

MIESTŲ NUOTEKŲ VALYKLŲ BŪVIO CIKLO VERTINIMAS

Estera ŠNEIDERAITIENĖ, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: e.sneideraitiene@vdu.lt

Santrauka

Šiame straipsnyje analizuojamas keturių miestų (A, B, C ir D) nuotekų valyklų veikimo efektyvumas ir jų poveikis aplinkai, remiantis būvio ciklo vertinimo (BCV) metodologija. Tyrimas apima pagrindinius nuotekų valyklų veikimo procesus: biocheminio deguonies suvartojimo per 7 paras (BDS_7), bendrojo fosforo (P_b) ir bendrojo azoto (N_b) valymo efektyvumą, elektros energijos naudojimą, dumblo tvarkymą ir transportavimą. Pagal gautus rezultatus galima teigti, kad visos nagrinėtos nuotekų valyklos užtikrina aukštą organinių medžiagų šalinimo efektyvumą ($>92\%$ BDS_7), tačiau pastebėti reikšmingi skirtumai pagal azoto ir fosforo šalinimo rodiklius. Būvio ciklo vertinimas parodė, kad B ir C miestų nuotekų valyklos pasižymi didžiausiu elektros energijos suvartojimu, o tai tiesiogiai lemia didesnį poveikį visuotiniam atšilimui. Dumblo apdorojimas identifikuotas kaip reikšmingiausias poveikio aplinkai šaltinis, ypač eutrofikacijos ir rūgštėjimo kategorijose, didžiausią įtaką darantis C miesto nuotekų valykloje. Tyrimo rezultatai rodo, kad dumblo apdorojimo optimizavimas ir energijos vartojimo mažinimas gali reikšmingai pagerinti nuotekų valyklų aplinkosauginius rodiklius.

Reikšminiai žodžiai: nuotekų valykla, efektyvumas, būvio ciklo vertinimas.

Įvadas

Nuotekų valyklos (NV) yra esminė miestų infrastruktūros dalis, atsakinga už tinkamą nuotekų tvarkymą ir jų poveikio aplinkai mažinimą. Tačiau nuotekų valymo procesas pats sukelia poveikį aplinkai – sunaudojami dideli energijos kiekiai, susidaro perteklinis dumblas, o į atmosferą ir vandenį patenka įvairūs teršalai (Hospido et al., 2007).

Pastaraisiais dešimtmečiais būvio ciklo vertinimo metodika (angl. Life Cycle Assessment, LCA) tapo viena pagrindinių priemonių aplinkosaugos vertinime, nes ji leidžia įvertinti nuotekų valyklų poveikį aplinkai per visą jų eksploatavimo laikotarpį (Emmerson et al., 1995; Gallego et al., 2008; Pasqualino et al., 2010). Ši metodika ne tik identifikuoja didžiausią poveikį sukeliančius procesus, bet ir padeda optimizuoti veiklą, siekiant mažesnio išteklių naudojimo bei taršos mažinimo.

Būvio ciklo vertinimas padeda įvertinti klimato atšilimo potencialo per 100 metų rūgštėjimo, eutrofikacijos, ozono sluoksnio mažėjimo, abiotinio nykimo, toksiškumo žmogui ir sausumos ekotoksiškumo bei kitus aspektus. BCV taip pat yra plačiai naudojamas vertinant atliekų tvarkymo sistemas, scenarijus ir strategijas, siekiant nustatyti svarbiausius būvio ciklo etapus, pagrindinius medžiagų/energijos srautus, taip pat tobulinimo galimybes iš aplinkosauginės perspektyvos (Tumoševičiūtė, Zigmontienė, 2018).

Svarbus nuotekų valyklų efektyvumas pagal BDS_7 , bendrąjį azotą (N_b) ir bendrąjį fosforą (P_b), nes šie rodikliai kelia vandens telkinių eutrofikacijos ir rūgštėjimo riziką (Flores-Alsina et al., 2014).

Tyrimo tikslas – įvertinti keturių miestų (A, B, C ir D) nuotekų valyklų poveikį aplinkai atlikus būvio ciklo vertinimą.

Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Palyginti keturių miestų nuotekų valyklų technologinius procesus.
2. Apskaičiuoti ir įvertinti nagrinėjamų nuotekų valyklų veikimo efektyvumą pagal šiuos rodiklius: BDS_7 , bendrąjį azotą (N_b) ir bendrąjį fosforą (P_b).
3. Atlikti nuotekų valyklų būvio ciklo vertinimą pagal šiuos veiksnus: nuotekų valymo procese susidariusį dumblą, transporto ir elektros energijos sąnaudas.

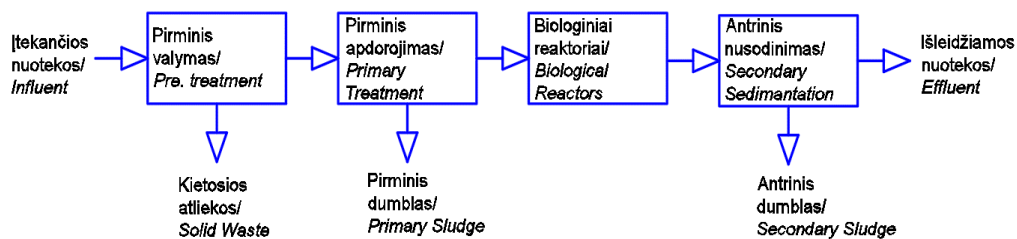
Tyrimų objektas ir metodai

Tyrimo objektas – keturių Lietuvos miestų (A, B, C, D) nuotekų valyklos, kurios skiriasi savo dydžiu bei tam tikrais technologiniais sprendimais. Remiantis nuotekų tvarkymo reglamentu (Nuotekų tvarkymo..., 2019) nuotekų valyklos skirstomos pagal jų dydį (gyventojų ekvivalentą, GE) į kelias kategorijas. Tyrime analizuojamos nuotekų valyklos priskiriamos šioms kategorijoms:

- A ir D miestų nuotekų valyklos – 10 000–100 000 GE turinčių aglomeracijų kategorijai (Nuotekų tvarkymo..., 2019);
- B ir C miestų nuotekų valyklos – daugiau nei 100 000 GE turinčių aglomeracijų kategorijai.

Visose nagrinėjamose valyklose nuotekos valomos mechaniniu ir biologiniu būdais, tačiau jų elektros energijos suvartojimas, dumblo tvarkymo metodai ir transportavimo procesai yra skirtingi.

1 paveiksle pateikta principinė miestų nuotekų valyklų technologinė schema.



1 pav. Miestų nuotekų valyklų principinė technologinė schema (McNamara et. al., 2016)

Fig. 1. Principal Technological Scheme of Urban Wastewater Treatment Plants (McNamara et. al., 2016)

Nuotekų valyklų būvio ciklo vertinimas leidžia įvertinti jų poveikį aplinkai nuo pradinės stadijos iki galutinio atliekų šalinimo.

Tyrime analizuoti šie pagrindiniai aspektai:

- Nuotekų valymo efektyvumas – vertinama, kiek efektyviai pašalinami organiniai teršalai (BDS₇), bendrasis azotas (N_b) ir bendrasis fosforas (P_b).
- Energijos suvartojimas – analizuojama, kiek elektros energijos sunaudojama nuotekoms valyti.
- Dumblo tvarkymas – vertinami dumblo susidarymo kiekiai ir jo apdorojimo būdai.
- Transportavimo sąnaudos – skaičiuojami dumblo ir cheminių reagentų pervežimai.

Nuotekų valymo efektyvumas apskaičiuotas pagal formulę (Nuotekų..., 2019):

$$E = \frac{c - c_0}{c} \cdot 100, \%,$$

Čia E – nuotekų valymo efektyvumas %;

c – valomų nuotekų taršos koncentracija mg/l;

c_0 – valytų nuotekų taršos koncentracija mg/l.

Nuotekų valyklų efektyvumai pagal BDS₇, N_b ir P_b palyginti tarpusavyje ir su Nuotekų tvarkymo reglamente (Nuotekų..., 2019) nurodytomis minimaliomis išvalymo efektyvumo reikšmėmis, taikomomis atitinkamo dydžio valykloms.

Būvio ciklas vertintas remiantis ISO 14044: 2006 ir tarptautiniu gyvavimo ciklo duomenų sistemos vadovu (European Commission, 2010).

Nuotekų valyklų būvio ciklui vertinti buvo naudojama *openLCA* programinė įranga – atvirojo kodo ir nemokama LCA analizės platforma, leidžianti modeliuoti procesus, analizuoti duomenis ir vertinti jų poveikį aplinkai. Duomenų bazės ir metodai buvo importuoti iš *openLCA Nexus* – oficialios duomenų platinimo platformos, kurioje centralizuotai pateikiamos įvairios pasaulinės LCA duomenų bazės. Vertinimui pasirinktas *IMPACT World+* metodas, integruotas per „OpenLCA LCIA Methods“ paketą. Juo buvo įvertintas poveikis gėlo vandens eutrofikacijai, rūgštėjimui, šiltnamio efektui, oro taršai ir kiti svarbūs aplinkosauginiai rodikliai. Šis metodas plačiai taikomas atliekant aplinkosaugines analizes įvairiuose sektoriuose, įskaitant nuotekų valymo sritį.

Darbo eigoje buvo surinkti duomenys apie nuotekų valymo procese susidariusius dumblo kiekius, elektros energijos suvartojimą ir transportavimą kiekvienoje iš keturių tirtų miestų (A, B, C ir D) nuotekų valyklų. Duomenys suvesti į „Microsoft Excel“ lentelę ir pritaikyti modeliavimui programa *OpenLCA 2.3*.

Modelio sudarymui visi procesai buvo sujungti į vieną bendrą būvio ciklo modelį, kuris leido įvertinti skirtingų procesų įtaką aplinkosauginiams rodikliams, tokiems kaip gamtinių išteklių sunaudojimas, šiltnamio efektą sukeliančių dujų (CO₂) emisijos ir eutrofikacija.

OpenLCA yra vizualizacijos priemonė, leidžianti analizuoti skirtingų veiksmų įnašą į bendrą poveikį aplinkai. Šioje aplinkoje pateikiama struktūrinė analizė, kuri rodo, kaip skirtingi sistemos elementai prisideda prie pasirinktų poveikio kategorijų. Analizėje gaunami rezultatai parodo, kiek kiekvienas veiksnys prisideda prie bendro poveikio (išreiškiamas procentais). Matoma, kurie veiksniai turi didžiausią poveikį, ir kaip jie susiję tarpusavyje. Analizės rezultatams apibendrinti naudojama hierarchinė struktūra – didžiausią poveikį turintys veiksniai yra viršuje, o mažesni – žemiau. Galima nustatyti, kuris nuotekų valyklos procesas sukelia didžiausią taršą ir palyginti, kuri NV generuoja didžiausią šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją. Priimant sprendimus dėl taršos mažinimo, matoma, ar apsimoka labiau optimizuoti energijos vartojimą, ar keisti dumblo apdorojimo būdus ir t.t.

Analizuoti keturi veiksniai: nuotekų valymo procese susidaręs dumblas, transportas (kuro sąnaudos dumblo ir cheminių reagentų pervežimui), elektros energijos sąnaudos nuotekų valymui ir dumblo apdorojimui bei cheminių reagentų naudojimas valymo procese. Būvio ciklas vertintas pagal 10 poveikio kategorijų.

Siekiant suvienodinti pradinis duomenis visoms keturioms nuotekų valykloms (valomų nuotekų debitai skirtingi kiekvienoje valykloje), duomenys perskaičiuoti 1 m³ išvalytų nuotekų.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Keturių miestų (A, B, C ir D) nuotekų valyklose vykdomų nuotekų valymo ir dumblo apdorojimo procesų palyginimas pateiktas 1 lentelėje. Analizuojamos valyklos skiriasi ne tik dydžiu (GE kategorija), bet ir pasirinktomis dumblo apdorojimo technologijomis, kurios gali turėti įtakos jų poveikiui aplinkai.

1 lentelė. Procesų, vykdomų tiriamose nuotekų valyklose, palyginimas

Table 1 Comparison of processes carried out in the investigated wastewater treatment plants

Eil.Nr	Procesai <i>The processes</i>	A	B	C	D
1	Įtekančios nuotekos <i>Influent wastewater</i>	+	+	+	+
	Išankstinis valymas <i>Preliminary treatment</i>	+	+	+	+
	Pirminis valymas <i>Primary treatment</i>	+	+	+	+
	Chemikalų naudojimas <i>Use of chemicals</i>	+	+	+	+
	Susidariusių kietųjų dalelių apdorojimas ir transportavimas <i>Transportation and treatment of generated solid particles</i>	+	+	+	+
2	Antrinis valymas (aktyviojo dumblo procesas) <i>Secondary treatment (activated sludge process)</i>	+	+	+	+
	Valytų nuotekų išleidimas į vandens šaltinį <i>Discharge of treated wastewater into the receiving water body</i>	+	+	+	+
3	Dumblo tankinimas <i>Sludge thickening</i>	+	+	+	-
	Dumblo anaerobinis apdorojimas <i>Anaerobic digestion of sludge</i>	+	+	+	-
	Biodujų produkcija ir vidinis naudojimas <i>Biogas production and internal utilization</i>	+	+	+	-
	Dumblo sausinimas (centrifugos, kiti) <i>Dewatering of digested sludge (centrifuges, others)</i>	+	+	+	-
	Cheminių reagentų produkcija ir transportavimas dumblo sausinimui <i>Production and transport of chemical agents for dewatering</i>	+	+	+	+
4	Elektros energijos suvartojimas atmetus pagalbinį servisą, bendrą apšvietimą <i>Electricity consumption excluding auxiliary services and general lighting</i>	+	+	+	+
5	Dumblo sandėliavimas <i>Storage of sludge</i>	+	+	+	+
	Džiovinimas <i>Drying</i>	+	+	+	-
	Panaudojimas žemės ūkiui (kompostavimas) <i>Application to agriculture (composting)</i>	+	+	+	-

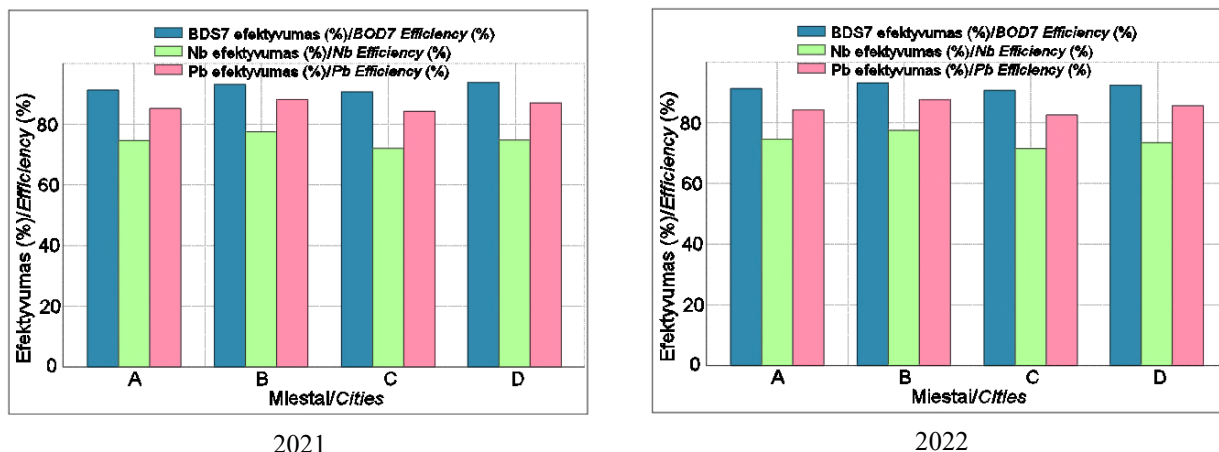
Kaip matyti 1 lentelėje, analizuojamose A, B ir C nuotekų valyklose taikomi analogiški valymo procesai. A, B, C miestų nuotekų valyklose dumblo apdorojimui taikomas anaerobinis apdorojimas, tačiau D miesto valykloje papildomai naudojami cheminiai reagentai, kurie skirti dumblo sausinimui. Šis metodas leidžia efektyviau pašalinti vandenį iš dumblo, sumažinti jo tūrį ir pagerinti tolesnį panaudojimą. Be to, D miesto valykloje dumblas nėra kompostuojamas ar džiovinamas, kaip kai kuriose kitose valyklose, o yra sandėliuojamas arba transportuojamas į galutines tvarkymo vietas. Tai gali turėti įtakos logistikai ir poveikiui aplinkai, nes skiriasi tiek dumblo drėgnumas, tiek jo stabilumas saugojimo metu.

Visų keturių nagrinėtų nuotekų valyklų efektyvumas pagal BDS₇, N_b ir P_b 2021–2022 m. laikotarpiu buvo stabilus, tačiau matomi tam tikri skirtumai tarp miestų valyklų. Visose valyklose pasiektas aukštas (>92 %) BDS₇ sumažinimas, tačiau efektyviausiai teršalus pašalina D miesto valykla (94,81 % 2022 m.), o mažiausias efektyvumas stebimas C miesto valykloje (92,94 % 2021 m.).

Bendrojo azoto šalinimo efektyvumas svyruoja nuo 69,09 % (B valykla, >100 000 GE, 2021 m.) iki 96,2 % (A valykla, 10 000–100 000 GE, 2022 m.). Pagal Nuotekų tvarkymo reglamentą (Nuotekų tvarkymo..., 2019), nuotekų valykloms, kurių dydis viršija 100 000 GE (t.y. B ir C), taikomas ne mažesnis kaip 70 % bendrojo azoto šalinimo reikalavimas, kuris šiose valyklose yra užtikrinamas. Mažesnėse valyklose (D ir A, 10 000–100 000 GE) stebimas didesnis efektyvumas, kuris gali būti susijęs su mažesne apkrova.

Bendrojo fosforo šalinimo efektyvumas taip pat yra artimas Nuotekų tvarkymo reglamento reikalavimams (~85–87 %), tačiau C ir D valyklose fiksuoti nedideli nukrypimai, rodantys nežymiai mažesnį efektyvumą. Nors visose tirtose valyklose taikoma iš esmės vienoda technologinė schema, nežymūs efektyvumo skirtumai gali būti siejami su

eksploatacinėmis sąlygomis, procesų apkrova ar naudojamų reagentų dozavimu. Pagal Nuotekų tvarkymo reglamentą visos tirtos valyklos atitinka minimalius išvalymo normatyvus. Beveik visose valyklose 2022 m. stebimas nedidelis valymo efektyvumo padidėjimas, kuris gali būti susijęs su natūraliais eksploatacijos ir aplinkos veiksniais.



2 pav. Nuotekų valyklų efektyvumas 2021–2022 m.

Fig. 2. Efficiency Of Wastewater Treatment Plants In 2021-2022

Šiltnamio efektą sukeliančios dujos ir iškastinio kuro naudojimas. Didžiausias visuotinio atšilimo potencialas (kg CO₂ ekv.) nustatytas C valykloje – 8,250 kg CO₂ ekv., tuo tarpu mažiausias rodiklis užfiksuotas B valykloje – 6,910 kg CO₂ ekv. Tai gali būti siejama su didesniu elektros energijos suvartojimu C valykloje, kurioje valomas didžiausias nuotekų kiekis ir yra didesnės apkrovos. A valykloje fiksuotas didžiausias bendras energijos suvartojimas – 102,500 MJ, o mažiausias – B valykloje (98,300 MJ). Šie skirtumai gali būti susiję su skirtingomis energijos tiekimo strategijomis, naudojamomis technologijomis ar valyklų apkrovomis. Didesnis energijos suvartojimas gali reikšti intensyvesnius valymo procesus arba mažesnę sistemų efektyvumą, tuo tarpu mažesnis rodiklis gali rodyti optimalesnę energijos naudojimą arba didesnę atsinaujinančių energijos šaltinių dalį.

Skirtingų miestų nuotekų valyklų bendro poveikio 1 m³ išvalytoms nuotekoms rezultatų (sudaro dumblas, transportas ir nuotekų valymui sunaudojama elektros energija) palyginimas pateiktas 2 lentelėje.

2 lentelė. Bendro poveikio aplinkai rezultatai 1 m³ valytų nuotekų miestų A, B, C ir D nuotekų valyklose

Table 2. Overall environmental impact results per 1 m³ of treated wastewater in urban wastewater treatment plants A, B, C and D

Poveikio kategorija/ Impact category	Matavimo vienetai/ Units of measurement	Miestų Nuotekų valyklos/ Urban wastewater treatment plants			
		A	B	C	D
Abiotinio išsekimo potencialas/Abiotic depletion potential	kg Sb eq	0,0001	0,00009	0,00012	0,00008
Abiotinio išsekimo potencialas (iškastinis kuras)/ Abiotic depletion potential (fossil resources)	MJ	102,500	98,300	110,200	95,600
Visuotinio atšilimo potencialas/Global warming potential	kg CO ₂ eq	7,420	6,910	8,250	6,750
Ozono sluoksnio nykimo potencialas/Ozone depletion potential	kg CFC-11 eq	2,5x10 ⁻⁵	2,3x10 ⁻⁵	2,7x10 ⁻⁵	2,2x10 ⁻⁵
Toksiškumas žmonėms/Human toxicity potential	kg 1,4-DB eq	7,800	6,950	8,500	6,600
Ekotoksiškumas gėliams vandens telkiniams/Freshwater ecotoxicity potential	kg 1,4-DB eq	4,920	4,520	5,150	4,380
Ekotoksiškumas sausumos ekosistemoms/Terrestrial ecotoxicity potential	kg 1,4-DB eq	0,031	0,027	0,035	0,026
Fotocheminė oksidacija/Photochemical ozone formation potential	kg C ₂ H ₄ eq	0,002	0,0018	0,0022	0,0017
Rūgštėjimas/Acidification potential	kg SO ₂ eq	0,046	0,041	0,050	0,039
Eutrofikacija/Eutrophication potential	kg PO ₄ eq	0,026	0,024	0,028	0,023

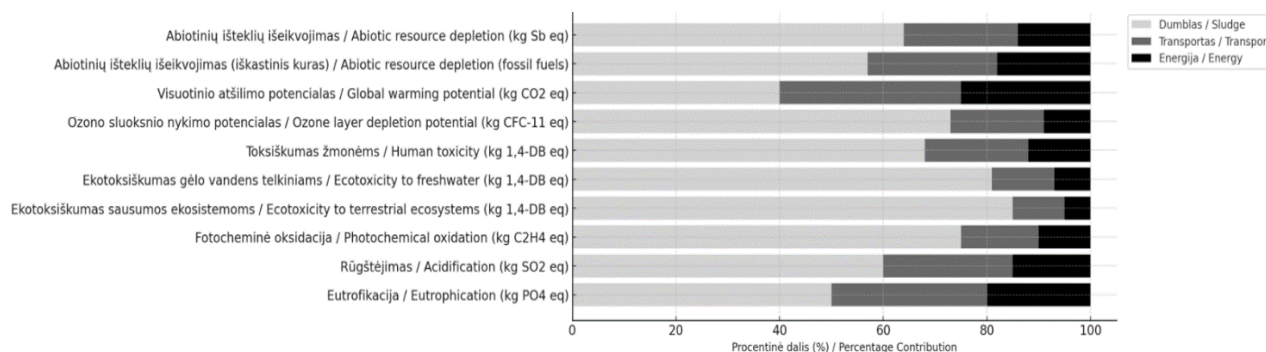
Ozono sluoksnio nykimo potencialas. Jo vertės yra panašios visose valyklose, tačiau mažiausias poveikis stebimas B valykloje – 2,3×10⁻³ kg CFC-11 ekv., o didžiausias – C valykloje (2,7×10⁻³ kg CFC-11 ekv.).

Toksiškumas žmonėms ir ekotoksiškumas skiriasi tarp nagrinėtų valyklų. Didžiausias poveikis nustatytas C valykloje – 8,500 kg 1,4-DB ekv., mažiausias – B valykloje (6,950 kg 1,4-DB ekv.). Šie skirtumai gali būti siejami su dumblo apdorojimo procesais ir naudojamais cheminiais reagentais, kurie gali generuoti papildomą taršą. Be to, ekotoksiškumo gėlo vandens telkiniams rodiklis yra didžiausias C valykloje (5,150 kg 1,4-DB ekv.), o mažiausias – B valykloje (4,520 kg 1,4-DB ekv.). Tai gali būti susiję su dumblo transportavimo intensyvumu ar skirtingais energijos gamybos procesais, kurie daro įtaką atmosferos ir vandens teršalų emisijoms.

Rūgštėjimo ir eutrofikacijos poveikis priklauso nuo dumblo apdorojimo procesų, energijos suvartojimo ir transporto sistemų veikimo. Rūgštėjimo rodiklis buvo aukščiausias C valykloje (0,050 kg SO₂ ekv.), o mažiausias – B valykloje (0,041 kg SO₂ ekv.). Šis skirtumas gali būti susijęs su energijos gamybos šaltiniais, nes iškastinio kuro deginimas sukelia sieros oksidų emisijas, kurios prisideda prie rūgštėjimo reiškinio (Bisinella et al., 2020).

Eutrofikacijos poveikis (kg PO₄ ekv.) taip pat buvo didžiausias C valykloje (0,028 kg PO₄ ekv.), o mažiausias B valykloje (0,024 kg PO₄ ekv.). Šie skirtumai gali būti siejami su dumblo apdorojimo metodais – intensyvesnis dumblo perdirbimas gali sumažinti į aplinką patenkančių maistinių medžiagų kiekį, o prastesnis dumblo tvarkymas gali lemti fosforo junginių patekimą į aplinką (Pasqualino et al., 2010). Taip pat transporto veiksnys gali turėti papildomą poveikį – didesnis pervežimų skaičius didina išmetamų teršalų kiekį, kuris taip pat gali prisidėti prie rūgštėjimo ir eutrofikacijos procesų (Wernet et al., 2016).

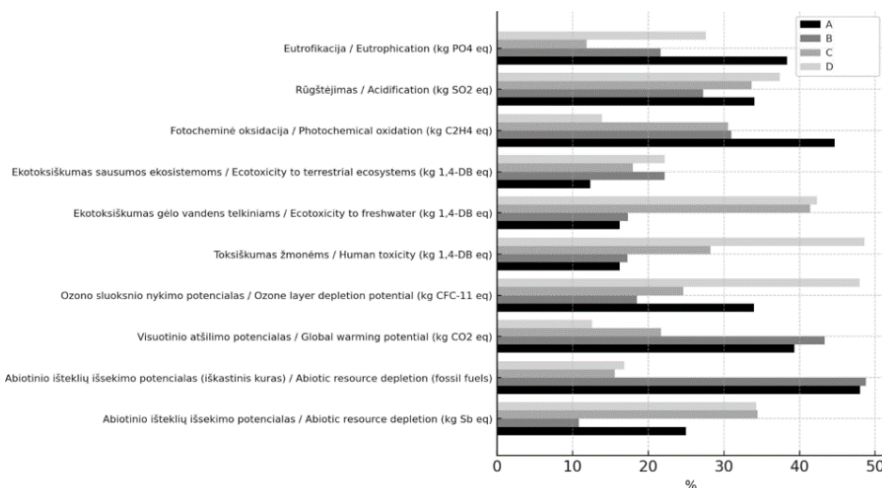
3 paveiksle pateikti C miesto nuotekų valyklos būvio ciklo vertinimo rezultatai pagal skirtingas poveikio kategorijas. Matyti, kad didžiausią įtaką visuotinio atšilimo potencialui daro energijos suvartojimas, kuris generuoja reikšmingą CO₂ emisiją. Dumblo apdorojimas dominuoja eutrofikacijos ir rūgštėjimo kategorijose, nes jame gali būti didelis maistinių medžiagų kiekis, prisidedantis prie šių procesų. Transporto poveikis yra palyginti mažesnis, tačiau jo indėlis pastebimas abiotinių išteklių eikvojimo rodikliuose, nes susijęs su kuro sąnaudomis. Ši analizė leidžia identifikuoti pagrindinius procesus, turinčius didžiausią poveikį aplinkai, ir pabrėžia dumblo tvarkymo bei energijos vartojimo optimizavimo svarbą siekiant sumažinti neigiamą poveikį aplinkai.



3 pav. C miesto nuotekų valyklos būvio ciklo vertinimas

3 pav. Life Cycle Assessment Of The Wastewater Treatment Plants in C City

4 paveiksle pateikiamas keturių analizuojamų nuotekų valyklų būvio ciklo vertinimo rezultatai pagal skirtingas poveikio kategorijas. Matyti, kad didžiausią eutrofikacijos ir rūgštėjimo poveikį turi A valykla, o tai gali būti susiję su didesniais dumblo tvarkymo ypatumais ir cheminių reagentų naudojimu. Visuotinio atšilimo potencialas didžiausias C valykloje, o tai gali rodyti intensyvesnę energijos vartojimą. Ozono sluoksnio nykimo potencialas ir toksiškumas žmonėms taip pat išsiskiria C valykloje, kas gali būti siejama su skirtingais cheminiais procesais.



4. pav. A, B, C, D nuotekų valyklų būvio ciklo vertinimas

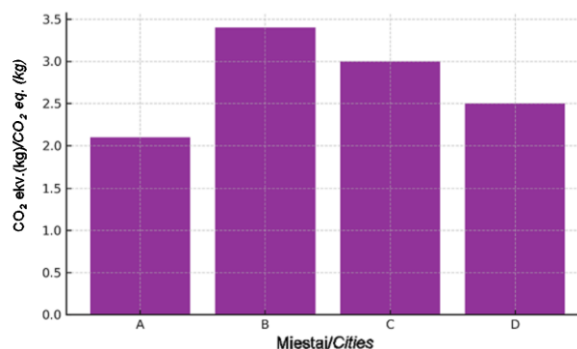
Fig. 4. Life Cycle Assessment of A, B, C, and D Wastewater Treatment Plants

Abiotinių išteklių eikvojimo rodiklis didžiausias A ir D valyklose, kas gali būti susiję su transportavimo ir kuro naudojimo skirtumais. Taip pat pastebima, kad fotocheminės oksidacijos poveikis skiriasi tarp valyklų, kas rodo nevienodą teršalų išmetimą į atmosferą dėl energijos gamybos ar transportavimo procesų.

Apibendrinant, poveikio kategorijų skirtumai tarp valyklų leidžia identifikuoti, kurios sritys reikalauja didesnio dėmesio siekiant mažinti poveikį aplinkai, ypač energijos vartojimo ir dumblo tvarkymo optimizavimo srityse.

5 paveiksle pateiktas trijų veiksnių (dumblo apdorojimo, energijos ir transporto) poveikis visuotinio atšilimo potencialui.

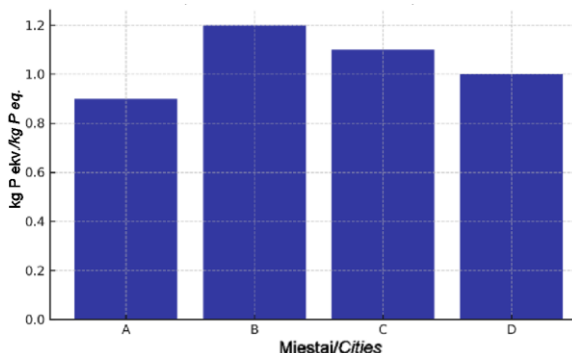
Diagramoje pateikiamas keturių miestų nuotekų valyklų indėlis į **visuotinio atšilimo potencialą**, kuris vertinamas pagal CO₂ emisijas. Matyti, kad didžiausią poveikį turi dumblo apdorojimo procesas, ypač iš miestų B ir C valyklose. Elektros energijos suvartojimo poveikis yra pastebimas, tačiau, lyginant su dumblu, jis yra mažesnis. Transportavimo įtaka visuotiniam atšilimui yra mažiausia.



5 pav. Nuotekų valyklų trijų veiksnių poveikis visuotinio atšilimo potencialui

Fig. 5. The Impact Of Three Wastewater Treatment Plant Factors On Global Warming Potential

6 paveiksle pateiktas trijų veiksnių (dumblo apdorojimo, energijos ir transporto) poveikis gėlo vandens eutrofikacijai.



6 pav. Nuotekų valyklų trijų veiksnių poveikis gėlo vandens eutrofikacijai

Fig. 6. Impact Of Three Wastewater Treatment Plant Factors On Freshwater Eutrophication

Vertinant eutrofikaciją matyti, kad atskirų valyklų veiksnių poveikis yra nežymus, tačiau dumblo tvarkymo intensyvumas lemia šių rodiklių augimą.

Emisijos, susijusios su transportavimu, nėra labai reikšmingos, lyginant su dumblo apdorojimo procesu. Tačiau logistikos optimizavimas galėtų dar labiau sumažinti emisijas, ypač anglies dvideginio išmetimus.

Nustatyta, kad analizuotas didžiausias neigiamas poveikis aplinkai visose analizuotose kategorijose, įskaitant rūgštėjimą (0,065 kg SO₂ eq) bei eutrofikaciją (0,036 kg PO₄ eq), yra C miesto nuotekų valykloje. Šioje valykloje apdorojamas didelis nuotekų kiekis, susidaro reikšmingai didesnis dumblo kiekis, tenkantis 1 m³ išvalytų nuotekų. Be to, C miesto NV sunaudoja didžiausią elektros energijos kiekį (kWh/m³).

Mažiausias neigiamas poveikis aplinkai stebimas A miesto NV, kur rūgštėjimas siekia 0,025 kg SO₂ eq, o eutrofikacija – 0,014 kg PO₄ eq, t. y. dvigubai mažiau nei C miesto nuotekų valykloje. Šis skirtumas gali būti susijęs su mažesniu apdorojamo dumblo kiekiu.

Analizuojant elektros energijos naudojimą matyti, kad didžiausios energijos sąnaudos fiksuojamas B ir C miesto NV. Didelis elektros energijos suvartojimas tiesiogiai prisideda prie klimato kaitos (CO₂ emisijų) ir rūgštėjimo rodiklių augimo. Kaip rodo tyrimai, mažesnės nuotekų valyklos neretai pasižymi didesnėmis specifinėmis energijos sąnaudomis, tai susiję su mažesniu apdorojamų nuotekų kiekiu ir mažiau optimizuotais procesais (Kuzmickienė, 2020). Todėl svarbu ieškoti efektyvesnių energijos naudojimo ir atsinaujinančių energijos šaltinių integravimo galimybių.

Atliktas būvio ciklo vertinimas parodė, kad didžiausias emisijas generuoja dumblo tvarkymas, ypač tose valyklose, kuriose dumblas nėra toliau perdirbamas ar naudojamas antrinėms reikmėms. Siekiant sumažinti poveikį, būtina didinti

dumblo apdorojimo efektyvumą. Transporto indėlis į bendrą poveikį yra mažesnis, tačiau optimizuojant logistiką būtų galima sumažinti emisijas, ypač susijusias su anglies dioksido išskyrimu.

Išvados

1. Keturių miestų nuotekų valyklų technologijų analizė parodė, kad visose valylose taikoma biologinio valymo aktyviuoju dumblo technologinė schema, tačiau skiriasi dumblo apdorojimo sprendimai.

2. Nuotekų valymo efektyvumo analizė pagal BDS₇, bendrąjį azotą (N_b) ir bendrąjį fosforą (P_b) rodo, kad visos tirtos valyklos atitinka Nuotekų tvarkymo reglamente nustatytus reikalavimus. Aukščiausias BDS₇ pašalinimo efektyvumas nustatytas D mieste (94,81 %), o didžiausias bendrojo azoto šalinimo efektyvumas – A mieste (96,2 %). C ir D miestų valyklos pasižymėjo nežymiai mažesniu fosforo šalinimo efektyvumu.

3. Atlikus nuotekų valyklų būvio ciklo analizę nustatyta, kad didžiausią poveikį aplinkai sukelia dumblo apdorojimas. C miesto valykla išsiskiria didžiausiu poveikiu šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų, rūgštėjimo ir eutrofikacijos kategorijose. Transporto poveikis yra mažiausias, bet svarbus A ir D valylose. Rezultatai rodo, kad didžiausias poveikis aplinkai susijęs su neefektyviu dumblo tvarkymu ir dideliu energijos suvartojimu.

Literatūra

1. Bisinella, V., Gilli, G., Cutaia, L., & Menegon, G. (2020). Environmental impacts of wastewater treatment plants: A review of Life Cycle Assessment studies. *Water Research*, 174, 115616.

2. Emmerson, R. H. C., Morse, G. K., Lester, J. N., & Edge, D. R. (1995). The life-cycle analysis of small-scale sewage-treatment processes. *Journal of Environmental Management*, 43(2), 143–155. <https://doi.org/10.1006/jema.1995.0076>

3. European Commission. (2010). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. Prieiga per internetą: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>

4. Flores-Alsina, X., Corominas, L., Snip, L., & Gernaey, K. V. (2014). Including greenhouse gas emissions during benchmarking of wastewater treatment plant control strategies. *Water Research*, 47(13), 4412–4422.

5. Gallego, A., Hospido, A., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2008). Environmental performance of wastewater treatment plants for small populations. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(6), 931–940.

6. Hospido, A., Moreira, M. T., Fernández-Couto, M., & Feijoo, G. (2007). Environmental performance of a municipal wastewater treatment plant. *Environmental Science and Pollution Research*, 14(1), 30–35. <https://doi.org/10.1065/espr2006.08.335>

7. Nuotekų tvarkymo reglamentas. <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.276576/asr>

8. McNamara, G., Fitzsimons, L., Horrigan, M., Phelan, T., Delaure, Y., Corcoran, B., ... & Clifford, E. (2016). Life cycle assessment of wastewater treatment plants in Ireland. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 4(3), 216–233.

9. ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines.

10. OpenLCA Nexus. (2025). OpenLCA database repository. Prieiga per internetą: <https://nexus.openlca.org/databases> [Žiūrėta 2025-03-12]

11. OpenLCA. (2025). OpenLCA software official website. Prieiga per internetą: <https://www.openlca.org/> [Žiūrėta 2025-03-12]

12. Pasqualino, J. C., Meneses, M., & Castells, F. (2010). Life cycle assessment of urban wastewater reuse with a MBR pilot plant. *Water Science and Technology*, 61(12), 2979–2985. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.196>

13. Pasqualino, J., Meneses, M., Abella, M., & Castells, F. (2010). LCA as a decision support tool for the environmental improvement of the operation of a municipal wastewater treatment plant. *Environmental Science & Technology*, 44(9), 3188–3194.

14. Tumoševičiūtė, G., & Zigmontienė, A. (2018). Life cycle assessment application in wastewater treatment plants. *Environmental Research, Engineering and Management*, 74(4), 27–35.

15. Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230.

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF URBAN WASTEWATER TREATMENT PLANTS

Abstract

This article analyzes the efficiency and environmental impact of four wastewater treatment plants (WWTPs) in different cities (A, B, C, and D) using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The study focuses on key operational processes of WWTPs, by the seven days biochemical oxygen demand (BOD₇), total phosphorus (P_t), and total nitrogen (N_t) removal efficiency, electricity consumption, sludge management, and transportation. The results indicate that all analyzed WWTPs ensure high organic matter removal efficiency (>92% BOD₇); however, significant differences

were observed in nitrogen and phosphorus removal rates. The life cycle assessment revealed that B and C WWTPs have the highest electricity consumption, directly contributing to a greater global warming impact. Sludge treatment was identified as the most significant source of environmental impact, particularly in eutrophication and acidification., with the greatest impact observed in the WWTP of city C. Improving treatment technologies, optimizing sludge management, and reducing energy consumption can significantly enhance the environmental performance of wastewater treatment plants. Future research should cover a wider range of treatment processes and incorporate long-term data analysis for more accurate insights into WWTPs' environmental impact.

Keywords: wastewater treatment plant, efficiency, Life Cycle Assessment.