

Potrošnja energije i primena obnovljivih izvora energije u postrojenjima za tretman otpadnih voda

Energy Consumption and Application of Renewable Energy Sources in a Wastewater Treatment Plants

Natalija Aleksić, Vanja Šušteršič, Nikola Rakić, Dušan Gordić

Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu

Rezime - Postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda doprinose uklanjanju zagađivača iz otpadne vode u skladu sa normama i propisima o kvalitetu otpadne vode na izlasku iz postrojenja i samim tim su neizostavni deo u tretmanu otpadnih voda i zaštite vodne sredine. U svakoj fazi tretmana otpadnih voda troši se značajna količina energije. Potreba da se zadovolji brzi rast populacije i strožiji uslovi u pogledu zahteva za kvalitetom efluenta dovela je do povećanja potrošnje energije u postrojenjima za tretman otpadnih voda. Potrošnja energije predstavlja usko grlo u postrojenjima za tretman otpadnih voda, a kako se broj ovih postrojenja širom sveta povećava, pitanje smanjenja potrošnje energije i energetske efikasnosti počinju da privlače pažnju. Takođe, sve ovo doprinosi povećanju troškova u postrojenjima za tretman otpadnih voda. Na potrošnju energije u postrojenjima za tretman otpadnih voda utiče mnogo faktora. Analiza i predviđanje potrošnje energije su ključni faktori za uštedu energije. Međutim, informacije o potrošnji energije i potencijali za obnovu/proizvodnju energije i postizanje energetske efikasnosti u postrojenjima za tretman otpadnih voda su i dalje veoma ograničene. Ovaj rad se bavi pregledom literature i analizira potrošnju energije u ovim postrojenjima kao i mogućnostima povećanja energetske efikasnosti ovih postrojenja kroz upotrebu obnovljivih izvora energije i kroz povrat energije iz samog postrojenja.

Ključne reči - postrojenje za tretman otpadne vode, potrošnja energije, obnovljivi izvori energije, energetska efikasnost

Abstract - Wastewater treatment plants contribute to the removal of pollutants from wastewater following the norms and regulations on the quality of the wastewater and therefore are an indispensable part of wastewater treatment and environmental protection. Each stage of wastewater treatment consumes a significant amount of energy. The need to meet rapid population growth and stricter conditions in terms of effluent quality requirements has led to an increase in energy consumption in wastewater treatment plants. Energy consumption is a bottleneck in wastewater treatment plants and, as the number of these plants in the world increases, the issues of reducing energy consumption and energy efficiency are beginning to attract attention. It also contributes to the cost increase in wastewater treatment plants. Analysis and prediction of energy consumption

are key factors for energy savings. Energy consumption in wastewater treatment plants is affected by many factors. However, information on energy consumption and potential for energy recovery/production and energy efficiency in wastewater treatment plants remains very limited. This paper reviews the literature and analyzes the energy consumption in these plants and the possibility of increasing the energy efficiency of these plants through the use of renewable energy sources and energy recovery from the plant itself.

Index Terms - Wastewater treatment plant, Energy consumption, Renewable energy sources, Energy efficiency

I UVOD

Postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda (PPOV) omogućavaju uklanjanje zagađivača iz otpadne vode u skladu sa normama i propisima o kvalitetu otpadne vode na izlasku iz postrojenja. Samim tim PPOV su neizostavni deo u tretmanu otpadnih voda i zaštite vodne sredine. Međutim, i ako doprinose značajnoj zaštiti vodne sredine, rad ovih postrojenja je povezan sa značajnom potrošnjom energije. Sakupljanje, tretman i ispuštanje otpadnih voda su procesi koji su značajni potrošači energije, a procene sugerišu da se više od 2% svetske električne energije koristi za vodosnabdevanje i prečišćavanje otpadnih voda [1]. Procenjuje se da se u PPOV troši 1% ukupne nacionalne potrošnje električne energije u evropskim zemljama [2]. Step en efikasnosti uklanjanja zagađenja prisutnih u otpadnim vodama, utiče na izbor tehnologije i broj uređaja koji će se koristiti u PPOV, a samim tim dovodi i do povećanja potrošnje energije u pojedinačnim procesima. Većina uređaja za prečišćavanje otpadnih voda je projektovana tako da zadovolji određene zahteve, bez dovoljnog razmatranja potrošnje energije. Potrebna energija dobija se uglavnom iz neobnovljivih izvora energije, a njena proizvodnja dovodi do emisije zagađujućih materija u vazduh i degradacije životne sredine. Istraživanja pokazuju da oko 80% emisije gasova staklene bašte povezanih sa radom PPOV potiče od sagorevanja fosilnih goriva u procesu proizvodnje električne energije [3].

Odnos između tretmana otpadnih voda i potrošnje energije u PPOV je složen i neizvestan. U naučnoj literaturi postoji veliki broj studija koje se bave analizom i utvrđivanjem korelacija

između tretmana otpadnih voda i potrošnje energije u PPOV, kao i veliki broj studija koje su sprovedene s ciljem dobijanja informacija o potrošnji energije i merama za postizanje uštede energije. Podaci iz studija o ukupnoj potrošnji, kao i specifičnoj potrošnji energije u pojedinim procesima tretmana otpadnih voda pokazuju značajne varijacije. U pojedinim radovima, autori su dali indikatore potrošnje električne energije koji su povezani sa količinom prečišćene otpadne vode ili uklonjenim zagađujućim materijama, na osnovu merenja ukupne potrošnje u PPOV. Međutim, bez poznavanja informacija o potrošnji energije pojedinačnih uređaja nije moguće izvršiti modernizaciju PPOV u cilju smanjenja potrošnje energije. Analiza potrošnje energije u PPOV je izuzetno važna, jer može da doprinese poboljšanju ekonomskih i ekoloških dobiti ovih postrojenja u zemljama širom sveta [4]. Sve veći značaj ekoloških standarda i širenje njihovih uticaja doprinosi stvaranju potreba za uvođenje sistemskih alata za projektovanje novih PPOV [5]. Danas je optimizacija energetske efikasnosti u PPOV prilično popularna tema u naučnoj zajednici [6]. U cilju poboljšanja energetske efikasnosti potrebno je poznavati tačne energetske potrebe pojedinačnih procesa. Veći troškovi proizvodnje energije, kao i zabrinutost usled globalnih klimatskih promena naglašavaju potrebu da se u PPOV ostvari energetska efikasnost i održivost. Rezultati već sprovedenih energetskih pregleda pokazuju da, uprkos kapacitetu, svako PPOV ima potencijal za uštedu energije. Te uštede mogu da se kreću od 20 do 40% [7], a u nekim specifičnim slučajevima i više (postoje primeri gde je postignuto i 75%) [8]. Xu i dr. [9] su analizirali različite scenarije o zadovoljenju potreba za energijom u PPOV u Kini. Studija je pokazala da električna energija proizvedena tehnologijom sa samo jednim obnovljivim izvorom energije (OIE) možda neće zadovoljiti potrebe za električnom energijom za prečišćavanje otpadnih voda i da je teško dostići energetska bilans. Ako bi se, na primer, uzela u obzir korisna toplota i sunčeva energija, rešenje bi bilo energetski pozitivno.

Upoređivanje potrošnje energije može da pomogne u identifikaciji potencijala za uštedu energije kao i u određivanju prioriteta prilikom odabira opcije za optimizaciju postrojenja. Trenutno, univerzalno upoređivanje energetske potrošnje i energetskih performansi u PPOV još uvek ne postoji na međunarodnom nivou [10], a postojeće studije su ograničene i podeljene na studije koje su sprovedene na osnovu nacionalnih/regionalnih istraživanja [11]. Međunarodno iskustvo je pokazalo da se samo kroz detaljnu energetska reviziju u PPOV, može u potpunosti sagledati količina energije potrebna za rad ovih postrojenja [12].

Ovaj rad ima za cilj da pruži analizu i pregled dostupnih literaturnih radova na temu potrošnje energije u PPOV i mogućnosti povećanja energetske efikasnosti ovih postrojenja povratom energije iz ovih postrojenja i primenom OIE. Iako se ulaže mnogo napora da se razviju neke nove konfiguracije procesa sa niskom potražnjom za energijom [13], pa čak i povratom energije u PPOV, i dalje postoji niz prepreka među kojima su preveliki investicioni troškovi, posebno u zemljama u razvoju.

II ANALIZA POTROŠNJE ENERGIJE U PPOV

Broj PPOV u svetu i njihov kapacitet

U svetu se generiše oko 380 milijardi m^3 otpadnih voda [14]. Među regionima u svetu, najveću količinu otpadnih voda generišu Azija (159 milijardi m^3 , 42% globalne količine), Severna Amerika (67 milijardi m^3) i Evropa (68 milijardi m^3) [15]. Očekuje se da će količina generisane otpadne vode dostići 574 milijarde m^3 (povećanje od 51% u odnosu na sadašnji nivo) 2050. godine [16].

Da bi se razmatrale mogućnosti povećanja energetske efikasnosti i energetske samoodrživosti u PPOV, od suštinskog je značaja uzeti u obzir broj ovih postrojenja.

U Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) postoji više od 16000 sistema za tretman otpadnih voda u javnom vlasništvu različitih veličina, a oko 20% stanovništva se oslanja na sisteme tretmana otpadnih voda na licu mesta (septičke jame, decentralizovani sistemi i dr.), [17]. U PPOV svih kapaciteta sistemi rade u proseku sa oko 81% svog projektovanog kapaciteta, dok je u oko 15% PPOV projektovani kapacitet postignut ili čak nadmašen [17]. Veličina PPOV varira u zavisnosti od broja priključenih stanovnika na sistem tretmana otpadnih voda, i u tabeli 1 prikazana je podela i broj PPOV u SAD-u u 2017. godini prema kapacitetu prečišćavanja.

Tabela 1. Broj PPOV i kapacitet prerade otpadnih voda širom SAD u 2017. godini [18]

Kapacitet prečišćavanja (m^3 /dan)	Broj PPOV	Ukupni kapacitet PPOV (m^3 /dan; %)
189 – 379	2766	760867 (0,6%)
379 – 37854	9144	42464749 (33,4%)
37854 – 189270	443	33830225 (26,6%)
189270 – 378541	60	16769374 (13,2%)
> 378541	39	33277554 (26,2%)

Studija [18] iz 2017. godine daje broj PPOV i njihovu podelu prema kapacitetu prečišćavanja za 12452 opštinskih PPOV u Sjedinjenim Američkim Državama. Sprovedena studija ukazuje da 73% od ukupnog broja PPOV ima kapacitet od 379 – 37854 m^3 /danu (33,4% ukupnog protoka vode), zatim slede PPOV od 37854 – 189270 m^3 /danu (26,6% ukupnog protoka vode), > 378541 m^3 /danu (26,2% ukupnog protoka vode), 189270 – 378541 m^3 /danu (13,2% ukupnog protoka vode), i 189 - 379 m^3 /danu (0,6% ukupnog protoka vode).

Evropska agencija za zaštitu životne sredine (EEA) objavila je kompletnu bazu podataka o postojećim PPOV u Evropi, podeljenu po zemljama [19]. U izveštaju se nalazi ukupno 28277 postrojenja sa opterećenjem jednakim ili većim od 2000 ekvivalentnih stanovnika (ES) i ukupnog kapaciteta od oko 569 miliona ES [19]. Baza podataka sadrži informacije o veličini PPOV (ES), unosu opterećenja, kapacitetu, kao i informacije o distribuciji i nivou tretmana svakog pojedinačnog PPOV. U navedenoj bazi podaci nisu dostupni za veliki broj postrojenja. Zbog toga su u nastavku rada analizirana PPOV u EU iz baze podataka koja sadrže podatke o: lokaciji (zemlja EU), ulaznom opterećenju (ES) i kapacitetu (ES) PPOV.

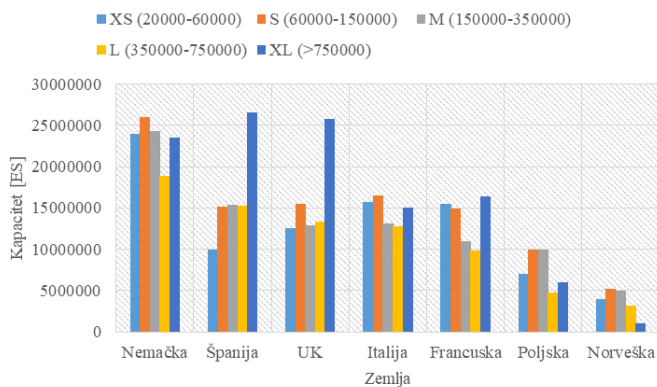
Tabela 2 prikazuje rezultate grupisane po veličini PPOV u EU. Postrojenja male veličine (manje od 50000 ES) predstavljaju skoro 90 % od ukupnog broja postrojenja, ali prerađuju samo

31% ukupnog kapaciteta (ES), dok se za njihov rad utroši 42% električne energije od ukupne potrošnje energije koja se raspoređuje za rad ovih postrojenja [20]. Srednja do veoma velika postrojenja, koja čine samo 10%, prerađuju oko 70% ES sa 58% ukupne potrošnje električne energije [20]. Velika postrojenja (više od 100000 ES) su obično energetski efikasnija u odnosu na postrojenja manje veličine [2].

Tabela 2. Podela PPOV u Evropi prema veličini postrojenja, broju ES priključenih na PPOV i broju postrojenja [19]

Veličina postrojenja	Broj ES priključenih na PPOV	Broj PPOV
2000 < ES ≤ 10000	51827664	11046
10000 < ES ≤ 50000	130862477	5824
50000 < ES ≤ 100000	83228712	1180
100000 < ES ≤ 500000	174421062	899
500000 > ES	128847853	125
Ukupno	569187768	19074

Slika 1 prikazuje podelu PPOV u zavisnosti od ES u 7 evropskih zemalja [21].



Slika 1. Kapacitet PPOV u zavisnosti od veličine postrojenja za 7 evropskih zemalja [21]

Podaci o broju PPOV u Aziji nisu trenutno dostupni, pa je u ovom radu razmatran broj PPOV samo za Kinu. U Kini je sistem za prečišćavanje otpadnih voda doživio značajan razvoj u poslednjih 10 godina. Krajem 2019. godine u Kini je broj postrojenja za tretman otpadnih voda iznosio 5333. U Kini su najzastupljeniji na prvom mestu srednji sistemi za tretman otpadnih voda, zatim mali, pa na kraju najveći. Krajem 2018. godine u Kini je registrovano: 1400 malih PPOV (27,9% od ukupnog broja), 3297 srednjih PPOV (65% od ukupnog broja) i 636 velikih PPOV (7,1%) [22]. U 2018. godini kapacitet malih postrojenja je iznosio $3,91 \times 10^6 \text{ m}^3$ dnevno, srednjih $117,08 \times 10^6 \text{ m}^3$ dnevno, a velikih $7,39 \times 10^6 \text{ m}^3$ dnevno [22], tabela 3.

Tabela 3. Distribucija PPOV u Kini [22, 23]

Kapacitet prečišćavanja (m^3/dan)	Broj PPOV	Ukupni kapacitet PPOV (m^3/dan)
< 10000	1400	$3,91 \times 10^6$
10000 – 100000	3297	$117,08 \times 10^6$
> 100000	636	$7,39 \times 10^6$

Potrošnja energije u PPOV u zavisnosti od lokacije

Iako je udeo ukupne potrošnje energije ovih postrojenja u ukupnoj nacionalnoj upotrebi energije relativno mali, potrošnja energije u PPOV privlači sve veću pažnju iz razloga što se njihov broj stalno povećava. Trenutno, ova postrojenja u SAD-u troše približno 4% ukupne električne energije proizvedene u SAD-u. Još jedna studija [25] otkrila je da sam sektor za prečišćavanje otpadnih voda troši približno 21000 GWh godišnje, što je ekvivalentno potrošnji energije u 1,8 miliona tipičnih domaćinstava.

PPOV su jedna od najskupljih javnih industrija u pogledu energetskih potreba i čine više od 1% potrošnje električne energije u Evropi [26]. Okvirna direktiva o vodama EU uvela je obavezu prečišćavanja otpadnih voda za gradove i naselja [27]. Autori [20] su u svojoj studiji procenili da je ukupna potrošnja energije PPOV u Evropi bila oko 24747 GWh godišnje, što je otprilike iznosilo oko 0,8% proizvodnje električne energije u EU-28 u 2015. godini. Prema [28] procenjeno je da je ukupna potrošnja energije u PPOV u Evropi 15021 GWh godišnje. Iako je većina ciljeva Okvirne direktive o vodama u vezi sa zaštitom voda postignuta, veliki broj starih postrojenja pokazuje neodrživu potrošnju energije i mora biti maksimalno optimizovana i renovirana u skladu sa tim. Međutim, u Evropi ne postoje zakoni, norme ili standardi koje treba poštovati, i kao posledica toga, ogromna prilika za smanjenje javnih troškova električne energije ostaje neregulirana.

Tabela 4. Prosečna potrošnja energije u različitim regionima [29]

Region	Broj zemalja	Broj kompanija	Prosečna potrošnja energije (kWh/m^3)
EU zemlje čiji je standard tretmana u skladu sa Direktivom o tretiranju otpadnih voda	12	112	1,18
Zemlje koje usklađuju postojeće zakone i propise s Direktivom o tretiranju otpadnih voda	3	31	0,62
Rusija i bivše države Sovjetskog Saveza	5	126	0,82
Razvijena Okeanija	2	43	0,65
Okeanija u razvoju	5	5	0,64
Centralna i Južna Amerika	1	1	0,64
Severna Amerika	2	2	0,57
Podsaharska Afrika	1	1	0,58

Tabela 4 prikazuje prosečnu potrošnju energije u različitim regionima sveta. Može se primetiti da su kompanije iz EU imale najveću prosečnu potrošnju energije od $1,18 \text{ kWh}/\text{m}^3$, dok su svi ostali regionima imali znatno niži prosek koji se kretao u rasponu od $0,58$ do $0,64 \text{ kWh}/\text{m}^3$, sem Rusije i bivših država Sovjetskog Saveza gde je ona iznosila $0,82 \text{ kWh}/\text{m}^3$ [29].

U poređenju sa razvijenim zemljama potrošnja energije u PPOV u Kini je manja, što je povezano sa uticajem različitih faktora,

kao što su standard ispuštanja, tehnologija tretmana, tretman mulja i ponovna upotreba iskorišćene vode [9].

Životni standard, ekonomski nivo, klimatski uslovi i mnogi drugi faktori razlikuju se između zemalja i imaju određeni uticaj na generisanje otpadnih voda, a ujedno i na potrošnju energije u PPOV. Npr. ekonomski nivo može da utiče na izbor načina tretmana otpadnih voda i opreme koja će da se koristi u PPOV, dok životne navike lokalnog stanovništva u velikoj meri određuju karakteristike otpadnih voda [30]. Zbog toga je neophodno mapirati geografsku distribuciju potrošnje energije u PPOV širom sveta, tabela 5.

Tabela 5. Distribucija potrošnje energije u PPOV na nacionalnom nivou u različitim zemljama

Zemlja	Potrošnja energije (kWh/m ³)	Udeo potrošnje energije na nacionalnom nivou (%)	Referenca
SAD	0,52	0,6	[24]
Kina	0,31	0,25	[24]
Nemačka	0,40 – 0,43; 0,67	0,7	[24, 30]
Južna Afrika	0,079 – 0,41	-	[24, 30]
Japan	0,304 – 0,45	-	[24]
Koreja	0,243	0,5	[24]
Švedska	0,42	1	[24]
Izrael	-	10	[24]
Austrija	0,3	-	[30]
Iran	0,3	-	[30]
Norveška	0,36	-	[30]
Australija	0,39	0,4	[30, 31]
Kanda	0,41	-	[30]
Švajcarska	0,52	-	[30]
Španija	0,53	-	[30]
Singapur	0,55	-	[30]
Ujedinjeno Kraljevstvo (UK)	0,63	-	[30]
Francuska	0,68	-	[30]
Danska	1,22	1-2	[32, 33]
Poljska	0,45 – 1,29	-	[34]

Potrošnja energije u PPOV u zavisnosti od veličine postrojenja

Veličina PPOV takođe ima značajan uticaj na potrošnju energije. Varijacije u potrošnji električne energije (sortirane prema broju priključenih ES) prikazane su za različite zemlje (Austrija – A, Belgija – B, Švajcarska – Š, Nemačka – NE, Danska – D, Norveška – NO) u tabeli 6 [35].

Iz tabele 6. se može zaključiti da potrošnja električne energije opada sa povećanjem veličine postrojenja, što svakako treba uzeti sa rezervom, obzirom da u studijama nisu analizirane efikasnost mreže, pumpna postrojenja, glavni kolektori pre PPOV, kao ni šta se dešava nakon PPOV. Takođe, potrošnja energije se povećava ako su zahtevi za kvalitetom prečišćene vode strožiji. Neke studije [36, 37] su potvrdile da je postizanje energetske efikasnosti i održivosti jednostavnije postići u postrojenjima velike i srednje veličine, a da je neophodno sprovesti dublje diskusije kada su u pitanju postrojenja malih veličina, [38]. Savremeni koncept u svetu je da se polako prelazi na decentralizovane sisteme tretmana otpadnih voda, u odnosu na robusne i energetske veoma zahtevne centralizovane sisteme PPOV.

Tabela 6. Specifična potrošnja električne energije [35]

Veličina PPOV (ES)	A	B	Š	NE	D	NO
	(kWh/ES)					
< 1000	69	130,5	67	75	-	-
1000 – 2000	53	123,8	45	55	-	-
2000 – 5000	53	99,6	45	55	-	-
5000 – 10000	45	81,4	45	44	60,4	48,7
10000 – 50000	37	63,5	34	35	60	48,2
50000 – 100000	37	48,3	32	35	42,6	38,3
> 100000	32	56	32	32	30,3	

Potrošnja energije u PPOV u zavisnosti od tipa tretmana

Proces prečišćavanja je ključni parametar projektovanja PPOV i njegov izbor zavisi od više faktora kao što su efikasnost prečišćavanja, kapitalna ulaganja i troškovi rada i održavanja [39], kao i mogućnost korišćenja efluenta kao vode za druge svrhe.

Za poboljšanje energetske efikasnosti neophodno je analizirati potrošnju energije različitih jedinica za tretman PPOV. PPOV se uglavnom mogu podeliti na jedinicu za predtretman, jedinicu za biološki tretman i jedinicu za tretman mulja [39]. Potrošnja energije u PPOV ima veliku važnost i može da govori o usvojenom nivou tretmana otpadnih voda. Naime, nizak procenat potrošnje energije može da govori o tome da se ne koristi adekvatan tretman otpadnih voda. Tabela 7 daje potrošnju energije u različitim procesima PPOV.

Tabela 7. Potrošnja energije u različitim procesima PPOV

	Istočna Kina	Grčka	Poljska
Predtretman (%)	-	13	-
Primarni tretman (%)	22,9	1	0,6
Napredni tretman (%)	14,3	6	-
Biološki (konvencionalni) tretman (%)	59,7	72	74
Tretman mulja (%)	3,1	8	8
Pumpanje (%)	-	-	6,5
Ostalo (%)	-	-	10,9
Referenca	[9]	[12]	[40]

Tip tretmana koji se koristi utiče na potrošnju energije u PPOV. Stoga je razumno očekivati razlike između zemalja, u kojima iz ekonomskih i/ili ekoloških razloga može prevladati određena vrsta tretmana [2].

Potrošnja energije u PPOV u različitim procesima tretmana

U većini PPOV koja koriste sisteme aktivnog mulja za sekundarni tretman, aeracija ima udeo u ukupnoj potrošnji energije sa oko 10–70%, pumpe koriste između 5–50% energije, sistemi za zgušnjavanje mulja i odvodnjavanje između 5–35%, dok se za ostale procese i sisteme troši između 7–27% energije, tabela 8.

Pored navedenog na potrošnju energije u PPOV utiče i vek trajanja samog postrojenja. Vek trajanja postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda (PPOV) je uobičajeno 20-25 godina, što znači da će do 2050. godine svako već postojeće PPOV zahtevati da bude renovirano, ponovo izgrađeno ili zamenjeno novim. Ovo stvara mogućnosti za održivije izbore u narednim godinama.

Tabela 8. Potrošnja energije u različitim operacijama procesa tretmana u PPOV (%)

	Kina	Singapur	Španija	Nemačka	Australija
Aeracija	51,58	13	42	67	40 – 50
Zgrušavanje mulja i odvodnjavanje	8,78	9	31	11	5 – 20
Pumpanje	17,76	24	20	5	30 – 50
Ostalo	21,88	54	7	17	-
Reference	[4]	[7]	[7]	[7]	[31]

III SMANJENJE POTROŠNJE ENERGIJE U PPOV I POVEĆANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI

PPOV su često sačinjena od kompleksnih infrastrukturnih sistema. Ponovno projektovanje celokupnog sistema bi predstavljalo veliki finansijski izdatak, pa samo poboljšanje u funkcionisanju pojedinih područja/procesa može dovesti do stvaranja značajnih mogućnosti za smanjenje potrošnje energije i postizanje energetske efikasnosti. Postizanje energetske efikasnosti u PPOV je postao jedan od prioriteta, obzirom da operateri postrojenja, kao i državne i lokalne jedinice samouprave, pojačavaju napore da se smanje troškovi energije i da se poboljša energetska efikasnost [41]. Mere energetske efikasnosti i modifikacije procesa tretmana mogu da smanje potrošnju energije u PPOV. Povećanje energetske efikasnosti treba da omogući postizanje istih rezultata uz smanjenje potrošnje energije ili postizanje poboljšanih performansi sa istom snagom [42].

Da bi se smanjila potrošnja energije i postigla energetska efikasnost, neophodno je da se u PPOV:

- procene performanse postojećeg sistema – proceniti potrošnju energije i efikasnost na licu mesta,
- procene operativni troškovi – proceniti stanje, performanse i preostali korisni vek procesne opreme,
- analiziraju mogućnosti iskorišćenja otpadnih voda – iskorišćenje energije iz otpadne vode [43],
- po mogućstvu primene decentralizovani sistemi kako bi se smanjili nepotrebni troškovi transporta otpadnih voda,
- primene napredne tehnike prečišćavanja koje troše manje energije.

Da bi se smanjila potrošnja energije i da bi se postigla energetska neutralnost u PPOV, mogu se preduzeti različite mere, a neke od njih mogu biti:

- smanjenje potrošnje energije u procesima prečišćavanja otpadnih voda,
- povećanje povrata energije iz unutrašnjih izvora,
- uvođenje eksternih OIE [7].

Takođe, mere za smanjenje potrošnje energije i podizanje energetske efikasnosti mogu da se podele u dve grupe. Prva grupa se fokusira na operativne modifikacije primenjene na različitim delovima PPOV, a druga uključuje inovativne procese za tretman otpadnih voda sa manjom potrošnjom energije u poređenju sa tradicionalnim tehnologijama i uvođenje eksternih i

unutrašnjih OIE. Budućnost OIE u svetu zagarantovana je potrebom za održivim razvojem, zaštitom životne sredine i energetske efikasnošću, zbog toga što imaju veoma važnu ulogu u smanjenju emisija gasova staklene bašte u atmosferu [44]. Takođe, programi energetske efikasnosti i korišćenja OIE su, za sada, glavni organizaciono-tehničko-tehnološki alati za uspostavljanje održivog razvoja [45].

Smanjenje potrošnje energije i povećanje energetske efikasnosti u PPOV u pojedinačnim procesima PPOV

Aeracija troši više od 50% ukupne energetske potrošnje u PPOV. Uštede energije se mogu postići projektovanjem i radom sistema za aeraciju koji će odgovarati, što je bliže moguće, stvarnim potrebama procesa za kiseonikom [6]. Promene u procesima biološkog tretmana potencijalno mogu da smanje potrebu za energijom u prečišćavanju. Tako na primer, difuzori koji prave sitne mehuriće su energetski efikasniji od difuzora koji prave krupne mehuriće, zbog toga što manji mehurići omogućuju veći prenos kiseonika. Prelaz sa difuzora koji prave krupne mehuriće na sistem sa difuzorima koji prave sitne mehuriće trebalo bi da snizi troškove energije potrebne za dovođenje vazduha za najmanje 25% [6]. Međutim, difuzori koji prave sitne mehuriće mogu iziskivati bolje održavanja od difuzora koji prave krupne mehuriće (da bi ostali čisti i da bi optimalno radili). Prelaskom sa konvencionalnih tehnika prečišćavanja (sa aktivnim muljem - CAS ili šaržni tip postupka sa aktivnim muljem - SBR) na IFAS tehnologiju (eng. Integrated Fixed Film Activated Sludge - proces aktivnog mulja sa integrisanim fiksiranim filmom) uštede mogu da budu od 50-70%. Takođe, u referenci [46] sprovedena je studija slučaja u kojoj je u jednom od PPOV u Maleziji korišćen turbo kompresor velike brzine, koji je smanjio potrošnju energije i do 42%.

Takođe, mnoge studije su istraživale smanjenje potrošnje električne energije kroz efikasnu upotrebu pumpnog sistema. Pumpe imaju veoma važnu ulogu i mogu predstavljati značajnu potrošnju energije u PPOV. Postrojenja se projektuju tako da mogu da prerade ne samo maksimalna dnevna opterećenja, već i vršna opterećenja koja potiču od priliva atmosferskih voda, tokom kišne sezone. Iz tog razloga, instalirane pumpe veći deo vremena rade sa kapacitetom manjim od nominalnog. U referenci [47] u jednom PPOV u Japanu, rezultati simulacije pokazuju da ukoliko se ukupni sati rada pumpe smanje za 28%, potrošnja energije će da se smanji za 10 %. U referenci [48], autori su takođe analizirali rad pumpi u PPOV. Različite simulacije pokazale su da je koordinisanjem pumpnog sistema i optimizacijom rada pumpi moguće postići uštedu energije za oko 11,5%.

Najbolji izbor opreme za pojedina postrojenja određuje tip i sastav otpadne vode, tako da u skladu sa navedenim treba sprovesti adekvatne analize i odabrati odgovarajuću opremu za tretman tih voda. Dakle, pored procesa projektovanja PPOV, proces i izbor odgovarajuće opreme igraju glavnu ulogu za smanjenje potrošnje energije i povećanje energetske efikasnosti u PPOV [49].

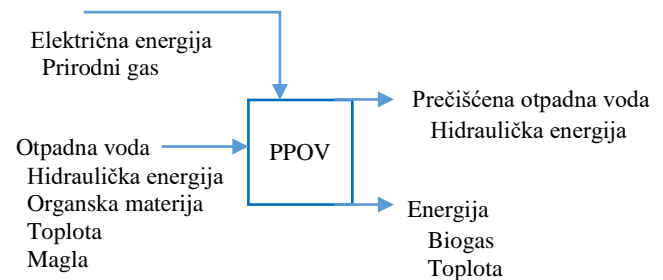
Primena OIE i povećanje povrata energije iz unutrašnjih izvora energije za podizanje energetske efikasnosti u PPOV

Najveća prednost OIE, pored toga što su praktično neiscrpn, je u tome što emituju znatno manju količinu štetnih gasova, čime značajno manje ugrožavaju životnu sredinu u odnosu na konvencionalne izvore energije [50]. Investicioni troškovi u projektima izgradnje kapaciteta baziranih na OIE su postali konkurentni troškovima izgradnje tradicionalnih izvora, što pre desetak godina nije bio slučaj [51]. Proizvodnja obnovljive energije na licu mesta postala je sve češća kao deo strategija upravljanja energijom u PPOV [24]. OIE se koriste u PPOV da bi se podržala sve veća potražnja za energijom (strožiji zahtevi tretmana otpadne vode utiču na povećanje potrošnje energije), ublažili rastući troškovi energije iz energetske mreže i da bi se smanjila emisija gasova staklene bašte. Primenom OIE, PPOV imaju mogućnost da značajno smanje ukupnu potražnju za energijom [52], postanu energetski samodovoljna i, u nekim slučajevima, energetski pozitivna [24].

Na lokacijama PPOV postoji nekoliko izvora koji se mogu koristiti za proizvodnju obnovljive energije. Ovi izvori mogu biti eksterni i unutrašnji izvori energije. Eksterni OIE podrazumevaju upotrebu solarne energije (solarnih fotonaponskih panela (PV)) i energiju vetra (vetrogeneratora). Solarna energija je jedan od najčešće korišćenih OIE u PPOV iz razloga što površine rezervoara za aeraciju, krov PPOV, kao i druge velike površine predstavljaju idealnu lokaciju za postavljanje PV opreme (kod konvencionalnih sistema prečišćavanja). Vetrogeneratori se mogu koristiti kao pomoćni i dodatni izvori energije za PPOV. Vetrogenerator je uređaj koji pretvara kinetičku energiju vetra u električnu energiju [53]. Energija vetra predstavlja nestabilan izvor energije, iz razloga što ne može samostalno da zadovolji potrebe za energijom PPOV, pa se zato kombinuje sa drugim izvorima energije, poput solarne energije [54]. U zavisnosti od same lokacije PPOV i klimatskih karakteristika, kao i tehničkih

uslova PPOV proizvodnju energije mogu obezbediti ovi izvori energije.

Unutrašnji izvori energije podrazumevaju proizvodnju biogasa, povrat toplote iz otpadne vode, povrat energije iz spaljivanja biočvrstih materija, proizvodnju biogoriva, i proizvodnju hidroenergije [55]. Glavni doprinosilac energije u PPOV je biogas proizveden u digestoru. Upotreba biogasa smatra se održivim načinom povrata energije iz PPOV, uz naknadno smanjenje mulja [56]. Takođe, toplotna energija iz otpadnih voda je važan OIE i korišćenjem izmenjivača toplote i toplotnih pumpi, toplotna energija iz otpadnih voda se može koristiti za zagrevanje PPOV, susednih zgrada ili se može dodati u sistem daljinskog grejanja [57]. Energetski bilans za PPOV je prikazan na slici 2. U predstavljenom primeru „kupljena energija“ u obliku električne i prirodnog gasa se koristi za prečišćavanje otpadnih voda, a pri njihovom tretmanu dobija se toplota, biogas i hidraulička energija (unutrašnji izvori energije).



Slika 2. Energetski bilans PPOV

U tabeli 9 dat je prikaz OIE i njihov doprinos u smislu postizanja energetskih potreba PPOV.

Tabela 9. Potrošnja energije nakon uvođenja obnovljivih izvora energije u PPOV

Tip	Lokacija	PPOV	Tehnologija	Doprinos (%)	Referenca
Solarna energija	Švajcarska	PPOV u Čuru	Sklopivi solarni krov postavljen nad otvorenim rezervoarom za prečišćavanjem otpadnih voda	15-30% energetskih potreba godišnje i povećava samoodrživost na preko 50%	[58]
	Palestina	3 PPOV – studije slučaja	PV sistem	9% i 15% energetskih potreba	[59]
	Kina	-	PV sistem	10% energetskih potreba godišnje	[60]
	SAD	PPOV u gradu Boulder, Nevada	PV sistem	15-18% energetskih potreba godišnje	[61]
	SAD	PPOV u gradu Sprag, Konektikat	PV sistem	80% energetskih potreba	[62]
	Tajland	PPOV u Nontaburiju – studija slučaja	PV sistem	30% energetskih potreba godišnje	[63]
Energija vetra	SAD	PPOV u Atlantik Sitiju, Nju Džersi	Vetroturbina	60% energetskih potreba godišnje	[53]
Kogeneracija	-	Studija slučaja	Kogeneracioni sistem zasnovan na gasifikaciji kanalizacionog mulja - singas proizveden gasifikacijom. Koristi se kao gorivo u motorima SUS za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije	9,3% i 10,8% energetskih potreba, a 28,8% i 30,7% energetskih potreba se ostvaruje primenom motora na singas ili sa dva goriva	[64]
	-	Studija slučaja	Motori sa unutrašnjim sagorevanjem	do 40% energetskih potreba	[65]
	SAD	PPOV u gradu Grešam, Oregon	Unapređenje opreme za sistem tretmana biogasa	PPOV je postigla 22 % veću proizvodnju električne energije	[66]
	Danska	PPOV Marselisborg	Proizvodnja energije kroz implementaciju novih energetski efikasnih motora na biogas	PPOV je proizvelo 30% više električne i 75% više toplotne energije nego što je potrošilo (višak toplotne energije koristi se u sistemu grejanja lokalne zajednice)	[67]

Trenutna ekspanzija PPOV u Švajcarskoj povećava ukupnu potrošnju električne energije svih postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda za preko 30%. Sa solarnim sklopivim krovom, ova postrojenja mogu sama pokriti ovu dodatnu potrošnju, lokalno i obnovljivo, na savremeni način [58]. Potrošnja energije u postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda može se delimično ili u potpunosti pokriti odgovarajućim energetskim menadžmentom i korišćenjem OIE. Prednosti ovih alternativa su ekonomske i ekološke i treba ih ozbiljno uzeti u obzir od strane društava i zemalja sveta. U nastavku je data tabela 10 koja prikazuje kako primena solarne energije i biogasa doprinose povećanju energetske efikasnosti u PPOV.

Tabela 10. Doprinosi obnovljivih izvora energije u PPOV u zavisnosti od veličine postrojenja [55]

Tip	Protok (m ³)	Doprinos (%)
Solarna energija	< 22730	30 – 100%
	> 22730	8 – 30%
Biogas	< 22730	-
	> 22730	25 – 60%

U PPOV sa protokom manjim od 22730 m³/dan, odsustvo proizvodnje energije iz biogasa može da dovede do zaključka da bi ovo PPOV trebalo da usvoji solarnu PV tehnologiju za postizanje energetske efikasnosti [55].

IV ZAKLJUČAK

Postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda su neizostavni deo tretmana otpadnih voda. Njihovo postojanje i rad doprinose zaštiti vodnih sredina i smanjenju degradacije životne sredine, ali, takođe, njihovo postojanje i rad imaju veliku potražnju za energijom. Iako na nacionalnom nivou udeo potrošnje energije ovih postrojenja možda nije veliki (0,4 – 1%), slobodno se može očekivati da će ovaj udeo porasti iz razloga što se broj ovih postrojenja u zemljama svake godine povećava, a samim tim se povećava i potrošnja energije. Ovaj rad je dao preglednu analizu potrošnje energije u PPOV. U radu je analizirana potrošnja energije različitih PPOV u zavisnosti od: lokacije PPOV, veličine PPOV, tipa tretmana otpadnih voda i pojedinačnih procesa unutar PPOV.

Rad je pokazao da:

- Životni standard, navike ljude, klimatske promene i mnogi drugi faktori utiču da u različitim regionima sveta potrošnja energije u PPOV bude različita (SAD – 21000 GWh, Evropa - 15021 GWh godišnje).
- Veličina postrojenja i dnevni kapacitet tretmana otpadnih voda utiču na potrošnju energije. Veća postrojenja imaju stabilnu/manju potrošnju energije, a manja postrojenja imaju veće varijacije u potrošnji energije i veću potražnju za energijom (npr. Nemačka za PPOV na koje je priključeno < 1000 ES, troši 75 kWh/ES, a za PPOV na koje je povezano > 100000 ES troši 32 kWh/ES). Međutim, prilikom analize PPOV treba uzeti u obzir mnogo veći broj parametara da bi se dobili adekvatni podaci vezani za potrošnju energije.
- U zavisnosti od sastava otpadnih voda za tretiranje otpadnih voda u PPOV se mogu koristiti različite vrste tretmana otpadnih voda. Rad je pokazao da najveću

potrošnju energije ima sekundarni tretman otpadnih voda (59–74% potrošnje energije). Takođe, za tretiranje otpadnih voda mogu da se primene različiti procesi i operacije. Neizostavni deo ovih postrojenja su jedinica za aeraciju, pumpe i jedinice za tretman mulja, a analiza je pokazala da su upravo navedene jedinice najveći potrošači energije u postrojenju (aeracija 13–67%, pumpe 5–50 %, tretman mulja 7–54%).

- Održavanje opreme i starosni vek ovih postrojenja takođe mogu da doprinesu povećanju potrošnje energije u PPOV.

Rad je ukazao na veliku varijaciju energetskih potreba i energetske potrošnje u PPOV. Zbog toga je preporuka da se u svakom PPOV sprovedu detaljne energetske procene u cilju nastojanja da se smanji potrošnja energije i da se poboljša energetska efikasnost. Smanjenje potrošnje energije i povećanje energetske efikasnosti predstavljaju glavni trend budućeg razvoja PPOV. Da bi se to postiglo potrebno je:

- Izvršiti optimizaciju pojedinačnih procesa u PPOV i proveru energetske efikasnosti opreme (npr. optimizacija rada pumpi može da doprinese uštedi od oko 10%, dok optimizacija procesa aeracije može da doprinese uštedi od 25 – 42% energije).
- Uvesti eksterne izvore energije (solarna energija može da obezbedi od 9–80% energije, energija vetra oko 60%, a kogeneracija od 10-50% energije).
- Analizirati mogućnost proizvodnje i upotrebe energije iz otpadnih voda i mulja, kao i mogućnost iskorišćenja efluenta i nutrijenata kao sirovina.

Do sada su postojale jasne granice između sektora voda i energetike, međutim te granice polako počinju da nestaju i zbog toga je bavljenje ovom temom važno ne samo za održivi razvoj sektora voda, energetike i velikog broja drugih industrijskih grana, poljoprivrede, industrije pića i hrane, ekologije itd. Sledeći korak za definisanje potrošnje energije u PPOV i smanjenje potrošnje energije i povećanje energetske efikasnosti bi podrazumevao usklađivanje podataka i informacija na međunarodnom nivou, kako bi se postigla održivost u PPOV.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Plappally, A., Lienhard, J. Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 7, pp. 4818-4848, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.022>
- [2] Longo, S., d'Antoni, B. M., Bongards, M., Chaparro, A., Cronrath, A., Fatone, F., Lema, J.M., Mauricio-Iglesias, M., Soares, A., Hospido, A. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement, *Applied Energy*, Vol. 179, pp. 1251-1268, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.043>
- [3] Yerushalmi, L., Ashrafi, O., Haghghat, F. Reductions in greenhouse gas (GHG) generation and energy consumption in wastewater treatment plants, *Water Science & Technology*, Vol. 67, No. 5, pp. 1159-1164, 2013. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.681>
- [4] Xie, T., Chengwen, W. Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants in China, in *Proc. World Congress on Water, Climate and Energy*, Dublin, Ireland, 2012. <https://doi.org/10.13140/2.1.1228.9285>
- [5] Galan, B., Grossmann, I. Optimization strategies for the design and synthesis of distributed wastewater treatment networks, Vol. 3, No. 1, pp. S161-S164, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(99\)80040-4](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(99)80040-4)
- [6] Awe, O., Liu, R., Zhao, Y. Analysis of Energy Consumption and Saving in Wastewater Treatment Plant : Case Study from Ireland, *Journal of Water*

- Sustainability, Vol. 6, pp. 63-76, 2016. <https://doi.org/10.11912/jws.2016.6.2.63-76>
- [7] Maktabifard, M., Zaborowska, E., Makinia, J., Achieving energy neutrality in wastewater treatment plants through energy savings and enhancing renewable energy production, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, Vol. 17, pp. 655–689, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9478-x>
- [8] Panepinto, D., Fiore, S., Zappone, M., Genon, G., Meucci, L. Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy, *Applied Energy*, Vol. 161, pp. 404–411, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.027>
- [9] Xu, J., Li, Y., Wang, H., Wu, J., Wang, X., Li, F. Exploring the feasibility of energy self-sufficient wastewater treatment plants: a case study in eastern China, *Energy Procedia*, Vol. 142, pp. 3055–3061, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.444>
- [10] Belloir, C., Stanford, C., Soares, A. Energy benchmarking in wastewater treatment plants: the importance of site operation and layout, *Environmental Technology*, Vol. 36, No. 2, pp. 260-269, 2015. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.951403>
- [11] 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*, Vol. 77, No. 9, pp. 2242-2252, 2018. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.035>
- [12] Christoforidou, P., Bariamis, G., Iosifidou, M., Nikolaidou, E., Samaras, P. Energy Benchmarking and Optimization of Wastewater Treatment Plants in Greece, *Environmental Sciences Proceedings*, Vol. 2, No. 1, pp. 36, 2020. <https://doi.org/10.3390/envirosciproc2020002036>
- [13] Cotterill, S.E., Dolfing, J., Jones, C., Curtis, T.P., Heidrich, E.S. Low temperature domestic wastewater treatment in a Microbial Electrolysis Cell with 1 m² anodes: towards system scale-up, *Fuel Cells*, Vol. 17, No. 5, pp. 584–592, 2017. <https://doi.org/10.1002/face.201700034>
- [14] Jones, E., van Vliet, M., Qadir, M., Bierkens, M. Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse, *Earth System Science Data*, Vol. 13, No. 2, pp. 237–254, 2021. <https://doi.org/10.5194/essd-13-237-2021>
- [15] Myszograj, S., Bochenki, D., Makowski, M., Pluciennik-Koropczuk, E. Biogas, Solar and Geothermal Energy - The Way to a Net-Zero Energy Wastewater Treatment Plant - A Case Study, *Energies*, Vol. 14, 6898, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14216898>
- [16] Qadir, M., Drechsel, P., Jiménez Cisneros, B., Kim, Y., Pramanik, A., Mehta, P., Olaniyan, O. Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source, *Natural Resources Forum*, Vol. 44, pp. 40–51, 2020. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12187>
- [17] Wastewater - report, <https://infrastructurereportcard.org/cat-item/wastewater/> [pristupljeno 09.02.2022]
- [18] Roostaei, J., Zhang, Y. Spatially Explicit Life Cycle Assessment: Opportunities and challenges of wastewater-based algal biofuels in the United States, *Algal Research*, Vol. 24, pp. 395-402, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.08.008>
- [19] European Environment Agency (EEA), Waterbase - UWWTD: Urban Waste Water Treatment Directive – reported data, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/waterbase-uwwtd-urban-waste-water-treatment-directive-7> [pristupljeno 11.02.2022]
- [20] Ganora, D., Hospido, A., Husemann, J., Krampe, J., Loderer, C., Longo, S., Moragas Bouyat, L., Obermaier, N., Piraccini, E., Stanev, S., Vaci, L., Pistocchi, A. Opportunities to improve energy use in urban wastewater treatment: a European-scale analysis, *Environmental Research Letters*, Vol. 14, No. 4, 044028, 2019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab0b54>
- [21] Sechi, S., Giarola, S., Lanzini, A., Gandiglio, M., Santarelli, M., Olulaye, G., Hawkes, A. A bottom-up appraisal of the technically installable capacity of biogas-based solid oxide fuel cells for self power generation in wastewater treatment plants, *Journal of Environmental Management*, Vol. 279:111753, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111753>
- [22] Xu, A., Wu, Y., Chen, Z., Wu, G., Wu, Q., Ling, F., Huang, W., Hu, H. Towards the new era of wastewater treatment of China: Development history, current status, and future directions, *Water Cycle*, Vol. 1, pp. 80-87, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.06.004>
- [23] Qu, J, Wang, H., Wang, K., of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China (MOHURC) (2019), National Municipal Wastewater Treatment Management System, Beijing, China., https://english.www.gov.cn/state_council/2014/09/09/content_2814749862_84089.htm [pristupljeno 09.02.2022]
- [24] Gu, Y., Li, Y., Li, X., Luo, P., Wang, H. Wang, X., Wu, J., Fengting, L.. Energy Self-sufficient Wastewater Treatment Plants: Feasibilities and Challenges, *Energy Procedia*, Vol. 105, pp. 3741–3751, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.868>
- [25] Rothausen, S., Conway, D. Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector. *Nature Climate Change*, Vol. 1, pp. 210–219, 2011. <https://doi.org/10.1038/Nclimate1147>
- [26] European Commission, Optimised Renewable Mix for Energy Saving in Waste Water Treatment Plants, https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search_h.dspPage&n_proj_id=4903 [pristupljeno 09.02.2022]
- [27] The European Parliament and the Council of the European Union. Water Framework Directive 2000/60/EC. <https://water.europa.eu/freshwater/europe-freshwater/water-framework-directive> [pristupljeno 13.02.2022]
- [28] European Commission, Standard method and online tool for assessing and improving the energy efficiency of wastewater treatment plants, <https://cordis.europa.eu/project/id/649819> [pristupljeno 13.02.2022]
- [29] Walker, N., Prysor Williams, A., Styles, D. Pitfalls in international benchmarking of energy intensity across wastewater treatment utilities, *Journal of Environmental Management*, Vol. 300, 113613, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113613>
- [30] Zhang, M., Ma, Y. Energy use and challenges in current wastewater treatment plants, *A-B processes: Towards Energy Self-sufficient Municipal Wastewater Treatment*, Ch. 1, IWA Publishing, London, UK, 2019. https://doi.org/10.2166/9781789060089_0001
- [31] *Energy Efficiency Opportunities in Wastewater Treatment Facilities*, Office of Environment and Heritage, 2019. <https://storage.googleapis.com/kms-au.appspot.com/sites/continuum/assets/f3f9e3ff-2686-43bc-bab0-86b469621f2d/wastewater-treatment-facilities-energy-efficiency-opportunities-190114.pdf> [pristupljeno 13.02.2022]
- [32] Danish Water and Wastewater Association (DANVA), (2020). Water in figures 2020, <http://www.e-pages.dk/danva/242> [pristupljeno 13.02.2022]
- [33] State of Green. Unlocking the potential of wastewater: using wastewater as a resource while protecting people and ecosystems, 2020. <https://stateofgreen.com/en/publications/unlocking-the-potential-of-wastewater-treatment/> [pristupljeno 13.02.2022]
- [34] Wroblewski, J., Heidrich, Z.. Energochłonność miejskich oczyszczalni ścieków Cz. II. Badania własne, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, No. 8, pp. 325-329, 2017. <https://doi.org/10.15199/17.2017.9.4>
- [35] Hansen, J., Becker, M.. *Is the energy-independency already state-of-art at NW-European wastewater treatment plants*, Marbella, Spain, 2013.
- [36] Gu, J., Li, J., Li, X., Luo, P., Wang, H., Robinson, Z., Wang, X., Wu, J., Li, F. The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants, *Applied Energy*, Vol. 204, pp. 1463-1475, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.069>
- [37] Llácer-Iglesias, R., López-Jiménez, A., Pérez-Sánchez, M. Energy Self-Sufficiency Aiming for Sustainable Wastewater Systems: Are All Options Being Explored?. *Sustainability*, Vol. 13, No. 10, 5537, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13105537>
- [38] Gandiglio, M., Lanzini, A., Soto, A., Leone, P., Santarelli, M. Enhancing the Energy Efficiency of Wastewater Treatment Plants through Co-digestion and Fuel Cell Systems, *Frontiers in Environmental Science*, Vol. 5, No. 13, 6056, 2017. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00070>
- [39] He, Y., Zhu, Y., Chen, J., Huang, M., Wang, P., Wang, G., Zou, W., Zhou, G. Assessment of energy consumption of municipal wastewater treatment plants in China. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 228, 399-404, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.320>
- [40] Maslon, A., Czarnota, J., Szaja, A., Szulzyk-Cieplak, J., Lagod, G. The Enhancement of Energy Efficiency in a Wastewater Treatment Plant through Sustainable Biogas Use: Case Study from Poland, *Energies*, Vol. 13, No. 22, pp. 6056, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13226056>
- [41] U.S. Department of Energy, Energy Data Management Manual for the Wastewater Treatment Sector, 2017. <https://www.energy.gov/eere/slsc/downloads/energy-data-management-manual-wastewater-treatment-sector> [pristupljeno 01.03.2022]
- [42] Li, Z., Zou, Z., Wang, L. Analysis and Forecasting of the Energy Consumption in Wastewater Treatment Plant, *Mathematical Problems in*

- Engineering, Vol. 2019, pp. 1-8, 8690898, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8690898>
- [43] 4 Ways To Create A More Energy Efficient Wastewater Treatment Plant, <https://www.oxymem.com/blog/4-ways-to-create-a-more-energy-efficient-wastewater-treatment-plant> [pristupljeno 01.03.2022]
- [44] Salkić, H., Softić, A., Salkić, A. Uticaj solarne elektrane na kvalitet električne energije u niskonaponskoj distributivnoj mreži, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 22, No. 1-2, pp. 137-144, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.1375>
- [45] Babić, M. Istraživanje mogućih scenarija energetske budućnosti Republike Srbije uz pomoć backcasting methodology i softvera Energovizija MB, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 22, No. 1-2, pp. 1-9, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.001B>
- [46] Aziz, N., Ramli, N., Hamid, M. Energy efficiency of wastewater treatment plant through aeration system, *Desalination and Water Treatment*, Vol. 156, pp. 38-45, 2019. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24134>
- [47] Kato, H., Fujimoto H., Yamashina K. Operational Improvement of Main Pumps for Energy-Saving in Wastewater Treatment Plants, *Water*, Vol. 11, No. 12, 2438, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11122438>
- [48] Kim, Y., Yoon, S., Mun, C., Kim, T., Kang, D., Sim, M., Hwang, E. Smart Day-ahead Pump Scheduling Scheme for Electricity Cost Optimization in a Sewage Treatment Plant, *Water Conservation Science and Engineering*, Vol. 6, pp. 79-94, 2021. <https://doi-org.libproxy.viko.lt/10.1007/s41101-021-00104-1>
- [49] Ekici, K.. Energy Saving Preventions for Aeration Process in Wastewater Treatment Plant, 2017. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17054.74567>
- [50] Krstić, N., Klimenta, D., Tasić, D., Radosavljević, D. Određivanje optimalnih nagibnih uglova fotonaponskih panela uz uvažavanje smanjenja direktne komponente iradijacije usled efekata senki u fotonaponskim sistemima, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 3, pp. 45-53, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-3.45K>
- [51] Antonijević, V., Mladenović, L., Dobrić, G., Žarković, M. Optimalno dimenzionisanje mikromreže sa obnovljivim izvorima energije u Srbiji, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 4, pp. 16-22, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-4.16A>
- [52] Mizuta, K., Shimada, M. Benchmarking energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan, *Water Science & Technology*, Vol. 62, No. 10, pp. 2256-2262, 2010. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.510>
- [53] Despotović, Ž., Rodić, A., Stevanović, I., Sistem napajanja i pametno upravljanje poljoprivrednim zemljištem korišćenjem obnovljivih izvora energije, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 28-39, <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.28D>
- [54] Guo, Z., Sun, J., Pan, Y., Chiang, C.. Integration of green energy and advanced energy-efficient technologies for municipal wastewater treatment plants, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 16, No. 7, 1282, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijerph16071282>
- [55] Strazzabosco, A., Kenway, J., Lant, A. Solar PV adoption in wastewater treatment plants: A review of practice in California, *Journal of Environmental Management*, Vol. 248, 109337, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109337>
- [56] Gupta, K., Ali, I., Saleh, A., Nayak, A., Agarwal, S. Chemical treatment technologies for waste-waterrecycling-an overview, *RSC Advances*, Vol. 12, No.16, pp. 6380-6388, 2012. <https://doi.org/10.1039/C2RA20340E>
- [57] Sun, Y., Lu, M., Sun, Y., Chen, Z., Duan, H., Liu, D. Application and Evaluation of Energy Conservation Technologies in Wastewater Treatment Plants, *Applied Sciences*, Vol. 9, 4501, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9214501>
- [58] The world's first solar folding roof, HORIZON, was built over the wastewater treatment plant of the city of Chur, Switzerland, <https://dhp-technology.ch/en/referenz/the-worlds-first-solar-folding-roof-horizon-was-built-over-the-wastewater-treatment-plant-of-the-city-of-chur-switzerland> [pristupljeno 05.03.2022]
- [59] Taha, M., Al-Sa'ed, R. Potential application of renewable energy sources at urban wastewater treatment facilities in Palestine – three case studies, *Desalination and Water Treatment*, Vol. 94, pp. 64-71, 2017. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21591>
- [60] Hao, X., Liu, R., Huang, X.. Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China, *Water Research*, Vol. 87, pp. 424-431, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.050>
- [61] Tzen, E. Renewable Energy Sources for Wastewater Treatment Plants. *Frontiers*, in Proc. *International Conference on wastewater treatment - FICWTM2017*, Palermo, Italy, 2017. https://www.researchgate.net/publication/321755190_Renewable_Energy_Sources_for_Wastewater_Treatment_Plants [pristupljeno 10.03.2022]
- [62] Greenskies, Greenskies finishes 137-kW solar array at water treatment plant, <https://www.greenskies.com/about/news/greenskies-finishes-137-kw-solar-array-water-treatment-plant> [pristupljeno 10.03.2022]
- [63] Lertpocasombut, K., Sirimontree, S., Witchayangkoon, B., Thongchom, C., Winoto, V., Keawsawasvong, S. The Renewable Energy Sources for Municipal Wastewater Processes in Thailand: A Case Study of the Nonthaburi Wastewater Treatment Plant, *Civil and Environmental Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 395-400, 2021. <https://doi.org/10.2478/cee-2021-0042>
- [64] Brachi, P., Di Fraia, S., Massarotti, N., Vanoli, L. Combined heat and power production based on sewage sludge gasification: An energy-efficient solution for wastewater treatment plants, *Energy Conversion and Management: X*, Vol. 13, 100171, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100171>
- [65] Sarpong, G., Gude, G. Codigestion and combined heat and power systems energize wastewater treatment plants – Analysis and case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 144, 110937, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110937>
- [66] Oregon WWTP's Energy Net Zero Journey, 2015. <https://www.biocycle.net/oregon-wwtps-energy-net-zero-journey/> [pristupljeno 13.03.2022]
- [67] Aarhus Vand, A. Achieving 150% energy self-sufficiency at Marselisborg Wastewater Treatment Plant, <https://www.aarhusvand.dk/en/international/about-us/news/achieving-150-energy-self-sufficiency-at-marselisborg-wwtp/> [pristupljeno 10.03.2022]

AUTORI/AUTHORS

msr Natalija Aleksić – istraživač pripravnik, Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, natalija94u@gmail.com, ORCID [0000-0001-9341-7806](https://orcid.org/0000-0001-9341-7806)

dr Vanja Šušteršič – redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, vanjas@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-7773-4991](https://orcid.org/0000-0001-7773-4991)

msr Nikola Rakić – viši stručni saradnik, Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, nikola.rakic@fink.rs, ORCID [0000-0002-3738-1869](https://orcid.org/0000-0002-3738-1869)

dr Dušan Gordić – redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, gordic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1058-5810](https://orcid.org/0000-0002-1058-5810)