

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Технологије и постројења за пречишћавање воде и ваздуха

Број индекса: 392/2014

Владимир Д. Павловић

Анаеробна дигестија муља

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Вања Шуштершич, ред. проф.

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да дâ основне напомене о аеробној и анаеробној дигестији, прикаже и објасни принцип рада анаеробних постројења, са посебним освртом на UASB реакторе (енг. *Upflow anaerobic sludge blanket*). Такође, неопходно је да опише принцип рада једног UASB реактора, опише који су његови основни делови, изврши прорачун, прикаже произвођаче и цене, као и да на крају да 3Д модел датог реактора.

Препоручена литература:

- [1] Chidozie Charles Nnaji (2013), A review of the upflow anaerobic sludge blanket reactor, *Desalination and water treatment*, vol 52, pp. 4122-4143.
- [2] Amit Dhir, Chhotu Ram, DESIGN OF AN ANAEROBIC DIGESTER FOR WASTEWATER TREATMENT, Vol. 1, No. 5, November, 2012.
- [3] Марија Вуковић, UASB reactor – Upflow anaerobic sludge blanket digestion (анаеробна дигестија муља), Семинарски рад из предмета: Напредне технике у третману вода, Крагујевац, 2018.

Крагујевац, 2018.

ментор:

Др Вања Шуштершич, ред. проф.

Резиме:

Потребе за енергијом у свету расту, тако да ће у будућности све већа пажња бити усмерена ка искориштавању енергије отпадних вода. Веома вредан енергент који се може добити третманом ових вода јесте метан, чији је потенцијал и даље слабо искориштен.

Велику популарност у третману примарног и активног муља имају анаеробни реактори. Овакви системи се користе у многим земљама у комбинацији са напредним системима, где се процес анаеробне дигестије користи у циљу стабилизације и редукције коначне количине муља.

У овом раду разматрају се теоријске основе анаеробне дигестије, њене предности и значај за очување животне средине. Описана су различити анаеробни третмани муља из отпадних вода и добијање метана са фокусом на UASB реакторе. Дат је и 3Д модел UASB реактора, чије су димензије добијене на основу прорачуна и задатог протока, као и приказ прорачуна добијања метана унутар UASB реактора.

Кључне речи:

Анаеробна дигестија, UASB реактор, муљ, метан.

Abstract:

Energy demand in the world is growing, so in the future, increasing attention will be focused on exploiting wastewater energy. A very valuable energy source that can be obtained by treating these waters is methane, whose potential is still poorly exploited.

Anaerobic reactors have great popularity in the treatment of primary and active sludge. Such systems are used in many countries in combination with advanced systems, where the process of anaerobic digestion is used to stabilize and reduce the final amount of sludge.

This work discusses the theoretical bases of anaerobic digestion, its advantages and importance for the preservation of the environment. Various anaerobic wastewater sludge treatments and production methane are described, with focus on UASB reactors. There is also a 3D UASB reactor model, which dimensions are based on the calculation and the given flow, as well as the calculation of the methane production within the UASB reactor.

Key words:

Anaerobic digestion, UASB reactor, sludge, methane.

САДРЖАЈ

1. Увод	1
2. Основне напомене о аеробној и анаеробној дигестији	3
2.1. Биолошки процеси пречишћавања отпадних вода	3
2.1.1. Аеробни процеси	7
2.1.2. Основе анаеробног пречишћавања	10
3. Врсте анаеробних постројења	17
3.1. Употреба постројења за прераду отпадних вода анаеробном дигестијом	18
3.2. Подела анаеробних реактора	19
3.2.1. Врсте анаеробних постројења	20
4. UASB реактори	24
4.1. Принцип рада UASB реактора	25
4.2. Основни делови UASB реактора	27
5. Прорачун UASB реактора	29
5.1. Прорачун производње метана унутар UASB реактора	32
5.2. 3Д модел UASB реактора	36
ЗАКЉУЧАК	39
ЛИТЕРАТУРА	40

1. Увод

Постоје записи који показују да се производ анаеробне дигестије органске материје, биогаз, појављује још у Асирији у X веку п.н.е. и у Персији у XVI веку п.н.е. Још у XVII веку Јан Баптист ван Хелмонт је први утврдио и документовао да се биогаз може добити приликом процеса распадања органске материје. Алесандро Волта (*Alessandro Volta*) је 1776. године утврдио однос између количине распаднуте материје и количине биогаза. Коначно Хамфри Дејви (*Humphry Davy*) дефинише потребу анаеробног пречишћавања органске материје за добијање биогаза. Прво документовано постројење за производњу биогаза изграђено је у колонији лепрозних болесника у Бомбају, Индија 1859. године. Истраживање на усавршавању процеса анаеробне дигестије се наставља, и 1895. године, у Егзетеру у Енглеској где су направљене прве плинске светиљке које користе биогаз [2].

У Европи се посебно радило на развијању технологије и система анаеробне дигестије током другог светског рата када је владала несташница енергената. Касније је тај вид енергије мало запостављен због релативно јефтиних фосилних горива, а након седамдесетих година расте интерес за системе анаеробне дигестије.

Интересовање науке за рационалније коришћење природних ресурса је у порасту, а главни циљ је примена нових мера за успостављање одрживих система како би се задовољиле садашње потребе, а да се не угрози развој будућих генерација. Когенерација енергије, добијање топлоте или горива прерадом отпада или отпадних вода неке су од области које су у жижи интересовања.

Испусти неадекватно третираних отпадних вода могу имати веома велики утицај на природне изворе. Третман отпадних вода представља проблем који је од веома велике важности у већини индустријских земаља због чега су оне применом адекватних третмана постигле задовољавајуће резултате у погледу квалитета отпадних вода. Међутим, због економских фактора, ставова становништва и нивоа образовања, земље у развоју имају проблеме у третману отпадних вода. У неким случајевима индустријске отпадне воде испуштају се директно у системе јавног прикупљања и то утиче на перформансе уређаја за пречишћавање. У многим земљама вода се испушта директно у реке што узрокује велику штету по живот у води и утиче на квалитет извора воде.

Добар пример постизања вишеструког позитивног дејства на животну средину уз производњу веома вредног енергента представљају анаеробни процеси. Анаеробни третман подразумева формирање безотпадних циклуса, заснованих на принципима кружења материје у природи. Производ АД (анаеробне дигестије), биогаз (слика 1), представља пример енергијско-економских користи за друштво у целини. Глобално снабдевање енергијом у великој је зависности од фосилних горива (сирова нафта, лигнит, угаљ, и природни гас). Искоришћавањем фосилних горива долази до оксидације

угљеника, при чему се сагоревањем ослобађа енергија, а у атмосферу испушта угљен-диоксид (CO_2) и други гасови.



Слика 1. Користи од анаеробне дигестије [6]

У многим земљама Европе присутан је проблем настанка великих количина отпада органског порекла, највише из пољопривредне производње, прехранбене индустрије, домаћинстава и постројења за обраду отпадних вода. Примена система за производњу биогаса одличан су начин за испуњавање све захтевнијих националних и европских прописа из подручја управљања отпадом и коришћења органског отпада за производњу енергије. Такође, технологија производње биогаса доприноси смањењу количине отпада и трошкова збрињавања.

Велику заступљеност у третману примарног и активног муља имају анаеробни дигестори. Овакви системи се користе у многим земљама у комбинацији са напредним системима, где се процес анаеробне дигестије користи у циљу стабилизације и редукције коначне количине муља.

2. Основне напомене о аеробној и анаеробној дигестији

2.1. Биолошки процеси пречишћавања отпадних вода

Степен третмана отпадних вода варира у већини земаља у развоју. У неким случајевима, индустријски објекти могу имати свеобухватни третман унутар постројења. Отпадна вода из домаћинства се третира у централизованим постројењима, септичким јамама, лагунама, септичким системима, као и помоћу отворених или затворених канализационих канала. У неким приморским градовима отпадна вода из домаћинства се испушта директно у море или океан. Слика 2. приказује различите системе за пречишћавање и системе испуштање отпадних вода.



Слика 2. Системи третмана отпадних вода и начини испуштања

При третману отпадних вода настаје метан уколико се врши анаеробна разградња органских и неорганских материја. Обим производње метана пре свега зависи од количине биоразградивог материјала у отпадној води, температуре и врсте третмана. Са повећањем температуре повећава се стопа производње метана. Ово је посебно важно у неконтролисаним системима и у топлијим климатским условима. Испод 15°C производња

метана је незнатна јер метаногени нису активни и лагуна ће практично служити као таложник. У случају да температура порасте изнад 15°C, производња CH_4 ће се наставити.

Главни фактор у одређивању CH_4 потенцијала за производњу из отпадних вода је количина разградивих органских материјала у отпадној води. Заједнички параметри који се користе за мерење органске компоненте отпадних вода су биохемијска потрошња кисеоника (БПК) и хемијска потрошња кисеоника (ХПК). Под истим условима, отпадне воде са већим ХПК или већом концентрацијом БПК-а генерално дају више CH_4 него отпадна вода са нижим концентрацијама ХПК (или БПК).

Концентрација БПК показује само количину угљеника која је аеробно биоразградљива. Стандард мерења за БРК је петодневни тест, означен као БПК₅. Термин "БПК" у овом поглављу односи се на БРК₅. НРК мери укупан материјал који је доступан за хемијску оксидацију (и биоразградив и био неразградив отпад). Пошто је БПК аеробни параметар, може бити мање прикладан за одређивање органских компоненти у анаеробном окружењу. Такође, и врста отпадних вода и врста бактерија присутних у отпадној води утичу на концентрацију БПК отпадних вода. Обично се БПК као параметар чешће јавља код отпадних вода из домаћинства, док се ХПК претежно користи за индустријске отпадне воде.

Биолошки процеси пречишћавања заснивају се на активности комплексне микрофлоре, које у току свог животног циклуса усваја органски и део неорганских материја које чине загађење отпадне воде, користећи их за одржавање животних активности и за стварање нових ћелија. Након завршеног пречишћавања обави се, на погодан начин, сепарација микрофлоре и пречишћене отпадне воде, у којој заостаје мала количина органске материје која је биолошки неразградива као продукт метаболизма које је микрофлора излучила у воду. Биолошким пречишћавањем могуће је из отпадне воде уклонити највећи део органског загађења, али је немогуће потпуно пречишћавање. У систему пречишћавања отпадних вода биолошка обрада вода одвија се као секундарно пречишћавање, а после механичког, односно примарног пречишћавања. Биолошко пречишћавање може се појавити и као независан поступак. У току биолошке обраде настаје стабилизовани муљ који се из воде одстрањује у секундарним таложницима. Биолошко пречишћавање отпадних вода у односу на друге индустријске биотехнолошке поступке разликује се у следећем:

- микроорганизми (микрофлора) потичу из природне средине,
- концентрација супстрата је обично мала,
- разграђује се органски материјал, а не стварање биомасе или продуката метаболизма.

Биолошко пречишћавање примењује се за:

- уклањање органских материја,
- уклањање азота (нитрификацијом и денитрификацијом),
- разградњу примарног муља из примарне обраде отпадних вода,
- разградњу секундарног муља из процеса биолошке обраде отпадних вода помоћу поступака стабилизације муљева и дигестије.

Биолошки процеси пречишћавања могу се одвијати као аеробни и као анаеробни, уз помоћ аеробних или анаеробних микроорганизама. Аеробни процеси су много заступљенији при обради отпадних вода, са малом и средњом концентрацијом органског материјала, и одвијају се на два начина:

- са суспендованом микрофлором (са активним муљем) и
- са имобилисаном микрофлором на инертном носачу (биолошка филтрација).

Аеробни поступци са суспендованом микрофлором деле се на:

- поступке са активним муљем у биоаерационим базенима,
- поступке у аерисаним лагунама (биолошке лагуне) и
- поступке у аеробним (плитким) језерима (биолошким вештачким језерима).

Поступци са суспендованом микрофлором користе се за обраду великих количина слабо и средње оптерећених отпадних вода (нпр. комуналне воде), односно поступци са активним муљем који се одвијају у биоаерационим базенима најчешће су у примени [2].

Табела 1. Предности и мане аеробног и анаеробног процеса пречишћавања [4]

Аеробни услови	Анаеробни услови
Најбоље за отпадне воде са малом концентрацијом	Само за средње и високо концентроване отпадне воде
За хладне отпадне воде	За топле отпадне воде (>22 °C)
Токсичне компоненте су прихватљиве под одређеним условима	Нису дозвољене токсичне компоненте
Често је захтевана неутрализација алкалних отпадних вода	Могућ је третман алкалних отпадних вода без неутрализације

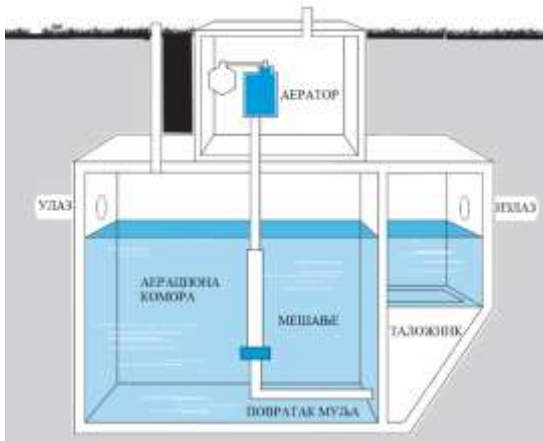
ПРОЦЕС	ПРОЦЕС
Само континуалан, нису дозвољени дугачки прекиди	Сезонски рад је могућ
Ниске вредности ефлуента, могу да се могу да се постигну кроз вишефазни или каскадни дизајн система	Ниске вредности ефлуента само са аеробним посттретманом
Истовремено уклањање N и P је могуће	Нема значајнијег уклањања P и N
Висока продукција вишка муља	Ниска продукција вишка муља
Опасност од зачепљења, када се користи носач материјала	Не постоји опасност од зачепљења
Високи трошкови одржавања за аерационе системе, третмане муља	Ниски трошкови одржавања
Могући проблеми са непријатним мирисом	Без проблема са мирисом због коришћења затворених резервоара
НУСПРОДУКТИ	НУСПРОДУКТИ
Много вишка муља (све теже за одлагање у многим земљама)	Вредан биогаз (исплатива инвестиција)
ТРОШКОВИ	ТРОШКОВИ
Ниски до средњи трошкови инвестиција	Вредан биогаз (исплатива инвестиција)
Средњи до високи трошкови инвестиција	Средњи до високи инвестициони трошкови
Високи трошкови за операције (аерација, уклањање N и P, уклањање муља)	Ниски трошкови за операције (ниска потрошња струје, нема или врло мало уклањање N и P, нема или врло мало уклањање муља)
Изводљиви мањи погони	Мањи погони неекономични
Велики захтеви што се тиче простора	Мали захтеви што се тиче простора

2.1.1. Аеробни процеси

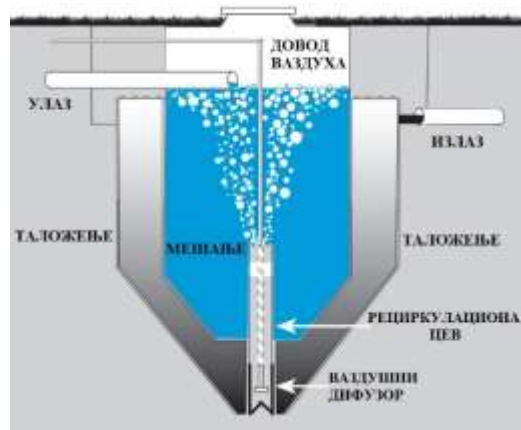
Аеробни системи врше обраду отпадне воде користећи природни процес који захтева присуство кисеоника. Бактерије успевају да у средини богатој кисеоником органске материје које се налазе унутар отпадне воде разграђују и метаболишу.

Као и многи слични системи, аеробни системи врше обраду отпадних вода у више фаза. Понекад је потребно да отпадна вода има предtretман пре него што уђе у аеробни процес, а такође је предtretман или дезинфекција потребна након аеробног третмана пре враћања у животну средину.

Најзаступљенији аеробни процес који се користи за обраду отпадне воде је суспендовани раст. Главни део једног оваквог система је аерациона комора у којој се ваздух меша са отпадном водом. Како се већина аеробних система налази под земљом као и септичке јаме, ваздух мора бити доведен до аерационе коморе помоћу вентилатора или компресора. Ваздух под притиском се меша са отпадном водом у аерационој комори док кисеоник поспешује раст аеробних бактерија које метаболишу чврсте материје. Ова мешавина отпадне воде и кисеоника назива се течна мешавина. Процес који се одвија у течној мешавини је суспендовани раст, зато што бактерије настају и угину као суспендоване у течности, а да нису закачене ни за какву површину. Нажалост бактерије не могу да метаболишу све чврсте материје у течној мешавини, тако да углавном буду избачене као муљ. Многи аеробни системи у свом саставу имају секундарну комору која се назива таложник где се може таложити вишак чврсте материје (слика 3). Други модели омогућавају да се муљ таложи у комори за таложење на дну резервоара (слика 4). У системима дизајнираним са одвојеним таложницима, муљ се враћа у аерациону комору (гравитационо или помоћу пумпе). Муљ садржи бактерије које такође помажу у процесу обраде. Иако, у теорији, аеробним третманом би требао да се потроши сав муљ, у теорији муљ се нагомилава и потребно је да се често пумпама избацује ван, да чврсте материје не би загушиле систем [5].



Слика 3. *Пример дизајна аеробног система са секундарном комором [5]*



Слика 4. *Пример дизајна аеробног система са таложном комором [5]*

2.1.1.1. Процес са активним муљем

Најраспрострањенији биолошки поступак за пречишћавање отпадних вода данас представља процес са активним муљем (слика 5). Први пут је примењен у Хјустону (САД) 1919. године и то за пречишћавање санитарних вода. Представља аеробни процес биолошког пречишћавања отпадних вода, јер се одвија помоћу аеробне микробиолошке популације. Савремени поступци се могу применити и за уклањање азотних једињења из отпадне воде. У систему са активним муљем микроорганизми се налазе у лебдећем стању, односно не образују слој на зидовима радних површина (код филтера). Микроорганизми (бактерије, протозое и метозое) налазе се у базену за аерацију, где се уз помоћ кисеоника у процесу метаболизма обезбеђује разградња супстрата. Микроорганизми оксидирају растворени супстрат у угљен-диоксид и воду. Део органског материјала синтетише се у нове ћелије или се користи за раст постојећих ћелија, а остатак се састоји од отпада и вишка муља. Аерација отпадне воде врши се у биоаерационим базенима, а након аерације следи биоталожење где се биомаса –микробиолошки муљ одваја од ефлуента. Део муља враћа се у процес (активни муљ) где служи као активатор биолошког процеса. Остатак муља се одводи у уређај за обраду муља, односно одлаже на одговарајући начин. Бистра пречишћена вода (ефлуент) испушта се у пријемник (реципијент) или, по потреби, води на додатну обраду (дезинфекцију, филтрирање и сл.). Највећа количина кисеоника потребна је у почетном стадијуму, јер тада има највише органских једињења. Нови систем пречишћавања отпадних вода назван биосорпција или контактна стабилизација (из 1951. године), састоји се у доброј припреми активног муља и довођењу отпадака са њим у трајању од око 30 минута уз интензивну аерацију у биосорпционом уређају. Формирани муљ одваја се у обичном резервоару – таложнику, после чега се врши обнављање муља. Аерација у новијој технологији врши се техничким кисеоником уместо ваздухом, а

погодна је за прераду отпадних вода у фармацеутској индустрији, производњи хартије, алкохола и млека [2].



Слика 5. Процес са активним муљем [9]

2.1.1.2. Процес у аеробним лагунама

Аеробни биолошки начин пречишћавања отпадних вода спроводи се у лагунама и плитким базенима (слика 6 и 7), где се обезбеђује довољна количина кисеоника процесом фотосинтезе. Примењује се у подручјима са повољним климатским условима. У дубљим лагунама примењује се механичка аерација, уношењем ваздуха дифузорима на дно лагуне (примењује се у условима прекривености ледом) [2].



Слика 6. Аеробна лагуна - монтажа



Слика 7. Аеробна лагуна - активна

2.1.1.3. Процес у плитким језерима

Аеробна језера су велики и плитки земљани базени у којима се пречишћавање отпадне воде одвија уз минималну регулацију, практично као природно самопречишћавање. Неопходна количина кисеоника обезбеђује се метаболизмом алги, а бактерије које разграђују загађење производе материјал за раст алги.

2.1.2. Основе анаеробног пречишћавања

Метанско врење је биолошка основа анаеробног пречишћавања, и може се дефинисати као низ биохемијских реакција посредованих сложеном бактеријском микрофлором. Метанским врењем се органска материја (органско загађење отпадне воде) преводи у смесу гасова, тзв. биогас, у којој су основне компоненте метан и угљендиоксид. Део органске материје није биолошки разградљив у анаеробним условима и чини највећи део резидуалног загађења отпадне воде, преостао после анаеробног пречишћавања. Бактерије метанског врења остварују своју активност у дефинисаним условима, које карактерише одсуство кисеоника, редукциона средина и одређени интервал pH . [3]

Метанско врење се упрошћено описује као процес који се састоји из две фазе: ацидогенезе, у оквиру које се одвија хидролиза макромолекула (у отпадним водама прехранбене индустрије и индустрије пића то су у првом реду биополимери: угљени хидрати, протеини, липиди) и ферментација производа хидролизе у органске киселине (највећим делом), алкохоле, амонијак, угљендиоксид и водоник; и метаногенезе: настајања метана и осталих гасова (највише угљендиоксида, затим, у много мањим концентрацијама, азота, водониксулфида), из продуката ацидогенезе прекурсора метаногенезе. Бактеријска флора која посредује хидролизу и ацидогенезу (тзв. ацидогене бактерије) је веома разноврсна, и састоји се од низа облигатних и неких факултативно анаеробних бактерија. Стварање метана посредују тзв. метаногене бактерије. Изоловано је тридесетак врста метаногених бактерија. Метанско врење се и даље дели, на шест различитих степени:

1. Хидролиза биополимера до мономера (аминокиселине, шећери и масне киселине других ланаца), где бактерије користе ензиме, тзв. еко ензиме, да трансформишу сложени нерастворени материјал у мање сложене, растворене компоненте које могу да прођу кроз зидове ћелија и мембране бактерија [7],
2. ферментација аминокиселина и шећера,
3. анаеробна оксидација масних киселина других ланаца и алкохола,
4. анаеробна оксидација интермедијерних продуката, као што су испарљиве масне киселине,

5. конверзија ацетата у метан, и

6. конверзија водоника у метан.

Међутим, за потребе разматрања основа технолошког процеса анаеробног пречишћавања отпадних вода, метанско врење се посматра као двофазни процес,

1. ацидогенеза и

2. метаногенеза,

које изводе две главне групе бактерија, ацидогене и метаногене, а које се међусобно значајно разликују у односу на своју физиологију, потребе за нутриентима, карактеристикама метаболизма и раста (кинетици), оптималним условима средине, и по осетљивости на промене средине; што је све од одлучујуће важности у разумевању процеса анаеробног пречишћавања, његовом формулисању, вођењу и контроли [3].

2.1.2.1. Неопходни технички услови анаеробног врења

Основни параметри који дефинишу техничке услови анаеробног врења су:

- Крупноћа и врста материјала,
- Температура у току процеса,
- Притисак у дигестору,
- Вредност рН,
- Квалитет метанских бактерија,
- Безкисеонична атмосфера дигестора,
- Време задржавања супстрата у дигестору,
- Однос угљеника и азота у супстрату (C/N),
- Мешање супстрата у дигестору,
- Однос суве органске материје и воде у супстрату

Крупноћа и врста материјала

Потребно је да органски материјал који се уноси у дигестор буде што ситнији, како би процес врења имао нормалан ток. Супстрат крупнијих честица продужава време анаеробног врења, што као резултат даје повећање потребне запремине дигестора. Из тог

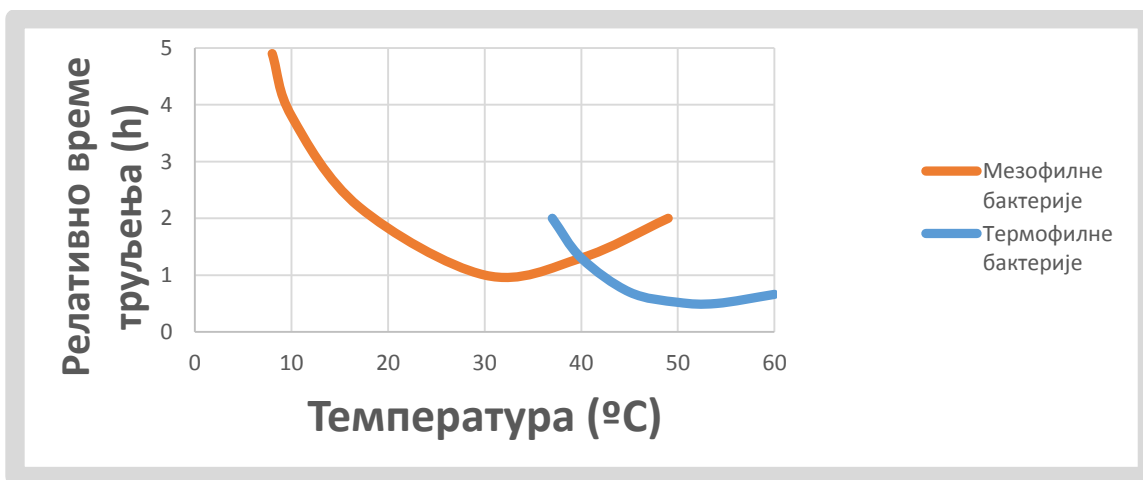
разлога на постројењима за пречишћавање градских отпадних вода неопходне су решетке, песколони и таложници за претходну обраду.

Температура одвијања процеса

Тип самог процеса, колики ће бити степен разградње органске материје, дужина трајања процеса, као и количина биогаса који ће се добити током анаеробног врења зависи од температуре при којој се процес одвија.

Процес анаеробног пречишћавања је, из термодинамичких разлога, знатно спорији од аеробног, а температура метанског врења веома утиче на брзину одвијања анаеробног процеса. Из тог разлога велика већина модерних поступака анаеробног пречишћавања са контролом температуре, тј. који се не одвијају на амбијенталним температурама, раде са грејаним ферменторима, у мезофилној (30-40 °C) или у термофилној температурној области (50-75 °C). Оптимум рН ацидогених бактерија је рН 5,5-6,0, а метаногених рН 6-8. Усваја се да је нормалан рН распон метанизације, када се ради о једностепеним процесима рН 6-8; а јавља се као резултат интеракције пуферског система угљендиоксида-бикарбоната и испарљивих масних киселина и амонијака. Важно је обезбедити довољан пуферски капацитет како испарљиве масне киселине, главни супстрат метаногенезе, не би снизиле рН у ферментору испод вредности оптималних за деловање метаногених бактерија. Нутриционе потребе анаеробног процеса пречишћавања су мале, у поређењу са аеробним пречишћавањем (око 1/5 потреба аеробног процеса), а последица су малог раста бактеријске биомасе [3].

На слици 8 приказан је утицај температуре на релативно време труљења (однос стварног и оптималног времена труљења).



Слика 8. Утицај температуре труљења у односу на релативно време труљења

Притисак у дигестору

Притисак биогаза у дигестору је углавном условљен потребним притиском биогаза код потрошача и величином губитака у цевоводу и уређајима за пречишћавање и регулацију притиска. Узимајући у обзир све наведено може се рећи да је уобичајена величина надпритиска гаса у дигестору између 2.5 - 4 kPa, и ову вредност треба одржавати применом пумпи и компресора који омогућавају несметано извлачење биогаза [8].

pH вредност

pH вредност је по важности један од битних технолошких услова анаеробне дигестије. За време трајања анаеробног врења, зависно од тога која се фаза одвија, pH вредност се мења у границама од 5.5 до 8.2. У случају да се супстрат додаје у дигестор континуирано сваког дана, тада се pH вредност креће у границама од 6.5 до 7.5. Иначе је пожељно да овај интервал буде нешто ужи, односно да се pH вредност креће у границама од 6.8 до 7.2. Важно је знати да што је супстрат у дигестору киселији, слабији је рад метанских бактерија, а оптимална pH вредност се може кориговати додавањем воде одређене pH вредности у односу на целокупну запремину дигестата. Ефикасно врење јавља се при pH вредности која је близу неутралности, односно вредности од 7 на температури дигестата од 25°C. Благо алкално стање је показатељ да pH флукуација у биодигестору није превише драстична и да се може очекивати позитивна производња метана. Ниска вредности pH – појава киселе средине која инхибира процес метаногенезе може да се исправи разблажењем воде веће pH вредности или додавањем креча [8].

Квалитет метанских бактерија

Количина и брзина производње биогаза зависи од квалитета метанских бактерија. Квалитет метанских бактерија условљен је осталим условима који владају у дигестору, а то су:

- температура,
- притисак,
- киселост,
- мешање супстрата.

Тежи се томе да се створи хибридна метанска бактерија која би имала већу продуктивност и отпорност.

Безкисеонична атмосфера у дигестору

Безкисеонична атмосфера у дигестору представља основни услов постојања анаеробног врења, јер само у таквој средини могу се развијати метанске бактерије. Обезбеђење безкисеоничне атмосфере постиже се добрим заптивањем свих спојева конструкције и

цевовода. На самом почетку рада дигестора процес је аеробан јер се одвија у кисеоничној атмосфери, па се развијају аеробне бактерије. Кад оне потроше сав кисеоник, онда почиње процес анаеробног врења.

Време задржавања супстрата у дигестору

Време задржавања супстрата у дигестору зависи од процеса анаеробног врења, а то значи од температурског режима. Изузетно скраћење задржавања биомасе у дигестору, уз добре резултате у приносу биогаса постиже се путем сложеног процеса раздвојених фаза анаеробног врења, при оптималним вредностима температуре карактеристичним за мезофилни или термофилни процес. Популације анаеробних микроорганизама обично захтевају значајан временски период да би се ефективно остварио процес дигестије. Из тог разлога неопходно је да се уведу анаеробни организми од материјала са постојећим популацијама, или да се вештачки додају бактерије које су већ оформљене, а затим се даље у биодигестору извршава процес раста. Ово додавање већ формираних бактерија или материјала које имају увећан степен бактерија у развоју назива се „сејање” дигестора, што се често врши у случају додавања муља из канализације или додавањем раздвојене течне фазе укупној маси у биодигестору [8].

Однос угљеника и азота у супстрату

Неопходан услов за нормалну активност и репродукцију метанских бактерија представља однос угљеника и азота у биомаси која се дигестира. Однос који се сматра повољним је C:N од 25:1 до 35:1, а идеални однос је 30:1. Овакав однос је битан зато што метанске бактерије 30 пута брже троше угљеник него азот. На овај однос позитивно утиче свакодневно додавање и мешање супстрата у дигестору.

Мешање супстрата у дигестору

Када чврсти материјали који су у дигестору нису добро уситњени, тада стварање метана може да омета формирање скраме која се састоји од чврстих – нерастворених честица ниске густине које плутају на филаментозној матрици. Након одређеног времена скрама се стврдне, реметећи процес дигестије и изазива заустављање рада дигестора. Агитација може да се уради или механички са клипом, системима за мешање или путем ротационог прскања са свежим уливом материје, или са одређеним решењем за унос биомасе у зависности од начина конструкције биодигестора. Агитација, је обично потребна за спирање дигестора, чиме се обезбеђује да површине које су радне компоненте у дигестору нису у контакту са бактериолошким дејством, чиме се спречавају штетни ефекти и успорење бактеријских активности, промовише се равномерна дисперзија понирућих материјала за шири процес ферментације течности, чиме се убрзава дигестија. Метанске бактерије су мале покретљивости, а како се брзо размножавају и још брже користе састојци супстрата у својој активности, неопходно је довести их у позицију да се наведене активности неометано обављају. Мешање доведеног супстрата у дигестору има за циљ да

реши проблем који настаје због слабе покретљивости метанских бактерија. Мешање је повољно и ради спречавања таложења тежих честица на дно дигестора што води смањењу активне запремине, односно запремине у којој су активне метанске бактерије и доводи до побољшања у количини биомасе која се може искористити за генерисање биогаза [8].

Однос суве материје и воде у супстрату

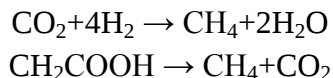
У свим фазама анаеробног врења од велике је важности садржај воде у супстрату. При недостатку воде активности метанских бактерија се успоравају, а уколико је воде превише разградња не може да се изврши у одговарајућим количинама, па је материја која излази из дигестора готово неразграђена.

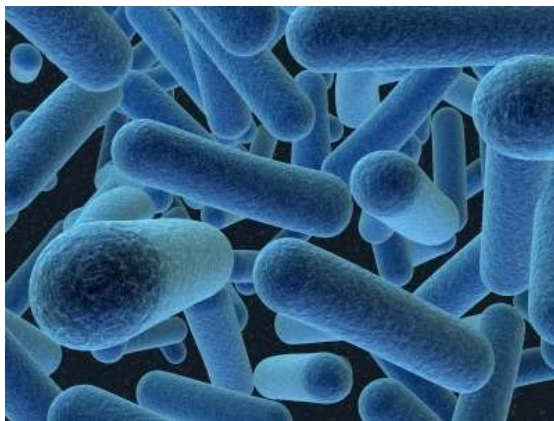
2.1.2.2. Ацидогенеза

Све до средине 1960-их година није примењен инжењеринг раздвајања фаза биомасе где је претпостављено да би се побољшала стабилност и применио правилан третман отпада у дигесторима. У овој фази, комплексни молекули, као што су: угљени хидрати, масти и протеини су у деполимеризованој форми који садржи растворљива једињења од хидролитичких ензима целулазе, хемицелулазе, амилазе, липазе и протеазе. Хидролизоване једињења се ферментацијом распадају до испарљивих масних киселина ацетат, пропионат, бутират, и лактат, и на такође неутрална једињења етанол, метанол, амонијак, водоник и угљен диоксид. Степен разлагања и могућности да дође до испаравања продуката хидролизе и ацидогенезе се изражава са процентом испарљивих чврстих материја VS – *volatile solids* [8].

2.1.2.2. Метаногенеза

Метаногенеза или биометанизација је формирање метана захваљујући микробима метаногених бактерија. Организми способни да производе метан су идентификовани само из домена Археја (слика 9), група која се разликује од еукариота и класичних бактерија, иако многе живе у тесној сарадњи са анаеробним бактеријама. Производња метана је важан и широко распрострањен облик метаболизма микроба и представља задњи корак у систему анаеробне дигестије. Метаногенеза у микробима – метаногенима је облик анаеробног дисања и не користи се кисеоник за употребу, који чак инхибира рад микроба. Тренутни електрон акцептор у метаногенези није кисеоник, већ је угљеник. Угљеник може доћи у малом броју органских једињења, и има малу молекулску тежину. Два најбоља описа пута да се употреби угљен-диоксид и сирћетна киселина, као акцептор електрона за даљу производњу метана су:



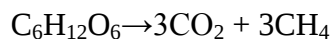


Слика 9. Бактерија Археја

Такође је у процесу метаногенезе показано да се користи угљеник из других малих органских једињења, као што су метанол, диметил – сулфид, метиламини и метан – етол. Биохемијски процес метаногенезе је релативно сложен процес, који користи коензиме:

- Ф420 коензим Б – користи се за редокс реакцију метаногена; при чему коензим Б реагује са коензимом – М при чему се директно издваја метан,
- Коензим – М – користи се за пребацивање метаболизма метаногена, где се одвија метаногенеза
- Метанофуран – је једињење које се налази у хемијским једињењима *metanogenere arhacee*; метаногенеза се одвија тако што се додаје још један позитиван јон.

Супстанце које су заступљене и које се апсорбују у процесу су водоник и угљендиоксид. За време процеса сложенијег органског распада сви електронски акцептори постају осиромашени са угљеником осим CO_2 , који је продукт у највећем броју процеса и не може да се истроши као друге супстанце. Само метаногенеза и ферментација могу да се појаве у одсуству акцептора електрона поред угљеника. Метаногенеза ефектно уклања полу – финалне продукте у распаду: водоник, мала органска једињења и CO_2 . Уколико не би постојала задња фаза у дигестији онда би се веома велики број једињења угљеника акумулирао у безваздушној средини. Метаногене бактерије садрже и преживари у већем проценту и људи у нешто мањем уделу у цревном тракту и ово омогућава разлагање целулозних биљних материја, и да се прежива трава – код преживара. Сама фаза метаногенезе може да се обавља само уколико су рН између вредности од 6.5 до 8, а преостали материјал који не може да буде у процесу биодигестије су мртве бактерије које остају чиниоци у дигестату. Уколико се сумира процес врења угљених хидрата, може се видети колико молекула метана и CO_2 настане при врењу, односно и део настанка CO_2 се у реакцији са водоником претвара у метан одакле се види да је велики проценат присутног метана у односу на остале чиниоце биогаса [8].



3. Врсте анаеробних постројења

Суштина биолошког третмана отпадних вода лежи у капацитету микроорганизама које користе биоразградиве органске честице и трансформишу их у нуспродукте који могу бити одстрањени из система. Формирани нуспродукти могу бити у чврстом стању (биолошки муљ), течном (вода) или гасовитом (карбон диоксид, метан, итд.). Који год да је процес у питању, аеробни или анаеробни, капацитет разградње органских једињења зависиће од микробиолошке активности биомасе присутне у систему, све док употреба анаеробних процеса за третман ефлуента не постане неекономична и проблематична. Смањени раст анаеробне биомасе, посебно метаногенична Археја, чини контролу процеса деликатном, пошто је обновљивост система веома спора када је анаеробна биомаса изложена штетним утицајима околине.

Са растом истраживања у области анаеробних третмана, развијени су системи са великом брзином дигестије. Карактеристично за њих је способност да задрже велике количине високо активне биомасе и примена малог времена хидрауличног задржавања. На тај начин одржава се време задржавања честица са применом високих хидрауличних оптерећења у систему. Резултат је компактан реактор са карактеристикама слабијим од конвенционалних анаеробних дигестора, који одржава висок степен стабилизације муља [10].



Табела 2. Подела анаеробних дигестора

Принципски биолошки процес који се користе у анаеробном третману отпадних вода могу бити подељени у две главне групе: суспендовани раст и причвршћени раст (биофилм). Операције ових процеса зависе од особина микроорганизама, специфичних и кинетичких реакција, потреба за нутријентима и другим еколошким факторима који утичу на њихово понашање.

3.1. Употреба постројења за прераду отпадних вода анаеробном дигестијом

Анаеробни дигестори широко се употребљавају у третману примарног и секундарног муља, што резултује аеробним третманом комуналних отпадних вода. Систем се примењује у многим земљама у комбинацији са напредним системима где се АД процес (анаеробна дигестија) користи за стабилизовање и редукцију коначне количине муља. Већина инжењеринг компанија које обезбеђују системе за третман отпадних вода имају могућности и за имплементацију система са анаеробним дигесторима. У европским земљама, између 30 и 70% отпадног муља се третира анаеробним дигесторима, у зависности од националног законодавства и приоритета. Ефлуент третиран АД поступком, даље се може користити као пољопривредно ђубриво или за производњу енергије за сагоревање. На жалост, још увек постоје земље у којима се ефлуент одлаже на депоније. Како ова пракса има негативне консеквенце на окружење кроз мешање нутриената са земним водама и емисијом гасова који утичу на ефекат стаклене баште, из тог разлога је овакво одлагање забрањено у већини западноевропских земаља.

Анаеробна дигестија је данас уобичајена технологија за третман различитих типова индустријског отпада из дрвопрерађивачке, прехранбене и фармацеутске индустрије. Такође примењује се за предтретман органских индустријских отпадних вода, пре коначног одлагања. Недавним унапређењем технологија за третман, могу се прерађивати и разређене индустријске отпадне воде. Европске компаније имају водећу светску позицију у примени оваквог типа апликација анаеробне дигестије. У последњих неколико година, актуелизовањем проблематике у области заштите животне средине и енергетске ефикасности, које је сада под контролом закона за заштиту животне средине додатно су увећана интересовања за директни анаеробни третман индустријског отпада и управљање чврстим индустријским отпадом.

Индустрије које употребљавају анаеробну дигестију за третман отпадних вода су најчешће:

- Прерада и производња прехранбених производа, као на пример: конзервирање поврћа, производња сира и млечних производа, кланице и месна индустрија, индустрија за прераду кромпира;

- Индустије пића: пиваре, производња безалкохолних пића, дестилерије, производња кафе, воћних сокова;
- Индустијски производи, као на пример: картон, гуме, хемијски производи, скроб, лекови.

Индустијска постројења на биогас носе различите користи за друштво и индустрију, које укључују:

- Додатну вредност нутриената за рециклажу и смањење трошкова одлагања;
- Употреба биогаса за добијање процесних енергената;
- Побољшање целокупне слике о компанијама, кроз еколошки прихватљив третман отпадних производа.

Узимајући у обзир еколошке и друштвено – економске користи оваквих система, уз увећање трошкова и пореза на друге методе одлагања индустријског отпада, долази до увећања броја реализованих апликација са индустријском применом биогаса у будућности [11].

3.2. Подела анаеробних реактора

Постоје два типа реактора која су у употреби:

- 1) реактор са стандардном брзином дигестије (ниско оптерећена трулишта) и
- 2) реактор са великом брзином дигестије (високо оптерећена трулишта).

Код стандардне брзине дигестије садржај дигестора се обично не загрева и не меша. Време трајања овог процеса варира од 30-90 дана.

Код велике брзине дигестије дигестор се загрева и потпуно меша. На тај начин се фаворизује раст термофилних бактерија (оптимална температура од 40 °C до 60 °C) и мезофилних бактерија (оптимална температура од 20 °C до 40 °C). Захтевано време дигестије је 15 дана или краће.

3.2.1. Врсте анаеробних постројења

Постоје више врста анаеробних постројења:

Анаеробни контакт реактор (CSTR)

Анаеробни контакт реактори (*CSTR - continuous stirred-tank reactors*) (слика 10) су отворени системи, где материјал слободно улази и излази из система, у стабилним условима у реактору који се не мењају са временом. Реактанти су континуално присутни у реактору, док се продукти континуално уклањају.

Анаеробни контакт реактори имају добро мешање, па одржавају релативно стандардне карактеристике као што су температура, густина итд. Такође услови на излазу реактора су исти као и унутар резервоара.

Када загрејан флуид под притиском уђе у систем да олакша мешање, анаеробни контакт реактор функционише као „петља реактор“ (*loop reactor*). То омогућава већи трансфер топлоте и масе, а такође се поједностављује одржавање јер нема пропелера за мешање.

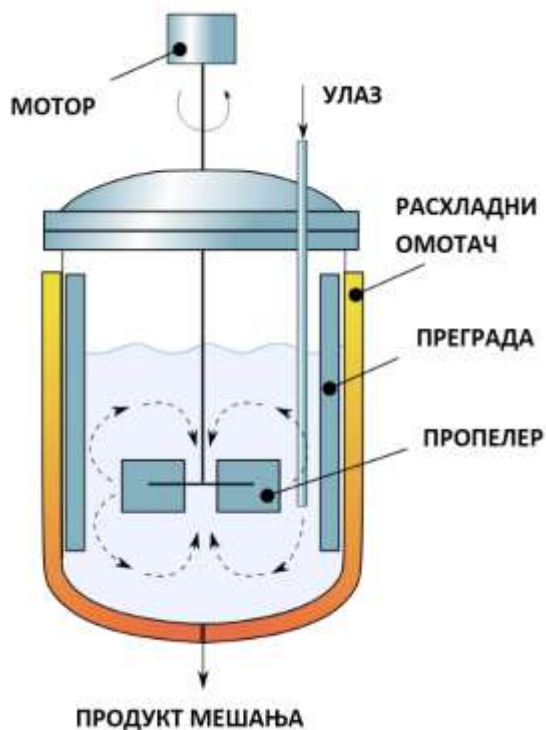
Највећу употребу имају у индустријским процесима, на првом месту у хомогенизацији течне фазе када је потребно константно мешање. Такође користе се и у фармацеутској индустрији као петља реактор [12]

Секвенцијални фазни реактор (SBR)

Секвенцијални фазни реактор (*SBR- Sequencing Batch Reactor*) је побољшана верзија система са активним муљем, који се састоји од једног или више резервоара, а сваки је способан за стабилизацију отпада и одвајање честица [13,14].

Да би се оптимизовао процес обично се користе два или више реактора у спрези.

Конвенционални SBR системи, уопштено се састоје од серије корака пуњења, реакције, таложења, цеђења и мировања у цикличном раду са комплетном аерацијом током периода оксидације органских материја и нитрификације амонијак-нитрата. Недавно, SBR системи су модификовани подешавањем корака у реакционом циклусу ради обезбеђивања анаеробних и аеробних фаза у одређеном броју и редоследа уклањања биолошких материја (C, N i P). SBR процес нуди флексибилност у лечењу при променљивим протоцима, мању упосленост руковаоца, опцију за анаеробне или аеробне услове у истом резервоару, квалитетан контакт кисеоника са микроорганизмима и субстратима, мање површине система и добру ефикасност уклањања. Ове предности оправдавају недавно повећање примене ових процеса код индустријских и комуналних отпадних вода [15].



Слика 10. Анаеробни контакт реактор (CSTR - continuous stirred-tank reactor) [13]

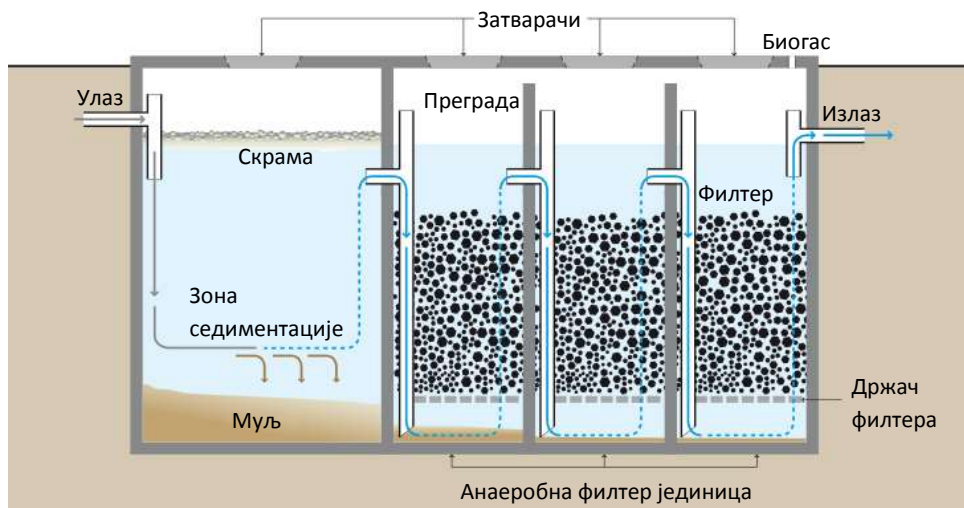
Анаеробни филтер реактор

Анаеробни филтер је биолошки реактор са фиксираним простором за паковање са једном или више преграда за серијску филтрацију. Отпадна вода пролази кроз филтер, честице су заробљене, а органска материја се разграђује помоћу активне биомасе која је закачена за површину материјала самог филтера. Анаеробни филтери имају широку употребу као секундарни третман отпадних вода из домаћинстава и побољшавају издвајање чврстих честица у поређењу са септичким јамама и анаеробним реакторима са преградама (*ABR - anaerobic baffled reactors*) (слика 11). Од кад анаеробни филтери раде на принципу анаеробне дигестије могу бити дизајнирани као анаеробни дигестори и производити биогаз.

Поред секундарног третмана такође се користе заједно и са другим системима, као што је тзв. децентрализовани систем отпадних вода (*DEWATS - decentralised wastewater treatment system*).

Конструкција анаеробних филтера је слична конструкцији септичких јама, али генерално ту је неколико комора и додатне преграде да би се обезбедио ток одоздо нагоре (*upflow*). Сходно томе, неосетљиве и растворене чврсте супстанце такође се третирају тако што се доводе у блиски контакт са активном бактеријском масом која је фиксирана на филтеру. Бактерије покушавају да се закаче на зидове реактора и материјал за филтрирање (нпр. шљунак, камење, гвожђе или посебно обликоване пластичне комаде), анаеробно

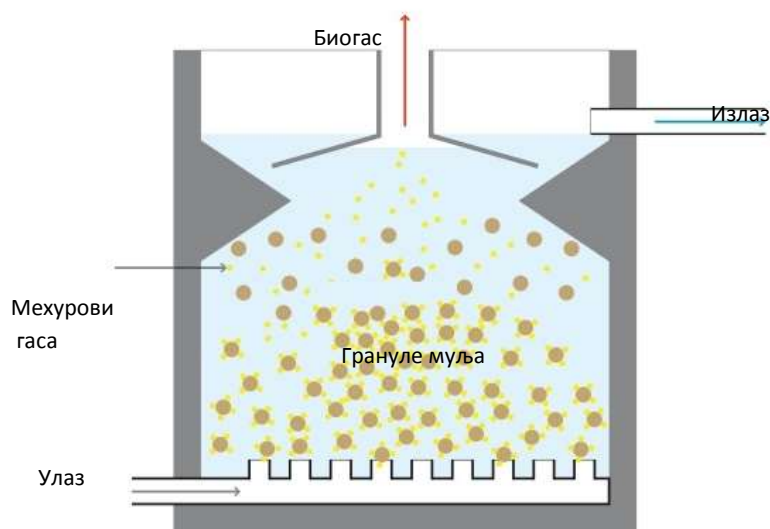
дигестирају распршену или растворену органску материју у кратком времену задржавања [16].



Слика 11. Анаеробни контакт реактор [16]

Дигестор са слојем муља (UASB)

Најзаступљенији у савременој индустријској пракси је тзв. дигестор са слојем зрнастог муља (уобичајена скраћеница је UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) (слика 12), накупљеног у доњој зони дигестора, обично у облику пелета, са узлазним током отпадне воде кроз слој муља. Висока концентрација биомасе постиже се сепаратором уграђеним у врху дигестора, којим се раздваја биогас, пречишћена отпадна вода, и муљ који се враћа, седиментира ка слоју муља. Показало се да UASB може да обрађује отпадне воде у доста широком интервалу концентрације органског загађења (НПК, ВПК₅) од средње, па и слабо загађених, све до отпадних вода и отпадних токова са великим и веома великим органским садржајем. UASB дигестор добро подноси сразмерно велика хидрауличка оптерећења, због тога што је муљ пелетиран, са добрим таложним карактеристикама. Повећана концентрација суспендованих честица у отпадној води не смета, уколико су те суспендоване честице у великој мери биолошки разградљиве, у супротном долази до накупљања биолошки неразградљивих материја у слоју муља [3].



Слика 12. Дигестор са слојем муља (UASB) [17]

UASB дигестор са рециркулационом петљом (EGSB)

Модификације UASB поступка које превазилазе ограничења првобитног UASB-а су поступак са експандованим слојем пелетираног муља (EGSB - Expanded Granular Sludge Bed), односно UASB дигестор са рециркулационом петљом (поврат дела анаеробно обрађене отпадне воде), чиме се постиже експандовање, делом и флуидизовање, слоја муља, што омогућава обраду и отпадних вода са повећаном концентрацијом биолошки тешко или неразградивих суспендованих честица, јер се због повећаног протока кроз сам дигестор не акумулишу у слоју муља [3].

У табели 3 је приказана упоредна анализа времена задржавања и ефикасности уклањања ХПК за различите типове дигестора.

Табела 3. Упоредна анализа времена задржавања и ефикасности уклањања ХПК за различите типове дигестора

Тип дигестора	Време задржавања (дани)	Ефикасност уклањања ХПК (%)	kg ХПК / (m ³ ·dan)
Покривени базен	3-5	Више од 90	1-5
Контакт реактор	5-8	70-80	2-5
Анаеробни филтер	2-5	70-80	2-10
UASB	0.5-5	70-90	5-15
EGSB	0.5-3	70-90	5-30

4. UASB реактори

Инвентивни развој UASB реактора приписује се Летинги (*Lettinga*). Пре седамдесетих година, интересовање за анаеробним третманом било је мало, а већина истраживача мислили су да аеробни третмани представљају најбољи начин за третирање отпадних вода. Међутим значај UASB методе повећао се када је цена сирове нафте порасла 1970. Током путовања у Африку 1979. године, Летинга је посетио постројење за третман отпадне воде из винске дестилерије, јер су инжењери мислили да гранулација и мешање приликом третмана стварају проблеме у реактору. Он је приметио муљ у облику гранула. Након овог искуства, Летинга је започео развој UASB реактора. Ово представља почетак развоја UASB реактора [19,18].

Од средине деведесетих, отприлике 10 година након инсталације првог пилот пројекта, UASB реактора за пречишћавање канализационих отпадних вода у Калију (*Cali*), Колумбија (*Lettinga 1993; Schellinkhout 1985*), и Бразилу (*Vieira i Souza 1986*), дошло је до наглог повећања броја инсталираних канализационих UASB постројења за третман отпадних вода, у суптропским земљама. Конкретно, Бразил и Индија имају широко распрострањену UASB технологију. На пример, аутори су могли идентификовати преко 45 општинских канализационих UASB постројења у Индији са просечним дневним протоком од 10.000 m^3 или више (највеће је дизајнирано за проток од 338.000 m^3) док је 15 таквих идентификовано у Бразилу. Главне предности које се односе на канализациона UASB постројења у поређењу са конвенционалним аеробним третманом су значајно смањење потрошње енергије и потенцијал за енергетску самоодрживост [20].

Вода је једна од највреднијих природних извора у свету. Нажалост, брзо је постала загађена и биле су потребне хитне мере да би се избегла штета. У многим земљама одпадна вода је испуштана директно у реке и језера без третмана. Многобројне технологије развијане су да би се постигло одвајање чврсте материје из отпадних вода. Данас су у употреби аеробни и анаеробни системи. Они могу бити слични један другом, осим у неким ситуацијама када анаеробни систем не може да испуни захтеве квалитета ефлуента. Анаеробни системи су били превише доминантни у биолошком третману отпадне воде до седамдесетих. Интерес за анаеробне системе се проширио десет до петнаест година касније од повећања цене енергије. Анаеробни третман не троши енергију али може производити енергију кроз производњу метана. Две главне предности анаеробног третмана, што објашњава његов напредак у погледу трошкова у односу на класични аеробни третман, су смањени раст муља и знатна уштеда енергије [21].

Неке индустрије имају своје фабрике за обраду отпадне воде, али у већини случајева то није довољно. Постоји неколико анаеробних третмана који могу као UASB да обрађују

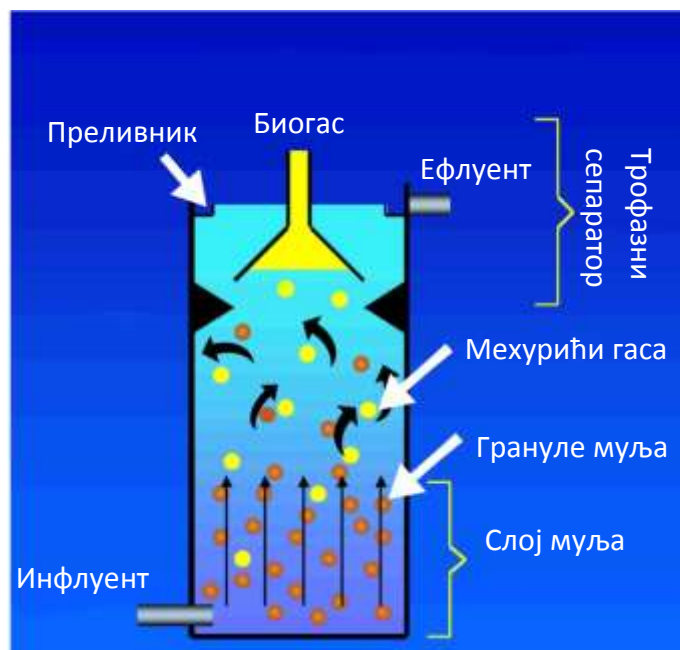
комуналну отпадну воду, отпадну воду из винских дестилерија или пивара, али не могу да постигну формирање гранула као UASB реактори.

UASB реактор је направљен да буде један од најуспешнијих анаеробних система, способан за брзо угушћавање и аутоматску имобилизацију како би се постигле високе перформансе реактора [22]. Примарну примену има у третманима са високом концентрацијом отпадних индустријских вода, али такође се може користити и у третману комуналних отпадних вода са мањом концентрацијом загађења [23]. Због свог једноставног дизајна, лаке конструкције и одржавања, ниске цене рада и способности да одржи стабилност варијација pH вредности, температуре и концентрације субстрата у инфлуенту, заслужио је своју популарност [24,21].

Различити модели су развијени да би се описали комплексни процеси у микробиолошком екосистему UASB реактора, унутрашњи ток процеса, и кинетичка реакција у биолошким гранулама. Хидрауличка разградња и дифузиони процеси играју важне улоге у разградњи отпадне воде. [21]

4.1. Принцип рада UASB реактора

UASB реактори (слика 13) су израђени од бетона или другог водонепропусног материјала и могу бити пројектовани као кружни или правоугаони. Отпадна вода се пумпа са дна у реактор, где улазне суспендоване чврсте материје и раст бактеријске активности доводе до стварања слоја муља. Слој муља се састоји од микробиолошких гранула (пречника од 1-3 mm) тј. малих агломерација микроорганизама који се због своје тежине опиру испирању при протоку. Микроорганизми у слоју муља разграђују органска једињења, а као резултат разградње ослобађају се гасови метан и карбон-диоксид, тј. биогас. Мехурићи који се стварају мешају муљ без помоћи механичких делова. Брзина струјања одоздо нагоре и брзина стварања муља су у равнотежи и формирају локални, прилично стабилни слој суспендованог муља.



Слика 13. Принцип рада UASB реактора

Процеси који се догађају унутар UASB реактора су веома сложени. Отпадна вода и честице у муљу представљају двофазни течно-чврсти систем у којем су препоручене брзине струјања (релативно ниске вредности, $0,1-1,0 \text{ m h}^{-1}$) умерене дисперзије [21, 26]. Ипак, присуство биогаза брзо „узнемири“ систем, који постаје гасно-течно-чврсти реактор чије се хидродинамичко понашање може разликовати. Повећавање концентрације гаса може имати разноврсне ефекте на укупне перформансе реактора: пружа добар контакт отпадне воде и биомасе код UASB система помоћу мешања али, са друге стране може изазвати губитак биомасе кроз флотацију и турбуленције.

Варијације хидрауличких брзина мењају перформансе процеса обраде у реактору из два разлога: један је директно повезан са хидрауличким заосталим временом (*HRT- hydraulic retention time*). Са високом брзином протока отпадна вода брже пролази кроз реактор и очекивана редукција органске материје не може се постићи. Међутим, велике брзине могу побољшати дисперзију (мешање) у реактору и повећати коефицијент преноса масе у филму тако се да коначне перформансе реактора побољшавају.

UASB реактор тежи стварању густих честица биофилма (гранула) које нормално укључују милионе микроорганизама по граму биомасе. Ниједна од врста формираних микро-екосистема није способна да комплетно разлаже субстрат који долази са отпадном водом.

Комплетно растварање отпадне материје укључује серијску повезаност између присутних врста [21, 27].

Да би се постигла очекивана деградација органске материје у агрегатима муља, важно је одржавати услове под којима анаеробне грануле расту и правилно се понашају. Органска стопа подношења органских супстрата (*OLR - organic substrate loading rate*), треба да буде довољно висока: код ниских вредности микроорганизми су подложни загађењу хранљивих материја, док веома високе вредности одржавају брз раст микроба. [21, 28]

Најчешће коришћени приступ за описивање разградње супстрата унутар гранула је позната теорија биофилма. Према овој теорији, брзина претварања супстрата је ограничена брзином транспорта супстрата у биофилм. Када дебљина биофилма порасте, може доћи до ограничења масе, што доводи до укупног ограничења капацитета реактора. Под овим условима, утицај супстрата и/или излива производа може постати степен утврђивања брзине [21, 29].

У целој запремини течности, супстрат се транспортује протоком. Близу површине биофилма постоји гранични слој у коме се проток мења из турбулентног у ламинарни или стагнирајући. Пренос масе између турбулентног тока течности и површине биофилма (тј. спољног преноса масе) се одвија дифузијом течног филма. Транспорт супстрата унутар биофилма контролисан је молекуларном дифузијом (тј. унутрашњим преносом масе). Ако је брзина транспорта супстрата на површину биофилма иста као и брзина уклањања супстрата у биофилму, на површини не долази до акумулације [21, 30].

Многе студије су развијене како би се утврдио утицај обе дифузије и отпора масовног преноса на употребу супстрата унутар анаеробних гранула. Гонзалес Гил (2001) је рекао да спољна ограничења преноса масе нису битна у условима који се обично срећу у биореакторима (брзина протока већа од 1 m h^{-1}). Међутим, смањење отпорности трансфера масе течне фазе и редукције K_s вредности са повећањем брзине протока нагоре може се приписати побољшаном мешању течности и слоја муља. Ефекат брзине протока може се онда приписати смањењу приоритетног каналисања отпадне воде а не било ком директном утицају транспорта у анаеробном биофилму. Даље, важно је узети у обзир да ће производња гаса допринети већој проточној брзини мешања у реактору [21, 31].

4.2. Основни делови UASB реактора

Трофазни сепаратор (гаса, чврстих честица, течности) при врху реактора омогућава ефективну сепарацију биогаса произведеног у реактору и враћа распршен муљ натраг у муљни слој. Кретање гасних продуката дешава се на горе кроз реактор, пружа довољну

турбуленцију за одржавање реактора у флуидизованом стању. Представља врло важну компоненту система.

Трофазни сепаратор омогућава:

- хватање и сакупљање генерисаног биогаса,
- побољшање процеса таложења честица у зони реакције изнад сепаратора (задржава бактерије потребне за процес),
- минимизује појаву чврстих честица у ефлуенту,
- креира додатан простор изнад сепаратора за компензацију приликом великих хидрауличких оптерећења (експанзија муљне покривке).

Уколико трофазни сепаратор не функционише исправно, могуће је изливање биогаса који у додиру са муљном покривком смањује ефикасност таложења и спирање муља.

Молекуларна дифузија (унутрашњи транспорт масе) се сматра главним транспортним механизмом у анаеробном биофилму и сматра се да вредности унутрашњег коефицијента преноса масе остају константне без обзира на хидродинамичке услове у запремини течности, бар у ламинарном режиму (Brito, 1999). Укупна стопа уклањања нитрата у UASB реакторима зависи од отпора на пренос снаге и то не треба занемарити [21, 32]. У експериментима изведеним у анаеробном биофилму у условима стабилног стања, утврђено је да је дифузивност нижа од одговарајуће вредности у води [21, 33].

У табели 4 су приказани неки од произвођача UASB реактора и њихове цене.

Табела 4. Произвођачи UASB реактора

Произвођач	Цена (US \$)
<i>Shendong Huaneng Jinhao Enviromental Engineering Co., Ltd</i>	6,500-35,000
<i>Qiankun Enviromental Protection Joint Stock Co., Ltd</i>	50,000-100,000
<i>Shandong Jinhaosanyang Environmental Protection Machine Co., Ltd.</i>	7,000-89,000
<i>Beijing Meckey Engineering Co.</i>	5,000-50,000
<i>Qingdao All Universe Machinery Equipment Co., Ltd.</i>	6,600-16,600
<i>Wuxi Mingzhou Environmental Protection Machinery & Equipment Factory</i>	4,500-100,000
<i>Shijiazhuang Zhengzhong Technology Co., Ltd.</i>	5,000-50,000
<i>Shandong Xuridong Machinery Co., Ltd.</i>	6,000-128,000
<i>Qingdao Yimei Environment Project Co., Ltd.</i>	6,000-30,000
<i>Qingdao All Universe Machinery Equipment Co., Ltd.</i>	6,600-16,600
<i>Zhucheng Jinlong Machine Manufacture Co., Ltd.</i>	15,000-45,000

5. Прорачун UASB реактора

Посебно занимљива технологија за земље с високим температурама је употреба UASB реактора. У овом поступку одвајање отпадне воде, муља и гаса врши се при струјању према горе и одређеним брзинама без кориштења посебног уређаја.

Ови анаеробни реактори имају посебне предности у земљама с високим температурама, ако би се користити само при минималним температурама отпадних вода $> 15^{\circ}\text{C}$.

Они су су били прво развијени за обраду индустријских вода с великом органском концентрацијом, али све данас све више употребљавају за обраду отпадних вода из домаћинства.

Специфична потреба за површином реактора креће се при обради комуналних отпадних вода у зависности од времена задржавања, скупљања отпадних вода и висини реактора између 10 и 25 m^2 на 1000 становника, што значи да се ова технологија може реализовати на локацијама мањих површина.

Постоје два начина прорачуна димензија UASB реактора:

- уколико је $HPK < 2.5\text{ kg HPK/m}^3$, када би метод прорачуна требало засновати на брзини протока, коришћењем формуле $V_r = HRT \times Q$.
- уколико је улазни $HPK > 2.5\text{ kg HPK/m}^3$, метод прорачуна димензија би требало засновати на степену органског оптерећења (Organic Loading Rate – ORL), коришћењем формуле $V_r = (C \times Q_r) / r_v$.

HPK опсег нормалан за институционалне воде је $0,2$ до $0,5\text{ kg HPK/m}^3$, а за комуналне воде $0,6 - 0,9\text{ kg HPK/m}^3$.

Очекиван HPK отпадне воде = $2,48\text{ kg/m}^3$; чим је $HPK < 2,5\text{ kg/m}^3$, користи се $V_r = HRT \times Q$ где је:

Q – количина отпадне воде која се пушта кроз реактор,

HRT – хидрауличко време задржавања (*Hydraulic Retention Time*),

V_r – запремина реактора.

Ради израчунавања Q_r , користи се формула $Q_r = Q_{ov} \times 80\%$; где је Q_{ov} проток отпадне воде. Усвојено је да је проток отпадних вода $17\text{ m}^3/\text{h}$.

$$Q = 17 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 80\% = 13,6\text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_r = HRT \times Q; HRT = 4\text{ сата (стандард)} = 13,6\text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_r = 4 \times 13,6 = 54,4 \text{ m}^3 \approx 55 \text{ m}^3$$

Ради израчунавања висине резервоара користи се формула: $H = H_s + H_{se}$ где је:

H – Висина резервоара,

H_s – Висина муљне покривке (главни реактор)

H_{se} – Висина подручја седиментације

$H_s = V \times HRT$, где је V брзина струјања воде од 0,6 до 0,9 m^3/h

$$H_s = 0,6 \times 4 = 2,4 \text{ m}$$

Табела 5. Одређивање H_{se} :

Улазни НРК	Висина муљног слоја
$< 3000 \text{ mg/L}$	3 – 5 m
$> 3000 \text{ mg/L}$	5 – 7 m

У овом случају усваја се се $H_s = 3 \text{ m}$.

$$H_s = 2,4 + 3 = 5,4 \text{ m}$$

За прорачунавање димензија реактора правоугаоног облика, користи се однос $L:W = 2:1$.

С обзиром на то да је

$$V_r = L \times W \times H; L = 2W$$

$$55 \text{ m}^3 = (5,4) \times 2W^2$$

$$W = 2,36 \text{ m}$$

$$L = 4,72 \text{ m}$$

$$H = 5,4 \text{ m}$$

Усвајамо димензије реактора **5m x 2,5m x 5,4 m**.

Ради израчунавања створених неиспарљивих суспендованих честица при смањивању ВРК, мора се дефинисати следеће:

- μ - смањивање биохемијске потрошње кисеоника = 80%
- ВРК отпадне воде = 1393 mg/L
- Коефицијент приноса = 0,1

Сада се може употребити следећа једначина:

$$NVSS = \text{Коефицијент приноса} \times \text{ВРК} \times \mu = 0,1 \times 1393 \times 0,8 = 111,44 \text{ mg/L}$$

Претпоставља се да талог неиспарљивих суспендованих честица чини 30% укупног талоба, на основу чега може да се прорачуна удео испарљивих суспендованих честица.

$$VSS(1 - 0,3) = 400 \times 0,7 = 280 \text{ mg/L}$$

Пепео при уливању једнак је разлици између укупно суспендованих честица и испарљивих честица:

$$(TSS - VSS) \text{ mg/L} = 810 - 270 = 210 \text{ mg/L}$$

Настали муљ, по метру кубном прерађене воде представља збир неиспарљивих и испарљивих суспендованих честица и насталог пепела:

$$NVSS + VSS + \text{пепео} = 111,44 + 400 + 210 = 721,4 \text{ mg/L} = 0,721 \text{ kg/m}^3$$

Укупно произведен муљ се сада може израчунати:

$$\text{проток воде} \times \text{настали муљ} = 13,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times (24 \times 0,721 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) = 235,33 \frac{\text{kg}}{\text{dan}} \approx 235 \text{ kg/dan}$$

За израчунавање времена задржавања муља, користи се пропорција највише температуре, која одговара времену задржавања у трајању од 20 дана.

За израчунавање количине муља која би требало да се екстрахује на свака три дана, користи се $H_{se} = 3\text{m}$, и израчунава помоћу димензија реактора и висине седиментационе зоне.

$$V_{\text{муља}} = L \times W \times H_{se} = 5 \times 2,5 \times 3 = 37,5 \text{ m}^3$$

Количина муља која сме да се извади из резервоара је 30 до 50 %, а препоручљиво је екстраховати 30%.

$$V_{\text{одстрањено}} = 37,5 \text{ m}^3 \times 30\% = 11,25 \text{ m}^3 \approx 11 \text{ m}^3$$

Запреминско органско оптерећење (*volumetric organic loading* – ORL) представља оптимално просечно органско оптерећење једнако у целом реактору. Израчунава се односом НРК, протока воде и димензија реактора.

$$ORL = \frac{2,48 \text{ mg/l} \times 326,4 \text{ m}^3/\text{dan}}{5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m} \times 5,4 \text{ m}} = 12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ dan}} \text{ НРК}$$

Прихватљива граница за запреминско органско оптерећење се креће између 1-3 $gHPK/m^3 dan$.

Требало би пратити одређене савете приликом дизајнирања трофазног сепаратора:

- Нагип сепаратора (нагнути зид колектора гаса) би требало да буде под углом између 45 и 60 степени,
- Површина отвора између гасних колектора би требало да буде на 15-20% укупне површине реактора,
- Висина гасног колектора би требало да се креће између 1,5 и 2 m , када је висина реактора 5-7 m ,
- Како би се онемогућио пролазак гасних мехурова у простор за таложење, преклапање преграда постављених испод отвора требало би да буде око 10-20 cm ,
- Генерално, преграде за одвод пене би требало да буду уграђене на местима испуштања ефлуента,
- Пречник цеви за испуштање гаса би требало да је довољно велика да гарантује лако отклањање биогаза из колекционе капе, посебно у случајевима пењања,
- При врху гасне капе, добро је уградити млазницу са средством против пењања, у случајевима када се зна да ће третман отпадне воде пратити и обилно пењање.

5.1. Прорачун производње метана унутар UASB реактора

У овом делу ћиће приказана процедура прорачуна производње метана при третману отпадних вода из домаћинства и индустрије, а која је дефинисана IPPC директивом [33].

5.1.1 Отпадна вода из домаћинства

Једначина која се користи за прорачун производње метана приликом третмана отпадних вода из домаћинства је:

$$CH_4 = \left[\sum_{i,j} (U_i - T_{ij} \times EF_j) \right] \times (TOW - S) - R$$

где је:

CH_4 – месечна емисија метана у години постављања ($kg CH_4/год.$)

TOW – укупна органска материја у отпадној води ($kg BPK/год.$)

S – органска компонента уклоњена у облику муља ($kg HPK / год.$)

U_i – део популације групе прихода

T_{ij} – степен искоришћења третмана, излаза или методе за сваку групу прихода

i – група прихода: рурални, урбани високи приходи и урбани ниски приходи

j – начин третмана / начин испуштања или систем

EF_j – фактор емисије ($kg\ CH_4 / kg\ BPK$)

R – годишња количина регенерисаног CH_4 ($kg\ CH_4 / год.$)

Фактор емисије метана за сваки систем, третман и начин испуштања отпадне воде из домаћинства се рачуна помоћу следеће формуле:

$$EF_j = B_o \times MCF_j$$

где је:

EF_j – фактор емисије метана ($kg\ CH_4 / kg\ HPK$)

j – начин третмана/начин испуштања или систем

B_o – максимални капацитет производње CH_4 ($kg\ CH_4 / kg\ HPK$)

MCF_j – фактор корекције метана

Најбоље је при прорачунима користити податке који су карактеристични за сваку земљу за B_o , уколико су доступни у јединицама мере $kg\ CH_4 / kg\ BPK$. Уколико нису доступни ови подаци, усвоја се вредност од $0,6\ kg\ CH_4 / kg\ BPK$. За отпадне воде из домаћинства, вредност B_o која је базирана на ХПК, може бити претворена тако да се базира на БПК вредности, множењем са фактором 2,4. Табела 6. приказује усвојене вредности максималног производног капацитета CH_4 , (B_o) за отпадне воде из домаћинства [33].

Табела 6. Усвојене вредности максималног производног капацитета CH_4 , (B_o) за отпадне воде из домаћинства [33]:

0,6 $kg\ CH_4 / kg\ BPK$
0,25 $kg\ CH_4 / kg\ HPK$

Табела 7. Усвојене вредности за коефицијент MCF за отпадне воде из домаћинства [33]:

Тип третмана и начина испуштања или система	Коментари	MCF^1	Опсег
Нетретирани системи			
Испуштање у мора, реке језера	Реке са високим количинама органске материје могу да постану анаеробне	0,1	0 - 0,2
Устајала канализација	Отворена и топла	0,5	0,4 – 0,8
Текућа канализација (отворена или затворена)	Брз проток, чистоћа (незнатне количине CH_4 из пумпне станице, итд.)	0	0

Третирани системи			
Централизовани, аеробна постројења	Нису добре за управљање. Преоптерећење.	0,3	0,2 – 0,4
Анаеробни дигестор за обраду муља	Обнављање CH_4 није узето у обзир	0,8	0,8 – 1,0
Анаеробни реактор	Обнављање CH_4 није узето у обзир	0,8	0,8 – 1,0
Анаеробна плитка лагуна	Дубина: мање од 2 метра	0,2	0 – 0,3
Анаеробна дубока лагуна	Дубина: више од 2 метра	0,8	0,8 – 1,0
Септички систем	Половина БПК се складишти у анаеробном резервоару	0,5	0,5
Тоалети	Сува клима, водена површина на земљи нижа од тоалета, за мале породице (3 – 5 чланова)	0,1	0,05 – 0,15
Тоалети	Сува клима, водена површина на земљи нижа од тоалета, јавно (за више корисника).	0,5	0,4 – 0,6
Тоалети	Влажна клима, користи се вода за испирање, водена површина на земљи нижа од тоалета	0,7	0,7 – 1,0
Тоалети	Редовно уклањање наталожених честица које се касније користе као ђубриво	0,1	0,7 – 1,0

Једначина која се односи на укупан органски разградиви материјал у отпадним водама из домаћинства:

$$TOW = P \times BOD \times 0.001 \times I \times 365$$

где је:

TOW_i – укупни органски разградиви материјал у текућој години (kg БПК /год.)

P – људска популација у текућој години

BPK – специфично за сваку земљу, БПК по глави становника у текућој години год./особа/дан

0,001 – фактор конверзије из грама у килограме БПК

I – Корекциони фактор за додатни индустријски БПК због испуштања у канализацију (за сакупљајуће воде је усвојена вредност 1,25, за несакупљајуће је 1,00)

5.1.2. Отпадна индустријска вода

Једначине које се препоручују за прорачун производње метана приликом третмана индустријских отпадних вода је:

$$CH_4 = \sum_i [(TOW_i - Si)EF_j - R_i]$$

где је:

CH_4 – месечна емисија метана из UASB реактора ($kg/mesec$)

TOW_i – укупни органски разградиви материјал за дату индустрију ($kg\ HPK / год.$)

i – сектор индустрије

S_i – органска компонента уклоњена у облику муља ($kg\ HPK / год.$)

EF_i – фактор емисије за индустрију ($kg\ CH_4 / kg\ HPK$)

R_i – износ CH_4 обрачунат у текућој години ($kg\ CH_4 / год.$)

Фактор емисије метана за индустријске отпадне воде:

$$EF_j = B_o \times MCF_j$$

Пожељно је да се користе индустријски или државни подаци уколико је влада те државе одобрила да буду доступни. Уколико подаци за одређену земљу нису доступни, користи се ХПК усвојени фактор за B_o ($0,25\ kg\ CH_4 / kg\ HPK$) [33].

Табела 8. Усвојене вредности MCF за индустријске отпадне воде [33]:

Тип третмана и начина испуштања или система	Коментари	MCF^1	Опсег
Нетретирани системи			
Испуштање у мора, реке језера	Реке са високим количинама органске материје могу да постану анаеробне,	0,1	0 - 0,2
Третирани системи			
Централизовани, аеробна постројења	Морају имати добро управљање. Нешто CH_4 може бити емитовано из наслага или других цепова	0	0 – 0,1
Анаеробно постројење	Нису добра за управљање. Преоптерећење.	0,3	0,2 – 0,4
Анаеробни дигестор за обраду муља	Обнављање CH_4 није узето у обзир	0,8	0,8 – 1,0
Анаеробни реактор (UASB са фиксираним	Обнављање CH_4 није узето у обзир	0,8	0,8 – 1,0

слојем)			
Анаеробна плитка лагуна	Дубина мање од 2 метра	0,2	0 – 0,3
Анаеробна дубока лагуна	Дубина више од 2 метра	0,8	0,8 – 1,0

Укупни органски разградиви материјал за индустријске отпадне воде се рачуна као:

$$TOW_i = P_i \times W \times HPK_i$$

TOW_i – укупни органски разградиви материјал у текућој години ($kg\ HPK / год.$)

i – индустријски сектор

P_i – Укупна индустријска производња за индустријски сектор ($t/год$)

W_i – Генерисана отпадна вода ($m^3/t_{\text{производње}}$)

HPK_i – Хемијска потрошња кисеоника (индустријске разградиве органске компоненте у отпадној води ($kg\ HPK / m^3$))

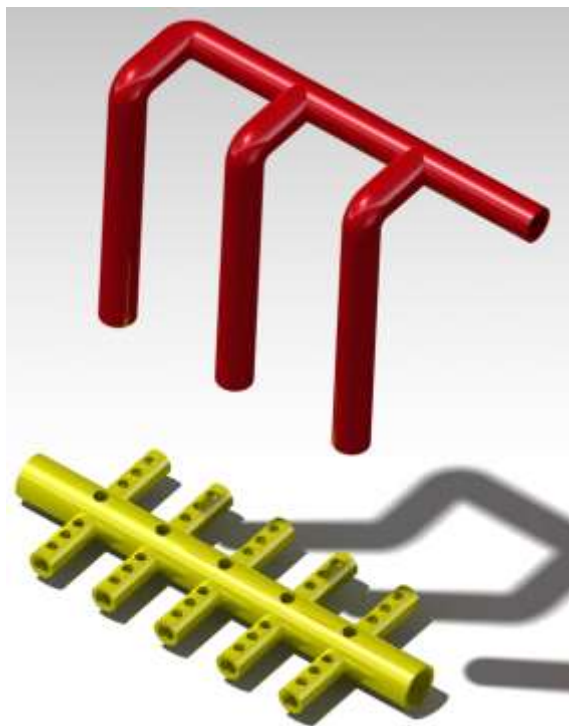
5.2. 3Д модел UASB реактора

У овом раду, на основу прорачуна, формиран је 3Д модел UASB реактора (слика 14) у софтверском пакету „Dassault Systemes Catia”. Овај 3Д модел UASB реактора се састоји из кућишта реактора, цеви за довод инфлуента, трофазног сепаратора, и цеви за одвод биогаса.



Слика 14. *3Д модел UASB реактора*

На слици 15. приказане су цеви за довод инфлуента и цеви за одвођење добијеног метана до резервоара, док је на слици 16. приказана унутрашњост UASB реактора са својим основним деловима.



Слика 15. *Цеви за довод инфлуента и одвод биогаса*



Слика 16. *Унутрашњост UASB реактора*

ЗАКЉУЧАК

Потрошња енергије је у порасту, нови извори за производњу електричне и топлотне енергије ће бити све потребнији, како у сектору индустрије тако и у општој потрошњи. Временом ће залихе конвенционалних енергената бити све мање и мање па ће когенерација из отпадних вода бити неопходна.

Постављање централног система за пречишћавање отпадних вода, у неком већем граду, уколико постоји река са великим протоком и великим загађењем је економски прихватљиво и еколошки потребно решење. Загађена вода представља велики еколошки проблем. Пречишћавање отпадних вода подразумева смањење или елиминисање штетних материја из воде и изводи се применом различитих физичких, хемијских и биолошких поступака у за то посебно намењеним базенима – реакторима.

Производња и коришћење биогаса из анаеробне дигестије има позитиван утицај на околину и друштвено-економске користи за друштво у целини. Искоришћавање унутрашњег вредносног ланца биогаса побољшава локалне економске услове и осигурава радна места у руралним подручјима, те повећава куповну моћ у регији. Самим тим, побољшава животни стандард и доприноси економском и социјалном развоју подручја.

Анаеробна дигестија се најчешће употребљава као процес третмана код јако оптерећених отпадних вода. Процес се темељи на конверзији органских једињења у CO_2 и метан – биогас, помоћу микроорганизама у условима без кисеоника и уз повишену температуру. Реактор са лебдећим муљем (Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactor – UASB reactor) представља комору за анаеробну реакцију отпадне воде са муљем који се налази у форми покривке. У UASB реактору отпадна вода има вертикалан ток струјања, са дна реактора, ка врху, на ком се налази трофазни сепаратор, један од кључних компонената, који раздваја генерисани биогас, отпадну воду и суспендоване честице.

UASB реактор представља технологију централизованог третмана вода и том технологијом морају управљати професионалци. Није погодан за мала или рурална подручја где није омогућено константно снабдевање водом и електричном енергијом. Количина биогаса која се добија у овим реакторима није довољна да задовољи све енергетске потребе модерног човека, али је њен значај утолико већи што се добија пречишћавањем отпадних вода.

Стиче се утисак да биогас представља органску сировину која је тренутно има веома мали степен искоришћења у односу на своје могућности. Данас се на научним скуповима и форумима све више покреће питање нивоа загађења, глобалном загревању, као и све мањим залихама нафте, тако да потенцијал оваквог извора енергије мора бити више искоришћен у будућности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] T. Abbasi et al., *Biogas Energy, Springer Briefs in Environmental Science 2*, Springer, 2012, ISBN 978-1-4614-1039-3
- [2] Вања М. Шуштершич, Ранђел Н. Китановић, *Третман отпадних вода*, Војнотехнички гласник, Вол. 59, Но 3, стр. 122-140, Београд 2013.
- [3] Миле Т. Клашња, Марина Б. Шћибан, *Основи процеса анаеробног пречишћавања отпадних вода прехрамбене индустрије и индустрије пића*, АПТЕФФ, 31, стр. 3- 22, Нови Сад, 2000.
- [4] Вања М. Шуштершич, *Технологије и постројења у припреми воде за пиће и третману отпадних вода*, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2014.
- [5] Pipeline, *Aerobic Treatment Units: An Alternative to Septic Systems*, Vol.16, NO.3, summer 2005. (http://www.nesc.wvu.edu/pdf/WW/publications/pipline/PL_SU05.pdf, преузето 10.05.2017.)
- [6] <http://www.biogas.rs/digestija.html>, преузето 07.05.2017.
- [7] Mogens Henze, Mark C. M. van Loosdrecht, George A. Ekama, Damir Brdjanovic, *Biological Wasterwater treatment: Principles, Modeling and Design*, Chapter 16, IWA Publishing, 2008.
- [8] Обновљиви извори енергије, Биогас, *Процес анаеробне дигестије*, (<http://www.green-group.rs/index.php?r=1922>, преузето 10.05.2017.)
- [9] *Activated sludge: Overview*, (<http://www.ewisa.co.za/misc/WasteWater/defaultas1.htm>, преузето 07.05.2017.)
- [10] Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, *Biological Wasterwater Treatment Series*, Volume four, Anaerobic Reactors, IWA Publishing, 2007.
- [11] <http://www.esco.rs/tretman-otpadnih-voda.html>, преузето 12.06.2017.
- [12] <http://encyclopedia.che.engin.umich.edu/Pages/Reactors/CSTR/CSTR.html>, преузето 03.09.2017.
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Continuous_stirred-tank_reactor, преузето 03.09.2017.
- [14] Eddy, M. a. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, fourth ed. McGraw Hill 2003.
- [15] <http://www.megaprojekt.rs/dokumenta/01.pdf>, преузето 03.09.2017.

- [16] <http://www.sswm.info/content/anaerobic-filter>, прегледано 10.01.2017.
- [17] https://wikivisually.com/wiki/Upflow_anaerobic_sludge_blanket_digestion, прегледано 4.10.2017.
- [18] Raúl Rodríguez Gómez, *UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET REACTOR: MODELLING*, Department of Chemical Engineering and Technology, School of Chemical Science and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden 2011
- [19] Lettinga G. *Digestion and Degradation*, Air for Life. Water Science and Technology, 2001
- [20] Jules B. van Lier, Anand Vashi, Jeroen van der Lubbe and Barry Heffernan, *Anaerobic Sewage Treatment using UASB Reactors: Engineering and Operational Aspects*, 2010
- [21] Larisa Korsak, *ANAEROBIC TREATMENT OF WASTEWATER IN A UASB REACTOR*, Department of chemical engineering and technology, Stockholm, Sweden, December 2008
- [22] Kalyushnyi, V., V.V. Fedorovich, and P.Lens, *Dispersed plug flow model for upflow anaerobic sludge bed reactors with focus on granular sludge dynamics*, Industrial Microbiology and Biotechnology, 2006
- [23] Leitão R., *Robustness of UASB reactor treating sewage under tropical conditions*, Thesis doctoral, Wageningen University, Wageningen, Netherlands, 2004
- [24] Alvarez, J.A., I. Ruiz, M. Gomez, J. Presas and M. Soto, *Start-up alternatives and performance of an UASB pilot plant treating diluted municipal wastewater at low temperature*, Bioresource Technology, 2006
- [25] <http://mechwat.blogspot.rs/2016/07/uasb-upflow-activated-sludge-blanket.html> прегледано 24.10.2017.
- [26] Zeng, Y., S.J.Mu. S.J.Lou, B. Tartakovsky, S.R. Guiot and P. Wu, *Hydraulic modeling and axial dispersion analysis of UASB reactor*. *Biochemical Engineering Journal* 25, 2005.
- [27] Liu, Y., H-L, Xu, K-Y, Show and J-H, Tay, *Anaerobic granulation technology for wastewater treatment*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2002.
- [28] Bitton G., *Wastewater microbiology*, New York, 1999.
- [29] Gonzalez-Gil, G., Seghezzo, L., Lettinga, G., Kleerebezem, R., *Kinetics and Mass-transfer phenomena in anaerobic granular sludge*. *Biotechnol Bioeng*, 2001.
- [30] Christiansen, P., L. Hollesen and P. Harremoës, *Liquid film diffusion on reaction rate in submerged biofilters*. *Water Research*, 1995.

- [31] Ting, Wen and Ju-Sheng Huang, *Influence of mass transfer resistance on overall nitrate removal rate in upflow sludge bed reactor*, Chemosphere, 2006.
- [32] Kitsos HM, RS Roberts, W J. Jones and TG. Tornabene, *An experimental study of mass diffusion and reaction rate in an anaerobic biofilm*, Biotechnol Bioeng, 1992.
- [33] IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, CHAPTER 6 - WASTEWATER TREATMENT AND DISCHARGE, 2006