

# ANALIZA POSTROJENJA ZA ENERGETSKU OPORABU KRUTOG OPORABLJENOG GORIVA

---

**Lesić, Josip**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac  
University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:799147>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-05**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied  
Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
SPECIJALISTIČKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

JOSIP LESIĆ

**ANALIZA POSTROJENJA ZA ENERGETSKU  
OPORABU KRUTOG OPORABLJENOG  
GORIVA**

DIPLOMSKI RAD

KARLOVAC, 2020

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
SPECIJALISTIČKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

JOSIP LESIĆ

**ANALIZA POSTROJENJA ZA ENERGETSKU  
OPORABU KRUTOG OPORABLJENOG  
GORIVA**

DIPLOMSKI RAD

dr. sc. Nenad Mustapić

KARLOVAC, 2020

## Zadatak diplomskog rada

## **IZJAVA**

Izjavljujem pod punom moralnom odgovornošću da sam diplomski rad izradio samostalno, znanjem stečenim na strojarskom fakultetu u Karlovcu, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentora dr. sc. Nenada Mustapića, kome se još jednom srdačno zahvaljujem.

## SAŽETAK

Provedena je simulacija predloženog cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom za Republiku Hrvatsku, te je na osnovu dobivenih rezultata provedena analiza mogućnosti energetske uporabe dobivenog krutog oporabljenog goriva za karakteristične godine 2020., 2025. i 2030. godinu. Predloženi cjeloviti sustav gospodarenja komunalnim otpadom potencira odvojeno sakupljanje pojedinih frakcija komunalnog otpada, koje se prvo upućuju na sortiranje, a onda na recikliranje. Ostatni otpad upućuje se na mehaničko-biološku obradu nakon čega slijedi proizvodnja krutog oporabljenog goriva (SRF). Proizvedeno kruto oporabljeno gorivo odlazi na energetske uporabu u odgovarajuća postrojenja gdje se proizvodi električna i toplinska energija. Ostaci energetske uporabe (pepeo i šljaka) odlažu se na odlagališta. Na takav način se minimizira odlaganje otpada na odlagališta. Za potrebe simulacije cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom definiran je matematički model u programskom paketu STAN. Na temelju dobivenih vrijednosti sastava krutog oporabljenog goriva i udjela pojedinih substanci proračunata je ogrijevna moć goriva za karakteristične godine. Korištenjem programskog paketa Cycle-Tempo, provedena je analiza različitih konfiguracija postrojenja za energetske uporabu krutog oporabljenog goriva.

Analizirane su karakteristike pet tipova (konfiguracija) postrojenja za energetske uporabu krutog oporabljenog goriva, te su na osnovu dobivenih rezultata definirani odgovarajući zaključci. Analizirana postrojenja su: osnovno (referentno) postrojenje, unapređeno osnovno (referentno) postrojenje (uvedeno je pregrijanje svježe pare i ekonomajzer), hibridno postrojenje kojeg sačinjavaju na specijalan način povezana postrojenja plinske i parne turbine, te postrojenje tip Amsterdam i postrojenje tip Brescia.

Ključne riječi: komunalni otpad, odvojeno sakupljanje i transport, sortiranje i recikliranje, biofrakcija, anaerobna digestija, kompostiranje, ostatni komunalni otpad, mehaničko-biološka obrada, toplinska obrada, SRF, spaljivanje, fluidizirani sloj, ogrijevna moć, energetska učinkovitost.

## **SUMMARY**

A simulation of the proposed complete municipal waste management system for the Republic of Croatia was performed and based on the obtained results, an analysis of the energy recovery possibilities of the obtained solid recovered fuel for the characteristic years 2020, 2025 and 2030 was performed. The proposed comprehensive municipal waste management system emphasizes the separate collection of individual fractions of municipal waste, which are first referred to sorting and then recycling. The remaining waste is sent for mechanical-biological treatment followed by the production of solid recovered fuel (SRF). The produced solid recovered fuel goes for energy recovery to appropriate plants where electricity and heat are produced. Residues of energy recovery (ash and slag) are disposed in landfills. In this way, landfilling is minimized. For the needs of simulation of the complete municipal waste management system, a mathematical model has been made in the STAN software package. Based on the obtained values of the composition of solid recovered fuel and the share of individual substances, the heating power of the fuel for the characteristic years was calculated. Using the Cycle-Tempo software package, an analysis of different configurations of waste-to-energy plants was performed.

The characteristics of five configurations of waste-to-energy plants were analyzed, and based on the obtained results, appropriate conclusions were defined. The analyzed plants are: basic (reference) plant, advanced basic (reference) plant (steam overheating and economizer introduced), hybrid plant consisting of specially connected gas and steam turbine plants, Amsterdam type plant and Brescia type plant.

Keywords: municipal waste, separate collection and transport, sorting and recycling, biofraction, anaerobic digestion, composting, mechanical-biological treatment, heat treatment, SRF, incineration, fluidized bed, heating power, energy efficiency.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Hijerarhija otpada i procesi proizvodnje energije iz otpada [2] .....	1
Slika 2. Prikaz tokova pojedinih frakcija komunalnog otpada u cjelovitom sustavu gospodarenja komunalnim otpadom.....	6
Slika 3. Sastav komunalnog otpada u RH [5] .....	7
Slika 4. Shema masenih tokova pojedinih frakcija komunalnog otpada sa odabranim masenim transfer koeficijentima.....	8
Slika 5. Shema odvojenog sakupljanja sa koeficijentima masenog toka za 2020. godinu .....	9
Slika 6. Shema odvojenog sakupljanja sa koeficijentima masenog toka za 2025. godinu .....	9
Slika 7. Shema odvojenog sakupljanja sa koeficijentima masenog toka za 2030. godinu .....	10
Slika 8. Shema postupaka sortiranja i recikliranja sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenog toka.....	12
Slika 9. Shema postrojenja biološke obrade s pretpostavljenim koeficijentima masenog toka ....	14
Slika 10. Shema prihvatne hale sa transfer koeficijentima masenog toka .....	16
Slika 11. Shema mješališta sa transfer koeficijentima masenog toka .....	16
Slika 12. Shema anaerobnog digestora sa transfer koeficijentima masenog toka.....	17
Slika 13. Shema kompostera za aktivno kompostiranje sa transfer koeficijentima masenog toka .....	17
Slika 14. Shema hale za prozračivanje sa transfer koeficijentima masenog toka .....	18
Slika 15. Shema procesa prosijavanja komposta sa transfer koeficijentima masenog toka.....	18
Slika 16. Shema mehaničke obrade sa koeficijentima masenog toka .....	19
Slika 17. Shema otvarača vreća s pretpostavljenim transfer koeficijentima.....	21
Slika 18. Shema rotacijskog sita s transfer koeficijentima masenih tokova .....	22
Slika 19. Shema grubog usitnjivača s pretpostavljenim transfer koeficijentima .....	23
Slika 20. Shema magnetskog odvajača s pretpostavljenim transfer koeficijentima .....	24
Slika 21. Shema zvjezdastog sita s pretpostavljenim transfer koeficijentima.....	25
Slika 22. Shema odvajača aluminijskog i bakra s pretpostavljenim transfer koeficijentima.....	26
Slika 23. Shema zračnog klasifikatora sa pretpostavljenim transfer koeficijentima.....	27
Slika 24. Shema finog usitnjivača s pretpostavljenim transfer koeficijentima .....	28
Slika 25. Shema biološke obrade ostatnog otpada sa kumulativnim masenim udjelima pojedinih tokova.....	28
Slika 26. Shema prihvatne hale sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova ....	29
Slika 27. Shema mješališta sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova.....	29



Slika 28. Shema anaerobnog digestora sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova.....	30
Slika 29. Shema postrojenja za biosušenje sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova.....	31
Slika 30. Shema procesa prosijavanja komposta sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova.....	31
Slika 31. Shema postrojenja za proizvodnju krutog oporabljene goriva sa pretpostavljenim masenim udjelima .....	32
Slika 32. Kumulativni tokovi frakcija otpada za 2020. godinu.....	33
Slika 33. Kumulativni tokovi frakcija otpada za 2025. godinu.....	33
Slika 34. Kumulativni tokovi frakcija otpada za 2030. godinu.....	34
Slika 35. Tanner-ov dijagram [17] .....	35
Slika 36. Postrojenje za spaljivanje obrađene otpada [21].....	39
Slika 37. Ložište za izgaranje goriva u fluidiziranom sloju [21] .....	41
Slika 38. Shema osnovnog (referentnog) postrojenja .....	46
Slika 39. Shema osnovnog (referentnog) postrojenje s međupregrijanjem .....	48
Slika 40. Hibridno postrojenje .....	51
Slika 41. Napredno energetska postrojenje tip Amsterdam.....	53
Slika 42. Napredno energetska postrojenje tip Brescia.....	55

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Pretpostavljeni ciljni postoci (ciljne vrijednosti, targets) recikliranja za svaku frakciju otpada .....	8
Tablica 2. Pretpostavljene vrijednosti koeficijenta gubitaka kod sortiranja i recikliranja .....	11
Tablica 3. Transfer koeficijenti za pojedine stupnjeve mehaničke obrade .....	20
Tablica 4. Udio elemenata u pojedinim frakcijama .....	36
Tablica 5. Vrijednosti gornje (HHV) i donje (LHV) ogrijevne moći pojedinih frakcija komunalnog otpada .....	37
Tablica 6. Doprinos pojedine frakcije ukupnoj ogrijevnoj moći .....	37
Tablica 7. Sastav goriva u suhoj frakciji .....	38
Tablica 8. Osnovni parametri za simulaciju postrojenja .....	45
Tablica 9. Pregled dobivenih rezultata za analizirana postrojenja postrojenja .....	57

## POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1. Gospodarenje otpadom u zemljama članicama EU [3].....	3
Dijagram 2. Postotak otpada koji se odlaže na odlagalištima [3] .....	3
Dijagram 3. Promjena masenih udjela pojedinih tokova kroz godine .....	34
Dijagram 4. Promjena količine i ogrijevne moći goriva kroz godine .....	38
Dijagram 5. T-Q dijagram osnovnog postrojenja.....	47
Dijagram 6. T-s dijagram osnovnog postrojenja .....	47
Dijagram 7. T-s dijagram osnovnog postrojenja s međupregrijanjem .....	49
Dijagram 8. T-Q dijagram osnovnog postrojenja s međupregrijanjem.....	49
Dijagram 9. T-s dijagram hibridnog postrojenja .....	52
Dijagram 10. T-Q dijagram hibridnog postrojenja.....	52
Dijagram 11. T-s dijagram naprednog postrojenja tip Amsterdam.....	54
Dijagram 12. T-Q dijagram naprednog postrojenja tip Amsterdam .....	54
Dijagram 13. T-s dijagram naprednog postrojenja tip Brescia .....	56
Dijagram 14. T-Q dijagram naprednog postrojenja tip Brescia .....	56
Dijagram 15. Dobivena net. električna energija.....	58
Dijagram 16. Količina proizvedene vodene pare .....	58
Dijagram 17. Net. energetska efikasnost.....	59
Dijagram 18. Dijagram pojave korozije .....	60

## POPIS OZNAKA

SRF	Kruto oporabljeno gorivo ( <i>eng. Solid recovered fuel</i> )
HHV	Gornja ogrijevna moć ( <i>eng. Higher heating value</i> )
LHV	Donja ogrijevna moć ( <i>eng. Lower heating value</i> )
OS	Odvojeno sakupljanje
OO	Ostatni otpad
PK	Papir i karton
PI	Plastika
St	Staklo
M	Metal
GK	Guma i koža
DK	Drvo i tkanina
OF	Organska frakcija
IF	Inertna frakcija
MRF	Postrojenje za oporabu materijala ( <i>eng. Material Recovery Facility</i> )
BFB	Ložište za sagorijevanje u fluidiziranom sloju ( <i>eng. Bubbling Fluidized Bed</i> )
MP	Međupregrijanje
HRSG	Generator pare za rekuperaciju topline ( <i>eng. Heat Recovery Steam Generator</i> )
NG	Prirodni plin ( <i>eng. Natural gas</i> )

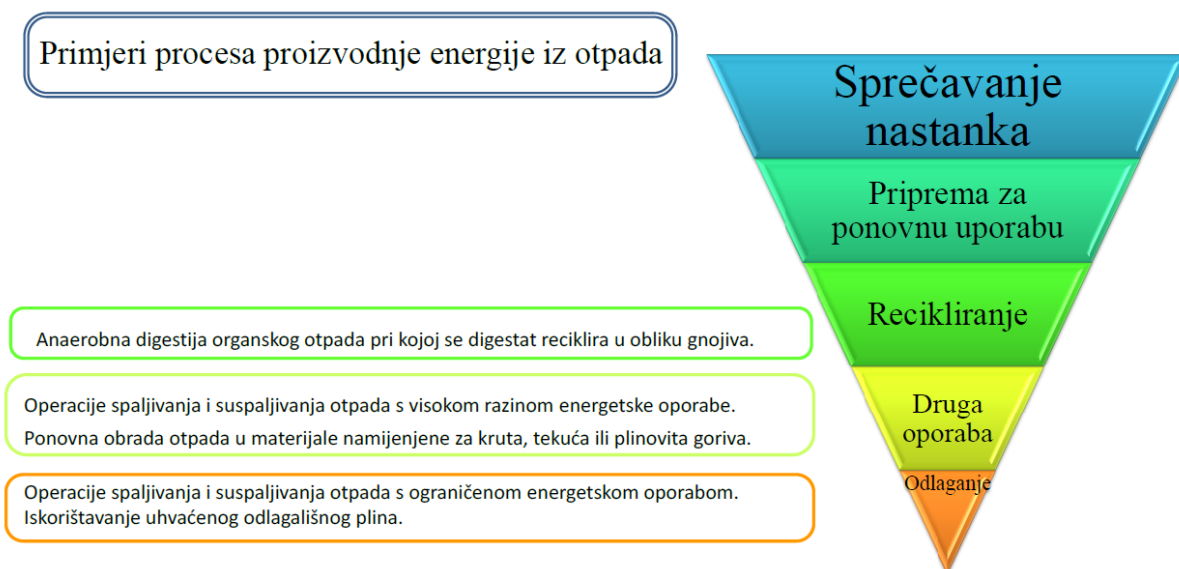
## SADRŽAJ:

1. UVOD.....	1
2. TEORETSKE OSNOVE .....	5
2.1 Tok komunalnog otpada .....	5
2.1.1 Odvojeno sakupljanje i transport pojedinih frakcija otpada .....	8
2.1.2 Postrojenje za biološku obradu odvojeno sakupljenog biootpada.....	14
2.1.3 Mehanička obrada .....	19
2.1.4 Biološka obrada ostatnog otpada.....	25
2.1.1 Biološka obrada ostatnog otpada.....	27
2.1.2 Proizvodnja krutog oporabljenog goriva.....	31
2.2 Izračun kumulativnih koeficijenata masenih tokova .....	32
2.3 Svojstva goriva .....	34
2.3.1 Određivanje ogrijevne moći krutog oporabljenog goriva .....	35
2.4 Sustav za energetske oporabu krutog oporabljenog goriva.....	38
2.4.1 Ložište za spaljivanje SRF-a u fluidiziranom sloju .....	40
2.4.2 Odlagalište pepela i šljake .....	41
3. POSTAVA ZADATKA .....	43
4. RAZRADA ZADATKA.....	44
4.1 Osnovno (referentno) postrojenje.....	46
4.2 Osnovno postrojenje sa međupregrijanjem .....	48
4.3 Hibridno postrojenje.....	49
4.4 Napredno energetske postrojenje tip Amsterdam .....	50
4.5 Napredno energetske postrojenje tip Brescia.....	52
5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA.....	57
5.1 Pojava korozije u generatoru pare.....	59
6. ZAKLJUČAK.....	61
LITERATURA .....	63

# 1. UVOD

Sve veća produkcija otpada jedan je od glavnih problema današnjice. Prema Zakonu o otpadu Republike Hrvatske [1] otpadom se smatraju sve tvari ili predmeti koje čovjek odbacuje, namjerava ili mora odložiti. Količina nastalog komunalnog otpada je direktan pokazatelj razvijenosti određenog društva, odnosno zemlje. Uočeno je da je odnos bruto nacionalnog dohotka, koji se uzima kao osnovni gospodarski pokazatelj, i količine proizvedenog otpada skoro linearan. Ekonomski razvijenije zemlje su prepoznale otpad kao problem, koji se posljednjih desetak godina intenzivno rješava. U Hrvatskoj je prvi Zakon o otpadu donesen 1995. godine, a aktualni je na snazi od srpnja 2013. godine. Ulaskom u Europsku uniju, Republika Hrvatska je počela primjenjivati pravne stečevine EU u obliku raznih direktiva.

Na slici 1. prikazano je pravo prvenstva u postupanju s otpadom (hijerarhija otpada) koja predstavlja temelj politike i zakonodavstva EU-a o otpadu i ključna je za prelazak na kružno gospodarstvo. Hijerarhija otpada služi tome da se utvrdi poredak prioriteta kojim se smanjuju štetni učinci na okoliš te optimira učinkovitost iskorištavanja resursa u gospodarenju otpadom i sprečavanju njegova nastanka.



Slika 1. Hijerarhija otpada i procesi proizvodnje energije iz otpada [2]

U ovom radu predložen je sustav gospodarenja otpadom koji je tako osmišljen da prati navedenu piramidu. Tako je na prvom mjestu odvojeno sakupljanje i

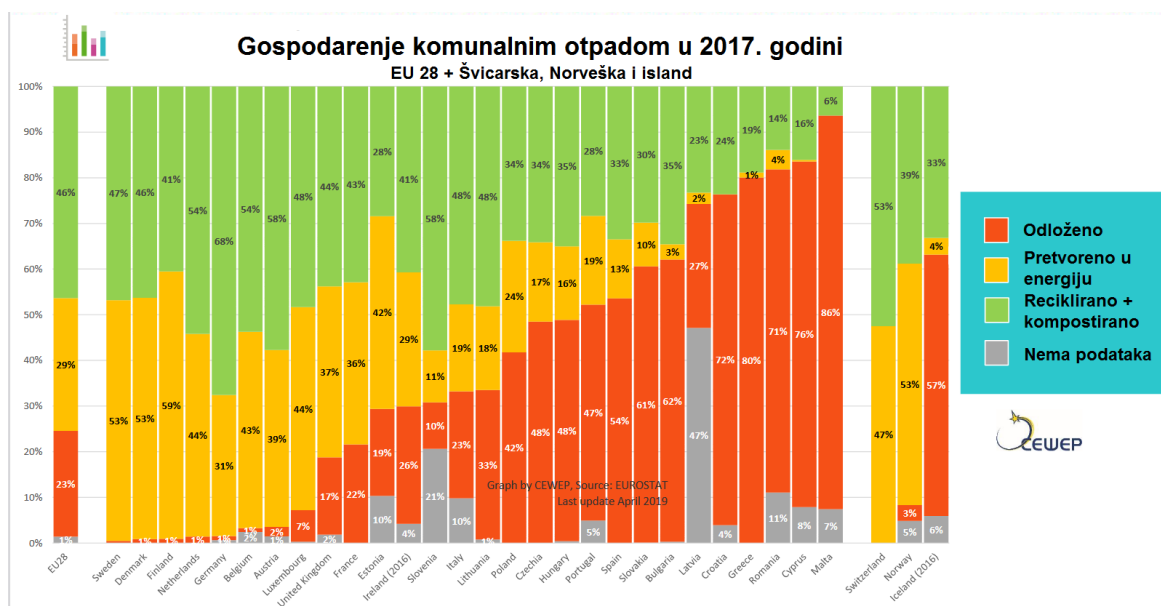
recikliranje frakcija otpada iza koje slijedi anaerobna digestija organaskog otpada. Organska frakcija se iskorištava tako što se provodi anaerobna digestija uz proizvodnju bioplina. Ostatni otpad se koristi za proizvodnju krutog oporabljene goriva koji se koristi u energetskej uporabi za proizvodnju električne i toplinske energije.

Energetska uporaba otpada obuhvaća 5 tehnologija proizvodnje energije iz otpada (waste-to-energy) [2]:

1. suspaljivanje krutog oporabljene goriva u termoelektranama i u proizvodnji cementa i vapna;
2. izgaranje otpada u namjenskim termoelektranama;
3. anaerobna digestija biorazgradivog otpada;
4. proizvodnja krutih, tekućih ili plinovitih goriva iz otpada;
5. drugi procesi među kojima su piroliza ili rasplinjavanje.

Od navedenih 5 načina proizvodnje energije iz otpada, u ovom radu obuhvaćena su 3, a to su: izgaranje otpada u namjenskim termoelektranama, anaerobna digestija biorazgradivog otpada uz proizvodnju plinovitog goriva (bioplin).

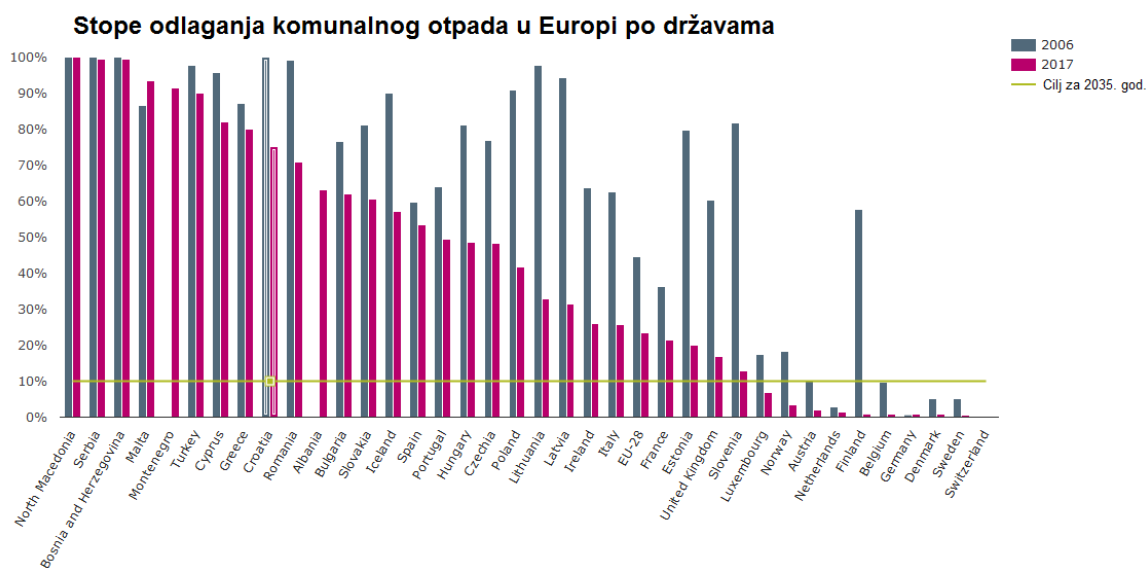
Na dijagramu 1. [3] grafički je prikazano stanje sustava gospodarenja komunalnim otpadom u zemljama članicama EU u 2017 godini.



Dijagram 1. Gospodarenje otpadom u zemljama članicama EU [3]

Hrvatska na žalost spada među zemlje sa slabo razvijenim sustavom gospodarenja otpadom i jedni smo od rijetkih da nemamo niti jedno postrojenje za proizvodnju energije iz otpada.

Što se tiče odlaganja otpada, dijagram 2. prikazuje usporedbu između 2006. i 2017. godine. Također je prikazan i cilj za 2030. godinu kada bi se maksimalno 10% otpada smjelo slati na odlagališta. Vidimo da je svega nekoliko zemalja već postiglo taj cilj (target), dok je kod nekih zemalja potrebno poduzeti drastične mjere kako bi cilj bio ostvaren.



Dijagram 2. Postotak otpada koji se odlaže na odlagalištima [3]



Usporedimo li podatke sa 2006. godinom, možemo reći da je Republika Hrvatska na dobrom putu ali je potrebno još dosta uložiti u razvoj sustava gospodarenja otpadom. Za primjer možemo uzeti susjedne zemlje npr. Slovenija, Italija, Austrija i vidjet ćemo da uz to što imaju razvijeniji sustav gospodarenja otpadom, svaka od njih ima i sustav za proizvodnju energije.

Upravno s tim ciljem, da se poboljša sustav gospodarenje otpadom u Republici Hrvatskoj, u ovom radu je predložena ideja cjelovitog sustava gospodarenja otpadom, koji se sastoji od prikupljanja, sortiranja, recikliranja, biološke obrade, mehaničke obrade i energetske oporabe ostatnog otpada koji se više nemože iskoristiti na neki drugi način.

Najbitniji podaci za analizu sustava su količina i sastav komunalnog otpada, udjeli vlage, kemijski sastav pojedinih frakcija otpada, postoci odvojeno sakupljenog otpada koji su određeni odgovarajućim direktivama i trendovi godišnje promjene količine nastajanja otpada. Matematički model koristi metodu analize materijalnih tokova definiran je u programskom paketu STAN 2.6 [4]. Program radi na principu blok shema. Svaki model sastoji se od blokova međusobno povezanih tokovima materijala. Veza između izlaznog i ulaznog toka u jedan blok definirana je transfer koeficijentom koji predstavlja omjer izlaznog i ulaznog toka. Koeficijenti su relativne vrijednosti i vrijede za svaki blok pojedinačno što znači da ako želimo znati točan (apsolutan) udio (postotak) neke frakcije na ulazu ili izlazu iz nekog bloka, moramo pomnožiti sve prethodne koeficijente na toku te frakcije.

Prije analiziranja sustava energetske oporabe, obrađen je kemijski sastav odnosno udjeli pojedinih kemijskih elemenata (C, H, O, N i S), postotak vlage i količina pepela dobivenog krutog oporabljenog goriva (SRF). Na temelju tih podataka izračunate su vrijednosti gornje i donje ogrijevna moć goriva (HHV-gornja ogrijevna moć, LHV-donja ogrijevna moć). Navedene vrijednosti koriste se kao ulazni podatci kod proračuna sustava za energetske oporabu krutog oporabljenog goriva. Sheme raznih postrojenja za energetske oporabu krutog oporabljenog goriva realizirane u programskom paketu Cycle-Tempo. Dobiveni podaci prikazani su grafički i tabelarno.

## 2. TEORETSKE OSNOVE

### 2.1 Tok komunalnog otpada

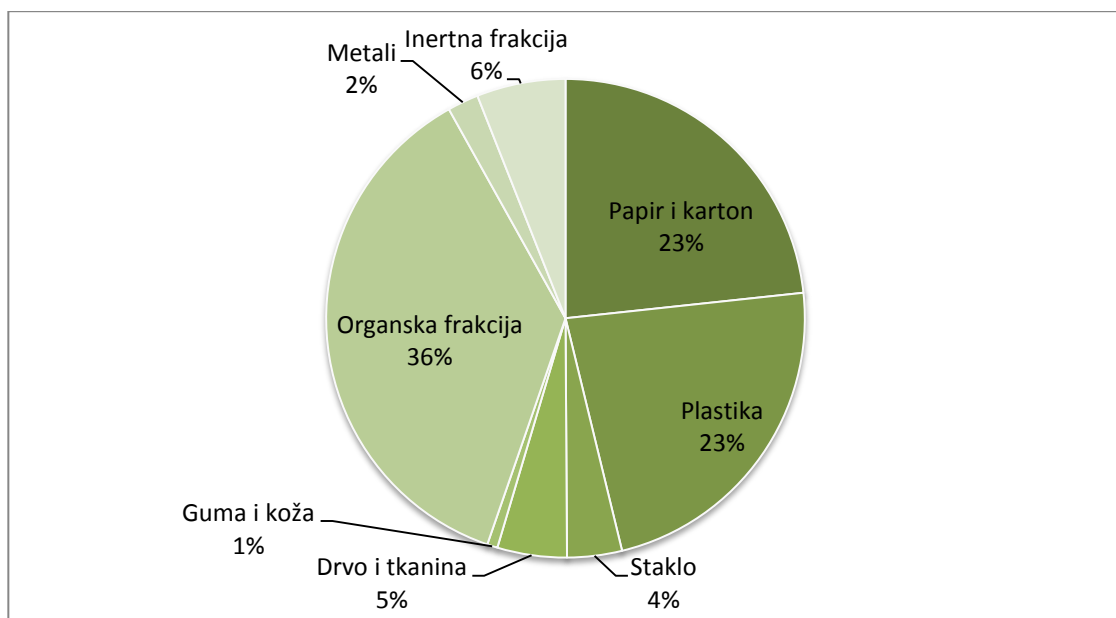
Na temelju matematičkog modela cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom predloženog u znanstvenoj literaturi [4], izvedena je funkcionalna shema prikazana na slici 2., koja prikazuje kompletni sustav za gospodarenje komunalnim otpadom. Za potrebe analize sustava, komunalni otpad je podijeljen u 8 frakcija: papir i karton, plastika, staklo, drvo i tkanina, guma i koža, organska frakcija, metali, inertna frakcija.

U dosadašnjem sustavu gospodarenja komunalnim otpadom sakupljao se je miješani komunalni otpad, dok se u novom sustavu odvojeno sakupljaju pojedine frakcije otpada. Odvojeno prikupljene frakcije otpada (laki ambalažni otpad, papir i karton, staklo) odvoze se u postrojenja za sortiranje i recikliranje, dok se odvojeno prikupljena frakcija biootpada (pretežno kuhinjski otpad) odvozi u pogone za biološku obradu, a ostatni otpad odvozi se u postrojenja za biološko-mehaničku obradu. Kod sortiranja lakog ambalažnog otpada, potrebno je razdvojiti papir od plastike ili plastiku od papira (ovisno o ambalaži), te metalni otpad. U mehaničkoj obradi ostatnog otpada, tok otpada prvo ulazi u rotacijsko sito, gdje se izdvaja biofrakcija koja propada kroz šupljine na situ. Takva mehanički izdvojena biofrakcija iz ostatnog otpada upućuje se na zasebnu biološku obradu. Proizvodi biološke obrade su kompost koji se koristi u poljoprivredi kao gnojivo i bioplin. Bioplin se koristi kao gorivo u plinskim motorima koji pokreću elektro-generatore za proizvodnju električne energije, ili se bioplin (pročišćen ili ne) može koristiti direktno npr. u automobilima, autobusima, kućanstvima itd., kao gorivo. Dobiveni bioplin sastoji se od cca. 60%  $\text{CH}_4$  i 40%  $\text{CO}_2$ . Drugi dio ostatnog otpada (takozvani suhi dio) obrađuje se u pogonu za mehaničku obradu, gdje se kao finalni proizvod dobiva kruto oporabljeno gorivo (SRF- solid recovered fuel), koje može biti u pahuljastom obliku ili u obliku peleta. Da bi sustav gospodarenja komunalnim otpadom bio potpuno zatvoren potrebno je kruto oporabljeno gorivo uputiti u postrojenja za energetske oporabu, gdje se proizvode električna i toplinska energija, a kao nusproizvod nastaje pepeo, koji se upućuje na odlagališta pepela, ili se može iskoristiti u industriji građevinskih proizvoda.



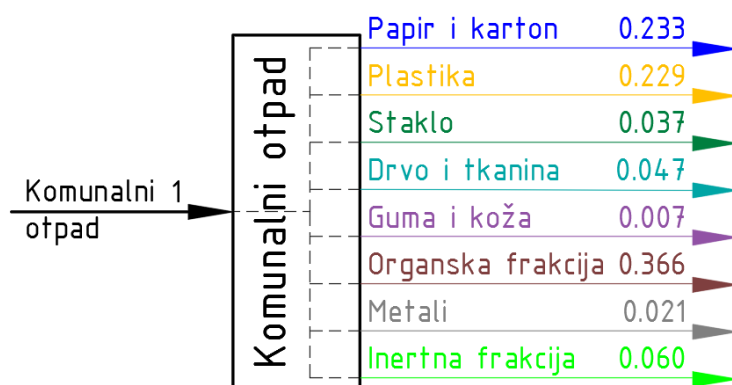
Pojedine frakcije komunalnog otpada prikupljaju kamioni koji nakon utovara kompaktiraju (prešaju) otpad u kamionima. Kamioni mogu biti predviđeni za pojedinu frakciju otpada, ili se u jednom kamionu mogu odvoziti više frakcija otpada u odvojenim komorama. Ostatni komunalni otpad se odvozi u postrojenje za mehaničko-biološku obradu, dok se odvojeno prikupljene frakcije otpada odvoze u postrojenje za sortiranje. Odvojeno prikupljene biofrakcija, ona se odvozi u postrojenje za biološku obradu.

Za potrebne analize cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom usvojen je naredni sastav komunalnog otopada u Republici Hrvatskoj objavljen u stručnoj literaturi [5], kako je to prikazano na slici 3.



Slika 3. Sastav komunalnog otpada u RH [5]

Navedeni sastav komunalnog otpada sadrži pojedine frakcije otpada u odgovarajućim postotcima, koji se preračunavaju u masene transfer koeficijente, što nam je potrebno za praćenje masenih tokova pojedinih frakcija otpada, kako je to prikazano na slici 4.



Slika 4. Shema masenih tokova pojedinih frakcija komunalnog otpada sa odabranim masenim transfer koeficijentima

### 2.1.1 Odvojeno sakupljanje i transport pojedinih frakcija otpada

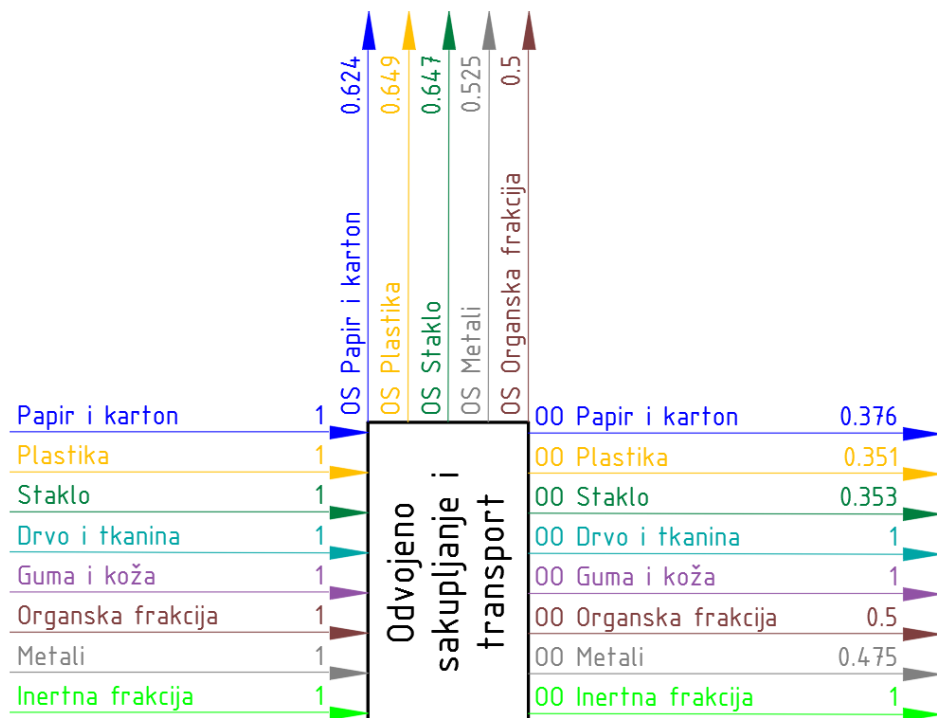
Nakon sortiranja u proces recikliranja upućuju se frakcije papira i kartona, staklo, metali, dok organska frakcija se upućuje na biološku obradu.

U odgovarajućim direktivama EU [6] [7] [8] i zakonskoj regulativi RH [9] zadane su ciljne vrijednosti postotaka odvojeno sakupljenih pojedinih frakcija komunalnog otpada upućenih na recikliranje što je prikazano u tablici 1. Prikazane su ciljne vrijednosti za 2020., 2025., 2030. godinu.

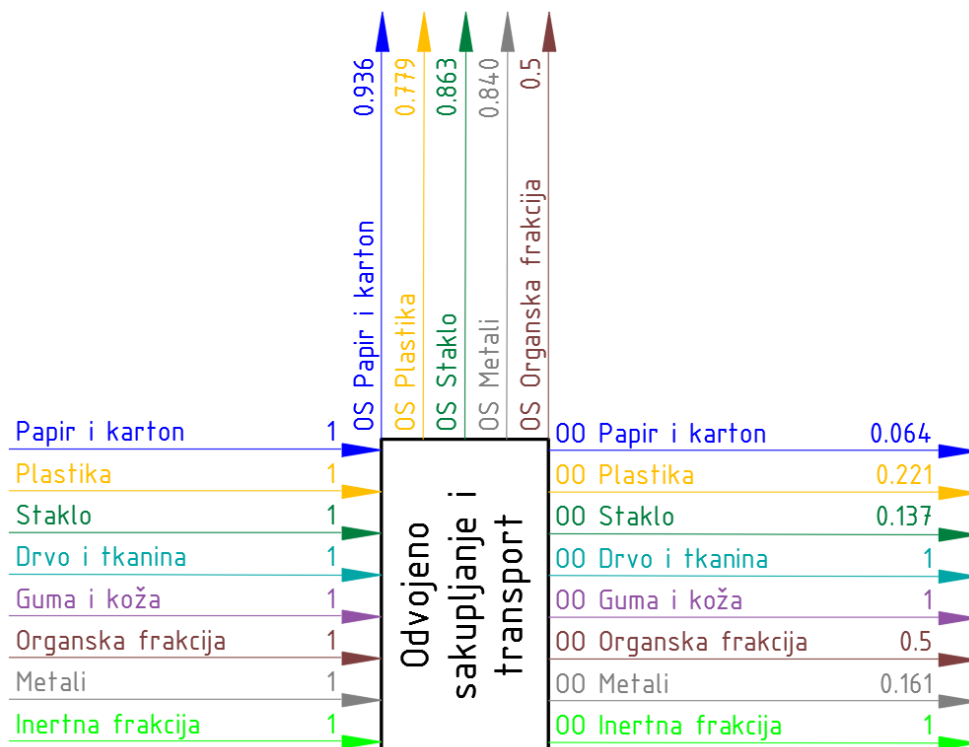
ODVOJENO SAKUPLJANJE OTPADA ZA RECIKLIRANJE	2020.	2025.	2030.
Papir i karton	60%	90%	90%
Plastika	50%	60%	60%
Staklo	60%	80%	90%
Drvo i tkanina	0%	0%	0%
Guma i koža	0%	0%	0%
Organska frakcija	50%	50%	60%
Metali	50%	80%	90%
Inertna frakcija	0%	0%	0%

Tablica 1. Pretpostavljeni ciljni postoci (ciljne vrijednosti, targets) recikliranja za svaku frakciju otpada

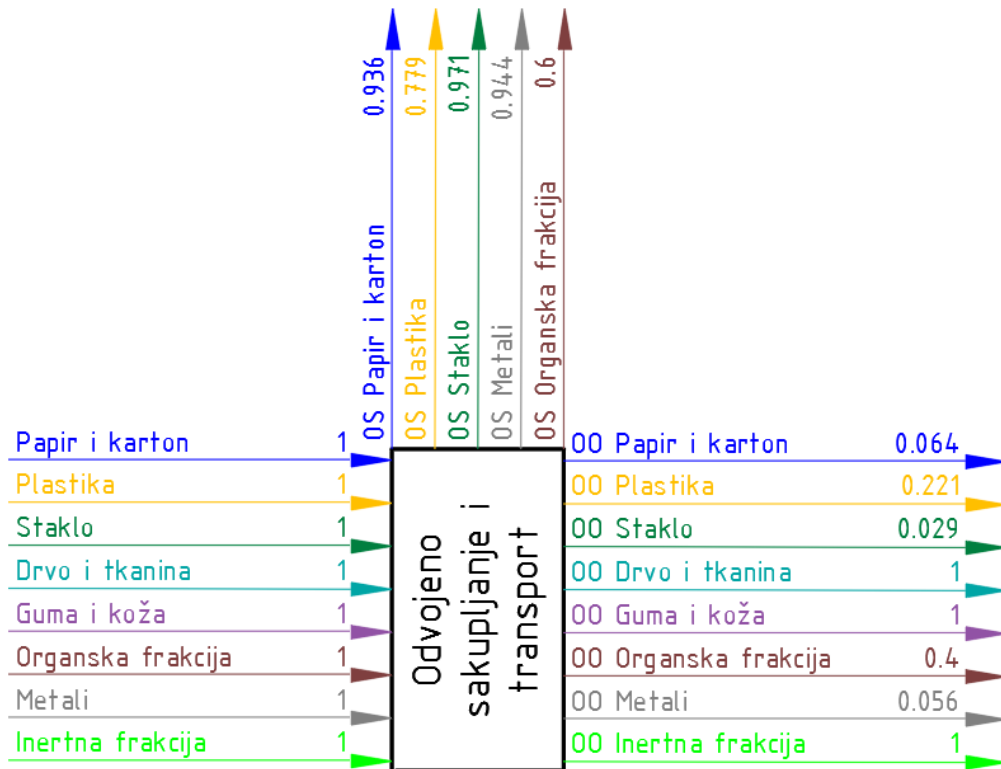
Na slikama 5., 6. i 7. Prikazane su blok sheme pojedinih dijelova (elemenata) sustava odvojenog sakupljanja komunalnog otpada sa pripadajućim transfer koeficijentima masenih tokova za godine 2020., 2025. i 2030.



Slika 5. Shema odvojenog sakupljanja sa koeficijentima masenog toka za 2020. godinu



Slika 6. Shema odvojenog sakupljanja sa koeficijentima masenog toka za 2025. godinu



Slika 7. Shema odvojenog sakupljanja sa koeficijentima masenog toka za 2030. godinu

Maseni koeficijenti trebaju biti uvećani za onoliko koliki su gubici kod sortiranja. U nastavku rada će se objasniti kako se došlo do masenih koeficijenata prikazanim na slikama 5., 6., i 7.

Za izračun postotaka odvojenog sakupljanja pojedinih frakcija komunalnog otpada koristi se izraz (1):

$$P_{OS} = \frac{P_{REC}}{1 - G_S} \quad (1)$$

Gdje je:

$P_{OS}$  – postotak odvojeno sakupljene frakcije otpada [%],

$P_{REC}$  – postotak frakcije otpada za recikliranje [%],

$G_S$  – gubitak sortiranja.

Gubici pri sortiranju se izračunavaju pomoću izraza preuzetih iz stručne literature [10]:

$$GS_{kom} = \text{maseni protok} \times \text{udio kom. otpada u ukupnom toku} \times \text{koeficijent gubitka sortiranja} \quad (2)$$

$$GS_{kuć} = \text{maseni protok} \times \text{udio kuć. otpada u ukupnom toku} \times \text{koeficijent gubitka sortiranja} \quad (3)$$

$$GS = GS_{kom} + GS_{kuć} \quad (4)$$

Pretpostavljeni udjeli odvojeno sakupljenih frakcija otpada (udjeli pojedinih tokova) prema mjestu nastanka [10]:

1. komercijalni otpad – 10%,
2. kućanski otpad – 90%.

Koeficijenti gubitaka uzeti su iz tablice 2, [11]:

	plastika	staklo	papir i karton	metali	drvo
<b>Gubici sortiranja</b>					
Kućanski otpad	25%	8%	4%	5%	5%
Komercijalni / industrijski	5%	1%	2%	2%	10%
<b>Gubici recikliranja</b>					
Kućanski otpad	29%	5%	10%	14%	-
Komercijalni / industrijski	5%	5%	10%	14%	11%

Tablica 2. Pretpostavljene vrijednosti koeficijenata gubitaka kod sortiranja i recikliranja

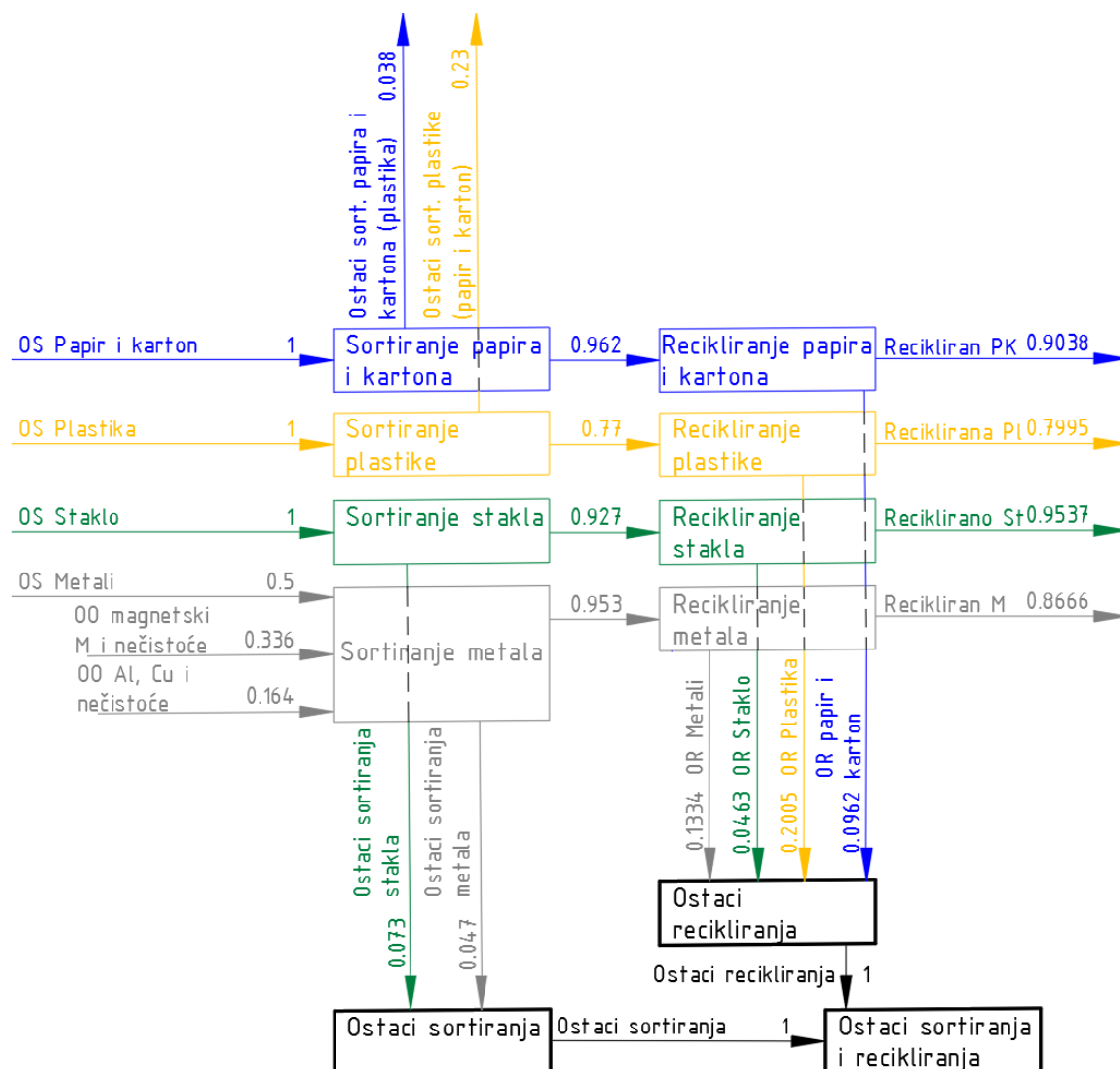


Kod izračun gubitaka recikliranja također se koriste podaci iz tablice 2. i pretpostavljeni udjeli pojedinih tokova (komercijalni i kućanski otpad). Gubici recikliranja se računaju korištenjem narednih izraza [10]:

$$GR_{kom} = \text{maseni protok} \times \text{udio kom. otpada u ukupnom toku} \times \text{koeficijent gubitka recikliranja} \quad (5)$$

$$GR_{kuć} = \text{maseni protok} \times \text{udio kuć. otpada u ukupnom toku} \times \text{koeficijent gubitka recikliranja} \quad (6)$$

$$GR = GR_{kom} + GR_{kuć} \quad (7)$$



Slika 8. Shema postupaka sortiranja i recikliranja sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenog toka

Na slici 8. shematski je prikazan postupak sortiranja i recikliranja sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenog toka. Tijek proračuna gubitaka sortiranja i recikliranja prikazan je na primjer papira i kartona. Gubici sortiranja se računaju prema formuli (2) i (3) korištenjem podataka iz tablice 2:

$$GS_{kom} = 1 \times 0.1 \times 0.02 = 0.02$$

$$GS_{kuć} = 1 \times 0.9 \times 0.04 = 0.036$$

Zbrajanjem ovih vrijednosti u skladu s formulom (4) izračunava se vrijednost ukupnog gubitka sortiranja:

$$GS = 0.02 + 0.036 = 0.038$$

Gubici recikliranja se računaju prema izrazima (5) i (6) uz korištenje podataka iz tablice 2.:

$$GR_{kom} = 0.962 \times 0.1 \times 0.1 = 0.00962$$

$$GR_{kuć} = 0.962 \times 0.9 \times 0.1 = 0.08658$$

Zbrajanje izračunatih vrijednosti u skladu s izrazom (7) izračunava se vrijednost ukupnog gubitka recikliranja:

$$GR = GR_{kom} + GR_{kuć} = 0.0098 + 0.08676 = 0.0962$$

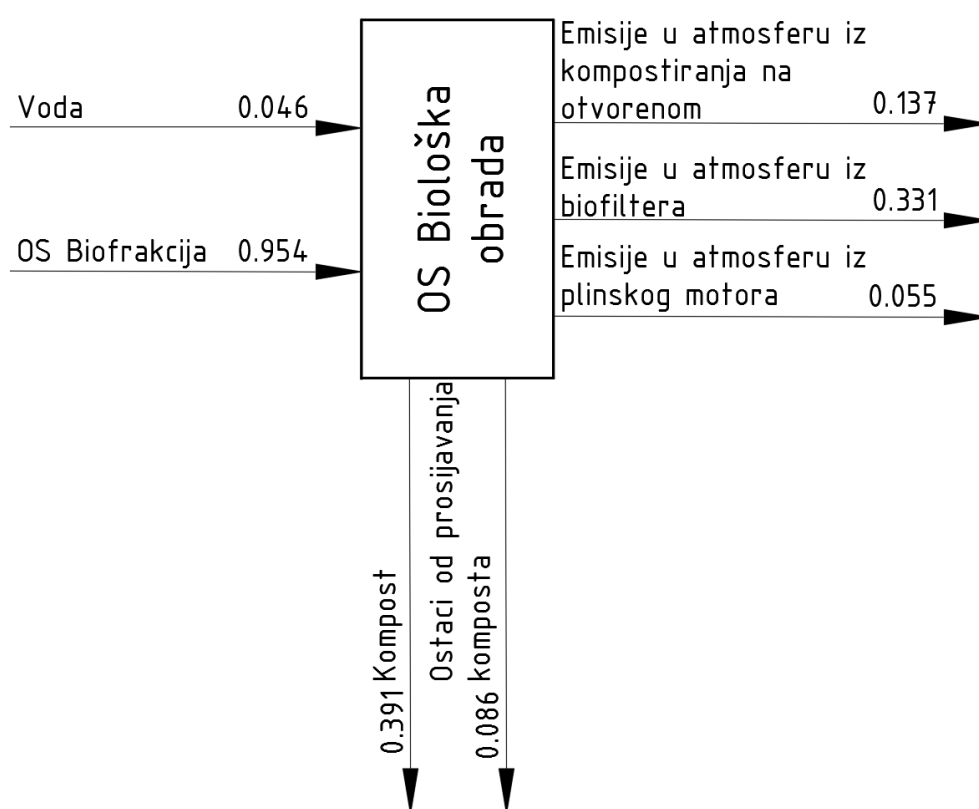
Pod maseni protok uvrštavamo 0.962 jer je to izlazni tok iz procesa sortiranja. To je ukupni tok umanjen za gubitke sortiranja koji iznose 0.038.

Analizom podataka iz predhodnog proračuna može se uvidjeti da postotak odvojeno sakupljene frakcije papira i kartona mora biti nešto veći zbog uračunavanja gubitaka pri procesu sortiranja. Iz navedenog tijeka proračuna može se zaključiti da je u procesu odvojenog prikupljanja papira i kartona potrebno prikupiti 62.4% papira i kartona. Pomnoži li se maseni koeficijent 0.624 sa koeficijentom gubitaka sortiranja koji ima vrijednost od 0.962, na kraju se dobije 0.60 odnosno 60%, koji se upućuje u postrojenje za recikliranje. Isto vrijedi i za ostale frakcije.

## 2.1.2 Postrojenje za biološku obradu odvojeno sakupljenog biootpada

Proizvodi biološke obrade odvojeno sakupljene biofrakcije su bioplin i kompost. Dobiveni bioplin sastoji se od cca. 60% CH<sub>4</sub> i 40% CO<sub>2</sub>. Bioplin se može dodatno obraditi na način da se odstrani CO<sub>2</sub>, tako da ostane skoro čisti metan. Takav pročišćeni bioplin naziva se biometan.

Bioplin i biometan se koriste kao gorivo u kogeneracijskim postrojenjima s motorima s unutarnjim izgaranjem. Potrebni podaci o kogeneracijskim postrojenjima mogu se naći na internet stranicama proizvođača navedenih postrojenja [11].



Slika 9. Shema postrojenja biološke obrade s pretpostavljenim koeficijentima masenog toka

Na slici 9. prikazana je blok shema biološke obrade s pretpostavljenim koeficijentima masenih tokova. Za izračun potrebne količine vode, uz najmanji potrebni sadržaj vlage od 0.65%, korišten je naredni izraz:

$$m_{H_2O} = m_{bio} \times [0.65 - w_{H_2O}] \quad (8)$$

Gdje je:

$m_{H_2O}$  – potrebna količina vode za digestiranje,

$m_{\text{bio}}$  – Količina biofrakcije na ulazu,

$w_{\text{H}_2\text{O}}$  – udio vode u biofrakciji,

0.65 – potrebni ukupni udio vlage.

Postrojenje biološke obrade kao modul sastoji se od niza elemenata (tehnoloških procesa obrade), kako je to prikazano na slici 2. elementi postrojenja biološke obrade su:

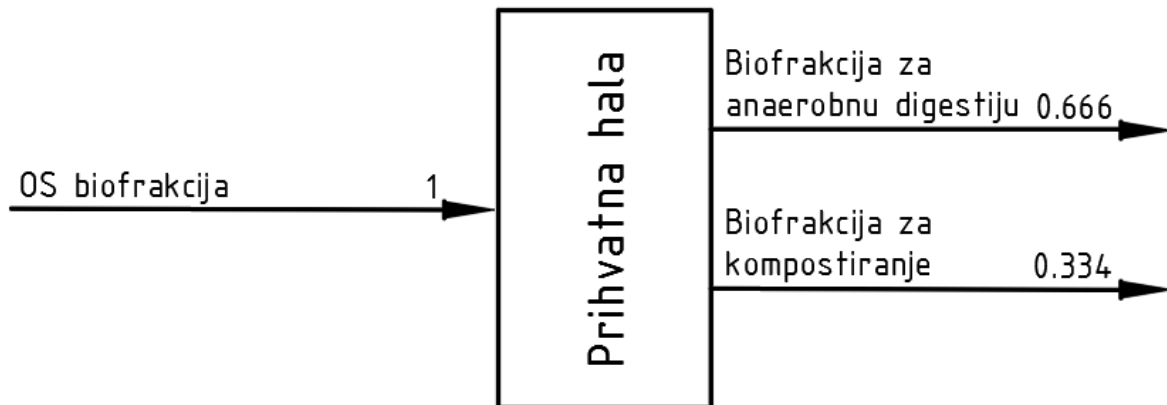
1. prihvatna hala za ulazni tok biootpada,
2. mješalište,
3. proces (postrojenje) anaerobne digestije,
4. proces aktivnog kompostiranja,
5. proces prozračivanja komposta,
6. proces prosijavanja komposta,
7. kogeneracijsko postrojenje s plinskim katorom,
8. biofiltrar.

U postrojenju za biološku obradu obrađuju se dvije različite frakcije otpada.

1. odvojeno sakupljeni biootpad (većinom kuhinjski otpad),
2. biootpad mehanički izdvojen (rotacijsko sito) iz ostatnog otpada.

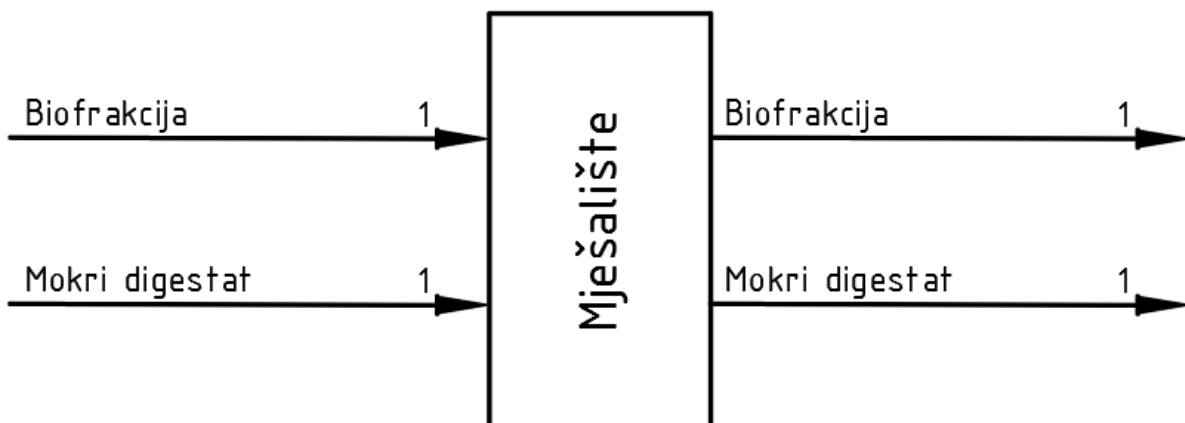
Svaka od navedenih frakcija otpada u pravilu se obrađuju u zasebnim postrojenjima.

U prihvatnoj hali privremeno se pohranjuje odvojeno prikupljeni biootpad te se u istom prostoru miješa s mokrim digestatom iz anaerobne digestije. Prihvatna hala je zatvorena te sav zrak koji izlazi kroz otvore za ventilaciju prolazi kroz biofilter čime se eliminiraju neugodni mirisi. Dio biofrakcije koja se izdvaja prije miješanja, odlazi na kompostiranje [12]. Na slici 10. prikazana je blok shema prihvatne hale s pretpostavljenim vrijednostima transfer koeficijenata masenih tokova.



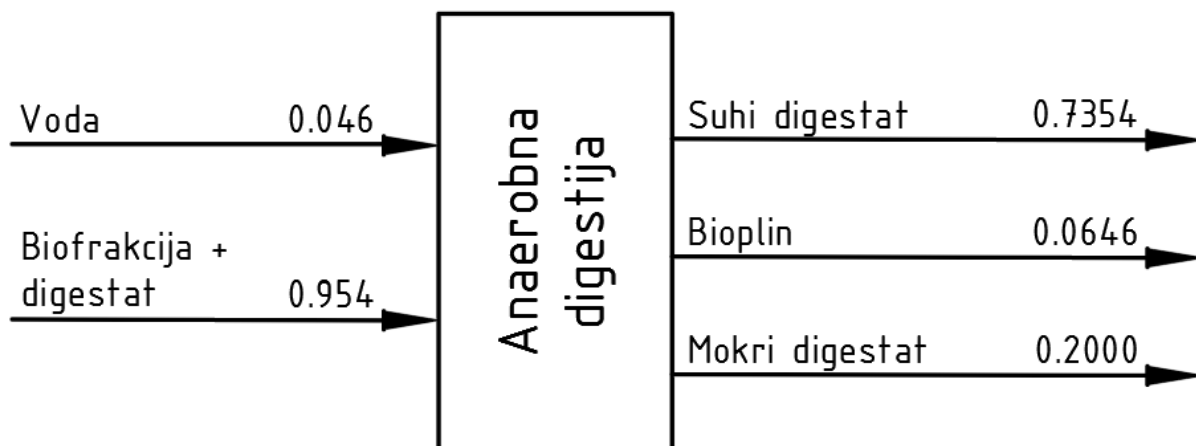
Slika 10. Shema prihvatne hale sa transfer koeficijentima masenog toka

Trećina od ulazne količine biofrakcije šalje na kompostiranje, a dvije trećine se miješaju u miješalištu s mokrim digestatom iz anaerobne digestije [12], kako je to prikazano na slici 11.



Slika 11. Shema mješališta sa transfer koeficijentima masenog toka

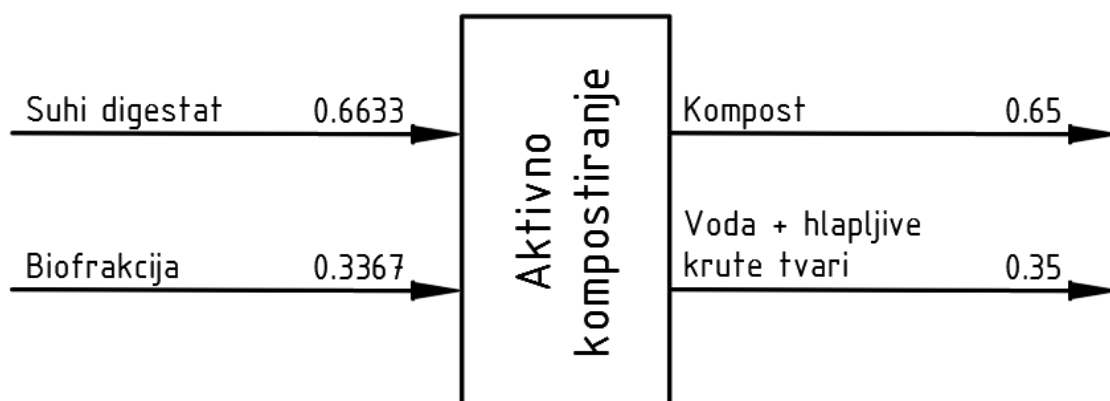
U reaktorima za anaerobnu digestiju (kako je to prikazano na slici 12.), dodaje se potrebna količina vode na način da se raspršuje po digestatu pomoću prskalice. Prije prskalice voda prolazi kroz mehanički filter koji služi za odstranjivanje nečistoća iz procjednih voda. Temperatura unutar reaktora se održava na 38°C na način da se procijeđena voda iz rektora hladi i ponovo raspršuje po digestatu. Ovaj proces traje između 4 i 6 tjedana [12].



Slika 12. Shema anaerobnog digestora sa transfer koeficijentima masenog toka

U procesu anaerobne digestije od ukupnog ulaznog toka voda i biofrakcije, dobijemo 73.54% suhog digestata, 6.46% bioplina i 20% mokrog digestata. Suhi digestat nastavlja u proces aktivnog kompostiranja, dok se mokri digestat vraća u mješalište. Proizvedeni bioplin se sagorijeva u plinskom motoru iz kojeg dobivamo toplinsku i električnu energiju. Blok-shema procesa anaerobne digestije s pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova prikazana je na slici 12.

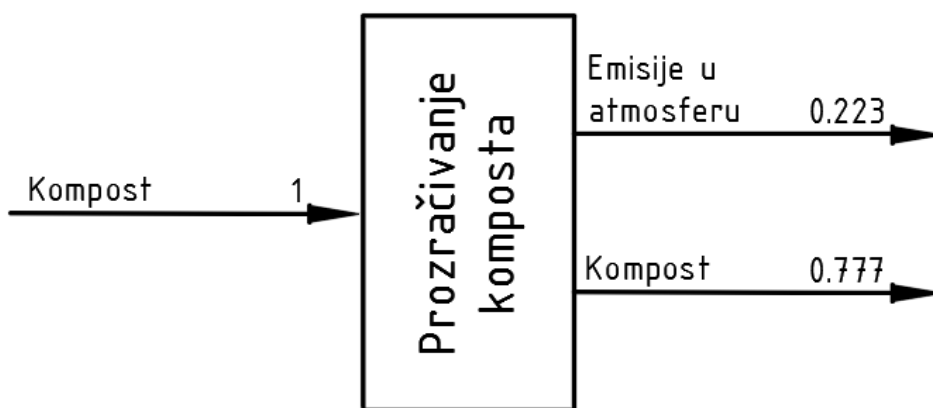
Prije ulaska u proces kompostiranja, suhi digestat i ulazni tok biofrakcije se miješaju, kako je to prikazano na slici 13. U komposteru se odvija intenzivni proces aerobnog kompostiranja za što je nužan zrak koji se upuhuje pomoću ventilatora. Višak zraka iz kompostera se odvodi u biofilter gdje se pročišćava. Proces aerobnog kompostiranja traje 5 do 7 dana.



Slika 13. Shema kompostera za aktivno kompostiranje sa transfer koeficijentima masenog toka

Ulazni tok u komposter sastoji se od 66.33% suhog digestata i 33.67% biofrakcije. Nakon procesa kompostiranja dobijemo 65% komsposta i 35% vode i hlapljivih krutih tvari koje se pročišćavaju u biofilteru.

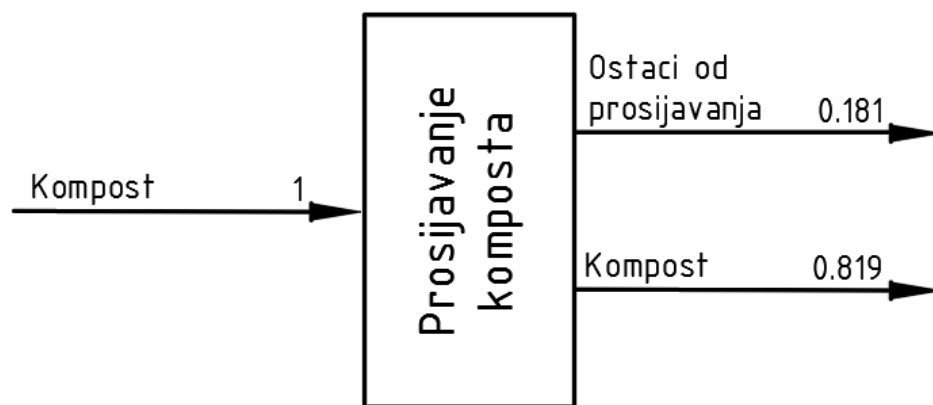
Nakon procesa intenzivnog kompostiranja, kompost se dovodi u halu gdje se odvija takozvani proces sazrijevanja komposta. Kompost se 2 puta tjedno preokreće i to traje sve dok ne završi proces sazrijevanja komposta što iznosi odprilike 8 tjedana.



Slika 14. Shema hale za prozračivanje sa transfer koeficijentima masenog toka

Kako je prikazano na slici 14., kompost ulazi u prostor za prozračivanje što se vrši na otvorenom (ili poluotvorenom) rostoru te plinovi i vlaga odlaze u atmosferu (22.3% od ukupnog ulaznog toka u procesu prozračivanja). Sazreli kompost (77.7%) odlazi na prosijavanje.

Pocesom prosijavanja završava obrada komposta koji se može koristiti u poljoprivredi. Ostaci od prosijavanja se odvoze na odlagalište otpada.

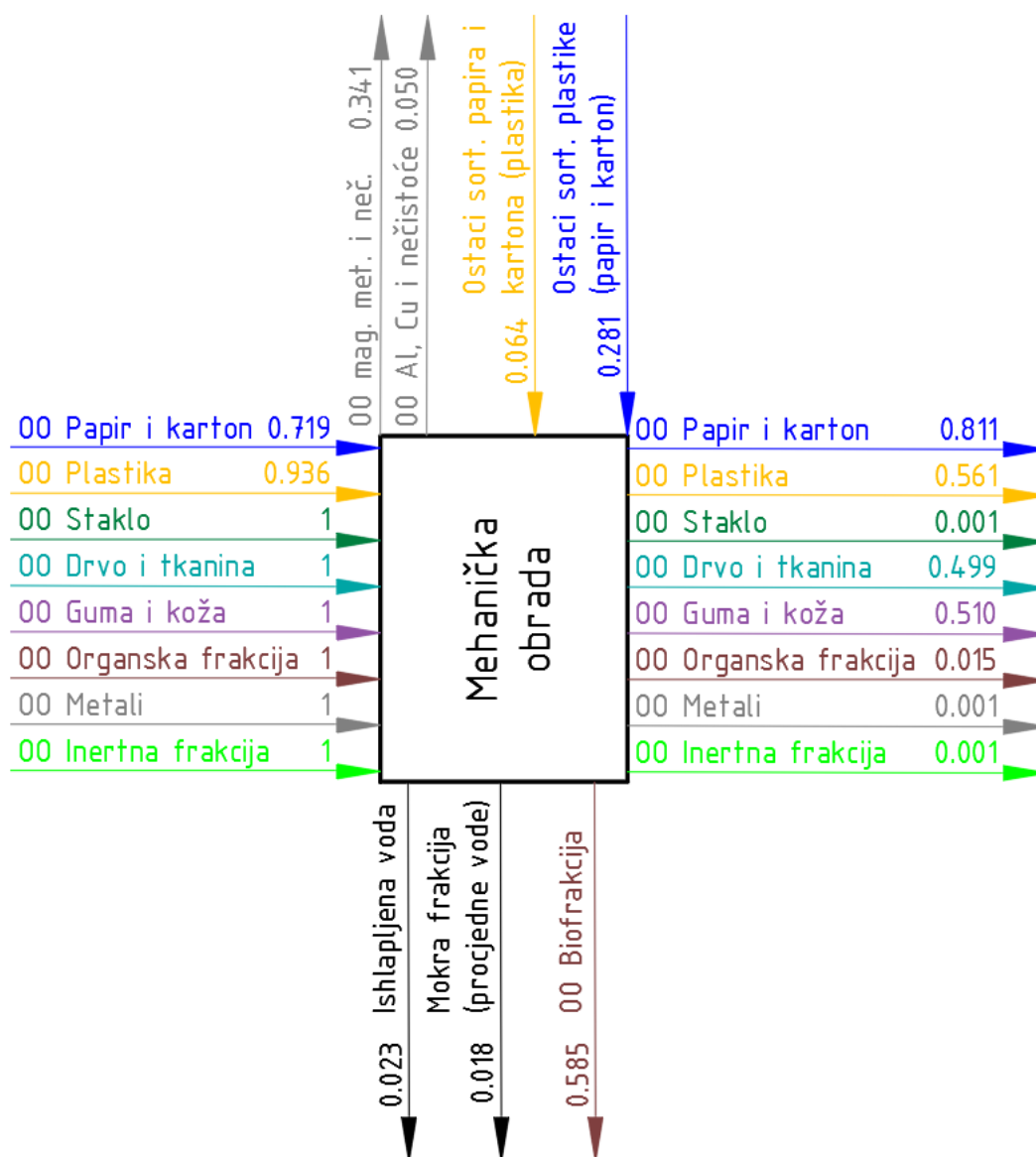


Slika 15. Shema procesa prosijavanja komposta sa transfer koeficijentima masenog toka

Kako je prikazano na slici 15., tokom procesa prosijavanja razdvajaju se ostaci (18.1% od ukupnog ulaznog toka u proces prosijavanja) i zreli kompost (81.9%).

### 2.1.3 Mehanička obrada

Maseni tok ulazne sirovine na ulazu u postrojenje mehaničke obrade sastoji se od ostataka sortiranja (manji dio) i ostatnog otpada. Ostatak od sortiranja papira i kartona je pretežno plastika, dok su ostaci od sortiranja plastike pretežno papir i karton. Mehanička obrada ostatnog otpada sastoji se od više koraka koji se odvijaju jedan za drugim [13]. Redosljed uređaja u okviru mehaničke obrade prikazan je u blok-shemi na slici 2. Slika 16. prikazuje zbirnu blok-shemu postrojenja mehaničke obrade s odabranim transfer koeficijentima masenih tokova pojedinih frakcija otpada.



Slika 16. Shema mehaničke obrade sa koeficijentima masenog toka



Vrijednost transfer-koeficijenta kod izlaznog toka magnetskih metala (0.341) je udio čistog metala (nisu uračunate nečistoće). Što znači da od ulazne količine metala, 34.1% se izdvoji na magnetskom odvajaču. Isto vrijedi i kod toka Al i Cu (0.050). Maseni tokovi mokrog sadržaja pojedinog toka (ishlapljena voda, mokra frakcija, OO biofrakcija) su dobiveni tako da se vrijednost toka podijelio sa vrijednošću ukupnog ulaznog toka. Tako npr. od ukupne ulazne količine ostatnog otpada, 58.5% predstavlja biootpad.

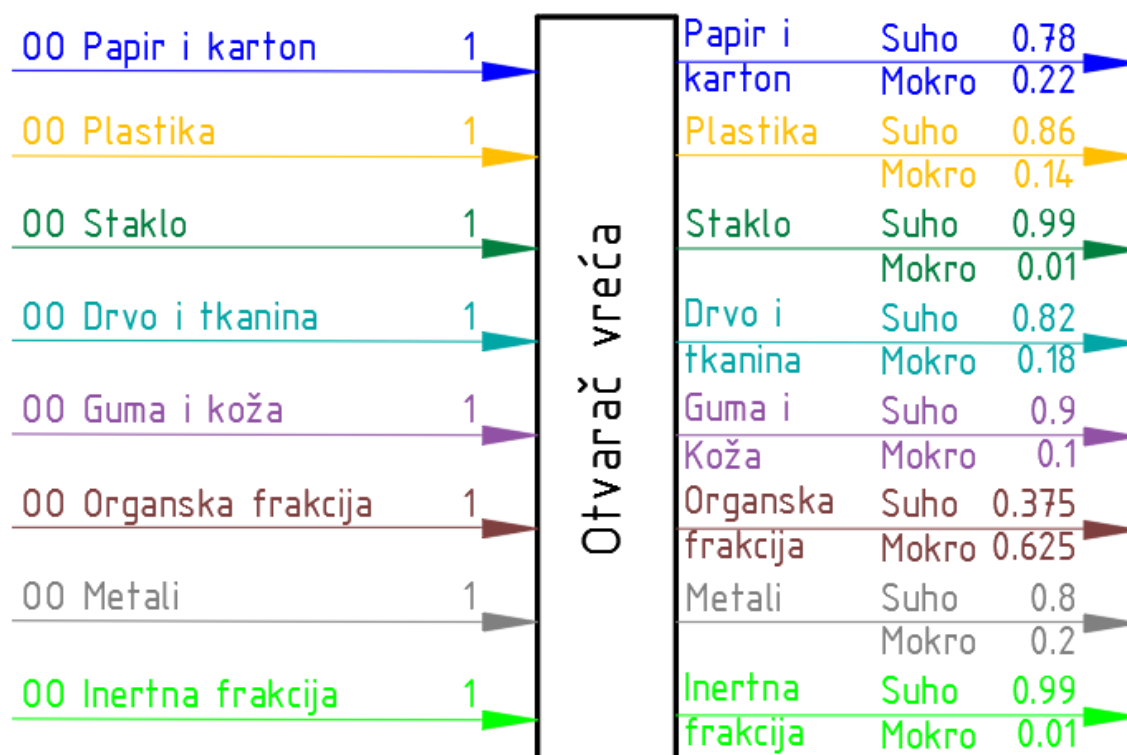
Papir i karton	0.78	0.69	1.565	0.98	0.85	0.98	0.98	1	0.6738	0.8107
	0.22	0.69	1.252	0.98	0.85	0.98	0.882	1	0.1368	
Plastika	0.86	0.62	1.111	0.98	0.9	0.98	0.98	1	0.5018	0.5606
	0.14	0.62	0.889	0.98	0.9	0.98	0.882	1	0.0588	
Staklo	0.99	0.01	1	1	0.2	1	0.7	1	0.0014	0.0014
	0.01	0.01	0.8	1	0.2	1	0.63	1	0.00001	
Drvo i tkanina	0.82	0.62	1	0.98	0.9	0.98	0.98	1	0.4307	0.4987
	0.18	0.62	0.8	0.98	0.9	0.98	0.882	1	0.0681	
Guma i koža	0.9	0.62	1	0.98	0.9	0.98	0.98	1	0.4727	0.5105
	0.1	0.62	0.8	0.98	0.9	0.98	0.882	1	0.0378	
Organska frakcija	0.375	0.11	1	0.95	0.25	0.98	0.7	1	0.0067	0.0148
	0.625	0.11	0.8	0.95	0.25	0.98	0.63	1	0.0081	
Metali	0.8	0.41	1	0.2	0.8	0.2	0.1	1	0.0010	0.0012
	0.2	0.41	0.8	0.2	0.8	0.2	0.09	1	0.0002	
Inertna frakcija	0.99	0.02	1	1	0.25	0.95	0.2	1	0.001	0.0009
	0.01	0.02	0.8	1	0.25	0.95	0.18	1	0.00001	
	Otvarač vreća	Rotacijsko sito	Grubi usitnjivač	Odvajač magnetskih metala	Zvezdasto sito	Odvajač aluminija i bakra	Zračni klasifikator	Fini usitnjivač	Apsolutni koeficijenti	Zbroj koeficijenata mokrog i suhog dijela

Tablica 3. Transfer koeficijenti za pojedine stupnjeve mehaničke obrade

U tablici 3. su prikazani transfer koeficijente za pojedinačne stupnjeve mehaničke obrade. Koeficijenti kod toka „Papir i karton“ i „Plastika“ su uvećani zbog pribrojavanja toka ostataka sortiranja. Svaka frakcija je podijeljena na suhi (gornja vrijednosti) i mokri (donja vrijednost) dio.

Na početku procesa mehaničke obrade nalazi se otvarač vreća. Uređaj se sastoji od dva nazubljena okretna valjka koji na sebi imaju pričvršćene noževe. Valjci imaju podesivi broj okretaja i smjer vrtnje za svaki pojedini valjak, te podesivi međusobni

razmak. Slika 17. prikazuje blok-shemu s odabranim transfer koeficijentima otvarača vreća [14].

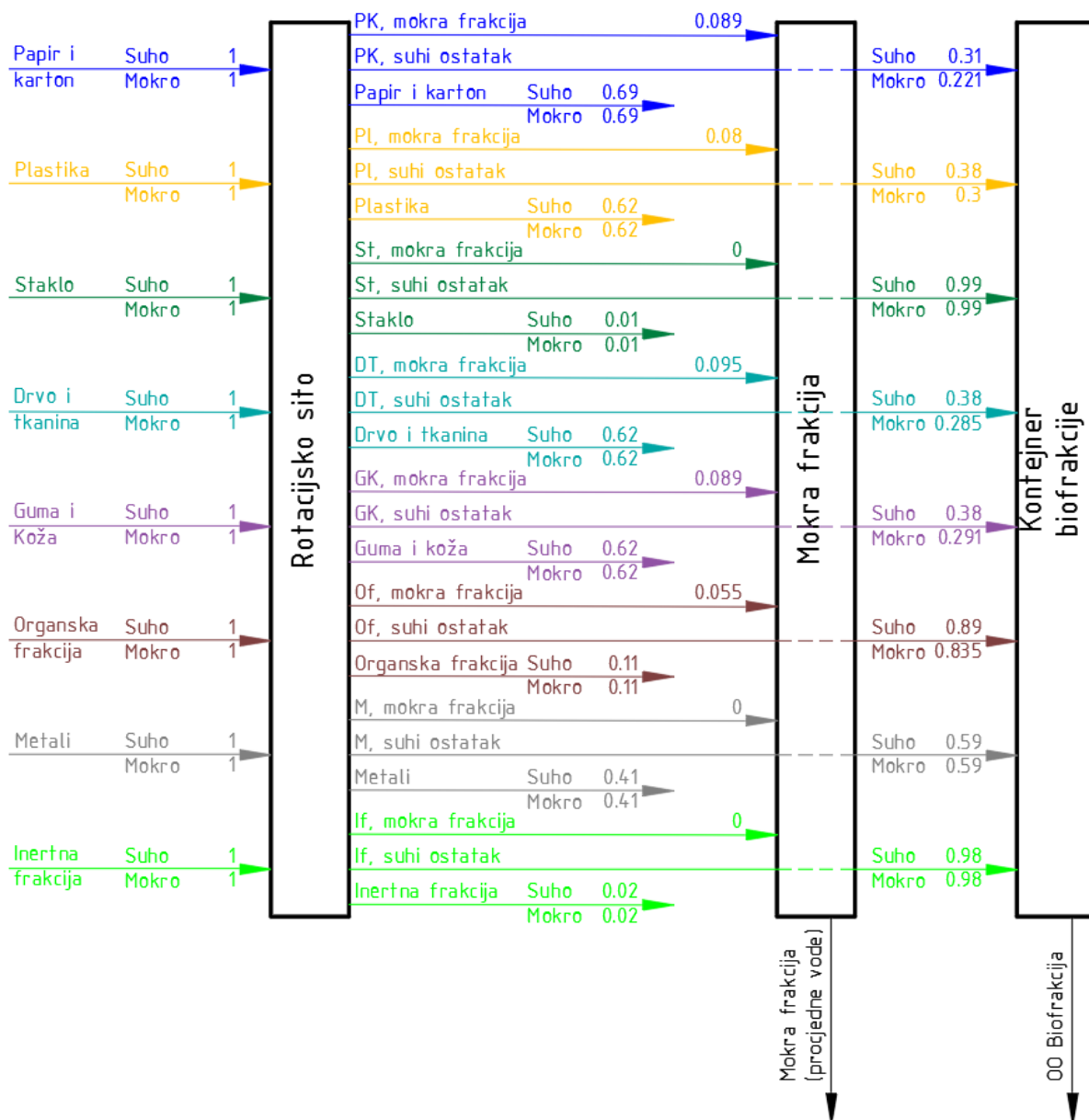


Slika 17. Shema otvarača vreća s pretpostavljenim transfer koeficijentima

Nakon otvarača vreća slijedi rotacijsko sito. To je perforirani bubanj koji rotira, gdje teže i mokra, uglavnom organska frakcija, propada kroz otvore. Mokra frakcija se upućuje u biološku obradu. Maseni tok „procjedne vode“ sačinjavaju procijeđena voda i ishlapljena vlaga iz otpada. Slika 18. prikazuje detaljnu blok-shemu rotacijskog sita sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova [14].

Kod frakcije papira i kartona od ukupnog ulaznog toka u rotacijskom situ propadne kroz provrte 8.9% u tok procjednih voda, 31% suhog dijela i 22.1% mokrog dijela toka koji odlazi na biološku obradu. Ostatak od 69% suhog dijela ulaznog toka i 69% mokrog dijela ulaznog tok, odlazi u daljnju mehaničku obradu.

Naredni uređaj u mehaničkoj obradi je grubo usitnjivač koji, služi za grubo mljevenje otpada na granulaciju <150 mm. Sastoji se od valjaka koji rotira u suprotnim smjerovima, na kojem su pričvršćeni noževi [15]. Slika 19. prikazuje detaljnu blok-shemu grubog usitnjivača sa transfer koeficijentima masenog toka [14].

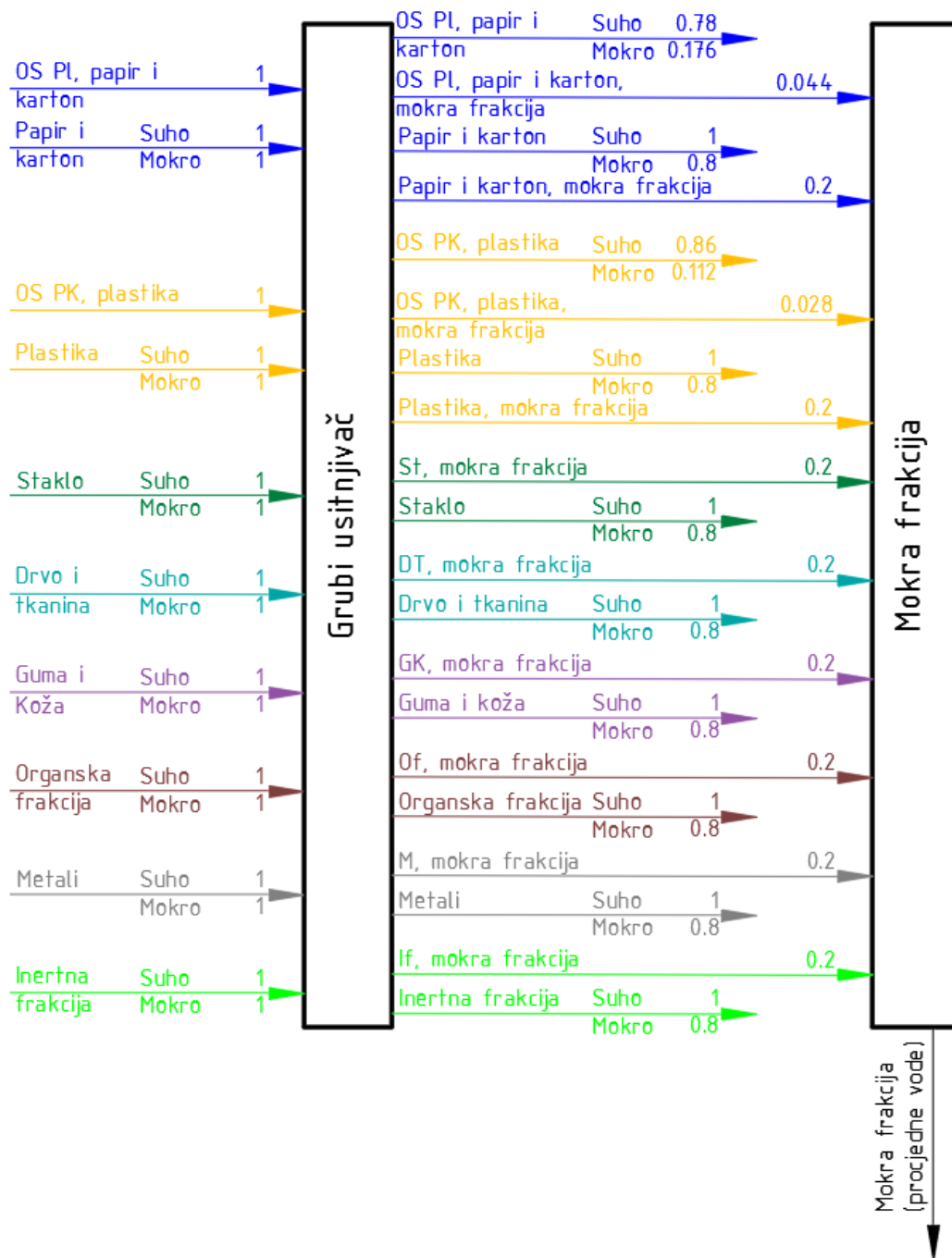


Slika 18. Shema rotacijskog sita s transfer koeficijentima masenih tokova

Ulazni tok plastike se sastoji od dva toka. Tok „OS PK, plastika“ je izlazni tok iz procesa recikliranja koji se sastoji od ostataka sortiranja i recikliranja papira i kartona. Tok „Plastika“ dolazi sa glavnim tokom gdje je svih 8 frakcija. Nakon grubog usitnjavanja, procijeđeni dio (mokra frakcija) se odvodi u tok procjednih voda.

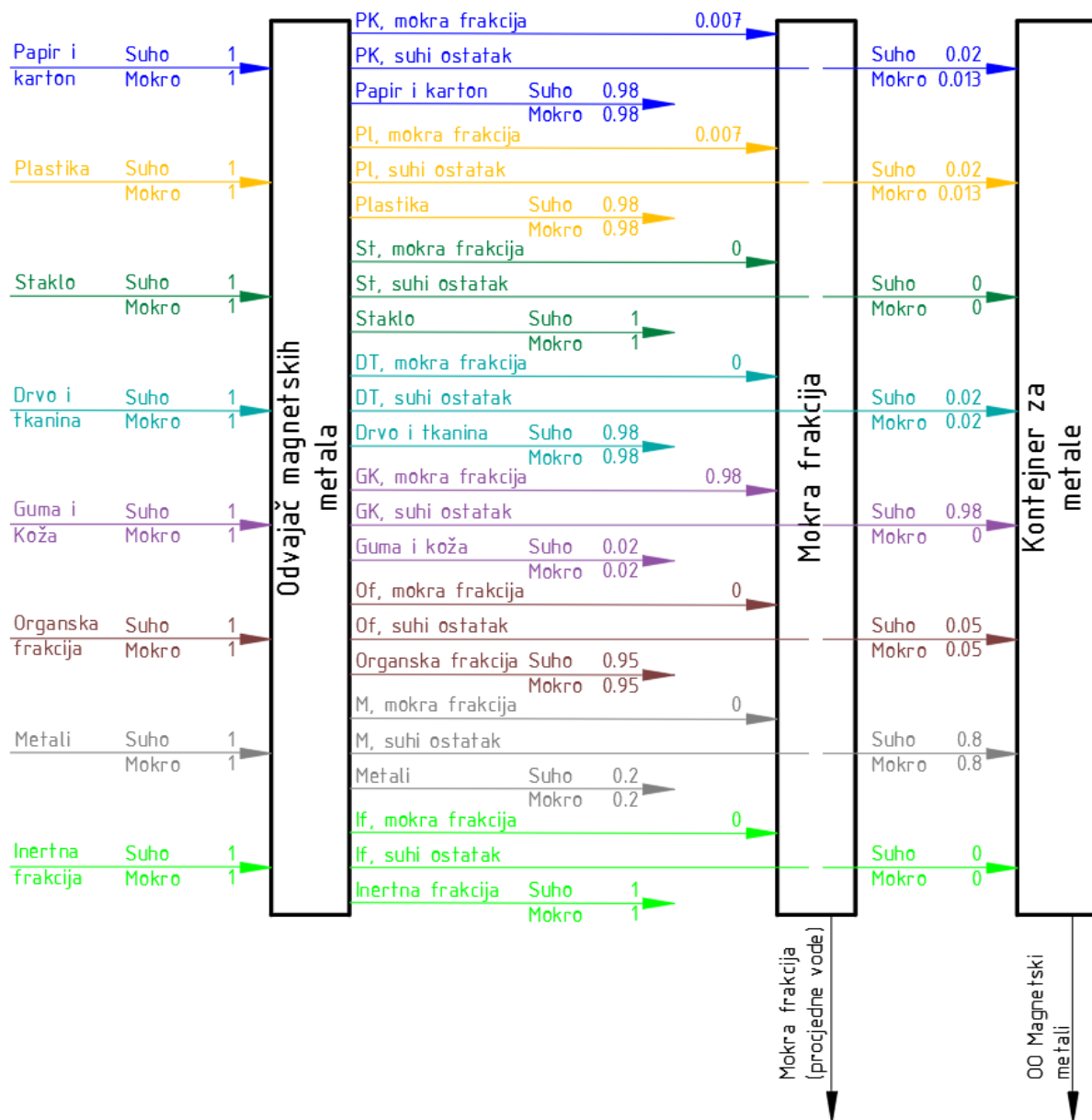
Odvajač magnetskih metala je stroj za odvajanje željeza, čelika i željeznih legura iz otpada pomoću rotacijske trake unutar koje se nalaze magneti koji magnetskom silom privlače magnetske metale. Magnetni nisu postavljeni na kraju magnetske trake, pa kad privučeni metali dospiju do kraja trake, padaju u spremnik za metale. Slika

20. prikazuje detaljnu blok-shemu odvajачa magnetskih metala sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova [14].



Slika 19. Shema grubog usitnjivača s pretpostavljenim transfer koeficijentima

Zvezdasto sito služi za prosijavanje inertne frakcije, koja nema energetska vrijednost (pijesak, šljunak, zemlja, beton, kamenje, keramika, staklo itd.). Slika 21. prikazuje detaljnu blok-shemu zvezdastog sita sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova [14].



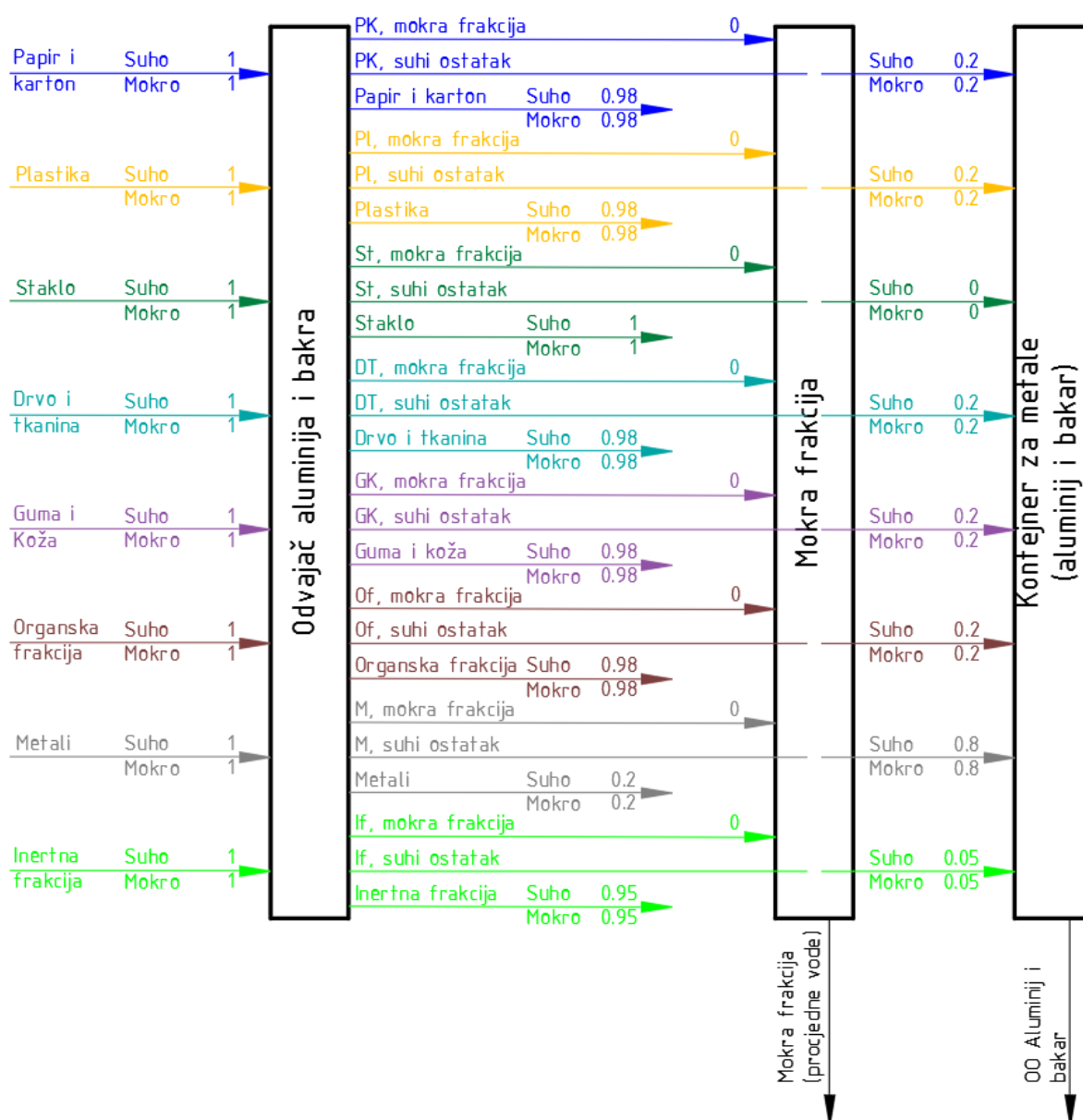
Slika 20. Shema magnetskog odvajaja s pretpostavljenim transfer koeficijentima

Odvajivač nemagnetskih metala odvaja nemagnetične metale korištenjem takozvane „Eddy current“ metode. Umjetno uspostavljeno magnetsko polje u rotoru stvara vrtložne struje u metalima što rezultira stvaranju suprotnog magnetskog polja u istim te se na taj način ti metali privlače i transportiraju u spremnik. Slika 22. prikazuje detaljnu blok-shemu odvajaja aluminija i bakra sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova [14].

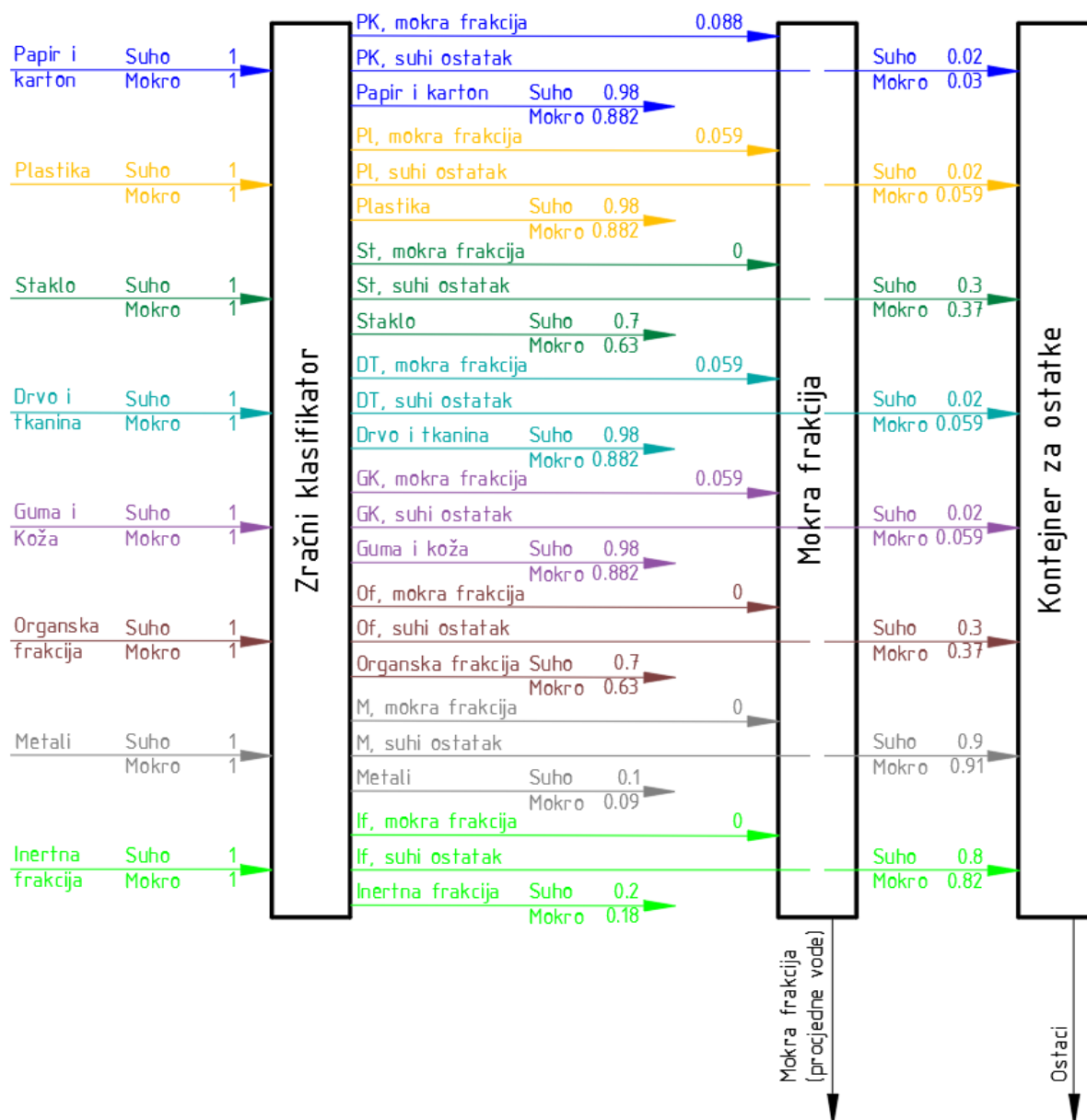
U zračnom klasifikatoru upuhuje se zrak u kućište koji svojom strujom otpuhuje razne frakcije otpada ovisno o njihovoj težini. U prvi spremnik padaju najteži materijali, a u drugi spremnik pada ostatak organske frakcije, dok se ostatak lake



udjelima pojedinih tokova. U postrojenje ulazu tok mehanički odvojenog biootpada iz ostatnog otpada u iznosu od 96.9%, kojem se dodaje 3.1% procjedne vode, kako bi se ostvarila potrebna vlažnost za daljnju obradu. Izlazni tokovi iz postrojenja su biosušena frakcija s postotkom od 62.7% od ukupnog izlaznog toka koja se upućuje u postrojenje za proizvodnju krutog oporabljene otpada. Ostatci od prosijavanja biosušenog digestata imaju udio od 13.8%, a oni se upućuju na odlagalište otpada. Emisija iz biofiltera iznosi 2.13% ukupnog izlaznog toka, dok emisija dimnih plinova iz plinskog motora iznosi 2.2%. Proizvedeni bioplina iz anaerobne digestije može se također koristiti za proizvodnju biometana.



Slika 22. Shema odvajača aluminija i bakra s pretpostavljenim transfer koeficijentima



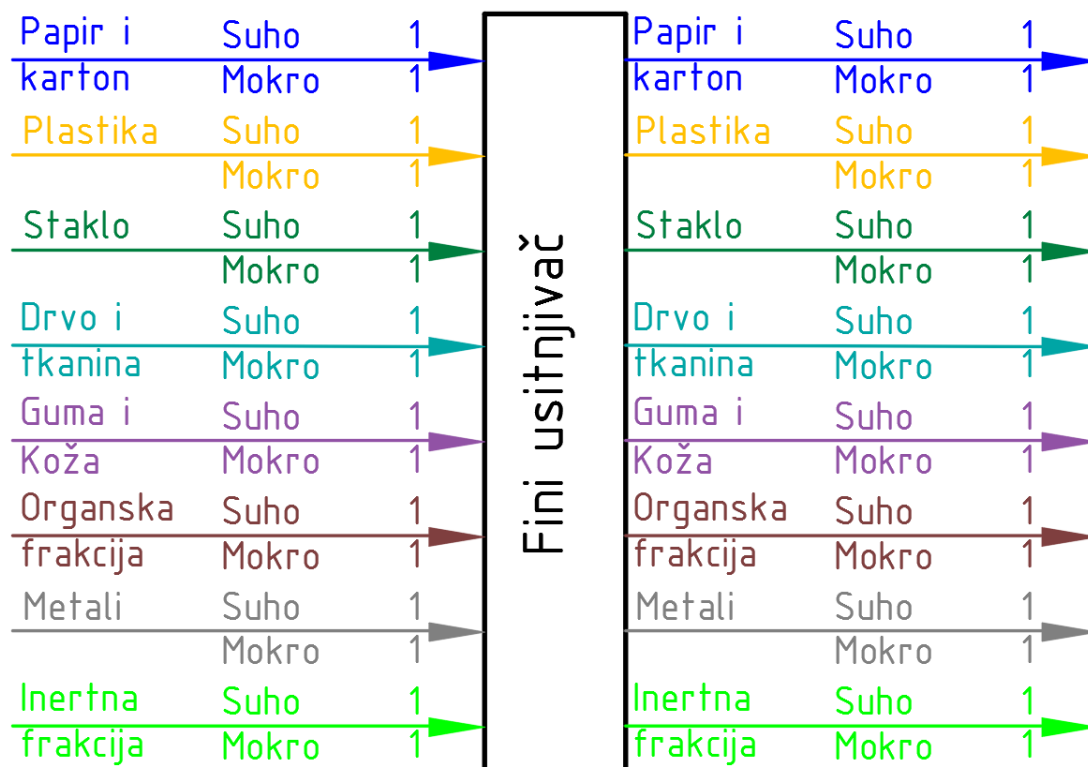
Slika 23. Shema zračnog klasifikatora s pretpostavljenim transfer koeficijentima

### 2.1.1 Biološka obrada ostatnog otpada

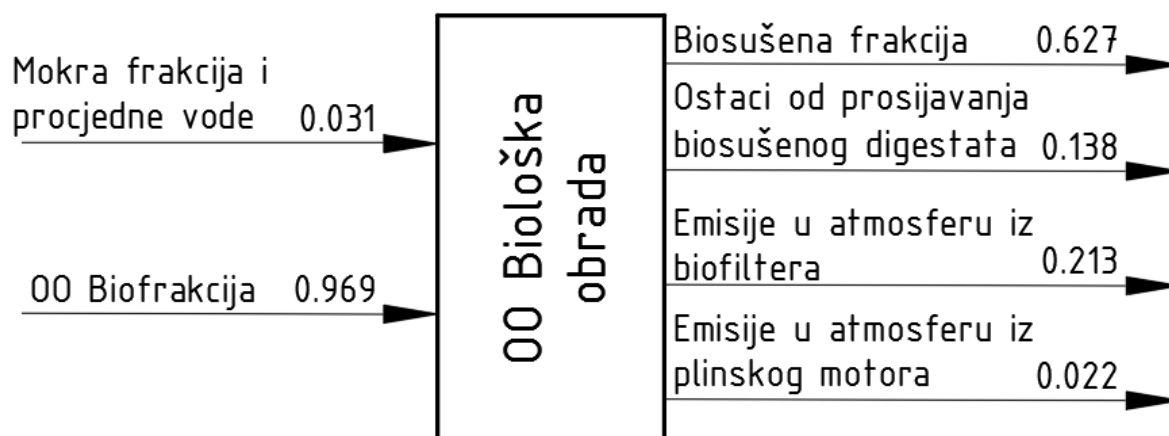
Biološka obrada ostatnog otpada slična je obradi odvojeno sakupljene frakcije biootpada. Shema na slici 25. prikazana je blok-shema s kumulativnim masenim udjelima pojedinih tokova. U postrojenje ulazu tok mehanički odvojenog biootpada iz ostatnog otpada u iznosu od 96.9%, kojem se dodaje 3.1% procjedne vode, kako bi se ostvarila potrebna vlažnost za daljnju obradu. Izlazni tokovi iz postrojenja su biosušena frakcija s postotkom od 62.7% od ukupnog izlaznog toka koja se upućuje u postrojenje za proizvodnju krutog oporabljene otpada. Ostaci od prosijavanja biosušenog digestata imaju udio od 13.8%, a oni se upućuju na odlagalište otpada.



Emisija iz biofiltera iznosi 2.13% ukupnog izlaznog toka, dok emisija dimnih plinova iz plinskog motora iznosi 2.2%. Proizvedeni bioplin iz anaerobne digestije može se također koristiti za proizvodnju biometana.



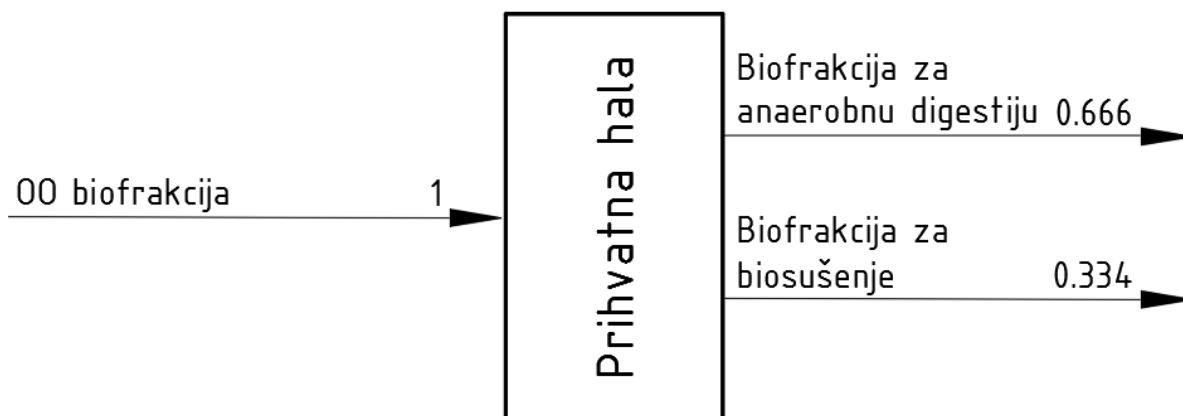
Slika 24. Shema finog usitnjivača s pretpostavljenim transfer koeficijentima



Slika 25. Shema biološke obrade ostatnog otpada sa kumulativnim masenim udjelima pojedinih tokova

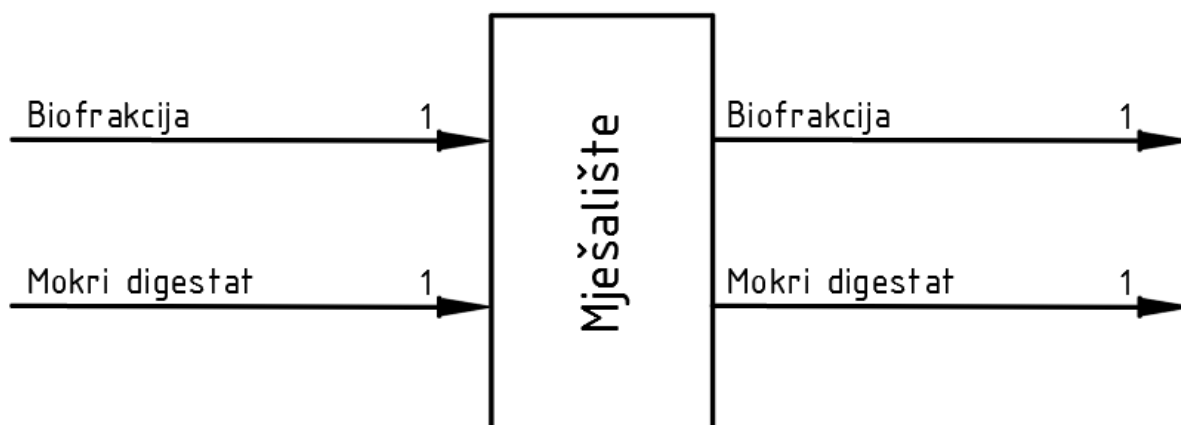
U prihvatnoj hali privremeno se pohranjuje biofrakcija iz ostatnog komunalnog otpada koja se zatim u istom prostoru miješa s mokrim digestatom iz anaerobne

digestije (slika 27.). Prikvatna hala je zatvorena i sav zrak koji izlazi kroz otvore za ventilaciju prolazi kroz biofilter čime se odstranjuju neugodni mirisi. Mješavina biofrakcije i mokrog digestata spremna je za biosušenje i anaerobnu digestiju. Dio biofrakcije koja se izdvaja prije miješanja, te odlazi na biosušenje [12].



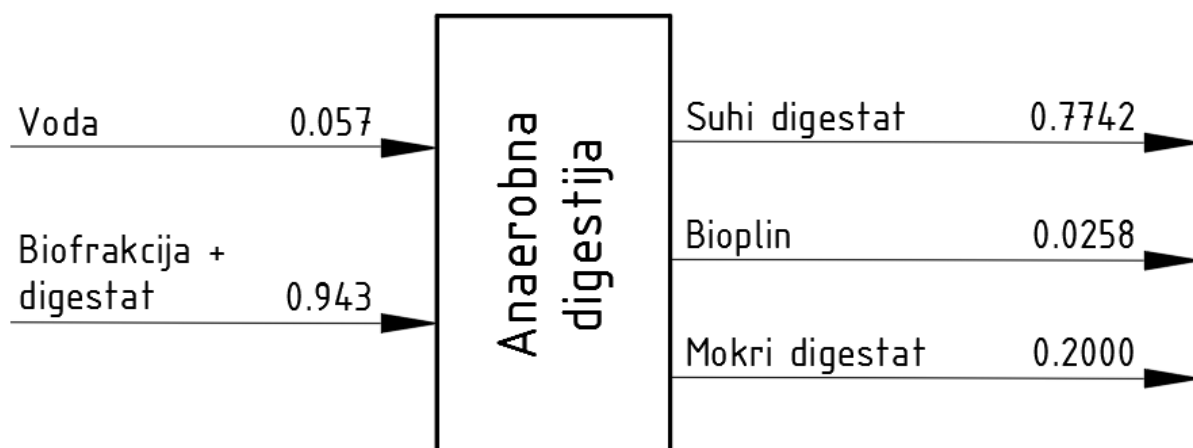
Slika 26. Shema prikvatne hale sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova

Kao što se vidi na slici 26., trećina ulazne količine biofrakcije odlazi na biosušenje, dok se dvije trećine miješaju sa mokrim digestatom iz anaerobne digestije [12].



Slika 27. Shema mješališta sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova

Anareobnom digestijom biofrakcije iz ostatnog komunalnog otpada u digestorima proizvodi se bioplina i digestat. Mokri digestat vraća se u mješalište na miješanje sa biofrakcijom, a suhi digestat podvrgava se biosušenju [12]. Na slici 27. prikazana je blok-shema postrojenja anerobne digesije s pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova.



Slika 28. Shema anaerobnog digestora sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova

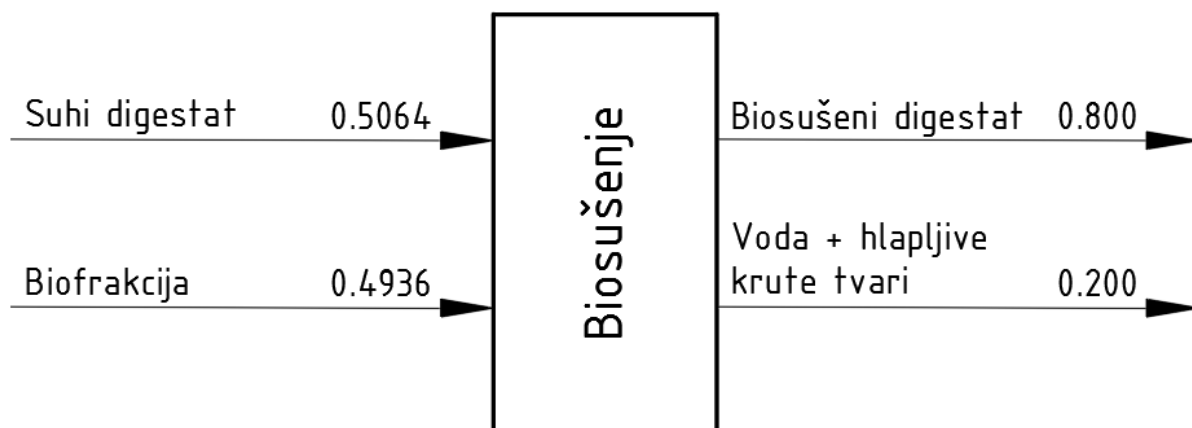
Vrijednost transfer koeficijenta za bioplin dobije se tako što se transfer koeficijent bioplina kod biološke obrade odvojeno prikupljene organske frakcije pomnoži sa 0.4. Razlog tome je što biofrakcija iz ostatnog komunalnog otpada sadrži oko 50% tvari koja je biološki razgradiva. Uzevši još u obzir i miješanje biofrakcije sa digestatom koji smanjuje biorazgradivi udio za 10%, dobije se 60% manje bioplina u odnosu na dobivenu količinu bioplina u slučaju odvojeno sakupljene biofrakcije. Stoga, transfer koeficijent bioplina za organsku frakciju iz ostatnog otpada biti će 0.4 puta manji od transfer koeficijenta za bioplin odvojeno sakupljene organske frakcije. Od ukupnog ulaznog toka (voda i biofrakcije), dobije se 77.42% suhog digestata, 2.58% bioplina i 20% mokrog digestata. Suhi digestat dalje se obrađuje u procesu biosušenja, dok se mokri digestat vraća u mješalište. Sakupljeni bioplin se koristi kao gorivo u plinskim motorima gdje se proizvodi toplinska i električna energija.

Biosušenjem mješavine biofrakcije i suhog digestata smanjuje se vlažnost ukupne mješavine. Cilj biosušenja je smanjiti sadržaj vlage na 20%, jer smanjenje vlage povoljno utječe na ogrijevnu vrijednost goriva.

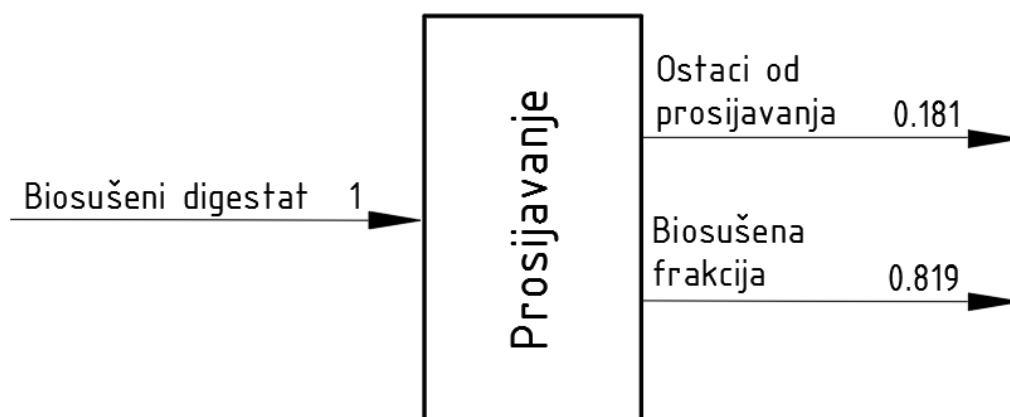
Izlazni tok se sastoji od 80% suhog digestata i 20% ishlapljene vode i hlapljivih tvari, kako je to prikazano na slici 29.

Procesom prosijavanja dobivamo biosušenu frakciju koja se upućuje u postrojenje za proizvodnju krutog oporabljene goriva. Ostaci od prosijavanja se odvoze na odlagalište.

Tokom procesa prosijavanja razdvajaju se ostaci (18.1% od ukupnog ulaznog toka u proces prosijavanja) i biosušena frakcija (81.9%), kako je to prikazano na slici 30.



Slika 29. Shema postrojenja za biosušenje sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova

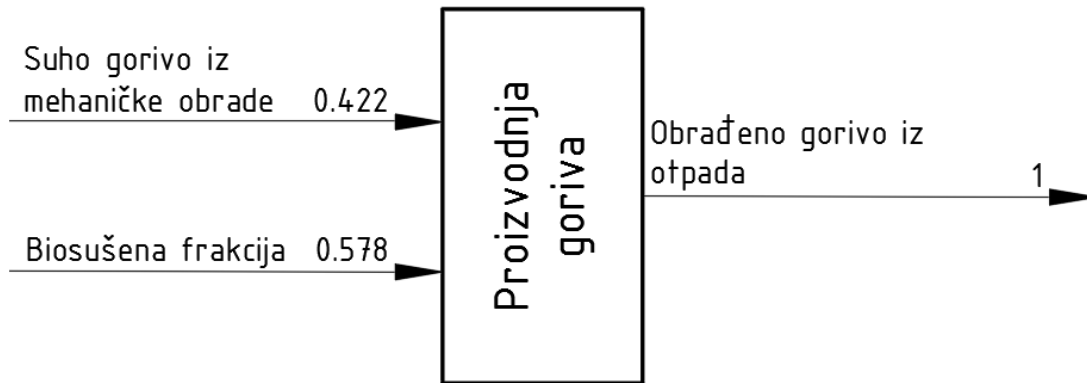


Slika 30. Shema procesa prosijavanja komposta sa pretpostavljenim transfer koeficijentima masenih tokova

### 2.1.2 Proizvodnja krutog oporabljeno goriva

Izlazni tokovi iz biološke obrade ostatnog otpada i iz mehaničke obrade sa postotnim udjelima 57.8% i 42.2% ulaze u postrojenje za proizvodnju krutog oporabljeno goriva, kako je to prikazano na slici 31. Kruto oporabljeno gorivo se najčešće proizvodi u obliku pahuljica pa zato ima vrlo malu gustoću. Radi ekonomičnijeg transporta i lakšeg manevriranja i skladištenja, gorivo se preša u bale i zamata u plastičnu foliju. Proces smanjenja volumena ne utječe na donju ogrijevnu moć goriva. Na mjestu korištenja krutog oporabljeno goriva potrebno je gorivo dovesti u prvobitno stanje što se izvodi u specijalnim strojevima. Drugi način je

proizvodnjom peleta od krutog oporabljelog goriva, čime se povećava nasipna gustoća goriva na oko  $650 \text{ kg/m}^3$ . Takvo gorivo se može sagorijevati u ložištima sa fluidiziranim slojem.



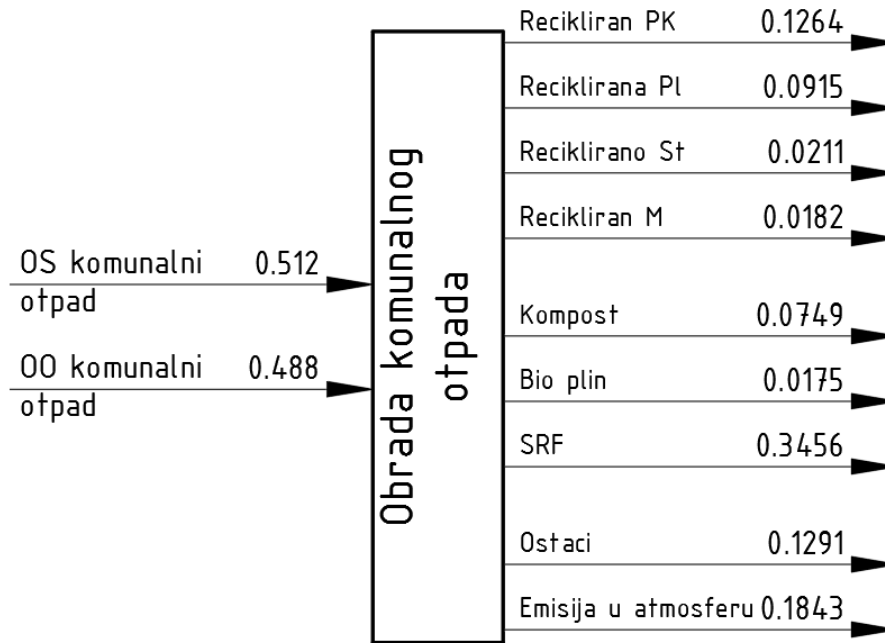
Slika 31. Shema postrojenja za proizvodnju krutog oporabljelog goriva sa pretpostavljenim masenim udjelima

## 2.2 Izračun kumulativnih koeficijenata masenih tokova

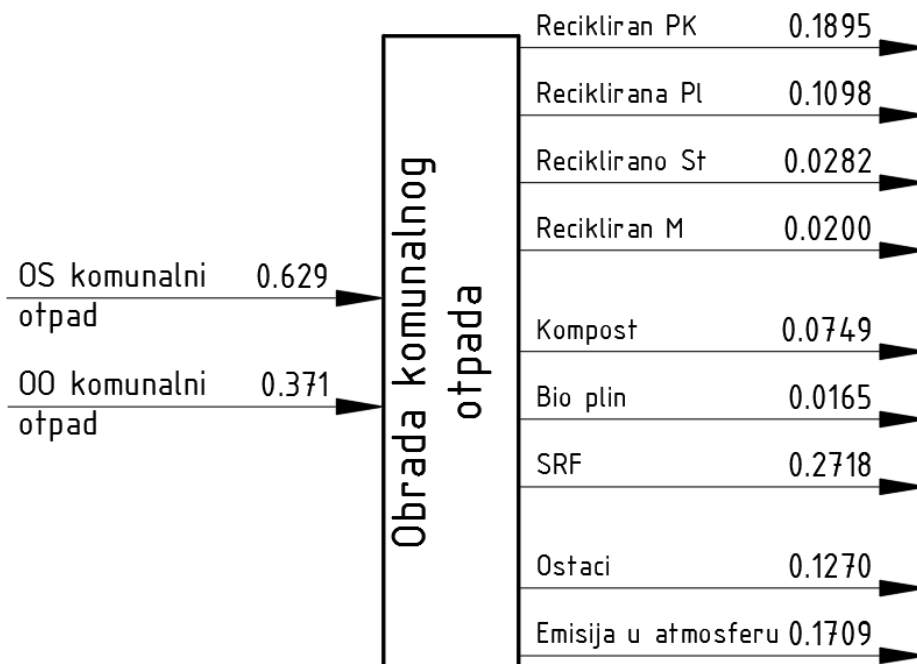
Nakon detaljne analize tokova, izračunati su kumulativni udjeli tokova pojedinih frakcija u sustavu za gospodarenje komunalnim otpadom koji vrijede za određene godine. Na slikama 32., 33. i 34. dani su kumulativni tokovi frakcija otpada za 2020., 2025. i 2030. godinu. U navedenim blok-shemama navedene su količine dobivenog bioplina, ali nije izračunata količina proizvedene električne i toplinske energije. Razlog tomu je što nije nužno da će se bioplin sagorijevati u plinskom motoru nego se može prodavati, spremati u boce za kućanstva itd.

Na osnovu provedene analize vidljivo je da iz otpada se može proizvesti velika količina korisnih proizvoda, što je prikazano na dijagramu 3.

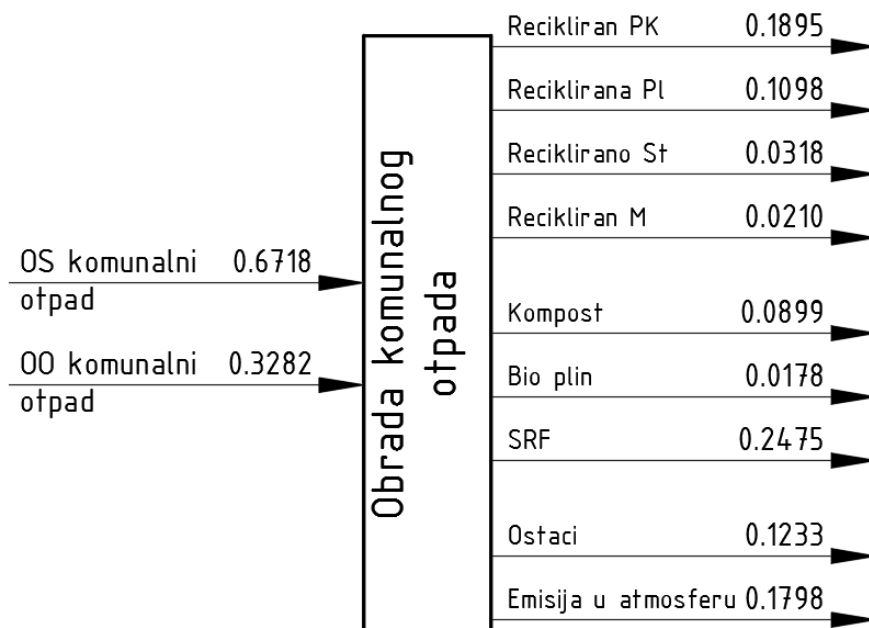
Smanjenje količine SRF-a uzrokovano je povećanjem udjela odvojeno prikupljenog otpada. Polazna pretpostavka u analizi je bila da se proizvedena količina komunalnog otpada neće mijenjati. Povećanje odvojeno prikupljenog otpada uzrokuje povećanje količine dobivenog komposta i recikliranih materijala što je i primarni cilj sustava gospodarenja komunalnim otpadom, čime se neposredno uvodi kružno gospodarstvo.



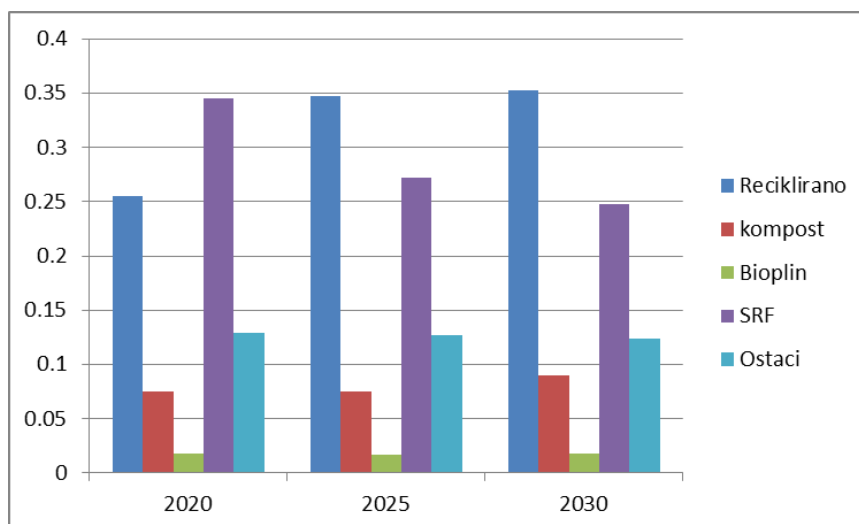
Slika 32. Kumulativni tokovi frakcija otpada za 2020. godinu



Slika 33. Kumulativni tokovi frakcija otpada za 2025. godinu



Slika 34. Kumulativni tokovi frakcija otpada za 2030. godinu

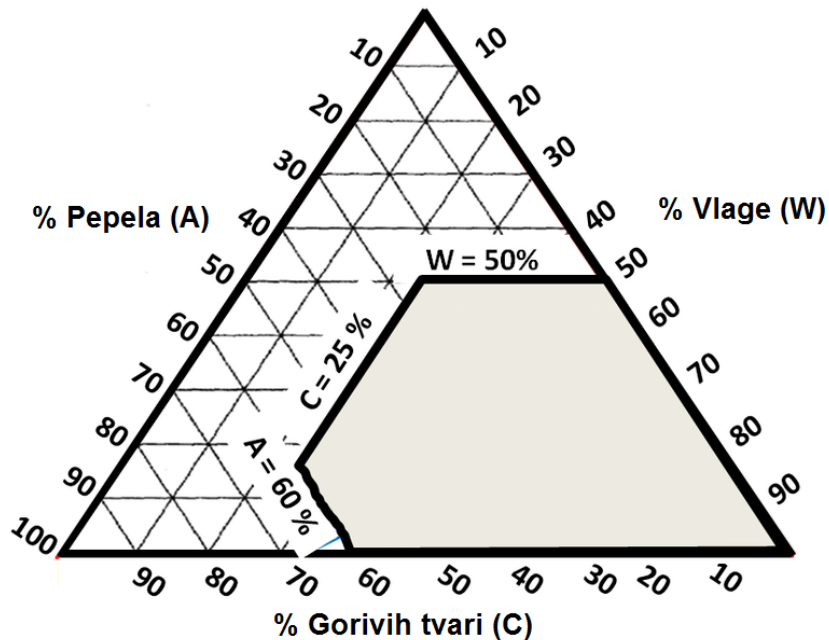


Dijagram 3. Promjena masenih udjela pojedinih tokova kroz godine

### 2.3 Svojstva goriva

Tri su bitna parametra koja definiraju kvalitetu bilo kojeg goriva, a to su udio gorive tvari, sadržaj vlage, udio pepela. Ova tri parametra određuju ogrijevnu moć ili vrijednost goriva. Najbitnija vrijednost je donja ogrijevna moć goriva. Ona govori koliko energije (kJ) se može dobiti iz 1 kg goriva u toplim dimnim plinovima. Niskokvalitetno gorivo ima visok udio vlage i pepela, a relativno nizak udio gorive tvari [16], što rezultira niskom vrijednosti donje ogrijevne moći. Tannerov dijagram (slika 35.) koristi se za određivanje dali otpad može biti spaljivan bez pomoćnog

goriva. Ako su vrijednosti pojedinih goriva izvan osjenčanog područja, to upućuje na činjenicu da je u procesu izgaranja potrebno pomoćno dodatnog gorivo za održavanje procesa izgaranja.



Slika 35. Tanner-ov dijagram [17]

### 2.3.1 Određivanje ogrijevne moći krutog oporabljenog goriva

Vrlo bitne vrijednosti kod energetske uporabe krutog oporabljenog otpada su gornja (HHV) i donja (LHV) ogrijevna moć goriva. Kako bi se odredila vrijednost gornje ogrijevne moći goriva koristit se metoda spaljivanjem male količine goriva u kalorimetarskoj peći. Potom se na temelju izmjerene gornje ogrijevne moći goriva izračunava donja ogrijevna moć. Vrijednost gornje ogrijevne moći goriva moguće je izračunati korištenjem odgovarajućih izraza ukoliko je poznat udio pojedinih elemenata u gorivu, kako je prikazano u tablici 4. [18], [19] za različite frakcije komunalnog otpada.

Bitno je napomenuti da se kod određivanja udjela pojedinih elemenata u frakciji, računaju postoci suhog dijela frakcije. Udio vlage ( $H_2O$ ) se računa posebno tako da se uzima cjelokupna masa (suhe i mokre frakcije) i izračuna se udio vlage.



Frakcija	H <sub>2</sub> O [%]	C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [%]	Pepeo
papir i karton	16.88%	43.50%	6.00%	44.00%	0.30%	0.20%	6.00%
plastika	10.49%	60.00%	7.20%	22.80%	0.00%	0.00%	10.00%
staklo	0.00%	0.50%	0.10%	0.40%	0.10%	0.00%	98.90%
drvo i tkanina	13.65%	52.00%	6.30%	36.60%	2.40%	0.20%	2.50%
guma i koža	7.41%	51.00%	6.66%	17.17%	7.99%	0.70%	16.48%
organska frakcija	54.54%	45.90%	6.00%	41.00%	1.80%	0.30%	5.00%
metali	17.65%	4.50%	0.60%	4.30%	0.10%	0.00%	90.50%
inertna frakcija	1.28%	29.04%	5.18%	6.12%	0.18%	0.02%	59.46%
<b>Biosušena frakcija</b>	35.00%	45.90%	6.00%	41.00%	1.80%	0.30%	5.00%

Tablica 4. Udio elemenata u pojedinim frakcijama

Za izračunavanje gornje ogrijevne moći (HHV), korištena je Dulong-ova formula [18].

$$HHV = - \left( 1 - \frac{\%H_2O}{100} \right) (-0.3708(\%C) - 1.1124(\%H) + 0.1391(\%O) - 0.3178(\%N) - 0.1391(\%S)) \quad (9)$$

Zatim se koristi formula za izračunavanje donje ogrijevne moći goriva (LHV) [20].

$$LHV = HHV - 0.212(\%H) - 0.0245(\%H_2O) - 0.008(\%O) \quad (10)$$

Postupak proračuna objasniti će se na primjeru frakcije papira i kartona. Upotrebom izraza (9) izračunava se gornja ogrijevna moć goriva:

$$HHV_{PK} = - \left( 1 - \frac{16.88}{100} \right) (-0.3708 \times 43.5 - 1.1124 \times 6 + 0.1391 \times 44 - 0.3178 \times 0.3 - 0.1391 \times 0.2)$$

$$HHV_{PK} = 13.97 \frac{kJ}{kg}$$

Zatim pomoću (10) izračunava se donja ogrijevna moć krutog oporabljivog goriva:

$$LHV_{PK} = 13.97 - 0.212 \times 6 - 0.0245 \times 16.88 - 0.008 \times 44$$

$$LHV_{PK} = 11.93 \frac{kJ}{kg}$$

Primijeni li se proračun na preostale frakcije, dobivaju se vrijednosti koje su prikazane u tablici 5.

<b>Suho gorivo</b>	HHV (prema Dulong) [kJ/kg]	LHV [kJ/kg]
Papir i karton	13.97	11.93
plastika	24.24	22.28
staklo	0.27	0.25
drvo i tkanina	18.99	17.03
guma i koža	24.60	22.87
organska frakcija	8.46	5.52
metali	1.46	0.86
inertna frakcija	15.54	14.36
<b>Biosušena frakcija</b>	12.09	9.64

Tablica 5. Vrijednosti gornje (HHV) i donje (LHV) ogrijevne moći pojedinih frakcija komunalnog otpada

Pošto su poznati udjeli pojedinih frakcija u ukupnoj smjesi, možemo izračunati koliko pojedina frakcija doprinosi ukupnoj ogrijevnoj moći. To se izračuna na način da se pomnoži maseni udio frakcije sa ogrijevnom moći. Za papir i karton to izgleda ovako:

$$doprin_{HHV,PK} = HHV_{PK} \times m_{PK} = 13.97 \times 0.2326 = 3.25$$

$$doprin_{LHV,PK} = LHV_{PK} \times m_{PK} = 11.93 \times 0.2326 = 2.78$$

Izračunate vrijednosti za preostale frakcije prikazane su u tablici 6.:

<b>Suho gorivo</b>	Udio pojedine frakcije	Doprinos (HHV)	Doprinos (LHV)
Papir i karton	0.2326	3.25	2.78
plastika	0.1586	3.84	3.53
staklo	0.0001	0.00	0.00
drvo i tkanina	0.0797	1.51	1.36
guma i koža	0.0130	0.32	0.30
organska frakcija	0.0048	0.04	0.03
metali	0.0000	0.00	0.00
inertna frakcija	0.0002	0.00	0.00
<b>Biosušena frakcija</b>	0.5110	6.18	4.92

Tablica 6. Doprinos pojedine frakcije ukupnoj ogrijevnoj moći

Zbrajanjem doprinosa dobivamo ukupnu ogrijevnu moć krutog oporabljene goriva koja iznosi:

$$HHV_{uk} = 15.15 \frac{kJ}{kg}$$

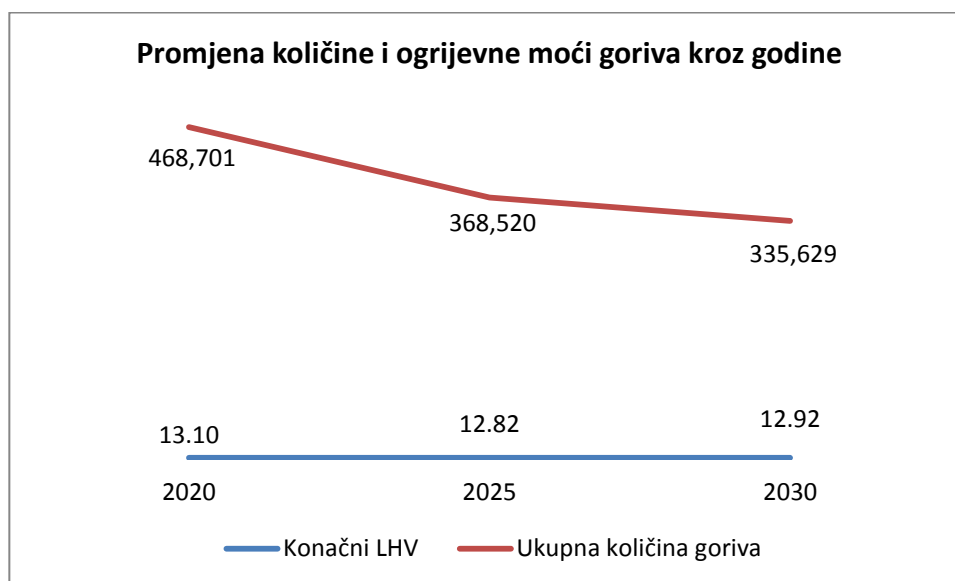
$$LHV_{uk} = 12.92 \frac{kJ}{kg}$$

Uz ukupnu donju ogrijevnu moć, veliku važnost ima i konačni sastav krutog oporabljenog goriva (tablica 7.).

Element	H <sub>2</sub> O [%]	C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [%]	Pepeo
Udio	24.92%	48.12%	6.22%	38.14%	1.29%	0.23%	6.00%

Tablica 7. Sastav goriva u suhoj frakciji

Ako prema primjeru iz prethodnog poglavlja isto učinimo i za ostale godine, dobit ćemo situaciju prikazanu u dijagramu 4.



Dijagram 4. Promjena količine i ogrijevne moći goriva kroz godine

Možemo zaključiti da promjena propisana regulativom [6], [7], [8], bitno ne utječe na ogrijevnu moć goriva već samo na ukupnu količinu proizvedenog krutog oporabljenog goriva (SRF).

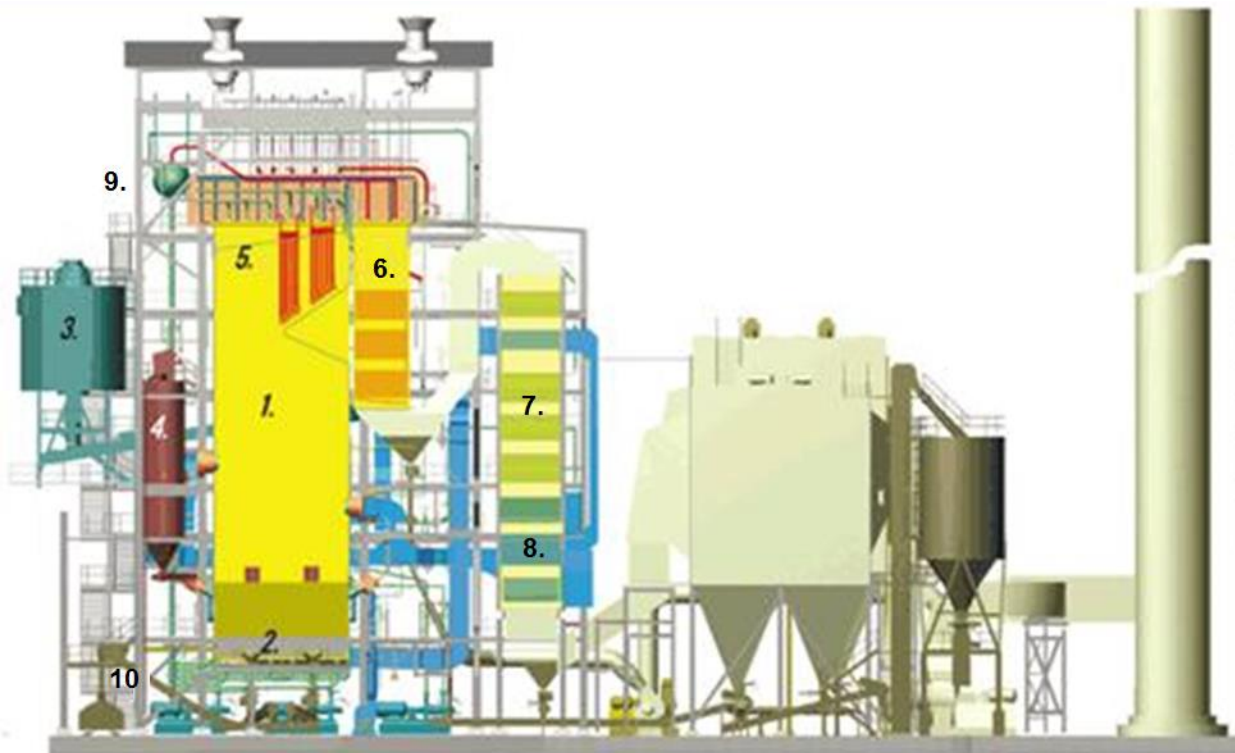
## 2.4 Sustav za energetske uporabu krutog oporabljenog goriva

Postoje tri tehnologije spaljivanja krutog oporabljenog goriva s obzirom na vrstu ložišta u generatoru pare, a to su:

1. izgaranje goriva na rešetci,
2. spaljivanje u fluidiziranom sloju ,
3. spaljivanje u rotacijskoj peći.

Spaljivanje na rešetki se uglavnom koristi u velikim postrojenjima, dok se u manjim postrojenjima pretežno koristi tehnologija izgaranja u fluidiziranom sloju. Rotacijske peći se uglavnom koriste za spaljivanje opasnog otpada.

Zbog količine proizvedenog otpada u Republici Hrvatskoj, u prednosti je upotreba ložišta generatora pare koja koriste tehnologiju izgaranja u fluidiziranom sloju. Postrojenje za spaljivanje u fluidiziranom sloju namijenjeno je spaljivanju goriva promijenljivog sastava. Zbog toga je fluidizirani sloj naširoko korišten pri enetskoj uporabi krutog oporabljene goriva (SRF). Fluidizirani sloj je sloj čvrstih čestica (kvarcnog pijeska) kroz koji protječe zrak s takvom brzinom da čestice levitiraju. Proizvod postrojenja za spaljivanje je dimni plin nastao izgaranjem mase pri kontinuiranom doziranju zraka za izgaranje. Dimni plinovi imaju funkciju prijenosnika toplinske energije koja se iskorištava u postrojenju za proizvodnju mehaničkog rada. Toplinska energija može se koristiti za zagrijavanje procesne tople vode i/ili za proizvodnju pare u generatorima pare u termoelektranama.



Slika 36. Postrojenje za spaljivanje obrađenog otpada [21]

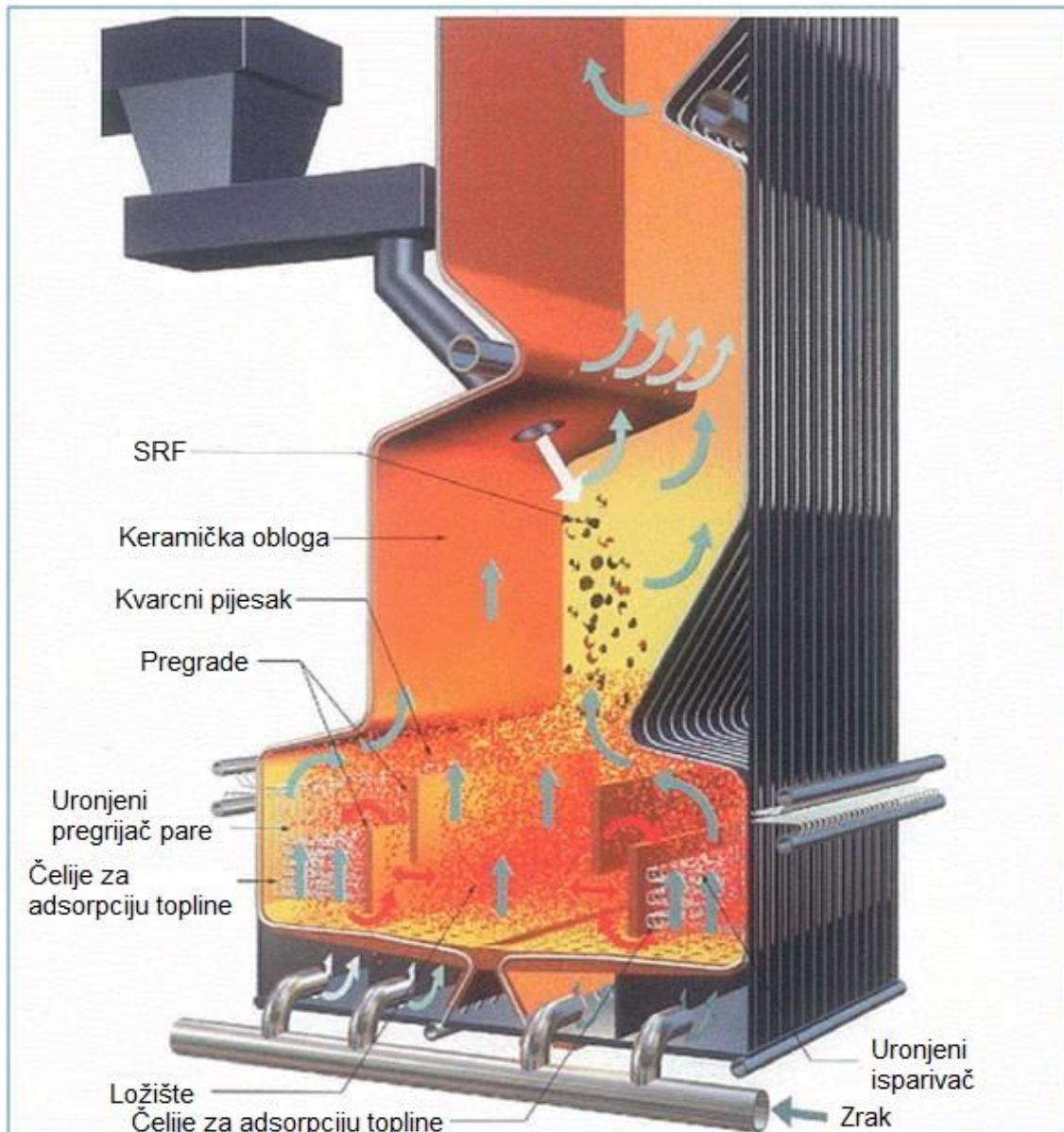
Proces spaljivanja u fluidiziranom sloju (slika 36.) počinje od spremnika goriva (3). Nakon spremnika slijedi dozator (4) koji na temelju trenutnih parametara dozira gorivo u ložište (1). Gorivo sagorijeva u fluidiziranom sloju, a pepeo pada kroz

rešetku (2) u sakupljač pepela koji se transporterom transportira do spremišta za pepeo (10). Dimni plinovi u ložištu postižu temperaturu od cca 950°C. U ovom slučaju, ložište je obloženo keramikom. Pod brojem 5 slijedi isparivač kroz koji teče mokra vodena para koja isparava te cijevima odlazi u bubanj (9). U daljnjem toku dimni plinovi prolaze kroz pregrijač pare (6) gdje predaju toplinsku energiju suhozasićenoj pari koja prelazi u stanje pregrijane pare. Zatim, dimni plinovi prolaze kroz ekonomajzer (7), gdje toplinsku energiju predaju napojnoj vodi koja se na takav način predgrijava na određenu temperaturu. Prije nego što dimni plinovi uđu u proces obrade dimnih plinova, dio topline predaju predgrijaču zraka (8).

#### 2.4.1 Ložište za spaljivanje SRF-a u fluidiziranom sloju

Kruto oporabljeno gorivo (SRF) ulazi iz spremnika u dozator gdje se dozira u ložište (slika 37.) gdje se odvija izgaranje u atmosferskom fluidiziranom sloju (BFB). U ložište se dozira zrak za izgaranje u omjeru 1.4 kilograma zraka prema 1 kilogramu goriva. Postoji primarni i sekundarni dovod zraka za izgaranje. Primarni zrak osigurava potpuno izgaranje goriva, dok sekundarni zrak realizira turbolentno miješanje SRF-a kako bi se postiglo potpuno izgaranje. Princip rada fluidiziranog sloja je fluidizacija čestica u ložištu gdje čestice krute tvari (kvarcni pijesak) lebde u uzlaznoj struji fluidizatora (zraka i dimnih plinova). Zbog dobre izmiješanosti čestica goriva i zraka u ložištu vladaju gotovo izotermni uvjeti što pospješuje zapaljenje i izgaranje goriva. Na česticu krutog goriva djeluju dvije sile, a to su sila gravitacije koja vuče česticu goriva prema dolje i pneumatska sila koja podiže česticu goriva prema gore. Fluidizacija čestica goriva nastaje kada se navedene sile izjednače, pa čestice goriva lebde u ložištu. Povećanjem brzine strujanja fluidizatora, visina sloja se povećava.

Temperature izgaranja dimnih plinova u ložištu su između 850°C i 1050°C, dok je u samom sloju temperatura 650°C. Pepeo se odvozi iz ložišta na dnu i skladišti na posebno odlagalište za pepeo i šljaku, a dimni plinovi nakon energetskog iskorištavanja odlaze u postrojenje za njihovu obradu prije ispuštanja u atmosferu. U ložište se s gorivom dozira i kvarcni pijesak koji ima funkciju da osigurava uniformnu temperaturu fluidiziranog sloja, čime se omogućuje lakše zapaljenje goriva. Osim ložišta sa atmosferskim fluidiziranim slojem, u praksi se koriste ložišta s cirkulirajućim fluidiziranim slojem (cirkofluid).



Slika 37. Ložište za izgaranje goriva u fluidiziranom sloju [21]

#### 2.4.2 Odlagalište pepela i šljake

Odlagalište pepela i šljake je specijalno odlagalište često u sklopu postrojenja za energetske uporabu goriva. Na odlagalište se odlažu pepeo i šljaka iz ložišta postrojenja, leteći pepeo iz sekcije za pročišćavanje dimnih plinova i filterski otpad iz sekcije za obradu otpadnih voda koje se koriste u sekciji za obradu dimnih plinova.

U primjeru koji se obrađuje u okviru ovog diplomskog rada izgaranjem jedne tone krutog oporabljene goriva (SRF) nastaje oko 104 kg pepela. IPPC BREF [22] navodi da će kod pročišćavanja dimnih plinova suhim postupkom nastati od 32 do 80 kg/t pepela, u polusuhom postupku nastaje od 40 do 65 kg/t, dok u mokrom postupku

nastaje od 30 do 50 kg/t. U otpadu se nalaze i anorganski onečišćivači od kojih su najznačajniji teški metali, jer se ne uništavaju tijekom procesa izgaranja, već napuštaju postrojenje bilo u dimnim plinovima, pepelu ili filter-pepelu. Visoka koncentracija onečišćenih tvari upućuje na to da se ostaci moraju zbrinjavati kao opasni otpad što zahtijeva odlaganje na odlagalištima opasnog otpada.

### 3. POSTAVA ZADATKA

Zadatak ovog diplomskog rada je ispitati mogućnosti energetske uporabe krutog oporabljenog goriva (SRF) u Republici Hrvatskoj. Analizirati će se energetska uporaba SRF-a u pet različitih postrojenja, te će se na osnovu dobivenih rezultata definirati odgovarajući zaključci. U radu će se analizirati naredna postrojenja za energetske uporabu krutog oporabljenog goriva (SRF):

1. Izgaranje krutog oporabljenog goriva (SRF) se odvija u baznom energetskom postrojenju, koji se bazira na osnovnom Rankinovom ciklusu sa pregrijanjem pare uz parametre svježe pare uobičajene za takav tip postrojenja.
2. Izgaranje krutog oporabljenog goriva (SRF) u energetskom postrojenju s međupregrijanjem i dvostupanjskom parnom turbinom (primjer waste-to-energy postrojenje preuzetog iz stručne literature [23]), gdje je maksimalna temperatura pregrijavanja pare limitirana na 443°C zbog izbjegavanja pojave korozije.
3. Izgaranje krutog oporabljenog goriva (SRF) u hibridnom energetskom postrojenju (primjer hibridnog waste-to-energy postrojenje preuzetog iz stručne literature [23]), gdje se ciklus parne turbine sparuje s ciklusom plinske turbine.
4. Izgaranje krutog oporabljenog goriva (SRF) u modernom energetskom postrojenju (postrojenje izvedeno po uzoru na waste-to-energy postrojenje u Amsterdamu [24]) s povišenim tlakom svježe pare od 130 bara, međupregrijanjem pare i predgrijanjem zraka.
5. Izgaranje krutog oporabljenog goriva (SRF) u naprednom energetskom postrojenju (postrojenje izvedeno po uzoru na waste-to-energy postrojenje u Italiji (Brescia) [24]), s tlakom svježe pare od 80 bara, ali bez međupregrijanja.

Podatci o godišnjim količinama nastalog otpada uzeti su iz relevantne stručne literature [5].



## 4. RAZRADA ZADATKA

Za simulaciju navedenih postrojenja potrebno je zadati odgovarajuće ulazne vrijednosti (parametre), koji su prikazani u tablici 8. Vrijednosti okolišnih uvjeta, protok goriva (SRF) i ogrijevna moć goriva imaju jednake vrijednosti kod svih postrojenja. Jednake su i vrijednosti izentropske efikasnosti turbina, pumpi, i generatora pare. Gubici u izmjenjivačima topline su zadani u programu. Na ovaj način je smanjen utjecaji različitih karakteristika pojedinih uređaja u postrojenju koja variraju od proizvođača do proizvođača. Proračun je proveden u programskom paketu Cycle-tempo.

Za okolišne uvjete uzeti su standardni okolišni uvjeti. Protok goriva izračunat je prema godišnjoj količini proizvedenog krutog oporabljenog goriva u Republici Hrvatskoj [5] [4], i predviđenom godišnjem broju radnih sati postrojenja [24]. Donja ogrijevna moć goriva je izračunata u poglavlju 2.3. Temperatura predgrijanog zraka je usvojena po preporuci iz stručne literature [24]. Temperatura dimnih plinova na izlazu iz postrojenja nesmiye biti niža od 180°C zbog mogućnosti kondenzacije [24]. Vrijednosti tlaka kondenzacije, te tlaka i temperature na ulazu u turbinu uzete su iz odgovarajuće stručne literature [23], [24]. Pretičak zraka usvojen je 1.4 u skladu sa stručnom literaturom [24].

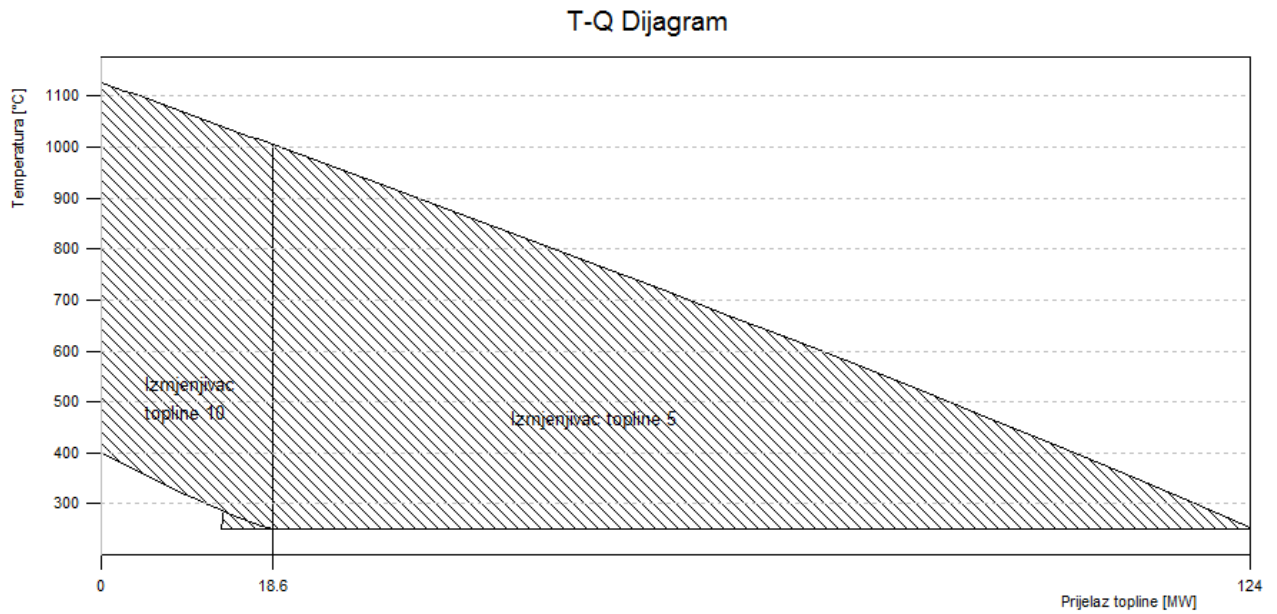
		Referentno postrojenje	Osnovno postrojenje sa MP	Hibridni sustav	Napredno postrojenje Amsterdam	Napredno postrojenje Brescia
<b>Okolišni uvjeti</b>						
Temperatura (°C)		15	15	15	15	15
Tlak (bar)		1.01325	1.01325	1.01325	1.01325	1.01325
Vlažnost (%)		60	60	60	60	60
<b>Postrojenje</b>						
Godišnja količina otpada (t/y)	2020	468701	468701	468701	468701	468701
	2025	368520	368520	368520	368520	368520
	2030	335629	335629	335629	335629	335629
Godišnji broj radnih sati postrojenja		7850	7850	7850	7850	7850

Protok goriva (kg/s)	2020	16.59	16.59	(SRF) 16.59	16.59	16.59	
				(NG) 4			
	2025	13.04	13.04	13.04	(SRF) 13.04	13.04	13.04
					(NG) 4		
	2030	11.88	11.88	11.88	(SRF) 11.88	11.88	11.88
					(NG) 4		
Donja ogrijevna moć goriva (LHV) (MJ/kgK)		13	13	(SRF) 13	13	13	
				(NG) 38			
<b>Generator pare</b>							
Temperatura predgrijanog zraka (°C)	-	-	-	-	150	150	
Temperatura dimnih plinova na izlazu iz postrojenja(°C)	250	180	180	180	180	180	
Pretičak zraka ( $\lambda$ )	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	
<b>Ciklus parne turbine</b>							
Temperatura na ulazu u turbinu (°C)	400	443	520	440	440	460	
Tlak na ulazu u turbinu (bar)	40	62	62	62	130	80	
Tlak kondenzacije (bar)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
Izentropska korisnost turbine (%)	80	80	80	Parna 80	80	80	
				Plinska 86			
Izentropska korisnost pumpi (%)	95	95	95	95	95	95	
				Kompresor 87			

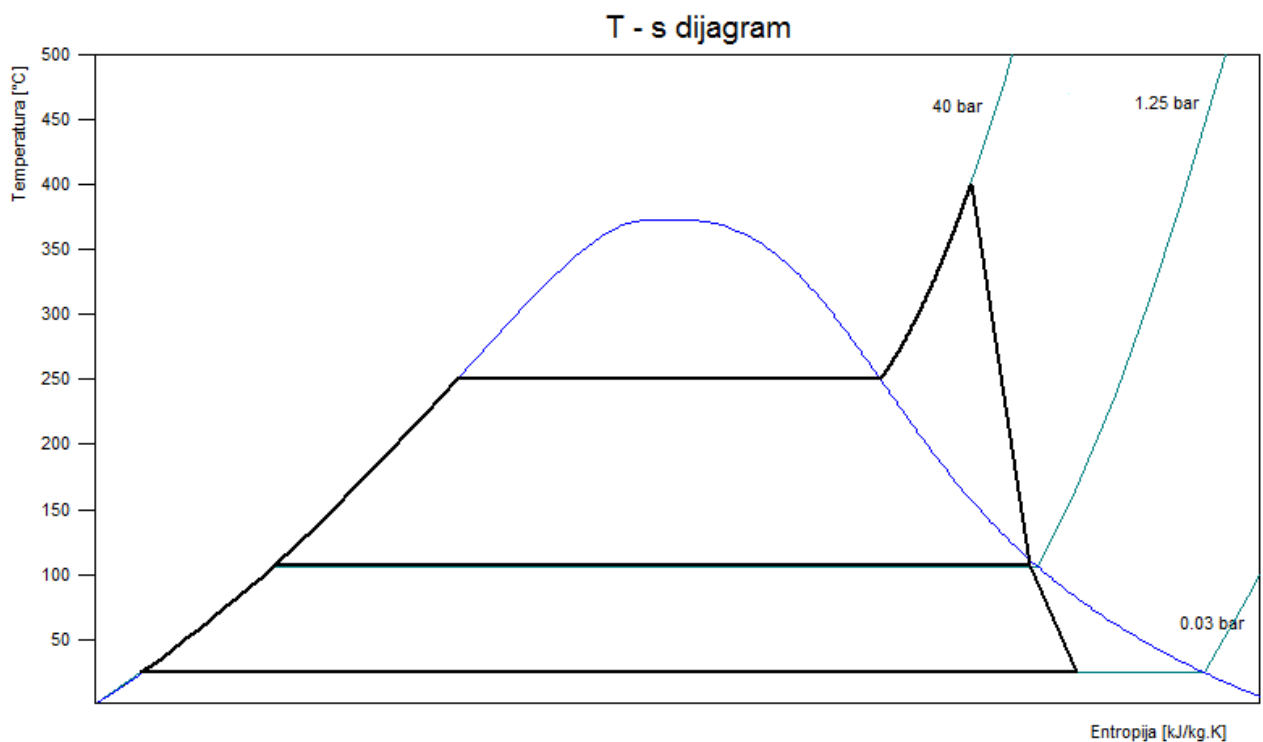
Tablica 8. Osnovni parametri za simulaciju postrojenja



predgrijavanje napojne vode minimalno. Kod našeg osnovnog postrojenja zato imamo samo otplinjivač. Na dijagramima 5. i 6. prikazani su odgovarajući T-s i T-Q dijagrami osnovnog (referentnog) postrojenja.



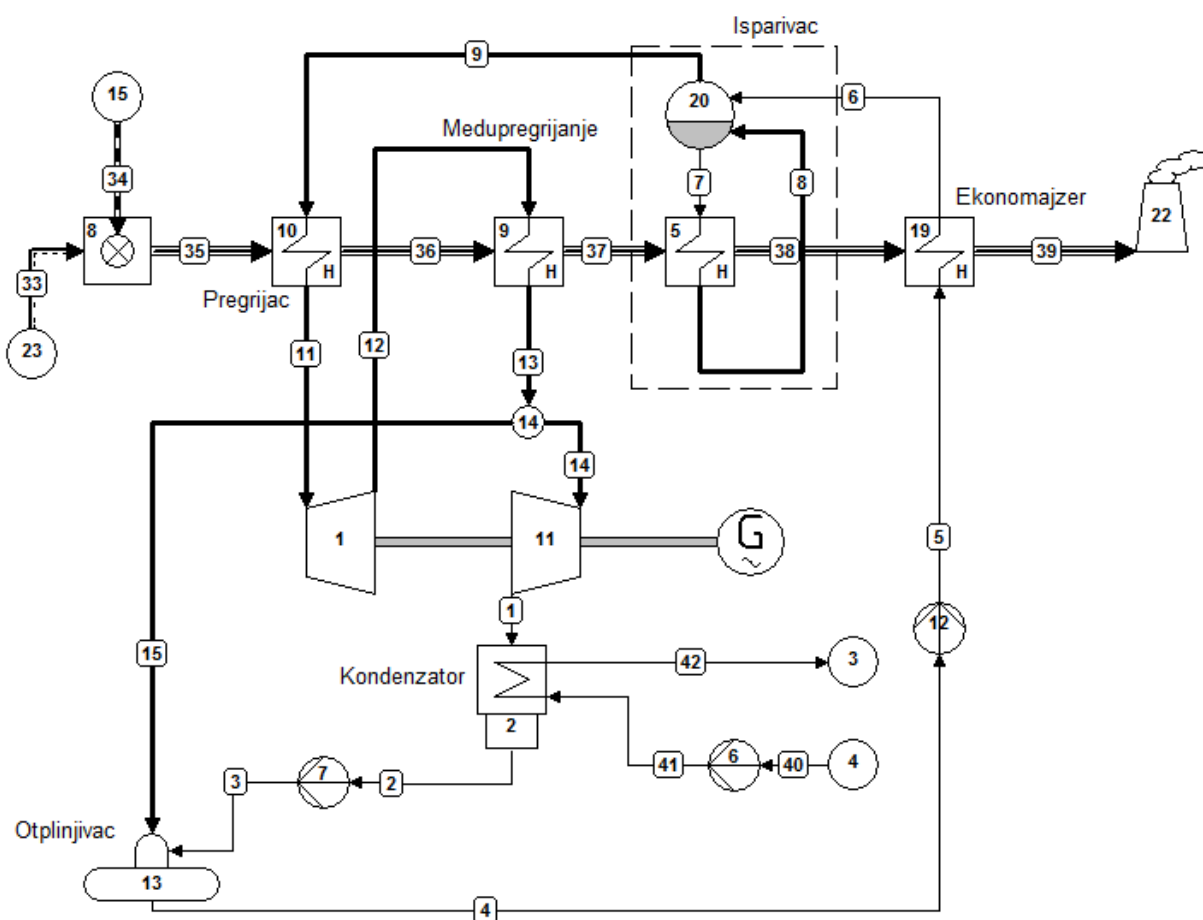
Dijagram 5. T-Q dijagram osnovnog postrojenja



Dijagram 6. T-s dijagram osnovnog postrojenja

## 4.2 Osnovno postrojenje sa međupregrijanjem

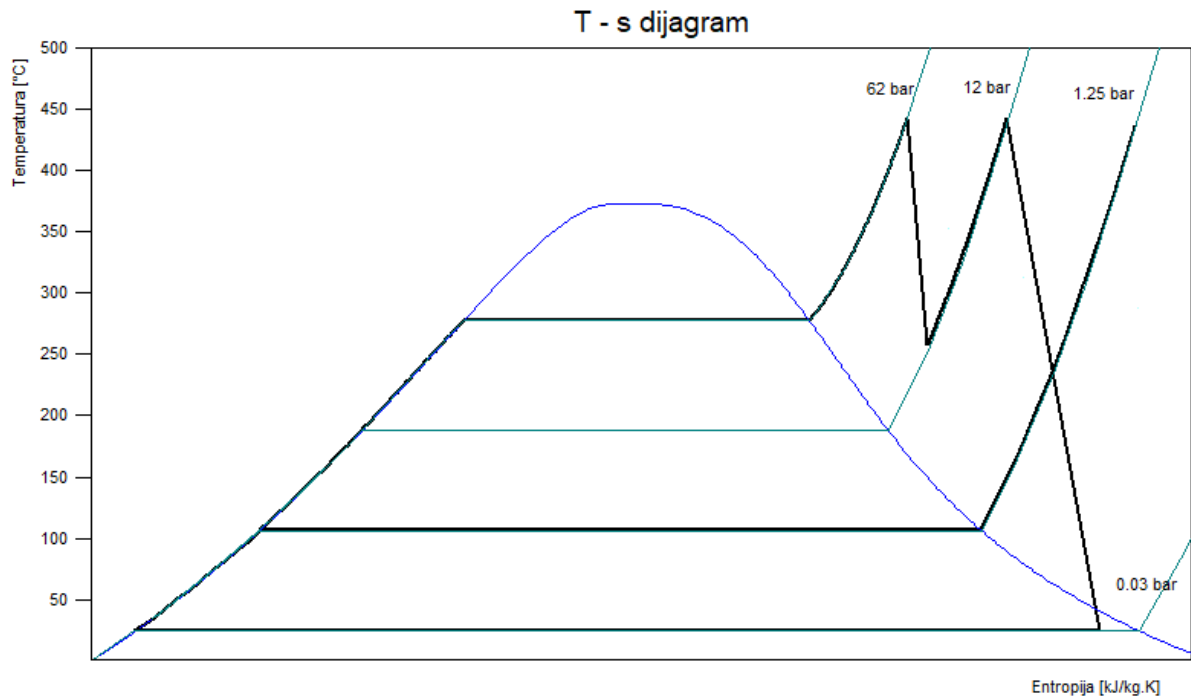
Analizirati će se osnovno (referentno) termoenergetskog postrojenje za proizvodnju električne i toplinske energije (waste-to-energy) koje kao gorivo koristi kruto oporabljeno gorivo (SRF) s međupregrijanjem. Ovakvo referentno postrojenje sastoji se od generatora pare u kojem se nalazi predgrijač (ekonomajzer) napojne vode, isparivač, pregrijač pare i međupregrijača. Toplinska shema postrojenja modeliranog u programskom paketu Cycle-tempo prikazana je na slici 39.



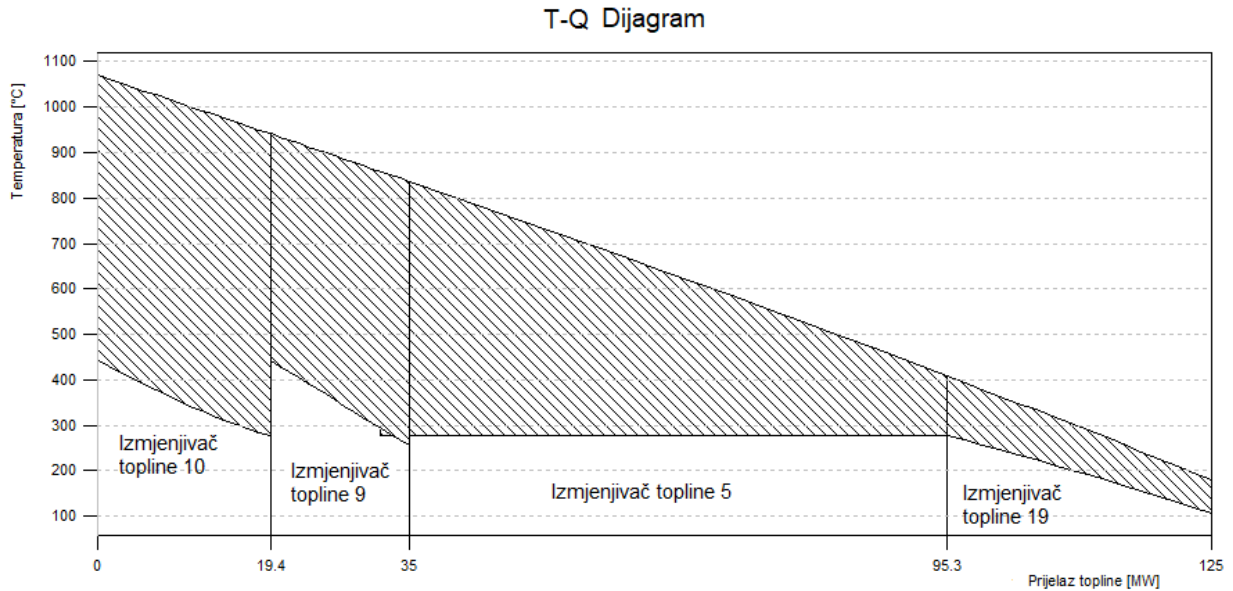
Slika 39. Shema osnovnog (referentnog) postrojenja s međupregrijanjem

Maksimalna temperatura pregrijane pare u generatoru pare je limitirana na  $443^{\circ}\text{C}$  zbog pojave erozije i korozije. Nakon izlaska iz generatora pare, pregrijana svježa para pod tlakom od 62 bara ulazi u visokotlačni dio turbine gdje ekspandira do tlaka 12.5 bara. Potom odlazi na međupregrijanje gdje joj se temperatura ponovo povisuje do  $443^{\circ}\text{C}$  i ulazi u niskotlačni dio turbine gdje ekspandira do tlaka kondenzacije od 0.03 bara. Nakon međupregrijanja, dio pare se uzima i šalje u otplinjivač gdje se miješa sa kondenzatom na tlaku od 1.3 bara.

Odgovarajući T-s i T-Q dijagrami osnovnog postrojenja s međupregrijanjem prikazani su na dijagramima 7. i 8.



Dijagram 7. T-s dijagram osnovnog postrojenja s međupregrijanjem



Dijagram 8. T-Q dijagram osnovnog postrojenja s međupregrijanjem

### 4.3 Hibridno postrojenje

Kod hibridnog postrojenja ciklus plinske turbine se uklapa u postrojenje parne turbine na specifičan način, te je takvo postrojenje predloženo u relevantnoj stručnoj literaturi [25]. Postrojenje plinske turbine koristi zemni plin kao gorivo, a ispušni dimni

plinovi iz plinske turbine koriste se za pregrijavanje pare u postrojenju parne turbine. Dakle, u hibridnom postrojenju generator pare ima pregrijač pare, ali se pregrijavanje vodene pare na konačnu temperaturu od 520°C odvija u posebnom vanjskom izmjenjivaču topline. Tlak svježere pare iznosi 62 bara, dok oduzeta para za potrebe otplinjavanja ima tlak od 1.25 bara.

Razlog uvođenju ovakvog rješenja je visok udio klorovodika koji se oslobađa u procesu izgaranja SRF-a. Naime, kod pregrijača pare, previsoke temperature svježere pare mogu biti razlog visokotemperaturne korozije cijevi.

Toplinska shema hibridnog postrojenja prikazana je na slici 40.

U sklop parnog postrojenja dodana je plinska turbina od koje se dimni plinovi također iskorištavaju za podizanje energetske vrijednosti radnog fluida (pare). Dakle, nakon izlaska iz bojlera gdje se spaljuje SRF, para se miješa sa suhozasićenom parom iz HRSG (*eng. Heat Recovery Steam Generator*) isparivača te se dovodi do HRSG pregrijača pare kako bi se podigla temperatura na 520°C. Zatim se pregrijana para dovodi do turbine gdje ekspandira do tlaka kondenzacije od 0.03 bara.

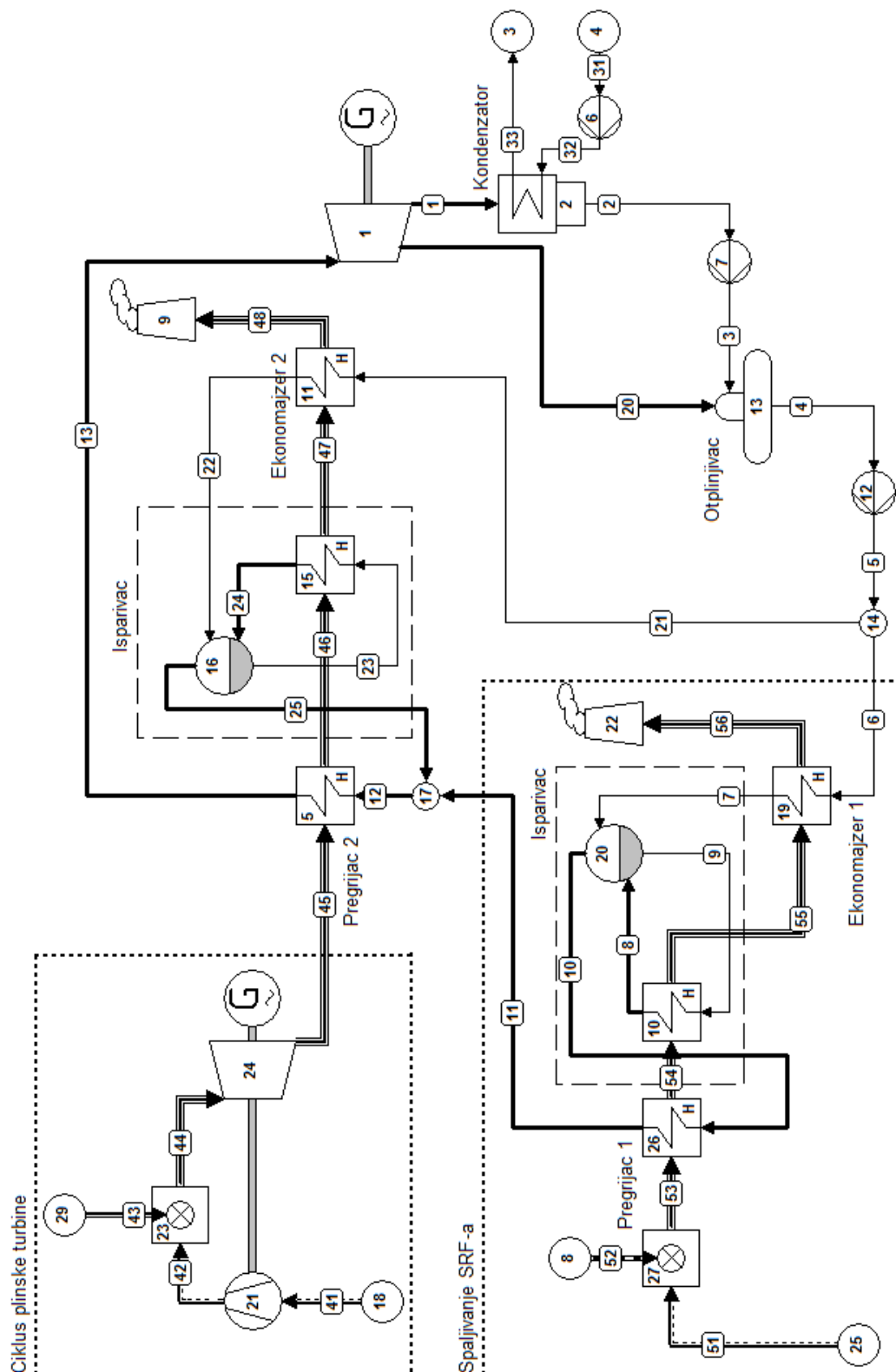
Odgovarajući T-s i T-Q dijagrami hibridnog postrojenja prikazani su na dijagramima 9. i 10.

#### **4.4 Napredno energetska postrojenje tip Amsterdam**

Povišenje stupnja termodinamičke korisnosti kod ovog tipa postrojenja izvedeno je tako što je povišen tlak svježere pare na 130 bara. Uz promjenu parametara, promijenjena je i toplinska shema postrojenja. Dio suhozasićene vodene pare se odmah na izlasku iz bubnja u generatoru pare oduzima za potrebe međupregrijanja pare, na njenom putu između visokotlačnog i niskotlačnog dijela turbine. Glavni dio toka suhozasićene pare se upućuje na pregrijavanje do temperature 440°C, nakon čega ulazi u visokotlačnu turbinu gdje ekspandira do tlaka od 14 bara. Nakon toga para ulazi u međupregrijač gdje se zagrijava do temperature od 320°C, te ekspandira u niskotlačnom dijelu turbine na tlak u kondenzatoru od 0.03 bara. Nakon kondenzatora, dio kondenzata se odvaja na predgrijavanje nakon čega se vraća u glavni tok. Kako bi se povećao stupanj termodinamičke korisnosti postrojenja, jedno oduzimanje u niskotlačnom dijelu turbine koristi se za predgrijavanje zraka za

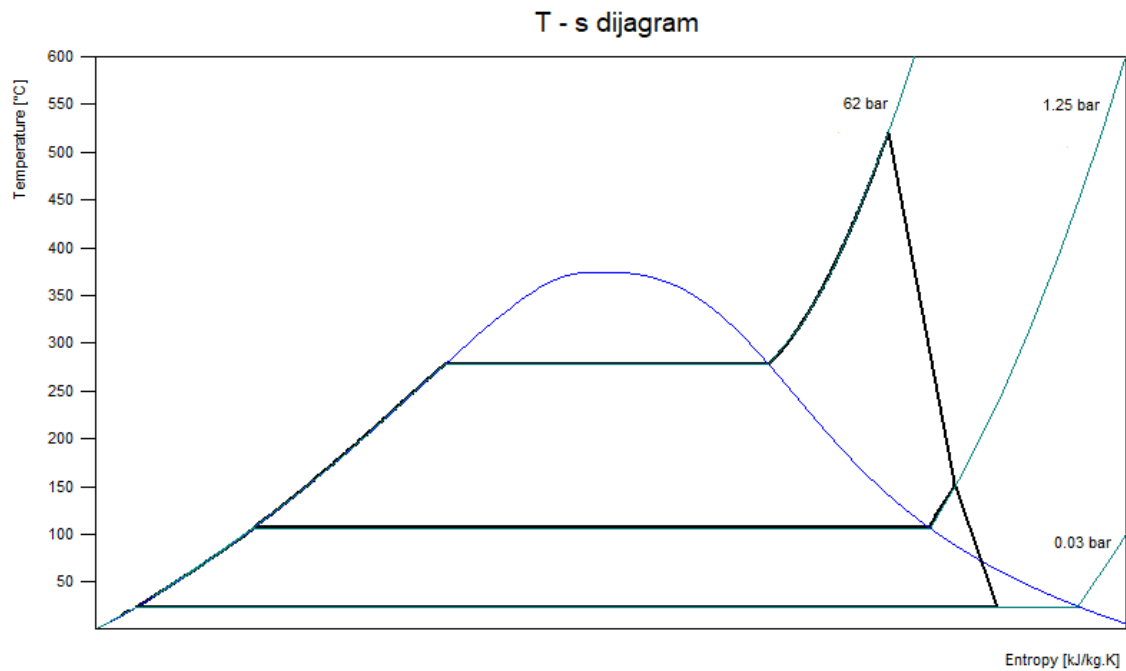
izgaranje koji ulazi u generator pare, a nastali kondenzat se vraća u tok kondenzata koji odlazi na predgrijavanje kondenzata pomoću dimnih plinova [24].

Toplinska shema postrojenja tip Amsterdam prikazana je na slici 41.

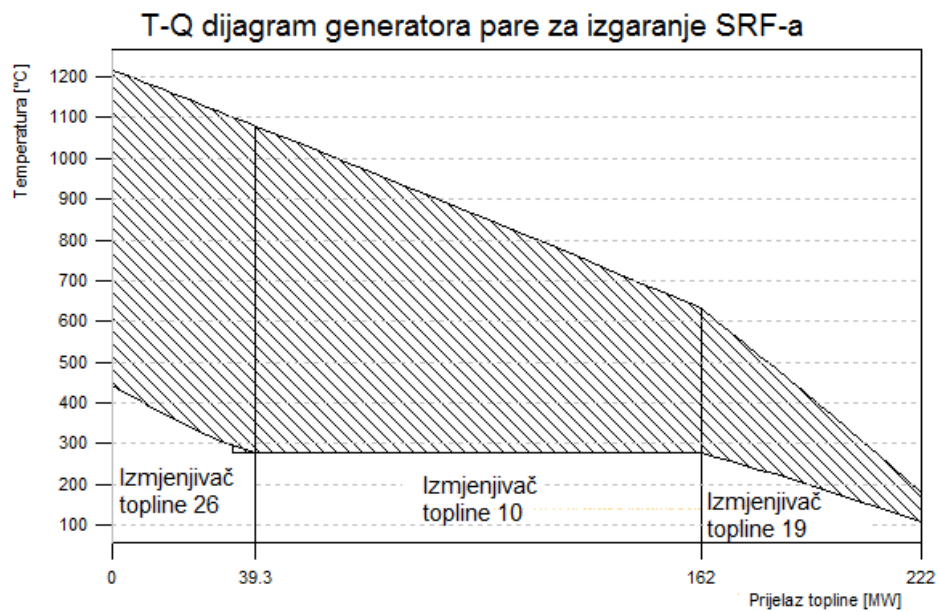


Slika 40. Hibridno postrojenje





Dijagram 9. T-s dijagram hibridnog postrojenja



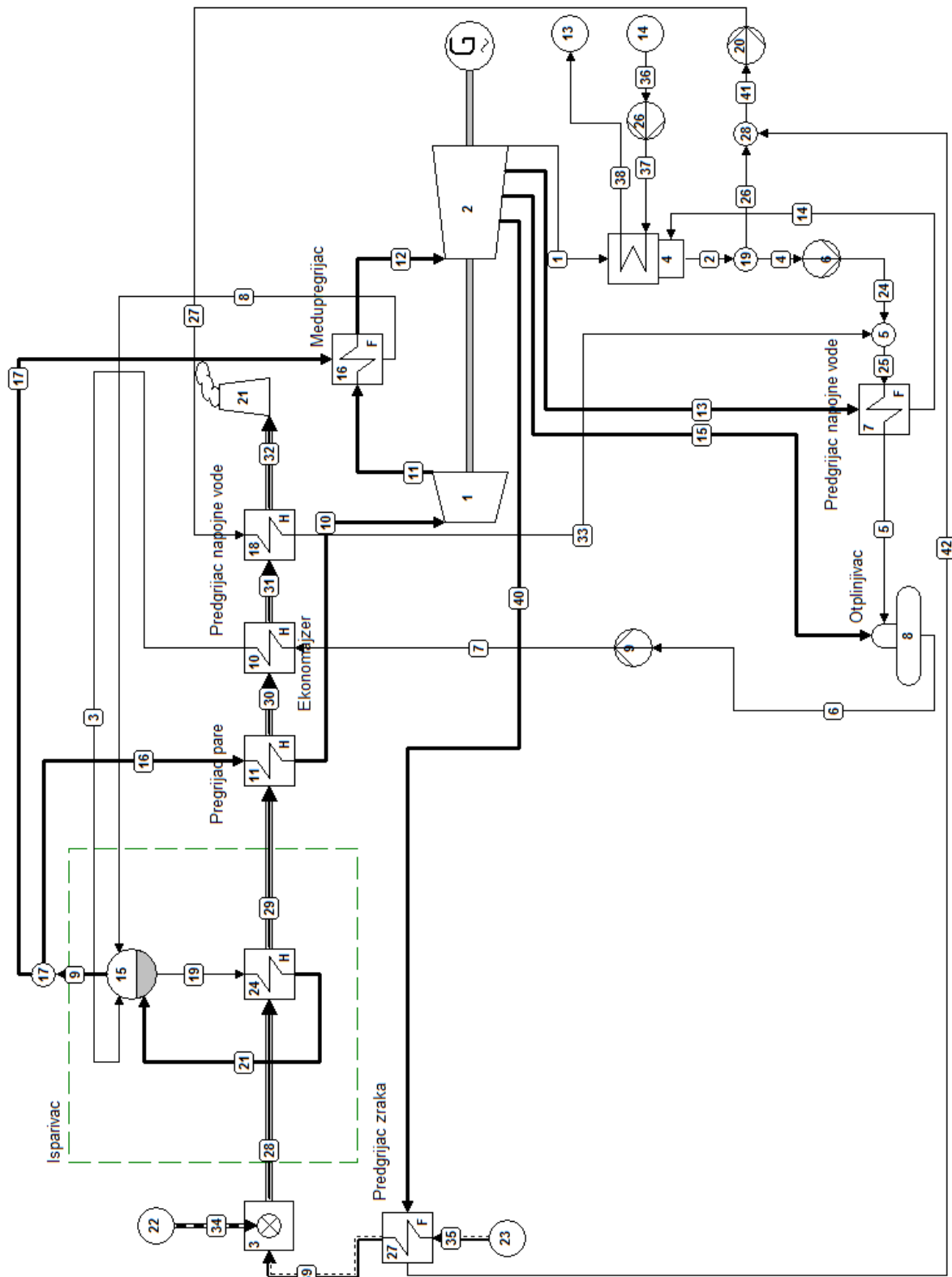
Dijagram 10. T-Q dijagram hibridnog postrojenja

Odgovarajući T-s i T-Q dijagrami postrojenja tip Amsterdam prikazani su na dijagramima 11. i 12.

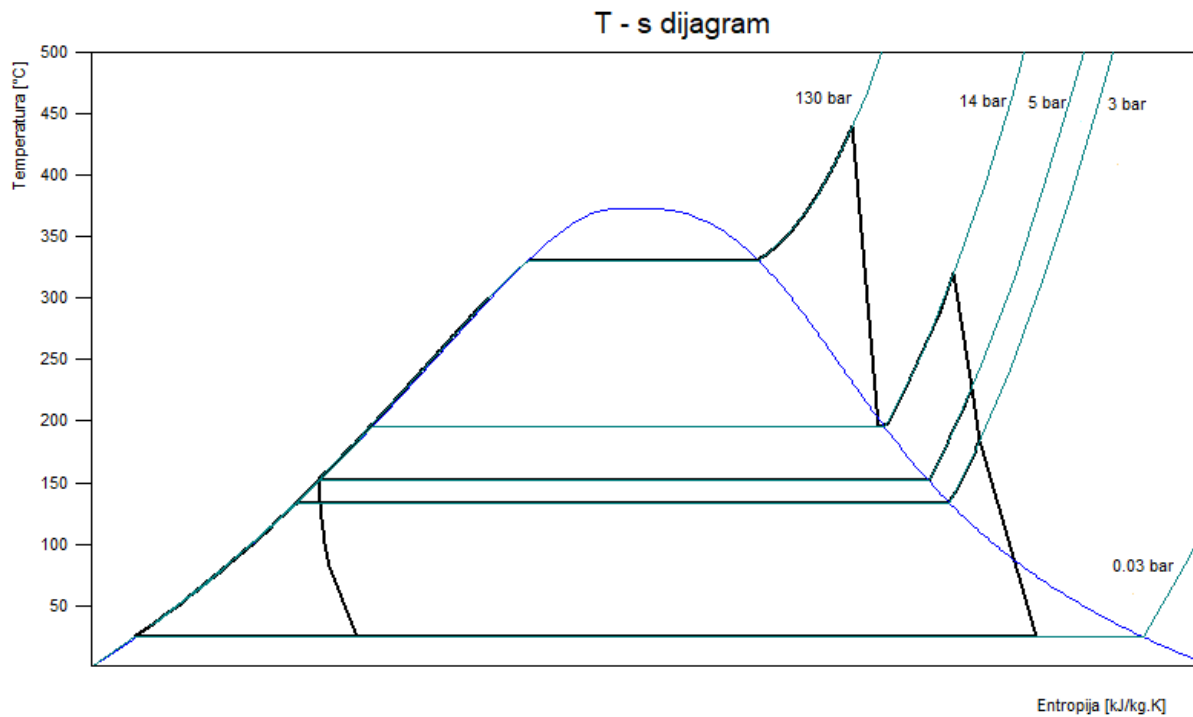
#### 4.5 Napredno energetska postrojenje tip Brescia

Postrojenje tip Brescia također sadrži dodatno predgrijanje kondenzata dimnim plinovima i predgrijanje zraka za izgaranje u generatoru pare s oduzetom parom iz niskotlačnog dijela turbine. Parametri pregrijane svježe pare na ulazu u turbinu su 80

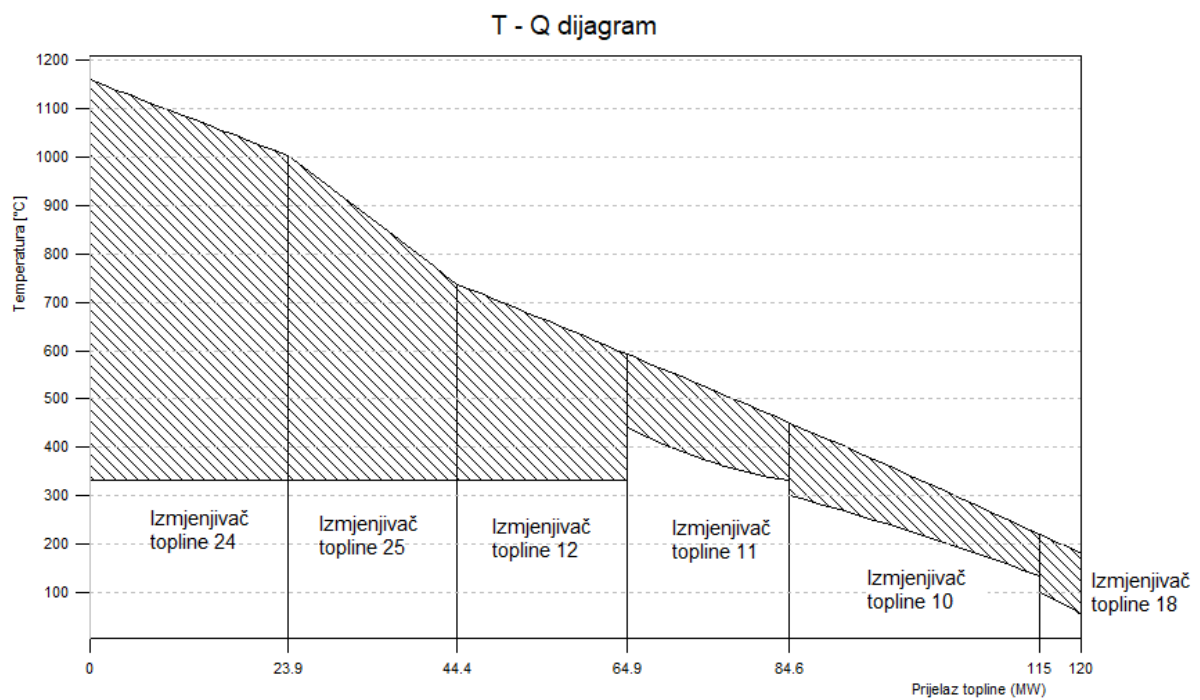
bara i 460°C. Turbina je izvedena iz jednog dijela, te postrojenje nema međupregrijanja [24]. Toplinska shema postrojenja prikazana je na slici 42.



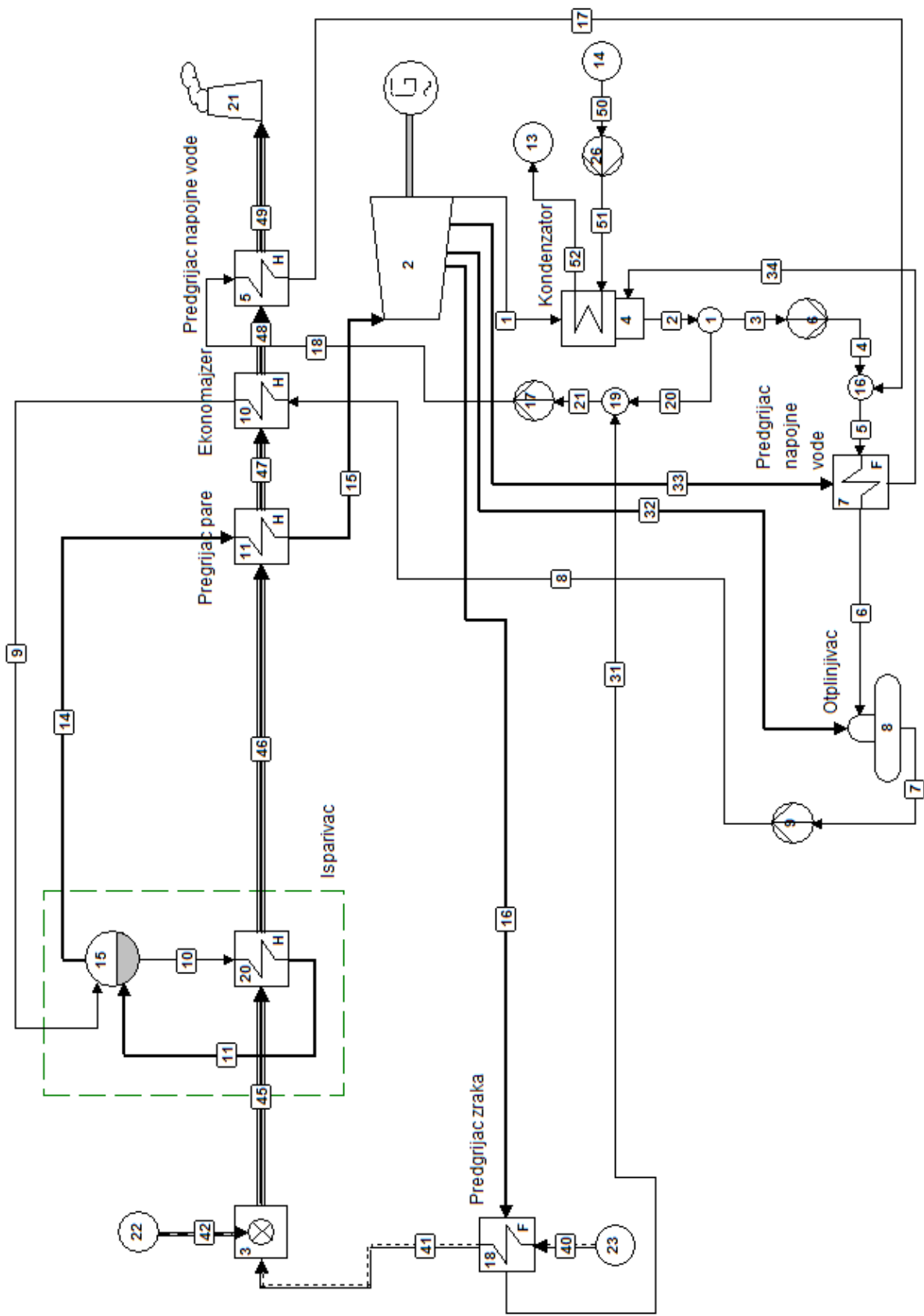
Slika 41. Napredno energetska postrojenje tip Amsterdam



Dijagram 11. T-s dijagram naprednog postrojenja tip Amsterdam

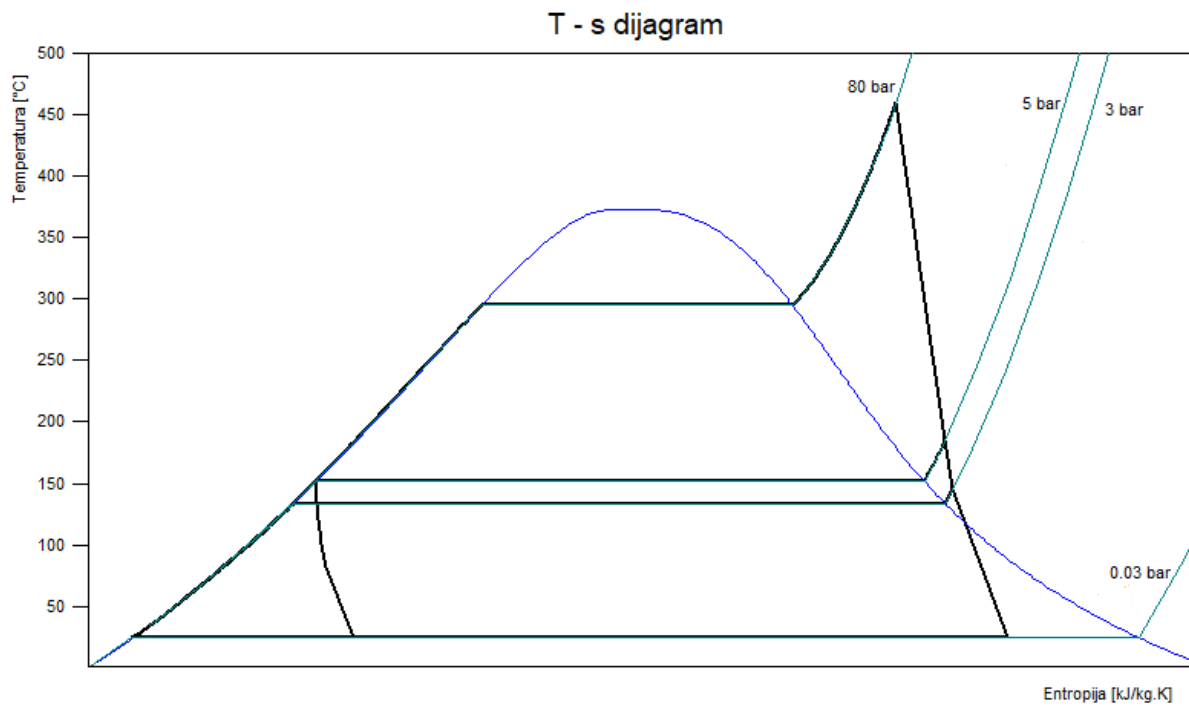


Dijagram 12. T-Q dijagram naprednog postrojenja tip Amsterdam

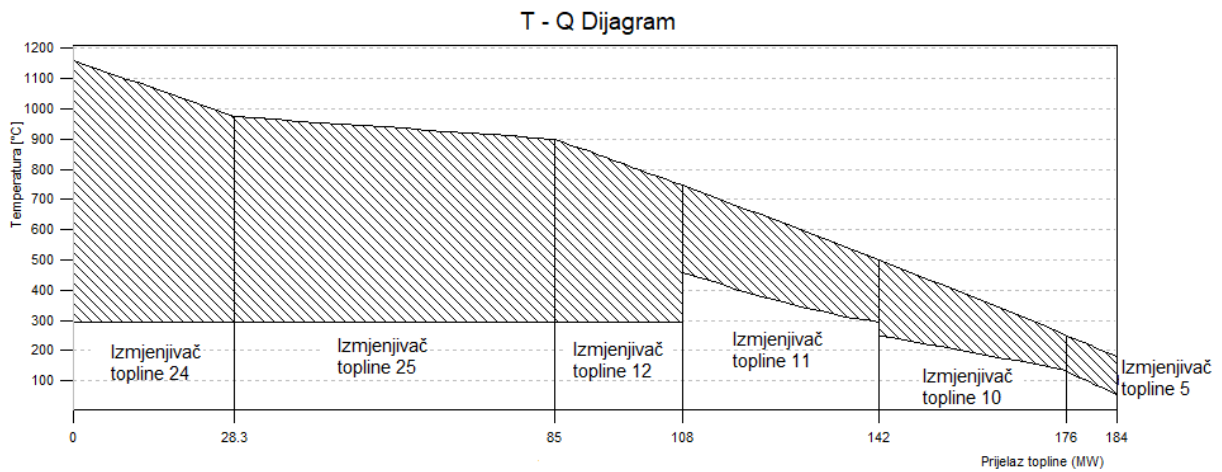


Slika 42. Napredno energetska postrojenje tip Brescia

Odgovarajući T-s i T-Q dijagrami postrojenja tipa Brescia prikazani su na dijagramima 13. i 14.



Dijagram 13. T-s dijagram naprednog postrojenja tip Brescia



Dijagram 14. T-Q dijagram naprednog postrojenja tip Brescia

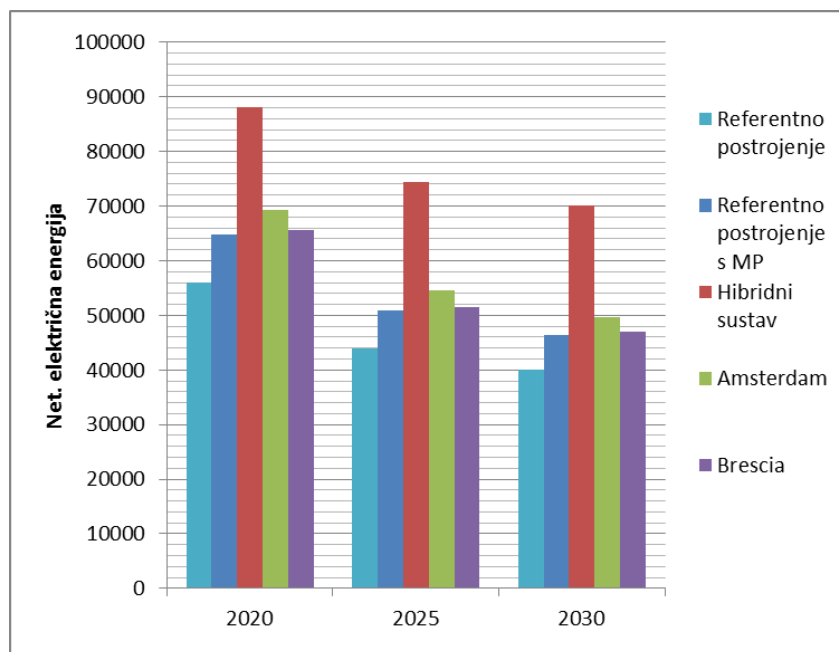
## 5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

Uvrštavanjem dobivenih podataka za pojedine godine u programski paket Cycle-tempo, dobiveni su naredni rezultati:

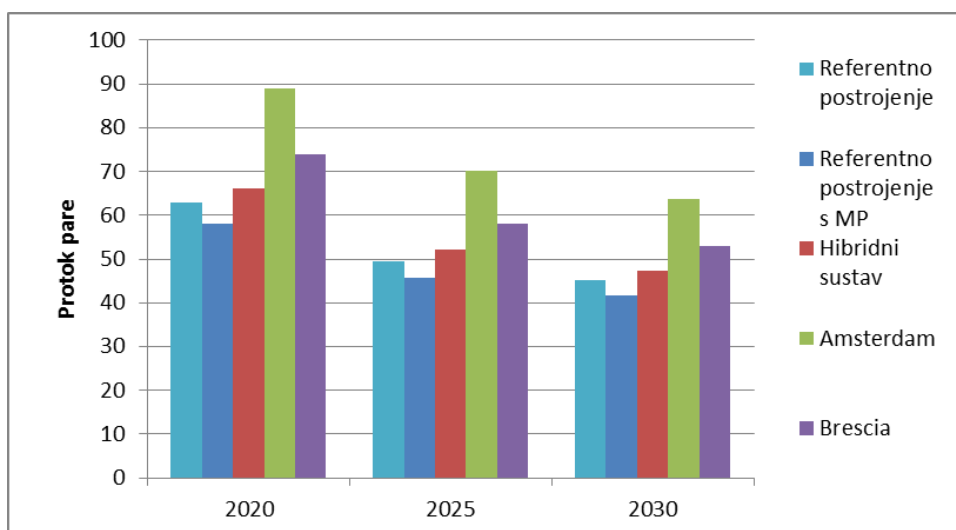
		Referentno postrojenje	Referentno postrojenje s MP	Hibridni sustav	Amsterdam	Brescia
Net. električna energija (kW)	2020	56020.18	64778.32	88045.17 (para)	69323	65551.50
				52530.04 (plin)		
	2025	44032.74	50916.77	74481.69	54489.36	51524.51
				52530.04		
	2030	40115.71	46387	70049.67	49642	46941.04
				52530.04		
Maseni protok pare (kg/s)	2020	62.966	58.008	66.227	89.099	73.980
				20.089		
	2025	49.492	45.595	52.055	70.033	58.149
				20.971		
	2030	45.089	41.539	47.424	63.803	52.976
				21.256		
Maseni protok dimnih plinova (kg/s)	2020	162.402	162.402	162.402 (para)	162.402	162.402
				146.58 (plin)		
	2025	127.65	127.65	127.65	127.65	127.65
				146.58		
	2030	116.295	116.295	116.295	116.295	116.295
				146.58		
Net. energetska efikasnost (%)	2020	24.873	28.787	37.584	30.737	29.282
	2025	24.873	28.786	38.874	30.734	29.280
	2030	24.872	28.785	39.38	30.733	29.278

Tablica 9. Pregled dobivenih rezultata za analizirana postrojenja postrojenja

Da bi rezultati iz tablice bili bolje predočeni, konstruirani su dijagrami 15.,16. i 17.



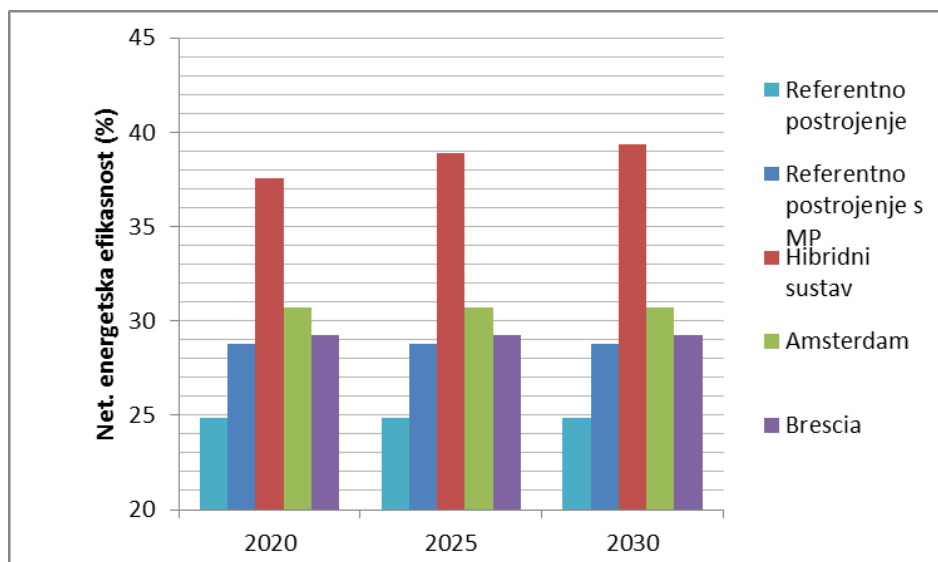
Dijagram 15. Dobivena net. električna energija



Dijagram 16. Količina proizvedene vodene pare

Referentno postrojenje proizvodi najmanje električne energije i radi sa najnižom vrijednosti stupnja korisnosti postrojenja. Dodavanjem međupregrijanja, čime se turbina razdvaja na visokotlačni i niskotlačni dio, realizira se povećanje korisnost postrojenja sa 22.4% na 28.8%.

Kod postrojenja tip Brescia realizirani su viši parametri svježije pare (80 bara i 460°C), te su dodani predgrijač kondenzata s dimnim plinovima i predgrijač zraka s oduzetom parom iz turbine. Dodavanjem navedenih komponenti i povećavanjem parametara svježije pare ostvarilo se je daljnje povećanje stupnja korisnosti postrojenja, a time i porast snage turbine.



Dijagram 17. Net. energetska efikasnost

Kod postrojenja tip Amsterdam, realiziran je viši tlak svježe pare (130 bara) uz nešto nižu temperaturu svježe pare (440°C) u odnosu na postrojenja tip Brescia, te dodavanjem međupregrijanja i razdvajanjem visokog i niskog dijela turbine, dodatno se je povećao stupanj korisnosti, a time i porast snage turbine.

Kod hibridnog postrojenja moguće je realizirati najviše temperature svježe pare (520°C) uz nešto nižu vrijednost tlaka svježe pare (62 bara), što je omogućilo daljnje povećanje stupnja korisnosti postrojenja. Još je jedna bitna prednost hibridnog postrojenja, a to je smanjenje utjecaja promjene količine raspoloživog goriva na proizvedenu količinu električne energije. Količina goriva može varirati ovisno o dobu u godinu i mjesecu, a time varira i količina proizvedene električne energije. Za prigušenje takvih oscilacija služi plinsko-turbsko postrojenje koje je fleksibilnije u pogonu. U slučaju kada padne količina raspoloživog krutog oporabljene goriva, pojačava se dotok goriva u plinsku turbinu i tako se nadoknađuje proizvodnja električne energije. Moguće je i povećati udio fluida iz parnog postrojenja (pomoću ventila 14, slika 40.) u dio gdje se iskorištavaju ispušni plinovi plinske turbine.

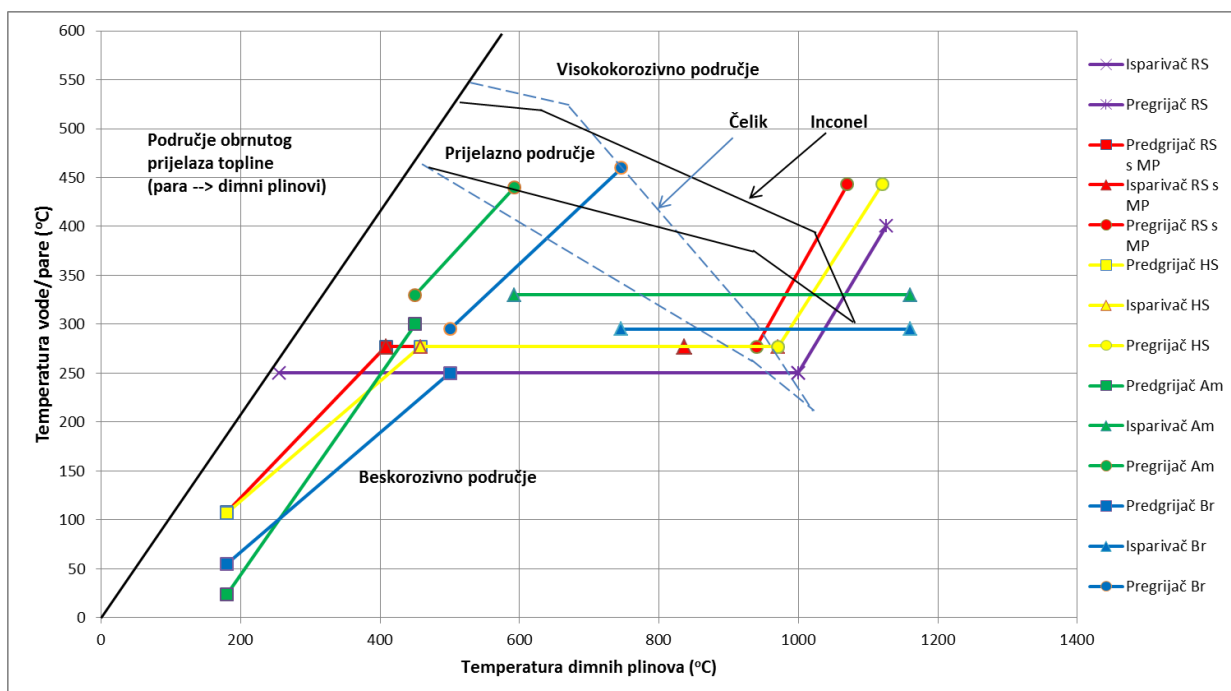
### 5.1 Pojava korozije u generatoru pare

Kod postrojenja tip Brescia i tip Amsterdam odabrane su temperature fluida i dimnih plinova u generatoru pare s ciljem da se izbjegnu područja visokotemperaturne korozije (dijagram 18.). Povećavanjem parametara svježe pare povisuje se stupanj korisnosti postrojenja. Međutim, povećanje parametara limitirano je pojavom korozije u visokotemperaturnom području. Komunalni otpad (a time i



SRF) sadrži visoku koncentraciju korozivnih elemenata kao što su lužine, teški metali te pogotovo kloridi. Tokom procesa izgaranja većina klora se oslobađa u obliku HCl te i u drugim klorovim spojevima (NaCl, KCl, PbCl...). Tokom hlađenja dimnih plinova, ti spojevi se kondenziraju i talože na cijevima (prvenstveno cijevima pregrijača pare) uzrokujući visokotemperaturnu koroziju metala. Pojava visokotemperaturne korozije drastično se povećava s povišenjem temperature cijevi. Potencijalni uzroci korozije u postrojenjima za izgaranje krutog oporabljeno goriva (SRF) su sastav goriva, loša konstrukcija generatora pare, varijacija sastava dimnih plinova i procesni parametri kao što su temperatura metala izmjenjivačkih cijevi, temperatura dimnih plinova i brzina dimnih plinova. Neke metode zaštite od visokotemperaturne korozije koje su primjenjene u praksi su oblaganje cijevi slojem inconel 625, korištenje cijevi od kompozitnih materijala, odgovarajuća konstrukcija generatora pare, ubrizgavanje odgovarajućih kemikalija u ložište, duže vrijeme zadržavanja dimnih plinova u ložištu te niža brzina dimnih plinova [24].

Glavna konstruktivna mjera za izbjegavanje visokotemperaturne korozije pregrijačkih cijevi je realizacija isparivača pomoću ekranskih cijevi u ložištu generatora pare. Na taj način se dovoljno snizi temperatura dimnih plinova ispred pregrijača pare te se pregrijavanje ne odvija u visokokorozivnom području. Na dijagramu 18. je vidljivo da su pregrijači pare kod prva 3 postrojenja svi u visokokorozivnom području dok su kod postrojenja tip Brescia u prijelaznom području, a kod postrojenje tip Amsterdam praktički u nekoroziivnom području. Postrojenja koja rade u visokokorozivnom području potrebno je češće servisirati, a vrijeme potrebno za servisiranje je duže. Također, vijek trajanja cijevi kod pregrijača je kraći [24].



## 6. ZAKLJUČAK

U Republici Hrvatskoj još uvijek se prevelika količina otpada odlaže na odlagališta, ili se nekontrolirano odlaže u prirodu (divlja odlagališta). Direktivom Europskog parlamenta [6], [7] i [8] je ograničena količina otpada koji se smije odlagati. Stoga je u ovom radu analiziran prijedlog cjelovitog sustava za gospodarenje komunalnim otpadom u Republici Hrvatskoj. Prateći postavljene zahtjeve za uvođenje kružnog gospodarstva i poštujući hijerarhiju otpada postavljenu od strane EU [2], predložena je shema sustava za gospodarenje otpadom. Po hijerarhiji otpada, prednost se daje odvojenom sakupljanju i recikliranju, te je stoga u predloženom sustavu to prvo na redu kako bi se maksimalna količina odvojeno sakupljenog otpada prikupila i usmjerila na recikliranja. Odvojeno prikupljeni biološki otpad se usmjerava u postrojenja za obradu biološkog otpada gdje nastaju kompost i bioplin. Prikupljeni ostatni otpad se prvo upućuje u proces mehaničke obrade gdje se dodatno odvajaju reciklabilni materijali i biološki otpad. Nakon toga ostatni otpad zajedno sa ostacima od sortiranja i recikliranja i ostacima od biološke obrade, odlazi u postrojenje za proizvodnju krutog oporabljene goriva (SRF). Tako pripremljeno gorivo se energetski oporabljuje u visokoučinkovitom postrojenju za proizvodnju električne energije (waste-to-energy).

Kod postrojenja za energetsku uporabu krutog oporabljene goriva najveću učinkovitosti ostvaruje hibridno postrojenje. Uz povećanje ukupne neto korisnosti, hibridno postrojenje je i fleksibilnije od ostalih postrojenja. Uz sve te prednosti, najveći nedostatak je složenost postrojenja, te samim tim i visoka cijena koštanja. Što se tiče visokoučinkovitih postrojenja tip Amsterdam i tip Brescia, oni također imaju dosta visoku učinkovitost i nisu toliko složena kao hibridno postrojenje. Uz visoku korisnost postrojenja, prednost kod ova dva postrojenja je pravilnom konstrukcijom generatora pare izbjegnuta visokotemperaturna korozija pregrijača pare. Kod ova dva postrojenja, veća prednost se daje postrojenju tip Amsterdam jer je kod njega praktički u potpunosti izbjegnuto korozivno područje i realizira višu vrijednost stupnja korisnosti postrojenja.

U Republici Hrvatskoj je nužno u što kraćem vremenskom roku uvesti predloženi cjeloviti sustav gospodarenja komunalnim otpadom kako bi pratila europski standard i poštovala direktive i odredbe EU. Veliki problem u provođenju

toga je visok stupanj neinformiranosti građana po pitanju gospodarenja otpadom i obradi otpada. Na žalost još dosta dijelova Republike Hrvatske nema adekvatno organizirano odvojeno prikupljanje pojedinih frakcija otpada. Ako se analiziraju zemlje sa visokorazvijenim sustavom gospodarenja otpadom, može se vidjeti da sve posjeduju sustave za energetske uporabu otpada i krutog oporabljene goriva, te na takav način minimiziraju odlaganje otpada na odlagališta.

## LITERATURA

- [1] *Zakon o otpadu Republike Hrvatske* (NN 94/13)
- [2] Europska komisija, *Komunikacija komisije europskom parlamentu, vijeću, europskom gospodarskom i socijalnom odboru i odboru regija*, 34 final, Bruxelles, 2017.
- [3] European Environment Agency, dostupno na: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/diversion-from-landfill/assessment>, pristupljeno 15.09.2020.
- [4] Mustapić N, Markovinović B, *Simulacija cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom Republike Hrvatske*, Sigurnost : časopis za sigurnost u radnoj i životnoj okolini, Vol. 61, No. 2, 2019.
- [5] Hrvatska gospodarska komora, *Gospodarenje otpadom u Republici Hrvatskoj u 2018. Godini*, Zagreb, 2018.
- [6] Europski parlament, *direktiva 94/62/EZ o ambalaži i ambalažnom otpadu*, 20. prosinac 1994.
- [7] Europski parlament i vijeće, *direktiva 2004/12/EZ*, br. L47, str. 26, 11. veljače 2004.
- [8] Europski parlament i vijeće, *direktiva 2008/98/EZ o otpadu i stavljanju izvan snage određenih direktiva (Waste Framework Directive)*, 19. studeni 2008.
- [9] *Zakon o održivom gospodarenju otpadom* (NN 94/13)
- [10] Christiaens P, Puttemans N, *The effects of the proposed EU packaging waste policy on waste management practice: a feasibility study*, Final version, Bruxelles, 2014.
- [11] Tedom group, dostupno na: <https://www.tedom.com/en/>, pristupljeno 16.09.2020.
- [12] Bang Jensen M, Møller J, Scheutz C, *Assessment of a combined dry anaerobic digestion and post-composting treatment facility for source-separated organic household waste, using material and substance flow analysis and life cycle inventory*, Denmark, 2017.

- [13] Anttila L, *Waste-to-energy scenarios in the china context*, 9-11, Lappeenranta, 2013.
- [14] C. Caputo A, M. Pelagagge P, *RDF production plants: I Design and costs*, 423-437, L'Aquila, 2002.
- [15] BMH Technology, dostupno na: <https://www.bmh.fi/category/equipment/shredders-and-crushers/>, pristupljeno 20.09.2020.
- [16] Anttila L, *Waste-to-energy scenarios in the china context*, 55-57, Lappeenranta, 2013.
- [17] Pasek A.D, Suwono A, W. Gultom K, *Feasibility of Recovering Energy from Municipal Solid Waste to Generate Electricity*, 241-256, Bandung, 2013.
- [18] Meraz L, Dominguez A, Kornhauser I, Rojas F, *A thermochemical concept-based equation to estimate waste combustion enthalpy from elemental composition*, 1499-1507, Mexico, 2003.
- [19] I.-S. Antonopoulos, A. Karagiannidis, E. Kalogirou, *Estimation of municipal solid waste heating value in Greece in the frame of formulating appropriate scenarios on waste treatment*, GR 54124, Thessaloniki, 2011.
- [20] Heating values, dostupno na: [https://www.cement-co2-protocol.org/en/Content/Internet\\_Manual/tasks/lower\\_and\\_higher\\_heating\\_values.htm](https://www.cement-co2-protocol.org/en/Content/Internet_Manual/tasks/lower_and_higher_heating_values.htm), pristupljeno 20.10.2020.
- [21] Waste C Control, dostupno na: <http://www.epem.gr/waste-c-control/database/html/WtE-02.htm>, pristupljeno 21.10.2020.
- [22] European Commission, *Reference Document on Best Available Techniques for the Waste Treatments Industries*, Seville, 2005.
- [23] Galvarino J, Balcazar C, Alves Dias R, Perrella Balestieri J.A, *Analysis of hybrid waste-to-energy for medium-sized cities*, vol.55, 728-741, Guaratinguetá, 2013.
- [24] Bogale W, Viganò F, *A preliminary comparative performance evaluation of highly efficient Waste-to-Energy plants*, 1315-1324, Milano, 2014.

[25] Otoma S, Mori Y, Terazono A, Aso T, Sameshima R, *Estimation of energy recovery and reduction of CO2 emissions in municipal solid waste power generation*, Vol. 20, 0921-3449 Japan, 1997.