



## BIOLOGIŠKAI SKAIDŽIŲ ATLIEKŲ TVARKYMAS KURIANT ŽIEDINĘ BIOEKONOMIKĄ

Rasa Tumaševičiūtė<sup>1</sup>, Gytautas Ignatavičius<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Gamtos tyrimų centras*

<sup>2</sup>*Ekologijos ir aplinkotyros centras*

*El. paštas: <sup>1</sup>rasa.tumaseviciute@gamtc.lt; <sup>2</sup>gytautas.ignatavicius@gf.vu.lt*

**Anotacija.** Pastaraisiais metais biologiškai skaidžios atliekos įgauna vis didesnę reikšmę, nes yra vis plačiau naudojamos kaip tvirti alternatyva naftos pagrindo produktams ir didelės vertės bioproduktams gaminti. Didžioji dalis pakopinių bioatliekų perdirbimo gamyklų (biorefinerijos) kaip žaliavą naudoja homogeninius srautus iš žemės ūkio, maisto perdirbimo įmonių ir (ar) nuotekų valymo įrenginių. Straipsnyje yra pristatoma biologiškai skaidžių atliekų, esančių komunalinių atliekų sraute (toliau – BAKAS), panaudojimo bioatliekų perdirbimo gamyklose situacija. Išanalizuoti tyrimai, kuriuose kaip žaliava naudojama komunalinių atliekų biologiškai skaidi (organinė) frakcija, iš kurios gaminami aukštos vertės bioproduktai – fermentai, bioplastikai ar biopesticidai. Nustatytiems tyrimams įvertintos produktų rinkos galimybės ir nustatyti didžiausią ekonominę potencialią turintys aukštos vertės bioproduktai. Pakopinės bioatliekų perdirbimo gamyklos, kurios naudoja komunalinių atliekų biologiškai skaidžių frakciją yra perspektyvus atliekų tvarkymo sprendimas, kuris suteikia galimybę išvystyti žiedinę bioekonomiką ir išspręsti atliekų tvarkymo problemas.

**Reikšminiai žodžiai:** bioproduktai, biologiškai skaidžios atliekos, organinė frakcija, žiedinė bioekonomika, fermentai.

### Įvadas

Vienas iš pagrindinių šiandieninių žmonijos iššūkių yra didėjantis komunalinių atliekų kiekis visame pasaulyje. Ši problema yra siejama su vyraujančia linijinės ekonomikos sistema ir augančiais miesto gyventojų skaičiais. Žiedinė ekonomika pastaraisiais metais tapo vienu iš svarbiausių metodų, siekiant suvaldyti šią problemą ir sukurti uždarus technologinius ir biologinius ciklus (Bocken, Olivetti, Cullen, Potting ir Lifset, 2017). Siekdami užtikrinti tvarų žmonių vystymąsi, privalome tarpusavyje susieti atliekų ir gamybos sektorius, nes tik taip išnaudosime turimų ribotų žaliavų potencialą ir įgyvendinsime pramoninės ekologijos koncepciją. Cikliniu metodu veikianti sistema, dar vadinama „iš lopšio į lopšį“ koncepcija, paremta tuo, kad medžiagos yra perdirbamos neribotą kiekį kartų, nesukeliant šių medžiagų savybių blogėjimo arba šios medžiagos yra grąžinamos į natūralią ekosistemą nekenkiant aplinkai (McDonough ir Braungart, 2010).

Linijinės ekonominės sistemos pakeitimas žiedine ir cikliško medžiagų judėjimo užtikrinimas padės sušvelninti

miesto atliekų tvarkymo problemą ir leis optimizuoti turimo riboto žaliavų kiekio panaudojimą. Ateityje išteklių trūkumas didės, o gebėjimas šiuos išteklius teisingai valdyti ir atkurti taps gyvybiškai svarbus tvariai pasaulio ekonomikai (Tonini, Martinez-Sanchez ir Astrup, 2013). Europos Sąjungos (toliau – ES) *Žiedinės ekonomikos strategija* skelbia, kad tokių sistemų tikslas yra „uždaryti kilpą veiksmingai panaudojant išteklius pramonės simbiozei plėtoti ir siekiant sumažinti spaudimą ES gamtiniam kapitalui“ (Europos Komisija, 2019).

2016 m. ES susidarė 253 mln. tonų kietųjų komunalinių atliekų (ES statistikos tarnyba, 2019), iš kurių 40–60 % yra organinės kilmės atliekos. Organinės atliekos pasižymi dideliu drėgmės ir druskų kiekiu, todėl aerobinėmis sąlygomis greitai skyla ir skleidžia nemalonius kvapus (Abu Yazid, Barrena, Komilis ir Sánchez, 2017). Netinkamai tvarkomas srautas sukelia sanitarines problemas ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas. Tinkamai tvarkomas organinių atliekų srautas yra puikus šaltinis atsinaujinančios energijos ir pridėtinės vertės produktų, tokių kaip

organinės trąšos, biopesticidai ar bioplastikai, gamybai (Abu Yazid ir kt., 2017; Tonini ir kt., 2013; Fava ir kt., 2015; Lin ir kt., 2013).

Pastaraisiais metais didelis dėmesys skirtas iš maisto gamybos įmonių ar žemės ūkio atliekų susidarančių organinių šalutinių gamybos produktų valorizacijos tyrimams (Poggi-Varaldo ir kt., 2014; Lin ir kt., 2013), tačiau tyrimų apie BAKAS valorizaciją vis dar trūksta.

BAKAS pasižymi (EU-AGRO-BIOGAS, 2010; Fricke, Santen, Wallmann, Hüttner ir Dichtl, 2007; Li, Park ir Zhu, 2011; Ward, Hobbs, Holliman ir Jones, 2008):

- 1) nepastovia ir sunkiai kontroliuojama sudėtimi;
- 2) dideliu dalelių dydžiu, t. y. jas reikia smulkinti,
- 3) paruošti apdorojimui arba rinkti atskirai;
- 4) biodujų išgavimo našumu – 03–06 m<sup>3</sup>/kg LK (lakiųjų kietųjų medžiagų);
- 5) kietąja frakcija – 20–50 (%);
- 6) C/N santykiu – 35.

Kuriant žiedinę ekonomiką naudojama pakopinio proceso metodo samprata, kurioje gamybos procesams yra naudojama pirminė žaliava arba bet kurio sektoriaus atliekos. Pakopinės koncepcijos svarba, kuriant ir įgyvendinant išteklius ir (arba) energiją taupančią, ekologišką ir mažai anglies dioksido į aplinką išskiriančią ekonomiką, yra vėraujanti ES aplinkosaugos politikos tema nuo 2012 m., kuri apima tokius aplinkosauginius dokumentus, kaip ES *Miškų strategiją*, ES *Bioekonomikos strategiją* ir ES *Žiedinės ekonomikos veiksmų paketą*.

Šiame darbe nagrinėjami pakopinių bioatliekų perdirbimo gamyklų modeliai, kuriuose kaip žaliava naudojama komunalinių atliekų biologiškai skaidi (organinė) frakcija, iš kurios gali būti gaminami aukštos vertės bioproduktai – fermentai, bioplastikai ar biopesticidai. Išanalizavus pakopinių bioatliekų perdirbimo gamyklų modelius siekiama įvertinti produktų rinkos galimybę ir nustatyti didžiausią ekonominę potencialią turinčius aukštos vertės bioproduktus, kurių žaliava – komunalinių atliekų biologiškai skaidi frakcija.

## Metodika

Nagrinėjant BAKAS panaudojimo pakopinėse atliekų perdirbimo gamyklose pridėtinės vertės produktų gamybai literatūros šaltinius, buvo naudojama *Scopus* duomenų bazė. Analizė atlikta remiantis šiais terminais: „bioekonomika“, „biologiškai skaidžios atliekos“, „bioatliekų perdirbimo gamyklos“, „organinės atliekos“, „maisto atliekos“, „anaerobinis pūdymas“, „bioplastikai“, „biopesticidai“, „fermentai“, „kietųjų komunalinių atliekų organinė frakcija“ ir „PHA“.

Ši analizė neapima vienaarūšių organinių šalutinių srautų iš maisto perdirbimo, žemės ūkio ar nuotekų valymo procesų. Dažniausiai naudojami biologiškai skaidžių atliekų anaerobinio raugo valorizacijos procesai apima organinių rūgščių, ekstrahuotų iš lakiųjų riebalų rūgščių, gamybą (Lee, Chua, Yeoh ir Ngoh, 2014). Šioje apžvalgoje aptariami biologinių atliekų perdirbimo technologiniai procesai ir valorizacijos procesas nuo biologiškai skaidžių atliekų anaerobinio raugo iki aukštos vertės bioproduktų gamybos (Scopus, 2014). Būtina atsižvelgti į tai, kad šiuo metu paplitusios technologijos, tokios kaip kietojo atgautojo kuro, techninio komposto arba biodegalų gamyba iš BAKAS, dėl savo efektyvumo ir generuojamų pajamų turi būti iš naujo įvertintos. Tačiau šiame darbe yra įvertinti tik aukštos pridėtinės vertės bioproduktai, o vertinimas atliktas:

- 1) nustatant tyrimus, kuriuose BAKAS yra naudojamas kaip žaliava gaminant didelės pridėtinės vertės produktus (t. y. ne bioenergiją ir ne trąšas);
- 2) nustatant biologinės kilmės produktų grąžinimą į ekonominę sistemą;
- 3) analizuojant galimas būsimų bioatliekų perdirbimo sistemų pajamas.

Aptarta pagamintų bioproduktų ekonominė nauda ir pateiktos pastabos dėl galimos verslo plėtros. Ši analizė dėl savo kompleksiskumo pateikia gaires apgalvotoms ir ekonomiškai pagrįstoms bioatliekų perdirbimo gamyklų projektavimo procedūroms, kurios atitiktų tiek techninius, tiek rinkos reikalavimus ir įgyvendintų pakopinio biomasės panaudojimo procesus bei užtikrintų spartesnę žiedinės bioekonomikos įgyvendinimą.

## Bioatliekų perdirbimo gamyklos koncepcija

Bioatliekų perdirbimo gamykla – tai gamykla, kurioje naudojamos visos biomasės sudėtinės dalys, pasitelkiant įvairias pasiekiamas technologijas ir integruotas biotechnologijas, tuo pačiu įgyvendinant pakopinį atliekų tvarkymo principą (Euroview ir Biopol, 2009). Bioatliekų perdirbimo gamyklos veikimo principas yra analogiškas naftos perdirbimo gamyklos veikimo principui, kur nafta yra išskiriama į įvairius sudėtinius produktus, tokius kaip degalai ir naftos chemijos pramonės žaliavos (Maity, 2015). BAKAS panaudojimas nėra taip gerai išvystytas kaip homogeninių srautų iš maisto gamybos įmonių ar žemės ūkio atliekų susidarančių organinių šalutinių gamybos produktų ar nuotekų valymo įrenginių panaudojimas. BAKAS yra mišraus pobūdžio ir susideda iš krakmolo, celiuliozės, baltymų, riebalų, lipidų ir kitų organinių junginių (Abu Yazid ir kt., 2017). Tai yra viena iš priežasčių, kodėl BAKAS

panaudojimo bioatliekų perdirbimo gamyklose tyrimų trūksta. Nepaisant to, atliekant literatūros analizę, buvo nustatyta 13 tyrimų, kuriuose BAKAS buvo panaudota kaip žaliava aukštos pridėtinės vertės bioproduktams gaminti (1 lentelė). Nenustatyta jokių pramoninio dydžio BAKAS bioatliekų perdirbimo gamyklų.

*Anaerobinio pūdymo pagrindo bioatliekų perdirbimo gamykla*

Bioatliekų perdirbimo gamykla savo koncepcija yra panaši į naftos perdirbimo gamyklą, kurioje biomasė yra paverčiama keliomis cheminėmis medžiagomis, degalais ir energija. Naudojamos kelios koncepcijos, o tarp jų ir anaerobinio pūdymo (toliau – AP) pagrindo bioatliekų perdirbimo gamyklos, kuriose AP procesas yra naudojamas kaip šalutinis ruošiant fermentuotą biomasę. AP pagrindo bioatliekų perdirbimo gamyklos gamina didelę pridėtinę vertę turinčius mažo tūrio produktus, t. y. degalus, chemines medžiagas, įvairius fermentus (1 paveikslas) ir didelio

tūrio mažos vertės produktus, pvz., šilumą, elektros energiją, dujas, trąšas ar pakratus gyvuliams (Sawatdeenarunat ir kt., 2016). AP pagrindo bioatliekų perdirbimo gamyklos yra ne tik ekonomiškai naudingos, tačiau ir tvaresnės, nes diversifikuoja AP panaudojimo galimybes ir prisideda prie energetinės nepriklausomybės užtikrinimo (Surendra, Sawatdeenarunat, Shrestha, Sung ir Khanal, 2015).

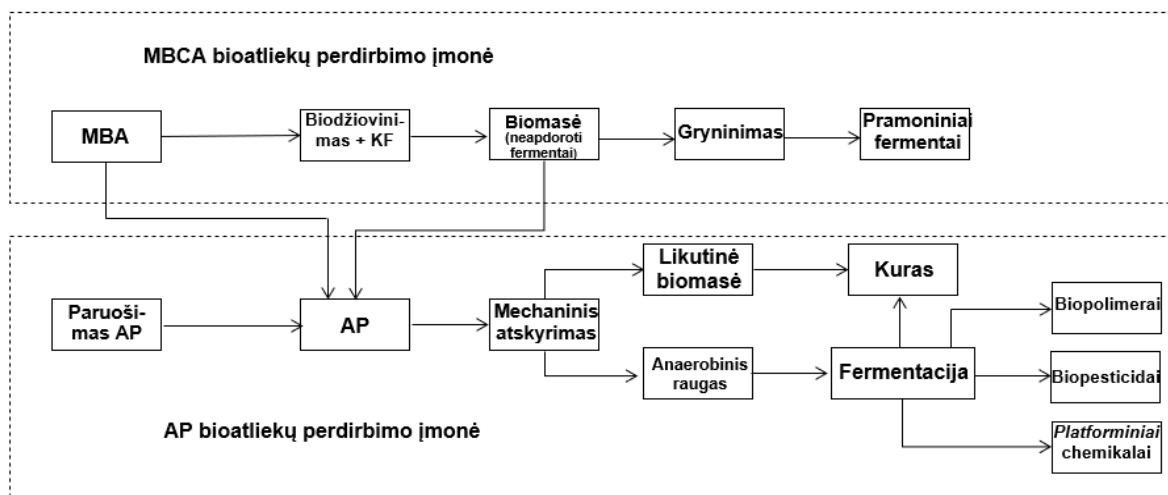
AP pagrindo bioatliekų perdirbimo gamyklos didžiąja dalimi gamina fermentuotas atliekas ir įvairias skystas frakcijas, o biodujos yra šalutinis procesų produktas. Todėl svarbu aiškiai identifikuoti AP procesui naudojamą žaliavas. Po proceso likę angliavandeniliai gali būti panaudojami tiesiogiai, fermentuojami iki alkoholių arba dehidratuojami iki furanų, kurie yra naudojami chemijos pramonėje (1 paveikslas). Likusi kietoji fermentuotų biologiškai skaidžių atliekų dalis gali būti panaudota gaminant biodegalus arba pirolizės metodu gaminant bioanglį.

1 lentelė. Reprzentaciniai tyrimai, valorizacijos efektyvumas ir vidutinė rinkos kaina (Eur/t) fermentų, PHA, biopesticido ir kitų didelės vertės produktų gamybai (ekstrahavimui) iš BAKAS gautų terpių

	Procesas	Produktas	Valorizacijos efektyvumas	Vidutinė rinkos kaina <sup>1</sup> , Eur/t	Literatūra
<i>Fermentų ekstrahavimas</i>					
	Kietafazė fermentacija	Gliukoamilazė	108,47 U/g	25 000	Kiran, Trzcinski ir Liu, 2014a
		Celiulazė	26,1 – 66,0 FPU/g	30 000	Abdullah, Greetham, Pensupa, Tucker ir Du, 2016; Janveja, Rana ir Soni, 2014
		Holoceliulazės	67 FPU/g	<i>Nėra rinkos</i>	Escamilla-Alvarado, Poggi-Varaldo ir Ponce-Noyola, 2013
Išankstinis apdorojimas	Procesas	Produktas	Valorizacijos efektyvumas		Literatūra
<i>PHA, biopesticidų ir kitų aukštos pridėtinės vertės produktų ekstrahavimas</i>					
Hidrolizė	Fermentacija	PHA	27–115 g/kg	4 500	Amulya, Jukuri ir Mohan, 2015; Eshtaya, Nor ‘Aini ir Hassan, 2013; Wu ir kt., 2017
		Polilaktinės rūgšties pluoštas	128 g/kg	5 000	Hu ir kt., 2017
		<i>Bacillus thuringiensis</i>	2,51 · 10 <sup>10</sup> CFU/g	8 000	Zhang ir kt., 2015; Zhang, Qiu, Gong, Cao ir Wang, 2013
		Probiotikai gyvūnų pašarams	2,24 · 10 <sup>10</sup> CFU/g	1 300	Yin ir kt., 2013
		Grafitas, C	0,5 %	900	Kampioti, 2016; Waterton ir Slack, 2019

čia: U/g – specifinis fermento aktyvumas – tarptautinio fermento aktyvumo vienetų (U) skaičius 1 g baltymo; FPU/g – 2,0 mg redukuoto cukraus ekvivalentų išsiskiriančio iš celiuliozės veikiančio fermento po 1 val. esant 50 °C temperatūrai ir pH4,8 tirpale, pagamintame ant išmatuotos filtravimo juostos; CFU/g – kolonijas formuojantis vienetas, naudojamas įvertinti gyvybingų bakterijų ar grybelių ląstelių skaičių mėginyje.

<sup>1</sup>Kaina įvertinta www.alibaba.com pagal gautų produktų aktyvumą ir sudėtį.



1 paveikslas. Supaprastinta BAKAS pagrindo bioatliekų perdirbimo gamyklos koncepcijos proceso schema

Panaudojant termocheminius procesus ligninas gali būti transformuojamas į šilumą ir elektros energiją, skystus degalus, dujų sintezei (antros kartos skystiesiems biodegalams ir biovandeniliui) arba aromatinių junginių, turinčių didelę pridėtinę vertę, gamybai (1 paveikslas). Maistinės medžiagos, esančios skystojoje frakcijoje, gali būti panaudojamos dumblių auginimui arba struvitui, t. y. lėtai atpaaiduojamoms trąšoms gaminti (Surendra ir kt., 2015). Biodujos nėra finansiškai naudingas produktas, todėl jos gali būti transformuotos į aukštesnės pridėtinės vertės produktus, tokius kaip metanolis, bio-SGD (suslėgtos gamtinės dujos) arba skystasis kuras (Surendra ir kt., 2015).

AP sistemos nėra vienodos, jos priklauso nuo žaliavų tipo ir kompozicijos, fermentatoriaus dydžio, naudojamų veiklos režimų, vyriausybės paskatų ir rinkos prieinamumo gautiems produktams (Taleghani ir Kia, 2005).

2 lentelė. AP sistemos analizė, kai žaliava yra biologiškai skaidžių atliekų, esančių komunalinių atliekų sraute, frakcija (perskaičiuota į Eur)

Produktas	Elektros energija, Eur	Biodujos, Eur
Kapitalo išlaidos	217–557 t / žaliavų	108
Veiklos sąnaudos	18–98 t / žaliavų	66 t / žaliavų
Produkto savikaina	–	325 t / biodujų
Pajamos už žaliavas	43–57 t / žaliavų	–
Regionas	Airija, JK, Kanada, Ispanija, Danija	Tailandas
Literatūra	Chynoweth, Owens ir Legrand, 2001; Hennig ir Gawor, 2012; Arsova, 2010; Murphy ir McKeogh, 2004	Ali, Nitivat-tanon, Abbas ir Sabir, 2012

Atliekant BAKAS panaudojimo bioatliekų perdirbimo gamyklose analizę, reikia įvertinti tai, kad tai yra didelio masto AP sistema, kuriai reikalingos didelės kapitalo investicijos, priežiūra ir įvairūs biologiškai skaidžių atliekų srautai (2 lentelė). Kapitalo ir veiklos sąnaudos sudaro didžiąją bendrosios energijos gamybos sąnaudų dalį (Chynoweth ir kt., 2001; Hennig ir Gawor, 2012).

#### *Mechaninio-biologinio-cheminio pagrindo bioatliekų perdirbimo gamykla*

Nauja integruota mechaninio-biologinio-cheminio apdorojimo (toliau – MBCA) sistema, skirta levulino rūgšties gamybai iš biologiškai skaidžių atliekų, esančių komunalinių atliekų sraute, bioatliekų perdirbimo įmonės ekonominį naudingumą padidina 110–150 %, o kietų komunalinių atliekų tvarkymo kaina siekia 191 Eur/t, 71 % šių išlaidų tenka cheminiams procesams (Sadhukhan, Ng ir Martinez-Hernandez, 2016), todėl aktualu optimizuoti procesus.

#### **Didelę pridėtinę vertę turintys mažo tūrio produktai iš bioatliekų perdirbimo gamyklos**

Didelę pridėtinę vertę turintys bioproduktai gali paskatinti verslo plėtrą. Tai produktai – visiškai arba bent iš dalies gauti iš biomasės. Jie yra biologiškai skaidomi, netoksiški ir patvarūs. Bioatliekų perdirbimo gamyklos pajamos susideda iš bioenergijos ir didelės pridėtinės vertės bioproduktų gamybos. Pagrindiniai reikalavimai – didelio masto gamybos pajėgumai ir pakopinis ryšys tarp bioproduktų ir bioenergijos išgavimo. Ne visi bioproduktai yra vertingi, todėl projektuojant bioatliekų perdirbimo gamyklą turėtų būti įvertinti šie kriterijai:

- 1) cheminė žaliavų sudėtis;
- 2) žaliavų perdirbimo sąnaudos;
- 3) dabartinė ir numatoma rinkos kaina;

- 4) rinkos pajėgumas;
- 5) įrenginių poreikis ir jų techninės charakteristikos.

2016 m. JAV Energetikos ministerijos užsakytu atliktame tyrime (JAV Energetikos departamentas, 2016) buvo identifikuotos 12 biocheminių medžiagų, kurios turi ir ateityje turės didžiausią rinkos potencialą: 1,3-butadienas, 1,4-butandiolis, etilo laktatas, riebieji alkoholiai, furfurolas, glicerinas, izoprenas, pieno rūgštis, propan-1,2-diolis, 1,3-propandiolis, gintaro rūgštis ir p-ksilenas. Biocheminių medžiagų rinkos stabilumas priklauso nuo to, koku mastu yra įgyvendinama biotechnologijų plėtros politika ir faktinio technologinių inovacijų pasiekiamumo (Patel ir kt., 2006).

#### *Fermentų ekstrahavimas*

Fermentai yra baltymų molekulės, kurios katalizuoja biochemines reakcijas, pvz., hidrolizuoja celiuliozę į gliukozę. Bioatliekų perdirbimo gamykloje fermentai (1 pav.) yra labai svarbūs biodegalų ir cheminių medžiagų gamybai, nes pagal juos yra nustatomas procese dalyvaujančių reakcijų efektyvumas ir greitis.

Dėl didelių substrato, naudojamo fermentų auginimui, sąnaudų įprastinė cheminė fermentų gamyba yra brangi (Janveja ir kt., 2014), todėl BAKAS kaip substrato naudojimas šiems fermentams gaminti yra svarbus žingsnis siekiant padidinti bioatliekų perdirbimo gamyklų ekonomiskumą.

Mišrios maisto atliekos (Cerda ir Sánchez; 2018, Kiran, Trzcinski ir Liu, 2014a; Janveja ir kt., 2014; Abdullah ir kt., 2016; Escamilla-Alvarado ir kt., 2013) kietafazės fermentacijos (toliau – KF) metodu pasitelkiant mikroorganizmus ir grybus yra naudojamos kaip fermentų gamybos žaliava (1 lentelė).

Pramoniniai fermentai, tokie kaip proteazės, celiulazės, amilazės, pektinazės, lipazės, gali būti gaunami iš maisto atliekų (Kiran, Trzcinski, Ng ir Liu, 2014b; Ravindran ir Jaiswal, 2016). Iš nešvaraus organinių atliekų srauto gaminami fermentai gali būti naudojami pramoniniams tikslams, priklausomai nuo žaliavų transportavimo kaštų ir bioproducto grynumo reikalavimų. Be to, šie fermentai gali būti integruoti į kitus bioatliekų perdirbimo gamykloje gaminamus bioproductus ar panaudoti bioenergijai išgauti.

#### *Bioplastikų, biopesticidų ir kitų aukštos pridėtinės vertės produktų ekstrahavimas*

Polihidroksialkanoatai (toliau – PHA) yra riebalų rūgščių (turinčių hidroksilo grupių) poliesteriai, kuriuos įvairios bakterijos saugo kaip ląstelių anglies ir energijos atsargų medžiagas (Sakai ir kt., 2015). PHA gali būti sintetiniai daugiau nei 75 skirtingų bakterijų genčių kaip

vidinis ląstelių anglies ir energijos šaltinis ir / ar kaip šalutinis produktas, skirtas sumažinti nereikalingą energijos suvartojimą arba perteklinius elektronus esant nepalankioms aplinkos ir mitybos sąlygoms (Lee, 1996). Biologinių ir biologiškai skaidžių plastikų, tokių kaip PHA gamyba ir naudojimas, išsprendžia biologiškai skaidžių atliekų tvarkymo problemą ir suteikia galimybę pakeisti naftos pagrindu pagamintus plastikus, kadangi pastarieji yra gaminami iš neatsinaujančių išteklių. Gaminant PHA pramoniniu būdu yra naudojami aukštos rinkos vertės cukraus pagrindo substratai. Siekiant sumažinti gamybos kaštus, siūloma naudoti mažos rinkos vertės substratus, tokius kaip BAKAS (Hafuka ir kt., 2011).

Reprezentaciniai tyrimai, valorizacijos efektyvumas ir vidutinė rinkos kaina (Eur/t) PHA gamybai (ekstrahavimui) iš BAKAS gautų terpių pateikti 1-oje lentelėje. Mokslininkų nuomone, procesą reikia toliau optimizuoti (Hu ir kt., 2017; Amulya ir kt., 2015), nors rezultatai yra daug žadantys. Su išimtimi (Hu ir kt., 2017) visuose tyrimuose taikytos panašios procedūros:

- 1) BAKAS fermentuotas;
- 2) kultūros selekcija (PHA gaminanti rūšis);
- 3) skystoji frakcijos, turinčios fermentuotų organinių rūščių, dalis derinama su tinkamiausia mikrobu kultūra tam, kad būtų pasiektas maksimalus rezultatas gaminant ir kaupiant PHA.

Visuose tyrimuose buvo gautas polimeras PHA, kurį sudarė PHB ir PHV. Tačiau tyrimai skyrėsi mikrobinėmis kultūromis ir taikymo mastu.

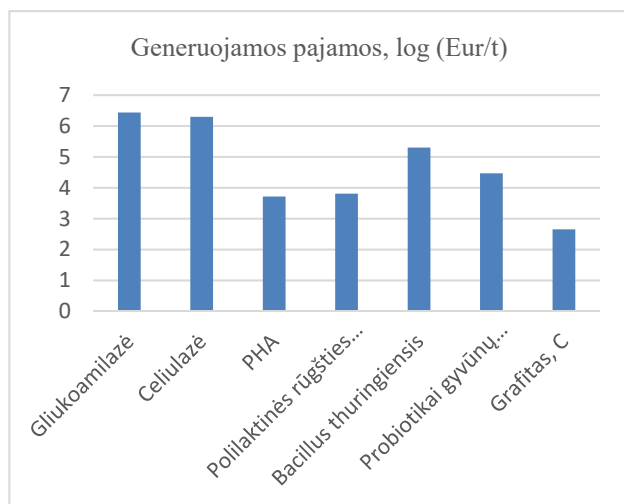
Bioplastikų, tokių kaip PHA, gamyba gali būti integruota į bioatliekų perdirbimo gamyklos technologinius procesus. Šiuo būdu pagamintas PHA yra gautas iš pirmųjų, tokių kaip pentozė ir levulino rūgštis. Didelis iššūkis – tai mažos sintetinio naftos pagrindo polimero gaminimo sąnaudos, palyginti su PHA gamybos sąnaudomis, todėl integruota bioatliekų perdirbimo gamykla yra žingsnis į priekį išlaidų mažinimo srityje. PHA gamybos sąnaudos priklauso nuo bakterijų augimo greičio, galutinio ląstelių tankio, PHA gaminančių mikrobu, derliaus konversijos, substratų kainų ir PHA panaudojimo efektyvumo (Chen, 2009).

*Bacillus thuringiensis* (Bt) yra vienas dažniausiai naudojamų ir tiriamų biopesticidų. Nepaisant plataus galimo panaudojimo (pvz., žemės ūkio, miškininkystės ir visuomenės sveikatos sektoriuose), jo tradicinė gamyba ribojama dėl brangių žaliavų, didelių investicijų į įrangą ir sudėtingų eksploataavimo sąlygų. Taigi Bt gaminimas iš BAKAS bioatliekų perdirbimo gamykloje yra konkurencinga ir perspektyvi alternatyva.

## Bioproduktų ekonominis potencialas

Analizėje nustatytiems tyrimams įvertintos produktų rinkos galimybės ir nustatyti ekonominį potencialą turintys aukštos vertės bioproduktai (2 paveikslas). Nustatyta, kad iš BAKAS pagaminti fermentai turi didžiausią potencialą – gliukoamilazė ir celiulazė generuoja atitinkamai 2,71 mln. Eur/t ir 1,98 mln. Eur/t. Buvo daroma prielaida, kad fermentų aktyvumas yra nekeičiamas ir nereikia atlikti papildomų gryninimo operacijų prieš pateikiant fermentus į rinką. Holoceliulazės ekonominis potencialas nebuvo vertinamas, nes dar nėra susikūrusios rinkos. Bt ir probiotikai gyvūnų pašarams generuoja atitinkamai 201 tūkst. Eur/t ir 29 tūkst. Eur/t. Bt atveju buvo daroma ta pati prielaida kaip ir fermentų atveju. Bioplastikų ir polilaktinės rūgšties pluošto potencialas nebuvo reikšmingos vertės ir siekė atitinkamai 5 175 Eur/t ir 6 400 Eur/t, tačiau šių produktų nereikia gryninti prieš pateikiant į rinką. Grafito C ekonominis potencialas siekė 450 Eur/t.

Tinkamas gamybos ir transformacijos etapų projektavimas, siekiant išsaugoti fermentacines savybes, užtikrina dideles pajamas iš apdoroto BAKAS. Pramoninis BAKAS valorizacijos įgyvendinimas yra labai svarbus bioatliekų perdirbimo gamyklų platesniam vystymui, kadangi organinių cheminių medžiagų rinka siekia 6 mlrd. JAV dolerių ir iki 2025 m. yra numatomas 16,16 % kasmetinis augimo tempas (Zion Market Research, 2016).



2 paveikslas. Produktų rinkos galimybės ir ekonominį potencialą turintys aukštos vertės bioproduktai

Vystant bioatliekų perdirbimo gamyklas reikia atsižvelgti į tokius aspektus, kaip eksploatacinės sąnaudos ir poveikis aplinkai bei nauda iš iškastinių produktų pakeitimo. Tik tada galima įvertinti visą produktų ekonominę ir aplinkosauginę vertę bei BAKAS kaip tvarų išteklių. Reikia atlikti tolesnius mokslinius tyrimus ir užtikrinti išsamų

BAKAS ištyrimą ir susijusių bioproduktų ekonominių ir aplinkosauginių kaštų ir naudos įvertinimą.

## Išvados

Šiame darbe apžvelgti naujausi tyrimai, kuriais remiantis galima naudoti BAKAS kaip žaliavą bioatliekų perdirbimo gamyklai, gaminančiai didelės pridėtinės vertės produktus. Šis tyrimas atskleidžia, kad bioatliekų perdirbimo gamyklose, naudojant BAKAS kaip žaliavą, yra generuojamos pajamos, ypač gaminant fermentus. Pagaminti fermentai galėtų būti naudojami kaip žaliava platforminiams (*platform*) chemikalams gaminti. BAKAS gali būti naudojamas kaip pigi žaliava biopesticidų, bioplastikų ir kitų aukštos pridėtinės vertės produktų gamybai.

Nepaisant ekonominio potencialo, bioatliekų perdirbimo gamyklos susiduria su šiais iššūkiais:

- 1) Sudėtingas biologinių procesų valdymo mechanizmas;
- 2) Fermentų išgavimas dėl gryninimo stadijos netobulumų yra pradiniam etape, todėl reikia tyrimų, kurie padėtų optimizuoti veiklos parametrus;
- 3) Nenustatyta jokių pramoninio dydžio BAKAS bioatliekų perdirbimo gamyklų, kurios būtų įsidedusios pakopines perdirbimo technologijas;
- 4) Siekiant sumažinti naujų bioatliekų perdirbimo gamyklų statybos kaštus, siūloma atlikti MBA arba AP gamyklų transformacijos į bioatliekų perdirbimo gamyklas tyrimus;
- 5) Kai kurių nišinių produktų rinkos dydis ir vertė nėra pakankamai išanalizuota.

Šiame tyrime pateikiami įrodymai, kad BAKAS yra išteklius, o ne atlieka. Dėl šios priežasties rekomenduojama daugiau dėmesio skirti biotechnologijų plėtrai. Būsimųjų mokslinių tyrimų metu turėtų būti sprendžiamos šių naujų biotechnologijų eksploatacinės sąnaudos ir įvertintas būvio ciklas.

## Literatūra

- Abdullah, J. J., Greetham, D., Pensupa, N., Tucker, G. A., & Du, C. (2016). Optimizing cellulase production from municipal solid waste (MSW) using solid state fermentation (SSF). *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*. *Fundam. Renew. Energy Appl.*, 6(3), 206.
- Abu Yazid, N., Barrena, R., Komilis, D., & Sánchez, A. (2017). Solid-state fermentation as a novel paradigm for organic waste valorization: A review. *Sustainability*, 9(2), 224. <https://doi.org/10.3390/su9020224>
- Ali, G., Nitivattananon, V., Abbas, S., & Sabir, M. (2012). Green waste to biogas: Renewable energy possibilities for Thailand's green markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5423-5429. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.021>

- Amulya, K., Jukuri, S., & Mohan, S. V. (2015). Sustainable multistage process for enhanced productivity of bioplastics from waste remediation through aerobic dynamic feeding strategy: Process integration for up-scaling. *Bioresource Technology*, 188, 231-239. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.070>
- Arsova, L. (2010). *Anaerobic digestion of food waste: Current status, problems and an alternative product*. Columbia University.
- Bocken, N. M., Olivetti, E. A., Cullen, J. M., Potting, J., & Lifset, R. (2017). Taking the circularity to the next level: A special issue on the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 476-482. <https://doi.org/10.1111/jiec.12606>
- Cerda, A., & Sánchez, A. (2018). *Report on the possibilities of digestate (and other wastes) as raw materials for SSF processes to obtain certain bioproducts* [Pranešimas apie digestato (ir kitų atliekų), kaip žaliavų kietafaziams procesams, galimybes gauti tam tikrus bioproduktus]. Prieiga per internetą: <http://www.decisive2020.eu/wp-content/uploads/2018/01/Report-on-the-possibilities-of-digestate-and-other-wastes-as-raw-materials-for-SSF-processes-to-obtain-certain-bioproducts.pdf>
- Chen, G. Q. (2009). A microbial polyhydroxyalkanoates (PHA) based bio- and materials industry. *Chemical Society Reviews*, 38(8), 2434-2446. <https://doi.org/10.1039/b812677c>
- Chynoweth, D. P., Owens, J. M., & Legrand, R. (2001). Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renewable Energy*, 22(1-3), 1-8. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00019-7)
- Final Report – BIOREFINERY EUROVIEW (Current situation and potential of the biorefinery concept in the EU: strategic framework and guidelines for its development) [Dabartinė bioatliekų perdirbimo gamyklų padėtis ir potencialas ES: Strateginė struktūra ir jos plėtros gairės] (2009). Prieiga per internetą: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/84092/reporting/en>
- ES statistikos tarnyba. (2019). *Pagrindinės lentelės – Eurostatas: komunalinių atliekų susidarymas ir apdorojimas pagal apdorojimo metodą* [Main tables – Eurostat: Municipal waste generation and treatment, by type of treatment method]. Prieiga per internetą: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/waste/data/main-tables>
- Escamilla-Alvarado, C., Poggi-Varaldo, H. M., & Ponce-Noyola, M. T. (2013). Use of organic waste for the production of added-value holocellulases with *Cellulomonas flavigena* PR-22 and *Trichoderma reesei* MCG 80. *Waste Management & Research*, 31(8), 849-858. <https://doi.org/10.1177/0734242X13492841>
- Eshtaya, M. K., Nor 'Aini, A. R., & Hassan, M. A. (2013). Bioconversion of restaurant waste into Polyhydroxybutyrate (PHB) by recombinant *E. coli* through anaerobic digestion. *International Journal of Environment and Waste Management*, 11(1), 27-37. <https://doi.org/10.1504/IJEW.2013.050521>
- EU-AGRO-BIOGAS. (2010). *Europos žaliavų atlasas* [European Feedstock Atlas basis version]. Prieiga per internetą: <https://daten.ktbl.de/euagrobiogasbasis/startSeite.do>
- Europos Komisija. (2019). *Žiedinės ekonomikos link* [Towards a circular economy]. Prieiga per internetą: [https://ec.europa.eu/commission/priorities/jobs-growth-and-investment/towards-circular-economy\\_en](https://ec.europa.eu/commission/priorities/jobs-growth-and-investment/towards-circular-economy_en)
- Fava, F., Totaro, G., Diels, L., Reis, M., Duarte, J., Carioca, O. B., Ctor, H., Poggi-Varaldo M., & Ferreira, B. S. (2015). Biowaste biorefinery in Europe: opportunities and research & development needs. *New Biotechnology*, 32(1), 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.11.003>
- Fricke, K., Santen, H., Wallmann, R., Hüttner, A., & Dichtl, N. (2007). Operating problems in anaerobic digestion plants resulting from nitrogen in MSW. *Waste Management*, 27(1), 30-43. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.003>
- Hafuka, A., Sakaida, K., Satoh, H., Takahashi, M., Watanabe, Y., & Okabe, S. (2011). Effect of feeding regimens on polyhydroxybutyrate production from food wastes by *Cupriavidus necator*. *Bioresource Technology*, 102(3), 3551-3553. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.018>
- Hennig, C., & Gawor, M. (2012). Bioenergy production and use: comparative analysis of the economic and environmental effects. *Energy Conversion and Management*, 63, 130-137. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.03.031>
- Hu, Y., Daoud, W. A., Fei, B., Chen, L., Kwan, T. H., & Lin, C. S. K. (2017). Efficient ZnO aqueous nanoparticle catalysed lactide synthesis for poly (lactic acid) fibre production from food waste. *Journal of Cleaner Production*, 165, 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.067>
- Yin, C. H., Dong, X., Lv, L., Wang, Z. G., Xu, Q. Q., Liu, X. L., & Yan, H. (2013). Economic production of probiotics from kitchen waste. *Food Science and Biotechnology*, 22(1), 59-63. <https://doi.org/10.1007/s10068-013-0049-1>
- Janveja, C., Rana, S. S., & Soni, S. K. (2014). Optimization of valorization of biodegradable kitchen waste biomass for production of fungal cellulase system by statistical modeling. *Waste and Biomass Valorization*, 5(5), 807-821. <https://doi.org/10.1007/s12649-014-9297-4>
- JAV Energetikos departamentas. (2016). *Iš biomasės išgautos cheminės medžiagos: bioproduktų rinkos potencialo vertinimas* [Chemicals from biomass: A market assessment of bioproducts with near-term potential]. JAV Energetikos departamentas. Prieiga per internetą: <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65509.pdf>
- Kampioti, A. (2016). *Nanocarbon from food waste: Dispersions and applications*. *Chemical Physics* [physics.chem-ph]. Université de Bordeaux. NNT: 2016BORD0364.
- Kiran, E. U., Trzcinski, A. P., & Liu, Y. (2014a). Glucoamylase production from food waste by solid state fermentation and its evaluation in the hydrolysis of domestic food waste. *Biofuel Research Journal*, 1(3), 98-105. <https://doi.org/10.18331/BRJ2015.1.3.7>
- Kiran, E. U., Trzcinski, A. P., Ng, W. J., & Liu, Y. (2014b). Enzyme production from food wastes using a biorefinery concept. *Waste and Biomass Valorization*, 5(6), 903-917. <https://doi.org/10.1007/s12649-014-9311-x>
- Lee, S. Y. (1996). Bacterial polyhydroxyalkanoates. *Biotechnology and Bioengineering*, 49(1), 1-14. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19960105\)49:1<1::AID-BIT1>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19960105)49:1<1::AID-BIT1>3.0.CO;2-P)
- Lee, W. S., Chua, A. S. M., Yeoh, H. K., & Ngoh, G. C. (2014). A review of the production and applications of waste-derived volatile fatty acids. *Chemical Engineering Journal*, 235, 83-99. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.002>
- Li, Y., Park, S. Y., & Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 821-826. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042>
- Lin, C. S. K., Pfaltzgraff, L. A., Herrero-Davila, L., Mubofu, E. B., Abderrahim, S., Clark, J. H., Koutinas, A. A., Kopsahelis, N., Stamatelatou, K., Dickson, F., Thankappan, S., Mohamed, Z., Brocklesby, R., ... & Thankappan, S. (2013).

- Food waste as a valuable resource for the production of chemicals, materials and fuels. Current situation and global perspective. *Energy & Environmental Science*, 6(2), 426-464. <https://doi.org/10.1039/c2ee23440h>
- Maity, S. K. (2015). Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part I. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1427-1445. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.092>
- McDonough, W., & Braungart, M. (2010). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. MacMillan.
- Murphy, J. D., & McKeogh, E. (2004). Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste. *Renewable Energy*, 29(7), 1043-1057. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.12.002>
- Patel, M., Crank, M., Dornberg, V., Hermann, B., Roes, L., Huesing, B., & Recchia, E. (2006). *Medium and long-term opportunities and risk of the biotechnological production of bulk chemicals from renewable resources – The potential of white biotechnology*. Utrecht University.
- Poggi-Varaldo, H. M., Munoz-Paez, K. M., Escamilla-Alvarado, C., Robledo-Narváez, P. N., Ponce-Noyola, M. T., Calva-Calva, G., Ríos-Leal, E., Galíndez-Mayer, J., Estrada-Vázquez, C., Ortega-Clemente, A., & Rinderknecht-Seijas, N. F. (2014). Biohydrogen, biomethane and bioelectricity as crucial components of biorefinery of organic wastes: A review. *Waste Management & Research*, 32(5), 353-365. <https://doi.org/10.1177/0734242X14529178>
- Ravindran, R., and Jaiswal, A. K. (2016). Exploitation of food industry waste for high-value products. *Trends in Biotechnology*, 34(1), 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.10.008>
- Sadhukhan, J., Ng, K. S., & Martinez-Hernandez, E. (2016). Novel integrated mechanical biological chemical treatment (MBCT) systems for the production of levulinic acid from fraction of municipal solid waste: A comprehensive techno-economic analysis. *Bioresource Technology*, 215, 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.030>
- Sakai, K., Miyake, S., Iwama, K., Inoue, D., Soda, S., & Ike, M. (2015). Polyhydroxyalkanoate (PHA) accumulation potential and PHA-accumulating microbial communities in various activated sludge processes of municipal wastewater treatment plants. *Journal of Applied Microbiology*, 118(1), 255-266. <https://doi.org/10.1111/jam.12683>
- Sawatdeenarunat, C., Nguyen, D., Surendra, K. C., Shrestha, S., Rajendran, K., Oechsner, H., Xie, L., & Khanal, S. K. (2016). Anaerobic biorefinery: current status, challenges, and opportunities. *Bioresource Technology*, 215, 304-313. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.074>
- Scopus® – Copyright Elsevier B.V. (2019). *Scopus*. Prieiga per internetą: <http://scopus.com>
- Surendra, K. C., Sawatdeenarunat, C., Shrestha, S., Sung, S., & Khanal, S. K. (2015). Anaerobic digestion-based biorefinery for bioenergy and biobased products. *Industrial Biotechnology*, 11(2), 103-112. <https://doi.org/10.1089/ind.2015.0001>
- Taleghani, G., & Kia, A. S. (2005). Technical–economical analysis of the Saveh biogas power plant. *Renewable Energy*, 30(3), 441-446. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.06.004>
- Tonini, D., Martinez-Sanchez, V., & Astrup, T. F. (2013). Material resources, energy, and nutrient recovery from waste: are waste refineries the solution for the future?. *Environmental Science & Technology*, 47(15), 8962-8969. <https://doi.org/10.1021/es400998y>
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928-7940. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>
- Waterton, J., & Slack, N. (2019). *Report to discuss upgrading of biogas for feed to a plasma reactor. Project deliverable D4.1* [Ataskaita, kurioje aptariamas biodujų, skirtų pašarams, modernizavimas į plazmos reaktorių. Projekto rezultatai D4.1]. Prieiga per internetą: [http://plascarb.eu/assets/content/D4\\_1%20Biogas%20Upgrading%20Report.pdf](http://plascarb.eu/assets/content/D4_1%20Biogas%20Upgrading%20Report.pdf)
- Wu, B., Zheng, D., Zhou, Z., Wang, J. L., He, X. L., Li, Z. W., & He, M. X. (2017). The enrichment of microbial community for accumulating polyhydroxyalkanoates using propionate-rich waste. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 182(2), 755-768. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2359-2>
- Zhang, W., Qiu, L., Gong, A., Cao, Y., & Wang, B. (2013). Solid-state fermentation of kitchen waste for production of *Bacillus thuringiensis*-based bio-pesticide. *BioResources*, 8(1), 1124-1135. <https://doi.org/10.15376/biores.8.1.1124-1135>
- Zhang, W., Zou, H., Jiang, L., Yao, J., Liang, J., & Wang, Q. (2015). Semi-solid state fermentation of food waste for production of *Bacillus thuringiensis* biopesticide. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 20(6), 1123-1132. <https://doi.org/10.1007/s12257-015-0347-y>
- Zion Market Research. (2016). *Bio-solvents market (Alcohols, Glycols, Diols, Lactate Esters, D-Limonene, Methyl Soyate & Others) for Industrial & Domestic Cleaners, Paints & Coatings, Adhesives, Printing Inks & Other Applications – Global Industry Perspective, Comprehensive Analysis and Forecast, 2016–2022* [Bio-tirpiklių rinka (alkoholiai, glikoliai, dioliai, laktato esteriai, D-limonenas, metilo sojos ir kiti) pramoniniam ir buitiniams valikliams, dažams ir dangoms, kljams, spausdinimo rašalams ir kitoms reikmėms – pasaulinės pramonės perspektyva, išsami analizė ir prognozė, 2016–2022 m.]. Prieiga per internetą: <http://www.zionmarketresearch.com/toc/bio-solvents-market>

## MANAGEMENT OF BIODEGRADABLE WASTE BY CREATING A CIRCULAR BIOECONOMY

R. Tumaševičiūtė, G. Ignatavičius

### Summary

In recent years, biodegradable waste has become increasingly important as it is increasingly used as a sustainable alternative to oil-based products and high-value bioproducts. Most of the biorefineries in the cascade process use homogeneous flows as raw materials from agricultural, food processing and / or wastewater treatment plants. The article presents the state of use of biodegradable waste in municipal waste stream for biorefineries. Research has been carried out using the biodegradable (organic) fraction of municipal waste as a raw material to produce high-value bioproducts – enzymes, bioplastics or biopesticides. The identified studies have been evaluated for returning products to the economic system and high value bio-products with the highest economic potential. Biorefineries are a promising waste management method that enables the development of a circular bioeconomy and solves waste management problems.

**Raktiniai žodžiai:** bioproducts, biodegradable waste, organic fraction, valorisation, circular bioeconomy.