost predstavlja dobar utjecaj. Slika 45. je grafički prikaz rezultata pojednostavljene LCA analize.



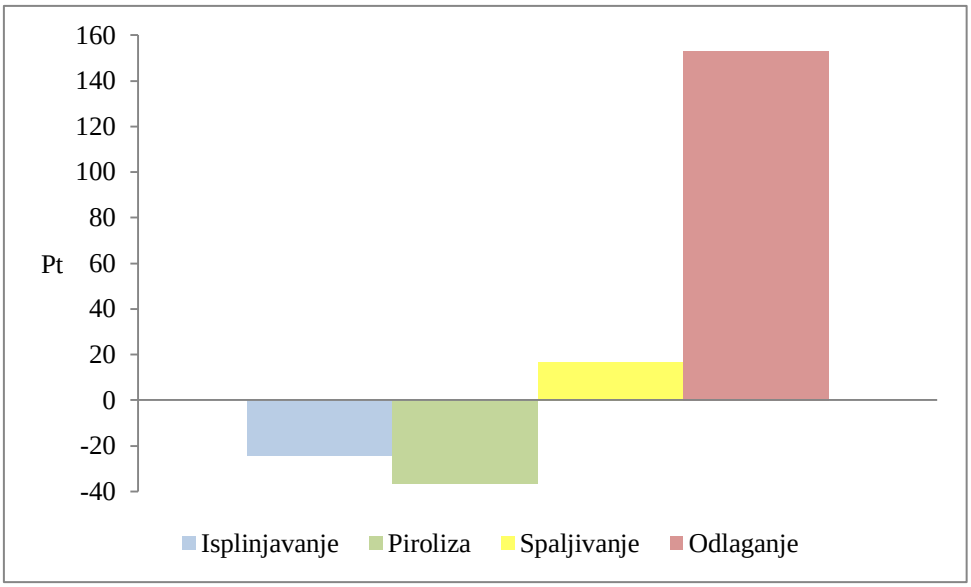
Slika 45. Prikaz svih kategorija utjecaja Eco-indicator

Dobivene rezultate po pojedinoj kategoriji moguće je međusobno zbrojiti te usporediti. Slika 46. prikazuje utjecaj razmatranih tehnologija na glavne praćene kategorije utjecaja te je vidljivo da na kvalitetu ekosustava najgori utjecaj ima piroliza, dok na ljudsko zdravlje najlošije utječe odlaganje otpada. Zbog izbjegnute potrošnje primarnih materijala i energenata, implementacija pirolize najbolje je rješenje u kategoriji iscrpljivanje resursa.



Slika 46. Prikaz rezultata po pojedinim kategorijama utjecaja Eco-indicator

Dobivene vrijednosti indikatora po pojedinoj kategoriji moguće je zbrojiti te sveukupno odrediti koja tehnologija ima najmanji utjecaj na okoliš i zdravlje ljudi (Slika 47.). Iako piroliza ima najveći štetan utjecaj na kvalitetu ekosustava te drugi najveći potencijal štetnog djelovanja na ljudsko zdravlje, utjecaj izbjegnute potrošnje resursa je toliko značajan da je sveukupno tehnologija ocijenjena kao ekološki najprihvatljivija. Implementacija tehnologija kemijske oporabe plastičnog otpada pirolize i isplinjavanja sveukupno su ocjenjene kao ekološki prihvatljive jer doprinose smanjenju utjecaja uslijed izbjegnute proizvodnje primarnih proizvoda.



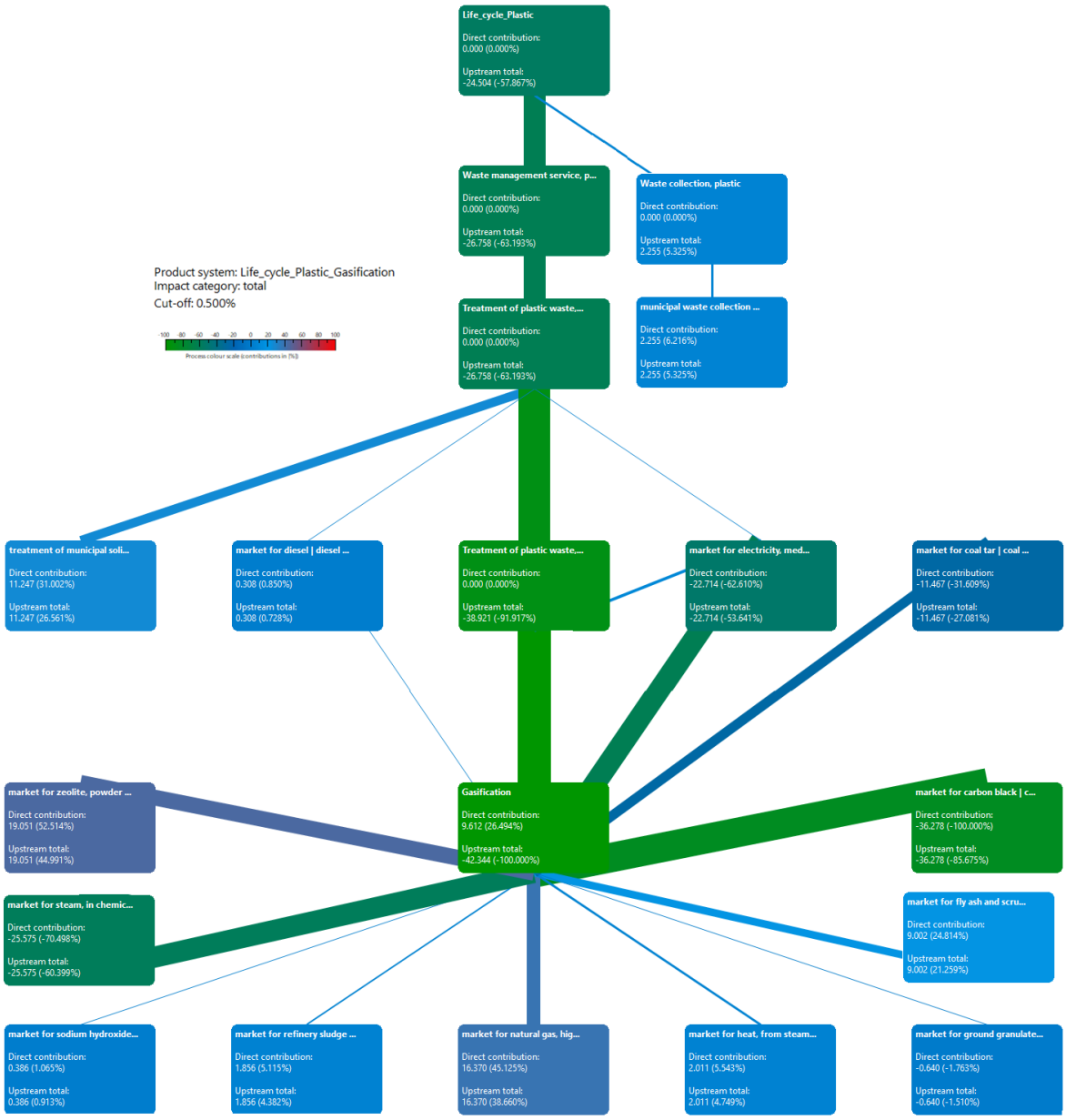
Slika 47. Usporedba indikatora svih tehnologija

Scenarij s odlaganjem ocijenjen je kao najlošiji, a ključan doprinos tome imaju štetan utjecaj na ljudsko zdravlje i nepovratan materijalan i energetski gubitak koji nastaje konačnim odlaganjem otpada.

9.2.1. Pregled utjecaja pojedinih faza scenarija

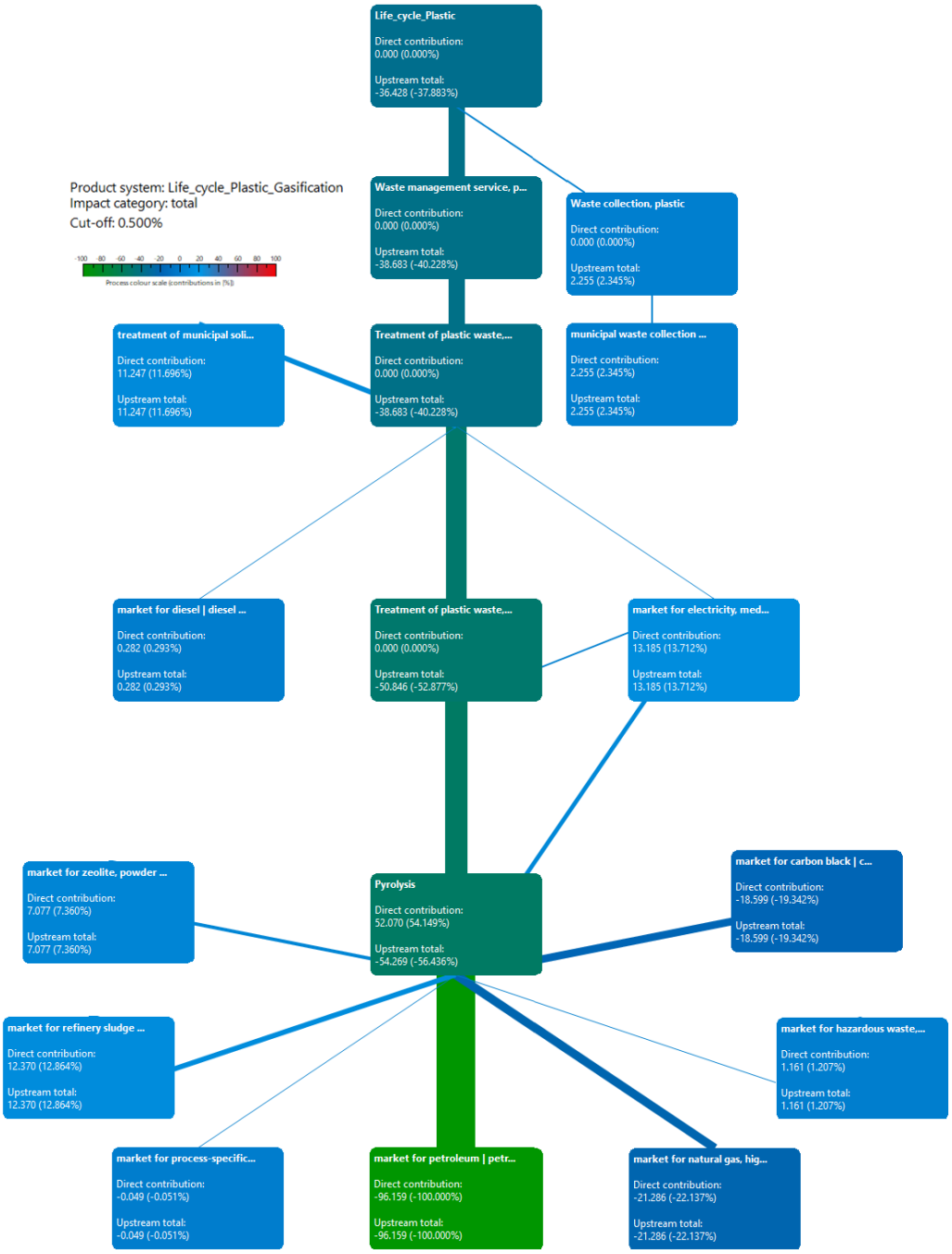
Slijedi grafički prikaz doprinosa ukupnom indikatoru utjecaja po pojedinim fazama promatranih scenarija u obliku Sankeyevih dijagrama.

Slika 48. prikazuje doprinos pojedinih faza sustava s implementiranim isplinjavanjem plastičnog otpada. Isplinjavanje je sveukupno ocjenjeno kao ekološki prihvatljivo na što najveći utjecaj ima utjecaj izbjegnute proizvodnje pare, odnosno toplinske energije te nadalje, električne energije i koksa. Sveukupnu ekološku prihvatljivost promatranog scenarija u najvećem udjelu umanjuju potrošnja energenata i kemikalija potrebnih za odvijanje procesa isplinjavanja te zbrinjavanje preostalog otpada koji nastaje kao nusprodukt promatranog postrojenja.



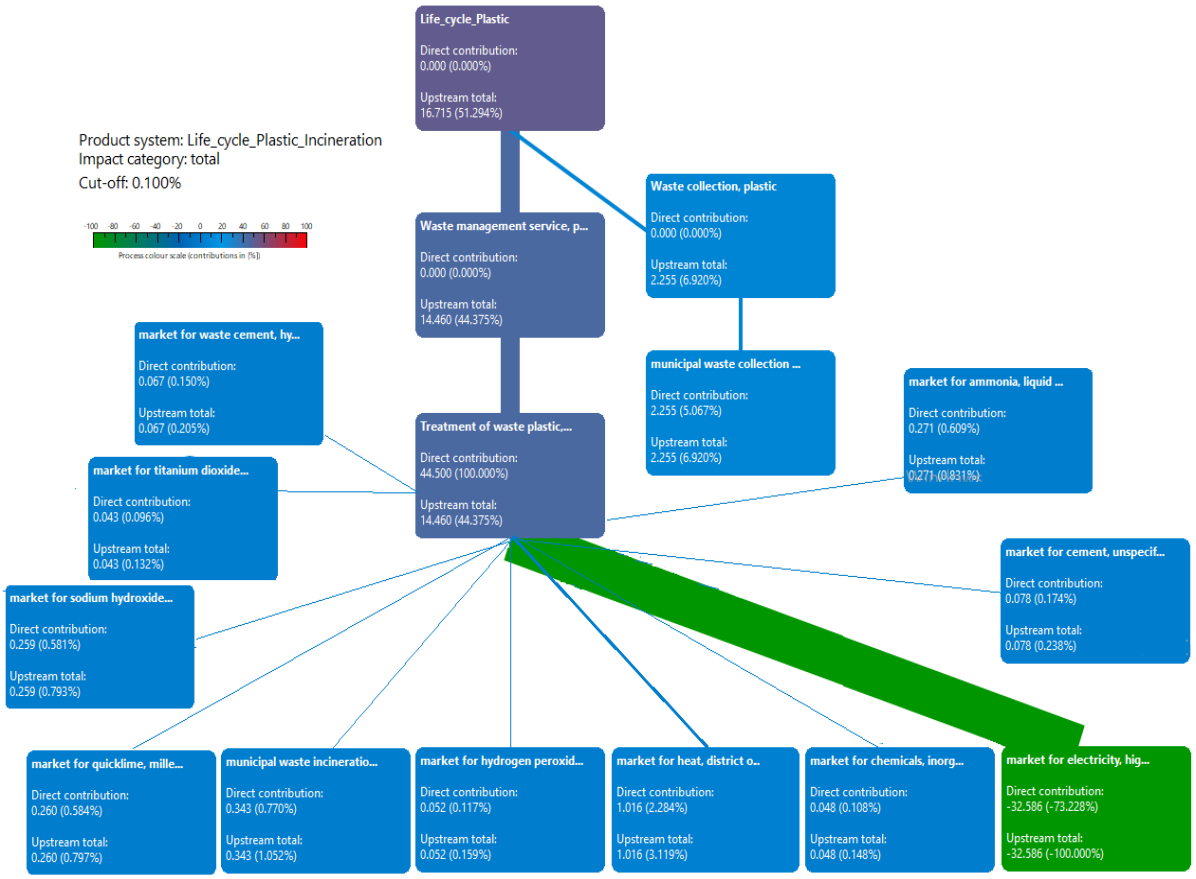
Slika 48. Isplinjavanje – ukupni indikator

Implementacija tehnologija pirolize sveukupno je ocjenjena kao ekološki najprihvatljivija, a tome najviše doprinose izbjegnuta proizvodnja sintetskog ulja, plina i koksa, a ekološka prihvatljivost i u ovom slučaju opada zbog potrebnih energenata i kemikalija te zbrinjavanja nusprodukta.



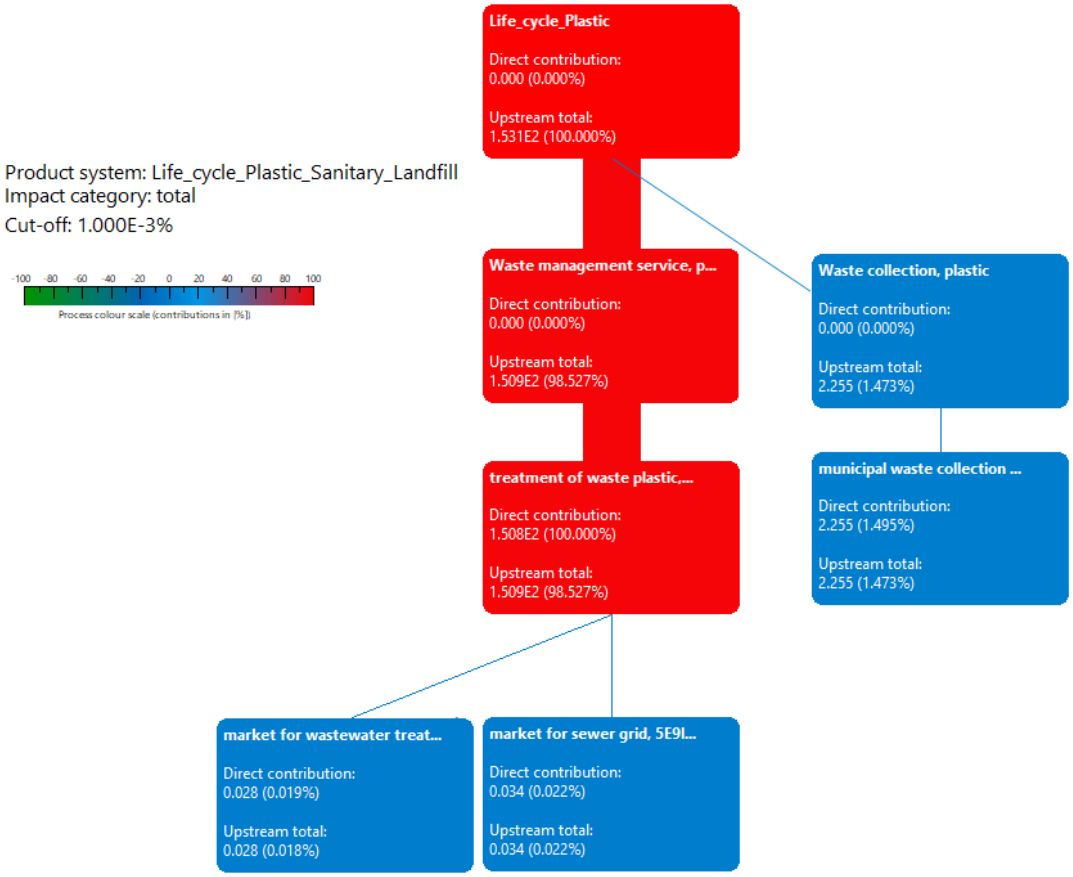
Slika 49. Piroliza – ukupni indikator

Slika 50. prikazuje doprinos faza scenarija sa spaljivanjem ukupnom indikatoru utjecaja koji je dobiven sumiranjem utjecaja na: ekosustav, zdravlje ljudi i iscrpljivanje resursa. Utjecaj izbjegnute proizvodnje električne energije prilikom spaljivanja plastičnog otpada nije dovoljno velik da kompenzira štetne utjecaje na ljudsko zdravlje i ekosustav koji su posljedica ostalih faza promatranog scenarija.



Slika 50. Spaljivanje – ukupni indikator

Slika 51. prikazuje doprinos pojedinih faza scenarija s odlaganjem ukupnom indikatoru utjecaja. Odlaganje otpada je s ekološkog aspekta najlošija promatrana opcija, a ključan doprinos tome imaju štetan utjecaj na ljudsko zdravlje i nepovratan materijalni te energetski gubitak koji nastaje konačnim odlaganjem otpada.



Slika 51. Odlaganje – ukupni indikator

10. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu analizirani su različiti sustavi gospodarenja plastičnim otpadom. Plastični otpad vrlo je vrijedna sirovina s energetskog aspekta te njegovo konačno odlaganje na odlagalištu čini nepovratnu štetu na okoliš, a uzevši u obzir konačno raspoloživ prostor odlagališta, potrebno je pronaći i ocijeniti moguća rješenja smanjenja nastalog otpada i njegove oporabe. U ovom radu analizirane su alternativne tehnologije energetske oporabe plastičnog otpada: piroliza i isplinjavanje.

Na temelju provedenog pregleda literature izrađeni su LCI setovi koji opisuju predmetne tehnologije. Formirani LCI setovi uneseni su u računalni program OpenLCA koristeći LCI bazu Ecoinvent te su ulazni i izlani tokovi povezani s ostalim tehnologijama iz baze koristeći europske i lokalne UPR i LCI podatke koji modeliraju tržišta pojedinih materijala i/ili usluga te procese gospodarenja otpadom.

U okviru ovog rada provedena je usporedna LCA analiza različitih načina gospodarenja plastičnim otpadom. Provedena je ekološka analiza koja je uključivala samo rad pojedinih sustava, a ne i utjecaje izgradnje potrebne infrastrukture te su analizirana četiri scenarija: isplinjavanje, piroliza, spaljivanje i sanitarno odlaganje plastičnog otpada. Procjena utjecaja na okoliš provedena je koristeći CML 2001 (baseline) metodu i Eco-indicator 99 (H.A) metodu. CML metoda prati sljedeće parametre: acidifikaciju, klimatske promjene, ekotoksičnost, eutrofikaciju, štetno djelovanje za ljude, iscrpljivanje resursa, oštećenje ozonskog omotača i fotokemijsko onečišćenje. Metoda Eco-indicator korištena je za provedbu pojednostavljene LCA analize jer omogućava izračun ukupnog indikatora utjecaja na okoliš i zdravlje ljude te ocjenu optimalnog rješenja. Razmatranje multifunkcionalnosti, alokacije utjecaja te koristi proizvodnje sekundarnih materijalnih i energetskih tokova provedeno je koristeći metodu proširenja sustava što podrazumijeva da se utjecaji na okoliš povezani s razmatranim aktivnostima gospodarenja otpadom uzimaju u obzir tako da se uspoređuju s izbjegnutim utjecajima koji se odnose na smanjenje potrošnje primarnih materijalnih sirovina i energenata. Povoljni utjecaji izbjegnute proizvodnje ovise o postojećem energetskom miksu koji zamjenjuju, što je definirano prilikom povezivanja ulaznih i izlaznih tokova s lokalnim tržištima.

Rezultati se interpretiraju na način da negativna vrijednost pojedinog indikatora ili kategorije utjecaja označava povoljno djelovanje promatranog sustava na promatranu kategoriju utjecaja, a veća pozitivna vrijednost predstavlja veći štetni utjecaj u usporedbi s tehnologijama, odnosno energetskim miksom koje zamjenjuje.

Cilj provedene analize bila je procjena posljedica koje tehnologije kemijske oporabe plastičnog otpada imaju na okoliš i zdravlje ljudi te bolje razumijevanje pozitivnih učinaka i negativnih ekoloških posljedica koji mogu proizići iz komercijalizacije tehnologija pirolize i isplinjavanja otpadne plastike u usporedbi s postojećim tehnologijama gospodarenja plastičnim otpadom. Upotrebom LCA analize moguće je modelirati promatrane scenarije gospodarenja otpadom te ih usporediti i pronaći rješenje s najmanjim sveukupnim utjecajem na okoliš.

Upotrebom CML metode dobivaju se apsolutni rezultati razmatrane tehnologije po pojedinoj kategoriji utjecaja. Provedena je relativna usporedba svih razmatranih tehnologija s referentnim scenarijem, odnosno sa scenarijem sa sanitarnim odlaganjem otpada. Uz to, sve tehnologije relativno su međusobno uspoređene po pojedinoj kategoriji utjecaja na način da je tehnologiji s maksimalnom apsolutnom vrijednošću utjecaja pripisan stopostotni utjecaj, u usporedbi s kojim su izračunati i utjecaji ostalih tehnologija. Relativnom usporedbom svih scenarija moguće je odrediti koji je najbolji, odnosno najlošiji po pojedinoj promatranoj kategoriji utjecaja, a jednostavnija procjena optimalnog rješenja moguća je korištenjem Eco-indicator metode procjene utjecaja, koja omogućava izračun jedinstvenog indikatora utjecaja na okoliš i ljude prema kojemu je u okviru ovog razmatranja piroliza ocjenjena kao optimalno rješenje.

Upotrebom LCA analize moguće je vrednovati pojedine načine gospodarenja otpadom te odrediti koji je najbolji, tj. najlošiji po pojedinoj promatranoj kategoriji utjecaja, odnosno upotrebom pojednostavljene LCA analize moguće je jednoznačno i jednostavno odrediti optimalno rješenje. Međutim za stvarnu ocjenu promatranih tehnologija potrebno je napraviti detaljniju i sveobuhvatniju analizu. Bilo bi potrebno uzeti u obzir sve ekološke faktore uključujući i one u periodu izgradnje potrebne infrastrukture, ali i ekonomske i socijalne čimbenike rada postrojenja. Promatrajući samo rad postrojenja može se zaključiti da sve tehnologije energetske oporabe plastičnog otpada pozitivno djeluju na iscrpljivanje resursa zbog utjecaja izbjegnute potrošnje. Potencijal uštede resursa veći je kod alternativnih tehnologija u usporedbi s konvencionalnim spaljivanjem.

U usporedbi s sanitarnim odlaganjem sve tehnologije oporabe su bolje u pogledu zagađenja vode, štetnom utjecaju na zdravlje ljudi i oštećenje ozonskog omotača. Usporedbom tehnologija oporabe otpada može se zaključiti da su generalno alternativne tehnologije bolje, tj. manje štetne od konvencionalnog spaljivanja koje je ocjenjeno bolje po utjecajima na acidifikaciju, eutrofikaciju i fotokemijsko onečišćenje.

U skladu s održivim razvojem i modelom cirkularne ekonomije u budućnosti će biti važno zadržati vrijednost proizvoda, materijala i resursa što je dulje moguće u gospodarstvu uz minimiziranje stvaranja otpada te će tehnologije energetske oporabe otpada dobivati sve više na važnosti. Spalionice otpada već su dobro istražena tehnologija, ali je nužna edukacija javnosti kako bi se spriječio negativan stav i otpor prema implementaciji ovog načina gospodarenja otpadom. Rješenje problema otpora javnosti mogu biti alternativne tehnologije poput pirolize i isplinjavanja, međutim za njihovu uspješnu implementaciju i komercijalizaciju u sustav gospodarenja plastičnim otpadom nužna je sveukupna detaljna analiza koja uključuje sve ekološke, socijalne i ekonomske čimbenike.

LITERATURA

[1] Dobrović, S., Juretić, H., Ljubas D., Predavanja iz kolegija Ekološka zaštita E, FSB, 2018.

[2] Medven, Ž.: EU I ZAŠTITA OKOLIŠA Gospodarenje otpadom na lokalnoj razini, Regionalni centar zaštite okoliša za Srednju i Istočnu Europu, 2009.

[3] Tomić, T: Energetska oporaba otpada pod utjecajem europske legislative. Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2019.

[4] HAOP, projekt: „Metodologija za određivanje sastava i količina komunalnog odnosno miješanog komunalnog otpada s Naputkom za naručivanje i provedbu određivanja prosječnog sastava komunalnog odnosno miješanog komunalnog otpada“, Zagreb, 2015.

[5] HAOP: Izvješće o komunalnom otpadu za 2017. godinu, Zagreb, 2018.

[6] Šercer, M., Opsenica, D., Barić, G.: Oporaba plastike i gume, mtg topograf d.o.o., Zagreb, 2000.

[7] Pavić-Rogošić, L., Jelić Mück, V., Jagnjić, M.: NOVI IZAZOV: Globali ciljevi održivog razvoja do 2030., ODRAZ-Održivi razvoj zajednice, Zagreb, 2015.

[8] Schneider, D., R.: Could waste to energy help to close the loop?, LA SDEWES conference, Rio de Janeiro, 2018.

[9] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS: A European Strategy for Plastics in a Circular Economy,2018.

[10] Ratnasari, D., K., Nahil, M.,A., Williams, P., T.: Catalytic pyrolsys of waste plastics using staged catalysis for production of gasoline range hydrocarbon oils

[11] Czajczyńska, D., Anguilano, L., Ghazal, H., Krzyżyńska, R., Reynolds, A.J., Spencer, N., Jouhara, H.: Potential of pyrolysis processes in the waste management sector, Energy Procedia, 123, pp. 387-394, 2017.

[12] Čatić, I.:Proizvodnja polimernih tvorevina, Biblioteka polimerstvo, Zagreb, 2006.

[13] RTI INTERNATIONAL: Environmental and Economic Analyiss of Emerging Plastics Conversion Technologies: Final Project Report, North Carolina, 2012.

[14] Al-Salem, S.M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., Dutta, A.: A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW), Journal of Environmental Management, 197, pp. 177-198, 2017.

[15] Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., Aroua, M. K.: A review on pyrolysis of plastic wastes, Energy Conversion and Management, 115, pp. 308-326, 2016.

[16] Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Alvarez, J.,Bilbao, J., Olazar, M.: Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, pp. 576–596, 2018.

[17] Punkkinen, H., Oasmaa, A., Laatikainen-Luntama, J., Nieminen, M, Laine-Ylijoki, J.: Thermal conversion of plastic containing waste: A review, Helsinki, 2017.

[18] Ducharme, C.: Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes, Columbia University, 2010.

[19] Poritosh, R., Animesh, D.: 15 Life Cycle Assessment (LCA) in Municipal Waste Management Decision Making, Plastics to Energy, pp. 377-402, 2019.

[20] Vertech Group Sarl: LCA scope and analysed system boundaries, 2013.

[21] Jensen, A., A., Hoffman, L., Møller, B., T., Schmidt, A., Christiansen, K., Elkington, J., van Dijk, F.: Life-cycle assessment (LCA) – a guide to approaches, experiences and information sources, European Environment Agency, 1997.

[22] Wenzel, H., Hauschild, M., Z., Alting, L: Environmental Assessment of Products (Vol. 1.), Chapman & Hall, 1997.

[23] Zhou, Z., Tang, Y., Chi, Y., Niand, M., Buekens, A.: Waste-to-energy: A review of life cycle assessment and its extension methods, Waste Management & Research, 2017.

[24] Hollerud, B., Bowyer, J., Howe, J., Pepke, E., Fernholz, K.: A REVIEW OF LIFE CYCLE ASSESSMENT TOOLS, DOVETAIL PARTNERS, INC, 2017.

[25] Web stranica IINAS, http://iinas.org/about-gemis.html

[26] Di Noi, C., Ciroth, A., Srocka, M.: openLCA 1.7 Comprehensive User Manual, GreenDelta, 2017.

[27] Menoufi, K., A., I.: Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment methodologies: A state of the art, University of Lleida, 2011.

[28] Acero, A., P., Rodríguez, C., Ciroth, A.: LCIA methods; Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories, Greendelta, 2016.

[29] Cerri D., Taisch M., Terzi S., Parrotta S.: Towards a Fast Evaluation of Environmental Impacts. in: Prabhu V., Taisch M., Kiritsis D.: IFIPAICT, vol 415. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.

[30] Tomić, T., Dominković, D., F., Pfeifer, A., Schneider, D., R., Pedersen, A., S., Duić, N.: Waste to energy plant operation under the influence of market and legislation conditioned changes, Energy, 137, pp. 1119-1129, 2017.

[31] Web stranica Fonda za zaštitu okoliša i energetsku učinkovitost (http://www.fzoeu.hr/hr/gospodarenje_otpadom/odlagalista_otpada_i_sanacije/)

[32] Tukker, A., de Groot, H., Simons, L., Wiegersma, S.: Chemical Recycling of Plastics Waste (PVC and other resins), TNO Institute of Strategy, 1999.

[33] Perugini, F., Mastellone, M., L., Arena, U.: A Life Cycle Assessment of Mechanical and Feedstock Recycling Options for Management of Plastic Packaging Wastes, Environmental Progress & Sustainable Energy, 24, 2005.

[34] Tsiamis, D.: Transforming the Non-Recycled Plastics of New York City to Synthetic Oil, Columbia University, 2013.

[35] Haig, S., Morrish, L., Morton, R., Onwuamaegbu, U., Speller, P., Wilkinson, S.: Plastics to oil products IFM002 final report, Zero Waste Scotland

[36] Ocean Recovery Alliance: 2015 Plastic-to-fuel Project Developer's Guide, , Hong Kong, 2015.

[37] Appendix D, Pyrolysis Plant Environmental Assessment Registration, Sustane Technologies, 2018.

[38] Fivga, A., Dimitriou, I.: Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment, Energy, 149, pp. 865-874, 2018.

[39] Yu, G., Hung, C.-Y., Hung, I.:An Optimized Pyrolysis Technology with Highly Energy Efficient Conversion of Waste Plastics into Clean Fuel While Substantially Reducing Carbon Emission, International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 9, No. 4, 2018.

[40] Rodriguez, I., G., L., M., Harden, T., Huang, X.: Transforming Non-Recyclable Plastics to Fuel Oil Using Thermal Pyrolysis, Grove School of Engineering, The City College of New York, 2018.

[41] American Chemistry Council: Comparison of Plastics-to-Fuel and Petrochemistry Manufacturing Emissions to Common Manufacturing Emissions, 2017.

[42] Ducharme, C.: Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes, Columbia University, 2010.

[43] PowerHouse Energy Group: DMG Process Application Introduction Brochure, 2019.

[44] 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.

PRILOZI

I. Podaci iz realnih postrojenja korišteni za formiranje LCI setova

II. CD-R disc

PRILOG I. Podaci iz realnih postrojenja korišteni za formiranje LCI setova

Tablica priloga 1. prikazuje korištene konverzijske faktore prilikom pretvorbe u SI jedinice budući da je dio promatrane literature bilo anglosaksonskog podrijetla.

Tablica priloga 1. Konverzijski faktori

Naziv	Oznaka		Oznaka	Naziv
funta	1 lb	=	0,4536 kg	kilogram
kratka tona	1 tona	=	0,9072 m. tona	metrička tona
funta po kratkoj toni	1 lb/tona	=	0,5000 kg/m. tona	kilogram po toni
milijun britanskih termalnih jedinica	1 MMBTU	=	0,2933 MWh	megavatsat
tisuću britanskih termalnih jedinica	1 MBTU	=	0,0003 MWh	megavatsat
galon	1 gal	=	3,7854 l	litra
američki barel	1 barell	=	42,0000 gal	galon
mega joule	1 MJ	=	0,0003 MWh	megavatsat

U nastavku slijedi tablični prikaz podataka o ulaznim i izlaznim tokovima postrojenja za pirolizu i isplinjavanje plastičnog otpada prikupljenih pregledom dostupne literature.

Tablica priloga 2. Piroliza a)

Refrence			**Units**	[13]	[13]	[13]	[13]	[13]	[13]	[13]	[32]	[33]	[33]	[34]	[34]
Label				P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Vendor				Agillyx	Envion	Climax	JBI	H. Smart	Veba	BP	BP Chemicals	BP process	Veba process	JBI Inc.'s "Plastic2Oil" Process	Agilyx
Location				Tigard, OR	Derwood, MD	Fairfax, SC	Niagara Falls, NY		Bottrop, Germany		Grangemouth				Portland, OR
Method of Depolymerization/ Feed Process															thermal pyrolysis
Design capacity			tonnes per day	9,0718474	26,30835746	18,1436948	18,1436948	48,08079122	581,5054183					43,54486752	27,2155422
Feedstock requirments				industry standard, grinding/shredding	feedstock is chipped to 1.5 inches or smaller	chipped and shred	shreding or pre-melting				size reduction and removal of most non-plastics				shredded, granulated, and pelletized
Type of Feedstock (% compositions, if available)				PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS, other plastics	PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS, other plastics	100% plastics	HDPE, LDPE, PP		Polyolefines		Polyolefins: 80 (min. 70) wt% PS: 15 (max. 30) wt%	Polyolefines	Polyolefines	HDPE, LDPE, PP, other plastisc, small amouns of PET	PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS, other plastics
Contamination limits					PET,PVC in small amounts						PET: 3 (max. 5) % PVC: 2 (max. 4) wt%	<4% contaminants, <4.5% ash, <2.5% chlorine, <1% moisture			
Inorganic matter of feedstock			<%	100	100		5		4,5						
Moisture content of feedstock			<%		2	0-5	10				0,5-1	1			
Energy recovery efficiency			%	82-85	30-80 (62)	75	92			80	85				
Heat for drying			kWh/wettone												
Input	Tonnage of feedstock		drytonneperday	9,0718474	26,30835746	18,1436948	18,1436948					1		43,54486752	27,2155422
	Power consumption / parasitic load		KWh/dry tone		529,1094292	992,0801798	0,330693393		220,4622622	0,033069339		58,88888936	266,6666688	29,85426467	35,82511761
			KW/dry tonne		826,7334832						60				
	Other inputs (e.g., water, oxygen, etc)	Oxygen	kg/drytonne												
		Catalysts and chemicals	kg/drytonne				trade secret	0,4						+	
		CaO	kg/drytonne						0,00005			46	1		
		Ammonia	kg/drytonne							0,3					
		Sand	kg/drytonne							0,000002		8,5			
		Hyrdrogen	kg/drytonne						1				11		
		E-Gas	kg/drytonne						11						
		Nitrogen	kg/drytonne			minimal amount								+	
		NaOH	kg/drytonne												
		HCl	kg/drytonne						1						
		Water	l/drytonne		417,2702222	834,5404443	125,1810666			1669,080889		2000			+
		Air	kg/drytonne												+
		Cooling water	l/drytonne								40000			86,93129628	
	Supplemental fuel use	Natural gas	MWh/drytonne				0,009699145		0,001293219				1,283333344	start up	+
		Off-gass	MWh/drytonne											recycled	
		Naphta	MWh/drytonne									0,036388889			
			l/drytonne												
		Steam	MWh/drytonne						2,26313E-05				0,031111111		
			tonne/tonnne								1,2				
		Heat input	KWh/dry tonne												
		Heat input startup	MWh/dry tonne												
Output	Energy product (e.g., syngas, ethanol, hydrogen, electricity, steam)	Syngas	MWh/drytone				0,064660969								
		Synthetic crude oil	MWh/drytone	12,60888898	11,96227928	9,699145366			64,6609691					7,712505307	7,104148722
			kg/drytonne										822	780,1788764	800
			l/drytonne	1051,52096		876,2674945									911,3181943
		Heavy fraction(waxes)	kg/drytonne								510	448			
		Light fraction (liquid)	kg/drytonne			150-200			0,015	0,00005	340	265			
		Gas fraction	kg/drytonne		100-250					0,000035	150	147	90	99,7903214	100
			MWh/drytonne											1,265958317	2,644223686
		Nitrogen	kg/drytonne												
		Petcoke	MWh/drytonne											0,07407205	
			kg/drytonne											27,2155422	
		Gasoline	kg/drytonne				11,5	10							

Nastavak Tablica priloga 2.:

			Units	Agillyx	Envion	Climax	JBI	H. Smart	Veba	BP	BP Chemicals	BP process	Veba process	JBI Inc.'s "Plastic2Oil" Process	Agilyx
Output	Energy product (e.g., syngas, ethanol, hydrogen, electricity,steam)	Diesel	kg/drytonne				850	750							
			l/drytonne												
			MWh/drytonne												
		CaO/CaCl2	kg/drytonne									57			
		Sand	kg/drytonne									76			
		Heat	MWh/dry tonne												
		CaCl2	kg/drytonne						1				4,1		
		Off-gass	kg/drytonne												
		HCl	kg/drytonne										5		
	Residuals (e.g., ash, char, slag,etc.)	Char	kg/drytonne	80			68								100
			MWh/drytonne												1,654268128
		Solid residues	kg/drytonne		80						200				
		Wax	l/drytonne												
		Spent catalyst and chemicals	kg/drytonne				trade secret	30							
		Catalys and sludge	kg/drytonne												
			MWh/drytonne												
	Residuals (e.g., ash, char, slag,etc.)	Spent SCR catalyst	kg/drytonne					0,1							
		Inorganic sludge	kg/drytonne		150										
		Residue to incineration	kg/drytonne						1				66		
		Non-hazardous solid waste	kg/drytonne				2,5	0,005	10				50		
		Waxy filter to icineration	kg/drytonne							0,000015		46			
	Heat losses		MWh/drytonne												
	Water losses		l/drytonne				125,1810666	1669,080889							
	Air Emissions Data														
	PM		kg/drytonne	not regulated	negliable	10	0,019								
		daily average	mg/mm3												
		half hourly avarage	mg/mm3												
	Fossil Carbon Dioxide (CO2 Fossil)		kg/drytonne												
	CO2		kg/drytonne	481	3,7-9,25	250		450				345			
	CO2eq		kg/drytonne				0,145							136,8107896	582,4261432
	Methane (CH4)		kg/drytonne		13-32,5										
	HCl		kg/drytonne				0,00015								
		periodic over min 1-hour period	mg/mm3												
	HF	periodic over min 1-hour period	mg/mm3												
	Hydrocarbons		kg/drytonne			4	0,00017		2				2,23		
	Sulphur dioxide (SO2)		kg/drytonne	minimum			0,007			0,0000005		2			
			ppm											0,02	
		periodic over min 1-hour period	mg/mm3												
	Nitrous Oxide (N2O)		kg/drytonne	minimum		minimal	0,15								
	NOx expressed as NO2		kg/drytonne	0,8	18,1-45,25	minimal	1,205	0,1		0,0000001		0,3			
			ppm											15,1	
		daily average	mg/mm3												
		half hourly avarage	mg/mm3												
	Carbon monoxide (CO)		kg/drytonne	0,5	1,8-4,5	minimal	0,145	0,3							
			ppm											3,1	
		daily average	mg/mm3												
		half hourly avarage	mg/mm3												
	TOC	daily average	mg/mm3												
		half hourly avarage	mg/mm3												
	Mercury (Hg)		kg/drytonne		1,7637E-11										
		periodic over min 1-hour period	mg/mm3												
	Lead (Pb)		kg/drytonne		0,0001		0,01								
	Cadmium (Cd)	periodc over min. 30 minute, max 8 hour	mg/mm3												
	VOC		kg/drytonne	0,8	negliable		0,0085	0,1							
	HAP		kg/drytonne				0,00017								
	Dioxins and furans	periodic over min 1-hour period	mg/mm3												
	NH3		kg/drytonne						0,005				0,006		
Cost Dat															
Cost per design capacity		$/dry tonnesperday			309418,785	275577,8277	32352,83698							180007,7815	

Tablica priloga 3. Piroliza b)

Refrence			**Units**	[34]	[35]	[35]	[36]	[36]	[36]	[36]	[37]	[38]	[39]	[40]	[41]
Label				P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
Vendor				Climax Global Energy Inc.	Pyrolysis	Catalytic depolymerisation	Cynar	Golden Renewables	PK Clean	Vadxx	Sustane Technologies	Pyrolysis system	R-ONETM (Regenerated Oil & New Energy)	NRP Pyrolysis Process	Comparison of emissions
Location				Barnwell County, SC.			Bristol, UK	Yonkers, NY, USA	Salt Lake City, UT, USA	Akron, OH	Sherwood, Canada		Hukou, Taiwan		
Method of Depolymerization/ Feed Process							Thermal Depolymerization Continuous Feed	Thermal Depolymerization Continuous Feed	Catalytic Depolymerization Continuous Feed	Thermal Depolymerization Continuous Feed					
Design capacity			tonnes per day	9,0718474	76,8	76,8	18,1436948	21,77243376	4,5359237	54,4310844	10	2,4	2	9,0718474	
Feedstock requirments				shredding	drying	drying		cleaning, drying, shredding	cleaning, shredding		cleaning, shredding				
Type of Feedstock (% compositions, if available)				MPW	MWP	MPW	HDPE, LDPE, PP, PS	PVC, LDPE,PP, PS, other plastics	PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS, other plastics	HDPE, LDPE, PP, PS, other plastics, Tires, EPDM rubber,	HDPE, LDPE, PP, PS	PE, PP, PS	85% (PP+PE+PS) 15% (ABS+PET+PVC, other)	MPW (60% PP, 40% PE)	MPW
Contamination limits							PVC: 0% PET: 2%		<40% PET+PVC						
Inorganic matter of feedstock			<%												
Moisture content of feedstock			<%												
Energy recovery efficiency			%				96								
Heat for drying			kWh/wettone		126	126									
Input	Tonnage of feedstock		drytonneperday		72,7296	72,7296		19,59519038		54,4310844	10				
	Power consumption / parasitic load		KWh/dry tone	352,7396195	16,49947202	16,49947202	+	+	211,9829444	967,2781753					
			KW/dry tonne										250		
	Other inputs (e.g., water, oxygen, etc)	Oxygen	kg/drytonne												
		Catalysts and chemicals	kg/drytonne			24,28722281			+ optional				39,35		
		CaO	kg/drytonne												
		Ammonia	kg/drytonne												
		Sand	kg/drytonne												
		Hyrdrogen	kg/drytonne												
		E-Gas	kg/drytonne												
		Nitrogen	kg/drytonne											45,359237	
		NaOH	kg/drytonne										0,4		
		HCl	kg/drytonne												
		Water	l/drytonne				+		6018,320512			50			
		Air	kg/drytonne									2884,7			
		Cooling water	l/drytonne												
	Supplemental fuel use	Natural gas	MWh/drytonne					start up	start up	start up					
		Off-gass	MWh/drytonne										+		
		Naphta	MWh/drytonne												
			l/drytonne										16,07		
		Steam	MWh/drytonne												
			tonne/tonnne												
		Heat input	KWh/dry tonne		127,7719113							411,6			
		Heat input startup	MWh/dry tonne		1,583949314	0,844772967									
Output	Energy product (e.g., syngas, ethanol, hydrogen, electricity, steam)	Syngas	MWh/drytone												
		Synthetic crude oil	MWh/drytone		9,926082365	7,814149947						10,55		8,186078689	
			kg/drytonne			650,4751848							794,11	598	
			l/drytonne				1043,175555	792,8134221	1043,175555	876,2674665			953,73	738,5682932	
		Heavy fraction(waxes)	kg/drytonne												
		Light fraction (liquid)	kg/drytonne												
		Gas fraction	kg/drytonne	150		102,4287223	60	150		175				312,0715506	
			MWh/drytonne	1,939829073		0,844772967								2,149977223	
		Nitrogen	kg/drytonne											45,359237	
		Petcoke	MWh/drytonne												
			kg/drytonne												
		Gasoline	kg/drytonne												

Nastavak Tablica priloga 3.:

			Units	Climax Global Energy Inc.	Pyrolysis	Catalytic depolymerisation	Cynar	Golden Renewables	PK Clean	Vadxx	Sustane Technologies	Pyrolysis system	R-ONETM (Regenerated Oil & New Energy)	NRP Pyrolysis Process	Comparison of emissions
Output	Energy product (e.g., syngas, ethanol, hydrogen, electricity,steam)	Diesel	kg/drytonne		718,0570222						900				
			l/drytonne	297,9309481											
			MWh/drytonne		8,975712777										
		CaO/CaCl2	kg/drytonne												
		Sand	kg/drytonne												
		Heat	MWh/dry tonne									1,156			
		CaCl2	kg/drytonne												
		Off-gass	kg/drytonne									3060	88,7		
		HCl	kg/drytonne												
	Residuals (e.g., ash, char, slag,etc.)	Char	kg/drytonne	100	102,4287223		50	50	75	100				52,61671492	
			MWh/drytonne	0,821194308	0,422386484									0,345936185	
		Solid residues	kg/drytonne										104,35		
		Wax	l/drytonne	578,3365464											
		Spent catalyst and chemicals	kg/drytonne												
		Catalys and sludge	kg/drytonne			199,5776135									
			MWh/drytonne			1,795142555									
	Residuals (e.g., ash, char, slag,etc.)	Spent SCR catalyst	kg/drytonne												
		Inorganic sludge	kg/drytonne												
		Residue to incineration	kg/drytonne												
		Non-hazardous solid waste	kg/drytonne												
		Waxy filter to icineration	kg/drytonne												
	Heat losses		MWh/drytonne		0,950369588										
	Water losses		l/drytonne									47			
	Air Emissions Data														
	PM		kg/drytonne								0,089142857		0,002667139		0,2
		daily average	mg/mm3				15								
		half hourly avarage	mg/mm3				45								
	Fossil Carbon Dioxide (CO2 Fossil)		kg/drytonne												
	CO2		kg/drytonne												
	CO2eq		kg/drytonne	279,7378616	58,71172122	56,21787686				0,586736399					
	Methane (CH4)		kg/drytonne												
	HCl		kg/drytonne												
		periodic over min 1-hour period	mg/mm3				15								
	HF	periodic over min 1-hour period	mg/mm3				2								
	Hydrocarbons		kg/drytonne												
	Sulphur dioxide (SO2)		kg/drytonne								0,011428571		0,0402		0,166666667
			ppm												
		periodic over min 1-hour period	mg/mm3				75								
	Nitrous Oxide (N2O)		kg/drytonne												0,766666667
	NOx expressed as NO2		kg/drytonne								1,659428571		0,01824		
			ppm												
		daily average	mg/mm3				300								
		half hourly avarage	mg/mm3				600								
	Carbon monoxide (CO)		kg/drytonne								0,930285714				0,533333333
			ppm												
		daily average	mg/mm3				75								
		half hourly avarage	mg/mm3				150								
	TOC	daily average	mg/mm3				15								
		half hourly avarage	mg/mm3				30								
	Mercury (Hg)		kg/drytonne												
		periodic over min 1-hour period	mg/mm3				0,05								
	Lead (Pb)		kg/drytonne												
	Cadmium (Cd)	periodc over min. 30 minute, max 8 hour	mg/mm3				0,05								
	VOC		kg/drytonne								0,121142857				0,333333333
	HAP		kg/drytonne												
	Dioxins and furans	periodic over min 1-hour period	mg/mm3				0,1								
	NH3		kg/drytonne												
Cost Data															
Cost per design capacity			$/dry tonnesperday					275577,8277	440924,5244	321507,4657				170852,5212	

Tablica priloga 4. Isplinjavanje a)

Refrence			**Units**	[13]	[13]	[13]	[42]	[35]	[35]	[35]	[35]	[32]
Vendor				Enerkem (Pontotoc)	Ze-gen	Plasco	Alter NRG - integrated gasification combined cycle	Gasification	Gasification and F–T synthesis	Gasification and methanol-to-gasoline synthesis	Gasification and bioconversion to ethanol	Texaco process
Location				Pontotoc, MS	Narragansett Bay,MS	Ottawa, Ontario, Canada						Montebello, California
Design capacity			tonnes per day	299,3709642	68-136	84,36818082	710	76,8	76,8	76,8	76,8	10
Feedstock requirments				sorting, drying, shredding	sorting, drying, shredding	eclamation of metals shredding	10 inches size					shredded or chipped
Type of Feedstock (% compositions, if available)				post-MRF-sorted MSW, industrial waste, construction and demolition waste, treated wood, bagasse, corn stover, wheat straw, rice hulls, wood chips, sawdust, bark, thinning, limbs, needles	95% wood based material, consisting of railroad crossties (90%), clean wood waste (5%), nonrecycled source-separated plastics (5%)	Paper and paperboard (24.3%), Plastics (16.2%), Metals (7.2%), Glass (6.1%), Rubber & Leather (3.3%), Textiles (5.9%), Wood (7.4%), Food Scraps (18%), Yard Trimmings (7.3%), Miscellaneous	MSW	dried waste plastics	dried waste plastics	dried waste plastics	dried waste plastics	MPW(<10% PVC)
Inorganic matter content of feedstock			<%	15	5							10
Moisture content of feedstock			<%		20			5	5	5	5	5
Efficiency of the electricity generating unit (ICE)			%		85							
Energy recovery efficiency			%	>72	48	98						
Heat for drying			kWh/wettone					126	126	126	126	
Input	Tonnage of feedstock		drytoneperday	299,3709642	68-136	84,36818082	710	72,7296	72,7296	72,7296	72,7296	
	Power consumption / parasitic load		KWh/dry tone	540,1325424	220,4622622		200		383,3157339	665,2587117		
	Other inputs (e.g., water, oxygen, etc)	Oxygen	kg/drytonne	723			172	1102,428722	1102,428722	1102,428722	1102,428722	+
		Air	kg/drytonne									
		Catalysts and chemicals	kg/drytonne									
		Diesel for preprocessing	l/drytonne			0,208635111						
		Caustic for gas cleaning and cooling	kg/drytonne			5						
		Chemicals, Catalysts, Guard Bed Materials	kg/drytone	45,45454545								
		Activated Carbon for gas cleaning and cooling	l/drytone			0,834540444						
			kg/drtytonne									
		Feldspar for gas cleaning and cooling	l/drytone			0,417270222						
		Heat input	kWh/dtytonne				115,2	22,17529039	22,17529039	22,17529039	22,17529039	
		Steam	kWh/drytonne								105,5966209	+
			kg/drytonne								473,0728617	
		Coke	kg/drytonne				38,9					
		Lignite	kg/drytonne									
		Water	l/drytonne	6768,123003	2253,2592							
			kg/drytonne								5630,411827	
		Hydrated lime	kg/drytonne									
	Supplemental fuel use	Syngass	kWh/drytonne									
		Natural gas	kg/drytone	7,86	1000	43,5						
			MWh/drytonne		439,9458333							
			m2/drytonne									
		Fuel oil	kg/drtytonne									
Output	Energy product (e.g., syngas,ethanol, hydrogen, electricity,steam)	Electricity	KWh/dry tonne			925-1302/0,907	929					
		Syngas	MWh/drytonne		29,0974361			8,342133052				
			kg/drytonne					1940,865892				
			Nm3/drytonne									2333,333333
		Steam	MWh/drytonne		3,233048455			0,739176346	2,111932418	2,111932418		
			kg/drtytonne					954,593453	2864,836325	2813,093981		
		Hydrogen	kg/drytonne									
		Ethanol	kg/drytonne	280-307,5							616,6842661	
			MWh/drytonne								5,068637804	
		Methanol	kg/drytonne									
		Purge gas	MWh/drytonne						1,372756072	2,217529039		
			kg/drytonne						1212,249208	1284,05491		
		F-T Liquids	MWh/drytonne						3,167898627			
			kg/drytonne						240,7602957			
		F-T Waxes	MWh/drytonne						2,006335797			
			kg/drytonne						154,1710665			
		Gasoline	MWh/drytonne							4,751847941		
			kg/drytonne							354,8046463		

Nastavak Tablica priloga 4.:

			Units	Enerkem (Pontotoc)	Ze-gen	Plasco	Alter NRG	Gasification	F–T synthesis	methanol-to-gasoline synthesis	bioconversion to ethanol	Texaco process
Output	Material Byproducts	Reactor off-gas	MWh/drytonne								2,006335797	
		Residual gas	kg/drytonne	214								
		Sulphur	kg/drytonne			1,5						
		Salt	kg/drytonne			4,5-6,5						
		Slag	kg/drytonne			12-212						
		Filter cake	kWh/tonne									
		NaCl	kWh/tonne									
		HCl	kg/drytonne									
		Solids	kWh/tonne									
	Residuals (e.g., ash, char, slag,etc.)	Char	kg/drytonne	148,66								
		Slag	kg/drytonne		15							
		Tar	kg/drytonne					141,499472	141,499472	141,499472	141,499472	
		Gasifier solid residues	kg/drytonne	60	15							
		Spent catalysts and chemicals	kg/drytonne	1,695								
		Ash	kg/drytonne					20,06335797	20,06335797	20,06335797	20,06335797	
		Air Pollution Control System residues	kg/drytonne									
		Inorganic sludge	kg/drytonne	22,5								
		Gypsium	kg/drytonne									
		Non-hazardous solid waste	kg/drytonne	6,5								
		Water	kg/drytonne						675,8183738	644,1393875	5485,744456	
		Potable water	kg/drytonne									
			l/drytonne			500-3000*3,785/0,907						
	Heat losses		MWh/drytonne				1,267159451	1,267159451	1,478352693	1,478352693	1,900739176	1,267159451
	Water losses		l/drytone	4172,702222	2086,351111							
			kg/drytonne									
	Air Emissions Data											
	PM		kg/drytonne	0,1765	0,005	0,021-0,022						
	PM 10		kg/drytonne			0,00035						
	PM 2,5		kg/drytonne									
	Biogenic Carbon Dixide(CO2bio)		kg/drytonne			233,52						
	Fossil Carbon Dioxide (CO2fossil)		kg/drytonne	201,94	172,5	523,78						
	CO2eq		kg/drytonne			220-354			301,1615628	1050,686378	1285,216473	
	Methane (CH4)		kg/drytonne	0,945		0,0001						
	HCl		kg/drytonne			0,012-0,01298						
	Hydrocarbons		kg/drytonne		0,004							
	Sulphur dioxide (SO2)		kg/drytonne	0,093	0,19	0,058-0,086						
	Sulphur oxide (SO)		kg/drytonne			0,000025						
	Nitrous Oxide (N2O)		kg/drytonne	0,1975		0,0005						
	NOx expressed as NO2		kg/drytonne	0,555	0,095	0,084-0,086						
	Carbon monoxide (CO)		kg/drytonne	0,73	0,065	0,205-0,22						
	Mercury (Hg)		kg/drytonne		0,0000017	0,0000003						
	Cadmium (Cd)		kg/drytonne		0,000000255	0,000004						
	Lead (Pb)		kg/drytonne		0,000003595	0,000005						
	VOC		kg/drytonne	0,45	0,02							
	HAP		kg/drytonne	0,05								
	NH3		kg/drytonne									
	Dioxins and furans		kg/drytonne									
	Acetaldehyde		kg/drytonne	0,03								
	TNMOC		kg/drytonne			0,1						
	Antimony (Sb)		kg/drytonne									
	Arsenic (As)		kg/drytonne									
	Titanium (Ti)		kg/drytonne									
	Chromimu (Cr)		kg/drytonne									
	Iron (Fe)		kg/drytonne									
	Copper (Cu)		kg/drytonne									
	Zinc (Zn)		kg/drytonne									
	Water Emissions Data											
	Water Effluent		l/drytonne	2504-5842								
			kg/drytonne			1453,05-3594,85						
Cost Data												
Cost per design capacity			$/drytonnesperday	550173,4961			388732,3944					
			£/drytonneperday						523858,2365	376302,0833	328125	

Tablica priloga 5. Isplinjavanje b)

Refrence			**Units**	[32]	[32]	[43]	[43]	[44]	[44]	[44]	[44]	[44]	[44]
Vendor				SVZ process	Akzo Nobel Steam Gasification Process	POWER HOUSE ENERGY GROUP: DMG :Generation and Heat only	POWER HOUSE ENERGY GROUP: DMG :Generation and Hydrogen	I	II	III	IV	V	VI
Location													
Design capacity			tonnes per day			25	25						
Feedstock requirments				particle size: 20-80 mm chlorine content: 2%		sorting, drying, shredding,	sorting, drying, shredding,						
Type of Feedstock (% compositions, if available)				MPW agglomerate, waste oil	PP, PE, PVC	SRF, plastics, WEE plastics, tyre	SRF, plastics, WEE plastics, tyre	PE - Recycled polyethylene, derived from separate collection of MSW	GS3 - Mix of recycled polyolefinic plastics obtained from plastic packaging for food and beverages by means of sorting and washing treatments	Neolite -Mix of plastics obtained from separate collection of post-consumer packaging made of plastic, but containing also ferrous and non-ferrous metals	Mix of plastics obtained from separate collection	PDF - Mix of different kinds of food packaging, generally consisting of multilayer packaging of plastic, paper and aluminum	PDF - Mix of different kinds of food packaging, generally consisting of multilayer packaging of plastic, paper and aluminiu
Inorganic matter content of feedstock			<%										
Moisture content of feedstock			<%										
Efficiency of the electricity generating unit (ICE)			%										
Energy recovery efficiency			%										
Heat for drying			kWh/wettone										
Input	Tonnage of feedstock		drytoneperday			25	25	1	1	1			
	Power consumption / parasitic load		KWh/dry tone		115200								
	Other inputs (e.g., water, oxygen, etc)	Oxygen	kg/drytonne	1442,590775									
		Air	kg/drytonne		2300								
		Catalysts and chemicals	kg/drytonne										
		Diesel for preprocessing	l/drytonne										
		Caustic for gas cleaning and cooling	kg/drytonne										
		Chemicals, Catalysts, Guard Bed Materials	kg/drytone										
			l/drytone										
		Activated Carbon for gas cleaning and cooling	kg/drytonne					0,508196721	0,491525424	0,5	0,5	0,5	0,5
		Feldspar for gas cleaning and cooling	l/drytone										
		Heat input	kWh/dtytonne										
		Steam	kWh/drytonne			915,2	915,2						
			kg/drytonne		300								
		Coke	kg/drytonne										
		Lignite	kg/drytonne	1226,692836									
		Water	l/drytonne	7752,698724	87000	+							
			kg/drytonne										
		Hydrated lime	kg/drytonne					6,557377049	6,440677966	6,477272727	6,40625	6,465517241	6,465517241
	Supplemental fuel use	Syngass	kWh/drytonne			1560	1560						
		Natural gas	kg/drytone										
			MWh/drytonne										
			m2/drytonne	98,13542689									
		Fuel oil	kg/drtytonne	39,25417076									
Output	Energy product (e.g., syngas,ethanol, hydrogen, electricity,steam)	Electricity	KWh/dry tonne	621,5243753		2288	1120	1639,344262	1694,915254	1136,363636	1562,5	862,0689655	862,0689655
		Syngas	MWh/drytonne										
			kg/drytonne	200,1962709	900								
			Nm3/drytonne										
		Steam	MWh/drytonne			1,56	1,152						
			kg/drtytonne										
		Hydrogen	kg/drytonne				40						
			kg/drytonne										
			MWh/drytonne										
		Methanol	kg/drytonne	698,7242395									
		Purge gas	MWh/drytonne										
			kg/drytonne										
		F-T Liquids	MWh/drytonne										
			kg/drytonne										
		F-T Waxes	MWh/drytonne										
			kg/drytonne										
		Gasoline	MWh/drytonne										
			kg/drytonne										

Nastavak Tablica priloga 5.:

			Units	SVZ process	Akzo Nobel Steam Gasification Process	DMG :Generation and Heat only	DMG :Generation and Hydrogen	I	II	III	IV	V	VI
Output	Material Byproducts	Reactor off-gas	MWh/drytonne			4,5968							
		Residual gas	kg/drytonne										
		Sulphur	kg/drytonne										
		Salt	kg/drytonne										
		Slag	kg/drytonne										
		Filter cake	kWh/tonne			0,0104							
		NaCl	kWh/tonne			1,9968							
		HCl	kg/drytonne		210								
		Solids	kWh/tonne			4,68							
	Residuals (e.g., ash, char, slag,etc.)	Char	kg/drytonne										
		Slag	kg/drytonne	0,883218842									
		Tar	kg/drytonne										
		Gasifier solid residues	kg/drytonne										
		Spent catalysts and chemicals	kg/drytonne										
		Ash	kg/drytonne		220			146,8852459	100,8474576	82,27272727	35,78125	68,36206897	68,36206897
		Air Pollution Control System residues	kg/drytonne					7,049180328	6,949152542	6,931818182	6,875	6,982758621	6,982758621
		Inorganic sludge	kg/drytonne										
		Gypsium	kg/drytonne	98,13542689									
		Non-hazardous solid waste	kg/drytonne										
		Water	kg/drytonne										
		Potable water	kg/drytonne										
			l/drytonne										
	Heat losses		MWh/drytonne										
	Water losses		l/drytone										
			kg/drytonne	9715,407262									
	Air Emissions Data												
	PM		kg/drytonne										
	PM10		kg/drytonne										
	PM2,5		kg/drytonne					0,01	0,012881356	0,066931818	0,01890625	0,061551724	
	Biogenic Carbon Dixide(CO2bio)		kg/drytonne										
	Fossil Carbon Dioxide (CO2fossil)		kg/drytonne	12177,26397				2622,95082	2762,711864	2409,090909	2828,125	1922,413793	1922,413793
	CO2eq		kg/drytonne										
	Methane (CH4)		kg/drytonne										
	HCl		kg/drytonne					0,000180328		0,104204545	0,0053125	0,027327586	0,027327586
	Hydrocarbons		kg/drytonne										
	Sulphur dioxide (SO2)		kg/drytonne										
	Sulphur oxide (SO)		kg/drytonne							0,098863636	0,0984375	0,103448276	0,103448276
	Nitrous Oxide (N2O)		kg/drytonne										
	NOx expressed as NO2		kg/drytonne					0,070327869	0,071355932	0,0625	0,06953125	0,066034483	0,066034483
	Carbon monoxide (CO)		kg/drytonne										
	Mercury (Hg)		kg/drytonne					6,55738E-07	6,77966E-07	1,13636E-06	1,5625E-06	8,62069E-07	8,62069E-07
	Cadmium (Cd)		kg/drytonne					1,63934E-06	1,69492E-06	2,27273E-05	4,6875E-06	1,72414E-06	1,72414E-06
	Lead (Pb)		kg/drytonne					0,000245902	0,002305085	0,008522727	0,000328125	0,000724138	0,000724138
	VOC		kg/drytonne										
	HAP		kg/drytonne										
	NH3		kg/drytonne					3,27869E-05	3,38983E-05	3,40909E-05	0,00003125	3,44828E-05	3,44828E-05
	Dioxins and furans		kg/drytonne					6,55738E-12	6,77966E-12	6,81818E-12	6,25E-12	6,03448E-12	3,44828E-12
	Acetaldehyde		kg/drytonne										
	TNMOC		kg/drytonne										
	Antimony (Sb)		kg/drytonne					3,27869E-06	1,52542E-05	0,000352273	5,3125E-07	1,12069E-05	1,12069E-05
	Arsenic (As)		kg/drytonne					6,55738E-07	6,77966E-07	1,13636E-06	1,5625E-06	8,62069E-07	8,62069E-07
	Titanium (Ti)		kg/drytonne					3,27869E-06	1,69492E-06	2,27273E-06	0,000003125	2,58621E-06	2,58621E-06
	Chromimu (Cr)		kg/drytonne							0,000988636	0,00009375		
	Iron (Fe)		kg/drytonne							0,004659091	0,0028125	0,001293103	0,001293103
	Copper (Cu)		kg/drytonne							0,013068182	0,000171875	2,58621E-05	2,58621E-05
	Zinc (Zn)		kg/drytonne								0,0000625		
	Water Emissions Data												
	Water Effluent		l/drytonne										
			kg/drytonne	9630,350195									
Cost Data													
Cost per design capacity			$/drytonnesperday										
			£/drytonneperday			240000							