

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Управљање чврстим отпадом

Број индекса: 303/2016

Зоран Н. Кончаловић

**Техно-економска анализа постројења за
секундарну сепарацију комуналног отпада
мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Небојша Јовичић - ментор
2. Др Горан Бошковић
3. Др Владимир Миловановић

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да развије математички модел за процену техно-економских перформанси карактеристичних постројења за секундарну сепарацију отпада (MRF – Material Recovery Facility). Модел развијен у EXCEL-у ће се користити за процену трошкова функционисања постројења сведених на тону процесуираног отпада. Анализираће се постројења за раздвајање мешаног отпада (dirty MRF) као и постројења за раздвајање отпада који је прошао примарну сепарацију (single and dual stream MRF). Користећи развијени модел, спровешће се анализа и дефинисати трошкови постројења које би било адекватно потребама града Крагујевца. Рад треба да садржи следеће целине:

- 1) Управљање чврстим отпадом у урбаним срединама
- 2) Механички третман отпада
- 3) Постојења за секундарну сепарацију отпада
- 4) Математички модел за прорачун јединичних трошкова функционисања постројења
- 5) Техно-економска анализа постројења за потребе града Крагујевца
- 6) Закључак

Препоручена литература:

[1]Јовичић, Н., „Управљање чврстим отпадом“, скрипта, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2018.

[2]Thomas H. Christensen, „Solid Waste Technology& Management“, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2011.

[3]Subba Nishtala, Eric Solano-Mora, „Description of the Material Recovery Facilities Process Model“, Design, Cost, and Life-Cycle Inventory, Октобар 1997.

Крагујевац, 2018

Ментор:
Др Небојша Јовичић, ред. проф.

Захвалница

Неизмерну захвалност, пре свега, дугујем ментору овог мастер рада, професору др Небојши Јовичићу. Хвала му за указано поверење, смернице, сугестије и пружену помоћ приликом израде овог рада.

Захваљујем се мајци Милеви за пружену љубав, подршку и сигурност током свих година студирања. Хвала јој што је увек била уз мене и што никада није сумњала у мене.

Хвала брату Давору и снаји Дубравки што су веровали у мене и подржали ме у намери да у овим годинама упишем факултет.

Посебну захвалност упућујем колегама из бивше фирме, пре свега директорки Радмили, и осталим колегама Душану, Милошу, Катарини, Ненаду, Слађани и Милисаву, на подршци и омогућеном толерантном радном времену.

На крају бих се још захвалио Јелени и Александру, колегама из генерације са којима сам уписао факултет. Хвала им на несебичној помоћи.

Хвала свима онима који су на било који начин имали утицај на мој успех током студирања.

Кончаловић Зоран

Резиме

Циљ овог рада јесте формирање математичког модела за израчунавање јединичних трошкова функционисања постројења за третман чврстог комуналног отпада. У зависности од тога да ли се у постројењу третира само мешани комунални отпад илије то постројење за третман рециклабилних материјала или пак њихова комбинација, сходно томе ће бити представљен математички модел за сваки од ова три случаја. Укупни трошкови постројења првенствено зависе од количине процесираног отпада, односно издвојених рециклабила. Према томе, појединачни трошкови су изведени по тони дневно процесираног отпада.

Рад је базиран на четири целине, једна се односи на опрему која се користи за механички третман отпада, друга на врсте постројења у којима се врши третман чврстог комуналног отпада, трећа на развијање математичког модела за одређивање трошкова постројења и последња целина се односи на примену тог модела на град Крагујевац. Прорачун трошкова је табеларног типа и изведен је помоћу Microsoft Excel-a.

Кључне речи: чврсти комунални отпад, механички третман отпада, постројење за третман отпада, трошкови постројења

Abstract

The aim of this paper is to form a mathematical model for the calculation of unit costs for the functioning of a treatment plant for municipal solid waste. Depending on whether the facility is treating only mixed municipal waste, whether it is a facility for recyclable materials or a combination thereof, a mathematical model for each of these three cases will be presented accordingly. The total cost of the facility is primarily dependent on the quantity of processed waste, ie separated recyclables. Therefore, individual costs are performed per ton of daily processed waste.

The work is based on four parts, one is related to the equipment used for mechanical treatment of waste, the second on the types of facilities where the treatment of municipal solid waste is done, the third on the development of the mathematical model for determining the cost of the facility, and the last one concerns the application of that model to the city of Kragujevac. The cost calculation is a tabular type and is done using Microsoft Excel.

Key words: municipal solid waste, mechanical treatment of waste, material recovery facilities, facilities costs

Садржај

1 Управљање чврстим отпадом у урбаним срединама	8
2 Механички третман отпада	13
2.1 Ситњење	13
2.1.1 Млинови чекићари	15
2.1.2 Ударне дробилице	16
2.1.3 Секачи/Резачи	17
2.1.4 Каскадни куглични млинови	17
2.1.5 Чељусна дробилица	18
2.2 Раздвајање	19
2.2.1 Сита	19
2.2.2 Ваздушни класификатори	22
2.2.3 Балистички сепаратори	28
2.2.4 Магнетни сепаратори	28
2.2.5 Сепаратори вртложним струјама	29
2.2.6 Оптичко сортирање	30
2.2.7 Спектроскопија ласерски индукованом плазмом	33
2.2.8. Сортирање помоћу X-зрака	34
2.2.9 Флотација	35
2.2.10 Густински сепаратори	36
2.2.11 Сортирање на бази спектралног снимка	39
2.2.12 Ручно сортирање	41
2.3 Балирање	42
2.3.1 Сабијање помоћу ослонца	43
2.3.2 Екструзија у калупима	44
3 Постројења за секундарну сепарацију отпада	46
4 Математички модел за прорачун јединичких трошкова постројења за раздвајање отпада	56
4.1 Постројење за раздвајање мешаног (неразврстаног) комуналног отпада - mwMRF	56
4.1.1 Опис процесног тока	56
4.1.2 Одређивање функције трошкова постројења за раздвајање мешаног отпада	59
4.1.3 Капитални трошак (КТ)	60
4.1.4 Годишњи оперативни трошкови (GOT)	71

4.2 Постројење за процесирање претходно издвојених (разврстаних) рециклабилних материјала - prMRF	74
4.2.1 Опис процесног тока	74
4.2.2 Одређивање функције трошкова постројења за процесирање претходно издвојених рециклабилних материјала	75
4.2.3 Капитални трошак (КТ).....	76
4.2.4 Годишњи оперативни трошкови (GOT)	77
4.3 Постројење у коме се врши допремање измешаних рециклабила и мешавине отпада смештених у истом одељку камиона за сакупљање - ss1MRF	78
4.3.1 Опис процесног тока	78
4.3.2 Одређивање трошковне функције постројења за измешане рециклабиле и мешавину отпада.....	80
4.3.3 Капитални трошак (КТ).....	80
4.3.4 Годишњи оперативни трошкови (GOT)	83
5 Техно-економска анализа постројења за потребе града Крагујевца	84
6 Закључак	93
Литература.....	94

1 Управљање чврстим отпадом у урбаним срединама

У чврсти отпад се убраја сав отпад који настаје активношћу људи или животиња, који је у чврстом агрегатном стању и који се одбацује као некористан или непожељан. Под термином чврсти отпад се подразумева хетерогена маса која се одбацује из урбаних заједница, као и хомогени отпад из пољопривреде и индустрије [1].

Према закону о управљању отпадом из 2016. године, отпадом се сматра свака материја или предмет који држалац одбацује, намерава или је неопходно да одбаци.

Према извору настанка, чврсти отпад може бити [1]:

- кућни (стамбени)
- комерцијални
- институцијални
- грађевински
- јавни комунални
- индустријски и
- пољопривредни.

Стамбени и комерцијални се углавном састоје од органске и неорганске фракције, са мањим уделом специјалног и опасног отпада. Органску фракцију обично чине отпаци од хране, разне врсте папира, картон, пластика, текстил, гума, кожа, дрво и дворишни отпад. Неорганску фракцију чине стакло, посуђе, металне и алуминијумске конзерве и прашина.

У институцијални отпад спада отпад из државних установа, школа, затвора и болница. Осим отпада из болница и затвора, отпад осталих институција је сличан стамбеном и комерцијалном отпаду.

Грађевински отпад чине отпад од рушења и грађења (керамика, бетон, челик, гвожђе, пластика и др.), ископану земљу и асфалт.

Јавни комунални отпад обухвата отпад од чишћења улица, отпад од уређења пејзажа и резања дрвећа као и отпад од угинулих животиња и напуштених возила.

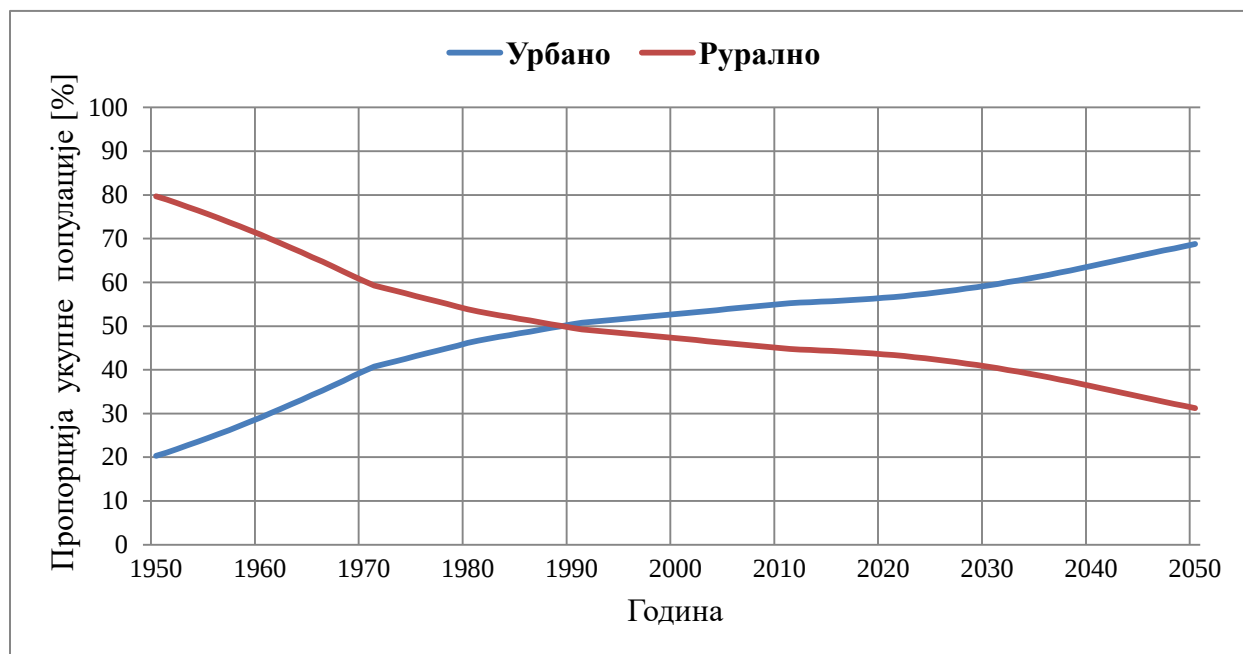
Индустријски отпад је отпад из било које индустрије или са локације на којој се налази индустрија, осим јаловине и пратећих минералних сировина из рудника и каменолома.

У пољопривредни отпад се убраја отпад настао као последица ратарских култура, отпад настао као последица узгајања стоке и отпад настао узгајањем воћарских култура.

Управљање чврстим отпадом се може дефинисати као дисциплина која укључује контролу настајања, чувања, сакупљања, транспорта, трансфера, третмана (процесирања) и одлагања чврстог отпада [1]. Управљање чврстим отпадом је један од главних еколошких проблема са којима се данас суочавају градске општине. Повећање урбаних, економских и индустријских активности, као и повећање броја становника довело је до повећања количине стварања чврстог отпада. Процес урбанизације настаје са почецима цивилизације и стварањем градова при чему се интензивирао након индустријске револуције.

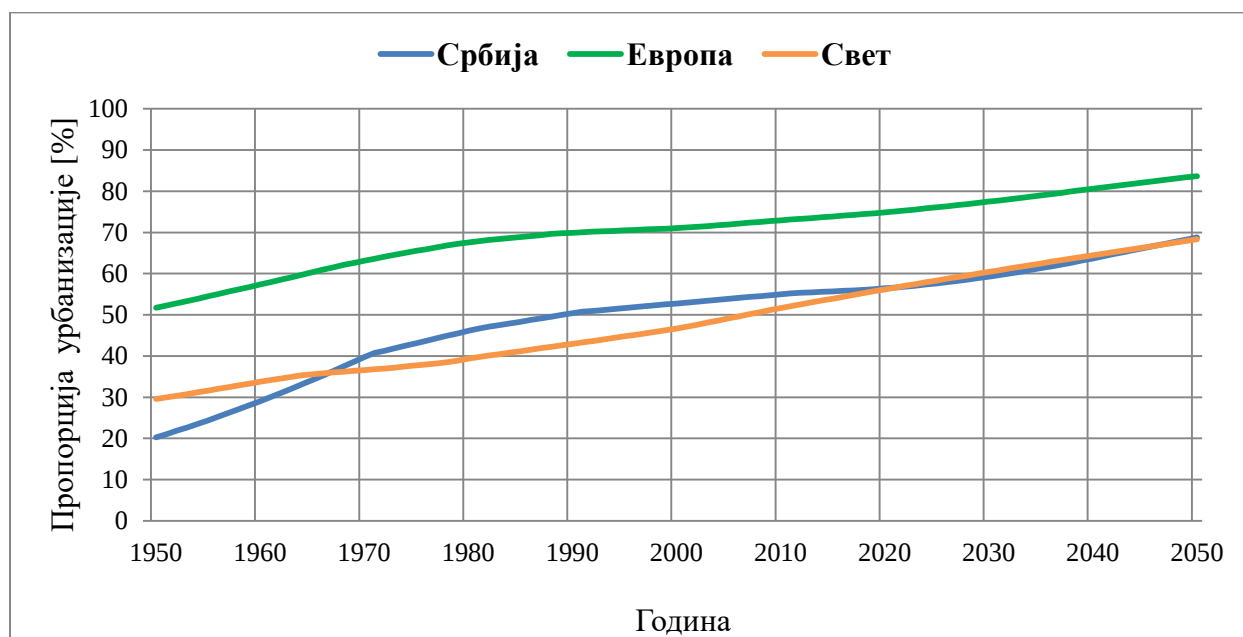
Према подацима World Urbanization Prospects из 2018. године, на слици 1.1 је представљен дијаграмски приказ поделе урбаног и руралног становништва у Србији за период од 1950.

до 2050. године [2]. Са дијаграма се може закључити да предвиђања указују на то да ће 2050. године бити свега 30% руралног становништва.



Слика 1.1. Однос урбаног и руралног становништва у Србији

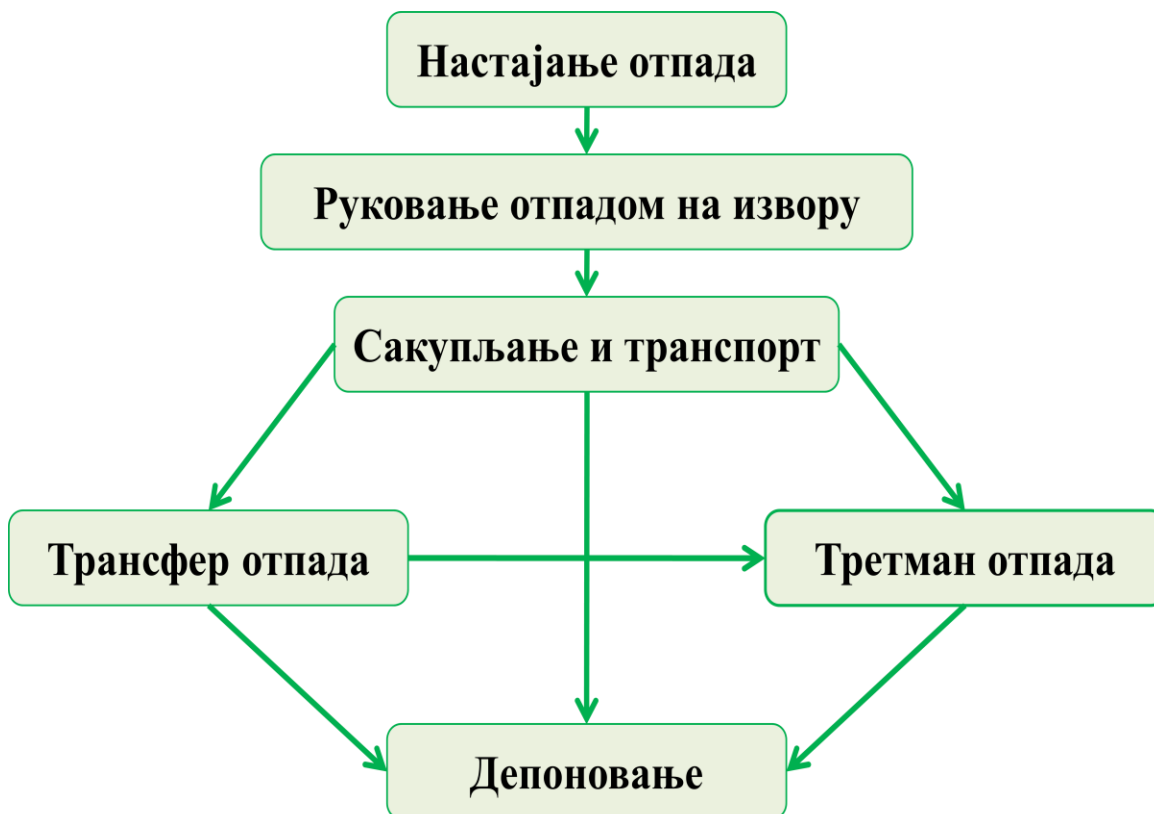
Када се упореди однос урбаног становништва у Србији са истим односом становништва у Европи и свету, за стогодишњи временски период, добија се график приказан на слици 1.2.



Слика 1.2. Однос урбаног становништва у Србији, Европи и свету

Иако се проценат урбаног становништва у Србији тренутно негде поклапа са укупним просеком урбаног становништва у свету, у доносу на просек урбаног становништва у Европи заостаје за готово целих 20%.

Од тренутка настајања до крајњег одлагања отпада, у оквиру система управљања отпадом, спроводе се следеће активности које се могу поделити у шест функционалних елемената: настајање отпада, руковање отпадом на извору, сакупљање и транспорт, трансфер отпада, третман отпада и депоновање (слика 1.3) [1].



Слика 1.3. Елементи система управљања чврстим отпадом

Први елемент је настајање отпада и он обухвата активности којима се одређени производи идентификују као безвредни за даљу употребу, због чега се одбацују или сакупљају и затим одлажу. Пример оваквог поступка могу бити новине које власник, након што их је прочитао, одбаци јер немају даљу употребну вредност. Настајање отпада се иницира још у фази дизајна производа и траје све док тај производ не постане отпад. У оквиру тог периода се спроводе бројне активности са циљем спречавања стварања отпада:

- превенција стварања отпада,
- редукција или минимизација стварања отпада,
- поновна употреба искоришћених производа који нису постали отпад.

Превенција и редукција стварања отпада се спроводе у свим фазама животног века производа, од производње преко дистрибуције кроз цео период коришћења производа. Поновно коришћење производа продужава његов животног век и одлаже настанак отпада.

Руковање отпадом на извору представља други елемент система управљања отпадом и оно укључује све активности које се односе на отпад, све до тренутка његовог одлагања у контејнер. Битан процес овог елемента је примарна сепарација отпада која представља раздвајање отпада на извору његовог настанка. Становништво је све више свесно важности одвајања пластике, папира, картона, стаклене амбалаже, алуминијумских конзерви, предмета од гвожђа и дворишног отпада. У део овог елемента се убраја и складиштење (чување) отпада. Складиштење отпада је од примарне важности, првенствено због здравствених, али и естетских разлога.

Сакупљање и транспорт отпада, као трећи елемент система управљања отпадом, обухвата сакупљање измешаног отпада и издвојених рециклабила, као и њихов транспорт до локације где се комунално возило које врши сакупљање, празни. Ова локација може бити депонија, трансфер станица или постројење за третман отпада. Сакупљање и транспорт чврстог отпада су најскупље операције у систему управљања отпадом, и често чине преко 50% укупних трошкова. Сакупљање и транспорт отпада се може вршити помоћу државних служби или помоћу приватних услужних предузећа

Третман чврстог отпада, као следећи елемент система, представља врло важан сегмент управљања отпадом. Овим елементом су обухваћене активности везане за издвајање материјала из отпада као и трансформација отпада у циљу издвајања енергије. Третман отпада може бити [1]:

- механички,
- биолошки,
- термички и
- хемијски.

Механички третман отпада је најважнији део процеса рециклаже и подразумева издвајање употребљивих материјала (секундарних сировина) из отпада у за то специјализованим постројењима, и он ће бити детаљније описан у наредном одељку. Процесирање отпада обично укључује издвајање крупних предмета, разврставање помоћу сита, ручну сепарацију, редукцију величине отпада помоћу дробилица, издвајање гвожђа помоћу магнета, редукцију запремине компактирањем, итд.

Биолошки третман отпада се примењује код биоразградиве фракције отпада. Ту спада органски део отпада који се под дејством микроорганизама може разградити. У случају да се овај процес одвија у присуству кисеоника (аеробни процес), он се назива компостирање и његов производ је компост који се користи за кондиционирање земљишта. Током процеса анаеробне разградње (разградња без присуства кисеоника), добија се биогас и овај процес се назива анаеробна дигестија.

Термички третман отпада се спроводи на органској фракцији отпада и користи се за издвајање енергије из отпада. Најчешћи поступци термичког третмана отпада су инсинерација (спаљивање), пиролиза, гасификација и плазма процес. Овим поступцима се може из отпада издвојити топлотна и електрична енергија или синтеровани гас.

Хемијски третман отпада обухвата разне физичко–хемијске процесе којима се смањују опасне карактеристике отпада. Најчешћи поступци су: неутрализација, минерализација, солидификација, оксидација, редукција, адсорпција, дестилација, јонске измене, реверзна осмоза итд.

Трансфер отпада као пети елемент система управљања отпадом, обухвата две фазе: трансфер отпада из мањих возила за сакупљање у већа возила за транспорт и транспорт отпада на већа растојања, до места процесирања или крајњег одлагања отпада. Трансфер отпада се обично обавља у претоварним (трансфер) станицама. Најчешће се превоз врши моторним возилима, мада се практикује и транспорт железницом и бродовима, тамо где је то могуће.

Последњи елемент система управљања отпадом је депоновање (одлагање) отпада. Одлагање отпада представља еколошки најмање прихватљиву опцију, али се због економских разлога најчешће примењује. На депоније чврстог отпада се трајно одлаже следећи отпад: стамбени отпад који се директно транспортује на депонију, остатак из постројења за третман отпада, остатак после спаљивања отпада, компост неодговарајућег квалитета или друге супстанце из различитих постројења за процесирање отпада. Одлагање отпада без опасности по здравље или безбедност становништва се обавља на модерним санитарним депонијама. Овим депонијама је онемогућен развој глодара и инсеката, као и контаминација подземних вода. Санитарне депоније су опремљене системима за сакупљање и третман течних вода као и системом за сакупљање и процесирање депонијског гаса.

2 Механички третман отпада

Механички третман отпада је термин који се често користи за издвајање и прераду вредних материјала из токова отпада, или је везан за биолошки или термички третман отпада. Сврха механичког третмана отпада, на пример, може бити уклањање контаминираних предмета, одвајање једног отпадног тока на више токова или хомогенизација отпада у циљу оптимизације других процеса. Ово поглавље описује механичке појединачне процесе, или појединачне операције, јер нема трансформације материјала, који се често користе током процеса управљања отпадом. Различити типови постројења за третман отпадног материјала, ће бити детаљније описани у наредном поглављу.

Механички третман је уско везан са улазом отпада, као и са жељеним излазом. Специфични механички процесни третман стога мора бити усклађен са одређеним улазом и требало би да буде оптимизован за производњу жељеног излаза. Физичке карактеристике отпада, заправо његове сваке главне фракције, морају бити доступне за правилно пројектовање механичког третмана. Карактеристике могу бити величина честица, облик, густина, флексибилност, компресибилност, затезна и притисна чврстоћа. Осим тога, садржај пепела и влаге могу такође бити важни фактори за одређивање третмана. Механички третман се може поделити на [3]:

- ситњење (смањење величине честица),
- раздвајање (сортирање према јединичним или комбинованим карактеристикама),
- балирање (повећање густине).

2.1 Ситњење

Ситњење је процес претварања отпада у ситније честице. На овај начин се хомогенизује дистрибуција честица, повећава се површина честица, и даље, поспешује мешање отпада. Информације које су неопходне за одређивање одговарајуће технологије ситњења су:

- Физичко својство материјала које се уситњава, попут величине честице, густине, структуре, тврдоће, кртости и способности разлагања (цепања),
- Будућа употреба материјала, на пример додатни физички и хемијски процеси,
- Потребне особине уситњеног материјала, као што су величина честица, расподела величина честица и просечна величина честица или специфична величина честица.

Током последњих неколико деценија, тестирана је различита опрема за ситњење која је нашла примену у области управљања отпадом. Најчешће врсте опреме за ситњење су:

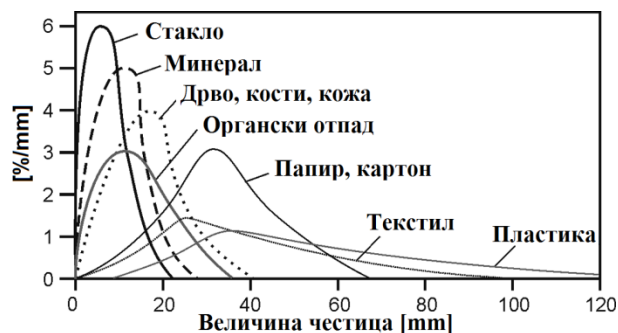
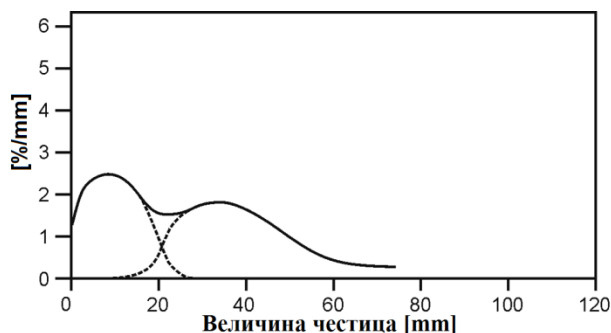
- млинови чекићари,
- ударне дробилице,
- резачи/секачи,
- каскадни куглични млинови,
- чељусне дробилице.

У примеру 2.1 су представљени подаци о расподели величине честица уситњеног отпада.

Пример 2.1. Расподела величина честица исецканог отпада

Расподела тежине по величини честица након сецкања отпада може се добити пропуштањем узорака кроз низ сита и мерењем количине материјала који је остао на сваком ситу. Тежине које је свако сито задржало се сабирају а појединачне тежине се деле са претходно добијеном укупном тежином како би се добио проценат остатка на сваком ситу. Ти подаци могу бити приказани на различитим графикама као што је приказано испод (хистограм и кумулативна расподела величине) [3].

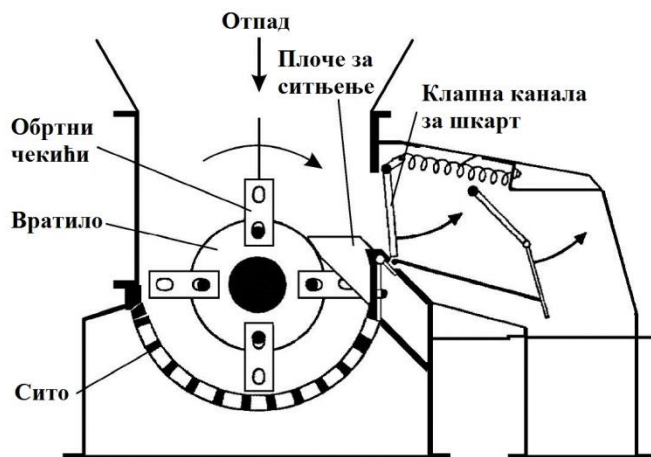
Маса			
Опсег величина [mm]	[kg]	[%]	Кумулативно [%]
<0,16	0,180	1,7	1,7
0,16-0,63	0,648	6,1	7,8
0,63-1,25	0,919	8,7	16,5
1,25-2,50	1,920	18,2	34,7
2,50-5,00	3,021	28,6	63,3
5,00-6,30	1,084	10,3	73,6
6,30-10,00	1,748	16,5	90,1
10,00-16,00	0,761	7,2	97,3
16,00-20,00	0,232	2,2	99,5
>20,00	0,054	0,5	100,0



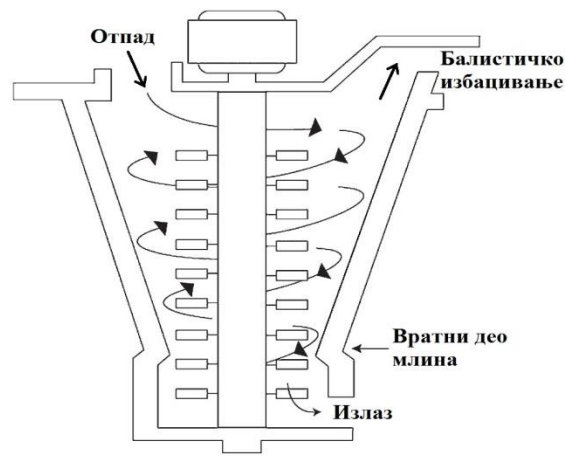
Сирови отпад уситњен помоћу млина чекићара садржи зрнаст фини материјал, добијен од песка, нечистоћа, изломљеног стакла и изгњеченог и исхабаног папира и картона, нарочито када је већи садржај воде присутан. Ови материјали могу се препознати на хистограму, као и визуелном посматрањем просејаног узорка. Расподела величине, базирана на подацима из табеле, приказује двоструку популацију, један пик на 34 mm и други на око 8 mm. Физички преглед узорака фракције сваког сита открива веће присуство запаљивих материјала попут папира, пластике, текстила, док је мање присуство материјала насталог од органског отпада, стакла и песка. Типична расподела величине селективних материјала након ситњења су такође приказане на графику.

2.1.1 Млинови чекићари

Млинови чекићари су најчешће коришћене процесне јединице за дробљење отпадних возила, грађевинског отпада, комерцијалног отпада и папира. Млинови чекићари имају или вертикално или хоризонтално постављено вратило са флексибилним сечивима (чекићима). Вратило се може окретати брзином од 1200 обртаја у минути, при чему сечива достижу брзину и до 70 m/s [3]. На слици 2.1 је дат шематски приказ млина са хоризонталним вратилом. Млин чекићар са хоризонталним вратилом се најчешће користи за примарно ситњење у бројним постројењима за прераду чврстог отпада, у којима се врши процесирање различитих токова отпада. Вертикална верзија млина (слика 2.2) је конструисана са чекићима монтираним на вертикалном вратилу [4]. Овај концепт је дизајниран касних 1950-их година за прераду чврстог отпада. Истискивање ваздуха се, за време пуњења млина отпадом, врши кроз бочни отвор. Овим се омогућава брзо пуњење и ситњење лаке фракције, као што су папир и пластика. Како вертикални млинови немају решетку за ограничавање величине честица, промена величине честица се врши изменом броја чекића. Повећање броја чекића резултује стварање финијих честица али се уједно и смањује брзина пуњења. Недостатак решетке захтева константно одстојање између кућишта млина и најнижег чекића како би се задржала величина излазних честица унутар прихватљивог опсега.

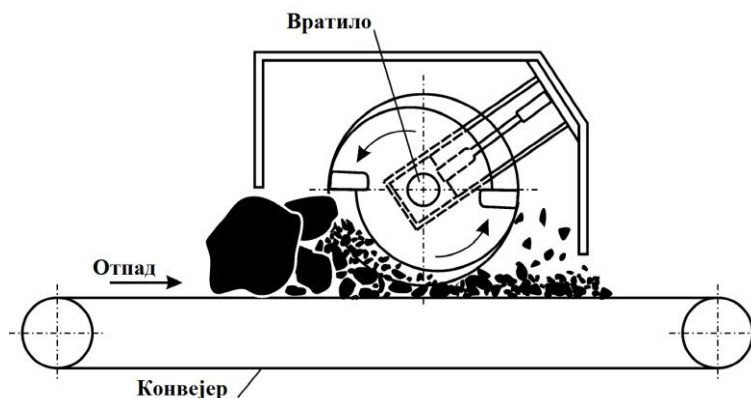


Слика 2.1. Млин чекићар са хоризонталним вратилом



Слика 2.2. Млин чекићар са вертикалним вратилом

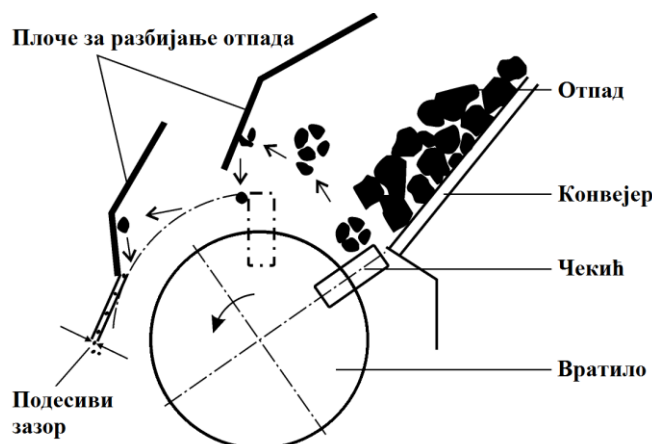
Специјални облик млина чекићара је ваљчаста дробилица која се користи за пре-процесирање грађевинског отпада. Довођење отпада до дробилице се врши помоћу хоризонталног конвејера. Брзо ротирајући ваљчasti чекић, позициониран изнад конвејера, дроби и уситњава материјал као што је приказано на слици 2.3. Предности ове технологије укључују ограничену висину опреме и раван смер транспорта отпада. Отпад се убацује на покретни конвејер, тако да платформа и левак за пуњење нису потребни. Када је успостављен правац транспорта отпада, процес дробљења се не може омести чак ни ојачаним (армираним) бетоном.



Слика 2.3. Ваљчата дробилица

2.1.2 Ударне дробилице

Ударне дробилице су израђене од вишеделних металних плоча или профилисаног завареног ојачаног челичног кућишта обложеног плочама о које отпад удара и притом се ломи. Брзо ротирајући ваљак (500-1000 o/min) је опремљен заменљивим чекићима израђеним од челика који је отпоран на хабање [3]. Ваљак се на својим крајевима ослоња преко ваљчастих лежајева постављених на бочним странама кућишта дробилице. Подесиве плоче за ломљење отпада налазе се изнад ротирајућег ваљка. Растојање између плоча и чекића се може подесити, као што се може подесити и нагиб плоча. Када у дробилицу уђе материјал који се не може уситнити, да би се он избацио, потребно је издићи плоче. Отпад се у ударну дробилицу уноси одозго, док се уситњени материјал испушта са доње стране. Слика 2.4 приказује шематски приказ процеса ударног дробљења.

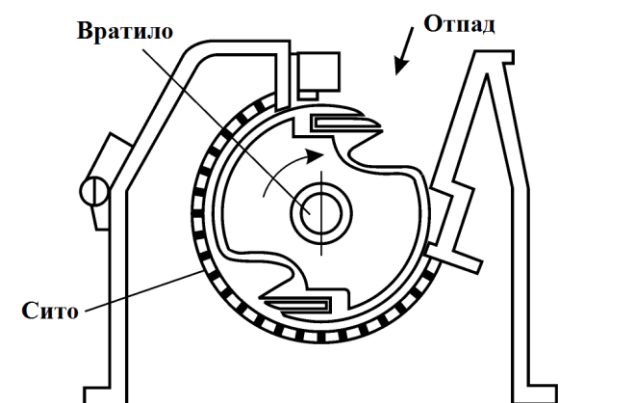


Слика 2.4. Ударна дробилица

Ударне дробилице се пуне до одређеног капацитета, путем левка и конвејера за пуњење. Убачени материјал се захвата чекићима (брзином од 25-40 m/s), удара о плоче и на тај начин разбија и уситњава[3]. Плоче за разбијање су распоређене тако да уситњени материјал остане у процесу дробљења све док се не уситни довољно да може проћи кроз отвор између ротирајућег ваљка и плоче. Када се ударне дробилице користе за ситњење грађевинског отпада, битно је да се армирани бетон пре убацивања у дробилицу скрати на мање комаде, како се велики делови не би задржали око ротора и евентуално изазвали блокаду дробилице.

2.1.3 Секачи/Резачи

У односу на млинове чекићаре, ротациони секачи и обртне дробилице се сматрају млиновима мањих брзина јер им се вратило обрће брзином од само 20-60 o/min. Млин може бити опремљен једним или са два хоризонтална вратила. Вратила са причвршћеним сечивима се обрћу у супротним смеровима у односу на ивице секача, и тако увлаче материјал. Ситњење се одвија између оштрица, без обзира да ли је материјал мекан, еластичан или тврд (слика 2.5). Степен ситњења је одређен ширином ножа или ширином на зубљене ивице ротирајућег резача. Пожељна ширина ротирајућег резача за ситњење чврстог комуналног отпада је 0,1 mm. Да би се обезбедила континуална прерада, ширина од 0,8 mm не треба да буде прекорачена. Пријањање материјала за оштрице секача ствара недовољан степен ситњења или дистрибуцију честица неједнаких величина [3].



Слика 2.5. Секач/Резач

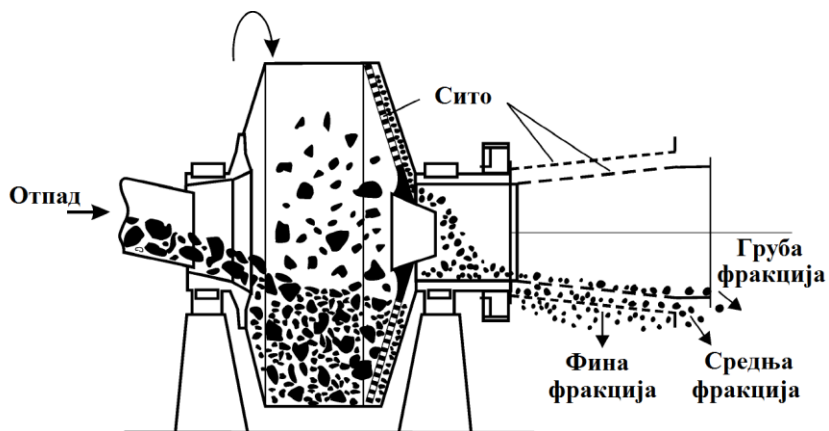
Да би се обезбедила већа брзина пуњења обилног или гломазног отпада, као што су текстил или мешани отпад, хидрауличне пресе потискују материјал према резним оштрицама. Масивни метални делови и други несаломиви предмети се не ситне у оваквим млиновима. Када се прекорачи снага мотора, ротирајуће оштрице аутоматски мењају смер обртања. Тада је потребно ручно уклонити тај материјал који је довео до преоптерећења. Искуство у пракси показује да је боље ручно уклонити тврде и гломазне предмете, попут метала, гума и тепиха, пре него што се млин активира.

Боља контрола величине честица се постиже примицањем обртног бубња са сечивима ка ситу. Међутим, чак и мала количина абразивног материјала може довести до хабања резних ивица ових машина. У зависности од величине сита, могуће је добити количину уситњеног материјала до 3 t/h. Крајњи производ се карактерише правилним ивицама и ограниченим опсегом величине честица. То је пожељна карактеристика за ток процеса, разних конвејера и бункера за транспорт. Ротирајући бубањ са сечивима се најчешће користи за ситњење пластике.

2.1.4 Каскадни куглични млинови

Каскадни куглични млин се састоји од споро обртаног ротирајућег бубња пречника од 4 до 7,2 m. Однос пречника и дужине бубња је приближно 3:1. Крајеви зидова бубња су благо конусног облика. Облога ротирајућег бубња је пресвучена слојем каљеног и извученог челика. Приближно 17% унутрашњости бубња (видети слику 2.6) је испуњено челичним куглицама. При оптималном окретању бубња од 14-20 o/min, мешавина

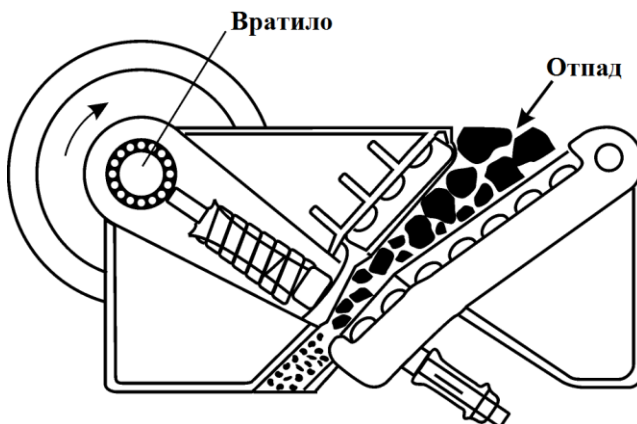
челичних куглица и отпада формирају савршену зону површине по којој се сировина претура. Са времена на време, челичне куглице падају на карактеристичан начин на врх сировине. Ситњење настаје ваљањем и трљањем челичних куглица о материјал отпада. Отвори у кућишту млина омогућавају пражњење материјала када је постигнута жељена величина честица. Челичне куглице, када се хабањем довољно истроше и тако им се смањи величина, такође излазе кроз те отворе, па зато морају бити замењене. Од када присуство метала у отпадном току помаже у ситњењу, каскадни млинови се сматрају полу-аутогеним процесом млевења [3].



Слика 2.6. Каскадни куглични млин

2.1.5 Чељусна дробилица

Слика 2.7 даје шематски приказ једне чељусне дробилице. Чељусна дробилица је нарочито погодна за тврде и ломљиве предмете. Материјал који је потребно дробити се убацује одозго, између покретних чељусти. Деловање чељусти условљава увлачење материјала при чему се материјал дроби, и такав уситњен избацује на тло. Ширина отвора чељусти зависи од жељене величине честица крајњег производа. Чељусне дробилице се првенствено користе за ситњење грађевинског отпада.



Слика 2.7. Чељусна дробилица

2.2 Раздвајање

Раздвајање се односи на процес одвајања једног отпадног тока на два или више токова према одређеној карактеристици или комбинацији тих карактеристика. Раздвајање никада није идеално, већа прерада одређене фракције материјала из отпадног тока је обично повезана са мањом чистоћом прерађеног материјала.

Током последњих неколико деценија тестиране су различите врсте опреме за раздвајање материјала чија се употреба препоручује при процесу управљања отпадом. Најчешће врсте опреме за раздвајање су: сита, ваздушни класификатори, балистички сепаратори, магнети, сепаратори вртложним струјама, оптички сортери, флотација, густински сепаратори (укључујући магнетне сепараторе и хидроциклоне), спектроскопија ласерски индукованом плазмом, сортирање помоћу Х-зрака, сортирање на бази спектралног снимка и ручно раздвајање.

2.2.1 Сита

Просејавањем се раздвајају материјали различитих величина при чему се добијају величине честица у одређеном распону. Ако је честица одређене величине карактеристична за одређену фракцију материјала, просејавање се може користити и за раздвајање материјала. Просејавање се одвија раздвајањем честица на основу величине отвора на површини сита. Честице које су мање од датог отвора пропадају кроз покретно сито и тако постају фина фракција. Материјал који је задржан на ситу се сматра крупном или великом фракцијом. Како је просејавање делимична сепарација, одређени проценат fine фракције се може задржати и у великој фракцији. Осим тога, грешке у пројектовању или хабање површине сита, могу довести до пропадања већих честица заједно са фином фракцијом. Од посебног значаја су оне честице које су приближно истог пречника као отвори на ситу јер имају тенденцију да се заглаве и изазивају хабање сита.

Санација сита је под утицајем различитих фактора који карактеришу процес:

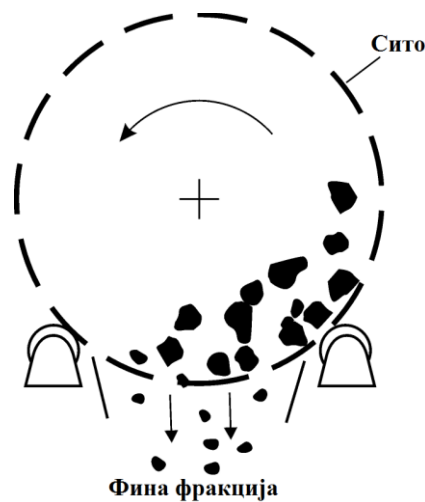
- фактори који зависе од уређаја: ширина и дужина сита, облик и нагиб сита, вибрациона фреквенција и амплитуда као и број обртаја,
- фактори који зависе од површине сита: тип површине, величина отвора и материјал сита,
- фактори који зависе од отпада: количина уноса, површинска влажност, расподела величине честица и садржај влакана.

Финозрнасти, влажни, влакнасти и лепљиви остаци теже да зачепе површину сита. На тај начин се смањује број отвора на ситу, при чему се смањује и количина просејаног материјала. Да би се смањила могућност зачепљења користе се специјалне конструкције сита за материјале који се теже просејавају, или се користе помоћна средства. Помоћна средства укључују четке, ланце, грејаче сита, ваздушне бластере, и додавање воде у циљу повећања капиларног притиска између лепљивих материјала. Сита су доступна у више различитих технологија укратко представљених у наставку.

Добош сита

Добош сита су проверена технологија и могу се користити за примарно као и за завршно просејавање. Слика 2.8 приказује дизајн једног добош сита. Унос и ефикасност раздвајања овог сита је контролисано помоћу величине отвора на ситу, пречника добоша, брзине

обртања, облика и броја преграда, и нагиба добоша. Будући да је ефективна површина сита релативно мала, одбојници и остали делови који се налазе у унутрашњости зида сита, постављају се тако да понесу материјал што је више могуће уз зид бубња, како би се добио што већи потенцијал просејавања. Добош сито функционише тако што омогућава отпаду унутар сита да се премеће док не дође до отвора и не прође кроз њега. Кретање отпада унутар добоша може бити каскадно, катарактично или центрифугално [5]. Каскадно се односи на кретање подизањем отпада кружном ротацијом сита и затим падањем наниже на почетак слоја материјала који се креће навише. На овај начин се само мали део сита ефикасно користи. Катарактичко кретање је кретање при већим брзинама сита у којима се материјал практично баца у ваздух, при чему пада по параболичној путањи назад на дно сита и евентуално наилази на слободан отвор кроз који пролази. Овде се јавља највећа турбуленција и највећа ефикасност просејавања. Центрифугално се односи на велике ротационе брзине тако да је материјал прилепљен за зид сита и никада не пада, па је због тога лошија ефикасност просејавања.



Слика 2.8. Добош сито

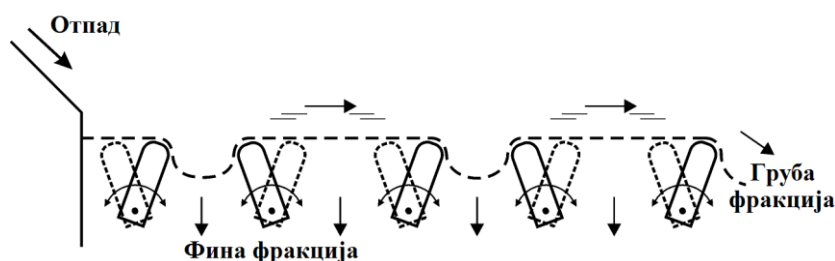
Повећање нагиба добоша више од пет степени узрокује велико смањење количине просејаног материјала. Да би се повећала количина просејаног материјала, постављена је спирална преграда на зид бубња која преноси материјал кроз бубањ без обзира на нагиб. Да би се постигла ефикасност сита од 90%, време задржавања и површина сита морају бити повезани са пуњењем сита отпадом. Брзина пуњења не сме бити већа од $1 \text{ t}/(\text{m}^2\text{h})$. Спровођење студија о добош сити пуњеног комуналним отпадом при брзини пуњења од $0,4 \text{ t}/(\text{m}^2\text{h})$ су показала да се може постићи пропустање материјала и до 80%. Време задржавања од најмање 25-30 секунди је неопходно да би се отпад уситнио. Оптимална брзина обртања бубња, пречника 2,7 m, постиже се на око 45% критичне брзине обртања, што одговара брзини од 8 o/min [6].

Студије у Великој Британији су показале различите количине просејаног материјала код добош сита које су подељене у два сектора са различитим величинама отвора сита и истом брзином обртања [7]. Пропуштање сита за честице мање од 10 mm, у два тестирања, је 32% и 34%, што је мало у поређењу са пропуштањем честица средње величине у распону од 10-160 mm, када је измерено 90% и 95%. Како би се избегао овај ефекат, могуће је раздвојити отпадни ток на три фракције постављањем добош сита унутар другог добош

сита. Оваква сита имају засебне моторе како би се омогућила оптимизација брзине ротације сваког сита понаособ.

Осцилаторна сита

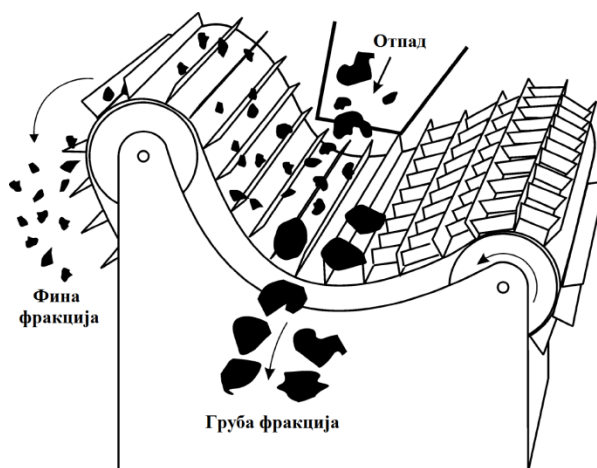
Осцилаторна сита представљају динамички метод просејавања који се показао као продуктиван и без зачепљавања, нарочито при просејавању компоста (слика 2.9). Осцилаторно сито се у суштини састоји од флексибилне исплетене мреже, која може бити од гуме или пластике. Та мрежа је повезана са осцилаторним држачима који се крећу у супротним смеровима. Отвори на мјесту су правоугаони или троугаони, око 8-40 mm. Аутоматско супротносмерно кретање држача узрокује таласастогибање исплетене мреже у одговарајућем опсегу (30-50 mm). При томе се постиже фреквенција осциловања од 1/1600 до 1/1800 у минути, чиме се ствара релативно јако дејство отпада по мрежи [3].



Слика 2.9. Осцилаторно сито

Сита са одељцима

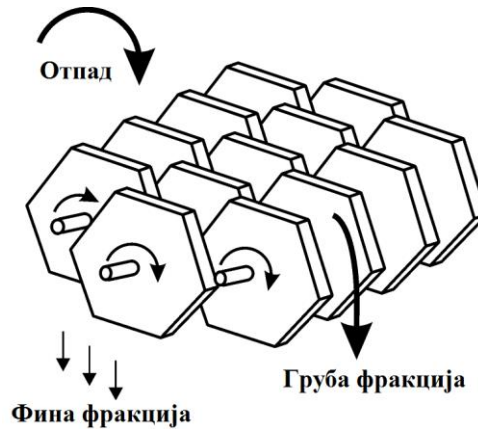
Због своје природе, једноставности рада и рада без зачепљења, ова сита су развијена за процесирање грађевинског отпада, али и за финије материјале, као што је текстил (слика 2.10). Финозрнаста фракција упада у кантице (четвртасте одељке) и односи се изнад највише тачке апарата помоћу конвејера. У поређењу са добош ситом, сито са одељцима је отворено са горње стране, а радни део овог сита има облик латиничног слова "S". Грубозрнаста фракција клизи низ нагнуту површину уређаја. Груба фракција се делом носи са спољне стране корита челичним решеткама, али под дејством гравитације упада назад у корита и конвејером се избацује.



Слика 2.10. Сито са одељцима

Диск сита

Диск сито је конструисано по методи каскадног просејавања, са низом корака, који обухватају многобројне и равномерно распоређене паралелне редове од шестоугаоних дискова који су монтирани на вратилу (слика 2.11). Дискови су постављени на такав начин да им је међусобни размак једнак величини усека суседног вратила. Размак међупростора између дискова одређује величину отвора сита. Обртање дискова такође може једним делом да уситни отпад који се налази на ситу. Заобљене ивице између дискова и конкавне угаоне површине, спречавају било какво заглављивање отпадом.



Слика 2.11. Диск сито

2.2.2 Ваздушни класификатори

Ваздушни класификатори врше раздвајање на основу брзине пада честице у струји ваздуха. Брзина пада честице зависи од њеног облика и његове специфичне тежине. Основна идеја је да материјали са мањом густином (папир, пластика, сув и лак органски отпад) буду захваћени и однешени узлазном струјом ваздуха, док материјали с већом густином (метал, камење, плочице, влажан органски отпад) падају наниже због немогућности да га струја ваздуха понесе. Лака фракција у ваздушној струји мора бити одвојена од ваздуха. То се најчешће постиже помоћу циклона. Раздвајање путем ваздушног класификатора је уско повезано са аеродинамичком брзином материјала који се раздваја. Нека основна питања везана за аеродинамичку брзину приказана су у примеру 2.2. Пројектовање ваздушног класификатора захтева дефинисање средње брзине протока ваздуха (μ_A , m/s), прорачун средње вредности оптерећења ваздуха чврстим материјама (β_L , kg/m³), јер се изнад или испод одређене вредности ефикасност раздвајања, на лаку и тешку фракцију, не може остварити. Количина уношења отпада ваздушног класификатора може се изразити једначином 2.1 [3]:

$$Q = A \cdot \mu_A \cdot \beta_L \cdot 3600 \quad (2.1)$$

где је:

Q - количина уношења отпада [kg/h]

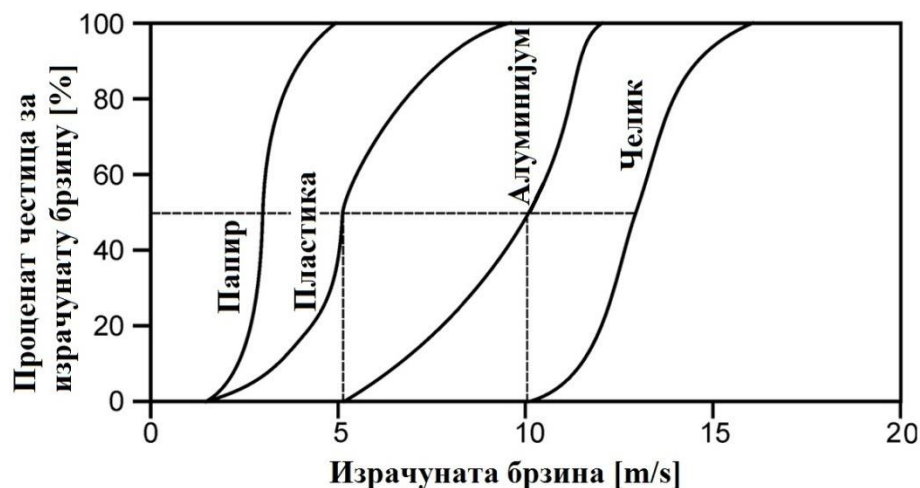
A - површина попречног пресека кућишта класификатора [m²]

μ_A - средња брзина протока ваздуха [m/s]

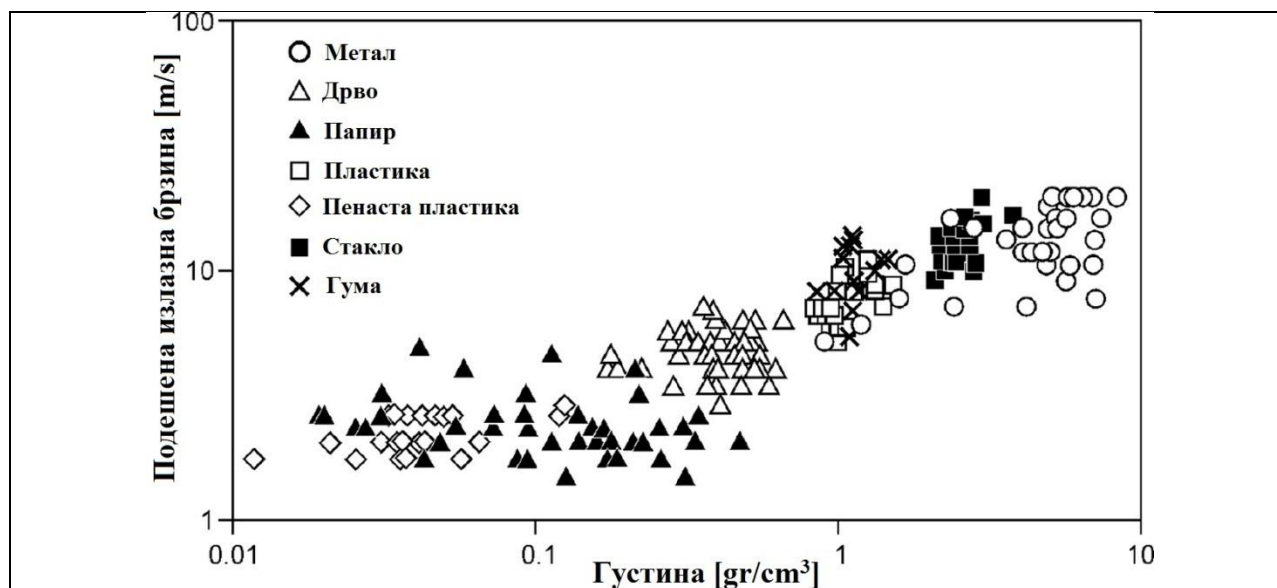
β_L - средња вредност оптерећења ваздуха чврстим материјама [kg/m³]

Просечна брзина струјања ваздуха је у распону од 2,5-5 m/s. Осим ових параметара, густина, садржај влаге, састав отпада, сабијеност и лепљивост отпада, и претходна смањења величине имају утицај на ефикасност ваздушног класификатора. Стога, претходна једначина се може узети у обзир само за првобитне грубе процене. Различите технологије ваздушних класификатора се користе у области управљања отпадом, на пример за производњу горива из отпада, прераду папира и картона, као и за компостирање. Цик-цак и ротациони ваздушни класификатори су превладавајуће технологије, али се користе и унакрсни, усисни и вишекоморни ваздушни класификатори.

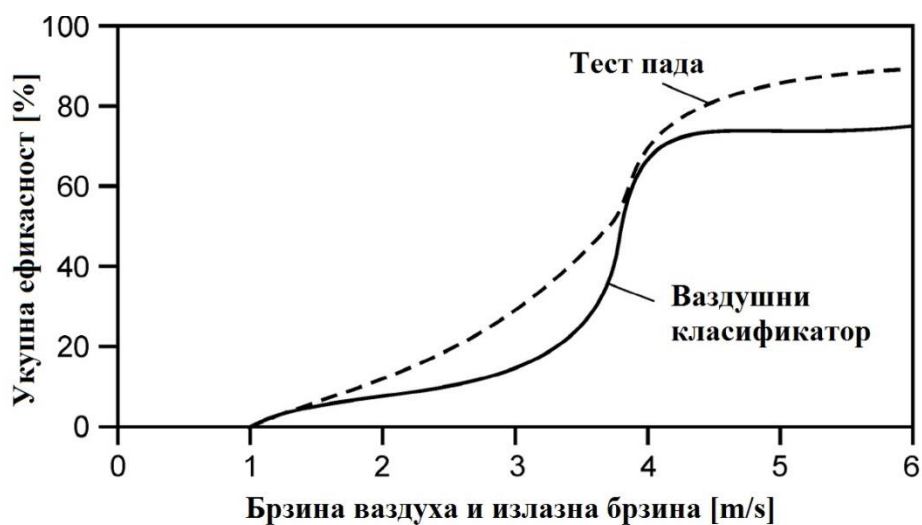
Пример 2.2. Аеродинамичка брзина честице отпада одређује да ли ће честица бити понета изазваним протоком ваздуха или ће честица пасти на дно класификатора. Прва процена аеродинамичке брзине честица које је потребно раздвојити ваздушним класификатором може се добити на основу тзв. теста пада, где се репрезентативна честица испушта са одређене висине без присуства ваздушне турбуленције. Брзина пада се рачуна на основу измереног времена и измерене висине са које је честица пала. Испод су приказани добијени резултати теста за папир, пластику, алуминијум и челик. График показује да је, како се брзина зрака повећава од нуле, папир први материјал који је захваћен струјом ваздуха. На брзини од око 5 m/s, сав папир је избачен, али је такође избачено и 50% пластике. Ако се брзина ваздуха повећа, почеће да се избацује и један део алуминијума. Овај тест даје теоријски обрачун брзине, ако је висина пада велика у односу на висину која је потребна за убрзање честице на подешеној излазној брзини. Овако је лако тестирати папир и танку пластику, али материјали са већом густином попут метала, могу захтевати знатно већу висину за убрзање па овај тест може дати погрешне резултате [8].



Ако резултати теста нису доступни, наредна слика може указати на типичне односе између подешене излазне брзине (v_s , m/s) и густине материјала (ρ_s , t/m³).



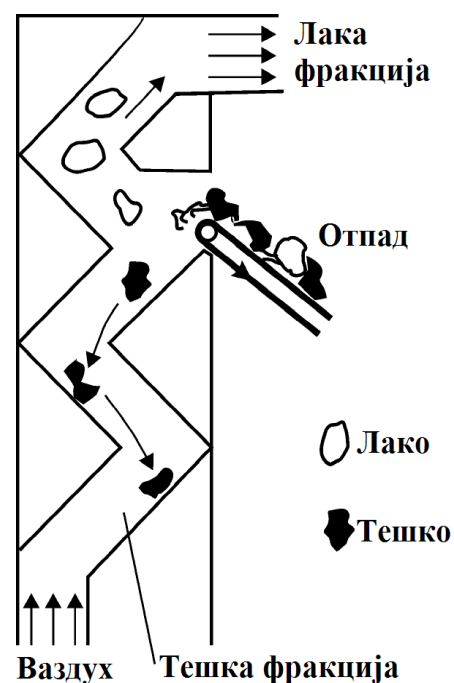
Знајући састав отпада, укупна излазна ефикасност ваздушног класификатора може се предвидети на основу резултата теста пада као што је приказано испод. Стварне перформансе ће увек бити мање ефикасне од оних предвиђених тестом пада.



Да би се постигло раздвајање материјала на основу само његове густине, без аеродинамичке брзине, која осим густине материјала, зависи и од величине и облика честица, ваздушни класификатор је модификован тако да приморава честице да се стално успоравају и убрзавају. Ово се постиже увођењем цик-цак преграда, различитих унакрсних зона или пулсирањем протока ваздуха. Све ове модификације користе принцип који никада не дозвољава честима да достигну своју подешену излазну брзину, чиме се повећава раздвајање на бази густине материјала. Турбуленција и учестало ударање материјала о зид класификатора подстиче раздвајање алгомерисаних честица и тиме се додатно повећава раздвајање на различите материјале.

Цик-цак ваздушни класификатори

Цик-цак ваздушни класификатори су се добро показали и често се користе за раздвајање комуналног отпада. Отпад се убацује у цик-цак вертикални стуб, при чему се подвргава струји ваздуха која се доводи са доње стране класификатора. Јединствена одлика ове конструкције је та да се отпад подвргне понављању процеса раздвајања тако што материјал улази у нову деоницу класификатора при чему је струја ваздуха приморана да промени правац струјања. Тешка фракција пада наниже, ударајући о странице цик-цак стуба, при чему се истовремено разбијају грудве отпада. Овако се постиже ефикасније раздвајање. Цик-цак ваздушни класификатор је приказан на слици 2.12. У табели 2.1 је дат проценат лаке и тешке фракције раздвојених помоћу цик-цак сепаратора пуњеног исецканим отпадом. Резултати показују да су различите компоненте отпада заступљене како у лакој, тако и у тешкој фракцији. Подаци показују да је добра прерада папира, картона, текстила и пластичних фолија, угрожена због чињенице да значајан део биљних материја и необојених метала завршавају у лакој фракцији.



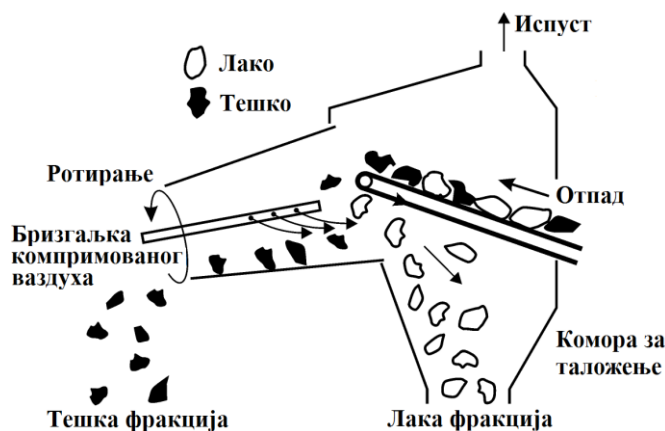
Слика 2.12. Цик-цак класификатор

Табела 2.1. Масени биланс цик-цак ваздушног класификатора пуњеног исецканим комуналним отпадом [9]

Компонента	Улаз [%]	Лака фракција [%]	Тешка фракција [%]	Прерађена лака фракција [%]
Папир	38.3	31.4	6.9	82.0
Картон	8.2	5.6	2.6	68.3
Дрво	3.8	1.4	2.4	36.8
Кожа	0.4	0.16	0.24	40.0
Гума	0.09	0.03	0.06	33.3
Кости	0.5	0.2	0.30	40.0
Текстил	4.6	3.6	1.0	78.3
Пластична фолија	5.0	4.7	0.3	94.0
Пластика	4.8	2.45	2.35	51.0
Биљне материје	16.8	7.4	9.4	44.3
Мали метални отпаци	0.4	0.05	0.35	12.5
Обојени метали	1.3	0.5	0.8	38.5
Стакло	7.1	0.4	6.7	5.6
Минерални отпад	8.7	4.4	4.3	50.6
Укупно	100.0	62.2	37.8	

Ротациони ваздушни класификатори

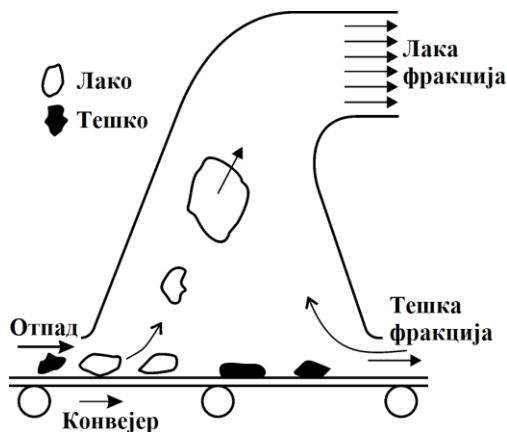
Ротациони ваздушни класификатори се састоје од три основне компоненте: ротирајућег бубња, коморе за просејавање и система компримованог ваздуха (видети слику 2.13). Предњи крај бубња је коничног облика и нагнут је неких 15° у односу на хоризонталу. Исецкан и претходно сортиран отпад се преноси конвејером до горњег дела бубња. Компримовани ваздух се удувава паралелно са осом бубња. Лакши материјал се односи ваздухом и издувава наниже према комори за таложење. Теже честице се, даље, транспортују и избацују на ужом и нижем делу бубња. Ваздух се удувава на нижој страни бубња како би му се одржао константан проток. Величина честица које се избацују се могу одредити подешавањем количине ваздуха, протоком компримованог ваздуха, нагибом и количином улазног отпада. Како би се смањила потребна количина свежег ваздуха који се удувава, већина ваздуха се може рециркулисати.



Слика 2.13. Ротациони ваздушни класификатор

Усисни ваздушни класификатори

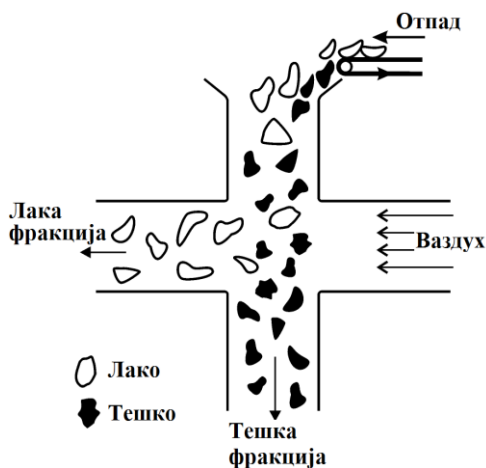
Углавном се лакше компоненте отпада усисавају са конвејера, вибрационог сита или добош сита и сакупљају помоћу циклонског сепаратора. Слика 2.14 даје шематски приказ усисне хаубе ваздушног класификатора. Степен раздвајања овог класификатора је обично низак.



Слика 2.14. Усисна хауба ваздушног класификатора

Унакрсни ваздушни класификатори

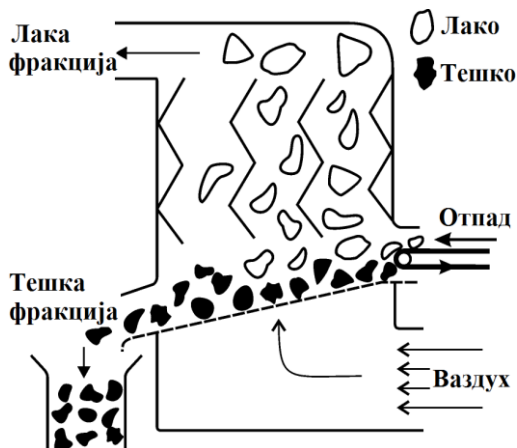
У унакрсном ваздушном класификатору (слика 2.15), ваздух се удувава управно на смер пада отпадног материјала. Због малог растојања висине пада хетерогеног материјала, постоји и маргинално раздвајање. Међутим, унакрсни ваздушни класификатори се успешно и често користе за раздвајање мешаног отпада у широком опсегу густине као и за раздвајање металних делова из токова пластике, текстила и дрвених предмета. Када се фокусирана струја ваздуха велике брзине користи уместо константне ваздушне струје средње брзине, јединица се назива импулсним ваздушним класификатором. Овај тип класификатора се такође успешно користи у индустрији отпада [10].



Слика 2.15. Унакрсни ваздушни класификатор

Вишекоморни ваздушни класификатори

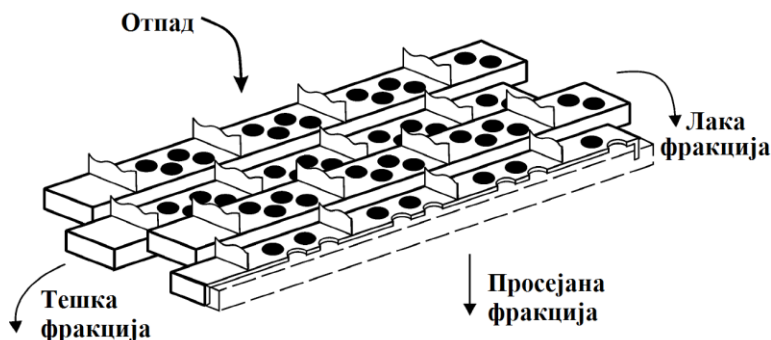
Слика 2.16 илуструје типичан пример вишекоморног ваздушног класификатора. Компоненте отпада се претресају помоћу струје ваздуха која се удувава кроз нагнуто сито, при чему се лакша фракција издиже и пролази кроз неколико цик-цак комора. Преостала тежа фракција се, даље, односи под дејством гравитационе силе. Такође се могу користити и хоризонтална сита са вртложним струјама. Распршивање отпада на оваквом хоризонталном сити се врши помоћу једног спорообртног ротора [10].



Слика 2.16. Вишекоморни ваздушни класификатор

2.2.3 Балистички сепаратори

Балистички сепаратори експлоатишу неколико карактеристика честица истовремено: величину, густину и крутост. Развијени су за раздвајање стамбеног и комерцијалног отпада у три фракције: тешко, лаку и фину. Балистички сепаратор се састоји од левка за унос отпада и покретних, нагнутих и перфорираних плочастих одељака сита (слика 2.17). Одељци сита су подељени у редове у виду вибрационих елемената. Уситњени материјал, у зависности од специфичне тежине и облика, се транспортује изнад или испод одељака. Теже честице се крећу ка најнижем нивоу због нагнутог положаја одељака и на тај начин постају тежа фракција. Због кретања вибрационих елемената и интензивне прерасподеле која се јавља, лакше честице попут папира, картона и пластичних фолија се крећу у супротном смеру према највишем нивоу и формирају лаку фракцију. Пропадањем кроз перфорирано дно одељака настаје трећа, фина фракција. Покретање вибрационих елемената се постиже помоћу електричног мотора и коленастог вратила, чиме се и редови међусобно померају. Одабирањем величине отвора перфорираног сита се дефинише проценат произведене fine фракције. Плочаста сита су заменљива и опремљена су уздужно и попречно причвршћеним преградама. Проценат добијене лакше и тешке фракције се одређује подешавањем нагиба одељака. Уобичајени нагиб се креће у границама између 15° и 20° [3].



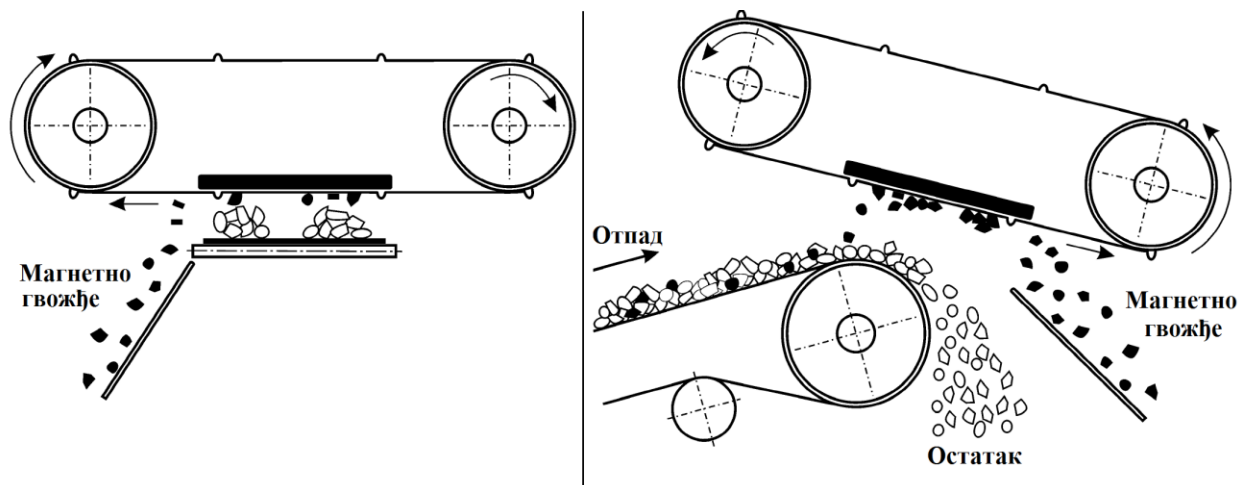
Слика 2.17. Балистички сепаратор

2.2.4 Магнетни сепаратори

Магнетни сепаратори издвајају магнетне необојене метале из отпадног тока (слика 2.18). Ова технологија обично укључује један висећи магнетни систем за раздвајање који привлачи необојене метале и преноси их даље, управно или паралелно са смером транспорта отпада.

Ефикасан систем, међутим, захтева да се материјал претходно уситни и да се одвоје метални материјали од осталих материјала из отпада. Величина материјала није од пресудног значаја јер се магнети практично прилагођавају свим величинама гвозденог отпада. Висећи систем се првенствено користи за разврставање уситњеног или неуситњеног чврстог комуналног отпада. Док се сепарација метала магнетом после ситњења отпада сматра поузданом технологијом, сепарација метала магнетом пре ситњења се тек треба доказати на тржишту феромагнетних производа. Табела 2.2 показује да је могуће постићи добар однос прераде, међутим, контаминација стамбеним отпадом резултира производом који није погодан за тржиште. Идеална величина честица за

магнетну сепарацију је у распону од 10 до 100 mm. Међутим, овај распон величина се ретко када може генерисати уз помоћ конвенционалне опреме за ситњење.



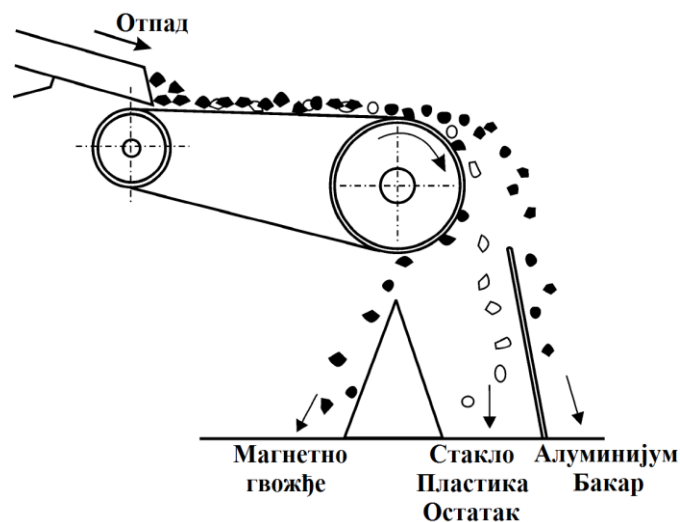
Слика 2.18. Управни и паралелни магнетни сепаратор

Табела 2.2. Проценат издвојеног метала и остатка добијених употребом магнетног сепаратора пре ситњења чврстог комуналног отпада[9]

Фракција отпада	Улаз [%]	Издвојено [%]
Гвоздени мешани отпад	48,1	98,9
Гвоздени плочасти отпад	35,2	87,6
Остатак чврстог комуналног отпада	16,7	
Укупно	100	

2.2.5 Сепаратори вртложним струјама

Рад сепаратора вртложним струјама заснива се на индукцији вртложних струја у немагнетним металним предметима, која се јавља као последица електромагнетног поља. На овај начин је омогућено издвајање алуминијума и бакра из отпадног тока. Сепаратори вртложним струјама обезбеђују одличан механизам за сортирање мешаног отпада сличне густине (нпр. делови алуминијума и стакла). Овакви сепаратори за раздвајање обојених метала се користе већ деценијама уз стална побољшања процеса (слика 2.19). Већа употреба је настала 1970-их година, претежно у Америци, као одговор на повећање количине алуминијумских лименки у отпаду. Познати облик лименки од 100% алуминијума је идеалан за издвајање вртложним струјама, због чега се могу успешно користити и једноставнији сепаратори [11]. Вртложне струје настају када се проводљиви предмети нађу унутар, или су изложени просторном или временом променљивом магнетном пољу. Ток вртложних струја се одвија у затвореној петљи унутар проводника. Према Ленцовом закону, индукована електрична струја ствара магнетно поље супротно пољу којем је изложена. Тако је створена сила која делује на проводник, и која избацује проводник из магнетног поља. Мање проводни материјали захтевају мању силу. Са повећањем густине потребна је већа сила избацивања због инерције масе појединачних предмета. Табела 2.3 представља однос електричне проводљивости и густине [11], што значи да сепаратори вртложним струјама имају потенцијал за раздвајањем првенствено алуминијума и алуминијумских легура.



Слика 2.19. Сепаратор вртложним струјама

Табела 2.3. Сила одбијања електричног проводника изразена као однос електричне проводности и густине

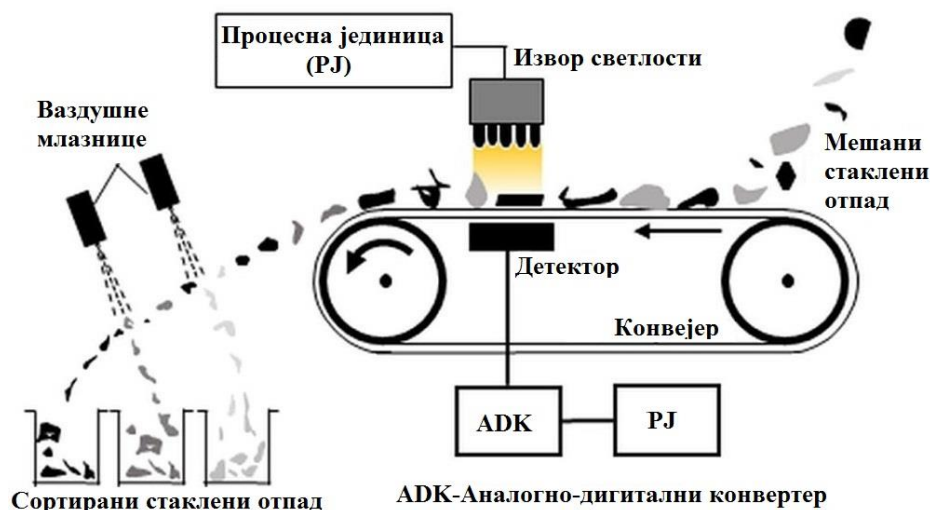
Проводник	Ел. проводност [$10^{-6}/\text{m}\Omega$]	Густина [gr/cm^3]	Проводност/Густина [$\text{m}^2 10^3 \text{kg}\Omega$]
Алуминијум	35.00	2.70	12.96
AlCuMg	18.50	2.80	6.61
AlMgSi	31.00	2.70	11.48
AlMg	16.50	2.63	6.23
Олово	4.82	11.34	0.43
Бронза	9.00	8.73	1.03
Бакар	60.00	8.96	6.90
Магнезијум	22.20	1.74	12.76
Месинг	16.00	8.40	7.90
Цинк	16.90	7.14	2.37
Калај	8.70	7.30	1.19

2.2.6 Оптичко сортирање

Оптичко сортирање се у протеклих петнаест година веома брзо развило, заједно са напретком рачунара за обраду великог броја података. Камере са сензорима за боју, спектроскопија у блиској ИС области и UV сензори, позиционирани на траци конвејера, су способни да региструју различите типове пластике, композита, папира, батерија итд. На основу снимљених информација, активирају се ваздушне млазнице које сортирају идентификоване предмете у одговарајуће контејнере за њихово сакупљање. Нека постројења за сортирање користе савремену опрему за сортирање затворених најлонских цакова препознатљивих боја који се користе за сакупљање батерија, отпадног папира, органског кухињског отпада или мешавине амбалаже из мешовитих токова отпада [3].

Оптичко сортирање се најчешће користи за разврставање стакла. Након пре-процесирања (ситњења, сецкања, сортирања), отпад се континуално доводи из контејнера за стакло и

излаже оптичком сортирању. Појединачне честице стакла се оптички прегледају према следећем распореду: провидно стакло, зелено стакло, браон и непровидно стакло (керамичко, камено, порцеланско, метално). Према овој методи, сензор скенира и мери пригушење светлости различитих боја које пролазе кроз скенирану област. Слика 2.20 шематски илуструје технику разврставања боја.

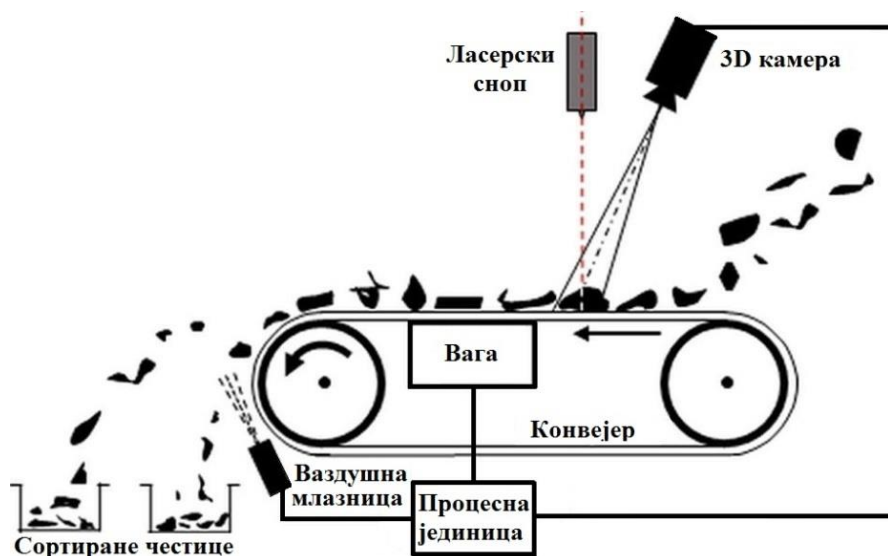


Слика 2.20. Техника сортирања стакла по боји

Са слике се види да несортирани отпади стакла најпре пролазе кроз зону надзора, где LED диоде сукцесивно емитују светлост црвене, плаве и зелене таласне дужине. У зависности од боје узорка, светлост емитована са LED диода се пригушује [12]. Ове компоненте пригушених боја се затим пореде са познатим референтним бојама, чиме се идентификује боја узорка. Затим се идентификовани узорци сортирају у засебне канте помоћу млазница компримованог ваздуха. Једна од недостатака ове технике јесте та да се не региструју узорци стакла који имају папирну или пластичну налепницу. Ово се може решити употребом ултравиолетних или инфрацрвених таласа уместо видљивих. ИС и UV таласи пролазе кроз папирне налепнице и тако могу помоћи у идентификацији узорака са налепницом. Технологија UV сортирања се користи за раздвајање непровидних и других специфичних врста стакла (керамичка, оловна, боросиликатна) из мешавине отпадног стакла [13]. Технологија је потпуно независна од боје и облика стаклених узорака. Детекција се врши зрачењем UV светла преко стакленог узорка. На основу састава узорка, UV светлост се апсорбује и пригушује. Интензитет пригушења се затим пореди са стандардном референтном вредношћу и тако се узорак класификује. Даље, класификовани узорак стакла се доставља у предодређену канту коришћењем ваздушне млазнице.

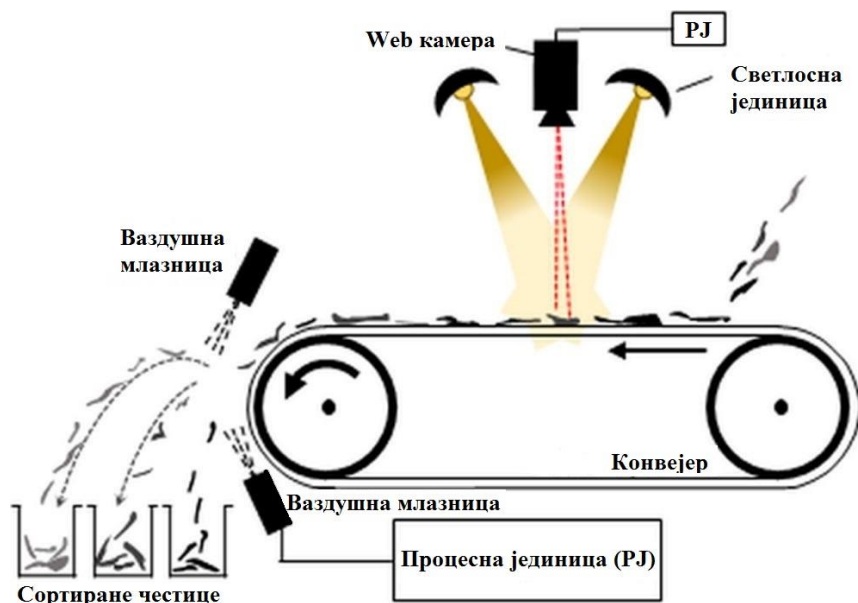
Оптичко сортирање се може користити за раздвајање метала и пластике. Хибридни систем са комбинацијом сензора за боју и индуктивног сензора може идентификовати метале попут бакра, месинга, алуминијума и нерђајућег челика. Делови са већином црвене компоненте у мешавини метала указују на бакар и месинг, док област плаве компоненте указује на алуминијум и нерђајући челик. Индуктивни сензор мери електричне карактеристике метала помоћу више од 52 индуктивних сензора. Идентификација метала је заснована на разлици боја и на електричној проводности [14]. Оптичко сортирање са мултиваријантном анализом укључује комбинацију 3D детекцијске камере и ваге,

фиксиране дуж конвејера (слика 2.21) [15]. Велики број обојених метала, као што су магнезијум, ковани и ливени алуминијум се раздвајају овом техником са ефикасношћу од 85%. На тачност ове методе не утиче површинска контаминација као што су боја, уље и прашина. Осим тога, овом техником се могу сортирати материјали врло неправилних облика. Инсталација и трошкови рада су релативно ниски у односу на остале технике, као што су техника сортирања Х-зрацима и спектроскопија ласерски индукованом пласмом. Техника сортирања заснована на карактеристикама као што су боја и облик, комбинује 3D камеру за скенирање боја и ласерског снопа монтираних на траци конвејера. Ова техника је још позната и као троугаоно скенирање, при чему троугао чине ласерски сноп, камера и ласерски одашиљач. Ова техника захтева чистоћу материјала од 98% за обојене метале и 99% за фракцију пластике.



Слика 2.21. Техника сортирања метала и пластике

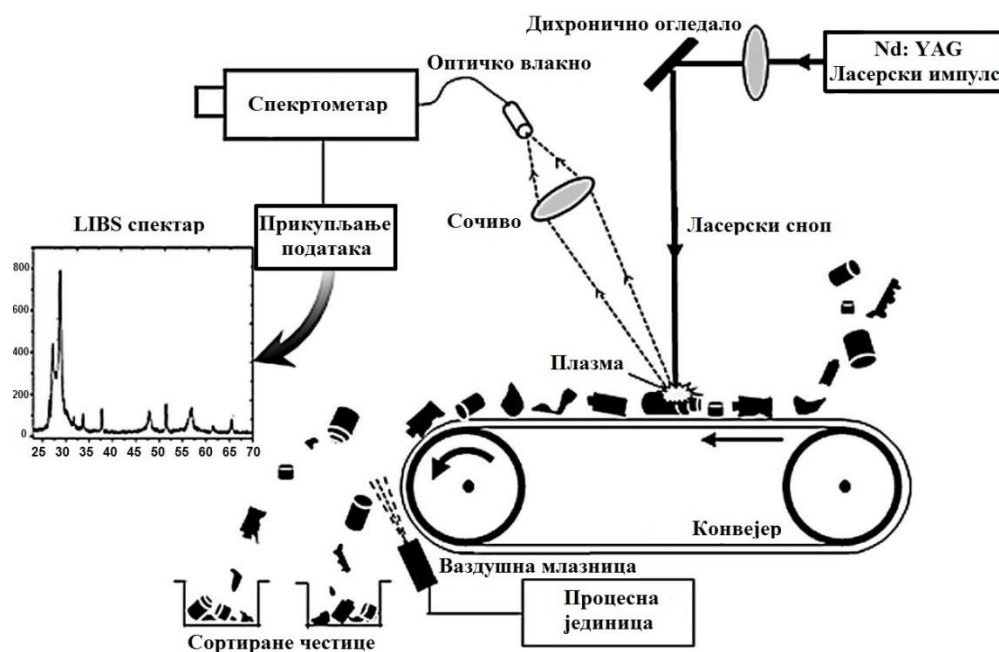
Употреба оптичког сортирања за различите типове папира из отпада, као што су стари картон, старе новине и бели папир, се постиже методом за обраду слике. Ова техника претвара слику папирног отпадног тока у квантну слику. Касније, папир се идентификује и разврстава у посуде помоћу класификатора чији се рад заснива на бази услова и закључка (ако-онда) (слика 2.22) [16]. Предложен је паметни оптички сензорски систем који може идентификовати различите типове папира, катрана, белог и новинског папира на основу конверзије црвено-зелено-плавих пиксела снимљене слике у NZI (нијанса, zasiћеност, интензитет) скалу боја. У овом приступу, јасноћа и интензитет информација се занемарује док превладава потреба за сталним осветљењем током идентификације. Коришћењем овог приступа забележена је ефикасност разврставања од 90%.



Слика 2.22. Техника сортирања папира са веб камером

2.2.7 Спектроскопија ласерски индукованом плазмом

Спектроскопија ласерски индукованом плазмом (Laser Induced Breakdown Spectroscopy-LIBS) је тип атомске емисионе спектроскопије која користи ласерски импулс велике снаге [17]. LIBS обезбеђује високодимензионалне спектрометријске информације за анализу легура метала и третирање дрвеног отпада. Систем LIBS се састоји од: чврстог ласера кога чини неодимијум допингован итријум-алуминијум-гранитом (Nd:YAG - neodymium-doped yttrium aluminum garnet), спектрометра спектралног опсега и процесне јединице за брзу анализу података (видети слику 2.23).



Слика 2.23. LIBS техника сортирања

Пре свега, отпад се доводи до подручја за преглед, изнад кога је постављен и фокусиран ласер. Стварање плазме, дејством ласера, доводи до уклањања слоја отпадног материјала. Зрачење које се емитује са овог слоја се читава помоћу спектрометра. Оптичка спектроскопија читава и разликује карактеристичне атомске емисионе линије и омогућава брзу анализу отпада праћеног детекцијом састава материјала. Затим механички систем сортира по саставу детектоване материјале у за њих намењене посуде. Предност LIBS-а се огледа у томе да се раздвајање отпада одвија према релативно већој запремини и брзини у односу на технику раздвајања вртложним струјама. Ограничење LIBS-а је такво да узорци отпада морају бити очишћени од мазива, боја или оксидних слојева. У пракси се ово тешко може обезбедити.

2.2.8. Сортирање помоћу X-зрака

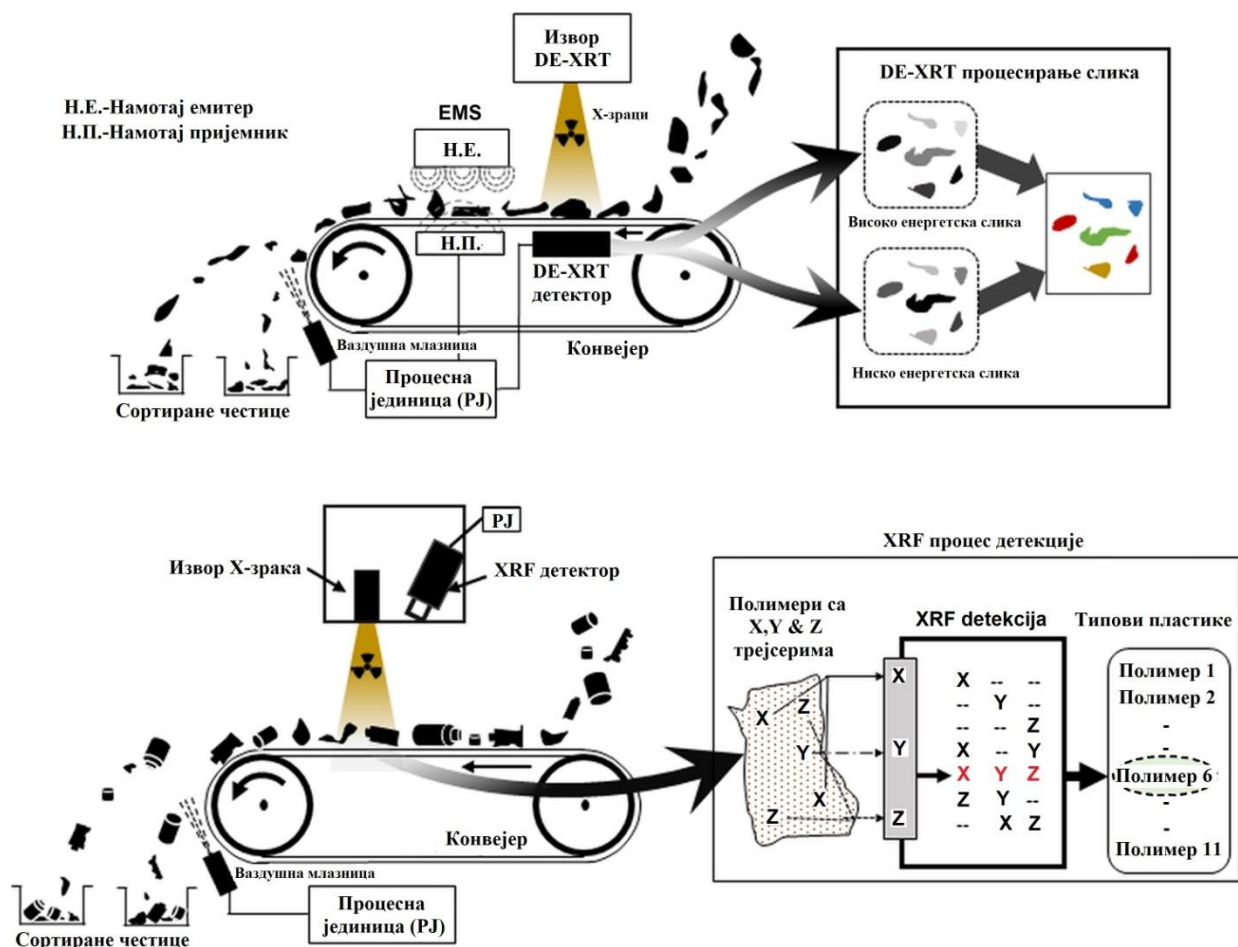
Рендгенска трансмисија (X-ray transmission - XRT) представља технику индиректног сортирања. Сортирање овом техником је релативно брзо, снимање рендгенских слика се одвија у року од неколико милисекунди. Модул за сликање користи сноп X-зрака високог интензитета. Кад зраци продру у материјал, део њихове енергије бива апсорбован док остатак пролази до детектора постављеног испод материјала (слика 2.24). Детектовано зрачење се може анализирати како би се добила информација о атомској густини материјала. Сортирање X-зрацима се може сврстати у две категорије: дво-енергетска рендгенска трансмисија (DE-XRT) и флуоресценција X-зрацима (XRF).

У процесу издвајања метала, апсорпција X-зрака зависи од густине и дебљине процесираних фракција метала. DE-XRT је модификована верзија XRT технике раздвајања, при чему је на материјале примењена двострука емисија X-зрака са различитим енергетским нивоима, односно два снопа са различитим таласним дужинама [18]. Веће слабење зрачења се јавља код материјала са већом густином. Идентификација различитих фракција се постиже употребом Ламбертовог закона, одређивањем разлике густина. Комбинација DE-XRT и електромагнетног сензора EMS (слика 2.24 горе) се користи у циљу повећања ефикасности раздвајања материјала.

XRF техника се може користити за издвајање пластичне фракције отпада. Ова техника се може применити само за издвајање PVC-а из PET-а, PP-а итд [19]. Принцип рада XRF-а је такав да се поједини атоми побуђују екстерним ласером који доводи до емисије фотона X-зрака. Емитовани фотони стварају јединствени спектрални потпис који одговара атомској тежини одређеног елемента. У случају једињења као што је пластика, одговарајући спектрални потпис се поклапа са спектралним потписом саставних елемената. Шематски приказ ове технике раздвајања је дат на слици 2.24 доле. Сноп фокусираних X-зрака је пропуштен кроз мањи део материјала после чега долази до детектора. Затим се сигнал из детектора шаље до процесне јединице која контролише извор X-зрака. Анализирани XRF спектрални сигнал се користи за раздвајање материјала који садрже одређене количине трејсера. XRF техника представља једну неструктивну елементарну анализу која је способна за идентификацију црних полимера и фракције материјала са контаминираном површином, путем пенетрације X-зрака до дубине од 1 mm.

Систем рендгенске флуоресценције се може ефикасно користити за идентификацију арсена у дрвеном отпаду [20]. Када се сноп X-зрака пројектује преко дрвеног узорка, долази до стварања флуоресценције услед попуштања атома. Количина ослобођене флуоресценције зависи од трејсера различитих елемената који су присутни у дрвеном

узорку. Истраживања показују да се XRF техником успешно идентификује присуство бакра, арсена и хрома.



Слика 2.24. DE-XRT i XRF процесирање

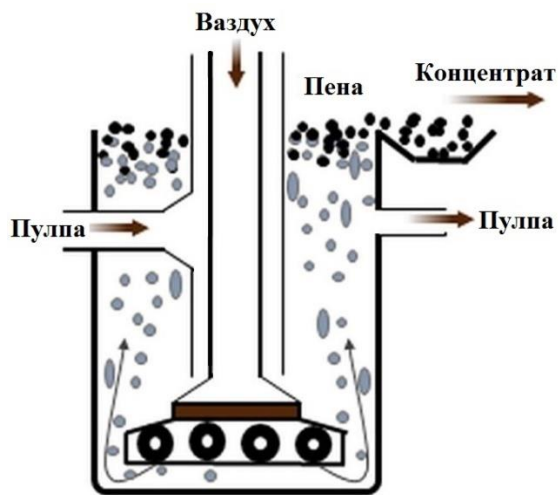
2.2.9 Флотација

Флотација се примарно користи за уклањање нечистоћа, нарочито као део процеса уклањања боје са старог папира. Технологија уклањања боје флотацијом за одстрањивање мастила из рециклиране папирне пулпе је први пут успостављена у Европи 1959 године. Од тада, производња пулпе са уклоњеним мастилом непрестано расте. Папир за новине у Немачкој се производи само од отпадног папира, чиме се добија 0,85 тона новина за сваку тону рециклираног папира. Ипак, употреба пулпе са уклоњеним мастилом представља сталан изазов у производњи папира константног квалитета, обзиром на варијације нечистоћа и нежељених компоненти у отпадном папиру. Новине, часописи и огласи, углавном прикупљени из домаћинства, главни су извор отпадног папира, али састав старог папира са кога се уклања боја се мења, зависно од врсте мастила нпр. водоотпорна мастила, мастила са природним везивним својствима, дигитално штампани папир, лепак на самолепљивим ковертама, пост-ит нотеси итд [3].

Данашњи флотациони резервоари су углавном цилиндричног облика који за свој рад користе убризгани ваздух. За стандардни новински папир, направљен од 100% рециклираних влакана, постројења за уклањање боје су често опремљена двоструком

флотацијом и дисперзивном фазом. Основни кораци у процесу флотације су кондиционирање, додавање разних супстанци, додавање пенушавих материја, ваздух, и уклањање пене. Под кондиционирањем се може подразумевати само подешавање рН вредности. Супстанце представљају хемикалије којима се селективно премазују честице мастила, чиме се производи хидрофобност неопходна за везивање мехурова ваздуха. Ваздух у комбинацији са сапуном производи пену, која се лако уклања са површине флотационог резервоара. Процесирање на бази двоструке флотације и дисперсије је намењено за уклањање честица мастила које су ослобођене влакана током стварања пулпе у првој фази флотације. За честице мастила које нису одвојене од влакана, као и за честице које су превелике за флотацију, фаза дисперзије доприноси разградњи на мање честице. У другој фази флотације, ове честице мастила се могу ефикасно уклонити са пулпе.

Често се флотација користи за издвајање пластике из отпадног тока. Пре процесирања је потребно уситнити отпад у фине честице или пулпу и помешати га са водом [21]. Шематски приказ флотације је дат на слици 2.25. У овом процесу, ваздух се под високим притиском раствара у мешавини воде и отпадне пулпе. Затим се растворен ваздух ослобађа у флотационом делу под атмосферским притиском. На овај начин долази до стварања пене на површини мешавине воде и отпада. Плутајуће честице пластике се, због своје хидрофобности, лепе за мехурове пене која је формирана. Специфична густина мехурова, који носи честице пластике, је мања у односу на течни флуид изазван флотацијом.



Слика 2.25. Издвајање пластике флотацијом

2.2.10 Густински сепаратори

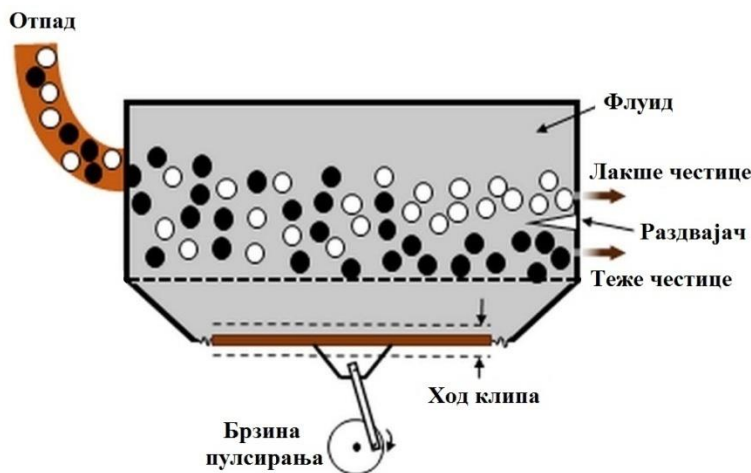
Рударска индустрија је развила технологију која користи течни флуид за раздвајање материјала према њиховој густини. Пре 30-40 година, ова технологија је испробана у неколико експеримената за сортирање компонената отпада, обојених метала, стакла, пластике, и контаминаната. Сортирање на бази густине материјала се најчешће користи за раздвајање пластике. Постоје три врсте густинских сепаратора који користе течност:

- гравитациони метод,
- магнетни густински сепаратори и
- хидрокиклони.

Гравитациони метод

Гравитациона метода може резултирати чистоћом раздвајања од преко 98% за мешовите пластичне материјале. Међутим, фракција мекшег PVC-а се не може раздвојити овом технологијом. Хидрофобност пластике се лако повећава током раздвајања помоћу средстава за влажење. Густина мешовите пластике из стамбеног и комерцијалног отпада креће се у следећем опсегу: полиетилен (PE) $< 0,98 \text{ gr/cm}^3 < \text{полистирен (PS)} < 1,05 \text{ gr/cm}^3 < \text{поливинилхлорид (PVC)}$. Течност за раздвајање се подешава за ниво високе густине додавањем CaCl_2 (220 gr/l). Боље сортирање настаје додавањем хемикалија које повећавају влажност површине пластике. Током експериментисања помоћу воденог медија (густине 1 gr/cm^3) са незапрљаним гранулама пластике из стамбеног отпада, добијена је фракција полиолефина са чистоћом раздвајања већом од 98%. Тешка фракција састоји се од PS-а и PVC-а, при чему је мање од 2% PS-а било одбачено. Одбачени део се претежно налазио у плутајућој фракцији због присуства финих честица на улазу сепаратора. Пре-процесирање тока отпада помоћу ваздушног класификатора се може користити за сакупљање већине финих честица. Пост-сепарација потонуле фракције са употребом CaCl_2 се добија концентрација PS-а и PVC-а и до 89% [3].

Критични фактор за успешно раздвајање је када нема појаве турбуленције у зони раздвајања која би могла изазвати да тешка фракција буде избачена. Стога, брзина пуњења гравитационог сепаратора је ограничена. Скупе измене конструкције су неопходне како би се избегла турбуленција у серијском погону гравитационих сепаратора. Из економских разлога, само континуални рад ових сепаратора треба узети у обзир у индустрији управљања отпадом.



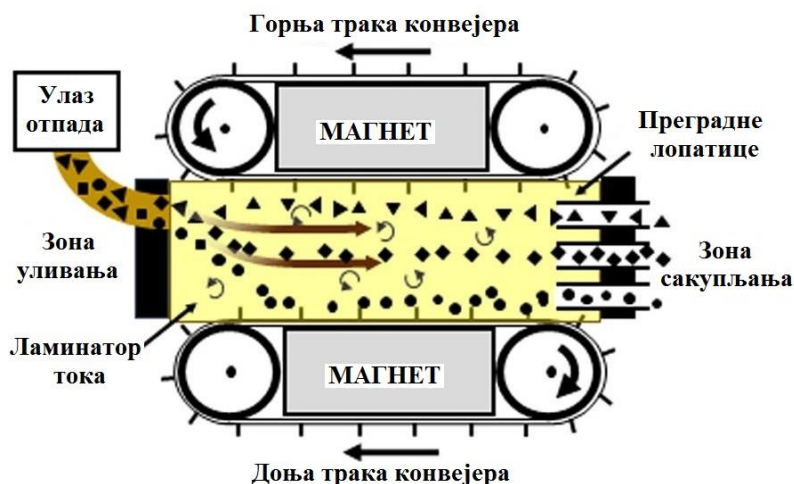
Слика 2.26. Раздвајање пулсацијом

У ову групу сепаратора спадају и пулсирајући гравитациони сепаратори, чији се принцип рада заснива на узајамном дејству пловности, гравитације, убрзања и кретања. У овом процесу се мешавина воде и чврстих честица поставља у перфорирану посуду тзв. пулсирајуће корито. Вибрирање (пулсирање) корита доводи до стварања вертикалне струје у воденом стубу при чему се издижу чврсте честице (видети слику 2.26). Разликују се два типа струје: узлазна и силазна. Материјали са већом густином се концентришу при дну корита. Раздвајање се одвија на основу густине, величине и облика материјала.

Основни параметри који утичу на процес пулсирања су: дужина клипа, почетна висина корита и брзина пулсирања [22].

Магнетни густински сепаратори

Магнетни густински сепаратори базирају свој рад на кориштењу намагнетисане течности као флуида за раздвајање. Улазни отпад се меша са намагнетисаном течношћу и тако уводи у зону раздвајања, као што је приказано на слици 2.27. За стварање магнетног поља се користе велики магнети. Јачина магнетног поља се, удаљавањем од магнета, експоненцијално смањује. Због дејства магнетног поља, густина намагнетисаног флуида постаје променљива [23]. Варирањем густине намагнетисане течности која се налази у сепаратору, се може постићи да одређени рециклабилни полимерни материјали различитих густина, плутају на различитим нивоима те течности. Плутајући полимерни материјали се затим сакупљају помоћу преградних лопатица за раздвајање.

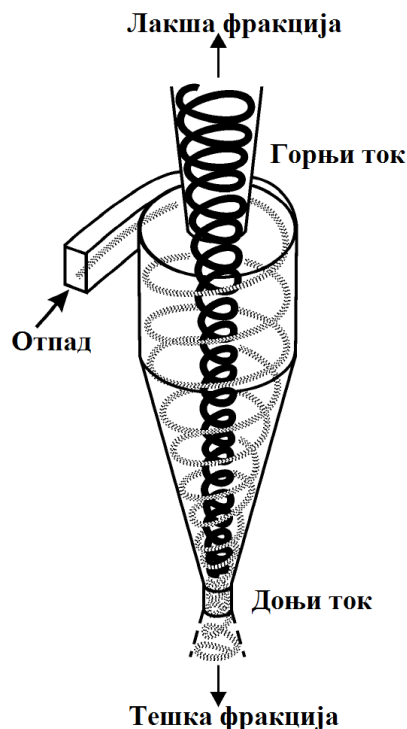


Слика 2.27. Магнетни густински сепаратор

Хидроциклони

Раздвајање различитих врста пластичних материјала из мешавине гранулата се постиже помоћу поља центрифугалних сила унутар хидроциклона. Геометрија циклона ствара, навише усмерен, унутрашњи спирални вртлог који односи лаку фракцију, док спољна спирала која је усмерена наниже односи тежу фракцију (видети слику 2.28). Хидроциклон се разликује од гравитационог сепаратора по својој једноставнијој конструкцији, недостатку компликованих делова и већој брзини пуњења. Врста и квалитет уређаја који се користе за иницијално пре-процесирање или улазно ситњење материјала, имају важну улогу у квалитету и концентрацији генерисаног излаза код хидроциклона. Тест са раздвајањем пластике је изведен помоћу хидроциклона капацитета од 1 t/h. Пластика је пореклом из градског чврстог комуналног отпадног тока. Проценат нечистоћа (нпр. папир, метал, песак) износи 1 до 5%. Просечан садржај пластике се креће од 80-85% PE, 2-10% PS и 8-15% PVC-а. Резултати теста су показали 100% излаз PE-а са око 2-3% PS шкарта, док присуства PVC шкарта нема. Секундарно сортирање хидроциклоном, за тежку фракцију (која се састоји од PS-а и PVC-а), резултирала је скоро 100% издвајањем PVC-а. PS се може издвајати до концентрације од 95%, остатак су шкарт PVC-а и PE-а. Већина захваћених контаминаната су сакупљени заједно са PVC-ом у тешкој фракцији. Већина

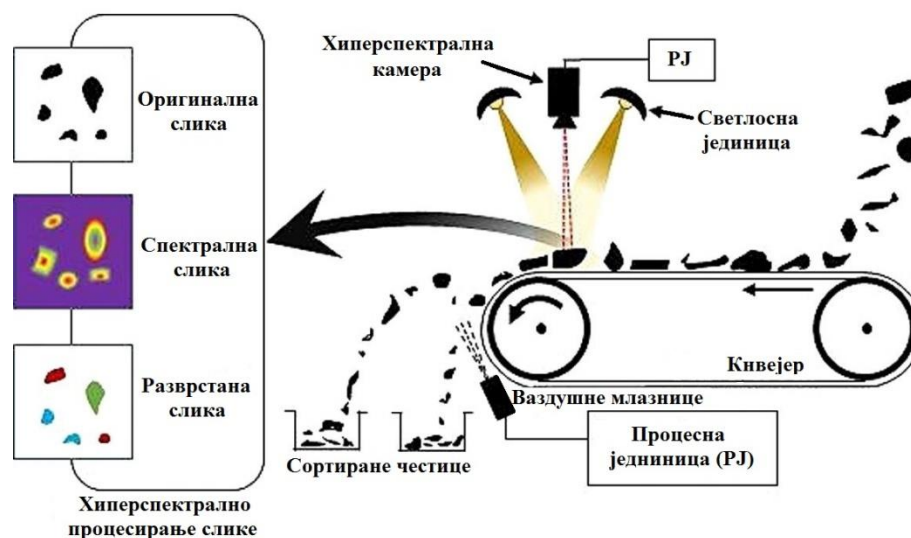
отпадне воде у хидроциклону се поново користи, док се чиста вода користи само у количинама до $0,2 \text{ m}^3$ по тони сировине. Потрошња енергије износи 36 kWh/t сировине [3].



Слика 2.28. Хидроциклон

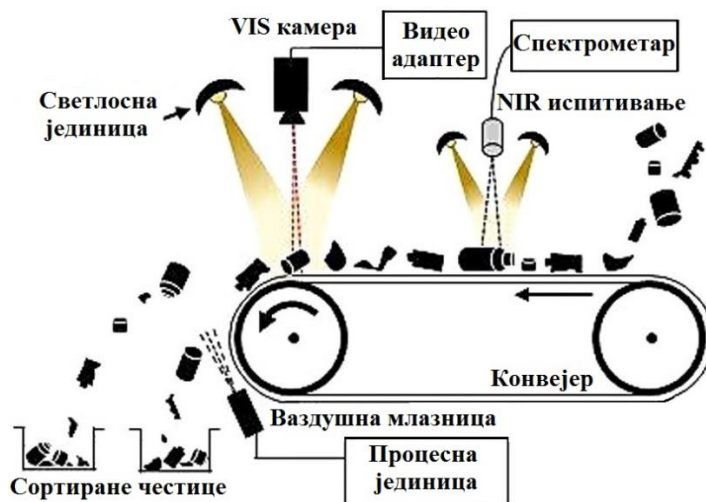
2.2.11 Сортирање на бази спектралног снимка

Спектрално снимање обједињује технологије мерења спектралне рефлексije и обраде слике. У различите спектралне технике на бази снимка спадају: спектроскопија у близини инфрацрвеног подручја (NIR- near infrared), спектроскопија слике у видљивом подручју (visual image spectroscopy - VIS), и хиперспектрални снимци (HSI - hyperspectral imaging) [24]. Хиперспектрална камера је слична лабораторијском спектрометру, која производи слике преко континуалног низа уских спектралних веза које олакшавају спектроскопску анализу података. Шематски приказ хиперспектралног сортирања је дат на слици 2.29. Конвејер транспортује фракцију отпада испод надзорне станице, а спектрална камера континуално прикупља спектралне податке у одређеним временским интервалима. Након пре-процесирања података на њих се примјењује алгоритамска класификација у циљу класификације материјала. Низ млазница компримованог ваздуха су монтиране на крају траке конвејера и, у зависности од врсте материјала, млазнице се активирају појединачно како би се раздвојиле фракције материјала у, за њих, предвиђене посуде (видети слику 2.29).



Слика 2.29. Техника хиперспектралног сортирања

Спектрално сортирање се користи и за раздвајање пластике. У спектроскопски заснованој технологији, светлост обасјава узорке пластичног отпада. Због интеракције између светла и пластичних узорака, јединствени сет светлосних таласа ће бити рефлектован у зависности од врсте пластике која је присутна међу узорцима. За читавање рефлектованих таласа се користе различити типови сензора. Касније, утврђивање материјала који је потребно сортирати се врши помоћу процесне јединице. Развијена је техника која користи рефлексију видљиве спектроскопије (visual image spectroscopy VIS) за идентификацију PP пластике у мешавини отпада. Подешавање се састоји од система за руковање материјалом и јединице за детекцију (слика 2.30) [25].



Слика 2.30. Техника сортирања VIS камером и NIR спектрометром

Конвејер служи за транспорт мешаног отпада до јединице за детекцију где се са VIS светлосним извором обасјавају узорци. Јединица за идентификацију користи VIS спектрометар за анализу рефлектованог светла са узорака и тако отврђује присуство одређеног материјала међу узорцима. Млазнице са компримованим ваздухом избацују честице у одговарајуће посуде.

Слика 2.30 илуструје типичан спектроскопски систем који је опремљен покретним конвејером и сензорским системом који укључује осветљење и NIR спектралну камеру. Први корак је достављање материјала у зону надзора помоћу конвејера. Затим NIR камера бележи снимак узорака. Слика се даље обрађује помоћу технике класификације алгоритама. Међутим ова техника не може ефикасно да детектује црне полимерне материјале због њиховог високог коефицијента апсорпције.

Сортирање керамичког стакла на спектралној бази врши се у средњој инфрацрвеној области (mid-infrared - MIR) [26]. Спектрална карактеризација фракције стакла и керамичког стакла се врши помоћу специфичних таласних дужина, чиме је омогућено препознавање две класе материјала. Пример приступа за препознавање и сортирање корисног (обичног стакла) и отпадног (керамичког стакла) је дат на слици 2.31.

Овај приступ користи VIS и NIR спектар, тако што пореди детектоване материјале са референтним узорцима стакла и керамичког стакла који су представљени у различитим облицима, дебљинама и бојама. Хиперспектрално снимање базирано на осетљивим уређајима се често користи за онлајн препознавање фракције стакла и керамичког стакла унутар постројења за рециклажу. NIR се примењује код статистичких класификатора за препознавање спектралног обележја материјала.



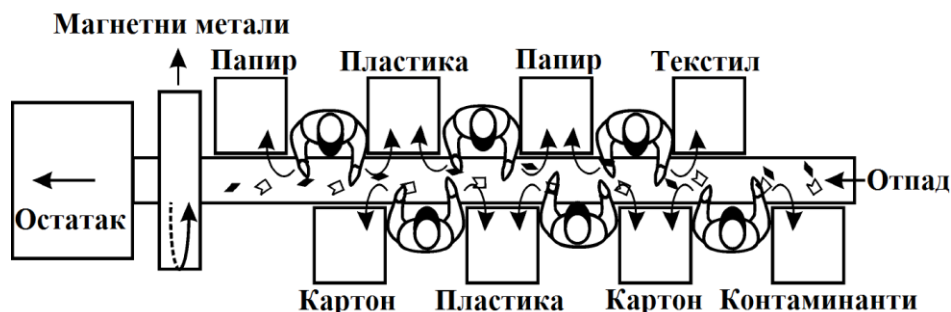
Слика 2.31. Техника сортирања обичног и керамичког стакла

2.2.12 Ручно сортирање

Упркос технолошком напредку, ручно сортирање представља најпоузданији метод раздвајања секундарних производа из мешаног отпада. Особље које сортира отпад може ефикасно раздвојити стамбени и комерцијални отпад (као и изворно одвојени отпад) у канте за отпадни папир, мешано стакло, као и провидне или обојене фолије, док истовремено уклањају контаминирани материјале. Ручно сортирање доводи радника у близак контакт са отпадом чиме га излаже повредама изазваним оштрим предметима, хемикалијама и токсинама. Мере опреза у виду заштитне опреме и вентилације, као и строге сигурносне и остале потребне процедуре, морају бити спроведене. Обзиром да је ручно сортирање прилично напоран посао, у циљу надокнаде трошкова и повећања ефикасности је потребно укључити и механизовано сортирање. Материјали мањих честица се просејавају, чиме се повећава продуктивност ручног разврставања. Примарни циљ магнетних сепаратора, ваздушних млазница, нагнутих конвејера и сита, јесте

припремање отпада за ручно сортирање како би се код радника повећао степен раздвајања. Приликом раздвајања треба разликовати позитивно и негативно разврставање [3]:

- позитивно разврставање укључује ручно уклањање рециклабилних материјала из отпада и њихово одлагање у одговарајуће канте (слика 2.32),
- насупротив томе, негативно разврставање, настаје сакупљањем контаминаната из отпада тако да жељена фракција остане на конвејеру.



Слика 2.32. Станица за ручно сортирање

Већа брзина сортирања се постиже са негативним раздвајањем, али са нижим квалитетом. Позитивно раздвајање, насупротив, резултира већим квалитетом одвојеног материјала али са знатно споријим раздвајањем. Ефикасност ручног раздвајања се значајно повећава при процесирању мешовитих или изворно раздвојених рециклабилних материјала, у поређењу са издвајањем рециклабилних материјала из читавог тока чврстог комуналног отпада.

2.3 Балирање

Циљеви балирања су смањење запремине и повећање густине отпада. Балирање је веома важан процес у управљању отпадом, с обзиром да се смањењем запремине смањују трошкови, затим се смањује потребна површина за одлагање и повећава корисна носивост рециклабилних производа транспортним возилима. Осим тога, балирањем се повећава енергетска густина материјала, ако се материјал користи за производњу топлотне енергије. Методе балирања користе две технике везивања, у којима се разликују два основна поступка [3]:

- поступак код кога се везивања честица постиже деловањем спољашњих сила, такође познато као везивање сабијањем,
- поступак код кога се везивања честица постиже додавањем везивних средстава са накнадним сушењем.

Поступак са додатком везивних средстава се примарно користи за трансформацију честица прашине. На пример, прашина настала чишћењем се уз додатак везивних средстава претвара у чврсте, геометријски хомогене грануле. Поступак везивања сабијањем се доминантно користи у свим осталим областима управљања отпадом.

Физичка зависност између смањења запремине и притиска се, када се користи преса за сабијање отпада, може дефинисати кроз три фазе [3]:

- фаза 1 - почетно сабијање изазива поравнавање материјала и повећање уклапања честица. Мало повећање притиска изазива велико смањење запремине, пошто се ваздух пропорционално измешта из укупне запремине материјала,

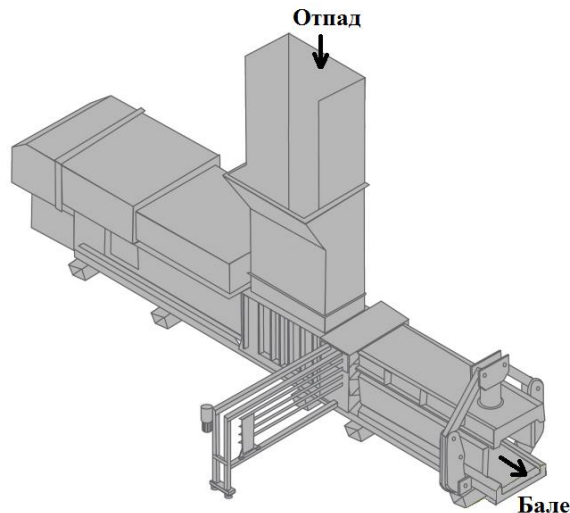
- фаза 2 - са повећањем притиска, долази до еластичних и пластичних деформација честица које попуњавају све постојеће празнине. Као резултат трења, повећава се температура при чему настаје периферно топлеење оних честица које имају ниску тачку топлеења, тако да енергија у овој фази служи као деформациона. Даљом компресијом, њена отпорност расте експоненцијално.
- фаза 3 - у овој фази, попуњене су практично све празнине и настаје скоро нестишљива маса. Повећање притиска резултира минималним смањењем запремине.

Уобичајене методе сабијања укључују сабијање помоћу ослонаца и сабијање екструзијом у калупима. Док први метод користи зидове коморе за пресовање као чврст ослонац, други користи обликоване калупе као ослонац.

2.3.1 Сабијање помоћу ослонаца

Већина отпада се састоји од материјала са малом густином и великом запремином. У сакупљању, транспортовању и руковању отпадом, велика запремина је важан трошковни фактор и сабијање отпада може довести до значајне уштеде. Сабијање отпада повећава његову густину при чему расте потрошња енергије за сабијање. Када се сабијају отпаци, до повећања густине се долази услед дробљења, деформисања и премештања појединих делова унутар отпада. Празна амбалажа, као што су бочице и конзерве, се ломи или гњечи при различитом притиску, зависно од тога какав је тренутни положај амбалажа заузела у процесу сабијања и од врсте материјала од кога је направљена. Сабијање неких материјала је неповратно, у смислу када се смањи притисак, материјал се не враћа у првобитни облик. Отпад, међутим, садржи различите компоненте које доприносе повратном сабијању. Што је већи притисак, већа је целовитост сабијеног отпада, као што је већа отпорност на распадање након сабијања [3].

Опрема за сабијање је доступна у различитим величинама и капацитетима. Након процеса компресије, бале се обично замотују у најлон или се повезују жицом. Све врсте производа, као што су амбалаже, рециклирани папир, RDF гориво, и мешани отпад, данас се замотавају у стреч фолију како би се обезбедило привремено складиштење, превоз и истовар без емисије непријатних мириса. Сабијање и балирање могу бити корисна алтернатива за контејнерске транспортне системе. На слици 2.33 је дат приказ једне пресе за балирање отпада и рециклабила.



Слика 2.33. Преса за балирање

2.3.2 Екструзија укалупима

Сабијање екструзијом се дели на континуалну, полуконтинуалну и неконтинуалну технологију [3]:

- Континуална операција сабијања обухвата екструдере, као што су пужни екструдери и завојне пресе. Завојна преса гура материјал кроз калуп (са једном или више отвора) и тако формира континуалну екструзију. Ово је основна технологија која се користи за обраду влажних ситнозрнастих материјала (нпр. третман отпадних муљних вода помешаних са пиљевином).
- Полуконтинуална екструзија или пресе за пелет су млинови код којих ваљак ротира преко перфорираних плоча или матрице у облику прстена, и истискује материјал кроз отворе. Са сваким истискивањем, производи одговарајуће облике који се наизменично (дисконтинуално) избацују.
- Неконтинуални погони обухватају млинове за гњечење, пресе за брикетирање, и механичке или хидрауличне ваљке који сабијају материјал сукцесивним протискивањем кроз отворене калупе. Уопштено, само је један калупни канал у употреби, тако да се само један брикет производи по ходу.

Пресе за брикете и пресе за пелет представљају две технологије компактирања екструзијом које се често користе у производњи RDF горива и за сабијање отпада након што је извршено издвајање материјала.

Пресе за брикете

Преса за брикете функционише углавном као клипњача са замајцем, коленастим вратилом, клипом са вођицама или хидрауличним погоном. Отпад се претходно сабија у завојној преси и затим се убацује кроз конусни жлеб у брикетирку где се врши калупљење. Клипно екструдовање кроз калуп се користи од средине 1900-тих за прераду тресета и брикетирања лигнита. У последњих неколико година, ове методе сабијања су примењене у процесу управљања отпадом за сабирање дрвене пиљевине, дрвене струготине, сламе, отпадног папира, итд [3].

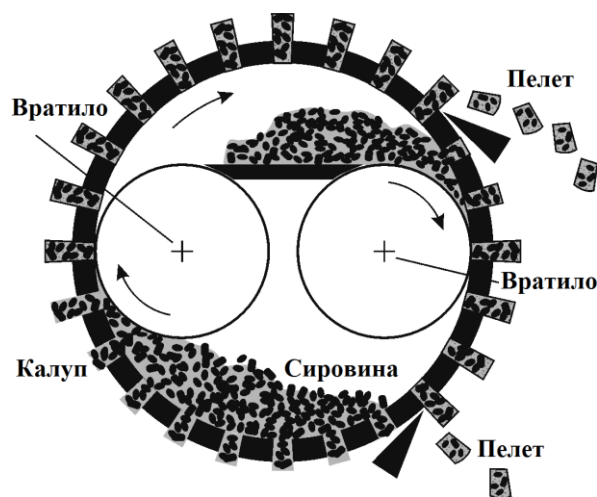
Пресе за пелет

Технологија пелетирања се први пут користила у индустрији сточне хране за прераду отпадних фракција са високим топлотним вредностима за производњу RDF-а. Пресе за пелет су касније уведене и у индустрији отпада. Предност у односу на пресе за брикете у индустрији RDF-а имају због веће улазне стопе пуњења као и мање величине готових производа. Пелет треба да резултира следећим предностима [3]:

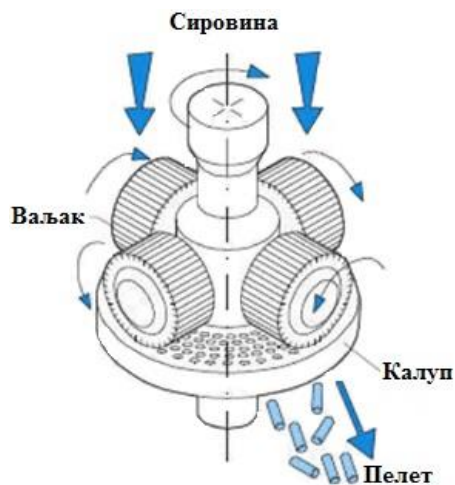
- мања запремина складиштења повећањем густине од растреситог горива ($\sim 65 \text{ kg/m}^3$) до меког пелета ($\sim 450 \text{ kg/m}^3$) или тврдог пелета ($\sim 650 \text{ kg/m}^3$),
- побољшан проток и пропорционалне карактеристике,
- избегавање везивања у силосима или транспортним конвејерима,
- повећање енергије трењем и сабијањем уз повећање притиска и температуре.

За потребе сабијања, пресе за пелет су подељене на три основна типа [3]:

- Џон Дир (John Deere) преса се састоји од прстена са вертикалним каналима за пресовање димензија $32 \times 32 \text{ mm}$. Материјал који се сабија се додаје на ваљке изнад канала за пресовање. Ваљак сабија материјал у четвртасте канале. На овај начин се материјал обликује у резанце који се затим крате, стационарним сечивом, на дужину од $20\text{--}50 \text{ mm}$.
- Преса са прстенастом матрицом састоји се од вертикалних ваљака који круже унутар прстенастог калупа, као што је приказано на слици 2.34. Погон може бити или на прстену или на ваљцима. Материјал се радијално истискује кроз отворе на прстенастом калупу. Број и величина ваљака се одређују на основу унутрашње величине прстенастог калупа. Сировина се убацује аксијално помоћу пужног транспортера или левка.
- Пресе са равном матрицом су конструисане са округлим, равним калупом са погонским ваљцима који ротирају по том калупу (слика 2.35). Материјал се истискује кроз канале нормалне на осу обртања тих ваљака. Растојење између ваљака, као и број ваљака, лакшеје подесиво него код пресе са прстенастом матрицом. Материјал који се сабија се убацује одозго у пресу. Плоче за вођење или механизми за присилно пуњење нису потребни.



Слика 2.34. Преса са прстенастом матрицом



Слика 2.35. Преса са равном матрицом

3 Постројења за секундарну сепарацију отпада

У цињу поновног коришћења и добијања чистих производа, сваки отпадни ток мора бити сортиран. Иако је индустријска аутоматизација овог процеса напредовала, велики део издвајања производа из отпадног тока се у постројењима за третман отпада мора вршити ручно.

Ова постројења представљају велике објекте у којима се мешани комунални отпад, различитим методама, разврстава на појединачне компоненте. Издвајање магнетних метала се најлакше постиже методом магнета, тако што ће ови метали бити привучени магнетним пољем. Ваздушно сортирање, као метода, се може користити за разврставање тежих материјала, попут стакла и осталих метала, тако што ће из отпадног тока odstraniti лакше компоненте као што су папир и пластика.

Ове технологије су релативно јефтине. За издвајање различитих обојених метала је развијена технологија инфра-црвеног скенирања па чак и скенирања помоћу Х-зрака. Овакве типове сензора могу да приуште само она постројења која процесирају велике количине отпада.

Поред ових технологија издвајања, и даље остаје проблем разврставања различитих типова пластике. За сада је у овоме још увек ефикасније ручно издвајање од онога путем индустријске аутоматизације. Наравно, ручно сортирање отпада је прљав и непријатан посао који није нарочито добро плаћен.

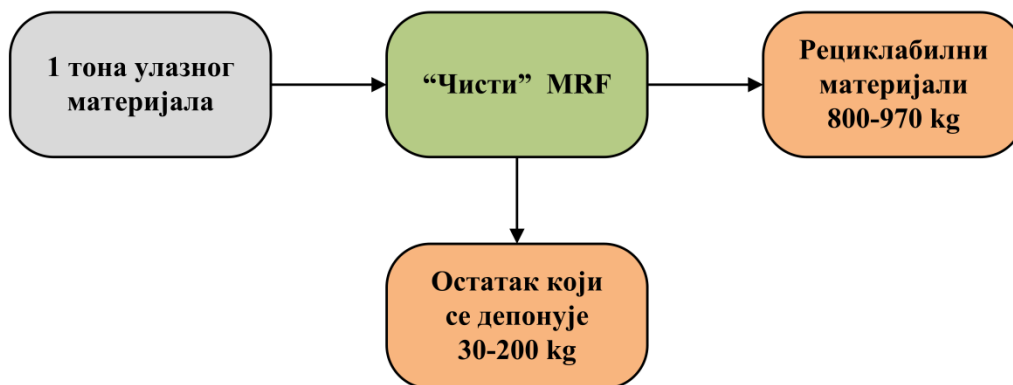
Процесирање и раздвајање отпада у постројењу за третман отпада се врши на основу његове величине, масе, електромагнетних својстава, и других карактеристика током кретања отпада преко низа транспортних трака. Након сортирања, корисни рециклабили се обично дробе, компактирају и балирају. У том случају, бале се продају и испоручују одређеним произвођачима, међутим, материјали се могу продати и у било којој претходној фази процеса.

Разликују се два основна типа постројења за третман чврстог комуналног отпада:

- такозвано „чисто“ (Clean MRF) и
- „прљаво“ постројење (Dirty MRF).

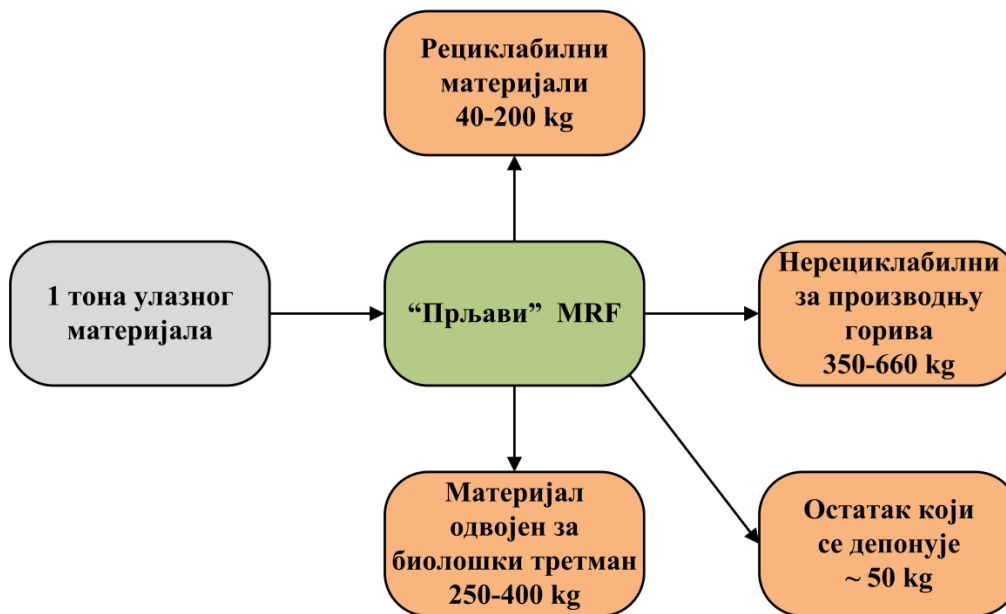
У „чистом“ постројењу се врши третман само оних материјала који се сматрају рециклабилним. Обично се сакупљање ових материјала врши са ивичњака поред пута где су одложени и издвојени од стране грађана или предузећа. На овај начин се смањује количина неупотребљених материјала који улазе у постројење. Оваква постројења се могу поделити на постројења са једним током (single stream) и на постројења са два тока (dual stream).

Код постројења са једним током су сви рециклабилни материјали измешани заједно, док постројења са два тока користе један ток за третман само мешавине папира а други за третман осталих рециклабила попут стакла, метала и пластике. Рециклабилни материјали се сортирају и тако припремају за тржиште. Нерециклабилни и контаминирани материјали се издвајају посебно и они углавном чине до 20% укупног тока материјала који уђе у „чисто“ постројење. На слици 3.1 је дат шематски приказ количине издвојених рециклабила у једном оваквом постројењу [27].



Слика 3.1. Ток материјала у „чистом“ постројењу

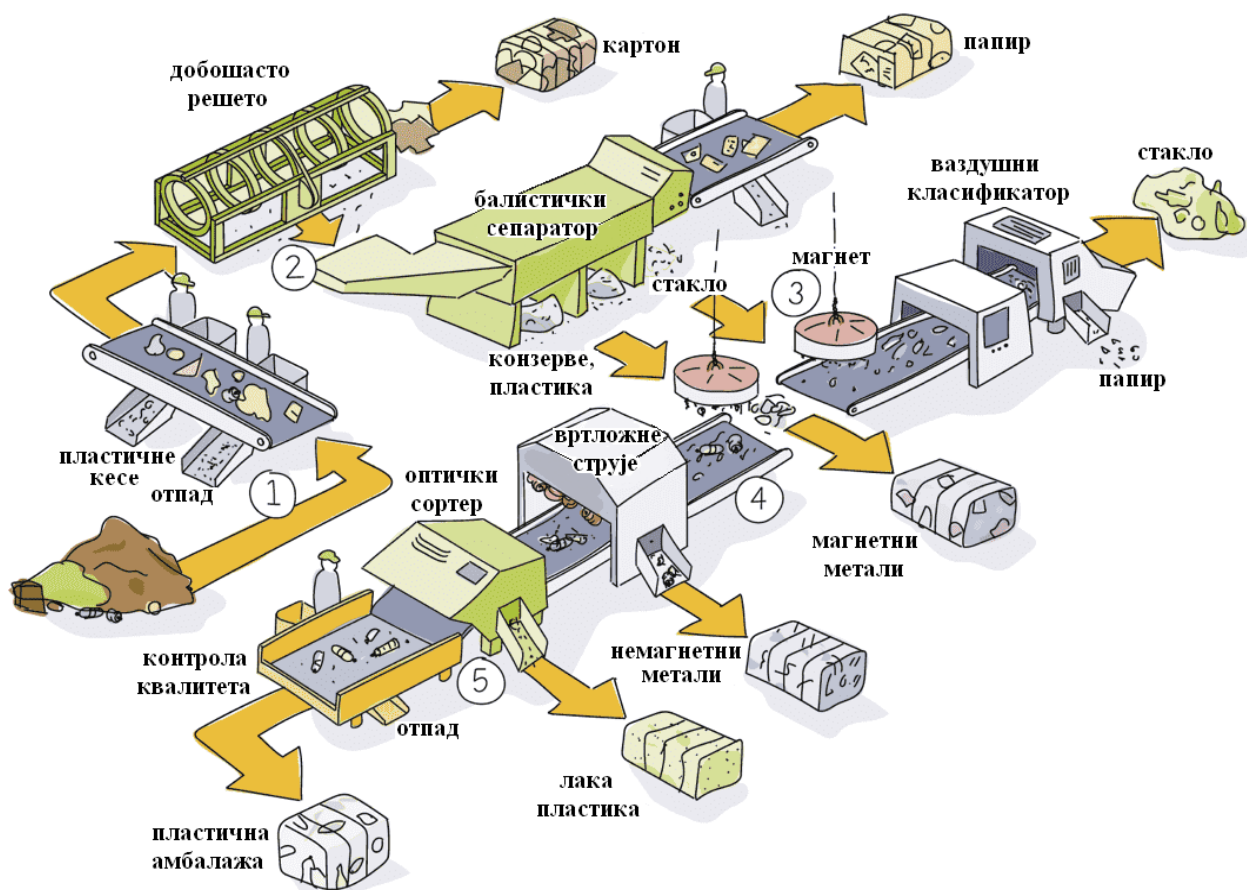
„Прљаво“ постројење заузима шири део чврстог отпадног тока где се издвајање рециклабилних материјала врши ручним и механичким путем. Након издвајања, рециклабили се продају на тржишту а нерестилабили се депонију или се одлажу и даље третирају у неком другом постројењу. Количина издвојених рециклабила у оваквом постројењу може значајно да варира и обично не прелази 20% као што се може видети на слици 3.2 [27]. Један део отпада у овим постројењима се користи за производњу горива док се други третира биолошким путем, све у циљу да што мања количина отпада заврши директно на депонији.



Слика 3.2. Ток материјала у „прљавом“ постројењу

На слици 3.3 је дат упрошћен пример третмана материјала у једном „чистом“ постројењу. Отпад (1) сакупљен из домаћинства, рециклажних центара и предузећа се транспортује до постројења где се утовара на конвејер. Материјали који се не могу рециклирати, као и они који могу оштетити опрему се ручно уклањају са конвејера. Ток материјала затим пролази кроз добошасто решето и балистички сепаратор (2) како би се раздвојили различити

рециклабили. Папир се ручно прегледа, затим балира, након чега се шаље у млин за рециклажни папир. Даље, стакло пролази испод магнета (3), да би се уклонили магнетни метали, и затим шаље кроз ваздушни класификатор због издвајања лаких папира. Стакло се сакупља и засебним возилом транспортује у постројење за рециклажу стакла. Метали се издвајају помоћу магнета (4) (магнетни метали попут челичних конзерви) и сепаратора вртложним струјама (немагнетни метали као што су алуминијумске лименке). Ови метали се балирају након чега су спремни за рециклажу. Јединица за оптичко сортирање (5) раздваја различите врсте пластике и пластичне амбалаже. Затим пролази линију ручне инспекције као финалне контроле квалитета. Балирана пластика се транспортује у постројење за рециклажу пластике.

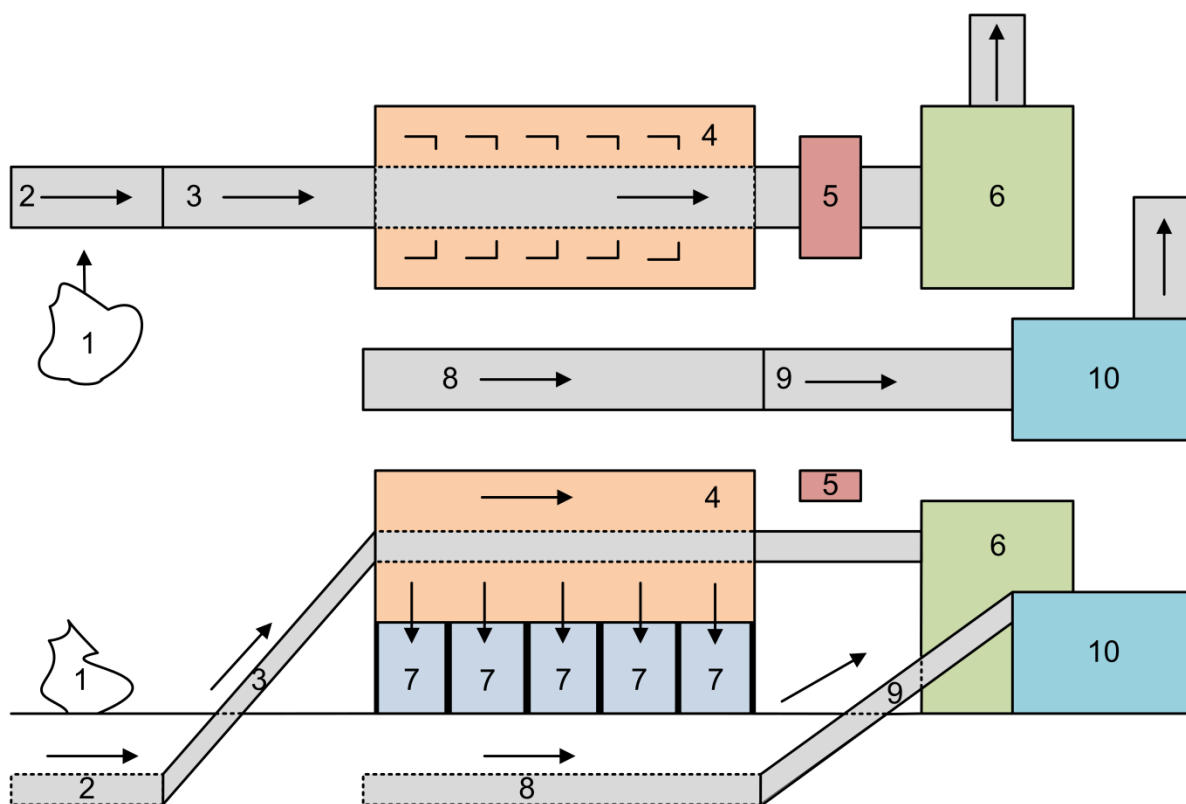


Слика 3.3. Третман рециклабила у „чистом“ постројењу

Као типичан пример једног „прљавог“ постројења се може узети постројење за сепарацију комуналног отпада у Новом Саду. Отпад који пристигне на градску депонију се, у зависности са којих локација је допремљен, упућује на сепарацију или на депоновање. Шематски приказ овог постројења је дат на слици 3.4 са објашњењем појединих позиција које следе:

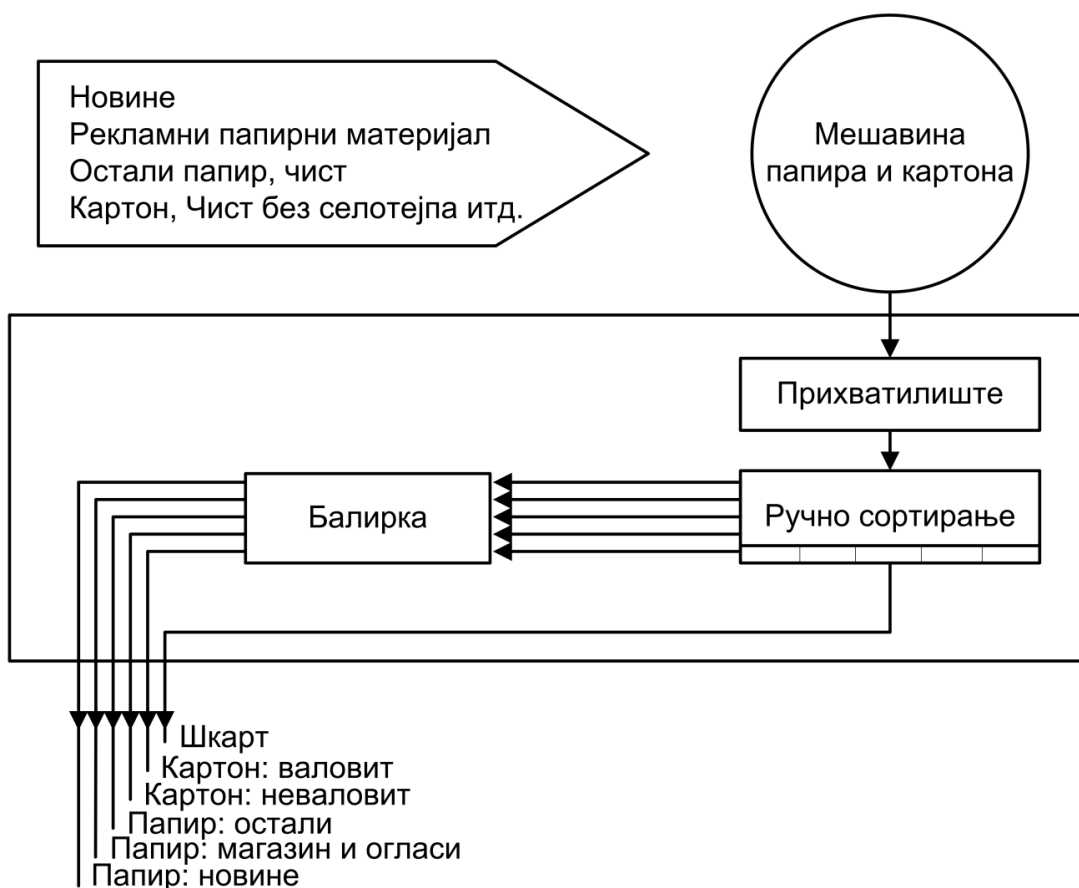
Из отпада (1) који је спреман за третман, односно сепарацију, се пре него што оде на пријемну транспортну траку (2), издвајају сви кабасте материјали: металне шипке, сајле, комади шута, бела техника, комади керамике, ... Пријемна транспортна трака је

постављена испод нивоа истоварне платформе. Након издвајања кабастог материјала, отпад се радним машинама нагура на пријемну транспортну траку. Отпад се даље помоћу транспортне траке за „увођење“ отпада (3) доводи до сортирнице (4) за ручно издвајање секундарних сировина из отпада. Из преосталог отпада који напусти сортирницу се помоћу магнета (5) врши издвајање магнетних метала. „Велика преса“ (6) се користи за балирање отпада који се депонује тако да заузме што мање простора на депонији. У боксевима (7) се привремено одлажу секундарне сировине све док се не накупи довољна количина за балирање. Ове сировине доспевају у боксеве тако што се у патосу сортирнице налазе отвори кроз које радници одлажу издвојене материјале. У један бокс се одлаже папир, други катрон, трећи најлон, четврти РЕТ амбалажа и пети алуминијум. Пре доласка сировина на пријемну траку за секундарне сировине (8) се врши контрола чистоће тих сировина. Даље се транспортном траком за одвођење секундарних сировина (9), сировине транспортују до „мале пресе“ (10) где се врши њихово балирање [28].



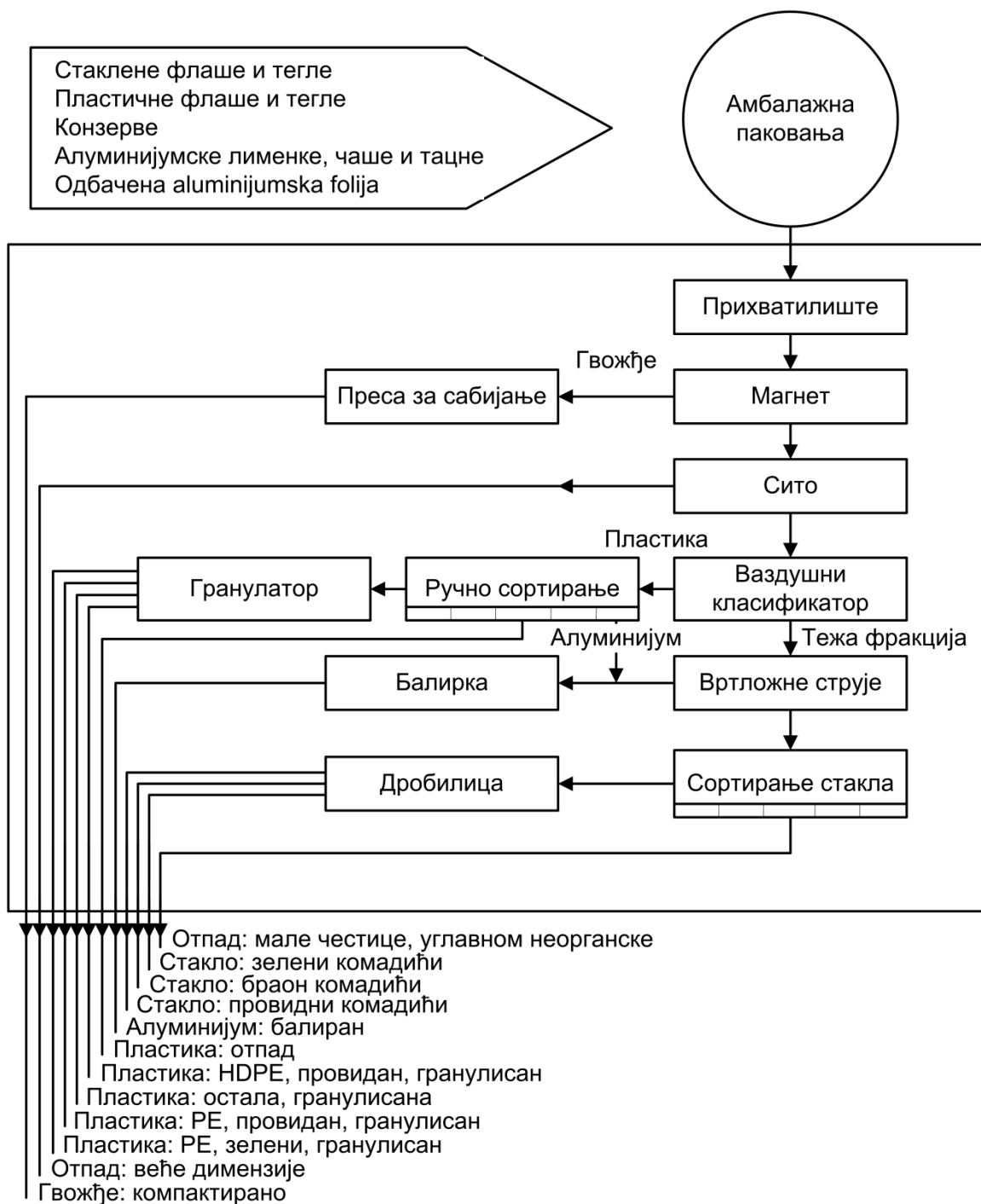
Слика 3.4. „Прљаво“ постројење за третман комуналног отпада у Новом Саду

У „чисто“ постројење се убрајају и она постројења у којима се врши третман појединачних и сродних рециклабилних материјала. Дијаграм тока једног постројења које третира само папир и картон је дат на слици 3.5. Издвојени отпад се допрема до прихватишта одакле се даље транспортује конвејером до сортирнице. У овом случају се ручним сортирањем производи пет фракција и остатак (шкарт). Сортиране фракције се на крају балирају и као такве одлажу након чега се, када се произведе довољан број бала, транспортују до постројења где се врши прерада ових сировина.



Слика 3.5. Дијаграмски ток постројења за третман папира и картона

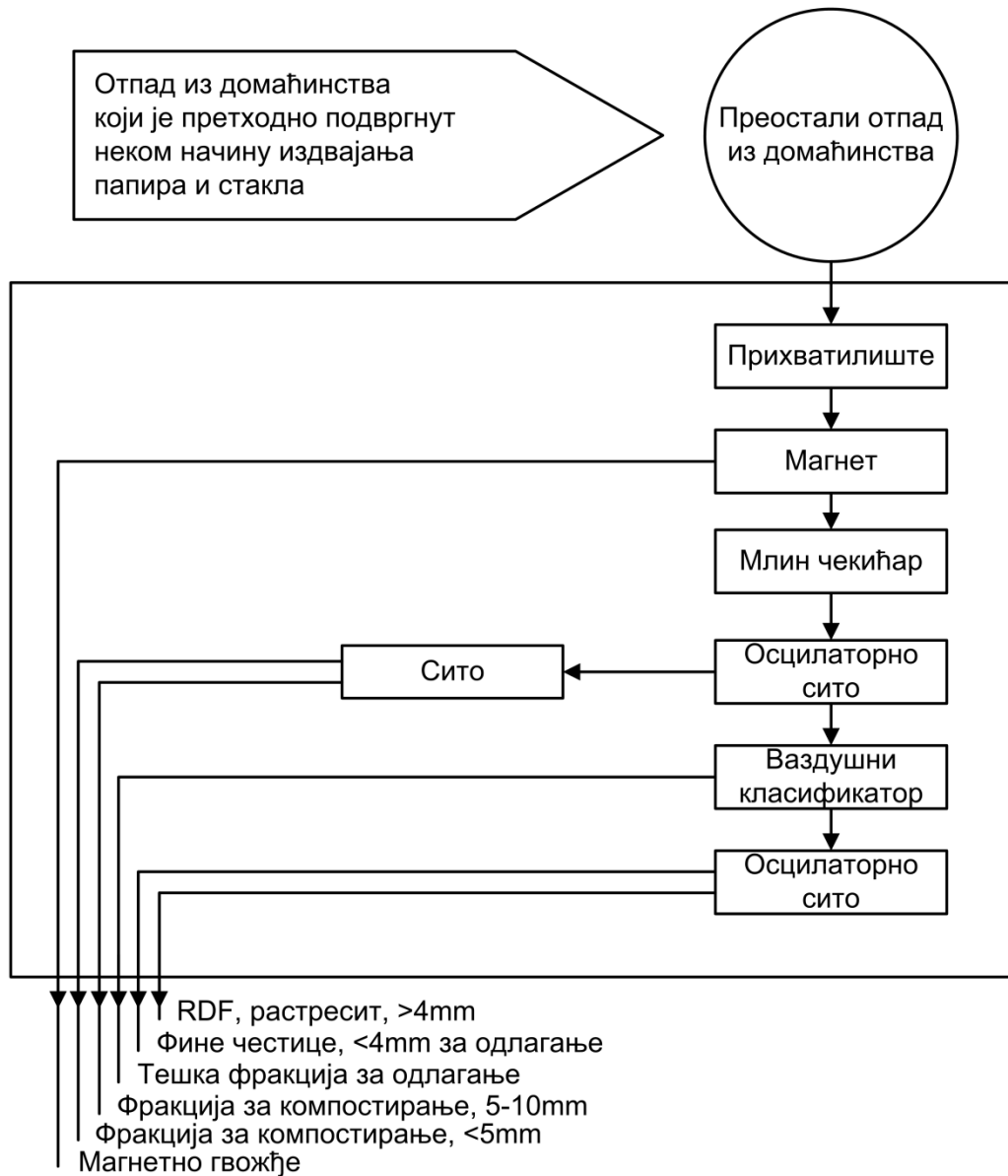
Слично претходном случају, у „чисто“ постројење могу бити допремљена само амбалажна паковања. На слици 3.6 је дат дијаграмски ток једног таквог постројења. Након прихвата, амбалажни отпад пролази најпре испод магнетног сепаратора где се издвајају челичне конзерве и друга амбалажа од магнетних метала. Ова фракција даље пролази кроз пресу где се врши компактирање издвојеног метала. Фракција која је остала испод магнета, долази до сита на чијој се површини издваја отпад већих диманзија. Преостали амбалажни отпад, који је прошао кроз сито, наставља свој пут до ваздушног класификатора. Као лакша фракција се на овај начин издваја пластика и евентуално алуминијумске лименке. Пластика се ручно сортира након чега настаје једна фракција отпадне пластике и 4 фракције које даље пролазе кроз гранулатор. Као гранулисана фракције се добијају провидни HDPE и PE, зелени PE и остала гранулисана пластика. Уколико се у лакшој фракцији, након ваздушног класификатора, појавио алуминијум, онда се он издваја и меша заједно са алуминијумом који је из теже фракције издвојен помоћу сепаратора вртложним струјама. Овако издвојени алуминијум се одводи до балирке и балира. Амбалажни отпад који се као тежа фракција, после сепарације вртложним струјама, задржао на конвејеру, углавном је од стакла. Након сортирања стакла, врши се његово ситњење у дробилици. Сортирање стакла се врши на основу боје, при чему се добијају 3 фракције: зелено, браон и провидно стакло. Приликом сортирања стакла, јавља се и једна фракција отпада коју чине углавном мале неорганске честице.



Слика 3.6. Дијаграмски ток постројења за амбалажни отпад

Супротно од претходна два случаја, на слици 3.7 је приказан дијаграмски ток отпада у постројењу које третира комунални отпад из кога је претходо издвојен папир и стакло. Самим тим што се третира комунални отпад, ово постројење спада у групу „прљавих“. Прва сепарација отпада у овом постројењу, након прихватишта, је магнетна. Овде је издвојена и прва фракција магнетних метала. Део отпада који је остао на конвејеру после магнетне сепарације се одводи до млина чекићара где се целокупан уситњава. Тако

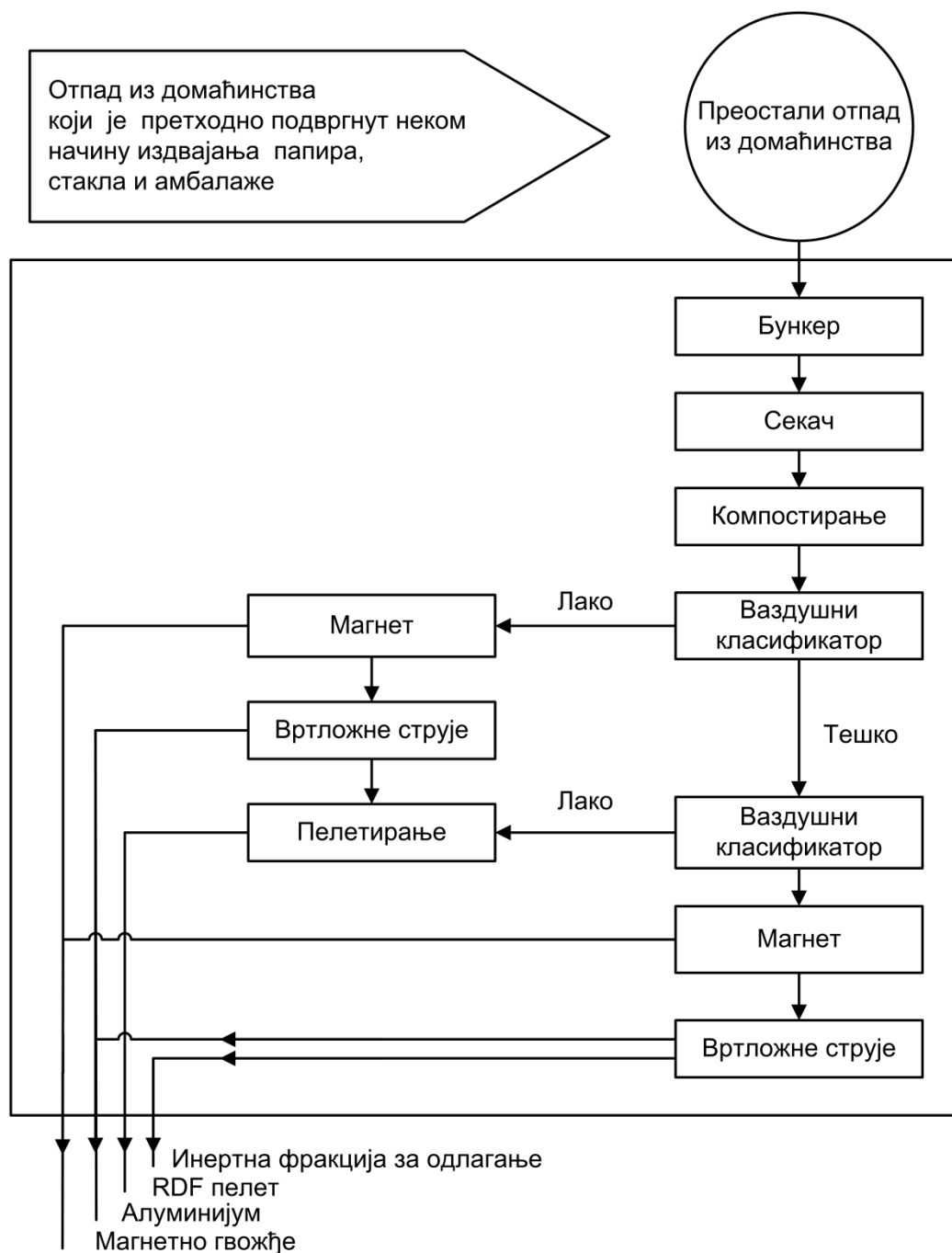
уситњен се даље допрема до осцилаторног сита после кога се отпад дели на два тока. Један ток се просејава помоћу сита како би се добиле крупнија и финија фракција за компостирање. Други ток се помоћу ваздушног класификатора дели на лакшу и тежу фракцију. Тежа фракција се депонује а лакша се предаје другом осцилаторном ситу. Одавде се ситнија фракција такође депонује док се крупнија користи за производњу горива.



Слика 3.7. Дијаграмски ток постројења за комунални отпад из кога су претходно издвојени папир и стакло

Још један пример „прљавог“ постројења, код кога су из комуналног отпада претходно издвојени папир, стакло и амбалажни отпад, је приказан на слици 3.8. Отпад из спремишта се помоћу секача уситњава и компостира након чега се прослеђује до ваздушног класификатора. Лакша фракција се подвргава магнетном и сепаратору вртложним струјама, након чега се као производи издвајају магнетно гвожђе и алуминијум. Преостали

део лаке фракције се пелетизира. Тежа фракција се након једног ваздушног класификатора прослеђује до другог. Лакша фракција од другог ваздушног класификатора се пелетизира а тежа наставља пут ка магнету. Након издвајања магнетних метала, на крају се врши издвајање алуминијума помоћу сепаратора вртложним струјама. Фракцију која је напустила сепаратор вртложним струјама, а која није алуминијум, чини инертни отпад који се депонује.



Слика 3.8. Дијаграмски ток постројења за комунални отпад из кога су претходно извојени папир, стакло и амбалажни отпад

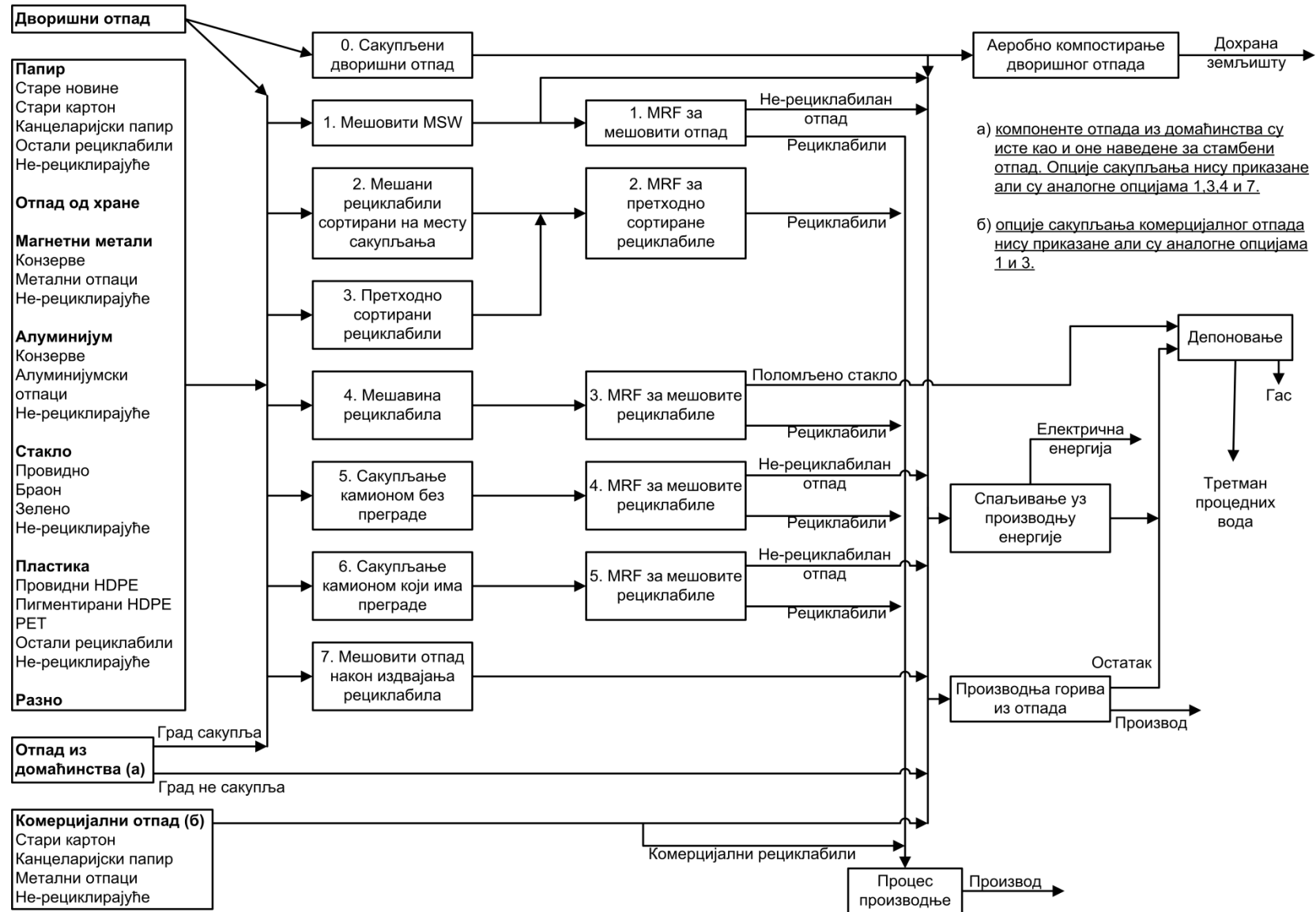
Сврха процесног модела постројења за секундарну сепарацију отпада (MRF- Materials Recovery Facility) је одређивање трошкова и параметара инвентара животног циклуса (LCI - life-cycle inventory) издвајања материјала из чврстог комуналног отпада.

Трошкови и LCI коефицијенти се рачунају као функција количине и састава третираног отпада и заснивају се на корисничком одабиру али и на подразумеваним информацијама везаним за пројектовање постројења. Ови коефицијенти се користе у моделирању алтернатива управљања чврстим комуналним отпадом кроз идентификацију оних сценарија који су повољнији према економском и еколошком критеријуму.

Целокупни систем управљања чврстим отпадом и улога постројења за третман отпада у таквом систему је илустрована сликом 3.9 [29]. Као што је приказано на слици 3.9, неколико различитих типова постројења је укључено у модел управљања отпадом, из разлога што су за различите начине сакупљања чврстог комуналног отпада потребни различити типови ових постројења. Различити типови постројења за третман отпада представљени у процесном моделу су описани у наредном одељку.

Систем управљања отпадом обухвата широк опсег разноврсних генератора отпада, попут кућа као једнопородичних објеката, зграда као вишепородичних објеката и комерцијалног сектора. У оваквом систему постоји више начина за сакупљање и издвајање рециклабилних материјала из наведених објеката. У складу са изабраном алтернативом за сакупљање отпада, издвајање рециклабилних материјала се може спровести помоћу 3 карактеристична типа MRF-а, и то су:

- 1) постројења за раздвајање мешаног (неразврстаног) комуналног отпада - Mixed waste MRF - mwMRF,
- 2) постројења за процесирање претходно издвојених (разврстаних) рециклабилних материјала - Presorted recyclables MRF - prMRF (сакупљени кроз процес примарне сепарације - раздвајање отпада на извору настанка),
- 3) постројења у којима се врши допремање измешаних рециклабила и мешавине отпада смештених у истом возилу - Co-collection MRF - ccMRF (рециклабили су сакупљени у џаковима једне боје а остали отпад у џаковима друге боје; папирнати и непапирни рециклабили су сакупљени засебно у џаковима исте боје). Овакво постројење представља комбинацију претходна два.



Слика 3.9. Алтернативе за интегрисано управљање чврстим отпадом

4 Математички модел за прорачун јединичких трошкова постројења за раздвајање отпада

4.1 Постројење за раздвајање мешаног (неразврстаног) комуналног отпада - mwMRF

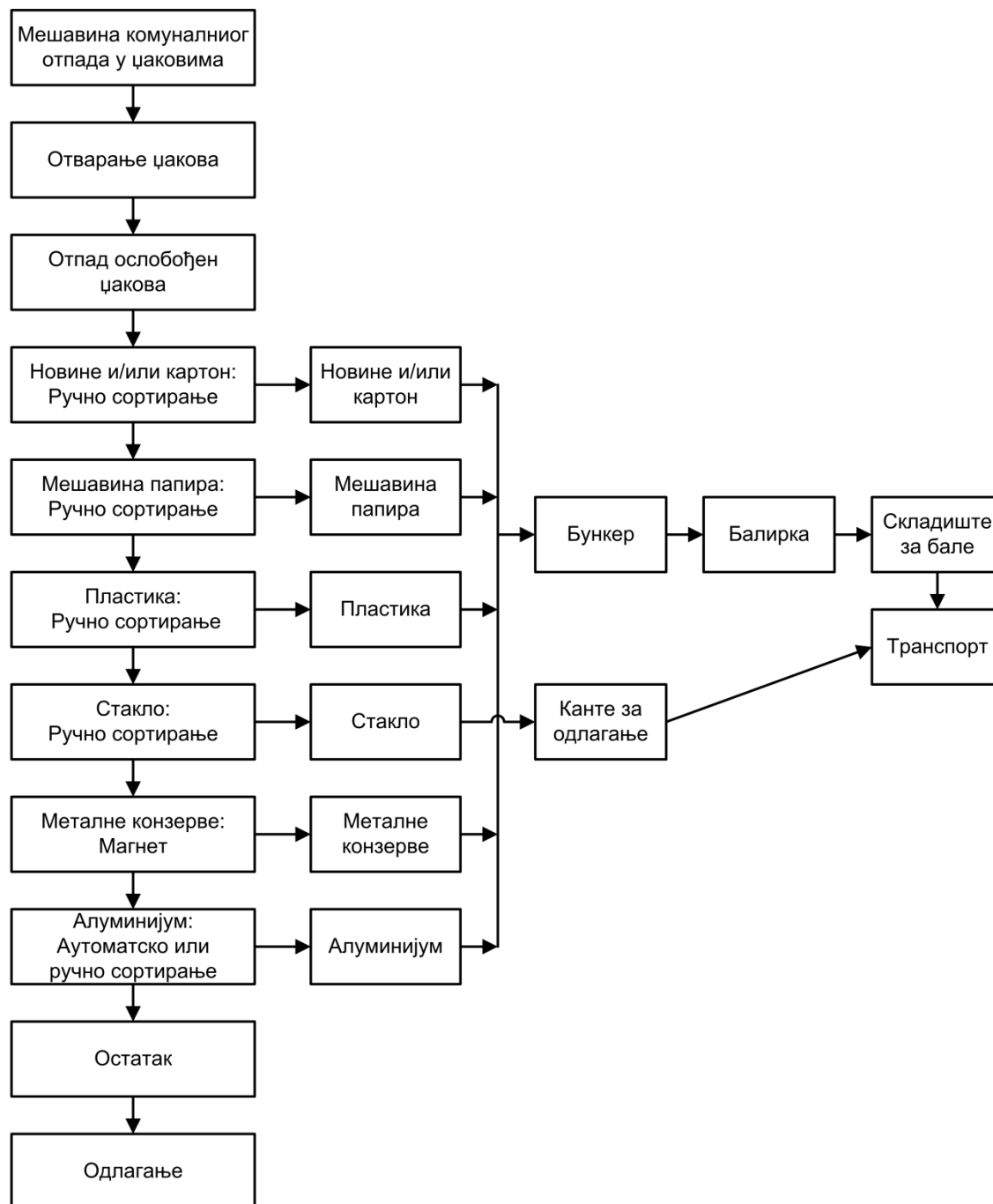
Циљ овог одељка је пројектовање постројењаа у којем се рециклабилни материјали издвајају из мешавине чврстог комуналног отпада. На основу пројекта, изведена је трошкова функција која повезује трошкове постројења са количином и саставом компоненти отпада које се у њему процесирају.

4.1.1 Опис процесног тока

Постројења за раздвајање мешаног (неразврстаног) комуналног отпада - Mixed waste MRF – wmMRF, примењује се на кућни (стамбени) и комерцијални мешовити отпад. Дијаграм тока, који описује процес издвајања у овом типу постројења, приказан је на слици 4.1. Мешавина отпада се обично сакупља са ивичњака улица и истовара на подну платформу унутар постројења. Затим се отпад са платформе, помоћу утоваривача са фронталном кашиком, пребацује на конвејер (транспортну траку). Конвејером се отпад транспортује до дела постројења где се врши отварање цакова, пошто се претпоставља да је већина отпада сакупљено у цаковима. Нежељене компоненте отпада (попут електричних апарата, гломазних предмета, итд.) се уклањају из тока отпада, на местима пре и после отварања цакова. Цакови се могу отворити, у зависности од опције постројења, или ручно или механичким путем. Развој у технологији отварања цакова доводи до тога да је механичко отварање технички изводљивији и економски прихватљивији избор. Отпад ослобођен цакова се даље транспортује до издигнуте и затворене просторије где се врши ручно издвајање рециклабилних материјала. Затворена просторија за сортирање (сортирница) се користи из разлога што радници треба да бораве у климатизованој просторији током операције издвајања отпада. Издизање сортирнице омогућава постављање бункера (или одговарајућих посуда) испод просторије, у које се убацују издвојени рециклабилни материјали. Компоненте отпада које се могу издвојити из мешаног комуналног отпада су дате у табели 4.1.

У просторији за сортирање, радници који издвајају рециклабиле из отпада се налазе са обе стране конвејера. Овакав распоред запослених који раде за конвејером омогућава примену компактне просторије за сортирање чиме се смањује потребна корисна површина постројења. Растојање између два суседна радника износи око 1,2 метра и сасвим је довољнотако да радници не могу у исто време да дохвате исти предмет. Слично томе, ширина покретне траке је такође 1,2 m, како би се смањило умарање запослених приликом дохватања предмета који се издвајају са траке, али и због смањења расипања предмета са конвејера. Рециклабилни материјали, који се са конвејера издвајају из мешовитог отпада, одлажу се у бункере који се налазе испод сортирнице. Када се неки бункер напуни рециклабилном, он се празни и помоћу конвејера се материјал убацује у балирку. За рециклажно стакло се не користе бункери. Стаклени рециклабили се не ломе и одлажу се у канте које се празне у камион када се напуне. Утовар бала у камионе се врши са платоа

који је за то предвиђен. Привремени простор за складиштење бала треба да буде довољно велик, тако да се може одложити број бала који је потребан да се напуни пун камион.



Слика 4.1. Дијаграм процесног тока постројења за раздвајање мешаног комуналног отпада

Старе новине, стари картон и остали папир друге категорије се могу издвајати из мешовитог отпада као појединачне компоненте. Због присуства мањих количина осталих компоненти папира, које су углавном влажне и запрљане, оне се могу издвајати као мешовити папир.

Табела 4.1. Компоненте отпада које могу бити издвојене путем MRF-а за мешовити отпад

Компонента отпада	
	Папир
Старе новине	
Стари картон	
Канцеларијски папир	
Телефонски именици	
Књиге	
Стари магазини	
Поштанске коверте	
Остали папир	
Мешавина папира	
	Пластика
HDPE - провидни	
HDPE - пигментирани	
PET	
Остала пластика	
Мешавина пластике	
	Метал
Металне конзерве	
Остали метал	
Алуминијумске конзерве	
Остали алуминијум	
	Стакло
Стакло - провидно	
Стакло - браон	
Стакло - зелено	
Мешавина стакла	

Металне конзерве остају са остатком отпада на конвејеру све до краја сортирнице. Тамо, на крају свих сортирних линија, постављени су попречни конвејери опремљени магнетом за издвајање магнетних метала, као и уређаји са системом вртложних струја за издвајање немагнетних метала. Издвајање алуминијумских лименки може бити ручно или аутоматско. За аутоматско издвајање алуминијумских лименки се користити систем са вртложним струјама. Избор процеса издвајања алуминијума је опција коју бира корисник. Препоручује се одабир ручне опције из разлога што су у мешовитом чврстом комуналном отпаду алуминијумске лименке помешане са осталим отпадом због чега се вртложним струјама могу поред лименки издвојити и контаминанти.

Као и код било ког другог индустријског процеса, договорена цена рециклабила се заснива на одређеном захтеваном квалитету, а контрола квалитета рециклабила је веома важна ставка у сваком постројењу. Контрола квалитета се често врши путем секундарног сортирања у свакој области складиштења. Секундарно сортирање рециклабила може бити извршено на почетку или на крају радног дана. Корисник може дефинисати потребно време за уклањање контаминаната из издвојених рециклабила. Секундарно сортирање се помиње у одељку који се односи на дужину радног дана. Тада се конвејери, након секундарне сепарације, могу користити за директан транспорт рециклабила до балирке.

Након издвајања, рециклабили се балирају и одлажу. Остатак отпада, према предлогу руководства, може бити отпремљен у спалионицу или на депонију. Трошкови транспорта и депоновања остатка отпада нису укључени у цену постројења. Трошкови транспорта остатка отпада до одлагалишта се израчунавају у моделу процеса транспорта.

4.1.2 Одређивање функције трошкова постројења за раздвајање мешаног отпада

Годишњи трошкови постројења за раздвајање мешаног отпада имају две компоненте:

- капитални трошак амотризован током животног века постројења и
- годишњи оперативни трошкови.

Капитални трошак постројења се рачуна на основу јединичне капиталне цене изражене у еврима по тони годишње процесираниог отпада. Поред тога, овај трошак се може изразити у годишњем термину употребом фактора повраћаја капитала који зависи од ангажованог животног века постројења и дисконтне стопе. Обе ове вредности су улазни параметри за које су доступни подразумевани подаци. Трошкови управљања и одржавања (UIO) постројења укључују трошкове рада, режије, порезе, администрацију, осигурање, индиректне трошкове, трошкове електричне енергије и трошкове одржавања. Оно што ови трошкови не укључују су трошкови за одлагање остатка отпада, али не узимају у обзир ни приходе добијене продајом рециклабила. Коефицијент трошкова управљања и одржавања зависи од јединичне цене UIO и количине процесираниог отпада. Годишњи трошкови постројења се исказују следећом једначином:

$$GTMRF = CRF \cdot KT + GOT \quad (4.1.1)$$

где су:

GTMRF – годишњи трошкови постројења, [€/t],

CRF – фактор повраћаја капитала, [god⁻¹],

KT – капитални трошкови, [€·god/t],

GOT – годишњи оперативни трошкови, [€/t].

CRF представља фактор повраћаја капитала који омогућава конверзију капиталних трошкова у облик исказан на годишњем нивоу. То је функција постројења или животног века опреме (n), и одговарајуће дисконтне стопе (i). За случај да је вредност дисконтне стопе различита од нуле ($i \neq 0$), CRF се рачуна по једначини 4.1.2:

$$CRF = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (4.1.2)$$

Што се тиче капиталних трошкова из израза 4.1.1, они представљају годишње трошкове по тони процесираниог материјала у постројењу. За конверзију капиталних трошкова у дневне трошкове по тони процесираниог материјала, користи се следећа једначина:

$$\frac{€}{t/god} = \frac{€ \cdot dan}{t} \cdot \frac{god}{dan} \quad (4.1.3)$$

где [dan] представља број радних дана у постројењу током године.

4.1.3 Капитални трошак (КТ)

Капитални трошак чине трошкови изградње (TIZ), земљишта (TZ), инжењеринга (TIN) и опреме (TO) као што је приказано следећим изразом:

$$KT_i = TIZ_i + TZ_i + TIN_i + TO_i \quad (4.1.4)$$

где су трошкови представљени по тони i -те компоненте отпада.

4.1.3.1 Трошкови изградње (TIZ)

Трошкови изградње укључују грађевинске трошкове, трошкове приступних саобраћајница, трошкове изградње оgrade, трошкове уређења простора, итд. У грађевинске трошкове спадају и помоћни објекти попут канцеларија, станице за мерење масе отпада и конвејера за транспорт отпада. Дужина конвејера се простира од места где се врши отварање џакова све до станице за сортирање и на крају до балирке. Укупна дужина конвејера унутар сортирнице је детаљније размотрена у наставку овог поглавља.

Трошкови изградње се рачунају множењем површине основе постројења (PMRF) са јединичном ценом трошкова изградње (STI) [€/m²]. За цену трошкова изградње се узимају стандардне вредности, према ЕРА приручнику [1], STI за ова постројења се креће у границама од 240 до 520 €/m². У прорачунима који следе усвојена је вредност од 350 €/m², а према анализама Nishtala (1997), утврђено је да за постројења која обрађују 50 до 350 тона отпада дневно, нема значајне промене у вредности STI. У трошкове изградње спадају и трошкови канцеларијске опреме. Трошкови изградње се рачунају на основу следећег израза:

$$TIZ_i = PMRF_i \cdot STI \quad (4.1.5)$$

где су:

TIZ_i – трошкови изградње MRF-а за i -ту компоненту отпада, [€/t/dan],

$PMRF_i$ – површина основе постројења за i -ту компоненту отпада, [m²/t/dan], (израз 4.1.6),

STI – стопа трошкова изградње (типична вредност је 350 €/m²).

Површина основе грађевинских објеката постројења (PMRF)

Површина основе грађевинских објеката постројења је функција дневне количине процесираниог отпада, а самим тим и функција количине издвојених рециклабила. Површина основе се састоји од површине на које се врши истовар отпада (PI), површине за процесирање отпада (PP), површине намењене канцеларијском простору (PK) и површине складишног простора (PSP). Прорачун свих ових површина укључује фактор маневрисања (FM) који омогућава приступ возилима и машинама, као и њиховом одржавању. Површина основе се одређује према следећем изразу:

$$PMRF_i = PI_i + PP_i + PK_i + PSP_i \quad (4.1.6)$$

Као што се може видети из релације (4.1.6), површина основе постројења је изражена према i -тој компоненти отпада.

Површина на коју се врши истовар отпада (PI)

Истовар мешавине отпада се из возила за сакупљање врши на за то предвиђену платформу. Ова платформа за истовар отпада треба да буде довољно велика како би могла да смести количину отпада, за време шпица, коју истовари више камиона истовремено. Постојање истоварне платформе омогућава смањење радног времена опреме укључујући и процену величине потребног складишног простора. Треба напоменути да мешовити отпад не треба да буде складиштен више од једног дана због потенцијалних проблема везаних за здравље, као и због непријатних мириса. Потребна површина истоварне платформе се одређује узимајући у обзир средњу вредност густине, као и висине нагомиланог отпада. За рачунање потребне површине платформе за истовар отпада се користи израз:

$$PI_i = \frac{FM1 \cdot ZS \cdot 1000}{n1 \cdot VO} \quad (4.1.7)$$

Ознаке у релацији (4.1.7) имају следеће значење:

PI_i – површина на коју се врши истовар отпада, $[m^2/t/dan]$,

$FM1$ – фактор маневрисања истоварне платформе (препоручена вредност је 2.5[30]),

ZS – захтевани складишни простор који омогућава смањење радног времена опреме (типична вредност је 0.5 дана),

$n1$ – густина отпада на истоварној платформи у растреситом стању (типична вредност је 200 kg/m^3),

VO – висина ринфузног отпада на истоварној платформи (типична вредност је 3 m,[30]).

Фактор 1000 у бројиоцу израза (4.1.7) се користи за конверзију јединица масе из тоне у килограм како би и лева и десна страна датог израза имале исту мерну јединицу.

Површина за процесирање отпада (PP)

Површина за процесирање отпада се користи за операције издвајања и балирања. Састоји се од површине просторије за сортирање (PPS), захтеване површине за балирке (PB) и површине за утовар преосталог, несортираног отпада (PUO). Површина за процесирање отпада се одређује на основу израза:

$$PP_i = PPS_i + 2 \cdot PB_i + PUO_i = (n3 \cdot DKS_i) + (FM2 \cdot f1) + f2 \quad (4.1.8)$$

где су:

PP_i – потребна површина за процесирање тоне i -те компоненте отпада, $[m^2/t/dan]$,

PPS_i – површина сортирнице по тони i -те компоненте отпада, $[m^2/t/dan]$,

$2 \cdot PB_i$ – површина за две балирке по тони i -те компоненте отпада, $[m^2/t/dan]$,

PUO_i – површина за утовар отпада по тони i -те компоненте отпада, $[m^2/t/dan]$,

$n3$ – ширина сортирнице, (типична вредност је 8.6m (за 3 конвејера)),

DKS_i – дужина конвејера у сортирници за издвајање i -тог рециклабила, $[m/t/dan]$,

$FM2$ – фактор маневрисања површине за процесирање, (типична вредност је 2.5, [30]),

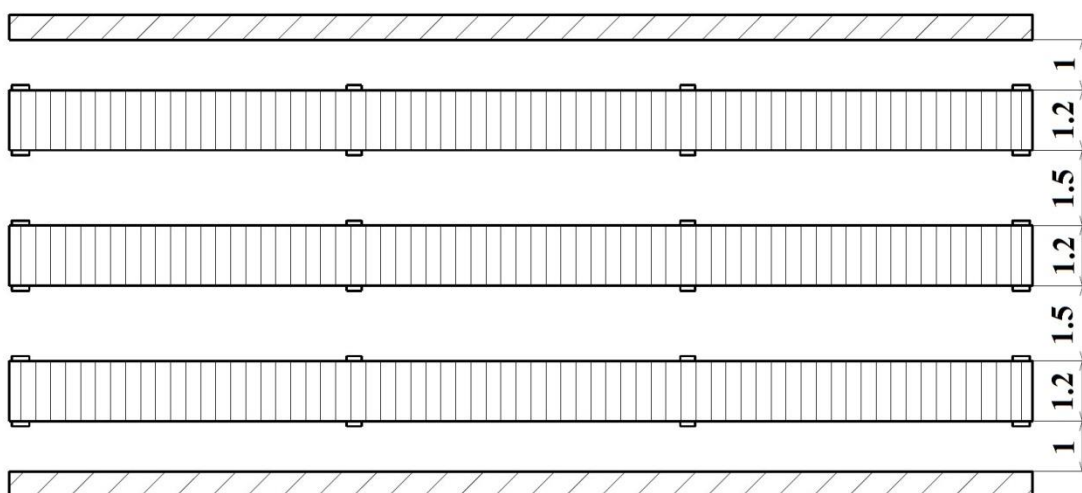
$f1$ – фактор за израчунавање потребне површине за балирке, (подразумевана вредност је $0.75 \text{ m}^2/t/dan$),

$f2$ – фактор за израчунавање потребне површине за отварање џакова, (подразумеване вредности су $1.8 [m^2/t/dan]$ за механичко и $1.4 [m^2/t/dan]$ за ручно отварање џакова).

Приликом одређивања површине за процесирање, не узима се у обзир површина потребна за магнет и сепаратор вртложним струјама. Претпоставља се да су ове површине мале у односу на остатак површине за процесирање, па се стога могу занемарити.

Сортирница

Сортирница, у којој се врши ручно издвајање рециклабилних материјала, затвореног је типа како би могла да се климатизује и налази се на 3,5 m изнад нивоа земље. Дужина сортирнице је једнака дужини конвејера за сортирање који се налази унутар ње. Ширина сортирнице одговара смештају три конвејера чије су ширине по 1,2 m и простора потребног за несметан рад радника који се налазе поред тих конвејера (препоруче: 1 m растојање траке од зида; 1,5 m растојање између трака као на слици 4.2). Радници су распоређени на растојању од 1,2 метра дуж једне стране траке, у распореду приказаном на слици 2.32. Отуда 1,2 метра траке је потребно за позиционирање 2 радника.



Слика 4.2. Шема сортирнице са три конвејера

Дужина конвејера зависи од састава и количине рециклабилних материјала који се издвајају у постројењу, и рачунају се према следећој једначини:

$$DKS_i = \frac{nR_i \cdot 1.2 \cdot FV}{2} \quad (4.1.9)$$

У претходној једначини фигуришу следеће ознаке:

DKS_i – дужина конвејера у сортирници за издвајање i -тог рециклабила, [m/t/dan],

nR_i – број радника за издвајање i -тог рециклабила, [radnik/t/dan],

1.2 – потребна дужина конвејера по раднику, [m/radnik],

FV – додатна дужина конвејера (подразумевана вредност је 1.5 [29]),

Фактор 2 у имениоцу израза (4.1.9) последица је чињенице да су радници лоцирани са обе стране конвејера. Дужина конвејера се множи са фактором додатка FV . Ова додатна дужина се дели између конвејера на једнаке вредности. Намењена је за омогућавање унакрсног повезивања конвејера и оперативне флексибилности попут додавања нових рециклабила на листу материјала за издвајање.

За одређену брзину конвејера, ширину конвејера, висину слоја и густину отпада на конвејеру, одређује се максимални капацитет који конвејер може да издржи. Уколико се ова максимална вредност прекорачи, онда се у сортирници додаје још један конвејер. У пројектовању овог постројења, претпостављена брзина конвејера у сортирници је 9 m/min, ширина конвејера је 1,2 m, висина слоја отпада на конвејеру је 0,15 m а за густину отпада на конвејеру је узета вредност од 150 kg/m³. Употребом ових података и уз претпоставку да се дневно ефективно ради 7 сати, капацитет конвејера (КК) се може одредити на следећи начин:

$$KK = 0.15[t/m^3] \cdot 1.2[m] \cdot 0.15[m] \cdot 9[m/min] \cdot 60[min/h] \cdot 7[h/dan] \approx 100 \text{ t/dan} \quad (4.1.10)$$

Да би се добила ширина сортирнице, коришћена је стопа генерисања отпада од 1 kg отпада по особи дневно, као и претпоставка да се сав генерисани отпад процесира 5 дана у недељи. Маса процесираног мешовитог отпада од 100 t/dan (500 тона у току радне недеље) би одговарала величини града који има око 70.000 становника, при чему би у току једне недеље било генерирано нешто мање од 500 тона отпада (7 дана x 70 t/dan). Према томе, за градове са бројем становника од око 200.000, адекватна ширина сортирнице би била 8,6 m (за 3 конвејера).

Ако се очекује да се у постројењу дневно процесира више од 300 тона отпада, потребно је у складу са тим повећати ширину сортирнице. Препорука је да се за сваки додатни конвејер ширина сортирнице повећа за 2,7 m.

Брзина издвајања рециклабила

Брзина издвајања (BI) је дефинисана као маса рециклабила (у тонама) која је издвојена од стране радника за један сат. Математичким моделом је предвиђено да за сваки од рециклабила буде унапред дефинисана брзина издвајања. Ови подаци директно утичу на трошкове издвајања рециклабила, а препоручене вредности су дате у табели 4.2.

Табела 4.2. Брзина издвајања (BI) рециклабила у постројењу за мешовити отпад

Компоненте отпада	Брзина издвајања [t/h]
Старе новине	0,250
Стари картон	0,250
Канцеларијски папир	0,250
Телефонски именици	0,250
Књиге	0,250
Стари магацини	0,250
Поштанске коверте	0,250
Остали папир	0,250
Мешавина папира	0,500
HDPE - провидни	0,025
HDPE - пигментирани	0,040
PET	0,025
Остала пластика	0,025
Мешавина пластике	0,025
Металне конзерве	Магнет
Остали метал	Магнет

Алуминијумске конзерве	0,010
Остали алуминијум	0,010
Стакло - провидно	0,150
Стакло - браон	0,100
Стакло - зелено	0,025
Мешавина стакла	0,025

Дужина радног дана

Постројења за издвајање рециклабила обично раде са једном сменом радника док радно време те смене може да варира. Дужина ефективног радног времена се користи за прорачун времена које радник потроши за издвајање рециклабила са конвејера. Ако су неопходне две смене, вредност дужине радног дана (DRD) се може повећати. Ефективна дужина радног дана се одређује на основу следећег израза:

$$DRDe = DRD - PAUZA - VNS \quad (4.1.11)$$

при чему су:

DRDe – ефективна дужина радног дана, [h/dan],

DRD – дужина радног времена (типична вредност је 8h),

PAUZA – време када је конвејер привремено заустављен да се обезбеди одмор запосленима (типична вредност је 0.5 h/dan),

VNS – време потребно за накнадно сортирање и издвајање контаминаната из већ извојених рециклабила (типична вредност је 0.5 h/dan).

Време за секундарно сортирање се употребљава када је потребно осигурати квалитет извојених рециклабилних материјала након иницијалног сортирања. Пауза је обично одређена за одмор радника и за то време су конвејери заустављени. Податак који се уноси, треба да укључује и сва она времена када се не врши издвајање рециклабила. Слично томе, део времена се одузима када конвејер може бити заустављен приликом операције утовара отпада на конвејер. Подразумеване вредности за дужину радног времена DRD, паузе и заустављања, накнадно сортирање, важе за једну радну смену.

Број радника

Број радника потребних за издвајање једне тоне рециклабила се одређује на основу једначине 4.1.12. За прорачун броја потребних радника који врше издвајање рециклабила са конвејер акористи се брзина издвајања (BI).

$$nR_i = \frac{EI_i}{BI_i \cdot DRDe} \quad (4.1.12)$$

Ознаке које фигуришу у претходном изразу имају следеће значење:

nR_i – број радника за издвајање i -тог рециклабила, [radnik/t/dan],

EI_i – ефикасност издвајања i -тог рециклабила (препоручена вредност, табела 3),

BI_i – брзина издвајања i -тог рециклабила (препоручена вредност, табела 2),

DRDe – ефективна дужина радног дана (типична вредност је 7 h/dan).

При прорачуну потребног броја радника за једно постројење, претпоставља се да је могућа и употреба парцијалног броја радника. Ово се оправдава тиме што у току смене, радници који су одређени за издвајање одређеног рециклабила могу бити флексибилни када не раде максималним капацитетом, тако што помажу другим радницима. Такође се претпоставља да је могуће, у складу са потребом за привременим пословима, ангажовање радника са непотпуним радним временом.

За издвајање металних конзерви нису предвиђени радници у сортирници из разлога што се издвајање врши помоћу магнета постављеног на крају конвејера. У зависности од модалитета постројења, алуминијумске лименке се могу издвајати ручно или механички помоћу сепаратора вртложним струјама. Ако је предвиђена опција са ручним издвајањем алуминијумских лименки, тада nR укључује и потребан број радника за ту врсту посла.

Површина за балирке (PB)

Потребна површина за балирке је одређена другим чланом израза (4.1.8). Фактор f1 представља везу између капацитета постројења и потребне површине за балирке. Препоручена вредност од 0,75 m²/t/dan [29].

Површина за утовар отпада (PUO)

Потребна површина за утовар отпада се добија множењем укупне масе процесираног отпада са фактором f2 из израза (4.1.8). Подразумеване вредности за овај фактор су 1,8 и 1,4 m²/t/dan за механичко, односно за ручно отварање џакова, респективно [29].

Модел за издвајање рециклабила

Ефикасност издвајања (EI) рециклабила је дефинисана као максимална вредност масе одређеног рециклабила која може бити издвојена са конвејера подељена са масом тог рециклабила која уђе у постројење. Претпоставља се да се не врши издвајање поломљеног стакла. Стога, у ефикасност издвајања стаклених рециклабила је укључено поломљено стакло. Рециклабилни материјали који нису издвојени, заједно са свим осталим нерациклабилима, одбацују се као остаци. (KIR) је количина рециклабила која је издвојена у постројењу. Типичне вредности ефикасности издвајања различитих материјала у постројењима за мешовити отпад су приказане у табели 4.3 [29].

Табела 4.3. Ефикасности издвајања материјала у постројењу за мешовити отпад

Материјал	Ефикасност издвајања [%]
Старе новине	30
Стари картон	30
Канцеларијски папир	30
Телефонски именици	30
Књиге	30
Стари магацини	30
Поштанске коверте	30
Остали папир	30
Мешавина папира	30
HDPE - провидни	30

HDPE - пигментирани	30
PET	30
Остала пластика	30
Мешавина пластике	30
Металне конзерве	Издавање магнетом
Остали метал	30
Алуминијумске конзерве	30
Остали алуминијум	30
Стакло - провидно	30
Стакло - браон	30
Стакло - зелено	30
Мешавина стакла	30

Ако се у изразима (4.1.13) користи знак једнакости (уместо знака мање или једнако), онда ће сви рециклабили који су послати у ово постројење бити максимално издвојени. Са друге стране, знак неједнакости дефинише издавање количине рециклабила која је мања од максимално могуће. На пример, ако је тржишна цена зеленог стакла знатно мања од цене браон стакла, онда ће се тежити издавању веће количине браон стакла. Знак једнакости у једначини (4.1.13) би омогућио максимално издавање и зеленог и браон стакла, без обзира на њихову тржишну вредност. Према томе, знак неједнакости је неопходан због тога што је један од циљева модела управљања отпадом издавање само оних рециклабила који омогућују најмање могуће трошкове (када је трошак задата функција). У једначини (4.1.13), због тога што је ефикасност сортирања рециклабила фиксна вредност, знак неједнакости може резултирати решењем најмањих трошкова (за целокупни систем управљања отпадом) који предлаже издавање само једног масеног удела одређеног рециклабила процесираним у току једног дана. На пример, ако је предложени удео 0,5 за алуминијумске лименке, онда ће радници морати да издвоје сваку другу лименку, што никако није практично. Ово може бити решено само усмеравањем 50% комуналног отпада кроз постројење за мешовити отпад, или тако што ће се алуминијумске лименке издавати сваки други дан.

Дакле, маса издвојених нестаклених рециклабилних материјала је дата следећим изразом:

$$\begin{aligned} UMI_r &\leq MNS + MS \\ UMI_r &= \sum_i MIR_i \\ MIR_i &\leq EI_i \cdot UMI_i \end{aligned} \quad (4.1.13)$$

Ознаке у претходном изразу имају следеће значење:

UMI_r – укупна маса свих издвојених рециклабила, [t],

MNS – укупна маса свих нестаклених рециклабила који се балирају, [t],

MS – маса издвојених стаклених рециклабила, [t],

$\sum_i$ – сума свих рециклабила који се налазе у мешовитом отпаду,

MIR_i – маса i -тог издвојеног рециклабила, [t],

EI_i – ефикасност издавања i -тог рециклабила (препоручена вредност, табела 4.3),

UMI_i – маса i -тог рециклабила која уђе у постројење [t].

Површина канцеларијског простора (PK)

Канцеларијски простор постројења обухвата радне канцеларије, сале за састанке, простор предвиђен за одмор радника, просторије за пресвлачење и тоалете. Површина канцеларије, сведена на тону процесираног материјала дневно, одређује се према следећем изразу:

$$PK_i = n_4 \quad (4.1.14)$$

где су:

PK_i – површина канцеларијског простора по тони процесираног материјала на дневном нивоу [$m^2/t/dan$],

n_4 – фактор површине канцеларије (типична вредност је 1 [$m^2/t/dan$])[29].

Површина складишног простора (PSP)

Складишни простор је потребан за смештај балираних рециклабила. Површина складишног простора за балиране рециклабиле представља потребну површину на коју могу да се одложе све бале које се направе у току једног дана. Површина основе сваке бале је вредност која се дефинише према конкретної ситуацији, а типична вредност је 2 m^2 . Претпоставка је да се по 3 бале пакују у висину, једна на другу. Површина складишног простора по тони издвојених, балираних рециклабила на дневном нивоу, рачуна се помоћу следећег изрази:

$$PSP_i = \frac{FM2 \cdot POB \cdot EI_i \cdot BRD}{3 \cdot MB_i} \quad (4.1.15)$$

Ознаке из претходног изрази имају следећа значења:

PSP_i – површина складишног простора за бале i -тог рециклабила, [$m^2/t/dan$]

$FM2$ – фактор маневрисања складишног простора, (типична вредност је 2.5[29]),

POB – површина коју заузима једна бала, (типична вредност је 2 m^2),

EI_i – ефикасност издвајања i -тог рециклабила (препоручена вредност, табела 4.3),

BRD – број дана за које се врши складиштење бала (типична вредност је 1 дан [29]),

3 – претпоставка је да се 3 бале пакују по висини, једна на другу,

MB_i – маса бале од нестакленог рециклабила (типична вредност је 0.4 [t]).

Изразом (4.1.15) завршен је део прорачуна који се односи на одређивање површине грађевинских објеката постројења.

Трошкови земљишта (TZ)

Укупна површина постројења обухвата површине грађевинских објеката, приступних путева, ограду, станицу за мерење, уређене површине итд. Трошкови куповине земљишта сведених на тону процесираног материјала, могу се представити следећим изразом:

$$TZ_i = PMRF \cdot FAK \cdot CZ \quad (4.1.16)$$

где су:

TZ_i – трошкови куповине земљишта по тони i -те компоненте процесираног материјала, [$€/t/dan$],

$PMRF$ – површина грађевинских објеката постројења из изрази 4.1.6, [$m^2/t/dan$],

FAK – фактор скалирања за укупну површину постројења (препоручена вредност је 4 m² укупне површине по m² површине грађевинских објеката),
 CZ – цена земљишта (типична вредност је 10-20 €/m²).

4.1.3.3 Трошкови инжењеринга (TIN)

Инжењерски трошкови се састоје од трошкова консалтинга и техничких услуга за планирање и изградњу постројења. Инжењерски трошкови се сматрају делом трошкова за изградњу и изражавају се следећим изразом:

$$TIN_i = FIT \cdot TIZ_i \quad (4.1.17)$$

где су:

TIN_i – трошкови инжењерских услуга по тони процесираниог материјала дневно, [€/t/dan],

FIT – фактор инжењерских трошкова (типична вредност је 30% [30]).

TIZ_i – трошкови изградње постројења по тони процесираниог материјала дневно, [€/t/dan].

4.1.3.4 Трошкови опреме (TO)

Трошкови опреме се састоје од капиталних трошкова опреме (KTO) и њихове инсталације. Трошкови опреме, по тони процесираниог материјала, одређују се следећим изразом:

$$TO_i = KTO_i + TIO_i \quad (4.1.18)$$

Трошкови инсталације опреме (TIO) се најчешће одређују као проценат капиталних трошкова (типично 10%):

$$TIO_i = 0,1 \cdot KTO_i \quad (4.1.19)$$

У претходним изразима:

TIO_i – трошкови инсталације опреме по тони *i*-тог материјала на дан, [€/t/dan],

KTO_i – капитални трошкови опреме по тони *i*-тог материјала на дан, [€/t/dan].

Капитални трошкови опреме (KTO)

Трошкови магнета се укључују само у случају када се издвајају гвоздени рециклабили. Трошкови сепаратора вртложним струјама се, такође, укључује у трошкове опреме, само у случају када је за избор модела одабрано механичко издвајање алуминијума и алуминијумских лименки. Трошкови магнета и сепаратора вртложним струјама укључују сву осталу опрему потребну за њихов рад, као што је транспортна опрема, итд. Трошкови опреме не укључују трошкове приколица за транспорт издвојених рециклабила. Претпоставља се да је купац рециклабилних материјала тај који обезбеђује транспорт из постројења. Капитални трошкови опреме по тони процесираниог *i*-тог материјала на дан се одређују помоћу следећег израза:

$$KTO_i = TK_i + TBU_i + TKO_i + TKS_i + TMA_i + TSVS_i + TVP_i + TBA_i + TOV_i \quad (4.1.20)$$

Трошкови конвејера (ТК)

Јединични трошак конвејера представља средњу вредност трошкова утоварног, унакрсног и сортирног конвејера. Трошкови конвејера се одређују према изразу:

$$TK_i = DKS_i \cdot CK \quad (4.1.21)$$

где су:

TK_i – трошкови конвејера по тони i -тог материјала, [€/t/dan],

DKS_i – дужина конвејера у сортирници за издвајање i -тог рециклабила, [m/t/dan] (израз 4.1.9),

CK – цена конвејера (типична вредност је 3.500 € по метру дужине, [30]).

Трошкови бункера (ТБУ)

Бункери се налазе испод просторије за сортирање и служе за одлагање издвојених рециклабилних материјала. Претпоставља се да је број бункера пропорционалан броју радника. Трошкови једног бункера укључују трошкове покретног пода који је потребан за његово функционисање. Трошкови бункера по тони процесираног материјала на дан се рачунају помоћу следећег израза:

$$TBU_i = \frac{CBU \cdot nR_i}{2} \quad (4.1.22)$$

где су:

TBU_i – трошкови бункера за i -ти материјал, [€/t/dan],

CBU – цена бункера (препоручена вредност је 20.000 € за бункере са покретним подом, односно 2.000 € без покретног пода),

nR_i – број радника за i -ти материјал, [radnik/t/dan],

(Примедба за вредност 2 у имениоцу – један бункер долази на свака два радника).

Трошкови канти за одлагање (ТКО)

Посуде (канте) су потребне за одлагање стаклених рециклабила након чега се, када се напуне, празне у транспортну приколицу. Број канти за одлагање је пропорционалан броју радника који издвајају стаклене рециклабиле. На сваког радника, који је одређен за издвајање стаклених рециклабила, предвиђена је по једна канта за одлагање. Трошкови канте за одлагање се одређују на следећи начин:

$$TKO_i = CKO \cdot nR_{si} \quad (4.1.23)$$

где су:

TKO_i – трошкови канте за одлагање i -тог материјала, [€/t/dan],

CKO – цена канте за одлагање, (типична вредност је 300 €, [31]),

nR_{si} – број радника потребних за издвајање i -тог стакленог рециклабила, [radnik/t/dan].

Трошкови каналних спроводника (ТКС)

Канални спроводници су потребни за одвођење рециклабила приликом њиховог одлагања из сортирнице до бункера који су смештени испод ње. Број спроводника у постројењу је

једнак броју радника који издвајају рециклабилне материјале у једној смени. Трошкови каналних спроводника се одређују према изразу:

$$TKS_i = nR_i \cdot CKS \quad (4.1.24)$$

где су:

TKS_i – трошкови каналних спроводника за i -ти материјал, [€/t/dan],

nR_i – број радника за i -ти материјал, [radnik/t/dan],

CKS – цена каналних спроводника, (типична вредност је 150 € по спроводнику).

Трошкови магнета (ТМА)

Издавање гвоздених конзерви и других магнетичних материјала се врши помоћу магнета постављених на крајевима сваке сортирне линије. Трошкови магнета укључују и одређену дужину конвејера потребног за његово функционисање. Дакле:

$$TMA_i = CMA \quad (4.1.25)$$

У претходном изразу фигуришу следеће ознаке:

TMA_i – трошкови магнета за издавање i -тог магнетичног материјала, [€/t/dan],

CMA – цена магнета (типична цена је 3000 [€/t/dan] процесираног магнетичног материјала [31]).

Трошкови сепаратора вртложним струјама (TSVS)

Издавање алуминијумских лименки (или других немагнетичних метала - Cu, Zn, Pb,...) се може вршити ручно или употребом сепаратора вртложним струјама. Уколико се изабере опција за аутоматску сепарацију, тада се трошкови сепаратора вртложним струјама одређује према изразу:

$$TSVS_i = CSVS \quad (4.1.26)$$

где су:

$TSVS_i$ – трошкови сепаратора вртложним струјама, [€/t/dan],

$CSVS$ – цена сепаратора вртложним струјама (подразумевана вредност је 12.000 [€/t/dan] процесираног алуминијума, [29]).

Трошкови возног парка (ТVP)

У постројењу се најчешће користе три врсте возила: фронтални утоваривач који гура отпад на сортирни конвејер, виљушкар који помера бале и мини утоваривач који уједно врши функције и утоваривача и виљушкара. Обично је мини утоваривач најмањи и најјефтинији од ова три типа возила. У мањим постројењима, мини утоваривач може заменити и виљушкар и фронтални утоваривач. У већим постројењима је потребна посебна опрема због чега возни парк може да обухвати и подне чистаче, итд. Трошкови возног парка су дати следећим изразом:

$$TVP_i = CVP \quad (4.1.27)$$

где су:

TVP_i – трошкови возног парка за i -ти материјал, [€/t/dan],
 CVP – цена возног парка (подразумевана вредност је 500 [€/t/dan] процесираниог материјала, [29].

За постројења капацитета од 50 тона на дан, према изразу (4.1.27), капитални трошак за возни парк је 25.000 €. Постојење ове величине може бити опслужено једним мини утоваривачем који ће руковати балама и мешовитим отпадом. Цена мини утоваривача се креће од 25.000 € до 30.000 € по возилу [31].

Трошкови балирки (ТВА)

У постројењу се користе најмање две балирке. Разлог је тај што је балирка специфичан тип опреме, и у случају да се једна балирка поквари, потребно је имати резервну. У постројењима већих капацитета, трошкови балирки могу бити увећани због потребе за куповином више балирки. Трошкови балирке су одређени следећим изразом:

$$TBA_i = CBA \cdot EI_i \quad (4.1.28)$$

У претходном изразу фигуришу следеће ознаке:

TBA_i – трошкови балирке по процесираниог i -том материјалу, [€/t/dan],
 CBA – цена балирки (типична вредност је 1.200 [€/t/dan] балираног материјала, из [29]),
 EI_i – ефикасност издвајања i -тог рециклабила (препоручена вредност, табела 4.3).

Трошкови отварача цакова (TOV)

Мешовити чврсти комунални отпад у MRF долази у цаковима. Цакови могу бити отворани ручно или употребом механичког отварача цакова. Механички отварач цакова, који се користи као стандардни изборни модел, састоји се од наизменичних редова сечица (усмерени истурени делови или шиљци) који се померају различитим брзинама преко цакова који се крећу на конвејеру [29]. Шиљци поцепају цакове, при чему се ослобађа садржај из тих цакова и расипа по конвејеру. Трошкови механичког отварача цакова су представљени следећом релацијом:

$$TOV_i = COV \quad (4.1.29)$$

где су:

TOV_i – трошкови отварача цакова за i -ти материјал, [€/t/dan],
 COV – цена отварача цакова (типична вредност је 1.100 [€/t/dan], из [29]).

4.1.4 Годишњи оперативни трошкови (GOT)

Оперативни трошкови постројења укључују трошкове зарада, административне трошкове, трошкове комуналних услуга и трошкове опреме и одржавања објекта. Оперативни трошкови, за процесирање тоне материјала у постројењу за мешовити отпад, представљени су следећим изразом:

$$GOT_i = TZA_i + TAD_i + TKU_i + TOD_i \quad (4.1.30)$$

Сви параметри у једначини за оперативне трошкове исказани су у [€/t/dan] базне компоненте.

4.1.4.1 Трошкови зарада (TZA)

Трошкови зарада се састоје од трошкова запослених у менаџменту, возача и оператора, запослених који отварају џакове и оних који врше издвајање рециклабила. Мања постројења могу користити услуге менаџмента по уговору о привременим или повременим пословима, док велика постројења захтевају менаџмент, административце и супервизоре са пуним радним временом. Приликом одређивања зараде радника, претпоставља се могућност ангажовања радника по уговору о привременим пословима. Трошкови зарада запослених су представљени следећим изразом:

$$TZA_i = TME_i + TRI_i + TVO_i + TRO_i \quad (4.1.31)$$

Трошкови менаџмента (TME)

Под менаџментом се подразумевају менаџери, административци и супервизори. Претпоставља се да трошкови који се односе на запослене у менаџменту представљају део трошкова који се односе на раднике оперативце:

$$TME_i = UTM \cdot (TRI_i + TVO_i + TRO_i) \quad (4.1.32)$$

где су:

TME_i – трошкови менаџмента за издвајање i -те компоненте отпада, [€/t],

UTM – удео трошкова менаџмента, (типична вредност је 25% [29]),

TRI_i – трошкови радника који издвајају рециклабиле по i -тој компоненти отпада, [€/t],

TVO_i – трошкови возача и оператора по i -тој компоненти отпада, [€/t],

TRO_i – трошкови радника који отварају џакове по i -тој компоненти отпада, [€/t].

Трошкови радника који издвајају рециклабиле (TRI)

Трошкови зарада коју примају запослени на издвајању i -тог рециклабила се рачунају употребом следећег израза:

$$TRI_i = \frac{CRI \cdot EI_i}{BI_i} \quad (4.1.33)$$

где су:

TRI_i – плате радника који издвајају рециклабиле по i -тој компоненти отпада, [€/t],

CRI – цена радника на сат (типична вредност је 4 €/h),

EI_i – издвајања i -тог рециклабила (препоручена вредност, табела 4.3),

BI_i – брзина издвајања i -тог рециклабила (препоручене вредности из табеле 4.2), [t/h].

Трошкови возача и оператора (TVO)

Код постројења за мешовити отпад мањег капацитета број возача и оператора је релативно мали, док постројења већег капацитета захтевају ангажовање више специјализоване радне снаге. Отуда, намеће се потреба за оператерима који су потребни за рад на балиркама и за

рад на станици за мерење. Одређивање трошкова зарада возача и оператора је представљено једначином (4.1.34), при чему фактор f_3 повезује број радних сати возача и оператора са масом процесираног материјала у постројењу.

Пример:

Процењено радно време возача и оператора је 32 h дневно (укључујући паузе и евентуални застој). Под претпоставком да је 8 h подразумевано дневно радно време, у постројењу које процесира 100 тона отпада дневно потребно је 4 радника (возача и оператора). Овај број радника може бити распоређен тако да двојица опслужују балирке, један је возач и један на станици који врши мерење.

$$TVO_i = CVO \cdot f_3 \quad (4.1.34)$$

Ознаке у у претходном изразу имају следеће значење:

TVO_i – трошкови возача и оператора по i -тој компоненти отпада, [€/t],

CVO – цена радног сата возача и оператора (типична вредност је 6 €/h),

f_3 – фактор броја радних сати возача и оператора по тони отпада (типична вредност је 0,32 h/t, [29]).

Трошкови радника који отварају цакове (TRO)

Ако се цакови са отпадом отварају ручно, тада се трошкови зараде радника који обављају ту активност могу прерачунати помоћу израза (4.1.35). Ручно отварање цакова се врши уз помоћ оштрог инструмента или загрејаног ножа.

$$TRO_i = \frac{CRO}{n_{10}} \quad (4.1.35)$$

где су:

TRO_i – трошкови радника који отварају цакове по i -тој компоненти отпада, [€/t],

CRO – цена радног сата радника који отварају цакове (типична вредност је 4 €/h),

n_{10} – радна норма за отварање цакова (типична вредност је 5 t/h).

4.1.4.2 Административни трошкови (TAD)

Општи трошкови се рачунају као фракција трошкова радне снаге. Под општим трошковима се подразумевају прековремени рад, канцеларијски материјал, осигурање, социјална заштита, годишњи одмор, боловање и друге услуге. Општи трошкови по тони процесираног материјала се одређују према једначини 4.1.36:

$$TAD_i = UAD \cdot TZA_i \quad (4.1.36)$$

где су:

TAD_i – административни трошкови, [€/t],

UAD – удео административних трошкова (типична вредност је 30% [30]).

TZA_i – трошкови зарада запослених за процесирани i -ту компоненту отпада (из једначине 4.1.31)

4.1.4.3 Трошкови комуналних услуга (TKU)

Трошкови комуналних услуга (електрична енергија, гориво, мазива, итд) су пропорционални маси процесираног отпада:

$$TKU_i = SKU \quad (4.1.37)$$

где су:

TKU_i – трошкови комуналних услуга по тони процесираног i -тог рециклабила, [€/t],

SKU – цена комуналних услуга (типична вредност је 1.5 €/t, [30]).

4.1.4.4 Трошкови одржавања (TOD)

Претпоставка је да су и трошкови одржавања опреме и објекта пропорционални маси процесираног материјала у постројењу:

$$TOD_i = COD \quad (4.1.38)$$

при чему су:

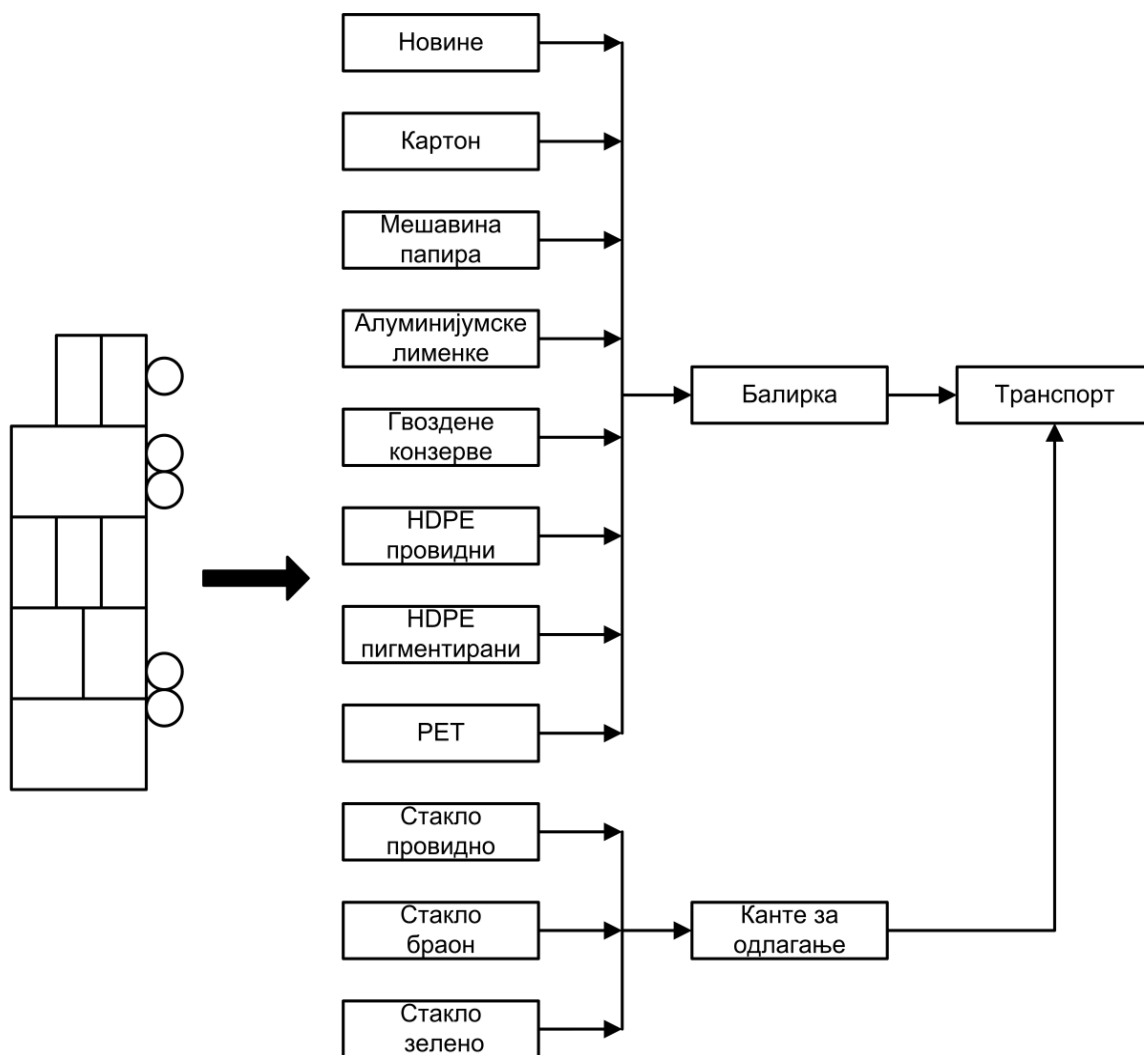
TOD_i – трошкови одржавања по тони i -тог материјала, [€/t],

COD – цена одржавања (типична вредност је 4 €/t, [30]).

4.2 Постројење за процесирање претходно издвојених (разврстаних) рециклабилних материјала - prMRF

4.2.1 Опис процесног тока

Оваква постројења су примењива на све комбинације улазних рециклабилних материјала. Материјал који улази у овакво постројење, претходно је сортиран или од стране становника или од комуналних радника који сакупљају отпад са ивичњака. Рециклабили се одлажу у одвојене одељке унутар возила којим се врши њихово сакупљање. Претпоставља се да је за сакупљање сваког рециклабилног материјала на располагању засебан одељак у возилу. Пражњење возила са сакупљеним рециклабилима врши се на истоварној платформи постројења. Простор за складиштење рециклабила садржи преграде како се рециклабили не би мешали. Контрола квалитета сортирања рециклабила се врши приликом пражњења возила на истоварну платформу. Рециклабили се из складишта на конвејере гурају помоћу утоваривача. Конвејери транспортују рециклабиле у левак балирке. Затим се готове бале утоварају у приколице како би се даље транспортовале. Стаклени рециклабили се одлажу у канте које се помоћу виљушкарa празне у транспортне приколице. У овом постројењу не постоји потреба за сортирањем или издвајањем рециклабилних материјала. Дијаграм процесног тока једног постројења за процесирање претходно сортираног отпад је приказан на слици 4.3.



Слика 4.3. Дијаграм тока постројења за процесирање претходно сортираног отпада

4.2.2 Одређивање функције трошкова постројења за процесирање претходно издвојених рециклабилних материјала

Годишњи торшкови постројења за претходно сортирани отпад се, као и у претходном случају, састоји из две компоненте:

- капитални трошак амотризован током животног века постројења и
- годишњи оперативни трошкови.

Годишњи трошкови овог постројења се исказују исто као и у случају постројења за раздвајање мешовитог отпада, изразом (4.1.1), при чему и чланови тог израза имају иста значења. Стога и изрази (4.1.2) и (4.1.3) имају исту примену као и у претходном случају.

4.2.3 Капитални трошак (КТ)

Прорачун капиталних трошкова код постројења за процесирање претходно издвојених рециклабила је такође одређен истим изразом (4.1.4) као и код постројења за раздвајање мешовитог отпада.

Чланови који фигуришу у изразу (4.1.5) за прорачун трошкова изградње овог постројења се не разликују од оних за случај изградње постројења за раздвајање мешовитог отпада.

Исте ознаке фигуришу и у једначини (4.1.6) којом се одређује укупна површина основе грађевинских објеката постројења. Површина основе се састоји од површине на које се врши истовар рециклабила (PI), површине за процесирање рециклабила (PP), површине намењене канцеларијском простору (PK) и површине складишног простора (PSP).

Приликом одређивања површине на коју се врши истовар рециклабила (PI), и за ово постројење, се користи израз (4.1.7) при чему неки од чланова тог израза имају различите вредности. У овом случају се разликују вредности густине рециклабила и мешаног отпада па је вредност члана n_1 промењена са 200 kg/m^3 на 100 kg/m^3 . Поред тога, различиту вредност има још један члан, ZS, који представља захтевани складишни простор који омогућава смањење радног времена опреме. Вредност овог члана је повећана са 0.5 на 2 дана.

За одређивање површине за процесирање рециклабила (PP) се уместо израза (4.1.8) користи следећи израз:

$$PP = 2 \cdot PB = FM2 \cdot f_1 \quad (4.2.8)$$

где су:

PP – потребна површина за балирање рециклабила, $[\text{m}^2/\text{t}/\text{dan}]$,

$2 \cdot PB$ – површина за две балирке, $[\text{m}^2/\text{t}/\text{dan}]$,

FM2 – фактор маневрисања површине за процесирање (типична вредност је 3),

f_1 – фактор за израчунавање потребне површине за балирке (подразумевана вредност је $0,75 \text{ m}^2/\text{t}/\text{dan}$),

При одређивању трошковне функције постројења за претходно издвојене рециклабиле, не користе се изразиод (4.1.9) до (4.1.14) као у случају одређивања трошковне функције постројења за мешовити отпад.

Вредност фактора површине канцеларије n_4 из израза (4.1.14) који се користи за одређивање површине канцеларијског простора (PK), у овом случају је нешто већа и уместо $1 \text{ m}^2/\text{t}/\text{dan}$ износи $2 \text{ m}^2/\text{t}/\text{dan}$.

За одређивање површине складишног простора (PSP) се уместо израза (4.1.15) користи следећи израз:

$$PSP_i = \frac{FM3 \cdot nB_i \cdot POB \cdot BRD}{3 \cdot MB_i}, \quad nB_i = \frac{1}{MB_i} \quad (4.2.15)$$

Ознаке из израза (4.2.15) имају следећа значења:

PSP_i – додатна површина складишног простора за нестаклене рециклабиле, $[\text{m}^2 \cdot \text{dan}/\text{t}]$,

FM3 – фактор маневрисања додатног складишног простора (типична вредност је 2.5, [30]),

BRD – број дана за које се врши складиштење бала (типична вредност је 1 дан),

3 – претпоставка је да се 3 бале пакују по висини, једна на другу,

МВ – маса бале i -тог рециклабила (типична вредност је 0.2 [t]).

РОВ – површина коју заузима једна бала, (типична вредност је 2 m²).

Трошкови земљишта (TZ), инжењеринга (TIN) и опреме (TO) се одређују аналогно изразима (4.1.16), (4.1.17), (4.1.18) и (4.1.19).

Капитални трошкови опреме (КТО) се за случај постројења за процесирање претходно сортираног отпада, не рачунају према изразу (4.1.20) већ према следећем:

$$КТО_i = ТКО_i + TVP_i + TBA_i \quad (4.2.20)$$

Из претходног израза, трошкови канти за одлагање стаклених рециклабила (ТКО) се рачунају на следећи начин:

$$ТКО_i = СКО \cdot nKO_i, \quad nKO_i = \frac{1}{GSR \cdot ZKO} \quad (4.2.21)$$

где су:

ТКО_{*i*} – трошкови канти за одлагање, [€·dan/t],

СКО – цена канти за одлагање (типична цена је 2400 € по канти),

nKO_{*i*} – број канти потребних дневно за одлагање i -тог стакленог рециклабила, [канта/dan],

GSR – густина стаклених рециклабила (типична вредност је 0,3 t/m³),

ZKO – запремина канти за одлагање (типична вредност је 2,5 m³).

Трошкови возног парка (TVP) и балирки (ТБА) из израза (4.2.20) се као и у случају постројења за раздвајање мешаног комуналног отпада рачунају према изразима (4.1.27) и (4.1.28).

4.2.4 Годишњи оперативни трошкови (GOT)

Оперативни трошкови се и код овог постројења састоје од трошкова зарада, административних трошкова, трошкова комуналних услуга и трошкова опреме и одржавања објекта, као што је представљено изразом (4.1.30).

Прорачун трошкова зарада (TZA) се разликује од онога представљеног изразом (4.1.31), и састоји се само од трошкова менаџмента и возача и оператора, па се уместо наведеног користи следећи израз:

$$TZA_i = TME_i + TVO_i \quad (4.2.31)$$

Самим тим, разликује се и образац за прорачун трошкова менаџмента (TME) и они се одређују према изразу:

$$TME_i = UTM \cdot TVO_i \quad (4.2.32)$$

где су:

TME_{*i*} – трошкови менаџмента за издвајање i -тог рециклабила, [€/t],

UTM – удео трошкова менаџмента, (типична вредност је 75%),

TVO_{*i*} – трошкови возача и оператора по i -тој компоненти рециклабила, [€/t].

Одређивање трошкова возача и оператера се врши према истом изразу као у случају постројења за раздвајање мешаног комуналног отпада (4.1.34). Једина разлика је у вредности фактора броја радних сати f_3 који у овом случају износи 0,24 [30].

Административни трошкови (TAD), трошкови комуналних услуга (TKU) и трошкови одржавања (TOD) се такође рачунају по истим изразима као што се рачунају у случају постројења за раздвајање мешаног комуналног отпада (4.1.36), (4.1.37) и (4.1.38). Разлика се запажа само у величини цене комуналних услуга (СКУ), из израза (4.1.37), која у овом случају износи 0,75 €/t [30].

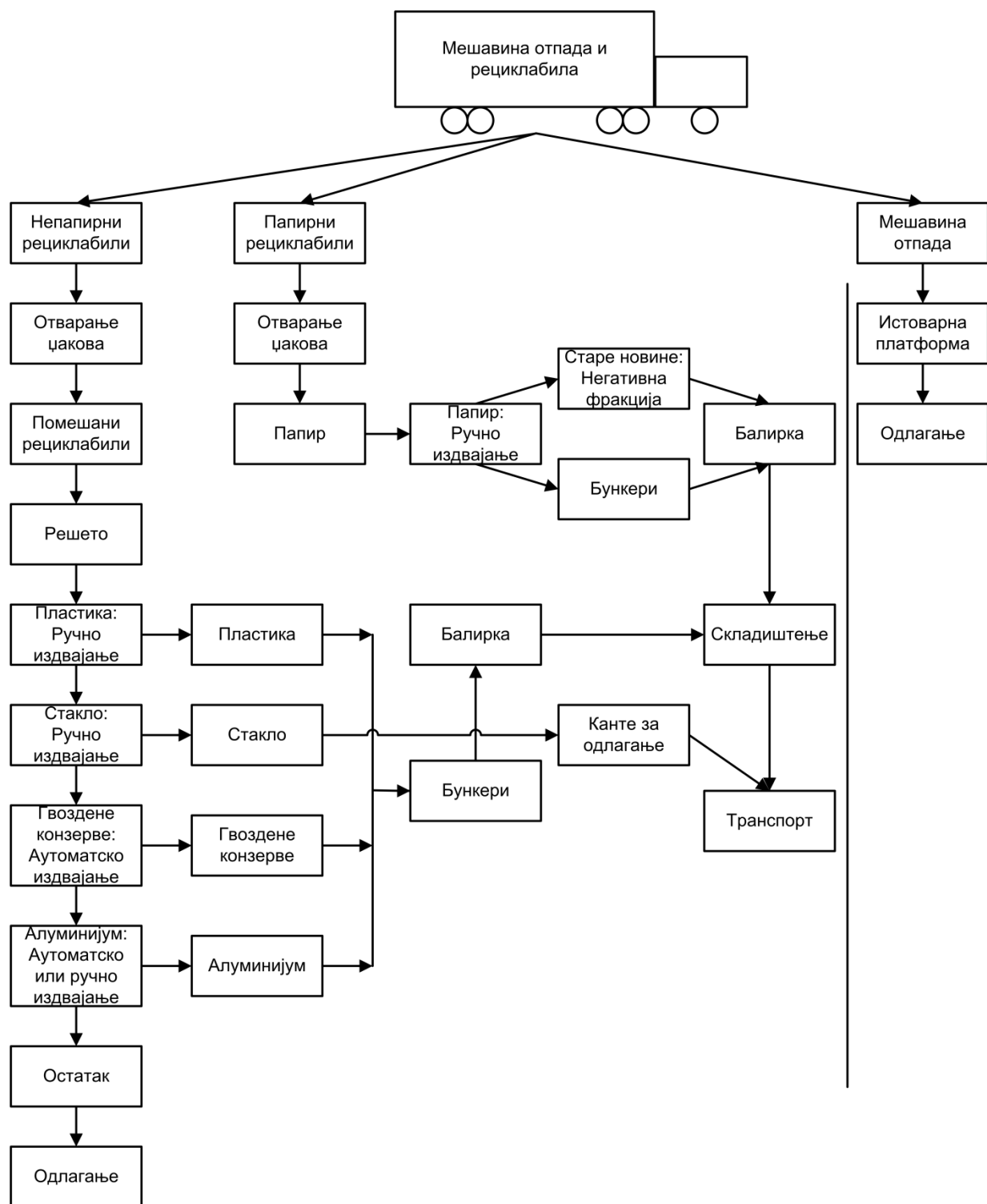
4.3 Постројење у коме се врши допремање измешаних рециклабила и мешавине отпада смештених у истом одељку камиона за сакупљање- ss1MRF

4.3.1 Опис процесног тока

Дизајн оваквог постројења је примењив на све могуће комбинације улазних рециклабилних материјала. Мешавина рециклабила и папирни рециклабили се одлажу у џаковима једне боје док се мешани отпад одлаже на ивичњак у џаковима друге боје. Сакупљање ових џакова се врши возилом које има само један одељак у кога се истовремено утоварају и једни и други џакови. Рециклабили који су помешани са осталим отпадом се не издвајају. Такође се не врши издвајање оних рециклабила из џакова када током транспорта дође до отварања и просипања садржаја из тих џакова. Обе врсте џакова се истоварају на платформу након чега се помоћу утоваривача гурају на конвејер. Одвајање џакова који садрже папирне рециклабиле, од оних који садрже непапирне рециклабиле, се врши ручно након чега се усмеравају ка засебним станицама за њихово отварање. Џакови који садрже мешани отпад се товаре директно у приколице које их транспортују на одлагалиште. Отварање џакова са рециклабилима може бити ручно или аутоматско, према избору корисника. Рециклабили ослобођени џакова се затим конвејером транспортују до сортирнице.

Мешани отпад се са истоварне платформе утоварају у транспортне приколице и одвозе или на депонију или у постројење за производњу енергије, постројење за производњу горива, постројење за компостирање, или у анаеробни дигестор према избору управљачког модела. Трошкови транспорта остатка из овог постројења до места одлагања су укључени у моделу транспортног процеса.

Дијаграм процесног тока једног постројења за процесирање претходно сортираног отпада је приказан на слици 4.4.



Слика 4.4. Дијаграм тока постројења у коме се врши допремање измешаних рециклабила и мешавине отпада смештених у истом одељку камиона за сакупљање

4.3.2 Одређивање трошковне функције постројења за измешане рециклабиле и мешавину отпада

Прорачун годишњих трошкова се и код овог постројења одређују аналогно изразу (4.1.1) као код прорачуна трошкова постројења за раздвајање мешаног комуналног отпада. Такође и изрази (4.1.2) и (4.1.3) имају исту примену као и у случају постројења за раздвајање мешаног комуналног отпада.

4.3.3 Капитални трошак (КТ)

Капитални трошакчине трошкови изградње (TIZ), земљишта (TZ), инжењеринга (TIN) и опреме (TO), и одређују се према изразу (4.1.4).

Трошкови изградње постројења (TIZ) се одређују према већ познатом изразу (4.1.5). Површина основе грађевинских објеката постројења (PMRF) која фигурише у претходном изразу се такође рачуна према истом изразу као код постројења за раздвајање мешаног комуналног отпада (4.1.6).

Приликом прорачуна површине на коју се врши истовар измешаних рециклабила и мешавине отпада (PI), а која је део израза (4.1.6), за вредност фактора маневрисања (FM1) у изразу (4.1.7) уместо 2.5 износи 4. У истом изразу, вредност захтеваног складишног простора (ZS) уместо 0.5 износи 2 дана. Још се разликује и густина i -те компоненте отпада у растреситом стању ($n1$) која у овом случају износи 100 kg/m^3 .

Површина за процесирање (PP) из израза (4.1.6) се одређује према изразу (4.1.8).

И дужина конвејера у сортирници (DKS) се рачуна на исти начин као код постројења за раздвајање мешаног комуналног отпада, према изразу (4.1.9).

Брзина издвајања рециклабила (BI) је дефинисана као маса рециклабила (у тонама) која је издвојена од стране радника за један сат. По питању брзине издвајања различитих рециклабила, веома ограничене информације су доступне за различите типове постројења. ЕРА приручник о постројењима даје приближане опсеге за вредности брзине издвајања и ефикасности издвајања. Подаци из овог извора покривају врло широк распон вредности као што је на пример брзина издвајања пластике (PET, HDPE) од $135\text{--}270 \text{ kg/h}$ по раднику. Овај приручник по том питању не прави разлику између типова постројења. Интуитивно, брзина издвајања рециклабила из постројењу за мешовити отпад ће бити мања него из постројења за помешане рециклабиле. Брзина издвајања рециклабила са конвејера зависи од броја рециклабила присутних на том конвејеру. Брзина издвајања провидног стакла из мешавине два типа пластике и металних конзерви ће бити мања него из мешавине само металних конзерви. Формула за одређивање прецизније вредности брзине издвајања рециклабила је представљена следећим изразом:

$$BI_A = \left(\frac{BI'_A \cdot ZAP_A}{\sum ZAP} \right)_{PIVK} \quad (4.3.10)$$

где су:

BI_A – коригована брзина издвајања рециклабила А при одређеној брзини конвејера, $[t/h]$,

BI'_A – измерена максимална брзина издвајања рециклабила А при одређеној брзини конвејера, $[t/h]$,

ZAP_A – запремина рециклабила А на конвејеру, $[m^3]$,

$\sum ZAP$ – укупна запремина свих рециклабила и отпада на конвејеру, $[m^3]$,

$PIBK$ – при измереној брзини конвејера.

Ова формула се заснива на претпоставки да је брзина издвајања рециклабила функција релативног „присуства“ рециклабила на конвејеру. Предлог је да ово „присуство“ буде приближно једнако релативној запремини рециклабила међу осталим такође присутним рециклабилима или отпадом на конвејеру. Максимална брзина издвајања рециклабила А је брзина при којој радник може да издвоји са конвејера рециклабил А (при одређеној брзини конвејера) у случају да се транспортује само тај рециклабил А. Та максимална брзина издвајања рециклабила А ће се смањити када се повећа брзина конвејера.

Израз 4.3.10 се може користити за прорачун брзине издвајања за сваки рециклабил понаособ, током операције сортирања. Запремина рециклабилног материјала се може добити дељењем масе рециклабила који се процесира са његовом густином. Слично томе, укупна запремина свих рециклабила се може добити након што се утврди састав рециклабила који се процесирају.

Да би се верификовали и обезбедили подаци за горе наведену формулу, као и за генерисање табеле са вредностима брзине издвајања у зависности од различите брзине конвејера, потребна су истраживања. Овакви подаци могу бити од велике важности за конструкторе постројења при процени броја сортирних линија за познату количину и мешавину рециклабила које је потребно издвојити.

Приближна вредност за брзину издвајања је улазни параметар модела. Вредности ових брзина издвајања су нешто веће него оне за помешани отпад из разлога што се ове брзине примењују за помешане рециклабиле, а препоручене вредности су дате у табели 4.4.

Табела 4.4. Брзина издвајања (BI) рециклабила у постројењу за измешане рециклабиле и мешавину отпада

Компоненте отпада	Брзина издвајања [t/h]
Старе новине	Негативно сортиране
Стари картон	0,100
Канцеларијски папир	0,750
Телефонски именици	0,750
Књиге	0,750
Стари магازини	0,750
Поштанске коверте	0,750
Остали папир	0,750
Мешавина папира	Негативно сортиране
HDPE - провидни	0,060
HDPE - пигментирани	0,100
PET	0,060
Остала пластика	0,060
Мешавина пластике	0,060
Металне конзерве	Магнет
Остали метал	Магнет
Алуминијумске конзерве	0,025
Остали алуминијум	0,025

Стакло - провидно	0,250
Стакло - браон	0,150
Стакло - зелено	0,050
Мешавина стакла	0,050

Брзина издвајања се користи и за одређивање броја радника потребних за сортирање долазних измешаних рециклабила. У изразу (4.1.12), ефикасност издвајања (EI) i -тог рециклабила, је дефинисана као маса издвојеног i -тог рециклабила са конвејера подељена са његовом масом на улазу у постројење. Сматра се да је ефикасност издвајања провидног стакла 94%, за случај када је дозвољено ломљење зеленог и браон стакла. Стаклени рециклабили се не издвајају када су поломљени, већ се одлажу као остатак. За остале рециклабиле се сматра да је ефикасност издвајања 90%.

Број радника потребних за издвајање једне тоне рециклабила се одређује на основу израза (4.1.12), при чему се за вредност брзине издвајања рециклабила (BI), која фигурише у том изразу, користи табела 4.4. Према дизајну процесног тока, за издвајање старих новина и металних конзерви у сортирници нису потребни радници. Старе новине се посматрају као негативно сортиран рециклабил из мешавине папира које остају на конвејеру и директно транспортују до балирке где се балирају. За издвајање металних конзерви се користи магнет који је постављен на крају конвејера унутар сортирнице.

Дужина ефективног радног дана се, као и у случају третмана мешаног комуналног отпада, одређује према изразу (4.1.11).

Потребна површина за балирке (PB), као и површина за утовар отпада (PUO), се одређују према изразу (4.1.8).

У изразу (4.1.14), за одређивање површине канцеларијског простора (PK), вредност фактора површине канцеларије (n_4) у овом случају има вредност $4 \text{ m}^2/\text{t/dan}$, [29]).

Површина складишног простора (PSP) као и трошкови земљишта (TZ) се и у овом случају рачунају према изразима (4.1.15) и (4.1.16), респективно.

Исто тако се одређују и трошкови инжењеринга (TIN) и трошкови опреме (TO) према изразима (4.1.17), (4.1.18) и (4.1.19).

Капитални трошкови опреме (KTO) из израза (4.1.19) се израчунавају према следећем изразу:

$$KTO_i = TK_i + TBU_i + TKO_i + TKS_i + TMA_i + TSVS_i + TVP_i + TBA_i + TOV_i + TDR_i \quad (4.3.20)$$

Трошкови конвејера (TK), трошкови бункера (TBU), трошкови канти за одлагање (TKO), трошкови каналних спроводника (TKS), трошкови магнета (TMA), трошкови сепаратора вртложним струјама ($TSVS$), трошкови возног парка (TVP), трошкови балирки (TBA) и трошкови отварача џакова (TOV) из претходног израза се одређују према изразима као код постројења за раздвајање мешаног отпада (4.1.21), (4.1.22), (4.1.23), (4.1.24), (4.1.25), (4.1.26), (4.1.27), (4.1.28) и (4.1.29), респективно.

Нови члан TDR у изразу (4.3.20) се односи на трошкове добошастог решета и они се рачунају према следећем изразу:

$$TDR_i = CDR \quad (4.3.30)$$

где су:

TDR_i – трошкови добошастог решета за i -ти материјал, [€·dan/t],

CDR – цена добошастог решета (типична вредност је 6500 €/t/dan, [29]).

4.3.4 Годишњи оперативни трошкови (GOT)

Оперативни трошкови овог постројења укључују трошкове зарада, административне трошкове, трошкове комуналних услуга и трошкове опреме и одржавања објекта и одређују се према изразу (4.1.30).

Трошкови зарада (TZA) као члан израза (4.1.30), се рачунају према изразу (4.1.31). Чланови тог израза (трошкови менаџмента (TME), трошкови радника који издвају рециклабиле (TRI), трошкови возача и оператера (TVO) и трошкови радника који отварају џакове (TRO)) се рачунају аналогно изразима (4.1.32), (4.1.33), (4.1.34) и (4.1.35).

Треба напоменути да се приликом одређивања трошкова радника који издвају рециклабиле (TRI), за брзину издвајања рециклабила (BI) и ефикасност издвајања рециклабила (EI) из израза (4.1.33), користе вредности одређене за ово постројење.

Административни трошкови (TAD), трошкови комуналних услуга (TKU) и трошкови одржавања (TOD) из израза (4.1.30) се, као и у случају постројења за раздвајање мешаног отпада, одређују према изразима (4.1.36), (4.1.37) и (4.1.38).

5 Техно-економска анализа постројења за потребе града Крагујевца

Крагујевац, као четврти по величини град у Србији, налази се у централном делу државе и седиште је шумадијског округа. Према попису из 2011. године, на територији града тренутно живи око 180 хиљада становника са сталном тенденцијом раста.

Приликом спровођења техно-економске анализе постројења за потребе града Крагујевца, узетесу у обзир следеће претпоставке:

- дневна просечна количина генерисаног отпада по становнику износи 1 kg
- постројења раде 5 дана недељно
- постројења раде са једном сменом уз могућност рада у две или три смене

У наредним табелама ће бити приказани укупни трошкови постројења за потребе града Крагујевца и то за сва три претходно обрађена случаја.

У табели 5.2 је дат приказ математичког модела за случај постројења за раздвајање мешаног комуналног отпада -mwMRF. Обзиром да постројење ради 5 од 7 дана недељно и да број становника у Крагујевцу константно расте, предвиђено је да ово постројење процесира 300 тона отпада дневно. У зависности од ефикасности издвајања рециклабилних материјала, у табели 5.1 (везано за табелу 5.2) су дати трошкови по тони процесираног отпада (TRTP), као и трошкови по тони издвојеног материјала (TPTI).

Табела 5.1. Трошкови по тони процесираног отпада и издвојених рециклабила у зависности од ефикасности издвајања

EI [%]	TRTP [€/t]	TPTI [€/t]
15	17.53	116.86
20	19.81	99.05
25	22.09	88.37
30	24.37	81.24

Наредна табела 5.3 даје увид у трошкове постројења за процесирање претходно издвојених (разврстаних) рециклабилних материјала – prMRF. Пошто се у овом постројењу процесирају рециклабили издвојени примарном сепарацијом, сматра се да се овим начином из укупне количине отпада издвоји 1/3 његове масе у виду рециклабила. Из тог разлога је за количину дневно процесираних рециклабила у овом постројењу узета вредност од 100 тона.

Трошкови постројења у коме се врши допремање измешаних рециклабила и мешавине отпада смештених у истом возилу – ssMRF су приказани у табели 5.4. Допремање отпада и рециклабила се врши у засебним цаковима који се разликују по боји. Након разврставања тих цакова, са процесирањем настављају само они цакови који садрже рециклабиле. Цакови са мешаним отпадом се даље одлажу па се из тог разлога, и у овом случају, за количину дневно процесираног материјала узима вредност од 100 тона.

Табела 5.2. Математички модел постројења за раздвајање мешаног комуналног отпада - *mwMRF*

Годишњи оперативни трошкови (GOT) [€/t]	$GOT_i = TZA_i + OPT_i + TKU_i + TOD_i$	/	/	22.92
Трошкови одржавања (TOD) [€/t]	$TOD_i = COD$	COD [€/t]	4	4.00
Трошкови комуналних услуга (TKU) [€/t]	$TKU_i = CKU$	CKU [€/t]	1.5	1.50
Административни трошкови (TAD) [€/t]	$TAD_i = UAD \cdot TZA_i$	UAD [%]	30	4.02
Трошкови зарада (TZA) [€/t]	$TZA_i = TME_i + TRI_i + TVO_i + TRO_i$	/	/	13.40
Трошкови менаџмента (TME) [€/t]	$TME_i = UTM \cdot (TRI_i + TVO_i + TRO_i)$	UTM [%]	25	2.68
Трошкови радника који издвају рециклабиле (TRI) [€/t]	$TRI_i = CRI \cdot Ei_i / BI_i$	CRI [€/h]	4	8.00
		EI [%]	30	
		BI [t/h]	0.15	
Трошкови возача и оператора (TVO) [€/t]	$TVO_i = CVO \cdot f3$	CVO [€/h]	6	1.92
		f3 [t/h]	0.32	
Трошкови радника који отварају цакове (TRO) [€/t]	$TRO_i = CRO / n10$	CRO [€/h]	4	0.80
		n10 [t/h]	5	
Капитални трошак (KT) [€/t/dan]	$KT_i = TIZ_i + TZ_i + TIN_i + TO_i$	/	/	7473.41
Трошкови изградње (TIZ) [€/t/dan]	$TIZ_i = PMRF_i \cdot STI$	STI [€/m²]	350	3436.92
Површина MRF-а (PMRF) [m²/t/dan]	$PMRF_i = PI_i + PP_i + PK_i + PSP_i$	/	/	9.82
Површина на коју се врши истовар отпада (PI) [m²/t/dan]	$PI_i = FM1 \cdot ZS \cdot 1000 / n1 / VO$	FM1	2.5	2.08
		ZS [dan]	0.5	
		n1 [kg/m³]	200	
		VO [m]	3	
		t - kg	1000	
Површина за процесирање отпада (PP) [m²/t/dan]	$PP_i = PPS_i + 2 \cdot PB_i + PUO_i = (n3 \cdot DKS_i) + (FM2 \cdot f1) + f2$	n3 [m]	8.6	5.49
		FM2	2.5	
		f1 [m²/t/dan]	0.75	
		f2 [m²/t/dan] ручно	1.4	
		f2 [m²/t/dan] ауто	1.8	

Дужина конвејера у сортирници DKS [m/t/dan]	$DKS_i = nR_i \cdot 1.2 \cdot FV / 2$	1.2 [m/radnik]	1.2	0.26
		FV	1.5	
		2	2	
Број радника који издвајају рециклабиле (nR) [radnik/t/dan]	$nR_i = Ei_i / Bi_i / DRDe$	EI [%]	30	0.29
		BI [t/h]	0.15	
Ефективна дужина радног дана (DRDe) [h/dan]	$DRDe = DRD - PAUZA - VNS$	DRD [h/dan]	8	7.00
		PAUZA [h/dan]	0.5	
		VNS [h/dan]	0.5	
Површина канцеларијског простора (PK) [m ² /t/dan]	$PK_i = n4$	n4 [m ² /t/dan]	1	1.00
Површина складишног простора (PSP) [m ² /t/dan]	$PSP_i = FM2 \cdot POB \cdot Ei_i \cdot BRD / 3 / Mb_i$	FM2	2.5	1.25
		POB [m ²]	2	
		EI [%]	30	
		BRD [dan]	1	
		bale po visini	3	
		MB [t]	0.4	
Трошкови земљишта (TZ) [€/t/dan]	$TZ_i = PMRF \cdot FAK \cdot CZ / 10000$	FAK [m ²]	4	589.19
		CZ [€/ha]	150000	
		1 ha - m ²	10000	
Трошкови инжењеринга (TIN) [€/t/dan]	$TIN_i = FIT \cdot TIZ_i$	FIT [%]	30	1031.08
Трошкови опреме (TO) [€/t/dan]	$TO_i = KTO_i + TIO_i$	/	/	2416.23
Трошкови инсталације опреме (TIO) [€/t/dan]	$TIO_i = PTO \cdot KTO_i$	PTO [%]	10	219.66
Капитални трошкови опреме (KTO) [€/t/dan]	$KTO_i = TK_i + TBU_i + TKO_i + TKS_i + TMA_i + TSVS_i + TVP_i + TBA_i + TOV_i$	/	/	2196.57
Трошкови конвејера (TK) [€/t/dan]	$TK_i = DKS_i \cdot CK$	CK [€/m]	3500	900.00
Трошкови бункера (TBU) [€/t/dan]	$TBU_i = CBU \cdot nR_i / 2$	CBU [€]	2000	285.71
		2	2	

Трошкови канти за одлагање (TKO) [€/t/dan]	TKO _i = CKO • nR _{si}	nR _{si} [radnik/t/dan]	0.01	3.00
		CKO [€]	300	
Трошкови каналних спроводника (TKS) [€/t/dan]	TKS _i = nR _i • CKS	CKS [€]	150	42.86
Трошкови магнета (ТМА) [€/t/dan]	TMA _i = CMA • KIM	CMA [€/t/dan]	3000	45.00
Кефицијент издвајања метала (KIM) [%]		KIM [%]	1.5	
Трошкови сепаратора вртложним струјама (TSVS) [€/t/dan]	TSVS _i = CSVS • KIA	CSVS [€/t/dan]	12000	60.00
Кефицијент издвајања алуминијума (KIA) [%]		KIA [%]	0.5	
Трошкови возног парка (TVP) [€/t/dan]	TVP _i = CVP	CVP [€/t/dan]	500	500.00
Трошкови балирки (ТБА) [€/t/dan]	TBA _i = CBA • EI _i	EI [%]	30	360.00
		CBA [€/t/dan]	1200	
Трошкови отварача џакова (TOV) [€/t/dan]	TOV _i = COV	COV [€/t/dan]	1100	0.00
Годишњи трошкови MRF-a (GTMRF) [€/t]	GTMRF = CRF • KT + GOT	/	/	8896.06
Фактор повраћаја капитала (CRF) [god ⁻¹]	CRF = i • (1 + i) ⁿ / ((1 + i) ⁿ - 1)	n	25	0.07
		i	0.05	
Количина процесираног отпада (KPO) [t/dan]	UGT = GTMRF • KPO	KPO [t/dan]	300	2668817
Укупни годишњи трошкови за укупну количину процесираног отпада (UGT) [€]		/	/	
Трошкови по тони процесираног отпада (TPTP) [€/t]	TPTP = UGT / KPO / 365	/	/	24.36
Трошкови по тони издвојеног материјала (TPTI) [€/t]	TPTI = UGT / KPO / 365 / EI	/	/	81.20

Табела 5.3. Математички модел постројења за процесирање претходно издвојених (разврстаних) рециклабилних материјала – prMRF

Годишњи оперативни трошкови (GOT) [€/t]	$GOT_i = TZA_i + OPT_i + TKU_i + TOD_i$	/	/	8.28
Трошкови одржавања (TOD) [€/t]	$TOD_i = COD$	COD [€/t]	4	4.00
Трошкови комуналних услуга (TKU) [€/t]	$TKU_i = CKU$	CKU [€/t]	0.75	0.75
Административни трошкови (TAD) [€/t]	$TAD_i = UAD \cdot TZA_i$	UAD [%]	40	1.01
Трошкови зарада (TZA) [€/t]	$TZA_i = TME_i + TVO_i$	/	/	2.52
Трошкови менаџмента (TME) [€/t]	$TME_i = UTM \cdot PVO_i$	UTM [%]	75	1.08
Трошкови возача и оператора (TVO) [€/t]	$TVO_i = CVO \cdot f2$	CVO [€/h]	6	1.44
		f3 [t/h]	0.24	
Капитални трошак (KT) [€/t/dan]	$KT = TIZ + TZ + TIN + TO$	/	/	34210.42
Трошкови изградње (TIZ) [€/t/dan]	$TIZ = PMRF \cdot STI$	STI [€/m ²]	350	21904.17
Површина MRF-а (PMRF) [m ² /t/dan]	$PMRF = PI + PP + PK + PSP$	/	/	62.58
Површина на коју се врши истовар отпада (PI) [m ² /t/dan]	$PI = FM1 \cdot ZS \cdot 1000 / GR / VR$	FM1	2.5	16.67
		ZS [dan]	2	
		GR [kg/m ³]	100	
		VR [m]	3	
		t - kg	1000	
Површина за процесирање отпада (PP) [m ² /t/dan]	$PP = 2 \cdot PB_i = FM2 \cdot f1$	FM2	3	2.25
		f1 [m ² /t/dan]	0.75	
Површина канцеларијског простора (PK) [m ² /t/dan]	$PK = n3$	n3 [m ² /t/dan]	2	2.00
Површина складишног простора (PSP) [m ² /t/dan]	$PSP = FM3 \cdot POB \cdot nB_i \cdot BRD / 3 / MB_i$	FM3	2.5	41.67
		POB [m ²]	2	
		$nB_i=1/MB_i$	5	
		BRD [dan]	1	
		3	3	
		MB _i [t]	0.2	

Трошкови земљишта (TZ) [€/t/dan]	$TZ_i = PMRF \cdot n5 \cdot CZ / 10000$	$n5 [m^2]$	4	3755.00
		CZ [€/ha]	150000	
		1 ha - m^2	10000	
Трошкови инжењеринга (TIN) [€/t/dan]	$TIN = FIT \cdot TIZ$	FIT [%]	30	6571.25
Трошкови опреме (TO) [€/t/dan]	$TO_i = KTO_i + TIO_i$	/	/	1980.00
Трошкови инсталације опреме (TIO) [€/t/dan]	$TIO_i = PTO \cdot KTO_i$	PTO [%]	10	180.00
Капитални трошкови опреме (KTO) [€/t/dan]	$KTO_i = TKO_i + TVP_i + TBA_i$	/	/	1800.00
Трошкови канти за одлагање (TKO) [€/t/dan]	$TKO_i = nKO_i \cdot CKO \cdot USR$	CKO [€/kanta]	2400	160.00
Удео стаклених рециклабила (USR) [%]		USR [%]	5	
Број канти за одлагање стакла (nKO_i) [kanta/dan]	$nKO_i = 1 / GSR / ZKO$	GSR [t/m^3]	0.3	1.33
		ZKO [m^3]	2.5	
Трошкови возног парка (TVP) [€/t/dan]	$TVP_i = CVP$	CVP [€/t/dan]	500	500.00
Трошкови балирки (TBA) [€/t/dan]	$TBA_i = CBA \cdot UNR$	CBA [€/t/dan]	1200	1140.00
Удео нестаклених рециклабила (UNR) [%]		UNR [%]	95	
Годишњи трошкови MRF-а (GTMRF) [€/t]	$GTMRF = CRF \cdot KT + GOT$	/	/	5448.78
Фактор повраћаја капитала (CRF) [god^{-1}]	$CRF = i \cdot (1 + i)^n / ((1 + i)^n - 1)$	n	25	0.07
		i	0.05	
Количина процесираног отпада (KPO) [t/dan]	$UGT = GTMRF \cdot KPO$	KPO [t/dan]	100	544878
Укупни годишњи трошкови за одређену количину процесираног отпада (UGT) [€]		/	/	
Трошкови по тони процесираног отпада (TPTP) [€/t]	$TPTP = UGT / KPO / 365$	/	/	14.93
Трошкови по тони издвојеног материјала (TPTI) [€/t]	$TPTI = UGT / KPO / 365 / EI$	/	/	14.93

Табела 5.4. Математички модел постројења у коме се врши допремање измешаних рециклабила и мешавине отпада смештених у истом возилу – *ссMRF*

Годишњи оперативни трошкови (GOT) [€/t]	$GOT_i = TZA_i + OPT_i + TKU_i + TOD_i$	/	/	21.71
Трошкови одржавања (TOD) [€/t]	$TOD_i = COD$	COD [€/t]	4	4.00
Трошкови комуналних услуга (TKU) [€/t]	$TKU_i = CKU$	CKU [€/t]	1.5	1.50
Административни трошкови (TAD) [€/t]	$TAD_i = UAD \cdot TZA_i$	UAD [%]	40	4.63
Трошкови зарада (TZA) [€/t]	$TZA_i = TME_i + TRI_i + TVO_i + TRO_i$	/	/	11.58
Трошкови менаџмента (TME) [€/t]	$TME_i = UTM \cdot (TRI_i + TVO_i + TRO_i)$	UTM [%]	25	2.32
Трошкови радника који издвајају рециклабиле (TRI) [€/t]	$TRI_i = CRI \cdot Ei_i / BI_i$	CRI [€/h]	4	6.55
		Ei [%]	90	
		BI [t/h]	0.55	
Трошкови возача и оператора (TVO) [€/t]	$TVO_i = CVO \cdot f4$	CVO [€/h]	6	1.92
		f4 [t/h]	0.32	
Трошкови радника који отварају џакове (TRO) [€/t]	$TRO_i = CRO / n10$	CRO [€/h]	4	0.80
		n10 [t/h]	5	
Капитални трошак (KT) [€/t/dan]	$KT_i = TIZ_i + TZ_i + TIN_i + TO_i$	/	/	47590.91
Трошкови изградње (TIZ) [€/t/dan]	$TIZ = PMRF \cdot STI$	STI [€/m ²]	350	14405.94
Површина MRF-а (PMRF) [m ² /t/dan]	$PMRF_i = PI_i + PP_i + PK_i + PSP_i$	/	/	41.16
Површина на коју се врши истовар отпада (PI) [m ² /t/dan]	$PI_i = FM1 \cdot ZS \cdot 1000 / GR_i / VR$	FM1	4	26.67
		ZS [dan]	2	
		GR _i [kg/m ³]	100	
		VR [m]	3	
		t - kg	1000	
Површина за процесирање отпада (PP) [m ² /t/dan]	$PP_i = PPS_i + 2 \cdot PB_i + PUO_i = (n3 \cdot DKS_i) + (FM2 \cdot f1) + f2$	n3 [m]	5.9	4.99
		FM2	2.5	
		f1 [m ² /t/dan]	0.75	
		f2 [m ² /t/dan] ручно	1.4	
		f2 [m ² /t/dan] ауто	1.8	

Дужина конвејера у сортирници DKS [m/t/dan]	$DKS_i = nR_i \cdot 1.2 \cdot FV / 2$	1.2 [m/radnik]	1.2	0.29
		FV	2	
		2	2	
Број радника који издвајају рециклабиле (nR) [radnik*dan/t]	$nR_i = nR1 + nR2 + nR3 + nR4$	/	/	0.32
Број радника који издвајају папир (nR1)	$nR = \text{Frac} \cdot Ei_i / Bi_i / DRDe$	Ei=90, Bi=0.75, Frac=0.4		0.07
Број радника који издвајају пластику (nR2)		Ei=90, Bi=0.6, Frac=0.35		0.08
Број радника који издвајају алуминијум (nR3)		Ei=90, Bi=0.025, Frac=0.02		0.05
Број радника који издвајају стакло (nR4)		Ei=90, Bi=0.1, Frac=0.1		0.13
Ефективна дужина радног дана (DRDe) [h/dan]	$DRD = DRD - \text{PAUZA} - VSS$	DRD [h/dan]	8	7.00
		PAUZA [h/dan]	0.5	
		VSS [h/dan]	0.5	
Површина канцеларијског простора (PK) [m ² /t/dan]	$PK_i = n4$	n4 [m ² /t/dan]	2	2.00
Површина складишног простора (PSP) [m ² /t/dan]	$PSP_i = FM2 \cdot POB \cdot EI_i \cdot BRD / 3 / MB_i$	FM2	2.5	7.50
		POB [m ²]	2	
		EI _i [%]	90	
		BRD [dan]	1	
		3	3	
		MB _i [t]	0.2	
Трошкови земљишта (TZ) [€/t/dan]	$TZ_i = PMRE_i \cdot n6 \cdot CZ / 10000$	n6 [m ²]	4	2469.59
		CZ [€/ha]	150000	
		1 ha - m ²	10000	
Трошкови инжењеринга (TIN) [€/t/dan]	$TIN_i = FIT \cdot TIZ_i$	FIT [%]	30	4321.78
Трошкови опреме (TO) [€/t/dan]	$TO_i = KTO_i + TIO_i$	/	/	26393.59
Трошкови инсталације опреме (TIO) [€/t/dan]	$TIO_i = PTO \cdot KTO_i$	PTO [%]	10	2399.42
Капитални трошкови опреме (KTO) [€/t/dan]	$KTO_i = TK_i + TBU_i + TKO_i + TKS_i + TMA_i + TSVS_i + TVP_i + TBA_i + TOV_i + TDR_i$	/	/	23994.18

Трошкови конвејера (ТК) [€/t/dan]	$TK_i = DKS_i \cdot CK$	CK [€/m]	3500	1019.25
Трошкови бункера (ТБУ) [€/t/dan]	$TBU_i = CBU \cdot nR_i / 2$	CBU [€]	2000	323.57
		2	2	
Трошкови канти за одлагање (ТКО) [€/t/dan]	$TKO_i = CKO \cdot nR_{si} \cdot KIS$	nR_{si} [radnik/t/dan]	0.01	2.82
Кефицијент издвајања стакла (KIS) [%]		CKO [€]	300	
Трошкови каналних спроводника (ТКС) [€/t/dan]		$TKS_i = nR_i \cdot CKS$	CKS [€]	
Трошкови магнета (ТМА) [€/t/dan]	$TMA_i = CMA \cdot KIM$	CMA [€/t/dan]	3000	2700.00
Кефицијент издвајања метала (KIM) [%]		KIM [%]	90	
Трошкови сепаратора вртложним струјама (TSVS) [€/t/dan]	$TSVS_i = CSVS \cdot KIA$	CSVS [€/t/dan]	12000	11760.00
Кефицијент издвајања алуминијума (KIA) [%]		KIA [%]	98	
Трошкови возног парка (ТVP) [€/t/dan]	$TVP_i = CVP$	CVP [€/t/dan]	500	500.00
Трошкови балирки (ТБА) [€/t/dan]	$TBA_i = CBA \cdot UNR$	CBA [€/t/dan]	1200	1140
Удео нестаклених рециклабила (UNR) [%]		UNR [%]	95	
Трошкови отварача џакова (TOV) [€/t/dan]	$TOV_i = COV$	COV [€/t/dan]	1100	0.00
Трошкови добошастог решета (TDR) [€/t/dan]	$TDR_i = CDR$	CDR [€/t/dan]	6500	6500.00
Годишњи трошкови MRF-а (GTMRF) [€/t]	$GTMRF = CRF \cdot KT + GOT$	/	/	11302.50
Фактор повраћаја капитала (CRF) [god ⁻¹]	$CRF = i \cdot (1 + i)^n / ((1 + i)^n - 1)$	n	25	0.07
		i	0.05	
Количина процесираног отпада (KPO) [t/dan]	UGT = GTMRF • KPO	KPO [t/dan]	100	1130250
Укупни годишњи трошкови за одређену количину процесираног отпада (UGT) [€]		/	/	
Трошкови по тони процесираног отпада (TPTP) [€/t]	$TPTP = UGT / KPO / 365$	/	/	30.97
Трошкови по тони издвојеног материјала (TPTI) [€/t]	$TPTI = UGT / KPO / 365 / EI$	/	/	34.41

6 Закључак

Људским активностима се генеришу отпадни материјали који се често одбацују јер се сматрају бескорисним. Овај отпад је обично чврстог агрегатног стања, а реч отпад сугерише да је материјал бескористан и непожељан. Међутим, многи од ових отпадних материја се могу поново искористити и уз правилно управљање могу постати ресурс за индустријску производњу или производњу енергије.

Управљање отпадом је постало један од најзначајнијих проблема нашег времена јер модеран начин живота производи огромне количине отпада, а већина људи жели да сачува свој начин живота, уз истовремену заштиту животне средине и јавног здравља. Индустрија, грађани и државна законодавства траже начине и средства за смањење све веће количине отпада које домаћинства и предузећа одбацују, са циљем његове поновне употребе или безбедног и економичног одлагања.

Неадекватно поступање са комуналним отпадом представља један од највећих проблема са којим се Србија тренутно суочава. Углавном се његово одлагање врши на неуређеним депонијама. Поред тога постоји и проблем дивљих депонија насталих као резултат несавесног понашања становништва чија домаћинства нису покривена организованим сакупљањем отпада. Решење за овакве проблеме представља санација дивљих и изградња санитарних депонија као и изградња постројења која би се бавила третманом отпада.

У оквиру овог рада су, у циљу утврђивања трошкова, израђени математички модели за три типа постројења за третман отпадних материјала. Прво постројење је везано за третман мешаног комуналног отпада, друго је намењено процесирању претходно издвојених рециклабила и последње представља неки вид комбинације претходна два.

Уношењем и варирањем вредности количине дневно процесираног отпада, као главног улазног параметра, за сваки од наведених модела се добијају одговарајући трошкови постројења. Из табеле 5.2 се види да трошкови постројења за третман мешаног комуналног отпада, које процесира 300 тона отпада дневно (што одговара једном граду попут Крагујевца), износе око 2.670.000 €. На исти начин се из табеле 5.3 види да су трошкови постројења за процесирање 100 тона претходно издвојених рециклабила на дан око 545.000 €. Трошкови постројења за третман 300 тона мешаног отпада на дан, од чега је 100 тона измешаних рециклабила, према табели 5.4, износе око 1.130.000 €.

Ови математички модели се могу користити као увид у апроксимативне трошкове изградње постројења за третман чврстог комуналног отпада или постројења за третман рециклабилних материјала. Нарочиту корист од модела могу остварити они који желе да учествују на јавним тендерима, тако што ће, у зависности од количине третираног отпада и врсте постројења, имати приближну представу о трошковима изградње тог постројења.

Литература

- [1] Јовичић, Н., „Управљање чврстим отпадом“, скрипта, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2018.
- [2] UNITED NATIONS, DESA / POPULATION DIVISION, World Urbanization Prospects (2018), преузето са: <https://esa.un.org/unpd/wup/Country-Profiles/>, сајту приступљено у јуну 2018.
- [3] Thomas H. Christensen, „Solid Waste Technology & Management“, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2011.
- [4] John Pichtel, „WASTE MANAGEMENT PRACTICES“, Municipal, Hazardous, and Industrial, Taylor & Francis Group, 2005.
- [5] Vesilind, P.A., Worrel, W.A. and Reinhart, D.R. „Solid waste engineering“, Brooks/Cole, Pacific Grove, USA, 2002..
- [6] Alter, H. and Crawford, B., „Materials recovery processing research“, Office of Solid Waste Management Programs, US EPA, Washington, D.C., USA, 1976.
- [7] Barton, J.R., Poll, A.J., Webb, M. and Whalley, L., „Waste sorting and RDF production in Europe“, Elsevier Applied Science Publishers, London, UK, 1985.
- [8] Vesilind, P.A., Worrel, W.A. and Reinhart, D.R. „Solid waste engineering“, Brooks/Cole, Pacific Grove, USA, 2002.
- [9] Bilitewski, B., Härdtle, G. and Marek, K., „Abfallwirtschaft – Eine Einführung“ (Waste management – an introduction; in German). Springer Verlag, Berlin, Germany, 1991.
- [10] Keller, E. (Hrsg.), „Abfallwirtschaft und Recycling – Probleme und Praxis“ (Waste management and recycling – problems and praxis; in German). Verlag Girardet, Essen, Germany, 1977.
- [11] Hoberg, H. and Schulze, O., „Wiedergewinnung von Nichteisenmetallen aus Abfällen. Aufbereitung fester Abfallstoffe“ (Recycling of nonferrous metals from waste. Processing of solid waste; in German). Haus der Technik e.v., Essen, Germany, 1988.
- [12] Afsari, F., Dimsdale, J.S., „Method of and apparatus for high speed, high quality, contaminant removal and color sorting of glass cullet“, U.S. Patent 7.351.929, 2008.
- [13] Huber, R., Leitner, K., „Method and an apparatus for detecting leaded pieces of glass“, U.S. Patent 8.803.020, 2014.
- [14] Kutila, M., Viitanen, J., Vattulainen, A., „Scrap metal sorting with colour vision and inductive sensor array. In: Proceeding of Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents“, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC), vol. 2, pp.725–729, 2005.
- [15] Koyanaka, S., Kobayashi, K., „Incorporation of neural network analysis into a technique for automatically sorting lightweight metal scrap generated by ELV shredder facilities“, Resour. Conserv. Recycl. 55 (5), 515–523, 2011.

- [16] Rahman, M.O., Hussain, A., Scavino, E., Hannan, M.A., Basri, H., „Segregating recyclable waste papers using co-occurrence features“, In: Proceeding of the 9th WSEAS International Conference on Applied Computer Science (ACS 2009), pp.187–191, 2009.
- [17] Noll, R., Sturm, V., Aydin, Ü., Eilers, D., Gehlen, C., Höhne, M., Lamott, A., Makowe, J., Vrenegor, J., „Laser-induced breakdown spectroscopy—from research to industry, new frontiers for process control“, Spectrochim. Acta B 63 (10), 1159–1166, 2008.
- [18] Mesina, M.B., De Jong, T.P.R., Dalmijn, W.L., „Automatic sorting of scrap metals with a combined electromagnetic and dual energy X-ray transmission sensor“, Int. J. Miner. Process. 82 (4), 222–232, 2007.
- [19] Brunner, S., Fomin, P., Kargel, C., „Automated sorting of polymer flakes: fluorescence labeling and development of a measurement system prototype“, Waste Manage, 38, 49–60, 2015.
- [20] Hasan, A.R., Schindler, J., Solo-Gabriele, H.M., Townsend, T.G., „Online sorting of recovered wood waste by automated XRF-technology“. Part I: Detection of preservative-treated wood waste. Waste Manage. 31 (4), 688–694, 2011.
- [21] Wang, C.Q., Wang, H., Fu, J.G., Liu, Y.N., „Flotation separation of waste plastics for recycling—a review“, Waste Manage. 41, 28–38, 2015.
- [22] Pita, F., Castilho, A., „Influence of shape and size of the particles on jigging separation of plastics mixture“, Waste Manage. 48, 89–94, 2016.
- [23] Bakker, E.J., Rem, P.C., Fraunholz, N., „Upgrading mixed polyolefin waste with magnetic density separation“, Waste Manage. 29 (5), 1712–1717, 2009.
- [24] Vegas, I., Broos, K., Nielsen, P., Lambert, O., Lisbona, A., „Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology“, Constr. Build. Mater. 75, 121–128, 2015.
- [25] Safavi, S.M., Masoumi, H., Mirian, S.S., Tabrizchi, M., „Sorting of polypropylene resins by color in MSW using visible reflectance spectroscopy“, Waste Manage. 30, 2216–2222, 2010.
- [26] Serranti, S., Bonifazi, G., Pohl, R., „Spectral cullet classification in the mid-infrared field for ceramic glass contaminants detection“. Waste Manage. Res. 24, 48–59, 2006.
- [27] Waste Technology, преузето са: <http://www.mbt.landfill-site.com/index.html>, кајту приступљено у јуну 2018.
- [28] Њежин, З., Ходолич, Ј., Стевић, М., „Сепарација комуналног отпада у Новом Саду – искуства и препоруке“, Фестивал квалитета 2006.
- [29] Subba Nishtala, Eric Solano-Mora, „Description of the Material Recovery Facilities Process Model“, Design, Cost, and Life-Cycle Inventory, Октобар 1997.
- [30] Peer Consultants and CalRecovery, „Material Recovery Facilities For Municipal Solid Waste“, Handbook, USEPA, 1991.
- [31] Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., A., McGraw Hill Inc., „Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management Issues“, 1993.