



Јована Благојевић<sup>1</sup>, Горан Орашанин<sup>2</sup>  
Будимирка Мариновић<sup>3</sup>, Стојан Симић<sup>4</sup>

Прегледни стручни рад  
DOI: 10.5937/VIK25317B

## ЕНЕРГЕТСКА ЕФИКАСНОСТ И ОПТИМИЗАЦИЈА ПОТРОШЊЕ ЕНЕРГИЈЕ У ПОСТРОЈЕЊИМА ЗА ПРЕЧИШЋАВАЊЕ ОТПАДНИХ ВОДА

**Резиме:** Рад анализира потрошњу енергије и могућности оптимизације у постројењима за пречишћавање отпадних вода (ППОВ). Посебан фокус стављен је на идентификацију кључних фактора који утичу на потрошњу енергије у различитим фазама третмана отпадних вода, укључујући прелиминарни, примарни, секундарни и терцијарни третман. Рад такође разматра стратегије повећања енергетске ефикасности кроз примјену напредних технологија, оптимизацију аерације, контролу процесних параметара у реалном времену и коришћење нуспроизвода, посебно муља, за производњу биогаса. На основу прегледане литературе и студија случаја, наглашава се потенцијал трансформације постројења у енергетски самоодрживе системе, са смањењем оперативних трошкова и емисија гасова са ефектом стаклене баште, уз очување квалитета третиране воде.

**Кључне речи:** пречишћавање отпадних вода, потрошња енергије, енергетска ефикасност, самоодржива постројења

## ENERGY EFFICIENCY AND OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION IN WASTEWATER TREATMENT PLANTS

**Abstract:** Paper analyzes energy consumption and optimization potentials in wastewater treatment plants (WWTPs). The paper focuses on identifying key factors affecting energy use across different treatment stages, including preliminary, primary, secondary, and tertiary treatment. Strategies for improving energy efficiency are also discussed, such as the implementation of advanced technologies, aeration optimization, real-time process control, and the utilization of by-products, especially sludge, for biogas production. Based on literature review and case studies, the paper highlights the potential for transforming WWTPs into energy self-sufficient systems, reducing operational costs and greenhouse gas emissions while maintaining the quality of treated water.

**Key Words:** wastewater treatment, energy consumption, energy efficiency, self-sufficient plants

<sup>1</sup> Универзитет у Источном Сарајеву, Машински факултет, [jovana.blagojevic@ues.rs.ba](mailto:jovana.blagojevic@ues.rs.ba)  
ORCID: 0000-0001-8124-9868

<sup>2</sup> Универзитет у Источном Сарајеву, Машински факултет, [goran.orasanin@ues.rs.ba](mailto:goran.orasanin@ues.rs.ba),  
ORCID:0000-0002-1513-3645

<sup>3</sup> Универзитет у Источном Сарајеву, Факултет за производњу и менаџмент Требиње, [budimirka.marinovic@fpm.ues.rs.ba](mailto:budimirka.marinovic@fpm.ues.rs.ba), ORCID:0000-0001-5509-0056

<sup>4</sup> Универзитет у Источном Сарајеву, Машински факултет, [stojan.simic@ues.rs.ba](mailto:stojan.simic@ues.rs.ba)



## 1. Увод

Постројења за пречишћавање отпадних вода (ППОВ) карактеришу се високом потрошњом електричне енергије [1]. Ипак, она имају кључну улогу у заштити животне средине јер уклањају штетне материје из отпадних вода прије испуштања у природне водотоке. На тај начин спрјечавају загађење, омогућавају опоравак екосистема и одржавају еколошку равнотежу, што је важно за очување разноликог биљног и животињског свијета те несметано одвијање природних процеса [2].

У контексту глобалних изазова климатских промјена и одрживог управљања ресурсима, ППОВ су препозната као важан елемент спровођења циљева „зелене агенде“ [3]. Ова стратегија наглашава потребу смањења емисија гасова са ефектом стаклене баште, повећања енергетске ефикасности и преласка на обновљиве изворе енергије. Будући да ППОВ спадају међу највеће потрошаче електричне енергије у комуналном сектору, оптимизација њихове потрошње представља значајан корак ка остваривању ових циљева.

Пораст свјетске популације и процјене да ће до 2050. године 64% земаља у развоју и 86% развијеног свијета бити урбанизовано [4], заједно са све строжијим захтјевима за квалитет воде која се испушта у реципијент, доводе до увођења напреднијих и сложенијих технологија у процес пречишћавања отпадних вода [5, 6]. Иако ефикасније у уклањању загађивача, ове технологије захтијевају знатно веће количине електричне енергије, што повећава укупну потрошњу у сектору вода. Будући да се производња електричне енергије у многим земљама и даље ослања на фосилна горива, већа потрошња енергије у ППОВ директно повећава емисије угљен-диоксида ( $\text{CO}_2$ ), главног покретача глобалног загађивања и климатских промјена [7, 8, 9].

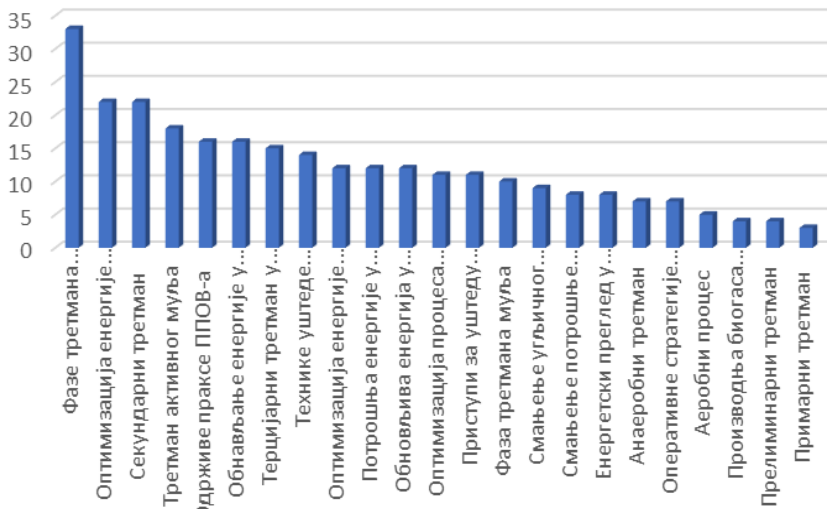
Због тога је кључно пронаћи баланс између обезбјеђивања високог квалитета третмана отпадних вода и смањења енергетске потрошње постројења. Унапрјеђење енергетске ефикасности кроз примјену напредних технологија, оптимизацију процеса и коришћење енергије произведене у самим процесима пречишћавања омогућава смањење трошкова рада и емисија  $\text{CO}_2$ . Такав приступ не само да доприноси еколошкој одрживости, већ и ублажава притисак на животну средину, осигуравајући истовремено ефикасну и поуздану услугу третмана отпадних вода [10].

## 2. Преглед истраживања о енергетској ефикасности у третману отпадних вода

Процјена енергетске ефикасности у третману отпадних вода представља отворену и актуелну истраживачку област која је посљедњих година привукла значајну пажњу научне заједнице. Истраживања се фокусирају на смањење трошкова рада, повећање производње енергије унутар постројења те искориштавање нуспроизвода процеса за добијање материје и енергије. У индустријској пракси спроводе се експерименти и пилот-пројекти који имају за циљ унапрјеђење стратегија управљања енергијом и повећање укупне ефикасности система за пречишћавање отпадних вода. Како би стекли детаљан увид у обрасце потрошње енергије и идентификовали могућности за побољшање, истраживачи примјењују различите методологије процјене и оптимизације енергетске ефикасности [11].



Tsalas и сарадници 2024. [2] спровели су опсежну анализу доступне литературе, укључујући научне радове, техничке извјештаје, поглавља књига и зборнике са конференција, обухвативши укупно 114 релевантних извора објављених у периоду од 2007. до 2023. године. Њихов циљ био је класификовати литературу према кључним темама које се односе на постројења за пречишћавање отпадних вода (ППОВ) и њихову енергетску ефикасност. Систематском категоризацијом идентификоване су најзаступљеније области истраживања: фазе третмана отпадних вода (33 извора), оптимизација енергије аерације у ППОВ (22), секундарни третман (22), третман активног муља (18) и одрживе праксе у ППОВ (16). Такође, значајан број радова посвећен је обнови енергије (16), терцијалном третману (15), техникама уштеде енергије (14) и оптимизацији процеса (11). Остале обрађене теме укључују смањење угљеничног отиска, енергетске прегледе, анаеробни третман и производњу биогаса, што указује на широк спектар приступа усмјерених ка повећању енергетске ефикасности и одрживости у постројењима за пречишћавање отпадних вода (слика 1).



Слика 1. Објављена литература према кључним темама [2]

Figure 1. Published literature by key topics [2]

### 3. Потрошња енергије у ППОВ

Процес пречишћавања отпадних вода обухвата низ поступака којима се уклањају или разграђују загађујуће материје присутне у води, како би се вода довела у стање безбједно за испуштање у природу или поновно коришћење. Овај процес комбинује физичке, хемијске и биолошке методе, које заједно омогућавају уклањање чврстих честица, органских и токсичних материја, патогених микроорганизама, као и вишка хранљивих материја попут азота и фосфора. Свака фаза третмана има специфичну

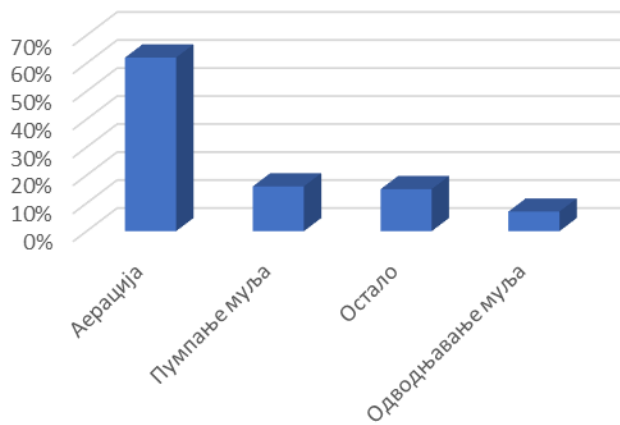


улогу – од механичког уклањања већих нечистоћа, преко хемијских реакција које неутрализују штетне супстанце, до биолошких процеса у којима микроорганизми разграђују преостале органске материје. На тај начин значајно се смањује негативан утицај отпадних вода на животну средину и омогућава очување квалитета водних ресурса.

Постројења за пречишћавање отпадних вода (ППОВ) обично се дијеле на четири фазе третмана: прелиминарни, примарни, секундарни и терцијарни [12, 13, 14]. Прелиминарни третман подразумева уклањање крупних чврстих материја попут грана, комада дрвета, папира, тканина, пластике, метала и стакла, као и пијеска, шљунка, уља и масти. Ефикасан прелиминарни третман штити накнадне фазе процеса, смањује оштећења опреме и одржава хигијенске стандарде у постројењу [15]. Примарни третман фокусира се на уклањање суспендованих органских и неорганских материја процесима таложења и/или флотације. Иако прелиминарни третман уклања веће честице, вода и даље садржи fine суспендоване материје, претежно органске. Примарни третман дјелимично смањује БПК (биолошка потрошња кисеоника) оптерећење, олакшавајући ефикасност секундарног третмана [16]. Секундарни третман примарно користи биолошке методе за разградњу преостале материје, у аеробним или анаеробним условима, уз често уклањање нутријената попут азота и фосфора. Заједно с примарним третманом, значајно смањује БПК и концентрацију суспендованих материја. Терцијарни третман примјењује се када је потребно додатно уклањање специфичних или тешко разградивих загађивача. Иако мање заступљен у земљама у развоју, ова фаза омогућава постизање стандарда квалитета за испуштање или поновну употребу воде. Поред обраде воде, многи ППОВ имају и линију за обраду муља, као пету фазу, која се користи за смањење запремине муља, стабилизацију и евентуалну производњу енергије [17].

Електрична енергија, примарно кроз електромоторне погонске системе, користи се у свим фазама третмана за погон кључне опреме – компресора, пумпних станица, мијешалица, вентилатора, преса и друге механичке опреме. Такође, електрична енергија омогућава освјетљавање и гријање техничких и административних објеката, као и производњу топлоте за дигесторе и сушење муља. Укупна потрошња енергије у ППОВ зависи од низа фактора. То укључује количину и квалитет отпадне воде, концентрацију отпадне воде загађујућим материјама, одабрани ниво третмана, циљне стандарде квалитета и тип постројења (централизовано или децентрализовано). Додатно, енергетске потребе повећавају обим система, врста колектора (одвојени или комбиновани), потреба за радом пумпи и локални климатски услови. Енергија се такође користи за кондиционирање и стабилизацију муља кроз анаеробну дигестију, компостирање или спаљивање, што доприноси смањењу запремине, неутрализацији патогена и, у неким случајевима, производњи корисне енергије [18, 19].

Специфична потрошња енергије се најчешће изражава у киловат-сатима по кубном метру третиране воде ( $\text{kWh/m}^3$ ), што омогућава поређење енергетских захтјева различитих технологија без обзира на капацитет постројења [20]. Овај индикатор је посебно користан у оптимизацији рада постројења и праћењу побољшања енергетске ефикасности током времена.



Слика 2. Потрошња енергије [2]

Figure 2. Energy consumption [2]

Потрошња енергије у постројењима за пречишћавање отпадних вода значајно зависи од типа примјењеног процеса. Најнижу потрошњу имају лагуне, гдје се енергија користи углавном за повремено мијешање или рад пумпи, и износи до  $0,1 \text{ kWh/m}^3$ . Триклинг филтери троше око  $0,15 \text{ kWh/m}^3$ , док напредни третмани који укључују уклањање нутријената, дезинфекцију и сличне процесе захтијевају око  $0,25\text{--}0,3 \text{ kWh/m}^3$ .

Конвенционални аерацијски третман (Activated Sludge Process ASP) троши приближно  $0,45 \text{ kWh/m}^3$ , а када се исти комбинује с анаеробном дигестијом муља, потрошња прелази  $0,5 \text{ kWh/m}^3$ . Јасно је да са сложености процеса расте и енергетска потрошња, при чему ASP и посебно ASP с анаеробном дигестијом спадају у енергетски најзахтјевније опције. Код ASP процеса највећи удио потрошње отпада на аерацију, што га чини кључном тачком за оптимизацију и смањење укупне енергетске потрошње (слика 2) [2].

Просјечна потрошња енергије за третман отпадних вода варира широм свијета: САД -  $0,52 \text{ kWh/m}^3$ , Кина -  $0,31 \text{ kWh/m}^3$ , Јапан -  $0,304 \text{ kWh/m}^3$ , Кореја -  $0,243 \text{ kWh/m}^3$  и Европа -  $0,42$  до  $0,53 \text{ kWh/m}^3$  [2,21].

#### 4. Потенцијали оптимизације енергетске ефикасности у ППОВ

С обзиром на значајан удио енергије који постројења за пречишћавање отпадних вода троше током различитих фаза третмана, као и на разлике у потрошњи међу примјењеним технологијама и типовима процеса, јасно је да постоји велики простор за оптимизацију. Анализа потрошње енергије пружа основу за идентификацију кључних тачака у процесу које утичу на укупну ефикасност, попут аерације, рада пумпи и третмана муља. Ова сазнања омогућавају примјену стратегија и технологија



које не само да смањују енергетске захтјеве, већ и користе присутне ресурсе унутар постројења, чиме се постиже већа самоодрживост и смањује негативан утицај на животну средину.

Оптимизација енергетске ефикасности у постројењима за пречишћавање отпадних вода може се постићи комбинацијом поврата енергије из самог процеса третмана и примјеном технологија које омогућавају значајне уштеде енергије [22]. За разлику од постројења за пречишћавање питке воде, постројења за пречишћавање отпадних вода располажу ширим спектром могућности за производњу енергије, првенствено захваљујући присуству органске материје у дотоку, која се може искористити за производњу биогаса путем анаеробне дигестије. На тај начин, ова постројења имају потенцијал да се трансформишу у самоодржива постројења, гдје не само да се отпадне воде пречишћавају, већ се нуспроизводи третмана, попут муља, биогаса или топлоте, поново користе. Трансформацијом постројења у енергетски самоодржива може се побољшати његова профитабилност, смањити емисија гасова стаклене баште, повећати енергетска и водна сигурност, побољшати заштита јавног здравља и животне средине [23]. Такође, постројења за пречишћавање отпадних вода могу бити важан дио циркуларне економије захваљујући интеграцији производње енергије и опоравка ресурса током производње чисте воде [24]. Оваквим приступом смањује се количина отпада који се одлаже, док се преостали материјали претварају у сировину за нове производне процесе, чиме се затвара циклус материјала и енергије [25].

Научници и истраживачи су вршили различита истраживања, развијали методологије и сценарија кроз које би постројење за пречишћавање отпадних вода могло постићи енергетски неутралан или позитиван статус.

Gikas 2016. [26] предлаже енергетски ефикасан процес третмана отпадне воде који се заснива на комбинацији физичко-хемијских метода, с циљем уклањања што већег дијела укупних суспендованих чврстих материја прије укључивања биолошких третмана. Овакав приступ, уз ефикасно одводњавање биочврстих материја и примјену биофилтрације с ниским енергетским захтјевима, значајно смањује потрошњу енергије у поређењу са конвенционалним процесом третмана активним муљем и то до 85%. Поред уштеде енергије, разматра и производњу енергије кроз анаеробну дигестију или гасификацију прикупљених биочврстих материја, чиме је могуће остварити нето производњу од приближно 0,172 kWh/m<sup>3</sup> електричне енергије. На овај начин, процес не само да смањује оперативне трошкове, већ доприноси и одрживости, претварајући отпадне материјале у вриједан енергетски ресурс.

Avilés и сарадници 2019. [27] развили су методологију за контролу енергије у постројењима за пречишћавање отпадних вода, засновану на три међусобно повезане фазе: процес, инсталацију и систем управљања. Прва фаза, која се односи на процес, подразумијева идентификацију кључних технолошких параметара који највише утичу на потрошњу енергије, попут потребе за кисеоником у биолошком третману или интензитета рецикулације муља. Друга фаза, инсталација, фокусира се на техничке карактеристике и ефикасност опреме, при чему се предлаже оптимизација рада пумпи, компресора, аерационих система и других потрошача енергије. Трећа фаза, систем управљања, укључује имплементацију аутоматизованог надзора и контроле одабраних



процесних промјенљивих у реалном времену, прилагођених специфичним потребама постројења. Примјеном овог интегрисаног приступа могуће је постићи смањење укупне потрошње енергије инсталације у првој фази за више од 15%, првенствено кроз оптимизацију дотока кисеоника и смањење односа рецикулације, без нарушавања квалитета третмана отпадне воде.

Sarpong и сарадници 2020. [28] истичу да први корак ка побољшању енергетске ефикасности постројења за пречишћавање отпадних вода (ППОВ) подразумева замјену застарјеле опреме високоефикасним уређајима. У њиховој студији показано је да већа ефикасност примарног третмана смањује потребу за оксидацијом, што доводи до мање потрошње енергије, али и веће производње исте. Будући да аерација представља највећег потрошача енергије у ППОВ, значајне уштеде могуће је постићи повећањем њене ефикасности – нпр. замјеном постојећих аерационих система технологијама с мањим енергетским захтјевима, попут триклинг филтера. Додатно, предложена кодигестије уз додатак високо биоразградивог отпада, чиме се повећава производња биогаса. Koch и сарадници 2016. [29] процјењују да би извођењем кодигестије са 10% отпадне хране и замјеном застарјелих когенерацијских јединица производња енергије могла порастати са 25% на чак 78%.

Yang и сарадници 2020. [30] су, истражујући корелацију између унутрашње енергије отпадних вода, потрошње енергије и потенцијала за поврат енергије на постројењима за пречишћавање отпадних вода, развили модел нето потрошње енергије (NEC– net energy consumption) за предвиђање нивоа енергетске самоодрживости постројења. Студија је заснована на анализи података са 347 постројења у Кини, а као мјере за производњу енергије разматрани су спаљивање муља, фотонапонска технологија и примјена топлотних пумпи.

Фотонапонска производња енергије могла би задовољити од 12,2% до 19,3% укупне потражње за енергијом, док је степен енергетске самоодрживости за топлотну енергију износио од 35,2% до 253,5%. Постројења која карактеришу већи протоци и мања концентрација ХПК (хемијска потрошња кисеоника) имају мању потрошњу енергије и већи потенцијал за постизање енергетске самоодрживости. Према NEC моделу, постројења у Кини могу постићи енергетску самоодрживост, јер ХПК на њима износи између 200 и 400 mg/l, а проток отпадне воде прелази 55 450 m<sup>3</sup>/дан.

Maslo и сарадници 2020. [31] наглашавају значај коришћења свих доступних извора енергије у постројењима за пречишћавање отпадних вода ради смањења укупне потрошње енергије из вањских извора. Један од најважнијих таквих ресурса је муљ из отпадних вода, који се може искористити за производњу биогаса путем анаеробне дигестије. Биогас, чији главни састојци су метан (CH<sub>4</sub>) и угљен-диоксид (CO<sub>2</sub>), може се користити за производњу топлотне и електричне енергије унутар самог постројења, чиме се значајно смањују оперативни трошкови и емисије стакленичких гасова.

Овакав приступ не само да доприноси енергетској самоодрживости, већ омогућава и смањење количине отпада који се мора одлагати, јер се током процеса дигестије запремина и маса муља знатно смањују. Поред анаеробне дигестије, разни истраживачи истичу и могућности допуњавања овог процеса кодигестијом са другим



органичним отпадом (нпр. отпадном храном), чиме се повећава принос биогаза и додатно побољшава енергетска биланса постројења.

## 5. Закључак

Постројења за пречишћавање отпадних вода представљају кључну компоненту заштите животне средине, али истовремено захтијевају значајну потрошњу енергије, нарочито код сложенијих процеса попут аерације и анаеробне дигестије муља. Анализа потрошње енергије у различитим фазама третмана показује да оптимизација и примјена енергетски ефикасних технологија имају кључну улогу у смањењу оперативних трошкова и емисија стакленичких гасова, без нарушавања квалитета третиране воде.

Трансформацијом постројења у енергетски самоодрживе системе, укључујући поврат енергије из муља, анаеробну дигестију, кодигестију и примјену обновљивих извора енергије, могуће је смањити укупну потрошњу енергије и повећати енергетску и еколошку одрживост. Такав приступ омогућава постројењима да постану активни учесници у циркуларној економији, претварајући нуспроизоде третмана у вриједне ресурсе, чиме се постиже баланс између високог квалитета третмана и минималне енергетске потрошње.

## 6. Литература

- [1] Алексић Н, Шуштершић В, Ракић Н, Гордић Д, Потрошња енергије и примена обновљивих извора енергије у постројењима за третман отпадних вода; *Енергија, економија, екологија*, год. XXIV, бр.3. 2022.
- [2] Tsalas N, Spyridon K, Golfinopoulos S. K, Samios S, Katsouras G, Peroulis K, Optimization of energy consumption in a wastewater treatment plant: An overview; *Energies* 2024, 17, 2808, 2024.
- [3] Ђукић А, Предлог нове директиве Европске Уније о пречишћавању градских отпадних вода. *Грађевински календар* 2022 54. 2022.
- [4] Hamawand I, Energy Consumption in Water/Wastewater Treatment Industry—Optimisation Potentials, *Energies* 2023, 16, 2433. 2023.
- [5] Hernández-Sancho F, Molinos-Senante M, Sala-Garrido R, Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: A non-radial DEA approach, *Science of the Total Environment*, 409(14), 2693-2699. 2011.
- [6] Di Fraia S, Massarotti N, Vanoli L, A novel energy assessment of urban wastewater treatment plants, *Energy Conversion and Management*, 163, 304-313. 2018.
- [7] Hao X, Liu R, Huang X, Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China, *Water Research*, 87, 424-431. 2015
- [8] Wang H, Yang Y, Keller A. A, Li X, Feng S., Dong Y, et al, Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany China and South Africa. *Appl Energy* 2016;184:873–81. 2016.
- [9] Vaccari M, Foladori P, Nembrini S, Vitali F, Benchmarking of energy consumption in municipal wastewater treatment plants—a survey of over 200 plants in Italy, *Water Science and Technology*, 77(9), 2242-2252, 2018.



- [10] Cardoso B. J, Rodrigues E, Gaspar A. R, Gomes, Á, Energy performance factors in wastewater treatment plants: A review, *Journal of Cleaner Production*, 322, 129107. 2021.
- [11] Lia Z, Lub J, Luc J, Energy efficiency evaluation and optimization for wastewater treatment plant, *Desalination and Water Treatment* 319, 100487, 2024.
- [12] Sonune A, Ghate R, Developments in wastewater treatment methods, *Desalination*, 167, 55-63, 2004.
- [13] Gaonkar G. V, A Review on Wastewater Treatment Techniques. *J. Emerg. Technol. Innov. Res.* 6, 102–109, 2019.
- [14] Silva J. A, Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature Review, *Sustainability*, 15, 10940, 2023.
- [15] Moore L. W, *Preliminary Wastewater Treatment*. доступно: [https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-10/tawebinar\\_preliminarywastewatertreatment\\_230725.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-10/tawebinar_preliminarywastewatertreatment_230725.pdf), 2023.
- [16] Partners G, Macero E, Guyer J. P, *An Introduction to Preliminary Wastewater Treatment*; Continuing Education and Development Inc.: New York, NY, USA, 2011.
- [17] Crini G, Lichtfouse E, Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment, *Environmental Chemistry Letters* 17:145–155, 2019.
- [18] Liu, Y. J, Gu, J, Liu Y, Energy Self-Sufficient Biological Municipal Wastewater Reclamation: Present Status, Challenges and Solutions Forward, *Bioresour. Technol.* 2018, 269, 513–519. 2018.
- [19] Masłoń A, Czarnota J, Szaja A, Szulżyk-Cieplak J, Łagód G, The enhancement of energy efficiency in a wastewater treatment plant through sustainable biogas use: Case study from Poland, *Energies*, 13(22), 6056, 2020.
- [20] Blagojević J, Jovović A, Midžić-Kurtagić S, Overview and analysis of electric energy consumption indicators in wastewater treatment plants, *Thermal science: Year 2025*, Vol. 29, No. 3B, pp. 1-12, 2025.
- [21] Tang J, Zhang C, Shi X, Sun J, Cunningham J. A, Municipal Wastewater Treatment Plants Coupled with Electrochemical, Biological and Bio-Electrochemical Technologies: Opportunities and Challenge toward Energy Self-Sufficiency, *J. Environ. Manag.* 234, 396–403, 2019.
- [22] Gu Y, Li Y, Li X, Luo P, Wanga H, Robinson Z. P, Wang X, Wu J, Li F, The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants, *Applied Energy* 204, p.p. 1463 – 1475, 2017.
- [23] Soares R. B, Memelli M. S, Roque R. P, Gonçalves R. F, Comparative analysis of the energy consumption of different wastewater treatment plants, *International Journal of Architecture, Arts and Applications*, 3(6), 79-86, 2017.
- [24] Neczaj E, Grosser A, Circular economy in wastewater treatment plant—challenges and barriers, *In Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, Vol. 2, No. 11, p. 614. 2018.
- [25] Орашанин Г, Мариновић Б, Water supply systems and circular economy, In 45. Међународна конференција "Водовод и канализација '24", зборник радова, Организациони и економски аспекти јавних комуналних предузећа водовода и канализације пп. 71-78, 2024.
- [26] Gikas P, Towards energy positive wastewater treatment plants, *Journal of Environmental Management*, Volume 203, Part 2, p.p. 621 – 629, 2016,
- [27] Avilés A. B. L, del Cerro Velázquez F, del Riquelme M. L. P, *Methodology for Energy Optimization in Wastewater Treatment Plants*. Phase I: Control of the Best Operating Conditions, *Sustainability* 2019, 11, 3919, 2019.
- [28] Sarpong G, Gude V. G, Magbanua B .S, Truax D. D, Evaluation of energy recovery potential in wastewater treatment based on codigestion and combined heat and power schemes, *Energy Conversion and Management*, Volume 222, 113147, 2020.



- [29] Koch K, Plabst M, Schmidt A, Helmreich B, Drewes J. E, Co-digestion of food waste in a municipal wastewater treatment plant: comparison of batch tests and full-scale experiences, *Waste Management*, 47, 28-33, 2016.
- [30] Yang X, Wei J, Ye G, Zhao Y, Li Z, Qiu G, Li F, Wei C, The correlations among wastewater internal energy, energy consumption and energy recovery/production potentials in wastewater treatment plant: An assessment of the energy balance, *Science of The Total Environment*, Volume 714, 136655, 2020.
- [31] Masło A, Czarnota J, Szaja A, Szulzyk-Cieplak J, Łagód G, The Enhancement of Energy Efficiency in a Wastewater Treatment Plant through Sustainable Biogas Use: Case Study from Poland, *Energies*, 13, 6056, 2020,