

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Марко Р. Мајсторовић

Нове тенденције у третману отпадних вода

мастер рад

Крагујевац, 2016.

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: 341/2013

Марко Р. Мајсторовић

Нове тенденције у третману отпадних вода

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Вања Шуштершич - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да опише настанак и врсте отпадних вода, аеробне и анаеробне процесе у третману отпадних вода, као и да прикаже нове технологије које се користе у третману отпадних вода, и то пре свега примену и принцип рада биодискова, СБР, УАСБ, АБР и МБР реактора. За све системе је неопходно дати прорачун, произвођаче и примену.

Препоручена литература:

- [1] D. Ljubisavljević, A. Djukić, B. Babić: *Prečišćavanje otpadnih voda*, Građevinski fakultet, 2004
- [2] Cvetković Dragan, Šušteršič Vanja, *Uporedni pregled karakteristika rotacionih biodiskova i sekvencijalnih faznih reaktora za tretman komunalnih otpadnih voda*, Vodoprivreda, Vol.43, br.4-6, str. 249-257, 2011.
- [3] Klašnja Mile, Šćiban Marina, *Osnovi procesa anaerobnog prečišćavanja otpadnih voda prehrambene industrije i industrije pića*, APTEFF, 31, str. 3-22, 2000.

Крагујевац, 2016.

ментор:

Име, презиме и звање ментора
др Вања Шуштершич, ванр. проф.

Резиме

Пречишћавање отпадних вода пре њиховог испуштања представља кључан корак у очувању околине. Битно је на адекватан начин пречистити и комуналне и индустријске отпадне воде. Приликом процеса пречишћавања, зависно од потреба средине, али и физичких, хемијских и биолошких карактеристика, бирају се аеробни или анаеробни процеси пречишћавања отпадних вода. Овај рад даје преглед одређених технологија коришћених при аеробном и анаеробном пречишћавању. Такође се даје кратак осврт на ситуацију у Србији и препоруке за даљи развој ових технологија.

Кључне речи: отпадне воде, пречишћавање, аеробни процеси, анаеробни процеси, технологија

Abstract

Treatment of wastewater before it is released into the environment represents a crucial step in the conservation of the environment. It is important to adequately treat both urban and industrial wastewater. During the treatment process, depending on the needs of the surroundings, as well as physical, chemical and biological properties of wastewater, aerobic or anaerobic treatment is chosen. This paper offers an overview of certain technologies used in aerobic and anaerobic treatment. It also provides a brief overview of the situation in Serbia, as well as some recommendations for the further development of these technologies.

Key words: wastewater, treatment, aerobic treatment, anaerobic treatment

Садржај:

1. Увод.....	4
2. Основне напомене о отпадним водама	6
2.1 Физичко-хемијске карактеристике отпадних вода	7
2.1.1 Физичке карактеристике	7
2.1.2 Хемијске карактеристике	8
2.1.3 Биолошке карактеристике.....	9
3. Начини пречишћавања отпадних вода.....	12
4. Аеробни процеси у третману отпадних вода	17
5. Ротациони биодискови (RBC).....	19
5.1 Прорачун RBC-а.....	22
6. Секвенцијални шаржни реактор (SBR).....	24
6.1 Прорачун SBR-а	29
7. Анаеробни процеси у третману отпадних вода	35
8. Дигестори са слојем муља (UASB реактори)	38
8.1 Прорачун UASB реактора	44
9. Анаеробни реактори са преградама (ABR реактори)	48
9.1 Прорачун ABR.....	51
10. Мембрански биолошки реактори (MBR реактори)	54
10.1 Прорачун MBR-а.....	64
11. Коришћење и третман комуналних и индустријских отпадних вода у Србији	66
11.1 Управљање комуналним и индустријским отпадним водама	66
11.2 Примери добре праксе у пречишћавању индустријских отпадних вода	68
12. Закључак	70
13. Литература.....	71

1. Увод

У прошлости, отпадна вода се испуштала у околину без икакве прераде. Сматрало се да ће реципијент те воде сам, на неки начин пречистити. Међутим, таква пракса је довела до тога да се поремети равнотежа у многим воденим системима. Такође, дошло је до уништавања одређених организама у системима у које је доспела непречишћена отпадна вода. Временом се схватио значај адекватног пречишћавања отпадне воде.

Међутим, и дан данас, на почетку 21. века, у свету постоји много проблема по питању квалитета воде, насталих као последица раста популације, урбанизације, коришћења земљишта, индустријализације, производње хране у прехранбеној индустрији, али и незадовољавајућих пракси и стратегија у области пречишћавања отпадних вода. Управљање отпадним водама има директан утицај на биолошки диверзитет водених екосистема, а самим тим, индиректно утиче на урбани развој, производњу хране и индустрију. Због свега овога, од суштинске је важности да управљање отпадним водама буде део интегрисаног еколошки-заснованог система за управљање свим димензијама одрживог развоја (социјалном, економском и заштитом животне средине [1]).

Након што се завршио период реализације Миленијумских циљева развоја (до 2015. године), по питању вода, може се приметити да је фокус био на пијаћој води и санацији. Међутим, није довољно пажње посвећено крајњим производима, односно, отпадним водама. Самим тим, неадекватни третман отпадних вода је можда погоршао глобално стање проблема везаних за квалитет воде. Третирање квалитета воде и пречишћавање отпадних вода су две области које су међусобно повезане и треба им дати подједнако пажње.

Како би системи за пречишћавање отпадних вода били одрживи у свету, а нарочито у земљама у развоју, потребно је примењивати што једноставније и јефтиније системе, при чему се њихова ефикасност не сме умањивати [2]. Мора се имати у виду да је општи циљ пречишћавања отпадних вода отклањање органских материја и индустријских загађивача, без опасности по људско здравље и без загађења околине. Конвенционално пречишћавање отпадних вода састоји се од комбинације физичких, хемијских и биолошких процеса и операција за уклањање чврстих загађивача и органских материја [3]. Поред тога битно је и пожељно да технологије које се користе имају могућност опоравка ресурса и поновног коришћења пречишћене отпадне воде.

Како би се нашло оптимално решење за пречишћавање отпадних вода, битно је имати у виду физичко-хемијске и биолошке карактеристике отпадне воде, као и познавање закона и прописа заједнице. Поред тога, треба, по потреби, спровести механичко, физичко-хемијско и/или биолошко пречишћавање. Такође, треба одлучити између

коришћења аеробних или анаеробних процеса. Аеробни и анаеробни процеси пречишћавања се јављају као конкурентни и као допуњујући процеси.

2. Основне напомене о отпадним водама

Постоји велики број дефиниција отпадних вода. Једна врло широка дефиниција се може извести из UNEP/UN-HABITAT (*eng. the United Nations Environment Programme, the UN Human Settlements Programme*) документа под називом “Болесна вода?”. На основу овог документа, отпадна вода се може дефинисати као комбинација једног или више следећих елемената:

- отпадних вода из домаћинства које садрже “црну воду” (фекалије и урин) и “сиву воду” (отпадне воде из кухиње и купатила);
- воду из комерцијалних установа и институција, укључујући и болнице;
- индустријске отпадне воде и друге урбане сливове;
- отпадне воде настале при земљорадничким процесима, било да су растворене потпуно или не [1].

Такође, једна од могућих дефиниција је следећа: “Вода онечишћена на било који начин током употребе представља отпадну воду.”

По начину настанка, загађивање може бити природно и антропогено. Природно загађивање настаје деловањем природних сила, као што су вулканске ерупције, поплаве, и друге. Са друге стране, антропогено загађивање настаје као последица делатности људи. Разликујемо следеће видове антропогеног загађивања [4]:

1. механичко (уношењем крутих отпадака),
2. физичко (у вези с променама температурно-енергетских и радијационих показатеља),
3. микробиолошко (појава нових микроорганизама или пренамножавање постојећих),
4. хемијско (продирање хемијских елемената и једињења која мењају хемијске особине воде).

Отпадна вода садржи различите загађиваче. Они могу бити растворене и нерастворене органске и неорганске материје, као и различити микроорганизми. Они укључују:

- азот, фосфор, калцијум;
- патогене микроорганизме (вирусе, бактерије, протозое);
- тешке метале (на пример: кадмијум, хром, бакар, жива, никл, олово и цинк);

- органске загађиваче (на пример: полиароматске хидрокарбоне, пестициде) и биоразградиве органске материје (BPK/BOD – *Biochemical Oxygen Demand*, НРК/COD – *Chemical Oxygen Demand*) и
- микро-загађиваче (лекове, козметичке препарате, средства за чишћење).

Све материје од горе наведених могу проузроковати здравствене и еколошке проблеме и могу имати економске и/или финансијске последице у случајевима када се отпадне воде на неадекватан начин испуштају у околину или ако се испуштају пре него што буду подвргнуте неком третману за пречишћавање.

2.1 Физичко-хемијске карактеристике отпадних вода

Све отпадне воде се разликују у односу на своје карактеристике, па је тешко извести неку општу поделу. Можемо разликовати:

1. физичке карактеристике,
2. хемијске карактеристике и
3. биолошке карактеристике.

2.1.1 Физичке карактеристике

Најзначајније физичке карактеристике су садржај суве материје, боја, мирис и температура воде. Поред тога, битни су и следећи параметри: мутноћа, укус, електропроводљивост и садржај флотирајућих материја [4].

- Суву материју можемо дефинисати као остатак након сушења узорка на температури од 103-105°C. Она представља најважнију физичку карактеристику отпадних вода. Филтрацијом се сува материја може раздвојити на суспендоване честице и на филтрат, који чине колоидне честице и раствор. Суспендоване честице углавном имају пречник од око 1 μm и већи. Одређена количина суспендованих честица се лако таложи и она се отклања одређеним уређајима за таложење. Са друге стране, колоидне честице се не могу уклонити тим путем, већ се морају применити неки сложенији процеси, попут коагулације или биолошке оксидације, након чега следи таложење.
- Боја нам омогућава да грубо проценимо стање отпадне воде. „Свеже“ отпадне воде су обично сиве боје, док „одлежале“ отпадне воде имају црну боју.
- Мирис отпадне воде потиче од гасова који настају у процесу распада органских материја у отпадној води. Људи су генерално најосетљивији на ову карактеристику отпадних вода.

- Температура је значајна карактеристика отпадне воде јер утиче на биосвет водотокова у које се испуштају такве загрејане отпадне воде, првенствено зато што се на вишим температурама растворљивост кисеоника у води смањује.

2.1.2 Хемијске карактеристике

У зависности од порекла отпадне воде, разликујемо више хемијских карактеристика отпадне воде [4].

- *Органске материје* представљају најзначајнију хемијску карактеристику отпадне воде. Правило је да се одређује укупан садржај органске материје, а ређе се одређује садржај одређених органских једињења.
- *Биохемијска потрошња кисеоника* (ВРК – *eng. Biochemical Oxygen Demand, BOD*) представља стандардни метод за индиректно мерење количине кисеоника која је потребна за оксидацију коју врше аеробни микроорганизми у једном узорку воде. Ова процедура се заснива на активностима бактерија и других аеробних микроорганизама, који се хране органском материјом у присуству кисеоника. Резултати поступка одређивања биохемијске потрошње кисеоника показују количину кисеоника која је разграђена у води, а коју утросе аеробни микроорганизми који се налазе у тами у периоду од пет дана на температури од 20°C. Што је већи резултат добијен, то је веће загађење у тестираном узорку отпадне воде. Због тога се најчешће одређује ВРК₅ који управо показује потрошњу кисеоника у првих пет дана. Вредност ВРК₅ износи 70-80% од ВРК. ВРК се изражава у mg/l, mg/m³, g(cm·dan), g/dan.
- *Хемијски потребна количина кисеоника* (НРК – *eng. Chemical Oxygen Demand, COD*) представља стандардни метод за индиректно мерење степена загађености отпадних вода на основу количине кисеоника која је потребна за оксидацију органских компоненти и неорганских соли, које су растворене или суспендоване у отпадној води. Резултати поступка одређивања хемијски потребне количине кисеоника показују количину кисеоника која је разграђена у води, а коју утросе загађивачи током два сата, уз помоћ бихроматне оксидације у јако киселом раствору. НРК се може одредити и теоријским путем преко стехиометријских једначина (под условом да је познат хемијски састав органских компоненти), при чему су лабораторијски измерене вредности углавном мање од теоријских. НРК се најчешће изражава потрошњом O₂ у mg/l.
- *Укупан органски угљеник* (*eng. TOC – Total Organic Carbon*) је термин који се користи за дефинисање количине органски везаног угљеника у отпадној води. Одређује се мерењем количине CO₂ насталог оксидацијом органског угљеника. ТОС боље показује садржај органских материја у отпадној води, али се ни ВРК и НРК не могу занемарити јер дају различите врсте информација које су такође битне.

- *Протеини, угљени хидрати, уља и масти* представљају неке од најважнијих група органских једињења, па је битно одредити и њихову концентрацију у отпадној води због потенцијалног утицаја који имају на екосистем. Ова органска једињења се различито понашају приликом пречишћавања. Протеини су најважнији извори азота у водотоковима; угљени хидрати су специфични јер се њихова биоразградљивост одвија различитом брзином; уља и масти су карактеристични јер стварају танак површински филм на води.
- Специфична органска једињења, као што су *површински активне материје, пестициди, феноли*, могу да се нађу у отпадним водама у одређеној мери у зависности од порекла отпадних вода. Ова органска једињења се најчешће јављају у отпадним водама индустријског порекла. Често је њихова биоразградљивост спора или уопште нису биоразградљива, него чак и токсична. У сваком случају ова једињења негативно утичу на употребну вредност воде реципијента. Површински активне материје углавном обухватају разне детергенте који изазивају пењење на површини воде, што отежава унос кисеоника. Пестициди и хербициди могу бити веома токсични по живи свет у води.
- *Неорганске материје* негативно утичу на реципијенте и морају се уклањати пречишћавањем.
- *Азот* и *фосфор* спадају у најважније биогене елементе што значи да већа концентрација ових елемената у отпадним водама доводи до прекомерног раста воденог биља. За *сумпор* је карактеристично да се редукује из сулфата, који се врло често налазе у великим концентрацијама у отпадним водама, у анаеробним условима до водониксулфида H_2S , који је изузетно токсичан.
- *pH, алкалитет и киселост* представљају битне карактеристике отпадне воде. Екстремне pH вредности отежавају биолошко пречишћавање отпадне воде. Може се рећи да је pH вредност показатељ који се односи на квалитет отпадне воде, док са друге стране алкалитет и киселост представљају квантитативне показатеље. Познавање садржаја алкалија или киселина је неопходно за процесе хемијске обраде отпадне воде.
- *Тешки метали и токсичне супстанце* се најчешће јављају у отпадним водама индустријског порекла. Присуство тешких метала и других токсичних супстанци (као што су цијаниди, хлорована органска једињења, итд.) доводи у питање поновну употребу те контаминираних вода.

2.1.3 Биолошке карактеристике

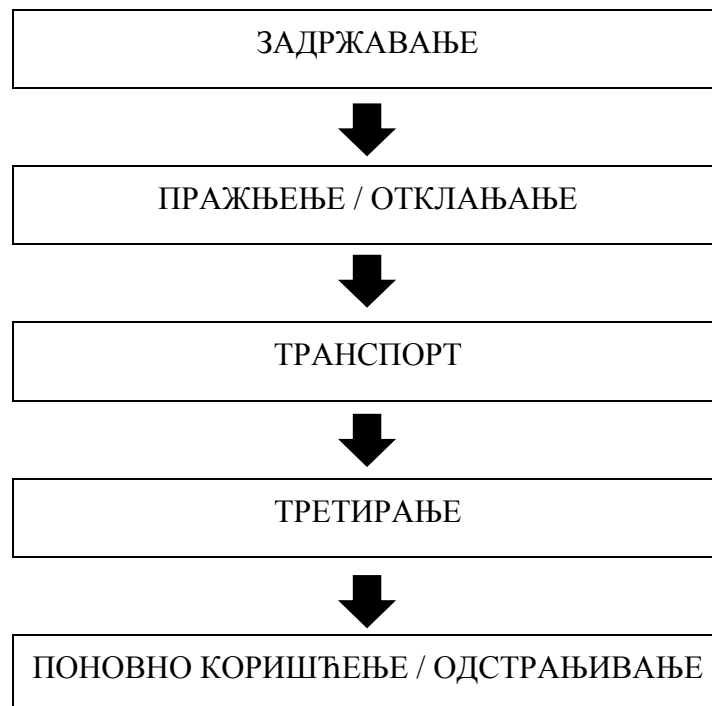
Одређене биолошке карактеристике отпадних вода пре и после пречишћавања су веома битне за одређивање квалитета отпадне воде.

- *Микробиолошка истраживања* су битна за одређивање санитарног квалитета воде. У том смислу је од изузетног значаја одредити концентрацију одређених микроорганизама који могу бити и патогени и самим тим изазвати тешке болести.
- *Биолошка испитивања* се користе да би се утврдила токсичност отпадне воде на биосвет водотокова јер се она не може утврдити само на основу физичких и хемијских карактеристика.

Најзначајнији загађивачи отпадних вода потичу из:

1. насеља,
2. пољопривреде и сточарства,
3. индустрије (која свакако највише доприноси загађивању).

Неопходно је да сви ови извори имају одговарајућу инфраструктуру за пречишћавање отпадних вода, мада је то често велики проблем јер је инфраструктура у великом броју случајева застарела. Често се дешава да комунална и атмосферска отпадна вода имају заједничке канализационе отворе, што ствара додатне потешкоће при пречишћавању, поготову у градовима у земљама у развоју. Можда су некада и постајали одвојени системи за одвођење отпадних вода али су због раста популације они постали преоптерећени. Комуналне и атмосферске отпадне воде је могуће опет користити у неким ситуацијама али само након адекватног пречишћавања. Међутим, ако оне долазе из истог система, тешко је пречишћавати их заједно јер комуналне отпадне воде често садрже неке тешке метале. На слици 1 се може видети шема са типичним корацима при пречишћавању отпадне воде.



Слика бр. 1 – Типични кораци при пречишћавању отпадне воде [1]

Ефективни системи за одвођење отпадних вода су кључни за успешно третирање отпадних вода. Али, они истовремено представљају најскупљи елемент укупних капиталних трошкова за успостављање доброг оперативног система за управљање отпадним водама. Међутим, стварност је да у многим местима широм света не постоје одговарајући системи или постоје нефункционални системи за управљање отпадним водама. Постоји више разлога због чега се то дешава, а неки од њих су:

- неуспешно планирање и постављање мрежа канализационих цеви за сакупљање отпадних вода,
- старе мреже или мреже које су пропале у току времена,
- постављање неодговарајућих система,
- неодговарајуће одређивање величине система (у односу на токове отпадних вода или на концентрацију популације),
- неадекватна прилагођеност озбиљним атмосферским непогодама, као што су олује,
- неадекватан рад и неадекватно одржавање система, и
- неадекватне регулације и контроле конекција између мрежа.

Уколико не постоје мерења у оквиру мреже канализационих цеви за одвод отпадних вода, знатно се ограничава могућност да се квантификује количина отпадне воде која се испусти у околину у одређеном подручју. То представља велики проблем јер је неопходно на неки начин одредити везу између количине отпадних вода и загађености у одређеном месту. Количина отпадних вода се може измерити или проценити. Мерење је најпрецизнији начин али уједно и најтежи. Са друге стране, доношење процене о количини отпадних вода на основу различитих чинилаца је најмање сигуран начин.

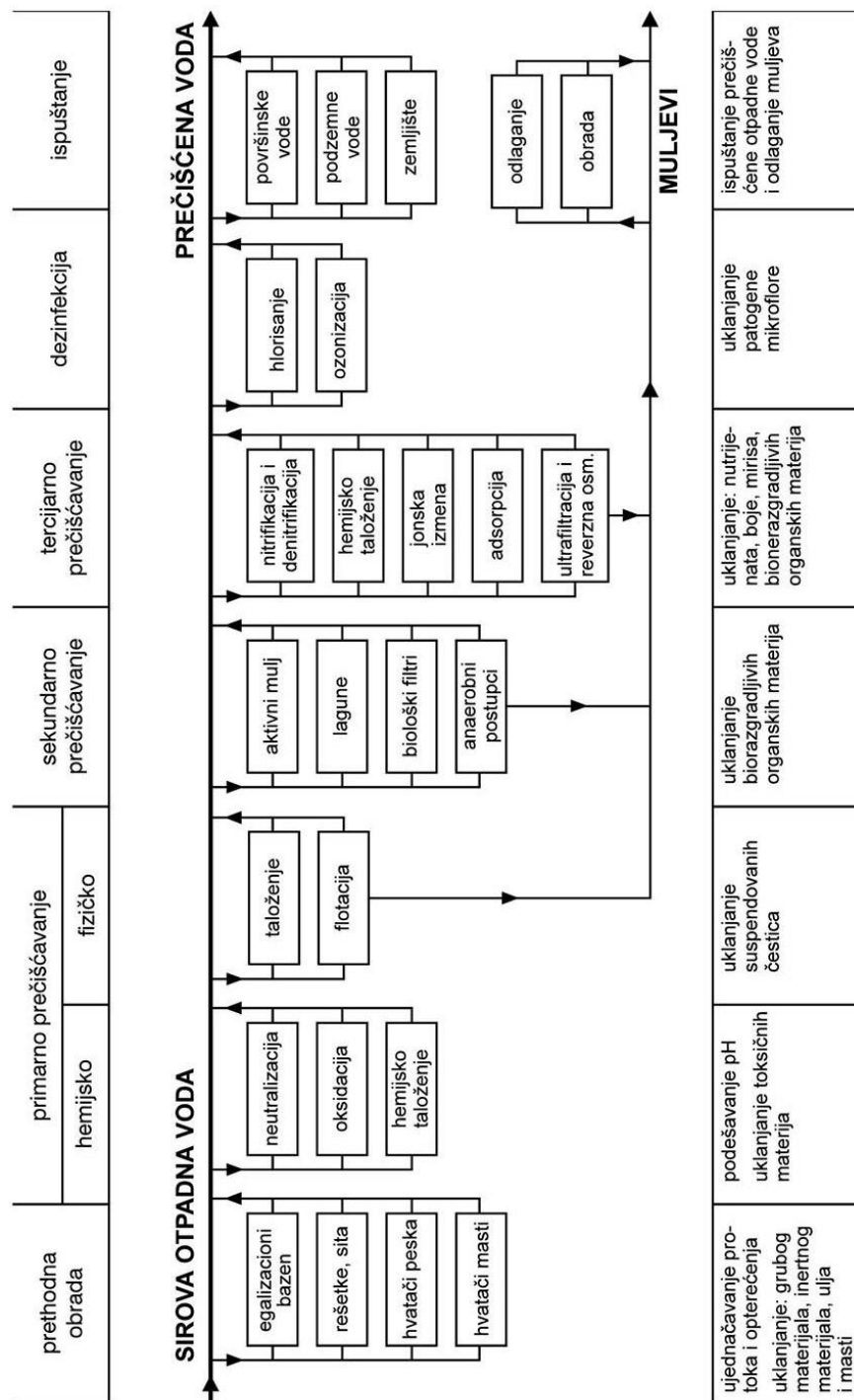
3. Начини пречишћавања отпадних вода

Сврха пречишћавања отпадних вода је да се спречи загађивање реципијента штетним материјама услед директног испуштања непречишћених отпадних вода. Пречишћавање отпадних вода као резултат има смањење или потпуно уклањање елемената који могу негативно да утичу на животну средину уопште. Пречишћавање отпадних вода подразумева различите механичке, физичке, хемијске и биолошке поступке. Међутим, сам процес пречишћавања, као и жељени резултат, зависе од низа фактора:

- За почетак, битан је сам квалитет сирове отпадне воде.
- Затим, зависно од квалитета реципијента разликују се и захтеви који се односе на квалитет пречишћене отпадне воде.
- На крају, сам процес пречишћавања зависи и од могућности примене различитих поступака, што зависи од многих фактора.

Што се тиче комуналних и индустријских отпадних вода, разликујемо три степена, односно, три корака у процесу пречишћавања отпадних вода. То су примарни, секундарни и терцијани третман. Примена ових система за пречишћавање отпадне воде треба да буде континуирана и неометана, са минималним одржавањем.

1. *Примарни третман* отпадне воде се још назива и претходно пречишћавање. Заснива се на процесима механичког пречишћавања. Подразумева коришћење решетки и таложника како би се раздвојиле крупне материје које плутају и које се таложе и које би могле угрозити рад пумпи и других машина у даљем процесу пречишћавања.
2. *Секундарни третман* отпадне воде је током времена постао једна од неопходних фаза. Овај корак у целокупном процесу се заснива на процесима биолошког пречишћавања. Заснива се на томе да се у контролисаним условима споје отпадна вода, бактерије и кисеоник како би бактерије разградиле органске материје у отпадној води.
3. *Терцијарни третман* је свакако најнапреднији корак. Заснива се на коришћењу физичких и хемијских процеса дезинфекције отпадне воде пре него што се она опет употреби у одређене сврхе. Овај последњи третман треба да финализира квалитет отпадне воде пре него што се она на неки начин испусти у животну средину.



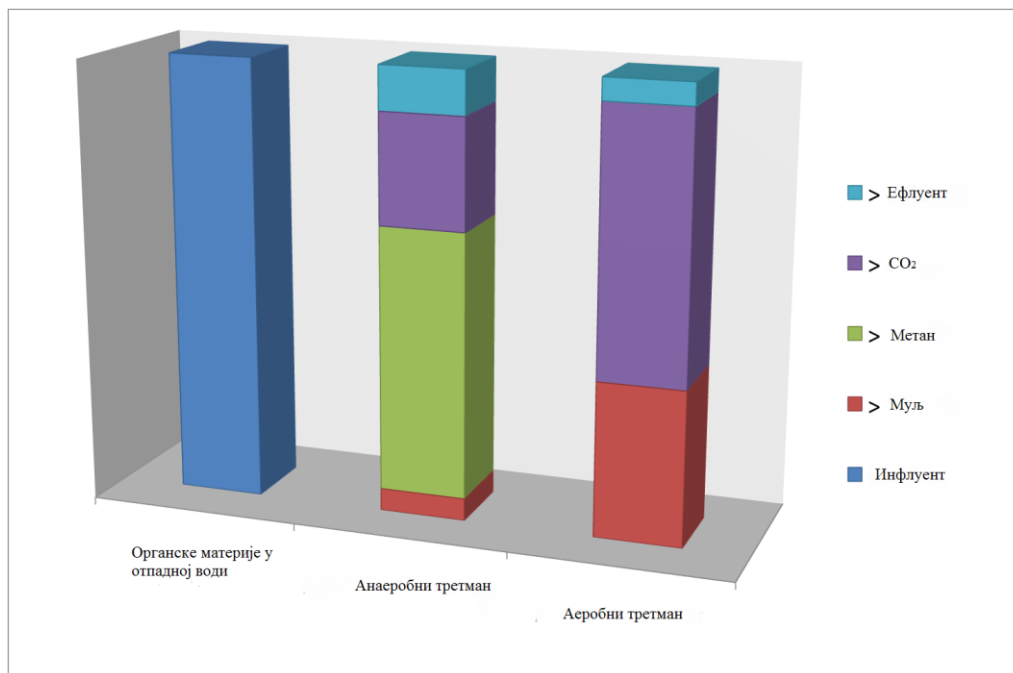
Слика бр. 2 – Општа шема процеса пречишћавања отпадних вода, која обухвата комуналне и индустријске отпадне воде, у случају пречишћавања са отпадним водама насеља [5]

За разлику од механичких, физичких и хемијских процеса, биолошки процеси се заснивају на активности комплексне микрофлоре. Одређени микроорганизми у отпадним водама користе органске и део неорганских материја из воде за активности које их одржавају у животу и тиме пречишћавају отпадне воде. Биолошки процеси не могу у потпуности да пречисте отпадну воду, али могу да отклоне највећи део органског загађења. Као што је већ речено, ови процеси се одвијају након механичких процеса, у секундарном кораку пречишћавања отпадних вода.

Биолошко пречишћавање се примењује за:

- уклањање органских материја,
- уклањање азота као биогеног елемента,
- разградњу примарног муља из процеса примарне обраде отпадних вода,
- разградњу секундарног муља из процеса биолошке обраде отпадних вода [4].

Код биолошких процеса пречишћавања отпадних вода разликујемо два типа процеса: аеробне и анаеробне. Ова два термина су директно повезана са типом бактерија или микроорганизма који су укључени у отклањање органског онечишћења вода и са радним условима биореактора. Дакле, аеробни процеси се одвијају у присуству ваздуха и заснивају се на активностима микроорганизма који користе молекуларни/слободни кисеоник како би превели органске нечистоће у угљен-диоксид, воду и биомасу. Са друге стране, анаеробни процеси се одвијају у одсуству ваздуха и заснивају се на активностима микроорганизма који не захтевају молекуларни/слободни кисеоник како би отклонили органске нечистоће.



Слика бр. 3 – Приказ учинка анаеробних и аеробних процеса [6]

У наредној табели ће бити дат преглед основних разлика између ова два процеса, а више речи о њима ће бити даље у раду.

Табела 1. Основне разлике између аеробних и анаеробних процеса

ПАРАМЕТАР	АЕРОБНИ ТРЕТМАН	АНАЕРОБНИ ТРЕТМАН
Принципи на којима је заснован процес	Микробне реакције се одвијају у присуству кисеоника. Биолошки процеси доводе до производње CO ₂ , воде и биомасе.	Микробне реакције се одвијају у одсуству кисеоника. Биолошки процеси доводе до производње CO ₂ , метана и биомасе.
Могућност примене	Отпадне воде са ниском до средњом концентрацијом органских нечистоћа (НРК<1000 ppm) и за отпадне воде које су тешко биоразградиве, као што је комунална отпадна вода.	Отпадне воде са средњом до високом концентрацијом органских нечистоћа (НРК>1000 ppm) и за отпадне воде које су лако биоразградиве, као што су отпадне воде из прехранбене индустрије.
Квалитет ефлуента	Одличан квалитет.	Средњи (до лоши) квалитет.
Брзина одвијања процеса	Релативно брза (2-4 недеље).	Релативно спора (2-4 месеца).
Нуспродукти	Релативно велика количина муља (што представља проблем због одлагања). Нема толико непријатних мириса.	Релативно мала количина муља (углавном једнака једној петини или једној десетини укупне количине). Потенцијални проблеми са непријатним мирисима.
Накнадни третман	Обично директно испуштање или филтрација/дезинфекција.	Увек праћен аеробним третманом.
Карбонски отисак	Релативно велики.	Релативно мали и компактан.
Трошкови	Релативно високи трошкови. Велика потрошња електричне енергије.	Релативно ниски трошкови уз могућност повраћаја новца. Ниска до умерена потрошња електричне енергије.

У неким случајевима, при пречишћавању индустријских отпадних вода које садрже високу концентрацију органских загађивача, аеробни или анаеробни процеси појединачно не дају ефлуент задовољавајућег квалитета. Због тога се ова два начина пречишћавања отпадних вода могу и комбиновати, па можемо имати секвенцијалне анаеробне-аеробне процесе. Овакви процеси користе најбоље карактеристике оба типа процеса на најисплативији начин. Они троше знатно мање електричне енергије, производе мању количину муља и мање су комплексни у раду [2]. Поред тога, комбиновани процеси имају већу ефикасност у отклањању органских загађивача и код њих нема потребе за рН корекцијом [7].

Са оперативне и економске тачке гледишта, може се закључити да усвајање анаеробних-аеробних процеса у пречишћавању јако загађених индустријских отпадних вода јер ова комбинација спаја предности анаеробне дигестије (производњу биогаса) са предностима аеробне дигестије (боље отклањање НРК-а). Због свега овога се увелико ради на развоју оваквих система у процесима пречишћавања комуналних отпадних вода.

Било да се ради о аеробним или анаеробним процесима у третману отпадних вода, сваки тип процеса има своју употребу у данашњем свету. Иако су различити, оба процеса се користе како би се постигла максимална разградња, док се истовремено испуњавају строги прописи које поставља Агенција за заштиту животне средине која регулише шта се испушта у атмосферу, тло или воду.

4. Аеробни процеси у третману отпадних вода

Аеробни третман отпадних вода представља процес у којем бактерије користе кисеоник за разграђивање органске материје (која се генерално квантификује као ВРК) и за разграђивање других загађивача који се јављају у разним производним системима. Три најчешће заступљена поступка у овом начину третирања отпадних вода јесу системи са активним муљем у биоаерационим базенима, системи са аерисаним лагунама (биолошким лагунама) и системи у аеробним (плитким) језерима (биолошким вештачким језерима). Ови системи се често користе у индустрији за прераду папира, али и у неким другим индустријама.

У типичном систему за третирање отпадних вода, инфлуент који улази у систем има највишу вредност ВРК зато што он још увек није подвргнут третману пречишћавања. Када инфлуент дође до аерисаног базена, он улази у аерисано окружење где почиње процес деградације. Различити типови аерације се користе у овим базенима, али се најчешће користе површински аерациони системи или дифузиони аерациони системи. При коришћењу површинских аерационих система, потребно је правилно поставити више јединица у којима ће се третирати отпадна вода. Дифузиона аерација подразумева испуштање ваздуха помоћу компресора преко цеви равномерно кроз цео базен.

Разграђивање ВРК се постиже уз помоћ аеробних бактерија у систему. Ове бактерије користе кисеоник као рецептор електрона како би конвертовали органску материју у угљен-диоксид. Уз помоћ овог процеса се ове бактерије размножавају, што заузврат ствара више бактерија које ће да разграђују још више ВРК. Како вода протиче кроз систем, долази до већег броја промена. Смањује се биохемијска потрошња кисеоника, а истовремено се смањује и укупан број бактерија. Како се биохемијска потрошња кисеоника смањује, тако ово окружење постаје погодније за напредније облике живота, као што су протозое или метазое. Неки уобичејени облици живота су бичари, трепљари и други. Ови виши облици живота се хране бактеријама и они управо представљају показатељ да је већина ВРК уклоњена из система за пречишћавање.



Слика бр. 4 – Приказ деловања аеробних бактерија [8]

Ови системи за пречишћавање отпадних вода су генерално веома отпорни системи и углавном производе ефлуент који је одговарајућег квалитета и испуњава захтеве да би се ова пречишћена вода испустила у околину. Међутим, од критичне је важности да се аератори правилно поставе и да се систем редовно одржава како би се осигурало да се систем не квари током времена.

5. Ротациони биодискови (RBC)

Ротациони биолошки контрактор је аеробни биофилтар чији се рад заснива на ротирајућим дисковима који садрже микроорганизме. Први патент за ротациони биолошки контрактор је регистровао А. Т. Малтби 1928. године [9]. Биодискови се користе у секундарном стадијуму пречишћавања воде. Дакле, потребно је отпадну воду прво подвргнути примарном третману пречишћавања. Такође, ефлуент који се добије из ротационог биолошког контрактора захтева поновно пречишћавање како би се раздвојио муљ од третиране отпадне воде. Биодискови се користе у пречишћавању комуналних вода, али се такође могу примењивати у постројењима за третирање отпадних вода које садрже штетне органске хемикалије или у постројењима за пречишћавање индустријских отпадних вода.

Овај систем је јединствена адаптација система са покретним медијумом на који су прикачени дискови са биофилмом (тј. имобилисана микрофлора). Медијум у облику великих равних или таласастих дискова са биофилмом причвршћеним на њихову површину је намонтиран на осовину која је делимично зароњена у отпадну воду и која се окреће кроз контурисане резервоаре кроз које отпадна вода тече у континуитету. Цела јединица се најчешће налази у адекватном кућишту како би се систем за пречишћавање изоловао од спољних утицаја. Облик резервоара је прилагођен зароњеном цилиндру. Мотор директно покреће осовину са спојницом и вибрирајућим амортизером између. Брзина ротације је обично око 4-5 обртаја у минути.

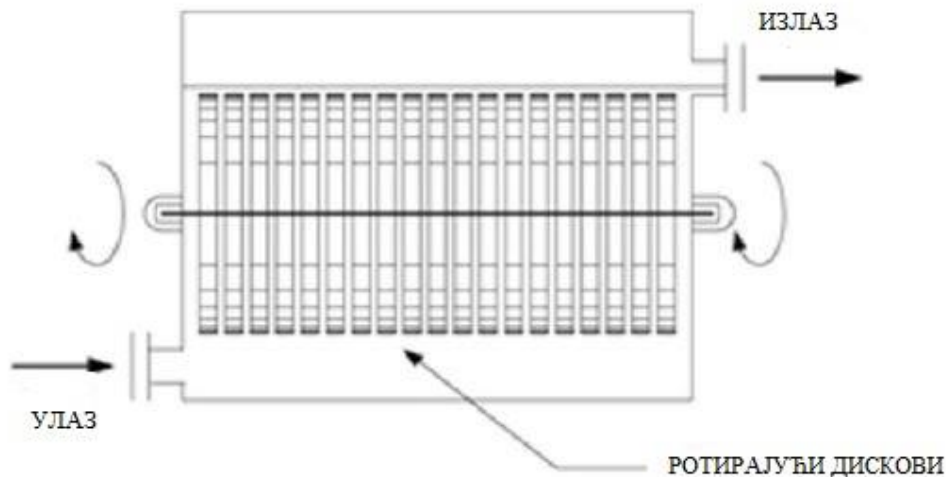


Слика бр. 5 – Постављена RBC јединица [10]

Континуирана ротација дискова преко осовине омогућава стални довод кисеоника до микроорганизама, али и до суспендоване биомасе у води, који су одговорни за биолошко пречишћавање отпадне воде. Довод кисеоника се константно аутоматски прилагођава потрошњи кисеоника, мада се може приметити да, иако је потрошња кисеоника велика, просечан садржај кисеоника у резервоару износи од 2 до 3 mg/l . При крају пречишћавања, отпадна вода може садржати више од 4 до 6 mg/l [4]. Што је дубља и бржа дифузија кисеоника унутар биофилма, то је бољи аеробни третман отпадне воде.

Уобичајено је да ротациони биолошки контрактор функционише у три до четири етапе. Постројење за пречишћавање отпадне воде је онда подељено у три до четири раздвојене каскаде. Прва каскада најчешће прима највећу количину органских материја у отпадној води и пружа максималну ефикасност отклањања органских загађивача. Наредне каскаде се користе за нитрификацију и за отклањање преосталог органског угљеника. Након четврте каскаде, побољшавање отклањања органских загађивача је незнатно.

Дискови који носе имобилисану микрофлору обично се производе од пластике (полиетилена, поливинил-хлорида или полистирена). Та имобилисана микрофлора је слузава по природи и дебљине је од 1 до 3 mm . Одавно је примећено у истраживањима да се раст и активност микроорганизама знатно поспешује када се обезбеди површина на коју се они могу прикачити [11]. Фиксирани механизми са биофилмом имају предност у старту због велике густине наталожене биомасе и због одличне компактности система. Биодискови су распоређени у групама са малим размацима између њих, како би се смањило потенцијално снажно изливање воде. Микроорганизми који се налазе на уроњеним деловима дискова и активни муљ унутар резервоара заједно разграђују биоразградиве органске загађиваче (Слика бр. 6).



Слика бр. 6 – Шематски приказ аеробног RBC-а [2]

Општи учинак ротационог биолошког контрактора у пречишћавању отпадне воде зависи од много фактора:

- Карактеристика инфлуента (степен хидрауличког оптерећења, степен органског оптерећења, степен уноса амонијака, рН вредност).
- Конфигурације система (ротациона брзина, карактеристике површине биодискова, уроњеност дискова, број етапа, степен рецикулације воде, механизми за погон, подешавања осовине).
- Степен трансфера кисеоника,
- Окружење и температура отпадне воде,
- Густина медијума.

Најважнији физички фактори који утичу на свеукупну ефикасност система јесу степен пренете количине кисеоника и температура. Степен трансфера кисеоника пак зависи од радне температуре и физичке конфигурације система. Густина биофилма се контролише преко доступности нутријената и турбуленције на површини воде услед брзине ротације. Међутим, ипак је брзина самих дискова најутицајнији фактор за раст биофилма и његову густину.

Коришћење ротационог биолошког контрактора има много предности првенствено због односа ефикасности и трошкова. Неке од предности су:

- Лаки трансфер кисеоника из ваздуха уз истовремено пречишћавање отпадне воде уз помоћ биофилма;
- Ниска енергетска потрошња;
- Ефикасна аерација воде услед ротације;
- Мале јединице за пречишћавање отпадне воде на местима где је простор ограничен;
- Једноставност у раду и одржавању;
- Снага и издржљивост;
- Прилагодљивост високим флукуацијама у протоку.

Механички кварови биодискова су често проузроковани услед проблема са осовином, са лежајевима и структуром на којој се налази фиксирани медијум. Они се могу јавити због преоптерећења које укључује високи степен хидрауличког оптерећења, претеран раст биофилма, корозију изазвану микробном активношћу, неадекватно подмазивање и неадекватно причвршћивање завртања. Ако се RBC јединица не постави правилно у одговарајуће кућиште, биодискови могу бити изложени UV зрачењу или лошим временским условима, што заузврат може оштетити биофилм на дисковима. Друга врста проблема везана за неадекватно кућиште односи се на претеран раст алги које могу закрчити осовину и ротацију дискова.

5.1 Прорачун RBC-а

Произвођач обично дефинише површину медијума у ротационом биолошком контрактору, а на основу тога се рачуна степен хидрауличког оптерећења. Хидрауличко оптерећење се изражава у јединицама метара кубних протока по дану по квадратном метру медијума. Овај прорачун може да буде од помоћи при процени тренутног оперативног статуса RBC-а. Поређење добијених резултата са спецификацијама постројења може да утврди да ли је јединица хидраулички преоптерећена или не користи своје капацитете до адекватног нивоа.

$$\text{Stepen hidrauličkog opterećenja} = \frac{\text{Protok, m}^3/\text{d}}{\text{Površina medijuma, m}^2}$$

Концентрација растворивог BPK у инфлуенту може да се одреди експерименталним путем у лабораторији или се може одредити користећи концентрацију суспендованих чврстих материја (TSS) и „K“ фактор [12]. Овај фактор се користи како би се приближно одредио BPK који долази од суспендоване материје у отпадној води. K фактор се мора дефинисати унапред или се може експериментално утврдити у лабораторији; а за отпадне воде из домаћинства, он обично има вредности од 0,5 до 0,7.

$$\text{Rastvorivi BPK}_5 = \text{Ukupni BPK}_5 - (K \text{ faktor} - \text{TSS})$$

Степен органског оптерећења се може изразити као укупна вредност BPK у килограмима по дану по 100 квадратних метара.

$$\text{Stepen organskog opterećenja} = \frac{\text{Rast. BPK} \times \text{Protok, m}^3/\text{dan} \times 1000 \text{ kg/m}^3}{\text{Površina medijuma, 100 m}^2}$$

Укупна површина медијума у свим каскадама постројења користи се у неколико једначина за прорачун RBC-а. Вредности појединачних површина (или укупне површине медијума у постројењу) дефинишу се на основу информација из нацрта постројења или на основу спецификација произвођача, јер би физичко одређивање ових вредности било изузетно тешко.

$$\text{Ukupna površina} = \text{Površina 1. kaskade} + \text{Površina 2. kaskade} + \dots + \text{Površina n-te kaskade}$$

За моделирање рада RBC-а најчешће се користи Schultz-Germain формула [13]:

$$S_e = S_i e^{k \left(\frac{A}{Q} \right)^{0.5}}$$

где су:

S_e – укупан BPK одређеног ефлуента, [mg/l]

S_i – укупан BPK отпадне воде примењене на филтеру, [mg/l]

A – површина, [m^2]

Q – проток, [m^3/s]

Контролни параметар за учинак RBC јединице је раствориви BPK (*eng. SBOD – Soluble Biochemical Oxygen Demand*):

$$SBOD = TBOD - \text{Суспендовани BOD}$$

$$\text{Суспендовани BOD} = c \text{ (TSS)}$$

$$SBOD = TBOD - c \text{ (TSS)}$$

где су:

SBOD – раствориви BPK

Суспендовани BOD – суспендовани BPK

TBOD – укупни BPK

TSS – укупна концентрација суспендованих чврстих материја (*eng. Total Suspended Solids*)

c = коефицијент, који има вредности:

= 0.5 до 0.7 за отпадне воде из домаћинства,

= 0.5 за непрерађене отпадне воде из домаћинства ($TSS > TBOD$),

= 0.6 за непрерађене отпадне воде ($TSS \cong TBOD$),

= 0.6 за примарне ефлуенте,

= 0.5 за секундарне ефлуенте [12].

Проценат отклањања BPK или суспендованих чврстих материја се рачуна по следећој формули:

$$\text{Procenat otklonjene količine} = \frac{(\text{koncentracija influenta} - \text{koncentracija efluenta})}{\text{koncentracija influenta} \times 100}$$

Однос рецикулације се рачуна преко следеће формуле:

$$\text{Odnos recirkulacije} = \frac{\text{stepen recirkulacije protoka}}{\text{stepen protoka influenta}}$$

Време задржавања се рачуна преко следеће формуле:

$$\text{Vreme zadržavanja} = \frac{\text{zapremina rezervoara}}{\text{stepen protoka}}$$

6. Секвенцијални шаржни реактор (SBR)

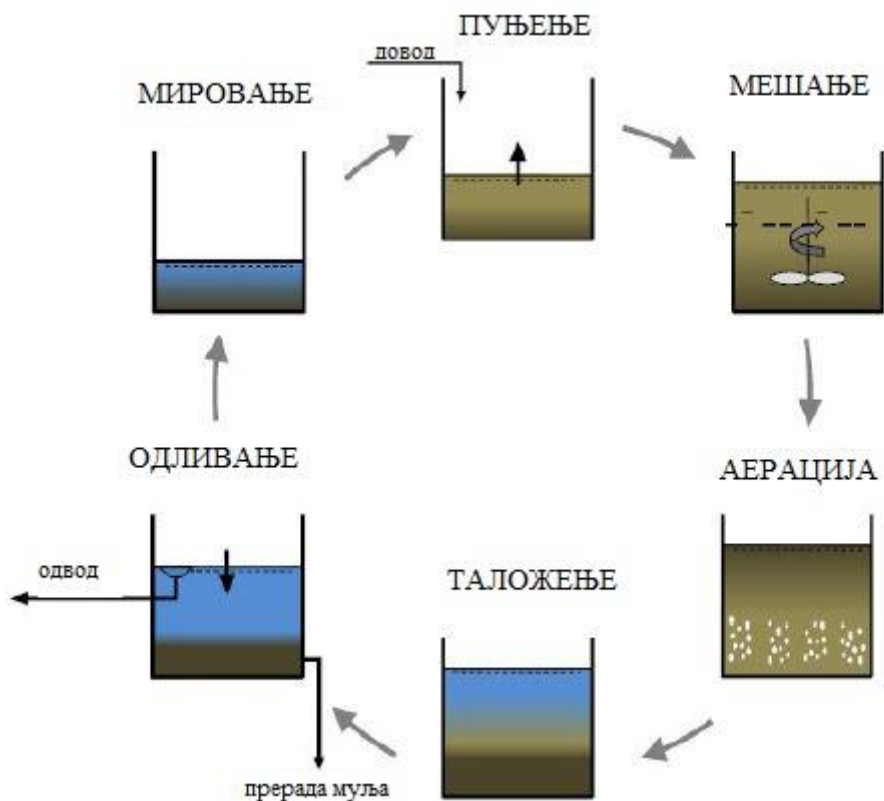
Секвенцијални шаржни реактор, или секвенцијални фазни реактор, јесте општи назив за одређени тип уређаја који се користе у индустрији за пречишћавање отпадних вода. Секвенцијални шаржни реактори се успешно користе у третирању комуналних и индустријских отпадних вода. Предност SBR система је што углавном елиминише потребу за одвојеним примарним и секундарним постројењима за пречишћавање, што смањује захтеве рада и одржавања. Када је реч о индустријским постројењима, SBR се најчешће користи за пречишћавање отпадних вода из млекара, постројења за производњу папирних марамица, текстила, и других. Ове отпадне воде имају различиту концентрацију органских и неорганских материја, па самим тим садрже велики НРК, ниски ВРК, високи садржај соли. Због свега тога, предност овог реактора је што може да комбинује аеробну и анаеробну фазу [14].

Сам процес пречишћавања се заснива на пуњењу и пражњењу реактора. Процеси засновани на пуњењу и пражњењу реактора су се доста развијали у периоду између 1914. и 1920. године, а интересовање за SBR системе се опет јавило током педесетих и шездесетих година двадесетог века. Побољшања у уређајима за аерацију и контролу система су омогућила SBR системима да се успешно надмећу са конвенционалним системима са активним муљем. У суштини, радне јединице ова два система су практично исте. Међутим, разлика у начину рада се може објаснити тако што се може рећи да SBR систем пречишћава отпадну воду у односу на функцију времена, а не простора. Запремина испуњености реактора варира с временом, за разлику од традиционалних система са континуалним протоком [15]. У SBR систему, процес егализације, биолошког третмана и секундарног пречишћавања обављају се у једном резервоару помоћу временски контролисане секвенце. У неким случајевима, овај реактор може да обавља и примарно пречишћавање. Са друге стране, у конвенционалном систему са активним муљем, ови процеси се обављају у засебним резервоарима.

Као што је већ речено, процеси аерације и пречишћавања отпадне воде се одвијају у истом резервоару. У SBR систему је битно то што је свака следећа фаза условљена завршетком претходне, чиме се гарантује уједначено и сигурно пречишћавање. Такође је могуће раздвојити ове процесе у два реактора који могу да раде наизменично, због чега је систем флексибилан. Иако је оптерећење променљиво, могу се гарантовати константне вредности излазних параметара ефлуента, без непријатних мириса. Процес декантације се обавља у истом оксидационом резервоару након што се заустави аерација и довод сирове отпадне воде. Поред тога, у SBR систему је могуће, уз биолошко пречишћавање, извести и третман симултане нитрификације и денитрификације [16].

Принцип рада SBR постројења карактерише пет одвојених фаза¹:

1. Пуњење,
2. Реаговање,
3. Таложење,
4. Одливање,
5. Мировање.



Слика бр. 7 – Циклус SBR процеса [15]

У фази пуњења, отпадна вода се доводи до реактора. У овој фази можемо да разликујемо три варијације: статичко пуњење, мешано пуњење и пуњење са аерацијом. Током статичког пуњења, отпадна вода се долива биомаси која се већ налази у SBR систему. Статичко пуњење се карактерише одсуством било каквог мешања или аерације, што значи да ће бити велике концентрације супстрата када почне мешање. Мешано пуњење се карактерише мешањем органских материја у отпадној води са биомасом, што покреће биолошке реакције. Током мешаног пуњења, бактерије биолошки разграђују

¹ Може се рећи да принцип рада карактерише и шест фаза, ако фазу реакције раздвојимо на мешање и аерацију.

органске материје, азот подлеже процесима денитрификације, а фосфор се уклања из воде преко муља. У оваком окружењу у аноксичним условима (без кисеоника), може доћи до процеса денитрификације. Пуњење са аерацијом омогућава започињање аеробних реакција које се комплетирају у фази реаговања, при чему се може смањити време потребно за аерацију у фази реаговања.

Биолошке реакције се комплетирају у фази реаговања. Дакле, у овој фази могу да се доврше процеси започети у првој фази помоћу мешаног пуњења, или фаза може да се започне преко процеса аерације. Реакције које се могу одвијати у овој фази су нитрификација, денитрификација и отклањање фосфора.

Фаза таложења се типично одвија током мирног стања рада SBR постројења. У неким случајевима, благо мешање у почетном стадијуму таложења може довести до чистијег ефлуента и гушћег наталоженог муља. У SBR систему, нема струјања воде које може да поремети процес таложења, као што се дешава у систему са активним муљем.

У фази изливања користи се декантер како би се повукла пречишћена отпадна вода. Могу се користити различите врсте декантера, о чему ће даље бити речи. Битно је да се пречишћени ефлуент извуче без узнемиравања наталоженог муља.

Фаза мировања се дешава између фаза пуњења и одливања. У овој фази се третирали ефлуент одлива, а додаје се нова сирови отпадна вода. Време трајања ове фазе зависи од протока сирове воде и саме брзине одвијања рада.

Конструкција SBR система генерално захтева мање простора од конвенционалних система са активним муљем јер SBR често елиминише потребу за примарним таложником. Такође, овај систем никада не тражи секундарне таложнике. Сама величина SBR постројења ће зависити од локације и расположивог простора. Међутим, овај систем има предност када је расположиви простор на локацији ограничен. Још једна од предности овог система у контексту простора јесте та што се елиминише потреба за додатним пумпама и цевима. Што се контролног система рада SBR постројења тиче, он је комплекснији од традиционалних система и подразумева аутоматске прекидаче, аутоматске вентиле и инструмент табле. Овакав контролни систем је доста деликатан у већим системима.

SBR систем се састоји од резервоара, опреме за аерацију и мешање, декантера и контролног система. Као што је већ речено, централне карактеристике овог система јесу контролна јединица и аутоматски прекидачи и вентили који преко временских секвенци обављају различите фазе пречишћавања отпадне воде. Поред аутоматског, може се уградити и ручни погон за управљање у одређеним целинама, у случају појаве хаваријских ситуација на постројењу. Што се постављања самог резервоара и опреме тиче, увек се

препоручује да се консултују произвођачи ових система. Иако је могуће користити резервоаре и осталу опрему других произвођача уз примену SBR система, ипак се препоручује да се комплетан систем добави од једног произвођача, управо због нивоа прецизности и софистицираности у вези са контролним системом.

Резервоар овог система се углавном производи од челика или бетона. При пречишћавању индустријских отпадних вода, најчешће се користе челични резервоари обложени заштитним слојем против корозије, док се при пречишћавању комуналних отпадних вода најчешће користе бетонски резервоари. Код опреме за аерацију и мешање, типично се користе системи за аерацију распршивањем јер омогућавају мешање са или без аерације.

Као што је већ речено, примарни део опреме SBR система, на основу којег се разликују произвођачи, јесте декантер. Разликујемо плутајуће и фиксирани декантере. Плутајући декантери омогућавају постављање отвора за унос отпадне воде мало испод површине воде како би се умањила концентрација чврстих материја из ефлуента. Плутајући декантери такође имају предност оперативне флексибилности јер запремине при пуњењу и пражњењу могу варирати. Са друге стране имамо фиксирани декантере који су уграђени у страну базена и који су значајни у фази таложења. Продужавање фазе таложења умањује шансе да ће чврсте материје плутати преко фиксираних декантера. Фиксирани декантери се некад могу поставити тако да се њихов положај подиже или спушта. Иако су они јефтиније решење, они немају флексибилност у раду коју нуде плутајући декантери.

Неопходно је спроводити праћење квантитета и квалитета како сирове отпадне воде, тако и пречишћене воде. Количина сирове и пречишћене воде мери се помоћу електромагнетног мерача протока. Овај мерач може забележити и архивирати податке у одређеном временском интервалу, чиме се може обезбедити спровођење анализа на периодичном или годишњем нивоу. Што се квалитета ефлуента тиче, те анализе се могу повремено обављати у лабораторији на самом постројењу, при чему се најчешће проверавају следећи параметри:

- рН вредност,
- ВРК₅,
- НРК,
- електропроводљивост,
- концентрација суспендованих материја,
- концентрација укупног азота,
- концентрација укупног фосфора,
- концентрација укупног угљеника [17].

Учинак SBR система се углавном пореди са учинком конвенционалних система са активним муљем, и он генерално зависи од дизајна система и критеријума у вези са самим постројењем. Зависно од начина рада, ови системи могу постићи добар ВРК и добар степен отклањања нутријената. За SBR системе, ефикасност отклањања ВРК је углавном од 85 до 95%. Такође, SBR произвођачи обично гарантују да ће карактеристике ефлуента бити мање од:

- 10 mg/l ВРК – биохемијска потрошња кисеоника,
- 10 mg/l TSS – укупна концентрација суспендованих чврстих материја (*eng. Total Suspended Solids*),
- 5 – 8 mg/l TN – укупна концентрација азота (*eng. Total Nitrogen*),
- 1 – 2 mg/l TP – укупна концентрација фосфора (*eng. Total Phosphorus*).

Неке од предности и мана коришћења SBR система могу се наћи у следећем прегледу:

Предности су:

- Егализација, примарно пречишћавање (у већини случајева), биолошки третман и секундарно пречишћавање могу се обавити у једном резервоару реактора.
- Флексибилност у раду и контроли.
- Минимална површина која је потребна.
- Потенцијална уштеда на капиталним трошковима ако се елиминишу таложници и друга опрема.
- Комплетно одсуство лошег мириса, буке и вибрација.
- Сигурност по питању квалитета ефлуента.

Недостаци су:

- Захтева се већи ниво прецизности и деликатности система (у поређењу са конвенционалним системима), поготову у већим постројењима, код јединица за подешавање временских секвенци и контрола.
- Веће потребе одржавања (у поређењу са конвенционалним системима) због деликатног контролног система, аутоматских прекидача и аутоматских вентила, мада је сама опрема у највећем броју случајева јако поуздана.
- Потенцијално зачепљење уређаја за аерацију током одређених циклуса рада, у зависности од система за аерацију које користи одређени произвођач.

SBR системи се генерално користе у постројењима где је просечан проток приближно једнак $19000 \text{ m}^3/\text{dan}$. Код већих протока неопходно је имати веће SBR постројење, што за собом повлачи веће захтеве по питању система за функционисање погона, због чега се SBR системи углавном не препоручују у случајевима где је већи проток отпадних вода.

Међутим, с обзиром да су ови системи веома флексибилни, могу се користити за пречишћавање отпадне воде са променљивим дневним хидрауличким оптерећењем, које може да се креће од 40% до 100% пројектованог капацитета, без потребе за додатним пречишћавањем [4].

С обзиром да ови системи заузимају релативно малу површину, погодно их је користити у подручјима где је расположива површина земљишта ограничена. Поред тога, циклуси рада у самом систему могу се подесити да отклањају нутријенте ако то постане потребно у неком тренутку. SBR системи су изузетно флексибилни по питању прилагођавања регулаторних измена параметрима ефлуента као што је отклањање нутријената. Ови системи су такође веома трошковно ефикасни ако се захтева додатни третман поред биолошког, као што је филтрација.



Слика бр. 8 – Приказ SBR постројења [18]

6.1 Прорачун SBR-а

За потребе прорачуна примера SBR реактора користе се следећи познати подаци, а посматрани проток третиране воде (Q) је $20.000 \text{ m}^3/\text{dan}$ [19].

Табела 2. Параметри инфлуента

	Назив параметра	Вредност
1.	BOD5	250 mg/l
2.	HPK	450 mg/l
3.	TSS	320 mg/l
4.	TKN	22 mg/l
5.	TP	5 mg/l
6.	Температура	25°C

Табела 3. Жељене вредности параметара добијеног ефлуента

	Назив параметра	Вредност
1.	BOD5	$\leq 10 \text{ mg/l}$
2.	COD	$\leq 50 \text{ mg/l}$
3.	TSS	$\leq 10 \text{ mg/l}$
4.	TKN	$\leq 5 \text{ mg/l}$
5.	TP	$\leq 1 \text{ mg/l}$

Табела 4. Почетни подаци о раду реактора

	Назив параметра	Вредност
1.	Трајање фазе пуњења и аерације	2 h
2.	Трајање фазе таложења	0.5 h
3.	Трајање фазе одливања	0.5 h
4.	Укупно време трајања циклуса	3 h
5.	Укупан број резервоара	4
6.	Број резервоара који истовремено примају воду	2
7.	Број резервоара у којима се истовремено врши аерација	2
8.	Број резервоара из којих се истовремено одлива вода	2
9.	MLSS у резервоару за аерацију	4000 mg/l
10.	MLVSS у резервоару за аерацију	3200 mg/l
11.	F/M однос	0.12
12.	Дубина једног резервоара	6 m
13.	Дужина једног резервоара	30 m
14.	Ширина једног резервоара	15 m

- Укупна запремина резервоара се рачуна преко следеће формуле:

$$V = \frac{Q \times BOD}{MLVSS \times F/M}$$

$$V = \frac{20000 \times 200}{3200 \times 0.12} = 104166,66 \text{ m}^3$$

- Самим тим, с обзиром да постоје 4 резервоара, запремина једног резервоара износи приближно 2700 m^3 .
- Површина једног резервоара рачуна се као количник запремине и дубине резервоара, што значи да површина једног резервоара износи $434,02 \text{ m}^2$.
- Хидрауличко време задржавања рачуна се као количник запремине и протока.

$$HRT = \frac{V}{Q}$$

$$HRT = \frac{4 \times 2700}{20000} = 0,54 \text{ dana}$$

$$HRT = 0,54 \times 24 = 12,96 \sim 13h$$

- Дизајн аноксичне зоне (за отклањање азота (TKN) помоћу процеса денитрификације)

Степен протока аноксичне зоне сваког резервоара рачуна се преко следеће формуле:

$$Q = \frac{V}{T}$$

$$Q = \frac{2700}{13} = 207,69 \sim 208 \text{ m}^3/h$$

За степен рецикулације протока (Q_r) усвојено је да износи 25% степена протока.

Проток аноксичне зоне у сваком резервоару рачуна се као збир степена протока и степена рецикулације протока.

$$Q + Q_r = 208 + 0,25 \times 208 = 259,25 \sim 260 \text{ m}^3/h$$

Узима се да вредност хидрауличког времена задржавања у аноксичној зони износи 1 h.

Запремина аноксичне зоне (V_a) рачуна се преко следеће формуле:

$$V_a = (Q + Q_r) \times HRT$$

$$V_a = 260 \times 1 = 260 \text{ m}^3$$

Ако се узме да је дубина аноксичне зоне 6 m, ширина 3 m а дужина 15 m, онда укупна расположива запремина аноксичне зоне износи 270 m³.

- Одређивање потребне количине кисеоника у датим условима протока

O₂ за отклањање ВРК:

- 1,2 kg O₂ / kg ВРК
- ВРК вредност инфлуента = 250 mg/l
- ВРК вредност ефлуента = 10 mg/l
- Отклоњени ВРК = 240 mg/l
- Отклоњени ВРК у килограмима:

$$ВРК \times Q = \frac{240 \times 20 \times 10^6}{10^6} = 4800 \text{ kg/dan}$$

- Узима се фактор безбедности од 10% за потребан кисеоник по килограму ВРК:

$$\frac{1,2 \times 110}{100} = 1,32$$

- Потребно килограма кисеоника за ВРК оптерећење:

$$1,32 \times 4800 = 6336 \text{ kg/dan}$$

O₂ за отклањање азота:

- Укупна вредност азота у инфлуенту = 22 mg/l
- Вредност амонијског азота у ефлуенту = 1 mg/l
- Вредност нитратног азота у ефлуенту = 10 mg/l
- Отклоњени NH₃-N у дану:

$$22 - 1 = 21 \text{ mg/l}$$

- 4,6 kg O₂ / NH₃-N kg
- Отклоњени NH₃-N у килограмима у дану:

$$20 \times 21 = 420 \text{ kg/dan}$$

- Потребно килограма кисеоника за отклоњени NH₃-N:

$$4,6 \times 420 = 1932 \text{ kg/dan}$$

- Отпуштено 2,86 kg O₂ током процеса денитрификације

Претпоставка да се обави 75% процеса денитрификације:

- Створени NO₃-N:

$$20 \times 21 \times 0,75 = 315 \text{ kg/dan}$$

- Количина NO₃-N у третираној води:

$$20 \times 10 = 200 \text{ kg/dan}$$

- Количина нитратног азота који се денитрификује:

$$315 - 200 = 115 \text{ kg/dan}$$

- 2,86 kg O₂ отпуштено током денитрификације:

$$115 \times 2,86 = 328,9 \text{ kg/dan}$$

- Укупно потребно килограма кисеоника по дану:

$$6336 + 1932 = 8268 \text{ kg/dan}$$

$$8268 - 328,9 = 7939,1 \text{ kg/dan}$$

- Фактор безбедности 10%:

$$\frac{7939 \times 110}{100} = 8733,01 \text{ kg/dan}$$

- Одређивање потребне количине ваздуха у стандардним условима

Стварна количина потребног кисеоника (*eng. AOR – Actual Oxygen Required*) = 8733,01 kg/dan.

Количина потребног кисеоника у стандардним условима (SOR) при условима на пољу рада рачуна се преко следеће формуле:

$$SOR = \frac{AOR}{(\beta \times C'_{sw} - C)/(C_{sw}) \times f \times \alpha \times 1.024^{(T-20)}}$$

где су:

β – фактор корекције салинитета = 0,95

α – фактор корекције трансфера кисеоника = 0,65

f – фактор зачепљења = 0,90

C'_{sw} – растворљивост кисеоника у води са чесме на 25°C = 840 mg/l

C_{sw} – растворљивост кисеоника у води са чесме на 20°C = 9,17 mg/l

C – DO концентрација у резервоару за аерацију = 2,0 mg/l

T – радна температура у резервоару за аерацију = 25°C

$$SOR = \frac{8733}{\left\{ \frac{0,95 \times 8,40 - 2}{9,17} \right\} \times 0,65 \times 0,90 \times 1.024^{(25-20)}} = 2079,85 \text{ kg/dan}$$

Стандардна ефикасност трансфера кисеоника помоћу дифузера по метру дубине износи 5,6% / m.

Ниво течности у резервоару за аерацију износи 6 m.

Висина на којим се држе дифузери јесте 0,4 m.

Ефективна дубина аерације: 6-0,4 = 5,6 m.

SOTE (eng. *Standard oxygen transfer efficiency*) изнад дубине аерације:

$$\frac{5,6 \times 5,6}{100} = 31,36$$

Проценат кисеоника у ваздуху износи 23,2%.

Специфична гравитација ваздуха износи 1,204.

Потребан ваздух при условима на пољу рада по резервоару (разматрају се 4 резервоара):

$$\frac{8733}{4} = 2183 \text{ kg}$$

$$\frac{2183 \times 100 \times 100}{31,36 \times 23,2 \times 1,204} = 24920,87 \text{ Nm}^3/\text{dan}/\text{rezervoar}$$

Утрошени сати на аерацију по резервоару по дану износе 12 h/dan/rezervoar.

Потребан ваздух по сату по резервоару:

$$\frac{24920,87}{12} = 2076,73 \text{ Nm}^3/\text{h}/\text{rezervoar}$$

Број дувачких елемената који раде у сваком тренутку јесте 2.

$$\frac{2076,73}{2} = 1038 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

- Прорачун производње муља и отпада

Произведени муљ износи $0,80 \text{ kg} / \text{kg ВРК}$.

Количина ВРК у килограмима отклоњена у дану износи 4800 kg/dan .

Произведени муљ по дану износи:

$$0,8 \times 4800 = 3840 \text{ kg/dan}$$

Број резервоара је 4:

$$\frac{3840}{4} = 960 \text{ kg/dan/rezervoar}$$

Концентрација чврстих материја у муљу износи $0,8\%$.

Специфична гравитација муља износи $1,5$.

Густина воде износи 1000 kg/m^3 .

Укупна запремина потрошеног муља:

$$\frac{3840 \times 100}{1000 \times 1,5 \times 0,8} = 320 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Запремина потрошеног муља по резервоару износи $80 \text{ m}^3/\text{dan}$.

Број циклуса по дану по резервоару износи 8.

Запремина потрошеног муља по циклусу по базену:

$$\frac{960}{8} = 120 \text{ kg/dan}$$

$$\frac{80}{8} = 10 \text{ m}^3/\text{dan}$$

- Капацитет пумпе

Узима се да је трајање циклуса рада пумпе 15 минута.

Капацитет пумпе се рачуна преко следеће формуле:

$$\frac{zapremina \times 60}{vreme rada} = \frac{10 \times 60}{15} = 40 \text{ m}^3/h$$

Треба обезбедити два црева пумпе – једно које ће да ради и једно резервно, капацитета $45 \text{ m}^3/h$.

7. Анаеробни процеси у третману отпадних вода

Анаеробни третман отпадних вода представља процес у којем микроорганизми разграђују материје у отпадној води без помоћи раствореног кисеоника. Међутим, анаеробне бактерије користе кисеоник који се налази у оксидима који су уведени у систем или који се може добити из органске материје из отпадних вода. Анаеробни системи се користе у многим индустријским системима укључујући прераду хране и системе за третмане градских канализационих вода.

Анаеробна дигестија се обично користи да се третирају муљевити у првим деловима постројења за пречишћавање воде. Овај процес је популаран јер може да стабилизује воду уз ниску производњу биомасе. Анаеробни третман се одвија у неколико стадијума. Кључни микроорганизми су произвођачи метана и произвођачи киселина. Произвођачи киселина су микроорганизми који стварају различите киселине из муља. Произвођачи метана преводе те киселине у метан.

Биолошка основа анаеробног процеса је метанско врење, које настаје као низ биохемијских реакција уз посредовање бактеријске микрофлоре. Метанским врењем се органске материје преводе у биогас – најчешће метан и угљен-диоксид. Наравно, део органске материје неће увек бити биоразградив, тако да ће одређена количина остати као резидуално загађење. Бактерије метанског врења делују у специфичним условима који морају бити задовољени.



Слика бр. 9 – Приказ деловања анаеробних бактерија [8]

Као што је већ напоменуто, метанско врење карактеришу две опште фазе: ацидогенеза и метаногенеза. У оквиру ацидогенезе одвија се хидролиза макромолекула и ферментација производа хидролизе у органске киселине (највећим делом), алкоhole, амонијак, угљен-диоксид и водоник [20]. У оквиру метаногенезе, из продуката ацидогенезе настају метан и остали гасови (највише угљен-диоксид). Ово су две главне фазе метанског врења, али се оно може поделити и даље на шест различитих стадијума:

1. хидролиза биполимера до мономера (аминокиселине, шећери и масне киселине других ланаца),
2. ферментација аминокиселина и шећера,
3. анаеробна оксидација масних киселина других ланаца и алкоhole,
4. анаеробна оксидација интермедијарних продуката, као што су испарљиве масне киселине,
5. конверзија ацетата у метан,
6. конверзија водоника у метан [20].

У најопштијем смислу, ако посматрамо само две главне фазе овог процеса, ацидогенезу и метаногенезу, онда можемо да говоримо и о ацидогеним и метаногеним бактеријама. Ацидогена бактеријска флора је веома разноврсна, док је, са друге стране, изоловано неких тридесетак врста метаногених бактерија. Ове две главне групе бактерија се значајно разликују у односу на своју физиологију, потребе нутријената, карактеристике раста, оптималне услове средине. Битно је имати у виду све разлике како би се анаеробни процес контролисао на прави начин.

Процес анаеробног пречишћавања је знатно спорији од аеробног процеса. Основни фактори који контролишу анаеробне процесе јесу температура, рН вредност, нутриционе потребе и инхибиције. Један од битних фактора који утичу на процес јесте температура. Доста модерних поступака анаеробног пречишћавања имају контролу температуре у виду грејаних ферментора, у мезофилној (30-40°C) или у термофилној температурној области (50-75°C). Такође битан елемент јесте и рН вредност. Код ацидогених бактерија, оптимална вредност је 5,5-6,0 а код метаногених бактерија она износи 6-8. Даље, нутриционе потребе анаеробног процеса су мање у поређењу са аеробним процесом пречишћавања, а последица су малог раста бактеријске биомасе. Што се инхибиција тиче, постојање инхибитора у отпадним водама може да утиче на ефикасност анаеробног процеса пречишћавања. Највећи инхибитори метаногенезе јесу сулфати и нитрати.

Два главна анаеробна система су шаржни систем и континуални систем. У шаржном систему, биомаса се додаје у реактор који се након тога затвара до краја процеса дигестије. Ово је најједноставнији облик анаеробног третмана, али недостатак је што се понекад јављају непријатни мириси. Поред тога што је најједноставнији, ово је уједно и најјефтинији начин да се пречисти отпадна вода. У континуалном систему, органска

материја се константно додаје систему за третирање отпадне воде. Пошто се органска материја константно додаје, потребно је да се и нуспродукти константно отклањају из система. Један од нуспродуката је константна производња биогаза који се може користити као алтернативни извор енергије. Овај систем је обично скупљи, управо због потребе константног надзора и броја људи који ће то да обављају.

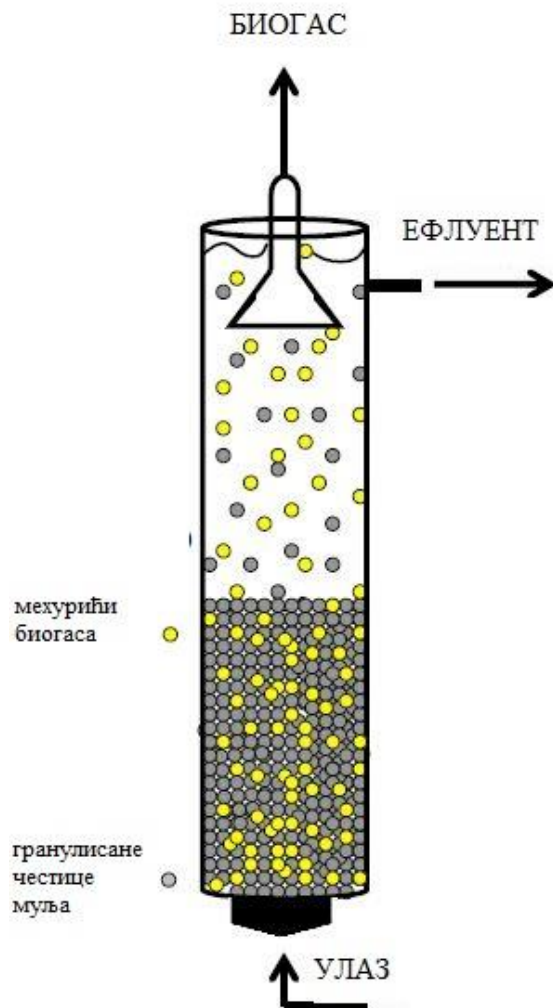
Биогас се производи док се бактерије хране биоразградивим материјама у анаеробном процесу. Већина произведеног биогаза су метан и угљен-диоксид. Ови гасови се могу сачувати и искористити за производњу енергије. Метан се може сагоревати како би се произвеле топлота и електрична енергија. Та топлота и електрична енергија се могу искористити да буду од користи анаеробном систему тако што ће снабдевати процес дигестије струјом и топлотом.

Биогас се може користити као алтернативни извор горива. Ово је нарочито релевантно сада када се доста пажње поклања све већим трошковима сагоревања фосилних горива. Како би биогаз произвео гориво, неопходно је да се прво подвргне третману како би се смањио или отклонио водоник-сулфид. Овај третман може бити скуп, али је неопходан јер Агенција за заштиту животне средине има строге прописе по питању количине водоник-сулфида који је испуштен у атмосферу.

8. Дигестори са слојем муља (UASB реактори)

Један од начина анаеробног пречишћавања отпадне воде јесте и UASB реактор (*engl. Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), што је заправо дигестор са слојем муља. Инжењер Летинга се сматра заслужним за инвентивни развој идеје о UASB реактору. Наиме, сматра се да је он почео да развија ову идеју након што је порасла цена сирове нафте током седамдесетих година двадесетог века и након што је посетио дестилерију вина у Африци у којој се јављао муљ у форми гранулата [21]. Овај тип реактора је у многим случајевима оптимално решење за пречишћавање отпадних вода, и то нарочито у земљама у развоју због своје једноставности и ниских трошкова. Поред тога, овај тип реактора веома је погодно користити за пречишћавање индустријских и/или комуналних отпадних вода са великим садржајем органских материја, па се често користи при пречишћавању отпадних вода које потичу из разних прехранбених индустрија. Такође, овај реактор се може користити у тропским пределима с обзиром да UASB реактор боље ради на високим температурама, које поспешују раст и деловање мезофилних метаногених бактерија.

Уопштено гледано, UASB реактор је резервоар најчешће направљен од обичног бетона са округлом или правоугаоном базом. Овај реактор има слој муља у коме се разграђују органске материје растворене у отпадној води. Слој муља се ствара од суспендованих честица из отпадне воде и микроорганизама који настају у реактору, и ове гранулисане честице најчешће имају пречник од 1 до 3 *mm*. Потребно је да прође неколико месеци док се створи муљ и док се он прилагоди конкретној врсти отпадне воде, након чега реактор постаје потпуно функционалан. Као последица ове анаеробне дигестије јавља се биогаз. Сирова отпадна вода улази у реактор на дну, а на врху се сакупља биогаз и испушта се пречишћени ефлуент. У горњем делу реактора, изнад слоја са муљем, ствара се зона у облику прекривача у коме су суспендоване неке честице биомасе. Ова зона раздваја воду која се креће на горе и суспендовану биомасу. На врху реактора се налази трофазни сепаратор који задржава гранулисане честице чврсте материја, а пропушта честице гаса и течности. Једна од предности овог типа реактора јесте мала производња муља. Закључено је да је довољно само једно пражњење муља годишње из UASB реактора висине 4 метра [22] или је могуће испразнити само вишак муља на сваке две до три године [23]. Гранулат који се формира унутар реактора елиминише потребу за било којим другим инертним материјалом.



Слика бр. 10 – Шематски приказ UASB реактора [24]

С обзиром да је формирање гранулата веома важна карактеристика UASB реактора, битно је размотрити различите теорије о настанку гранулата. Самим тим, током година, развијено је доста теорија које објашњавају настанак гранулата. Сматра се да UASB реактор успешно ради када се формирају честице гранулисаног муља [25]. У овој студији, теорије о анаеробној гранулацији муља подељене су у три групе: физичке теорије, микробне теорије и термодинамичке теорије. У раду ће само бити наведене неке од основних теорија:

- *Физичке теорије* – Гранулација се може објаснити преко физичких феномена који се јављају у реактору. Главне физичке теорије су: Раст колонизованих суспендованих чврстих материја и Селективни притисак.

- *Микробне теорије* – Бактерије су микроорганизми који обично покрећу анаеробне процесе [26]. Бактерије луче екстрацелуларне полимере (ЕЦП) који се јављају као кључни фактор за настанак гранулисаног муља у неколико модела. Главне теорије или модели који повезују микроорганизме са настанком гранулата јесу: Модел са везивањем екстрацелуларних полимера, Кејптаун модел, Теорија шпагета.
- *Термодинамичке теорије* – Опис процеса гранулације мора да узме у обзир и напон гранулисаних честица. Главни модели који припадају овој групи јесу: Модел са четири корака, Модел протонске транслокације-дехидратације, и Модел о везивању мултивалентних јона.

Што се тиче механизма мешања у оквиру реактора, може се закључити да су брзина кретања тока отпадне воде на горе и мехурићи биогаса који се подижу главни фактори који утичу на мешање у реактору. Мешање у талогу муља ствара покретачке снаге које су кључни фактор који утиче на формирање, стабилност и структуру анаеробних гранула.

Дуго хидраулично време задржавања повезано је са малом брзином кретања тока воде на горе, што може да поспеши стварање раштрканих бактерија и што може бити мање повољно за формирање гранулата. Са друге стране, кратко хидраулично време задржавања у комбинацији са великом брзином кретања тока воде на горе може да доведе до испирања негранулисаних микроорганизма и на тај начин поспеши стварање муља.

Такође је проучаван утицај брзине кретања тока воде на горе и пражњења муља на отклањање чврстих материја у UASB реакторима [22]. У експериментима спроведеним у оквиру наведене студије, висина талога муља расла је само 8,6 *cm* месечно, па је реактор морао да се празни само једном годишње. Отклањање укупне концентрације суспендованих чврстих материја (TSS), односно концентрације испарљивих чврстих материја (VSS) обрнуто је сразмерно брзини кретања тока на горе, што значи да је TSS/VSS добар критеријум за доношење одлуке о томе када је прави тренутак да се испусти муљ из реактора. Када дође до пражњења муља, оно доводи до померања у талогу муља. Међутим, ово пражњење не утиче на конкретну метаногену активност унутар реактора.

На ниским температурама, степен производње биогаса је толико низак да мешање услед подизања мехурића није довољно да проузрокује одговарајући трансфер масе између супстрата и гранулисаних честица. Судари између честица гранулата утичу на мешање унутар UASB реактора. Ови судари могу бити проузроковани различитим дешавањима унутар реактора, као што су варијације у густини честица, гурање гранулата услед брзине кретања тока на горе, повлачење гранула уз мехуриће биогаса, биогас који је заглављен у слоју муља или таложење. Сви ови фактори могу да се групишу као карактеристике које утичу на способност гранулата да исплива на површину. Те плутајуће

честице се дефинишу као оне честице чија је густина скоро једнака густини флуида који носи те честице.

Како би се постигло добро мешање унутар реактора, формирање гранула и добар контакт између активног талогa муља и инфлуента, од критичне је важности да се сирова отпадна вода равномерно распореди пре него што крене на горе. Поред ових параметара који се односе на сам дизајн реактора, најбитнији фактори који утичу на рад UASB реактора су следећи:

- *pH вредност*: Постоје три главна типа бактерија задужених за стварање биогаса, и то су бактерије задужене за хидролизу, бактерије које производе киселине и бактерије које производе метан. Бактерије које стварају киселине генерално толеришу ниску pH вредност, али је оптимална вредност у распону од 5,0 до 6,0. Са друге стране, већина бактерија које су задужене за стварање метана најбоље делују у pH распону од 6,7 до 7,4. Ако pH вредност у реактору иступа из распона 6,0-8,0, деловање бактерија које производе метан може бити умањено, што може негативно утицати на учинак реактора.
- *Температура*: Метаногена активност бактерија се доводи у питање на температурама испод 30°C. У температурном распону од 37 до 55°C, долази до испирања муља и неефективног отклањања НРК [27]. Када температура у UASB реактору прелази 55°C, квалитет ефлуента није толико добар као када је температура нижа од мезофилних услова. У таквим случајевима је неопходно додатно загревање реактора, што повећава оперативне трошкове. UASB реактор мора да ради у мезофилним условима (30 до 35°C) како би се добили задовољавајући резултати.
- *Степен органског оптерећења*: Степен органског оптерећења утиче на степен раста микроорганизама. Када је органско оптерећење велико, микроорганизми брже расту, док са друге стране, када је органско оптерећење ниско, долази до недовољног храњења микроорганизама. Практично решење је да се манипулише степеном органског оптерећења како би се достигао ниво редуције НРК од 80%. Међутим, ако је органско оптерећење превелико, може доћи до јаког мешања унутар реактора и испирања наталоженог муља.
- *Хидраулично време задржавања*: Као што је већ назначено, хидраулично време задржавања (HRT) представља просечно време током којег вода остаје у реактору. Оно се може израчунати као однос запремине реактора и протока воде (Q_{water}). Међутим, један део простора у реактору заузимају гранулисане честице, тако да се хидраулично време задржавања треба рачунати узимајући у обзир само запремину воде у реактору (V_{water}).

$$HRT = \frac{V_{water}}{Q_{water}}$$

- *Брзина кретања тока воде на горе:* Повећање брзине кретања тока воде на горе може умањити површину стагнирајућег филма који се налази око гранулисаних честица. Циљ је смањити отпор при трансферу масе у тој течности која мирује око гранулата како би се повећала дифузија из течне фазе у чврсту фазу (гранулат), што пак повећава разградњу супстрата и стимулише раст микроорганизама. Брзина кретања тока воде на горе обично варира од 0,1 до 1,4 m/h у UASB реактору [28]. С обзиром да је талог муља сачињен од гранулисаних честица које су суспендоване у води која тече, разумно је очекивати да је брзина кретања тока воде на горе у слоју талоба муља мало већа од брзине кретања тока воде на горе у горњем делу реактора пошто гранулисане честице смањују простор кроз који протиче вода. Брзина се повећава у простору између самих честица.
- *Супстрат:* Различити типови отпадних вода се могу пречишћавати у овом типу реактора али је најбоље када отпадна вода садржи доста нутријената и органских материја. Због тога се UASB реактори најчешће користе за пречишћавање отпадних вода из прехранбене индустрије. Комунална отпадна вода у неким случајевима не садржи довољно нутријената, па је онда потребно додати нутријенте како би се створили прави услови за ефикасност рада анаеробног реактора.
- *Инокулација муља:* Било који медиј који садржи одговарајућу микробну флору може се користити као база за стварање талоба муља у UASB реактору. Гранулисане честице настају и расту у присуству масних киселина (као што су ацетат, пропионат).

На основу свега поменутог, може се закључити да UASB реактори имају одређене предности, али и недостатке.

Предности су:

- Висок степен отклањања ВРК.
- Овај реактор може да подржи велике степене органског и хидрауличног оптерећења.
- Ниска производња муља, што значи да пражњење муља не треба често да се обавља.
- Биогас који се ствара може да се користи као енергија (након одговарајуће прераде) за кување, грејање. Такође може да се конвертује у електричну енергију и онда да се користи за грејање реактора, што поспешује анаеробну дигестију.
- Није потребан никакав систем за аерацију, што значи да је смањена потрошња електричне енергије.

- Ефлуент има доста нутријената па се може користити за наводњавање у земљорадњи.
- Вишак муља може да се преради и користи као органско ђубриво.
- Реактор не заузима доста простора и може да се изгради и под земљом.
- Смањене су емисије CH_4 и CO_2 .

Недостаци су:

- Процес пречишћавања отпадне воде може бити нестабилан ако варирају степени органског и хидрауличног оптерећења.
- Неопходно је руковање и одржавање реактора од стране обученог особља.
- Тешко је одржавање одговарајућих хидрауличких услова, односно, одржавање баланса између брзине кретања тока воде на горе и степена таложења.
- Реактору је потребно доста времена да се успоставе услови за рад пре него што може да ради пуним капацитетом.
- Потребно је непрекидно снабдевање реактора електричном енергијом.
- У неким случајевима и у неким локалним заједницама, није могуће лако обезбедити све делове и материјале.
- Овај тип реактора захтева рад експерата на дизајну и конструкцији реактора.
- Ефлуент и муљ често захтевају даљи третман пре отпуштања или поновног коришћења.
- UASB реактор није погодно користити у хладним подручјима.



Слика бр. 11 – UASB реактор у Индији [29]

8.1 Прорачун UASB реактора

За потребе прорачуна примера UASB реактора користе се следећи познати подаци [30].

Табела 5. Параметри коришћени при прорачуну UASB реактора

	Назив параметра	Вредност
1.	Укупна популација у насељу	10.000
2.	Проток отпадне воде	1500 m ³ /dan
3.	Ефикасност отклањања BPK (η)	80%
4.	BPK	300 mg/l
5.	HPK	450 mg/l
6.	TSS	400 mg/l
7.	VSS	270 mg/l
8.	pH	7,7
9.	SO ₄	85 mg/l

Нова концентрација испарљивих чврстих материја (NVSS) настала приликом отклањања BPK рачуна се по следећој формули:

$$NVSS = koeficijent\ proizvodnje \times BPK \times \eta$$

$$NVSS = 0,1 \times 300 \times 0,8$$

$$NVSS = 24\ mg/l$$

Неразградиви остатак концентрације VSS која се налази у сировој отпадној води рачуна се по следећој формули, под претпоставком да је 40% испарљиве чврсте материје разградиво, а да је остатак 60%:

$$Nerazgradivi\ ostatak = VSS \times (1 - 0,4)$$

$$Nerazgradivi\ ostatak = 270 \times (1 - 0,4)$$

$$Nerazgradivi\ ostatak = 162\ mg/l$$

Концентрација пепела која се прима у сировој отпадној води рачуна се по следећој формули:

$$Pepeo = TSS - VSS$$

$$Pe_{\text{peo}} = 400 - 270$$

$$Pe_{\text{peo}} = 130 \text{ mg/l}$$

Количина добијеног муља рачуна се као збир претходне три вредности (концентрације NVSS, неразградивог остатка и пепела):

$$Mulj = 24 + 162 + 130$$

$$Mulj = 316 \text{ mg/l} \text{ односно } 0,316 \text{ kg/m}^3$$

$$Ukupna \text{ količina mulja} = 1500 \times 0,316$$

$$Ukupna \text{ količina mulja} = 474 \text{ kg/dan}$$

Површина реактора рачуна се према следећој формули:

$$Površina \text{ reaktora} = \frac{Protok \text{ otpadne vode}}{Brzina \text{ kretanja toka vode na gore}}$$

$$Površina \text{ reaktora} = \frac{1500}{0,5}$$

$$Površina \text{ reaktora} = 125 \text{ m}^2$$

Брзина кретања тока воде на горе је израчуната на основу вредности хидрауличног времена задржавања (HRT) и времена задржавања чврстих материја (SRT) коришћених у другим тестовима [31]. Ако је дужина правоугаоног реактора 15 m, онда је ширина $125/15=8,333 \text{ m}$, а дубина 4,8 m.

Органско оптерећење рачуна се на основу следеће формуле:

$$Organisko \text{ opterećenje} = \frac{HPK \text{ opterećenje}}{zapremina \text{ reaktora}}$$

$$Organisko \text{ opterećenje} = \frac{450 \times 1500}{15 \times 8,333 \times 4,8}$$

$$Organisko \text{ opterećenje} = 1,125 \text{ kg HPK/m}^3 \text{ dan}$$

Прихватљиве граничне вредности органског оптерећења износе 1 – 3 kg HPK / m³dan.

За даљи прорачун усвајају се следеће претпоставке:

- Време задржавања чврстих материја на датој температури – 30 дана
- Хидраулично време задржавања – 8-10 сати са просечним протоком отпадне воде
- Просечна концентрација муља у талогу – 60 kg/m^3
- Укупна дубина реактора за пречишћавање комуналне отпадне воде са ниским нивоом ВРК – 4,5-5 m

Укупни проценат отклоњеног НРК = 80% од вредности у сировој отпадној води

$$\text{Otklonjen HPK} = 0,8 \times (0,45 \times 1500)$$

$$\text{Otklonjen HPK} = 540 \text{ kg/dan}$$

$$\text{Otklonjeni sulfati} = 0,8 \times (0,085 \times 1500)$$

$$\text{Otklonjeni sulfati} = 102 \text{ kg/dan}$$

$$\text{Raspoloživi HPK za proizvodnju metana} = 540 - 102 = 438 \text{ kg/dan}$$

Теоријски, количина произведеног метана на 25°C износи $300 \text{ l/kg otklonjenog HPK}$. Самим тим укупна количина произведеног метана по дану износи:

$$\text{Ukupna količina proizvedenog metana} = 0,300 \times 438 = 131,4 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Практично посматрано, количина метана која нестаје растворена у ефлуенту износи $0,028 \text{ m}^3$ по метру кубном запремине ефлуента по дану.

$$\text{Količina metana koja nestaje} = 0,028 \times 1500 = 42 \text{ m}^3/\text{dan}$$

$$\text{Raspoloživi metan} = 131,4 - 42 = 89,4 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Теоријски је познато да 1 m^3 биогаса са 75% садржаја метана производи $1,4 \text{ kWh}$ електричне енергије. Када се та вредност помножи са количином метана који је на располагању, добија се вредност од $125,16 \text{ kWh}$ електричне енергије.

На основу свега наведеног, параметри које треба узети у обзир при дизајнирању овог примера UASB реактора јесу следећи:

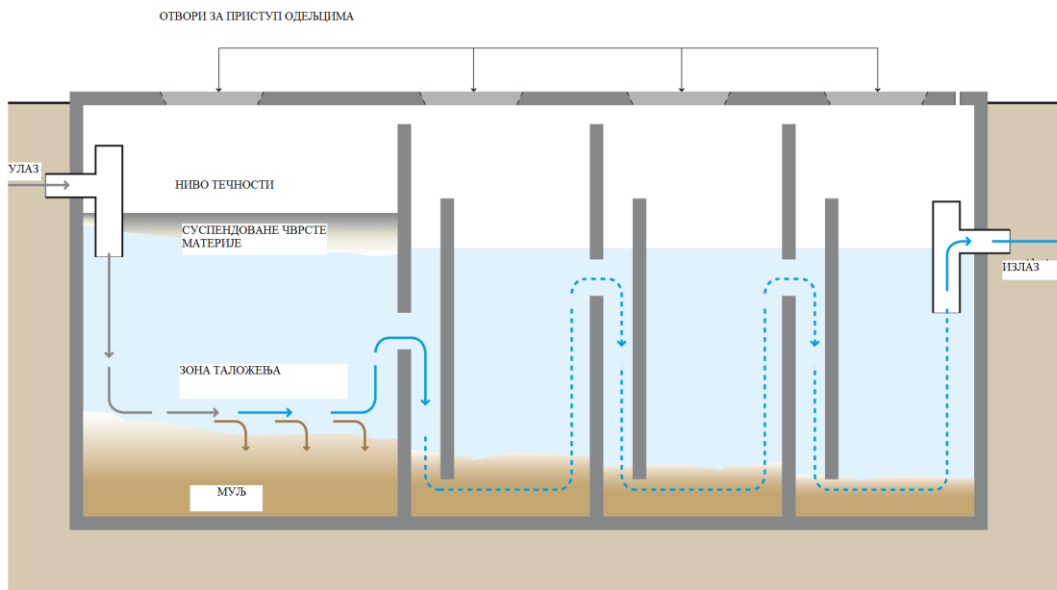
Табела 6. Параметри за дизајн UASB реактора

Редни број	Назив параметра		Вредност
1.	Укупна количина произведеног муља	kg/dan	474
2.	Површина реактора	m^2	125
3.	Дужина реактора	m	15
4.	Ширина реактора	m	8,333
5.	Дубина реактора	m	4,8
6.	Запремина органског оптерећења	$kg\ HPK / m^3 dan$	1,125
7.	Укупна количина отклоњеног НРК	kg/dan	540
8.	Расположиви НРК за производњу метана	kg/dan	438
9.	Расположиви метан	$m^3/kg\ HPK$	0,165
10.	Производња електричне енергије	kWh	125,16

9. Анаеробни реактори са преградама (ABR реактори)

ABR (*engl. Anaerobic Baffled Reactor*) јесте анаеробни реактор са преградама. Анаеробни реактор са преградама се најчешће користи у секундарној фази пречишћавања отпадне воде пошто се процес заснива на аеробној дигестији [3], али постоји и део који се односи на физичко пречишћавање унутар реактора, а то је таложење чврстих материја на почетку. Овај тип реактора је у основи побољшана верзија септичког резервоара због серије преграда преко којих отпадна вода мора да прође. Приликом проласка кроз реактор, отпадна вода тече одоздо на горе и одозго на доле, у зависности од одељака кроз које пролази. Овај реактор су развили МекКарти и његове колеге са Станфорд Универзитета и описали су га као серију повезаних UASB реактора [32]. Ови реактори се могу користити за пречишћавање јако загађених отпадних вода, са великим степеном органског оптерећења. Најчешће се користе за пречишћавање константног довода такозване „црне“ и „сиве“ воде из домаћинства.

Отпадна вода у реактору тече испод и преко вертикалних преграда што смањује степен испирања бактерија. Оваква структура омогућава анаеробном реактору да задржи активан слој биомасе без коришћења неког фиксираних медијума. Бактерије у реактору се дижу и спуштају заједно са гасом у свакој прегради, али се крећу у доњем делу реактора релативно споро. Као последица тога, повећано време контакта са активном биомасом, односно муљем, доводи до бољег процеса пречишћавања. Већина чврстих материја које могу да се таложе се отклањају у прегради за седиментацију на почетку самог реактора, што углавном представља 50% укупне запремине [23]. Примарна седиментација такође може да се одвија и у засебном таложнику или, на пример, у неком већ постојећем септичком резервоару. Одељци у којима се вода креће на горе омогућавају додатно отклањање и дигестију органских материја: ВРК може да се умањи чак до 90%, што је знатно супериорније у односу на учинак обичног септичког резервоара. Критични параметри који се односе на дизајн реактора обухватају: хидраулично време задржавања између 48 и 72 сати, брзину кретања тока отпадне воде на горе мању од 0,6 m/h. Што се броја преграда тиче, зависно од потреба подручја, потребне су две до три преграде у којима се вода креће на горе, или три до шест преграда.



Слика бр. 12 – Попречни пресек приказа анаеробног реактора са преградама [23]

Пошто се муљ таложи, пражњење вишка муља је потребно обавити на сваке две до три године. Комплетно чишћење реактора би требало да се обавља једном годишње, због чега је потребно имати вакуум пумпу. Спојеви између преграда могу бити или у виду вертикалних цеви или само преграда. Због потреба одржавања и чишћења, потребно је омогућити приступ свим одељцима реактора. Овај тип реактора такође треба повремено да се вентилира како би се спречило испуштање потенцијално штетних гасова у атмосферу. Што се биогаса тиче, у оваквом типу реактора се производи недовољна количина биогаса, па се он и не сакупља.

Ова технологија се лако може прилагодити различитим условима и може се користити за пречишћавање отпадне воде из једног домаћинства или из једног мањег блока домаћинства. Анаеробни реактор са преградама је такође одговарајуће решење у подручјима где је расположивост земљишта ограничена пошто овај резервоар не захтева много простора, а може се поставити и под земљом. Међутим, овај реактор не би требало постављати у подручјима где има доста површинске воде јер ће инфилтрација утицати на ефикасност третмана и контаминирати воде у подручју.

Ова технологија се може ефикасно користити у системима где дневни доток воде износи до 200 000 l/dan. Међутим, као што је случај и код других анаеробних реактора, ABR неће радити пуним капацитетом током неколико месеци након инсталације због чињенице да је потребно доста времена за анаеробну дигестију муља. Стога, ова технологија не треба да се користи у оним случајевима где пречишћавање отпадне воде треба одмах да се обави. Такође, овај тип реактора боље ради у топлијим пределима.

Са друге стране, отклањање патогених организама није толико успешно у овом типу реактора. Задовољавајући услови безбедности се могу осигурати тако што ће се избегавати контакт корисника са отпадном водом како би се избегле болести проузроковане одређеним патогеним организмима.

Предности су:

- ABR је отпоран на променљива органска и хидрауличка оптерећења.
- Није потребна никаква електрична енергија.
- Реактор се може изградити и поправљати уз помоћ локално доступних материјала.
- Дуг сервисни век.
- Нема великих проблема по питању лошег мириса ако се правилно користи.
- Отклањање органских материја је велико.
- Капитални трошкови су ниски. Оперативни трошкови могу бити умерено високи у зависности од пражњења. Укупни трошкови могу бити ниски у зависности од броја корисника.

Недостаци су:

- Овај тип реактора захтева константан извор воде.
- Ефлуент захтева додатни третман и/или одговарајуће пражњење.
- Отклањање патогених организама није толико успешно.
- Потребан је рад експерата на дизајну и конструкцији реактора.
- Потребна је претходна прерада отпадне воде да се реактор не би запушио.



Слика бр. 13 – Приказ постављања ABR постројења [33]

9.1 Прорачун ABR

Проток постројења (Q) за пречишћавање отпадне воде зависи од популације у том подручју и нивоа активности при производњи отпадне воде. Како би се дефинисао тренутни проток, треба анализирати претходне забележене вредности. Процена протока отпадне воде треба да обухвати највећу и најнижу вредност, као и просечну вредност.

Када је реч о капацитету и димензијама овог постројења, прорачун је сличан прорачуну септичке јаме јер су ова два система веома слична, као што је већ и речено. Прорачунава се количина отпадне воде коју реактора треба да прими у односу на еквивалентни број становника, а димензије се одређују на основу спецификације произвођача.

$$C = 180 \times P + 2000$$

где су:

C – величина реактора [l]

P – потенцијални број становника.

Димензије резервоара се рачунају према следећим формулама:

$$B = a \times b$$

$$M = 2 \times (a + b) \times h$$

$$A = 2 \times B + M$$

где су:

a – дужина основе резервоара, [m]

b – ширина основе резервоара, [m]

h – висина резервоара, [m]

B – површина базе, [m²]

M – површина основе, [m²]

A – укупна површина, [m²].

Корисна запремина (V) рачуна се преко следеће формуле:

$$V = a_k \times b_k \times h_k$$

где су:

a_k – корисна дужина резервоара, [m]

b_k – корисна ширина резервоара, [m]

h_k – висина стуба течности, [m].

Предност ABR постројења јесте та што бактерије расту на фиксираним поршинама унутар реактора, што доводи до високе вредности времена задржавања чврстих материја (SRT). Самим тим, вредности хидрауличног времена задржавања (HRT) и времена задржавања чврстих материја не морају да буду једнаке, као што је случај у типичним реакторима са суспендованим чврстим материјама без дела за рециклажу.

$$HRT = \frac{V}{Q}$$

где су:

Q – степен протока [m³/dan]

V – запремина реактора [m³]

Време задржавања чврстих материја (SRT) може се дефинисати као количник масе муља у реактору и масе степена отклањања муља из реактора.

$$SRT = \frac{V \times X_V}{Q_W \times X_W}$$

где су:

X_V – просечна концентрација испарљивих чврстих материја (VSS) у реактору

Q_W – степен протока чврстих материја из система

X_W – концентрација испарљивих чврстих материја (VSS) у Q_W

Количина метана произведеног у анаеробном процесу је пропорционална количини отклоњеног супстрата. Степен производње метана се рачуна преко следеће формуле:

$$Q_m = Q \times M \times (S_o - S_e) = Q \times E \times M \times S_o$$

где су:

S_o – укупна количина НРК у инфлуенту,

S_e – укупна количина НРК у ефлуенту,

M – запремина CH_4 произведена по јединици отклоњеног НРК,

Q – степен протока инфлуента,

E – фактор ефикасности.

Утицај температуре на отклањање супстрата рачуна се преко следеће формуле:

$$r_{st1} = r_{st2} \times \Theta^{(T_2 - T_1)}$$

где су:

r_{st1} – степен отклањања супстрата на температури 1,

r_{st2} – степен отклањања супстрата на температури 2,

Θ – константа (једнака 1,105 за $10^\circ C < T < 30^\circ C$),

T_1 – температура 1,

T_2 – температура 2.

Концентрација супстрата у сировој отпадној води и температура представљају битне факторе који утичу на производњу метана. Ако је разлика у температури висока или ако је концентрација супстрата у инфлуенту ниска, производња метана неће бити енергетски задовољавајућа. Да би се користио анаеробни третман за пречишћавање отпадне воде, сирова отпадна вода треба да има прилично ниску разлику у температури и релативно висок садржај органских материја. Истраживања о коришћењу ABR система за пречишћавање отпадне воде доказала су да смањивање температуре са $35^\circ C$ на $25^\circ C$ нема много утицаја на производњу метана, иако температуре треба одржавати изнад $25^\circ C$. Ово даје додатну стабилност систему пошто дозвољава флукуације температуре без негативног утицаја на учинак реактора.

10. Мембрански биолошки реактори (MBR реактори)

Биолошки третман отпадних вода постао је стандардни метод прераде отпадних вода већ у тридесетим годинама двадесетог века. У преради комуналних и индустријских отпадних вода се користе и аеробни и анаеробни процеси прераде, али се углавном користе секундарни таложници како би се добио чист ефлуент. Како би се отклониле мане конвенционалних технологија, биолошко пречишћавање се може интегрисати са мембранском технологијом. Дакле, мембранска филтрација и биолошко пречишћавање отпадних вода се могу успешно примењивати заједно. Биолошки третман отпадних вода конвертује растворене органске материје у суспендовану биомасу, што смањује могућност да се мембрана запуши и запрља. Са друге стране, мембране не само да замењују секундарне таложнике у процесу раздвајања чврсте од течне материје, већ и спречавају видљиве честице да дођу до ефлуента, што доводи до велике концентрације муља у реакторима. Примена мембранских биореактора у третману комуналних отпадних вода је знатно порасла. До пораста у примени је дошло управо због строжих захтева по питању квалитета ефлуента, ограничења по питању расположивог простора, мање потребе да се укључују радници и могућности пружања ефлуента који има доследан квалитет пречишћене воде.

Основа рада ових реактора се заснива на мембранама. Мембране се најчешће праве од полимера или неорганских материјала и у себи садрже велику количину пора које се могу видети једино под микроскопом. Због њихове мале величине, поре дозвољавају једино малим честицама да продру кроз мембрану са једне стране на другу. Самим тим, вода може да продре кроз мембрану док се већина честица задржава на другој страни. Чиста вода која се добија као резултат овог процеса назива се пермеат и она такође садржи одређен број ситних честица које су успеле да прођу кроз мембрану, али овај пермеат је много бољег квалитета од типичног ефлуента који се добија помоћу конвенционалних секундарних кларификатора.

Табела 7. Квалитет отпадне воде пречишћене у MBR систему у односу на квалитет отпадне воде пречишћење коришћењем конвенционалне методе

Параметри		Сирова вода	Третирана вода: поређење	
			MBR	Конвенционална метода
BPK ₅	[mg/l]	300	1,0	20
HPK	[mg/l]	300	7,5	50
TN	[mg/l]	38	5,7	5,7
TP	[mg/l]	7,8	0,3	0,5
TSS	[mg/l]	300	< 0,4	30
Coliform (бактерија)	[CFU/ml]	$3,7 \cdot 10^5$	није детектована	< 3000
Escherichia Coli phage (вирус)	[PFU/100ml]	$3,6 \cdot 10^5$	1	$2,7 \cdot 10^2$

Зависно од величине пора, можемо извршити класификацију мембрана која је приказана у табели 8. Уобичајено је да се мембране за микрофилтрацију и ултрафилтрацију користе заједно са биореакторима у третману отпадних вода, што онда представља мембрански биореактор.

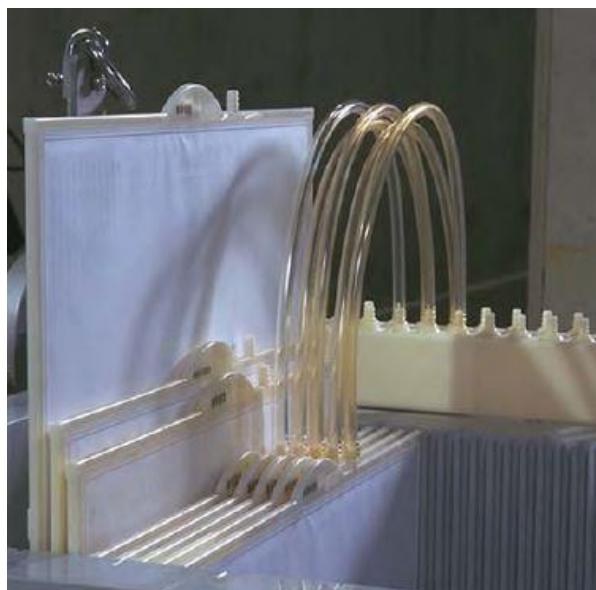
Табела 8. Класификација мембрана

Класа филтрације	Величина честица које се хватају (μm)	Типични контаминати који се отклањају	Типични распони радног притиска
Микрофилтрација (MF)	0,1 – 10	Суспендоване чврсте материје, бактерије, протозое	0,1 – 2 bar
Ултрафилтрација (UF)	0,003 – 0,1	Колоиди, протеини, полисахариди, већина бактерија, вируси (делимично)	1 – 5 bar (екстерни MBR) 0,2 – 0,3 bar (интерни MBR)
Нанофилтрација (NF)	0,001	Вируси, природне органске материје, мултивалентни јони	5 – 20 bar
Реверзна осмоза (RO)	0,0001	Скоро све нечистоће, укључујући моновалентне јоне	10 – 100 bar

У мембранским биореакторима се користе три главна типа конфигурације мембрана, и то су: модули са шупљим влакнима, оквирни плочасти модули и цевни мембрански модули. Мембрански модули са шупљим влакнима и оквирни плочасти модули се углавном потапају у отпадну воду, док се цевни мембрански модули обично постављају изван биореактора. Оквирни плочасти модули и модули са шупљим влакнима се углавном користе у третману комуналних отпадних вода, док је употреба цевних мембранских модула релативно ограничена.



Слика бр. 14– Модули са шупљим влакнима [34]



Слика бр. 15 – Оквирни плочасти модули [34]



Слика бр. 16 – Цевни мембрански модули [34]

У модулима са шупљим влакнима, велике количине мембрана са шупљим влакнима су наслагане, тако да изгледају као сноп. Пречници шупљих влакана углавном износе неколико стотина микрометара. Ови модули се постављају или хоризонтално или вертикално. Густо су спаковани и потопљени су у биомасу. Ове модуле је могуће у потпуности очистити аутоматски, док је ручно чишћење непрактично решење. Са друге стране, овај тип модула захтева комплекснију конфигурацију за подешавање система, и, у зависности од типа модула, може доћи до зачепљења мембрана.

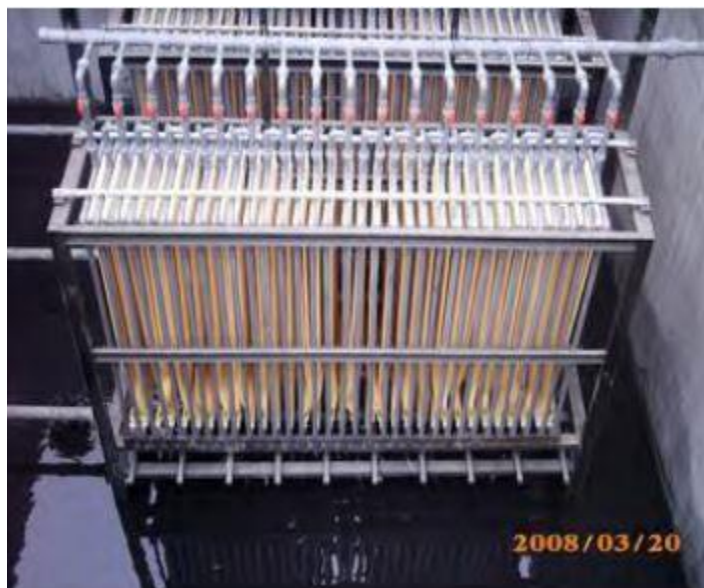
Оквирни плочасти модули су сачињени од мембрана у облику равних плоча са сепараторима. Отпадна вода тече преко мембране, а пречишћена вода се сакупља помоћу цеви које полазе из унутрашњости мембранског модула који ради под вакуумом. Плочасти модули су мање подложни томе да се запуше у односу на одређене модуле са шупљим влакнима. Могуће је чистити их ручно док је аутоматско чишћење скуп. Конфигурација за контролу система и процеса је прилично једноставна.

Цевни мембрански модули се ређе користе у поређењу са претходна два наведена модула. Углавном се ове цевне мембране налазе у судовима који су под притиском и мешавина течности се упумпава у њих. Као што је већ речено, овакви модули се најчешће користе у конфигурацијама које се налазе изван биореактора. Пречник цевних мембрана је временом смањен са 20 mm на 5 mm како би се повећала густина њиховог слагања. Дужина ових цевних мембранских модула може да достигне чак 6m и они могу бити постављени хоризонтално или вертикално.

Што се тиче материјала од којих се производе мембране, најчешће се ради о полимерима и керамици. Метални мембрански филтери се такође користе, али се користе у одређеним случајевима који нису повезани са MBR технологијом. Мембране се скоро увек састоје од танког површинског слоја који се налази на слоју са гушће постављеним порама који пружа механичку стабилност. Полимерне мембране се најчешће тако праве да је њихова површинска порозност велика, а да су поре густо распоређене. Мембране такође морају бити механички јаке како би имале постојаност по питању структуре. На крају, тај

материјал мора бити и отпоран на одређене хемијске нападе, као што су екстремне промене температуре, рН вредности и/или концентрација оксиданата, до којих долази када се мембрана чисти хемијским путем. Такође је потребно да материјал буде релативно отпоран на то да се мембрански филтер запрља и запуши у току времена. Иако се, у принципу, било који полимер може користити за формирање мембране, само одређен број материјала је одговарајући за процес мембранске сепарације, од којих се најчешће користе: поливинилиден дифлуорид (PVDF), полиетер-сулфон (PES), полиетилен (PE) и полипропилен.

Као што је већ и поменуто, можемо разликовати два типа мембранских биореактора у зависности од конфигурације, па тако разликујемо изван-реакторску конфигурацију и унутар-реакторску конфигурацију. У унутар-реакторској конфигурацији, мембрана је потопљена у реактору. Са друге стране, у изван-реакторској конфигурацији, мембрана се налаз изван реактора.



Слика бр. 17 – Унутар-реакторска MBR конфигурација [34]



Слика бр. 18 – Изван-реакторска MBR конфигурација [34]

У случају конфигурација где се мембране налазе изван реактора, најчешће се користе цевни мембрански модули. Мешавина течности са суспендованим муљем се упумпава у мембранске модуле. Добро дефинисана брзина протока од 4 m/s спречава да се мембрана запрља и запуши. На капиталне и оперативне трошкове везане за мембрански модул знатно утиче проток пермеата. Конвенционални екстерни мембрански системи типично раде са протоком између 85 до $135 \text{ l/m}^2/\text{h}$ где је трансмембрански притисак већи од 210 kPa .

У потопљеном или интерном MBR систему, мембране су директно потопљене у биореактор. Оне се пожељно налазе у одељцима или одвојеном резервоару који је спојен са биореактором како би се смањили напори чишћења мембране. Овакав тип конфигурације углавном подразумева коришћење полимерних мембрана. Мембране се јављају у два вида. Користе се или вертикално или хоризонтално постављени модули са шупљим влакнима који се налазе у правоугаоној или цевној структури која даје стабилност овом склопу, или вертикално постављени плочасти модули који се налазе у структури која им даје стабилност. Мембранске компоненте овакве конфигурације захтевају знатно више мембранске површине по јединици запремине у односу на мембранске компоненте екстерне MBR конфигурације. Мембранска влакна су стално или испрекидано подвргнута аерацији. Такође се користе и различите методе како би се смањило гомилање чврстих материја на површини мембране. Међутим, типична средња вредност протока пермеата ипак износи мање од $35 \text{ l/m}^2/\text{h}$ [35].

У табели 9 дате су основне информације о ове две конфигурације.

Табела 9. Основне информације о изван-реакторској и унутар-реакторској MBR конфигурацији

Фактор поређења	Изван-реакторска MBR конфигурација	Унутар-реакторска MBR конфигурација
Потребна површина за мембрану	Већи проток, а самим тим мање површине потребне за мембрану.	Мањи проток, али већа густина паковања мембрана (тј. већа површина мембрана по јединици запремине).
Потребан простор	MBR систем је компактан јер су мембране постављене уз реактор, а сам систем ради при високој концентрацији испарљивих чврстих материја (<i>engl. VSS – Volatile Suspended Solids</i>).	MBR систем је компактан, јер је густина паковања мембрана већа, а сам систем ради при концентрацији испарљивих чврстих материја већој од 10 g/l.
Дизајн биореактора и мембранских компоненти и њихова међузависност	Биореактор може да се дизајнира и да функционише под оптималним условима, укључујући оне да се достигне отклањање азота и фосфора, ако је то потребно.	Дизајн и рад биореактора и мембранске компоненте или резервоара нису независни.
Доследност перформанси мембране	Мања је вероватноћа да мембране промене карактеристике отпадне воде и биомасе.	Већа је вероватноћа да мембране промене карактеристике отпадне воде, што би захтевало измене у плану чишћења и/или учесталости чишћења.

У поређењу са конвенционалним технологијама за биолошки третман отпадних вода, мембрански биореактори имају одређене предности, али и недостатке, који су наведени испод.

Предности су:

- Постројење не захтева много слободног простора.
- Добија се ефлуент високог квалитета.
- Нема потребе за дезинфекцијом.
- Органско оптерећење може да буде велико.
- Степен производње муља је низак.
- Постројење се брзо покреће.

- Постројењем се лако управља и лако се мењају модули рада.
- Постројење лако може да се надогради.

Недостаци су:

- Релативно је скупо поставити и управљати оваквим системом.
- Потребно је често праћење и одржавање мембране.
- Мембрана може да се запрља и запуши.
- Трошкови рада су високи.
- Толеранције мембране намећу ограничења по питању вредности притиска, температуре и рН вредности.
- Мембране могу бити осетљиве на одређене хемикалије.
- Трансфер кисеоника је мање ефикасан због велике концентрације мешавине течности суспендованих чврстих материја (*engl. MLSS – Mixed liquor suspended solids*).
- Могућност додатног третирања вишка муља се доводи у питање.
- Потребан је претходни третман отпадне воде.

Један од највећих проблема мембранских биореактора је тенденција да се мембране запрљају током рада што смањује способност филтрације мембрана, а што заузврат доводи до повећаних оперативних трошкова и учесталијег чишћења мембрана. Запрљање мембране може да се дефинише као нежељено таложење микроорганизама, колоида, нерастворених остатака ћелија у порама или на површини мембране [36]. Оно настаје као последица интеракције мембранског материјала и компоненти активног муља. Суспендована биомаса нема константан састав и он варира у односу на састав инфлуента и у односу на изабран начин рада MBR биореактора. Због свега овога се предузимају одређене мере које контролишу прљање мембрана. У одређеним ситуацијама, нарочито код модула са шупљим влакнима, користе се аератори који мехурићима ваздуха спирају површину мембрана. Такође се користи инверзно испирање како би се отклонио наталожени слој прлавштине са површине мембрана. Међутим, и поред ових техника, некада је неопходно механичко, ручно чишћење.

Данас се мембрански биореактори могу сматрати доказаном технологијом за пречишћавање отпадних вода. У последњих 15 година, знатан напредак је остварен по питању дизајна и рада мембранског биореактора. Почев од 1990. године, доста малих постројења је изграђено у Европи, Северној Америци и Јапану. Међутим, шира примена ових биореактора још увек није распрострањена због разблажене природе комуналних отпадних вода. С обзиром да се цене мембрана смањују, MBR системи постају конкурентни традиционалним системима са активним муљем, али је сама употреба ових биореактора за третирање комуналних вода још увек ограничена. Предности и мане MBR

система у односу на традиционални систем са активним муљем представљене су у табели 10 [37].

Табела 10: Поређење MBR система и система са активним муљем

Предности коришћења MBR система у односу на традиционални систем са активним муљем:	Недостаци коришћења MBR система у односу на традиционални систем са активним муљем:
1. Ограниченост расположивог простора не представља препреку. 2. Задовољавају се строги захтеви по питању квалитета ефлуента. 3. Нема проблема са сепарацијом чврстих материја и течности у последњем таложнику.	1. Већи трошкови везани за рад система и за почетно инвестирање. 2. Повећана комплексност система која захтева вешто руковање. 3. Еколошка питања у вези са коришћењем хемикалија за чишћење и повећана потрошња енергије.

Све док захтеви који се односе на квалитет ефлуента нису превише ригорозни и све док се годишње улагање у MBR систем не смањи, конвенционални системи са активним муљем ће бити конкурентије решење за пречишћавање комуналних отпадних вода. Међутим, у будућности, ако цене земљишта порасту, а цене мембрана се смање, мембрански биореактори ће бити боље решење, поготову за јако загађене индустријске отпадне воде. Такође, нарочито у Европи, у складу са директивом Европске уније по питању повећања квалитета површинских и подземних вода, решења која укључују MBR ће постати привлачнија [37].

Тренутно су два највећа произвођача ових постројења у свету Кубота из Јапана и Зенон из Канаде. Кубота је поставила већину MBR постројења у свету. Са друге стране, Зенон доминира на пољу капацитета постојења јер је у њиховим постројењима пречишћено скоро четири пута више воде у поређењу са постројењима које је поставила Кубота. Зенон је поставио око 85% постројења у Северној Америци, што чини око 11% свих MBR постројења на тржишту. На азијском тржишту, углавном у Јапану и Јужној Кореји, MBR технологија се најчешће користи у постројењима малих размера за пречишћавање отпадних вода из домаћинстава. Уопштено гледано, највише MBR постројења су средње или мале размере. Више од 85% Куботиних MBR постројења има протоке мање од $200 \text{ m}^3/\text{dan}$, док од 219 MBR постројења за пречишћавање комуналних отпадних вода у Северној Америци, само њих 17 имају проток већи од $10.000 \text{ m}^3/\text{dan}$. Постројење са највећим капацитетом у Северној Америци тренутно има проток од $26.900 \text{ m}^3/\text{dan}$, а највеће MBR постројење у свету у овом тренутку налази се у Карсту, у Немачкој ($48.000 \text{ m}^3/\text{dan}$), са укупном површином мембрана од 84.480 m^2 [34]. Оба ова постројења користе Зенонове мембране. Број MBR постројења које су поставили водећи произвођачи

и њихов капацитет експоненцијално расту у последњој деценији. Иако на тржишту још увек доминирају Зенон и Кубота, много варијанти MBR постројења је доступно, али су та постројења још увек у стадијуму развоја [38].



Слика бр. 19 – Кубота MBR постројење са оквирним плочастим модулима [38]



Слика бр. 20 – Зенон MBR постројење са шупљим влакнима [38]

Третирање комуналних отпадних вода је уједно и најранија и највећа примена MBR система, и предвиђа се да ће ова примена наставити да буде примарна и у будућности. Због малих потреба за простором и због потенцијалног поновног коришћења ефлуента високог квалитета, MBR системи могу да се носе са проблемима раста популације и смањивања расположивог земљишта. За примене у индустрији, где су захтеви о квалитету строжи ови системи обезбеђују ефлуент који се може безбедно отпустити у околину. Главне области примене технологије мембранске сепарације у индустрији јесу пречишћавање јако загађених отпадних вода, као што су отпадне воде са великим садржајем уља и масти, или отпадне воде из индустрија за прераду коже и текстила.

10.1 Прорачун MBR-а

Проток отпадне воде може утицати на рад мембрана, а он зависи од биолошког стања отпадне воде која се доводи у систем. Кључни параметри који су у вези са радом и одржавањем мембрана јесу проток, пропусност (пора), протокол и учесталост чишћења и аерација мембрана.

Специфична потрошња ваздуха на основу површине мембрана (*engl. SAD_m – Specific air demand based on membrane area*) дефинише се као проток ваздуха који је потребан за спирање по површини мембрана. Потребно је обавити аерацију мембрана како би се спрале чврсте материје [39].

$$SAD_m = \frac{Q_A}{A_m}$$

где су:

SAD_m – специфична потрошња ваздуха на основу површине мембрана, [m³/m²]

Q_A – степен аерације мембрана, [m³/h]

A_m – укупна површина мембрана, [m²].

Минимална запремина резервоара са мембранама дефинише се као количник укупне површине мембрана и густине паковања мембрана у резервоару.

$$V_{m,min} = \frac{A_m}{\varphi_{tank}}$$

где су:

V_{m,min} – минимална запремина резервоара са мембранама [m³]

φ_{tank} – густина паковања мембрана у резервоару [m⁻¹]

Број потребних плочастих модула се рачуна преко следеће формуле [40]:

$$N = \frac{Q}{\frac{S}{F}}$$

где су:

N – број потребних плочастих модула,

Q – просечан дневни проток, [m^3/dan]

S – ефективна површина плочастих мембранских модула, [m^2]

F – степен протока у односу на просечни дневни проток, [$m^3/m^2/dan$], који зависи од типа инфлуента, степена загађености инфлуента, температуре воде, и других фактора.

Запремина резервоара за аерацију у односу на BPK рачуна се преко следеће формуле:

$$V_1 = \frac{BPK_C \times Q}{BPK_L}$$

где су:

V_1 – неопходна запремина резервоара за аерацију, [m^3]

BPK_C – концентрација BPK у инфлуенту,

Q – просечан дневни проток, [m^3/dan]

BPK_L – BPK оптерећење.

Запремина резервоара за аерацију у односу на степен нитрификације рачуна се преко следеће формуле:

$$V_2 = \frac{TN_C \times Q}{MLSS \times N_R}$$

где су:

V_2 – неопходна запремина резервоара за аерацију, [m^3]

TN_C – укупна концентрација азота у инфлуенту,

Q – просечан дневни проток, [m^3/dan]

MLSS – концентрација мешавине течности суспендованих чврстих материја у резервоару за аерацију,

N_R – степен нитрификације.

Запремина резервоара за денитрификацију у односу на степен денитрификације рачуна се преко следеће формуле:

$$V = \frac{TN_C \times Q}{MLSS \times \frac{R}{(R + 1)} \times DN_R}$$

где су:

V – неопходна запремина резервоара за аерацију [m^3],

TN_C – укупна концентрација азота у инфлуенту,

Q – просечан дневни проток [m^3/dan],

MLSS – концентрација мешавине течности суспендованих чврстих материја у резервоару за аерацију,

DN_R – степен денитрификације,

R – степен рецикулације.

11. Коришћење и третман комуналних и индустријских отпадних вода у Србији

Судећи по публикацији Централно-европског форума за развој [41], на основу анализе стања у Србији 2015. године, закључено је да је највећи проблем са којим се Србија суочава недовољна изграђеност канализационе инфраструктуре, заједно са недовољно изграђеним постројењима за пречишћавање отпадних вода. Вода је један од најважнијих, али и најосетљивијих ресурса. У Србији се дуго није водило рачуна о третману отпадних вода, што је проузроковало загађење великог броја водотокова. Судећи по проценама, више од 65% индустријских постројења не пречишћава отпадне воде. Што се одвођења и пречишћавања атмосферских и комуналних отпадних вода тиче, за то су задужена Јавна комунална предузећа водовода и канализација. Према прикупљеним подацима у Агенцији за заштиту животне средине Републике Србије, таквих предузећа у Србији има 178. Међутим, битно је истаћи да велики број ЈКП нема одговарајући систем за праћење и контролу отпадних вода. Приоритет у третману отпадних вода треба да буде изградња постројења за пречишћавање отпадних вода првенствено у ризичним подручјима, па затим и у мање ризичним. Првенство ова постројења треба да имају и већа насеља која су већи загађивачи. Канализација се мора изградити на адекватан начин који подразумева постројење за пречишћавање отпадних вода, као и систем за контролу и спречавање неконтролисаног отпуштања отпадних вода.

Неопходно је уложити много средстава како би се успоставили одрживи начини третирања отпадних вода. Закон о водама (“Службени гласник РС”, бр. 30/2010 и 93/2012) [42] прописује одређена начела на којима са заснива управљање водама. Начело одрживог развоја подразумева то да се потребе садашњих генерација морају задовољити, али на такав начин да се не угрози могућност задовољавања потреба будућих генерација. Такође, на основу начела о јединству водног система, претпоставља се да се развој система за управљање водама мора одвијати заједно са развојем Републике Србије како би се оствариле максималне економске и социјалне погодности. Треба обратити и посебну пажњу на начело “загађивач плаћа” по којем загађивачи морају сносити одређене трошкове. Поред ових начела, битно је и начело учешћа јавности које подразумева право јавности на информације о стању вода.

11.1 Управљање комуналним и индустријским отпадним водама

У Србији се прерађује само 5-10% отпадних вода, како је наведено у публикацији [41]. Као што је већ речено, више од 50% индустријских постројења у Србији нема постављене системе за пречишћавање отпадних вода. Такође, када је реч о пречишћавању комуналних

отпадних вода, само 20% општина има постројења за пречишћавање отпадних вода. Због свега овога, Србија се налази при дну лествице европских земаља у погледу пречишћавања отпадних вода, чему су знатно допринеле бројне поплаве које су погодиле овај регион у претходним годинама.

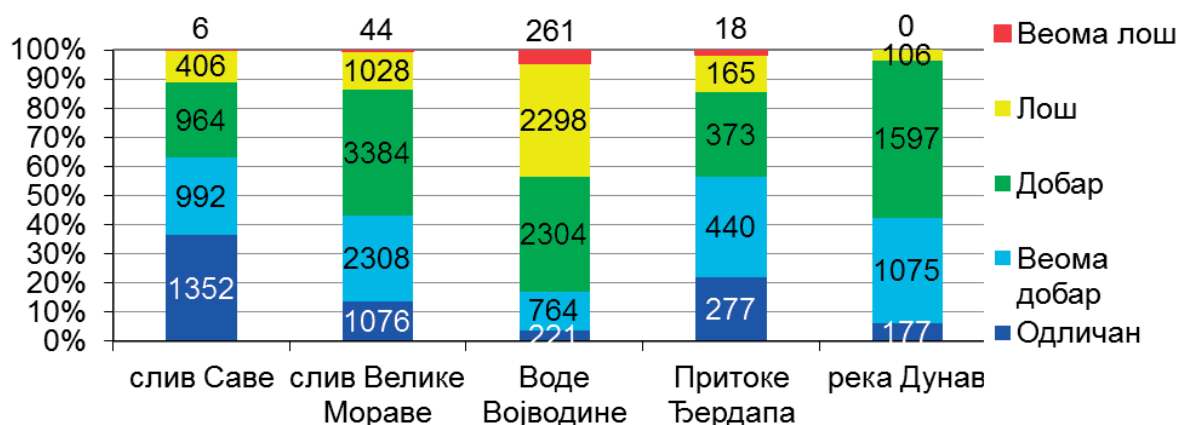
Велики проблем је тај што јавно комунална предузећа не достављају редовне извештаје о стварном саставу и стварној количини отпадних вода, због чега је тешко сакупити конкретне податке. Примера ради, према подацима Агенције за заштиту животне средине Србије, Извештај о отпадним водама за 2012. годину доставило је само 23 од укупно 178 јавно комуналних предузећа водовода и канализације. Такође, на основу података Републичког завода за статистику, у 2012. години 58% становништва Републике Србије било је прикључено на систем јавне канализације, при чему је генерисано 433 милијарде кубних метара комуналних отпадних вода. Од тога, 72% општина има јавну канализацију а од ових општина само 9,8% њих има ефективан систем за пречишћавање отпадних вода [41]. Међутим, због недостатка поузданих података, подаци о количинама испуштених непречишћених и пречишћених отпадних вода најчешће су само процењивани.

У Агенцији за заштиту животне средине развијен је индикатор животне средине Serbian Water Quality Index који служи за извештавање свих заинтересованих страна. Индикатор представља вредност која је добијена методом која је објединила десет параметара физичко-хемијског и микробиолошког квалитета отпадних вода. Ти параметри су засићеност кисеоником, ВРК₅, амонијум јон, рН вредност, укупни оксиди азота, ортофосфати, суспендоване материје, температура, електропроводљивост и колиформне бактерије.

Serbian Water Quality Index	Нумерички индикатор	Описни индикатор	Боја
	100 - 90	Одличан	
	84 - 89	Веома добар	
	72 - 83	Добар	
	39 - 71	Лош	
	0 - 38	Веома лош	

Слика бр. 21 – Индикатори квалитета површинских вода (SWQI) [41]

Обављена анализа SWQI у периоду од 1998. до 2013. године обухвата укупно 21.819 узорак физичко-хемијских показатеља узоркованих у просеку једном месечно. Графички приказ ове анализе се може видети на следећој слици 22.



Слика бр. 22 – Проценат квалитета свих узорака воде по сливовима (са одговарајућим бројем узорака) за период 1998-2013. одређених методом SQWI [41]

11.2 Примери добре праксе у пречишћавању индустријских отпадних вода

Coca-Cola Hellenic – Coca-Cola је компанија која подржава одрживи развој и заштиту животне средине. Компанија је фокусирана на подизање свести код становништва, поготову по питању очувања слатководних ресурса јер су они уједно и главни састојак њихових производа. Поред многих кампања, Coca-Cola употребљава воду на одрживи начин и ради на заштити речних сливова. Степен пречишћавања је 97%, а ради се и на изградњи постројења за завршну обраду отпадних вода.

Carnex – Индустрија меса Carnex поставила је ново постројење за пречишћавање отпадних вода у Врбасу. Еколошки чиста производња читаве компаније подразумева и изградњу фабрике воде, нову систематизацију радних места, набавку цистерни за растурање течног стајњака, уградњу филтера за крупне масне нечистоће и систем за пречишћавање отпадних вода. Постојење је пројектовано за укупно оптерећење од 40.000 ЕС и за средњи дневни проток од 2.300 m^3 . Постојење за пречишћавање отпадних вода чине следеће јединице: црпна станица сирове воде, самоиспирајуће ротационо сито, флотатор, разделна комора, SBR реактори (SBR1 и SBR2), угушћивач муља (ротирајући бубањ), резервоар за ефлуент, резервоар за хидролизу, аеробни дигестор, резервоар за муљ, станица за полимер и декантер за муљ [43].

Апатинска пивара – Апатинска пивара је велики загађивач, па самим тим, помоћу постројења за пречишћавање отпадних вода знатно доприноси побољшању квалитета воде. Отпадне воде се пречишћавају и путем аеробних и путем анаеробних процеса. Пречишћене отпадне воде се испуштају у мелирациони канал преко заједничке црпне станице, а за пречишћавање се користи аеробно постројење на принципу активног муља. Са друге стране, помоћу анаеробних процеса ствара се биогаз који се даље користи за производњу енергије.

НИС – Терминал за претакање нафтних деривата НИС Југопетрола поседује трајне пливајуће заштитне завесе за спречавање низводног ширења потенцијалних загађивача. Велика пажња се посвећује пречишћавању отпадних вода с обзиром да су зауљене отпадне и атмосферске воде веома ризичне по рецепијент.

Предлози за унапређење управљања комуналним и индустријским отпадним водама

1. Непостојање адекватног система за пречишћавање отпадних вода може се решити применом савремених и иновативних технолошких решења. На овај начин би се омогућило оптимално коришћење водних ресурса, пречишћавање отпадних вода, као и поновно коришћење.
2. Потребно је обезбедити нова улагања у постројења за пречишћавање отпадних вода, канализациону инфраструктуру и системе за снабдевање водом.
3. Потребно је да се државни и приватни сектор више укључе у ову област и да инвестирају у овај сектор. Потребна средства се могу обезбедити преко различитих пројеката, фондова, и других начина.
4. Неопходно је радити на подизању свести код компанија о значају улагања у еколошки начин пословања. Треба подстицати компаније, а нарочито велике загађиваче, да буду еколошки одговорни.

12. Закључак

На основу свега наведеног, може се видети да постоји много поступака и много технологија за пречишћавање отпадних вода, како комуналних, тако и индустријских. Ради ефикасне заштите здравља људи, али и заштите животне средине, битно је одабрати и примењивати право решење за дату ситуацију. Да би све функционисало на адекватан начин, битно је извршити анализу ситуације, формулисати политику и акциони план, примењивати одабрани план, али и вршити редован мониторинг и анализе стања како би се контролисао квалитет и ефикасност одабране технологије за пречишћавање отпадне воде. На основу свега тога, треба радити на одрживом систему како би се поспешео целокупан одрживи развој. Све ове кораке треба спроводити на државном, регионалном и локалном нивоу.

Уједињене Нације су 2014. године дефинисале Агенду за развој, која се бави и питањем воде. Закључено је да постоји неколико проблема који су међусобно повезани и чијем решавању треба приступити заједничким снагама из различитих сектора. Дакле, обезбеђивање одрживе воде за све обухвата: пијаћу воду, санацију и хигијену; водене ресурсе; управљање водом; катастрофе у вези са водом; загађење отпадних вода и квалитет воде. Општи циљ је обезбедити свима доступност и одрживо управљање водом и санацијом, укључујући и конкретан циљ који се односи на побољшање процеса управљања отпадним водама. Међутим, иако постоји јасан циљ да се успоставе ефективни и одговарајући системи за пречишћавање отпадних вода, имплементација стратегија није увек једноставна. Постоје неколико фактора на које треба обратити пажњу при планирању, а то су: системи законских регулатива, финансијски аспекти, препреке при увођењу иновација и недовољно података на располагању.

На крају се може закључити да поред одабира адекватне технологије за пречишћавање отпадне воде, свакако треба усвојити и одређени стратешки приступ целокупном управљању отпадним водама. Треба водити рачуна о производњи отпадне воде, њеном пречишћавању, али и евентуалном поновном коришћењу. У многим случајевима, постојеће технологије нису довољно развијене или не раде пуним капацитетом (или пак, раде под оптерећењем). Због тога је изразито важно прикупљати релевантне податке и пратити стање редовно.

У данашње време долази до значајних демографских и социјалних промена у свету, где су урбанизација и миграција једне од најважнијих. Ове промене имају и значајан утицај на производњу отпадних вода. Пречишћавање отпадне воде треба на време да се препозна као неискоришћена прилика која утиче на одрживи развој. Ако се не успоставе адекватни системи за пречишћавање отпадних вода, животна околина се може неповратно оштетити, а могу се и пропустити трошковно повољне прилике за побољшање санације и здравља људи.

13. Литература

- [1] Corcoran E, Nellemann C, Baker E, Bos R, Osborn D, Savelli H (eds) (2010) *Sick Water? The central role of wastewater management in sustainable development*. A Rapid Response Assessment. UNEP/UNHABITAT.
- [2] Cvetković Dragan, Šušteršič Vanja, *Uporedni pregled karakteristika rotacionih biodiskova i sekvencijalnih faznih reaktora za tretman komunalnih otpadnih voda*, Vodoprivreda, Vol.43, br.4-6, str. 249-257, 2011.
- [3] Nikolić Danijela, Skerlić Jasmina, Šušteršič Vanja, *Sistemi za prečišćavanje otpadnih voda u velikim i malim naseljima*, Vodoprivreda, Vol.44, br.4-6, str.247-255, 2012.
- [4] Šušteršič Vanja, *Tehnologije i postrojenja u pripremi vode za piće i tretmanu otpadnih voda*, Fakultet inženjerskih nauka, 2014.
- [5] D. Ljubisavljević, A. Djukić, B. Babić: *Prečišćavanje otpadnih voda*, Građevinski fakultet, 2004
- [6] <http://www.ebsbiowizard.com/2011/08/aerobic-vs-anaerobic-treatment-in-wastewater-systems-part-2-2/>, приступљено 28.3.2016.
- [7] Yi Jing Chan, Mei Fong Chong*, Chung Lim Law, D.G. Hassell, *A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater*, Chemical Engineering Journal 155 (2009) 1–18
- [8] Mittal Arun, *Biological Wastewater Treatment*, Water Today, August, 2011.
- [9] Winkler, M.A. (1981), *Biological Treatment of Wastewater*, John Wiley, New York
- [10] *Opšte informacije o BIODISK postrojenjima za otpadne vode projektovanih od strane BIOCLEAN GmbH*, preuzeto sa http://www.pbc.co.rs/bioloska-prerada/Biodisks_General_Information-Serbian.pdf, pristupljeno 28.3.2016.
- [11] H. Heukelekian and A. Heller, *Relation between Food Concentration and Surface for Bacterial Growth*, Journal of Bacteriology, Vol.40, No.4, pp. 547-558, 1940.
- [12] Spellman, Frank R and Nancy E Whiting. *Environmental Engineer's Mathematics Handbook*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2005. Print.
- [13] Spengel, D.B. and Dzombak, D.A. (1992). *Biokinetic modeling and scale-up considerations for biological contractors*, Water Environ. Res., 64(3), 223–234.
- [14] Gaćeša Slobodan, Klašnja Mile, *Tehnologija vode i otpadnih voda*, Jugoslovensko udruženje pivara, Beograd, 1994.

- [15] Cvetković Dragan, Despotović Milan, *Primena SBR sistema u prečišćavanju komunalnih otpadnih voda sa parametarskim modelom postrojenja*, Vodoprivreda, Vol.43, br.1-3, str. 89-92, 2011.
- [16] Mickle P. (2005), *Sequencing Batch Reactor, Design Calculations, BOD Removal and Nitrification Process*, Booneville, AR-4 MGD PWWF
- [17] Sudar Nedeljko, Perić Momir, Đokić-Vasić Dragana, *Postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda Bileća po 'SBR' tehnologiji – realizacija i efekti prečišćavanja*, Vodoprivreda, Vol.44, br.1-3, str. 127-138, 2012.
- [18] <http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/ecobatch/en/>, pristupljeno 15.7.2016.
- [19] Kumar Ajay, *Biological Treatment of Wastewater & Design Calculation of Sequencing Batch Reactor Process*, A technical seminar report, Mewar University, Faculty of Engineering and Technology, Department of Chemical Engineering, India, 2015.
- [20] Klašnja Mile, Šćiban Marina, *Osnovi procesa anaerobnog prečišćavanja otpadnih voda prehrambene industrije i industrije pića*, APTEFF, 31, str. 3-22, 2000.
- [21] Lettinga G. (2001). *Digestion and Degradation, Air for Life*. Water Science and Technology 44: 157-176.
- [22] Seghezze L., Gutierrez M., Trupiano A., Figueroa M., Cuevas C., Zeeman G., Lettinga G. (2002). *The Effect of Sludge Discharges and Upflow Velocity on the Removal of Suspended Solids in a UASB Reactor Treating Settled Sewage at Moderate Temperatures*. In Proceedings of the VII Latin-American Workshop and Seminar on Anaerobic Digestions. Merida, Mexico.
- [23] Tilley, E.; Ulrich, L.; Luethi, C.; Reymond, P.; Zurbruegg, C. (2014): *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*. 2nd Revised Edition. Duebendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag).
- [24] Gomez Raul Rodriguez, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor: Modelling*, Licentiate Thesis in Chemical Engineering, School of Chemical Science and Engineering, Department of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2011.
- [25] Hulshoff L., Lens P., Castro S., Lettinga G. (2004). *Anaerobic Sludge Granulation*. Water Research 38: 1376-1389.
- [26] Bitton G. (2005). *Wastewater Microbiology* (Wiley Series in Ecological and Applied Microbiology). Third Edition.
- [27] Fang H., Lau I. (1996). *Start-up of the Thermophilic (55°C) UASB Reactors using Different Mesophilic Seed Sludges*. Water Science and Technology 34: 445.– 452.

- [28] Kalyuzhnyi S., Fedorovich V., Lens P. (2006). *Dispersed Plug Flow Model for Upflow Anaerobic Sludge Bed Reactors with Focus on Granular Sludge Dynamics*. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology 33: 221.–237.
- [29] <http://www.nisargindia.com/products/upflow-anaerobic-sludge-blanket-reactor-uasb/>, pristupljeno 16.7.2016.
- [30] Dhir Amit, Ram Chhotu, *Design of an Anaerobic Digester for Wastewater Treatment*, International Journal for Advanced Research in Engineering and Applied Sciences, Vol.1, No.5, November, 2012
- [31] Singh Manohar, 1999. *A project report on Design of an anaerobic digester for treatment of SLIET waste-water*. Dept of Chemical Technology, SLIET.
- [32] Barber, W., and Stuckey, D., 1999. *The Use of the Anaerobic Baffled Reactor (ABR) for Wastewater Treatment: A Review*.
- [33] <http://www.bioinnovatives.com/sewage-treatment/>, pristupljeno 16.7.2016.
- [34] Jixiang Yang (2013). *Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment*, Dr. Jixiang Yang & bookboon.com, 1st edition
- [35] Sutton, P.M. (2006) *Membrane bioreactors for industrial wastewater treatment: applicability and selection of optimal system configuration*, P.M. Sutton & Associates, Inc., Enfield.
- [36] Meng, F.G., Chae, S.R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.S., Yang, F.L., 2009. *Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material*. Water Research 43(6), 1489-1512.
- [37] van Haandel, A., van der Lubbe, J., 2007. *Handbook of biological wastewater treatment*, Quist Publishing, Leidschendam
- [38] Radjenović, J., Matošić, M., Mijatović, I., Petrović, M., Barcelo, D., 2008. *Membrane bioreactor (MBR) as an advanced wastewater treatment technology*. Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste, 37-101.
- [39] Zaerpour Masoud, *Design, Cost & Benefit Analysis of a Membrane Bioreactor*, Politecnico di Milano, Department of Environmental and Geomatic Engineering, 2013-2014.
- [40] ACWA presentation, at Enviro Arabia Conference, 2007.
- [41] Коришћење и третман комуналних и индустријских отпадних вода у Републици Србији, ЦЕДЕФ публикација, мај 2015.
- [42] Закон о водама, “Службени гласник РС”, бр. 30/2010 и 93/2012

- [43] Fridrich Beata, Izvod iz radne sveske postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda IM Carnex, Industrija mesa „CARNEX“ DOO, Vrbas, preuzeto sa <http://www.carnex.rs/srb/kompanija/17/19/Ekologija>, приступљено 7.7.2016.