



Бојана Вујовић¹

Прегледни стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25289V

РАЗУМЕВАЊЕ МИКРОБИОЛОГИЈЕ АКТИВНОГ МУЉА – КЉУЧ ЗА ЕФИКАСНО УПРАВЉАЊЕ ПРОЦЕСОМ ПРЕЧИШЋАВАЊА ОТПАДНИХ ВОДА

Резиме: Активни муљ чини сложена заједница микроорганизама различитих трофичких нивоа, формирана под утицајем бројних фактора спољашње средине, а чија екологија и физиологија имају кључну улогу у третману отпадних вода. Разумевање законитости ових односа омогућава селекцију микроорганизама чије особине и метаболизам доприносе ефикасном пречишћавању отпадне воде. У пракси, проблеми попут надувавања, испливавања и слабог таложења муља често су последица нарушене структуре биоценозе активног муља. Циљ рада је да прикаже значај познавања, праћења и управљања микробиолошким саставом активног муља за унапређење поузданости и ефикасности процеса третмана отпадних вода.

Кључне речи: биоценоза активног муља, третман отпадних вода, селекција микроорганизама

ACTIVATED SLUDGE MICROBIOLOGY – A KEY TO EFFICIENT WASTEWATER TREATMENT PROCESS MANAGEMENT

Abstract: Activated sludge is a complex community of microorganisms at different trophic levels, shaped by various environmental factors. Their ecology and physiology play a crucial role in wastewater treatment. Understanding these interactions enables the selection of microorganisms with favorable metabolic traits for effective purification. In practice, issues like bulking, foaming, and poor sludge settling often result from an imbalanced activated sludge biocenosis. This paper highlights the importance of identifying, monitoring, and managing the microbial composition of activated sludge to improve the reliability and efficiency of wastewater treatment processes.

Key Words: activated sludge biocenosis, wastewater treatment, microorganism selection

1. Увод

Активни муљ је најчешће коришћена технологија у третману комуналних и отпадних вода високо оптерећених органском материјом у свету. Активни муљ представља конзорцијум микроорганизама различитих трофичких нивоа. Реактор са активним муљем можемо посматрати као вештачки екосистем где су различити микроорганизми под сталним утицајем различитих абиотичких и биотичких еколошких фактора. Биоценозу активног муља чине бактерије, протозое и метазое различитих трофичких нивоа. Бактерије чине око 95% биомасе активног муља и представљају примарне разлагаче органске материје, одговорне за деградацију свих биодеградабил-

¹ *4waters doo, Beograd, b.vujovic@4waters.rs*



них растворених једињења у отпадној води. Бактеријама из муља се хране једноћелијске протозое на тај начин доприносе пречишћавању отпадне воде. Такође, метазое, као вишећелијски микроскопски организми, доприносе пречишћавању посредно, хранећи се слободнопливајућим бактеријама [2] [8].

Бактеријска заједница у активном муљу је бројна и разноврсна, изграђена из различитих група бактерија, међу којима су аеробне хетеротрофне бактерије, нитрификатори, денитрификатори, ферментативне бактерије и полифосфат-акумулирајуће бактерије. Основна разлика између ових заједница је у катаболичком метаболизму, те бројност појединих група детерминише доступност и врста једињења које користе као извор нутритивних и енергетских потреба (донор електрона) и оксичност услова средине (акцептор електрона) [6].

Процес пречишћавања отпадне воде започиње пуштањем отпадне воде у биореактор. У зависности од тога која врста органске материје је присутна (лако или споро биодеградабилна), услова средине и времена задржавања, долази до умножавања одређених група бактерија које постају доминанте. Флокулација, односно груписање бактерија је њихово природно својство. Сматра се да у природи, бактерије не живе као планктонски организми, него у заједницама изграђених из једне или више врста бактерија, које су слеplене међу собом и заштићене слузавим омотачем. На исти начин, бактерије у биолошком реактору се природно слеplују међу собом, формирајући пахуље или флокуле муља што омогућава сепарацију бактерија од пречишћене воде [6], [7], [8]. Слеplивање бактерија се одвија захваљујући способности лучења различитих екстрацелуларних полисахарида које поспешују слеplивање, али такође обезбеђују заштитни матрикс у које су бактерије уроњене и на тај заштићене од променљивих спољашњих утицаја. Екстрацелуларни матрикс такође служи као депо нутритивних елемената, због чега количина и развијеност матрикса представља један од значајних показатеља услова који владају у биореактору [6], [7], [8].

Величина, облик, структура и постојаност флокула муља зависи од диверзитета бактерија које учествују у њиховој изградњи и детерминисана је условима који владају у биореактору. Од карактеристика флокула муља у највећој мери зависи успешност пречишћавања отпадних вода, укључујући сепарацију пречишћене воде од муља у фази финалног таложења [8], [9].

Активни муљ је такође насељен бројном и разноврсном заједницом протозоа и метазоа. Ови организми су крупни, лако видљиви и препознатљиви под микроскопом. Иако је њихов биоиндикаторски значај по некада неконзистентан, многи аутори наглашавају њихов значај у управљању процесом пречишћавања отпадних вода [1], [7] [8], [11]. Као најразвијенији микроорганизми присутни у муљу, они су и најосетљивији на недостатак кисеоника и присуство токсичних супстанци, због чега њихова бројност, диверзитет или изненадни нестанак свих јединки често означава акутни или хронични стрес који постоји у систему [1], [2], [15]. Такође, њихов развој је детерминисан старошћу муља, па претстављају добре индикаторе зрелости и старости муља у систему [7].

Филаментозне бактерије су нормално присутна бактеријска заједница у активном муљу. Због свог специфичног кончастог изгледа, оне су видљивије у систему, а због утицаја на процес третмана, често су у фокусу интересовања. Уколико су присутне у



мањем броју, ове бактерије служе као арматура која одржава флокулу муља чврстом и компактном. Међутим, уколико су присутне у већем броју, те уколико њихов раст није ограничен само на површину флокуле, него излази и изван, или ако су развијене и у течности између флокула муља, ове бактерије значајно отежавају пречишћавање, пре свега јер отежавају, успоравају или потпуно онемогућавају сепарацију муља од пречишћене воде у финалном степену пречишћавања. Такође, стварање пене на биолошким реакторима или таложницима је често последица масовног развоја неких од ових бактерија [7], [8], [10].

Циљ рада је да се кроз приказ резултата, оригиналних микрографија и доступних литературних података прикаже значај познавања односа и динамике односа у биолошком реактору, а који утичу на ефикасност и економичност процеса пречишћавања. Најчешћи проблеми у процесу третмана отпадних вода су проузроковани лошом микробном структуром активног муља, а која је са друге стране последица услова који су успостављени у биолошком реактору и као такви подложни промени.

2. Материјал и методе рада

Микроскопска анализа активног муља обухвата преглед свежих, нативних и фиксираних препарата активног муља. Свежи препарати се прегледају при увеличању светлосног микроскопа од 100 – 400x, док се за обојене користи имерзиони објектив. На нативном препарату се при увеличању објектива од 10 и 40x уочава величина, облик, структура и диверзитет пахуља муља, абунданција филамената, као и квалитативно и квантитативно присуство протозоа и метазоа. Прегледом претходно обојених препарата (по Граму, Нејсеру, индија инком или метиленско плавим) је могуће уочити различите детаље, као што је развијеност екстрацелуларног матрикса, морфолошке карактеристике присутних филамената, уз могућност да се уради њихова идентификација употребом дихотомих кључева идентификације [7] [8].

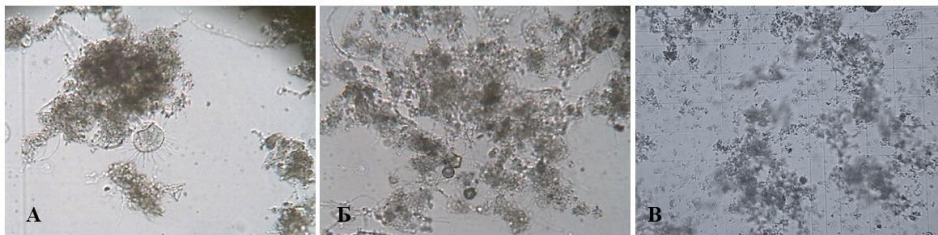
3. Резултати рада и дискусија

Велики број аутора наглашава значај микроскопских анализа активног муља у управљању процесом пречишћавања. Међутим, резултати испитивања и биоиндикаторска вредност и значај појединих микроорганизама је различито вреднована. Микроскопским прегледом нативног препарата муља уочавају се главне основне карактеристике квалитета активног муља.

Морфологија флокула се карактерише присуством флокула различитих величина, облика, структуре и постојаности. Типично, флокуле се димензија између 50 – 500 μm , облика који може варирати од облог, овалног до потпуно неправилног облика. Структура флокула може бити отворена или затворена, у зависности да ли су флокулоформирајући организми спојени у компактну заједницу или она има „паучинасту структуру“. Постојане флокуле се карактеришу флокулама на чијим ивицама нема неповезаних, слободнопливајућих ћелија (слика 1).

Морфолошке карактеристике флокула муља су детерминисане квалитетом улазне отпадне воде, примењеним технолошким поступком, процесним параметрима и

другим факторима. Флокуле ситних величина, неправилног облика и структуре се спорије и непотпуно одвајају од пречишћене воде, узрокујући погоршање квалитета ефлуента [8], [9].



Слика 1. Морфолошке карактеристике флокула муља (нативни препарат): А – заобљен облик, компактна структура, Б - неправилан облик, компактна структура, В – неправилан облик, отворена структура

Figure 1. Morphological characteristics of activated sludge flocs (native slide): А – oval shape, compact structure, Б – irregular shape, compact structure, В – irregular shape, open structure

Присуство великог броја слободнопливајућих бактеријских ћелија, као и бактерија спиралног облика (спирила и спирохета) су лако уочљиви знаци недостатка кисеоника, присуства високе концентрације органске материје у реакторима или знаци „гладујућег муља“ [8].

Међу једноћелијским протозоама, у муљу су присутне амебе, амебе са љуштурицом, флагелате и цилијате. Амебе су једноћелијске животиње препознатљиве по својим псевдоподијама или „лажним ножицама“ којима се крећу, хватају плен, истовремено мењајући облик свог тела. У муљу су видљиве крупне амебе (слика 2Б), као и ситне, а њихова појава је везана за присуство веће количине хране у води, било због високе концентрације растворене органске материје у почетном периоду рада постројења, или у условима велике старости муља и распадања постојећих флокула [7] [8].

Амебе са љуштурицом се разликују према облику љуштурице изграђене из калцијум-карбоната испод које по некада извиру танке псевдоподије. Флагелате су једноћелијски организми који се карактеришу присуством бича или флагеле. Осим *Euglena* sp. која је крупна, остали представници су ситни, често означене као ситне безбојне флагелате и препознатљиве по свој типичном брзом кретању кроз воду [7] [8].

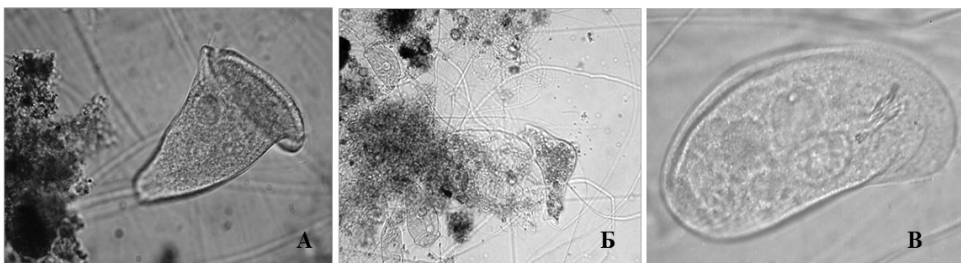
Цилијатне протозое су најсложеније и најосетљивији једноћелијски организми у активном муљу, због чега се присуство, бројност или одсуство неких од представника има највећи биоиндикаторски значај [3] [12]. Ови организми не учествују директно у трансформацији органске материје у активном муљу, али хранећи се планктонским бактеријама доприносе бистрењу воде и производњи квалитетнијег ефлуента [7] [8].

У муљу су цилијатне протозое диференциране према трофичкој ниши коју заузимају:

- Слободнопливајуће цилијате се крећу између флокула муља и хране се бактеријским ћелијама које су присутне као планктони у течности (слика 2В),

- Брстеће цилијате које насељавају површину флока и хране се бактеријама одвојеним од флока у близини ивице флока и

Причвршћене цилијате које воде сесилни начин живота причвршћене за површину флокуле (слика 2А). Управо причвршћене цилијате се сматрају најбољим биоиндикаторима, јер због свог сесилног начина живота, нису у могућности да промене станиште приликом погоршања услова живота. У муљу су присутни представници родова *Vorticella* sp, *Opercularia* sp, *Epystilis* sp, *Charchesium* sp. и други. Иако се сматрају индикаторима зрелог, радно активног, добро аерисаног муља, велики број аутора наводи да се бројно присуство *Opercularia* и *Vorticella microstoma* јавља и у условима који се сматрају лимитирајућима за раст цилијата. Елошки посматрано, на добре услове и стабилан систем указује умерена бројност и велики диверзитет ове групе животиња, док велики раст само једне врсте упућује на услове који су ограничавајући (недостатак кисеоника, рН, присуство токсичних или тешко разградивих супстанци и слично) [3], [11], [12], [15].



Слика 2. Протозое у активном муљу (нативни препарат): А – *Vorticella convallaria*, Б - Амoеба, В – *Colpidium* sp.

Figure 2. Activated sludge protozoa (native slide): А – *Vorticella convallaria*, Б - Амoеба, В – *Colpidium* sp.

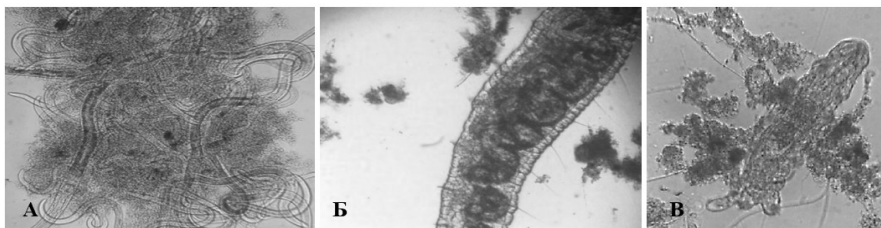
Метазое активног муља су више животиње микроскопских величина. У муљу се могу видети нематoде, ротаторије, олигохете и тардиграде, а њихов висок број у муљу увек указује на муљ велике старости (слика 3). Контрола старости муља је од великог значаја за успостављање енергетски ефикаснијег и економичнијег процеса третмана отпадних вода [16].

Филаментозне бактерије су специфична група бактерија издуженог, кончастог облика. У муљу је присутно око 30 различитих врста ових организама, које се разликују по својим морфолошким, физиолошким и еколошким карактеристикама, те такође имају висок биоиндикаторски значај у технологији пречишћавања [7], [8], [10].

Најчешће неправилности у раду постројења за третман отпадних вода су мутан ефлуент, отежано таложење муља у финалним таложницима, немогућност сепарације муља од пречишћене отпадне воде (набујавање муља), појава пене у биолошким реакторима или финалним таложницима, испливање погача муља у финалном таложнику су проузроковани неправилном структуром активног муља [4], [10], [13], [14].

Већина ових појава је везана за композицију активног муља [7], [8]:

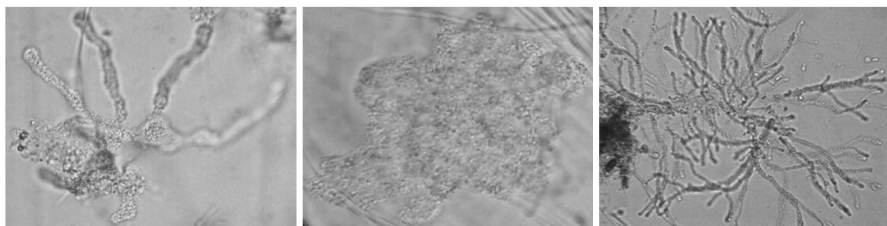
- Ситне флокуле и велики број слободнопливајућих бактерија доводе до продукције замућеног ефлуента уз повећану концентрацију укупних суспендованих материја;



Слика 3. Метазое у активном муљу (нативни препарат): А – Nematoda, Б - Oligochaeta, В – Tardigrada

Figure 3. Activated sludge metazoa (native slide): А – Nematoda, Б - Oligochaeta, В – Tardigrada

- Висока вредност филаментозног индекса указује на масован раст филаментозних (кончастих) бактерија и немогућности сепарације муља од пречишћене воде;
- Бројно присутне *Zooglea* или друге моноколоније доводе до присуства веће количине екстрацелуларних полисахарида и масивније развијеног слузавог омотача око формираних флокула, што узрокује повећање вискозности муља, отежаног таложења и обезводњавања овог муља (слика 4);



Слика 4. Различити облици *Zooglea* моноколонија (нативни препарат)

Figure 4. Different shapes of *Zooglea* monoclonies (native slide)

- Висока бројност филамената *Nocardia* spp., *Microthrix parvicella* i Тип 1863 доводи до стварања велике количине пене или скраме на површини биолошких реактора и/или финалних таложника [4], [5];
- Муљ са видљивим знацима старости укључујући присуство већих зона са израженим знацима труљења, доминантно присутне метазое, малобројне и оштећене јединке причвршћених цилијата доводи до одвајања и испливавања муља у финалним таложницима, односно појаве познате као „rising sludge“ [8].

4. Закључак

Микроскопска анализа муља је брза, јефтина и поуздана метода за праћење рада биолошких реактора. Активни муљ је екосистем изграђен из различитих популација



микроорганизама, различите сложености и трофичких нивоа под сталним утицајем абиотичких еколошких фактора. Успешност њиховог прилагођавања променљивим и често рестриктивним условима средине, условљава успешност целокупног третмана отпадних вода и квалитета пречишћене воде. Екологија активног муља је условљена условима средине, те познавање микроорганизама и њихових биолошких карактеристика омогућава подешавање и усклађивање услова у складу са потребама оне физиолошке групе чији раст је пожељан. Праћење биолошких карактеристика активног муља под микроскопом се омогућава увид у услове реактора, а који обједињују податке о физичко-хемијском квалитету инфлуента, ефикасности предтретмана, квантитету и доступности присутних нутритивних елемената, физичко-хемијском квалитету садржаја биореактора, старости муља и другим процесним параметрима. Сви проблеми који могу настати се на овај начин могу благовремено уочити и спровођењем превентивних мера спречити.

5. Литература

- [1] Babko R, Kuzmina T, Lagod G, Jaromin-Glen K. Changes in the structure of activated sludge protozoa community at the different oxygen condition, *Chem didact ecol metrol.* 19 (1-2): 87-95, 2014.
- [2] Benyelles M. B, Slimane M, Belgharbi A, Tir Toul M. A, Microbiological aspects of the aeration tanks of an activated sludge treatment plant during dysfunction: consequences on its treatment performance, *Lebanese Science Journal*, Vol.23, No 1, 2022.
- [3] Berger F, Foissner W, III-2.1 Illustrated guide and ecological notes to ciliate indicator species (Protozoa, Ciliophora) in running waters, *Lakes, and sewage plants*, 2003.
- [4] Burger B, Effect of *Microthrix parvicella* growth in domestic wastewater treatment plant of the city of Subotica, *7th Balkan Congress of Microbiology*, Belgrade, Proceedings, 2011.
- [5] Бургер Б, Сезонска динамика раста *Microthrix parvicella* на ППОВ у Суботици током 2011 године, *41. Конференција о актуелним проблемима коришћења и заштите вода „Вода“*, Зборник радова (ISBN 978-86-904241-9-1), pp. 321-326, 2012.
- [6] Chen G, Van Loosdrecht, Mark C. M, Ekama G.A, Brdjanovic D, *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design* – 2nd edition, IWA Publishing, 2023.
- [7] Eikelboom D. H, *Process control of activated sludge plants by microscopic investigation*, 2000.
- [8] Jenkins D, Richard M. G, Daigger G, *Manual of the causes and control of activated sludge bulking, foaming, and other solids separation problems* – 3rd edition, CRC Press LLC, 2004.
- [9] Liwarska-Bizukoje E, Klepacz-Smolka A, Andrzejczak O, Variations of morphology of activated sludge flocs studied at full-scale wastewater treatment plants, *Environmental Technology*, 36(9): 1-26, 2014.
- [10] Madoni P, Davoli D, Gibin G, Survey of filamentous microorganisms from bulking and foaming activated sludge plants in Italy, *Wat. Res.* 34(6), 1767-1772, 2000.
- [11] Martin-Cereceda M, Perez-Uz B, Serrano S, Guinea A, Dynamics of protozoan and metazoan communities in a full scale wastewater treatment plant by rotating biological contactors, *Microbiol.Res.* 156, pp. 225-238, 2001.
- [12] Милошевић Д, Борота Б, Фејзулахи Б, Вујовић Б, Диверзитет цилијата на ППОВ Руменка, Ковиљ и Степановићево у 2022. години, *52. Конференција о актуелним темама коришћења и заштите вода, „Вода 2022“*, Зборник радова pp. 299-304, 2023.



- [13] Милошевић Д, Борота Б, Фејзулахи Б, Вујовић Б, Доминантно присутне филаментозне бактерије на ППОВ Руменка у периоду од августа 2022 године до фебруара 2023. године, 52. Конференција о актуелним темама коришћења и заштите вода, „Вода 2022“, Зборник радова, pp. 305-310, 2023.
- [14] Милошевић Д, Борота Б, Вујовић Б, Структура заједнице филаментозних бактерија у пречистачима комуналне отпадне воде и њихов индикаторски значај у биолошким реакторима, 54. Конференција о актуелним темама коришћења и заштите вода, „Вода 2025“, Зборник радова, pp. 359-366, DOI: 10.46793/VODA25.351M, 2025.
- [15] Nicolau A, Dias N, Mota M, Lima N, Trends in the use of protozoa in the assessment of wastewater treatment, *Res. Microbiol.* 152, 621-630, 2001.
- [16] Рех Ж, Бургер Б, Економски значај биолошких анализа активног муља у вођењу технолошког процеса пречишћавања отпадних вода, *XIV Научно-стручни скуп о природним вредностима и заштити животне средине Екоист 07*, Сокобања, Зборник радова, pp. 382-385, 2007.