



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

APLINKOS APSAUGOS IR VANDENS INŽINERIJOS KATEDRA

Mantas Aputis

**DUMBLO SKAIDYMO POVEIKIO ANAEROBINIO STABILIZAVIMO
PROCESUI TYRIMAS**

**RESEARCH OF SLUDGE DISINTEGRATION IMPACT ON ANAEROBIC
STABILIZATION PROCESS**

Baigiamasis magistro darbas

Vandens ūkio inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX035

Aplinkos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2019

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Aplinkos inžinerijos fakultetas Aplinkos apsaugos ir vandens inžinerijos katedra	ISBN Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Vandens ūkio inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	Dumblo skaidymo poveikio anaerobinio stabilizavimo procesui tyrimas
Autorius	Mantas Aputis
Vadovas	Regimantas Dauknys
Kalba: lietuvių	
Anotacija Nuotekų valymo procese susidaro dumblas, kuris linkęs kaupti sunkiuosius metalus ir prastai skaidomus organinius junginius, taip pat jame gausu patogeninių organizmų (virusų, bakterijų ir t.t.), todėl jis yra laikomas atlieka ir turi būti tvarkomas taip, kad jo liktų kuo mažiau. Nuotekų dumblas turi būti tvarkomas pačiu ekonomiškiausiu ir efektyviausiu būdu. Vienas iš tokių būdų yra pūdymas, tačiau jį taikant ne visais atvejais yra išgaunamas maksimalus biodujų ir energijos kiekis, optimaliai sumažinamas dumblo kiekis, padengiamos dumblo tvarkymo išlaidos. Siekiant išgauti geresnius dumblo pūdyimo rezultatus, rekomenduojama taikyti dumblo skaidymą prieš jį pūdant. Efektyviausiai ir plačiausiai naudojamos technologijos pasaulyje yra dumblo skaidymas ultragarsu ir aukšta įtampa. Ultragarsu skaidant perteklinį veiklųjį dumblą, maksimalus SM pašalinimo padidėjimas yra 34 %, o maksimalus SM pašalinimo efektyvumas siekia 26,51 %, maksimalus specifinis BSM suskaidymo padidėjimas yra 22,1 %, o maksimalus BSM suskaidymo efektyvumas yra 40,6 %, maksimalus specifinis biodujų padidėjimas yra 11,9 %, o maksimalus specifinis biodujų kiekis yra 0,226 l/g BSM suskaidyto. Aukšta įtampa skaidant perteklinį veiklųjį dumblą, maksimalus SM pašalinimo padidėjimas yra 35,3 %, o maksimalus specifinis SM pašalinimo efektyvumas siekia 28,91 %, maksimalus BSM suskaidymo padidėjimas yra 22,2 %, o maksimalus specifinis BSM suskaidymo efektyvumas yra 42,2 %, maksimalus specifinis biodujų padidėjimas yra 13,4 %, o maksimalus specifinis biodujų kiekis yra 0,229 l/g BSM suskaidyto. Maksimalus specifinis ultragarso skaidymo įrenginio elektros suvartojimas yra 0,056 kWh/kg SM, o aukštos įtampos – 0,006 kWh/kg SM. Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, tyrimo metodika, tyrimo rezultatai, išvados, rekomendacijos, literatūros sąrašas. Darbo apimtis: 82 p. teksto be priedų, 26 paveiksłai, 25 lentelės, 48 literatūros šaltiniai.	
Prasminiai žodžiai: Dumblas, ultragarsas, aukšta įtampa, SM sumažėjimas, BSM suskaidymas, biodujos.	

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Environmental Engineering
Department of Environment Protection and Water Engineering

ISBN	ISSN
Copies No.	
Date-.....-.....	

Master Degree Studies **Water Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title	Research of Sludge Disintegration Impact on Anaerobic Stabilization Process
-------	--

Author **Mantas Aputis**

Academic supervisor	Regimantas Dauknys
---------------------	---------------------------

Thesis language: Lithuanian

Annotation

Sludge originates from the process of treatment of waste water. Due to the physical-chemical processes involved in the treatment, the sludge tends to concentrate heavy metals and poorly biodegradable trace organic compounds as well as potentially pathogenic organisms (viruses, bacteria, etc.) present in waste waters. Sewage sludge should be managed in the most technological, efficiency and economical way to reduce the amount of sludge. One of the most effective way to reduce the amount of sludge is anaerobic stabilization, but not always obtained the maximum amount of electricity and biogas, not always obtainable the best reduction of sludge and destruction of organic solids, so the cost of sludge management increases. For the most effective result of anaerobic stabilization there is sludge disintegration technology. Most effective and widely sludge disintegration technology is ultrasonic and elektrokinetic. The results with ultrasonic disintegration are: maximum TS efficiency of reduction is 26,51 % and TS increase of reduction is 34 %, maximum VS efficiency of destruction is 40,6 % and VS increase of destruction is 22,1 %, maximum specific biogas is 0,226 l/g TS and increase of specific biogas is 11,9 %. The results with elektrokinetic disintegration are: maximum TS efficiency of reduction is 28,91 % and TS increase of reduction is 35,3 %, maximum VS efficiency of destruction is 42,2 % and VS increase of destruction is 22,2 %, maximum specific biogas is 0,229 l/g TS and increase of specific biogas is 13,4 %. Maximum specific electrical consumed of ultrasonic is 0,056 kWh/kg DS, and maximum electrical consumed of elektrokinetic is 0,006 kWh/kg DS.

This work consists of 7 parts: introduction, review of literature, methodology of work, result of research, conclusions, recommendations, and references. Thesis consists of: 82 p. text without appendixes, 26 pictures, 25 tables, 48 references.

Keywords: Sludge, ultrasonic, elektrokinetic, TS reduction, VS destruction, biogas

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	11
ĮVADAS	13
1. LITERATŪROS APŽVALGA	15
1.1. Nuotekų dumblo susidarymas nuotekų valyklose	15
1.2. Pirminis ir perteklinis dumblas	15
1.2.1. Pirminis dumblas	15
1.2.2. Antrinis dumblas	16
1.3. Anaerobinis dumblo stabilizavimas	17
1.3.1. Dumblo pūdymui reikšmingi veiksniai	20
1.3.2. Biodujų kokybė	25
1.4. Dumblo skaidymas	27
1.4.1. Terminė hidrolizė	28
1.4.2. Ultragarsas	30
1.4.3. Ozonavimas	32
1.4.4. Aukštas slėgis	34
1.4.5. Aukšta įtampa	36
1.4.6. Dumblo skaidymo metodų palyginimas	38
1.5. Literatūros apžvalgos apibendrinimas	41
2. TYRIMO METODIKA	42
2.1. Tyrimo objektas ir vieta	42
2.2. Laboratoriniai tyrimai	45
2.2.1. Rodiklių reikšmių nustatymo metodikos	48
2.3. Natūriniai tyrimai	52
2.3.1. Statistinis duomenų apdorojimas ir duomenų palyginimas	52
2.3.2. Dumblo rodiklių apskaičiavimas	54
2.3.3. Duomenų palyginimas	56
2.4. Eksploatacijos ir investicijų kaštų įvertinimas	56
3. TYRIMO ANALIZĖ IR REZULTATAI	58
3.1. Laboratorinio tyrimo rezultatai	58
3.1.1. ChDS dumblo vandenyje kitimo po pūdymo proceso analizė	60
3.1.2. SM pašalinimo efektyvumo dumble po pūdymo proceso kitimo analizė	60
3.1.3. BSM suskaidymo efektyvumo dumble po pūdymo proceso kitimo analizė	62
3.1.4. Metano koncentracijos biodujose kitimo analizė	64
3.1.5. Specifinio biodujų susidarymo kitimo analizė	65

3.1.6.	Dumblo mikroskopavimo analizė.....	67
3.2.	Specifinio SM pašalinimo, BSM suskaidymo, biodujų kiekio susidarymo analizė	68
3.2.1.	Specifinio sausų medžiagų pašalinimo padidėjimo kitimo analizė	70
3.2.2.	Specifinio bepelenių sausų medžiagų padidėjimo analizė	72
3.2.3.	Specifinio biodujų susidarymo padidėjimo analizė.....	73
3.3.	Natūrinio tyrimo rezultatai.....	75
3.4.	Eksploatacijos ir investicijų kaštų įvertinimas.....	78
IŠVADOS		80
REKOMENDACIJOS		81
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....		82

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Hidrolizės reakcija, kai hidrolizės procesu yra skaidomi riebalai (Jules B. van Lier ir kt., 2008).....	18
2 pav. Rūgštinio rūgimo stadijos organinių medžiagų skaidymo schema (Beržinskienė, 1999)	19
3 pav. Acetogeninių ir metanogeninių bakterijų vykdomų procesų ryšys (Scragg, 2005).....	20
4 pav. Temperatūros ir išbuvimo trukmės įtaka metano susidarymui ir sausųjų medžiagų skaidymui (Turovskiy, 2006)	22
5 pav. Laiko, per kurį suskaidoma organinė medžiaga priklausomybė nuo temperatūros (Masse, 2001).....	22
6 pav. CAMBI technologijos terminės hidrolizės proceso schema (Pilli, 2014)	29
7 pav. BioTHELYS technologijos terminės hidrolizės proceso schema (Pilli, 2014)	30
8 pav. Cheminių reakcijų skaidomame ozonu dumble schema (Chu, 2008)	33
9 pav. Skaidymas ozonu nuotekų valykloje (Chu, 2008)	33
10 pav. Aukšto slėgio homogenizatorius (Rai, 2009)	35
11 pav. Homogenizatoriaus integracija į nuotekų valyklos dumblo apdorojimo įrenginius (Onyeche, 2010).....	36
12 pav. Pulsuojančios elektros srovės dezintegratorius (Zhena et al., 2017)	37
13 pav. Kauno ir Šiaulių nuotekų valyklos dumblo apdorojimo technologinė schema (sudaryta autoriaus)	42
14 pav. Dumblo skaidymo technologija Kauno nuotekų valykloje (nuotrauka iš asmeninio archyvo)	43
15 pav. Dumblo skaidymo technologija Šiaulių nuotekų valykloje (nuotrauka iš asmeninio archyvo)	44
16 pav. Principinė skaidymo įrangos montavimo schema Kauno ir Šiaulių nuotekų valykloje (sudaryta autoriaus)	44
17 pav. W8 Armfield Ltd modelis (nuotrauka iš asmeninio archyvo)	45
18 pav. Bandymo stendo principinė schema (sudaryta autoriaus)	46
19 pav. Sausų medžiagų pašalinimo efektyvumo priklausomybė nuo įrenginio taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus (sudaryta autoriaus)	61
20 pav. Bepelenių sausų medžiagų suskaidymo efektyvumo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų kiekio (sudaryta autoriaus)	63
21 pav. Metano koncentracijos priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų kiekio (sudaryta autoriaus)	64

22 pav. Specifinio biodujų susidarymo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų kiekio (sudaryta autoriaus)	66
23 pav. Neskaidyto (a ir c) ir ultragarsu (b) bei aukšta įtampa (d) skaidyto dumblo mikroskopinis vaizdas (sudaryta autoriaus)	68
24 pav. Specifinio sausų medžiagų pašalinimo padidėjimo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus (sudaryta autoriaus)	71
25 pav. Specifinio bepelenių sausų medžiagų suskaidymo padidėjimo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus (sudaryta autoriaus).....	72
26 pav. Specifinio biodujų kiekio padidėjimo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus (sudaryta autoriaus)	74

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Pirminio dumblo tipinė sudėtis (Turovskiy ir kt., 2006)	16
2 lentelė. Metalai nuotekų dumble (Werle ir kt., 2010)	16
3 lentelė. Antrinio (perteklinio) dumblo tipinė sudėtis (Turovskiy ir kt., 2006).....	17
4 lentelė. Dumblo skirstymas į kategorijas pagal sunkiųjų metalų koncentraciją (Turovskiy, 2006)	24
5 lentelė. Ryšys tarp dumblo koncentracijos, hidraulinės išbuvimo trukmės ir faktinės dumblo apkrovos (Wastewater Engineering, 2014)	24
6 lentelė. Tipinės organinių medžiagų specifinio dujų susidarymo reikšmės (Wastewater Treatment Plant Design, 2003)	25
7 lentelė. Stechiometrinė biodujų išeiga ir metano kiekis jose (Navickas, 2008).....	26
8 lentelė. Ultragarsinis dumblo skaidymas skirtingais dažniais ir trukme (Braguglia, 2009).....	31
9 lentelė. Skaidymo ultragarsu tyrimo rezultatai (Carrere, 2010)	32
10 lentelė. Ozono dozavimas skaidymo metu (Chu, 2008).....	34
11 lentelė. Skaidymo metodų pagal: 1. Bouger ir kt. (2006), 2. Kim ir kt. (2003), 3. Bajenbruch, Koppolow (2003), 4. Salsabil ir kt.(2010) palyginimas	38
12 lentelė. Skaidymo metodų energetinis palyginimas (Carrere, 2010)	40
13 lentelė. Apdoroti tyrimų rezultatai (vidutinė reikšmė ir standartinis nuokrypis) prieš pūdymą ir po jo, kai tirtas ultragarsu ir aukšta įtampa neskaidytas ir skaidytas dumblas (sudaryta autoriaus) .	47
14 lentelė. Apdoroti biodujų tyrimų rezultatai (vidutinė reikšmė ir standartinis nuokrypis) po pūdymo, kai tirtas ultragarsu ir aukšta įtampa neskaidytas ir skaidytas dumblas (sudaryta autoriaus)	48
15 lentelė. Apskaičiuotos specifinio SM pašalinimo, BSM suskaidymo ir biodujų susidarymo reikšmės prieš ir po pūdymo proceso, kai dumblas neskaidytas ir skaidytas ultragarsu bei aukšta įtampa (sudaryta autoriaus)	52
16 lentelė. Apdoroti tyrimų rezultatai (vidutinė reikšmė ir standartinis nuokrypis) prieš pūdymą ir po jo, kai tirtas ultragarsu neskaidytas ir skaidytas dumblas (sudaryta autoriaus).....	58
17 lentelė. Apdoroti biodujų tyrimų rezultatai (vidutinė reikšmė ir standartinis nuokrypis) po pūdymo, kai tirtas ultragarsu neskaidytas ir skaidytas dumblas (sudaryta autoriaus).....	59
18 lentelė. Apdoroti tyrimų rezultatai (vidutinė reikšmė ir standartinis nuokrypis) prieš pūdymą ir po jo, kai tirtas aukšta įtampa neskaidytas ir skaidytas dumblas (sudaryta autoriaus).....	59
19 lentelė. Apdoroti biodujų tyrimų rezultatai (vidutinė reikšmė ir standartinis nuokrypis) po pūdymo, kai tirtas aukšta įtampa neskaidytas ir skaidytas dumblas (sudaryta autoriaus).....	60
20 lentelė. Apskaičiuotos specifinio SM pašalinimo, BSM suskaidymo ir biodujų susidarymo reikšmės prieš ir po pūdymo proceso, kai dumblas neskaidytas ir skaidytas ultragarsu (sudaryta autoriaus)	69

21 lentelė. Apskaičiuotos specifinio SM pašalinimo, BSM suskaidymo ir biodujų susidarymo reikšmės prieš ir po pūdymo proceso, kai dumblas neskaidytas ir skaidytas aukšta įtampa (sudaryta autoriaus)	69
22 lentelė. Statistiškai apdoroti Kauno nuotekų valyklos dumblo parametrų reikšmės (sudaryta autoriaus)	75
23 lentelė. Skaičiuotini dumblo parametrai pagal statistiškai apdorotus duomenis (sudaryta autoriaus)	76
24 lentelė. Dumblo parametrų lyginamosios skirtumų reikšmės (sudaryta autoriaus).....	76
25 lentelė. Skaidymo įrangos efektyvumą apibūdinančių parametrų reikšmės (sudaryta autoriaus)	77

IVADAS

Visame pasaulyje nuotekų dumblo utilizavimas yra aktuali problema. Pagal Lietuvos stojimo į Europos Sąjungą sutartį Lietuva įsipareigojo įgyvendinti 1991 m. gegužės 21 d. Tarybos direktyvą Nr. 1/271/EEC dėl miesto nuotekų valymo ir nuotekų dumblo utilizavimo. Plečiant nuotekų surinkimo ir valymo infrastruktūrą, proporcingai didėja ir nuotekų valymo metu susidarancio dumblo kiekis. Dumblo aikštelėse sukaupti dideli dumblo kiekiai, kurių tvarkymas iki šiol naudojamais būdais pradeda kelti grėsmę aplinkai, nebeatitinka ilgalaikių visuomenės interesų, prieštarauja darnios plėtros principams. Taigi ieškoma efektyviausių būdų nuotekų dumblui apdoroti, kyla poreikis neatidėliotinai diegti modernesnes, našesnes ir aplinkai palankesnes dumblo tvarkymo technologijas. Labiausiai pasaulyje paplitęs ir efektyviausias metodas nuotekų dumblui stabilizuoti yra anaerobinis dumblo pūdyimas. Dumblo pagrindinė sudedamoji dalis yra organinės medžiagos, iš kurių galima pagaminti metano dujas, todėl dumblo pūdyimas yra perspektyvi technologija, leidžianti sumažinti dumblo kiekį ir pagaminti dujas. Anaerobinis dumblo pūdyimas yra labiausiai pasaulyje naudojama dumblo stabilizavimo technologija, tačiau žemas biologinis dumblo skaidymo efektyvumas (30–50 %) ir ilga dumblo pūdyimo trukmė (20–30 dienų) yra didžiausi šio proceso apribojimai, kurie gali būti įveikti naudojant įvairius dumblo suskaidymo metodus prieš dumblo pūdyimą (Tyagi ir Lo, 2011). Europos sąjungos valstybės, sekamos minėtos direktyvos nuostatomis, 1998–2005 metais 40 % padidino miestų nuotekų valyklų dumblo apdorojimo įrenginių rekonstrukcijų skaičių, kurių tarpe itin plačiai pradėtos taikyti dumblo skaidymo technologijos (Tyagi ir Lo, 2011). Dumblo skaidymas, kuris vykdomas prieš dumblo pūdyimo grandį, yra itin svarbus dumblo pūdyimo procesui, nes didžiausią dumblo dalį ir sudaro perteklinio dumblo mikroorganizmų ląstelės, kurios yra palyginti sunkiai skaidomas substratas (Appels, 2008). Dumblo skaidymo technologijos greitina hidrolizės procesą greičiau ardydamos ląstelių membranas ir paruošdamos organines medžiagas tolimesniam skaidymui, tuo būdu sumažindamos dumblo pūdyimo trukmę ir pagerindamos dumblo suskaidymo efektyvumą.

Darbo tikslas – įvertinti dumblo kiekio sumažinimo, biodujų padidinimo bei eksploatacijos kaštų optimizavimo galimybes taikant dumblo pūdyimo procesą drauge su dumblo skaidymo metodais.

Tyrimo objektas – komunalinių nuotekų biologinio valymo procese susidarantis perteklinis veiklusis dumblas.

Darbo uždaviniai:

- Laboratorinėmis sąlygomis įvertinti dviejų skirtingų dumblo skaidymo būdų – aukšta įtampa ir ultragarsu – poveikį pūdyimo procesui.

- Įvertinti ultragarsu veikiančio įrenginio taikymo poveikį dumblo pūdymo procesui natūrinėmis sąlygomis veikiančiuose dumblo apdorojimo įrenginiuose.
- Atlikti skirtingų dumblo skaidymo būdų taikymo palyginamąją analizę įvertinant poveikį pūdymo procesui, eksploatacijos ir investicijų kaštus.

Temos aktualumas. Nuotekų dumblas laikomas atlieka, todėl reikia taikyti tokius tvarkymo būdus, kad jo liktų kuo mažiau, o biodujos yra perspektyvi atsinaujinančios energijos rūšis mažinanti šiltnamio efektą ir jo pasekmes.

Temos naujumas. Dumblo skaidymas plačiau pradėtas taikyti per pastaruosius 10 metų. Taikomi metodai nėra kompleksiškai ištirti, nėra įvertintas skaidymo įrangos techninis-ekonominis naudingumas.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Nuotekų dumblo susidarymas nuotekų valyklose

Nuotekų valymo įrenginiuose susidaro dviejų tipų dumblas: pirminis ir antrinis, dar kitaip vadinamas pertekliniu veikliuoju dumblu, kurie yra apdorojami dumblo apdorojimo įrenginiuose. Visame pasaulyje susiduriama su dumblo utilizavimo ir tvarkymo problemomis. Besiplečiantis centralizuotas nuotekų valymas, pramonės ir žmonių skaičiaus augimas lemia didesnius susidariusio perteklinio dumblo kiekius nuotekų valyklose. Pasaulyje iki šiol ieškomos ir atrandamos vis naujesnės dumblo apdorojimo technologijos, kurios lemia mažesnius dumblo susidarymo kiekius bei jo tolesnį panaudojimą kitose pramonės bei ūkio šakose (Tyagi ir Lo, 2011).

1.2. Pirminis ir perteklinis dumblas

Nuotekų dumblu vadinamas buitinių, komunalinių ir pramonės bei panašios sudėties nuotekų valymo metu susidarantis dumblas. Valymo įrenginiuose susidaręs dumblas – sunkiai besifiltruojanti koloidinė suspensija (Burton ir kt., 2003). Nuotekų valymo įrenginiuose susidaro dviejų tipų dumblas: pirminis ir antrinis (kitaip vadinamas pertekliniu veikliuoju dumblu). Pirminis ir antrinis dumblas yra apdorojami nuotekų valykloje dumblo apdorojimo įrenginiuose. Dumblo tvarkymą apsunkina nuotekų dumble esančių sunkiųjų metalų (kadmio, chromo, kobalto, vario, nikelio, cinko ir švino) koncentracijos (Werle ir kt., 2010; Tyagi ir Lo, 2011).

1.2.1. Pirminis dumblas

Pirminis dumblas – tai pirminio valymo įrenginiuose arba pirminiuose nusodintuvuose nusėdusios skendinčiosios medžiagos. Sausų medžiagų koncentracija pirminiame dumble gali būti nuo 2 iki 7 %. Bepelenių sausų medžiagų procentinis kiekis pirminiame dumble maždaug atitinka atitekėjusiose nuotekose esančių bepelenių skendinčių medžiagų procentinį kiekį ir sudaro apie 60–75 % bendro sausų medžiagų kiekio. Kiti junginiai esantys pirminiame dumble – riebalai, baltymai, azotas, fosforas, kalis, celiuliozė, geležis ir silicis. Pirminio dumblo pH svyruoja nuo 5,0 iki 8,0, šarmingumas (pagal CaCO_3) nuo 500 mg/l iki 1500 mg/l (Turovskiy, 2006). Lyginant su antriniu dumblu, pirminis dumblas pasižymi didesnėmis riebalų ir baltymų koncentracijomis, tačiau savo sudėtyje turi mažiau angliavandenių (Werle ir kt., 2010). Pirminio dumblo tipinę sudėtį pateikta 1 lentelėje.

1 lentelė. Pirminio dumblo tipinė sudėtis (Turovskiy ir kt., 2006)

Rodiklis	Pirminis dumblas
Sausos medžiagos (SM, %)	4,5
Bepelenės medžiagos (% nuo SM)	70
Riebalai (% nuo SM)	18
Baltymai (% nuo SM)	25
Azotas (% nuo SM)	3,0
Fosforas (% nuo SM)	1,4
Kalis (% nuo SM)	0,5
pH	6

Valant nuotekas dėl vykstančių fizikinių-cheminių procesų valyklose susidarantis pirminis dumblas yra linkęs kaupti metalus. Metalų kiekis nuotekų dumble pateiktas 2 lentelėje.

2 lentelė. Metalai nuotekų dumble (Werle ir kt., 2010)

Metalai	Koncentracija dumble, mg/kg _{SM}
Arsenas	6,2 – 15,3
Kadmis	-
Chromas	106,2 – 380
Kobaltas	10,9 – 40
Varis	80 – 800
Geležis	23586 – 26000
Švinas	20,0 – 49,5
Manganas	-
Gyvsidabris	1,99 – 2,5
Molibdenas	-
Nikelis	16 – 50

Dėl tokių sunkiųjų metalų kaip, cinko, vario, nikelio, kadmio, švino, gyvsidabrio ar chromo nuotekų dumble, jo panaudojimas žemės ūkyje yra ribotas (Werle ir kt., 2010).

1.2.2. Antrinis dumblas

Antrinis dumblas, kitaip žinomas kaip veiklusis perteklinis dumblas, nuotekų valymo įrenginiuose šalinamas iš antrinių nusodintuvų. Antrinis dumblas – tai mikroorganizmų (bakterijų, aktinomicetų, pirmuonių, grybų, dumblių ir kt.) visuma. Antrinis dumblas, kontaktuodamas su

nuotekų teršalais, absorbuoja juos, o po to mikroorganizmai naudoja teršalus savo gyvybinei veiklai vykdyti ir oksiduoja juos iki anglies dvideginio, vandens, nitratų, fosfatų ir kt. (Beržinskienė, 1999). Mikroorganizmai savyje sukaupia organinius teršalus, kurie iš nuotekų valymo įrenginių šalinami su pertekliniu dumbly. Toks dumblas yra takus ir sunkiai atiduoda drėgmę toliau jį apdorojant dumblo tvarkymo įrenginiuose. Valymo procese dalyvauja įvairios bakterijų rūšys – Pseudomonas, Bacillus, Bacterium, Mycobacterium, Pseudobacterium, Sarcina, Micrococcus ir kt. Bakterijų rūšis priklauso nuo valomų nuotekų sudėties. Valant tas pačias nuotekas bakterijų procentinis skaičius gali kisti atsižvelgiant į dumblo apkrovą, aplinkos temperatūrą, pH, inhibitorių ir aktyviklių įtaką (Beržinskienė, 1999). Perteklinis dumblas drėgnesnis už pirminį dumblą. Sausų medžiagų koncentracija antriniame dumbly yra nuo 0,4 iki 1,5 %. Dėl šių savybių perteklinis dumblas, prieš patekdamas į dumblo skaidymo ir stabilizavimo įrenginius, turi būti sutirštintas. Šiame dumbly yra mažesni kiekiai riebalų ir celiuliozės, bet yra 2-3 karto daugiau azoto, fosforo ir baltymų, lyginant su pirminiu dumbly. Antrinio dumblo pH svyruoja nuo 6,5 iki 8,0, šarmingumas pagal CaCO_3 – nuo 580 mg/l iki 1100 mg/l (Turovskiy ir kt., 2006). Perteklinio dumblo tipinė sudėtis pateikta 3 lentelėje.

3 lentelė. Antrinio (perteklinio) dumblo tipinė sudėtis (Turovskiy ir kt., 2006)

Rodiklis	Perteklinis dumblas
Sausos medžiagos (SM, %)	0,5
Bepelės medžiagos (% nuo SM)	75
Riebalai (% nuo SM)	6
Baltymai (% nuo SM)	37
Azotas (% nuo SM)	5
Fosforas (% nuo SM)	4
Kalis (% nuo SM)	0,4
pH	7

Nuotekų dumbly be 3 lentelėje išvardintų medžiagų mažesniais kiekiais taip pat aptinkamos silicio, kalcio, geležies, aliuminio, magnio ir sieros koncentracijos (Werle ir kt., 2010).

1.3. Anaerobinis dumblo stabilizavimas

Anaerobinis dumblo stabilizavimas (pūdyimas) – tai mikrobiologinis procesas, kurio metu organinės medžiagos yra skaidomos anaerobinių mikroorganizmų, dalyvaujant fermentams bedeguonėje aplinkoje. Anaerobinis pūdyimas yra laikomas labiausiai energiją taupantis metodas, mažinant nuotekų dumblo kiekį bei išgaunant biodujas, kurios sumažina aplinkos tvarkymo kainą.

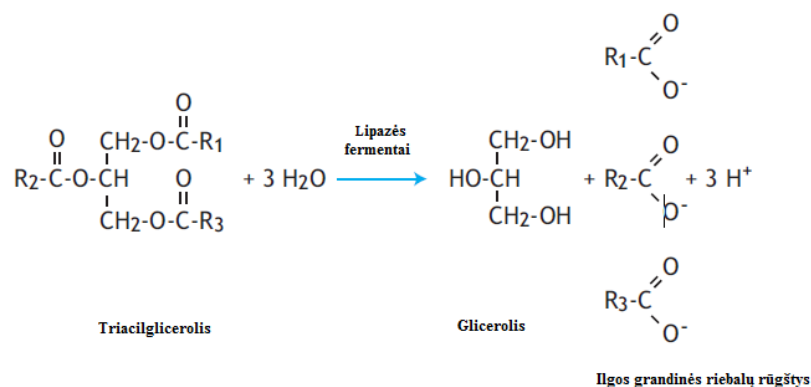
Tai yra sudėtingas, iš kelių pakopų susidedantis procesas, kurio metu kaip šalutinis produktas išsiskiria biodujos – atsinaujinantis energijos šaltinis (Wang ir kt., 2013).

Apdorojant dumblą anaerobiniu būdu dumblo sausų medžiagų kiekis sumažėja 35–50 %, sumažinamas nemalonas kvapas. Be to, pūdant dumblą, iš susidariusių biodujų yra galimybė išgauti elektros energiją ir (ar) šilumos energiją. Sumažėja ir patogeninių mikroorganizmų kiekis dumble.

Visą anaerobinį procesą galima suskirstyti į tokias tris stadijas:

- Organinių junginių hidrolizė (hidrolizė);
- Acetogenezė (fermentacija);
- Metanogenezė.

Hidrolizės etapas yra pirmas žingsnis pūdymo procese, kuriame kompleksinės makromolekulės (tokios, kaip polisacharidai, baltymai, lipidai ir nukleino rūgštys) yra konvertuojamos į smulkesnes medžiagas: tokias kaip monosacharidai, aminorūgštys, riebalų rūgštys, purinai ir pirimidinai (1 pav.).



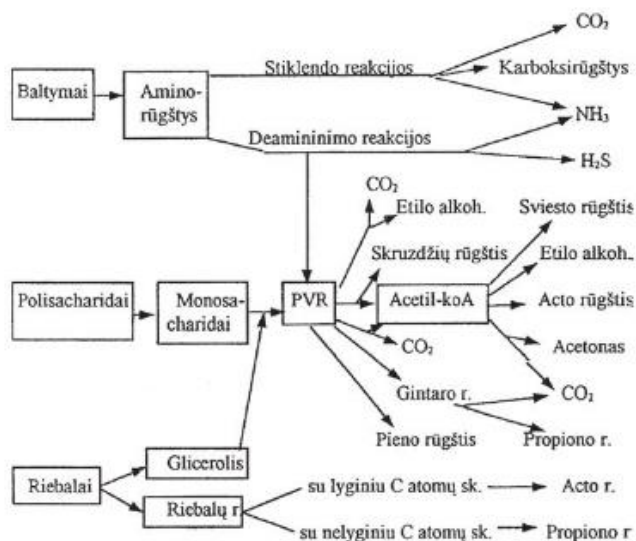
1 pav. Hidrolizės reakcija, kai hidrolizės procesu yra skaidomi riebalai (Jules B. van Lier ir kt., 2008)

Hidrolizė yra lėtas procesas ir jo greitis dažnai nulemia viso proceso spartą, todėl paspartinti hidrolizės procesą prieš dumblo pūdymą naudojamos dumblo skaidymo technologijos.

Acetogenezės metu organiniai junginiai, suskaidyti iki monomerų, jau gali patekti į ląsteles ir prasideda rūgštinis rūgimas. Galutiniai šios stadijos produktai yra acto, sviesto, pieno, propiono, skruzdžių rūgštys, alkoholiai (etanolis, metanolis), ketonai (glicerolis, acetonas), acetatas, amoniakas, CO₂ ir H₂S. Šių produktų kiekis priklauso nuo vyraujančios mikroorganizmų kultūros, aplinkos sąlygų (temperatūros, pH, oksidacinio – redukcinio potencialo). Čia susidariusios organinės rūgštys su trumpa angliavandeniline grandine yra vadinamos lakiosiomis riebalų rūgštimis (LRR). Toliau acetogeninės bakterijos riebalų rūgštis ir alkoholį paverčia į acetatą, anglies dioksidą ir vandenilį.

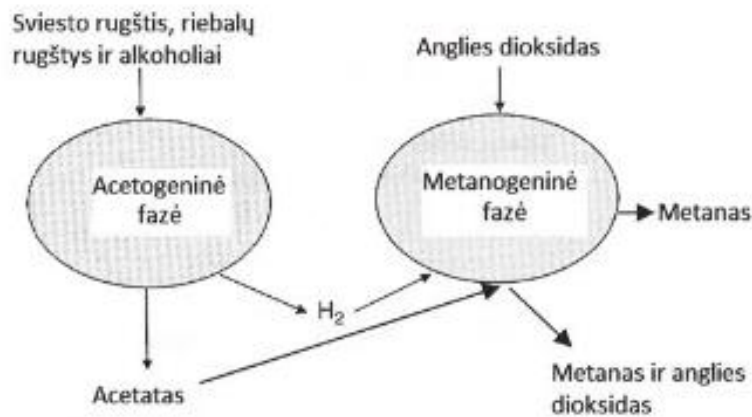
Bakterijų visuma nuotekų nuosėdų baltymus, riebalus ir angliavandenius paverčia karboksirūgštimis, etilo alkoholiu, amoniaku, H_2 ir H_2S . Apie 70 % rūgščių kiekio sudaro acto, apie 25 % propiono ir sviesto rūgštys, kitų rūgščių kiekiai nedideli.

Smulkesnės medžiagos gali praeiti pro bakterinių ląstelių sienelę, kur paskui yra naudojamos kaip energijos ar maistinių medžiagų šaltinis. Bendra organinių medžiagų skaidymo schema pateikta antrame paveiksle.



2 pav. Rūgštinio rūgimo stadijos organinių medžiagų skaidymo schema (Beržinskienė, 1999)

Metanogenezė yra trečias etapas, kuris yra atliekamas Archaea mikroorganizmų, kitaip žinomų kaip metanogenų. Dvi rūšys metanogeninių organizmų yra priskiriamos metano gamybai. Viena grupė, vadinama *acetoclastic methanogens* išskiria acetatą į metaną ir anglies dioksidą. Antra grupė vadinama *hydrogenotrophic methanogens* naudoja vandenilį ir anglies dioksidą gaminant metaną. Metanogenai – tai bakterijos, kurios naudoja anglies dioksidą ir lakiąsias riebalų rūgštis (LRR), jas paversdamos į metaną. Šis etapas yra naudojamas anaerobiniame pūdyje, kai metanas yra gaunamas pūdant dumblą (Li ir kt., 2002). Metanogeniniai mikroorganizmai pasižymi lėtesniu augimu, todėl jas gali paveikti įvairių aplinkos sąlygų pasikeitimai, tokie kaip pH ir šarmingumo, temperatūros pasikeitimai, hidraulinės išbuvimo trukmės, organinių medžiagų išbuvimo trukmės. Taigi, jeigu pūdytuve staigiai pakinta temperatūra arba pH, metanogenezė atsilieka nuo acetogenezės, vandenilis ir įvairios rūgštys akumuliuojasi ir žymiai nukrinta pH. Jeigu nesiimama atitinkamų veiksmų pūvimo procesas sutrinka (Tukovskiy, 2006). Acetogeninių ir metanogeninių bakterijų vykdomų procesų ryšys pateiktas 3 paveiksle.



3 pav. Acetogeninių ir metanogeninių bakterijų vykdomų procesų ryšys (Scragg, 2005)

Gerei veikiančiame pūdytuve abi anaerobinio skaidymo stadijos vyksta sinchroniškai, tarp acetogeninių ir metanogeninių bakterijų nusistovi tarpusavio santykiai ir ekologinė pusiausvyra. Karboksirūgštis, susidariusias pirmojoje stadijoje, naudoja metanogeninės bakterijos, todėl šių koncentracija pūdomose nuotekose apytikriai pastovi.

Ekologinė pusiausvyra pūdytuve palaikoma tik tuomet, kai yra tam tikras abiejų grupių bakterijų gausumas. Metanogeninės bakterijos auga ir dauginasi lėčiau už acetogenines, todėl būtina sudaryti jų vystymuisi kuo palankesnes sąlygas.

1.3.1. Dumblo pūdymui reikšmingi veiksniai

Anaerobinio stabilizavimo procesą veikia šie parametrai: organinių medžiagų išbuvimo trukmė, hidraulinė išbuvimo trukmė, temperatūra, šarmingumas, pH, toksiniai metalai, redukcijos – oksidacijos potencialas, faktinė dumblo apkrova, dumblo koncentracija, tiekiamų žaliavinių medžiagų sudėtis.

Organinės medžiagos ir hidraulinė išbuvimo trukmė. Pūdytuvo dydis priklauso nuo išbuvimo trukmės maišomuose reaktoriuose. Išbuvimo trukmė turi užtikrinti, kad mikroorganizmai spės suskaidyti ir įsisavinti organines medžiagas. Pagrindiniai parametrai yra organinės medžiagos išbuvimo trukmė ir hidraulinė išbuvimo trukmė.

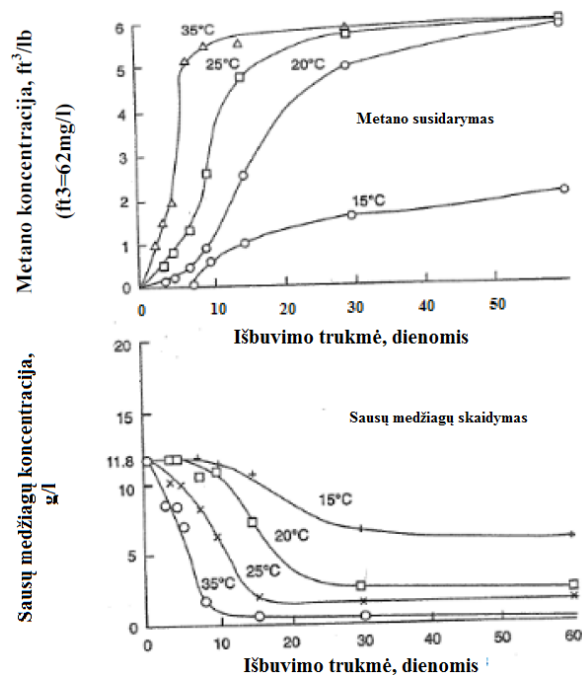
- Organinių medžiagų išbuvimo trukmė (angl. SRT) – vidutinis laikas, kurį organinės medžiagos išbūna pūdytuve.
- Hidraulinė išbuvimo trukmė (angl. HRT) – vidutinis laikas, kurį dumblas išbūna pūdytuve.

Tirpių organinių medžiagų išbuvimo trukmė (paromis) gali būti apibrėžta kaip santykis tarp organinių medžiagų masės (kg BSM) reaktoriuje ir patiektų organinių medžiagų masės per parą (kg BSM/d). Hidraulinė išbuvimo trukmė (paromis) yra santykis tarp dumblo tūrio (m^3) reaktoriuje ir patiekto dumblo tūrio per parą (m^3/d). Jei nėra taikomas dalies pūdyto dumblo grąžinimas į pūdymo procesą, tai hidraulinė išbuvimo trukmė yra lygi organinių medžiagų išbuvimo trukmei.

Reakcijos, tokios kaip hidrolizė, fermentacija, metanogenezė, yra tiesiogiai susijusios su organinių medžiagų išbuvimo trukme. Jeigu organinių medžiagų išbuvimo trukmė mažesnė nei minimali, bakterijos negali augti pakankamai greitai ir stabilizavimo procesas bus neefektyvus. Minimali išbuvimo pūdytuve trukmė prie 24 °C temperatūros yra 8 paros, o prie 18 °C – 11 parų (Wastewater Engineering, 2014). Mezofiliniu režimu dumblą pūdyti rekomenduojama 15–20 parų, o termofiliniu – 7–10 parų (Matuzevičius, 1996).

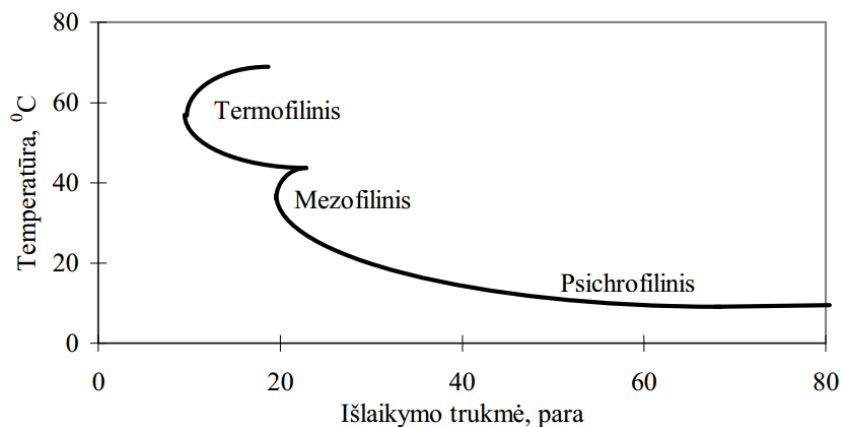
Biomasė reaktoriuje išbūna nustatytą laiką, per kurį didesnioji jos dalis suyra ir virsta biodujomis. Šis laikotarpis priklauso nuo biomasės pobūdžio ir sudėties. Ilgiausiai trunka biomasės rišamųjų medžiagų – celiuliozės ir hemiceliuliozės suirimas. Lengviau suyra baltymai, riebalai ir angliavandeniai. Ilgesnė biomasės perdirbimo trukmė yra susijusi su didesnėmis energetinėmis sąnaudomis, todėl parenkant žaliavas biodujoms gaminti ir sudarant biodujų gamybos programą būtina įvertinti energetinį efektyvumą (Schön, 2009).

Temperatūra. Tai vienas iš svarbiausių parametrų, taikytų bakterijų augimo greičius ir lemiančių anaerobinį organinių medžiagų skaidymo procesą. Aukštesnė temperatūra padidina mikroorganizmų aktyvumą, pagreitina reakcijas ir suintensyvina mikroorganizmų augimą. Stabiliam proceso vyksmui užtikrinti rekomenduojama, kad temperatūros pokytis neviršytų ± 1 °C/d. Geriausia, kad temperatūra per dieną nepakistų daugiau nei 0,5 °C/d. Tai kritinis rodiklis, apibrėžiantis į pūdytuvą tiekiamo dumblo kiekį ir dažnį (Vesilind, 2003). Stabilios darbinės temperatūros palaikymas yra svarbus, nes metaną gaminančios bakterijos, ypač termofilinio režimo metu, yra jautrios temperatūros pokyčiams. Temperatūros įtaka sausų medžiagų skaidymui ir metano išsiskyrimui pateikta 4 paveiksle. Iš jo matyti, kad didžiausias sausų medžiagų suskaidymas ir metano susidarymas yra kai temperatūra siekia 35 °C.



4 pav. Temperatūros ir išbuvimo trukmės įtaka metano susidarymui ir sausųjų medžiagų skaidymui (Turovskiy, 2006)

Mezofilinėse sąlygose procesas vyksta stabiliau: mezofilinė mikroflora mažiau jautri temperatūros ir apkrovos svyravimas. Priimta proceso temperatūras skirstyti į tris grupes (4 pav.): psichrofilinę (10–25 °C), mezofilinę (25–40 °C), termofilinę (40–55 °C). Gerai fermentacijai reikalinga stabili darbo temperatūra. Biodujų mikrobai, kaip ir kiti gyvi organizmai, yra jautrūs aplinkos temperatūros pokyčiams. Didesni temperatūros pokyčiai gali sutrikdyti biodujų gamybą ir parūgštinti substratą. Rekomenduojama, kad temperatūros kitimo sparta nebūtų didesnė kaip ± 2 °C/h – esant psichrofiliniam režimui, ± 1 °C/h – mezofiliniam režimui ir $\pm 0,5$ °C/h – termofiliniam režimui (Masse DI, Masse, 2001).



5 pav. Laiko, per kurį suskaidoma organinė medžiaga priklausomybė nuo temperatūros (Masse, 2001)

Vandenilio jonų koncentracija (pH). Šarmingumas. Pūdymo procese jautriausios pH pokyčiams yra metanogeninės bakterijos. Įvairioms metanogeninių mikroorganizmų rūšims aplinka palankiausia, kai pH reikšmė svyruoja nuo 6 iki 8, o daugumai jų optimali reikšmė yra 6,8–7,8 (Wastewater Engineering, 2014). Kai pH reikšmė artima neutraliai, metanogenezės procesas vyksta intensyviai, o žemiau 6,8 pH – metanogenezės aktyvumas yra nuslopinamas.

Acetogenezės etape susidariusios rūgštys sumažina pH. Anglies dvideginis yra gaminamas rūgimo ir metanogenezės stadijose anaerobinio stabilizavimo metu. Anglies dvideginio koncentracija biodujose atspindi šarmingumo poreikį.

Šarmingumas nulemia terpės karbonatinę pusiausvyrą. Yra ryšys tarp karbonatų koncentracijos, terpės pH bei anglirūgštės kiekio biodujose, kai užtikrinamos optimalios anaerobinio proceso sąlygos.

Kuo aukštesnis terpės pH rodiklis, tuo sistemoje yra didesnė karbonatų koncentracija bei mažesnis anglies dioksido kiekis biodujose. Jei terpėje esančių karbonatų koncentracija sumažėja iki 1000 mg/l pagal CaCO_3 , labai greitai pradeda mažėti pH reikšmė ir procesas sutrikdomas. Stabiliam proceso vyksmui užtikrinti bendras terpės šarmingumas turi būti ne mažesnis nei 2000 mg/l pagal CaCO_3 (Wastewater Engineering, 2014).

Stabilaus veikimo pūdytuve bendras šarmingumas yra nuo 2000 iki 3500 mg/l pagal CaCO_3 . Geriausias būdas pūdytuve pakelti pH yra papildomai dozuoti natrio hidrokarbonatą ar natrio šarmą. Kalkės taip pat gali būti dozuojamos šarmingumui kelti, tačiau jos gali reaguoti su hidrokarbonatais ir gali suformuoti netirpus kalcio karbonatas (Turovskiy, 2006).

Redukcijos–oksidacijos (Redox) potencialas. Redox potencialas – parametras, kitaip apibūdinamas kaip dumblo pūdymo aplinkos sąlyga, nuo kurios priklauso acetogenezės procesas. Redukcijos–oksidacijos potencialas apibūdina tiriamos medžiagos pajėgumą atiduoti ar prisijungti elektronus. Organinių mikroteršėjų irimas biologinio skaidymo metu yra specifinis ir priklauso nuo redukcinių – oksidacinių sąlygų ir biomasės sudėties (Falås ir kt., 2013). Redox potencialas yra įvardijamas kaip universalus parametras, kuris gali greičiau už kitus parametrus parodyti procesų sutrikimus. Redox potencialas pirmasis sureaguoja iki atsirandant kitais rodikliais išmatuojamiems pokyčiams sutrikimo atveju (Rieger, Weiland, 2006). Lyginant su Redox potencialo pokyčio pradžia, organinių rūgščių ir šarmingumo reikšmių santykis dar gali nekisti apytiksliai 14 dienų. Redox potencialo pokytis 10 mV per parą gali reikšti sistemos sutrikimą, kuris matomai gali pasireikšti tik po dviejų savaičių.

Redukcijos–oksidacijos potencialas nusako perdirbamų medžiagų oksidacijos arba redukcijos laipsnį. Biodujų gamyba yra efektyvi tik tuomet, kai redukcijos–oksidacijos potencialas yra mažesnis nei –300 mV. Substratas, kuriame yra deguonies, sulfato arba nitrato grupių, gali gerokai pakeisti redukcijos–oksidacijos potencialą ir pH. Neigiamas poveikis taip pat gali atsirasti dėl substrato kaitos.

Nuolatiniai redukcijos–oksidacijos potencialo matavimai suteikia galimybę kontroliuoti procesą reaktoriuje tol, kol pH nėra pakitęs (Wiese ir Konig, 2007).

Toksinį poveikį turintys metalai. Toksinį poveikį turintys metalai (kadmis, chromas, kobaltas, varis, nikelis, cinkas ir švinas) neigiamai veikia bakterijų veiklą. Pūdymo įrenginiuose jie atsiranda dėl į nuotekų valyklą atitekančių gamybinių nuotekų. Dažniausiai šie metalai sutrikdo pūdymo procesą. Buitinėse nuotekose paprastai yra mažos metalų, tokių kaip natris, kalis, kalcis ir magnis koncentracijos, taip pat kalcio, natrio metalų papildomai patenka ir su cheminių medžiagų dozavimu dėl pH kontrolės pūdytave. Amoniakas, kuris išskiriamas pūdymo procese, gali pasiekti kenksmingą lygį stipriai koncentruotame dumble. Amonio azoto koncentracijos neturėtų viršyti 1000 mg/l, kitaip jis gali tapti toksišku (Turovskiy, 2006).

Pagal toksinį poveikį turinčius metalus dumblas yra skirstomas į tris atskiras kategorijas (4 lentelė).

4 lentelė. Dumblo skirstymas į kategorijas pagal sunkiųjų metalų koncentraciją (Turovskiy, 2006)

Dumblo kategorija	Sunkiųjų metalų koncentracija, mg/kg						
	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Hg
I	<140	<1,5	<140	<75	<50	<300	<1,0
II	140-750	1,5-20	140-400	75-1000	50-300	300-2500	1,0-8,0
III	>750	>20	>400	>1000	>300	>2500	>8,0

Faktinė dumblo apkrova ir koncentracija. Faktinė dumblo apkrova yra dumblo kokybės parametras, įvardijamas kaip pūdymo procesą lemiantis parametras. Nuo dumblo apkrovimo bepelenėmis sausomis medžiagomis priklauso bepelenių sausų medžiagų suskaidymas, tuo pačiu ir biodujų išgavimas. Ryšys tarp faktinės dumblo apkrovos, dumblo koncentracijos bei hidraulinės išbuvimo trukmės pateiktas 5 lentelėje.

5 lentelė. Ryšys tarp dumblo koncentracijos, hidraulinės išbuvimo trukmės ir faktinės dumblo apkrovos (Wastewater Engineering, 2014)

Dumblo koncentracija, %	Faktinė dumblo apkrova, kg BSM/m ³ /d			
	10 d	12 d	15 d	20 d
2	1,4	1,2	0,95	0,70
3	2,1	1,8	1,4	1,1
4	2,9	2,4	1,9	1,4
5	3,6	3,0	2,4	1,8
6	4,3	3,6	2,9	2,1
7	5,0	4,2	3,3	2,5
8	5,7	4,8	3,8	2,9

Vadovaujantis literatūros šaltiniais optimaliam pūdytuvo darbui palaikyti gali būti palaikoma 1,6–4,8 kg BSM/m³/d tūrinė pūdytuvų apkrova (Wastewater Engineering, 2014).

1.3.2. Biodujų kokybė

Biodujos – dujos, pagamintos iš biomasės ir (ar) biologiškai skaidomos atliekų dalies. Anaerobiniame procese skylant organinėms medžiagoms ir susidarant biodujoms, dalyvauja dešimtys rūšių bakterijų ir kitų tarpusavyje organiškai susijusių mikroorganizmų. Kuo palankesnės aplinkos sąlygos, tokios kaip temperatūra, pH, šarmingumas, Redox potencialas, dumblo faktinė apkrova, dumblo koncentracija, išbuvimo pūdytuve trukmė, tuo mikroorganizmai aktyvesni, greičiau auga ir dauginasi, o tuo pačiu intensyvėja visas organinių medžiagų skaidymas ir didėja susidarančių biodujų kiekis.

Anaerobinio puvimo metu susidaro įvairių dujų mišinys, kuriose daugiausia yra metano (55 – 70 %) ir anglies dioksido (30–45 %), labai mažus kiekius sudaro anglies monoksidas (CO), dujinis azotas (N₂), sieros vandenilis (H₂S), amoniakas (NH₃) ir deguonis (O₂) (Monnet, 2003). Susidariusios biodujos nuotekų valykloje yra surenkamos ir išvalomos dujų valymo įrenginiuose bei talpinamos dujų talpyklose. Kai kurių organinių medžiagų specifinio dujų susidarymo bei metano kiekio reikšmės pateiktos 6 lentelėje.

6 lentelė. Tipinės organinių medžiagų specifinio dujų susidarymo reikšmės (Wastewater Treatment Plant Design, 2003)

Organinė medžiaga	Specifinis dujų susidarymas, N m ³ /kg suskaidytų BSM	Metano kiekis, %
Riebalai	1,2-1,6	62-72
Išplūdosi	0,9-1,0	70-75
Taukai	1,1	68
Stambūs plaušai	0,8	45-50
Baltymai	0,7	73

Biodujų gamyba yra sudėtingas biocheminis procesas, kurio metu organines medžiagas veikia skirtingų rūšių bakterijos. Medžiagų apykaitos aktyvumas ir metano gamybos intensyvumas taip pat priklauso nuo perdirbamo substrato sudėties, palaikomos temperatūros ir jos svyravimų, išlaikymo trukmės, slopinimo faktorių (Nagel ir kt. 2001, Khandelwal, 1990).

Biodujų energinė vertė tiesiogiai susijusi su metano koncentracija. Esant metano daugiau negu 55 %, biodujos laikomos vertingu kuru. Metanas yra bekvapis, netoksiškas ir lengvesnis už orą. Deginamas metanas virsta anglies dioksidu ir vandens garais (Budrys, 2006).

Biodujos yra metano ir anglies dvideginio mišinys, joms užsiliepsnojimo ribinės koncentracijos šiek tiek skiriasi nuo gryno metano ir priklauso nuo pastarojo koncentracijos biodujose. Dujų užsiliepsnojimo ore ribinės koncentracijos yra labai svarbus rodiklis. Jis reiškia, kad dujų ir oro mišinio temperatūrai pasiekus užsiliepsnojimo temperatūrą, jei dujų koncentracija mišinyje randasi tarp žemutinės ir viršutinės ribinių koncentracijų, mišinys degs (jei mišinio tūris pakankamai didelis – jis sprogs) (Navickas 2008). Suskystinti biodujas yra sudėtinga techniniu požiūriu, nes reikia jas atšaldyti iki labai žemos temperatūros esant aukštam slėgiui. Tai atlikti galima panaudojus brangius įrenginius ir daug energijos (kompresoriaus ir šaldymo agregato maitinimui), o tai reiškia, kad ekonominiu požiūriu suskystinti biodujas neapsimoka (Genutis ir kt., 2008).

Esant skirtingoms angliavandenių, baltymų ir riebalų proporcijoms substrate, gaunama ir skirtinga biodujų išeiga bei jose esantis metano kiekis (7 lentelė).

7 lentelė. Stechiometrinė biodujų išeiga ir metano kiekis jose (Navickas, 2008)

Medžiaga	Biodujų išeiga, m ³ /kg	Metano išeiga, m ³ /kg	Metano kiekis Biodujose, %	Biodujų šiluminė vertė, MJ/Nm ³
Riebalai	1,44	1,03	71,5	38,83
Baltymai	0,96	0,51	53,1	19,23
Angliavandeniai	0,79	0,39	49,4	14,70

Skaidant pirminio ir perteklinio veikliojo dumblo mišinį išsiskiria nuo 0,75 iki 1,2 m³/kg suskaidytų bepelenių sausų medžiagų. Biodujų kiekybinės ir kokybinės savybės taip pat priklauso nuo pūdymo temperatūros, organinių medžiagų išbuvimo trukmės pūdytuve ir pūdomo dumblo apkrovos bei dumblo tiekimo į pūdytuvą režimų. Pūdant dumblą termofiliniu režimu biodujų išsiskyrimo efektyvumas yra 33–38 % didesnis negu pūdant dumblą mezofiliniu režimu, metano koncentracija supūdžius dumblą termofilinėmis sąlygomis siekia 59,8–64,3 %, o mezofilinėmis – 56,9–57,7 % (Vindis, 2009).

Tyrimai rodo, jog biodujų išsiskyrimas didžiausias per pirmas 7 pūdymo dienas, vėliau biodujų išsiskyrimas sulėtėja, o išbuvimo trukmei pasiekus 20 dienų biodujų išsiskiriantis kiekis tampa visai nežymus. Praktika rodo, kad geriau pūdymo metu yra suskaidomas pirminis dumblas negu perteklinis. Šio reiškinio priežastis yra ta, kad pertekliniame dumble organinės medžiagos yra susikaupusios mikroorganizmų viduje. Mikroorganizmai yra sudaryti iš baltymų, kurie skaidomi sunkiausiai. Pūdymo procese suskaidžius 1 kg baltymų, susidaro tik apie 0,7 m³ dujų. Tuo tarpu pirminis dumblas ir susideda iš organinių medžiagų, jame nėra mikroorganizmų, todėl organinės medžiagos pūdyje yra skaidomos iš karto.

Tradiciškai energijos išgavimas iš nuotekų dumblo anaerobinio pūdymo ir biodujų pagalba gali būti panaudojamas mišrioms šilumos ir energijos sistemoms (Mills, 2013). Pūdymo metu susidariusios biodujos gali būti naudojamos kaip kuras kūrenti katilams ir gaminti šiluminę energiją, tačiau naudojant biodujas šiai paskirčiai, jos turi būti išvalytos ir iš jų turi būti pašalintas sieros vandenilis, dėl kurio prasideda korozijos (Monnet, 2003). Iš pūdymo metu susidariusių dujų, panaudojant kogeneracijos jėgaines, galima išgauti ne tik šilumą, bet ir gaminti elektros energiją. Tokiu atveju pagaminta elektros energija gali būti panaudojama patenkinti daliai nuotekų valyklos elektros energijos poreikių, taip pat susidariusią šilumą galima panaudoti pūdomam dumblui pašildyti. Biokuro naudojimas įvairiose pramonės šakose sparčiai plinta, nes jis laikomas vienu iš švariausių kuru, turinčiu mažiausią neigiamą poveikį aplinkai bei žmonių sveikatai (Monnet, 2003).

1.4. Dumblo skaidymas

Anaerobinis dumblo pūdydas yra labiausiai pasaulyje naudojama dumblo stabilizavimo technologija, tačiau žemas biologinis dumblo skaidymo efektyvumas ir ilga dumblo pūdymo trukmė yra didžiausi šio proceso apribojimai, kurie gali būti įveikti naudojant įvairius dumblo suskaidymo metodus prieš dumblo pūdydą (Tyagi ir kt., 2011). Dumblo skaidymo technologijos yra naudojamos tam, kad būtų greičiau suardomos mikroorganizmų ląstelės ir išlaisvinamos organinės medžiagos. Skaidymo technologijos, integruotos į dumblo apdorojimo įrenginius, yra apdorojimo procesai, kurie mažina dumblo tūrį ir pagerina dumblo savybes. Šios technologijos yra laikomos ekologiškai saugiomis, nes jos nesukelia aplinkai kenksmingų papildomų atliekų, į orą neišleidžia kenksmingų dalelių. Todėl pastarųjų dešimtmečių dumblo kiekio mažinimas ir jo gerinimas nuolat didėjo (Atay, 2016). Skaidymo metodai yra pagrįsti fizikiniais, cheminiais ir biologiniais procesais. Biologiniai skaidymo metodai pagrįsti fermentų veikla, kuri natūraliai jau vyksta sistemoje arba naudojamas papildomas fermentų kiekis. Biologinis skaidymas nėra efektyvus, nes yra gana lėtas procesas ir sunkiai prognozuojamas jo efektyvumas. Šių trūkumų neturi fizikiniai ir cheminiai skaidymo metodai arba jų kombinacija, taip pat taikant šiuos metodus skaidymo procesas tampa stabilesnis, lankstesnis ir lengviau valdomas (Tyagi ir Lo, 2011). Daugelis tyrimų parodė, kad ląstelių yrimui įtaką daro ir greitina hidrolizės procesą rūgštys ir šarmai, dumblo ozonavimas, terminis dumblo apdorojimas, aukštas slėgis, ultragarso naudojimas, aukšta įtampa, gama spinduliuotė, įvairūs mechaniniai metodai bei šių visų išvardintų metodų kombinacijos. Vieni metodai yra taikomi praktikoje, o kiti atlikti tik laboratoriniais tyrimais. Skaidymo pasirinkimo metodą lemia energijos sunaudojimas reikalingam skaidymo efektui sukurti. Iš vienos pusės dumblo skaidymas reikalauja papildomai energijos, tačiau dumblo skaidymas lemia didesnę biodujų išsiskyrimo kiekį pūdymo procese.

Pagrindiniai dumblo apdorojimo įrenginiuose taikomi skaidymo metodai yra: terminė hidrolizė, dumblo skaidymas ultragarsu, skaidymas ozonu, dumblo skaidymas aukštu slėgiu ir dumblo skaidymas aukšta įtampa. Plačiausiai iš pagrindinių metodų taikomi aukšta įtampa ir ultragarsas dėl SM pašalinimo, BSM suskaidymo ir specifinio biodujų susidarymo padidėjimo efektyvumo ir pigesnių eksploatacinių bei investicinių kaštų.

1.4.1. Terminė hidrolizė

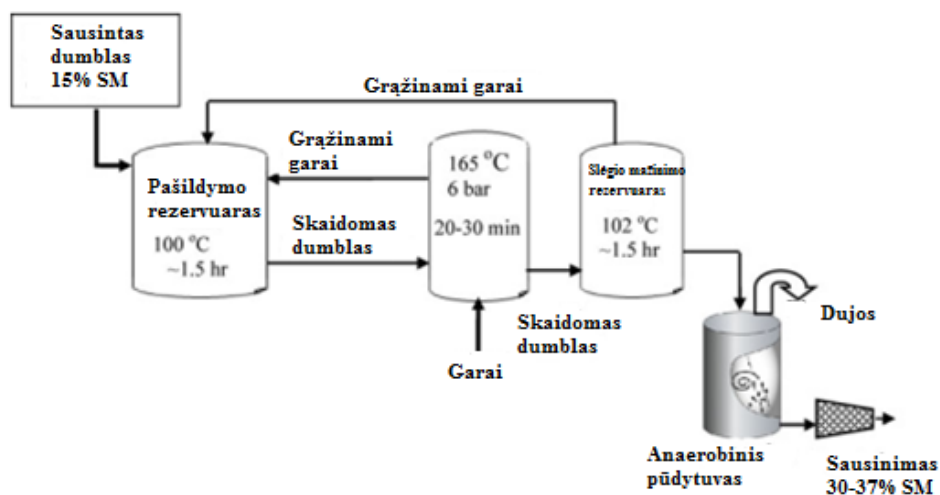
Terminė hidrolizė yra žinoma kaip priemonė atskirti vandenį iš dumblo ir taip jį pasausinti, šiuo būdu chemiškai su ląstelėmis susijungęs vanduo yra išlaisvinamas. Terminė hidrolizė taip pat yra priemonė dumblui skaidyti, kai stambiamolekulinės medžiagos ardomos aukštos temperatūros pagalba. Hidrolizė gali būti naudojama prieš biologinį nuotekų valymą arba prieš dumblo pūdymą. Tai dviejų stadijų procesas, apimantis dumblo ar atliekų virinimą dideliame (6-8 barai) slėgyje ir po to vykstančią greitą dekompresiją. Šis procesas dumblą sterilizuoja ir padaro lengviau biologiškai yrantį, kas padidina pūdymo efektyvumą.

Šio metodo dėka dumblas efektyviai suskaidomas, išgaunamos biodujos, sunaikinami patogeniniai organizmai. Po terminės hidrolizės anaerobinio pūdymo metu efektyviai šalinamos lakiosios medžiagos, organinės medžiagos (pagal ChDS), efektyviai išsiskiria biodujos (Camacho ir kt., 2008). Pranašumas tame, kad hidrolizė, kuri yra viso skaidymo greitį ribojantis procesas, gali būti vykdoma ne biologinėmis, o fizikinėmis priemonėmis (Wilson, 2008). Po terminės hidrolizės anaerobinio pūdymo metu pasiekiamas lakiųjų medžiagų suskaidymas 55–60 % (Jolis ir kt., 2008). Taipogi įrodyta, kad terminė hidrolizė yra geras metodas sumažinti vandens kiekiui dumble (Kepp ir kt., 2000).

Dauguma tyrimų parodė, kad optimali skaidymo temperatūra yra 160–180 °C ir 30–60 min skaidymo trukmė. Atitinkamai sistemoje palaikomas slėgis nuo 600 iki 2500 kPa. (Carrere, 2010). Terminio skaidymo temperatūra taip pat priklauso nuo skaidymo trukmės. Aukštas suskaidymo efektyvumas gali būti pasiektas skaidant dumblą 170°C tik 60 sekundžių (Dahanyos, 2004), iš kitos pusės tas pats skaidymo efektyvumas gali būti pasiektas skaidant dumblą 70 °C keletą dienų (Ferrer, 2008). Termohidrolizė atliekama reaktoriuose, į kuriuos tiekiamas sutankintas dumblas. Į reaktorius paduodamas karštas garas iki kol pasiekiamas projektinė termohidrolizės proceso temperatūra ir slėgis. Padidėjęs sausų medžiagų suskaidymo bei biodujų kiekis ir sumažėjusi pūdymo trukmė yra pagrindinės priežastys dėl ko taikomi dumblo skaidymo metodai. Taikant termohidrolizę su mažesnėmis temperatūromis (121 °C, 30 min), 30 % padidėja bepelenių sausų medžiagų suskaidymas (Kim, 2003). 59% didesnę bendrą sausų medžiagų sumažėjimą savo bandymais pasiekė mokslininkas A.Valo (2004 m), termohidrolizę taikęs 15 min. ir 170 °C temperatūroje. Panašūs rezultatai pasiekti

ir mokslininkų S. Graja bei J. Chauzy (2005 m). Jie nustatė 65 % padidėjusį sausų medžiagų sumažėjimą, taikant termohidrolizę 175 °C, 40 min ir pūdant dumblą mezofiliniu režimu (37 °C temperatūroje). Skaidant dumblą šiuo būdu pastebimas didesnis biodujų išsiskyrimas, o tai savo bandymais įrodė daugelis mokslininkų: 40-50 % didesnis biodujų išsiskyrimas (skaidymas 170 °C temperatūroje, 30 min, 7 bar, HRT 12 dienų) (X.Yang, 2010), 50 % padidėjęs metano išsiskyrimas (skaidymas 170 °C temperatūroje, 30 min) (F.Fernandez-Polanco, 2008). Laboratoriniais bandymais B.Wett (2010 m.) pasiekė 75 % didesnę biodujų išsiskyrimą, o biodujų išsiskyrimas padidėjo nuo 247 iki 443 l vienam kg bepelenių sausų medžiagų, tiekiamų į termohidrolizės reaktorių. Skaidymas atliktas 180 °C temperatūroje, 60 min, pūdyta mezofiliniu režimu 14 dienų. Skaidymas aukštesnėje negu 190 °C temperatūroje lemia sumažėjusį dumblo skaidymo efektyvumą. Šis procesas dažnai traktuojamas kaip *Maillard* reakcijos, kurios įtraukia hidrokarbonatus ir aminorūgštis melanoidinų formavimuisi, kurie yra itin sunkiai skaidomi dariniai ir netgi gali būti toksiški metanogenazės bakterijoms. Jie taip pat pakeičia supūdymo dumblo spalvą (Carrere, 2010 ir Water Treatment Handbook, 2007).

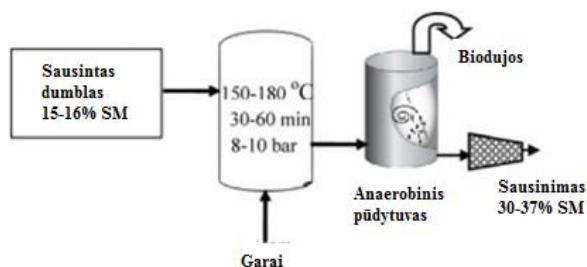
Pasaulyje gerai žinomos dvi bendrovės *Cambi* ir *BioTHELYS*, kurios savo kuriamoms ir taikomoms dumblo skaidymo technologijoms naudoja termohidrolizę. Norvegijos bendrovės *Cambi* taikomų procesų (6 pav.) rezultatai yra: 30 % padidėjęs organinių medžiagų suskaidymas, 50 % padidėjęs biodujų išsiskyrimas, sumažėjęs dumblo kiekis daugiau kaip 30 %, didesnis pūdymo greitis.



6 pav. CAMBI technologijos terminės hidrolizės proceso schema (Pilli, 2014)

Prancūzų bendrovė *BioTHELYS* dumblo skaidymo procesams pasiekia didesnę 25-45 % bendrą sausų medžiagų suskaidymą, 46 % sumažėjusį dumblo kiekį bei padidėjusį biodujų išsiskyrimą.

BioTHELYS technologijos (7 pav.) pagrindinis principas yra pagerinti dumblo suskaidymą ir padidinti biodujų susidarymą anaerobinio pūdymo metu. Visas procesas vyksta hidrolizės reaktoriuje, į kurį patenka tirštintas, 15-16% sausų medžiagų dumblas. Dumblas yra šildomas 30-60 min. įterpiant į reaktorių garus, kol temperatūra pasiekia 150-180 °C. Hidrolizuotas dumblas yra pašalinamas naudojant likutinį slėgį reaktoriuje, ataušinamas iki 35 °C ir tiekiamas į pūdytuvą, kur vyksta anaerobinis dumblo pūdyimas.



7 pav. BioTHELYS technologijos terminės hidrolizės proceso schema (Pilli, 2014)

Cambi ir *BioTHELYS* bendrovės dumblo skaidymo procesus taiko 150–180 °C temperatūroje, 30–60 min skaidymo trukmei (Appels, 2008 ir Carrere, 2010).

1.4.2. Ultragarasas

Dumblo ar jo mišinio skaidymui gali būti naudojamas ultragarasas, kuris taikomas prieš dumblo pūdyimą. Dumblo skaidymas ultragarsu yra techniškai lengvai kontroliuojamas ir stabilus metodas. Šio proceso esmė yra dumble atsiradusių mikroburbuliukų kavitacija, kurios metu per labai trumpą laiką burbuliukai atsiranda, išsiplečia ir sprogs. Greitas mikroburbuliukų išsiplėtimas ir sproginimas nulemia aukštos temperatūros ir aukšto slėgio gradientus, kurie ardo dumblo ląstelių membranas ir išleidžia iš jų biologiškai skaidomas organines medžiagas (Tyagi and Lo, 2011).

Dauguma tyrimų parodė, kad efektyviausias skaidymas ultragarsu tuomet, kai jo dažnis yra 20 kHz (Erden, 2009). Energijos suvartojimo kiekiai svyruoja nuo 1000 iki 16 000 kJ/kg SM ir priklauso nuo dumblo koncentracijos. Optimali sausųjų medžiagų koncentracija šiam metodui taikyti yra 2,3–3,2 %. Jeigu sausųjų medžiagų koncentracija yra per didelė, tuomet dumblo klampumas neleidžia formuotis kavituojantiems burbuliukams. Sunaudojamos energijos kiekis priklauso ir nuo skaidymo trukmės. Galima skaidyti naudojant didesnius energijos kiekius, bet trumpesnį laiką arba atvirkščiai, tačiau tyrimai parodė, kad didesnis skaidymo efektyvumas pasiekiamas tada, kai per trumpesnį laiką skaidoma naudojant daugiau energijos negu ilgos skaidymo trukmės mažesne energija (Carrere, 2010). Labai svarbu yra tinkamas įrangos (skaidymo generatoriaus, galvutės ir

dumblo kameros) nustatymas, norint, jog skaidymas veiktų sklandžiai, pasiektų didžiausią efektyvumą tiek dumblo suskaidymo tiek suvartojamos energijos aspektais. Be abejo tai yra labai patogi, lengvai aptarnaujama ir saugi naudoti sistema (Zielewicz, 2015). Skaidymo įrenginiai, veikdami dinaminėmis sąlygomis, turi užtikrinti nustatytą dumblo išbuvimo trukmę ir ultragarso poveikį dumbliui. Jų konstrukcijos užtikrina priverstinį hidraulinį maišymąsi arba juose yra įmontuotos maišyklės (Zielewicz, 2015).

Mokslininkai pastebėjo, kad, naudojant ultragarsinį skaidymą, tirpios ChDS dalis, ištirpusios organinės anglies dalis, N_b , P_b koncentracijos dumblo paviršiuje padidėjo 340%, 860%, 716% ir 207,5% (Erden and Fillibeli, 2010).

Dumblo skaidymo ultragarsu technologijos taikomos daugelyje nuotekų valyklų nuo 50 000 iki 750 000 žm.ekv. Šiose valykluose pastebimi pokyčiai: sausų medžiagų sumažėjimas padidėja 40–55 %, biodujų išsiskyrimas padidėja apie 50 %, dumblo drėgnumas sumažėja 5 %, tai leidžia sutaupyti 33 % polimerų, naudojamų dumblo sausinimui (Appels, 2008). S. Burith (2010) savo bandymais deklaravo, kad energijos kiekis 3,8 kJ/g SM yra efektyviausias dumblo skaidymui. Mažiausia reikalinga energija dumblo ląstelių yrimui yra 1,5 kJ/g SM. Svarbu paminėti, kad skirtingos ultragarso sistemos lemia skirtingus skaidymo efektyvumus (Burith, 2010).

Laboratorinėmis sąlygomis skaidymą atliko Braguglia (2009), kuris skaidė dumblą naudodamas 5000 kJ/kg ir 2500 kJ/kg energijos kiekį ir 24 kHz dažnio ultragarsą. Bandymą atliko 67, 34 ir 63 dienas. Rezultatai pateikti 8 lentelėje.

8 lentelė. Ultragarsinis dumblo skaidymas skirtingais dažniais ir trukme (Braguglia, 2009)

Bandymas	1	2	3
Trukmė (d)	67	34	63
Dažnis	24 kHz	24 kHz	24 kHz
Energijos kiekis	5000 kJ/kg	5000 kJ/kg	2500 kJ/kg
Bepelenių medžiagų suskaidymas	8,3%	6,5%	16,7%
Biodujų išsiskyrimas	36%	29%	26%

Iš rezultatų matyti, jog biodujų daugiausiai susidarė, kuomet dumblas buvo skaidomas 34 dienas, 24 kHz dažnio ultragarsu ir sunaudojant 5000 kJ/kg energijos kiekį. Daugiausiai bepelenių medžiagų suskaidoma, skaidant dumblą 63 dienas, 24 kHz dažnio ultragarsu ir sunaudojant 2500 kJ/kg energijos.

Carrere (2010) taip pat atliko skaidymo ultragarsu tyrimus, gauti rezultatai parodyti 9 lentelėje.

9 lentelė. Skaidymo ultragarsu tyrimo rezultatai (Carrere, 2010)

Dumblo tipas	Skaidymo sąlygos	Rezultatai
Pirminio ir antrinio dumblo mišinys	31 kHz, 3,6 kW, 64 s	Bepelenių medžiagų suskaidymas 50,3%
Aktyvusis dumblas	41 kHz, 150 min	Bepelenių medžiagų suskaidymas + 36%
Aktyvusis dumblas	20 kHz, 7000 kJ/kg SM	Biodujų išsiskyrimas +40 %
Aktyvusis dumblas	5000 kJ/kg SM	Biodujų išsiskyrimas +36 %
Aktyvusis dumblas	20 kHz, 9690 kJ/kg SM	Biodujų išsiskyrimas +44 %

Iš rezultatų matyti, jog biodujų daugiausiai susidarė, kuomet dumblas buvo skaidomas 20 kHz dažnio ultragarsu ir sunaudojant 7000 kJ/kg. Daugiausiai bepelenių medžiagų suskaidyta esant 31 kHz dažnio ultragarsui, 3,6 kW energijai ir per 64 s laiko tarpui.

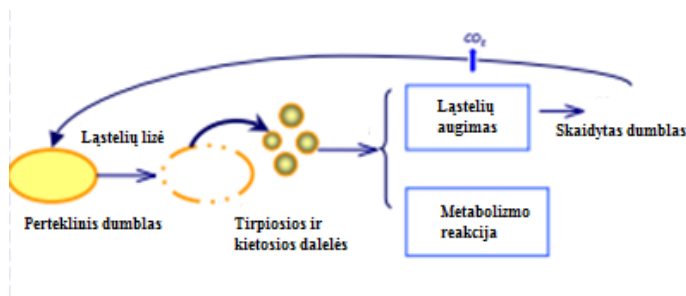
Pagrindiniai ultragarsinio metodo privalumai: kvapų sumažinimas, jokių užsikimšimo problemų, geresnis dumblo nusausinimas, kompaktiškas dizainas ir lengvas įdiegimas nuotekų valymo įrenginiuose, potencialus siūlinių bakterijų ir putojimo anaerobiniame reaktoriuje kontroliavimas, išaugusi biodujų gamyba. Tačiau šio metodo pritaikymas yra ribotas dėl aukštos ultragarsinių įrenginių kainos ir didelių elektros energijos sąnaudų. Didelis energijos poreikis, dezintegracijai ultragarsu gali būti sumažintas derinant jį su kitais apdorojimo metodais, dėl to, kad skirtingų apdorojimo technologijų deriniai, gali leisti gauti didesnę suskaidymą (Kim et al., 2010).

1.4.3. Ozonavimas

Ozonas yra dujos, kurioms būdingas specifinis, pakankamai stiprus (užuodžiamas nuo 0,02 mg/m³) kvapas. Gamtoje susidaro trenkus žaibui (elektros išlydžio metu) ir nuo intensyvių UV spindulių. Tai natūrali sudėtinė atmosferos dalis, apie 90% yra stratosferoje nuo 15 iki 35 km aukštyje, kur apsaugo žemės paviršių nuo kenksmingo UV spinduliavimo. Ozono tirpumas vandenyje yra 109 mg/L esant 25 °C temperatūrai. Tai yra maždaug 13 kartų daugiau, negu deguonies. Ozonas gaminamas iš deguonies (oro) koronos išlydžio būdu (iš deguonies iki 18% koncentracijos, iš oro iki 4%). 1 kg ozono pagaminti reikalinga apie 7 kW elektros energijos, 8 m³ dujinio deguonies, 1,5 m³ vandens arba 4 kW šaldymui. Ozonas yra labai nestabili medžiaga. Skyla į deguonį. Jis negali būti saugomas ar transportuojamas. Gaminamas išimtinai naudojimo vietoje (Loeb, 2012).

Ozonas gali skaidyti organinius polimerus į mažesnius junginius, todėl vis plačiau naudojamas dumblo skaidymui nuotekų valyklose ir yra vienas iš stipriausių dumblo apdorojimo oksidatorių. Ozono oksidacija tiesioginėmis ir netiesioginėmis reakcijomis įgalina veikliojo dumblo mikroorganizmų ląstelių sienelių suardymą. Iš veikliojo dumblo skaidymo būdų dumblo ozonavimas

yra vienas efektyviausių, pasiekiamą aukščiausio lygio suskaidymas. Paprastai, skaidymas ozonu yra paremtas ląstelių lizės (irimo) procesu (8 pav.), kuomet nuo ląstelės atsiskiria jos lizatas (Chu, 2008).

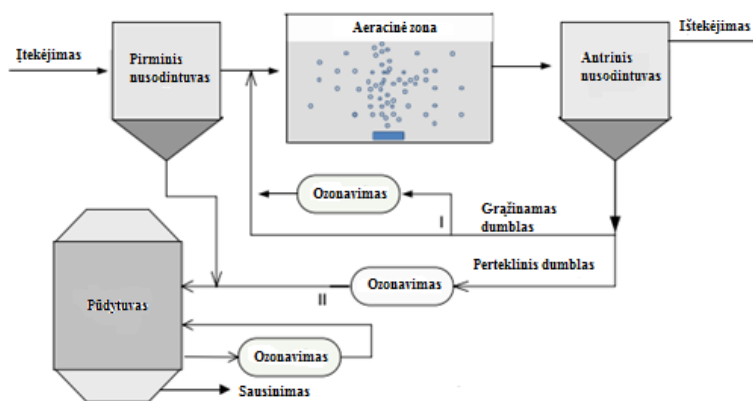


8 pav. Cheminių reakcijų skaidomame ozonu dumblės schema (Chu, 2008)

Nuotekų valykloje gali būti trys skirtingos vietos (9 pav.), kuriose vykdomas skaidymas ozonu (Chu, 2008):

1. Po antrinio nusodintuvo, skaidant į bioreaktoriaus pradžią grąžinamą dumblą;
2. Po antrinio nusodintuvo, skaidant perteklinį, tiekiamą į pūdytuvą, dumblą;
3. Skaidant recirkuliacinį pūdomą dumblą.

Bet kuriuo atveju, naudojant vienokį ar kitokį sprendimo būdą, padidės biodujų gamyba, pagerės apdoroto dumblo nusėdimas ir dumblo stabilizavimas, sumažės šiltnamio dujų išmetimas tvarkant dumblą.



9 pav. Skaidymas ozonu nuotekų valykloje (Chu, 2008)

Toks dumblo skaidymo būdas nuo 1980-ųjų metų labai išpopuliarėjo, ypač Japonijoje – Tokijo ir Kansai regionuose. 1980 m. dumblą ozonu skaidė 1 valykla, o 2010 m. – 65 nuotekų valyklos (Loeb, 2012). Populiarėjant šiam skaidymo būdai, atsiranda vis daugiau mokslininkų, kurie

tiria ozono dozės poveikį dumblo biodegradacijai. Apdorojimas ozonavimo būdu padidina suskaidymą, ypač biologinės kilmės dumblo, apie 54 – 64%, priklausomai nuo ozono koncentracijos. Pvz., Weemaes ir kt. (2000) atliktame tyrime pasiektas 64% perteklinio veikliojo dumblo suskaidymas, naudojant 0,1g O₃/g dozę. Atliekant tolimesnius eksperimentus ir didinant ozono dozę reikšmingo pokyčio biodujų gamyboje nepastebėta. Rekomenduojama leistina ozono dozė gali būti ir mažesnė – 0,03-0,05 g O₃/g, kuri pasirodė tinkama pasiekti veiksmingą dumblo suskaidymą (10 lentelė) mažiausiais kaštais (Chu, 2008). Iš lentelėje pateiktų rezultatų matyti, kad 30 % siekianti suskaidymo efektyvumą galima pasiekti naudojant ir 0,025, ir 0,05 O₃/g dozę.

10 lentelė. Ozono dozavimas skaidymo metu (Chu, 2008)

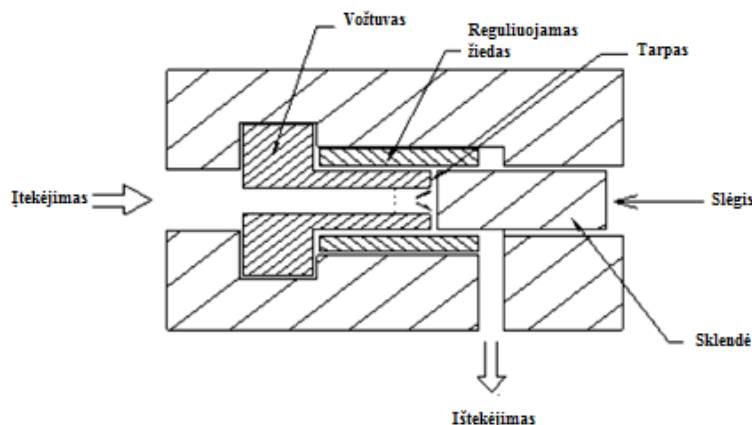
Sausų medžiagų koncentracija (mg/l)	Tūris, L	Ozono dozė, g O ₃ /g	Suskaidymo efektyvumas, %
3790-4570	630	0,025-0,035	20-30
1200-4000	2	0,03-0,04	30
5000-5300	350	0,05	30
18900	1	0,1-0,16	20-25
8000-12000	1000	0,1	45

Didžiausias suskaidymo efektyvumas (45 %) šiame tyrime buvo pasiektas naudojant 0,1 O₃/g dozę.

1.4.4. Aukštas slėgis

Dumblo skaidymas aukštu slėgiu yra vienas iš mechaninio dumblo skaidymo metodų. Tai populiarijantis metodas. Šis procesas sukuriamas įrenginyje, vadinamu aukšto slėgio dumblo homogenizavimo įrenginiu. Kitaip negu terminė hidrolizė, kuri reikalauja didelių energetinių poreikių arba cheminis dumblo skaidymas, kuris sukelia neigiamą poveikį dumblą pūdančioms bakterijoms, šis metodas imtas plačiai naudoti dėl nedidelių įrenginių bei lengvos integracijos į egzistuojančią ir veikiančią nuotekų valyklą. Skaidymas aukštu slėgiu pagrįstas procesu, kada išorinis slėgis viršija dumblo ląstelių vidinį slėgį ir ląstelės yra suardomos išleidžiant iš jų citoplazmą (Onyeche, 2010). Dumblo skaidymas vyksta aukšto slėgio dumblo homogenizavimo įrenginyje, į kurį aukštu slėgiu ir mažu greičiu siurbliu tiekiamas dumblas. Kuomet dumblas pereina per vožtuvą ir pasiekia reguliuojamą žiedą, slėgis krenta, o greitis gali pakilti iki 300 m/h. Toks energijos atpalaidavimas lemia dumblo turbulenciją ir lokalizuotą slėgių skirtumą. Šie procesai sudaro galimybę atsirasti kavitacijos burbuliukams, kurių formavimasis ir sproginimas pakelia dumblo temperatūrą keliais šimtais laipsnių bei lemia dumblo ląstelių yrimą (Tyagi ir Lo, 2011). Metodas grindžiamas ląstelių

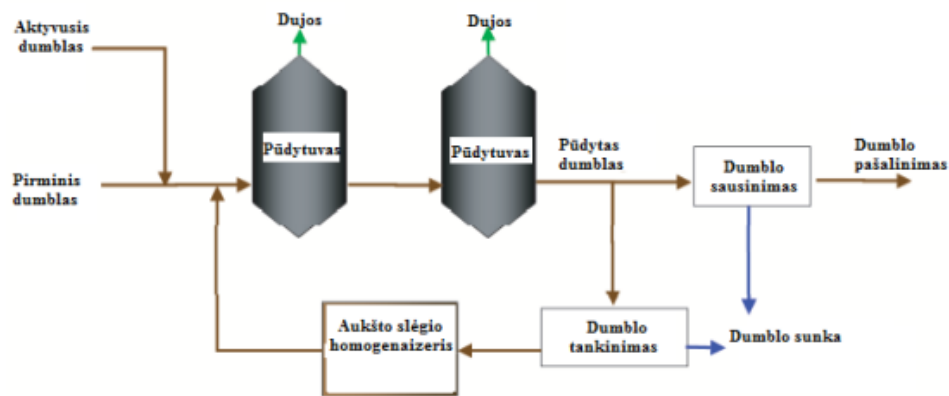
sienų suardymu ir citoplazmos išleidimu skysčio pavidalu dėl slėgio gradiento, kavitacijos, turbulencijos, ląstelės pažeidimo, šlyties įtempių ir išilginio poslinkio. Detali skaidymo aukštu slėgiu schema pateikta 10 paveiksle.



10 pav. Aukšto slėgio homogenizatorius (Rai, 2009)

Šis metodas turi keletą privalumų, lyginant jį su kitais skaidymo būdais – lengvas aptarnavimas ir aukštas lizės efektyvumas. Be to, šis metodas gali veikti kartu su kitais dumblo skaidymo metodais, t.y. terminiu arba šarminiu, kurie pagerina anaerobinio pūdymo efektyvumą. Į aukšto slėgio homogenizatorių tiekiamas dumblas gali būti veikiamas iki 900 bar slėgiu, tačiau tokie homogenizatoriai naudojami ir mažesniems slėgio skirtumams – iki 150 bar. Slėgio skirtumas yra pagrindinė priežastis, kuri priverčia ląsteles irti (Zhang, 2011).

Dumblo skaidymo metodo efektyvumas tuo didesnis, kuo didesnė tiekiamo dumblo koncentracija, todėl dažniausiai prieš šį skaidymą dumblas yra tankinamas. Didesnė dumblo koncentracija lemia tai, kad dumblo ląstelės yra arčiau viena kitos, o tai veikia didesnę ląstelių yrimą: kada dumblas prateka homogenizuojančią sklendę, nereikia papildomos energijos dumblui suspausti. Dažniausiai nuotekų valyklose ne visas dumblas prateka pro aukšto slėgio homogenizatorių (11 pav.), praleidžiama tik dalis dumblo, nes kitaip žymiai išaugtų sistemos energijos sąnaudos: ląstelės suardomos tiek, kad būtų pasiekiamos mikroorganizmams. (Onyeche, 2010).



11 pav. Homogenizatoriaus integracija į nuotekų valyklos dumblo apdorojimo įrenginius (Onyeche, 2010)

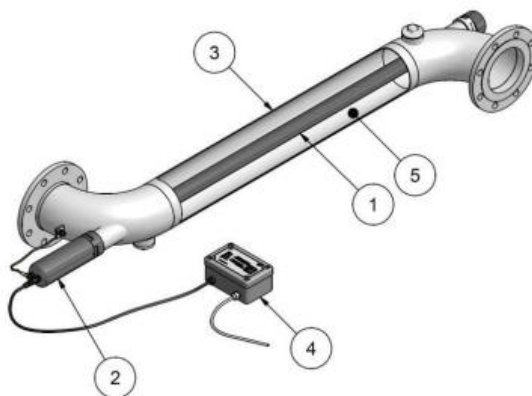
Daugelis mokslininkų, tyrinėdami šį skaidymo būdą, nustatė, jog jis veikia sausų medžiagų ir dumblo kiekio sumažėjimą, biudujų išsiskyrimo padidėjimą:

- Onyeche (2007 m), naudodamas dumblo skaidymui homogenizatorių, pastebėjo: kai slėgio skirtumas 150 bar pasiekė 30 % biudujų išsiskyrimą, metano koncentracija pakilo nuo 68 iki 72 %, o dumblo kiekis sumažėjo 23 %.
- Zhang (2011) savo bandymuose pasiekė 24,67 % ChDS suskaidymo laipsnį, homogenizuojant dumblą 80 Mpa slėgiu, kai dumblo mėginio sausų medžiagų kiekis buvo 9,58 g/l. Energijos kiekis, reikalingas tokiam suskaidymui – 8450 kJ/kg.
- Carrere (2010) geriausius savo rezultatus gavo skaidant dumblą 30-60 MPa slėgiu. Bandymų metu pastebėtas 18 % padidėjęs biudujų išsiskyrimas, 28 % ir 87 % padidėjęs bepelenių medžiagų suskaidymas bei 60% padidėjęs metano išsiskyrimas.

1.4.5. Aukšta įtampa

Aukštos įtampos dumblo skaidymas yra elektrinė sistema ir veikia pagal elektrokinetinius principus, kai vamzdynų sistemoje, pro kurią yra leidžiamas dumblas, keletu aukštos įtampos generatorių yra sugeneruojami elektros laukai. Elektrokinetinis suskaidymas yra vienas iš aukštos įtampos suskaidymo metodų. Sistemos veikimo principas yra išskirtinai paprastas. Dumblas patenka į vamzdžių sistemą, kurioje įmontuoti elektrodai, generuojantys elektrinį lauką. Elektrodai gali būti įtaisyti vamzdyje (12 pav.), kuriuo teka dumblas ir nustatytais laiko tarpais gauna elektros iškrovą arba elektrodai gali būti įrengti specialiuose rezervuaruose, į kuriuos dumblas suteka prieš pūdymą. Pirmuoju atveju dumblo skaidymo procesas vyksta tolygiau, nes dumblas labiau susimaišo, o dumblo skaidymas talpoje yra netolygesnis, nes daugiausiai mikroorganizmų yra suskaidoma aplink elektrodus, o toliau esančių dumblo sluoksnių elektros srovės nepasiekia. Elektriniame lauke

deformuojasi ląstelių sienelės ir sukelia jų nuoseklų prakiurimą, todėl jų turinys lengvai prieinamas bakterijoms. Kibirkštis įvyksta tarp elektrodo paviršiaus ir vamzdžio, kuris yra antrasis polius ir uždaro grandinę (Krzemieniewski, 2016).



12 pav. Pulsuojančios elektros srovės dezintegratorius, sudarytas iš elektrodo (1) ir jo korpuso (2), vamzdžio formos korpusu (3) ir maitinimo šaltiniu (4). Sritis tarp elektrodo ir vamzdžio korpuso, kurioje vyksta dezintegracija (5) (Zhena et al., 2017)

Įtampa gali svyruoti nuo 10 iki 100 kV. Elektrodais teka įprasta elektros srovė (230 V, 50 Hz). Be to, elektros srovė keičia į 24 V nuolatinę srovę moduluose, naudojamuose tam tikriems elektrodams. Diegimas yra visiškai saugus, nes sukurtos srovės vertė neviršija 250 mA, be to, laidai yra įžeminti. Maža elektros srovė reiškia mažą energijos suvartojimą. Šiam skaidymo metodui reikia labai mažo, tik 35 W elektrodo, o tai reiškia ir labai mažus elektros energijos suvartojimus. Siūlomi S ir U tipo vamzdžiai leidžia labai patogiai sumontuoti sistemą ir prisitaikyti prie jau esamų patalpoje konstrukcijų. Vamzdžių sistema gali būti montuojama horizontaliai, vertikaliai, pakreiptai, ant specialių laikiklių arba tiesiai ant patalpos sienos. Vamzdžių ir elektrodų skaičius nustatomas pagal eksploataavimo sąlygas, taip pat dumblo kiekį, biomasės tipą, sausos medžiagos kiekį, suskaidymo metodą, montavimo vietą ir pan.

Dumblo suskaidymo laipsnis priklauso elektros iškrovos laiko, dumblo laidumo, elektrodų dydžio ir artumo tarp jų, reaktoriaus specifikacijos ir ypač nuo elektrinės energijos dydžio. Mokslininkai įrodė, kad 50 % sunaudotos energijos virsta naudingomis elektrinėmis bangomis skaidančiomis mikroorganizmų ląsteles (Lee, 2007). Kaip ir kitos dumblo skaidymo technologijos, taip ir ši, stipriai veikia dumblo skaidymo rezultatus: didėja biodujų išsiskyrimas, suskaidoma daugiau sausųjų medžiagų ir sumažėja dumblo kiekis.

Kopplow (2004) pasiekė 20 % didesnę dumblo suskaidymą naudodamas 8000 kJ/kg sausų medžiagų, išsiskiriančių biodujų kiekis padidėjo 20 %. Visgi pagrindiniais šio metodo trūkumais išlieka mažas atliktų tyrimų skaičius, elektrodų erozija bei dideli energijos eikvojimai (Tyagi ir Lo,

2011). Viena pagrindinių pasaulyje įmonių, tiekianti aukštos įtampos skaidymo įrangą *SÜD-CHEMIE*, įrengė skaidymo įrangą Vokietijoje esančiame mieste Bruckmühl. Su aukštos įtampos įranga biodujų kiekis padidėjo 20%, sumažėjo 10% reikiamo flokulianto kiekis ir taip pat 10% sumažėjo dumblo kiekis. Pagal tai, kiek kainuoja įranga, kiek sutapoma per metus elektros energijos, šilumos energijos, polimerų ir dumblo, valyklos priežiūrai, buvo nustatyta, jog įranga atsiperka per 2 metus ir 5 mėnesius.

1.4.6. Dumblo skaidymo metodų palyginimas

Dumblo skaidymo metodus galima palyginti atsižvelgiant į šiuos aspektus:

1. Skaidymo efektyvumas – suskaidytų ląstelių kiekis (išlaisvintos organinės medžiagos kiekis).
2. Skaidymo metodo energetiniai ir kainos aspektai.
3. Pagamintas specifinis biodujų kiekis.

Skaidymo technologijų palyginimas atliekamas nagrinėjant mokslininkų straipsnių medžiagą, kurioje yra informacijos apie skirtingų skaidymo metodų įtaką dumblo pūdymui.

Mokslininkai ir įrangos gamintojai teigia, jog, taikant dumblo skaidymo metodus, suskaidomų organinių medžiagų kiekis padidėja 20–30 %, dumblo kiekis sumažinamas 50-60 %, biodujų išsiskyrimas padidėja 20–60 %, dumblo stabilizavimui gali būti naudojami mažesni pūdytuvai (hidrolizės procesas, kuris užima didžiausią dumblo pūdymo laiką, yra paspartinamas dumblo skaidymo metu). Mokslininkė Carrere (2010) yra pateikusi skaidymo energetinius ir kainos parametrus (11 lentelė). Kaip matyti iš 11 ir 12 lentelių rezultatų, skirtingomis sąlygomis taikomi tie patys skaidymo metodai duoda skirtingus rezultatus po dumblo pūdymo.

11 lentelė. Skaidymo metodų pagal: 1. Bouger ir kt. (2006), 2. Kim ir kt. (2003), 3. Bajenbruch, Koppolow (2003), 4. Salsabil ir kt.(2010) palyginimas

Eil. Nr.	Dumblo savybės prieš skaidymą	Skaidymo metodas	Skaidymo sąlygos	Pūdymo sąlygos	Rezultatai		
					Biodujų susidarymas (CH ₄ , %)	mlCH ₄ /gChDS	Biologinis skaidomumas (%)
1.	20 g SM/l 76 % BSM	Bandinys be skaidymo	-	Pūdomas dumblas skiedžiamas	1 (75 %)	221	63
		Terminė hidrolizė	170 °C, 60 min	iki 4 g BSM/l;	1,59 (71 %)	333	95

Eil. Nr.	Dumblo savybės prieš skaidymą	Skaidymo metodas	Skaidymo sąlygos	Pūdymo sąlygos	Rezultatai		
					Biodujų susidarymas (CH ₄ , %)	mlCH ₄ /gChDS	Biologinis skaidomumas (%)
		Ultragarsas	6250 kJ/kg SM, 20 kHz	SRT=24 d., t = 35 °C	1,51 (71 %)	325	93
9350 kJ/kg SM, 20 kHz	1,53 (74 %)	334	95				
Pastaba: bandymas laboratorinis, bandinys be skaidymo buvo išlaikomas 24 dienas, su terminiu skaidymu – 3 dienas, su ultragarso skaidymu – 6 dienas, kad būtų pasiektas 300 ml biodujų/ gChDS rezultatui.							
2.	38,0 g SM/l 26,0 g BSM/l	Bandinys be skaidymo	-	SRT= 7 d., t = 37 °C	ChDS koncentracijos padidėjimas po skaidymo (%)	Org. Medžiagų suskaidymas (%)	Biodujų susidarymas, l/m ³
					0	20,5	3657
		Terminė hidrolizė	121 °C, 30 min, 1,5 atm		17,6	32,1	4843
		Ultragarsas	42 kHz, 120 min		18,4	38,6	4413
Pastaba: bandymas laboratorinis, atliekamas laboratoriniais prietaisais.							
3.	40-50 g BSM/l	Terminė hidrolizė	80 °C	HRT= 20 d., t = 37 °C	Biodujų susidarymas, (%)		Org. Medžiagų suskaidymas (%)
					16,5		
		Terminė hidrolizė	90 °C		21,0		4,9
		Terminė hidrolizė	121 °C		20,0		6,0
		Aukštas slėgis	600 bar		17,5		6,5
Pastaba: bandymas laboratorinis, atliekamas laboratoriniais prietaisais.							
4.	14,26 g SM/l 72,82 % BSM nuo SM	Bandinys be skaidymo	-	SRT= 50 d., t = 37 °C	Sausų medžiagų suskaidymas, (%)	Energija kWh/1 kg SM pašalinimui	E _{SKAIDYMU} /E _{VISO} , (%)
					72,0	4655	-

Eil. Nr.	Dumblo savybės prieš skaidymą	Skaidymo metodas	Skaidymo sąlygos	Pūdymo sąlygos	Rezultatai		
					Biodujų susidarymas (CH ₄ , %)	mlCH ₄ /gChDS	Biologinis skaidomumas (%)
					76,9	3381	2,0
		Terminė hidrolizė	121 °C, 1 bar, 15 min, 665024 kJ/kg SM				
		Ultragarsas	20000 kJ/kg SM, 20 kHz		86,0	2601	0,1
<i>Pastaba:</i> bandymas laboratorinis, atliekamas laboratoriniais prietaisais. Toks pat sausų medžiagų suskaidymo laipsnis taikant skaidymo metodus gali būti pasiektas po 20 dienų, kai tuo tarpu netaikant skaidymo metodų – po 50 dienų.							

12 lentelė. Skaidymo metodų energetinis palyginimas (Carrere, 2010)

Eil. Nr.	Skaidymo metodas	Skaidymo sąlygos	Dumblo konc. %	SM sumažėjimas, %	El. energijos suvartojimas (kWh/kgSM)	Šil. Energijos suvartojimas (kWh/kgSM)	Biodujų produkcija (kWh/kgSM)
1	Terminė hidrolizė	170 °C, 15-30 min.	9	60	0,04	2,0	2,9
2	Ultragarsas	100 W, 16 s, 30 kW/m ³	6	50	0,37	0,5	2,4
3	Aukštas slėgis	200 bar	6	50	0,33	1,0	2,6

Didžiausi energetiniai resursai reikalingi dumblo skaidymui termohidrolizei, kada pasiekama efektyviausia skaidymo temperatūra (apie 170–180 °C), tačiau taikant tokias temperatūras pasiekiami geriausi pūdymo rezultatai, t.y. didžiausias organinių medžiagų suskaidymas (iki 60 %) ir biodujų susidarymo kiekis (2,9 kWh/kg SM). Lyginant 121 °C termohidrolizę su 20–42 kHz ultragarsiniu skaidymu, efektyvesni pūdymo rezultatai pasiekiami taikant ultragarsinį skaidymą. Bendroju atveju visi tyrimai rodo, kad taikant bet kurį skaidymo metodą pasiekiami geresni pūdymo rezultatai, negu taikant pūdymą be dumblo skaidymo.

1.5. Literatūros apžvalgos apibendrinimas

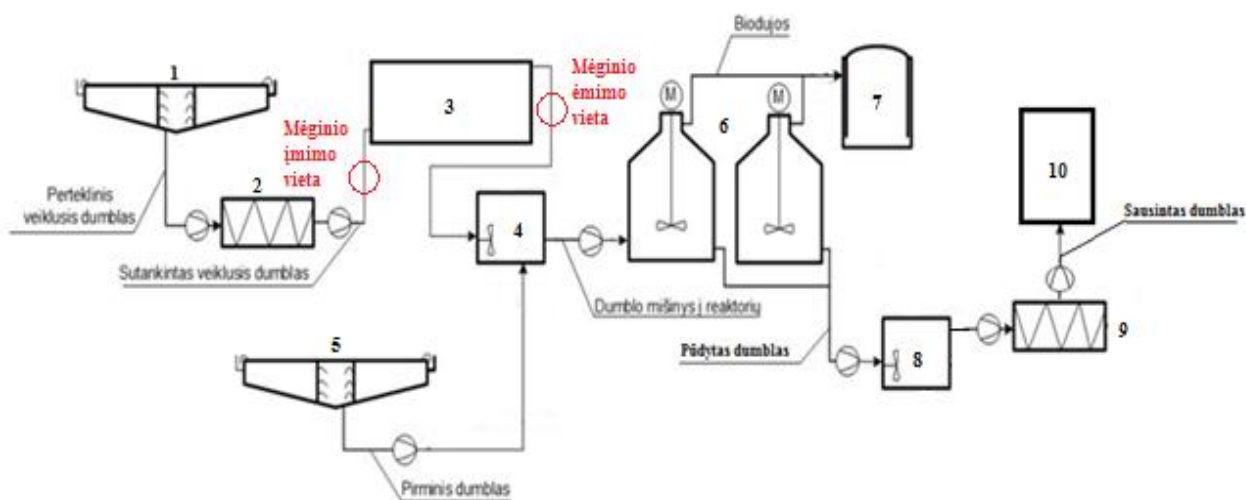
- Dumblo utilizavimas – aktuali ir ypatingai svarbi problema visame pasaulyje, nes kiekvieną dieną pasaulyje susidaro milijonai kubinių metrų dumblo ir šis skaičius nėra mažėjantis. Dėl šios priežasties yra ieškoma būdu kaip būtų galima mažinti dumblo kiekį ir optimizuoti dumblo tvarkymo kaštus.
- Pasaulyje yra išplitęs dumblo stabilizavimo metodas – anaerobinis dumblo pūdymas, kurio metu dumble esančios organinės medžiagos dalyvaujant fermentams yra suskaidomos anaerobinių mikroorganizmų, o skaidymo proceso metu, kaip šalutinis produktas išsiskiria biudujos, kuriose metano kiekis svyruoja tarp 60–70 %. Biudujos yra perspektyvi atsinaujinančios energetikos rūšis, mažinanti šiltnamo efektą. Taip pat sumažinamas dumblo kiekis iki 40% sausų medžiagų, išsprendžiama blogo kvapo problema.
- Žemas perteklinio veikliojo dumblo skaidymo efektyvumas (30–40 %) ir ilga dumblo pūdymo trukmė (20–30 dienų) yra didžiausi anaerobinio stabilizavimo proceso trūkumai. Pertekliniame dumble gausu organinių medžiagų, tačiau jos yra mikroorganizmų ląstelėse, todėl pūdymo procesą vykdančios mikroorganizmai jų negali pasisavinti. Dėl šios priežasties dumblas yra skaidomas prieš anaerobinį dumblo stabilizavimą.
- Efektyviausiai ir plačiausiai taikomos technologijos pasaulyje yra dumblo skaidymas ultragarsu ir aukšta įtampa dėl efektyvaus SM pašalinimo, BSM suskaidymo, specifinio biudujų susidarymo ir pigesnių eksploatacinių ir investicinių kaštų. Šios technologijos yra ekologiškai saugios, nesukeliančios aplinkai kenksmingų papildomų atliekų, į orą neišleidžiančios kenksmingų dalelių, todėl pastarųjų dešimtmečių dumblo kiekio mažinimas ir jo gerinimas taikant šiuos skaidymo metodus nuolat didėjo. Taikant šiuos dumblo skaidymo metodus suskaidomų organinių medžiagų kiekis padidėja 20–30 %, sumažinamas dumblo kiekis, biudujų išsiskyrimas padidėja 20–60 %, reikalingi mažesni pūdytuvai, nes hidrolizės procesas, kuris užima didžiausią dumblo pūdymo laiką, yra paspartinamas dumblo skaidymo metu.
- Apžvelgus literatūrą nustatyta, kad dumblo skaidymas plačiau pradėtas taikyti per pastaruosius 10 metų. Taikomi metodai nėra kompleksiškai ištirti, tyrimais gautų rezultatų ribos plačios, nėra įvertintas skaidymo įrangos techninis-ekonominis naudingumas. Dėl šių priežasčių toliau darbe tiriamas plačiausiai naudojamų metodų poveikis anaerobinio stabilizavimo procesui bei vertinamas techninis-ekonominis naudingumas.

2. TYRIMO METODIKA

2.1. Tyrimo objektas ir vieta

Tam, kad įvertinti dumblo kiekio sumažinimo, biodujų padidrinimo bei eksploatacijos kaštų optimizavimo galimybes taikant dumblo pūdymo procesą drauge su dumblo skaidymo metodais, tyrimams naudotas Kauno ir Šiaulių nuotekų valyklų tirštintas neskaidytas bei skaidytas perteklinis veiklusis dumblas. Abiejose valylose taikoma analogiška dumblo tvarkymo technologija, todėl toliau pateiktas bendras jos aprašymas.

Valant nuotekas biologiniu būdu susidaro perteklinis veiklusis dumblas. Prieš tiekiant jį į pūdymą, perteklinis dumblas sutankinamas, t. y. padidinama jo koncentracija ir sumažinamas tūris. Dumblo sutankinimui naudojami tankintuvai (13 pav., 2). Pūdymo proceso efektyvumui pagerinti taikoma perteklinio veikliojo dumblo skaidymo įranga (13 pav., 3). Pirminiuose nusodintuvuose susidaręs pirminis dumblas ir sutankintas perteklinis dumblas siurbliais tiekiamas į dumblo buferinį rezervuarą (13 pav., 4). Iš šio rezervuaro dumblas tiekiamas į pūdytuvus, kur vyksta anaerobinis pūdymo procesas. Po pūdymo proceso dumblas yra sausinimas, o vėliau ir džiovinamas (13 pav., 6, 9, 10).



13 pav. Kauno ir Šiaulių nuotekų valyklos dumblo apdorojimo technologinė schema (sudaryta autoriaus): 1 – antrinis nusodintuvas, 2 – tankinimo įrenginys, 3 – skaidymo įrenginys, 4 – pirminio ir perteklinio dumblo talpa, 5 – pirminis nusodintuvas, 6 – pūdytuvas, 7 – biodujų talpa, 8 – pūdyto dumblo talpa, 9 – sausinimo įrenginys, 10 – džiovinimo įrenginys

Kauno nuotekų valykloje pertekliniam veikliajam dumblui skaidyti taikoma dumblo skaidymo ultragarsu įranga, kuri sumontuota perteklinio dumblo linijoje už dumblo tirštintuvų ir susideda iš buferinės talpos, dumblo tiekimo į skaidymo įrenginį siurblio, skaidyto dumblo šalinimo siurblio bei 14 ultragarsinių dumblo skaidymo reaktorių. Įrenginio našumas – 7,5 m³/h. Įrenginys dirba visą laiką kol dirba perteklinio veikliojo dumblo tankinimo įranga. Įrangos montavimo vieta Kauno nuotekų valykloje pavaizduota 14 paveiksle, o principinė montavimo schema – 16 paveiksle.



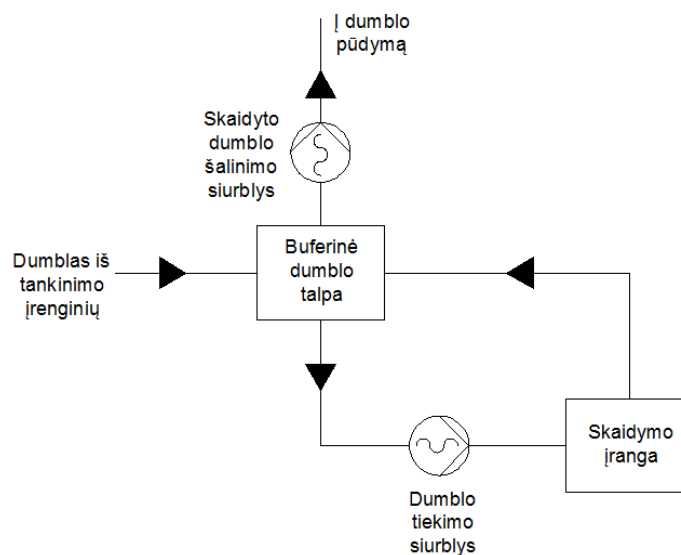
14 pav. Dumblo skaidymo technologija Kauno nuotekų valykloje (nuotrauka iš asmeninio archyvo)

Šiaulių nuotekų valykloje pertekliniam veikliajam dumblui skaidyti taikoma **dumblo skaidymo aukšta įtampa įranga**, kuri sumontuota taip pat perteklinio dumblo linijoje už dumblo tirštintuvų ir susideda iš buferinės talpos, dumblo tiekimo į skaidymo įrenginį siurblio, skaidyto dumblo šalinimo siurblio bei 6 aukštos įtamos elektrodo. Įrenginio našumas – 5 m³/h. Įrenginys dirba visą laiką kol dirba perteklinio veikliojo dumblo tankinimo įranga. Įrangos montavimo vieta Šiaulių nuotekų valykloje pavaizduota 15 paveiksle, o principinė montavimo schema – 16 paveiksle.



15 pav. Dumblo skaidymo technologija Šiaulių nuotekų valykloje (nuotrauka iš asmeninio archyvo)

16 paveiksle pavaizduota principinė skaidymo įrangos montavimo Kauno ir Šiaulių nuotekų valyklose schema.



16 pav. Principinė skaidymo įrangos montavimo schema Kauno ir Šiaulių nuotekų valykloje (sudaryta autoriaus)

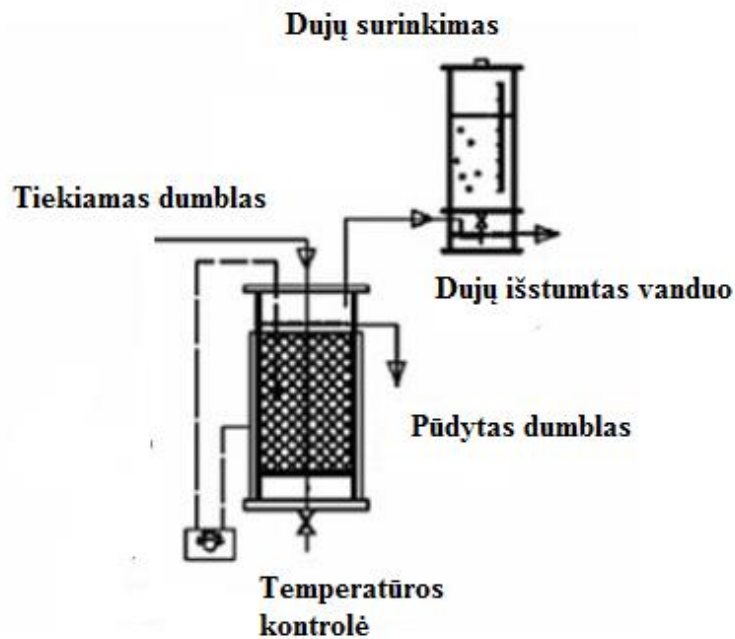
2.2. Laboratoriniai tyrimai

Tyrimai atlikti VGTU Vandentvarkos laboratorijoje. Tyrimai vyko 2018 m. liepos – 2019 m. vasario mėnesiais. Tyrimui atlikti naudotas anaerobinio pūdymo modelis "W8 Armfield Ltd" (Didžioji Britanija) (17 pav.).



17 pav. W8 Armfield Ltd modelis (nuotrauka iš asmeninio archyvo)

Šis modelis sukomplektuotas iš dviejų lygiagrečiai taikytų anaerobinių reaktorių. Kiekvieno anaerobinio reaktoriaus darbinis tūris – 4,8 l. Reaktoriai yra apšildinti kilimėliais su elektrinėmis plokštelėmis, kurios užsideda aplink kiekvieną iš reaktorių. Reaktoriuose įrengtos mechaninės maišyklės, kad dumblas laikytųsi skendinčioje būklėje, o dujų surinkimo induose – dujų paėmimo bei vandens pripildymo sklendės. Maišyklės pūdymo metu sukosi iki 100 apsisukimų per minutę. Dujos, gautos pūdymo metu, kiekvieną dieną kaupotos 3300 ml kalibruotuose induose, o iš jų surenkamos į dujų maišus, kad būtų ištirtas metano kiekis biodujose. Tyrime naudoti abu reaktoriai ir jie dirbo kaip vienalaipsniai anaerobiniai reaktoriai. Dauguma anaerobinių reaktorių nuotekų valymo įrenginiuose dirba su hidrauline išbuvimu trukme nuo 15 iki 30 dienų mezofilinės temperatūros sąlygomis (Alepu et al., 2016). Dėl šios priežasties dumblas pūdytas 20 parų palaikant 37 °C temperatūrą. Bandymo stendo principinė schema pateikta 18 paveiksle.



18 pav. Bandymo stendo principinė schema (sudaryta autoriaus)

Tirtas dumblas maišytas su pūdytu dumblo kaip pasėliu, santykiu 10:1 pagal bepelenes sausas medžiagas tam, kad pūdymo procesas prasidėtų iš karto. Pasėlio kiekis apskaičiuotas pagal (1) formulę:

$$V_P = \frac{BSM_T \cdot 4}{10 \cdot BSM_P + BSM_T}, l \quad (1)$$

Čia: BSM_T – dumblo prieš pūdymą bepelenių sausų medžiagų koncentracija, g BSM/l; BSM_P – pūdyto dumblo bepelenių sausų medžiagų koncentracija, g BSM/l; 4 – reaktoriaus tūris, l; 10 – santykis tarp dumblo BSM prieš pūdymą ir po jo.

Tyrimas taikant dumblo skaidymo ultragarsu įrangą susideda iš 3 etapų, kurių kiekvieno trukmė – 20 parų:

- Pirmu etapu viename reaktoriuje pūdytas neskaidytas dumblas, o kitame – 5-iuose ultragarso reaktoriuose skaidytas dumblas.
- Antru etapu viename reaktoriuje pūdytas neskaidytas dumblas, o kitame – 9-iuose ultragarso reaktoriuose skaidytas dumblas.

- Trečiu etapu viename reaktoriuje pūdytas neskaidytas dumblas, o kitame – 14-oje ultragarso reaktorių skaidytas dumblas.

Tyrimas taikant dumblo skaidymo aukšta įtampa įrangą susideda iš 3 etapų, kurių kiekvieno trukmė – 20 parų:

- Pirmu etapu viename reaktoriuje pūdytas neskaidytas dumblas, o kitame – 2-iam aukštos įtampos elektrodais skaidytas dumblas.
- Antru etapu viename reaktoriuje pūdytas neskaidytas dumblas, o kitame – 4-iais aukštos įtampos elektrodais skaidytas dumblas.
- Trečiu etapu viename reaktoriuje pūdytas neskaidytas dumblas, o kitame – 6-iais aukštos įtampos elektrodais skaidytas dumblas.

Skirtingas ultragarso ir aukštos įtampos įrangos elementų skaičius pasirinktas siekiant nustatyti kokių atveju pasiekiamas efektyviausias SM pašalinimas, BSM suskaidymas ir specifinis biodujų susidarymas.

Kiekvieno etapo metu nustatytos neskaidyto dumblo ir skaidyto dumblo prieš pūdymą ir po jo rodiklių reikšmės: sausos medžiagos dumble (SM), bepelenės sausos medžiagos dumble (BSM), cheminis deguonies suvartojimas (ChDS) dumblo vandenyje. Rodiklių reikšmės tirtos po 3 kartus dėl rezultatų tikslumo. Kas parą fiksuotas susidariusių dujų kiekis tiek pūdant neskaidytą, tiek skaidytą dumblą, o metano dujų koncentracija tirta, kai susidarydavo 1,5 l biodujų. Taip pat atlikta skaidyto ir neskaidyto dumblo elektroninė mikroskopija. Gauti rezultatai surašomi į (13) ir (14) lenteles.

13 lentelė. Apdoroti tyrimų rezultatai (vidutinė reikšmė ir standartinis nuokrypis) prieš pūdymą ir po jo, kai tirtas ultragarsu ir aukšta įtampa neskaidytas ir skaidytas dumblas (sudaryta autoriaus)

Parametras	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Skirtumas, %	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Skirtumas, %	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Skirtumas, %
	I etapas			II etapas			III etapas		
Neskaidytas/skaidytas dumblas									
Dumblas									
Sausų medžiagų koncentracija, g SM/l									
Bepelenių sausų medžiagų koncentracija, g BSM/l									
Bepelenių sausų medžiagų koncentracija, % SM atžvilgiu									
Dumblo vanduo									
Cheminis deguonies suvartojimas, mgO ₂ /l									

14 lentelė. Apdoroti biodujų tyrimų rezultatai (vidutinė reikšmė ir standartinis nuokrypis) po pūdymo, kai tirtas ultragarsu ir aukšta įtampa neskaidytas ir skaidytas dumblas (sudaryta autoriaus)

	Neskaidytas	Skaidytas	Skirtumas, %	Neskaidytas	Skaidytas	Skirtumas, %	Neskaidytas	Skaidytas	Skirtumas, %
	I			II			III		
Biodujos per 20 parų, ml									
Metano kiekis biodujose, %									

2.2.1. Rodiklių reikšmių nustatymo metodikos

Mėginio paėmimas

Mėginiai tyrimams imami vadovaujantis Lietuvos standartu LST EN ISO 5667 – 13 „Vandens kokybė. Mėginių ėmimas. 13 dalis. Nurodymai kaip imti dumblo mėginius (ISO 5667 – 1:2006)“ ir „Vandens kokybė. Mėginių ėmimas – 3 dalis: Nurodymai, kaip konservuoti ir tvarkyti vandens mėginius (ISO 5667 – 3:2003).

Perteklinio dumblo sausų medžiagų koncentracijos ir bepelenių sausų medžiagų koncentracijos nustatymas

Sausų medžiagų ir bepelenių sausų medžiagų koncentracija nustatyta remiantis Lietuvos standartu LST EN 15934:2012. „Dumblo apibūdinimas. Sausos masės nuostolių išskaitinant nustatymas”.

Sausųjų medžiagų koncentracija SM gramais litre apskaičiuota pagal (2) formulę (LST EN 15934:2012):

$$SM = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 1000}{V_b}, g/l \quad (2)$$

Čia: SM – bendroji sausų medžiagų koncentracija, g/l; m_1 – lėkštelės masė, g; m_2 – lėkštelės su mėginiu masė po džiovinimo, g; V_b – mėginio tūris, ml.

Pirminio dumblo bepelenių medžiagų koncentracija BSM gramais litre apskaičiuota pagal (3) formulę (LST EN 12880:2002):

$$BSM = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 1000}{V_b}, g/l \quad (3)$$

Čia: SM – bepelenių medžiagų koncentracija, g/l; m_1 – mėginio su lėkšte masė po deginimo, g; m_2 – mėginio su lėkšte masė po džiovinimo, g; V_b – mėginio tūris, ml.

Cheminio deguonies suvartojimo koncentracijos nustatymas

Cheminio deguonies suvartojimo koncentracija nustatoma pagal Lietuvos standartą LAND 83–2006 „Vandens kokybė. Cheminio deguonies suvartojimo nustatymas“ (LAND 83–2006). Tiriamas mėginys yra kaitinamas nustatytą laiką kondensatorinėje aparatūroje su žinomu kalio bichromato kiekiu sieros rūgšties tirpale. Kaitinimo metu oksiduojanti medžiaga sunaudoja dalį bichromato. Bichromato perteklius nutitruojamas, vertė apskaičiuota pagal sunaudotą bichromato kiekį.

Cheminio deguonies suvartojimas apskaičiuotas pagal (4) formulę:

$$ChDS = \frac{8000 \cdot c \cdot (V_1 - V_2)}{V_0}, mg/l; \quad (4)$$

Čia: c – amonio-geležies (II) sulfato koncentracija (moliais litre).

V_0 – mėginio tiriamosios dalos tūris prieš skiedimą (jei mėginys skiestas) (mililitrais).

V_1 – amonio-geležies (II) sulfato tūris, sunaudotas tuščiojo mėginio titravimui (mililitrais).

V_2 – amonio-geležies (II) sulfato tūris, sunaudotas mėginio tiriamosios dalos titravimui (mililitrais).

8000 – $1/2 O_2$ molinė masė (miligramais litre).

Metano koncentracijos nustatymas biodujose

Metano koncentracija biodujose matuota įrenginiu INCA 4000 T100. Įrenginyje yra integruotas dujų proceso vėsinimas. Kondensate yra matuojami šie komponentai: metanas (CH_4 , %), anglies dioksidas (CO_2 , %), deguonis (O_2 , %) ir sieros vandenilis (H_2S , ppm). Įrenginio matavimo tikslumas ± 1 %, o matavimo ribos 0–100 %.

Efektyvumo, specifinio kiekio ir padidėjimo apskaičiavimas

SM pašalinimo, BSM suskaidymo ir ChDS efektyvumas nustatytas pagal (5) formulę:

$$E_x = \frac{X_{prieš} - X_{po}}{X_{prieš}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Čia $X_{prieš}$ – analizuojamos reikšmės kiekis skaidytame ir neskaidytame dumble prieš pūdymo procesą; X_{po} – analizuojamos reikšmės kiekis skaidytame ir neskaidytame dumble po pūdymo proceso.

Biodujų susidarymo, specifinio biodujų susidarymo ir metano koncentracijos efektyvumas nustatomas pagal (6) formulę:

$$E_x = \frac{X_{nesk.} - X_{sk.}}{X_{nesk.}} \cdot 100\% \quad (6)$$

Čia $X_{nesk.}$ – analizuojama reikšmė iš neskaidyto dumblo po pūdymo; $X_{sk.}$ – analizuojama reikšmė iš skaidyto dumblo po pūdymo.

Specifinis biodujų susidarymas apskaičiuotas pagal (7) formulę:

$$D = \frac{Q_{dujų}}{BSM_{susk}}, l/g \text{ BSM suskaidyto} \quad (7)$$

Čia $Q_{dujų}$ – pagamintų biodujų kiekis, l/d; BSM_{susk} – pūdymo metu suskaidytas bepelenių sausų medžiagų kiekis, g BSM/d.

Specifinis biodujų susidarymo padidėjimas apskaičiuotas pagal (8) formulę:

$$D = \left(\frac{D_{sk.}}{D_{nesk.}} - 1 \right) \cdot 100, \% \quad (8)$$

Čia $D_{sk.}$ – specifinis biodujų susidarymas skaidytame dumble, l/g BSM suskaidyto; $D_{nesk.}$ – specifinis biodujų susidarymas neskaidytame dumble, l/g BSM suskaidyto.

Specifinis SM pašalinimas apskaičiuotas pagal (9) formulę:

$$SM = \frac{SM_{paš.}}{SM_{pr.}}, g \text{ SM pašalinto/g SM pradinio} \quad (9)$$

Čia $SM_{paš.}$ – pašalintas SM kiekis po pūdymo proceso, g SM; $SM_{pr.}$ – SM kiekis prieš dumblo pūdymą, g SM.

Specifinis SM pašalinimo padidėjimas apskaičiuotas pagal (10) formulę:

$$SM = \left(\frac{SM_{sk.}}{SM_{nesk.}} - 1 \right) \cdot 100, \% \quad (10)$$

Čia $SM_{sk.}$ – specifinis SM pašalinimas skaidytame dumble, g SM pašalinto/g SM pradinio; $SM_{nesk.}$ – specifinis SM pašalinimas neskaitytame dumble, g SM pašalinto/g SM pradinio.

Specifinis BSM suskaidymas apskaičiuotas pagal (11) formulę:

$$BSM = \frac{BSM_{paš.}}{BSM_{pr.}}, g \text{ SM pašalinto/g SM pradinio} \quad (11)$$

Čia $BSM_{paš.}$ – suskaidytas BSM kiekis po pūdymo proceso, g BSM; $BSM_{pr.}$ – BSM kiekis prieš dumblo pūdymą, g BSM.

Specifinis BSM suskaidymo padidėjimas apskaičiuotas pagal (12) formulę:

$$BSM = \left(\frac{BSM_{sk.}}{BSM_{nesk.}} - 1 \right) \cdot 100, \% \quad (12)$$

Čia $BSM_{sk.}$ – specifinis BSM suskaidymas skaidytame dumble, g BSM suskaidyto/g BSM pradinio; $BSM_{nesk.}$ – specifinis BSM suskaidymas neskaitytame dumble, g BSM suskaidyto/g BSM pradinio.

Specifiniam SM pašalinimui, BSM suskaidymui ir biodujų susidarymui nustatyti sudaryta 15 lentelė.

15 lentelė. Apskaičiuotos specifinio SM pašalinimo, BSM suskaidymo ir biodujų susidarymo reikšmės prieš ir po pūdymo proceso, kai dumblas neskaitytas ir skaidytas ultragarsu bei aukšta įtampa (sudaryta autoriaus)

Neskaitytas/skaitytas						
	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Prieš pūdymą	Po pūdymo
	I etapas		II etapas		III etapas	
SM kiekis pertekliniame dumble, g SM						
SM kiekio pašalinimas, g SM						
Specifinis SM pašalinimas, g SM sumažėjusio/g SM pradinio						
BSM kiekis pertekliniame dumble, g BSM						
BSM suskaidytas, g BSM						
Specifinis BSM suskaidymas, g BSM suskaidyto/g BSM pradinio						
Biodujos, ml						
Specifinis biodujų kiekis, l/g BSM suskaidyto						

2.3. Natūriniai tyrimai

2.3.1. Statistinis duomenų apdorojimas ir duomenų palyginimas

Iš Kauno nuotekų valyklos surenkami 2016-2017 m. duomenys apie nuotekų ir dumblo kiekius, jų sudėties rodiklius. 2016 metais skaidymo ultragarsu įrenginys neveikė, o 2017 metais minėtas įrenginys veikė.

Iš nuotekų valyklos surinkti ir statistiškai apdoroti tokie duomenys:

1. Pirminio dumblo kiekis pagal tūrį (m^3/d), SM koncentracija ($\text{kg SM}/\text{m}^3$), BSM koncentracija ($\text{kg BSM}/\text{m}^3$), BSM kiekis SM atžvilgiu (%).
2. Perteklinio dumblo kiekis pagal tūrį (m^3/d), SM koncentracija ($\text{kg SM}/\text{m}^3$), BSM koncentracija ($\text{kg BSM}/\text{m}^3$), BSM kiekis SM atžvilgiu (%).
3. Pirminio ir perteklinio dumblo mišinio kiekis pagal tūrį (m^3/d), SM koncentracija ($\text{kg SM}/\text{m}^3$), BSM koncentracija ($\text{kg BSM}/\text{m}^3$), BSM kiekis SM atžvilgiu (%).
4. Pūdyto dumblo kiekis pagal tūrį (m^3/d), SM koncentracija ($\text{kg SM}/\text{m}^3$), BSM koncentracija ($\text{kg BSM}/\text{m}^3$), BSM kiekis SM atžvilgiu (%).

5. Sausinto dumblo kiekis pagal tūrį (m^3/d), SM koncentracija ($\text{kg SM}/\text{m}^3$), BSM koncentracija ($\text{kg BSM}/\text{m}^3$), BSM kiekis SM atžvilgiu (%).
6. Biodujų kiekis (m^3/d).
7. Aktyviosios medžiagos kiekis sausinimui ($\text{kg}/\text{t SM}$).

Duomenys apdorojami statistiškai. Duomenų vertės yra atsitiktiniai dydžiai, todėl duomenų vertės naudojamos laikantis atitinkamų reikalavimų:

- Rodiklio negali apibūdinti viena kuri jo reikšmė.
- Pagrindiniais rodiklio parametrais laikytini reikšmių aritmetinis vidurkis ir imties standartinis nuokrypis.
- Aritmetinis vidurkis taip pat yra atsitiktinis dydis, todėl turi būti nurodomos jo pasiklivimo ribos.
- Patikimais laikytini dydžiai, kurių tikimybė yra intervale nuo 2,5 % iki 97,5 %.
- Nepatikimų reikšmių turi būti nepaisoma.

Kurio nors rodiklio x reikšmių (x_i) aritmetinis vidurkis apskaičiuotas pagal (13) formulę:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (13)$$

Čia: x_i – i -tojo rodiklio reikšmė; n – rodiklio analizių skaičius.

Rodiklio imties standartinis nuokrypis apskaičiuotas pagal (14) formulę:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (14)$$

Čia: x_i – i -tojo rodiklio reikšmė; n – rodiklio analizių skaičius; $\bar{x}$ – imties vidurkis.

Pagal apskaičiuotus parametrus tikrinamas duomenų patikimumas. Pasirinkus 95 % patikimumo pasikliautinąjį intervalą, statistiškai patikimos reikšmės turi tenkinti (15) formulės sąlygą:

$$|x_i - \bar{x}| \leq 2s; \quad (15)$$

Čia: $\bar{x}$ – rodiklio reikšmių (x_i) aritmetinis vidurkis; x_i – i -tojo rodiklio reikšmė; s – rodiklio imties standartinis nuokrypis.

Šios sąlygos netenkinančios rodiklio reikšmės atmetamos, nes yra už 95 % patikimumo pasikliautinojo intervalo ribos. Atmetus nepatikimas reikšmes, rodiklio reikšmių aritmetinis vidurkis bei imties standartinis nuokrypis skaičiuojami iš naujo ir vėl tikrinama aukščiau nurodyta sąlyga. Tai kartojama, kol lieka tik šią sąlygą tenkinančios rodiklio reikšmės.

Skaičiuotinos teršalų koncentracijos skaičiuojamos pagal (16) formulę:

$$x_{sk} = \bar{x} + \frac{t_{95} \cdot s}{\sqrt{n}}; \quad (16)$$

Čia: t_{95} – Stjudento pasiskirstymo parametras, kurio dydis priklauso nuo pasikliautinojo intervalo tikimybės ir duomenų skaičiaus; s – vidutinis kvadratinis nuokrypis; n – pasirinktų reikšmių skaičius.

2.3.2. Dumblo rodiklių apskaičiavimas

Pagal statistiškai apdorotus natūrinius nuotekų valyklos duomenis apskaičiuoti dumblo parametrai, kurie tiesiogiai nefiksuoti ar neišmatuoti. Apskaičiuoti tokie parametrai:

1. Pirminio, perteklinio, pirminio ir perteklinio mišinio, pūdyto, sausinto dumblo kiekis pagal masę (kg SM/d).
2. Pirminio ir perteklinio mišinio, pūdyto dumblo organinių medžiagų kiekis pagal masę (kg BSM/d).
3. Dumblo išbuvimo trukmė pūdytuvuose (d).
4. Pūdytuvų faktinė apkrova (kg BSM/m³).
5. Suskaidytas organinių medžiagų kiekis (kg BSM/d).
6. Organinių medžiagų suskaidymas (%).
7. Sausų medžiagų kiekio pašalinimas (%).
8. Specifinis biodujų susidarymas, (m³/kg BSM).

Pirminio dumblo, perteklinio dumblo, pirminio ir perteklinio dumblo bei pūdyto dumblo kiekis pagal sausą masę apskaičiuotas pagal (17) formulę:

$$M_x = Q_x \cdot a_x, \text{ kg SM/d} \quad (17)$$

Čia: Q_x – skaičiuojamo dumblo kiekis pagal tūrį, m³/d; a_{zd} – skaičiuojamo dumblo koncentracija, kg SM/m³.

Pirminio dumblo, perteklinio dumblo, pirminio ir perteklinio dumblo bei pūdyto dumblo kiekis pagal bepelenę sausą masę apskaičiuotas pagal (18) formulę:

$$M_y = M_x \cdot (1 - s_x), \text{ kg BSM/d} \quad (18)$$

Čia: M_{tdm} – skaičiuojamo dumblo kiekis pagal masę, kg SM; s_x – skaičiuojamo dumblo peleningumas, vnt.

Hidraulinė išbuvimo trukmė pūdytuve apskaičiuota pagal (19) formulę:

$$t = \frac{V_p}{Q_{tdm}}, d \quad (19)$$

Čia: V_p – pūdytuvo tūris, m³; Q_{tdm} – pirminio ir perteklinio dumblo mišinio kiekis pagal tūrį, m³/d.

Pūdytuvo apkrova apskaičiuota pagal (20) formulę:

$$f = \frac{V_p}{M_{btdm}}, m^3/kg \text{ BSM} \quad (21)$$

Čia: V_p – pūdytuvo tūris, m³; M_{btdm} – pirminio ir perteklinio dumblo bepelenių sausų medžiagų kiekis pagal masę, kg BSM.

Pūdymo metu suskaitytų bepelenių sausų medžiagų kiekis apskaičiuotas pagal (22) formulę:

$$M_{BSM} = M_{btdm} - (Q_{tdm} \cdot a_{bpd}), \text{ kg BSM/d} \quad (22)$$

Čia: M_{btdm} – pūdyto dumblo bepelenių sausų medžiagų kiekis pagal masę, kg BSM/d; Q_{tdm} – pirminio ir perteklinio dumblo mišinio kiekis pagal tūrį, m³/d; a_{bpd} – pirminio ir perteklinio dumblo mišinio bepelenių sausų medžiagų koncentracija, kg SM/m³.

Bepelenių sausų medžiagų suskaidymas apskaičiuotas pagal (23) formulę:

$$BSM_{sk} = \frac{M_{BSM}}{M_{btdm}} \cdot 100, \% \quad (23)$$

Čia: M_{BSM} – pūdymo metu suskaidytų bepelenių sausų medžiagų kiekis, kgBSM; M_{btdm} – pūdyto dumblo bepelenių sausų medžiagų kiekis pagal masę, kg BSM.

2.3.3. Duomenų palyginimas

Norint palyginti skirtingų metų valyklos natūrinius duomenis, reikia įsitikinti, kad analizuoti duomenys yra analogiški pagal tokius rodiklius:

1. Pirminio ir perteklinio dumblo koncentracija bei tiekias kiekis į pūdymą.
2. Technologiniai parametrai, turintys įtakos pūdymo procesui (išbuvimo trukmė ir apkrova bepelenėmis sausomis medžiagomis).

Visi anksčiau aprašyti parametrai lyginti tarp atskirų valyklų su sąlyga, kad jų reikšmės neturi skirtis daugiau kaip 10 %. Pastaroji vertė pasirinkta atsižvelgiant į tai, kad gamybinėmis sąlygomis sudėtinga užtikrinti technologinių parametru pastovumą, vienodą dumblo mišinio proporcinę sudėtį, nes rezultata gali veikti nenumatyti tiekimo režimui įtakos turintys veiksniai, pvz., elektros energijos sutrikimai, įrangos gedimai, staigūs teršalų kiekio svyravimai. Jei parametru reikšmės tenkina nurodytą sąlygą, priimta prielaida, kad duomenys yra analogiški ir gali būti lyginami tarpusavyje.

2.4. Eksploatacijos ir investicijų kaštų įvertinimas

Metinis elektros suvartojimas apskaičiuotas pagal (24) formulę:

$$E = P_2 \cdot Q \cdot 8760, kWh/metus \quad (24)$$

Čia: P_2 – specifinis skaidymo įrenginio elektros suvartojimas 1 kg SM, kWh/kg SM; Q – į įrenginį tiekiamo dumblo kiekis, kg SM/h.

Metiniai elektros energijos kaštai apskaičiuojami pagal (25) formulę:

$$K = E \cdot 0,10, EUR/metus \quad (25)$$

Čia: E – metinis elektros energijos suvartojimas, kWh/metus, 0,1 – elektros kaina, EUR.

Kapitalizuotos eksploatacijos išlaidos apskaičiuojamos pagal (26) formulę:

$$KK = K \cdot 12, EUR \quad (26)$$

Čia: K – metiniai elektros energijos kaštai, EUR/metus; 12 – kapitalizacijos koeficientas.

Eksploatacijos ir investicijos kaštai apskaičiuojami pagal (27) formulę:

$$EI = KK + I, EUR \quad (27)$$

Čia: KK – kapitalizuotos eksploatacijos išlaidos, EUR; I – investiciniai kaštai, EUR.

3. TYRIMO ANALIZĖ IR REZULTATAI

3.1. Laboratorinio tyrimo rezultatai

Apdoroti tyrimų rezultatai prieš anaerobinį perteklinio dumblo stabilizavimą ir po jo, kai tirtas ultragarsu neskaidytas ir skaidytas dumblas, pateikti 16 lentelėje, o tyrimų rezultatai, kai tirtas biodujų susidarymas ir metano koncentracija – 17 lentelėje. Kiekvieno etapo metu dumblo mėginys tirtas po 3 kartus, o lentelėse pateiktos vidutinės reikšmės bei standartiniai nuokrypiai.

16 lentelė. Apdoroti tyrimų rezultatai (vidutinė reikšmė ir standartinis nuokrypis) prieš pūdymą ir po jo, kai tirtas ultragarsu neskaidytas ir skaidytas dumblas (sudaryta autoriaus)

Parametras	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Efektyvumas, %	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Efektyvumas, %	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Efektyvumas, %
	I etapas			II etapas			III etapas		
Neskaidytas dumblas									
Dumblas									
Sausų medžiagų koncentracija, g SM/l	50,73 (0,31)	41,03 (0,16)	19,12	50,30 (0,27)	40,37 (0,25)	19,75	50,40 (0,27)	40,43 (0,26)	19,78
Bepelenių sausų medžiagų koncentracija, g BSM/l	37,15 (0,19)	24,81 (0,28)	33,22	36,41 (0,34)	24,30 (0,14)	33,30	36,44 (0,26)	24,37 (0,54)	33,10
Bepelenių sausų medžiagų koncentracija, % SM atžvilgiu	73,20	60,50	17,35	72,40	58,60	19,06	72,30	60,70	16,04
Dumblo vanduo									
Cheminis deguonies suvartojimas, mgO ₂ /l	6 346 (195)	3 510 (170)	44,69	6 627 (58)	3 742 (122)	43,53	6 967 (128)	3 950 (100)	43,30
Ultragarsu skaidytas dumblas									
Dumblas									
Sausų medžiagų koncentracija, g SM/l	47,47 (0,14)	36,43 (0,24)	23,24	46,40 (0,33)	34,10 (0,03)	25,28	46,93 (0,55)	35,07 (0,14)	26,51
Bepelenių sausų medžiagų koncentracija, g BSM/l	34,67 (0,03)	22,02 (0,26)	36,50	33,87 (0,46)	20,12 (0,07)	38,80	34,01 (0,19)	20,82 (0,05)	40,60
Bepelenių sausų medžiagų koncentracija, % SM atžvilgiu	73,0	60,4	17,26	73,0	59,0	19,18	72,5	59,4	18,07
Dumblo vanduo									
Cheminis deguonies suvartojimas, mgO ₂ /l	57 487 (140)	11 017 (79)	80,84	57 584 (198)	10 584 (150)	81,62	57 690 (180)	9 487 (47)	83,55

17 lentelė. Apdoroti biodujų tyrimų rezultatai (vidutinė reikšmė ir standartinis nuokrypis) po pūdymo, kai tirtas ultragarsu neskaidytas ir skaidytas dumblas (sudaryta autoriaus)

	Neskaidytas	Skaidytas	Efektyvumas, %	Neskaidytas	Skaidytas	Efektyvumas, %	Neskaidytas	Skaidytas	Efektyvumas, %
	I			II			III		
Biodujos per 20 parų, ml	10 000	11 145	10,27	9 800	11 875	17,47	9 800	12 420	21,10
Metano kiekis biodujose, %	58,32 (0,74)	64,16 (0,80)	9,10	58,33 (0,33)	69,15 (0,18)	15,65	58,38 (0,52)	71,85 (0,47)	18,75

Apdoroti tyrimų rezultatai prieš anaerobinį perteklinio dumblo stabilizavimą ir po jo, kai tirtas aukšta įtampa neskaidytas ir skaidytas dumblas, pateikti 18 lentelėje, o biodujų susidarymo ir metano koncentracijos jose tyrimų rezultatai – 19 lentelėje. Kiekvieno etapo metu dumblo mėginys tirtas po 3 kartus, o lentelėse pateiktos vidutinės reikšmės bei standartiniai nuokrypiai.

18 lentelė. Apdoroti tyrimų rezultatai (vidutinė reikšmė ir standartinis nuokrypis) prieš pūdymą ir po jo, kai tirtas aukšta įtampa neskaidytas ir skaidytas dumblas (sudaryta autoriaus)

	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Efektyvumas, %	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Efektyvumas, %	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Efektyvumas, %
	I etapas			II etapas			III etapas		
Neskaidytas dumblas									
Dumblas									
Sausų medžiagų koncentracija, g SM/l	58,20 (0,26)	46,67 (0,06)	21,17	57,93 (0,25)	46,73 (0,06)	20,70	57,84 (0,05)	46,60 (0,40)	21,36
Bepelenių sausų medžiagų koncentracija, g BSM/l	42,69 (0,18)	28,07 (0,06)	35,20	42,73 (0,25)	28,00 (0,01)	34,50	42,59 (0,32)	27,73 (0,32)	34,50
Bepelenių sausų medžiagų koncentracija, % SM atžvilgiu	73,10	60,10	17,78	72,50	59,90	17,38	71,40	59,50	16,67
Dumblo vanduo									
Cheminis deguonies suvartojimas, mgO ₂ /l	5 950 (295)	3 315 (140)	44,29	6 020 (108)	3 350 (112)	44,35	6 080 (128)	3 390 (100)	44,24
Aukšta įtampa skaidytas dumblas									
Dumblas									
Sausų medžiagų koncentracija, g SM/l	56,44 (0,24)	41,40 (0,10)	26,65	56,97 (0,35)	41,43 (0,45)	27,90	57,34 (0,24)	40,77 (0,06)	28,91
Bepelenių sausų medžiagų koncentracija, g BSM/l	41,14 (0,07)	24,97 (0,06)	39,30	41,55 (0,16)	24,63 (0,12)	40,70	42,30 (0,19)	24,47 (0,06)	42,20
Bepelenių sausų medžiagų koncentracija, % SM atžvilgiu	72,90	60,30	17,30	72,90	59,50	18,40	73,80	60,00	18,70
Dumblo vanduo									
Cheminis deguonies suvartojimas, mgO ₂ /l	61 050 (111)	10 650 (174)	82,55	61 090 (178)	10 301 (110)	83,14	61 210 (120)	9 487 (36)	84,50

19 lentelė. Apdoroti biodujų tyrimų rezultatai (vidutinė reikšmė ir standartinis nuokrypis) po pūdymo, kai tirtas aukšta įtampa neskaidytas ir skaidytas dumblas (sudaryta autoriaus)

	Neskaidytas	Skaidytas	Efektyvumas, %	Neskaidytas	Skaidytas	Efektyvumas, %	Neskaidytas	Skaidytas	Efektyvumas, %
	I			II			III		
Biodujos per 20 parų, ml	12 400	14 300	13,30	12 000	15 200	21,00	11 900	16 300	27,00
Metano kiekis biodujose, %	58,20 (0,74)	64,48 (0,80)	11,10	58,30 (0,33)	69,92 (0,18)	15,41	58,24 (0,52)	71,92 (0,47)	19,02

Iš 16 ir 18 lentelėse pateiktų rezultatų nustatyta, kad neskaidytame dumble prieš pūdymo procesą sausų medžiagų (SM) bepelinių sausų medžiagų (BSM) ir dumblo vandenyje cheminio deguonies suvartojimo koncentracijų (ChDS) vidutinės reikšmės skyrėsi ne daugiau kaip 5 %, todėl galima teigti, kad pokytis yra nereikšmingas ir atskiri tyrimo etapai pagal dumblo kokybę po pūdymo proceso gali būti lyginami.

3.1.1. ChDS dumblo vandenyje kitimo po pūdymo proceso analizė

Prieš dumblo skaidymą ultragarsu paimtų mėginių vidutinė ChDS koncentracijos reikšmė buvo 6 647 mg/l. Suskaidžius dumblą ultragarsu koncentracija padidėjo 8,6 karto – iki 57 587 mg/l. Prieš dumblo skaidymą aukšta įtampa paimtų mėginių vidutinė ChDS koncentracijos reikšmė buvo 6 017 mg/l. Suskaidžius dumblą aukšta įtampa koncentracija padidėjo 10 kartų – iki 61 116 mg/l. ChDS koncentracijos dumblo vandenyje kitimas atskirais tyrimo etapais pateiktas 16 ir 18 lentelėse. ChDS koncentracijų padidėjimas po dumblo skaidymo rodo, kad dumblo skaidymo proceso metu yra išlaisvinamos organinės medžiagos iš mikroorganizmų ląstelių.

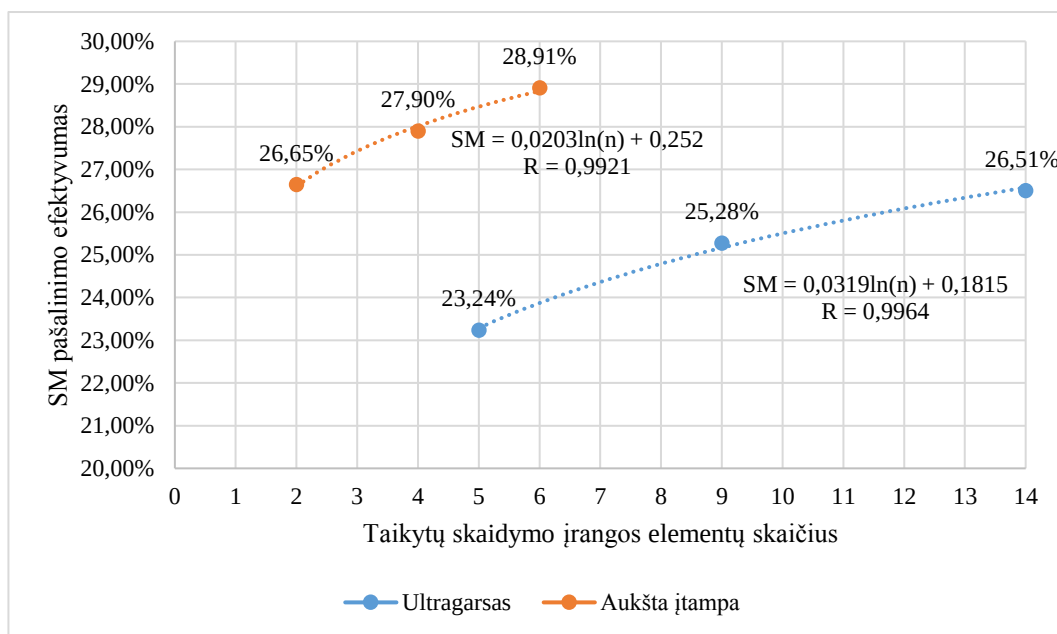
Tyrimo metu po ultragarsu skaidyto dumblo pūdymo proceso ChDS koncentracija dumblo vandenyje vidutiniškai sumažėjo 5,5 karto – nuo 57 587 mg/l iki 10 362 mg/l. Po aukšta įtampa skaidyto dumblo pūdymo proceso ChDS koncentracija dumblo vandenyje vidutiniškai sumažėjo 6 kartus – nuo 61 116 mg/l iki 10 146 mg/l. ChDS koncentracijos dumblo vandenyje kitimas pateiktas 16 ir 18 lentelėse. ChDS koncentracijų sumažėjimas po pūdymo proceso rodo, kad organinės medžiagos yra sunaudojamos pūdymo proceso metu.

3.1.2. SM pašalinimo efektyvumo dumble po pūdymo proceso kitimo analizė

SM pašalinimo efektyvumas nustatytas lyginant SM koncentraciją prieš pūdymo procesą ir po pūdymo proceso, kai pūdytas neskaidytas ir skaidytas ultragarsu bei aukšta įtampa dumblas (5) formulė), o rezultatai pateikti 16 ir 18 lentelėse.

SM pašalinimo efektyvumo po pūdymo proceso, kai dumblas ultragarsu neskaidytas, reikšmės kito 19,12–19,78 % (16 lentelė), o kai dumblas aukšta įtampa neskaidytas, reikšmės kito 20,70–21,36 % (18 lentelė). Neskaidyto dumblo reikšmės kito ne daugiau kaip 3 %, todėl galima teigti, kad pokytis nereikšmingas, o SM pašalinimo efektyvumas neskaidytame dumble išlieka pastovus viso tyrimo metu.

SM pašalinimo efektyvumo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus, kai pūdytas skaidytas dumblas, pateikta 19 paveiksle.



19 pav. Sausų medžiagų pašalinimo efektyvumo priklausomybė nuo įrenginio taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus: SM – sausų medžiagų pašalinimo efektyvumas, n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius (sudaryta autoriaus)

Iš 19 paveikslo matyti, kad SM pašalinimo efektyvumas priklauso nuo skaidymo įrenginio taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus ir kinta pagal logaritminę priklausomybę:

Ultragarsu veikiančio įrenginio:

$$SM = 0,0319\ln(n) + 0,1815 \quad (28)$$

Čia: SM – sausų medžiagų pašalinimo efektyvumas, %; n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius.

Aukšta įtampa veikiančio įrenginio:

$$SM = 0,0203\ln(n) + 0,252 \quad (29)$$

Čia: SM – sausų medžiagų pašalinimo efektyvumas, %; n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius.

Nustatytų priklausomybių koreliacijos koeficiento reikšmės yra artimos vienetui. Tai rodo, kad yra stiprus ryšys tarp analizuojamų parametų, todėl pagal taikytų skaidymo įrangos elementų skaičių galima prognozuoti SM pašalinimo efektyvumą. Pastarosios priklausomybės gali būti taikomos pertekliniam veikliajam dumblui, kuriame SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 % ir tiekiamas dumblo kiekis yra ne daugiau kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė 20 parų, o temperatūra – 37 °C.

Tyrimais nustatyta, kad skaidant perteklinį veiklųjį dumblą, kurio pradinė SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 % ir tiekiamas dumblo kiekis yra ne daugiau kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė 20 parų, o temperatūra – 37 °C, maksimalus SM pašalinimo efektyvumas yra 26,5–28,9 % (19 pav.).

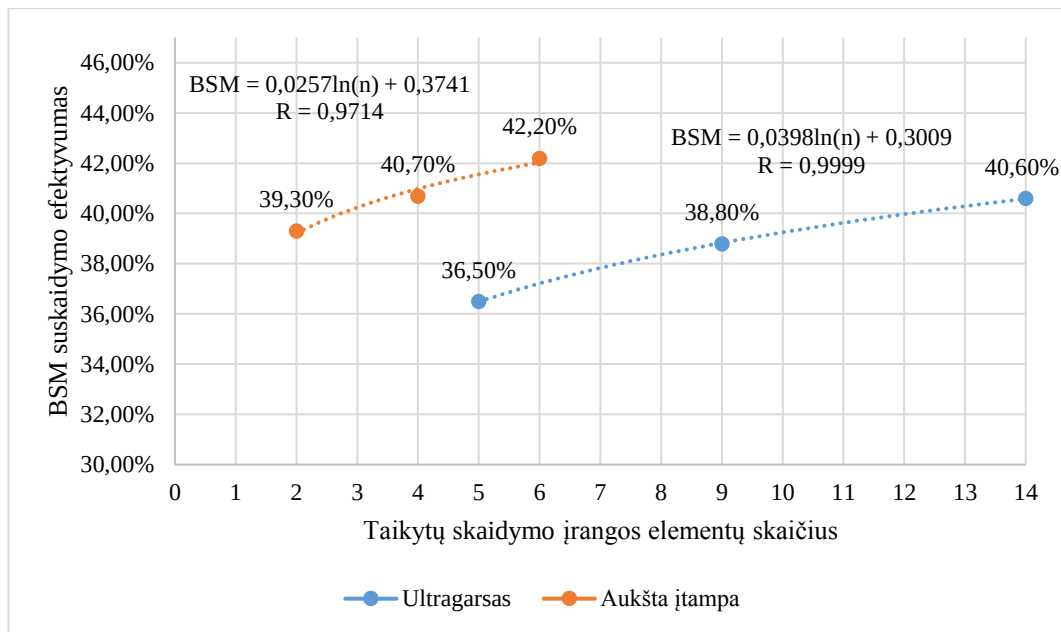
Sausų medžiagų pašalinimas po pūdymo proceso rodo, kad pūdymo metu dalis biomasėje esančių organinių junginių yra suardoma dėl anaerobinių mikroorganizmų veiklos.

3.1.3. BSM suskaidymo efektyvumo dumble po pūdymo proceso kitimo analizė

BSM suskaidymo efektyvumas nustatytas lyginant BSM koncentraciją prieš pūdymo procesą ir po pūdymo proceso, kai pūdytas neskaidytas ir skaidytas ultragarsu bei aukšta įtampa dumblas (5 formulė), o rezultatai pateikti 16 ir 18 lentelėse.

BSM suskaidymo efektyvumo po pūdymo proceso, kai dumblas ultragarsu neskaidytas, reikšmės kito 33,1–33,3 % (16 lentelė), o kai dumblas aukšta įtampa neskaidytas, reikšmės kito 34,5–35,2 % (18 lentelė). Neskaidyto dumblo reikšmės kito ne daugiau kaip 2 %, todėl galima teigti, kad pokytis nereikšmingas, o BSM pašalinimo efektyvumas neskaidytame dumble išlieka pastovus viso tyrimo metu.

BSM suskaidymo efektyvumo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus, kai pūdytas skaidytas dumblas, pateikta 20 paveiksle.



20 pav. Bepelenių sausų medžiagų suskaidymo efektyvumo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų kiekio: BSM – bepelenių sausos medžiagų suskaidymo efektyvumas, n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius (sudaryta autoriaus)

Iš 20 paveikslo matyti, kad BSM suskaidymo efektyvumas priklauso nuo skaidymo įrenginio taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus ir kinta pagal logaritminę priklausomybę:

Ultragarsu veikiančio įrenginio:

$$BSM = 0,0398\ln(n) + 0,3009 \quad (30)$$

Čia: SM – bepelenių sausų medžiagų suskaidymo efektyvumas, %; n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius.

Aukšta įtampa veikiančio įrenginio:

$$BSM = 0,0257\ln(n) + 0,3741 \quad (31)$$

Čia: SM – bepelenių sausų medžiagų suskaidymo efektyvumas, %; n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius.

Nustatytų priklausomybių koreliacijos koeficiento reikšmės yra artimos vienetui. Tai rodo, kad yra stiprus ryšys tarp analizuojamų parametų, todėl pagal taikytų skaidymo įrangos elementų skaičių galima prognozuoti BSM suskaidymo efektyvumą. Pastarosios priklausomybės gali būti taikomos

pertekliniam veikliajam dumblui, kuriame SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 %, BSM kiekis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą yra ne mažesnis kaip 72,3 %. ir tiekiamas dumblo kiekis yra ne daugiau kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė 20 parų, o temperatūra – 37 °C.

Tyrimais nustatyta, kad skaidant perteklinį veiklųjį dumblą, kurio pradinė SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 %, BSM kiekis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą yra ne mažesnis kaip 72,3 % ir tiekiamas dumblo kiekis yra ne daugiau kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė 20 parų, o temperatūra – 37 °C, maksimalus BSM suskaidymo efektyvumas yra 40,6–42,20 % (20 pav.).

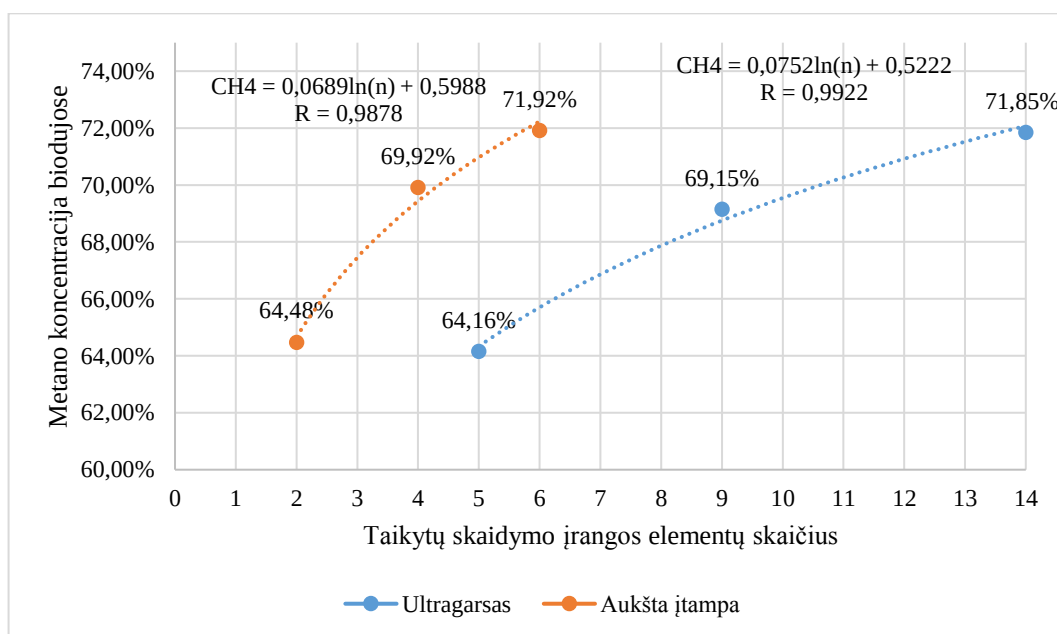
Bepelenių sausų medžiagų suskaidymas po pūdymo proceso rodo, kad pūdymo metu dalis biomasėje esančių organinių junginių yra suardoma dėl anaerobinių mikroorganizmų veiklos.

3.1.4. Metano koncentracijos biodujose kitimo analizė

Metano koncentracija nustatyta iš pūdymo proceso metu susidariusių biodujų, kai pūdytas tiek neskaidytas dumblas, tiek skaidytas dumblas.

Metano koncentracija biodujose, susidariusių pūdymo proceso metu iš neskaidyto perteklinio dumblo, vidutiniškai siekė 58,3 % (17 ir 19 lentelės). Biodujų koncentracija neskaidytame dumble kito ne daugiau kaip 1 %, todėl galima teigti, kad pokytis nereikšmingas, o metano koncentracija neskaidytame dumble išlieka pastovi viso tyrimo metu.

Metano koncentracijos priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus, kai pūdytas skaidytas dumblas, pateikta 21 paveiksle.



21 pav. Metano koncentracijos priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų kiekio: CH₄ – metano koncentracija biodujose, n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius (sudaryta autoriaus)

Iš 21 paveikslo matyti, kad metano koncentracija biodujose priklauso nuo skaidymo įrenginio taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus ir kinta pagal logaritminę priklausomybę:

Ultragarsu veikiančio įrenginio:

$$CH_4 = 0,0752 \ln(n) + 0,5222 \quad (32)$$

Čia: SM – metano koncentracija biodujose, %; n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius.

Aukšta įtampa veikiančio įrenginio:

$$CH_4 = 0,0689 \ln(n) + 0,5988 \quad (33)$$

Čia: SM – metano koncentracija biodujose, %; n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius.

Nustatytų priklausomybių koreliacijos koeficiento reikšmės yra artimos vienetui. Tai rodo, kad yra stiprus ryšys tarp analizuojamų parametru, todėl pagal taikytų skaidymo įrangos elementų skaičių galima prognozuoti metano koncentraciją biodujose. Pastarosios priklausomybės gali būti taikomos pertekliniam veikliajam dumblui, kuriame SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 %, BSM kiekis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą yra ne mažesnis kaip 72,3 % ir tiekiamas dumblo kiekis yra ne daugiau kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė 20 parų, o temperatūra – 37 °C.

Tyrimais nustatyta, kad skaidant perteklinį veiklųjį dumblą, kurio pradinė SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 %, BSM kiekis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą yra ne mažesnis kaip 72,3 % ir tiekiamas dumblo kiekis yra ne daugiau kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė 20 parų, o temperatūra – 37 °C, maksimali metano koncentracija biodujose yra 71,9 % (20 pav.).

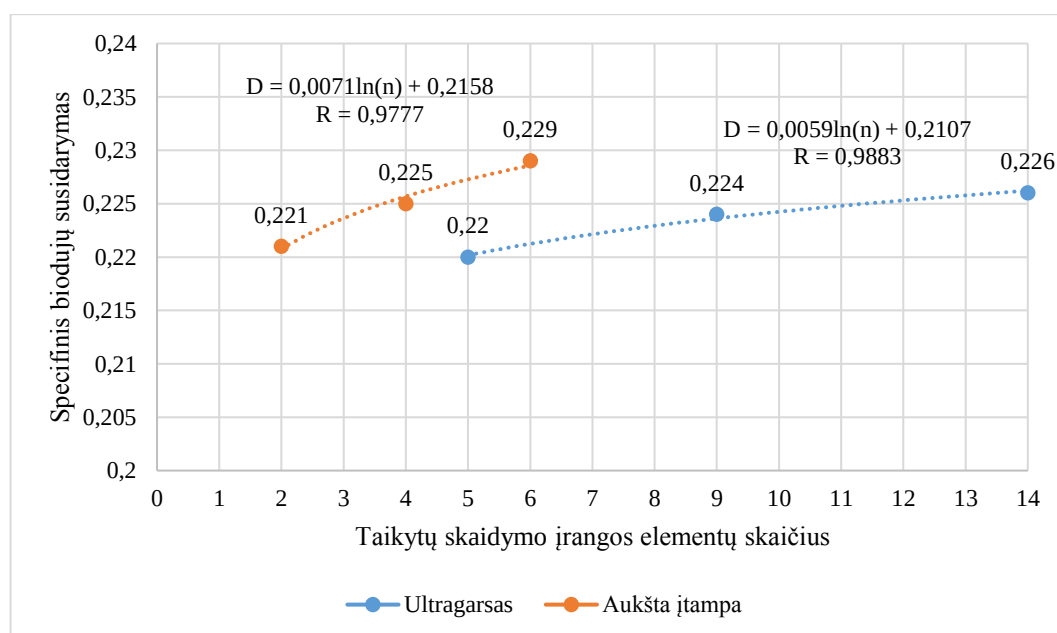
Metano procentinės koncentracijos skirtumas tarp neskaidyto ir skaidyto dumblo sudarė 13,6 procentinio punkto ir jis padidėjo skaidyto dumblo pūdymo atveju, nes skaidymo metu yra pagreitinami hidrolizės ir acetogenezės procesai, kurio metu suskaidyti junginiai naudojami metanogenezės etape, kai susidaro metanas ir anglies dioksidas.

3.1.5. Specifinio biodujų susidarymo kitimo analizė

Specifinis biodujų kiekis nustatytas pagal santykį tarp pūdymo proceso metu per 20 parų susidariusio biodujų kiekio ir suskaidyto bepelenių sausų medžiagų kiekio (6 formulė), o rezultatai pateikti 21 ir 22 lentelėse.

Specifinis biodujų susidarymo, kai pūdytas ultragarsu neskaidytas dumblas, reikšmės kito 0,202–0,203 l/g BSM suskaidyto (21 lentelė), o kai pūdytas aukšta įtampa neskaidytas dumblas, reikšmės kito 0,202–0,203 l/g BSM suskaidyto (22 lentelė). Specifinio biodujų susidarymo reikšmės, kai pūdytas neskaidytas dumblas, kito ne daugiau kaip 1 %, todėl galima teigti, kad pokytis nereikšmingas, o specifinis biodujų susidarymas neskaidytame dumble išlieka pastovus viso tyrimo metu.

Specifinio biodujų susidarymo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus pateikta 22 paveiksle.



22 pav. Specifinio biodujų susidarymo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų kiekio: D – specifinis biodujų susidarymas, n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius (sudaryta autoriaus)

Iš 22 paveikslo matyti, kad specifinis biodujų susidarymas priklauso nuo skaidymo įrenginio taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus ir kinta pagal logaritminę priklausomybę:

Ultragarsu veikiančio įrenginio:

$$y = 0,0059\ln(n) + 0,2107 \quad (34)$$

Čia: D – specifinis biodujų kiekis, l/g BSM suskaidyto; n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius.

Aukšta įtampa veikiančio įrenginio:

$$D = 0,0071 \ln(n) + 0,2158 \quad (35)$$

Čia: D – specifinis biodujų kiekis; n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius.

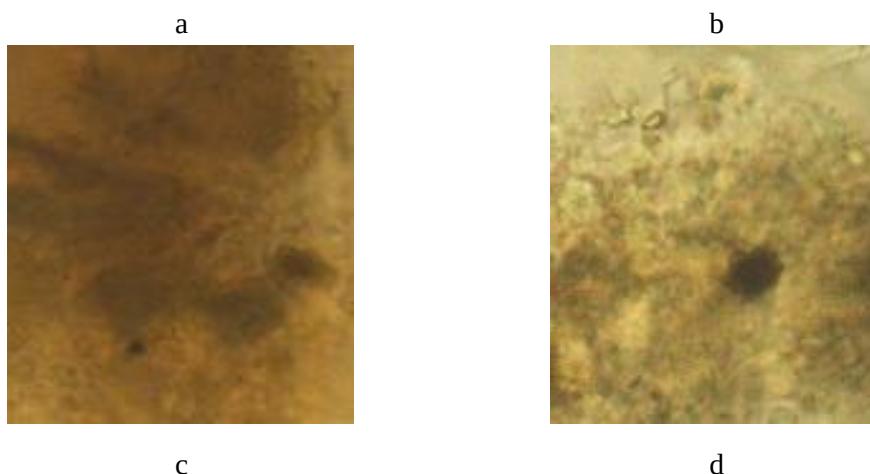
Nustatytų priklausomybių koreliacijos koeficiento reikšmės yra artimos vienetui. Tai rodo, kad yra stiprus ryšys tarp analizuojamų parametrų, todėl pagal taikytų skaidymo įrangos elementų skaičių galima prognozuoti metano koncentraciją biodujose. Pastarosios priklausomybės gali būti taikomos pertekliniam veikliajam dumblui, kuriame SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 %, BSM kiekis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą yra ne mažesnis kaip 72,3 %. ir tiekiamas dumblo kiekis yra ne daugiau kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė 20 parų, o temperatūra – 37 °C.

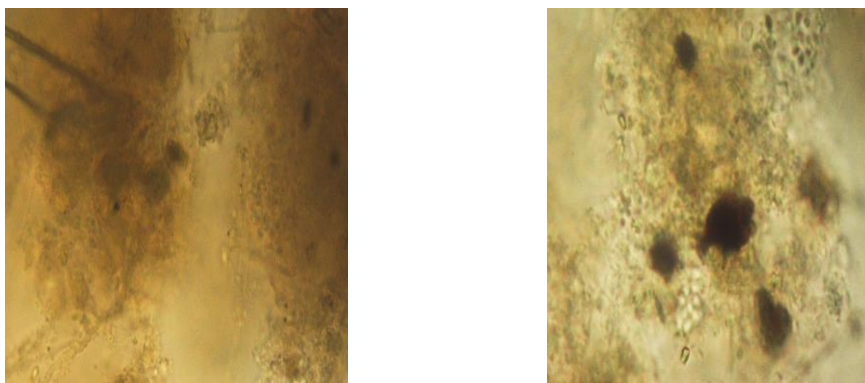
Tyrimais nustatyta, kad skaidant perteklinį veiklųjį dumblą, kurio pradinė SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 %, BSM kiekis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą yra ne mažesnis kaip 72,3 % ir tiekiamas dumblo kiekis yra ne daugiau kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė 20 parų, o temperatūra – 37 °C, maksimalus specifinis biodujų susidarymas yra 0,226–0,229 l/g BSM suskaidyto (22 pav.)

Specifinio biodujų susidarymo skirtumas tarp neskaidyto ir skaidyto dumblo atsiranda, nes dėl dumblo skaidymo yra pagreitinami hidrolizės ir acetogenezės procesai pūdymo metu, todėl efektyviau vyksta ir metanogenezės procesas, kurio metu susidaro biodujos.

3.1.6. Dumblo mikroskopavimo analizė

23 paveiksle pavaizduotas skaidytas ultragarsu (a ir b) bei skaidytas aukšta įtampa (c ir d) 1000 kartų padidintas dumblo vaizdas per mikroskopą.





23 pav. Neskaidyto (a ir c) ir ultragarsu (b) bei aukšta įtampa (d) skaidyto dumblo mikroskopinis vaizdas (sudaryta autoriaus)

Iš 23 paveikslo matyti, jog (b ir d) vaizde dumblo struktūra yra labiau suardyta nei neskaidytame dumble. Tamsūs dariniai rodo dumblo mikroorganizmų sankaupas, kurios po skaidymo proceso sumažėja, o tuo pačiu metu dalis ląstelių membranų yra suardoma. Skaidymo proceso metu iš suardytų ląstelių yra išlaisvinamos organinės medžiagos, todėl hidrolizės ir acetogenezės procesai vyksta sparčiau ir taip pūdymo procesas tampa efektyvesnis.

3.2. Specifinio SM pašalinimo, BSM suskaidymo, biodujų kiekio susidarymo analizė

Specifinis sausų medžiagų pašalinimas – tai rodiklis, nurodantis koks SM kiekis buvo pašalintas pūdymo proceso metu SM kiekio prieš pūdymo procesą atžvilgiu. Specifinis bepelenių sausų medžiagų suskaidymas – tai rodiklis, nurodantis koks BSM kiekis buvo suskaidytas pūdymo proceso metu BSM kiekio prieš pūdymo procesą atžvilgiu. Specifinis biodujų kiekio susidarymas – tai rodiklis, nurodantis koks biodujų kiekis susidarė pūdymo proceso metu suskaidyto BSM kiekio po pūdymo atžvilgiu. Specifinio SM pašalinimo, specifinio BSM suskaidymo ir specifinio biodujų kiekio susidarymo reikšmės, kai dumblas neskaidytas ir skaidytas ultragarsu, pateiktos 20 lentelėje, o kai dumblas neskaidytas ir skaidytas aukšta įtampa, – 21 lentelėje. Pastarųjų rodiklių reikšmės apskaičiuotos remiantis 16–19 lentelėmis bei 7–12 formulėmis.

20 lentelė. Apskaičiuotos specifinio SM pašalinimo, BSM suskaidymo ir biodujų susidarymo reikšmės prieš ir po pūdymo proceso, kai dumblas neskaidytas ir skaidytas ultragarsu (sudaryta autoriaus)

Parametras	Prieš pūdymā	Po pūdymo	Prieš pūdymā	Po pūdymo	Prieš pūdymā	Po pūdymo
	I etapas		II etapas		III etapas	
Neskaidytas						
SM kiekis pertekliniame dumble, g SM	202,93	164,13	201,60	161,72	201,20	161,47
SM kiekio pašalinimas, g SM	38,40		39,88		39,73	
Specifinis SM pašalinimas, g SM sumažėjusio/g SM pradinio	0,191		0,197		0,198	
BSM kiekis pertekliniame dumble, g BSM	148,61	99,25	145,76	97,47	145,65	97,20
BSM suskaidytas, g BSM	49,36		48,29		48,45	
Specifinis BSM suskaidymas, g BSM suskaityto/g BSM pradinio	0,332		0,333		0,331	
Biodujos, ml	10 000		9 800		9 800	
Specifinis biodujų kiekis, l/g BSM suskaityto	0,203		0,203		0,202	
Skaidytas						
SM kiekis pertekliniame dumble, g SM	189,87	145,73	187,73	140,27	185,60	136,40
SM kiekio pašalinimas, g SM	44,13		47,47		49,20	
Specifinis SM pašalinimas, g SM sumažėjusio/g SM pradinio	0,232		0,253		0,265	
BSM kiekis pertekliniame dumble, g BSM	138,67	88,07	136,04	83,27	135,49	80,48
BSM suskaidytas, g BSM	50,60		52,77		55,01	
Specifinis BSM suskaidymas, g BSM suskaityto/g BSM pradinio	0,365		0,388		0,406	
Biodujos, ml	11 145		11 875		12 420	
Specifinis biodujų kiekis, l/g BSM suskaityto	0,220		0,224		0,226	

21 lentelė. Apskaičiuotos specifinio SM pašalinimo, BSM suskaidymo ir biodujų susidarymo reikšmės prieš ir po pūdymo proceso, kai dumblas neskaidytas ir skaidytas aukšta įtampa (sudaryta autoriaus)

Parametras	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Prieš pūdymą	Po pūdymo
	I etapas		II etapas		III etapas	
Neskaidytas						
SM kiekis pertekliniame dumble, g SM	236,80	186,67	235,73	186,93	237,03	186,40
SM kiekio pašalinimas, g SM	50,13		48,80		50,63	
Specifinis SM pašalinimas, g SM sumažėjusio/g SM pradinio	0,212		0,207		0,214	
BSM kiekis pertekliniame dumble, g BSM	173,21	112,27	186,93	112,00	169,33	110,93
BSM suskaidytas, g BSM	60,95		58,93		58,40	
Specifinis BSM suskaidymas, g BSM suskaidyto/g BSM pradinio	0,352		0,345		0,345	
Biodujos, ml	12 400		12 000		11 900	
Specifinis biodujų kiekis, l/g BSM suskaidyto	0,203		0,203		0,202	
Skaidytas						
SM kiekis pertekliniame dumble, g SM	225,76	165,60	227,87	165,73	229,37	163,07

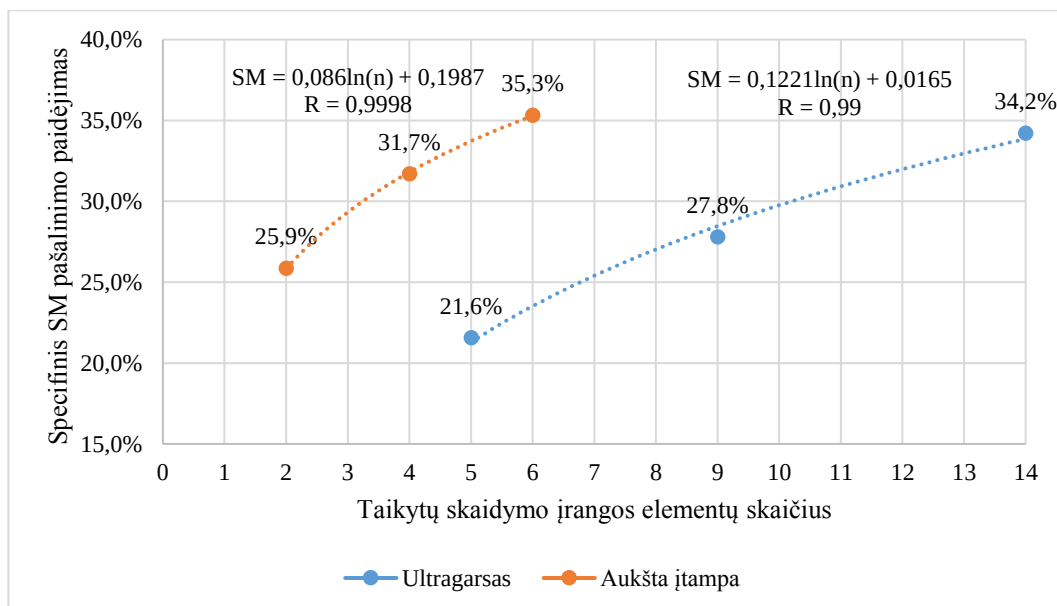
Parametras	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Prieš pūdymą	Po pūdymo	Prieš pūdymą	Po pūdymo
	I etapas		II etapas		III etapas	
SM kiekio pašalinimas, g SM	60,16		62,13		66,31	
Specifinis SM pašalinimas, g SM pašalinto/g SM pradinio	0,266		0,273		0,289	
BSM kiekis pertekliniame dumble, g BSM	164,56	99,87	166,20	98,53	163,07	97,87
BSM suskaidytas, g BSM	64,69		67,67		71,33	
Specifinis BSM suskaidymas, g BSM suskaidyto/g BSM pradinio	0,393		0,407		0,422	
Biodujos, ml	14 300		15 200		16 300	
Specifinis biodujų kiekis, l/g BSM suskaidyto	0,221		0,225		0,229	

Specifinio SM pašalinimo, specifinio BSM suskaidymo ir specifinio biodujų kiekio susidarymo reikšmės yra sąlyginiai dydžiai, todėl 20 ir 21 lentelėse nurodytas jų reikšmes galima taikyti SM pašalinimui, BSM suskaidymui ir biodujų susidarymui prognozuoti, kai SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 %, BSM kiekis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą yra ne mažesnis kaip 72,3 % ir tiekiamas dumblo kiekis yra ne didesnis kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė – 20 parų, o temperatūra – 37 °C.

Didžiausios SM pašalinimo, BSM suskaidymo ir biodujų kiekio susidarymo reikšmės nustatytos, kai taikytas didžiausias skaidymo įrangos elementų skaičius (14 ultragarso elementų arba 6 aukštos įtampos elementai, 19, 20 ir 22 pav.). Tokiu atveju rekomenduojama SM pašalinimą prognozuoti taikant 0,265–0,289 g SM pašalinto/g SM pradinio specifinio SM pašalinimo reikšmę, BSM suskaidymą – taikant 0,406–0,422 g BSM suskaidyto/g BSM pradinio specifinio BSM suskaidymo reikšmę, o biodujų susidarymą – taikant 0,226–0,229 l/g BSM suskaidyto specifinio biodujų susidarymo reikšmę.

3.2.1. Specifinio sausų medžiagų pašalinimo padidėjimo kitimo analizė

Specifinio SM pašalinimo padidėjimas išreikštas santykiu tarp specifinio SM pašalinimo pūdymo proceso metu reikšmių, kai pūdytas skaidytas ir neskaidytas dumbblas (10 formulė). Specifinio SM pašalinimo padidėjimo priklausomybė nuo reaktorių skaičiaus pateikta 24 paveiksle.



24 pav. Specifinio sausų medžiagų pašalinimo padidėjimo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus: SM – SM pašalinimo padidėjimas, n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius (sudaryta autoriaus)

Iš 24 paveikslo matyti, kad specifinio SM pašalinimo padidėjimas priklauso nuo skaidymo įrenginio taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus ir kinta pagal logaritminę priklausomybę:

Ultragarsu veikiančio įrenginio:

$$SM = 0,1221\ln(n) + 0,0165 \quad (36)$$

Čia: SM – specifinis SM pašalinimo padidėjimas, %; n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius.

Aukšta įtampa veikiančio įrenginio:

$$SM = 0,086\ln(n) + 0,1987 \quad (37)$$

Čia: SM – specifinis SM pašalinimo padidėjimas, %; n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius.

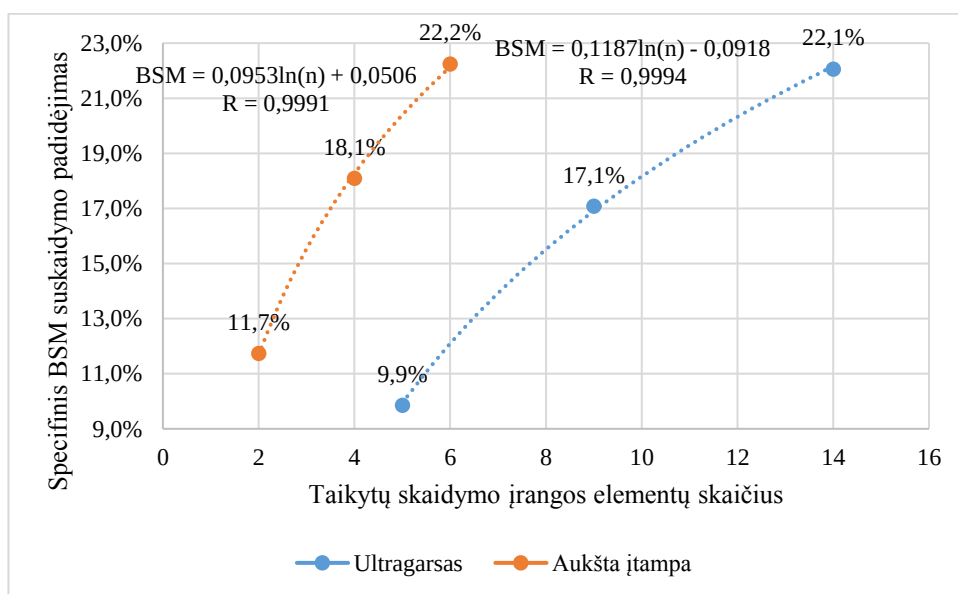
Nustatytų priklausomybių koreliacijos koeficiento reikšmės yra artimos vienetui. Tai rodo, kad yra stiprus ryšys tarp analizuojamų parametru, todėl pagal taikytų skaidymo įrangos elementų skaičių galima prognozuoti specifinį SM pašalinimo padidėjimą. Pastarosios priklausomybės gali būti taikomos pertekliniam veikliajam dumblui, kuriame SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 % ir

tiekiamas dumblo kiekis yra ne daugiau kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė 20 parų, o temperatūra – 37 °C.

Tyrimais nustatyta, kad skaidant perteklinį veiklųjį dumblą, kurio pradinė SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 % ir tiekiamas dumblo kiekis yra ne daugiau kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė 20 parų, o temperatūra – 37 °C, maksimalus SM pašalinimo padidėjimas yra 34–35 % (24 pav.), o maksimalus SM pašalinimo efektyvumas yra 27–29 % (19 pav.)

3.2.2. Specifinio bepelenių sausų medžiagų padidėjimo analizė

Specifinio BSM suskaidymo padidėjimas išreikštas santykiu tarp specifinio BSM suskaidymo pūdymo proceso metu reikšmių, kai pūdytas skaidytas ir neskaidytas dumblas (12 formulė). Rezultatai pateikti 20 ir 21 lentelėse. Specifinio BSM suskaidymo padidėjimo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus pateikta 25 paveiksle.



25 pav. Specifinio bepelenių sausų medžiagų suskaidymo padidėjimo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus: BSM – BSM suskaidymo padidėjimas, n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius (sudaryta autoriaus)

Iš 25 paveikslo matyti, kad specifinio BSM suskaidymo padidėjimas priklauso nuo skaidymo įrenginio taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus ir kinta pagal logaritminę priklausomybę:

Ultragarsu veikiančio įrenginio:

$$BSM = 0,1187\ln(n) - 0,0918 \quad (38)$$

Čia: BSM – specifinis BSM suskaidymo padidėjimas, %; n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius.

Aukšta įtampa veikiančio įrenginio:

$$BSM = 0,0953\ln(n) + 0,0506 \quad (39)$$

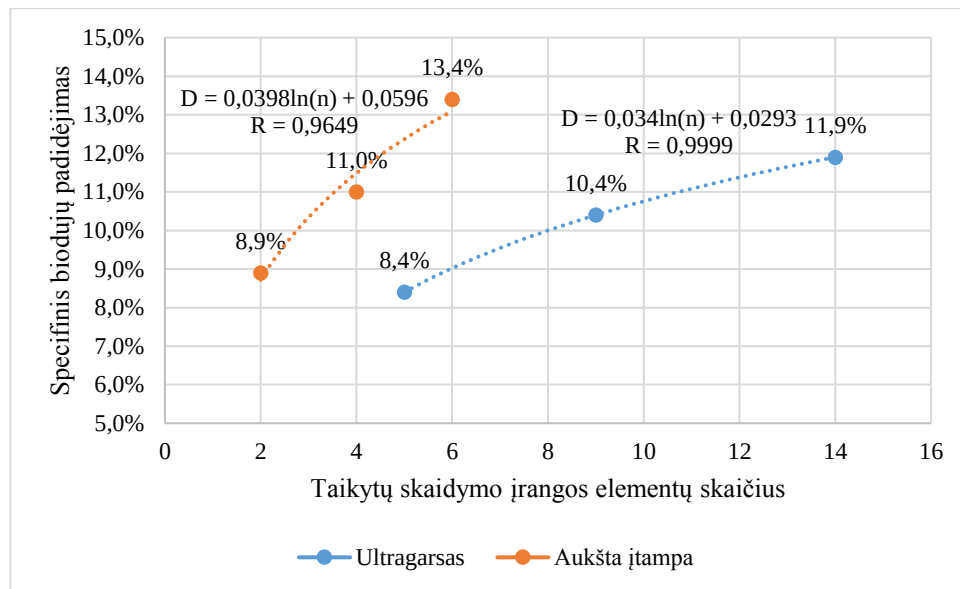
Čia: BSM – specifinis BSM suskaidymo padidėjimas, %; n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius.

Nustatytų priklausomybių koreliacijos koeficiento reikšmės yra artimos vienetui. Tai rodo, kad yra stiprus ryšys tarp analizuojamų parametrų, todėl pagal taikytų skaidymo įrangos elementų skaičių galima prognozuoti BSM suskaidymo efektyvumą. Pastarosios priklausomybės gali būti taikomos pertekliniam veikliajam dumblui, kuriame SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 %, BSM kiekis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą yra ne mažesnis kaip 72,3 %, ir tiekiamas dumblo kiekis yra ne daugiau kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė 20 parų, o temperatūra – 37 °C.

Tyrimais nustatyta, kad skaidant perteklinį veiklųjį dumblą, kurio pradinė SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 %, BSM kiekis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą yra ne mažesnis kaip 72,3 % ir tiekiamas dumblo kiekis yra ne daugiau kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė 20 parų, o temperatūra – 37 °C, maksimalus BSM suskaidymo padidėjimas yra 22,1–22,2 % (25 pav.), o maksimalus BSM suskaidymo efektyvumas yra 40,6–42,2 % (20 pav.).

3.2.3. Specifinio biodujų susidarymo padidėjimo analizė

Specifinis biodujų susidarymo padidėjimas išreikštas santykiu tarp specifinio biodujų susidarymo pūdymo proceso metu reikšmių, kai pūdytas skaidytas ir neskaidytas dumblas (12 formulė). Rezultatai pateikti 20 ir 21 lentelėse. Specifinio biodujų susidarymo padidėjimo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus pateikta 26 paveiksle.



26 pav. Specifinio biodujų kiekio padidėjimo priklausomybė nuo taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus: D – specifinis biodujų kiekio padidėjimas, n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius (sudaryta autoriaus)

Iš 26 paveikslo matyti, kad specifinis biodujų padidėjimas priklauso nuo skaidymo įrenginio taikytų skaidymo įrangos elementų skaičiaus ir kinta pagal logaritminę priklausomybę:

Ultragarsu veikiančio įrenginio:

$$D = 0,034\ln(n) + 0,0293 \quad (40)$$

Čia: D – specifinis biodujų padidėjimas, %; n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius.

Aukšta įtampa veikiančio įrenginio:

$$D = 0,0398\ln(n) + 0,0596 \quad (41)$$

Čia: D – specifinis biodujų padidėjimas, %; n – taikytų skaidymo įrangos elementų skaičius.

Nustatytų priklausomybių koreliacijos koeficiento reikšmės yra artimos vienetui. Tai rodo, kad yra stiprus ryšys tarp analizuojamų parametru, todėl pagal taikytų skaidymo įrangos elementų skaičių galima prognozuoti metano koncentraciją biodujose. Pastarosios priklausomybės gali būti taikomos pertekliniam veikliajam dumbliui, kuriame SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 %, BSM kiekis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą yra ne mažesnis kaip 72,3 % ir tiekiamas dumblo kiekis yra ne daugiau kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė 20 parų, o temperatūra – 37 °C.

Tyrimais nustatyta, kad skaidant perteklinę veiklų dumblą, kurio pradinė SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 %, BSM kiekis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą yra ne mažesnis kaip 72,3 % ir tiekiamas dumblo kiekis yra ne daugiau kaip 300 kg SM/h, pūdymo trukmė 20 parų, o temperatūra – 37 °C, maksimalus specifinis biodujų susidarymo padidėjimas yra 11,9–13,4 % (26 pav.), o maksimalus specifinis biodujų susidarymas yra 0,226–0,229 l/g BSM suskaidyto (22 pav.).

3.3. Natūrinio tyrimo rezultatai

Atlikus surinktų duomenų statistinį apdorojimą, dumblo apdorojimo grandies rodiklių imties vidurkiai, kai dumblas neskaidytas ir kai dumblas skaidytas, pateikti 22 lentelėje, o skaičiuotini technologiniai dumblo apdorojimo grandies parametrai – 23 lentelėje.

22 lentelė. Statistiškai apdoroti Kauno nuotekų valyklos dumblo parametrų reikšmės (sudaryta autoriaus)

Dumblo parametrai	Neskaidytas dumblas	Reikšmių imtis	Ultragarsu skaidytas dumblas	Reikšmių imtis
Pirminio dumblo kiekis, m ³ /d	255	312	248	233
Sausų medžiagų koncentracija, kg SM/m ³	70,45	28	69,57	35
Bepelenių sausų medžiagų koncentracija, kg BSM/m ³	49,56	31	47,76	35
Bepelenių sausų medžiagų kiekis sausų medžiagų atžvilgiu, %	70,35	31	68,65	35
Perteklinio dumblo kiekis po tirštinimo, m ³ /d	201	184	197	196
Sausų medžiagų koncentracija, kg SM/m ³	49,98	34	50,60	66
Bepelenių sausų medžiagų koncentracija, kg BSM/m ³	36,76	29	36,60	67
Bepelenių sausų medžiagų kiekis sausų medžiagų atžvilgiu, %	73,54	29	72,33	67
Pirminio ir perteklinio dumblo mišinio kiekis į pūdytuvus, m ³ /d	456	330	446	306
Sausų medžiagų koncentracija, kg SM/m ³	61,42	25	61,17	27
Bepelenių sausų medžiagų koncentracija, kg BSM/m ³	43,92	33	42,82	25
Bepelenių sausų medžiagų kiekis sausų medžiagų atžvilgiu, %	71,50	33	70,00	25
Pūdyto dumblo kiekis, m ³ /d	456	330	446	306
Sausų medžiagų koncentracija, kg SM/m ³	36,50	38	34,93	88
Bepelenių sausų medžiagų koncentracija, kg BSM/m ³	21,79	39	20,13	41
Bepelenių sausų medžiagų kiekis sausų medžiagų atžvilgiu, %	59,71	39	57,64	41

Dumblo parametrai	Neskaidytas dumbblas	Reikšmių imtis	Ultragarsu skaidytas dumbblas	Reikšmių imtis
Sausinto dumblo kiekis, m ³ /d	66,64	325	62,09	330
Sausų medžiagų koncentracija, kg SM/m ³	25,01	20	25,10	18
Aktyvios medžiagos kiekis sausinimui, kg/kg SM	5,93	350	5,59	347
Biodujų kiekis, m ³ /d	8 737	333	9 004	341

23 lentelė. Skaičiuotini dumblo parametrai pagal statistiškai apdorotus duomenis (sudaryta autoriaus)

	Neskaidytas	Skaidytas
Pirminio dumblo masė, kg SM/d	17 974	17 303
Perteklinio dumblo masė, kg SM/d	10 070	10 009
Pirminio ir perteklinio dumblo mišinio masė, kg SM/d	28 046	27 314
Pirminio ir perteklinio dumblo organinių medžiagų masė, kg SM/d	20 055	19 120
Dumblo išbuvimo trukmė, d	39,42	40,31
Pūdytuvų faktinė apkrova, kg BSM/m ³	1,11	1,06
Pūdyto dumblo masė, kg SM/d	16 667	15 597
Pūdyto dumblo organinių medžiagų masė, kg SM/d	9 950	8 988
Suskaidytas organinių medžiagų kiekis, kg BSM/d	10 105	10 131
Bepelenių sausų medžiagų suskaidymas, %	50,40	53,00
Sausų medžiagų pašalinimas, %	40,57	42,90
Specifinis biodujų susidarymas, m ³ /kg BSM	0,86	0,89

Pagal 22 ir 23 lentelių duomenis apskaičiuotos skirtumas tarp vidutinių pirminio ir perteklinio dumblo kiekių ir technologinių parametų reikšmių, kai pūdytas neskaidytas ir skaidytas dumbblas. Skaičiavimo rezultatai pateikti 24 lentelėje.

24 lentelė. Dumblo parametų lyginamosios skirtumų reikšmės (sudaryta autoriaus)

Parametrai	Skirtumas tarp vidutinių parametų reikšmių, kai pūdytas neskaidytas ir skaidytas dumbblas, %
Pirminis dumbblas, kg SM/d	1,3
Perteklinis dumbblas, kg SM/d	1,2
Pirminio dumblo kiekis pagal tūrį, m ³ /d	2,5
Perteklinio dumblo kiekis pagal tūrį, m ³ /d	1,8
Dumblo išbuvimo pūdytuve trukmė, d	2,2
Faktinė apkrova, kg BSM/d	3,6

Atlikus pirminio ir perteklinio dumblo kiekių bei technologinių parametrų analizę, gautų reikšmių skirtumas yra ne didesnis kaip 4 %. Atsižvelgus į tai, kad skirtumas nereikšmingas, neskaidyto ir skaidyto dumblo parametrai gali būti lyginami. Apskaičiuotos skaidymo efektyvumą apibūdinančių rodiklių reikšmės pateiktos 25 lentelėje.

25 lentelė. Skaidymo įrangos efektyvumą apibūdinančių parametrų reikšmės (sudaryta autoriaus)

Parametrai	Neskaidytas dumblas	Skaidytas dumblas	Specifinis padidėjimas, %
Bepelenių sausų medžiagų suskaidymas, %	50,4	53,0	5,2
Sausų medžiagų pašalinimas, %	40,6	43,9	8,2
Specifinis biodujų susidarymas, m ³ /kg BSM	0,86	0,89	3,5

Iš 24 paveikslo matyti, jog laboratorinėmis sąlygomis specifinis SM pašalinimo padidėjimas, veikiant 9 ultragarso reaktoriams, yra 27,8 %. Natūrinėmis sąlygomis gautas rezultatas yra 29,5 % mažesnis nei rezultatas gautas laboratorinėmis sąlygomis.

Iš 25 paveikslo matyti, jog laboratorinėmis sąlygomis specifinis BSM suskaidymo padidėjimas, veikiant 9 ultragarso reaktoriams, yra 17,1 %. Natūrinėmis sąlygomis gautas rezultatas yra 30,4 % mažesnis nei rezultatas gautas laboratorinėmis sąlygomis.

Iš 26 paveikslo matyti, jog laboratorinėmis sąlygomis specifinis SM pašalinimo padidėjimas, veikiant 9 ultragarso reaktoriams, yra 10,4 %. Natūrinėmis sąlygomis gautas rezultatas yra 33,6 % mažesnis nei rezultatas gautas laboratorinėmis sąlygomis.

Apibendrinant galima teigti, kad visų analizuotų rodiklių specifinis padidėjimas natūrinėmis sąlygomis yra vidutiniškai 31 % mažesnis nei specifinis padidėjimas, nustatytas laboratorinėmis sąlygomis. Šis skirtumas galėtų būti paaiškinamas tuo, kad natūrinėmis sąlygomis pūdytas ne tik perteklinis dumblas, bet pirminio ir perteklinio dumblo mišinys, kuriame perteklinio dumblo dalis sudarė 37 % (23 lentelė). Be to, nereikšmingas skirtumas tarp laboratorinėmis ir natūrinėmis sąlygomis gautų rezultatų galėjo susidaryti dėl skirtingų pirminio ir perteklinio dumblo specifinio BSM suskaidymo rodiklio reikšmių. Iš turimų natūrinių duomenų nebuvo galimybės nustatyti minėtojo rodiklių reikšmių atskirai pirminiam ir pertekliniam dumblui.

Iš aukščiau atliktos analizės galima teigti, kad pūdant dumblo mišinį, kuriame yra apie trečdalį perteklinio dumblo, specifinio SM pašalinimo, BSM suskaidymo ir biodujų susidarymo padidėjimo reikšmės gautos taip pat apie trečdalį mažesnės nei nustatytos laboratorinių tyrimų metu. Galima daryti prielaidą, kad, natūrinėmis sąlygomis pūdant tik perteklinį dumblą, specifinio SM, BSM ir biodujų padidėjimo rezultatas būtų toks pat kaip ir laboratorinėmis sąlygomis.

3.4. Eksploatacijos ir investicijų kaštų įvertinimas

Be darbe analizuojamo biodujų padidėjimo, sausų medžiagų pašalinimo ir bepelenių sausų medžiagų suskaidymo pagerinimo svarbu įvertinti ir eksploatacijos bei investicijos kaštus.

Eksploatacijos kaštai

Ultragarsu skaidomo įrenginio vartojamasis elektros galingumas kinta nuo 0,03 kWh/kg SM, kai taikomas vienas elementas, iki 0,056 kWh/kg SM, kai taikoma 14 elementų. Aukšta įtampa skaidomo įrenginio vartojamasis elektros galingumas kinta nuo 0,001 kWh/kg SM, kai taikomas vienas elementas, iki 0,006 kWh/kg SM, kai taikoma 6 elementai.

Pagal laboratorinių tyrimų rezultatus geriausias perteklinio dumblo pūdymo proceso rezultatas pasiektas, kai dumblui skaidyti taikyta 14 elementų, todėl priimta, kad dumblo skaidymo įrenginys nepertraukiamai bus eksploatuojamas su 14 elementų. Į skaidymo įrenginį atitekantis dumblo debitas yra 300 kg SM/h, įrenginys dirba 8760 h/metus. Įrenginio suvartojamas metinis elektros energijos kiekis būtų 147 168 kWh/metus ((24) formulė).

Pagal laboratorinių tyrimų rezultatus geriausias perteklinio dumblo pūdymo proceso rezultatas pasiektas, kai dumblui skaidyti taikyti 6 elementai, todėl priimta, kad dumblo skaidymo įrenginys nepertraukiamai bus eksploatuojamas su 6 elementais. Į skaidymo įrenginį atitekantis dumblo debitas yra 300 kg SM/h, įrenginys dirba 8760 h/metus. Įrenginio suvartojamas metinis elektros energijos kiekis būtų 15 768 kWh/metus ((24) formulė).

Lyginant nurodytus skaidymo metodus pagal elektros suvartojimą galima teigti, kad ultragarsu skaidomas metodas reikalauja daugiau nei 9 kartus didesnio elektros energijos kiekio. Metiniai elektros energijos kaštai, naudojant ultragarsu skaidomą įrangą, būtų 14 717 EUR/metus, o naudojant aukštą įtampą – 1 577 EUR/metus ((25) formulė).

Įvertinus įrangos kapitalizacijos koeficientą, kuris priimtas – 12, nustatyta, kad, taikant skaidymo ultragarsu įrangą, kapitalizuotos išlaidos būtų 176 604 EUR, o taikant skaidymo aukštą įtampą įrangą, – 18 924 EUR ((26) formulė).

Įrangos įsigijimo kaštai

Analizuojamos darbe skaidymo ultragarsu įrangos rinkos kaina – 135 000 EUR, skaidymo aukštą įtampą įrangos – 30 000 EUR.

Bendrų kaštų įvertinimas

Bendri skaidymo ultragarsu įrangos kaštai, įvertinus eksploatacijos kaštus ir investicinius kaštus, būtų 311 604 EUR (0,99 cnt./kg SM), o bendri skaidymo aukštą įtampą įrangos kaštai – 48 924 EUR (0,16 cnt./kg SM) (27 formulė).

Specifinio SM pašalinimo, BSM suskaidymo ir biodujų susidarymo reikšmių skirtumai, taikant skirtingus dumblo skaidymo metodus, neviršijo 5 %, todėl galima teigti, kad gautas rezultatas, taikant ultragarsu ir aukšta įtampa skaidymo įrangą, yra analogiškas. Atsižvelgiant į tai, kad laboratorinių tyrimų pagrindu gautas analogiškas pūdymo rezultatas taikant tiek skaidymo ultragarsu, tiek aukšta įtampa įrangą, o bendri kaštai, taikant dumblo skaidymo ultragarsu įrangą, yra daugiau kaip 6 kartus didesni, nei taikant dumblo skaidymo aukšta įtampa įrangą, rekomenduojama taikyti dumblo skaidymo aukšta įtampa įrangą.

IŠVADOS

1. Skaidant perteklinį dumblą ultragarsu, ChDS koncentracija dumblo vandenyje padidėjo 8,5 karto (nuo 6 647 mg/l iki 57 587 mg/l), o skaidant aukšta įtampa, – 10 kartų (nuo 6 017 mg/l iki 61 116 mg/l). ChDS dumblo vandenyje padidėjimas rodo, kad, skaidant dumblą, yra išlaisvinamos organinės medžiagos iš mikroorganizmų ląstelių.
2. Laboratorinių pūdymo tyrimų metu specifinis SM pašalinimo padidėjimas siekė 34–35 %, specifinis BSM suskaidymo padidėjimas – 22 % ir specifinis biodujų susidarymo padidėjimas – 12–13 % lyginant pūdymo procesus, kai pūdytas skaidytas ir neskaidytas perteklinis veiklusis dumblas, taikytas didžiausias skaidymo įrangos elementų skaičius ir jos našumas buvo 300 kg SM/h, SM koncentracija prieš pūdymą buvo 5–6 %, BSM kiekis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą – 72 %, o pūdymo trukmė ir palaikoma temperatūra – atitinkamai 20 parų ir 37 °C.
3. Laboratorinių pūdymo tyrimų metu didžiausias specifinis SM pašalinimas siekė 0,27 g SM pašalinto/g SM pradinio, specifinis BSM suskaidymas – 0,4 g BSM suskaidyto/g BSM pradinio ir specifinis biodujų susidarymas – 0,23 l/g BSM suskaidyto, kai pūdytas skaidytas perteklinis veiklusis dumblas, taikytas didžiausias skaidymo įrangos elementų skaičius ir jos našumas buvo 300 kg SM/h, SM koncentracija prieš pūdymą buvo 5–6 %, BSM kiekis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą – 72 %, o pūdymo trukmė ir palaikoma temperatūra – atitinkamai 20 parų ir 37 °C.
4. Laboratorinėmis sąlygomis pūdant skaidytą tiek ultragarsu, tiek aukšta įtampa perteklinį dumblą, metano procentinė koncentracija biodujose padidėjo 13,6 procentinio punkto (nuo 58,3 % iki 71,9 %), lyginant su tuo atveju, kai pūdytas neskaidytas dumblas.
5. Nustatyta, kad specifinis SM pašalinimo, BSM suskaidymo ir biodujų susidarymo padidėjimas lyginant pūdymo procesus, kai pūdytas skaidytas ir neskaidytas dumblo mišinys, natūrinėmis sąlygomis yra vidutiniškai 31 % mažesnis nei specifinis nurodytų rodiklių padidėjimas, nustatytas laboratorinėmis sąlygomis. Šis skirtumas galėtų būti paaiškinamas tuo, kad natūrinėmis sąlygomis pūdytas ne perteklinis dumblas, bet pirminio ir perteklinio dumblo mišinys, kuriame perteklinio dumblo dalis sudarė 37 %.
6. Įvertinus tai, kad laboratorinių pūdymo tyrimų metu, taikant skirtingus dumblo skaidymo metodus, specifinio SM pašalinimo, BSM suskaidymo ir biodujų susidarymo reikšmės skyrėsi ne daugiau kaip 5 %, galima teigti, kad gautas rezultatas, taikant tiek ultragarso, tiek aukštos įtampos pagrindu veikiančią skaidymo įrangą, yra analogiškas.
7. Bendri kaštai, įvertinantys dumblo skaidymo įrangos įsigijimo kaštus bei 12-os metų elektros energijos kaštus, taikant dumblo skaidymo ultragarsu įrangą (0,99 cnt./kg SM), yra daugiau kaip 6 kartus didesni, nei taikant dumblo skaidymo aušta įtampa įrangą (0,16 cnt./kg SM).

REKOMENDACIJOS

1. Pūdymo procesui įvertinti rekomenduojama taikyti 0,27 g SM pašalinto/g SM pradinio specifinę SM pašalinimo reikšmę, 0,4 g BSM suskaidyto/g BSM pradinio specifinę BSM suskaidymo reikšmę ir 0,23 l/g BSM suskaidyto specifinę biodujų susidarymo reikšmę, jei numatoma pūdyti ultragarsu ar aukšta įtampa skaidytą (atitinkamai ne mažiau kaip 14 elementų ir 6 elementai) dumblą, kurio kiekis ne didesnis nei 300 kg SM/h, SM koncentracija prieš pūdymą yra 5–6 %, BSM kiekis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą – ne mažesnis kaip 72 %, numatoma pūdymo trukmė – ne mažesnė kaip 20 parų, palaikoma temperatūra pūdymo metu – 37 °C ir ChDS koncentracija dumblo vandenyje skaidymo metu padidėja ne mažiau kaip 8,5 karto.
2. Dumblo skaidymo įrangą rekomenduojama taikyti, jei reikia pagerinti biodujų kokybę metano kiekio jose atžvilgiu. Pirmoje rekomendacijoje nurodytomis sąlygomis pūdant skaidytą perteklinį dumblą galima pasiekti iki 72 % metano biodujose koncentraciją.
3. Tyrimų rezultatai parodė, kad, pūdant skaidyto perteklinio dumblo ir neskaidyto pirminio dumblo mišinį, specifinis SM pašalinimo, BSM suskaidymo ir biodujų susidarymo padidėjimas mažėja proporcingai perteklinio dumblo kiekiui dumblo mišinyje. Siekiant gauti kuo didesnę perteklinio dumblo skaidymo poveikio pūdymo procesui rezultatą, rekomenduojama dumblo skaidymo procesą taikyti tais atvejais, kai pūdomas vien tik perteklinis veiklusis dumblas arba jo kiekis dumblo mišinyje sudaro ne mažiau kaip 50 %.
4. Atsižvelgiant į tai, kad laboratorinių tyrimų pagrindu gautas analogiškas pūdymo proceso rezultatas taikant tiek skaidymo ultragarsu, tiek aukšta įtampa įrangą, o bendri kaštai, taikant dumblo skaidymo ultragarsu įrangą, yra daugiau kaip 6 kartus didesni, nei taikant dumblo skaidymo aukšta įtampa įrangą, rekomenduojama taikyti dumblo skaidymo aukšta įtampa įrangą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Appels L., Baeyens J., Degreve J., Dewil R. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science* (2008) 755-781.
2. Atay S., Akbal F. Classification and effects of sludge disintegration technologies integrated into sludge handling units: an overview. *Clean – Soil, Air, Water* (2016) 1198-1213.
3. Bolzonella D., Cavinato C., Fatone F., Pavan P., Cecchi F. High rate mesophilic, thermophilic, and temperature phased anaerobic digestion of waste activated sludge: A pilot scale study. *Journal of Waste management* (2012) 1196-1202.
4. Braguglia C. M., Mininni G., Gianico A. Is sonication effective to improve biogas production and solids reduction in excess sludge digestion? *CNR – Istituto di Riverca Sulle Acque* (2010) 1-6.
5. Carrere H., Dumas C., Battimelli A., Batstone D.J., Delgenes J.P., Steyer J.P, Ferrer I. Pretreatments methods to improve sludge anaerobic degradability: A review. *Journal of Hazardous Materials* (2010) 1-15.
6. Chen Y., Cheng J., Creamer S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. 2007. *Biosource technology* (2007) 4044-4065.
7. Chu L., Yan S., Xing X., Sun X., Jurcik B. Progress and perspectives of sludge ozonation as a powerful pretreatment method for minimization of excess sludge production. *Water research* (2008) 1811-1823.
8. Climent, M., Ferrer, I., Baeza, M., Artola, A., Vazquez, F., Font, X. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. *Chemical engineering journal* (2007) 335-343.
9. Dohanyos M., Zabranska J., Kutil J., Janicek P. Improvement of anaerobic digestion of sludge. *Water Sci. Technol* (2004) 89-96.
10. Erden. G, Filibeli A. Ultrasonic pre-treatment of biological sludge: consequences for disintegration, anaerobic biodegradability, and filterability. *J Chem Technol Biotechnol* (2010) 145-150.
11. Ferrer I., Ponsa S., Vazquez F., Font X. Increasing biogas production by thermal (70°C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion. *Biochemical engineering journal* (2008) 1-7.
12. Fytili D., Zabaniotou A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2008) 116-140.

13. Gerardi M. Wastewater microbiology series. *Wiley-Interscience* (2003) 1-188.
14. Graja S., Chauzy P., Fernandez., Patria L., Cretenot D. Reduction of sludge production from WWTP using thermal pretreatment and enhanced anaerobic methanisation. *Water Sci. Technol* (2005) 263-273.
15. Greene, P. Anaerobic digestion and biogas. *Natural systems utilities* (2014) 1-27.
16. Higgins M.H., Beightol S., Mandahar U., Suzuki R., Xiao S., Lu H.G., Trung Le T., Mah J., Pathak B., De Clippeleir H., Novak J.T., Al-Omari A., Murthy S.N. Pretreatment of a primary and secondary sludge blend at different thermal hydrolysis temperatures: Impacts on anaerobic digestion, dewatering and filtrate characteristics. *Water Res.* 2017; 122: 557-569.
17. Higgins M.H., Beightol S., Mandahar U., Suzuki R., Xiao S., Lu H.G., Trung Le T., Mah J., Pathak B., De Clippeleir H., Novak J.T., Al-Omari A., Murthy S.N. Pretreatment of a primary and secondary sludge blend at different thermal hydrolysis temperatures: Impacts on anaerobic digestion, dewatering and filtrate characteristics. *Water Res.* 2017; 122: 557-569.
18. Horn M.A., Matthies C., Küsel K., Schramm A., Drake H.L. Hydrogenotrophic Methanogenesis by Moderately Acid-Tolerant Methanogens of a Methane-Emitting Acidic Peat, *Appl. Environ. Microbiol.* 2003; 69: 74-83.
19. EN 15934: 2012, Sludge, treated biowaste, soil and waste, Calculation of dry matter fraction after determination of dry residue or water content, CEN, European Committee for Standardization, Rue de Stassart, 36 - B-1050 Bruxelles.
20. Kim J., Park C., Kim T., Lee M., Kim S., Kim S. Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge. *J Biosci Bioeng* (2003)1-5.
21. Krzemieniewski M., Zielinski M., Debowski M. Technology of Electrokinetic Disintegration of Virginia Fanpetals (*Sida hermaphrodita*) Biomass in a Biogas Production System. *International journal of energy and power engineering* (2016).
22. Labatut R.A., Gooch C.A, Monitoring of anaerobic digestion process to optimize performance and prevent system failure. *Department of biological and environmental engineering* (2009) 1-17.
23. Lettinga G, Rebac S, Zeeman G. Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. *Trends in Biotechnology* (2001) 363-370.
24. Loeb, L., Thompson M., Drago J., Takahara H., Baig S. Worldwide ozone capacity for treatment of drinking water and wastewater: a review. *Ozone: Science and engineering: the journal of the international ozone association* (2012) 1-15.

25. Lietuvos standartas LAND 83–2006 „Vandens kokybė. Cheminio deguonies suvartojimo nustatymas“, 2006.
26. Metcalf, Eddy. Wasterwater engineering. Treatment and Reuse, Fourth edition (2003).
27. Mottete, A., Franc, E., Latrille, E., Steyer, E. P., Deleris, S., Vedrenne, F., Carrere, H. Estimating anaerobic biodegradability indicators for waste activated sludge. *Chemical Engineering Journal* (2010) 488-497.
28. Ofverstrom S. Nuotekų dumblo anaerobinio pūdymo proceso gerinimo galimybės. *Structum* (2014) 1-3.
29. Ofverstrom S., Dauknys R., Sapkaitė I. The effect of iron salt on anaerobic digestion and phosphate release to sludge liquor. *Science-future of Lithuania* (2011) 123-127.
30. Onyeche T.I. Economic benefits of low pressure sludge homogenization for wastewater treatment plants. In: IWA specialist conferences. *Moving forward wastewater biosolids sustainability, Moncton, New Brunswick, Canada* (2007) 1-6.
31. Pathak B., De Clippeleir H., Novak J.T., Al-Omari A., Murthy S.N. Pretreatment of a primary and secondary sludge blend at different thermal hydrolysis temperatures: Impacts on anaerobic digestion, dewatering and filtrate characteristics. *Water Res.* 2017; 122: 557-569.
32. Pilli S., Yan S., Tyagi R., D., Surampalli R., Y. Thermal pretreatment of sewage sludge to enhance anaerobic digestion: a review. *Environmental science and technology* (2014) 1-35.
33. Rai C., Rao P. Influence of sludge disintegration by high pressure homogenizer on microbial growth in sewage sludge: an approach for excess sludge reduction. *Clean Techn Environ Policy* (2009) 1-10.
34. Rossel P.E., Lipp J.S., Fredricks H.F., Arnds J., Boetius A., Elvert, M., Hinrichs KU. Intact polar lipids of anaerobic methanotrophic archaea and associated bacteria. *Organ Geochem.* 2008; 39 (8): 992-999.
35. Sapkaite I., Barrado E., Fdz-Polanco F., Perez-Elvira S.I. Optimization of a thermal hydrolysis process for sludge pre-treatment. *J. Environ. Manage.* 2017; 192: 25-30.
36. Smith, J. A., Carliell-Marquet, C. M. 2009. A novel laboratory method to determine the biogas potential of iron-dosed activated sludge. *Bioresource Technology* (2009) 1767-1775.
37. Tyagi V.K., Lo S.L. Application of physico-chemical pretreatment methods to enhance the sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: an up date review. *Rev Environ Sci Biotechnol* (2011) 215-242.

38. Turovskiy I. S., Mathai P. K. Wastewater sludge processing. *Wiley-Interscience* (2006). 349p.
39. Valo A., Carrere H., Delgene J. Thermal, chemical and thermo-chemical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion. *J Chem Technol Biotechnol* (2004) 1197-2005.
40. Van Lier J.B., Tilche A., Ahring B.K., Acarie H., Moletta R., Dohanyos M., Hulshoff Pol L.W., Lens P. and Verstraete W. New perspectives in anaerobic digestion. *Water science and technology* (2001) 1-18.
41. Vesilind P.A. Wastewater Treatment Plant Design. *Water Environment Federation* (2003) 209p.
42. Zielewicz E., Tytla M. Effects of ultrasonic disintegration of excess sludge obtained in disintegrators of different constructions. *Environmental Technology* (2015) 1-8.
43. Zhang Y., Zhang P., Ma B., Wu H., Zhang S., Xu X. Sewage sludge disintegration by highpressure homogenization: A sludge disintegration model. *Journal of environmental sciences* (2011) 814-821.
44. Zhou A., Zhang J., Varrone C., Wen K., Wang G., Liu V., Wang A., Yue X. Process assessment associated to microbial community response provides insight on possible mechanism of waste activated sludge digestion under typical chemical pretreatments. *Energy*. 2017; 37: 457-467.
45. Yang X., Wang X., Wang L. Transferring of components and energy output in industrial
46. sewage sludge disposal by thermal pretreatment and two-phase anaerobic process. *Bioresour. Technol* (2010) 2580-2584.
47. Yuan Q., Baranowski M., Oleszkiewicz J. Effect of sludge type on fermentation products. *Chemosphere*. 2010; **80**: 445-449.
48. Werle S., Wilk R. K. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. *Renewable Energy* (2010) 1914–1919.