



## DAUGIAKRITERĖS ANALIZĖS TVARIAM BIOLOGINIŲ ATLIEKŲ TVARKYMOUI TAIKYMAS

Rasa TUMAŠEVIČIŪTĖ<sup>1</sup>, Aušra ZIGMONTIENĖ<sup>2</sup>

*VGTU AIF Aplinkos apsaugos ir vandens inžinerijos katedra*

*El. paštas: <sup>1</sup>rasa.tume@gmail.com; <sup>2</sup>ausra.zigmontiene@vgtu.lt*

**Anotacija.** Tarptautinis, taip pat ir Lietuvos, atliekų tvarkymo sektorius susiduria su naujais iššūkiais, sprenddamas politinius tvaraus atliekų tvarkymo klausimus, skatindamas naujų atliekų apdorojimo technologijų plėtrą ir ruošdamas didelio masto pertvarką atliekų sektoriuje. Atliekų tvarkymo taisyklėse numatyta, kad nuo 2019 m. visi miestai, turintys daugiau nei 50 000 gyventojų, privalės atskirai iš savo gyventojų surinkti biologines atliekas. Valstybei tampa aktualu tinkamai įvertinti biologinių atliekų tvarkymo technologijų poveikį aplinkai. Šiame straipsnyje biologinių atliekų vadybos aplinkosauginis poveikis nagrinėjamas naudojant būvio ciklo vertinimo (toliau – BCV) metodą. Problemos kompleksiskumui įvertinti ir analizuoti pritaikytas kompleksinis daugiakriteris vertinimo metodas ir pasitelktas aukštos kvalifikacijos specialistų (ekspertų) dalyvavimas. Pasitelkus BCV ir ekspertų kriterijų įvertinimo duomenis, įvertintas aplinkosauginis klimato atšilimo potencialas per 100 metų, rūgštėjimo, eutrofikacijos, fotocheminis ozono susikūrimo, ozono sluoksnio mažėjimo, abiotinio nykimo, toksiškumo žmogui ir sausumos ekotoksiškumo potencialai. BCV atliktas, remiantis *EcoInvent 2.2* duomenų baze ir pasiekiamais regioniniais duomenimis. Ekspertų nuomonių suderinamumas įvertintas naudojant Kendelo konkordacijos koeficientą. Bendri duomenys apdoroti pasinaudojant COPRAS metodu. Gauti rezultatai parodė, kad geriausias biologinių atliekų tvarkymo būdas – anaerobinis perdirbimas su vėlesniu kompostavimo etapu, mažiau naudingas kompostavimas įrenginiuose – 58,98 %, o prasčiausias – biologinių atliekų deginimas (16,58 %).

**Reikšminiai žodžiai:** biologinės atliekos, daugiakriterė analizė, būvio ciklo vertinimas, Kendelo konkordacijos koeficientas, COPRAS.

### Įvadas

Augant ekonomikai ir vartojimui, didėjant gamybos, pramonės ir kitos ūkinės veiklos mastams, tuo pačiu auga ir komunalinių organinių atliekų srautų susidarymas, taigi didėja ir susidarančių atliekų kiekis. Vadinasi, augant pramonės, ekonomikos ir vartojimo tempams, labai svarbu tinkamai tvarkyti organines atliekas.

Būvio ciklo vertinimas, kaip apibrėžta ISO 14044: 2006 ir toliau nurodyta Tarptautiniame etaloniniame gyvavimo ciklo duomenų sistemos vadove (European Commission, 2010), – tai sprendimų palaikymo priemonė, plačiai naudojama, norint įvertinti bet kokių prekių/paslaugų poveikį aplinkai. 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 (Manfredi ir Goralczyk, 2013; Manfredi, 2013).

Atliekų prevencija ir pakartotinis naudojimas (du pagrindiniai prioritetai, nurodyti atliekų hierarchijoje) šiame straipsnyje nenagrinėjami. Straipsnyje nagrinėjama sritis iš tikrųjų apima vėlesnius atliekų hierarchijos etapus, taigi čia konkrečiai kalbama apie organinių atliekų srautą, kurio negalima išvengti ir pakartotinai panaudoti, tačiau jį reikia tvarkyti ir (arba) apdoroti.

Daugelis susirūpinimą keliančių klausimų, susijusių su BCV rezultatų tikslumu, yra susiję su potencialiai reikšmingais netikrumo šaltiniais (Ross, Evans ir Webber, 2002). Informacija apie modelio rezultatų neapibrėžtumą gali suteikti naudingos informacijos vertinant BCV pagrįstų sprendimų patikimumą (Lloyd ir Ries, 2007). Pagrindiniai neapibrėžtumo šaltiniai (Björklund, 2002) yra šie:

- duomenų netikslumas ir duomenų spragos;
- nereprezentatyvūs duomenys;
- modelio neapibrėžtumas;

- neapibrėžtumas dėl tinkamo pasirinkimo;
- erdvės ir laiko kintamumas;
- šaltinių ir objektų kintamumas;
- epistemologinis neapibrėžtumas;
- klaidos ir neapibrėžtumo įvertinimas.

Kitas klausimas yra susijęs su tam tikrais neaiškumais, kurie kyla dėl parametrų, modelio ir scenarijaus neapibrėžtumo. Labiausiai ištirta yra parametrų neapibrėžtumo sritis. Jei skaičiavimai atliekami su neaiškiais duomenimis, o į sistemos neapibrėžtį nėra neatsižvelgiama, tada sprendimas, pagrįstas skaičiavimų rezultatais, gali pateikti visiškai neteisingus rezultatus.

Siekiant pašalinti potencialiai reikšmingus netikrumo šaltinius iš BCV, atliekamas subjektyvus alternatyvas apibūdinančių rodiklių reikšmingumų nustatymas, o kadangi sprendžiamoji problema yra kompleksiško pobūdžio, todėl siūloma taikyti daugiakriterius sprendimų priėmimo metodus. Taikant daugiakriterius sprendimo priėmimo metodus, visų pirma nustatomi rodiklių reikšmingumai, kurie nagrinėjamajai problemai parodo tam tikro rodiklio svarbą.

Vienas svarbiausių biologinių atliekų tvarkymo poveikio aplinkai daugiakriterės analizės etapų – alternatyvas apibūdinančių rodiklių reikšmių ir jų reikšmingumų nustatymas. Apskaičiavus rodiklių reikšmes ir reikšmingumus bei pritaikius daugiakriterės analizės metodus, nustatomas lyginamųjų scenarijų naudingumo laipsnis ir prioritetas.

## Metodika

Pirmajame šio darbo etape sumodeliuoti BCV metodai pagrįsti pasirinktais biologinių atliekų tvarkymo scenarijais. BCV tyrimas atliktas pagal ISO 14040 (2006) metodiką, taip pat vadovaujantis pateiktomis Tarptautinės etaloninės būvio ciklo duomenų sistemos gairėmis.

Modeliavimas buvo atliktas naudojant programinę *SimaPro 7.2* įrangą.

Antrajame etape daugiakriterio vertinimo rodiklių reikšmingumų nustatymo metodu pasirinktas ekspertinis vertinimas. Subjektyvų rodiklių reikšmingumų nustatymo pagrindą sudaro specialistų ekspertų vertinimai. Taikant ekspertinius metodus, svarbu nustatyti rodiklių reikšmingumą, be kurio nustatymo sunku įvertinti tyrimo patikimumą ir alternatyvas ir nustatyti ekspertų nuomonių suderinamumą.

COPRAS metodas yra sukurtas VGTU mokslininkų (Zavadskas, Kaklauskas ir Sarka, 1994; Kaklauskas, 1999). Šiuo metodu nagrinėjamų variantų prioritetas ir reikšmingumas tiesiogiai ir proporcingai priklauso nuo alternatyvas adekvačiai apibūdinančių rodiklių sistemos, rodiklių reikšmių ir reikšmingumų dydžių. Rodiklių sistemą

nustato, o rodiklių reikšmes ir pradinius reikšmingumus apskaičiuoja ekspertai.

## Scenarijų identifikavimas

Tam, kad būtų galima nustatyti vertinamus biologinių atliekų tvarkymo būdus, buvo pasinaudota Atliekų tvarkymo taisyklėse nurodytomis gairėmis ir įvertinta Lietuvos situacija. Šiuo atveju vertinami kompostavimas (K), anaerobinis perdirbimas, vėliau substratą kompostuojant (AP+K) ir deginimas (D) po mechaninio-biologinio apdorojimo. Tai apima veikiančias technologijas ir tuos įrenginius, kurie jau yra pastatyti ir veikia. Darbe įvertinta tai, kad ateityje, privalomai atskiriant dalį biologinių atliekų srauto, jis privalės būti tvarkomas naudojant naują metodiką, nes dabartinė tvarkymo sistema yra tik iš dalies tinkama atskirai surinktam srautui tvarkyti.

## Funkcinis vienetas

Remiantis nustatytais scenarijais ir sprendimų kontekstu, apibrėžtas tinkamas funkcinis vienetas (toliau – FV), kuris apibūdinamas kiekybiškai ir kokybiškai kaip tiksli funkcija ar paslauga, tinkama numatytiems nagrinėjamiems scenarijams įgyvendinti. Kiekvieno scenarijaus sistemos ribose, be pagrindinės tvarkymo technologijos(-ų), įtraukti atitinkami procesai, susiję su atliekų transportavimu.

Siekiant, kad būvio ciklo požiūriu būtų galima palyginti skirtingų rezultatų scenarijų našumą, taikomas sistemos pakeitimo metodas. Pakeitimas – tai sukuriama naudos, atsirandančios dėl tam tikros funkcijos / produkto perkėlimo į kitą lygiavertę funkciją / produktą, sukurtą modeliuojama sistema, apskaita.

## Aplinkosauginio veiksmingumo įvertinimas

Remiantis nustatytais atliekų tvarkymo galimybėmis, pasirinktu FV ir visais procesais, įtrauktais į sistemos ribas, aplinkosauginio veiksmingumo vertinimas atliekamas naudojant BCV pagrįstą programinę įrangą.

Naudojama supaprastinta prielaida, kai scenarijuose, pagal kuriuos biologinės atliekos nėra atskirai surenkamos (t. y. deginamos), yra naudojamos tos pačios transporto priemonės kaip ir mišrių atliekų surinkimo atveju ir naudojant mažiau pažangias sistemas, pvz., didelius dyzelinius sunkvežimius.

Nors biologinės atliekos gali būti tvarkomos tokiomis technologijomis, kaip kompostavimas ir anaerobinis pūdyimas, kitose tvarkymo technologijose, kuriose nėra atskiro biologinių atliekų tvarkymo galimybės, biologinės atliekos paprastai apdorojamos kartu su kitais atliekų srautais. Tai yra, pavyzdžiui, deginimo atvejis, kai biologinės atliekos deginamos kartu su kitomis atliekų rūšimis. Kruopščią

BCV paskirstymo variantų analizę pateikia K. Allackeris (2014 m.).

#### Aplinkos rodiklių parinkimas

Darbe analizuojamos šios poveikio kategorijos:

- galimas pasaulinis klimato atšilimo potencialas per 100 metų;
- rūgštėjimo potencialas;
- eutrofikacijos potencialas;
- fotocheminis ozono susikūrimo potencialas;
- ozono sluoksnio mažėjimo potencialas;
- abiotinio nykimo potencialas;
- toksiškumo žmogui potencialas;
- sausumos ekotoksiškumo potencialas.

Norint įvertinti santykinį galimo poveikio dydį ir išteklių suvartojimo lygį, poveikio kategorijos gali būti normalizuotos naudojant standartinę informaciją. Pateiktos poveikio kategorijos dažniausiai naudojamos atliekų tvarkymo BCV studijose (Laurent et al., 2014).

#### Aplinkos rodiklių reikšmingumą (svorių) nustatymas

Teorijoje ir praktikoje žinomi keli ekspertų rodiklių svarumo vertinimo būdai: svorių nustatymas ranguojant, tiesioginis svorių nustatymas, svorių nustatymas porinio lyginimo būdu.

Taikant paprasčiausią svorių nustatymo būdą – rangavimą, visi rodikliai tiriamojo reiškinio svarbos atžvilgiu numeruojami eilės tvarka.

Konkordancijos koeficiento  $W$  skaičiavimai, naudojantis sudaryta ekspertinio įvertinimo rodiklių lentele, atliekami tokia tvarka (Zavadskas et al., 1994; Kaklauskas, 1999):

1. Pirmiausiai, įvertinus turimus ekspertų vertinimo rezultatus, nustatoma rangų sumą pagal formulę:

$$t_j = \sum_{k=1}^r t_{jk}, \quad (1)$$

čia:  $r$  – ekspertų skaičius,  $k$  – ekspertų autoriteto koeficientas,  $t_{jk}$  – eksperto atliktas  $j$  rodiklio vertinimas.

2. Kitame etape nustatoma vidutinė rodiklio vertinimo reikšmė:

$$\bar{t}_j = \frac{\sum_{k=1}^r t_{jk}}{r}. \quad (2)$$

3. Nustatoma rangų kvadratų suma (dispersijos analogas):

$$S = \sum_{k=1}^n t_{jk} - \bar{t}_j, \quad (3)$$

čia  $n$  – įvertinamų rodiklių skaičius.

4. Nustatoma kiekvieno rodiklio įvertinimo rezultatų nukrypimo kvadratų suma pagal formules (įvertinama deviacija):

$$S = \sum_j \left( \sum_{k=1}^r t_{jk} - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{jk} \right); \quad (4)$$

$$T_k = \sum_{l=1}^{H_k} (h_k^3 - h_l), \quad (5)$$

čia:  $T_k$  –  $k$  rangavime susijusių rangų rodiklis,  $H_k$  – lygių rangų skaičius  $k$  rangavime,  $h_k$  – lygių rangų,  $l$  susijusių rangų grupėje skaičius, įvertinant  $k$  ekspertui,  $t_{jk}$  –  $k$  eksperto rodikliui priskiriamas rangas,  $r$  – ekspertų skaičius,  $n$  – įvertinamų rodiklių skaičius.

5. Nustatomas konkordancijos koeficientas pagal formulę (Kendall, 1975):

$$W = \frac{12S}{r^2(n^3 - n)}. \quad (6)$$

Šia formule yra nustatomas ekspertų suderinamumas. Koeficientas nusako individualių nuomonių sutapimo laipsnį.

6. Nustatoma konkordancijos koeficiento rodiklio statistika pagal formulę (Kendall, 1975):

$$\chi^2 = W \cdot r \cdot (n-1) = \frac{12S}{r \cdot n \cdot (n+1)}. \quad (7)$$

Jei  $S$  didesnis nei  $\chi_{krit}^2$  pagal lentelę (reikšmė priklauso nuo laisvės laipsnių skaičiaus bei nustatymo tikslumo lygio), ekspertų rangavimo paisyta. Jei  $\chi^2 \leq \chi_{krit}^2$ , yra manoma, kad ekspertų nuomonė yra nesuderinta.

Tiksliausių rezultatų suteikia tiesinis vertinimų transformavimas. Šiuo atveju kriterijų svorių reikšmes galima suskaičiuoti pagal formulę:

$$w_i = \frac{\sum_{k=1}^r t_{jk}}{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r t_{jk}}. \quad (8)$$

#### COPRAS metodas

Nagrinėjimų alternatyvų reikšmingumas ir prioritetškumas skaičiuojami penkiais etapais (Zavadskas et al., 1994; Kaklauskas, 1999).

1 etapas. Sudaroma įvertinta normalizuota sprendimų matrica  $D$ . Tam taikoma tokia formulė:

$$d_{ij} = \frac{x_{ij} q_i}{\sum_{j=1}^n x_{ij}}, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}, \quad (9)$$

čia:  $x_{ij}$  –  $i$  rodiklio reikšmė  $j$  sprendimo variante;  $m$  – rodiklių skaičius;  $n$  – lyginamų variantų skaičius;  $q_i$  –  $I$  rodiklio reikšmingumas.

2 etapas. Apskaičiuojamos  $j$  variantą apibūdinančių kaštų (jų mažesnė reikšmė yra geresnė)  $S_j$  ir naudos (jų didesnė reikšmė yra geresnė)  $S_{+j}$  rodiklių sumos. Jos apskaičiuojamos pagal formulę:

$$S_{+j} = \sum_{i=1}^m d_{+ij}; S_{-j} = \sum_{i=1}^m d_{-ij}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \quad (10)$$

3 etapas. Lyginamų scenarijų santykinis reikšmingumas (efektyvumas) nustatomas remiantis juos apibūdinančiomis teigiamomis (teigiamu arba „plusiniu“ poveikiu)  $S_{+j}$  ir neigiamomis (neigiamu arba „minusiniu“ poveikiu)  $S_{-j}$  savybėmis. Kiekvieno objekto  $a_j$  santykinis reikšmingumas  $Q_j$  nustatomas pagal formulę:

$$Q_j = S_{+j} + \frac{S_{-\min} \sum_{j=1}^n S_{-j}}{S_{-j} \sum_{j=1}^n \frac{S_{-\min}}{S_{-j}}}, j = \overline{1, n}. \quad (11)$$

4 etapas. Nustatomas objektų prioritetiškumas. Juo didesnis  $Q_j$ , tuo didesnis prioritetiškumas.

5 etapas. Biologinių atliekų tvarkymo aplinkos poveikių  $a_j$  naudingumo laipsnis  $N_j$  nustatomas pagal tokią formulę:

$$N_j = (Q_j : Q_{\max}) \cdot 100 \%, \quad (12)$$

čia  $Q_j$  ir  $Q_{\max}$  – aplinkos poveikių reikšmingumai apskaičiuoti pagal (10) formulę.

### Alternatyvų $a_j$ naudingumo laipsnis

$N_j$  išreiškia reikalavimų pasiekimo lygį. Juo pasiekta daugiau ir reikšmingesnių tikslų, tuo didesnis naudingumo laipsnis.

Kadangi suinteresuotas grupes labiausiai domina tai, koku laipsniu nagrinėjamieji variantai yra vieni už kitus mažiausiai žalingi aplinkai, tai praktikoje norint išrinkti geriausią biologinių atliekų tvarkymo alternatyvą geriau vartoti naudingumo, o ne reikšmingumo sąvoką.

### Rezultatai ir jų analizė

#### Ekspertų įvertinimo suderinamumas

Sprendžiant biologinių atliekų tvarkymo alternatyvų uždavinį, buvo apklausta 40 ekspertų, iš kurių atsakymų anketų buvo tinkamos naudoti tik 10. Rodiklių reikšmingumams apibrėžti naudojama skalė nuo 1 iki 8. Svarbiausias rodiklis įgyja 8 balų reikšmę, visi kiti rodikliai lyginami su svarbiausiuoju, pavyzdžiui, jei rodiklis mažiau svarbus, jam suteikiamas 7 balų įvertinimas, o mažiausiai reikšmingam rodikliui suteikiamas 1 balo įvertinimas. Ekspertų apklausos apskaičiuoti kriterijų reikšmingumai pateikti 1 lentelėje.

Taikant ranginės koreliacijos teoriją (Kendall, 1975), buvo patikrintas ekspertų vertinimo suderinamumas. Vertinimo pagrindą sudaro ekspertų rodiklių rangavimo lentelė. Vertinime nuomonės buvo suderintos. Poveikio aplinkai reikšmingumo vertinimų konkordacijos koeficientas  $W = 0,299$ , atitinkama rodiklio  $\chi^2$  statistika  $\chi^2 = 20,933$  ir yra didesnė už  $\chi^2_{krit} = 20,278$ , paimtą iš  $\chi^2$  skirstinio lentelės su  $\nu = 8 - 1 = 7$  laisvės laipsniu ir

1 lentelė. Funkcinio vieneto (FV) tvarkymo aplinkosauginis įvertinimas (sudaryta autorės)

Table 1. Environmental assessment of functional unit (FU) management (developed by author)

Nagrinėjami rodikliai	*	Reikšmingumas	Matavimo vienetai	Lyginamieji scenarijai		
				K	AP+K	D
Galimas pasaulinis klimato atšilimo potencialas per 100 metų	min	0,14722	kgCO <sub>2</sub> eq./a	0,112	0,107	0,0338
Rūgštėjimo potencialas	min	0,13610	kgSO <sub>2</sub> eq./a	3,09 · 10 <sup>-4</sup>	3,56 · 10 <sup>-3</sup>	9,17 · 10 <sup>-3</sup>
Eutrofikacijos potencialas	min	0,15552	kgPO <sub>4</sub> eq	6,44 · 10 <sup>-7</sup>	-3,66 · 10 <sup>-6</sup>	1,63 · 10 <sup>-4</sup>
Fotocheminis ozono susikūrimo potencialas	max	0,07225	kgC <sub>2</sub> H <sub>2</sub> eq./a	6,81 · 10 <sup>-5</sup>	1,3 · 10 <sup>-4</sup>	2,64 · 10 <sup>-5</sup>
Ozono sluoksnio mažėjimo potencialas	min	0,07779	kgCFC-11 eq./a	1,52 · 10 <sup>-9</sup>	-1,12 · 10 <sup>-9</sup>	6,06 · 10 <sup>-9</sup>
Abiotinio nykimo potencialas	min	0,09725	kgSb eq./a	1,13 · 10 <sup>-5</sup>	-1,14 · 10 <sup>-3</sup>	5,73 · 10 <sup>-5</sup>
Toksiškumo žmogui potencialas	min	0,16942	kg1,4-DB eq./a	2,18 · 10 <sup>-5</sup>	-2,20 · 10 <sup>-4</sup>	2,28 · 10 <sup>-3</sup>
Sausumos ekotoksiškumo potencialas	min	0,14445	kg1,4-DB eq./a	0,155	-0,181	3,75

reikšmingumo lygmeniu  $\alpha = 0,005$ , todėl buvo priimta statistinė hipotezė apie ekspertų vertinimų suderinamumą.

Rodiklių reikšmingumų nustatymui ekspertai tiesiogiai įvertino jų svarbą, t. y. kiekvieno eksperto visų vertinimų reikšmingumų suma turi būti lygi vienetui (arba 100 %). Subjektyvių reikšmingumų skaičiavimo rezultatai pagal skirtingos rūšies poveikį aplinkai pateikti 1 lentelėje.

Nagrinėjant poveikį aplinkai, toksiškumo žmogui potencialas (0,16942) ir galimas pasaulinis klimato atšilimo potencialas per 100 metų (0,14722) turi didžiausią įtaką biologinių atliekų tvarkymui. Mažiausiai svarbus poveikis – fotocheminis ozono susikūrimo potencialas (0,07225) ir ozono sluoksnio mažėjimo potencialas (0,07779). Toks ekspertų vertinimas galėjo būti paveiktas ES per pastarąjį dešimtmetį nuveiktų darbų, siekiant atkurti ozono sluoksnį ir mažinant medžiagų, ardančių ozono sluoksnį, patekimą į rinką.

#### Pradiniai uždavinio duomenys

Modeliavimo scenarijai simbolizuoja tipiską Europos padėtį, kai reikia padėti nuspręsti, kaip tvarkyti biologines atliekas. Dauguma naudojamų duomenų yra susiję su laikotarpiu nuo 2010 iki 2017 m.

Modeliavimui pasirinktas FV yra 1 kg biologinių atliekų tvarkymas (nuo surinkimo iki galutinio šalinimo), įskaitant visus su šios frakcijos tvarkymu susijusius papildomus duomenis. Šiame darbe FV ir į sistemą įvežtų atliekų kiekis laikomas pastoviu pagal būvio ciklo inventurizaciją (toliau – BCĮ).

Sistemos bendrieji duomenys – tai komunalinės biologinės atliekos, transportavimo duomenys ir įrenginių procesams sunaudota energija. Visų pirma Lietuvos energetinis derinys buvo priimtas tiek už sunaudotą elektros energiją, tiek ir dėl sunaudotos energijos išvengimo. AP+K scenarijaus atveju buvo pagaminta atsinaujinanti energija ir grąžintos biologinės atliekos komposto pavidalu, kuris mechaniškai buvo padalytas į skystąją ir kietąją frakcijas. Kietoji anaerobinio raugo frakcija buvo apdorota aerobiniu būdu ir taip buvo gautos organinės trąšos (Di Maria, Micale ir Contini, 2016), o skysta frakcija buvo apdorota nuotekų valymo įrenginiuose dėl to, kad Lietuvoje negalima naudoti tokio tipo skysto anaerobinio raugo kaip trąšų. Deginimo metu yra gaminama elektros energija ir sukuriama išlakos, kurias reikia papildomai tvarkyti. Apdorojant komunalines biologines atliekas mechaninio-biologinio apdorojimo įrenginiuose jos yra stabilizuojamos, bet ne perdirbamos ir vėliau siunčiamos į sąvartyną, surenkant biologinių atliekų srautą atskirai ir panaudojant minėtą technologiją, kai proceso metu yra atgaunamas kompostas. Remiantis šiais tvarkymo scenarijais, sistemoje naudojama informacija apibūdina kaip deginimo būdu pagamintos elektros energijos ir AP būdu pagamintos elektros energijos kiekis; skystųjų, kietųjų ir dujinių teršalų išsiskyrimas iš deginimo, AP, kompostavimo ir biodžiovinimo įrenginių; surinkimui skirto transporto priemonių kaštų bei pagamintų organinių trąšų kiekio.

2 lentelė. Biologinių atliekų tvarkymo scenarijai ir jų vertinimas COPRAS metodu (sudaryta autorės)

Table 2. COPRAS assessment of biowaste treatment scenarios (developed by author)

Nagrinėjami rodikliai	*	Reikšmingumas	Matavimo vienetai	Lyginamieji scenarijai		
				K	AP+K	D
Galimas pasaulinis klimato atšilimo potencialas per 100 metų	min	0,14722	<i>kgCO<sub>2</sub> eq./a</i>	0,06522	0,06232	0,01968
Rūgštėjimo potencialas	min	0,13610	<i>kgSO<sub>2</sub> eq./a</i>	0,00323	0,03715	0,09572
Eutrofikacijos potencialas	min	0,15552	<i>kgPO<sub>4</sub> eq</i>	0,00391	0	0,15161
Fotocheminis ozono susikūrimo potencialas	max	0,07225	<i>kgC<sub>2</sub>H<sub>2</sub> eq./a</i>	0,02192	0,04183	0,00850
Ozono sluoksnio mažėjimo potencialas	min	0,07779	<i>kgCFC-11 eq./a</i>	0,02091	0	0,05688
Abiotinio nykimo potencialas	min	0,09725	<i>kgSb eq./a</i>	0,04759	0	0,04966
Toksiškumo žmogui potencialas	min	0,16942	<i>kgI,4-DB eq./a</i>	0,01495	0	0,15447
Sausumos ekotoksiškumo potencialas	min	0,14445	<i>kgI,4-DB eq./a</i>	0,01137	0	0,13308
Naudingų poveikių aplinkai rodiklių suma				0,02192	0,04183	0,00850
Žalingų poveikių aplinkai rodiklių suma				0,16718	0,09947	0,66110
Alternatyvos reikšmingumas				0,33817	0,57336	0,08847
Alternatyvos prioritetiškumas				2	1	3
Naudingumo laipsnis				58,98 %	100 %	16,58 %

Kalbant apie transportavimą, visų scenarijų atveju buvo daroma prielaida, kad atliekų tvarkymo įrenginys yra 50 km atstumu nuo surinkimo taško ir kad transporto priemonės taip pat turi grįžti į tą vietą.

Modeliavimas atliktas remiantis būvio poveikio vertinimo (toliau – BCĮ) skaičiavimais, atliktais *SimaPro 7.2*, ir grindžiamas IMPACT 2002+ bei EcoInvent 2.2 duomenų baze. Šiame darbe poveikis aplinkai yra vertinamas pagal aštuonias poveikio kategorijas (rezultatai pateikti I lentelėje).

Remiantis pasirinktomis alternatyvomis bei atrinktais vertinimo kriterijais, sudaroma pradinė uždavinio lentelė su duomenimis, kuriais remiantis atliekama analizė ir vertinimas.

Siekiant suvienodinti ženklus ir visus juos padaryti teigiamus, kiekvienas neigiamas rezultatas (teigiamas aplinkosauginiu požiūriu, nes nesukuria taršos, o atvirkščiai – ją sumažina) įgyja 0 reikšmę, o prie likusiųjų yra pridamas atitinkamo dydžio poveikis.

Atliekant biologinių atliekų tvarkymo alternatyvų analizę, remiantis aplinkosauginiu poveikiu aplinkai per BCV ir daugiakriterė analize (COPRAS metodu), ir naudojant subjektyvius reikšmingumus, galima teigti, kad aplinkosauginiu požiūriu geriausia biologinių atliekų tvarkymo alternatyva yra anaerobinis pūdymas su vėlesniu substrato kompostavimu, kompostavimas įrenginiuose (Lietuvos atveju laisvuose biodžiovinimo tuneliuose) yra antroji alternatyva, o biologinių atliekų deginimas šiuo metu veikiančioje kogeneracinėje atliekų deginimo gamykloje aplinkosauginiu požiūriu yra netvariausia alternatyva.

## Išvados

1. Biologinių atliekų tvarkymo scenarijų aplinkosauginė analizė atlikta remiantis BCV metodika ir pasitelkiant daugiakriterės analizės metodus, kadangi BCV rezultatų tikslumas yra susijęs su potencialiai reikšmingais netikrumo šaltiniais.

2. Biologinių atliekų tvarkymo scenarijų aplinkosauginis poveikis turi būti analizuojamas holistiškai, pasitelkus visus įmanomus duomenis iš visų atliekų tvarkymo etapų ir pritaikius tinkamus matematinės išraiškos būdus.

3. Atliekant biologinių atliekų tvarkymo aplinkosauginių poveikių kriterijų reikšmingumo rodiklių nustatymą, subjektyvūs reikšmingumai nustatyti remiantis 10 ekspertų, kurių nuomonės buvo suderintos, įvertinimu.

4. Apskaičiuoti biologinių atliekų tvarkymo scenarijų vertinimai pagal COPRAS metodą. Apdorojus rezultatus galima teigti, kad aplinkosauginiu požiūriu geriausia

biologinių atliekų tvarkymo alternatyva – anaerobinis pūdymas su vėlesniu substrato kompostavimu.

## Priedas A. Paremiančioji informacija

Paremiančioji informacija nurodyta baigiamajame magistro darbe „Bioskaidžių atliekų tvarkymas remiantis žiedinės ekonomikos principais“.

## Literatūra

- Allacker, K., Mathieux, F., Manfredi, S., Pellettier, N., de Camillis, C., Ardente, F., & Pant, R. (2014). Allocation solutions for secondary material production and end of life recovery: proposals for policy initiatives. *Resources, Conservation & Recycling*, 88, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.016>
- Björklund, A. E. (2002). Survey of approaches to improve reliability in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(2), 64. <https://doi.org/10.1007/BF02978849>
- Di Maria, F., Micale, C., & Contini, S. (2016). A novel approach for uncertainty propagation applied to two different bio-waste management options. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(10), 1529-1537. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1101-1>
- European Commission. (2010). Communication from the Commission on the practical implementation of the EU bio-fuels and bioliquids sustainability scheme and on counting rules for biofuels. *Official Journal of the European Union*, 17(443), 8-16.
- International Organization of Standardization. (2006). *Environmental management: life cycle assessment, principles and guidelines (ISO 14040)*. Geneva.
- Kaklauskas, A. (1999). *Multiple criteria decision support of building life cycle*. Research report presented for habilitation (DrSc). Technological sciences, civil engineering (02T). Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius: Technika. 118 p.
- Kendall, M. (1975). *Rank correlation methods*. London: Griffin. 2016 p.
- Laurent, A., Bakas, I., Clavreul, J., Bernstad, A. Niero, M., Gentil, E., Hauschild, M. Z., & Christensen, T. H. (2014). Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: Lessons learned and perspectives. *Waste Management*, 34(3), 573-588. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.045>
- Lloyd, S. M., & Ries, R. (2007). Characterizing, propagating, and analyzing uncertainty in life-cycle assessment: a survey of quantitative approaches. *Journal of Industrial Ecology*, 11(1), 161-179. <https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1136>
- Manfredi, S., & Goralczyk, M. (2013). Life cycle indicators for monitoring the environmental performance of European waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 81, 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.09.004>
- Manfredi, S., & Pant, R. (2013). Improving the environmental performance of bio-waste management with life cycle thinking (LCT) and life cycle assessment (LCA). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1), 285-291. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0497-5>

- Ross, S., Evans, D., & Webber, M. (2002). How LCA studies deal with uncertainty. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(1), 47.  
<https://doi.org/10.1007/BF02978909>
- Zavadskas, E. K., Kaklauskas, A., & Sarka, V. (1994). The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects. *Technological and Economic Development of Economy*, 1(3), 131-139.

#### **APPLICATION OF THE MULTI-CRITERIAN ANALYSIS FOR SUSTAINABLE BIO-WASTE MANAGEMENT**

R. Tumaševičiūtė, A. Zigmontienė

##### **Summary**

International and Lithuanian waste management sector faces new challenges in tackling the policy of sustainable waste management, encouraging the development of new waste treatment technologies and preparing for a large-scale transformation in the waste sector. Waste Management Regulations provide that from 2019 all cities with more than 50,000 inhabitants will be required to collect bio-waste separately. Thus, it has become relevant for the state to properly assess the environmental impact of bio-waste technologies. In this paper, the environmental impact of biowaste management is studied using the Life Cycle Assessment (LCA) approach. The multi-criteria assessment method was used to estimate the complexity of the problem; also, highly qualified specialists (experts) were consulted. LCA and expert assessed global warming, acidification, eutrophication, photochemical ozone creation, human toxicity, terrestrial ecotoxicity, abiotic depletion and ozone layer depletion potentials. The compatibility of expert opinions was evaluated using the Kendall's concordance coefficient. The general data was processed using the COPRAS method. The results showed that the best way to manage biowaste is to process anaerobic digestion with a later stage of composting, less useful was composting in plants – 58.98%, and the least effective was WtE (16.58%).

**Keywords:** bio-waste, multi-criteria analysis, life cycle assessment, Kendall's concordance coefficient, COPRAS.