

# Projekt pogonskog postrojenja broda za prikupljanje komunalnog otpada s otoka

---

**Franulović, Luka**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:239593>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-10**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**PROJEKT POGONSKOG POSTROJENJA BRODA ZA  
PRIKUPLJANJE KOMUNALNOG OTPADA S OTOKA**

Rijeka, rujan 2024.

Luka Franulović

0069084182

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**PROJEKT POGONSKOG POSTROJENJA BRODA ZA  
PRIKUPLJANJE KOMUNALNOG OTPADA S OTOKA**

Mentor: prof. dr. sc. Tomislav Mrakovčić

Komentor: Igor Čutić, dipl. ing.

Rijeka, rujan 2024.

Luka Franulović

0069084182

Rijeka, 13. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za termodinamiku i energetiku**  
Predmet: **Brodski sustavi**  
Grana: **2.11.04 brodsko strojarstvo**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Luka Franulović (0069084182)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**  
Modul: **Termotehnika**

Zadatak: **Projekt pogonskog postrojenja broda za prikupljanje komunalnog otpada s otoka / Design of propulsion plant of a ship for municipal waste collection from islands**

### Opis zadatka:

Potrebno je izraditi projekt pogonskog postrojenja broda za prikupljanje komunalnog otpada s otoka. Brod je opremljen sustavom koji iz prikupljenog komunalnog otpada generira bioplin pogodan za rad pogonskih motora broda. U radu je potrebno opisati postrojenje za prikupljanje, sortiranje i obradu otpada u brodu te izraditi analizu izvedivosti pogona broda na bioplin dobiven iz komunalnog otpada.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*Luka Franulović*

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

*Mrakovčić*

Prof. dr. sc. Tomislav Mrakovčić

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

*Bonefadić*

Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefadić

### **Izjava o akademskoj čestitosti**

Izjavljujem da sam svoj diplomski rad pod naslovom "Projekt pogonskog postrojenja broda za prikupljanje komunalnog otpada s otoka" izradio samostalno, uz korisne upute i savjete mog mentora prof. dr. sc. Tomislava Mrakovčića i komentora Igora Čutića, dipl. ing. te koristeći literaturu i radove koje sam naveo u literaturnom pregledu, kao i znanje stečeno tijekom studija.

## **Zahvala**

Zahvaljujem prof. dr. sc. Tomislavu Mrakovčiću i industrijskom mentoru Igoru Čutiću, dipl. ing. te cjelokupnoj grupaciji Maritime Center of Excellence za pomoć, razumijevanje i strpljenje koje su mi pružili tijekom procesa izrade diplomskog rada. Zahvaljujem i na vremenu koje su mi posvetili te na izvrsnoj suradnji koju smo ostvarili. Također, zahvalan sam svojoj obitelji na kontinuiranoj podršci ne samo u fazi izrade diplomskog rada, već i tijekom cijelog mog studijskog puta.

## Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>2. TEMELJI ODRŽIVOG UPRAVLJANJA OTPADOM</b> .....	<b>8</b>
2.1 Povijesni razvoj sustava upravljanja otpadom .....	8
2.2 Bioplin kao izvor energije .....	10
2.3 Kružno gospodarstvo.....	10
2.4 Strategija gospodarenja otpadom u Hrvatskoj .....	11
2.5 Početne premise idejnog plovila .....	12
2.6 Plan rješavanja zadanog problema .....	13
<b>3. KOMUNALNI OTPAD</b> .....	<b>15</b>
3.1. Definicija komunalnog otpada i njegov utjecaj na okoliš .....	15
3.2. Svojstva komunalnog otpada .....	16
3.3. Količine komunalnog otpada na otocima.....	18
3.3.1. <i>Raspodjela nastajanja otpada po mjesecima</i> .....	20
3.4 Gospodarenje otpadom u PGŽ .....	21
3.5 ŽCGO Marišćina .....	22
3.6 Tok obrade otpada na ŽCGO Marišćina .....	24
<b>4. PRORAČUN NASTALIH KOLIČINA MIJEŠANOG KOMUNALNOG OTPADA</b> .....	<b>26</b>
4.1 Prikaz reciklabilnih frakcija u siječnju i kolovozu.....	26
4.2 Raspodjela pojedinih frakcija komunalnog otpada na otocima u siječnju .....	27
4.3 Raspodjela pojedinih frakcija komunalnog otpada na otocima u kolovozu.....	28
<b>5. SUSTAV ZA PRIKUPLJANJE, OBRADU I SORTIRANJE MIJEŠANOG OTPADA</b> .....	<b>30</b>
5.1 Biosušenje .....	30
5.2 Pretovarne stanice .....	32
5.3. Sustav za sortiranje otpada na brodu.....	34
5.3.1 <i>Tok materijala u sortirnici otpada</i> .....	35
<b>6. IMPLEMENTACIJA PLAZMA SUSTAVA ZA UPLINJAVANJE NA IDEJNOM BRODU</b> .....	<b>37</b>
6.1 Uvod u plazma sustave uplinjavanja.....	37
6.2 Uplinjavanje pomoću plazma sustava na brodu.....	37
6.2.1 <i>Baklja plazma sustava</i> .....	38
6.2.2 <i>Grafitne elektrode plazma sustava</i> .....	39
6.3 Plazma sustav za uplinjavanje otpada .....	39
6.3.1 <i>Procesi obrade otpada pomoću plazma sustava za raplinjavanje</i> .....	39
6.4 Kemijske reakcije u procesu uplinjavanja.....	42
6.5 Mogućnost korištenja sintetskog plina za pogon plinskog motora .....	44
6.6 Prednosti korištenja plazma sustava za uplinjavanje komunalnog otpada i mogući problemi	46
6.7 Utjecaj na okoliš.....	47
<b>7. DIMENZIJE BRODA ZA PRIKUPLJANJE KOMUNALNOG OTPADA</b> .....	<b>49</b>

7.1 Distribucija prostora na brodu i određivanje dimenzija .....	49
7.2 Dimenzije sustava za obradu otpada na brodu .....	50
7.3 Kamionski prijevoz otpada do broda .....	51
<b>8. OPERATIVNI PLAN .....</b>	<b>52</b>
8.1 Aktivnosti idejnog broda.....	52
8.2 Količina komunalnog otpada za plazma uplinjavanje.....	53
8.3 Potrošači idejnog plovila.....	54
8.4 Proračun proizvedene energije .....	55
8.5 Gustoća sintetskog plina.....	55
8.6 Prikaz operativnog plana.....	57
<b>9. PROCJENA KOLIČINE DOBIVENE ENERGIJE POMOĆU PLAZMA SUSTAVA ZA UPLINJAVANJE KOMUNALNOG OTPADA .....</b>	<b>60</b>
9.1 Proračun gornje ogrjevne vrijednosti .....	60
9.2 Procjena proizvedene električne energije.....	65
9.3 Analiza osjetljivosti.....	67
9.3.1 Promjena ogrjevne vrijednosti.....	68
9.3.2 Promjena pojedine frakcije u postocima.....	68
9.3.3 Maksimalna i minimalna količina otpada koja se može obraditi u sustavu .....	72
<b>10. PROCJENA KOLIČINE RECIKLIRANOG MATERIJALA I PEPELA .....</b>	<b>74</b>
<b>11. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>76</b>
<b>11. LITERATURA .....</b>	<b>78</b>
<b>Popis oznaka .....</b>	<b>81</b>
<b>Popis slika.....</b>	<b>82</b>
<b>Popis tablica .....</b>	<b>83</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>85</b>



## 1. UVOD

U ovom radu biti će razrađen idejni projekt plovnog objekta, odnosno broda čija bi namjena bila sakupljati, odvajati, obrađivati i uplinjavati prethodno sortirani komunalni otpad sa obližnjih kvarnerskih otoka, točnije, Krka, Raba, Cresa i Malog Lošinja. Izdvojene reciklabilne frakcije otpada zajedno s pepelom dobivenim uplinjavanjem miješanog komunalnog otpada koji nije moguće dalje izdvojiti iskrcavali bi se u Rijeci. Otpad bi se na plovnom objektu, odnosno brodu usitnjavao pomoću drobilice. Zatim, tako usitnjeni otpad prolazio bi kroz rotor separatora čija je funkcija izdvajanje metalne frakcije otpada pomoću magneta nakon čega bi uslijedilo ručno izdvajanje frakcija papira i kartona, plastike i stakla. Ideja je sakupljati otpad s obližnjih otoka, izdvajati reciklabilne frakcije te potom iskoristiti ostatak nereciklabilnog miješanog komunalnog otpada za dobivanje goriva za propulziju broda i za proizvodnju potrebne električne i toplinske energije za sve sustave na brodu. Gorivo za propulziju broda može se dobiti uplinjavanjem nereciklabilne frakcije otpada pomoću plazma sustava na način da se otpad izlaže visokim temperaturama od oko 5000 °C. Uplinjavanjem bi se dobio sintetski plin (syngas) s manjim udjelima ugljikovog dioksida i metana, te većim udjelima vodika i ugljikovog monoksida koji određuju ogrjevnu vrijednost proizvedenog plina, odnosno goriva. Nusprodukt procesa uplinjavanja miješanog komunalnog otpada je inertni pepeo, a njegova bi količina iznosila oko 5% početne mase otpada. Ogrjevna vrijednost dobivenog goriva odnosno plina izračunati će se u radu te će se koristiti za proračun proizvedene energije i proizvedene količine plina. Nadalje će se provjeriti je li gorivo s izračunatom ogrjevnom vrijednošću prikladno za propulziju plinskog motora za pogon broda i proizvodnju električne energije za potrebe svih brodskih sustava, uključujući i sustav za obradu otpada, uplinjavanje i skladištenje sintetskog plina. U slučaju viška sintetskog plina, odvoditi će se na visokotemperaturnu baklju za sagorijevanje. Kako bi se otpad uplinjavao u plazmi, potrebna mu je predobrada koja se sastoji od sušenja otpada s pretpostavljenom prosječnom vlažnošću od 30% na vlažnost od 10% i usitnjavanja otpada na malene komade. Otpad se može osušiti na više načina, a jedan od načina je upotreba spremnika (preskontejnera) za biosušenje otpada. Obradeni, odnosno osušeni i usitnjeni otpad ulazi u plazma sustav gdje se uplinjava i potom prolazi kroz složene sustave pročišćavanja i hlađenja plinova kako bi plin bio spreman za upotrebu.

## **2. TEMELJI ODRŽIVOG UPRAVLJANJA OTPADOM**

### **2.1 Povijesni razvoj sustava upravljanja otpadom**

Povijest upravljanja otpadom seže unatrag do antičkih civilizacija. Rimljani su imali sofisticirane sustave za uklanjanje otpada, poput kanalizacije i javnih otpadnih jama. To je bio njihov način zbrinjavanja komunalnog otpada. Kako je vrijeme prolazilo, industrijska revolucija i urbanizacija su donijeli nove izazove u vezi s otpadom. S rastom gradova i razvojem industrije, problemi s otpadom su se povećavali. Gradovi su morali pronaći načine da se nose s velikom količinom otpada koja se svakodnevno stvarala. Tako su se razvili organizirani sustavi za prikupljanje otpada, što je bio korak prema suvremenim načinima upravljanja otpadom. Napretkom tehnologije razvijali su se i načini prikupljanja i recikliranja otpada kao i specijalizirana vozila i oprema koja je dizajnirana za prikupljanje otpada. Ovo je omogućilo efikasnije i brže prikupljanje otpada, smanjujući njegov utjecaj na okoliš.

U današnje vrijeme, upravljanje otpadom uključuje niz inovativnih tehnologija i pristupa koji su osmišljeni kako bi se povećala učinkovitost i smanjio negativan utjecaj na okoliš. Jedan od ključnih pristupa je kružno gospodarstvo, koje se fokusira ponovnu uporabu i recikliranje materijala kako bi se smanjila količina otpada koji završava na odlagalištima.

Pametni sustavi upravljanja otpadom koriste tehnologiju IoT “Internet of things” za optimizaciju prikupljanja otpada. Kante za smeće opremljene sensorima mogu slati podatke o svojoj popunjenosti, omogućujući učinkovitije planiranje ruta za prikupljanje otpada. Ovi sustavi smanjuju operativne troškove i emisije CO<sub>2</sub> povezane s prikupljanjem otpada [1].

Suvremeni centri za reciklažu koriste napredne tehnologije za sortiranje otpada. Automatizirani sustavi za razvrstavanje otpada koriste optičke senzore, infracrvenu tehnologiju i robote za prepoznavanje i razdvajanje različitih vrsta materijala. To omogućuje visoku stopu reciklaže i smanjuje količinu otpada koji završava na odlagalištima.

Tehnologije proizvodnje energije iz otpada omogućuju pretvaranje nerekiclabilnog komunalnog otpada u energiju kroz procese poput spaljivanja, pirolize i plazma uplinjavanja. Ove tehnologije smanjuju volumen otpada i stvaraju korisne oblike energije, poput električne energije i topline. Moderni pogoni opremljeni su naprednim sustavima za pročišćavanje plinova kako bi se minimizirale emisije štetnih tvari.

Sve više pozornosti pridaje se prikupljanju otpada iz mora i rijeka, kako bi se zaštitio ekosustav voda. Zbog toga se dolazi do ideje razvitka brodova koji su posebno dizajnirani da prikupljaju otpad iz vode. Oni su tu da pomognu u smanjenju zagađenja i očuvanju vodenog okoliša. U suvremeno doba, fokus

je na održivim metodama upravljanja otpadom. Brodovi za prikupljanje otpada opremljeni su tehnologijom koja omogućava efikasnije prikupljanje otpada, smanjenje emisija štetnih plinova i očuvanje morske biološke raznolikosti. Mreže i sakupljači prikazani na slici 2.1.1 ispod koriste se za prikupljanje krutog otpada kao što su plastične boce i vrećice, dok sustavi za usisavanje uklanjaju mulj i sediment s dna. Skimmeri na slici 2.1.2 , specijalizirani uređaji za uklanjanje uljnih mrlja, skupljaju izliveno ulje koje se potom može sigurno zbrinuti. Plovila opremljena za sakupljanje plutajućeg otpada i uljnih mrlja redovito plove u turističkim zonama, osiguravajući čistoću vode za kupaće i morske organizme [2].



*Slika 2.1.1 Sakupljač otpada na vodi*



*Slika 2.1.2 Uređaj za sakupljanje uljnih mrlja*

Nadalje, razvijena je ideja o plovilima za sakupljanje otpada s obližnjih otoka i njegovoj obradi izravno na tim plovilima putem recikliranja i uplinjavanja. Time bi se smanjilo opterećenje na CGO Marišćina te bi se osiguralo jednostavnije rješenje u strategiji gospodarenja otpadom.

## **2.2 Bioplin kao izvor energije**

Proizvodnja bioplina iz komunalnog otpada ima mnoge prednosti za društvo. Osim što poboljšava lokalne gospodarske uvjete, stvara nova radna mjesta u ruralnim područjima i povećava kupovnu moć, bioplin ima široku primjenu. Može se koristiti za različite svrhe, kao što je proizvodnja toplinske i/ili električne energije. Proces transformacije organskog dijela otpada u iskoristivu energiju pomaže u rješavanju problema velikih nastalih količina otpada u mnogim Europskim zemljama. Jedna od glavnih prednosti proizvodnje bioplina iz komunalnog otpada je smanjenje nastale količine otpada koja bi završila na odlagalištima. Iskorištavanjem organskog otpada za proizvodnju energije, smanjuje se potreba za prostorom na odlagalištima. Bioplin je obnovljiv izvor energije jer se kontinuirano može proizvoditi iz organskih materijala prisutnih u komunalnom otpadu. To znači da se može koristiti dugoročno korištenjem lokalno proizvedenog otpada za proizvodnju bioplina, te smanjiti svoju ovisnost o fosilnim gorivima, čime se povećava energetska neovisnost. Bioplin se može koristiti u kombiniranim sustavima za proizvodnju električne i toplinske energije u sustavu kogeneracije, čime se povećava energetska efikasnost.

Korištenje bioplina umjesto fosilnih goriva smanjuje emisiju štetnih plinova poput  $CO_2$ ,  $CH_4$  i  $N_2O$  što pridonosi smanjenju globalnog zatopljenja. Anaerobna digestija također smanjuje emisije metana i dušikovih oksida, čime se dodatno pridonosi održivosti proizvodnje energije. U mnogim Europskim zemljama bioplin se koristi kao energent za proizvodnju toplinske i električne energije u kogeneracijskim postrojenjima.

## **2.3 Kružno gospodarstvo**

Orijentacija prema kružnom gospodarstvu važan je korak jer pomaže u postizanju ciljeva iz Europskog zelenog plana i provedbi akcijskog plana EU za kružno gospodarstvo. Mjere gospodarenja otpadom uključuju proizvodnju, obradu, recikliranje, uplinjavanje. U svim fazama, mjere koje predstavljaju proces kružnog gospodarstva imaju za cilj smanjiti količinu otpada na mjestu nastajanja te ga koristiti u sustavima gdje se može reciklirati kao sirovina za daljnju upotrebu u gospodarstvu, te pritom zadržati svoju približnu novčanu vrijednost.

Sprječavanje stvaranja komunalnog otpada, smanjenje njegova obujma i recikliranje glavni su fokusi akcijskog plana za kružno gospodarstvo. Osim toga, plan uključuje proširenje odgovornosti proizvođača, poticanje recikliranja i ponovne uporabe te postupno smanjenje odlaganja otpada. Ove

su inicijative ključne u nastojanju da se gospodarenje otpadom uključi kao sastavni dio kružnog gospodarstva.

Kružno gospodarstvo uključuje uvođenje i implementaciju novih tehnologija i projekata za obradu otpada, kao i modifikaciju postojećih sustava. Brod koji sakuplja komunalni otpad s otoka svakako bi bio na popisu takvih projekata. Sakupljanje otpada, njegova obrada, recikliranje te uplinjavanje, obrada dimnih plinova, iskrcavanje reciklabilnih frakcija iz nastalog otpada i minimalne količine pepela dobivenog uplinjavanjem u plazma sustavima doprinijeti će razvoju kružnog gospodarstva te smanjenju ukupne količine komunalnog otpada koja završava na odlagalištima [3], [4], [5]

**Reference source not found..**

#### **2.4 Strategija gospodarenja otpadom u Hrvatskoj**

Gospodarenje otpadom uključuje ekonomski i ekološki održivo upravljanje otpadom tijekom njegovog nastanka, sakupljanja, transporta, obrade i konačnog zbrinjavanja u skladu s važećim zakonima i propisima. Ciljevi gospodarenja otpadom su smanjenje količine komunalnog otpada na mjestu nastajanja, neutralizaciju opasnih sastojaka otpada osobito kroz razvoj čistih tehnologija koje troše manje prirodnih resursa i korištenjem materijala s manjim negativnim utjecajem na okoliš, primjena odgovarajućih metoda akcija zbrinjavanja opasnih tvari u otpadu, recikliranja, ponovne uporabe recikliranih materijala ili korištenje otpada radi dobivanja sekundarnih sirovina kao što je gorivo, energetska korištenje goriva iz otpada, zbrinjavanja ostatne količine nastalog komunalnog otpada te sanacije okoliša onečišćenog otpadom.

Strategija gospodarenja otpadom temelji se na postojećim praksama koje uključuju sprječavanje ili smanjenje otpada na izvoru nastajanja, recikliranje i ponovnu upotrebu materijala, tretiranje otpada koji se ne može reciklirati kako bi se neutralizirali štetni sastojci i smanjivanje volumena prije odlaganja i konačno odlaganje kao posljednje rješenje u sustavu gospodarenja otpadom. Dugoročno, zbrinjavanje otpada na odlagalištima ima najveći ekološki učinak onečišćenja okoline, no u nedostatku boljih rješenja i bolje strategije gospodarenja otpadom često se prakticira, posebno u manje razvijenim zemljama. Zakonom se utvrđuju smjernice za gospodarenje otpadom s ciljem izbjegavanja rizika za zdravlje ljudi, biljaka i životinja te smanjenja onečišćenja vode, tla i zraka. Osim toga, potrebno je spriječiti nekontrolirano odlaganje i spaljivanje otpada, kao i moguće eksplozije, požare, buku i neugodne mirise. Također, može doći do nekontrolirane fermentacije otpada pri čemu se stvaraju uvjeti pogodni za razmnožavanje raznih bakterija. Insekti, glodavci i neke ptičje vrste mogu postati prijenosnici različitih zaraznih bolesti. Komunalni otpad često sadrži patogene, odnosno

uzročnike bolesti koji mogu ući u ljudski organizam i izazvati ozbiljne zdravstvene probleme, širenja patogenih životinja i biljaka te razvoja patogenih mikroorganizama.

Zbog tih razloga, posebna pozornost posvećuje se prihvatu otpada te njegovoj količini, njegovim kemijskim, fizikalnim i biološkim svojstvima, prilagodbi okolišu, zaštiti podzemnih voda i kontroli ispušnih plinova. Obvezuje se sve proizvođače, sakupljače i prijevoznike otpada te rukovatelje, obrađivače i zbrinjavače otpada na postupanje s komunalnim otpadom u skladu s važećim zakonima i propisima [4], [5].

## **2.5 Početne premise idejnog plovila**

- Količine otpada izračunate su na temelju javno dostupnih podataka za Krk za 2021. godinu.
- Sastav komunalnog otpada na Rabu i Cresu izračunat je na temelju podataka za Krk.
- Otpad se može skladištiti u prekrcajnim stanicama u luci dok se ne prikupi.
- Pretpostavljena pogonska snaga broda je 325 kW uzimajući u obzir brzinu broda od 5 čvorova na temelju Jadrolinijinog trajekta.
- Brod posluje tijekom cijele godine.
- Brod može pristajati u lukama u bilo koje vrijeme.
- Luka Rijeka može prikupljati bale recikliranog otpada i pepela za daljnju obradu.
- Postrojenje za razvrstavanje otpada i plazma postrojenje mogu raditi tijekom tranzita i u luci.
- Pretpostavlja se da je otpad proporcionalan ukupnom poznatom sastavu otpada u županijskom centru za gospodarenje otpadom Marišćina, uz pretpostavku vlažnosti od 30%.

Operativni plan i logistika broda temelje se na nekoliko ključnih pretpostavki kako bi se osigurala učinkovita obrada komunalnog otpada i stabilna proizvodnja energije tijekom cijele godine. Prvo, količine otpada koje će brod obrađivati izračunate su na temelju podataka prikupljenih za Krk u 2021. godini. S obzirom da su podaci za Krk korišteni i za procjenu sastava otpada na Rabu i Cresu, osigurana je dosljednost i pouzdanost u procjeni količine i sastava otpada koji će se prikupljati i obrađivati. Otpad prikupljen na različitim lokacijama može se privremeno skladištiti u prekrcajnim stanicama u luci dok se ne prikupi dovoljna količina za obradu. Ove prekrcajne stanice osiguravaju fleksibilnost u operacijama broda, omogućujući kontinuirani rad sustava za uplinjavanje otpada plazma sustavom bez obzira na trenutne količine otpada prikupljenog u lukama.

Pogonska snaga broda pretpostavljena je na 325 kW, što je određeno uzimajući u obzir brzinu broda od 5 čvorova temeljem performansi Jadrolinijinih trajekata koji plove između Krka, Cresa, Raba i Malog Lošinja. Snaga od 325 kW omogućuje dovoljnu efikasnost za plovidbu i obavljanje svih

operacija tijekom cijele godine, osiguravajući da brod može kontinuirano prikupljati i obrađivati komunalni otpad.

Brod bi poslovao tijekom cijele godine, pristajući u lukama u bilo koje vrijeme, što omogućuje neprekidno prikupljanje i obradu otpada. Luka Rijeka ima kapacitete za prikupljanje bala recikliranog otpada i pepela, koji se zatim mogu dalje obrađivati ili reciklirati, čime se dodatno poboljšava održivost broda.

Postrojenje za razvrstavanje otpada i plazma postrojenje mogu raditi tijekom tranzita i dok je brod u luci. Ova mogućnost kontinuiranog rada osigurava maksimalnu iskoristivost postrojenja i omogućuje učinkovitu obradu otpada bez nepotrebnih zastoja, čime se povećava ukupna operativna učinkovitost broda.

Pretpostavlja se da je sastav otpada proporcionalan ukupnom poznatom sastavu otpada, uz pretpostavku vlažnosti od 30%. Ova pretpostavka omogućuje točniju procjenu energetske vrijednosti otpada, što je ključno za optimizaciju procesa uplinjavanja i proizvodnje energije.

Sve navedene pretpostavke ključne su za izradu operativnog plana broda. Precizno planiranje i praćenje količina otpada, energetske potrošnje i učinkovitosti sustava osigurava stabilan rad i održivost operacija na brodu, omogućujući učinkovitije upravljanje otpadom i proizvodnju energije. Kroz pažljivo planiranje i optimizaciju resursa, brod može ispuniti svoje ciljeve i doprinijeti održivom upravljanju otpadom te zaštititi okoliša.

## **2.6 Plan rješavanja zadanog problema**

Plan izrade projekta plovnog objekta, odnosno broda, čija bi namjena bila sakupljati, reciklirati, obrađivati i uplinjavati neodvojeni otpad sa obližnjih Kvarnerskih otoka, točnije, Krka, Raba, Cresa i Malog Lošinja sastoji se od nekoliko ključnih koraka koji uključuju: analizu dinamike i količine generiranog komunalnog otpada, analizu tehnologije sortiranja i obrade otpada te proračun količine proizvedenog sintetskog plina odnosno goriva te električne i toplinske energije. Prva faza uključuje organizaciju i implementaciju sustava za sakupljanje prethodno sortiranog komunalnog otpada s navedenih otoka. Komunalni otpad bi se prikupljao pomoću specijaliziranih plovila, odnosno brodova opremljenih dizalicom za prihvat komunalnog otpada. Posebna pažnja bit će posvećena optimizaciji rute brodova kako bi se smanjili troškovi prijevoza i emisije CO<sub>2</sub>. Nakon sakupljanja, komunalni otpad bi se pomoću pokretnih traka dovodio do drobilice gdje bi se usitnjavao u malene komade. Usitnjeni otpad prolazio bi kroz rotacijski separator čija je funkcija izdvajanje metalne frakcije pomoću centrifugalne sile koju proizvodi rotor te magnetna za sakupljanje metala. Nakon toga uslijedilo bi ručno izdvajanje frakcija papira i kartona, plastike i stakla. Reciklabilne frakcije otpada odvojile bi se

i skladištite na idejnom brodu dok se ne prevezu u luku Rijeka te na daljnju obradu prema CGO Marišćini. Plazma sustav za uplinjavanje otpada bio bi implementiran na idejnom plovilu. Sustav bi uključivao plazma reaktor za koje će generirati potrebne visoke temperature za uplinjavanje komunalnog otpada te sustav za pročišćavanje i skladištenje proizvedenog sintetskog plina. Proces uplinjavanja obuhvaća niz složenih kemijskih reakcija koje će s ulaznim komunalnim otpadom rezultirati izlaznim inertnim pepelom i sintetskim plinom. Inertni pepeo, koji čini oko 5% početne mase otpada zbrinjavao bi se na Marišćini ili bi se iskoristio kao sirovina u građevinskoj industriji. Implementacija plazma sustava ima potencijal značajno smanjiti količinu komunalnog otpada na odlagalištima te smanjiti emisije potencijalno opasnih plinova koje nastaju na takvim odlagalištima. Plazma sustavi za uplinjavanje također nude mogućnost generiranja čišće energije, smanjujući potrebu za fosilnim gorivima. Plan rješavanja problema sakupljanja, obrade i iskorištavanja otpada pomoću idejnog plovila predstavlja inovativno rješenje koje kombinira moderne tehnologije recikliranja i proizvodnje energije iz komunalnog otpada. Takav pristup omogućava učinkovito upravljanje otpadom na otocima te pridonosi održivom gospodarenju komunalnim otpadom i zaštiti okoliša.



### **3. KOMUNALNI OTPAD**

#### **3.1. Definicija komunalnog otpada i njegov utjecaj na okoliš**

Komunalni otpad predstavlja otpad koji uključuje kruti otpad iz stambenih područja, uključujući kućni, industrijski i obrtnički otpad, ali i vrtni i tržišni otpad, otpad od dijelova, građevinski otpad i otpad od pročišćavanja komunalnih otpadnih voda, a za njegovo su zbrinjavanje uglavnom odgovorna komunalna poduzeća. Nepravilno zbrinjavanje ovog otpada može uzrokovati izravnu štetu ljudskom zdravlju kroz nekontrolirane fermentacije koje potiču rast štetnih bakterija kao i insekata, glodavaca i nekih vrsta ptica koje postaju prijenosnici bolesti.

Temeljne mjere gospodarenja otpadom uključuju odvojeno prikupljanje pojedinih frakcija komunalnog otpada koje se mogu reciklirati na mjestu nastajanja, poput papira, kartona, metala, stakla, plastike i organskog dijela otpada. Također je potrebno uvesti mjere koje promiču smanjenje nastajanja otpada, kao što su npr. poticaji za smanjenje količine otpada, naknade za njegovo zbrinjavanje, kućno kompostiranje, izgradnja sortirnica i informatička podrška za praćenje tokova otpada.

Infrastruktura za gospodarenje komunalnim otpadom u Hrvatskoj pokriva veliku većinu stanovništva, ali još uvijek nema dovoljan broj centara za gospodarenje otpadom opremljenih potrebnim sustavima za obradu i zbrinjavanje. Gospodarski razvoj, izražen kroz bruto domaći proizvod (BDP), izravno utječe na nastalu količinu komunalnog otpada, pri čemu se svaka promjena BDP-a odražava na promjenu količine otpada. Demografske promjene uključuju blagi pad broja stanovnika, dok se povećanje potrošnje može odraziti na povećanje proizvodnje komunalnog otpada.

Očekuje se da će dodatni čimbenici poput urbanizacije, starenja stanovništva i migracija te zakonske regulative dovesti do smanjenja nastale količine komunalnog otpada po stanovniku u Republici Hrvatskoj. Turizam kao važna grana sa specifičnom količinom otpada od 1,4 kg po noćenju i očekivanim porastom broja noćenja dodatno utječe na nastajanje većih količina miješanog komunalnog otpada. Demografski raspored stanovništva, pretežito u urbanim područjima i manjim dijelom u ruralnim područjima, zajedno s onima koji žive na otocima, ključni su u planiranju i provedbi strategije gospodarenja otpadom.

Kategorizacija komunalnog otpada prikazana je u tablici 3.1 u nastavku kako bi se detaljnije definirali glavni izvori velikih nastalih količina komunalnog otpada [6].

Tablica 3.1 Podjela komunalnog otpada po porijeklu i vrsti

PORIJEKLO	AKTIVNOST	VRSTA OTPADA
Domaćinstva	Stanovanje	Hrana, papir, karton, staklo, metali, prašina, pepeo, komadni kućanski otpad, opasni kućanski otpad (baterije), "štedne" žarulje
Komercijalna djelatnost	Trgovine, restorani, marketi, uredi, hoteli, moteli, institucije	Hrana, papir, karton, staklo, metali, komadni otpad, opasni otpad.
Industrija	Prerada, proizvodnja, rafinerije, kemijska postrojenja, rudnici, proizvodnja energije	Industrijski otpad, metali, plastika, uljni otpad, razni opasni otpad
Građevinarstvo	Gradnja	Pijesak, beton, kamen, čelik, plastika, staklo, vegetacija.

### 3.2. Svojstva komunalnog otpada

Za uspješno upravljanje komunalnim otpadom, nužno je poznavati njegova glavna svojstva koja obuhvaćaju fizikalna, kemijska/energetska i biološka svojstva.

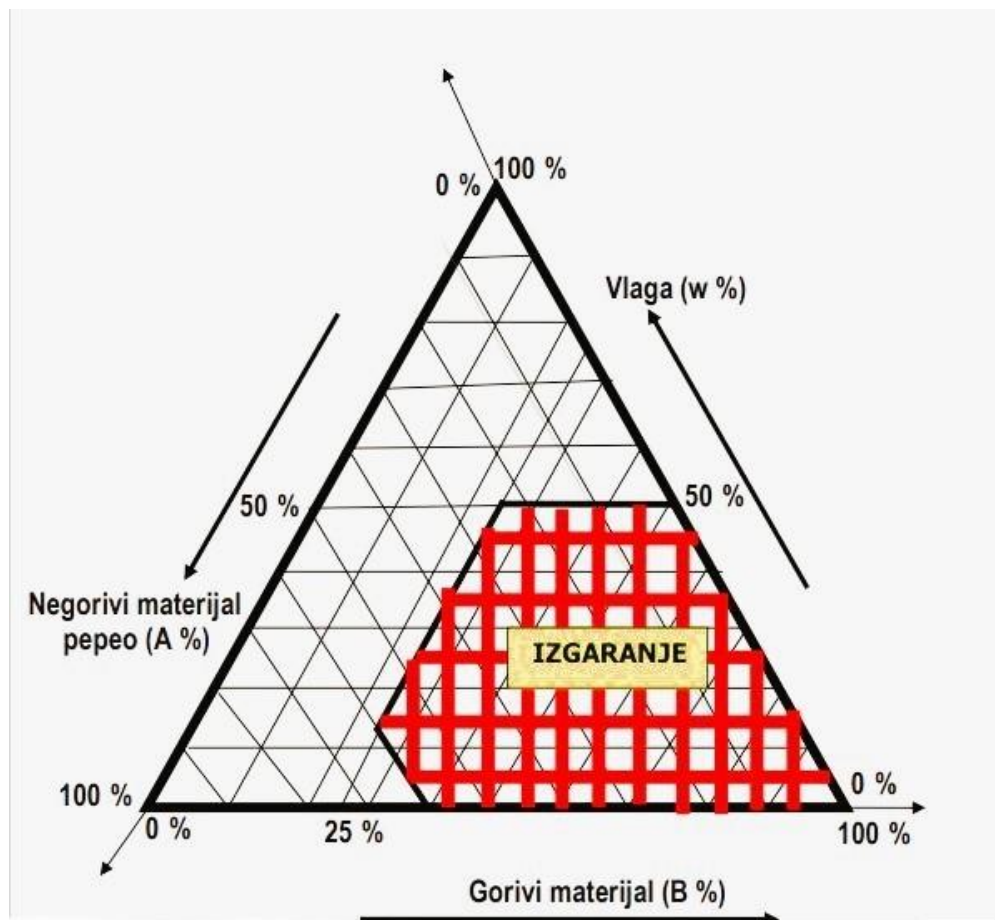
Fizikalna svojstva otpada uključuju gustoću, sadržaj vlage i veličinu čestica (statistička raspodjela veličine), a karakteristike odlagališta su kapacitet polja, hidrauličku propusnost i čvrstoća na smicanje. Gustoća otpada ovisi o njegovom sastavu, sadržaju vlage i stupnju zbijenosti otpada. Sadržaj vlage ima važnu ulogu u određivanju ogrjevne vrijednosti otpada, veličine odlagališta i kapacitet reaktora za anaerobno kompostiranje ukoliko je odabrana strategija odlaganja otpada na odlagalištu otpada. Veličina čestica utječe na odabir i projektiranje djelova postrojenja za odlaganje, spaljivanje i biološku obradu otpada. Kapacitet polja odnosi se na maksimalni udio vlage koji rastresiti otpad može zadržati pod utjecajem gravitacije bez da se krene prelijevati, što je bitno za upravljanje procjednim vodama. Hidraulička propusnost tla na odlagalištu važna je za određivanje količine procjedne vode i ovisi o gustoći, vrsti i homogenosti otpada. Smična čvrstoća, koja ovisi o vlažnosti otpada, utječe na statičku stabilnost odlagališta.

Kemijska i energetska svojstva uključuju približan sastav otpada, kao što su npr. sadržaj vlage, udio volatilnih i negorivih sastojaka i udio ugljika. Vlaga smanjuje iskoristivi dio ogrjevne vrijednosti otpada. Sadržaj ugljika i isparljivih tvari povećava ogrjevnu vrijednost otpada i utječe na sastav i

količinu produkata izgaranja. Analiza kemijskih elemenata, uključujući sadržaj ugljika, vodika, kisika, sumpora, dušika, vlage i pepela, potrebna je za točno određivanje ogrjevne vrijednosti.

Donja ogrjevna vrijednost odnosi se na količinu topline koja se oslobađa kada 1 kg otpadnog materijala potpuno izgara bez kondenzacije vodene pare u plinovima izgaranja. Gornja ogrjevna vrijednost uključuje toplinu oslobođenu izgaranjem kao i latentnu toplinu kondenzacije vodene pare, čime se dobiva cjelokupniji pregled energetskeg potencijala otpada.

Za razumijevanje izgaranja ključan je Tannerov trokut izgaranja prikazan na slici 3.2.1. U nastavku su navedeni uvjeti potrebni za spaljivanje otpada bez dodatnog goriva [6].



Slika 3.2.1 Tannerov trokut izgaranja

Prema slici 3.2.1 iznad [6], otpadni materijal može samostalno izgarati ako je sadržaj vlage manji od 50%, udio ne-gorivih dijelova (pepela) manji od 60% i sadržaj gorivih dijelova veći od 25%. Tannerov trokut služi kao smjernica za određivanje sposobnosti otpada za efikasno izgaranje, što je ključno za procese pretvorbe otpada u iskoristivu električnu i/ili toplinsku energiju.

Biološka svojstva komunalnog otpada presudna su za odabir tehnologije biološke obrade, bilo u aerobnim ili anaerobnim uvjetima. Komponente organskog otpada kao što su plastika, guma, koža i

drvo mogu biti nepovoljne za biološku pretvorbu zbog svojih komponenti kao što su masti, ulja, proteini, lignin i celuloza. Biološka prerada omogućuje izdvajanje korisnih proizvoda iz biorazgradivog dijela otpada ili za dobivanje deponijskog plina pomoću kojeg se može proizvoditi energija. Svaki od navedenih svojstava ima važnu ulogu u procesu gospodarenja otpadom, od odabira odgovarajuće tehnologije obrade do optimizacije procesa recikliranja i smanjenja utjecaja na okoliš.

### 3.3. Količine komunalnog otpada na otocima

Već je otprije poznato kako ukupne količine otpada u Hrvatskoj rastu prvenstveno zbog porasta broja noćenja u turističkoj sezoni te povećanih nastalih količina komunalnog otpada. To je pogotovo vidljivo u priobalnom području i na otocima. Za potrebe diplomskog rada koristili su se podaci o količinama komunalnog otpada na obližnjim otocima u primorsko-goranskoj županiji, odnosno Krku, Cresu i Malom Lošinju i Rabu. Tablica 3.3.1 ispod prikazuje ukupne količine nastalog komunalnog otpada na lokacijama predviđenim za sakupljanje otpada koje će se detaljnije obraditi [7].

*Tablica 3.3.1 Lokacijski raspored proizvedenih količina otpada*

LOKACIJA SAKUPLJANJA OTPADA	NASTALA KOLIČINA OTPADA (t/god)
Cres (Merag)	10430
Krk (Valbiska)	18268
Rab (Lopar)	5711
<b>UKUPNO (t/god)</b>	<b>34409</b>

Iz tablice 3.3.1. vidljivo je da se najveće količine otpada generiraju na otoku Krku, što je pogodno za potrebe ove analize budući da bi predviđena ruta idejnog plovila, odnosno broda polazile iz pristaništa Rijeka u pristanište Valbiska. Za početak analize najvažnije su inicijalne količine otpada na temelju kojih se utvrđuje količina otpada koja će se reciklirati, odvajati i balirati, kao i količina otpada koja će se koristiti u plazma postrojenju za uplinjavanje komunalnog otpada te proizvodnju goriva u obliku sintetskog plina.

Svaki od navedenih otoka ima specifične sustave i strategije gospodarenja otpadom, pa se na svakom mjestu prikuplja, odvaja te reciklira određena količina komunalnog otpada, tj. frakcije kao što su papir i karton, staklo, plastika, metal, glomazni otpad, tekstil i organski otpad. Ideja je prikupiti svaku frakciju pojedinačno. Iz tog razloga, tablica 3.3.2 u nastavku prikazuje ukupan broj frakcija prikupljenih pojedinačno. Tablica 3.3.2 također prikazuje izračun svih frakcija komunalnog otpada koje su uzete u obzir prilikom izrade rada zbog daljnjeg proračuna i analize.

Tablica 3.3.2 Količine pojedinačnih frakcija otpada

Lokacija otpada	Papir (t/god)	Plastika (t/god)	Staklo (t/god)	Metal (t/god)	Glomazni otpad (t/god)	Tekstil (t/god)	Biootpad (t/god)	UKUPNO (t/god)
<b>Cres + Mali Lošinj (Merag)</b>	586	84	360	26	1184	1	2489	<b>4730</b>
<b>Krk (Valbiska)</b>	2203	747	265	39	2587	0	5074	<b>10915</b>
<b>Rab (Lopar)</b>	461	339	273	16	1147	8	209	<b>2454</b>

Iako se svaka od ovih frakcija sakuplja i reciklira zasebno, u komunalnom otpadu nalazi se svaka od navedenih frakcija u određenim količinama odnosno postotcima. Tablica 3.3.2 je prikaz ukupno recikliranog otpada po otocima što ne obuhvaća količinu otpada koja odlazi na reciklažna dvorišta kao i na količinu otpada koja nije reciklirana. Sažetak navedenih podataka i prikaz izračunate ukupne količine miješanog komunalnog otpada dan u tablici 3.3.3 [7].

Tablica 3.3.3 Prikaz količina miješanog komunalnog otpada

LOKACIJA SAKUPLJANJA OTPADA	NASTALA KOLIČINA OTPADA (t/god)	RECIKLIRANA KOLIČINA OTPADA (t/god)	MIJEŠANI OTPAD (t/god)
Cres (Merag)	10430	4730	5700
Krk (Valbiska)	18268	10915	7353
Rab (Lopar)	5711	2454	3257
<b>UKUPNO (t/god)</b>	<b>34409</b>	<b>18098</b>	<b>16311</b>

Također, potrebno je utvrditi količinu otpada koja se dovozi u lokalna reciklažna dvorišta svakog od navedenih otoka, budući da svaki od navedenih otoka ima jedan ili više reciklažnih centara. Zato su ispod u tablici 3.3.4 prikazane i količine koje otpadaju na lokalna reciklažna dvorišta, količinu otpada koja nije reciklirana i ostatnu količinu otpada koja se na kraju odvodi lokalne deponije ili Mariščinu, centar za gospodarenje otpadom u Primorsko - goranskoj županiji [7].

Tablica 3.3.4 Prikaz količina miješanog komunalnog otpada

LOKACIJA SAKUPLJANJA OTPADA	MIJEŠANI OTPAD (t/god)	RECIKLAŽNA DVORIŠTA (t/god)	LOKALNI DEPONIJ ILI MARIŠČINA (t/god)
Cres (Merag)	5700	913	4787
Krk (Valbiska)	7353	2072	5281
Rab (Lopar)	3257	271	2986
<b>UKUPNO (t/god)</b>	<b>16311</b>	<b>3256</b>	<b>13054</b>

Budući da je ideja plovila za sakupljanje otpada prikupiti ukupnu količinu prethodno obrađenog, miješanog komunalnog otpada koji je trebao biti saniran na lokalnim odlagalištima ili dovezen u Mariščinu na daljnju obradu, u tablici 3.3.4 izračunata je ukupna količina miješanog komunalnog

otpada umanjena za količinu otpada odvezenu u reciklažne centre. Ova količina otpada zapravo predstavlja količinu otpada koja bi se ukrcala na brod u razdoblju od jedne godine. Reciklažni centri predstavljaju zadovoljavajući način zbrinjavanja otpada te nebi imalo smisla sakupljati određenu količinu otpada koja je zbrinuta na odgovarajući način.

### 3.3.1. Raspodjela nastajanja otpada po mjesecima

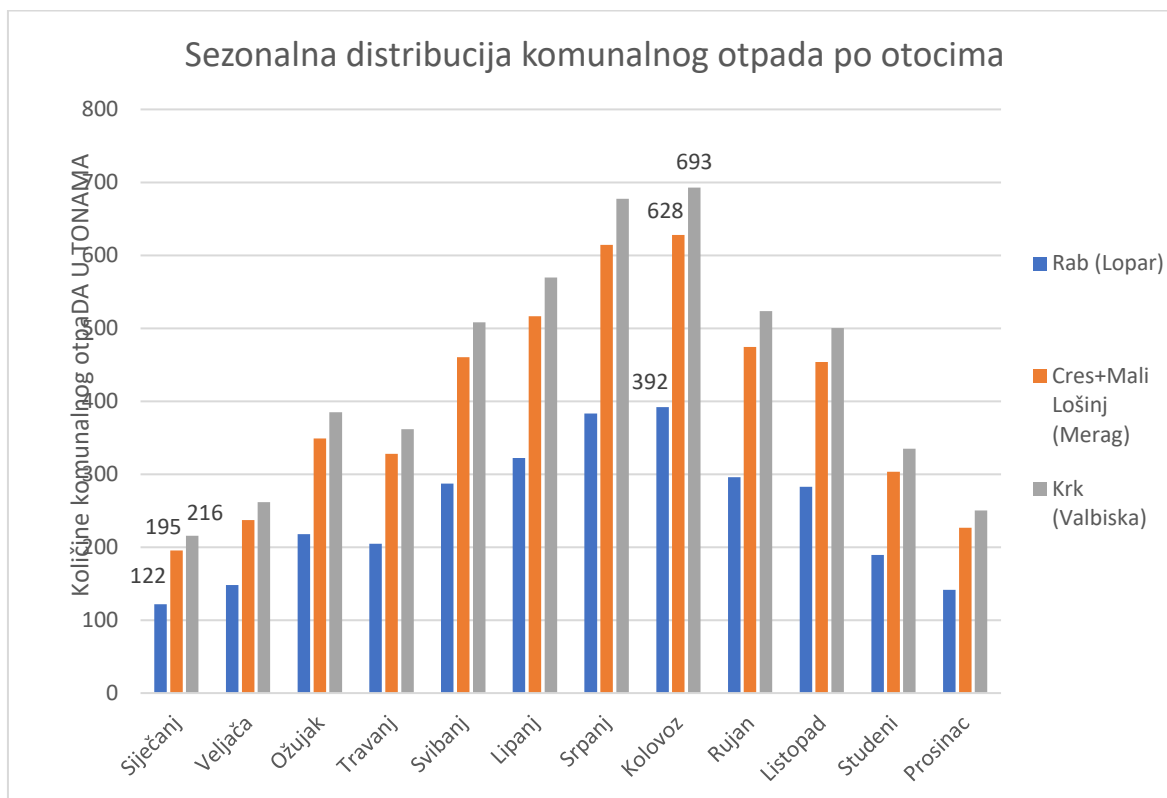
Nakon što je prikazan proračun ukupne količine miješanog komunalnog otpada koju bi idejni plovni objekt, odnosno brod obrađivalo, potrebno je provesti analizu za prikaz raspodjele prikupljenih količina miješanog komunalnog otpada po mjesecima tijekom razdoblja od jedne godine. U tablici 3.3.1.1 prikazane su ukupne nastale količine otpada na mjesečnoj razini za promatrane otoke, uz napomenu da se pod pristaništem Merag podrazumijevaju otoci Cres i Mali Lošinj. Podaci prikazani unutar tablice odnose se na količine otpada koje bi inače završile na lokalnim deponijima na otocima ili na ŽCGO Marišćini. Ova tablica omogućuje bolje razumijevanje sezonskih varijacija nastajanja komunalnog otpada, što je ključno za planiranje kapaciteta sortirnice, plazma postrojenja i optimizacije procesa odvoza [7].

*Tablica 3.3.1.1 Mjesečne količine miješanog komunalnog otpada*

	Rab (Lopar)	Cres (Merag)	Krk (Valbiska)	Ukupno
<b>Siječanj (t/god)</b>	122	195	216	<b>533</b>
<b>Veljača (t/god)</b>	148	237	262	<b>647</b>
<b>Ožujak (t/god)</b>	218	349	385	<b>951</b>
<b>Travanj (t/god)</b>	205	328	362	<b>894</b>
<b>Svibanj (t/god)</b>	287	461	508	<b>1256</b>
<b>Lipanj (t/god)</b>	322	516	570	<b>1408</b>
<b>Srpanj (t/god)</b>	383	614	677	<b>1675</b>
<b>Kolovoz (t/god)</b>	392	628	693	<b>1713</b>
<b>Rujan (t/god)</b>	296	475	523	<b>1294</b>
<b>Listopad (t/god)</b>	283	454	500	<b>1237</b>
<b>Studeni (t/god)</b>	189	304	335	<b>828</b>
<b>Prosinac (t/god)</b>	141	227	250	<b>618</b>
<b>Ukupno (t/god)</b>	<b>2986</b>	<b>4787</b>	<b>5281</b>	<b>13054</b>

Iz tablice 3.3.1.1 vidljivo je da je mjesec s najmanjom količinom otpada mjesec siječanj, dok je kolovoz mjesec s najvećom količinom otpada. To dovodi do zaključka da se brod za sakupljanje, obradu i uplinjavanje otpada mora projektirati za mjesece siječanj i kolovoz, Naime, potrebno je

provjeriti da li se u mjesecu siječnju, mjesecu u kojem je količina otpada najmanja, proizvede dovoljna količina električne i toplinske energije iz goriva dobivenog uplinjavanjem sakupljenog miješanog komunalnog otpada za rad svih postrojenja, sustava plovila i pogonskog motora. Radi boljeg prikaza, raspodjela količina miješanog otpada koje bi preuzelo idejno plovilo odnosno brod tijekom razdoblja od jedne godine prikazana je na slici 3.3.1.1.



Slika 3.3.1.1 Sezonska dinamika komunalnog otpada na otocima

Slika 3.3.1.1 prikazuje distribuciju nastalog komunalnog otpada na mjesečnoj razini u razdoblju od jedne godine. Siječanj i kolovoz su dva mjeseca izabrana kao referentna za analizu i dimenzioniranje postrojenja za sortiranje, recikliranje i uplinjavanje otpada pošto je siječanj mjesec s najmanjom, a kolovoz mjesec s najvećom nastalom količinom komunalnog otpada.

### 3.4 Gospodarenje otpadom u PGŽ

Sustav gospodarenja otpadom na području Primorsko-goranske županije trebao bi uključivati tri ključne komponente: prikupljanje i odvajanje otpada direktno iz kućanstava na mjestu nastanka, uspostavu pretovarnih stanica i reciklažnih centara za privremeno skladištenje otpada te prihvata, te trajnu obradu i zbrinjavanje otpada u sklopu županijskog centra za gospodarenje otpadom (ŽCGO) Marišćina. Za uspješnu implementaciju cjelovitog sustava za obradu neopasnog komunalnog otpada ključno je bilo osigurati sljedeće: radne zone i odlagališta na lokaciji Marišćina, postrojenja za

mehaničku i biološku obradu nerazvrstanog komunalnog otpada te pet pretovarnih stanica raspoređenih po županiji (Cres, Krk, Rab, Novi Vinodolski i Delnice). Kao što je navedeno, svi otoci spomenuti u ovom projektu već imaju pretovarne stanice što je pogodna okolnost za sakupljanje miješanog komunalnog otpada s otoka.

Gospodarenje otpadom u Primorsko-goranskoj županiji temelji se na načelima zaštite okoliša utvrđenim zakonima o zaštiti okoliša, zakonima Europske unije, načelima međunarodnog prava zaštite okoliša, svjetskoj praksi i standardima struke. Glavni cilj je osigurati kvalitetno i ekonomski učinkovito prikupljanje komunalnog otpada uz izbjegavanje velikih troškova u skladu s načelima održivog razvoja i zaštite okoliša. To uključuje i selektivno prikupljanje miješanog komunalnog otpada iz kućanstava i drugih izvora. Komunalni otpad, opasni komunalni otpad i glomazni otpad imaju važnu ulogu u procesu gospodarenja otpadom, od odabira odgovarajuće tehnologije obrade do optimizacije procesa recikliranja i smanjenja utjecaja na okoliš. Također je bitna kupnja spremnika za odvojeno prikupljanje otpada na razini gradova i naselja: plavi za papir, narančasti za višeslojnu ili tetra ambalažu i zeleni za staklo te spremnici za miješani i biorazgradivi otpad.

U Primorsko-goranskoj županiji 28 tvrtki i komunalnih društava dobilo je dozvole za prikupljanje komunalnog i neopasnog otpada. Osim toga, sedam tvrtki i jedna djelatnost ovlaštene su za prodaju opasnog otpada. Razina pokrivenosti kućanstava uslugama prikupljanja komunalnog otpada u primorsko-goranskoj županiji je između 95% i 100% u većini područja. Ovlaštena komunalna poduzeća u županiji kontinuirano unapređuju svoju opremu i osposobljavaju svoje djelatnike za učinkovito prikupljanje komunalnog otpada.

Gradovi i općine u goranskom dijelu županije proizvode znatno manje komunalnog otpada u odnosu na prosjek Republike Hrvatske, kao i u priobalnom dijelu županije, čemu je pridonijela manja posjećenost turista. Među gradovima, Vrbovsko stvara najmanju količinu otpada po stanovniku, dok je Lopar, a potom Mali Lošinj, na prvom mjestu zbog velikog broja turista. Sveukupno, Primorsko-goranska županija proizvodi više komunalnog otpada od prosjeka cijele Republike Hrvatske. Središnja točka sustava gospodarenja otpadom u županiji je Županijski centar za gospodarenje otpadom Marišćina, prvi takve vrste u Republici Hrvatskoj [8], [9], [10].

### **3.5 ŽCGO Marišćina**

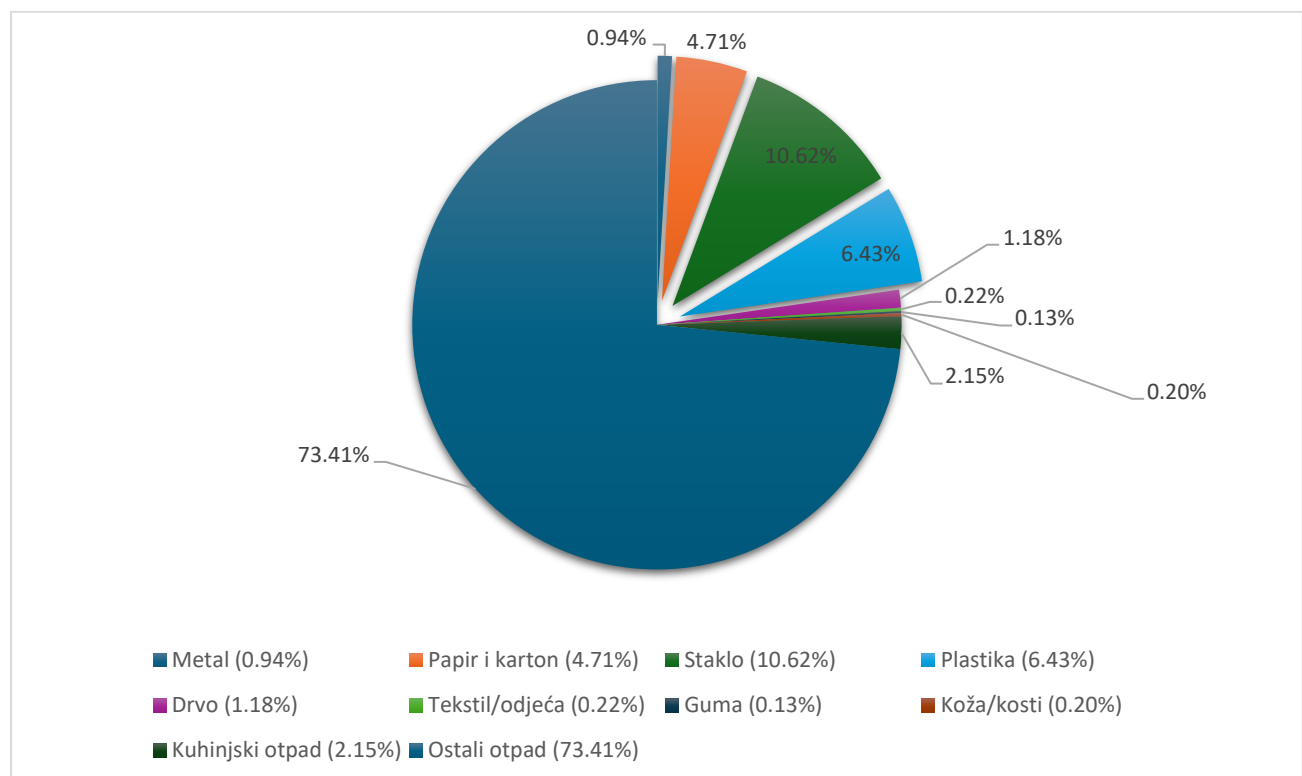
Županijski centar za gospodarenje otpadom Marišćina važan je dio strategije gospodarenja otpadom u Primorsko-goranskoj županiji. Temelji se na načelu smanjenja proizvodnje otpada na izvoru, recikliranja i energetskog korištenja otpadnih materijala te sigurnog i reguliranog zbrinjavanja preostalog komunalnog otpada u skladu s nacionalnim i EU propisima. Uključen je i pogon za



mehaničku preradu, stanica za biološku obradu i pretovarne stanice na ranije navedenim strateškim lokacijama.

ŽCGO Mariščina podijeljen je na nekoliko segmenata, uključujući prihvatno-otpremne zone, obradu i zbrinjavanje otpada te radne površine, a prostire se na cca 42,5 ha. S radnom površinom od približno 5,5 ha, područjem za odlaganje otpada od 21 ha, zaštitnim zelenim i protupožarnim pojasevima te internim prometnicama, kapacitet centra je projektiran da zadovolji potrebe županije do 2040. godine. ŽCGO Mariščina opremljen je za obradu kako sortiranog, tako i nesortiranog otpada, s ciljem maksimalnog smanjenja organskog sadržaja u preostalom otpadu koji se odlaže, ciljajući na smanjenje volumena odloženog otpada na ispod 35% ukupne mase. Sustav također uključuje napredne tehnike za obradu tekućih i plinovitih nusproizvoda nastalih tijekom procesa obrade te mogućnost obrade neopasnog industrijskog otpada. Slijedeći IVO metodologiju (izbjegavanje, valorizacija, odlaganje), Mariščina naglašava važnost primarne selekcije za recikliranje i uporabu materijala poput papira, stakla, plastike i metala, dok se ostali otpad podvrgava daljnjoj obradi i sigurnom zbrinjavanju.

Napori za smanjenje rizika povezanih s otpadom već su u tijeku. To se odvija kroz sanacije postojećih odlagališta širom županije, te uz planove za dodatno poboljšanje putem proizvodnje goriva iz prethodno procesiranog otpada. Također, otvaraju se nova radna mjesta vezana uz postrojenja za gospodarenje otpadom. Prosječni sastav pojedinih frakcija komunalnog otpada izračunata u postocima je prikazana na slici 3.4.1 [9], [10].



### *Slika 3.4.1 Pojedine frakcije komunalnog otpada na ŽCGO Marišćina*

Prosječni sastav pojedinih frakcija komunalnog otpada na Marišćini će se koristiti za proračun tjednih i dnevnih količina pojedinih frakcija komunalnog otpada na spomenutim otocima. Pri tome vrijedi pretpostavka da prosječni sastav komunalnog otpada na Marišćini odgovara prosječnom sastavu komunalnog otpada na pojedinim otocima. Prije prikaza tjednih i dnevnih nastalih količina otpada reći će se malo više o samoj obradi otpada u županijskom centru za gospodarenje otpadom (ŽCGO) Marišćina, pošto bi se na idejnom plovnom objektu koristio sličan sustav obrade otpada.

#### **3.6 Tok obrade otpada na ŽCGO Marišćina**

Prije detaljnijeg opisa procesa u županijskom centru za gospodarenje otpadom (ŽCGO) Marišćina, važno je spomenuti i postrojenje za obradu i iskorištavanje deponijskog bioplina koji nastaje aerobnom i anaerobnom digestijom komunalnog otpada te predstavlja bitan segment održivog gospodarenja komunalnim otpadom. Ovo postrojenje dijeli se na tri glavna dijela: plinsku stanicu, modul za proizvodnju električne energije te visokotemperaturnu baklju. U slučajevima kada bioplin ne bude imao dovoljnu ogrjevnu vrijednost za proizvodnju električne energije, bit će preusmjeren na visokotemperaturnu baklju za sigurno izgaranje. Visokotemperaturna baklja zajedno s plinskom stanicom smjestit će se odmah pored elektroenergetskog dijela postrojenja za proizvodnju električne energije iz bioplina, čime se zaokružuje ciklus iskorištavanja bioplina za proizvodnju električne energije.

Kada komunalni otpad stigne u županijski centar za gospodarenje otpadom, prvo slijedi pregledavanje, vaganje i evidentiranje. Zatim se otpad šalje u postrojenje namijenjeno za mehaničko-biološku obradu (MBO).

Ovaj proces obrade otpada započinje tako što se komunalni otpad istovaruje iz kamiona u predviđeni prostor unutar hale. Da bi se minimizirao gubitak topline i spriječilo širenje neugodnih mirisa, vrata hale brzo se otvaraju prije i zatvaraju nakon istovara otpada. Nakon toga, kranovi odnosno dizalize preuzimaju manipulaciju komunalnim otpadom i pod nadzorom iz kontrolne sobe ga prenose na daljnju obradu. Prva etapa obrade je mehanička predobrada koja uključuje razbijanje vrećica za komunalni otpad i prosijavanje. Cilj je otvoriti vrećice i odvojiti otpad po veličini pomoću rotacijskog sita, nakon čega se različite frakcije usmjeravaju dalje.

Nakon toga slijedi bio-sušenje, gdje se otpad raspoređuje u slojeve visine do šest metara. U ovom koraku, organski dio otpada podlozan je biološkoj razgradnji koja, uz pomoć procesa koji se odvija uz prisustvo vode, ugljika i dušika, te nastaje toplina. Nastala toplina se koristi za sušenje ostalog dijela otpada, čime se povećava njegova energetska vrijednost i smanjuje sadržaj vlage. Proces

biosušenja traje između 12 i 15 dana tijekom kojih se gubi oko 20 do 30% ukupne mase otpada zbog isparavanja vode.

Posljednji korak je mehaničko razdvajanje, gdje se iz osušenog otpada odvajaju korisne frakcije poput papira i kartona, stakla, metala i plastike. Ova faza uključuje niz uređaja koji otpad usitnjavaju, odvajaju po težini i veličini, te na kraju iz preostalog dijela miješanog komunalnog otpada proizvode bioplin. Otpad se prvo usitnjava, zatim se sitnijim frakcijama odvaja biološki obrađeni dio, dok se teži materijali poput metala odvoze za recikliranje.

Sve u svemu, proces u ŽCGO Marišćini je dobro osmišljeni niz koraka koji osigurava da se komunalni otpad što efikasnije obradi i iskoristi. Takav pristup ne samo da smanjuje količinu otpada koja završava na deponijima, već i povećava stopu recikliranja i oporabe materijala, što je važno za očuvanje okoliša [9], [10], [11].

## 4. PRORAČUN NASTALIH KOLIČINA MIJEŠANOG KOMUNALNOG OTPADA

### 4.1 Prikaz reciklabilnih frakcija u siječnju i kolovozu

Kako bi se odredila ukupna količina komunalnog otpada koja se odvodi u plazmu koriste se podaci iz proračuna mjesečnih količina nastalog komunalnog otpada kao i udjeli pojedinih frakcija izdvojenog komunalnog otpada u ŽGCO Marišćina. Sastav sitne frakcije komunalnog otpada u Marišćini predstavlja količine izdvojenih pojedinih frakcija miješanog komunalnog otpada [10]. Za proračune u tablicama 4.1.1 i 4.1.2 pretpostavlja se da bi se uspjelo izdvojiti jednake količine pojedinih frakcija otpada na temelju korištenja postrojenja identičnog onome koje se koristi u Marišćini.

*Tablica 4.1.1 Sastav otpada za plazmu u siječnju*

Vrsta KO	Otpad na CGO Marišćina	1 GODINA (t)	SIJEČANJ (t)
Metal	0.94%	122.7	5.0
Papir i karton	4.71%	614.9	25.1
Staklo	10.62%	1386.4	56.6
Plastika	6.43%	839.4	34.3
Ostali otpad	77.30%	10091.5	411.9
<b>Ukupno</b>	<b>100.00%</b>	<b>13054.9</b>	<b>532.9</b>

*Tablica 4.1.2 Sastav otpada za plazmu u kolovozu*

Vrsta KO	Otpad na CGO Marišćina	1 GODINA (t)	KOLOVOZ (t)
Metal	0.94%	122.7	16.1
Papir i karton	4.71%	614.9	80.7
Staklo	10.62%	1386.4	181.9
Plastika	6.43%	839.4	110.1
Ostali otpad	77.30%	10091.5	1324.0
<b>Ukupno</b>	<b>100.00%</b>	<b>13054.9</b>	<b>1712.7</b>

Kada se uspoređuju podatci prikazani u tablici 4.1.2, koji opisuju količine pojedinih frakcija komunalnog otpada (KO) za mjesec siječanj, s onima iz tablice 4.1.2, koja detaljno opisuje količine istih frakcija KO za mjesec kolovoz, primjećuju se značajne razlike u ukupnim količinama proizvedenog komunalnog otpada u tonama. Ove razlike jasno ukazuju na značajno povećanje količine proizvedenog otpada tijekom ljetnih mjeseci, što se može izravno povezati s povećanjem broja turista i turističkih aktivnosti na otocima Krk, Rab, Cres i Mali Lošinj. Također je bitno naglasiti

da većinu otpada čini ostali otpad koji predstavlja količinu otpada koja bi se obrađivala na idejnom plovilu.

Ovakav trend prikazuje uvećanu sezonsku dinamiku proizvodnje komunalnog otpada u navedenim obalnim i otočnim područjima te također naglašava važnost implementacije efikasnijih strategija upravljanja otpadom na otocima.

#### 4.2 Raspodjela pojedinih frakcija komunalnog otpada na otocima u siječnju

Kako je već prije spomenuto, siječanj i kolovoz su mjeseci koji će se uzeti kao referentni u smislu ukupnih nastalih količina komunalnog otpada. Prvo slijedi proračun količina recikliranih frakcija otpada koje bi idejno plovilo moglo obraditi na temelju ukupne proračunate količine komunalnog otpada za siječanj. Tablica 4.2.1 prikazuje ukupne nastale količine komunalnog otpada po otocima, prosječnu gustoću otpada, te ukupnu količinu nastalog komunalnog otpada u m<sup>3</sup> na tjednoj bazi kako bi se mogla odrediti učestalost sakupljanja i prijevoza otpada pomoću kamionskog prijevoza te količine izdvojenih odnosno recikliranih frakcija otpada pri čemu je ideja da se izdvajaju papir i karton, metal, plastika i staklo [10].

Tablica 4.2.1 Tjedne količine otpada za siječanj

	KOLIČINA OTPADA U SIJEČNJU (t)	KOLIČINA OTPADA NA TJEDNOJ BAZI (t)	GUSTOĆA OTPADA $\rho$ =0,35 (t/m <sup>3</sup> )	KOLIČINA OTPADA NA TJEDNOJ BAZI (m <sup>3</sup> )
Cres (Merag)	195.4	44.1	0.35	126.0
Krk (Valbiska)	215.6	48.7	0.35	139.0
Rab (Lopar)	121.9	27.5	0.35	78.6
<b>Ukupno</b>	<b>532.8</b>	<b>120.3</b>		<b>343.7</b>

Nakon prikaza proračunatih vrijednosti ukupnih tjednih količina miješanog komunalnog otpada, koji zapravo predstavlja otpad koji bi se odvodio na idejno plovilo, prikazat će se tablica količina izdvojenih odnosno recikliranih frakcija otpada koje obuhvaćaju papir i karton, metal, plastika i staklo. U tablici 4.2.2 vidljive su proračunate količine pojedinih frakcija po pojedinim otocima na temelju prosječnog sastave sitne frakcije komunalnog otpada ŽCGO Marišćina [10].

Tablica 4.2.2 Količine pojedinih frakcija komunalnog otpada za siječanj

Vrsta KO	Otpad na ŽCGO Marišćina	Cres + Mali Lošinj (t/tjedan)	Krk (t/tjedan)	Rab (t/tjedan)	Ukupno (t/tjedan)
Metal	0.94%	0.4	0.5	0.3	1.1
Papir i karton	4.71%	2.1	2.3	1.3	5.7
Staklo	10.62%	4.7	5.2	2.9	12.8

Plastika	6.43%	2.8	3.1	1.8	7.7
Ostali otpad	77.30%	34.1	37.6	21.3	93.0
<b>Ukupno</b>	<b>100.00%</b>	<b>44.1</b>	<b>48.7</b>	<b>27.5</b>	<b>120.3</b>

Iz tablice 4.2.2 vidljivo je da je preostala količina komunalnog otpada zapravo količina otpada koja bi se odvodila u plazma sustav na uplinjavanje i proizvodnju plinovitog goriva. Vidljivo je da ostali otpad čini 77.30 % što je i očekivano pošto je ukupna nastala količina otpada prethodno reciklirana u lokalnim reciklažnim centrima i dvorištima.

Tablica 4.2.3 prikazuje proračunate količine nastalog komunalnog otpada u siječnju za jedan ciklus plovila odnosno broda za sakupljanje otpada koji traje 2 dana te će se dalje koristiti kod proračuna proizvedene količine električne energije [10], [12].

Tablica 4.2.3 Količine komunalnog otpada za dvodnevni ciklus broda u siječnju

Lokacija sakupljanja	Količina KO po danu (t)	Nastali KO u jednom ciklusu vožnje brod (t)
Cres (Merag)	6,3	34,4
Krk (Valbiska)	7,0	
Rab (Lopar)	3,9	

### 4.3 Raspodjela pojedinih frakcija komunalnog otpada na otocima u kolovozu

Nakon proračuna količina pojedinih reciklabilnih frakcija i ostatnog dijela komunalnog otpada za siječanj, slijedi identični proračun recikliranih količina pojedinih frakcija komunalnog otpada za kolovoz. Količine otpada u kolovozu najveće su za sve promatrane otoke te je već prije spomenuto kako se analiza provodi za mjesec s najvećom i mjesec s najmanjom količinom otpada. Tablica 4.3.1 također prikazuje ukupne nastale količine komunalnog otpada po otocima, prosječnu gustoću otpada, te ukupnu količinu nastalog komunalnog otpada u m<sup>3</sup> na tjednoj bazi kako bi se mogla odrediti učestalost sakupljanja i prijevoza otpada pomoću kamionskog prijevoza te količine izdvojenih odnosno recikliranih frakcija otpada za mjesec kolovoz.

Tablica 4.3.1 Tjedne količine otpada za kolovoz

	KOLIČINA OTPADA U KOLOVOZU (t)	KOLIČINA OTPADA NA TJEDNOJ BAZI (t)	GUSTOĆA OTPADA $\rho = 0,35$ (t/m <sup>3</sup> )	KOLIČINA OTPADA NA TJEDNOJ BAZI (m <sup>3</sup> )
Cres (Merag)	628.1	141.8	0.35	405.1
Krk (Valbiska)	692.8	156.4	0.35	446.9
Rab (Lopar)	391.8	88.4	0.35	252.7
<b>UKUPNO</b>	<b>1712.7</b>	<b>386.6</b>		<b>1104.6</b>

Za detaljniji prikaz raspodjele pojedinih reciklabilnih frakcija komunalnog otpada u kolovozu na tjednoj razini po pojedinim otocima, dana je tablica 4.3.2 ispod pri čemu ostali otpad predstavlja otpad koji bi se odvodio u plazma sustav za uplinjavanje.

*Tablica 4.3.2 Količine pojedinih frakcija komunalnog otpada za kolovoz*

Vrsta KO	Otpad na CGO Marišćina	Cres + Mali Lošinj (t/tjedan)	Krk (t/tjedan)	Rab (t/tjedan)	Ukupno (t/tjedan)
Metal	0.94%	1.3	1.5	0.8	3.6
Papir i karton	4.71%	6.7	7.4	4.2	18.2
Staklo	10.62%	15.1	16.6	9.4	41.1
Plastika	6.43%	9.1	10.1	5.7	24.9
Ostali otpad	77.30%	109.6	120.9	68.4	298.9
<b>Ukupno</b>	<b>100.00%</b>	<b>141.8</b>	<b>156.4</b>	<b>88.4</b>	<b>386.6</b>

Prikazane tjedne količine pojedinih frakcija komunalnog otpada su bitne kako bi se mogao odrediti kamionski raspored odvoza komunalnog otpada prema pretovarnim stanicama koje bi se koristile za skladištenje i manipulaciju otpada između otoka i idejnog plovila odnosno broda.

Tablica 4.3.3 prikazuje izračunate količine nastalog komunalnog otpada u kolovozu za jedan dvodnevni ciklus plovidbe broda za sakupljanje otpada, koje će se dalje koristiti za proračun proizvedene količine električne energije [10], [12].

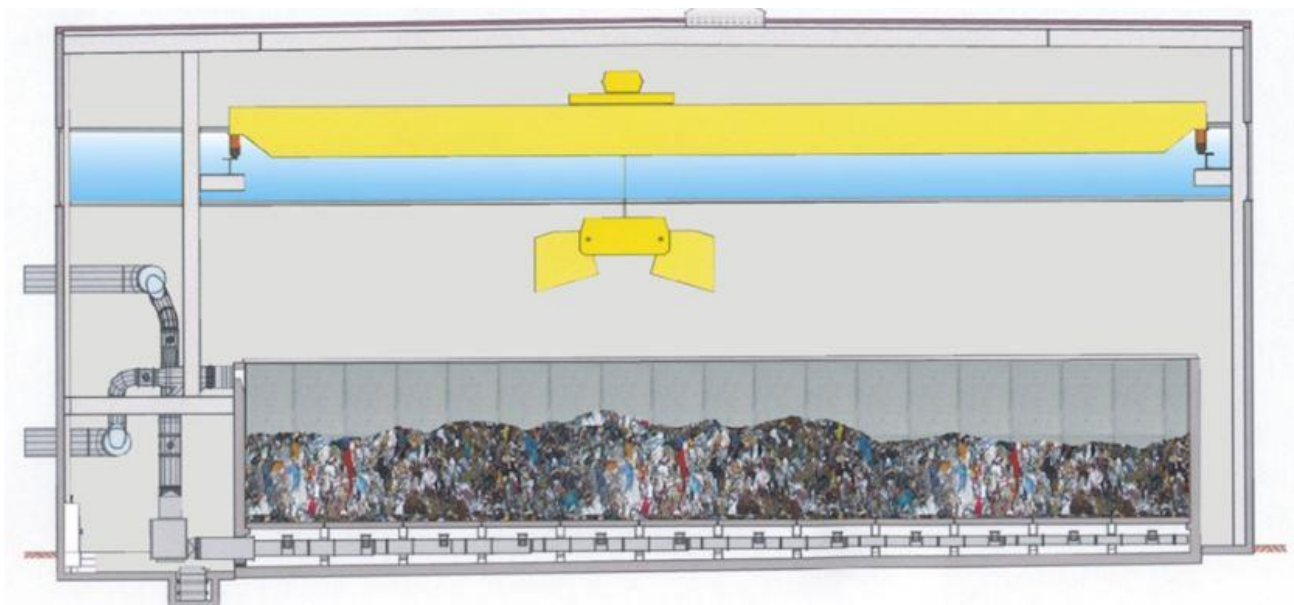
*Tablica 4.3.3 Količine komunalnog otpada za dvodnevni ciklus broda u kolovozu*

Lokacija sakupljanja	Količina KO po danu (t)	Nastali KO u jednom ciklusu plovidbe broda (t)
<b>Cres (Merag)</b>	20,3	110,4
<b>Krk (Valbiska)</b>	22,3	
<b>Rab (Lopar)</b>	12,6	

## 5. SUSTAV ZA PRIKUPLJANJE, OBRADU I SORTIRANJE MIJEŠANOG OTPADA

### 5.1 Biosušenje

Biosušenje je postupak mehaničko-biološke obrade otpada, koji omogućava djelomičnu stabilizaciju i sušenje komunalnog otpada, koristeći aerobnu razgradnju za smanjenje udjela vlage. Ovaj proces se koristi kako bi se komunalni otpad djelomično stabilizirao i osušio, čime se olakšava njegova mehanička obrada i odvajanje pojedinih frakcija komunalnog otpada i poboljšava potencijal za termičku obradu uklanjanjem suvišne vlage. Za razliku od kompostiranja, biosušenje je energetski učinkovitije te se često koristi za proizvodnju krutog goriva iz otpada kao glavnog produkta. Komora za biosušenje sa svojim glavnim djelovima je prikazana na slici 5.1.1 ispod [14].



*Slika 5.1.1 Komora za biosušenje komunalnog otpada*

Tijekom procesa biosušenja, udio vlage u komunalnom otpadu se smanjuje pomoću topline nastale tijekom aerobne razgradnje, pri čemu voda isparava. Osnovni mehanizam sušenja je konvektivna evaporacija, gdje se toplina dobivena aerobnom razgradnjom komponenata komunalnog otpada širi po prostoru, te se određeni dio gubi zbog uvjeta okoline. Metoda sušenja komunalnog otpada razvijena je u različitim granama industrije, uključujući poljoprivredu, farmaciju, prehrambenu industriju i industriju papira.

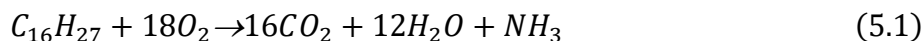
U procesu biosušenja, otpad se slaže u naslage visine 5 do 6 metara, ovisno o sadržaju otpada. Organska komponenta komunalnog otpada može se razgraditi aerobno ili anaerobno.

Lako razgradivi dio aerobno oksidira, te se oslobođena toplinska energija koristi ne samo za sušenje tzv. gorivih frakcija otpada, već i za uklanjanje neželjenih bakterija. Temperatura od oko 50 - 60 °C,



postignuta biološkim procesom razgradnje organske tvari, omogućuje inertiranje i dezinfekciju biorazgradivih organskih tvari sadržanih u komunalnom otpadu. Time se smanjuje sadržaj vlage u komunalnom otpadu, povećava se njegova ogrjevna vrijednost i povećava se učinkovitost tijekom izgaranja i kvaliteta daljnje obrade. Kao rezultat procesa stabilizacije, 20-30% ulazne mase komunalnog otpada gubi se u obliku isparene vode, što dodatno potvrđuje učinkovitost metode sušenja komunalnog otpada [13].

Biosušenje se može opisati sljedećom formulom:



gdje je:

$C_{16}H_{27}$  – biorazgradiva supstanca

Za razgradnju deset kilograma biorazgradive materije potrebno je upotrijebiti 16 kg  $O_2$ . Kroz ovaj proces oslobađa se približno 220000 kJ energije u formi topline. Dodatni produkti koji nastaju tijekom razgradnje uključuju 19 kg  $CO_2$ , 6 kg  $H_2O$  i 0,4 kg  $NH_3$ .

Kako je prethodno navedeno, pretpostavljeno je da mješani komunalni otpad sadrži oko 30% vlage. Uzimajući u obzir mogućnosti sušenja u kontejneru za sušenje ili pomoću osjetne topline koju plazma postrojenje proizvodi i higijenzaciju otpada te smanjenja vlage za oko 20%, za daljnje proračune se uzima u obzir mješani otpad sa ukupnim udjelom vlage od 10% što znači da je i ukupna masa miješanog komunalnog otpada umanjena za 20%. Tablice 5.1.1 i 5.1.2 prikazuju preostalu količinu miješanog komunalnog otpada nakon procesa biosušenja proračunat iz ukupnih količina otpada za siječanj i kolovoz.

Tablica 5.1.1 Osušeni otpad za plazma uplinjavanje u siječnju

Siječanj	Nereciklirani otpad (t/mjesec)	Otpad za plazmu s 30% vlažnosti	Osušeni otpad za plazmu s 10% vlažnosti (t/mjesec)	Dnevna količina otpada za plazmu (t)	Količina otpada za plazmu nakon jednog ciklusa (t)
Cres (Merag)	195.40	151.05	120.84	3.90	7.80
Krk (Valbiska)	215.55	166.63	133.30	4.30	8.60
Rab (Lopar)	121.88	94.22	75.37	2.43	4.86
<b>Ukupno</b>	<b>532.83</b>	<b>411.90</b>	<b>329.52</b>	<b>10.63</b>	<b>21.26</b>

Tablica 5.1.2 Osušeni otpad za plazma uplinjavanje u kolovozu

Kolovoz	Nereciklirani otpad (t/mjeseć)	Otpad za plazmu s 30% vlažnosti	Osušeni otpad za plazmu s 10% vlažnosti (t/mjeseć)	Dnevna količina otpada za plazmu (t)	Količina otpada za plazmu nakon jednog ciklusa (t)
Cres (Merag)	628.08	485.53	388.42	12.53	25.06
Krk (Valbiska)	692.84	535.59	428.47	13.82	27.64
Rab (Lopar)	391.76	302.84	242.27	7.82	15.63
<b>Ukupno</b>	<b>1712.68</b>	<b>1323.96</b>	<b>1059.17</b>	<b>34.17</b>	<b>68.33</b>

U tablicama 5.1.1 i 5.1.2 prikazane su ukupne mjesećne kolićine osušenog miješanog komunalnog otpada, prosjećne dnevne kolićine otpada kao i prosjećne kolićine otpada nastale tijekom jednog radnog ciklusa broda koji bi iznosio dva dana. U jednom radnom ciklusu, brod mora sakupiti cjelokupnu kolićinu miješanog komunalnog otpada koji nastaje u dva dana na svim spomenutim lokacijama, obraditi ga i proizvesti gorivo pomoću plazma sustava za uplinjavanje. Osušeni komunalni otpad će se prvo odvoditi u sortirnicu otpada na brodu gdje će se pokušati izdvojiti što veće kolićine reciklabilnih frakcija te će zatim proći kroz sustav za uplinjavanje otpada gdje će se proizvesti plinovito gorivo za pogon motora i proizvodnju elektrićne i toplinske energije [13].

## 5.2 Pretovarne stanice

Pretovarna stanica je građevina koja služi za privremeno skladištenje komunalnog otpada. U pretovarnoj stanici sakuplja se komunalni otpad prikupljen manjim kamionskim vozilima, te se potom pretovaruje u veće kontejnere ili kamione za transport do konaćne destinacije. Cilj ove operacije je smanjiti troškove i vrijeme potrebno za prijevoz otpada, olakšavajući posao lokalnim službama za sakupljanje otpada.

Za prebacivanje komunalnog otpada koristi se specijalizirana jama iz koje se otpad pomoću pokretnih traka prenosi u kamione s prikolicama. U tim prikolicama otpad se komprimira kako bi zauzeo manje prostora, odnosno kako bi stala što veća kolićina komunalnog otpada. Proces prijevoza zapoćinje se dovođenjem prazne prikolice ispod utovarne rampe, njenim punjenjem i odvozom do županijskog centra za gospodarenje otpadom. Priprema i završetak ovog postupka traje oko 15 minuta, dok je za prihvat i pretovar 20 tona otpada potrebno otprilike sat vremena, s time da pretovar traje 50 minuta na površini od 150 kvadratnih metara.

Prije početka pretovara, kamionska prikolica se pozicionira ispod utovarne rampe. Zatim, vozila koja su sakupila komunalni otpad s otoka dovode ga u pretovarnu stanicu, prilaze rampi stražnjim dijelom vozila, otvaraju stražnja vrata i istovaruju otpad na pokretnu traku. Otpad se preko trake transportira do lijevka koji ga usmjerava u prikolicu. Povremeno se pokretna traka zaustavlja, a potisna ploća

kontinuirano kompresira otpad po cijeloj duljini prikolice sve dok ne dođe u kontakt s prethodno zbijenim komunalnim otpadom. Kad se prikolica napuni, pokretna traka prestaje s radom. Tekućina koja iscuri iz otpada skuplja se u posebnom spremniku, a potom se pumpom vraća natrag u otpad, što je bitno za pravilno mjerenje količine otpada. Nakon što se prikolica napuni, potrebno ju je priključiti na tegljač za transport do odlagališta, a na rampu se postavlja druga prazna prikolica. Sve operacije može obaviti jedan radnik koristeći daljinsko upravljanje i kontrolnu ploču smještenu kraj pokretne trake, što omogućava nadzor nad cijelim procesom. Na slici 5.2.1 prikazano je idejno rješenje pretovarne stanice Zagvozd [15].

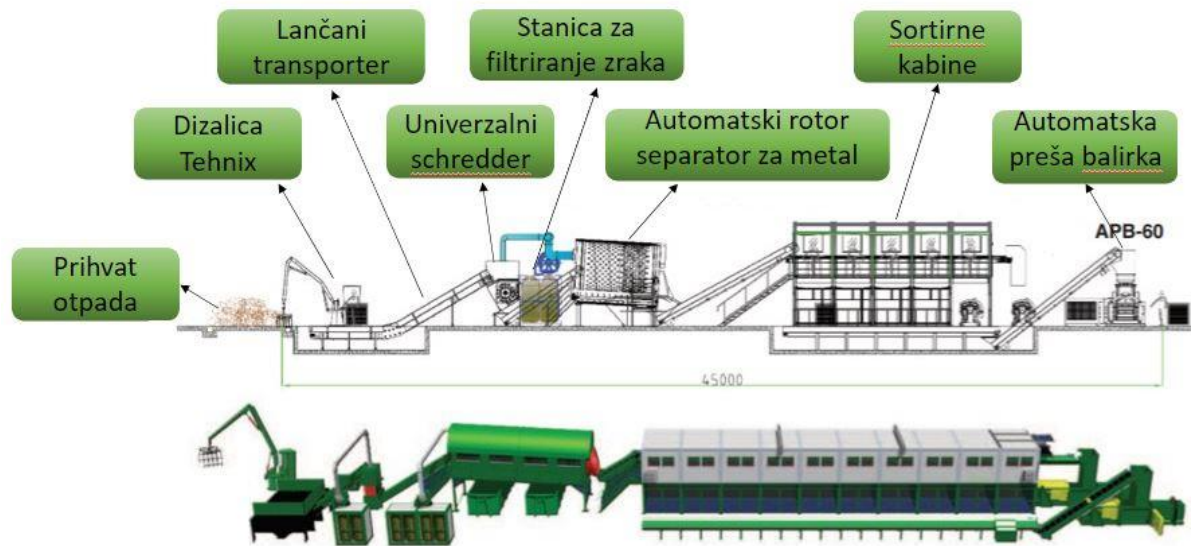


*Slika 5.2.1 Pretovarna stanica*

Proces prethodno opisane pretovarne stanice započeo bi sakupljanjem osušenog miješanog komunalnog otpada iz komora za biosušenje te punjenjem kamiona za prijevoz takvog otpada do pretovarnih stanica. Koristili bi se posebni preskontejneri koji bi skladištili osušeni komunalni otpad. Prednosti takvih kontejnera su sprječavanje širenja neugodnih mirisa, onemogućavanje kontaminacije i ispiranja voda, sprječavanje širenja zaraznih bolesti, blokiranje pristupa štetočinama poput glodavaca, zaštita od disperzije otpada vjetrom i ljudskom aktivnošću. Skladišteni otpad bi se potom pomoću kрана odnosno dizalize prenio na idejno plovilo na daljnju obradu. Ovakav sustav bi bilo moguće izvesti na trajektnim pristaništima zbog malene potrebne površine za pretovar (150 m<sup>2</sup>) i zbog neutralizacije neugodnih mirisa i štetnih utjecaja na okoliš ili na ljude koji posjećuju navedena trajektna pristaništa.

### 5.3. Sustav za sortiranje otpada na brodu

Na idejnom plovilu odnosno brodu koristio bi se sustav za sortiranje otpada kakav se koristi na ŽCGO Mariščina. Slika 5.3.1 prikazuje shematski prikaz linijske sortirnice otpada na kojemu su označene najvažnije faze obrade i sortiranja otpada [16].



Slika 5.3.1 Sortirnica tvrtke Tehnix d.o.o. [16]

Slika 5.3.1 iznad prikazuje sortirnicu komunalnog otpada sa sa strojevima i uređajima potrebnim za učinkovito odvajanje pojedinih frakcija komunalnog otpada kao što su papir i karton, staklo, plastika i metal. Na brodu za prikupljanje komunalnog otpada koristila bi se sortirnica otpada kao sa skice s kapacitetom od 3 t/h što je dovoljno za obradu najveće proračunate količine otpada u jednom ciklusu vožnje broda koja iznosi nešto više od 110 t, kako je i prikazano u tablici 4.3.3. U nastavku, opisani su pojedini podsustavi takve sortirnice otpada i njihove funkcije.

Dizalica ima ulogu prijenosa komunalnog otpada s mjesta njegovog prijema izravno na lančani transporter. Ovaj mehanizam je bitan jer omogućuje brzo i sigurno premještanje velikih količina otpada, čime se optimizira proces unutar postrojenja.

Lančani transporter koristi se u postrojenjima za sortiranje otpada za učinkovito premještanje različitih vrsta materijala. Njegov glavni cilj je transport komunalnog otpada kroz različite faze obrade unutar postrojenja. Lančani transporter koristi niz međusobno povezanih lančanih traka koje se kreću duž određene putanje za transport materijala, bilo da se radi o krutim tvarima, većem otpadu ili pakiranju. Ovi transporteri su izdržljivi i mogu učinkovito transportirati teške i abrazivne materijale, što ih čini idealnim za korištenje u industriji recikliranja i gospodarenja otpadom.

Univerzalna drobilica odnosno "schredder", dizajniran je za drobljenje odnosno usitnjavanje širokog spektra otpadnih materijala na manje komade. U kontekstu upravljanja otpadom, univerzalni shredderi su neophodni za obradu raznovrsnog otpada, uključujući elektronički otpad, metalni otpad, plastiku, drvo, papir i mnoge druge vrste materijala. Opremljeni su snažnim noževima ili čekićima koji mogu usitniti gotove sve materijale, čineći procese recikliranja ili odlaganja otpada lakšim. Ovi uređaji igraju ključnu ulogu u smanjenju volumena otpada, omogućujući lakše i učinkovitije sortiranje, recikliranje ili toplinsku obradu.

Filtarska stanica služi za pročišćavanje zraka i uklanjanje prašine i drugih onečišćujućih tvari iz atmosfere unutar postrojenja za obradu otpada. Razvrstavanjem, usitnjavanjem i drugim obradama otpada oslobađaju se čestice prašine i plinovi koji mogu biti štetni za radnike i okoliš. Filtarske stanice koriste filtere različitih vrsta i klasa, kao što su: vrećasti filtri ili ciklonski separatori kako bi se osiguralo da je zrak koji izlazi iz sustava čist i da zadovoljava ekološke standarde.

Automatski rotirajući separator je uređaj za sortiranje koji odvaja materijale različitih gustoća i veličina. Na primjer, može se koristiti za odvajanje lakših materijala kao što su papir i plastika od težih materijala kao što su metal i staklo. Učinkovitost ovog sustava omogućava točnije razvrstavanje komunalnog otpada, poboljšanje kvalitete izdvajanja reciklabilnih frakcija, odnosno povećanje postotka recikliranih frakcija i učinkovitost cjelokupnog procesa recikliranja.

Sortirne kabine su radni prostori dizajnirani za ručno sortiranje otpada. Radnici u sortirnim kabinama odvajaju frakcije koji se mogu reciklirati (poput papira, plastike, metala i stakla) od onih koji se ne mogu. Kabine su obično opremljene transportnim trakama koje dopremaju otpad do radnika, a dizajn kabine i sustavi za filtraciju zraka osiguravaju sigurno i zdravo radno okruženje, te nema potrebe za dodatnim mjerama zaštite radnika.

Automatske preše balirke komprimiraju reciklabilne frakcije (npr. papir i karton, plastika, staklo i metal) u čvrste bale koje se lako prenose. Baliranjem otpada smanjuje se volumen otpada, olakšava se skladištenje i transport te se poboljšava manipulacija otpada na brodu. Bale recikliranog materijala lako je transportirati do reciklažnih centara ili proizvođača koji ih koriste kao sirovinu.

### 5.3.1 Tok materijala u sortirnici otpada

Tok materijala kroz sortirnicu započinje dolaskom kamiona s mješanim komunalnim otpadom, gdje se otpad prvo vaganjem u kamionu bilježi prije istovara. Masa se evidentira, a komunalni otpad bi se zatim istovario na predviđeno mjesto za prijem na palubi. Dalje, grabilicom odnosno "kran-om" se komunalni otpad prenosi do kutnog lančanog transportera, koji ga vodi do sita opremljenog

mehanizmom za otvaranje vreća. Ovo sito ne samo da otvara vreće već i priprema otpad za sljedeći korak transporta. Tijekom tog postupka, iz kompaktnog sita se izdvaja prašina.

Nakon toga, komunalni otpad se pomoću kutnog lančanog transportera dovodi do rotacijskog separatora koji odvaja metalnu frakciju komunalnog otpada od ostatka otpada. Odvojena metalna frakcija komunalnog otpada potom se odvodi na baliranje. Ostatak miješanog komunalnog otpada odvodi se u sortirne kabine gdje se provodi ručno sortiranje. Na brodu su predviđene tri sortirne kabine, s transporterom smještenim u središtu svake. Radnici sa svake strane transportera postupno odvajaju različite vrste otpada, postavljeni između dviju kanti za sakupljanje na visini transportera, u kojima se ručno sortiraju pojedine frakcije kao što su papir i karton, plastika i staklo. Svaka kabina ima svoj kontejner za određene frakcije otpada (npr. vrećice i plastika, staklo, karton i papir). a optimalan broj radnika za ove aktivnosti je osam do deset. Osim njih, potrebna su dodatna dva radnika za rad sa grabalicom i viličarima, koji se smatraju dijelom posade sortirnice. Kabine su opremljene sustavima za ventilaciju, grijanje i hlađenje radi optimalnih uvjeta rada.

Nakon sortirnih kabina slijedi podni transporter, koji je spojen s kutnim transporterom prema preši. Nakon što se kontejneri za reciklabilne frakcije napune, prenose se do preše balirke putem podnog transportera koji se proteže duž kabine. Konačni proizvod iz preše su bale koje se mogu razlikovati po dimenzijama, no standardna bala je veličine 1200x800 mm i visine 1000 mm, što odgovara dimenzijama europaleta i omogućava lakše skladištenje i transport. Bale se manipuliraju električnim viličarima koji bi stalno bili prisutni na brodu [16].

## **6. IMPLEMENTACIJA PLAZMA SUSTAVA ZA UPLINJAVANJE NA IDEJNOM BRODU**

### **6.1 Uvod u plazma sustave uplinjavanja**

Uplinjavanje otpada ima potencijal proizvodnje električne i toplinske energije iz komunalnog otpada na učinkovit način. Očekuje se da otrovni spojevi poput dioksina i furana neće biti prisutni u sustava uplinjavanju zbog visokih temperatura koje se koriste kod uplinjavanja i bez prisutnosti kisika onemogućujući stvaranje slobodnog klora i time ograničavajući kloriranje dioksina. Zbog smanjenja volumena otpada u sustavu, stvaranje dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ) u sustavu plazma uplinjavanja je također ograničeno. U plazma sustavu usitnjeni otpad se dovodi prvo u grafitno ložište, gdje se anorganska frakcija tali i ostakljuje, a organska frakcija isparava kao plinska smjesa sintetskog plina ( $\text{CO}$  i  $\text{H}_2$ ). Sirovi sintetski plin se zatim dovodi u sekundarni rasplinjač, u kojem je plazma reduktor, a gdje se temperatura sintetskog plina povećava, a kompleksne organske molekule se razgrađuju na  $\text{CO}$  i  $\text{H}_2$ , a čađa se pretvara u  $\text{CO}$ . Konačni proizvod je sintetski plin koji ne sadrži nikakve organske primjese.

### **6.2 Uplinjavanje pomoću plazma sustava na brodu**

Kruti miješani komunalni otpad koji bi bio sakupljen na brodu morao bi biti obrađen prije nego što se uđe u reaktor plazma sustava. Trostupanjski proces uplinjavanja unutar reaktora pretvara otpad u sirovi sintetski plin, ostavljajući mali postotak krutog ostatka u obliku inertnog pepela. Sirovi sintetski plin pročišćava se u sustavu za obradu plina i na kraju dovodi u plinski motor za proizvodnju električne energije.

Plazma je agregatno stanje koje sadrži značajan udio nabijenih čestica (iona i elektrona) koje je čine električki vodljivom. Kada se na elektrode odvojene inertnim plinom ili zrakom dovede električni naboj visokog napona, nastalo električno polje privlači elektrone iz neutralnih molekula plina. Elektroni se zatim pomiču s električnim poljem i utječu na druge molekule, otpuštajući više iona, što dovodi do fenomena koji se naziva kaskada elektrona. Nakon što se dovoljno elektrona kreće s električnim poljem, između elektroda se stvara električni luk koji oslobađa velike količine topline na temperaturama iznad  $5000\text{ }^\circ\text{C}$ . Protok visokotemperaturnog plina (u ovom slučaju dušika), usmjerenog iz vrha baklje, stvara električni luk izvan baklje, stvarajući plamen plazme. Posebnost plazma baklji je mogućnost obrade različitih vrsta otpada, uključujući materijale s vrlo niskom toplinskom moći. Kada otpad dođe do plamena plazme, brzo se rasplinjava, stvarajući sintetski plin (syngas) od organskih komponenti i pepeo od anorganskih. Sustav za plazma uplinjavanje osmišljen je za obradu otpada i mulja koji nastaju na brodu i njihovu pretvorbu u sintetski plin koji se može



koristiti za proizvodnju toplinske i električne energije i vrlo ograničenu količinu krutog ostatka, čime se uvelike smanjuje potreba za skladištenjem otpada na brodu. Sustav može proizvesti električnu i toplinsku energiju iz otpada čime se smanjuje potrošnja goriva i smanjuje utjecaja plovila na okoliš. S velikim smanjenjem količine otpada (obično oko 93-97%), to je najučinkovitija metoda smanjenja otpada. Otpad koji se obično iskrcava u lučki prihvatni objekt pretvara se u korisnu energiju na brodu. Plazma sustav na brodu bio bi potpuno funkcionalan, uključujući sve potrebne komponente kao i kod sustava na kopnu. Kako se u mjesecu kolovozu očekuje najveća količina komunalnog otpada u iznosu od 55,3 t/dan., potreban plazma sustav za uplinjavanje otpada će morati imati dostatan kapacitet kako bi mogao obraditi svu nastalu količinu miješanog komunalnog otpada s otoka Krka, Raba, Cresa i Malog Lošinja. Plazma sustav koji bi se koristio na brodu bi bio mobilne kontejnerske izvedbe što olakšava organizaciju cjelokupne strojarnice te mogućnost manipulacije cjelokupnog sustava.

#### 6.2.1 Baklja plazma sustava

Osnovna plazma baklja sadrži dvije elektrode, katodu i anodu, obično izrađene od bakra, s malom količinom plemenitih metala poput volframa ili hafnija. Na elektrode se dovodi visoki napon, a između njih se pušta struja plina, u kojoj zbog visokog napona nastaje električni luk. Plin zagrijan na visoku temperaturu, usmjeren iz vrha baklje, rasteže električni luk, na način da na izlazu iz baklje dolazi u kontakt s otpadom koji treba rasplinjavati. Jednostavno rečeno, plazma plamenik radi poput sušila za kosu, gdje električni luk djeluje kao grijaći element, a zrak koji struji kroz plazma plamenik se zagrijava do temperatura od preko 5000 °C. Plamen koji izlazi iz baklje, prikazan je na slici 6.2.1.1 [17].



*Slika 6.2.1.1 Baklja plazma sustava jačine 150 kW*

Kada komunalni otpad dođe u kontakt s plamenom plazme u okruženju bez kisika, brzo se rasplinjava, stvarajući sintetski plin od organskih komponenti, kao i pepeo od anorganskih. Ako je baklja



postavljena na način da može nastaviti zagrijavati pepeo, pretvorit će ga u inertan staklasti materijal, poznat kao troska.

#### 6.2.2 Grafitne elektrode plazma sustava

Plazma sustavi s grafitnim elektrodama prenose energiju električnog luka izravno izravno na materijal koji će biti spaljen, odnosno uplinjen. Jakost struje koja se koristi je u rasponu od nekoliko stotina ampera do nekoliko tisuća ampera. Jaka struja usmjerava se kroz cilindrične grafitne elektrode u peć, obloženu vatrostalnim materijalom. Električna energija prelazi s jedne elektrode na drugu bez prijenosa luka ili s elektrode na otpad s prijenosom luka. Kao i kod baklje, električni luk stvara značajnu toplinu koja služi za zagrijavanje otpada. Temperatura u jednoj od ovih peći može doseći više od 1500° C. Na ovoj temperaturi, anorganski dio otpada se ostakljuje, odnosno pretvara u trosku. Troska na dnu peći sadrži značajnu količinu toplinske energije koja pospješuje preradu velikih količina otpada jer dodatno zagrijava plazma reaktor. Zagrijavanje je zbog toga ravnomjernije što omogućava i kvalitetnije izgaranje.

### 6.3 Plazma sustav za uplinjavanje otpada

#### 6.3.1 Procesi obrade otpada pomoću plazma sustava za raplinjavanje

Kompletan sustav uplinjavanja komunalnog otpada pomoću plazma reaktora sastoji se od sljedećih koraka:

1. Predobrada otpada – prikupljanje, obrada i transport komunalnog otpada do reaktora
2. Reaktor – uplinjavanje prethodno obrađenog komunalnog otpada u sintetski plin
3. Obrada plinova – hlađenje i čišćenje sirovog sintetskog plina
4. Proizvodnja električne i/ili toplinske energije – proizvodnja električne i/ili toplinske energije pomoću plinskog ili dvogorivnog dizelsko-plinskog motora

Na slici 6.3.1.1 prikazan je plazma sustava za raplinjavanje bez sustava za obradu plina nakon uplinjavanja [17].



*Slika 6.3.1.1 Plazma sustav za uplinjavanje*

Pojedine faze procesa bit će detaljnije objašnjene u nastavku.

Otpad se prvo dovodi u drobilicu, gdje se usitnjava na male komade. Ukoliko se otpad nije uspio dovoljno osušiti u komorama za biosušenje, može se sušiti koristeći otpadnu toplinu iz sustava za rekuperaciju energije, kako bi se poboljšala energetska učinkovitost procesa uplinjavanja. Isparena vlaga miješa se s procesnim zrakom i dovodi, zajedno s otpadom, u primarnu peć za uplinjavanje pri čemu osim termičke razgradnje svih sadržanih ugljikovodika, to ima i važnu ulogu u drugim kemijskim reakcijama u procesu uplinjavanja. U peći za primarno uplinjavanje, organski dio otpada isparava i odvaja se od anorganskog dijela. Anorganski dio otpada (metali, staklo, prljavština, itd.) pretvara se u fazu rastaljenog metala i rastaljene inertne troske. Temperatura rastaljenog otpada održava se iznad  $1600^{\circ}\text{C}$  [19].

Zanimljivo je da se čak i troska može iskoristiti ukoliko se kontinuirano odvodi iz peći za uplinjavanje. Može se granulirati kada se sakupi u vodi ili ulije kalupe, ovisno o krajnjoj upotrebi. Troska je vrlo stabilan materijal, koji se može koristiti za građevinske ili druge komercijalne svrhe.

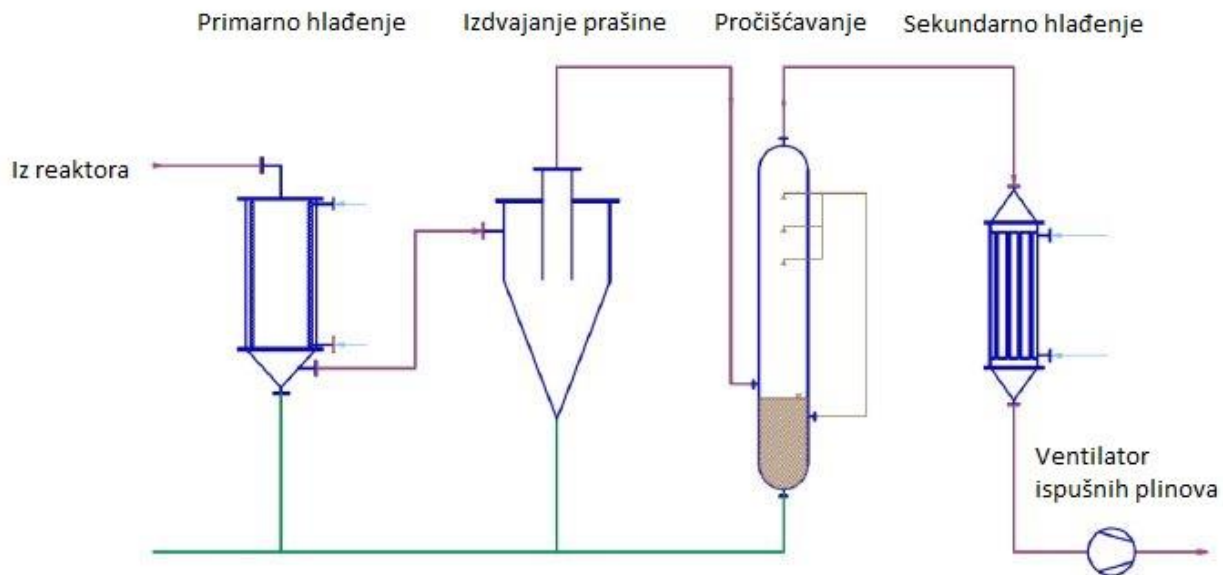
Uplinjavanje obrađenog miješanog otpada odvija se u tri faze unutar reaktora. Prva faza uključuje predgrijavanje, gdje se smjesa zagrijava vrućim zrakom, prvo na  $200^{\circ}\text{C}$ , a zatim na  $600^{\circ}\text{C}$ , pri čemu isparava voda odnosno vlaga iz otpada. U reaktoru, otpad se neizravno zagrijava toplinom proizvedenog plina. Prethodno zagrijani zrak za uplinjavanje dovodi se u reaktor kako bi se pokrenuo proces uplinjavanja, uz ubrizgavanje vodene pare za regulaciju temperature.

U drugoj fazi se smjesa iz prve faze zagrijava na temperaturu između  $1200^{\circ}\text{C}$  i  $1300^{\circ}\text{C}$  pomoću plazma baklji, čime se postiže maksimalno smanjenje volumena otpada. U trećoj fazi dolazi do

kreiranja gdje se plinovi iz druge faze dalje zagrijavaju dodatnim plazma bakljama pri čemu nastaje sintetski plin. Sintetski plin dobiven iz procesa uplinjavanja sastoji se od ugljikovog monoksida ( $CO$ ), vodika ( $H_2$ ), dušika ( $N_2$ ) i malih količina ugljikovog dioksida ( $CO_2$ ) i metana ( $CH_4$ ). Zbog visokog udjela ugljikovog monoksida i vodika, sintetski plin se smatra gorivom. Izgaranjem sintetskog plina u plinskom agregatu proizvodi se električna energija za potrebe broda ili se sintetski plin može koristiti za pogon plinskog motora za propulziju broda.

Otprilike 5% ulazne mase otpada ostaje kao kruti ostatak u obliku inertnog pepela. Ovaj pepeo se izdvaja iz reaktora i mora se skladištiti i zbrinuti kao inertni materijal. Sintetski plin koji izlazi iz sekundarnog rasplinjača hladi se pomoću vode od  $1100^\circ C$  do približno  $85^\circ C$ , u manje od pola sekunde, kako bi se izbjegla reformacija dioksina, furana i drugih složenih molekula.

Na slici 6.3.1.2 prikazana je shema obrade sintetskog plina dobivenog uplinjavanjem komunalnog otpada pomoću plazma sustava na brodu [20].



Slika 6.3.1.2 Obrada sintetskog plina dobivenog uplinjavanjem komunalnog otpada

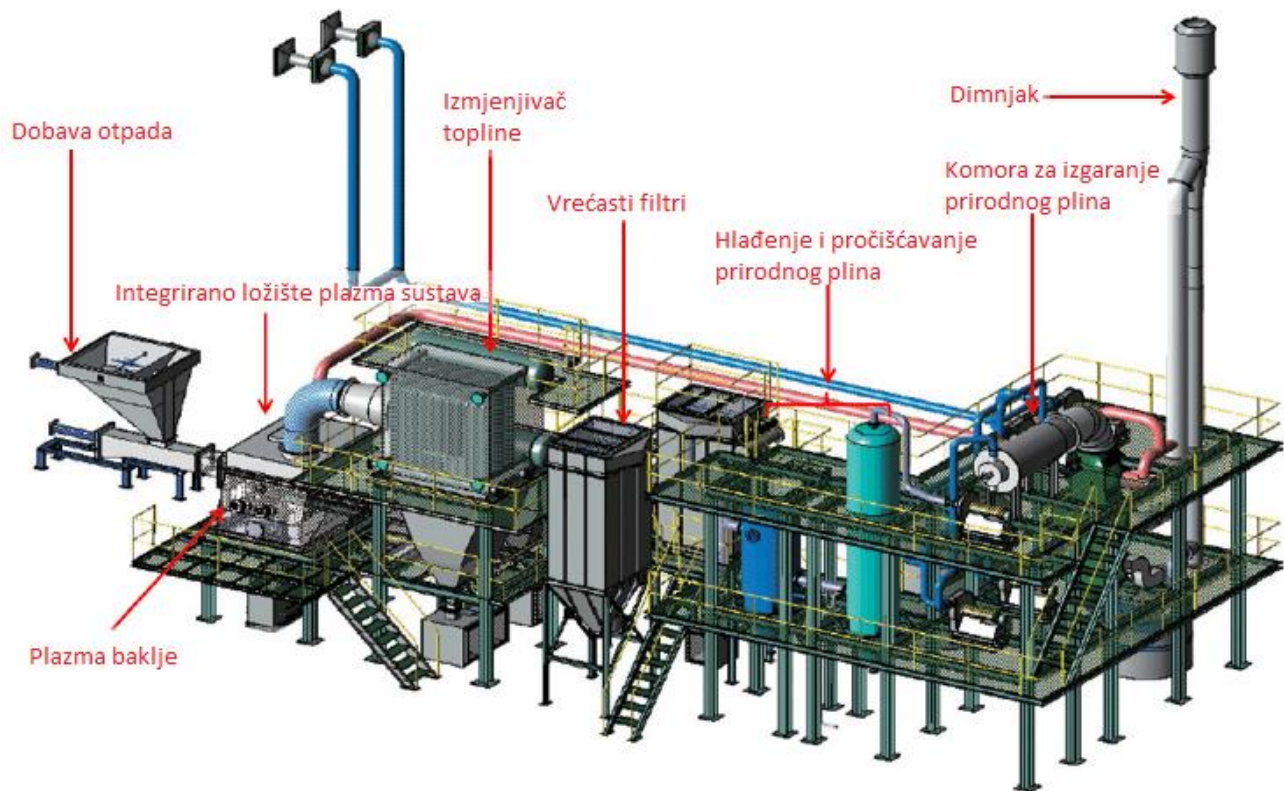
Ispušni plinovi koji izlaze iz reaktora moraju se ohladiti na cca.  $400^\circ C$  u prvom koraku i dalje na  $100^\circ C$  u drugom koraku, te se izdvajaju  $H_2S$ ,  $HCl$  i krute čestice. Ovisno o sastavu otpada, iz ispušnih plinova moraju se ukloniti krute čestice i pepeo. Kako bi se spriječila korozija opreme, potrebno je neutralizirati sve topive kisele plinove prisutne u otpadnom plinu.

Obrada otpadnih plinova uključuje:

1. Uklanjanje većih čestica prašine mehaničkim odvajanjem, odvajanjem pomoću pročišćivača.

2. Smanjenje temperature ispušnih plinova i sprječavanje stvaranja dioksina, furana i drugih štetnih satojaka pomoću ulja za hlađenje.
3. Kondenzacija vodene pare sadržane u struji ispušnih plinova u kondenzatoru
4. Uklanjanje finijih čestica, hlapljivih i poluhlapljivih materijala i finijih aerosola u mlaznom scrubberu
5. Neutralizacija i izdvajanje  $SO_2$ ,  $H_2S$  i topivih kiselih plinova (npr.  $HCl$ ), ako je potrebno.

Na slici 6.3.1.3 prikazan je koncept cjelokupnog plazma sustava za uplinjavanje na brodu, od faze dobave sortiranog miješanog krutog komunalnog otpada, preko uplinjavanja otpada te pročišćavanja dobivenog sintetskog plina, do njegova izgaranja u motoru s unutarnjim izgaranjem radi proizvodnje toplinske i električne energije te radi propulzije broda [21], [29].



Slika 6.3.1.3 Koncept plazma sustava na brodu

#### 6.4 Kemijske reakcije u procesu uplinjavanja

Pri uplinjavanju miješanog komunalnog otpada pomoću plazma sustava za uplinjavanje, odvija se veliki broj različitih kemijskih reakcija, a krajnji produkt ovisi o sastavu miješanog komunalnog otpada i okolišnim uvjetima pri kojima plazma sustav radi. Toplina dobivena iz plazma baklji koristi se za razgradnju otpadnog materijala na plinovite frakcije. Sustavi za uplinjavanje s fluidiziranim slojem postoje već mnogo godina, te se proizvedeni sintetski plin koristi kao niskoenergetsko gorivo.

Uplinjavanje je process toplinske razgradnje organskih sastojaka miješanog komunalnog otpada na bazi ugljika u plin visoke temperaturama između 400°C do 1500 °C. Ovaj se proces provodi u okruženju bez kisika, čime se sprječava oksidacija ugljika u  $CO_2$ . Kemijske reakcije koje se odvijaju tijekom uplinjavanja mogu se opisati stehiometrijskim jednadžbama niže u tekstu [21].

Nepotpunim izgaranjem nastaje ugljikov monoksid  $CO$  koji se može prikazati sljedećom jednadžbom:



Ova reakcija je egzotermna i oslobađa 110 kJ energije po kilomolu ugljika. Ugljikov monoksid također može nastati i vezivanjem kisika iz vode ili vodene pare. Taj proces se može opisati kroz sljedeću reakciju.



Prikazana reakcija je endotermna što znači da preuzima energiju iz procesa uplinjavanja. Zato se količina vode ili pare koja se dovodi u rasplinjač mora kontinuirano kontrolirati kako bi se izbjeglo prekomjerno hlađenje reaktora, odnosno ložišta.

Tijekom uplinjavanja dolazi i do kemijske reakcije vode i ugljikovog monoksida pri čemu nastaju ugljikov dioksid i vodik. Prikazana je sljedećim izrazom:



Također dolazi i do procesa metanacije pri čemu iz ugljika i vodika nastaje metan, te je process prikazan izrazom 6.4.4:



Konačno, zbog oksidacije u plinskom motoru dolazi do oslobađanja kemijske energije sastojaka sintetskog plinovitog goriva.

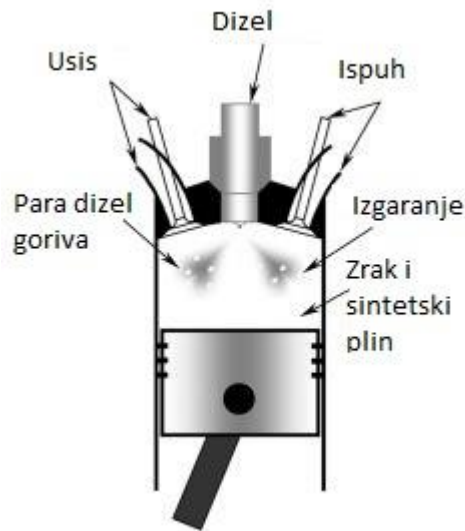


Osim ugljika, kisika i vodika, otpadni materijal koji se dovodi u rasplinjač obično može sadržavati i druge sastojke, kao što su sumpor, organski klor i dušik. Bitno je uzeti u obzir sve kemijske elemente koji se mogu pojaviti tijekom procesa uplinjavanja kako bi se mogli predvidjeti eventualni štetni kemijski spojevi koji mogu nastati. Tijekom procesa uplinjavanja, u uređajima i opremi za uplinjavanje može se održavati podtlak kako bi se spriječilo propuštanje štetnih sastojaka u okolnu atmosferu. Na primjer, uz ograničenu prisutnost kisika, velika većina prisutnog sumpora prijeći će u plin vodikov sulfid ( $H_2S$ ), dok će količina nastalog sumpornog oksida  $SO_2$  biti maksimalno smanjena. Isto vrijedi i za klor, koji uglavnom tvori plinoviti  $HCl$ . Ovi plinovi koji se nalaze u sintetskom plinu napuštaju plazma reaktor i moraju se obraditi prije nego što se sintetski plin dalje koristi [21], [22].

## 6.5 Mogućnost korištenja sintetskog plina za pogon plinskog motora

Upotreba sintetskog plina u kompresijskim motorima (CI) s dvostrukim gorivom predstavlja tehnologiju koja omogućuje zamjenu dijela dizelskog goriva s sintetskim plinom s ciljem smanjenja emisija i troškova goriva. Sintetskim plin karakterizira visoka temperatura samozapaljenja, što otežava izravno korištenje kao jedinog goriva u kompresijskim motorima [33].

Paljenje u kompresijskim motorima (CI) s dvostrukim gorivom funkcionira na način da se ubrizgava primarno gorivo, u ovom slučaju dizel, koje se zapali uslijed kompresije unutar cilindra, što podiže temperaturu u cilindru. Nakon toga, uvodi se sintetski plin, koji se zapali kada temperatura dizela dovoljno poraste, pošto je temperatura samozapaljenja sintetskog plina oko 500 °C. Proces izgaranja u ovim motorima sastoji se od nekoliko faza: razdoblja kašnjenja paljenja, izgaranja dizelskog goriva, izgaranja sintetskog plinovitog goriva te difuzijskog izgaranja plinovitog goriva zajedno s preostalim dizelskim gorivom. Ključni parametar je kašnjenje paljenja, koje se odnosi na vrijeme između ubrizgavanja dizelskog goriva i početka oslobađanja topline uslijed izgaranja. Prikaz je vidljiv na slici 6.5.1. [33]



Slika 6.5.1 Dvogorivni motor

Korištenje sintetskog plina u dvogorivnom motoru može zamijeniti između 60% i 90% dizelskog goriva. S druge strane dolazi do smanjenja snage motora zbog niže ogrjevne vrijednosti sintetskog plina u usporedbi s konvencionalnim gorivima poput dizelskog goriva ili prirodnog plina. Smanjenje ogrjevne vrijednosti gorive smjese uglavnom je posljedica zamjene dijela zraka i dizela u cilindru s većim udjelom sintetskog plina.



Korištenje sintetskog plina rezultira smanjenjem emisija stakleničkih plinova. Emisije sumpornih oksida ( $\text{SO}_2$  i  $\text{SO}_3$ ), koji doprinose stvaranju kiselih kiša, također su smanjene u usporedbi s radom na dizelsko gorivo. U nekim slučajevima je zabilježen porast emisija ugljikovog monoksida ( $\text{CO}$ ) i dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ). Povećanje  $\text{NO}_x$  uglavnom je uzrokovano višim temperaturama izgaranja, do kojih dolazi zbog povećanih udjela vodika u sintetskom plinu. Smanjenje emisija  $\text{NO}_x$  može se postići primjenom recirkulacije ispušnih plinova (EGR sustav) i ubrizgavanjem vode, koje snižavaju temperature izgaranja [34], [35], [36].

Jedan od glavnih izazova u primjeni sintetskog plina u kompresijskim motorima je postizanje potpune zamjene dizelskog goriva. Sintetski plin se često pokazao manje učinkovitim od prirodnog plina i ukapljenog naftnog plina kada se koristi u dvogorivnim motorima. Problemi poput nepotpunog izgaranja, visokih oscilacija ogrjevnosti i visoke emisije  $\text{NO}_x$  zahtijevaju dodatna istraživanja i razvoj kako bi se poboljšala učinkovitost i smanjile emisije. Posebno se istražuje utjecaj različitih sastava sintetskog plina, gdje se povećanjem udjela vodika (do 75%) poboljšava učinkovitost izgaranja, ali također povećavaju emisije  $\text{NO}_x$  [34], [35], [36].

Sintetski plin kao dodatno gorivo u dvogorivnim motorima ima potencijal za smanjenje troškova goriva i emisija štetnih dimnih plinova i čestica, no suočava se s tehničkim izazovima poput smanjenja snage motora i kontroliranja emisija  $\text{NO}_x$ . Sintetski plin ne može u potpunosti zamijeniti dizel kompresijskim motorima, ali predstavlja održivu alternativu kao dodatno gorivo [34], [35], [36].

Sintetski plin može se koristiti kao gorivo u motoru s unutarnjim izgaranjem (plinski motor). Jedan od poznatijih proizvođača plinskih motora je tvrtka Jenbacher iz Austrije. Plinski motori ostvaruju stupnjeve djelovanja u rasponu od 35% do 40%. Također, plinski motori su prikladni za proizvodnju električne energije iz plina s niskom ogrjevnom vrijednošću, kao što je sintetski plin proizveden uplinjavanjem miješanog komunalnog otpada.

Zbog mogućnosti iskorištenja plinskog goriva dobivenog iz miješanog komunalnog otpada, ovakav sustav može funkcionirati i na brodu te proizvoditi sintetski plin za korištenje kao pogonsko gorivo brodskog motora. Nadalje će se u radu prikazati proračunate teoretske količine plinskog goriva odnosno sintetskog plina koje se može proizvesti na temelju prosječnog sastava komunalnog otpada i na temelju proračunatih prosječnih količina komunalnog otpada po ciklusu vožnje idejnog plovila ili broda koji iznosi 2 dana.

Dvogorivni četverotaktni motori kompanije 2G Energy AG trebaju minimalnu ogrjevnu vrijednost sintetskog plina od  $4,98 \text{ kWh/m}_n^3$ . Za pretvorbu u  $\text{kJ/kg}$  koristiti će se sljedeći izraz:

$$H_{\min} = \frac{4,98 \cdot 3600}{\rho_{\text{PL}}} = \frac{4,98 \cdot 3600}{0,87} \cong 20,500 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (6.7)$$

Iz izraza 6.7 vidljivo je da minimalna ogrjevna vrijednost sintetskog plina iznosi oko  $20,500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ . Kao česta konfiguracija za propulziju brodova susreću se četverotaktni brodski motori u V konfiguraciji s 12 cilindara koji funkcioniraju kroz četiri glavna takta: usisni, kompresijski, radni i ispušni. U prvom taktu, usisni ventil se otvara dok se klip pomiče prema dolje, omogućujući zraku ili kisiku da uđe u cilindar. Motor radi s viškom zraka ( $\lambda > 1$ ), što znači da ima više zraka nego što je potrebno za potpuno izgaranje goriva, čime se poboljšava efikasnost i smanjuju emisije štetnih dimnih plinova i čestica. Tijekom kompresije, klip se pomiče prema gore, komprimirajući zrak i povećavajući njegovu temperaturu i tlak.

Potom, ubrizgava se gorivo u cilindar gdje se nalazi komprimirani zrak, što dovodi do paljenja mješavine goriva i zraka uslijed visokih temperatura i tlaka. Oslobođena energija potiskuje klip prema dolje, čime se stvara mehanički rad. Na kraju, tijekom ispuha, klip se ponovno pomiče prema gore, izbacujući dimne plinove izgaranja kroz ispušni ventil. V konfiguracija motora omogućava kompaktnije dimenzije i ravnomjerniju distribuciju snage, dok rad s viškom zraka osigurava bolje izgaranje, smanjenje emisija i povećanu efikasnost, što je ključno za dugotrajan i učinkovit rad brodskih motora.

## **6.6 Prednosti korištenja plazma sustava za uplinjavanje komunalnog otpada i mogući problemi**

Primjena plazma sustava u sustavu gospodarenja komunalnim otpadom bio bi isplativ na brodovima koji mogu skladištiti i obraditi velike količine komunalnog otpada. Osnovna zamisao idejnog plovila je sakupljati i obrađivati velike količine komunalnog otpada te na taj način maksimalno umanjiti masu i volumen preuzetog otpada zbog povećanih troškova prijevoza i obrade.

Neke od prednosti plazma sustava za uplinjavanje su sljedeće:

1. Visoka učinkovitost u smanjenju volumena otpada: sustav za raplinjavanje otpada može značajno smanjiti volumen krutog otpada, često za 95% ili više, što rezultira minimalnom količinom krutog ostatka, većinom u obliku inertnog pepela.
2. Proizvodnja čistog sintetskog plina: uplinjavanjem se miješani komunalni otpad pretvara u sintetski plin, koji se može koristiti kao gorivo za proizvodnju električne ili toplinske energije.
3. Smanjenje emisije stakleničkih plinova: korištenjem otpada kao izvora energije smanjuje se potreba za fosilnim gorivima, što dovodi do nižih emisija stakleničkih plinova i pozitivnog utjecaja na okoliš.



4. Sposobnost obrade širokog raspona otpada: plazma sustavi za raplinjavanje mogu obraditi gotovo sve vrste otpada, uključujući opasni, medicinski i industrijski otpad, nudeći fleksibilnost i široku primjenjivost.
5. Smanjenje potrebe za odlagalištima: s obzirom na visoku učinkovitost u smanjenju količine otpada, potreba za novim odlagalištima je smanjena i smanjuje probleme povezane s odlaganjem otpada.
6. Proizvodnja inertnog pepela: kruti ostaci koji nastaju iz procesa uplinjavanja su inertni i mogu se koristiti u građevinarstvu.
7. Visoke temperature: plazma sustavi rade s visokim temperaturama, osiguravajući gotovo potpunu razgradnju organskih materijala i uništavanje opasnih tvari.
8. Sposobnost pretvaranja otpada u energiju može djelomično doprinijeti energetske neovisnosti pojedinih objekata.

Plazma sustav vrlo je prikladan za upotrebu u industriji obrade komunalnog otpada. Za rad su mu potrebni električna energija i inertni plinovi poput zraka ili dušika. Vrlo visoke temperature omogućavaju uništavanje i uplinjavanje gotovo svih vrsta otpada, bez obzira na vlastitu ogrjevnu vrijednost. Nove primjene plazma sustava za raplinjavanje u obradi otpada sve su češće.

Glavni problemi kod njihove primjene su velika kapitalna ulaganja, dugoročna učinkovitost je zasada nedovoljno ispitana i javno mišljenje o termičkoj obradi otpada je prilično loše zbog nedovoljne educiranosti ljudi. Kako prosječni građanin shvaća da odlaganje otpada ima i negativne posljedice kao što su neugodni mirisi i potencijalna kontaminacija podzemnih voda, rješenja toplinske obrade kao što je plazma uplinjavanje postaju sve prihvaćenija [22].

### **6.7 Utjecaj na okoliš**

Usporedba postignutih rezultata s konvencionalnim postrojenjem za spaljivanje pokazuje da je plazma sustav za uplinjavanje bolja opcija. Plazma sustav za uplinjavanje je najučinkovitija tehnika zbrinjavanja, koja proizvodi manje količine ostataka u obliku pepela.

Dva su glavna čimbenika koji doprinose smanjenju utjecaja na okoliš sa plazma sustavom uplinjavanja, a to su smanjenje emisija u usporedbi sa konvencionalnim spaljivanjem otpada i smanjene emisije štetnih dimnih plinova zbog ušteđenog fosilnog goriva koje bi se koristilo za proizvodnju električne energije na brodu.

Plazma sustav za uplinjavanje u usporedbi sa konvencionalnim spaljivanjem miješanog krutog komunalnog otpada osigurava smanjenje od 31 kg  $CO_2$  ekvivalenta po toni ulaznog otpada.

Za slučajeve kada se električna energija proizvodi iz sintetskog plina i koristi na brodovima, dolazi do uštede koja je ekvivalentna količini fosilnog goriva koja bi bila potrebna za proizvodnju iste

količine električne energije. Osim smanjenja potrošnje fosilnih goriva i ukupne mase miješanog komunalnog otpada, smanjene emisije u odnosu na konvencionalne incineratore mogu se procijeniti na 31 kg  $CO_2$  po kg goriva, uzimajući u obzir standardni sporohodni 2-taktni brodski motor [22], [23].

## 7. DIMENZIJE BRODA ZA PRIKUPLJANJE KOMUNALNOG OTPADA

### 7.1 Distribucija prostora na brodu i određivanje dimenzija

Potrebno+ je odrediti rutu kojom bi brod plovio, aktivnosti broda s početnim i krajnjim vremenima, odnosno vremenima trajanja pojedinih aktivnosti, količine otpada za siječanj i kolovoz prikazan prema pojedinim frakcijama komunalnog otpada te tablicu proizvedenih i utrošenih količina sintetskog plina i električne energije.

Prije određivanja rute, potrebno je odrediti dimenzije broda. Brod za prikupljanje komunalnog otpada projektirat će se prema karakteristikama postojećih brodova u floti tvrtke "Jadrolinija" koji plove između prethodno navedenih pristaništa (Valbiska, Merag i Lopar) i da bude u mogućnosti koristiti postojeću infrastrukturu na spomenutim pristaništima. To je bitno kako bi brod mogao obavljati sve potrebne operacije kao što su isplovljavanje, manevri, isplovljavanje te utovar i istovar otpada. Osnovne dimenzije broda ne bi smjele prelaziti dimenzije korištenih trajekata na spomenutim otocima odnosno pristaništima.

Kao osnova za utvrđivanje osnovnih dimenzija broda, u obzir su uzeti trajekti "Krk" koji plove na relaciji Lopar-Valbiska i "Kornati" koji plove na relaciji Valbiska-Merag. Navedeni trajekti plove između svih pristaništa koja su uzeta u obzir prilikom izrade analize što je bitno brod za sakupljanje miješanog komunalnog otpada plovilo između istih pristaništa. Trajekti "Krk" i "Kornati" su identičnih dimenzija prikazanih u tablici 7.1.1 [24], [25].

*Tablica 7.1.1 Prikaz dimenzija trajekata "Krk" i "Kornati"*

Karakteristika	Vrijednost
Duljina	99,80 m
Širina	17,50 m
Gaz	2,40 m
Pogon	4xVolvo Penta (svaki 442 kW)
Brzina	12,5 čvorova

Na slici 7.1.prikazan je trajekt "Krk" koji je u prometu od listopada 2014. godine između pristaništa Valbiska – Merag [24].



*Slika 7.1.1 Trajekt "Krk"*

Iz navedenog se može zaključiti da dimenzije broda za prikupljanje komunalnog otpada mogu iznositi  $D \cdot \dot{S} = 99,5\text{m} \cdot 17,5\text{ m}$  dok gaz smije iznositi 2,4 m. Potrebno je utvrditi ukupne dimenzije sustava za sortiranje, plazma sustava i sustava za skladištenje proizvedene energije kako bi se moglo utvrditi da li takva oprema stane na brod bez da se prelaze navedene dimenzije trajekata koji putuju na tim rutama. U slučaju da analiza prostora za velike sustave na brodu pokaže potrebu za plovilom većih dimenzija od prethodno navedenih, nužno je provesti dodatnu analizu kako bi se utvrdilo mogu li takve veće dimenzije odgovarati zahtjevima pojedinih navedenih pristaništa.

## **7.2 Dimenzije sustava za obradu otpada na brodu**

Kako je prethodno spomenuto prikazati će se dimenzije sustava za sortiranje, plazma sustava i sustava za skladištenje proizvedene energije što su u ovom slučaju standardni kontejneri veličine 20 ft, odnosno duljine od otprilike 6 m. U tablici 7.2.1 prikazane su dimenzije pojedinih velikih sustava koji bi se koristili na brodu za prikupljanje otpada.

*Tablica 7.2.1 Dimenzije pojedinih sustava*

Raspodjela prostora na brodu	Duljina (m)	Širina (m)	Visina (m)	Površina (D*Š) m <sup>2</sup>
Skladišni kontejner	6	2.5	2.5	15
Spremnik za skladištenje viška sintetskog plina	6	2.5	2.5	15
Sortirница otpada	45	5	5	225
Kompresori (3x)	4,65	2,7	1	13
Plazma postrojenje				150

Zahtjevi za palubu	60	15	10	900
--------------------	----	----	----	-----

Brod se može zamisliti kao mobilna jedinica za upravljanje komunalnim otpadom, organizirana na dvije razine i prilagođena specifičnim potrebama obrade i sortiranja otpada. Na gornjoj razini nalazili bi se sustavi za sortiranje i skladištenje miješanog komunalnog otpada, zauzimajući prostor od oko 300 m<sup>2</sup>. Ova razina bi obuhvatila veliki broj skladišnih kontejnera i opreme za rukovanje otpadom, predstavljajući početnu fazu obrade.

Druga, donja razina bio bi rezerviran za smještaj plazma postrojenja. Zauzimajući oko 1090 m<sup>2</sup> prostora prema podacima dobivenim iz grupacije “Maritime Center of Excellence”, plazma postrojenje koristilo bi se za pretvorbu komunalnog otpada u plinovito gorivo, te istovremeno za efikasno i ekološki prihvatljivo smanjenje volumena otpada.

S obzirom na planirane aktivnosti na obe razine, planirane dimenzije broda za prikupljanje otpada iznosile bi  $D \cdot \check{S}$  (Dužina x Širina) = 80 m · 17,5 m, dajući ukupno 1400 m<sup>2</sup> prostora po razini. Te dimenzije osigurale bi dovoljno prostora ne samo za sadašnje potrebe obrade otpada, već i za potencijalna buduća proširenja. Ovakav pristup bi omogućio fleksibilnost i u slučaju povećanih količina komunalnog otpada, čineći brod prilagodljivim budućim izazovima i povećanjima količina nastalog komunalnog otpada.

### **7.3 Kamionski prijevoz otpada do broda**

Za prijevoz i manipulaciju otpada od strane lokalnih jedinica samouprave spomenutih otoka do plovila za sortiranje i obradu otpada koristio bi se kamionski prijevoz. U Hrvatskoj se za prijevoz otpada općenito koriste standardni kamioni kapaciteta 20 m<sup>3</sup>. Takvi kamioni obično se opremljeni sa stražnjim utovarom i pogodni su za prikupljanje miješanog komunalnog otpada iz stambenih i poslovnih područja. Kapacitet od 20 m<sup>3</sup> omogućava efikasno prikupljanje veće količine komunalnog otpada, što doprinosi učinkovitosti i efikasnosti operacija sakupljanja komunalnog otpada.

Vozilo bi prikupljalo komunalni otpad iz kanti i kontejnera kapaciteta od 80 l do 1100 l, te 5 i 7 m<sup>3</sup>. Dodatno, ugrađeni kran na svakom vozilu omogućava pražnjenje podzemnih kontejnera, a vozilo također omogućava pretovar otpada iz manjih u veće kapacitete do 16 m<sup>3</sup>.

Ekološke prednosti uključuju smanjeno zagađenje zraka i manje zaustavljanja vozila tijekom prikupljanja otpada što povećava operativnu efikasnost. Vozilo omogućava prikupljanje kako presortiranog tako i miješanog komunalnog otpada, što doprinosi boljoj organizaciji otpadnog sustava.

## 8. OPERATIVNI PLAN

### 8.1 Aktivnosti idejnog broda

Za izradu operativnog plana broda koji će biti primjenjiv tijekom cijele godine, uz potrebne prilagodbe vremena utovara ovisno o količini nastalog miješanog komunalnog otpada, izrađena je tablica s popisom aktivnosti i trajanjem svake aktivnosti u minutama. Podaci su prikazani u tablici 8.1.1.

Tablica 8.1.1 Popis aktivnosti broda te njihovo trajanje

Popis aktivnosti broda	Trajanje aktivnosti (min)
Ri (odvezivanje)	2
Ri (manevar)	5
Ri-Krk (Valbiska) (navigacija)	196
Krk (1, manevar)	5
Krk (privezivanje)	2
Krk (utovar)	120-360
Krk (odvezivanje)	2
Krk (2, manevar)	5
Krk-Rab(Lopar) (navigacija)	196
Rab (1, manevar)	5
Rab (privezivanje)	2
Rab (utovar)	120-360
Rab (odvezivanje)	2
Rab (2, manevar)	5
Rab-Cres (Merag) (navigacija)	196
Cres (1, manevar)	5
Cres (privezivanje)	2
Cres (utovar)	120-360
Cres (odvezivanje)	2
Cres (2, manevar)	5
Cres(Merag)-Ri (navigacija)	256
Ri (manevar)	5
Ri (privezivanje)	2
Ri (sidrište)	720

Tablica prikazuje detaljan raspored aktivnosti broda, uključujući trajanje svake aktivnosti u minutama. Aktivnosti broda su raznovrsne i uključuju manevre, navigaciju, utovar i privezivanje. Tablica 8.1.1 jasno prikazuje operativnost broda kroz detaljno navedene aktivnosti i njihovo trajanje. Analiza ovih aktivnosti omogućava nekoliko ključnih uvida:

1. Varijabilno vrijeme utovara pokazuje sposobnost sustava da se prilagodi različitim količinama otpada koje se generiraju u različitim mjesecima. To je posebno važno za održavanje kontinuiteta operacija bez obzira na sezonske fluktuacije u količini otpada.
2. Razlike u vremenu utovara između zimskih i ljetnih mjeseci (120 minuta u siječnju i 360 minuta u kolovozu) ukazuju na sezonske varijacije u generiranju komunalnog otpada. Ove informacije su ključne za planiranje kapaciteta i resursa broda.
3. Detaljno navedeno trajanje aktivnosti omogućava precizno planiranje ruta broda. To osigurava optimizaciju vremena plovidbe, manevriranja i utovara, što može poboljšati ukupnu operativnu učinkovitost broda.
4. Kratke aktivnosti poput manevriranja, privezivanja i odvezivanja koje traju samo nekoliko minuta, omogućavaju efikasno korištenje vremena i minimiziranje zastoja tijekom operacija broda.

Kroz ovu analizu aktivnosti broda, moguće je bolje razumjeti operativne zahtjeve i izazove s kojima se brod suočava tijekom svojih ruta te pomažu u optimizaciji upravljanja vremenom i dostupnom količinom nastalog komunalnog otpada.

Ukupno trajanje aktivnosti broda izravno utječe na određivanje rute broda. Prema tablici aktivnosti, ukupno trajanje operacija broda, uključujući navigaciju, manevre, privezivanje, utovar, odvezivanje i sidrenje, iznosi manje od 48 sati. To znači da brod može završiti jednu kompletnu rutu i započeti novu svakih 48 sati, odnosno 2 dana.

## **8.2 Količina komunalnog otpada za plazma uplinjavanje**

Nadalje je potrebno odrediti omjer otpada iz kojeg će se proizvoditi gorivo i ukupno utovarenog miješanog komunalnog otpada. Ključni podaci za ovu analizu uključuju količinu nerecikliranog i osušenog otpada za siječanj i kolovoz te se nalaze u tablicama 5.1.1 i 5.1.2. Ovi podaci su ključni za izradu operativnog plana i proračuna bilance mase otpada.

Količina osušenog otpada za plazma postrojenje:

- Siječanj: 329.5 tona
- Kolovoz: 1059.2 tona

Ukupna količina nastalog komunalnog otpada:

- Siječanj: 532.8 tona
- Kolovoz: 1712.7 tona

Omjer količine osušenog otpada za plazmu i ukupne količine nerecikliranog otpada po mjesecu ključan je za izradu operativnog plana te će se koristiti kod proračuna bilance mase otpada. Izračun omjera provodi se prema sljedećim izrazima:

Omjer za siječanj:

$$Omjer_{sij} = \frac{\text{Količina osušenog otpada za plazma postrojenje}}{\text{Ukupna količina nastalog komunalnog otpada}} \cdot 100\% \quad (8.1)$$

Uvrštavanjem se dobiva sljedeća vrijednost:

$$Omjer_{sij} = \frac{329.5}{532.8} \cdot 100\% = 61,84\%$$

Omjer za kolovoz:

$$Omjer_{kol} = \frac{\text{Količina osušenog otpada za plazma postrojenje}}{\text{Ukupna količina nastalog komunalnog otpada}} \cdot 100\% \quad (8.2)$$

Uvrštavanjem se dobiva sljedeća vrijednost:

$$Omjer_{kol} = \frac{1059.2}{1712.7} \cdot 100\% = 61,84\%$$

Omjer količine osušenog otpada za plazmu u odnosu na ukupnu količinu nerekiciranog otpada za siječanj i kolovoz, iznosi 61.84%. To pokazuje stabilnost sustava za uplinjavanje otpada bez obzira na sezonske varijacije u količini otpada, odnosno, 61.84% od ukupne količine nerekiciranog otpada ulazi u plazma sustav za uplinjavanje.

### 8.3 Potrošači idejnog plovila

Ukupna potrošnja električne energije na brodu sastoji se od nekoliko ključnih komponenti koje zajedno osiguravaju učinkovit rad plovila i svih njegovih sustava. Instalirana snaga reciklažnog centra, kompresori, sustav za plazma uplinjavanje otpada, motori broda i različiti pomoćni sustavi zajedno čine ukupnu energetska potrošnju. Razumijevanje ovih potreba ključno je za planiranje energetskih resursa i osiguranje stabilnog rada broda, posebno u kontekstu obrade komunalnog otpada i proizvodnje sintetskog plina. U tablici 8.3.1 dani su podaci s pojedinim potrošačima broda te njihovim vrijednostima.

Tablica 8.3.1 Potrošači idejnog broda

UKUPNA POTROŠNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE	
INSTALIRANA SNAGA RECIKLAŽNOG POSTROJENJA	125 kW
KOMPRESORI (3X)	90 kW
SNAGA PLAZMA SUSTAVA	250 kW
SNAGA ELEKTROMORA ZA PROPULZIJU	325 kW
UREĐAJI I OPREMA BRODSKIH SUSTAVA	205,8 kW

Svi navedeni potrošači bitni su za proračun ukupnog utroška energije, a samim time i bilance energije tijekom vremena. Precizno upravljanje njihovom potrošnjom energije omogućuje optimizaciju



resursa, osigurava stabilan rad sustava i doprinosi održivosti operacija na brodu. To je ključno za postizanje ciljeva vezanih uz učinkovitost, pouzdanost i ekološku prihvatljivost broda.

#### 8.4 Proračun proizvedene energije

Proizvedena energija će ovisiti o vremenu trajanja pojedinih operacija te će se računati na sljedeći način:

$$L_{EL} = H_d \cdot m_{KO} \cdot \eta_{PL} \cdot \eta_R \cdot t_{akt} \quad \text{kWh} \quad (8.1)$$

Pri čemu vrijedi:

$L_{EL}$  – teoretski proizvedena energija u kWh

$H_d$  – donja orgjevnost u kJ/kg

$m_{KO}$  – maseni protok komunalnog otpada na mjesečnoj razini u kg/s

$\eta_{PL}$  – iskoristivost plinskog motora

$\eta_R$  – iskoristivost plazma reaktora

$t_{akt}$  – vrijeme trajanja pojedine aktivnosti broda u satima

Proizvedena količina sintetskog plina u  $m^3$  računati će se iz teoretski proizvedene energije prema sljedećem izrazu:

$$V_{PL} = \frac{L_{EL}}{\frac{H_d}{3600} \cdot \rho_{pl}} \quad m_n^3 \quad (8.2)$$

Pri čemu vrijedi:

$L_{EL}$  – teoretski proizvedena energija u  $m^3$

$V_{PL}$  – količina proizvedenog sintetskog plina u  $m_n^3$

$H_d$  – donja orgjevnost u kJ/kg

$\rho_{pl}$  – gustoća sintetskog plina u  $kg/m_n^3$

Ove formule omogućuju proračun proizvedene energije i količine sintetskog plina, što je ključno za izradu operativnog plana broda. To osigurava da svi energetske zahtjevi mogu biti zadovoljeni na održiv i efikasan način. korištenjem ovih proračuna, moguće je optimizirati korištenje resursa, minimizirati gubitke i osigurati maksimalnu iskoristivost energetskih kapaciteta. Razumijevanje potrošnje i proizvodnje energije omogućava brzu prilagodbu operativnih planova u slučaju promjena u količini otpada ili energetskim potrebama broda.

#### 8.5 Gustoća sintetskog plina

Kako bi se mogla izračunati proizvedena količina sintetskog plina iz proizvedene energije, potrebno je izračunati gustoću sintetskog plina. Podaci korišteni za proračun masenih udjela pojedinih

kemijskih elemenata su uprosječeni uzimajući podatke koji uzimaju u obzir sastav sintetskog plina [32].

Tablica 8.5.1 prikazuje podatke za proračun srednje molarne mase sintetskog plina, uključujući molarne mase i masene udjele pojedinih kemijskih spojeva:

Tablica 8.5.1 Proračun molarne mase sintetskog plina

Kemijski element	Molarna masa (g/mol)	Maseni udio	Srednja molarna masa (g/kmol)	(kg/mol)
H <sub>2</sub>	2,02	0,333	<b>20,57</b>	<b>0,021</b>
CO <sub>2</sub>	44,01	0,160		
CO	28,01	0,449		
CH <sub>4</sub>	16,04	0,018		

Iz tablice je vidljivo da je srednja molarna masa sintetskog plina izračunata kao 20,57 g/kmol, što je jednako 0,021 kg/mol. Gustoća plina može se izračunati prema jednadžbi stanja idealnog plina, koja je prikazana sljedećim izrazom:

$$p \cdot V = n \cdot \mathcal{R} \cdot T \quad (8.3)$$

Pri čemu vrijedi da je:

$$\rho_{\text{pl}} = \frac{m}{V} \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (8.4)$$

Budući da je:

$$m = n \cdot M \quad \text{kg} \quad (8.5)$$

Uređivanjem izraza se dobiva izraz za izračun gustoće sintetskog plina:

$$\rho_{\text{pl}} = \frac{p \cdot M}{\mathcal{R} \cdot T} \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (8.6)$$

Proračun gustoće sintetskog plina provest će se uz sljedeće okolišne uvjete i vrijednost srednje molarne mase:

$$p = 1 \text{ bar}$$

$$T = 288,15 \text{ K}$$

$$M = 0,021 \text{ kg/kmol}$$

Uvrštavanjem se dobiva sljedeća vrijednost gustoće sintetskog plina:

$$\rho_{\text{pl}} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 0,021}{8,314 \cdot 288,15} = 0,87 \text{ kg/m}^3$$

Izračun gustoće sintetskog plina omogućava proračun proizvedene količine plina iz proizvedene energije. Korištenjem srednje molarne mase izračunate na temelju masenih udjela pojedinih kemijskih elemenata i jednadžbe stanja idealnog plina, dobiva se vrijednost gustoće koja je ključna za daljnje

proračune i operativno planiranje. Ovaj pristup osigurava točnost i pouzdanost u procjeni bilance plina tijekom obrade otpada pomoću plazma sustava.

### **8.6 Prikaz operativnog plana**

Tablice 8.6.1 i 8.6.2 prikazuju operativni plan, energetske bilance i bilance plina za siječanj i kolovoz. Utrošak energije uključuje ukupnu snagu potrebnu za rad svih sustava na brodu, s ukupnim utroškom energije tijekom jednog ciklusa u siječnju od 17516,9 kWh, dok u kolovozu iznosi 31095,7 kWh. Teoretski proizvedena energija u siječnju je 44657 kWh, a u kolovozu 143540 kWh. Proizvodnja energije umanjena za potrošnju iznosi 27140,1 kWh u siječnju i 112444,8 kWh u kolovozu. Bilanca energije tijekom vremena pokazuje akumulaciju energije, dosežući 23273,9 kWh u siječnju i 112444,8 kWh u kolovozu. Proizvodnja plina iz otpada u siječnju iznosi 8689,8 m<sup>3</sup>, a u kolovozu 27931,6 m<sup>3</sup>, s proizvodnjom plina po satu od 506,7  $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  u siječnju i 744,8  $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  u kolovozu. Potrošnja plina tijekom ciklusa je 3408,6 m<sup>3</sup> u siječnju i 6050,9 m<sup>3</sup> u kolovozu, dok bilanca plina na kraju ciklusa iznosi 10281,2 m<sup>3</sup>, u siječnju i 21880,7 m<sup>3</sup>, u kolovozu. Analiza pokazuje da sustav učinkovito upravlja sezonskim varijacijama u količini otpada, održavajući visoku energetska efikasnost i pozitivnu bilancu plina tijekom cijele godine. To osigurava kontinuiran rad sustava tijekom cijele godine, pridonoseći održivom gospodarenju komunalnom otpadom.

## 9. PROCJENA KOLIČINE DOBIVENE ENERGIJE POMOĆU PLAZMA SUSTAVA ZA UPLINJAVANJE KOMUNALNOG OTPADA

### 9.1 Proračun gornje ogrjevne vrijednosti

Nakon proračunatih ukupnih dnevnih, tjednih i mjesečnih količina miješanog komunalnog otpada, može se proračunati gornja ogrjevna vrijednost koju sadržava komunalni otpad. Za proračun ogrjevne vrijednosti komunalnog otpada bitan je kemijski sastav pojedinih frakcija komunalnog otpada koje bi se koristile u plazma sustavu za uplinjavanje otpada. Prije prikaza kemijskog sastava pojedinih frakcija komunalnog otpada, u tablici 9.1.1 bit će prikazana raspodjela tih frakcija, njihovi udjeli te informacija o tome hoće li određena frakcija biti obrađena u plazma sustavu uplinjavanja ili sustavu recikliranja.

*Tablica 9.1.1 Prikaz sastava komunalnog otpada*

Komponenta	Maseni udio (%)	Namijenjeno plazma sustavu
Plastika	6,43	Ne
Papir i karton	4,71	Ne
Staklo	10,62	Ne
Metal	0,94	Ne
Tekstil i odjeća	0,22	Da
Drvo	1,18	Da
Koža i guma	0,33	Da
Kuhinjski otpad	2,15	Da
Ostali otpad	73,42	Da

Iz tablice 9.1.1 je vidljivo da će u plazma sustav za uplinjavanje komunalnog otpada ulaziti tekstil i odjeća, drvo, koža i guma, kuhinjski otpad i ostali otpad koji čini većinski dio ukupne količine nastalog komunalnog otpada. Ukupna količina komunalnog otpada koja bi se koristila u plazma sustavu za uplinjavanje bi iznosila 77,3%. S druge strane vidljive su frakcije komunalnog otpada koje bi se reciklirale i balirale, te kao takve iskrcavale u luku Rijeka te dalje prevozile do županijskog centra za gospodarenje otpadom “Marišćina”, te ukupna količina iznosi 22,7% ukupno nastalog komunalnog otpada.

Kako je prethodno navedeno, ogrjevna vrijednost ovisi o kemijskom sastavu pojedinih frakcija komunalnog otpada. Kemijski sastav pojedinih frakcija miješanog komunalnog prikazan je u tablici 9.1.2.

Tablica 9.1.2 Kemijski sastav pojedinih frakcija miješanog komunalnog otpada

Komponenta	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Plastika	77	9,7	9,4	2,3	0,1
Papir i karton	52	7	40	0,4	0,1
Staklo	0,5	0,1	0,4	0,1	0
Metal	4,5	0,6	4,3	0	0
Tekstil i odjeća	54	5,8	1,7	0,2	38
Drvo	52	6,1	41	1,1	0,2
Koža i guma	65	11	15	7,1	1,9
Kuhinjski otpad	50	6,5	42	1,5	0,2
Ostali otpad	52	6,3	40	3	1,2

Kao što je prikazano u tablici 9.1.2, tekstil sadrži visok udio ugljika i sumpora, dok su udjeli vodika i kisika nešto manji, a dušik je prisutan u vrlo malim količinama. Iako sumpor nije pogodan za izgaranje, tekstil sadrži značajne količine ugljika, vodika i kisika, koji su ključni za proračun ogrjevne vrijednosti. Papir i karton, drvo, kuhinjski otpad i ostali otpad sadrže visoke udjele ugljika i kisika, dok je udio vodika, a dušik i sumpor su prisutni u vrlo malim količinama. Plastika, koža i guma sadrže vrlo visoke udjele ugljika, dok su udjeli vodika i kisika nešto niži. Dušik je prisutan u znatno većim količinama u koži i gumi, oko 7%, dok sumpor postoji u vrlo malim količinama u obje frakcije. Staklo i metal sadrže vrlo male udjele ugljika, vodika i kisika, elemenata koji najviše doprinose ogrjevnoj vrijednosti te ih nema potrebe uzimati u obzir kod proračuna prosječne ogrjevne vrijednosti miješanog komunalnog otpada. Dušik i sumpor su gotovo potpuno odsutni u ovim materijalima.

Gornja ogrjevna vrijednost bit će izračunata kao prosječna vrijednost svih frakcija miješanog komunalnog otpada. Taj proračun temeljit će se na zasebnim ogrjevnim vrijednostima pojedinih frakcija otpada, količinama svake frakcije te korištenju više odgovarajućih izraza radi postizanja preciznije aproksimacije rezultata.

Za proračun ogrjevne vrijednosti korištene su tri korelacije te je na temelju njih izračunata prosječna ogrjevna vrijednost [26], [27], [28], [27], [30], [31], [32].

Izraz za izračun gornje ogrjevne vrijednosti prema [26] glasi::

$$H_g = 416,638 \cdot C + 570,01 \cdot H + 259,031 \cdot O + 598,955 \cdot N - 5829,078 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (9.1)$$

gdje je:

$C$  - udio ugljika u gorivoj tvari u %

$H$  - udio vodika u gorivoj tvari u %

$O$  – udio kisika u gorivoj tvari u %

$N$  – udio dušika u gorivoj tvari u %

Rezultati u tablici 9.1.3 dobiveni pomoću formule 9.1 i podataka iz tablice 9.1.2.

Tablica 9.1.3 Ogrjevna vrijednost prema [26]

Komponenta	Gornja ogrjevna vrijednost (kJ/kg)
Plastika	24535
Papir i karton	22447
Staklo	
Metal	
Tekstil i odjeća	13923
Drvo	23638
Koža i guma	23120
Kuhinjski otpad	23075
Ostali otpad	24403

Iz tablice 9.1.3 može se zaključiti da sve frakcije, osim tekstila i odjeće imaju podjednake ogrjevne vrijednosti. Razlog ovoj razlici leži u činjenici da izraz 9.1.1 uzima u obzir samo udjele ugljika, vodika, kisika i dušika pri proračunu ogrjevne vrijednosti, dok se sumpor ne uzima u obzir. Budući da tekstil sadrži oko 38% sumpora, značajan dio njegove mase ne doprinosi ogrjevnoj vrijednosti. Stoga je ogrjevna vrijednost tekstila znatno niža u usporedbi s ostalim frakcijama otpada.

Izraz za izračun gornje ogrjevne vrijednosti prema [27] glasi:

$$H_g = 0,349 \cdot C + 1,01 \cdot H - 0,174 \cdot N + 0,886 \cdot S - 0,0812 \cdot O \quad \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad (9.2)$$

gdje je:

$C$  - udio ugljika u gorivoj tvari u %

$H$  - udio vodika u gorivoj tvari u %

$O$  – udio kisika u gorivoj tvari u %

$N$  – udio dušika u gorivoj tvari u %

$S$  – udio vodika u gorivoj tvari u %

U tablici 9.1.4 prikazani su rezultati dobiveni pomoću izraza 9.2 i podataka iz tablice 9.1.2.

*Tablica 9.1.4 Ogrjevna vrijednost prema [27]*

Komponenta	Gornja ogrjevna vrijednost (kJ/kg)
Plastika	35595
Papir i karton	21989
Staklo	
Metal	
Tekstil i odjeća	58199
Drvo	20966
Koža i guma	33025
Kuhinjski otpad	20521
Ostali otpad	21804

Iz tablice 9.1.4 vidljivo je kako najveću ogrjevnu vrijednost ima tekstil i odjeća. Razlog tome je što formula za proračun ogrjevne vrijednosti uzima u obzir i sadržaj sumpora. Sve ostale frakcije osim plastike i kože i gume imaju slične vrijednosti te ne odstupaju previše od ogrjevne vrijednosti izračunate prema izrazu 9.1.1. Plastika kao i koža i guma u ovom slučaju imaju visoke ogrjevne vrijednosti zbog velikih masenih udjela ugljika i vodika.

Izraz za izračun gornje ogrjevne vrijednosti prema [28] glasi:

$$H_g = 0,3517 \cdot C + 1,1626 \cdot H - 0,1047 \cdot S - 0,111 \cdot O \quad \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad (9.3)$$

gdje je:

$C$  - udio ugljika u gorivoj tvari u %

$H$  - udio vodika u gorivoj tvari u %

$O$  – udio kisika u gorivoj tvari u %

$S$  – udio sumpora u gorivoj tvari u %

U tablici 9.1.5 prikazani su rezultati dobiveni pomoću izraza 9.3 i podataka iz tablice 9.1.2.

Tablica 9.1.5 Ogrjevna vrijednost prema [28]

Komponenta	Gornja ogrjevna vrijednost (kJ/kg)
Plastika	37304
Papir i karton	21976
Staklo	
Metal	
Tekstil i odjeća	21568
Drvo	20808
Koža i guma	33785
Kuhinjski otpad	20459
Ostali otpad	21047

Prema tablici 9.1.5, plastika, koža i guma imaju najveću ogrjevnu vrijednost, dok ostale frakcije pokazuju slične ogrjevne vrijednosti i ne odstupaju značajno od rezultata dobivenih drugim formulama. Iznimka je tekstil i odjeća, čija ogrjevna vrijednost prema formuli 9.2 odstupa zbog visokog udjela sumpora, pošto formula uzima u obzir prisutnost sumpora.

Za određivanje prosječne gornje ogrjevne vrijednosti miješanog komunalnog otpada, kako je i prethodno spomenuto koristiti će se tekstil i odjeća, drvo, koža i guma, kuhinjski otpad i ostali otpad, pošto će se ostale frakcije reciklirati. Uzimanjem prosječnih vrijednosti svake od navedenih frakcija proračunatih pomoću gore navedenih izraza, dobiva se sljedeća prosječna gornja ogrjevna vrijednost komunalnog otpada:

$$H_g = 22437 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Kako je otprije poznato donja ogrjevna vrijednost uzima u obzir stvarno dostupnu energiju, nakon što voda nastala izgaranjem ispari, odnosno ne uzima u obzir latentnu toplinu kondenzacije. Razlika između gornje i donje ogrjevne vrijednosti se može izračunati pomoću formule 9.4 na sljedeći način:

$$H_g - H_d = 2500(9m_H - m_W) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (9.4)$$

Iz izraza (9.4) može se izračunati donja ogrjevna vrijednost komunalnog otpada te slijedi da je:

$$H_d = H_g - 2500(9m_H - m_W) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (9.5)$$

Kako je vidljivo iz izraza 9.5 potrebno je poznavati udjele vodika i vlage u komunalnom otpadu..

Kako je prethodno navedeno, pretpostavka je da se komunalni otpad suši s pretpostavljene vrijednosti od 30% na 10% što znači da je sadržaj vlage jednak 0,1.



Sadržaj vodika je izračunat koristeći kemijski sastav frakcija komunalnog otpada koje bi se odvodile u plazma sustav za uplinjavanje, podatke o ukupnoj količini nastalog komunalnog otpada te pomoću proračunatih količina pojedinih frakcija.

$$m_W = 10 \% = 0,1$$

$$m_H = 6,3 \% = 0,063$$

Pomoću navedenih masenih udjela može se dobiti donja ogrjevna vrijednost prema izrazu 9.1.5, te iznosi:

$$H_d = 22436,5 - 2500(9 \cdot 0,063 - 0,1) = 21264 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Izračunata donja ogrjevna vrijednost iznosi 21264 kJ/kg, što je prilično visoko s obzirom na to da se radi o komunalnom otpadu. Ova visoka ogrjevna vrijednost omogućava da se takav otpad koristi na različite načine. Konkretno, može se koristiti kao gorivo u plinskim motorima, čime se smanjuje potrošnja fosilnih goriva. Osim toga, visoka ogrjevna vrijednost čini otpad pogodnim za proizvodnju električne energije.

## 9.2 Procjena proizvedene električne energije

Nakon određivanja donje ogrjevne vrijednosti, može se pristupiti proračunu koji procjenjuje količine proizvedene električne energije. Ovaj proračun temelji se na donjoj ogrjevnoj vrijednosti sintetskog plina, količini osušenog recikliranog komunalnog otpada pripremljenog za uplinjavanje u plazma sustavu te iskoristivosti plinskog motora od 25%. Ova iskoristivost uzima u obzir gubitke topline tijekom uplinjavanja, nisku ogrjevnju vrijednost otpada, gubitke pri pročišćavanju sintetskog plina i relativno malu snagu postrojenja. Rezultati ovog će pomoći kod optimizacije cjelokupnog procesa i određivanja limita cjekupnog sustava kada se govori o maksimalnoj i minimalnoj količini nastalog komunalnog otpada koji bi se mogao obraditi u takvom sustavu.

Proračun se provodi za siječanj i kolovoz jer je važno utvrditi može li količina miješanog komunalnog otpada, koji se koristi za proizvodnju sintetskog plina, zadovoljiti energetske potrebe broda i njegovih sustava u mjesecu s najmanjom količinom otpada, kao i obraditi najveću količinu otpada nastalu u mjesecu s najvećom masom i volumenom otpada.

Za proračun proizvedene električne energije koristit će se sljedeći izraz:

$$L_{EL} = H_d \cdot m_{KO} \cdot \eta_{PL} \cdot \eta_R \cdot t_{akt} \quad \text{kWh} \quad (9.6)$$

$H_d$  – donja orgjevna vrijednost (kJ/kg)

$m_{KO}$  – maseni protok komunalnog otpada na mjesečnoj razini (kg/s)

$\eta_{PL}$  – iskoristivost plinskog motora pri čemu su uzeti i gubici u obzir

$\eta_R$  – iskoristivost plinskog reaktora

Navedeni parametri imaju sljedeće vrijednosti:

$$H_d = 21264 \text{ kJ/kg}$$

$$m_{KO-sij} = 0,557 \text{ kg/s}$$

$$\eta_{PL} = 0,25$$

$$\eta_R = 0,88$$

Prema prethodno prikazanim podacima u tablici 5.1.1, količina otpada za jedan ciklus u siječnju iznosi 34,37 tona. Na temelju toga, izračunat je maseni protok komunalnog otpada kroz plazma sustav za uplinjavanje.

Snaga koju bi motor mogao proizvesti, prema masenom protoku otpada u siječnju izračunata je prema izrazu 9.6 i iznosi:

$$L_{EL-S} = 21264 \cdot 0,557 \cdot 0,25 \cdot 0,88 = 2604 \text{ kW}$$

Nadalje, potrebno je odrediti ukupnu proizvedenu količinu električne energije za jedan ciklus broda, koji, kako je navedeno u inicijalnim pretpostavkama, traje dva dana. Kako je prikazano u poglavlju 8.4, ukupno trajanje rute broda za obavljanje svih aktivnosti u siječnju, uz količinu otpada od 34,4 tone po ciklusu, iznosi 17,15 sati.

$$L_{S-ciklus} = L_{EL-S} \cdot 17,15 = 2604 \cdot 17,15 = 44657 \text{ (kWh)} \cong 44,7 \text{ MWh} \quad (9.7)$$

Također, potrebno je izračunati ukupnu količinu električne energije koja bi se proizvela u siječnju, uzimajući u obzir ukupno 15,5 ciklusa, odnosno 266 sati, a izračunati će se prema sljedećem izrazu:

$$L_S = L_{EL-S} \cdot 266 = 2604 \cdot 266 = 692184 \text{ (kWh)} \cong 692 \text{ MWh} \quad (9.8)$$

Potom je potrebno odrediti ukupnu količinu električne energije koja bi se proizvela za jedan ciklus broda u kolovozu, koji prema inicijalnim pretpostavkama traje dva dana. Prema podacima iz poglavlja 7, ukupno trajanje svih aktivnosti broda u kolovozu, s količinom otpada od 110,5 tona po ciklusu broda, iznosi 37,5 sati.

Vrijedi:

$$H_d = 21264 \text{ kJ/kg}$$

$$m_{KO-kol} = 0,818 \text{ kg/s}$$

$$\eta_{PL} = 0,25$$

$$\eta_R = 0,88$$

Snaga koju bi motor mogao proizvesti, prema masenom protoku otpada u kolovozu izračunata je prema izrazu 9.6 i iznosi:

$$L_{EL-K} = 21264 \cdot 0,818 \cdot 0,25 \cdot 0,88 = 3828 \text{ kW}$$

Prema istim postavkama kao u siječnju, ciklus broda u kolovozu također traje 48 sati, na temelju čega će se izračunati proizvedena električna energija za jedan ciklus. Također će se izračunati ukupna količina električne energije koja bi se proizvela u kolovozu, uzimajući u obzir da kolovoz ima 15,5 brodskih ciklusa, odnosno ukupno 581 sati.

$$L_{K-ciklus} = L_{EL-K} \cdot 37,5 = 3828 \cdot 37,5 = 143541 \text{ kWh} \cong 144 \text{ MWh} \quad (9.9)$$

Uz to, potrebno je izračunati ukupnu količinu proizvedene električne energije u siječnju, uzimajući u obzir ukupno 15,5 ciklusa ili 581 sati. Izračun će se provesti prema sljedećem izrazu:

$$L_K = L_{EL-K} \cdot 581 = 3828 \cdot 581 = 2224877 \text{ kWh} \cong 2225 \text{ MWh} \quad (9.10)$$

Velike razlike u mogućnosti proizvodnje električne energije između siječnja i kolovoza su jasno vidljive, što je i očekivano s obzirom na značajnu razliku u ukupnim nastalim količinama miješanog, prethodno recikliranog komunalnog otpada. Ova razlika u količinama otpada izravno utječe na masene protoke komunalnog otpada za navedene mjesece, što rezultira varijacijama u proizvodnji električne energije. Siječanj, s manjom količinom otpada, ima manju snagu koju motor može osigurati, dok kolovoz, s većom količinom otpada, omogućava veću snagu motora.

### 9.3 Analiza osjetljivosti

Kako bi se razumjela ograničenja koje bi idejno plovilo moglo postići u smislu minimalne količine nastalog i pripremljenog komunalnog otpada potrebne za proizvodnju dostatne količine sintetskog plina i električne energije, odnosno funkcioniranje cjelokupnog sustava, kao i maksimalne količine otpada koju bi brod mogao obraditi tijekom jednog ciklusa ili mjeseca, potrebno je provesti analizu osjetljivosti.

Potrebno je utvrditi moguće minimume i maksimume komunalnog otpada koje je moguće obraditi na brodu te ostale parametre koji utječu na proizvodnju goriva odnosno sintetskog plina i električne energije. Primjerice, potrebno je istražiti kako promjena količine pojedinih frakcija otpada, uz nepromijenjenu ukupnu količinu otpada koji se odvodi u plazma sustav za uplinjavanje, utječe na gornju i donju ogrjevnu vrijednost. Također, važno je utvrditi kako te promjene utječu na proizvodnju električne energije.

Analiza osjetljivosti pomoći će u optimizaciji sustava, odnosno operativnog procesa, kroz ispitivanje različitih scenarija količina pojedinih frakcija otpada. Ovo će osigurati da brod može učinkovito funkcionirati u uvjetima varijabilnih količina komunalnog otpada, proizvoditi energiju i osigurati stabilnost sustava kroz cijelu godinu. Kroz ovu analizu, također će se moći bolje predvidjeti moguće

izazove i prilagoditi strategiju za upravljanje otpadom i energijom kako bi se postigla optimalna učinkovitost i održivost broda.

### 9.3.1 Promjena ogrjevnosti vrijednosti

Za početak prikazati će se kako promjena ogrjevnosti vrijednosti utječe na ukupnu proizvodnju energije. Analiza uzima u obzir smanjenje ogrjevnosti vrijednosti između 5 i 50 posto u koracima od 5% kako bi se provjerilo na koji način će se mijenjati količina proizvedene energije. Također, na taj način će se utvrditi minimalna ogrjevnost koja je potrebna kako bi se proizvodila dostatna količina električne energije za pogon broda i njegovih sustava.

*Tablica 9.3.1.1 Proizvodnja energije kod promjene ogrjevnosti vrijednosti*

Trenutna ogrjevnost (kJ/kg)	Promjena u [%]	Nova ogrjevnost (kJ/kg)	Proizvedena energija u siječnju (MW)	Proizvedena energija po ciklusu kretanja broda u siječnju (MW)	Proizvedena energija u kolovozu (MW)	Proizvedena energija po ciklusu kretanja broda u kolovozu (MW)
<b>22437</b>	0%	22436	452	29	1452	94
	5%	21315	429	28	1380	89
	10%	20193	407	26	1307	84
	15%	19071	384	25	1234	80
	20%	17949	361	23	1162	75
	25%	16827	339	22	1089	70
	30%	15706	316	20	1017	66
	35%	14584	294	19	944	61
	40%	13462	271	17	871	56
	45%	12340	248	16	799	52
	50%	11218	226	15	726	47

Iz tablice 9.3.1 iznad vidljivo je kako se proizvodnja energije mijenja linearno u odnosu na linearnu postotnu promjenu ogrjevnosti što je bilo i očekivano. Ukupni utrošak električne energije po ciklusu broda u siječnju iznosio bi oko 17,5 MWh što znači da bi promjena ogrjevnosti iznad 35% uzrokovala proizvodnju nedovoljne količine električne energije da se pokriju sve aktivnosti broda.

Nadalje, potrebno je odrediti minimalnu ogrjevnost koju bi miješani komunalni otpad trebao imati kako bi se proizvela dostatna količina energije za plovidbu broda u siječnju i u kolovozu.

### 9.3.2 Promjena pojedine frakcije u postocima

Za analizu osjetljivosti nadalje se razmatra utjecaj promjene masenih udjela pojedinih frakcija komunalnog otpada na ukupnu proizvodnju električne energije. Svaka frakcija otpada se u analizi

uzima u obzir s masenim udjelom od 20%, dok se količina frakcije ostalog otpada proporcionalno prilagođava kako bi ukupna masena količina otpada ostala nepromijenjena.

Kao polazna točka, koristi se trenutna raspodjela frakcija otpada uzeta prema [10], koja se zatim modificira tako da svaka frakcija pojedinačno čini 20% ukupne količine otpada. Na temelju podataka danih u tablicama 9.3.2.1 i 9.3.2.2 ispod provedena je analiza koja uzima u obzir kako promjena udjelu svake frakcije utječe na sljedeće parametre:

1. Ogrjevnju vrijednost (kJ/kg): vrijednost koja pokazuje koliko energije se može dobiti spaljivanjem jednog kilograma otpada.
2. Proizvedenu električnu energiju na mjesečnoj razini (MW): količina električne energije proizvedena u siječnju i kolovozu u megavatima.
3. Proizvedenu električnu energiju po ciklusu broda (kW): količina električne energije proizvedena tijekom jednog ciklusa obrade otpada na brodu u siječnju i kolovozu u kilovatima.

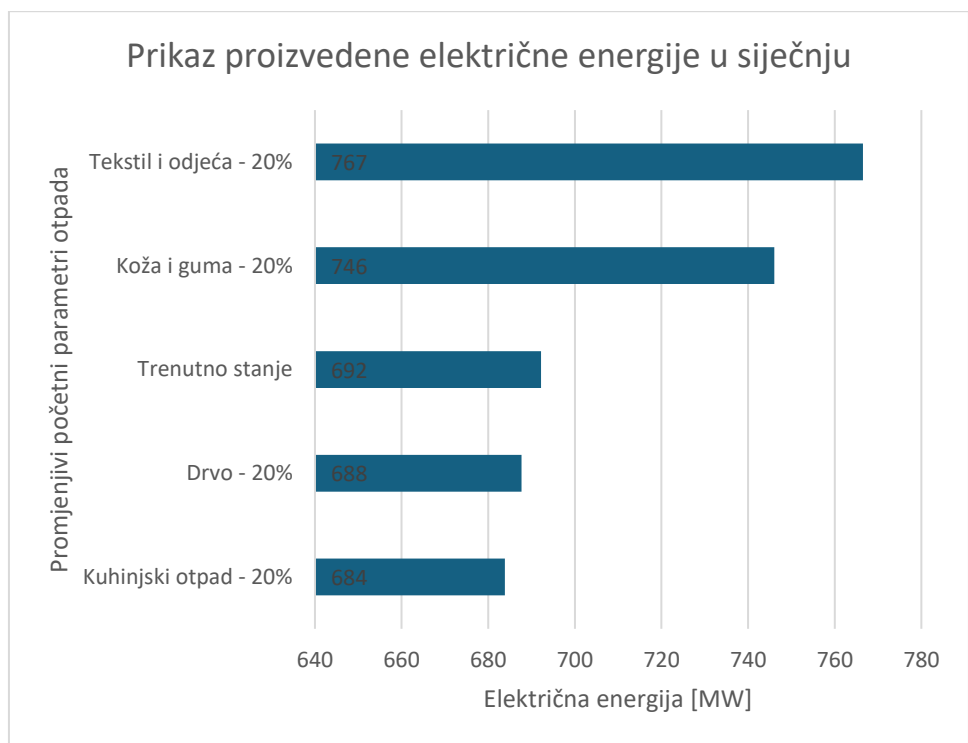
*Tablica 9.3.2.1 Utjecaj promjene ulaznih parametara na proizvodnju energije u siječnju*

Siječanj	Maseni udio pojedine frakcije otpada (%)	Ogrjevna vrijednost (kJ/kg)	Proizvedena el. energija u siječnju (MW)	Proizvedena el. energija za 1 ciklus brod (kW)
	<b>Kuhinjski otpad - 20%</b>	22190	684	44118
	<b>Drvo - 20%</b>	22287	688	44366
	<b>Trenutno stanje</b>	22436	692	44657
	<b>Koža i guma - 20%</b>	24360	746	48131
	<b>Tekstil i odjeća - 20%</b>	24691	767	49453

*Tablica 9.3.2.2 Utjecaj promjene ulaznih parametara na proizvodnju energije u kolovozu*

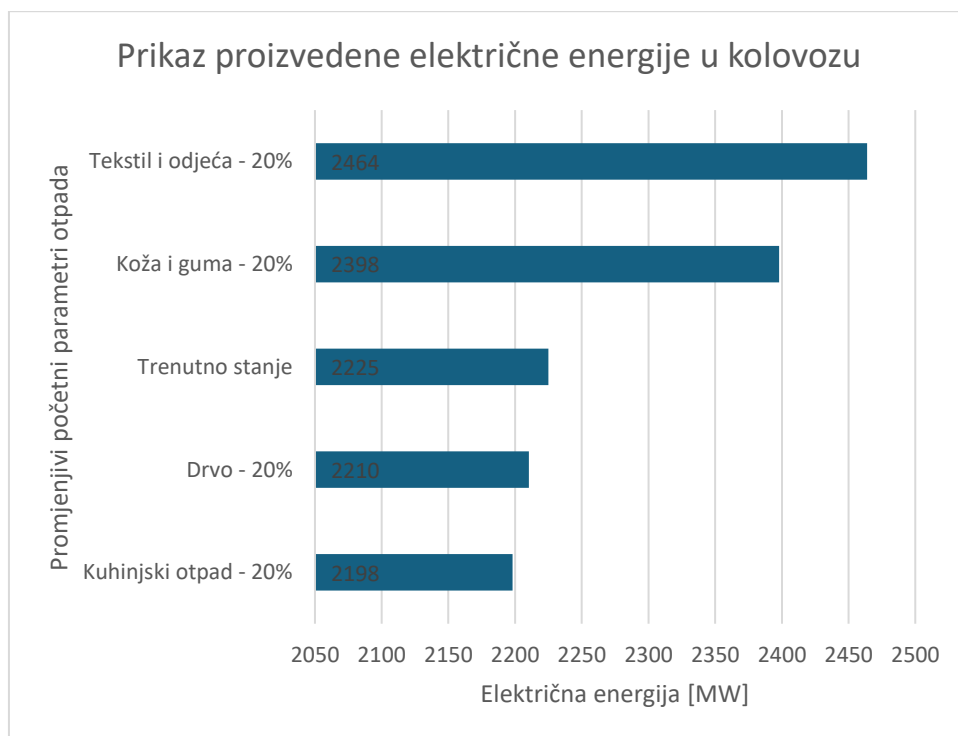
Kolovoz	Maseni udio pojedine frakcije otpada (%)	Ogrjevna vrijednost (kJ/kg)	Proizvedena el. energija u siječnju (MW)	Proizvedena el. energija za 1 ciklus brod (kW)
	<b>Kuhinjski otpad - 20%</b>	22190	2198	141808
	<b>Drvo - 20%</b>	22287	2210	142605
	<b>Trenutno stanje</b>	22436	2225	143540
	<b>Koža i guma - 20%</b>	24360	2398	154708
	<b>Tekstil i odjeća - 20%</b>	24691	2464	158956

Za bolje razumijevanje utjecaja promjene pojedinih frakcija otpada na proizvodnju električne energije, izrađeni su grafovi koji prikazuju razlike proizvedene električne energije na razini mjeseca, odnosno za mjesec siječanj i kolovoz koji su prikazani na slikama 9.3.2.1 i 9.3.2.2.



*Slika 9.3.2.1 Proizvedena električna energija u siječnju*

Slika 9.3.2.1 iznad pokazuje količinu proizvedene električne energije u siječnju za različite masene udjele pojedinih frakcija otpada. Ovo omogućuje usporedbu energetske učinkovitosti različitih frakcija otpada tijekom siječnja. Zimski mjeseci često zahtijevaju više toplinske, a s time i električne energije, pa je razumijevanje kako različite frakcije doprinose ukupnoj proizvodnji energije ključno za optimizaciju sustava. Na temelju podataka iz grafova, tekstil i odjeća pokazuju najvišu proizvodnju električne energije, dok kuhinjski otpad ima najnižu proizvodnju, što ukazuje na značaj udjela visokoenergetskih frakcija u otpadu.



*Slika 9.3.2.2 Proizvedena električna energija u kolovozu*

Slika 9.3.2.2 prikazuje količinu proizvedene električne energije u kolovozu za različite masene udjele pojedinih frakcija otpada. Ovaj graf omogućuje usporedbu energetske učinkovitosti različitih frakcija otpada tijekom kolovoza. Ljetni mjeseci mogu imati različite energetske zahtjeve, često povezane s hlađenjem. Promjene u sastavu otpada mogu značajno utjecati na proizvodnju energije. Tekstil i odjeća, kao frakcije s visokim udjelom energije, pokazuju najveću proizvodnju električne energije, dok kuhinjski otpad opet ima najnižu proizvodnju što je bilo i očekivano.

Promjena masenog udjela pojedinih frakcija otpada značajno utječe na ukupnu proizvodnju električne energije. Najveći doprinos u povećanju proizvodnje električne energije daje frakcija tekstila i odjeće, a nešto manje utjecaj imaju koža i guma. Kuhinjski otpad kao i drvo imaju negativan utjecaj na proizvodnju električne energije, odnosno proizvodnja se smanjuje povećanjem masenih udjela spomenutih frakcija. Ovi rezultati sugeriraju da optimizacija procesa upravljanja otpadom može značajno poboljšati energetske učinkovitost broda, posebice kroz povećanje udjela visokoenergetskih frakcija kao što su tekstil i odjeća te smanjenje udjela frakcija s niskom ogrjevnom vrijednošću kao što je kuhinjski otpad. Kroz detaljnu analizu osjetljivosti, sustav se može prilagoditi kako bi se postigla maksimalna učinkovitost i održivost.

### 9.3.3 Maksimalna i minimalna količina otpada koja se može obraditi u sustavu

Kao dio analize osjetljivosti obuhvaća se i utvrđivanje granica kapaciteta obrade komunalnog otpada u sustavu za uplinjavanje plazmom na brodu, s naglaskom na maksimalne i minimalne količine otpada. Razumijevanje ovih granica ključno je za osiguranje učinkovite operativnosti sustava i optimalne proizvodnje energije, kao i utvrđivanje limita cjelokupnog sustava.

Maksimalna količina otpada koju sustav može obraditi određena je kapacitetom sustava za uplinjavanje plazmom i trajanjem rute broda. Kapacitet sustava iznosi 3 tone otpada po satu, a prosječna ruta broda traje 48 sati. To znači da se maksimalna količina otpada koju brod može obraditi tijekom jedne rute može izračunati prema sljedećem izrazu:

$$m_{\max} = \text{Kapacitet sustava} \frac{t}{h} \cdot \text{Trajanje rute } h \quad (9.11)$$

te se uvrštavanjem dobiva sljedeća vrijednost:

$$m_{\max} = 3 \cdot 48 = 144 \text{ t}$$

Ovaj izračun pokazuje da je sustav sposoban obraditi do 144 tone otpada tijekom jedne rute. Maksimalna količina otpada od 144 tone po ruti omogućuje punu iskorištenost kapaciteta sustava i maksimalnu proizvodnju energije. Prema podacima iz poglavlja 4.3, količina nastalog miješanog komunalnog otpada u kolovozu iznosila je 110,5 tona po jednom ciklusu broda. Višak komunalnog otpada koji postrojenje može obraditi u jednom ciklusu plovidbe iznosio bi približno 43,5 tona, što je prikazano postotcima u izrazu 9.3.3.2 ispod:

$$m_{\text{povećanje-postotak}} = \left(1 - \frac{110,5}{144}\right) \cdot 100\% = 23,3\% \quad (9.12)$$

Povećanje količine otpada s trenutne maksimalne količine od 110,5 tona na maksimalni kapacitet sustava od 144 tone predstavlja porast od 33,5 tona, što predstavlja mogućnost povećanja nastalog komunalnog otpada od približno 23,3%. Ovaj značajni porast u kapacitetu obrade otpada ukazuje na fleksibilnost sustava i njegovu sposobnost prilagodbe na veće količine otpada, što je ključno za osiguranje održivosti operacija tijekom intenzivnijih perioda generiranja otpada kao što je ljetni period.

Za izračun minimalne količine otpada potrebne za pokrivanje ukupnog utroška energije broda od oko 18000 kWh, uzimaju se u obzir sljedeći podaci:

- Donja ogrjevna vrijednost otpada:  $H_d = 21264 \text{ kJ/kg}$
- Iskoristivost plinskog postrojenja:  $\eta_{PL} = 0,25$
- Iskoristivost reaktora za spaljivanje otpada:  $\eta_R = 0,88$



- Maseni protok komunalnog otpada za rutu broda u siječnju:  $m_{KO} = 0,556 \text{ kg/s}$

Minimalna količina otpada za pokrivanje utroška energije za propulziju broda i njegove sustave računa se prema sljedećem izrazu:

$$m_{\min} = \frac{L_{uk}}{H_d \cdot \eta_{PL} \cdot \eta_R} = \frac{18000 \cdot 3600}{21264 \cdot 0,25 \cdot 0,88} = 13851 \text{ kg} \cong 14 \text{ t} \quad (9.13)$$

Iz izraza (9.13) je vidljivo da potrebna količina miješanog komunalnog otpada za pokrivanje gubitaka od 18 MWh iznosi oko 14 tona otpada. Nadalje će se usporediti minimalna potrebna količina miješanog komunalnog otpada za pokrivanje svih sustava broda s količinom otpada koja nastaje na ruti broda u siječnju. Time će se utvrditi kolika količina otpada može biti smanjena u siječnju, a da plovilo i dalje funkcionira bez potrebe za dodatnim gorivom za izgaranje.

Razlika između nastale količine otpada od 34,4 tone i minimalno potrebne količine otpada od 14 tona iznosi 20,4 tone. Ta razlika će biti prikazana u postotcima sljedećim izrazom:

$$m_{\text{smanjenje-postotak}} = \left(1 - \frac{14}{34,4}\right) \cdot 100\% = 59,3\% \quad (9.14)$$

Izrazom (9.14) utvrđeno je da se količina otpada u siječnju može smanjiti za 59,3%, a da sustav i dalje funkcionira bez potrebe za dodatnim gorivom izvan nastalog komunalnog otpada.

Razumijevanje granica maksimalne i minimalne količine otpada ključni je aspekt za optimizaciju sustava obrade otpada i proizvodnje energije na brodu. Izračun maksimalne i minimalne količine otpada omogućuje stabilan i učinkovit rad sustava, prilagođavajući operacije različitim scenarijima količina otpada. Analiza osjetljivosti provedena na maksimalnim i minimalnim količinama komunalnog otpada pokazala je ključne uvide u operativnu fleksibilnost i energetska učinkovitost sustava obrade otpada na brodu. Ovo osigurava učinkovito funkcioniranje broda u uvjetima varijabilnih količina komunalnog otpada, omogućujući stabilnu proizvodnju energije tijekom cijele godine.

## 10. PROCJENA KOLIČINE RECIKLIRANOG MATERIJALA I PEPELA

Tablice 10.1 i 10.2 prikazuju isporuku baliranih reciklabilnih frakcija i zaostalog otpada (pepela) nakon jednog ciklusa prikupljanja i obrade u siječnju i kolovozu. Ovi podaci su ključni za razumijevanje količina recikliranog materijala i pepela koji će se generirati nakon obrade komunalnog otpada na brodu.

*Tablica 10.1 Isporuka recikliranog materijala i pepela u siječnju*

Materijal	Siječanj (t)	Jedan ciklus (t)
Metal	5,0	0,3
Papir	25,1	1,6
Staklo	56,6	3,6
Plastika	34,3	2,2
Pepeo	15,9	1,1
<b>UKUPNO</b>	<b>136,9</b>	<b>8,9</b>

*Tablica 10.2 Isporuka recikliranog materijala i pepela u kolovozu*

Materijal	Siječanj (t)	Jedan ciklus (t)
METAL	16,1	1,0
PAPIR	80,7	5,2
STAKLO	181,9	11,7
PLASTIKA	110,1	7,1
PEPEO	51,3	3,4
<b>UKUPNO</b>	<b>440,0</b>	<b>28,5</b>

Iz tablica je vidljivo da se količine recikliranih materijala i pepela značajno razlikuju između siječnja i kolovoza. U siječnju je ukupna isporuka 136,9 tona otpada, dok je u kolovozu ova količina znatno veća, iznosi 440,0 tona. Ove razlike mogu biti posljedica sezonskih varijacija u generiranju otpada na otocima, s većim količinama otpada tijekom ljetnih mjeseci kada je povećana turistička aktivnost.

Količine pojedinih materijala također variraju između mjeseci. Na primjer, količina papira u siječnju iznosi 25,1 tonu, dok u kolovozu iznosi 80,7 tona. Slične razlike u količinama mogu se primijetiti za staklo, plastiku i pepeo. Ove informacije su ključne za planiranje logistike isporuke recikliranog materijala, kao i za kapacitete reciklažnih postrojenja.

Nakon obrade otpada u plazma sustavu, generira se višak sintetskog plina u siječnju i kolovozu kao što je vidljivo u tablicama 8.6.1 i 8.6.2. Višak sintetskog plina skladištiti će se u tlačnim posudama pod tlakom od 300 bar smještenim u standardnim kontejnerima veličine 20 ft. Broj kontejnera potrebnih za skladištenje viška sintetskog plina odredit će se prema najvećim očekivanim količinama komunalnog otpada, a to je u mjesecu kolovozu.

Višak sintetskog plina predstavlja vrijedan resurs koji se može koristiti kao gorivo ili prodati za daljnju upotrebu, kao naprimjer za proizvodnju vodika iz sintetskog plina. Kompresija plina omogućuje učinkovito skladištenje i transport, smanjujući potrebni prostor za skladištenje.

U slučaju viška proizvedenog sintetskog plina sigurnosnih razloga i spaljivanja koji nadilazi kapacitet skladištenja potrebno je imati visokotemperaturnu baklju na brodu. Visokotemperaturna baklja mora biti na brodu iz zbog sigurnosnih razloga poput prevencije eksplozija, korištenja u slučaju kvara i djeluje kao sigurnosni ventil u slučaju povećanog tlaka u sustavu. Mora osigurati pouzdano i potpuno izgaranje viška sintetskog plina uz minimalne emisije štetnih dimnih plinova u atmosferu.

Količine recikliranih materijala i otpada značajno variraju između siječnja i kolovoza, što zahtijeva prilagodljivost u operativnim planovima tijekom godine. Isporuca recikliranog otpada i komprimiranog sintetskog plina omogućava održivo upravljanje resursima i doprinosi smanjenju okolišnog otiska.

## 11. ZAKLJUČAK

Projekt prikupljanja, recikliranja, obrade i uplinjavanja komunalnog otpada s Kvarnerskih otoka pomoću specijaliziranog plovila predstavlja inovativan pristup rješavanju problema gospodarenja otpadom u primorsko-goranskoj županiji. Implementacija ovog projekta temelji se na detaljno razrađenom operativnom planu koji obuhvaća nekoliko ključnih koraka: sakupljanje otpada, sortiranje i recikliranje, obradu otpada te proizvodnju goriva i električne energije.

Prva faza uključuje organizaciju i implementaciju sustava za sakupljanje otpada s otoka Krka, Raba, Cresa i Malog Lošinja. Specijalizirano plovilo opremljeno s potrebnom opremom za prihvrat komunalnog otpada omogućio bi efikasno prikupljanje miješanog, prethodno sortiranog komunalnog otpada s tih otoka. Optimizacija ruta brodova smanjuje troškove prijevoza i emisije  $CO_2$ , pridonoseći ekološkoj održivosti.

Nakon sakupljanja, otpad bi se usitnjavao pomoću "shreddera" odnosno drobilice i prolazio bi kroz rotor separator za izdvajanje metalnih frakcija. Ostale frakcije poput papira, kartona, plastike i stakla izdvajale bi se ručno te bi se omogućila reciklaža navedenih materijala. Reciklabilne frakcije otpada bi se potom skladištile na brodu dok se ne prevezu u luku Rijeka, gdje bi se dalje obrađivale u županijskom centru za gospodarenje otpadom Marišćina. Ovaj postupak bi osiguravao učinkovito upravljanje reciklabilnim materijalima i smanjenje količine miješanog komunalnog otpada koja završava na odlagalištima.

Plazma sustav za uplinjavanje otpada implementiran na plovilu predstavlja ključnu tehnologiju za obradu otpada. Plazma reaktor generira visoke temperature potrebne za uplinjavanje otpada, dok bi sustav za pročišćavanje sintetskog plina osigurao dostatnu kvalitetu proizvedenog goriva. Proces uplinjavanja rezultira inertnim pepelom i sintetskim plinom. Inertni pepeo, koji čini oko 5% početne mase otpada, može se zbrinuti na Marišćini ili koristiti kao sirovina u građevinskoj industriji. Proizvedeni sintetski plin koristio bi se za pokretanje motora i generatora električne energije, čime bi se smanjila potreba za fosilnim gorivima.

Implementacija plazma sustava za uplinjavanje ima potencijal značajno smanjiti količinu komunalnog otpada na odlagalištima te smanjiti emisije štetnih plinova. Plazma sustavi također nude mogućnost generiranja čiste energije, smanjujući potrebu za fosilnim gorivima. Time bi se postignuo dvostruki učinak: učinkovito zbrinjavanje otpada i proizvodnja energije na održiv način.

Konačna isporuka u luci Rijeka uključuje bale recikliranog otpada i komprimirani sintetski plin. Luka Rijeka ima kapacitete za prihvrat i daljnju obradu ovih materijala, što dodatno doprinosi održivosti i

učinkovitosti projekta. Postrojenje za razvrstavanje otpada i plazma postrojenje mogu raditi tijekom tranzita i dok je brod u luci, osiguravajući kontinuiranu obradu otpada.

Projekt prikupljanja, obrade i iskorištavanja otpada pomoću specijaliziranog plovila donosi značajne ekološke i ekonomske koristi. Ovakav pristup omogućio bi učinkovito upravljanje otpadom na otocima, smanjujući količinu otpada na odlagalištima i emisije štetnih plinova. Proizvodnja čiste energije iz komunalnog otpada pridonijela bi energetskej neovisnosti i održivosti Primorsko-goranske županije. Ovakav brod bi posebno bio pogodan i značajan i za manje otoke koji nisu spomenuti u radu, poput Paga, Brača, Visa, Mljeta, Korčule i mnogih drugih, koji nemaju sortirnice otpada. Njegova primjena bi omogućila ekološki prihvatljivo rješenje za smanjenje problema (divljih) deponija te povećanje količine izdvojenih reciklabilnih frakcija.

Kroz pažljivo planiranje i implementaciju naprednih tehnologija, ovaj projekt predstavlja model za održivo gospodarenje otpadom koji se može primijeniti i na drugim dijelovima Jadranske obale.

## 11. LITERATURA

- [1] Vukelić, N.: “Tehničko-tehnološka obilježja brodova za kružna putovanja”, završni rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, Rijeka, 2022.
- [2] “History of waste management”, s interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_waste\\_management](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_waste_management), 15.3.2024.
- [3] “Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost”, s interneta, <https://www.fzoeu.hr/hr/sakupljanje-8371/8371>, 16.3.2024.
- [4] “Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja”, s interneta, <https://mingor.gov.hr/o-ministarstvu-1065/djelokrug/uprava-za-procjenu-utjecaja-na-okolis-i-odrzivo-gospodarenje-otpadom-1271/gospodarenje-otpadom/strategije-planovi-i-programi-7595/7595>, 25.3.2024.
- [5] Bulić, S.: “Kružno gospodarstvo”, završni rad, Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Pula, 2019.
- [6] Dragičević V.: “Predavanja iz kolegija inženjerstvo zaštite okoliša”, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2023.
- [7] Puntarić, E.; Požgaj, Đ.; Korica, Ž.: “Izješće o komunalnom otpadu za 2021. godinu”, Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Zagreb, 2021.
- [8] Ekoplus d.o.o.; Rijeka: “Sažeti izvještaj o provedenom postupku procjene utjecaja na okoliš”, s interneta, <https://www.ebrd.com/english/pages/project/eia/39417c.pdf>, 10.4.2024.
- [9] Grad Rijeka: “Novi sustav gospodarenja otpadom u Primorsko-goranskoj županiji”, s interneta, <https://www.rijeka.hr/gradska-uprava/eu-projekti/završeni-projekti/novi-sustav-gospodarenja-otpadom-u-primorsko-goranskoj-zupaniji/>, 20.4.2024.
- [10] Ekoplus d.o.o.; Rijeka: “Elaborat zaštite okoliša”, s interneta, [https://mingor.gov.hr/UserDocsImages//UPRAVA-ZA-PROCJENU-UTJECAJA-NA-OKOLIS-ODRZIVO-GOSPODARENJE-OTPADOM/Opuo/OPUO\\_2023//25\\_10\\_2023\\_Elaborat\\_CGO\\_Mariscina\\_0-1.pdf](https://mingor.gov.hr/UserDocsImages//UPRAVA-ZA-PROCJENU-UTJECAJA-NA-OKOLIS-ODRZIVO-GOSPODARENJE-OTPADOM/Opuo/OPUO_2023//25_10_2023_Elaborat_CGO_Mariscina_0-1.pdf), 30.4.2024.
- [11] Stojšić, V.: “Kvaliteta gospodarenja otpadom Primorsko-goranske županije”, diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Fakultet za menadžment, Rijeka, 2023.
- [12] Androić, T.: “Prosječni sastav sitne frakcije komunalnog otpada CGO Marišćina”, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Zagreb, 2020.
- [13] Gogić, D.: “Laboratorijska simulacija postupka biosušenja”, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Zagreb, 2018.

- [14] Ivanušec, J.: “Mjerenje stišljivosti MBO otpada”, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Zagreb, 2020.
- [15] Regionalni centar čistog okoliša d.o.o.: “Ishodena građevinska dozvola za pretovarnu stanicu Zagvozd”, s interneta, <https://rcco.hr/ishodena-građevinska-dozvola-za-pretovarnu-stanicu-zagvozd/>, 3. kolovoza 2024.
- [16] Tehnix d.o.o.: s interneta, <https://tehnix.hr/en/>, 25.4.2024.
- [17] Carabin, P.; Gagnon, J.R.: “Thermal destruction of waste using plazma”, Journal of Physics D: Applied Physics, 41(5):053001, 2008.
- [18] Carabin, P.; Palumbo E.; Alexakis T.: “Two-stage plazma gasification of waste”, Proceedings of the 23rd International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies, Phoenix, Arizona, USA, 2004.
- [19] Plazarium: “Plasma gasification and disposal units for standard and hazardous waste”, s interneta, <https://www.plazarium.com/en/products/plazma-gasification-units/plazarium-mgs/>, 3.5.2024.
- [20] Ramos A.; Afonso Teixeira C.; Rouboa A.: “Environmental Assessment of Municipal Solid Waste by Two-Stage Plazma Gasification”, Energies, 12(1), pp. 137, 2019.
- [21] Yao Y.; Ramu, C.; Procher, A.; Littlejohns, J.; Hill J.M.; Butler J.W.: “Potential for Thermo-Chemical Conversion of Solid Waste in Canada to Fuel, Heat, and Electricity”, Waste vol. 1, issue 3, 1-22, -2023.
- [22] Themelis, N.J.; Kim, Y.H.; Brady, M.H.: “Energy Recovery from New York City Municipal Solid Wastes”, Waste Management & Research 20(3):223-33, 2002.
- [23] Komilis, D.; Evangelou, A.; Giannakis, G.; Lymperis, C.: “Revisiting the Elemental Composition and the Calorific Value of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes”, Waste Management 32(3):372-81, 2012.
- [24] “M/T Krk”, s interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/M/T\\_Krk](https://hr.wikipedia.org/wiki/M/T_Krk), 20.5.2024.
- [25] “M/T Kornati”, s interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/M/T\\_Kornati](https://hr.wikipedia.org/wiki/M/T_Kornati), 20.5.2024.
- [26] Kathiravale, S.; Muhd Yunus, M. N.; Sopian, K.; Samsuddin, A. H.; Rahman, R. A.: “Modeling the heating value of Municipal Solid Waste”, Fuel 82(9):1119-1125, 2003.
- [27] Khuriati, A.; Budi, W.; Nur, M.; Istadi, I.; Suwoto, G.: “Modeling of heating value of municipal solid waste based on ultimate analysis using stepwise multiple linear regression in semarang”, 2017.

- [28] Olatunji, O.; Akinlabi, S.; Madushele, N.; Adedeji, P.: “Estimation of Municipal Solid Waste (MSW) combustion enthalpy for energy recovery”, EAI Endorsed Transactions on Energy Web Vol. 6 No. 23, 2019.
- [29] Byun, Y.; Cho, M.; Hwang, S.M.; Chung, J. W.: “Thermal Plazma Gasification of Municipal Solid Waste (MSW)”, 10.5772/48537, 2012.
- [30] Hussein J.; Mukhtar, D. A.; Marwah Al-Khuzae M.; Al-Ansari N.: “Energy Content Estimation of Municipal Solid Waste by Physical Composition in Al-Diwaniyah City, Iraq”, Journal of Ecological Engineering 22(7):11-19, 2021.
- [31] Yayalík, İ.; Koyun, A.; Akgün, M.: “Gasification of Municipal Solid Wastes in Plazma Arc Medium”, Plasma Chemistry and Plasma Processing 40(6), 2020.
- [32] National Energy Technology Laboratory: “Syngas Composition”, s interneta, <https://netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/syngas-composition>, 27.6.2024.
- [33] Boehman, A. L.; Le Corre, O.: “Combustion of Syngas in Internal Combustion Engines”, Plasma Chemistry and Plasma Processing 40(6), 2008.
- [34] Bates, R. P.; Dölle, K.: “Syngas Use in Internal Combustion Engines - A Review”, Advances in Research 10(1): 1-8, 2017.
- [35] Hagos, F. Y.; Rashid, A. A. A.; Sulaiman, S. A.: “Trends of Syngas as a Fuel in Internal Combustion Engines”, SAGE Publications Inc, 2014
- [36] Hamid, M.; Wesolowski, M.: “Waste-to-energy technologies as the future of internal combustion engines”, Combustion Engines 193(2), 2023
- [37] “Technical specification avus 500plus BG”, s interneta, [www.2-g.com](http://www.2-g.com), 27.7.2024.



## Popis oznaka

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
<i>sij</i>	-	siječanj
<i>kol</i>	-	kolovoz
$L_{teo}$	kWh	teoretski proizvedena energija
$H_d$	kJ/kg	donja orgjevna vrijednost
$m_{KO}$	kg/s	maseni protok komunalnog otpada za plazma postrojenje
$\eta_{PL}$	-	iskoristivost plinskog motora pri čemu su uzeti u obzir i gubici
$\eta_R$	-	iskoristivost plazma reaktora
$t_{akt}$	h	vrijeme trajanja pojedine aktivnosti broda
$V_{PL}$	m <sup>3</sup>	količina proizvedenog sintetskog plina
$\rho_{PL}$	kg/ m <sup>3</sup>	gustoća sintetskog plina
$P$	bar	atmosferski tlak
$V$	m <sup>3</sup>	volumen plina
$n$	mol	broj molova
$R$	J/molK	opća plinska konstanta
$T$	K	temperatura
$m$	kg	masa
$M$	g/kmol	molarna masa
$H_g$	kJ/kg	gornja ogrjevna vrijednost
$m_H$	%	maseni udio vodika
$m_W$	%	maseni udio vode
$L_{EL-S}$	kWh	proizvedena energija u siječnju
$L_{S-ciklus}$	kWh	proizvedena energija u jednom ciklusu u siječnju
$L_S$	kWh	proizvedena energija u siječnju
$L_{EL-K}$	kWh	proizvedena energija u kolovozu
$L_{K-ciklus}$	kWh	proizvedena energija u jednom ciklusu u kolovozu
$L_K$	kWh	proizvedena energija u kolovozu
$m_{max}$	kg	maksimalna količina otpada koju je moguće obraditi
$m_{min}$	kg	minimalna količina otpada za pokrivanje utroška energije za propulziju broda i njegove sustave
$t_{obrada}$	h	vrijeme potrebno za obradu otpada u satima
$t_{obrada(s)}$	s	vrijeme potrebno za obradu otpada u sekundama
$p_1$	bar	atmosferski tlak
$p_2$	bar	tlak kompresora
$V_V$	m <sup>3</sup>	višak plina
$V_{SKL}$	m <sup>3</sup>	volumen skladištenog plina
$m_{KO-sij}$	kg/s	maseni protok komunalnog otpada za plazma postrojenje u siječnju
$m_{KO-kol}$	kg/s	maseni protok komunalnog otpada za plazma postrojenje u kolovozu

## Popis slika

Slika 2.1.1 Sakupljač otpada na vodi

Slika 2.1.2 Uređaj za sakupljanje uljnih mrlja

Slika 3.2.1 Tannerov trokut izgaranja

Slika 3.3.1.1 Sezonska dinamika komunalnog otpada na otocima

Slika 3.4.1 Pojedine frakcije komunalnog otpada na ŽGCO Marišćina

Slika 5.1.1 Komora za biosušenje komunalnog otpada

Slika 5.2.1 Pretovarna stanica

Slika 5.3.1 Sortirnica tvrtke Tehnix d.o.o. [16]

Slika 6.2.1.1 Baklja plazma sustava jačine 150 kW

Slika 6.3.1.1 Plazma sustav za uplinjavanje

Slika 6.3.1.2 Obrada sintetskog plina dobivenog uplinjavanjem komunalnog otpada

Slika 6.3.1.3 Koncept plazma sustava na brodu

Slika 6.5.1 Dvogorivni motor

Slika 7.1.1 Trajekt "Krk"

Slika 9.3.2.1 Proizvedena električna energija u siječnju

Slika 9.3.2.2 Proizvedena električna energija u kolovozu

## Popis tablica

- Tablica 3.1 Podjela komunalnog otpada po porijeklu i vrsti
- Tablica 3.3.1 Lokacijski raspored proizvedenih količina otpada
- Tablica 3.3.2 Količine pojedinačnih frakcija otpada
- Tablica 3.3.3 Prikaz količina miješanog komunalnog otpada
- Tablica 3.3.4 Prikaz količina miješanog komunalnog otpada
- Tablica 3.3.1.1 Mjesečne količine miješanog komunalnog otpada
- Tablica 4.1.1 Sastav otpada za plazmu u siječnju
- Tablica 4.1.2 Sastav otpada za plazmu u kolovozu
- Tablica 4.2.1 Tjedne količine otpada za siječanj
- Tablica 4.2.2 Količine pojedinih frakcija komunalnog otpada za siječanj
- Tablica 4.2.3 Količine komunalnog otpada za dvodnevni ciklus broda u siječnju
- Tablica 4.3.1 Tjedne količine otpada za kolovoz
- Tablica 4.3.2 Količine pojedinih frakcija komunalnog otpada za kolovoz
- Tablica 4.3.3 Količine komunalnog otpada za dvodnevni ciklus broda u kolovozu
- Tablica 5.1.1 Osušeni otpad za plazma uplinjavanje u siječnju
- Tablica 5.1.2 Osušeni otpad za plazma uplinjavanje u kolovozu
- Tablica 7.1.1 Prikaz dimenzija trajekata "Krk" i "Kornati"
- Tablica 7.2.1 Dimenzije pojedinih sustava
- Tablica 8.1.1 Popis aktivnosti broda te njihovo trajanje
- Tablica 8.3.1 Potrošači idejnog broda
- Tablica 8.5.1 Proračun molarne mase sintetskog plina
- Tablica 8.6.1 Operativni plan za siječanj
- Tablica 8.6.2 Operativni plan za kolovoz
- Tablica 9.1.1 Prikaz sastava komunalnog otpada
- Tablica 9.1.2 Kemijski sastav pojedinih frakcija miješanog komunalnog otpada
- Tablica 9.1.3 Ogrjevna vrijednost prema [26]
- Tablica 9.1.4 Ogrjevna vrijednost prema [27]
- Tablica 9.1.5 Ogrjevna vrijednost prema [28]
- Tablica 9.3.1.1 Proizvodnja energije kod promjene ogrjevne vrijednosti
- Tablica 9.3.2.1 Utjecaj promjene ulaznih parametara na proizvodnju energije u siječnju
- Tablica 9.3.2.2 Utjecaj promjene ulaznih parametara na proizvodnju energije u kolovozu

Tablica 10.1 Isporuca recikliranog materijala i pepela u siječnju

Tablica 10.2 Isporuca recikliranog materijala i pepela u kolovozu

## SAŽETAK

Gospodarenje otpadom u Primorsko-goranskoj županiji postaje sve važnije zbog porasta količine komunalnog otpada na obali i otocima, što je posljedica povećanog broja turista. Rad istražuje procjenu učinkovitosti specijaliziranog broda za sakupljanje, reciklažu, obradu i uplinjavanje prethodno sortiranog komunalnog otpada s otoka Krka, Raba, Cresa i Malog Lošinja. Bale recikliranog otpada i inertni pepeo dobiven izgaranjem nereciklabilnog otpada iskrcavali bi se u luci Rijeka. Brod je osmišljen da koristi plazma sustav za uplinjavanje otpada, pri čemu bi se nereciklabilna frakcija izlagala ekstremno visokim temperaturama od oko 5000 °C, stvarajući sintetski plin (syngas) koji bi se koristio kao gorivo za pogon broda i za proizvodnju električne energije potrebne za rad svih brodskih sustava. Nusprodukt procesa bio bi inertni pepeo, koji bi činio oko 5% početne mase otpada. Rad također uključuje proračun ogrjevne vrijednosti dobivenog sintetskog plina te procjenu količine proizvedene energije i plina. Istražuje se prikladnost dobivenog goriva za pogon plinskog motora broda, s posebnim naglaskom na održavanje energetske učinkovitosti i stabilnosti sustava tijekom cijele godine. Analizom operativnog plana i energetskih bilanci vidljiva je sposobnost sustava da se prilagodi sezonskim varijacijama količine generiranog otpada, uz održavanje visoke razine održivosti i učinkovitosti. Prikazan je detaljan pregled tehnologija potrebnih za integrirano upravljanje otpadom na kvarnerskim otocima, usmjeren na smanjenje okolišnih utjecaja i unaprjeđenje održivog razvoja.

**Ključne riječi:** brod za prikupljanje komunalnog otpada, plazma sustav, sintetski plin

## ABSTRACT

Waste management in the Primorsko-Goranska County is becoming increasingly important due to the rise in municipal waste along the coast and islands, driven by an increase in tourism. The paper examines the efficiency of a specialized ship designed for the collection, recycling, processing, and gasification of pre-sorted municipal waste from the islands of Krk, Rab, Cres, and Mali Lošinj. Bales of recycled waste and inert ash, obtained from the combustion of non-recyclable waste, would be unloaded at the port of Rijeka. The ship is designed to utilize a plasma gasification system, where the non-recyclable fraction of mixed municipal waste would be exposed to extremely high temperatures of around 5000°C, generating synthetic gas (syngas) to be used as fuel for powering the ship and producing electricity for all onboard systems. The byproduct of the process would be inert ash, constituting about 5% of the initial waste mass. The paper also includes a calculation of the calorific value of the generated syngas and an estimation of the produced energy and gas quantities. It investigates the suitability of the generated fuel for powering the ship's gas engine, with a particular focus on maintaining energy efficiency and system stability throughout the year. By analyzing the operational plan and energy balances, the system's capability to adapt to seasonal variations in waste generation while maintaining high sustainability and efficiency is demonstrated. A detailed overview of the technologies required for integrated waste management on the Kvarner islands is presented, focusing on reducing environmental impacts and enhancing sustainable development.

**Keywords:** ship for collecting municipal waste, plasma system, synthetic gas