



ENERGETSKA UČINKOVITOST IN INTELIGENTNA RABA ENERGIJE NA ČISTILNIH NAPRAVAH (PRIMER CČN KRANJ)

ALEKSANDER MULEC¹, doc. dr. DRAGO PAPLER²,
JELKA KOPŠE³, MIHA ERKLAVEC⁴

Povzetek

Na čistilni napravi odpadnih voda CČN Kranj sta lastnik in upravitelj izrazila željo po iskanju možnosti za dodatno zmanjšanje obratovalnih stroškov, predvsem stroškov porabe električne energije. Čistilna naprava je bila zgrajena in zagnana leta 2015, nato je bila v letu 2016 izvedena delna programska optimizacija delovanja. Glede na sprotno spremljanje delovanja čistilne naprave in na podlagi dosegljivih arhivskih podatkov ugotavljamo, da bi bilo možno dodatni prihranek teoretično doseči na dveh področjih. Hkrati bi bilo možno z vzpostavitvijo virtualne elektrarne pridobiti dodatni vir dohodkov. Podrobnejša analiza procesnega delovanja čistilne naprave, delovanja programskih algoritmov in organizacijske ureditve je razkrila določene pomanjkljivosti, ki bi jih bilo možno z natančnim spremljanjem in ustreznim odzivom posameznih tehnoloških naprav občutno zmanjšati ali povezati med seboj z namenom povečanja sinergijskega učinka delovanja. Ker čistilna naprava že v osnovi za delovanje uporablja zelo moderno tehnološko, krmilno in merilno opremo, je treba vse te možnosti kar najbolje izkoristiti ter ustrezno nadgraditi. Lastna proizvodnja električne in toplotne energije zelo poveča skupno učinkovitost naprave in hkrati zmanjša končne stroške obratovanja. Z ustrezno nadgradnjo teh regulacij bi še bolj pripomogli k dinamičnemu delovanju celotnega procesa čiščenja. Namen naloge je ugotoviti, ali so predvidene nadgradnje ekonomsko upravičene in dejansko prispevajo k optimizaciji stroškov porabe. Predvidene nadgradnje na CČN Kranj bi morale zmanjšati porabo elektrike za 10 do 15 % in na letnem nivoju iz naslova virtualne elektrarne pridobiti okoli 18 do 20.000 EUR dodatnih sredstev.

Ključne besede: ekologija, ekonomika, kogeneracija, optimizacija, regulacija, upravičenost investicije, virtualna elektrarna

1 Aleksander Mulec, dipl. org. menedž., inž. el., Hidroinženiring, d. o. o.

2 Doc. dr. Drago Papler, mag. gosp. inž., Elektro Gorenjska, d. d.

3 Jelka Kopše, univ. dipl. inž. kem. inž., Hidroinženiring, d. o. o.

4 Miha Erklavec, el. teh., Hidroinženiring, d. o. o.



Abstract

In the wastewater treatment plant WWTP Kranj the owner and manager expressed the desire to reduce operating costs, especially the costs of electricity consumption. According to previous research on the operation of the WWTP Kranj and on the basis of available archive data it was established that the savings could be theoretically achieved in two areas. At the same time it would be possible to obtain an additional source of income by establishing a virtual power plant. A more detailed analysis of the process operation of the treatment plant, the operation of program algorithms and the organizational arrangement revealed some of the deficiencies that can be significantly reduced or interconnected with each other in order to increase the efficiency of operation by accurate monitoring and appropriate response of individual technological devices. Since the treatment plant already basically operates very modern technological, control and measuring equipment, all these options must be used to the best of their ability and only need to be upgraded. Own production of electric and thermal energy greatly increases efficiency and at the same time reduces final operating costs. By properly upgrading these regulations they would further contribute to the dynamic functioning of the entire cleaning process. The purpose of the task is to determine whether the planned upgrades are economically viable and actually contribute to the optimization operation cost. The planned upgrades to the WWTP Kranj should reduce electricity consumption by 10 to 15 %, and at the annual level from the virtual power plant, they will obtain about 18 to 20 000 EUR of additional funds.

1. UVOD

V novejši centralni čistilni napravi (CČN) odpadnih voda Kranj sta tako investitor, Mestna občina Kranj, kot tudi upravitelj, Komunala Kranj, izpostavila potrebo po zmanjšanju obratovalnih stroškov na področju porabe električne energije in porabe kemičnih reagentov. Glede na predhodne raziskave delovanja CČN Kranj in na podlagi dosegljivih arhivskih podatkov ugotavljamo, da bi bilo mogoče prihranke teoretično doseči na dveh področjih, hkrati pa se kot dodatni vir dohodkov odpira tudi možnost izkoriščanja prostih virov na stacionarnem dizelskem agregatu. Prvo področje je vezano na optimizacijo delovanja tehnološkega procesa čiščenja skupnega dušika na iztoku iz naprave, drugo področje pa je vezano na tehnološko možnost povečanja izkoristka izplena bioplina v kombinaciji z natančnim merjenjem elektroenergetskih razmer na napravi. Z naprednejšo, bolj dinamično regulacijo bi z lastno proizvodnjo električne energije z obstoječimi kogeneracijskimi napravami lahko učinkoviteje sledili potrebam tehnološkega procesa po električni energiji. Tretje področje je vezano na obstoječi dizelski agregat, ki je trenutno namenjen zgolj kratkotrajnemu napajanju celotne naprave v posebnih okoliščinah. Z ustrezno pogodbo bi agregat lahko vključili v sistem t. i. virtualne elektrarne, ki bi z ustreznim vključevanjem v elektroenergetski sistem pomagala pri terciarni regulaciji obratovalne frekvence na tem istem elektroenergetskem sistemu (ELES).

Namen prispevka je preučiti realne možnosti za implementacijo sprememb na obstoječi čistilni napravi, ki bi omogočale zmanjšanje obratovalnih stroškov na več področjih. Teoretično bi bilo mogoče zmanjšati porabo električne energije ter kemičnih reagentov, bolj dinamično prilagajati proizvodnjo električne energije trenutni največji porabi in z ustrezno pogodbo prodajati storitev terciarne regulacije (virtualna elektrarna) frekvence za ELES.

Predpostavljamo, da bodo predlagane spremembe znatno pripomogle k učinkovitosti in stabilnosti obratovanja procesa ter posledično k zmanjšanju obratovalnih stroškov.

2. TEHNOLOŠKI OPIS NAPRAVE IN MOŽNOSTI ZA OPTIMIZACIJO DELOVANJA

2.1. Kratek tehnološki opis procesnega dela naprave

CČN Kranj je bila zgrajena in vključena v obratovanje leta 2015 za predvideno največjo zmogljivost 95.000 PE (populacijskih enot). Izbrani proces obdelave odpadne vode je enostopenjska biološka čistilna naprava s sistemom prezračevanja nitrifikacije-denitrifikacije v treh kaskadnih linijah ter s kemičnim obarjanjem fosforja, primarnim in sekundarnim usedanjem, anaerobno stabilizacijo blata v mezofilnem gnilišču (35–40 °C) in uporabo bioplina za soprodukcijo elektrike ter toplote (Bajželj, 2016). V sklopu čistilne naprave je vgrajena tudi naprava za sprejem septike. UV-dezinfekcija na iztoku v tej fazi ni bila vgrajena, je pa v ta namen predviden iztočni objekt. Glede na trenutno stanje priklopljenih zmogljivosti je CČN Kranj računsko obremenjena do največ 70–80.000 PE.



Slika 1: Prikaz tehnoloških sklopov oz. objektov v CČN Kranj

Vir: Bajželj, 2016.



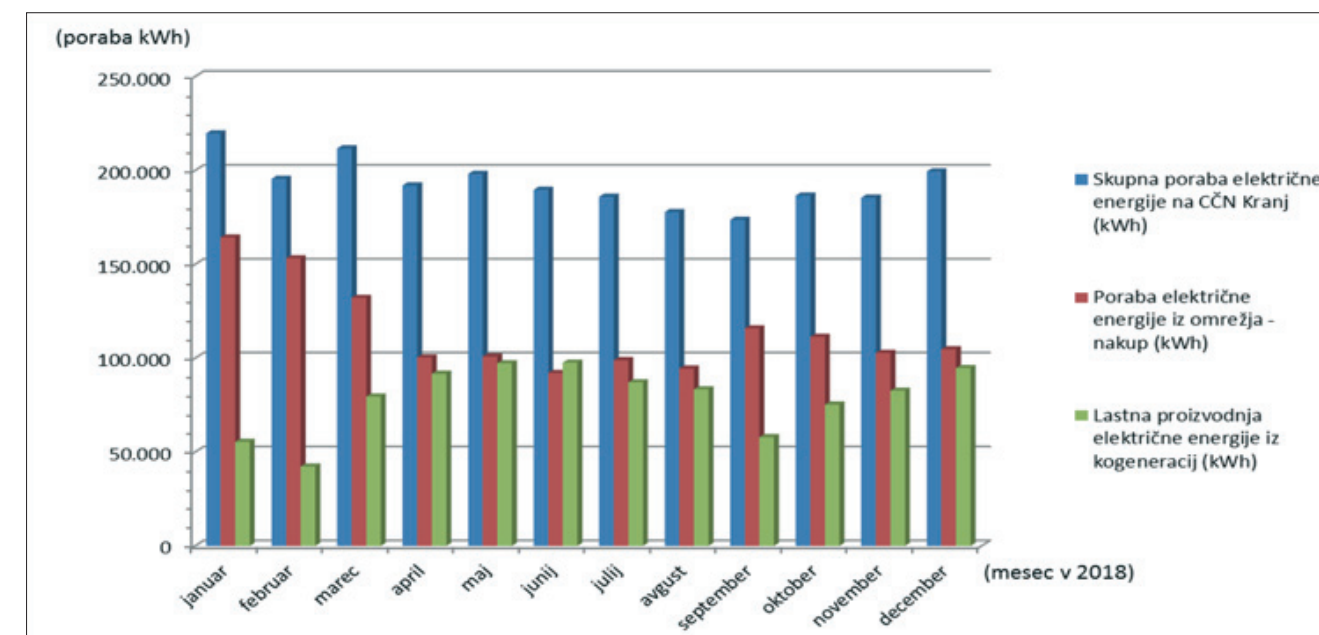
2.2. Analiza trenutne porabe električne energije

V letu 2018 je znašala skupna poraba električne energije 2.315.621 kWh. Od tega je lastna proizvodnja električne energije iz bioplinjskih kogeneracij dosegla dobrih 40 % potreb, preostalo se je zagotovilo iz elektroenergetske mreže. Skupni strošek za kupljeno električno energijo je v letu 2018 znašal 98.750,54 EUR brez DDV-ja. Slika 2 prikazuje razmerje skupne porabe električne energije, dosežene proizvodnje lastne električne energije in potrebe po nakupu mrežne električne energije v letu 2018. Podrobneje so vrednosti porabe električne energije prikazane v mesečnem intervalu (tabela 1). Za analizo obstoječega stanja porabe električne energije smo najprej pridobili natančne podatke meritev v določenem širšem časovnem obdobju in nato še meritve trenutne porabe v naključno izbranih dneh. Meritev porabe električne energije poteka na srednjenapetostni (SN) strani v transformatorski postaji (TP), zmanjšana za količino lastne proizvodnje električne energije. To analizo smo izdelali v dveh korakih, in sicer za eno leto (leto 2018) ter štiri zaporedne mesece, od 1. 8. 2018 do 31. 11. 2018. Za eno leto so podatki analizirani za posamezni mesec, podrobneje pa so podatki obdelani v izbranem terminu štirih mesecev, ko smo natančno analizirali podatke o skupni minutni porabi električne energije za vsak peti zaporedni dan. Tako je bilo analiziranih po sedem dni v mesecu. Vsak peti dan smo izbrali zato, da v analizi upoštevamo tako delovne kot nedelovne dneve (sobota oz. nedelja ali praznični dnevi).

Tabela 1: **Poraba električne energije v CČN Kranj v letu 2018**

Mesec v letu 2018	Skupna poraba električne energije na CČN Kranj (kWh)	Poraba električne energije iz omrežja - nakup (kWh)	Lastna proizvodnja električne energije iz kogeneracij (kWh)	Najvišje registrirana obračunska moč - konica (kW)
Januar	219.688	164.230	55458	558
Februar	195.466	153.136	42330	514
Marec	211.692	132.127	79565	469
April	192.041	100.395	91646	337
Maj	198.077	100.805	97272	373
Junij	189.663	92.081	97582	389
Julij	185.987	98.867	87120	352
Avgust	177.798	94.416	83382	356
September	173.712	115.826	57886	379
Oktober	186.582	111.340	75242	443
November	185.443	102.804	82639	334
December	199.472	104.738	94734	340
Skupaj	2.315.621	1.370.765	944.856	
Uspešnost pokrivanja potreb z lastno proizvodnjo v %	100	59,20	40,80	

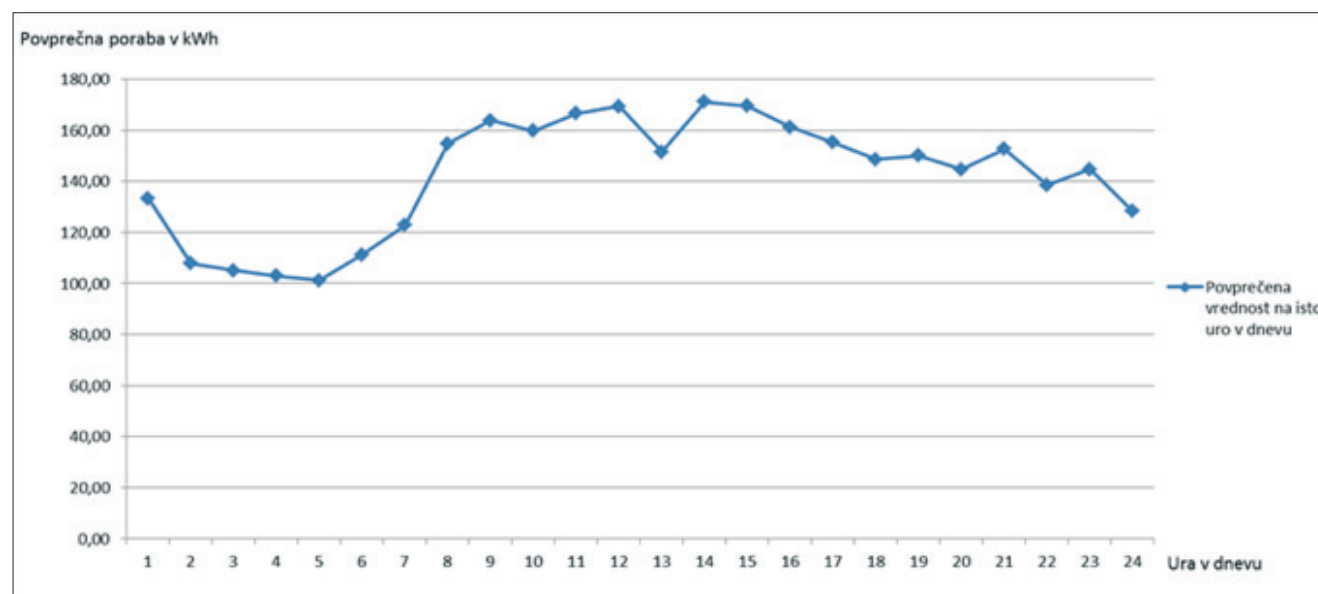
Vir: Arhiv Komunala Kranj, 2018.



Slika 2: Poraba in proizvodnja električne energije v CČN Kranj v letu 2018

Vir: Arhiv Komunala Kranj, Margetič, 2018.

Iz poteka grafa na sliki 2 razberemo, da je skupna poraba električne energije dokaj konstantna in ni veliko odvisna od letnega časa. Vse leto se giblje med 173.000 in 219.000 kWh na mesec. Toplotna energija iz kogeneracijskih enot se v zimskem času porabi za ogrevanje gnilišča in vseh drugih objektov, v poletnem času pa se toplota odvaja v ozračje prek namenskih ventilatorskih hladilnikov. Zelo pomemben je podatek o razmerju količine lastne proizvodnje električne energije in potrebe po nakupu mrežne elektrike. Trenutno lastna proizvodnja doseže okoli 40,8 %, razliko je treba dokupiti. Če hočemo razumeti trend porabe električne energije, je treba upoštevati povprečno porabo za manjše časovno obdobje, npr. na navaden delovni dan v procesu čiščenja, in nato natančno razdeliti tudi obračun stroškov, ki ga po navadi zaračuna dobavitelj elektrike.



Slika 3: 24-urni potek porabe električne energije v CCN Kranj

Vir: SCADA-Hidroinženiring, d. o. o., december 2018.

Iz poteka grafa na sliki 3 vidimo, da trend porabe električne energije čez dan ni konstanten; ima obdobje nižje porabe ter obdobje, ko je poraba višja. To sovпада s trendom dotoka na čistilno napravo in delovnim urnikom zaposlenih. Pomemben dejavnik je delovanje naprav za dehidracijo blata, ki navadno obratujejo med 7. in 17. uro. V tem času je čistilna naprava najbolj obremenjena, zato tudi druge naprave delujejo z višjo intenzivnostjo ter posledično z višjimi potrebami po energiji. Ker se električna energija obračunava tarifno, je zelo pomembno, kdaj določena oprema obratuje, in že manjši premiki delovanja v nižjo tarifo lahko pomenijo znatne prihranke. Podobno je tudi pri omrežnini. Z regulacijo je treba doseči, da bodo 15-minutne registracije moči čim nižje, ker se na koncu obračunskega meseca plača najvišje dosežena konica. Na računu dobavitelj električne energije izračuna tudi, kolikšna je bila povprečna dnevna poraba v preteklem obdobju. Za oktober 2018 je znašala 3.591,61 kWh, kar preračunano na 24 ur pomeni povprečje okoli 149,65 kW/h.

Tabela 2: Razčlenjeni obračun porabe elektrike za oktober 2018

Tabela za izračun stroška elektrike		Vrsta odjema: SN-T>2500 UR, Poslovni odjem				Datum: 31.10.2018	
Obračunska moč v kW	443,0	Letna količina VT	60.420,000	kWh	Letna količina NT	50.920,000	kWh
		VT (vsoka tarifa)			NT (nizka tarifa)		
DELOVNA ENERGIJA	Merjena enota	€/kWh	količina kWh/mesec	cena v €	€/kWh	količina kWh/mesec	cena v €
Energija	kWh	0,04206	60.420,00	2.541.26520	0,02696	50.920,00	1.373.82160
OMREŽNINA	Merjena enota	€/kWh	količina kWh/mesec	cena v €	€/kWh	količina kWh/mesec	cena v €
Obračunska moč	kW	3,63920	443,00	1.612.16560			
Omrežnina	kWh	0,00910	60.420,00	549.82200	0,00700	50.920,00	356.44000
PRISPEVKI	Merjena enota	€/kWh	količina kWh/mesec	cena v €	€/kWh	količina kWh/mesec	cena v €
Prispevek OVE in SPTE	kW	4,10702	443,00	1.819.40986			
Prispevek za energetske učinkovitost (EnU)	kWh	0,00060	60.420,00	48.33600	0,00080	50.920,00	40.73600
Dodatek za AGEN-RS+BORZEN (Delovanje Operaterja trga)	kWh	0,00013	60.420,00	7.65460	0,00013	50.920,00	6.61960
Trošarina - poslovni uporabniki	kWh	0,00305	60.420,00	184.28100	0,00305	50.920,00	155.30600
JALOVA ENERGIJA	Merjena enota	€/kWh	količina kWh/mesec	cena v €	€/kWh	količina kWh/mesec	cena v €
Jalova energija	kWh	0,00835	374,0	3.12290			
OBRAČUN za obdobje (datum)		od 1.10.2018 do 31.10.2018	TARIFA	cena v €	TARIFA	cena v €	
CENA ENERGIJE (€/mesec)			VT	2.541.26520	MT	1.373.82160	
CENA OMREŽNINE (€/mesec)			VT	549.82200	MT	356.44000	
			MOČ				1.612.16560
CENA PRISPEVKOV (€/mesec)			KOLIČINA				443.13320
			MOČ				1.819.40986
CENA JALOVE ENERGIJE (€/mesec)							3.12290
CENA SKUPAJ brez DDV (€/mesec)							8.699,18036

Vir: Izračun Mulec, december 2018.

2.3. Predlog optimizacije na predlaganih področjih

Po skupnem delu s tehnologiji na objektu CCN Kranj in tehnologiji v našem podjetju smo ugotovili, da bi se optimizacija lahko izvedla na vsaj treh področjih oz. tehnoloških podsklopih:

- Prvo področje je vezano na optimizacijo delovanja tehnološkega procesa čiščenja skupnega dušika (N_{tot}) na iztoku iz naprave v območju zakonsko predvidenih dopustnih vrednosti. Procesni program bi dinamično spremljal delovanje celotne naprave in vtočno-iztočne izmerjene vrednosti parametrov ter na podlagi teh podatkov prilagajal proces. Predvidena optimizacija bi lahko zmanjšala porabo električne energije oz. potrebe po nakupu električne energije od 3–5 % (ocenjeno).
- Drugo področje je vezano na tehnološko možnost regulacije lastne proizvodnje elektrike in povečanja obstoječega izkoristka izplena bioplina. Prva je dinamična regulacija proizvodnje lastne električne energije na podlagi merjenja porabe ter natančnega sledenja trenutnim potrebam tehnološkega procesa po električni energiji. Druga je povečanje izkoristka proizvodnje bioplina z delom primarnega biološkega mulja, ker to blato vsebuje večjo koncentracijo biološkega materiala. Predvidena optimizacija bi lahko zmanjšala porabo električne energije oz. potrebe po nakupu električne energije 10–15 % (ocenjeno).
- Tretje področje je vezano na obstoječi dizelski agregat, ki je trenutno namenjen zgolj kratkotrajnemu napajanju celotne naprave v posebnih okoliščinah. Z ustrežno pogodbo bi se agregat lahko vključil v sistem t. i. virtualne elektrarne (aktivna terciarna regulacija). Cene so odvisne od sprejetih cen po zaključku vsakoletne dražbe na ELES-u in števila aktivacij oz. delovnih ur agregata v času aktivne regulacije (www.eles.si/)



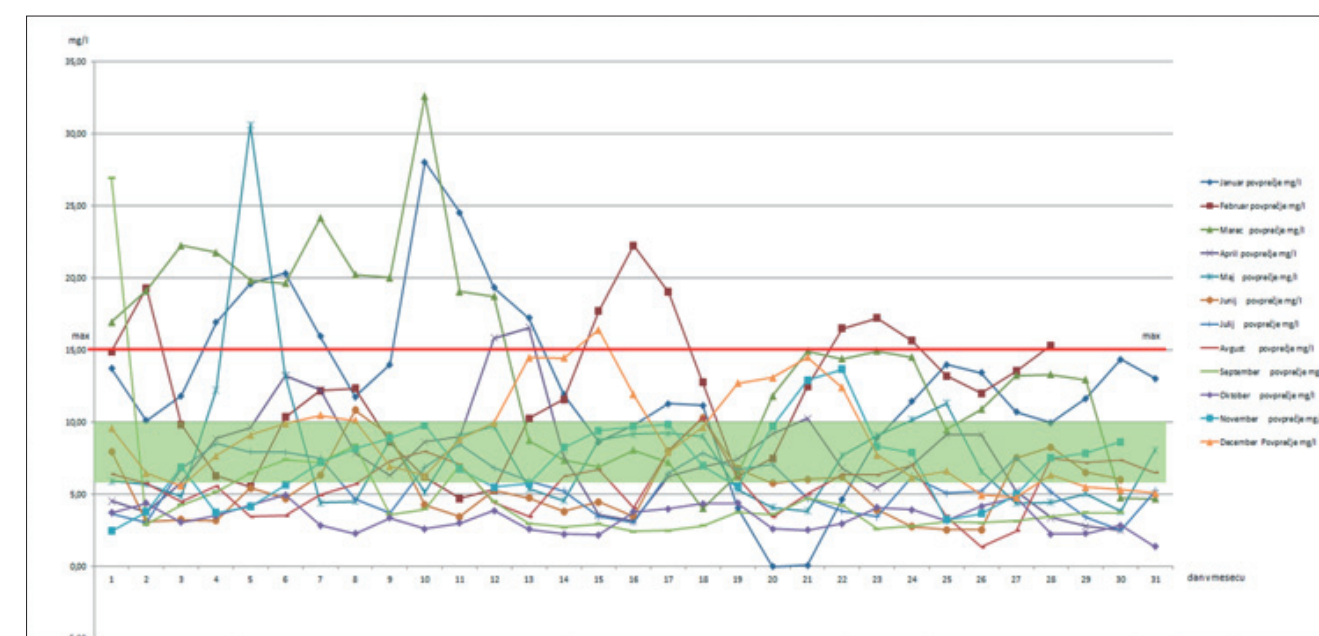
novice-za-poslovne-uporabnike/ArticleID/14096/Rezultati-javne-dražbe-za-terciarno-regulacijo-frekvence-za-januar-2019).

2.3.1. Opis optimizacije regulacije celotnega dušika

Prvo področje optimizacije je vezano na optimizacijo delovanja tehnološkega procesa čiščenja skupnega dušika (N_{tot} v mg/L) na iztoku iz naprave v smislu linearizacije izpustnih vrednosti N_{tot} znotraj najvišjih zakonsko dopustnih vrednosti. Po natančnejšem pregledu arhivskih podatkov smo ugotovili, da prihaja do večjih nihanj trenutno izmerjenih iztočnih vrednosti N_{tot} . Te vrednosti se v povprečju gibljejo od 0 mg/L do 32 mg/L, vendar je v 24-urnem vzorcu s tehnološkim postopkom ta vrednost navadno nižja kot zgornja še dovoljena z Uredbo o dovoljenih emisijah, ki znaša 15 mg/L. Uradne meritve potekajo 24 ur in vrednost se arhivira kot povprečna vrednost v 24 urah. Ideja za regulacijo izhaja ravno iz podatka o višini nihanj vrednosti vzorca. Bolj kot sama optimizacija delovanja v smislu zmanjševanja stroškov bi ustrezna regulacija vrednosti N_{tot} doprinesla k širši stabilizaciji tehnološkega procesa, saj vrednost N_{tot} pod 10 mg/L (tipično najoptimalnejša vrednost od 6 do 10 mg/L) zagotavlja tudi boljšo usredljivost blata. Regulacija bi tako morala spremljati potek vrednosti meritve na merilnem mestu in ustrezno prilagajati tehnološki proces, ki bi posledično vplival na te iztočne vrednosti. Tehnološko gledano je učinkovitost oziroma iztočna vrednost N_{tot} odvisna od mešanja v denitrifikacijskih conah in internega recikla v biološki stopnji ter razmerja med energijo (ogljik – C) in dušikom – N, torej ustreznega razmerja C : N. Iz poglobljene analize je mogoče sklepati, da bi z ustrezno povezanim programskim krmiljenjem in regulacijo na treh področjih že učinkovito in še vedno cenovno sprejemljivo lahko reševali ta problem, ki v CCN Kranj zajema: upravljanje vsebine iz zalogovnika sprejema septike, upravljanje s filtratom iz zalogovnika filtrata iz centrifugalnih naprav za dehidracijo blata in ustrezno dinamično regulacijo internega recikla. Trenutno se septična vsebina sproti črpa samodejno, brez posebne regulacije in neposredno v proces. Podobno je tudi z izcednimi vodami oz. filtratom iz centrifug. Te se preprosto prelivajo nazaj v vhodno črpališče. Mešala v anaerobnih bazenih sicer delujejo skladno s tehnološkim postopkom, vendar so po ugotovitvah glede na višino koncentracije blata v bazenih trenutno premalo učinkovita za doseganje dovolj homogene vsebine. K optimizaciji bi zelo pripomogel tudi zahtevnejši algoritem krmiljenja z upoštevanjem določenih motenj, časovnih zapoznitev in po možnosti celo prediktivnega načina regulacije. Kot ugotavljata Martin Stepančič in Juš Kocijan (2014, str. 374), bi bil z ustrezno predelavo lahko primeren kot regulator internega cikla v bioloških bazenih. Ta omogoča določeno stopnjo dinamičnega prilagajanja spreminjajočim se pogojem v procesu, ki izhajajo iz referenčnih podatkov predhodnih procesnih trendov in arhivov. Tako programska oprema do neke mere lahko predvideva obnašanje procesa in posledično prilagaja referenčne vrednosti. Pri implementaciji ustrezne nadgradnje programske opreme je omejitev predvsem v razpoložljivosti trenutnih zmogljivosti in rezerv, ki jih omogoča obstoječa programska oprema.

Dodatna težava nastane zaradi časovno koncentriranega hkratnega dotoka na čistilno napravo in dovoza septičnih vsebin ter dehidriranja blata. Vse aktivnosti potekajo v dopoldanskem času od 8. do 14. ure, potem pa se določene aktivnosti ali zmanjšajo ali pa celo ustavijo do naslednjega dne. Reševanja tega problema bi se bilo treba lotiti v dveh sklopih. Prvi sklop

bi bil lahko izveden večinoma s programsko rešitvijo, in sicer z dozirne črpalke in ustreznim organizacijskim ukrepom. Drugi sklop bi moral biti izveden tudi z večjim strojno-tehnološkim posegom, ki pa bi bil trenutno previsoko finančno breme. Torej se bomo v nalogi omejili zgolj na prvi sklop optimizacije.



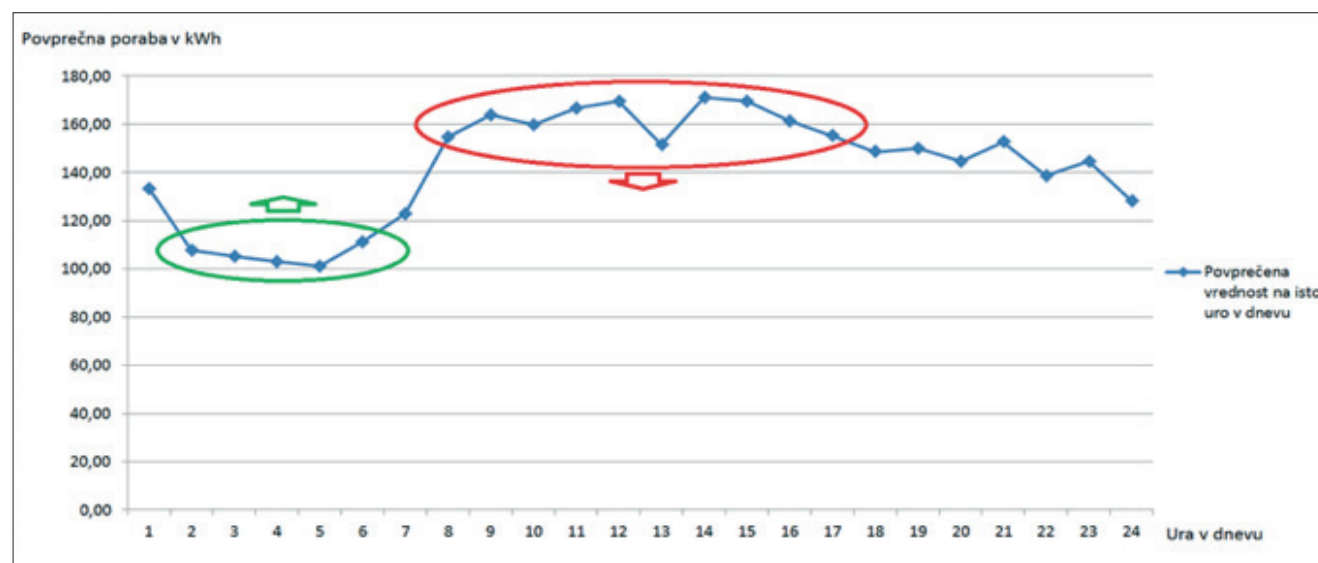
Slika 4: Dnevni trendi nihanja vrednosti N_{tot} v letu 2018

Vir: SCADA-Hidroinženiring, d. o. o., januar 2019.

Najučinkovitejšo optimizacijo bi izvedli s preprosto nadgradnjo obstoječega programa, ki bi na podlagi podatkov iz procesa samodejno intenziviral doziranje septičnih vsebin v ustreznem času in zunaj dosedanjih delovnih ur (med 15. in 6. uro). Doziranje v proces bi prerazporedili čez ves dan. Izcedne vode oz. filtrat, ki se izteka v zalogovnik iz naprav za dehidracijo blata, bi bilo treba v zalogovniku ustrezno znižati, da ne bi prihajalo do nenadzorovanih iztokov, in v notranjost zalogovnika vgraditi ustrezno potopno črpalko za primerno doziranje te vsebine ter v procesu primernem času. Podobno kot za septične vsebine bi dodatno nadgradili programsko opremo za spremljanje določenih vrednosti, ki bi bile nato pogoj za izračun količine in načina doziranja teh izcednih voda v proces. Z optimizacijo regulacije iztočnega N_{tot} bi poleg večje stabilizacije celotne čistilne naprave v okviru izvedbe drugega sklopa dosegli tudi znižanje porabe električne energije za mešanje, ki ga proces denitrifikacije nujno potrebuje, in sicer ocenjeno nekje za 25–30 W/m³ odpadne vode.

2.3.2. Opis optimizacije regulacije proizvodnje električne energije

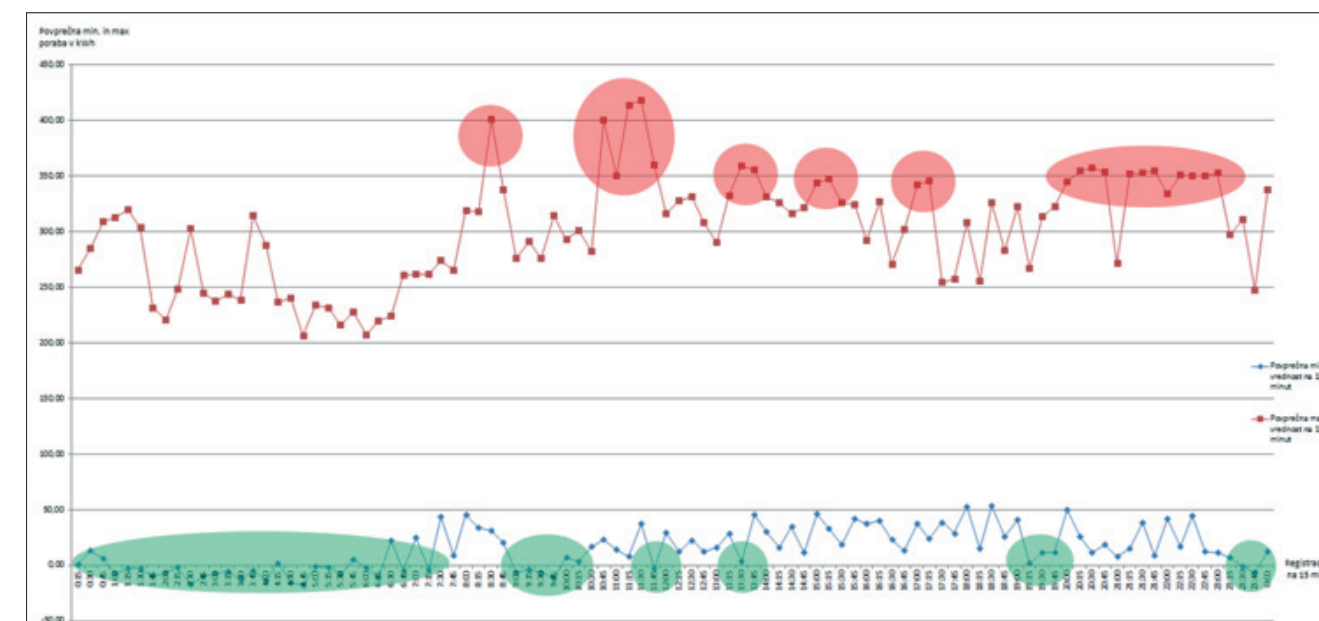
Za razumevanje dinamike elektroenergetskih potreb je treba natančno razčleniti obstoječe stanje. Izhajajoč iz povprečnega urnega trenda v 24-urnem obdobju se kaže možnost za optimizacijo delovanja (slika 5).



Slika 5: 24-urni potek porabe električne energije v CČN Kranj

Vir: SCADA-Hidroinženiring, d. o. o., december 2018.

Iz poteka grafa na sliki 5 povprečnih vrednosti porabe električne energije razberemo določen vzorec trenutnega poteka višje in nižje porabe, vezan na določen čas v dnevu. Trend povišanja porabe je zaznan med normalnim delovnikom, medtem ko v nočnem času pade. Glede na zgoraj pridobljene podatke smo prepoznali določene možnosti tudi na področju uravnavanja obremenitve. Na sliki 5 sta označeni dve območji, na katerih bi z ustrezno regulacijo lahko aktivno vplivali na zniževanje porabe električne energije. Zeleno področje predstavlja manjšo porabo in hkrati nekoliko previsoko lastno proizvodnjo elektrike, na rdečem področju je ravno obratno. Žal pa nam enourna resolucija meritev lahko pomaga zgolj informativno. Registracija porabe električne energije poteka v 15-minutnem ciklu, kar pomeni, da je treba na spremembo porabe reagirati najpozneje v 5 minutah po izmerjeni spremembi. Optimizacija porabe električne energije bo učinkovita samo takrat, ko bo učinkovit način uravnavanja porabe in ko bo tej porabi sledila tudi lastna proizvodnja električne energije. Poglobljena analiza pomeni natančno razčlenitev dogajanja daljšega testnega obdobja na 15-minutni ločljivosti. V poteku grafa na sliki 6 je prikazan natančnejši trend določanja povprečja na 15-minutni ločljivosti, najnižjih in najvišjih vrednosti oz. konic.



Slika 6: 15-minutna najnižja in najvišja poraba električne energije v CČN Kranj

Vir: SCADA-Hidroinženiring, d. o. o., december 2018.

V CČN Kranj poteka lastna soproizvodnja električne in toplotne energije s pomočjo dveh batnih bioplinskih kogeneracij z električno močjo 2 x 100 kW in toplotno močjo okoli 2 x 220 kW. Trenutno potekata proizvodnja in posledično poraba bioplina neodvisno od delovanja procesa. To pomeni, da se delovanje obeh kogeneracij krmili izključno na količino bioplina v zalogovniku bioplina oz. plinohramu. Obstoječi plinohram je prostornine 1000 m³. Dokumentirana celotna proizvodnja bioplina iz procesa čiščenja je v letu 2017 znašala 592.840 m³, v letu 2018 pa 585.879 m³. Proizvodnja bioplina se tako v povprečju giblje med 1600 m³ in 1750 m³ na dan, kar pomeni okoli 60–70 m³/h. Ob predpostavki, da posamezna kogeneracija porabi okoli 50 m³/h bioplina ob 90-% zmogljivosti proizvodnje električne energije, bi ob omenjeni proizvodnji bioplina to zadoščalo za delovanje obeh kogeneracij dobrih 16–17 ur dnevno. V praksi se je izkazalo, da delovanje obeh kogeneracij ni vedno mogoče v enem sklopu, ampak so vmes občasne daljše prekinitve, ki so posledica neustreznega in nezanesljivega obstoječega sistema merjenja količine plina v plinohramu. Ugotovili smo, da se količine bioplina v plinohramu pod 70 % ne da zanesljivo meriti, ker prihaja do izpadanja signala in ob višjih vrednostih tlaka v sistemu do varnostnega vklopljanja plinske bakle. Tako je za regulacijo v procesu na voljo samo slaba četrtnina zaloge plinohrama. Vsako delovanje plinske bakle še dodatno zmanjšuje učinkovitost izrabe bioplina. Po pregledu arhivskih podatkov o delovnih urah plinske bakle za leti 2017 in 2018 je bilo ugotovljeno, da je bakla delovala skupaj več kot 1860 ur, kar pomeni, da je ob nastavljeni zmogljivosti 40 m³/h porabila pribl. 74.400 m³ bioplina. Izgube bioplina zaradi delovanja plinske bakle tako znašajo okoli 6,5 % letno. Smiselno bi bilo zagotoviti takšno količino plina, da bi obe kogeneraciji lahko obratovali neprekinjeno 24 ur z 90-% zmogljivostjo, kar bi dnevno zagotovilo 4320 kWh lastne električne energije. Da bi to dosegli, bi morala biti tudi proizvodnja bioplina konstantno nad 2400 m³/dan, česar pa ob obstoječi tehnološki zmogljivosti in obstoječih količinah ni mogoče doseči. Teoretično bi se bilo mogoče tej vrednosti približati z dodajanjem primarnega blata, s čimer bi povečali proizvodnjo bioplina na okoli 80–90 m³/h in tako dosegli sku-



pno proizvedeno količino bioplina do 2160 m³/dan. Z zmanjšanjem delovanja bakle bi lahko pridobili še dobrih 6 % bioplina. Obratovanje obeh kogeneracij bi tako lahko podaljšali na teoretično 22–23 ur dnevno.

Za regulacijo lastne proizvodnje bi v tem primeru imeli na voljo območje 70–100-% zmogljivosti obeh kogeneracij. Izhajajoč iz poteka grafa na sliki 6, bi lastno proizvodnjo elektrike lahko nekoliko zmanjšali v nočnem času, ko bi obe kogeneraciji lahko obratovali največ do 70-%, torej skupaj okoli 140 kW, v dnevnem režimu nekje 85–90-% in za pokrivanje konic tudi kratkotrajno 100-%, kar bo največja predvidena proizvodnja elektrike, in sicer 200 kW. Za uspešno realizacijo predvidenega delovanja bo treba zagotoviti predvsem konstantnost delovanja kogeneracij brez izpadov, zanesljivo merjenje nivoja bioplina v plinohramu in hitro odzivnost proizvodnje elektrike glede na procesne potrebe.

2.3.3. Opis izvajanja terciarne regulacije frekvence v sistemu ELES

Dizelski agregati so idealne naprave za nudenje terciarne minutne rezerve moči. Prednosti so predvsem v stalni pripravljenosti agregata, hitrem zagonu, ustreznem izkoristku, in ker so ti agregati redno vzdrževani, so tudi zelo zanesljivi. Dizelski agregati so navadno namenjeni zgolj kratkotrajnemu napajanju celotne naprave v posebnih okoliščinah, torej ob izpadih omrežja ali drugih napakah, ki povzročijo izpad primarnega električnega napajanja. Zaradi zahtev po zanesljivosti delovanja agregatov je potrebno redno mesečno samodejno testiranje kratkotrajnega delovanja, kar pomeni, da imajo agregati najmanj 12 vklopov letno. To prinaša določene finančne stroške, električna energija pa se v testnih primerih ne uporablja v koristne namene. S finančnega vidika je na letnem nivoju (brez okvar in delovanja v času daljših izpadov primarnega napajanja) strošek vklopov (vključno s porabo goriva) ter rednega vzdrževanja agregata velikosti 1 MVA okoli 2.000–3.000 EUR.

ELES za zagotavljanje teh storitev v sodelovanju z BSP Regionalno Energetsko Borzo, d. o. o., izvaja periodične nakupe oz. prodaje (dražbe) električne energije, potrebne za izvajanje ročne rezerve za povrnitev frekvence (rRPF), na katerih zbira ponudbe potencialnih dobaviteljev ročne rezerve z dizelskimi agregati.

Ob predpostavki, da bi bila v januarju 2019 opravljena aktivacija 1-MW agregata, ki bi na zahtevo obratoval 4 ure s 100-% zmogljivostjo, bi bila končna cena za ponudnika skupaj 4.174,00 EUR. V sklopu pogodbe s kvalificiranim ponudnikom teh storitev bi si dobiček z naslova rezervacij delili na pol in z naslova proizvodnje bi ga pridobili v celoti. Za grobo oceno bi na letni ravni z naslova rezervacij lahko pridobili 12 x 3.162,00 EUR = 37.944,00 EUR – 50 % = 18.972,00 EUR. In če predpostavimo letno dve aktivaciji po 4 ure, lahko zaključimo z oceno 2 x 4 MWh = 8 MWh x 253,00 EUR = 2.024,00 EUR. Predvidoma bi CČN Kranj s tega naslova na leto lahko pridobila okoli 21.000,00 EUR (brez odšteti stroškov) dodatnih finančnih sredstev.

3. IZRAČUN PROCESNIH INDIKATORJEV NAPRAVE PRED OPTIMIZACIJO IN PO NJEJ

Pri izračunu procesnih indikatorjev smo se omejili na izračun specifične porabe električne energije na kWh/PE_{BPK}/leto. Specifična poraba električne energije (SPee) na PE_{BPK} nam pove, koliko električne energije se na čistilni napravi porabi glede na obremenitev na PE. Obremenitev PEBPK predstavlja obremenitev surove odpadne vode na prebivalca, ki se izraža v PE_{BPK} . PE tako pomeni 1 PE = 60 g BPK/ dan.

CČN Kranj se uvršča v razred čistilnih naprav z zmogljivostjo 10.000–100.000 PE. V tabelah 3, 4 in 5 so prikazane specifične porabe električne energije glede na upoštevano optimizacijo.

Tabela 3: Specifična poraba energije v CČN Kranj brez lastne elektrike

Mesec v letu 2018	Povprečna vtočna vrednost BPK v mg/l	Povprečna vrednost pretoka na dotoku v m ³	Izračunana povprečna vrednost obremenitve v PE	Skupna poraba električne energije na CČN Kranj (kWh)	Povprečna specifična poraba električne energije na kWh / PE _{BPK}
januar	333,36	11.119,68	61.781	219.688	3,56
februar	269,00	13.300,43	59.630	195.466	3,28
marec	287,73	15.871,97	76.114	211.692	2,78
april	370,00	11.344,20	69.956	192.041	2,75
maj	298,00	10.179,81	50.560	198.077	3,92
junij	327,22	10.084,73	54.999	189.663	3,45
julij	286,35	9.100,32	43.431	185.987	4,28
avgust	284,32	9.062,48	42.944	177.798	4,14
september	319,40	9.877,33	52.580	173.712	3,30
oktober	336,00	10.491,58	58.753	186.582	3,18
november	290,00	12.715,13	61.456	185.443	3,02
december	312,13	7.764,35	40.391	199.472	4,94
skupaj				2.315.621	42,58

Vir: Hidroinženiring, d. o. o., marec 2019.

Tabela 4: Specifična poraba energije v CČN Kranj z upoštevanjem lastne elektrike

Mesec v letu 2018	Povprečna vtočna vrednost BPK v mg/l	Povprečna vrednost pretoka na dotoku v m ³	Izračunana povprečna vrednost obremenitve v PE	Poraba električne energije iz omrežja - nakup (kWh)	Povprečna specifična poraba električne energije na kWh / PE _{BPK}
januar	333,36	11.119,68	61.781	164.230	2,66
februar	269,00	13.300,43	59.630	153.136	2,57
marec	287,73	15.871,97	76.114	132.127	1,74
april	370,00	11.344,20	69.956	100.395	1,44
maj	298,00	10.179,81	50.560	100.805	1,99
junij	327,22	10.084,73	54.999	92.081	1,67
julij	286,35	9.100,32	43.431	98.867	2,28
avgust	284,32	9.062,48	42.944	94.416	2,20
september	319,40	9.877,33	52.580	115.826	2,20
oktober	336,00	10.491,58	58.753	111.340	1,90
november	290,00	12.715,13	61.456	102.804	1,67
december	312,13	7.764,35	40.391	104.738	2,59
skupaj				1.370.765	24,90

Vir: Hidroinženiring, d. o. o., marec 2019.

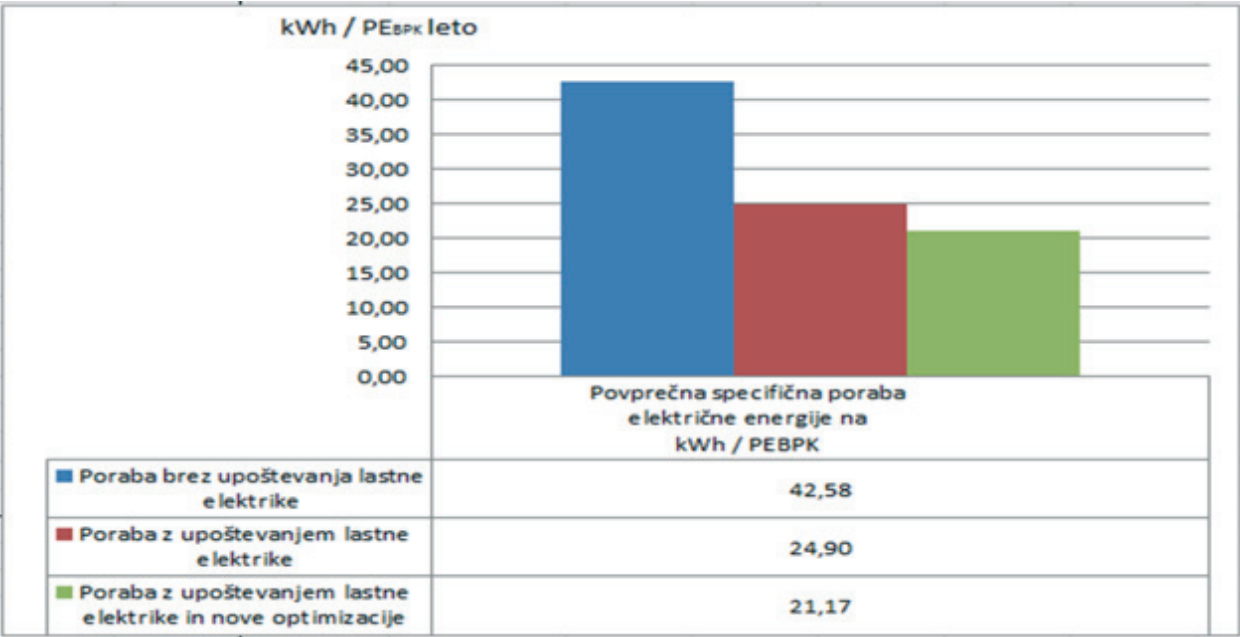


Tabela 5: **Specifična poraba energije v CČN Kranj s predvideno optimizacijo**

Mesec v letu 2018	Povprečna vtočna vrednost BPK v mg/l	Povprečna vrednost pretoka na dotoku v m3	Izračunana povprečna vrednost obremenitve v PE	Optimizirana poraba električne energije iz omrežja - nakup (kWh)	Povprečna specifična poraba električne energije na kWh / PE _{BPK}
januar	333,36	11.119,68	61.781	139.596	2,26
februar	269,00	13.300,43	59.630	130.166	2,18
marec	287,73	15.871,97	76.114	112.308	1,48
april	370,00	11.344,20	69.956	85.336	1,22
maj	298,00	10.179,81	50.560	85.684	1,69
junij	327,22	10.084,73	54.999	78.269	1,42
julij	286,35	9.100,32	43.431	84.037	1,93
avgust	284,32	9.062,48	42.944	80.254	1,87
september	319,40	9.877,33	52.580	98.452	1,87
oktober	336,00	10.491,58	58.753	94.639	1,61
november	290,00	12.715,13	61.456	87.383	1,42
december	312,13	7.764,35	40.391	89.027	2,20
skupaj				1.165.150	21,17

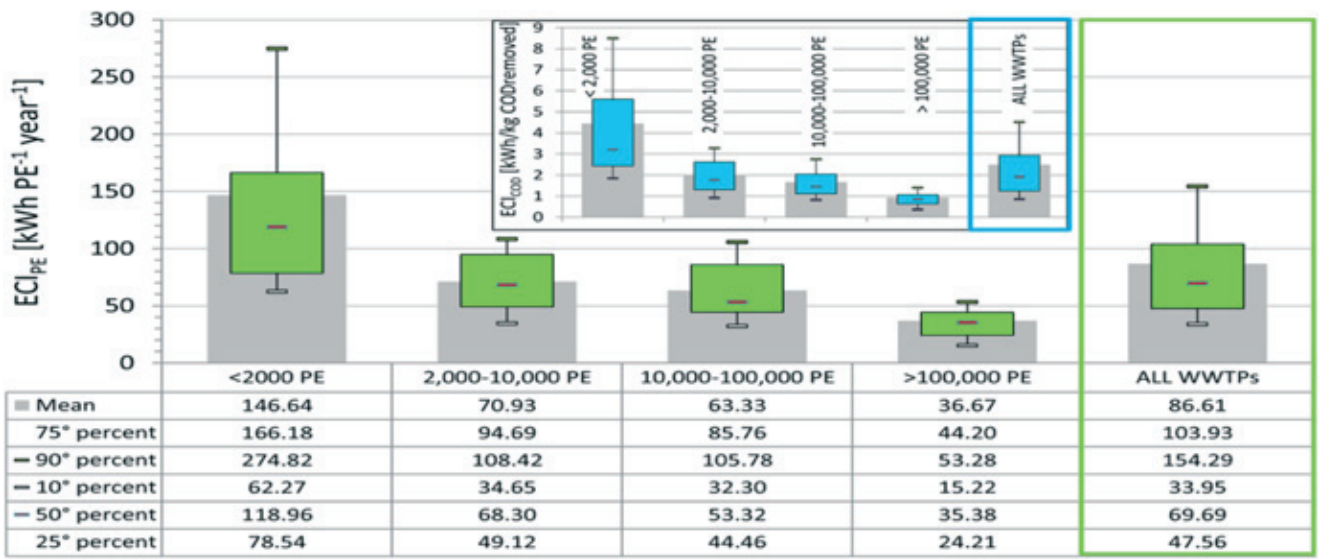
Vir: Hidroinženiring, d. o. o., marec 2019.

S pomočjo primerjave specifične porabe električne energije v CČN Kranj na različnih stopnjah optimizacije smo dobili kakovosten podatek, s katerim lahko izvedemo primerjavo tudi z drugimi podobnimi čistilnimi napravami po svetu. Za primer smo vzeli statistične podatke čistilnih naprav v sosednji Italiji (slika 9) in Sloveniji (tabela 6) ter prišli do zanimivih ugotovitev. CČN Kranj bi bila v osnovni izvedbi brez izvedenih kogeneracijskih enot glede na statistične podatke primerljiva s čistilnimi napravami v Italiji. Če upoštevamo, da je bila v CČN Kranj že upoštevana zelo kakovostna optimizacija s proizvodnjo bioplina ter uporabo kogeneracijskih enot, dobimo bistveno nižji podatek, pod 25 kWh/PE na leto. Z našo dodatno predlagano optimizacijo bi se poraba še znižala na 21,2 kWh/PE na leto.



Slika 7: Primerjalni graf specifične porabe električne energije v CČN Kranj

Vir: Hidroinženiring, d. o. o., marec 2019.



Slika 9: Specifična poraba energije italijanskih čistilnih naprav odpadnih vod

Vir: Vaccari, Foladori, Nembrini in Vitali, 2018.

Tabela 6: **Specifična poraba energije slovenskih čistilnih naprav odpadnih vod**

Komunalna čistilna naprava	Projektirana zmogljivost	Povprečna obremenitev	poraba električne energije	specifična poraba električne energije	Predvidena specifična poraba električne energije po nemškem standardu
Leto 2018	PE	(%)	(kWh/leto)	(kWh/PE _{BPK} /leto)	(kWh/PE _{BPK} /leto)
1. čistilna naprava*	6.600	120,1	221.659,00	30,43	47,0
2. čistilna naprava	14.500	159,5	490.613,00	26,18	41,8
3. čistilna naprava	12.000	57,5	319.598,00	59,12	42,9
4. čistilna naprava*	4.000	66,6	175.057,00	94,4	51,0
5. čistilna naprava	20.000	157,0	750.640,00	33,66	39,8
6. čistilna naprava	360.000	100,7	11.361.328,00	31,38	25,7
7. čistilna naprava	100.000	100,2	3.706.791,00	37,69	31,2
8. čistilna naprava	28.000	53,8	651.947,00	48,88	37,8
9. čistilna naprava	95.000	59,0	1.370.765,00	24,9	31,5

* meritve se opravljajo samo 4x letno

Vir: Arhivi nekaterih slovenskih čistilnih naprav-Mulec, julij 2019.



4. PREGLED KAZALNIKOV UČINKOVITOSTI IN USPEŠNOSTI

Tabela 7: **Ekonomski kazalniki**

Ekonomski kazalci	Investicija pri izračunani diskontni stopnji $r = 5,42\%$	Investicija pri upoštevanju tveganj in diskontni stopnji $r = 5,42\%$
Naložba (v EUR)	67.850,00	80.000,00
Stroški (v EUR)	59.200,00	109.200,00
Prihodki (v EUR)	320.240,60	274.394,40
Sedanja vrednost projekta (v EUR) pri $r = 5,42\%$	131.717,51	46.318,00
Interna stopnja donosnosti ISD (v %)	39,07	17,437
1. Odplačilna doba (v letih)	2,5	3,26
2. Kazalnik gospodarnosti in ekonomičnosti $E = (v\%)$	2,19	1,29
3. Kazalnik donosnosti in rentabilnosti naložbe $D = (v\%)$	194,13	57,9
4. Kazalnik donosnosti odhodkov $Do = (v\%)$	119,10	28,74

Vir: Izračun Mulec, marec 2019.

V tabeli 7 je prikazana analiza posameznih ekonomskih kazalnikov za predvideno življenjsko dobo 10 let z variantama optimalne investicije ter investicije s predvidenimi možnimi tveganji, ki se v tovrstni industriji lahko zgodijo. Osnovna investicija kaže pozitivno in zelo uspešno rešitev, ki bi se ob predvidenih aktivnostih povrnila že v 2,5 leta.

5. ZAKLJUČEK

Primarni cilj naloge je bil na podlagi raziskovalnega dela ugotoviti trenutno učinkovitost delovanja in prepoznati realne možnosti ter z ustrezno nadgradnjo ali dodelavo obstoječe tehnološke opreme (pod pogojem ekonomsko še upravičene investicije) doseči kar največje znižanje obratovalnih stroškov. Treba je poudariti, da je naprava relativno nova, zelo sodobno zasnovana in da že v osnovni tehnološki izvedbi vsebuje določene optimizacije, npr. izrabo bioplina ter sproizvodnjo toplotne in električne energije, kar jo uvršča med najvarčnejše naprave v državi. Omenjeno učinkovitost pri porabi električne energije v letu 2018 smo primerjali s statistično obdelanimi podobnimi napravami v Sloveniji in primerjalno s podobnimi napravami v sosednji Italiji. Na podlagi pridobljenih rezultatov CČN Kranj dosega odličnih $SP_{ee} < 25$ kWh/PE/leto. Z našo dodatno predlagano optimizacijo pa bi se poraba predvidoma še znižala na $SP_{ee} < 21,2$ kWh/PE/leto.

Finančni izračun je pokazal ekonomsko upravičenost predlagane nadgradnje tudi v primeru upoštevanja nekoliko slabših okoliščin in določenih nepredvidenih dogodkov. Doba vračanja naložbe v optimistično zastavljenem načrtu je 2,5 leta, pri upoštevanju določenih tveganj

in negotovosti pa se ta doba podaljša na še vedno sprejemljiva 3,26 leta. Na ugodno dobo vračanja naložbe zelo pripomore tudi dodatni vir dohodkov ob nadgradnji obstoječega generatorja v virtualno elektrarno.

Skrbno spremljanje sodobnih trendov pri učinkoviti rabi energije ter obnovljivih virov omogoča nadgradnjo znanja za uporabo novih tehnologij in organizacijskih ukrepov, ki za doseganje enakih ali celo boljših učinkov zahtevajo manj energije.

LITERATURA IN VIRI

1. Akt o določitvi metodologije za določanje cen sistemskih storitev. Uradni list RS, št. 15/18 in 20/19, neuradno prečiščeno besedilo št. 1.
2. Akt o metodologiji za določitev regulativnega okvira in metodologiji za obračunavanje omrežnine za elektrooperaterje. Uradni list RS, št. 66/15, 105/15, 61/16 in 46/18. Neuradno prečiščeno besedilo št. 2.
3. Aqua consult GmbH, 2013. Upgrading of the Kranj Waste Water Treatment Plant, Concept Sizing of the Main Treatment Components. Interna dokumentacija na projektu izdelave projektne tehnične dokumentacije za nadgradnjo CČN Kranj.
4. Bajželj, B., 2016. Načrt gospodarjenja z blatom. Dostopno na: https://www.komunala-kranj.si/sites/default/files/public/4_Na%C4%8Drt%20gospodarjenja%20z%20blatom_2017_2020.pdf [23. 8. 2019].
5. Bojnec, Š. in Papler, D., 2013. Biogas energy development in Slovenia. Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, ISSN 1584-2665, (2013), tome 9, fasc. 1, str. 77-86, tabele. Dostopno na: https://www.researchgate.net/publication/280918358_Biogas_energy_development_in_Slovenia [23. 8. 2019].
6. Cigre XX, 2015. Uporaba dizel električnih agregatov za terciarno regulacijo frekvence. 12. konferenca slovenskih elektroenergetikov, Portorož 2015. Dostopno na: <https://www.cigre-cired.si/referat/uporaba-dizel-elektricnih-agregatov-za-terciarno-regulacijo-frekvence> [11. 2018].
7. COMteh, d. o. o., 2018. Internetna stran Biološko čiščenje. Dostopno na: <http://www.comteh.si/biološko-ciscenje.html> [23. 8. 2019].
8. Čebokli, Z., 2019. Internetna stran podjetja AKC – izdelava poslovnih načrtov, področje investicije. Dostopno na: <http://www.akc.si/investicije.php> [23. 8. 2019].
9. ELES, d. o. o., 2019. Rezultati javne dražbe za terciarno regulacijo frekvence za januar 2019. Dostopno na: <https://www.eles.si/obratovanje/novice-za-poslovne-uporabnike/ArticleID/14096/Rezultati-javne-drazbe-za-terciarno-regulacijo-frekvence-za-januar-2019> [28. 3. 2019].
10. Energetski zakon EZ-1. Uradni list RS, št. 17/14, 81/15. Neuradno prečiščeno besedilo št. 1.
11. German Association for Waterm Wastewater and Waste (DWA), 2015. Usposobljenost osebja za delo na čistilni napravi. Theodor-Heuss-Allee 17, 53773 Hennef, Germany, Edition 2015, prevod Slovensko društvo za zaščito voda.
12. Habjan, V., 2014. Dobre izkušnje virtualne elektrarne skupine Elektra Ljubljana. Naš stik. Dostopno na: <http://www.nas-stik.si/1/Novice/novice/tabid/87/ID/2449/Dobre-izkusnje-virtualne-elektrarne-skupine-Elektra-Ljubljana.aspx> [23. 8. 2019].
13. Hidroinženiring, d. o. o., 2013a. PGD, 4-3 Načrt električnih inštalacij in električne opreme – tehnološka oprema, št. PGD – 6C11303-10. Interna dokumentacija.
14. Hidroinženiring, d. o. o., 2013b. PZI, 4-3 Načrt električnih inštalacij in električne opreme – tehnološka oprema, št. PZI – 6C11303-20. Interna dokumentacija.
15. Kemija.net, 2018. Obdelava blata, ki nastaja na bioloških čistilnih napravah. Dostopno na: https://kemija.net/e-gradiva/odvajanje_in_ciscenje_odpadnih_voda/5_0_Obdelava_blata_ki_nastaja_na_bioloških_cistilnih_napravah/anaerobna_presnova.html [23. 8. 2019].
16. Konzorcij Veolia Voda, d. o. o., Aquaconsult GmbH in IEI, d. o. o., 2012. IDZ, Nadgradnja CČN Kranj, Konzorcija Veolia Voda, aqua consult, IEI, št. pr. 110322/2: Kranj_IDZ_AC_02_13321 s podpisi.doc.
17. Papler, D., 2005. Interna stopnja donosnosti, kriterij ekonomskega optimiranja elektroenergetske infrastrukture z vidika gospodarskega inženirstva. 7. konferenca slovenskih elektroenergetikov, Velenje 2005. Dostopno na: https://www.researchgate.net/publication/241037211_Interna_stopnja_donosno



- sti_kriterij_ekonomskega_optimiranja_elektroenergetske_infrastrukture_z_vidika_gospodarskega_inu-
enirstva [23. 8. 2019].
18. Pravila za izvajanje izravnalnega trga z elektriko. Uradni list RS, št. 97/14, 28/17. Neuradno prečiščeno besedilo št. 1.
19. SODO, d. o. o., 2010. Navodila za priključevanje in obratovanje elektrarn inštalirane električne moči do 10 MW. Dostopno na: https://www.sodo.si/_files/366/SONDO%202011%20Priloga%205.pdf [23. 8. 2019].
20. Turk, I., 2019. Pojmovnik. Zveza računovodij, finančnikov in revizorjev Slovenije (RFR). Dostopno na: <https://www.zvezarfr.si/pripomocki/slovar?pojem=ponderirana%20aritmeti%C4%8Dna%20sredina> [23. 8. 2019].
21. Sistemska obratovalna navodila za distribucijsko omrežje električne energije. Uradni list RS, št. 41/11, 17/14 - EZ-1.
22. Štepančič, M. in Kocijan, J., 2014. Prediktivno vodenje nestabilnega sistema s sprotno identifikacijo verjetnostnega modela. Ventil. Dostopno na: <http://www.revija-ventil.si/data/strokovni-clanki/20-2014-5/stepancic.pdf> [23. 8. 2019].
23. Uredba o odvajanju in čiščenju komunalne odpadne vode. Uradni list RS, št. 98/15 in 76/17. Neuradno prečiščeno besedilo št. 1.
24. Vaccari, M., Foladori P., Nembrini S., in Vitali F., 2018. Benchmarking of energy consumption in municipal wastewater treatment plants – a survey of over 200 plants in Italy. Water Science & Technology. Dostopno na: <https://iwaponline.com/wst/article/77/9/2242/38630/Benchmarking-of-energy-consumption-in-municipal> [23. 8. 2019].
25. Wikipedija, 2018a. Algoritem. Dostopno na: <https://sl.wikipedia.org/wiki/Algoritem> [23. 8. 2019].
26. Wikipedija, 2018b. Čistilna naprava. Dostopno na: https://sl.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cistilna_naprava [12. 2018].