

Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



**Пиролиза и гасификација
канализационог муља**
Мастер рад

Крагујевац, 2020. године

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



**Назив студијског програма: Инжењерство заштите животне средине
Ниво студија: Мастер академске студије
Предмет: Напредне технике третмана вода
Број индекса: 304/2019**

Јована М. Јанковић

**Пиролиза и гасификација
канализационог муља**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. проф. др Вања Шуштершич - ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру мастер рада кандидат треба да изврши преглед литературе и досадашњих истраживања везаних за процес настанка муља из третмана отпадних вода, да приказ различитих решења третмана и диспозиције муља у свету, Европи и код нас, да осврт на законску регулативу везану за третман и диспозицију муља, изврши истраживање могућности искоришћења канализационог муља као енергента, као и да сагледа економски и еколошки аспект примене датог третмана.

Препоручена литература:

- [1] Веселин Благојевић, Вања Шуштершич, Синиша Божичковић: Pyrolysis and gasification in the process of sewage sludge treatment; *Zaštita materijala*, Inženjersko društvo za koroziju, Beograd, Vol. 58, No. 3, 2017, str. 305-312 ISSN 0351-9465
- [2] Recycling of sewage sludges: pyrolysis; Greenlife Ressourcen GmbH, Habersdorferstraße 21b, A-8230 Hartberg;
(http://www.greenlife.co.at/uploads/2/3/2/5/23252088/greenlife_pyrolysis.pdf)
- [3] Kosov V. F., Umnova O. M. and Zaichenko V. M.: The pyrolysis process of sewage sludge; *Journal of Physics: Conference Series* 653, 012032, 2015,
- [4] Biogreen; Интернет страница: <http://www.biogreen-energy.com/pyrolysis-applications/sludge-pyrolysis/>

Ментор:

Др Вања Шуштершич, ред проф.

Резиме

У овом раду су дате дефиниције канализационог муља, поступак његовог добијања, као и основне карактеристике, својства и врсте, а затим су приказани поступци обраде и одлагања канализационог муља. Након тога су детаљније анализирани термички поступци обраде муља, пиролиза и гасификација. Истакнуте су предности и мане примене ових третмана муља (еколошке, економске, утицај на животну средину итд.). У раду су такође дата решења овог проблема у свету и Европи. На крају рада је сагледана евентуална могућност примене ових поступака у Србији.

Кључне речи: канализациони муљ, гасификација, пиролиза..

Abstract

In this paper are presented the definitions of sewage sludge, the procedure for its production, as well as the basic characteristics of sewage sludge, properties and types, and then the procedures for processing and disposal of sewage sludge. After that, thermal processes of sludge, pyrolysis and gasification were analyzed in more detail. The advantages and disadvantages of applying these sludge treatments (economic, environmental impact, etc.) are given. The paper also provides solutions to this problem in the world and in Europe. At the end of the paper, the possibility of applying these procedures in Serbia was considered.

Key words: sewage sludge, gasification, pyrolysis

Садржај:

Увод	2
1. Канализациони муљ	4
1.1. Карактеристике, састав, својства и врсте муља	5
1.2. Главни контаминанти у муљу	8
1.3. Поступци обраде и одлагања муљева.....	11
1.4. Законска регулатива везана за третман и диспозицију муља	13
2. Пиролиза	16
2.1. Поступци пиролизе	17
2.2. Реактори за пиролизу	22
2.3. Састав продуката пиролизе и њихова примена.....	25
3. Гасификација	28
3.1. Поступак гасификације.....	28
3.2. Реактори за гасификацију.....	30
4. Предности и мане примене пиролизе и гасификације.....	37
5. Примена пиролизе и гасификације у свету и Европи.....	40
6. Канализациони муљ у Србији и могуће примене пиролизе и гасификације	47
6.1. Крагујевац	49
6.2. Предлог решења за Крагујевац	50
Закључак.....	53
Литература	55

Увод

Канализациони муљ је нуспроизвод рада уређаја за пречишћавање отпадних вода. Због брзе стопе урбанизације и индустријализације и брзог раста броја становништва, светска заједница суочена је са озбиљним изазовом повезаним са његовим одлагањем или третманом. Постоји хитна потреба за истраживањем нискобуџетних, енергетски ефикасних и одрживих решења за третман, управљање и будућу употребу канализационог муља.

Количина производње муља у Европи варира у различитим земљама (16 - 94 g / дан по особи). Штавише, коначно одлагање муља из отпадних вода зависи од метода обраде муља који се користе на постројењу за пречишћавање отпадних вода.

Канализациони муљ су чврсти, получврсти или течни остаци који настају након процеса прераде отпадне воде. Канализациони муљ је пример сировине за биомасу. Састав органске фракције у биомаси не варира много. Међутим, варијације у садржају воде и пепела су велике. Најпопуларнији начин коначног управљања отпадним муљем је складиштење. У земљама које су технолошки мање развијене, директна пољопривредна примена или складиштење су типични путеви за сигурно одлагање муља из уређаја за пречишћавање отпадних вода. У земљама у којима су практично законски забрањена таква решења (нпр. Европска унија) доступни су само топлотни методи збрињавања. Термо-хемијска конверзија муља из отпадних вода састоји се од следећих процеса:

- сагоревање,
- пиролиза и
- гасификација.

Термо-хемијска конверзија канализационог муља сматра се најперспективнијом алтернативом за одрживо управљање канализационим муљем.

Пиролиза и гасификација представљају термички процес конверзије чврсте масе и добијени производи су: течност (пиролитичко уље), гасови и остаци кокса.

У модерном друштву постоји растућа потреба за коришћењем еколошких система и обновљивих извора енергије. Као потенцијал и обновљиви извор енергије можемо сматрати канализациони муљ. Већином је канализациони муљ одлаган у природу, док је врло мали део третиран. Због неадекватног третирања канализационог муља, постоји велики ризик од утицаја штетних материја на људе и животиње. Осим што талог из канализације може бити главни енергетски потенцијал, термичка обрада омогућава решавање проблема одлагања муља из отпадних вода у природу и загађења околине. Коришћење канализационог муља као енергента смањило би коришћење фосилних горива као и одлагање муља из отпадних вода на депоније, а уједно би и смањило ризик од развоја и ширења болести због присуства штетних супстанци.

Пиролиза представља термички процес претварања чврсте масе који се одвија у недостатку кисеоника, а добијени производи су: течност (пиролитичко уље), гасови и остаци кокса. Количина продукта пиролизе зависи од хемијског састава муља из отпадних

вода и услова у којима се одвија пиролиза. Компоненте канализационог муља се термички разграђују различитим брзинама. Тешко је прецизно одредити доњу температурну границу на којој започиње термичко распадање канализационог муља. Процес пиролизе одвија се у 4 фазе:

- фаза 1 (до 200°C);
- фаза 2 (од 200°C до 280°C);
- фаза 3 (од 280°C до 500°C);
- фаза 4 (преко 500°C).

Процесом пиролизе при ниским температурама, високим стопама загревања и кратким периодом масовног боравка у реакционој зони постиже се максимална количина течног производа.

Процесом пиролизе при ниским температурама и ниским стопама загревања постиже се максимална количина остатка кокса.

Процесом пиролизе при високим температурама, ниским стопама загревања и дугим периодима гасне фазе у реактору постиже се велики принос пиролитичког гаса.

Гасификација се може посматрати као наставак процеса пиролизе. После пиролизе током процеса гасификације даље реагују гас, пиролитичко уље и остаци кокса. У поређењу са пиролизом, у процес гасификације се додаје одређена количина кисеоника.

Процес гасификације одвија се на високим температурама (700-1000°C). Главне компоненте гаса које настају процесом гасификације су: CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄ и други угљоводоници. Процес гасификације одвија се у две фазе након завршетка процеса пиролизе:

- фаза 1 (преко 500°C): испарљиве материје и део чврстог остатка реагују са кисеоником и формирају CO₂ и мале количине CO;
- фаза 2 (смањење зоне сагоревања): непотпуни производи сагоревања (H₂O, CO₂ и незасићени производи пиролизе) реагују са воденом паром, смањујући температуру насталих продуката гасификације (CO, CO₂, CH₄, H₂ и N₂). Редукована температура је (~ 700-950 °C).

1. Канализациони муљ

Канализациони муљ (Слика 1.) је нуспроизвод обраде отпадних вода у постројењим за пречишћавање. Отпадне воде долазе из индустријских, градских или руралних извора. Талог из отпадних вода потиче из примарних, секундарних и терцијарних процеса обраде. У Радном документу о муљу 3. нацрт (EC DG ENV, 2000) предлаже се употреба дефиниције муља коју је предложио CEN (Европски комитет за стандардизацију) која гласи: „мешавина воде и чврстих материја одвојених од различитих врста вода као резултат природних или вештачких процеса“. Канализациони муљ би тада био „талог из градских уређаја за пречишћавање отпадних вода“. Талог канализације припада великој групи биоразградивог отпада (биоотпад) што значи „сваки отпад који је у стању да се подвргне анаеробној варењу или аеробном разградњи“ [1].



Слика 1. Канализациони муљ [11]

Канализациони муљ је полутврди материјал који је остао након испуштања очишћене воде из постројења за пречишћавање отпадних вода. Чврсти материјал се таложи из комуналних или индустријских отпадних вода, када се канализациони отпад очисти и задржава у великим резервоарима између пола сата до једног и по сата.

По доласку у постројење за пречишћавање отпадних вода свежа канализација или отпадне воде прво се уливају у комору са шљунком. Ово је дугачак уски резервоар који је дизајниран да успори проток тако да се чврсте честице као што су песак и каменчићи, зрна кафе и љуске јаја таложе ван воде. Затим се вода улива у „таложник“.

У примарном таложнику приближно 50% суспендоване чврсте материје ће се наталожити за сат и по, за то време (у просеку) доспевајућа смеша чврстих и течних онечишћења из отпадних вода остаје у резервоару.

Вода се прелива на површини бране и наставља на даље чишћење (третман). Оно што остаје у примарном таложнику је скуп чврстих материја познатијих као канализациони муљ или примарни талог. За почетак се каже да је „свеж“, али убрзо се растворени ваздух искористи и анаеробни процеси (распадање или труљење без ваздуха (кисеоника)) постану активни.

Овај муљ би почео да трули, за кратко време када анаеробне бактерије постану

активне и то би довело до појаве непријатаног мириса. Зато се он уклања из примарног таложника пре него што се то догоди.

Обично се свежи муљ из отпадних вода непрекидно извлачи из резервоара механичким стругачима и преноси на више начина, ради даљег третмана и збрињавања [2].

Такође, велика количина муља се уклања и у даљем поступку пречишћавања отпадних вода. То се врши захваљујући секундарним таложницима.

Накнадни таложници су пратећи уређаји биоаерационим базенима у оквиру биолошких поступака. Накнадни таложници врше уклањање активног муља из процеса после биоаерационих базена, биолошких филтера, или ротационих биодискова. После биоаерационих базена активни муљ се понаша по зонској теорији таложења, па су бољи таложници са вертикалним током (кружни) од хоризонталних таложника (четвороугаони).

Евакуација муља из накнадних таложника се врши централно муљном пумпом из муљне шикане, ка којој се муљ усмерава помоћу радијалних згртача који споро ротирају. Код поступака код којих се врши рецикулација повратног муља неопходна је његова брза евакуација из таложника, што се најчешће врши усисавањем помоћу муљне пумпе, дислоциране у муљној шахти ван таложника [3].

1.1. Карактеристике, састав, својства и врсте муља

Карактеристике муљева су:

- велика количина воде (96-99%);
- сува материја муља се састоји од органских материја (приближно 75%);
- садржи нутријенте;
- тешки метали и органска загађења која потичу из индустријских отпадних токова који се уливају у канализацију;
- патогени микороорганизми.

Канализациони муљ је течност специфичног мириса и садржи око 4% чврстих материја. Он се одлаже и у сировом стању, али се најчешће третира пре одлагања, рециклаже или даљег третмана [4].

Тешко се могу унапред одредити основне карактеристике канализационог муља. Идеално је најпре изградити технолошку линију пречишћавања отпадне воде и тек пошто се произведе муљ, утврдити његова својства и најповољније поступке даље прераде. Тако се избегава предимензионирање објеката за обраду муља и цео поступак управљања муљем се побољшава.

Муљ отпадних вода нема трајно исте карактеристике. Технолошким тестовима потребно је чешће испитивати карактеристике муља. Муљ као остатак након биолошке обраде отпадних, комуналних или индустријских вода садржи и вредне органске материје (око 70%). Његова енергетска вредност се може искористити за производњу енергије, или у производњи компоста. Први циљ је, без обзира на поступак обраде муља смањење запремине (издвајање што већих количина воде из муља), јер се тиме смањују трошкови даље обраде [5].

Својства муља по којима се разликују један од другог, односно од којих ће зависити избор начина њихове даље обраде и збрињавања, могу се поделити на:

- физичка;
- хемијска;
- биолошка.

Физичка својства су:

- таложивост муља – зависи од начина везивања воде у муљу. Укупна вода коју муљ садржи може бити слободна (лако се уклања таложењем), везана капиларно (тада се теже одваја) или интермолекуларна (може се уклонити само термичким поступком);
- стишљивост – способност цеђења;
- гранулометријски састав;
- влажност муља;
- вискозност муља;
- густина муља;
- топлотна вредност муља или калоријска вредност муља.

Хемијска својства представљају:

- рН вредност муља – ова вредност свежег муља износи око 7 (неутрална средина). Када вредности рН опада на 6, муљ прелази у стање распадања, кисело врење;
- садржај суве материје – количина суве материје након сушења на 105° С;
- фракција суве органске материје.

Биолошка својства карактеришу:

- садржај патогених микроорганизама – садржај црва, јаја црва, друге паразите, сапрофитне организме и патогене микроорганизме;
- токсичност муља [4].

Класификација муљева се може извршити на основу места настанка и то на:

- примарни муљ – Под примарним муљем се подразумева муљ који настаје у примарној обради отпадне воде, а који није помешан са другим муљевима који се враћају у процес обраде. Примарни муљ садржи органске материје (песак, глину, карбонате, оксиде метала), органске лако разградиве материје (протеине, масти, угљене-хидрате), тешко разградиве материје (метале), али и поједине врсте живих организама (бактерије, вирусе и паразите);
- секундарни муљ (биолошки муљ) - је производ биолошких поступака обраде отпадних вода, односно онај муљ који је издвојен из биолошког реактора процесима аеробне и анаеробне разградње органских материја. Секундарни муљ садржи биомасу, неразградиву суспендовану органску и минералну материју, која се не може издвојити примарном обрадом муља;
- терцијални муљ - настаје кад је у поступцима обраде отпадне воде одвојена терцијална фаза. Наиме, муљ настаје у поступку хемијске обраде отпадне воде, који подразумева потребу да се из отпадне воде уклоне материје као што су тешки метали, азот и фосфор. Терцијални муљ настаје када се употребљавају хемијска средства да се уклоне или исталоже тешко одстрањиване материје. Овај муљ садржи остатке реакција додатих хемикалија са отпадном водом и њеним садржајем (при коагулацији), адсорбенсе са адсорбираним састојцима из отпадне воде, алге и друго. Терцијални муљ, уколико се не обради и не одложи на адекватан начин, може бити погубан за животну околину, јер садржи остатке

реакција додатих хемикалија с отпадном водом и њеним садржајем, који могу бити јако токсичне;

- комбинација муљева – настаје комбинацијом муљева различитог порекла [4], [5].

Чврсте честице муља састоје се од многих састојака, а његов стварни састав може бити веома променљив у зависности од врсте постројења за пречишћавање и његових метода рада. У ствари, канализациони муљ је далеко највећи по количини међу свим нуспроизводима насталим након третмана отпадних вода. Муљ је остатак који настаје током примарног (физичког и / или хемијског), секундарног (биолошког) и терцијарног третмана (уз секундарни, често уклањање хранљивих састојака). Важно је знати састав муља како би се ефикасно одложио или третирао. Типична композиција и својства нетретираног и дигестираног муља приказана је у Табели 1. [6].

Табела 1. Типичан хемијски састав и особине нетретираног / дигестираног муља [6]

Састав муља	Нетретиран		Дигесиран		Активан опсег
	Опсег	Типично	Опсег	Типично	
Укупне суве чврсте честице (TS), %	2.0 - 8.0	5.0	6.0 - 12.0	10.0	0.83 - 1.16
Испарљиве чврсте материје (% of TS)	60 - 80	65	30 - 60	40	59 - 88
Растворљив етар	6 - 30	-	5 - 20	18	-
Екстракт етра	7 - 35	-	-	-	5 - 12
Протеин (% of TS)	20 - 30	25	15 - 20	18	32 - 41
Азот (N, % of TS)	1.5 - 4	2.5	1.6 - 6.0	3.0	2.4 - 5.0
Фосфор (P ₂ O ₅ , % of TS)	0.8 - 2.8	1.6	1.5 - 4.0	2.5	2.8 - 11.0
Калијумска ђубрива (K ₂ O, % of TS)	0 - 1	0.4	0.0 - 3.0	1.0	0.5 - 0.7
Целулоза	8.0 - 15.0	10.0	8.0 - 15.0	10.0	-
Гвожђе (не као сулфид)	2.0 - 4.0	2.5	3.08 - 8.0	4.0	-
Силицијум-диоксид (SiO ₂ , % of TS)	15.0 - 20.0	-	10.0 - 20.0	-	-
Базност (mg/L as CaCO ₃)	500 - 1,500	600	2,500 - 3,500		580 - 1,100
Органске киселине (mg/L as HAc)	200 - 2,000	500	100 - 600	3,000	1,100 - 1,700
Садржај енергије	10,000 - 12,500	11,000	4,000 - 6,000	200	8,000 - 10,000
pH	5.0 - 8.0	6.0	6.5 - 7.5	7	6.5 - 8.0

1.2. Главни контаминанти у муљу

Неки састојци отпадних вода, док пролазе кроз систем за пречишћавање, могу повећати своју концентрацију у талогу. Иако неколико органских и минералних састојака у муљу може имати добре карактеристике које потпомажу ђубрењу, други можда нису пожељни због санитарних и еколошких ризика. Ови нежељени састојци се углавном могу груписати у:

- метале;
- органска једињења;
- патогене организме.

Њихово присуство у талогу је изузетно променљиво у зависности како од карактеристика сирове отпадне воде, тако и од система за пречишћавање. Отпадне воде из „здравог“ становништва имају знатно мање патогена од оних из „нездравог“. На сличан начин, талог из кућних отпадних вода има низак садржај тешких метала, који обично не представља опасност по животну средину, док је већина хемијских контаминаната у муљу последица испуштања индустријских отпадних вода у канализацију.

Добра пракса управљања муљем мора узети у обзир овај аспект, који многе компаније за водоснабдевање и санитарне услуге често не поштују. Одржива политика заштите животне средине која има за циљ рециклирање муља, захтева најбољи економски остварив квалитет муља. Предузећа за водоснабдевање и канализацију морају имати јасну, добро дефинисану и технички засновану политику прихватања отпадних вода, чиме се избегавају загађивачи који могу угрозити квалитет муља и проузроковати употребу скупог третмана отпадних вода.

Метали

Иако метали могу евентуално бити отровни за биљке и животиње, чак и у ниским концентрацијама у којима се обично јављају у кућним отпадним водама, обично се не јавља хронична токсичност услед њиховог одлагања. С друге стране, исто не важи за одлагање индустријских отпадних вода, а углавном и за њихов талог, јер су они главни извори концентрованих метала. Метали у отпадним водама углавном настају због испуштања индустријских отпадних вода из следећих индустрија у јавне канализационе системе:

- галванско полирање;
- хемијска индустрија (производња органских једињења, кожарство, фармацевтска индустрија);
- металопреправљачка индустрија (ливнице);
- хемијска индустрија (производња неорганских једињења, перионице веша, индустрија уља, производња боја и пигмената) [7].

Главни извори контаминације металима који могу да се нађу у муљевима из канализационих система који примају индустријске отпадне воде представљен је у Табели 2.

Табела 2. Главни извори метала који се налазе у муљу [7]

Метал	Главни индустријски извори контаминације
Бакар	- неметални минерални производи: стакло, цемент и производи од бетона; - металуршки производи: галванизација, обојени метали и одливци; - механички производи; електричне и електронске компоненте; - дрвна индустрија; намештај; - кожа, крзно и слични производи; - хемијска индустрија: неорганска једињења и елементи; лепкови; нафтна индустрија; пластика, производи од пластичних материјала; боје и лакови; сапуни и детерџенти; козметика и мириси; текстил; болнице; перионице веша; цеви за топлу воду.
Цинк	- неметални минерални производи: стакло, цемент и производи од бетона; - металуршки производи: гвожђе, челик, галванизирање, обојени метали; - механички производи; електричне и електронске компоненте; - намештај; гума; кожа, крзно и слични производи; - неколико хемијских индустрија; лепкови; експлозивни; нафтна индустрија; уља и воскови; пестициди; пластика; боје и лакови; сапуни и детерџенти; - фармацеутски производи; козметика и мириси; текстил; болнице; перионице веша.
Никл	- неметални минерални производи: стакло, цемент и производи од бетона; - металуршки производи: гвожђе, челик, галванизирање, обојени метали; - механички производи; електричне и електронске компоненте; - намештај; кожа, крзно и слични производи; - неколико хемијских индустрија; боје и пигменти; експлозивни; пластика; боје и лакови; сапуни и детерџенти; - фармацеутски производи; козметика и мириси; текстил; перионице веша; фотографска опрема.
Жива	- металуршки производи: галванизирање, обојени метали - механички производи; електричне и електронске компоненте и уређаји; - намештај; папир и картон; - неколико хемијских индустрија; лепкови; експлозивни; ђубрива; пестициди; пластика; производи од пластичног материјала; боје и лакови; - фармацеутски производи; текстил; болнице; лабораторије; фотографска опрема
Олово	- неметални минерални производи: стакло, цемент и производи од бетона; - металуршки производи: гвожђе и челик, галванизирање, обојени метали; - механички производи; електричне и електронске компоненте; - намештај; гума; кожа, крзно и слични производи; - неколико хемијских индустрија; лепила, бојила и пигменти; експлозивни; нафтна индустрија; уља и воскови; пластика; боје и лакови; сапуни и детерџенти; - фармацеутски производи; козметика и мириси; текстил; болнице; перионице веша; фотографска опрема; водоводне инсталације

Постоје други метали као што су кадијум, хром, асрен, селен...а који могу да се нађу у отпадним водама.

Органска једињења

Главни извори органских једињења су: хемијска индустрија, индустрија за производњу пластике, за производњу механичких производа, фармацеутска индустрија, индустрија челика, нафтна индустрија, перионице и дрвна индустрија. Најчешћи органски загађивачи у индустријским отпадним водама су: цијанид, фенол, метил хлорид, толуен, етил бензен, трихлоретилен, тетрахлоретилен, хлороформ, нафтаген, бутилбензилфталат, акролеин, ксилен, крезол, ацетофенон, метил-собутил-ацетон, дифениламин, анилин, етил ацетат итд. [7].

Патогени организми

Организми који се налазе у муљу могу бити сапрофити, симбиоти или паразити. Само су паразити патогени и могу да узрокују болести код људи и животиња. У муљу се може наћи пет група патогених организама: (а) хелминти (цревна глиста), (б) протозое, (ц) гљивице, (д) вируси и (е) бактерије. Патогени организми могу потицати из људских извора, такође могу потицати из животињских извора, чије се излучевине елиминишу кроз канализациону мрежу или преко канализационих одвода, углавном глодара. Што се тиче патогена у муљу, епидемиолошка испитивања показала су да бактерије, вируси, јаја хелминта и протозоеске цисте представљају ризик за здравље људи и животиња. Ови ризици су последица:

- велике учесталости паразитизма који се јавља код становништва у различитим деловима света;
- дугог преживљавања јаја хелминта у животној средини;
- мала заразна доза (једно јаје или циста може бити довољна да инфицира домаћина).

Количина патогена у муљу из одређене општине увелико варира и зависи од:

- социјално-економског нивоа становништва;
- санитарних услова;
- географског региона;
- присуства пољопривредних индустрија;
- врсте обраде муља.

Популација патогена у талогу такође варира у складу са горе наведеним условима. Међутим, на њихову концентрацију утичу и процеси обраде муља. У фазама сепарације организми се причвршћују за круте честице које се талоче. Стога се може наћи иста почетна популација, иако у већим концентрацијама. Други фактор који треба узети у обзир је проценат присутних патогена, али неодрживих, јер процеси третмана могу да их денатуризују, односно да ови организми губе своју заразност[7].

1.3. Поступци обраде и одлагања муља

Избор поступака обраде и одлагање муља највише зависи од његових карактеристика. Муљ је, у општем случају, веома различит. Од количине муља и концентрације суспендованих честица највише и зависи начин обраде муља.

Концентрација суспендованих честица има највише утицаја на реолошке карактеристике муља. У општем случају, муљеви се не понашају као њутновски флуиди већ имају особине пластичних и псеудопластичних материјала и важно је познавати њихове реолошке карактеристике (вискозитет у првом реду) да би се на одговарајући начин извела опрема за транспорт и обраду муљева: пумпе, мешалице, вентили, цевоводи. Остале карактеристике муљева (способност обезбеђивања, топлотна вредност, хемијске и биолошке карактеристике) разматраће се везано за поједине поступке обраде и одлагања муљева. Муљеви се, најчешће, морају обрадити пре одлагања.

Међутим, који ће се од поступака применити и којим редоследом, зависи од читавог низа фактора: физичких, хемијских и биолошких карактеристика муља, расположивости и карактеристика места за одлагање муља, могућности рецикулације појединих конституената муља, цене и прихватљивости појединих поступака обраде муља итд. [3].

Најважнији поступци обраде муља су:

- Стабилизација – процес обраде муља којим се смањује садржај органске материје да би се спречило труљење. Могућа је аеробна стабилизација муља (процес разградње органске материје у муљу помоћу аеробних микроорганизама распрашених у резервоару (дигестору) којима се уноси ваздух) и анаеробна стабилизација муља (процес разградње органске материје у муљу у затвореним посудама без присуства ваздуха (анаеробним дигесторима);
- Кондиционирање муља – поступак којим се побољшавају својства муља. То је поступак којим се смањује број микроорганизама, а повећава се учинак одводњавања и смањују се непријатни мириси. Поступак се може вршити хемијски и термички. Хемијски се врши додавањем хемијских средстава, где се дозе утврђују за сваки муљ посебно. Термички је овај поступак и стабилизација муља. Најчешће се врши на температури од 160 до 210°C, на којој се муљ задржава 30 до 60 минута;
- Цеђење – неопходан поступак због даље обраде и превоза. Може се постићи природним цеђењем и испаравањем на пољима за сушење муља, механичким цеђењем са притиском или вакуум цедиљкама или центрифугирањем на центрифугама за муљ;
- Угушћивање – поступак повећања концентрације суспендованих честица и смањење запремине муља - може бити гравитационо и флотационо.
- Одлагање – сирови муљ је најнеприкладнији за одлагање. Након што се осуши на пољу за сушење, ако није погодан за коришћење у пољопривреди или за производњу енергије, потребно га је негде одложити. Места за одлагање су депонија, разбацавање по обрадивом земљишту, лагуне, море [8].

Сваки процес прераде муља има своје предности и недостатке. При избору поступка неопходно је размотрити два питања: у којој мери поступак обезбеђује заштиту средине и

какви су економски ефекти примене продуката из прераде.

Методe – поступци уклањања муља могу се поделити у две групе:

- утилизациони поступци у којима је циљ максимално искоришћење енергије и сировина из муља (сагоревање, пиролиза, гасификација итд.);
- ликвидациони поступци у којима је циљ елиминисање целе масе муља да би се спречило нагомилавање и дејство штетних компонената из муља (сагоревање муља, коришћења топлотне енергије, трајно затрпавање итд.).

Према примењеној технологији, поступци прераде муља могу бити:

- биолошки, у којима физичко – хемијску разградњу органских компоненти из муља врше живи организми (депоније, компостирање);
- термички (хемијски) поступци код којих се физичко – хемијска разградња муља врши коришћењем хемијске енергије садржане у муљу. Ту спада: сагоревање, пиролиза, хидролиза, гасификација;
- механички поступци који имају за циљ само механичку трансформацију појединих компонената или муља у целини. Један од ових поступака је пресовање неорганске компоненте и добијени пресовани блокови користе се у грађевинарству.

Компостирање је најједноставнији начин обраде биолошки разградивог муља. То је биохемијски процес прераде компонената муља у стабилан производ - компост који је сличан хумусу. Компостирање је аеробан процес и одвија се у мезофилним и термофилним стадијумима. Мезофилне бактерије су активне при температури од 15 - 20°C, а термофилне при температурама од 45 - 60°C. Оптимална температура за компостирање је 35°C. Коришћење компоста заснива се на утицају компоста на земљиште и на хемијском саставу компоста.

Користи се:

- у пољопривреди (побољшава састав земљишта);
- за ревитализацију површина огољених пожаром;
- за побољшање квалитета земљишта непосредно уз друмске саобраћајнице.

Поступци механичко-биолошке обраде муља развили су се на бази досадашњих искустава одлагања остатка муља у земљама Западне Европе. Механичко – биолошка обрада, врши се само за остатак муља после издвајања корисних компоненти из муља.

Основне предности механичко – биолошке обраде остатка муља су:

- материјали који нису подесни за одлагање у депоније издвајају се и одлажу у посебне депоније;
- количина депонијског филтрата у телу депоније се смањује;
- мања је продукција депонијског гаса;
- побољшава се збијање и густина муља.

За разлику од биохемијских анаеробних и аеробних дуготрајних процеса разградње муља, гориве компоненте муља могу се обрадити и термички. При термичкој преради муља одвијају се хемијске реакције при којима се ослобађа енергија (егзотермне реакције), или је потребно доводити енергију (ендотермне реакције).

Термичка прерада муља изводи се следећим поступцима:

- сагоревање;
- пиролиза;
- гасификација [3].

Састав муља из отпадних вода један је од најважнијих фактора који дефинише правилни избор методе за термичко третирање муља. Из тог разлога, потребно је обратити пажњу на техничку и елементарну анализу из које добијамо енергетску вредност и састав муља. Сува материја, нижа вредност загревања и састав муља су важни фактори који утичу на то да ли ће се муљ користити као гориво [10].

1.4. Законска регулатива везана за третман и диспозицију муља

Како се Република Србија, као земља кандидат за чланство, налази у процесу приступања ЕУ, може се констатовати да је током протекле деценије највећи део одредби законодавства ЕУ у области заштите радне и животне средине скоро у потпуности пренет у националне прописе Републике Србије. Тренутно се на националном нивоу у области заштите животне средине примењује око 15 различитих стратегија уз 55 различитих закона и 100 правилника коју проистичу из тих закона. Такође додатно, на локалном нивоу, свака општина има на десетине Одлука везаних за комуналне послове који се обављају у циљу заштите животне средине.

Најважније стратегије, приказане по датуму доношења, у овој области су:

1. Национална стратегија одрживог развоја
2. Стратегија увођења чистије производње
3. Стратегија развоја званичне статистике
4. Стратегија управљања отпадом
5. Национални програм заштите животне средине

Постојећи законски оквир и основни закони у области заштите животне средине приказани су на Слици 2.



Слика 2. Постојећи законски оквир и хијерархија закона у ЗЖС [8]

Закон о заштити животне средине (2011. година) уређује интегрални систем заштите животне средине, који чине мере, услови и инструменти за одрживо управљање и очување природне равнотеже, целовитости, разноврсности и квалитета природних вредности и услова за опстанак свих живих бића, спречавање, контролу, смањивање и санацију свих облика загађивања животне средине, промовисање и употребу производа, процеса, технологије и праксе који мање угрожавају животну средину, примену посебних правила понашања у управљању отпадом од његовог настанка до одлагања, односно спречавање или смањење настајања, поновну употребу и рециклажу отпада, издвајање секундарних сировина и коришћење отпада као енергента, увоз, извоз и транзит отпада [8].

У оквиру закона о водама ("Сл. гласник РС", бр. 30/2010, 93/2012, 101/2016, 95/2018 и 95/2018-др.закон) којим се уређује правни статус вода, интегрално управљање водама, управљање водним објектима и водним земљиштем, извори и начин финансирања водне делатности, надзор над спровођењем овог закона, као и друга питања значајна за управљање водама, обухваћен је део који се тиче и канализационог муља, и то:

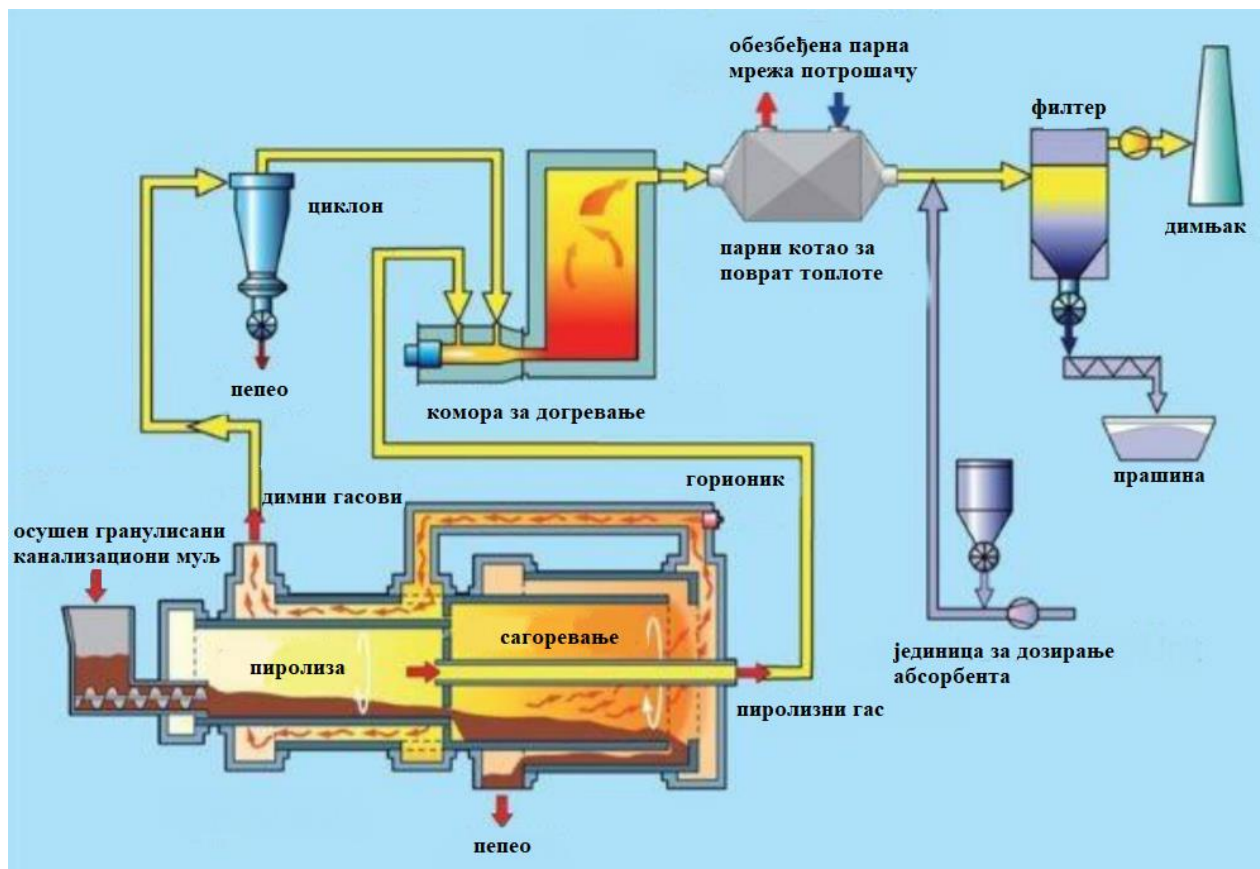
1. Значење појмова, Члан 3, тачка 41-а: „муљ јесу обрађени или необрађени остаци који настају у процесу пречишћавања комуналних отпадних вода“;
2. Водни објекти за сакупљање, одвођење и пречишћавање отпадних вода и заштиту вода, Члан 19: „водни објекти за сакупљање, одвођење и пречишћавање отпадних вода и заштиту вода су: главни колектори, постројења за пречишћавање отпадних вода, постројења за прераду отпадних муљева, постројења за прераду процедурних вода санитарних депонија чврстог

- отпада, испусти из постројења у пријемник (реципијент) и други припадајући уређаји, као и бране са акумулацијама за побољшање квалитета вода“;
3. Забране ради заштите квалитета воде, Члан 97, тачка 4-а: „ради заштите квалитета вода, забрањено је: одлагање у воде муља, обрађеног или необрађеног, из постројења за пречишћавање комуналних отпадних вода“;
 4. Обавеза пречишћавања отпадних вода, Члан 98: „муљ који је настао у процесу пречишћавања комуналних отпадних вода обрађује се, користи или одлаже на начин којим се не угрожава животна средина и здравље људи, у складу са овим законом, прописом којим се уређују граничне вредности емисије загађујућих материја у воде и посебним законима којима се уређује пољопривредно земљиште и управљање отпадом“ [9].

2. Пиролиза

Пиролиза (Слика 3.) је термохемијски процес конверзије чврсте масе који се одвија у недостатку кисеоника, а добијени производи су: течност (пиролитично уље), гасови и остаци кокса. Количина продукта пиролизе зависи од хемијског састава муља из отпадних вода и услова у којима се одвија пиролиза. Компоненте канализационог муља се термички разграђују различитим брзинама. Тешко је прецизно одредити доњу температурну границу на којој почиње термо-хемијска разградња канализационог муља. Процес пиролизе одвија се у 4 фазе:

- фаза 1 (до 200°C): уклања се влага и ослобађају се испарљиве материје, попут етанске (сирћетне) и метанске (мравље) киселине;
- фаза 2 (од 200°C до 280°C): пиролиза ослобођених киселина, пиролитичких гасова из воде и нафте (CO , CO_2);
- фаза 3 (од 280°C до 500°C): ослобађање запаљивих испарљивих продуката, као што су CO , CH_4 , H_2 метанал, мравља киселина, етанска киселина и метанол;
- фаза 4 (изнад 500°C): процес карбонизације је завршен. Ако се реакциони производи не уклоне из реакционе зоне одмах након формирања, започињу секундарне реакције и реакција кокса са гасом [12].



Слика 3 . Поступак пиролизе канализационог муља [12]

Производи пиролизе могу да се користе као горива, са или без претходног унапређивања, или се могу користити као сировина за хемијску индустрију или индустрију материјала. Због природе процеса, принос корисних производа је висок у односу на друге процесе. Производи пиролизе се све више усавршавају и стога могу да се користе са већом ефикасношћу. Процес пиролизе подразумева примену горива као што су: угаљ, животињски и комунални отпад, канализациони муљ, отпаци од хране, папир, картон, пластика, гума и биомаса.

У зависности од брзине загревања као и других параметара процеса разликују се следећи процеси пиролизе:

- спора пиролиза;
- брза пиролиза;
- флеш пиролиза и
- каталитичка пиролиза.

Наведени процеси се разликују по хемијским реакцијама, приносу и квалитету добијених производа као што су:

- пиролитички гас,
- пиролитичко уље и
- чврсти (коксни) остатак [13].

2.1. Поступци пиролизе

Каталитичка пиролиза – пиролитичко уље добијено процесима споре, брзе и флеш пиролизе по својим карактеристикама не задовољава услове за директно мешање са фосилним дизелом, па су потребни додатни процеси којима би се смањио садржај кисеоника и влаге да би се постигло смањење вискозности, повећала оксидациона стабилност и смањила корозивна деловања. Међутим, додатни процеси код наведених процеса пиролизе, утицали су на повећање цене добијања пиролитичког уља. Каталитичком пиролизом биомасе са различитим типовима зеолитних катализатора може се добити пиролитичко уље са карактеристикама које задовољавају услове за мешање са дизелом што омогућава директно коришћење у моторима. Највећи принос пиролитичког уља, које се користи као компонента за мешање са фосилним дизелом или као гориво, добија се поступком брзе пиролизе [14].

Брза пиролиза – загрева чврсте делове до повишених температура, 450°C-750°C, у инертном окружењу, обично тако што циркулише димни гас или пиролизни гас. Хемијске реакције вођене топлотом испарују и термолизују органска једињења у гасове мале молекулске тежине (H_2 , CO, CO_2 нижи угљоводоници) и мање реактивне органске остатке који се могу рекомбиновати у кондензовану пару. Овим процесом се добијају 3 фракције – чврсти угаљ састављен од нереагованог угљеника и пепела, уљана течност која се меша са водом (био-уље) и запаљиви гас. Брза пиролиза односи се на пиролизу где је време задржавања гаса испод 2,5 секунде што подстиче производњу течности смањењем времена трајања реакције термичког пуцања и реформисања паре, ради претварања уља у трајне гасове. Процеси пиролизе се обично изводе како би се остварио максимални принос био-уља. Једном пречишћено уље се лако складишти и транспортује. Услови реактора могу утицати на то како се производи деле у свакој фази. Пепео служи да катализује

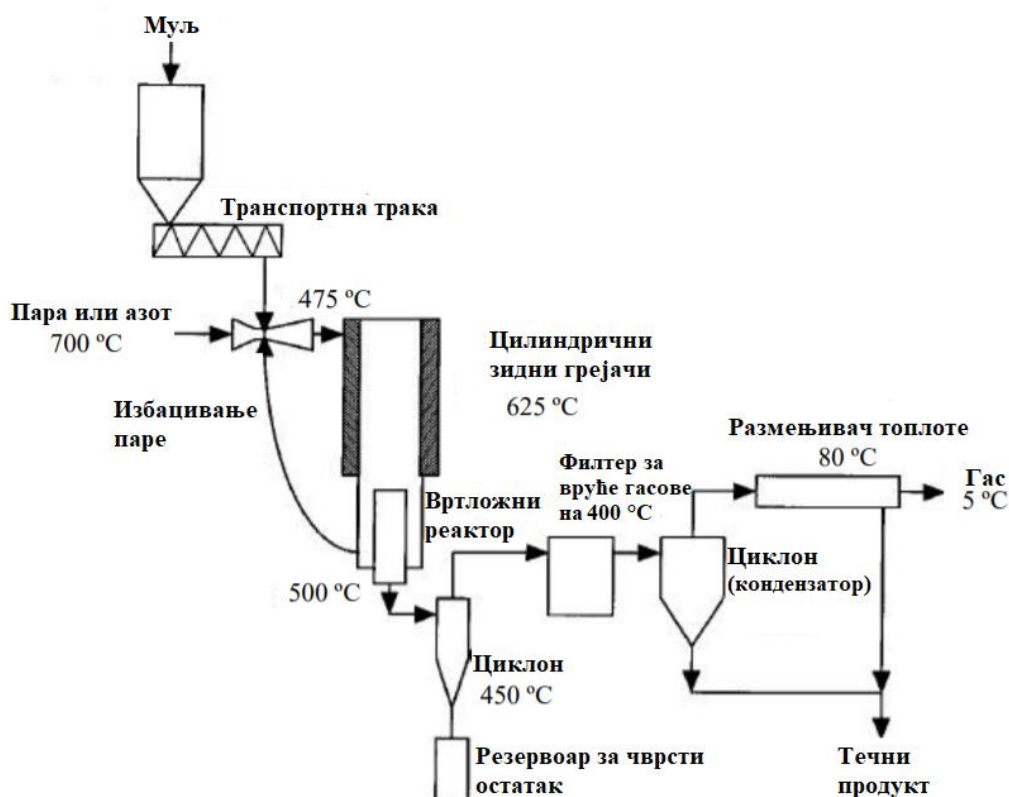
пуцање прекурсора нафте у врсте гаса. Висок садржај пепела у муљу доводи до максималних приноса уља од око 50%. Гасификација чађи је ограничена на релативно ниским температурама потребним за максималан принос уља, што смањује укупну ефикасност. Приноси уља изнад 30 % нису неуобичајени. На високим температурама, део кондензоване паре може се даље трансформисати у H_2 , CO , CO_2 унутар реактора реакцијом мењањем стања воде и гаса, или реакцијом поновног формирања паре. Могући су приноси гаса до 70 % иако је укупна ефикасност процеса пиролизе на високим температурама мања од ефикасности процеса гасификацију. Пиролитичко уље из муља је густо, корозивно, оптерећено водом и слабо сагориво. Од 2013. пиролитичко уље добијено из муља није показало као ефикасно клипно моторно гориво без значајније физичке и хемијске прераде. Конкретно, садржај воде у био-уљу произведеном из муља ствара потешкоће у постизању стабилног паљења код мотора са компресијским паљењем. Међутим, доказано је да пиролитичко био-уље служи као гориво у турбинама приликом сагоревања. Можда је могуће задовољити потребе за топлотом и водоником за водено паљење и поступак хидрообrade употребом пиролитичког гаса. Део гаса за пиролизу може се директно сагоревати ради топлоте, а остатак реформисати паром да би се добио водоник. У случају муља, пиролиза производи три фазе горивог производа, свака са значајним уделом почетне енергије. Сагоревање чађи има исте недостатке као и директно сагоревање, нарочито ако се ради о сложене чишћењу гаса. Управљање процесом пиролизе ради постизања максималне производње гаса приближава се условима парне гасификације. Због своје способности да произведе течне гориво које се лако складишти, брза пиролиза се обично узима у обзир при производњи течне биогорива. Генерално, пиролиза представља бољу опцију за производњу горива за транспорт у великим биорафинеријама који могу ефикасно интегрисати надоградњу био-уља [15].

Посматрано са становишта међусобног контакта биомасе и извора топлоте разликују се четири поступка брзе пиролизе:

- аблативна пиролиза (лат. Аблатив - односити, одвајати);
- пиролиза у реактору са барботажним флуидизованим слојем;
- пиролиза у флуидизованом и циркулирајућем слоју и
- вакуум пиролиза.

Аблативна пиролиза

Процес у вртложном реактору приказан на Слици 4., састоји се у следећем: честице биомасе величине око 5 mm, мешају се са рециклирајућом паром и уводе у реактор тангенцијално брзином већом од 400 m/s тако да честице врше притисак на зидове реактора великом центрифугалном силом.



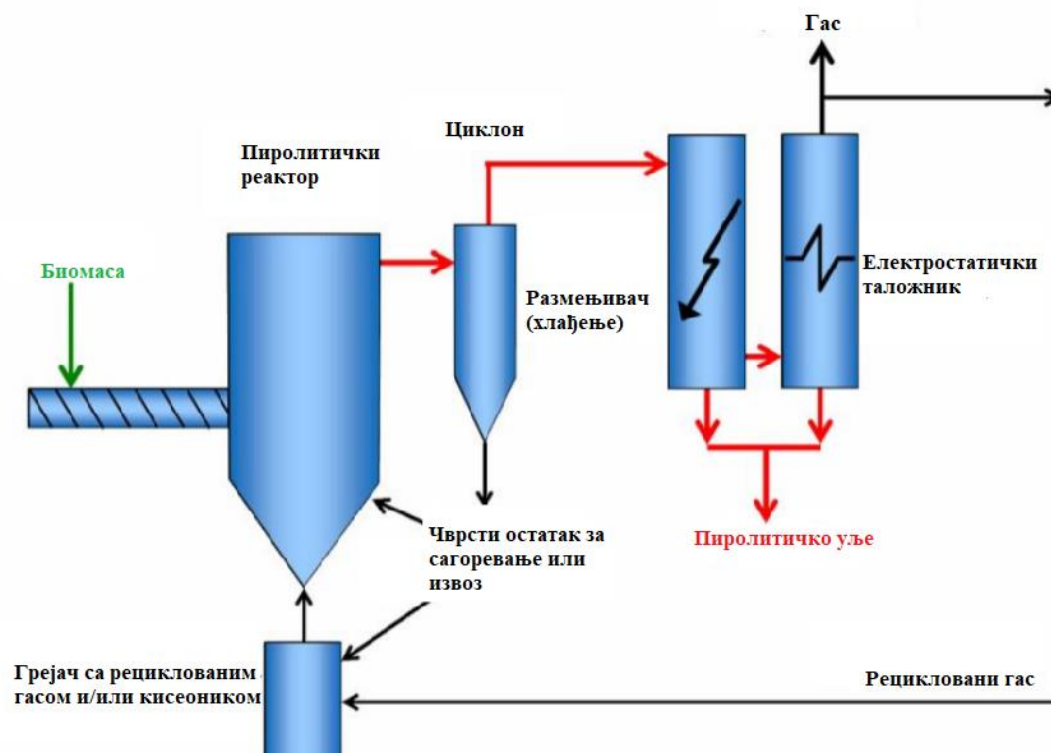
Слика 4. Аблативн пиролиза [13]

На рачун топлоте зидова реактора (приближно 600°C) честице биомасе прелазе у течан филм који испарава. Добијени гасовити производи напуштају реактор и одводе се у циклон са чијег врха се издвајају врели гасови, а са дна кокс. Гасови се даље одводе на филтрацију на повишеној температури (приближно 400°C) како би се издвојиле и најфиније честице кокса и алкални метали. После филтрације топли гасови се уводе у топлотни размењивач из кога се издваја кондензована течност и гасна фаза.

Поступком аблативне пиролизе се остварује принос пиролитичког уља у облику смеше органске фазе и воде до 67% (масени удео) и кокса до 13% (масени удео) у односу на суву материју сировине [16].

Брза пиролиза у реактору са барботажним флуидизованим слојем

Упрошћена шема процеса брзе пиролизе у реактору са барботажним флуидизованим слојем дата је на Слици 5. Биомаса после ситњења (величине честица 2–3 mm) и сушења се помоћу затвореног пужног транспортера уводи у реактор. Флуидизација честица у реактору постиже се рециркулираним гасом који се пре увођења у реактор загрева у размењивачу топлоте.



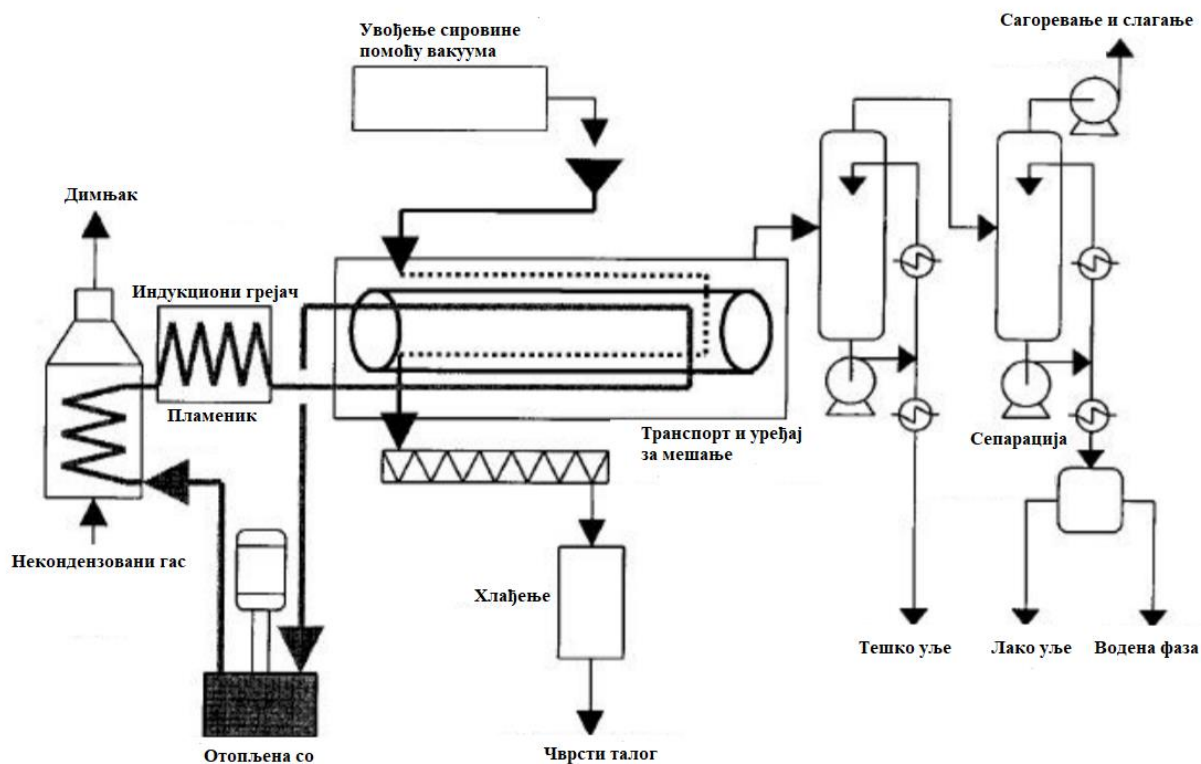
Слика 5. Процес брзе пиролизе у реактору са барботажним флуидизованим слојем [17]

Приноси производа, у односу на суву материју сировине су: био-уља приближно 70–75% (масени удео), а чврстог остатка (кокса) приближно 20% (масени удео) [17].

Вакуум пиролиза

Вакуум пиролиза је процес термичке разградње биомасе на температури 450°C и притиску 15 kPa. Шема процеса приказана је на Слици 6. Гориво, претходно осушено и уситњено, уводи се у реактор помоћу вакуума. Загревање горива и превозићење у гасовиту фазу се постиже помоћу две паралелне плоче које се загревају помоћу смеше минералних соли загрејаних до температуре од 530°C . Загревање смеше минералних соли се постиже на рачун топлоте сагоревања отпадног гаса који се издваја у току процеса пиролизе. За одржавање константне температуре у реактору користи се индукциони електрични грејач. Паре конвертоване биомасе одводе се из реактора у два кондензатора помоћу вакуум пумпе. Из првог кондензатора се са дна издваја тешка течна фаза, а са врха фракција која се одводи у други кондензатор. Са врха другог кондензатора се издвајају отпадни гасови који се користе за сагоревање у самом процесу, а са дна се издваја смеша воде и лаке течне фазе. Настала смеша се раздваја у сепаратору на водену фазу и лаку фазу, био-уље.

При процесу вакуум пиролизе не користи се гас носач. Биомаса као гориво може имати већу величину честица у односу на друге процесе брзе пиролизе. Принос производа процеса при преради горива је: 35–47% (масени удео) био-уља, 17–20% (масени удео) пиролитичке воде, 24–34% (масени удео) кокса и приближно 12% (масени удео) гаса [13].

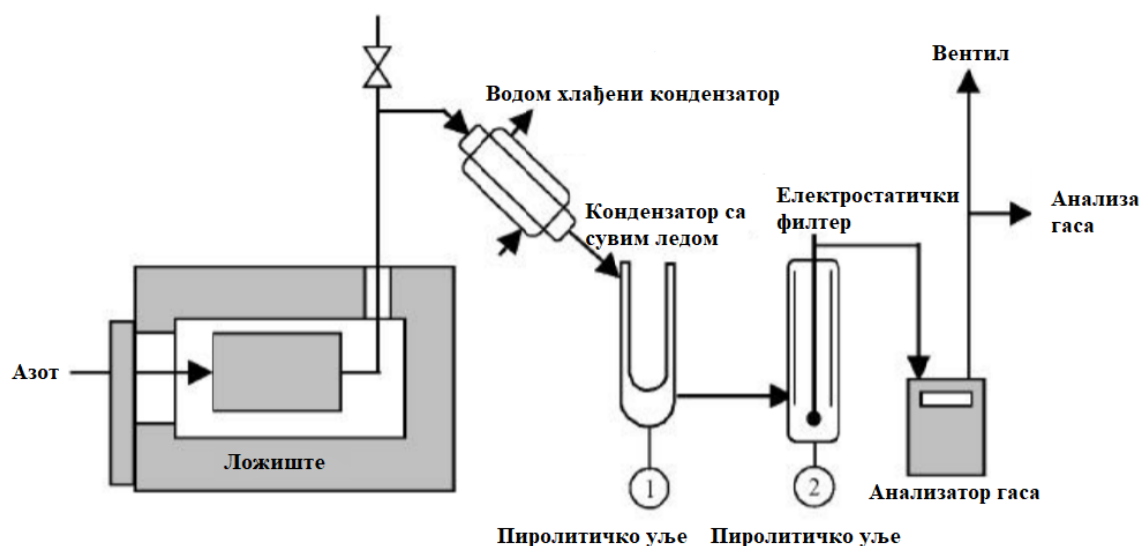


Слика 6. Вакуум пиролитички процес [13]

Разматрани процес има комерцијалну примену при рециклирању аутомобилских гума и отпадних муљева. Такође се истражује могућност примене за рециклирање других отпадних материјала органског порекла (медицински отпад, пластични отпад, комунални чврсти отпад, нафтни муљеви и други индустријски отпад) [13].

Спора пиролиза

Спора пиролиза одвија се при температурама већим од 400 °C и при дугом времену боравка гасне фазе (4–8 минута). Брзина загревања креће се од 1 до 5 °C/s. При наведеним условима, гасовита компонента производа има висок принос услед завршених секундарних реакција. Крајњи принос чврстог остатка смањује се повећавањем температуре процеса од 400 до 700 °C. Течни производ достиже максималну вредност при температури од 550 °C и смањује на температури од 700 °C. Смањени принос чврстог остатка при вишим температурама јавља се услед пораста приноса испарљивих материја. Долази до секундарних реакција, што подразумева мању производњу течне фазе и већи принос гаса. На Слици 7. дат је шематски приказ процеса споре пиролизе [18].



Слика 7. Просечна шема споре пиролизе [19]

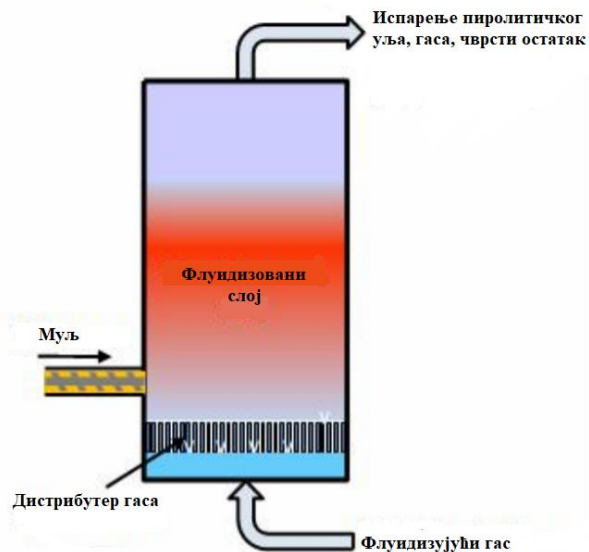
Флеш пиролиза

Флеш пиролизу карактерише велика брзина загревања ($> 1000\text{ }^{\circ}\text{C/s}$), кратко време боравка (0.1–1s) чврстих и испарљивих материја и различит температурски опсег у зависности од жељеног производа у проточном реактору или реактору са флуидизованим слојем, са циљем да се добије максималан принос течног производа. При температурама између 450 и 750°C , постиже се приближно 80% од укупне масе течне фазе и истовремено, услед велике брзине реакције, настаје мање кокса, а топлотна моћ гаса је повећана за 5–10% [18].

2.2. Реактори за пиролизу

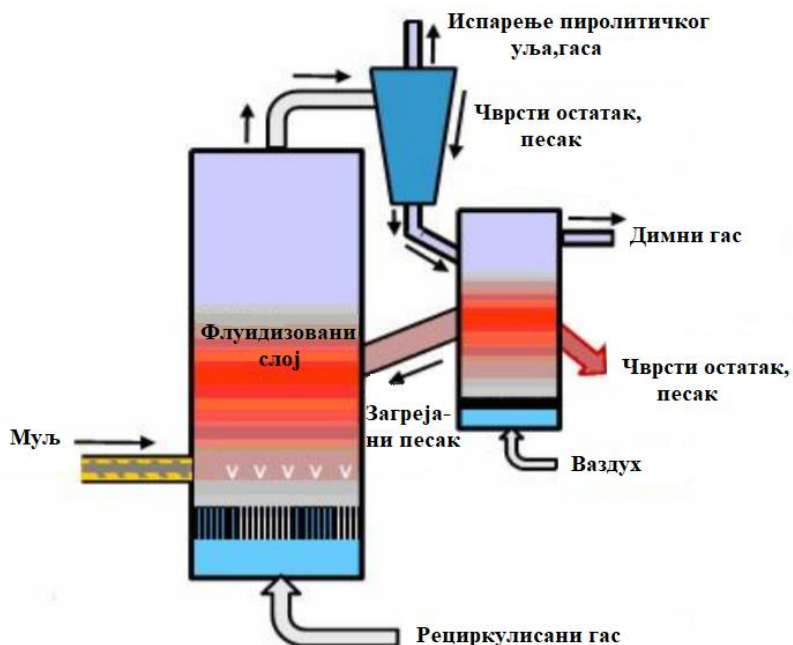
Постоји више врста реактора за пиролизу. Најчешће се користе реактор са барботажним флуидизованим слојем, ротирајући конусни реактор, реактор са циркулационим флуидизованим слојем и реактор за вакуум пиролизу.

Реактори са барботажним флуидизованим слојем (Слика 8.) су једноставнији за пројектовање у односу на друге реакторе и карактерише их велика контактна површина гаса и чврсте материје, добар трансфер топлоте, једноставна контрола температуре и велики капацитет за складиштење топлоте. Употребом поменутих реактора углавном се постиже висок принос течне фазе (око 70% од укупне масе суве биомасе). Да би се обезбедиле велике брзине загревања потребно је користити гориво са малим димензијама честица [20].



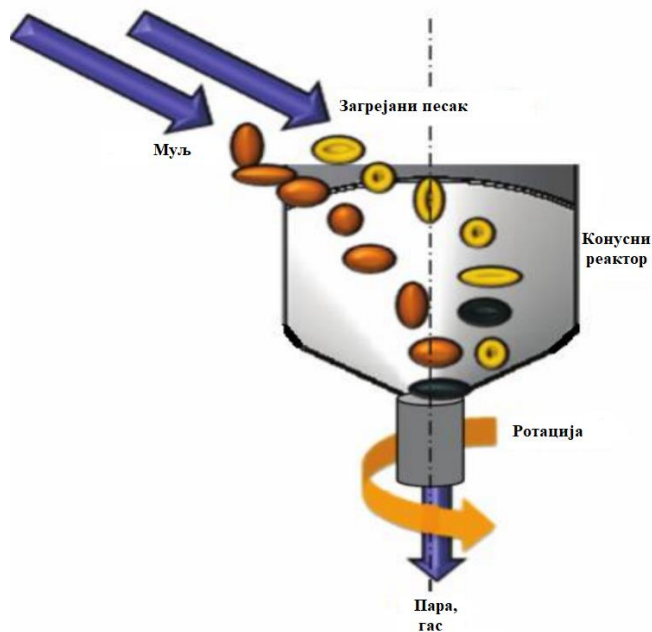
Слика 8. Реактор са барботажним флуидизованим слојем [20]

Реактори са циркулационим флуидизованим слојем (Слика 9.) слични су са реакторима са барботажним флуидизованим слојем, али имају краће време боравка чврстог остатка што доводи до веће брзине гаса, пара и чврсти остатак брже напуштају реактор и већи је садржај чврстог остатка у биоуљу. У поређењу са реакторима са барботажним флуидизованим слојем, реактори са циркулационим флуидизованим слојем имају већи радни капацитет, бољи контакт гаса и чврсте материје и побољшану способност да пиролизују чврсте материје које је тешко флуидизовати, али се ређе користе. Топлотом се снабдевају углавном из секундарног горионика за чврсти остатак [21].



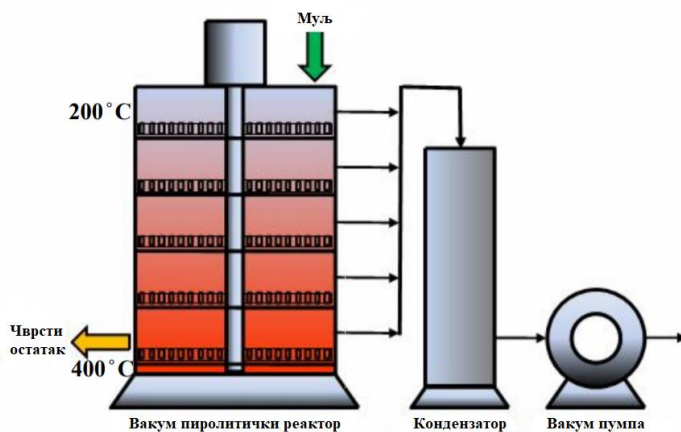
Слика 9. Реактори са циркулационим флуидизованим слојем [20]

У ротирајући конусни реактор за пиролизу (Слика 10.) честице биомасе на собној температури и загрејани песак уводе се при дну купе, мешају и транспортују на горе ротацијом купе. Притисак је мало изнад атмосферског притиска. Може се постићи брзо загревање и кратко време боравка гасовите фазе [21].



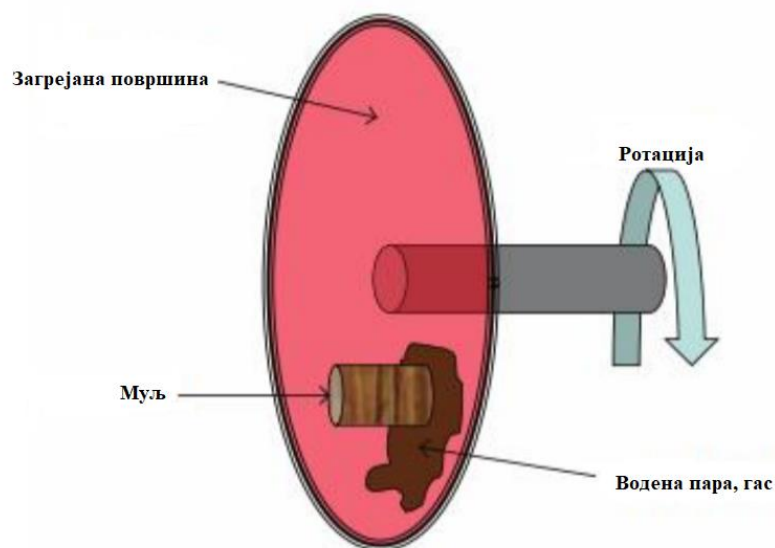
Слика 10. Ротирајући конусни реактор за пиролизу [20]

Реактор за вакуум пиролизу (Слика 11.) чини више загрејаних кружних плоча. На горњој плочи температура је приближно 200 °С, а на доњој приближно 400 °С. Са горње плоче биомаса доспева до доњих плоча помоћу стругова. Приликом кретања биомаса се суши и подлеже процесу пиролизе. У разматраној врсти реактора није потребан гас носач. Када биомаса дође до најниже плоче преостаје само чврсти остатак. И ако је брзина загревања биомасе релативно мала, време боравка паре у зони пиролизе је кратко. Као резултат, принос течне фазе у овом процесу је релативно скроман, приближно 35–50% суве основе, док је принос чврстог остатка висок [21].



Слика 11. Реактор за вакуум пиролизу [20]

Реактор за аблативну пиролизу, приказан на Слици 12. Аблативна пиролиза подразумева стварање високог притиска између честице биомасе и загрејаног зида реактора. То омогућава неометани трансфер топлоте са зида реактора на биомасу што изазива топљење течног производа из биомасе. Клизећи по зиду реактора биомаса оставља течни филм који испарава и напушта зону пиролизе. Као резултат неометаног преноса топлоте и кратког времена боравка гаса, принос течне фазе може да буде чак до 80%. Притисак између биомасе и зида постиже се или механички или центрифугалном силом. Ког механичког система, велики комад биомасе притиска се уз ротирајућу загрејану плочу [21].



Слика 12. Реактор за аблативну пиролизу [21]

2.3. Састав продуката пиролизе и њихова примена

Пиролитичко уље, односно течни производ, представља хомогену мешавину органске компоненте и воде (15–30%, масени удео). Вода потиче од присутне воде у полазној сировини и такође се ствара током реакције пиролизе. Присутна вода утиче на смањење топлотне вредности и температуре паљења био-уља, као и на смањење вискозности. Присутна вода се не може уклонити поступком дестилације [22].

Пиролитичко уље има широку примену и може се користити као:

- гориво за сагоревање у бојлерима, пећима и за производњу енергије;
- гориво или компонента за мешање са фосилним дизелом за дизел моторе и
- сировина за добијање хемијских компонената, адхезионих средстава, анхидрованих шећера.

Велики садржај кисеоника у пиролитичком уљу указује на присуство бројних поларних група у једињењима присутним у пиролитичком уљу, која условљавају велику вискозност, термичку нестабилност и корозивно дејство.

Поменуте особине се могу побољшати различитим поступцима обраде пиролитичког уља као што су:

- хидродеоксигенација у присуству катализатора Со-Мо, Ni-Мо и њихових оксида на носачу Al_2O_3 , у атмосфери H_2 или CO ; присутан кисеоник се уклања као H_2O и CO_2 ;
- каталитички крекинг пиролизних пара у присуству различитих катализатора при чему се кисеоник уклања као H_2O , CO_2 или CO [22].

Гасовита компонента – се углавном састоји од CO , CO_2 и CH_4 . У мањем садржају су присутни H_2 , етан, пропан, пропилен, бутан, бутен, пентан и др. У поређењу са гасом добијеним процесом гасификације пиролитички гас има већу топлотну вредност и може се користити као гориво за сагоревање у гасним турбинама у индустријске сврхе и као гориво у домаћинствима [11].

Састав некондензујућих пиролизних гасова добијених током процеса пиролизе приказан је у Табели 3. Неопходно је приметити да је највећа концентрација горућих гасова (H_2 , CO , CH_4 , C_nH_m) добијена на 620°C [32].

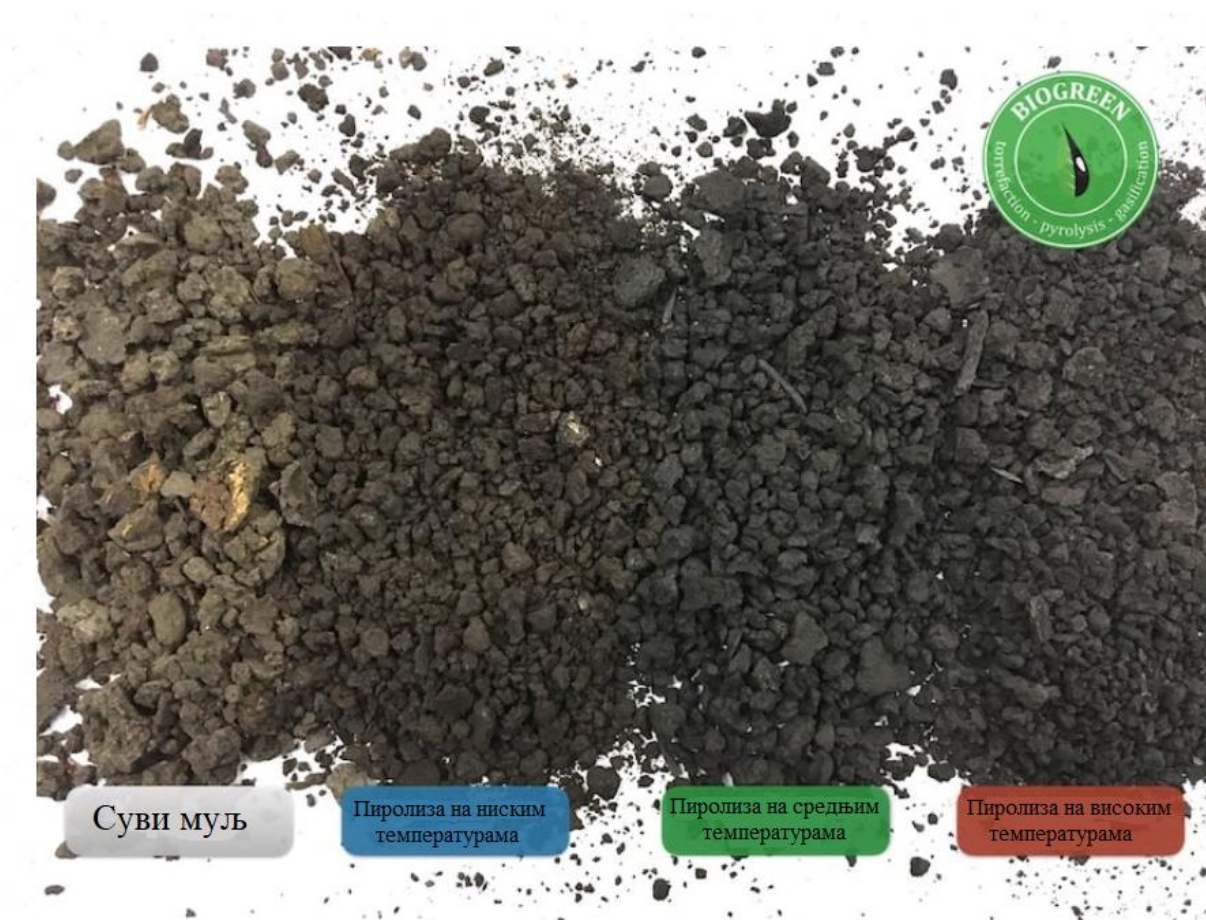
Табела 3 . Састав некондензујућих пиролизних гасова

t, °C	H_2 , %	CO , %	CO_2 , %	CH_4 , %	N_2 , %	C_nH_m , %	Други, %
260	0	2.8	46.3	0	40.1	0	10.8
350	1.1	5.4	69.8	0.9	18.7	0.5	3.6
470	7.2	5.8	56.6	7.1	5.2	7.3	10.8
520	14.1	5	33.9	15.2	7.3	7.9	16.6
570	3.2	3.2	13.5	7.9	43	7.5	21.7
620	30.5	2.9	20.3	19.1	6.7	11.3	9.2

Чврсти остатак (кокс) – се састоји од елементарног угљеника са водоником и његов принос у процесу пиролизе најчешће износи од 20 до 26% [12]. Може се користити: као чврсто гориво у бојлерима, самостално или у мешавини са биомасом:

- за добијање активног угљеника и
- у гасификационим процесима за добијање гаса богатог водоником који се користи у термичком крекингу [13].

На Слици 13. представљене различите варијанте чврстог остатка (кокса) у зависности од температуре на којима се одвија пиролиза.



Слика 13. Изглед кокса у зависности од температуре [34]

3. Гасификација

Гасификација је термохемијски процес при коме долази до конверзије чврстог горива у гасовито гориво. Процес гасификације се одвија при високим температурама (700–1000 °C), које не дозвољавају да се процес сагоревања развије и тиме утроши сва горива материја.

Гасификација се може посматрати као наставак процеса пиролизе. После пиролизе током процеса гасификације даље реагују гас, пиролитичко уље и коксни остаци. У поређењу са пиролизом, у процес гасификације се додаје одређена количина кисеоника. Главне компоненте гаса које настају процесом гасификације су: CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄ и други угљоводоници (сингас) [11].

Током процеса гасификације канализациони муљ пролази кроз физичке и хемијске промене. Хемијске реакције се одвијају у присуству паре уз помоћ кисеоника из атмосфере.

3.1. Поступак гасификације

Поступак гасификације се одвија кроз четири различите процесне зоне:

- зона сушења – процес у коме се врши испаравање влаге из биомасе на температури од ~100 °C;
- зона пиролизе – процес у коме се ослобађају кокс и друге испарљиве материје;
- зона сагоревања – испарљиве материје и део чврстог остатка реагују са кисеоником и формирају CO₂ и мале количине CO;
- зона редукције – процес у коме продукти непотпуног сагоревања (H₂O, CO₂ и несагорели продукти пиролизе) реагују са воденом паром и тиме смањују температуру насталих продуката гасификације (CO, CO₂, CH₄, H₂ и N₂). Температура редукције је (~ 700-950 °C).

Током процеса гасификације канализациони муљ пролази кроз физичке и хемијске промене. Хемијске реакције се одвијају у присуству паре уз помоћ кисеоника из атмосфере.

Зона сушења

У зони сушења долази до испаравања влаге из пољопривредне биомасе на (~100°C).

Зона пиролизе

Производи пиролизе зависе од температуре, притиска, времена боравка и топлотних губитака. До 200°C избацује се само вода. Између 200 и 280°C ослобађају се угљен – диоксид (CO₂) и вода. Права пиролиза се одвија између 280 и 500 °C, при чему настају велике количине кокса и гасова који садрже угљен – диоксид. Између 500 и 700°C производња гаса је мала и настаје водоник (H₂).

Зона сагоревања:

Сагориве материје чврстог горива обично садрже угљеник, водоник и кисеоник. При потпуном сагоревању CO₂ се добија од угљеника из биомасе, а вода се добија из водоника,

обично у виду водене паре. Реакција сагоревања је егзотермна и даје теоретску температуру оксидације од 1450 °C. Стога, основне реакције су:

- $C (\text{гориво}) + O_2 \rightarrow CO_2 + \text{топлота} (-393 \text{ MJ/kg mol})$
- $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O (-242 \text{ MJ/kg mol})$

Зона редукције:

У зони редукције настају продукти непотпуног сагоревања (вода, угљен – диоксид и несагорели продукти пиролизе) и одвијају се следеће хемијске реакције:

- $C + H_2O (\text{пара}) \rightarrow CO + H_2 (-122.6 \text{ MJ/kg mol})$
- $C + CO_2 \rightarrow 2CO (-164.9 \text{ MJ/kg mol})$
- $C + 2H_2 \rightarrow CH_4 (+75 \text{ MJ/kg mol})$
- $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 (+42 \text{ MJ/kg mol})$
- $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O (-42.3 \text{ MJ/kg mol})$
-

Као што је већ споменуто гасификација канализационог муља се дели на три корака и то су:

- (1) сушење,
- (2) пиролиза и
- (3) термичка обрада.

У фази сушења уклања се садржај воде из канализационог муља као влага. Износ суве чврсте супстанце из сушача износи између 85-93% суве чврсте материје у зависности од типа инсталираног гасификатора. Ова фаза се одвија на температури од око 150°C. Једном када се талог практично осуши, његова температура се подиже на 400°C, што је случај када долази до пиролизе (друга фаза). У завршном кораку, производи пиролизе, кондензована и некондензована пара и чађ подвргавају се гасификацији (термички фаза), где се оксидују, а затим редукују и претварају у чађ, пару, кокс и гасове. Муљ се оксидује са суб-стехиометријским уносом кисеоника. Термичка фаза се јавља при температури између 800 и 1400°C. Додатна горива попут угља или нафтног кокса потребна су за одржавање жељених температура гасификације у реактору [6].

После термичке фазе, температура сировог синтетичког гаса се смањује гашењем водом, суспензијом и / или хлађењем рециклираног сингаса (смеша гасова која се добија гасификацијом - од синтезе гаса или синтетичког гаса). Даље хлађење може се извршити разменом топлоте у расхладном систему сингаса, пре него што се честице уклоне. Честице се хватају у води и филтрирају из воде. Алтернативно, честице се могу уклонити сувом филтрацијом или филтрацијом врућег гаса. Влага у сингасу кондензује се када се хлади испод своје тачке рошења. Било која вода за пречишћавање честица и кондензати за хлађење сингаса садрже неке гасове растворљиве у води (NH_3 , HCN , HCl , H_2S). Даље усавршавање сингаса условљено је крајњом употребом производа сингаса, али обично укључује уклањање сумпорних једињења (H_2S). Различити токови воде који настају услед хлађења и чишћења сингаса обично се рециклирају на гасификатору или у скрубелу након што се уклоне чврсте материје. Мали део воде мора да се очисти из система да би се избегло нагомилавање растворених соли. Добијена вода се затим враћа у процес. Кондензат гаса такође може да се одстрани паром ради уклањања амонијака, угљен-диоксида и водоник-сулфида. Све фазе се одвијају у реактору за гасификацију, чији рад

варира зависно од врсте[6].

Најчешћи реактори који се користе за гасификацију су:

- реактор са фиксним слојем;
- реактор са флуидизованим слојем;
- реактор са циркулационим (покретним) слојем;
- истосмерни проточни реактор.

Реактори са фиксним слојем и флуидизованим слојем обично су ватростални или са воденим хлађењем да би заштитили реакцијску комору од високих температура, а имају ротирајућу или фиксну решетку. Реактори са покретним слојем се углавном индиректно загревају кроз металну реакциону комору и ређи су од рекатора са фиксним или флуидизованим слојем, мада је једно од најновијих достигнућа у примени топлотне гасификације у талог канализације LurgiRhurgas процес заснован на циркулационом флуидном слоју. Овај термички процес може да произведе гас калоријске вредности од око 23 MJ/m^3 , који се добија од повећаног контакта доведеног од рециркулирајућег флуидизованог медија.

На располагању су само ограничени подаци о емисијама гасификације канализационог муља. Ово је разумљиво, јер су емисије веома променљиве и зависе од типа гасификатора, карактеристика муља, услова процеса (температура и притисак) и система за климатизацију гаса. Дефинисано је да се емисије диоксида, фурана, живе и других тешких метала, NO_x , N_2O , и CO значајно смањују мада постоји велика забринутости због повећаних концентрација тешких метала који се могу јавити код произведене шљаке. Откривена су органска једињења попут бензена, толуена, нафталена и аценафталена на веома ниским нивоима у произведеном гасу из неких система за гасификацију. Међутим, када се гас користи као гориво и сагорева у гасној турбини, емисије ових једињења или других органских опасних загађивача ваздуха или нису детектоване или су присутне у веома малим концентрацијама. Додатно гориво коришћено за одржавање жељених температура у реактору не повећава емисију CO_2 , па стога доприноси производњи више гаса[6].

3.2. Реактори за гасификацију

У литератури се може пронаћи велики број различитих врста гасификатора. Најчешће се користе следеће врсте гасификатора:

1. Гасификатор са покретним или фиксним слојем:

- а) гасификатор са улазном струјом оксиданта;
- б) гасификатор са силазном струјом оксиданта;
- ц) унакрсни гасификатор.

2. Гасификатор са флуидизованим слојем;

- а) гасификатор са циркулационим слојем;
- б) гасификатор са барботажним слојем.

3. Истосмерни проточни гасификатор

- а) гасификатор са протоком надоле и
- б) гасификатор са протоком нагоре [14].

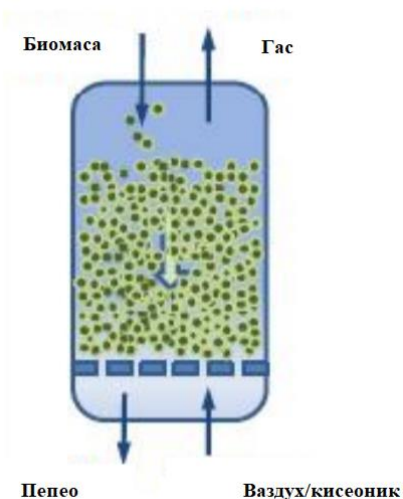
Основне разлике између наведених гасификатора су:

- начин увођења: биомаса се уводи у горњи део гасификатора или са стране, а затим покреће гравитацијом или ваздушним током;
- гасификациони агенс који се користи;
- начин загревања: делимично сагоревање биомасе у гасификатору (директно загревање) или спољним извором (индиректно загревање), као што је кружење инертног материјала;
- температурски опсег;
- опсег притиска при коме се одвија процес у гасификатору.

Гасификатор са фиксним слојем

У гасификаторима са фиксним слојем биомаса се обрађује пролазећи кроз зоне сушења, пиролизе и сагоревања коксног остатка. Гасификатори са фиксним слојем су најстарији тип гасификатора и углавном се користе у мањим постројењима. Како су развијени пре савремених система са компјутерским управљањем, релативно су једноставни за рад и одржавање. Услед високих температура које се постижу у зонама сагоревања коксног остатка, гасификатори са фиксним слојем имају велики потенцијал за уклањање пепела и шљаке, што утиче на њихову поузданост. Гасификатори са фиксним слојем могу бити реактори са током нагоре и реактори са током надоле који имају различите оперативне карактеристике.

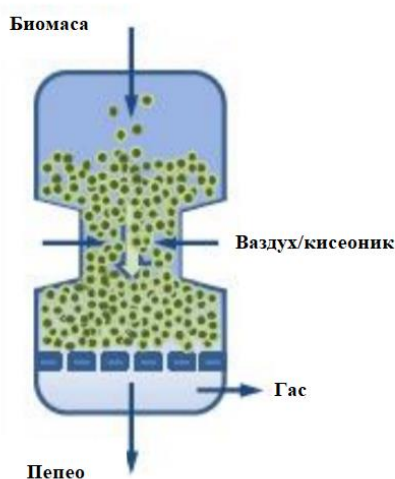
- Гасификатор са узлазном струјом оксиданта
Гасификатор са узлазном струјом оксиданта је најједноставнији и најстарији тип гасификатора. Код ове врсте гасификатора, биомаса се уводи у горњи део реактора, док се ваздух, кисеоник или пара уводе у доњи део реактора, крећу се на горе, а произведени гас излази кроз горњи део реактора. Потпуно сагоревање чврстог остатка одвија се на дну слоја, ослобађајући CO_2 и H_2O . Врео гас ($\sim 1000^\circ\text{C}$) на путу ка врху гасификатора проласком кроз слој наилазеће биомасе, која се уводи одозго, редукује се до CO и H_2 и затим хлади до 750°C . Крећући се нагоре, редукујући гас пиролизује силазећу суву биомасу и на крају исушује долазећу влажну биомасу, остављајући реактор на прилично ниској температури ($\sim 500^\circ\text{C}$) [22]. Шематски приказ гасификатора са узлазном струјом оксиданта дат је на Слици 14.



Слика 14. Шематски приказ гасификатора са узлазном струјом оксиданта[14]

Предности коришћења гасификатора са узлазном струјом оксиданта огледају се у томе што се поменути гасификатори могу користити за примену у постројењима малих димензија, могу да користе гориво са високим садржајем влаге и дају низак садржај угљеника у преосталом пепелу. Недостаци гасификатора са узлазном струјом оксиданта су ограничење количине горива, висок принос пепела што захтева опсежно чишћење синтезног гаса пре примене у мотору, турбини или за синтезу [14].

- Гасификатор са силазном струјом оксиданта
У гасификатору са силазном струјом оксиданта, гориво и гасификациони агенс крећу се у истом смеру (Слика 15.). Постоје различите реакционе зоне у реактору са силазном струјом оксиданта. У зони сушења, влага испарава из биомасе како се полако креће на доле, ка зони пиролизе. У зони пиролизе, биомаса прелази у чврсти остатак, пару и гас. Неки од продуката пиролизе сагоревају. Као резултат, произведени гас је релативно чист.



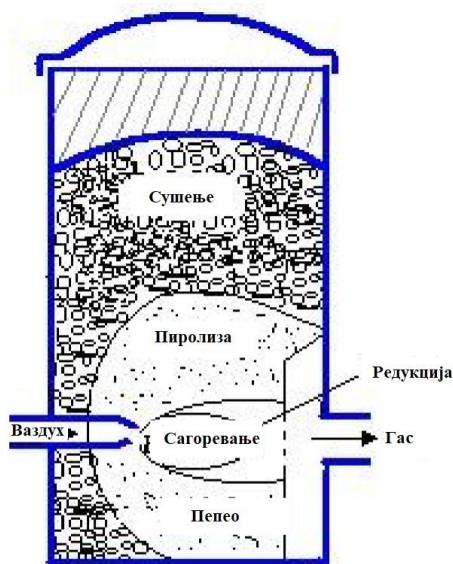
Слика 15. Шематски приказ гасификатора са силазном струјом оксиданта [14]

Гасификатор са силазном струјом оксиданта има и одређене недостатке:

- захтева сушење горива ради постизања малог садржаја влаге;
- синтетни гас који излази из реактора је на високој температури, што захтева секундарни систем за надокнаду енергије [14].

- Унакрсни гасификатор

Унакрсни гасификатор (Слика 16.) има одређене предности у односу на гасификаторе са узлазном и силазном струјом оксиданта, али и одређене недостатке. Недостаци, као што су висока температура гаса на излазу, мала редукција CO_2 и велика брзина кретања гаса настају као последице конструкције. За разлику од гасификатора са узлазном и силазном струјом оксиданта, посуда за пепео, зоне ватре и редукције су одвојене у унакрсном гасификатору. Карактеристике конструкције условљавају употребу горива са ниским садржајем пепела, као што су дрво, угаљ и кокс. Процес много брже започиње него код осталих гасификатора. Релативно виша температура у унакрсном гасификатору има значајан утицај на састав излазног гаса, на пример, удео угљен монооксида је висок, а удели водоника и метана су ниски када се користи суво гориво као што је угаљ [14].



Слика 16. Шематски приказ унакрсног гасификатора[14]

Гасификатор са флуидизованим слојем

Гасификатори са флуидизованим слојем имају следеће предности:

- готово униформна расподела температуре у реактору;
- велика брзина трансфера топлоте између инертног материјала, биомасе и гаса;
- могућ је висок степен конверзије.

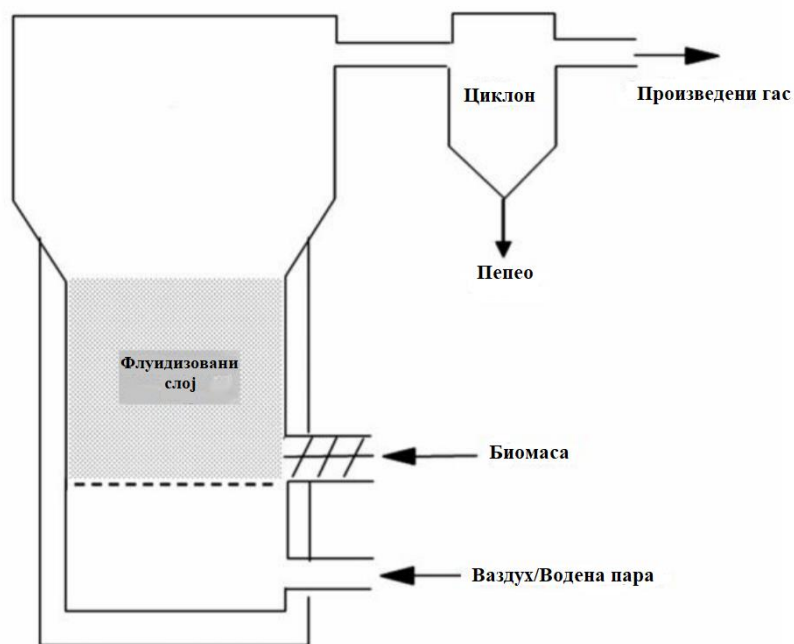
Недостаци гасификатора са флуидизованим слојем су:

- дозвољено одступање садржаја влаге у гориву је мање;
- конструкција система је сложенија, захтева компресоре за увођење оксиданта при дну флуидизованог слоја;

- слој се синтерује када се користи биомаса са високим садржајем пепела. Алкалне компоненте у пепелу имају тенденцију ка формирању еутектика са ниском температуром топљења, што уз силицијум диоксид, као најчешће коришћени материјал у слоју, може да доведе до губитка флуидизације.

Најчешће коришћени типови гасификатора са флуидизованим слојем су гасификатор са барботажним и циркулационим слојем

- Гасификатор са барботажним флуидизованим слојем
У гасификатору са барботажним флуидизованим слојем, као што је приказано на Слици 17., гас се креће на горе кроз слој зрнастог материјала са слободним током при брзини гаса довољно великој да претвори материјал у мешавину лебдећих честица и мехурова гаса. Барботажни флуидизовани слој подсећа на течност која ври и има многе физичке карактеристике сличне флуиду. Као материјал у слоју у главном се користе песак, оливин (ортосиликат гвожђа и магнезијума), кречњак, доломит или глина. Слој се флуидује ваздухом, кисеоником и/или воденом паром. У гасификатору са барботажним флуидизованим слојем, површинска брзина гаса у доњем делу гасификатора се контролише како би се одржао у флуидизованом стању.

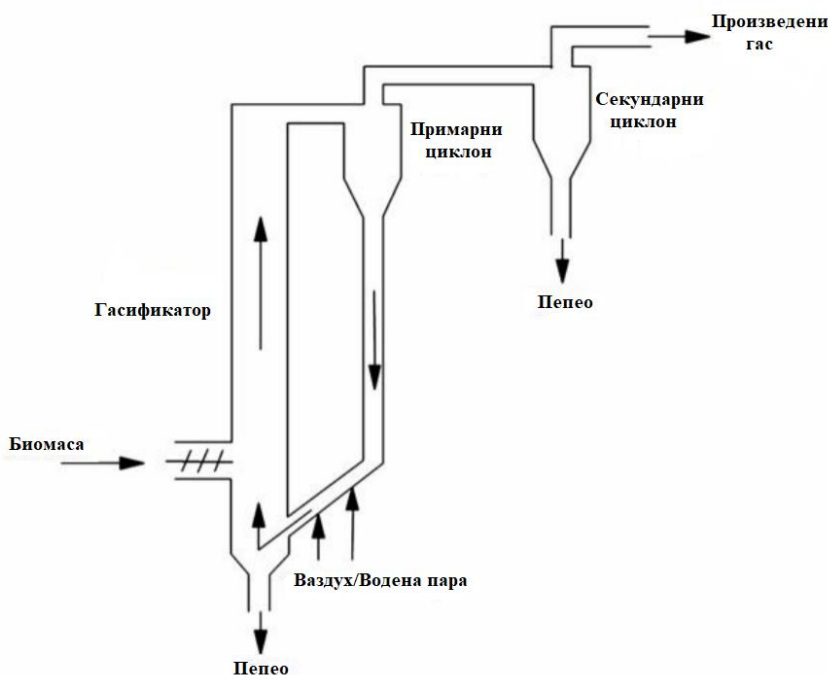


Слика 17. Шематски приказ гасификатора са барботажним флуидизованим слојем [22]

У горњем делу гасификатора, површина попречног пресека је углавном повећана како би се смањила површинска брзина гаса у односу на брзину флуидизације што помаже честицама да се врате у слој. Површина попречног пресека је већа како би се постигло жељено време боравка у гасној фази које је потребно за потпуну деволатилизацију. Да би се флуидизујући гас увео у слој, користи се цевовод за довод гаса или више прскајућих цеви. Биомаса

која улази у загрејани барботажни флуидизовани слој се готово тренутно деволатилизује. Може доћи до делимичне гасификације коксног остатка, али време боравка и за гасове и за честице коксног остатка је релативно кратко тако да се састав гаса не приближава равнотежном стању. У гасификаторима са флуидизованим слојем у којима се врши делимична оксидација, сагоревање коксног остатка у слоју обезбеђује топлоту потребну да се одржи температура у слоју и деволатилизује биомаса. У индиректно загреваним гасификаторима са флуидизованим слојем, топлота се уводи разменом топлоте кроз зидове гасификатора или кроз цеви за размену топлоте у слоју [22].

- Гасификатор са циркулационим флуидизованим слојем
Код реактора са циркулационим флуидизованим слојем (Слика 18.), површинске брзине гаса су углавном 3 до 5 пута веће него код реактора са барботажним флуидизованим слојем. Циркулациони флуидизовани слој може се користити за гасификаторе и са делимичном оксидацијом и са индиректним загревањем.



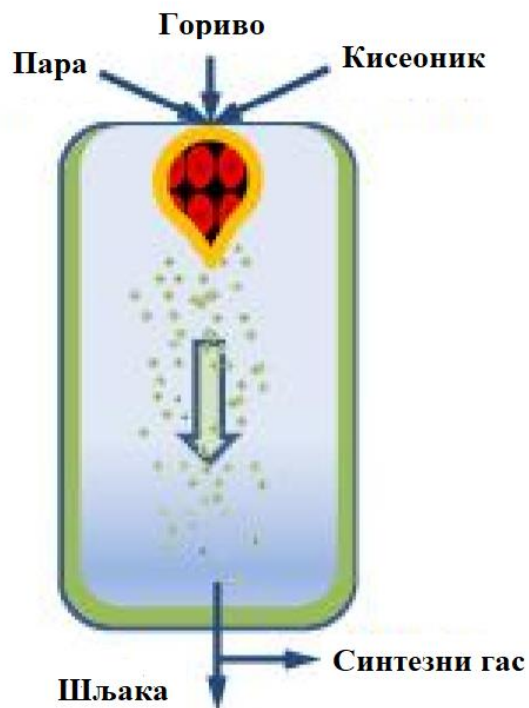
Слика 18. Шематски приказ гасификатора са циркулационим флуидизованим слојем [22]

У системима са делимичном оксидацијом, зона оксидације је у делу у коме се гас враћа у гасификатор, а гасовити производи постају део синтезног гаса. У системима са индиректним загревањем, коксни остатак сагорева изван реактора, димни гасови се одвајају од чврстих честица и у гасификатор се враћају само загрејане чврсте честице. На тај начин се мења састав синтезног гаса. Брзина циркулације чврстих честица у циркулационом флуидизованом

слоју зависи од количине енергије која је потребна да се гасификује биомаса и да се одржи максимална вредност температуре која не доводи до настајања шљаке [22].

Истосмерни проточни гасификатор

У истосмерном проточном гасификатору (Слика 19.), биомаса је присутна у виду праха. Контактне површине су веома велике и стога је реакционо време врло кратко. Гориво и ваздух крећу се у истом смеру и реакције се одвијају у густом облаку честица на веома високој температури, изнад 1000°C , тако да се прво добија синтезни гас, а затим се топи пепео и скупља на дну реактора у облику шљаке. Конверзија у истосмерном проточном реактору је готово 100% [14]. У оваквим системима биомаса се ретко користи. Разматрани гасификатори се најчешће користе за угаљ, а веома ретко за биомасу. Основни разлог су високи трошкови смањивања удела воде и ситњења честица (на величину $100\text{ }\mu\text{m}$ до 1 mm) [22].



Слика 19. Шематски приказ истосмерног проточног гасификатора [14]

4. Предности и мане примене пиролизе и гасификације

Конверзија биомасе у вредне продукте помоћу процеса пиролизе пружа бројне предности:

- спречава одлагање канализационог муља, шумског, пољопривредног, комуналног отпада на депоније што би довело до потенцијалних опасности по животну средину, као што је загађење земљишта и подземних вода, хазарда, непријатних мириса и штетних гасова, разлагања под условима који доводе до испуштања метана;
- спречава директно сагоревање на отвореном без контроле загађења и честица;
- производи обновљиве и одрживе алтернативе исцрпљеним резервама фосилних горива које подразумевају мање емисије у односу на фосилна горива при сагоревању. Коришћење биомасе као горива готово не доводи до емисија сумпора. Емисије NO_x су такође значајно ниже у већини случајева. Осим тога, коришћење биомасе као горива не доприноси постојећем нивоу угљеника у атмосфери [14];
- то је једноставна, јефтина технологија за прераду широког спектра сировина;
- смањује отпад који одлази на депоније и емисију гасова ефекта стаклене баште;
- смањује ризик од загађења воде;
- има потенцијал да смањи зависност земље од увезених енергетских извора генеришући енергију из домаћих ресурса;
- изградња електране за пиролизу релативно је брз процес;
- отвара неколико нових радних места за људе са ниским примањима на основу количина муља који се ствара у региону, што заузврат пружа користи за јавно здравље[25];
- производи мало емисија штетних гасова у ваздух због ограничене употребе кисеоника;
- замењује угљ и природни гас као одрживе изворе горива, што узрокује смањење климатских промена;
- производи корисне производе за више примена;
- може се лако применити у ЦХП системима;
- ефикасније од спаљивања (70% наспрам 40%);
- постројења за пиролизу су флексибилна и једноставна за руковање јер су модуларна. Састоје се од малих јединица које се могу додати или одузети када се маса или запремина органске материје промене [25].

Мане процеса пиролизе канализационог муља:

- главни недостатак технологије пиролизе огледа се у самом постројењу за пиролизу. Технологија је врло добра, али се мора водити рачуна приликом одабира правог добављача постројења за пиролизу. Неквалификовано постројење за пиролизу које не испуњава еколошке стандарде емисије, проузроковаће загађење ваздуха и земљишта и саме животне средине [24];
- ствара могуће токсичне остатке попут инертног минералног пепела, неорганских једињења и нероформисаног угљеника;

- потенцијал за стварање бројних могућих токсичних емисија у ваздух као што су кисели гасови, диоксини и фурани, азотни оксиди, сумпор-диоксид, честице итд.;
- постројења за пиролизу захтевају одређену количину материјала за ефикасан рад;
- иако пиролиза има велики потенцијал за будућност, морају се имати на уму одређени фактори за спровођење таквог процеса у урбаном окружењу, укључујући доступност одређене биомасе и ресурса, као и економску изводљивост постројења за пиролизу [23].

Предности гасификације канализационог муља су што:

- спречава одлагање канализационог муља, шумског, пољопривредног, комуналног отпада на депоније што би довело до потенцијалних опасности по животну средину, као што је загађење земљишта и подземних вода, хазарда, непријатних мириса и штетних гасова, разлагања под условима који доводе до испуштања метана;
- значајно смањење тежине и запремине муља;
- мање потребе за депонијом и ширењем земљишта;
- коришћење мање кисеоника резултира мањим емисијама;
- произведени синтетички гас има много примена (производња електричне енергије, хемикалије, метанол, итд.);
- процеси за производњу електричне енергије засновани на гасификацији карактеристично резултирају много нижим емисијама загађујућих материја у поређењу са конвенционалним сагоревањем угља;
- омогућава поврат енергије из отпада;
- смањује запремину чврстог остатка;
- санитизира чврсти остатак ... као и сагоревање, али поред тога може бити и:
- ефикаснији;
- имати мањи утицај на животну средину;
- нижи визуелни утицај;
- постројењем се може лако управљати, већина нових постројења је потпуно аутоматизовано и доступне су функције даљинског управљања;
- гасификација је применљива у широком спектру величина, нпр. фарма, село, мала индустрија или град, велике индустрије [6].

Мане гасификације су:

- скупо почетно подешавање;
- представљају комплексни вишефазни процес;
- сингас мора бити очишћен / пречишћен;
- неопходан је унос енергије за покретање реакција [6].

Конкретно за гасификацију, сваки тип гасификатора има одређене мане, које су специфичне само за њега:

- гасификатор са узлазном струјом оксиданта (ограничења величине „хране“, велики принос катрана, ограничења скале, произвођач гаса, потенцијал слегања);
- гасификатор са силазном струјом оксиданта (ограничења величине „хране“,

- ограничења скале, произвођач гаса, осетљив на влагу);
- гасификатор са циркулационим слојем (средњи принос катрана, веће оптерећење честицама);
- гасификатор са барботажним слојем (средњи принос катрана, веће оптерећење честицама);
- истосмерни проточни гасификатор (велика количина гаса носача, веће оптерећење честицама, потенцијално висок S/C, ограничења величине честица) [31].

Обе технологије нуде исте предности у погледу смањења запремине и масе муља и мању зависност депоније и ширења земљишта као коначне методе одлагања. Такође обе технологије спречавају одлагање канализационог муља, шумског, пољопривредног, комуналног отпада што би довело до потенцијалних опасности по животну средину, као што је загађење земљишта и подземних вода, хазарда, непријатних мириса и штетних гасова, разлагања под условима који доводе до испуштања метана, али се и разликују по продуктима који се добијају њиховим радом, опремом која је потребна, што доводи до економских разлика. Такође једна битна разлика су мане како код једне, тако и код друге технологије.

5. Примена пиролизе и гасификације у свету и Европи

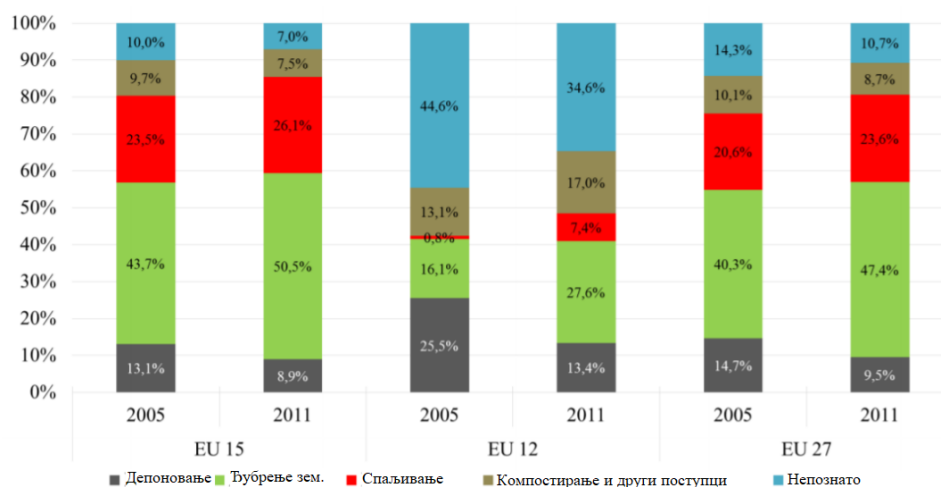
Како се о заштити животне средине годинама придаје све већи значај, примена различитих метода и техника за прераду отпадних вода и канализационог муља све је већа. Посебна пажња придаје се решавању проблема са канализационим муљем, који настаје у великим количинама, а који поседује одређене карактеристике и енергетску вредност која може бити од користи. Управљање канализационим муљем, који потиче из процеса пречишћавања отпадних вода, представља проблем који забрињава Европу и читав свет. Процењује се да се у Европи годишње произведе око 10 милиона тона суве материје канализационог муља. Ова вредност се односи на период од 2003. до 2006. године (данас је та бројка знатно већа како због повећања броја становника, тако и због бољег социјално-економског живота). Због тих великих количина захтева се различитим прописима и законима решавање овог проблема и проналажење адекватног начина за третман муља.

Састав канализационог муља је један од најважнијих фактора који утиче на правилан избор третмана муља. Из тог разлога, потребно је извршити посебну анализу која се односи на енергетску вредност и састав муља, добро је проучити и на крају одлучити који третман се може вршити. У Табели 4. су представљени резултати једне такве анализе, која обухвата 17 различитих градова у различитим земљама света, а која показује податке о канализационом муљу. На основу приказаних података може се претпоставити да земље са великом енергетском вредношћу канализационог муља могу врло добро искористити тај потенцијал. Када је у питању опоравак енергије из канализационог муља сагоревање је најчешће примењивана метода у Европи, али последњих година развијен је иновативни систем који фаворизује тремичку обраду муља применом пиролизе или гасификације. Ипак, како пиролиза и гасификација спадају у релативно нове технологије прераде отпадног муља, о овим процесима у свету нема пуно података и технологије су још увек у фази развијања. Очекује се да ће наредних година, након одређеног периода истраживања и експериментисања, постојати више конкретних података и примера примене ових технологија [12].

Табела 4. Техничка и елементарна анализа канализационог муља у свету [12]

Држава	Састав муља (%)						Енергетска вредност (MJ/kg)
	С	Н	N	S	О	Чврсте честице	
Кина-Јиангсу	7,6	2,53	0,37	0,91	34,09	54,5	-----
Пољска-Краков	30,8	3,9	4,3	1,4	18,3	36,4	12,57
Кина-Гуангџоу	38,96	5,3	3,51	0,27	25,18	8,67	13,51
Кореја	32,59	6,08	3,08	1,27	56,97	13,33	1,37
Турска	38,97	5,10	4,11	0,81	50,99	36,54	16,18
Пољска-Гљивице	32,1	5,26	4,7	1,56	23,64	34,29	14,42
Кина-Бејинг	33,98	6,02	6,24	0,92	52,84	30,76	13,17
Грчка	35	6,1	4,5	1,9	19,8	32,7	14,80
Шпанија	29,5	4,8	4,1	1,6	18,3	41,7	13,1
Сингапур	39,9	6,2	6	5,6	29,1	21,8	18
Хаваи	37,7	5,22	7,05	3,58	14,6	31,9	----
Француска	54,9	7,3	9,3	0,8	22,2	---	17,6
Кина—Шанфонг	27,69	4,89	4,36	1,37	61,69	43,11	8,27
Малезија	68,96	9,78	3,14	0,27	54,8	8	33,97
Кина-Хунан Провинција	51,05	5,97	0,73	0,12	---	4,98	---
ЕУ	9,30	8,13	5,32	0,552	76,7	---	---
Индија	15,24	1,30	1,02	0,81	22,44	60	---

Како пиролиза и гасификација спадају у термичке поступке прераде отпадних муљева, исто као и спаљивање, а не постоји довољно доступних података где се користе и у којим количинама прерађују канализациони муљ, могу се посматрати општи подаци који описују количине сагорелог муља и сматрати да један мањи део тог сагоревања обухватају и поступци пиролизе и гасификације. Према подацима Европске агенције за заштиту животне средине у периоду од 2005. до 2011.године, у различитим земљама Европске уније сагореван је различит проценат муља, а подаци су приказани на Слици 20. [35].



Слика 20. Процентуални удео различитих врста третмана отпадног муља у Европи [35]

Третман муља из канализације пиролизом и гасификацијом још увек је у фази израде и може се сматрати технологијом будућности. Многа истраживања потенцијала за пиролизу и гасификацију спроводе се у Европи, док су комерцијалне примене мале. Из доступних података може се видети да у Немачкој постоје три (једно се тек пушта у рад) постројења за прераду канализационог муља гасификацијом и једна фабрика у Аустрији која се бави производњом постројења за пиролизу канализационог муља.

Прво демонстрацијско постројење изграђено је у Балингену 2002. године са протоком од око 1100 t/дан. Укупна количина канализационог муља који се суши на ППОВ Балинген износи до 6 700 тона годишње. Муљ долази из општина Балинген (124 000 ЕС), Бисинген (18 700 ЕС), Хеџхинген (57 000 ЕС), Сцхомберг (6 500 ЕС), Росенфелд (7 200 ЕС) и Бинсдорф-Ерлахеим (3 000 ЕС) и суши се са приближно 28% до 90% пре термичке употребе у постројењу за гасификацију. Примарни циљ концепта постројења је да обезбеди потпуно искоришћење отпадне топлоте која се ствара на локацији како би се смањила употреба примарне енергије. Отпадна топлота се генерише у блоковским термоелектранама на локацији и термичким секундарним сагоревањем постројења за гасификацију канализационог муља, што има за резултат два различита нивоа температуре. Њихово најефикасније коришћење у сушари дефинисано је као примарни циљ. Сходно томе, поступак опоравка је прилагођен потребама специфичним за локацију. Изглед сушача и постројења за пиролизу и гасификацију приказано је на Слици 21. [28].



Слика 21. Постројење у Балингену [28]

Друго постројење за гасификацију налази се у Манхајму (Слика 22.). Изграђен је 2010. године, а пуштено у рад 2011. године. На основу стеченог искуства овај систем је надограђен и проток му је око 5000 t/дан, то је око половине годишњег муља који производи постројење за пречишћавање отпадних вода, које је дизајнирано за 725 000 ЕС и третира приближно 35 000 000 m³ отпадних вода годишње.. Систем има око 600 000 становника. Инсталирана снага је 2,2 MV топлотне енергије.

Оваки системи, поред решавања проблема са одлагањем отпадног муља, решавају и друге проблеме, као што је снабдевање енергијом и могу се слободно назвати когенеративним постројењима. У свету се добијени продукти након гасификације и пиролизе користе као топлотна енергија или као течна горива [28].



Слика 22 . Постројење у Манхајму, Немачка [29]

Треће постројење у Немачкој које тек треба да се пусти у рад, где она даје добар пример свим осталим државама, налази се у Коблензу (Слика 23.), и то је најновије постројење за гасификацију у тој држави. Проток овог система је 4000 t/дан, а висина постројења је 15 метара.

Захваљујући иновативном решењу за пречишћавање канализационог муља компаније, постројење за пречишћавање отпадних вода Кобленз ускоро ће моћи да третира долазне отпадне воде које се испоручују на енергетски самосталан начин. Постојење за пречишћавање отпадних вода већ само производи део потребне енергије радом постројења за когенерацију, које се испоручују са биогасом. Чим се покрене постројење за гасификацију канализационог муља, постојећи енергетски јаз у процесу пречишћавања отпадних вода биће затворен [28].



Слика 23. Постојење у Коблензу, Немачка [28]

Добар пример постројења за пиролизу је фабрика која се бави њиховом производњом, и налази се у околини Беча, Аустрија (Слика 24.). Ова постројења за пиролизу претвара 4 000 тона одводњеног муља из канализације (25% суве материје) у 500 тона чистог био-угља. Трошкови одлагања канализационог муља се могу свести на минимум. Овом процесу је потребно мање енергије од конвенционалних техника, а смањује емисију CO₂ и награђена је аустријском наградом за заштиту климе 2012. год.[Österreichischer Klimaschutzpreis 2012].

Неке од карактеристика постројења које се производе у овој фабрици су:

- капацитет: 4 000 t канализационог муља са 25% суве материје годишње;
- одлагање муља из канализације по постројењу: до 50 000 еквивалентних становника;
- произведени био-угаљ: до 70 kg/h или 500 t/годишње (у зависности од избора горива);
- номинални капацитет горива: до 500 kW по постројењу;
- максимална ограничења рада: калорична вредност > 6 MJ/kg, влажност < 50%;
- излазна топлотна снага: до 150 kW топлоте издувних гасова (у зависности од избора горива);
- излазна снага: приближно 7,5 kWel;
- тежина реактора: приближно 10 t;
- димензије реактора: уградња у контејнер (приближно 8m × 2,5m × 2,5m);
- даљински пренос података/стандардизована даљинска дијагностика и даљинско одржавање [32].



Слика 24. Изглед једног постројења за пиролизу [32]

Одељак 1, сушење: Осушени муљеви са око 25% садржаја суве материје сушени су на приближно 65% суве материје. За овај корак обраде користи се отпадна топлота из реактора. Сушење је затворено, тако да нема емисије мириса или непријатних мириса.

Одељак 2, храњење: Суво гориво се утоваривачем точи у бункер за напајање и аутоматски транспортује кроз под стругача у бункеру за дистрибуцију. Одатле се материјал уводи помоћу транспортног вијка и преко ротационог додавача у реактор.

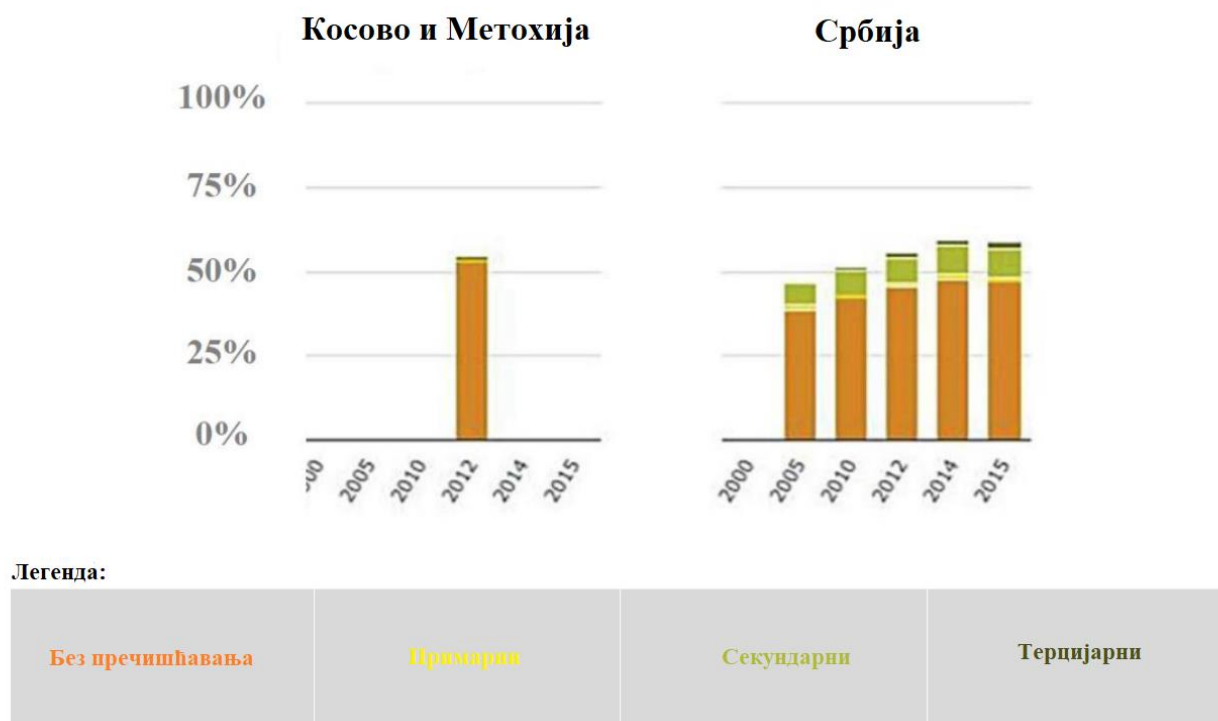
Одељак 3, реактор: Осушени канализациони муљ се кроз реактор преноси двоструким вијком и загрева, без ваздуха на 600°C. Гас настао у процесу

карбонизације се екстрахује и доводи у комору за сагоревање. Материјал остаје у реактору 30 минута, тако да се хормонске контаминације у потпуности елиминишу. Оно што остаје је чисти угљеник, који се испоручује након проласка кроз систем за прскање воде преко ротационе хранилице и вијака за пражњење у бункеру за биогориво. Настали гасови сагоревају се у комори за сагоревање на $1\ 100^{\circ}\text{C}$, а димни гасови се чисте даљим циклоном. После тога, гасови пролазе кроз омотач реактора. Дакле, издувна струја загрева материјал који је тек уведен у реактор. У следећем измењивачу топлоте уклања се заостала топлота од око 100 до 150 kV и обезбеђује се за термичко сушење канализационог муља. Одељак 4, бункер за биоугаљ: Привремено складиште биоугља пре него што се искористи за кондиционирање земљишта или на неки други начин [32].

6. Канализациони муљ у Србији и могуће примене пиролизе и гасификације

Република Србија је класификована као средње развијена земља, ако се анализира изграђеност канализационе инфраструктуре. Заправо је око 55% становништва прикључено на канализациону мрежу, док је мање од 10% становништва покривено неким степеном пречишћавања отпадних вода. Укупна количина отпадних вода из насеља у 2018. години опала је за 1,3% у односу на референтни период 2017. године, од чега се количина отпадних вода испуштених у јавну канализацију смањила за 0,5% у односу на исти период 2017. Количина отпадних вода испуштених у септичке јаме је за 3,4% нижа него у 2017. У погледу испуштања канализације у 2018. у односу на 2017. годину, домаћинства су забележила пад од 1,2%, индустријски сектор за 3,5%, а остали корисници пораст од 5,1%.

У 2018. години пречишћено је 1,1% мање отпадних вода него у 2017. години, а најчешћи метод пречишћавања био је секундарни третман. Јавна канализациона мрежа у 2018. години већа је за 0,8% у односу на 2017. годину, док су нови прикључци канализационе мреже у 2018. години били за 0,8% већи него претходне године. На основу података Европске комисије, могуће је видети удео становништва у појединим земљама који је повезан са барем секундарним третманом отпадних вода. Слика 25. графички приказује удео становништва повезан најмање на секундарни третман отпадних вода у периоду 2005-2015 у Србији [26].



Слика 25. Промене у пречишћавању комуналних отпадних вода у Србији [26]

У процесу пречишћавања отпадних вода ствара се чиста вода и отпадни муљ који се производи као нуспроизвод. Важно је третирати овај муљ на одговарајући начин или га правилно користити (пољопривреда, компостирање, спаљивање, депоновање, пиролиза, гасификација итд.). Најчешће коришћене методе обраде муља у Европској унији приказане су на Слици 26.



Слика 26. Третман и употреба муља из пречишћавања отпадних вода [27]

Типично, четири различите врсте одлагања чине значајан удео у укупној количини третираног муља из канализације: најмање половина укупне количине коришћена је као ђубриво за пољопривредну у две државе чланице ЕУ - Ирској (79%) и Литванији (51%) - као и у Норвешкој (54%). Супротно томе, 84% муља из канализације компостирано је у Естонији (подаци из 2016.) и 53% у Луксембургу. Алтернативни облици третирања канализационог муља могу се користити за смањење или уклањање ширења загађивача на пољопривредном или баштенском земљишту; ту спадају спаљивање и депонија. Како је због овог питања све више забринутости за животну средину, спаљивање је све више метод избора, а све чешће и гасификација и пиролиза (сматра се да су оне технологије будућности): док су Холандија (98%), Немачка (64%), Белгија (79%) и Аустрија (53%) пријавиле спаљивање (сматра се да под спаљивањем спадају и пиролиза и гасификација) као свој главни облик третмана за одлагање, испуштање на контролисане депоније практиковало се као главна врста третмана на Малти, у Србији и Босни и Херцеговини (у тим земљама то је једини облик третмана), Румунији (59%) и Хрватској (57%) [27].

На основу ових података може се закључити да Србија има велики потенцијал за искоришћење енергије коју канализациони муљ поседује, а не да га депонује и тиме штети животној средини на разне начине. Међутим, према Министарству животне средине, само

пречишћавање отпадних вода један је од највећих проблема у Србији, па тек онда и канализациони муљ који настаје пречишћавањем. У погледу очувања, улагања и унапређења животне средине, Србија заостаје око 25 година за развијеним европским земљама. У Србији постоји четрдесетак објеката за ову намену, али само петина испуњава европске стандарде. Да би се дошло до њих, процењује се да је за пречишћавање воде потребно још 300 постројења. Када су у питању постројења за пречишћавање отпадних вода, један од добрих примера је постројење у Крагујевцу, где се електрична енергија такође генерише из отпадних вода, производњом биогаса.

6.1. Крагујевац

Сва отпадна вода из индустријских и стамбених зграда одводи се у колектор у Цветојевац (Слика 27.). Након обраде посебном технологијом, чиста вода одлази у Лепеницу. Током процес пречишћавања, биогаз се извлачи из муља.

Овако добијени биогаз складишти се у резервоару и потом користи за производњу топлотне и електричне енергије. Произведена електрична енергија користи се за напајање саме електране. Суботица такође производи електричну енергију из биогаса. Годишња уштеда енергије је око 2 милиона динара, што омогућава улагање ових средстава у неке друге сврхе у систему и у друге водне објекте снабдевања и канализације.

Тренутно се користи само 1/3 расположивог капацитета прераде, што је врло задовољавајућа чињеница. Квалитет испуштене воде у реципијент (река Лепеница) се подудара са законским стандардима, што је верификовано издавањем водне дозволе од стране надлежна министарства. Поред свог еколошког значаја, пречишћавање такође доприноси производњи биогаса, који има највећи потенцијал у области обновљиве енергије.



Слика 27. Постојење за пречишћавање отпадних вода у Цветојевцу [34]

Што се тиче података о канализационом муљу који настаје приликом пречишћавања отпадних вода у Цветојевцу, „Хигијенски завод“ врши анализу испресованог и депонованог муља. Према последњој анализи утврђено је присуство тешких метала: бакра (Cu), олова (Pb), живе (Hg) у концентрацијама већим од дозвољених (Табели 5.).

Табела 5. Резултати анализе муља из постројења у Цветојевцу, Крагујевац

	(mg/kg) суве материје	MDK (mg/kg) суве материје
Сува материја %	89.35	
Влага %	10.65	
pH	6.65	
Олово (Pb) mg/kg	112.852	до 100
Кадмијум (Cd) mg/kg	1.712	до 3
Жива (Hg) mg/kg	2.221	до 2
Арсен (As) mg/kg	0.803	до 25
Хром (Cr) mg/kg	194.914	до 100
Бакар (Cu) mg/kg	211.273	до 100
Цинк (Zn) mg/kg	102.271	до 300
Никл (Ni) mg/kg	48.122	до 50

У самом постројењу не врши се „ослобађање“ муља од тешких метала, па се због тога складишти на парцели у оквиру постројења или одвози на градску депонију уместо да се користи као ђубриво у пољопривреди, или још боље да се искористи његова енергија помоћу технологија као што су пиролиза и гасификација, јер за ове технологије није потребно одстрањивање тешких метала из канализационом муља и тиме би се смањили трошкови. Биогас који се добија током процеса пречишћавања отпадних вода користи се за загревање дигестора и осталих просторија у постројењу [29]. Одвожење и депоновање канализационог на градску депонију такође представља проблем јер је она у јако лошем стању, и одавно је премашила све дозвољене димензије, и као таква представља опасност по град, тако да је неопходно што пре решити проблем канализационог муља.

6.2. Предлог решења за Крагујевац

На основу прегледа студија и постојећих комерцијалних постројења која раде, за преглед у овом раду одабране су три најчешће коришћене термичке технологије. Технологије које се сматрају алтернативним убрајају се у категорију термичког третмана муља из канализације: спаљивање, гасификација и пиролиза.

Спаљивање је тренутно једна од најистраженијих и примењиваних термичких технологија за канализациони третман муља. Кружни флуидизовани слој је посебно погодан за спаљивање осушеног канализационог муља са високом топлотном калоричном вредношћу. Главне предности ове технологије су значајно смањење запремине канализационог муља, термичка деградација токсичних компонената, висока енергетска ефикасност и релативно ниска улагања у поређењу са другим технологијама. Међутим, процес захтева висок садржај сувих честица у муљу, до 35%, што значи да је неопходна

претходна обрада (нпр. сушење, итд.). Штавише, током процеса спаљивања настаје пепео који може да садржи акумулиране тешке метале из муља, а из табеле 5. се може закључити да канализациони муљ у Цветојевцу садржи велике количине тешких метала које се не „ослобађају“. Због тога је потребан одговарајући третман у циљу спречавања загађења животне средине, што је додатан трошак и додатан посао.

Пиролиза је процес хемијске разградње током високих температура у анаеробним условима. Главни производи су течна, гасовита и чврста фракција (биогориво), чији однос зависи од процесних параметра. У поређењу са поступком спаљивања, пиролиза је врло ендотермичан процес, који захтева 100 KJ / kg суве честице. Овај поступак такође захтева претходну обраду у облику сушења.

Гасификација је поступак врло сличан пиролизи. Током гасификације само се један гас производи, који се може користити локално и углавном без додатног третмана. Процес је спроводи се у присуству ваздуха (у облику чистог кисеоника или ваздуха). Укупан процес је сам себи довољан и стабилан, без потребе за уносом енергије.

У Табели 6. су представљене све битне карактеристике технологија које су узете у разматрање приликом одабира решења.

Табела 6 . Битне карактеристике пиролизе и гасификације

Параметри	Пиролиза	Гасификација
Температура (°C)	300-900	400-850
Притисак (МРа)	Атмосферски	Атмосферски
Период задржавања (h)	Кратко (секунде-сати)	Кратко (секунде-минути)
Главни производи	Фракција гаса (H_2 , CH_4 , CO_2 , гасови у траговима): грејна вредност око 15 MJ/m ³ . Чврста фракција (биоугаљ). Течна фракција (углавном уља, воде, катрана и органских једињења).	Слично пиролизи, али се производи само један запаљиви гас, који се може локално користити.
Произведене потенцијално штетне материје	Већина тешких метала је у потпуности садржана у чврстој фракцији.	Долази до фиксирања опасних супстанци, као што су Cd, Co, As, Hg у угаљ и преостали пепео и шљаку.
Други коментари	Захтева уклањање садржаја воде.	Карактеристике горива, као што су величина, облик, садржај влаге, испарљива једињења и садржај угљеника могу утицати на процес. Захтева уклањање садржаја воде.

Одабрана технологија погодна за пречишћавање муља отпадних вода у Крагујевцу је гасификација, узимајући у обзир различите факторе који су утицали на процес одабира (до промене ове одлуке би могло доћи уколико би се дошло до енергетске вредности канализационог муља). Хемијски састав отпадне воде није у дозвољеним границама (доступни подаци о хемијском састав отпадних вода). То значи да није могућа производња синтетичког гаса, који ће имати доста нечистоћа, а произведени биоугаљ се не би могао искористити у разне сврхе (производња енергије, ђубриво за некавалитетна тла итд.). Пиролиза, која је поступак сличан уплињавању је такође применљив; међутим, количина произведеног синтетичког гаса је мањи и енергетски биланс више користи процесу гасификације.

Као пример постројења за гасификацију које се може изградити у Крагујевцу, може да послужи пример из Немачке, постројење изграђено је у Балингену 2002. године са протоком од око 1100 t/дан. Укупна количина канализационог муља који се суши на ППОВ Балинген износи до 6 700 тона годишње, чији је капацитет око 220 000 еквивалентних становника, колико отприлике има и град Крагујевац, а само постројење у Цветојевцу тренутно користи само 1/3 расположивог капацитета прераде, што иде у прилог на рачун ширења града у будућности.

Закључак

Канализациони муљ је нуспроизвод обраде отпадних вода у постројењим за пречишћавање. Отпадне воде долазе из индустријских, градских или руралних извора. Талог из отпадних вода потиче из примарних, секундарних и терцијарних процеса обраде. Предлаже се употреба дефиниције муља „мешавина воде и чврстих материја одвојених од различитих врста вода као резултат природних или вештачких процеса”. Канализациони муљ би тада био "талог из градских уређаја за пречишћавање отпадних вода".

Карактеристике муљева су:

- велика количина воде;
- сува материја муља се састоји од органских материја;
- садржи нутријенте;
- тешки метали и органска загађења која потичу из индустријских отпадних токова који се уливају у канализацију;
- патогени микороорганизми.

Муљ отпадних вода нема трајно исте карактеристике. Технолошким тестовима потребно је чешће испитивати карактеристике муља.

Својства муља према којима се разликују један од другог, односно од којих ће зависити избор начина њихове даље обраде и збрињавања, могу се поделити на:

- физичка;
- хемијска;
- биолошка.

Неки састојци отпадних вода, док пролазе кроз систем за пречишћавање, могу повећати своју концентрацију у талогу. Иако неколико органских и минералних састојака у муљу може имати добре карактеристике које потпомажу ђубрењу, други можда нису пожељни због санитарних и еколошких ризика.

Избор поступака обраде и одлагање муљева највише зависи од њихових карактеристика. Муљеви су, у општем случају, веома различити. Од количине муља и концентрације суспендованих честица највише и зависи начин обраде муља.

Пиролиза је термохемијски процес конверзије чврсте масе који се одвија у недостатку кисеоника, а добијени производи су: течност (пиролитично уље), гасови и остаци кокса. Количина продукта пиролизе зависи од хемијског састава муља из отпадних вода и услова у којима се одвија пиролиза. Компоненте канализационог муља се термички разграђују различитим брзинама. Тешко је прецизно одредити доњу температурну границу на којој почиње термо-хемијска разградња канализационог муља. Процес пиролизе одвија се у 4 фазе.

Постоји више врста реактора за пиролизу. Најчешће се користе реактор са барботајним флуидизованим слојем, ротирајући конусни реактор, реактор са циркулационим флуидизованим слојем и реактор за вакуум пиролизу.

Гасификација је термохемијски процес при коме долази до конверзије чврстог горива у гасовито гориво. Процес гасификације се одвија при високим температурама (700–1000 °C), које не дозвољавају да се процес сагоревања развије и тиме утроши сва горива материја. Гасификација се може посматрати као наставак процеса пиролизе. После пиролизе током процеса гасификације даље реагују гас, пиролитичко уље и коксни остаци. У поређењу са пиролизом, у процес гасификације се додаје одређена количина

кисеоника. Процес гасификације одвија се на високим температурама (700-1000°C). Главне компоненте гаса које настају процесом гасификације су: CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄ и други угљоводоници (сингас).

У литератури се може пронаћи велики број различитих врста гасификатора. Најчешће се користе следеће врсте гасификатора:

- гасификатор са покретним или фиксним слојем;
- гасификатор са флуидизованим слојем;
- истосмерни проточни гасификатор.

Обе технологије спречавају одлагање канализационог муљ, шумског, пољопривредног, комуналног отпада што би довело до потенцијалних опасности по животну средину, као што је загађење земљишта и подземних вода, хазарда, непријатних мириса и штетних гасова, разлагања под условима који доводе до испуштања метана, али постоје и разлике између њих.

Процењује се да се у Европи годишње произведе око 10 милиона тона суве материје канализационог муља. Због тих великих количина захтева се различитим прописима и законима решавање овог проблема и проналажење адекватног начина за третман муља. Овај проблем се односи и на Србију, међутим, према Министарству животне средине, само пречишћавање отпадних вода један је од највећих проблема у Србији, па тек онда и канализациони муљ који настаје пречишћавањем. У погледу очувања, улагања и унапређења животне средине, Србија заостаје око 25 година за развијеним европским земљама.

Ипак, како пиролиза и гасификација спадају у релативно нове технологије прераде отпадног муља, о овим процесима у свету нема пуно података и технологије су још увек у фази развијања. Очекује се да ће наредних година, након одређеног периода истраживања и експериментисања, постојати више конкретних података и примера примене ових технологија.

Литература

- [1] Twardowska I., Schramm K-W., Berg K.: Solid Waste: Assessment, Monitoring and Remediation; Volume 4, Elsevier, 2004, Интернет страница: приступљено: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0713274304800138>, приступљено август 2020. год.
- [2] Anaerobic-Digestion.com Blog; Интернет страница: <https://blog.anaerobic-digestion.com/what-is-sewage-sludge-biosolids/>, приступљено август 2020. год.
- [3] Начини третмана воде за пиће, отпадних вода и муљева; скрипта; Интернет страница: http://moodle.fink.rs/pluginfile.php/26434/mod_resource/content/1/III%20predavanje%20-%20Nacini%20tretmana%20voda%20za%20pice%2C%20otpadnih%20voda%20i%20muljeva.pdf, приступљено август 2020. год.
- [4] Технологије и поступци при третману отпадних вода; скрипта; Интернет страница: http://moodle.mfkg.rs/pluginfile.php/107123/mod_resource/content/2/TRETMAN%20OTPADNIH%20VODA%20-7%20predavanje.pdf, приступљено август 2020. год.
- [5] Ткалчић Д.: Контрола и технологија прочишћавања отпадних вода; Удружење за технологију воде, Београд, 1975.
- [6] Fericelli P.D.: Comparison of Sludge Treatment by Gasification vs. Incineration; 9th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology Medellín, Colombia, August 3-5, 2011.
- [7] Cleverston Vitorio Andreoli, Marcos von Sperling, Fernando Fernandes: Sludge treatment and disposal; Biological Wastewater Treatment Series (Volume 6), IWA Publishing, 2007 Интернет страница: <https://library.oapen.org/bitstream/id/2cfbc8d9-8306-4c26-8b13-27e213a14f26/640145.pdf>, приступљено: август 2020. год.
- [8] Законска регулатива у области заштите животне средине; Интернет страница: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/politehnikapu:100/preview>, приступљено: септембар 2020.год
- [9] Закон о водама; Интернет страница: https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_vodama.html, приступљено: септембар 2020.год
- [10] М.В. Pescod; Wastewater treatment and use in agriculture; Интернет страница: <http://www.fao.org/3/T0551E/t0551e00.htm#Contents>, приступљено август 2020. год.
- [11] Nordic investment bank; Интернет страница: https://www.nib.int/who_we_are/news_and_media/articles/1736/helcom_sewage_sludge_recycling_crucial_for_baltic_sea_region, приступљено август 2020. год.
- [12] Blagojević V., Šušteršič V., Božičković S.: Pyrolysis and gasification in the process of sewage sludge treatment; Zaštita materijala, Inženjersko društvo za koroziju, Beograd, Vol. 58, No. 3, 2017, str. 305-312 ISSN 0351-9465;
- [13] Onay O, Koçkar O. M.: Fixed-bed pyrolysis of rapeseed (Brassica napus L.).

- Biomass and Bioenergy, 2004.
- [14] Косанић Т.: Утицај процесних параметара на пиролизу дрвне биомасе, докторска дисертација, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад, 2015.
 - [15] Goyal H. B, Diptendu S, Saxena R. C.: Biofuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. Renewable and sustainable energy reviews, 2008.
 - [16] Nicholas P. G. Lumley: Techno- Economic Analysis of Wastewater Sludge Gasification: A Decentralized Urban Perspective, 2013.
 - [17] Предојевић З.: Горива из биомасе: биоетанол и биодизел, Технолошки факултет Универзитета у Новом Саду, Нови Сад 2010.
 - [18] Bridgwater A. V.: Renewable fuels and chemical by thermal processing of biomass. Chemical Engineering Journal, 2003.
 - [19] Zajec L.: Slow pyrolysis in a rotary kiln reactor: Optimization and experiments. Master's Thesis, the School for Renewable Energy Science, University of Iceland and University of Akureyri, 2009.
 - [20] Bridgwater A. V, Carson P, Coulson M. A comparison of fast and slow pyrolysis liquids from mallee. International Journal of Global Energy Issues, 2007.
 - [21] Basu P.: Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, Second Edition. Elsevier, USA, 2013.
 - [22] Бранков С.: Могућност коришћења енергије пиролизом пољопривредне биомасе, докторска дисертација, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад, 2016.
 - [23] Bridgwater A. V, Meier D, Radlein D.: An overview of fast pyrolysis of biomass. Organic Geochemistry; 1999.
 - [24] Azo Cleantech; Интернет страница: <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=336>, приступљено: септембар 2020. год.
 - [25] Alternative Energy Technologies High Tech Solutions for Urban Carbon Reduction; Интернет страница: https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042506-065120/unrestricted/Technical_Report.pdf, приступљено: септембар 2020. год.
 - [26] Перспектива примене европске директиве о пречишћавању комуналних отпадних вода у Србији; Интернет страница: <http://www.sepa.gov.rs/download/radovi/2018/UrbanWasteWaterTreatmentDirecti veInSerbia.pdf>, приступљено: септембар 2020. год.
 - [27] Eurostat; Интернет страница: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Water_statistics&fbclid=IwAR2HtC5TYJHH0tRyKsCv aJkU0oW2FpWOEF2ofrTcuJEQHqf6lqAmC5Vwxj4#Water_uses, приступљено: септембар 2020. год.
 - [28] SÜLZLE KOPF SynGas; Интернет страница: <https://kopf-syngas.de/en/syngas-sewage-plant-in-mannheim/?lang=en>, приступљено: септембар 2020. год.
 - [29] Martać J.: Water and Wastewater Treatment in Kragujevac; Thessaloniki 2020.
 - [30] Biomass Gasification; Интернет страница: <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/np307/biomasstoDiesel/RichBainpresentationslides.pdf>, приступљено: септембар 2020. год.

- [31] Kosov V. F., Umnova O. M., Zaichenko V. M.: The pyrolysis process of sewage sludge; Journal of Physics: Conference Series 653, 012032, 2015;
- [32] Recycling of sewage sludges: pyrolysis; Greenlife Ressourcen GmbH, Habersdorferstraße 21b, A-8230 Hartberg;
- [33] Biogreen; Интернет страница: <http://www.biogreen-energy.com/pyrolysis-applications/sludge-pyrolysis/>, приступљено: септембар 2020. год.
- [34] ЈКП „Водовод и канализација“ Крагујевац; Интернет страница: <http://jkpvik-kg.com/galerija/sistem-za-preciscavanje-otpadnih-voda-cvetojevac/?pismo=cir&script=lat> , приступљено: септембар 2020. год.
- [35] Bianchini A., Bonfiglioli L., Pellegrini M., Saccani C.: Sewage sludge management in Europe: a critical analysis of data quality; International Journal of Environment and Waste Management 18(3):226, 2016.