

BIODUJŲ GAMYBOJE SUSIDARANČIO DIGESTATO TVARKYMO APLINKOSAUGINIS IR ENERGETINIS VERTINIMAS

Tatjana ŠEMETIENĖ, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: tatjana.semetiene@stud.vdu.lt

Kęstutis NAVICKAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: kestutis.navickas@vdu.lt

Santrauka

Gaminant biodujas iš žemės ūkio ir pramonės atliekų, tenka užsiimti ne tik energijos gamyba, bet ir maistinėms medžiagoms, esančioms digestate, iš kurių gaunamos maistingos trąšos. Digestato laikymas, apdorojimas ir transportavimas į panaudojimo vietas yra susiję su energijos sąnaudomis ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) emisijomis. Šiame darbe atliktas tyrimas, kurio metu nustatytos energijos sąnaudos ir ŠESD biodujų jėgainės digestato tvarkymo procesuose: homogenizavimui, pumpavimui ir transportavimui. Energijos sąnaudos nustatytos, įvertinus digestato saugykloje veikiančių maišyklių ir siurblio galią ir jų darbo laiką. Transportavimo metu lagūnose nuolat veikia digestato maišyklės, kurios užtikrina vienalytį skystosios frakcijos mišinį. Siurbliai naudojami digestato perkėlimui iš lagūnos į cisterną, o jų darbo laikas atitinka vieną pakrovimo operaciją, priklausomai nuo transporto priemonės talpos. Pervežimui iš biodujų jėgainės saugyklos į klientų saugyklas, sunaudojama energija apskaičiuota įvertinus transporto priemonių degalų sąnaudas, patiriamas transportavimo ciklo metu. Digestato tvarkymo ir transportavimo aplinkosauginis vertinimas atliktas, nustatius sukeltas anglies dioksido (CO₂) emisijas, kurios atsiranda technologiniuose procesuose naudojant elektros energiją ir degalus. Tiriamoje biodujų jėgainėje per metus susidaro apie 33 tūkst. t digestato, kuris iki transportavimo laikomas sandarioje lagūnoje. Digestatas iš lagūnos išvežamas tręšimo sezono metu. Šiame darbe yra pasirinkti trys scenarijai, kurie skiriasi digestato pervežimo atstumais – 8, 22 ir 100 km. Skystoji digestato frakcija iš biodujų jėgainės lagūnos į klientų saugyklas transportuojama sunkvežimiais su 24 t cisternomis, aprūpintomis siurblynėmis sistemomis. Tyrimo metu nustatyta, kad didžiausios energijos sąnaudos patiriamos digestato transportavimui – nuo 2,18 kWh/t iki 27,0 kWh/t, priklausomai nuo pervežimo atstumo. Digestato logistikos procesai taip pat turi reikšmingiausią įtaką anglies dioksido emisijoms. Digestato transporto priemonių sukeltos CO₂ emisijos, tenkančios vienai tonai digestato, reikšmingiausios pervežant digestatą didžiausiu atstumu, ir siekia 7,34 kgCO₂/t. Pervežimas 22 km atstumu sukelia 1,62 kgCO₂/t CO₂ emisijos, o 8 km atstumu – vos 0,59 kgCO₂/t. Tačiau digestatą pervežant trumpiausiu maršrutu didesnės CO₂ emisijos sukelia digestato maišyklių darbas (apie 57,1 % nuo visų CO₂ emisijų), kiek mažiau (apie 37,3 %) transportavimas ir apie 5,6 % siurbimas.

Reikšminiai žodžiai: biodujos, digestatas, digestato transportavimas, energinės sąnaudos, poveikis aplinkai.

Įvadas

Anaerobinio skaidymo metu, priklausomai nuo žaliavos sudėties ir taikomo skaidymo proceso, 20–95 % žaliavos organinių medžiagų yra suskaidoma ir paverčiama biodujomis. Anaerobinio skaidymo metu suskaidomi lengvai skaidomi žaliavoje esantys anglies junginiai, o likusi anglis kartu su makro ir mikroelementais grąžinama į dirvožemį su likutine organine medžiaga ir anglimi. Tai padeda padidinti dirvožemio humuso kiekį ir užtikrinti jo ilgalaikį tinkamumą žemės ūkiui. Šiose trąšose yra vertingų ingredientų, kurie naudojami augalams aprūpinti maistinėmis medžiagomis, humusui ir dirvožemio struktūrai formuoti (Tambone et al., 2009).

Eksplloatuojant biodujų jėgainę, dėmesys turėtų būti skiriamas ne tik energijos gamybai, bet ir maistinėms medžiagoms, esančioms digestate, iš kurio gali būti gaminamos aukštos kokybės trąšos. Nesuskaidyti stabilūs anglies junginiai, esantys digestate, papildomai skatina humuso ir struktūros formavimąsi dirvožemyje. Digestato sudėtis ir jo vertė didele dalimi yra susijusi su biodujų gamybai naudojamų žaliavų savybėmis. Biodujų gamybai dažniausiai naudojamas mėšlas, žemės ūkio atliekos, energetiniai augalai, maisto perdirbimo pramonės atliekos, nuotekų dumblas ir organinės komunalinės atliekos (Appels et al., 2011). Iš žemės ūkio ir maisto atliekų gaunamas digestatas pasižymi geriausiomis cheminėmis savybėmis ir yra labiausiai pritaikomas kaip trąšų pakaitalas (Sarker et al., 2018).

Digestatas gali būti naudojamas tręšimui neapdorotas, gali būti separuojamas į dvi frakcijas, kurios naudojamos pagal skirtingus tręšimo planus. Tirštoji frakcija gali būti naudojama birių trąšų gamybai. Šiame darbe analizuojamas neapdorotas digestatas, kurio naudojimas yra labiausiai paplitęs.

Biodujų jėgainėse digestatas kaupiamas saugyklose, kurių pargindinė funkcija – užtikrinti saugų digestato saugijimą siekiant išvengti aplinkos taršos ir maksimaliai išsaugoti naudingąsias digestato savybes. Digestatas dažniausiai kaupiamas lagūnose, plieniniuose ar betoniniuose rezervuaruose ir lanksčiuose saugojimo maišuose. Lankstūs saugojimo maišai gaminami iš poliesterio pluošto, pasižyminčio dideliu tempiamuoju atsparumu ir įrengiami kelis metrus žemiau žemės paviršiaus.

Digestatas yra mišrus produktas, todėl viršutiniame jo sluoksnyje formuojasi pluta, o dugne – nuosėdos. Visa tai apsunkina siurbimą ir mažina hidraulinį pralaidumą. Todėl digestato kaupimo įrenginiuose įrengiamos maišymo sistemos, kurios mažina nuosėdų susidarymą ir padidina substrato homogeniškumą. Maišyklės naudojamos digestato

transportavimo metu. Transporto būdas ir priemonės priklauso nuo digestato tipo ir atstumo iki panaudojimo vietos. Dažniausiai transportavimui naudojami traktoriai, savivarčiai, sunkvežimiai ir vamzdynai.

Tyrimui pasirinkta veikianti biodujų jėgainė, kuri tiekia digestatą į ūkius, išsidėsčiusius įvairiu atstumu nuo jėgainės. Šiame darbe siekta įvertinti biodujų jėgainėje susidarančio digestato transportavimo energines sąnaudas ir poveikį aplinkai. Tai svarbu biodujų jėgainės operatoriui, siekiančiam ūkininkams tiekti tvarius produktus su mažomis energijos sąnaudomis ir minimaliu anglies pėdsaku visoje vertės grandinėje.

Tyrimo tikslas – įvertinti biodujų jėgainėje susidarančio digestato transportavimo energines sąnaudas ir poveikį aplinkai.

Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Nustatyti biodujų gamybos metu susidarančio digestato tvarkymo ir logistikos energines sąnaudas.
2. Nustatyti digestato tvarkymo ir logistikos sukeltas anglies dioksido emisijas.

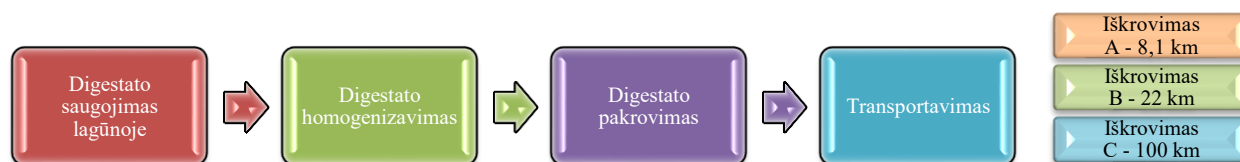
Tyrimų objektas ir metodai

Tyrimui pasirinkta biodujų jėgainė per metus gaminanti apie 32850 tonų skysto digestato. Kadangi per dieną susikaupia apie 90 t digestato, jis iki išvežimo kaupiamas lagūnoje, kurios talpa yra apie 15000 t. Lagūną sudaro iškasa su išklotomis HDPE membranomis, drenažo sistema, atraminės konstrukcijos, vamzdynai, maišymo sistema ir siurblys. Naudojamos trys membranos (apatinė, tarpinė ir viršutinė). Kaupiamas substratas laikomas tarp tarpinės ir viršutinės membranų. Apatinė plėvelė tarnauja kaip papildoma apsauga. Viršutinė sulaiko kvapus ir neleidžia jiems prasiskverbti į aplinką.

Prieš skysto digestato išvežimą lagūnose turi būti užtikrinamas vienalytis skystosios frakcijos mišinys. Tiriamoje biodujų jėgainėje yra įrengtos 8 panardinamos propelerinės maišyklės, skirtos dideliems skysčio kiekiams judinti. Maišyklės veikia viso tręšimo sezono metu (balandžio 15–birželio 15 d. ir rugpjūčio 1–lapkričio 15 d. Maišyklių variklio galia – 18,5 kW, o maišymo trukmė 8 val./d.

Skystas digestatas iš lagūnos į sunkvežimio cisterną pakeliamas siurbliu, kuris užtikrina nuolatinį skystosios frakcijos srautą ir yra eksploatuojamas kiekvieno transportavimo ciklo metu. Tiriamoje jėgainėje įrengto siurblio galia siekia 7,5 kW, o pakrovimo ir iškrovimo laikas trunka 25 min.

Tiriamajame objekte skystoji digestato frakcija iš biodujų jėgainės lagūnos į klientų saugyklas transportuojama sunkvežimiais – cisternomis, aprūpintomis siurblinėmis sistemomis. Šiame tyrime pasirinktos 24 t talpos cisternos. Šis transportavimo būdas užtikrina pastovų skystosios frakcijos tiekimą ir tikslų jos paskirstymą iškrovimo metu. Transportavimas organizuojamas pagal nepertraukiamą ir sinchronizuotą darbo schemą, kai vienu metu būtų vykdomi skirtingi proceso etapai – pakrovimas, transportavimas ir iškrovimas, taip užtikrinant maksimalų darbo našumą ir minimalias prastovas. Darbo ciklo metu vienas automobilis yra pakraunamas, kitas automobilis pilnai pakrautas juda iš pakrovimo vietos į iškrovimo vietą, o trečias automobilis jau atlieka iškrovimo darbus, perpumpuodama skystą krovinį į kliento saugyklas. Šis modelis leidžia užtikrinti nenutrūkstama skystosios digestato frakcijos srautą, kadangi nei viena transporto priemonė nelaukia, kol bus baigtas kitas proceso etapas (žr. 1 pav.). Savivarčiai – cisternos pasižymi vidutinėmis kuro sąnaudomis 33 l/100 km (HOGS, 2025).



1 pav. Digestato tvarkymo ir transportavimo iš biodujų jėgainės į tris skirtingas vietas A, B ir C procesų schema

Fig. 1. Process flow diagram for digestate handling and transportation from biogas plants to three different locations A, B and C

Maišyklių energijos sąnaudas E_m (kWh/t) galima aprašyti lygtimi:

$$E_m = \frac{n_m \cdot P_m \cdot t_m}{m} \quad (1)$$

čia E_m – maišyklių energijos sąnaudos, kWh/t; n – maišyklių skaičius; P_m – vienos maišyklės galia, kW; t_m – maišyklės veikimo laikas per metus, h; m – per 1 metus apdorotas digestato kiekis, t.

Siurblio energijos sąnaudos nustatomos pagal lygtį:

$$E_s = \frac{P_s \cdot t_s}{m} \quad (2)$$

čia E_s – siurblio energijos sąnaudos, kWh/t; P_s – vieno siurblio galia, kW; t_s – siurblio veikimo laikas per metus, h; m – per 1 metus apdorotas digestato kiekis, t.

Transporto energijos E_t sąnaudos nustatomos pagal lygtį:

$$E_t = \frac{S_t \cdot g \cdot q}{100 \cdot m} \quad (3)$$

čia E_t – transporto energijos sąnaudos, tenkančios vienai tonai pervežamos biomasės, kWh/t; S_t – vidutinis transportavimo atstumas, km; g – sunkvežimio vidutinės degalų sąnaudos vienam šimtui kilometrų, l/100km; q – specifinė žemutinė šiluminė vertė (dyzelinui – 9,8 kWh/l) digestato kiekis, t.

Maišyklių ir siurblio elektros variklių sukeliamas emisijas e_{CO_2} (kg CO₂/t) galima aprašyti lygtimi:

$$e_{\text{CO}_2} = E \cdot F_{el} \quad (4)$$

čia E – suvartota elektros energija, kWh/t; F_{el} – elektros energijos emisijos faktorius, kurio reikšmė 0,34019 kg CO₂/kWh (Nowtricity, 2026);

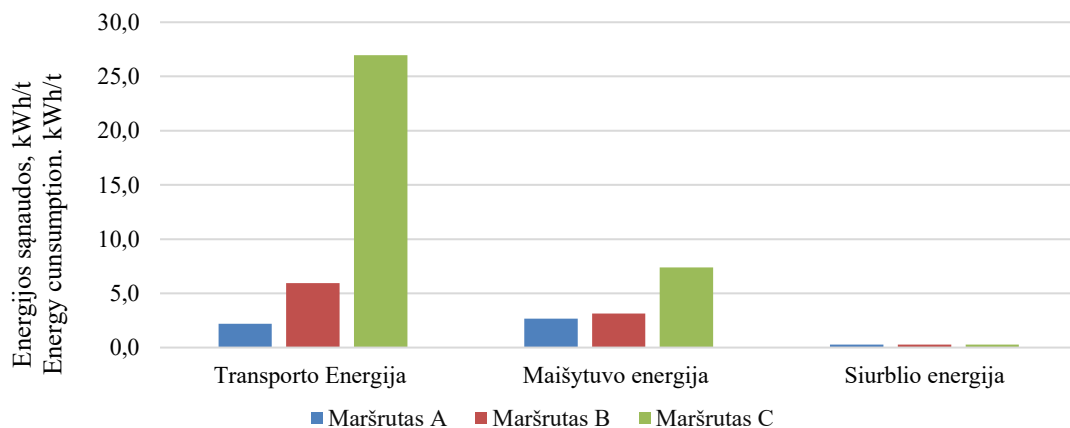
Digestato transportavimo sukeliamas emisijas (kg CO₂/t) nustatomos pagal lygtį:

$$e_{\text{CO}_2} = \frac{Q \cdot F_{\text{diz}}}{m} \quad (5)$$

čia Q – suvartotas dyzelino kiekis digestato pervežimui, l; F_{diz} – emisijos faktorius, kurio reikmė dyzelinui yra 2,68 kg CO₂/l (D-Carbonize, 2024); m – per metus pervežtas digestato kiekis, t.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Energijos sąnaudų ir anglies dioksido (CO₂) emisijų vertinimai atlikti trimis transportavimo kryptimis, vežant digestatą iš biodujų jėgainės į iškrovimo vietas nutolusias 8,1, 22 ir 100 km. Digestato išvežimo metu maišyklės dirba nepertraukiamai visą darbo dieną, todėl jų energijos sąnaudos priklauso nuo jų variklių elektrinės galios ir digestato išvežimo trukmės. Digestatą išvežant 100 km atstumu, gautos didžiausios energijos sąnaudos, kurios siekia 7,4 kWh/t, nes pervežimas šiuo maršrutu trunka ilgiausiai (žr. 2 pav.). Digestatą transportuojant trumpesniais atstumais elektros energijos sąnaudos homogenizavimui buvo ženkliai mažesnės (atitinkamai 3,15 ir 2,67 kWh/t).



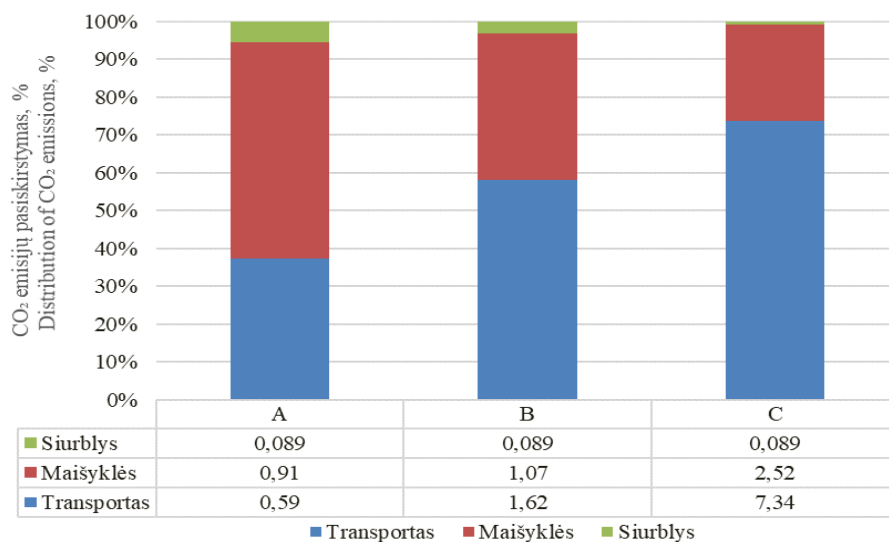
2 pav. Energijos sąnaudų palyginimas skirtinguose maršrutuose A, B ir C
Fig. 2. Comparison of energy consumption on different routes A, B and C

Digestatas iš lagūnos į sunkvežimio cisterną pakeliamas siurbliu, kuris dirba kiekvieno transportavimo ciklo metu. Siurblio darbo trukmė priklauso nuo pervežamo digestato kiekio ir nepriklauso nuo transportavimo atstumo. Tiriamu atveju siurblio energijos sąnaudos perpumpuoti 1 t digestato visais transportavimo maršrutais buvo vienodos ir siekė 0,26 kWh/t.

Per metus surinkto digestato kiekio išvežimui 24 t talpos sunkvežimiais būtina atlikti 1369 reusus. Transportavimo degalų sąnaudos priklauso nuo sunkvežimių nuvažiuoto kelio tiriamais maršrutais. Todėl didžiausios degalų ir energijos sąnaudos patiriamos pervežant digestatą ilgiausiu maršrutu (100 km) ir siekia 26,95 kWh/t (žr. 2 pav.). Šio maršruto energijos sąnaudos visiems procesams (įskaitant digestato homogenizavimą, siurbimą ir transportavimą) buvo didžiausios ir siekė 34,61 kWh/t.

Remiantis 3 paveiksle pateiktais duomenimis, akivaizdu, kad digestato logistikos procesai turi reikšmingiausią įtaką aplinkos taršai. Digestato maišytuvų sukeltos CO₂ emisijos kinta proporcingai transportavimo trukmei, nes ilgesnė pervežimo trukmė prailgina viso digestato homogenizavimo laiką. Maišytuvų sukeltos CO₂ emisijos kinta 0,91–2,52 kgCO₂/t ribose. Digestato siurblio emisijos visiems maršrutams išlieka vienodos ir sudaro mažiausią CO₂ emisijų dalį visuose logistikos procesuose ir siekia vos 0,089 kgCO₂/t.

Digestato transporto priemonių sukeltos CO₂ emisijos, tenkančios 1 t digestato, reikšmingiausios pervežant digestatą didžiausiu atstumu, ir siekia 7,34 kgCO₂/t. Pervežimas 22 km atstumu sukelia 1,62 kgCO₂/t CO₂ emisijos, o 8 km atstumu – vos 0,59 kgCO₂/t.



3 pav. CO₂ emisijų (kgCO₂/t) pasiskirstymas transportuojant digestatą maršrutais A, B ir C
Fig. 3. CO₂ emissions (kgCO₂/t) breakdown for digestate transport to destinations A, B and C

Analizuojant biodujų gamyboje susidarančio digestato tvarkymo procesuose sukeltų CO₂ emisijų pasiskirstymą, pastebėta, kad išvežant digestatą trumpiausiu maršruto didesnes CO₂ emisijas sukelia digestato maišyklės darbas (apie 57,1 % nuo visų CO₂ emisijų), kiek mažiau (apie 37,3 %) transportavimas ir apie 5,6 % siurbimas. Pervežant digestatą 20 ir 100 km atstumu didžiausias CO₂ emisijas sukelia digestato transportavimas (atitinkamai 58,2 ir 73,8 %). Maišyklų sukeliamų emisijų dalis atitinkamai sumažėja atitinkamai iki 38,6 ir 25,3 %.

Išvados

1. Biodujų gamybos metu susidarančio digestato tvarkymo ir logistikos procesuose didžiausią energijos poreikio dalį sudaro transportavimas. Atstumas yra svarbiausiu elementu vertės grandinėje. Todėl didžiausios degalų ir energijos sąnaudos patiriamos pervežant digestatą ilgiausiu maršrutu (100 km) ir siekia 26,95 kWh/t. Šio maršruto energijos sąnaudos visiems procesams (įskaitant digestato homogenizavimą, siurbimą ir transportavimą) buvo didžiausios ir siekė 34,61 kWh/t.
2. Digestato transporto priemonių sukeltos CO₂ emisijos, tenkančios vienai tonai digestato, reikšmingiausios pervežant digestatą didžiausiu atstumu, ir siekia 7,34 kgCO₂/t. Pervežimas 22 km atstumu sukelia 1,62 kgCO₂/t CO₂ emisijos, o 8 km atstumu – vos 0,59 kgCO₂/t.
3. Biodujų gamyboje susidarantį digestatą pervežant trumpiausiu maršruto didesnes CO₂ emisijas sukelia digestato maišyklės darbas (apie 57,1 % nuo visų CO₂ emisijų), kiek mažiau (apie 37,3 %) transportavimas ir apie 5,6 % siurbimas. Pervežant digestatą 20 ir 100 km atstumu didžiausias CO₂ emisijas sukelia digestato transportavimas (atitinkamai 58,2 ir 73,8 %). Maišyklų sukeliamų emisijų dalis atitinkamai sumažėja, atitinkamai iki 38,6 ir 25,3 %.

Literatūra

1. D-Carbonize. (2024). *What is the carbon footprint of a conventional car?* Prieiga per internetą: <https://d-carbonize.eu/conventional-car/>
2. HOGS. (2025). 6 būdai sumažinti kuro sąnaudas TIR (kelių transporte). Prieiga per internetą: <https://hogs.live/lt/blog/mazesnes-kuro-sanaudos/>
3. L Appels, L., Lauwers, J., Degreuve, J., Helsen, L., Lievens, B., Willems, K., Van Impe, J., & Dewil, R. (2011). Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4295–4301. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.121>
4. Nowtricity (2026). Lithuania – real-time electricity CO₂ emissions data [Informacinis tinklalapis]. Prieiga per internetą: <https://www.nowtricity.com/country/lithuania/>. Užklausa: „Esamos emisijos Lietuvoje“ (žiūrėta 2026-02-26)
5. Sarker, J. R., Singh, B. P., Cowie, A. L., Fang, Y., Collins, D., Badgery, W., & Dalal, R. C. (2018). Impact of agricultural management practices on the nutrient supply potential of soil organic matter under long-term farming systems. *Soil and Tillage Research*, 175, 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.08.013>
6. Tambone, F., Scaglia, B., D'Imporzano, G., Schievano, A., Orzi, V., Salati, S., & Adani, F. (2009). Assessing amendment properties of digestate by studying the organic matter composition and the degree of biological stability during the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 100(12), 3140–3142. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.012>
7. Vilanova, P., & Noche, B. (2016). A review of the current digestate distribution models: Storage and transport. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 202, 345–357. <https://doi.org/10.2495/WM160311>

8. Webfleet Solutions (2024). Fuel efficiency in transport industry [Informacinis tinklalapis]. Prieiga per internetą: https://www.webfleet.com/en_au/webfleet/industries/transport/fuel-efficiency/ . Užklausa: „Fuel efficiency solutions for transport industry“(žiūrėta 2026-02-26)

ENVIRONMENTAL AND ENERGY ASSESSMENT OF THE MANAGEMENT OF DIGESTATE FROM BIOGAS PRODUCTION

Abstract

Producing biogas from agricultural and industrial waste, one has to deal not only with energy production, but also with the nutrients contained in the digestate, from which nutritious fertilizers are obtained. Storage, processing and transportation of digestate to places of use are related to energy costs and greenhouse gas (GHG) emissions. This work has conducted a study that determined the energy costs and GHG emissions in the digestate handling processes of a biogas power plant: homogenization, pumping and transportation. Energy costs were determined by assessing the power of the mixers and pumps operating in the digestate storage and their operating time. During transportation, digestate mixers are constantly operating in the lagoons, which ensure a homogeneous mixture of the liquid fraction. Pumps are used to transfer the digestate from the lagoon to the tank, and their operating time corresponds to one loading operation, depending on the capacity of the vehicle. For transportation from the biogas plant storage to customer storage, the energy consumption was calculated by evaluating the fuel consumption of vehicles during the transportation cycle. The environmental assessment of digestate handling and transportation was carried out by determining the induced carbon dioxide (CO₂) emissions that occur in technological processes using electricity and fuel. The studied biogas plant generates about 33 thousand tons of digestate per year, which is stored in a sealed lagoon before transportation. The digestate is removed from the lagoon during the fertilization season. Three scenarios are selected in this work, which differ in the distances of digestate transportation - 8, 22 and 100 km. The liquid digestate fraction is transported from the biogas plant lagoon to customer storage by trucks with 24-ton tanks equipped with pumping systems. The study found that the highest energy consumption is incurred for digestate transportation – from 2.18 kWh/t to 27.0 kWh/t, depending on the transportation distance. Digestate logistics processes also have the most significant impact on carbon dioxide emissions. CO₂ emissions caused by digestate vehicles per tonne of digestate are most significant when transporting digestate over the longest distance, reaching 7.34 kgCO₂/t. Transportation over a distance of 22 km causes 1.62 kgCO₂/t of CO₂ emissions, and over a distance of 8 km – only 0.59 kgCO₂/t. However, when transporting digestate over the shortest route, higher CO₂ emissions are caused by the operation of digestate mixers (about 57.1% of total CO₂ emissions), somewhat less (about 37.3%) by transportation and about 5.6% by pumping.

Keywords: biogas, digestate, digestate transportation, energy consumption, environmental impact.