



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

VANDENTVARKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Marius Pakalniškis

**DUMBLO TIEKIMO REŽIMO POVEIKIO DUMBLO PŪDymo
PROCESUI TYRIMAS**

**A RESEARCH OF SLUDGE LOADING REGIME IMPACT ON
SLUDGE DIGESTION PROCESS**

BAIGIAMASIS MAGISTRO DARBAS

Vandens ūkio inžinerija studijų programa, valstybinis kodas 621H23001

Statybos inžinerija studijų kryptis

Vilnius, 2017

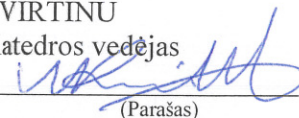
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

VANDENTVARKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas



(Parašas)

Mindaugas Rimeika

(Vardas, pavardė)

2017-06-01

(Data)

Marius Pakalniškis

**DUMBLO TIEKIMO REŽIMO POVEIKIO DUMBLO PŪDymo PROCESUI
TYRIMAS**

**A RESEARCH OF SLUDGE LOADING REGIME IMPACT ON SLUDGE
DIGESTION PROCESS**

Baigiamasis magistro darbas

Vandens ūkio inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H23001

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Regimantas Reutkus  2017-06-01

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. B. Vinkienė 

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

2017-05-30

Vilnius, 2017

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Marius Pakalniškis, 20112309

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Aplinkos inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Vandens ūkio inžinerija, VImf-15

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

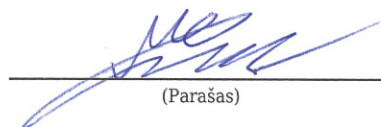
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2017 m. birželio 01 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Dumblo tiekimo režimo poveikio dumblo pūdymo procesui tyrimas“ patvirtintas 2017 m. kovo 17 d. dekanų potvarkiu Nr. 86ap, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas doc. dr. Regimantas Daukyns.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Marius Pakalniškis
(Vardas ir pavardė)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
VANDENTVARKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Statybos inžinerija
Vandens ūkio inžinerija

studijų kryptis
studijų programa, valstybinis kodas 621H23001

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Mindaugas Rimeika

(Vardas, pavardė)

2017-06-01

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

2015-10-27 Nr. 03

Vilnius

Studentui Mariui Pakalniškiui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Dumblo tiekimo režimo poveikio dumblo pūdymo procesui tyrimas

patvirtinta 2017 m. kovo 17 d. dekanų potvarkiu Nr. 86ap.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2017 m. gegužės 30 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Apžvelgti nuotekų dumblo susidarymo šaltinius nuotekų valyklose, dumblo tvarkymo ir stabilizavimo būdus, veiksniai, turinčius įtakos anaerobinio pūdymo procesui, anaerobinio pūdymo įrenginius, biotųjų kokybinius ir technologinius parametrus. Pateikti literatūros apžvalgos apibendrinimą. Pateikti Alytaus, Marijampolės, Šiaulių ir Tauragės miestų dumblo apdorojimo įrenginių technologijų aprašymą. Suformuoti tyrimų metodiką išskeltiems uždaviniams įvykdyti. Atlikti duomenų statistinį apdorojimą, apskaičiuoti technologinius dumblo apdorojimo grandies parametrus. Atlikti miestų valyklų palyginimą pagal pirminio ir perteklinio dumblo kokybę, dumblo mišinio proporcinę sudėtį, aplinkos veiksniai ir technologinius parametrus. Atlikti pūdymo proceso vertinimo analizę pagal dumblo mišinio tiekimo į pūdytuvus režimą. Paanalizuoti parametrų tarpusavio priklausomybes. Pateikti tyrimų rezultatus, išvadas ir rekomendacijas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

lekt. Regina Žukienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas

Regimantas Dauknys
(Parašas)

dr. doc. Regimantas Dauknys

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

Marius Pakalniškis
(Parašas)
Marius Pakalniškis
(Vardas, pavardė)
2016 m. gegužės mėn.
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Aplinkos inžinerijos fakultetas
Vandentvarkos inžinerijos katedra

ISBN _____ ISSN _____
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Vandens ūkio inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas 4

Pavadinimas **Dumblo tiekimo režimo poveikio dumblo pūdymo procesui tyrimas**
Autorius **Marius Pakalniškis**
Vadovas **Regimantas Dauknys**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Anaerobinis dumblo stabilizavimas yra vienas plačiausiai pasaulyje taikomų dumblo apdorojimo būdų. Šio proceso metu ne tik sumažinamas dumblo kiekis (iki 40 %), bet ir pašalinamas nemalonus dumblo kvapas bei patogeniniai mikroorganizmai, susidaro šalutinis produktas – biodujos. Anaerobinio pūdymo proceso efektyvumui turi įtakos įvairūs aplinkos veiksniai ir technologiniai parametrai, vienas jų – dumblo tiekimo režimas. Tyrimu atlikta keturių Lietuvos miestų nuotekų valyklų lyginamoji analizė pagal pirminio ir perteklinio dumblo kokybę, dumblo mišinio proporcinę sudėtį ir aplinkos veiksnius bei technologinius parametrus. Lyginant atrinktų valyklų dumblo pūdyką apibūdinančius rodiklius, nustatyta, kad du kartus trumpesnis dumblo tiekimo į pūdymo grandį ciklas, kai jo metu tiekimo trukmė sudarė 4 h, o pauzė – 2 h, sąlygojo 29 % didesnę BSM dalies SM kiekio atžvilgiu sumažėjimą pūdymo proceso metu bei 8,2 % didesnę metano koncentraciją biodujose.

Prasminiai žodžiai: Anaerobinis pūdykimas, dumblo tiekimo režimas, bepelenių sausų medžiagų suskaidymas, biodujos

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Environmental Engineering
Department of Water Engineering

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

Master Degree Studies **Water Engineering** study programme Master Graduation Thesis 4

Title **A Research of Sludge Loading Regime Impact on Sludge Digestion Process**

Author **Marius Pakalniškis**

Academic supervisor **Regimantas Dauknys**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The anaerobic sludge digestion is widely used method for sludge stabilization. During digestion processes 40 % amount of sludge can be reduced. As a by-product of the stabilization process biogas is produced, unpleasant sludge odour and pathogenic organisms are removed. Anaerobic digestion is affected by environmental factors and technological parameters, like loading regime. The comparable analysis of four Lithuanian WWTP is performed according to quality of primary and excess sludge, proportional content of sludge mixture, as well as environmental and technological parameters. Comparing the indicators characterizing the sludge digestion process of selected WWTPs, it is determined that two time shorter sludge loading regime to the digestion process with 4 hours supply and 2 hours pause stipulated higher reduction of VS as fraction of DS by 29 % and higher concentration of methane in biogas by 8.2 %.

Keywords: Anaerobic digestion, loading regime, VSS destruction, biogas

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	10
ĮVADAS.....	11
1. LITERATŪROS APŽVALGA	12
1.1. Dumblo rūšys ir jo savybės	12
1.1.1. Pirminis dumblas	12
1.1.2. Antrinis dumblas	13
1.2. Dumblo stabilizavimas.....	13
1.2.1. Aerobinis dumblo stabilizavimas	14
1.2.2. Kompostavimas	15
1.2.3. Dumblo stabilizavimas naudojant kalkes	16
1.2.4. Dumblo deginimas.....	17
1.2.5. Anaerobinis dumblo stabilizavimas	17
1.2.5.1. Termofilinis ir mezofilinis dumblo pūdymas	20
1.2.5.2. Anaerobiniam pūdyimo procesui įtakos turintys veiksniai.....	21
1.2.5.3. Anaerobinio pūdyimo įrenginiai	25
1.3. Biodujos	28
1.4. Literatūros apibendrinimas.....	30
2. TYRIMO OBJEKTŲ DUMBLO APDOROJIMO ĮRENGINIAI	32
2.1. Alytaus nuotekų valykla.....	32
2.2. Marijampolės nuotekų valykla	33
2.3. Šiaulių nuotekų valykla.....	35
2.4. Tauragės nuotekų valykla	36
3. TYRIMO METODIKA.....	39
3.1. Tyrimų objektas	39
3.2. Tyrimų uždaviniai	39
3.3. Duomenų surinkimas ir apskaičiavimas.....	40

3.4. Statistinis duomenų apdorojimas	41
3.5. Nuotekų valyklų palyginimas	41
3.6. Kokybinių rodiklių skaičiavimas	43
3.7. Parametrų priklausomybių nustatymas	44
4. REZULTATAI.....	45
4.1. Nuotekų valyklų palyginimas	45
4.1.1. Nuotekų valyklų palyginimas pagal pirminio ir perteklinio dumblo kokybę.....	45
4.1.2. Nuotekų valyklų palyginimas pagal dumblo mišinio proporcinę sudėtį, aplinkos veiksnius ir technologinius parametrus.....	47
4.2. Dumblo pūdymo įrenginių rezultatai	49
4.3. Dumblo pūdymo įrenginių parametrų priklausomybės.....	50
4.3.1. Bepelenių sausų medžiagų pašalinimas pūdymo procese	50
4.3.1. Biodujų susidarymas pūdymo metu	51
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	54
LITERATŪROS SĄRAŠAS	55

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Aerobinio dumblo stabilizavimo schema (Cakir 2005).....	15
2 pav. Anaerobinio dumblo pūdymo proceso etapai (Reith 2003).....	18
3 pav. Optimalios pūdytuvo apkrovos įvertinimas (Deublein 2011)	23
4 pav. pH įtaka karbonatų ir anglies dioksido kiekiui biodujose (Deublein 2011)	23
5 pav. Temperatūros įtaka bakterijų augimo greičiui (Lettinga 2001)	24
6 pav. Žemos apkrovos (a) ir aukštos apkrovos (b) vienalaipsniai anaerobiniai pūdytuvai (Appels 2008).....	26
7 pav. Reaktorių maišymo būdai: (a) recirkuliaciniu siurbliu, (b) plokščiųjų menčių mechanine maišykle, (c) dujų vamzdinis maišymas (Appels 2008).....	27
8 pav. Dvilaipsnio anaerobinio pūdytuvo schema (Appels 2008).....	28
9 pav. Organinės kilmės atliekos, kurias skaidant susidaro biodujos (Abbasi 2012).....	29
10 pav. Principinė Alytaus nuotekų valyklos supaprastinta technologinė dumblo apdorojimo schema.....	32
11 pav. Alytaus nuotekų valyklos pūdytuvai	33
12 pav. Principinė Marijampolės nuotekų valyklos supaprastinta technologinė dumblo apdorojimo schema	34
13 pav. Marijampolės nuotekų valyklos pūdytuvai.....	35
14 pav. Principinė Šiaulių nuotekų valyklos supaprastinta technologinė dumblo apdorojimo schema.....	35
15 pav. Šiaulių nuotekų valyklos pūdytuvai.....	36
16 pav. Principinė Tauragės nuotekų valyklos supaprastinta technologinė dumblo apdorojimo schema.....	37
17 pav. Tauragės nuotekų valyklos pūdytuvai	38
18 pav. Suskaidytų BSM kiekio priklausomybė nuo pūdytuvų apkrovos analizuojamose valyklose	50
19 pav. Biodujų susidarymo priklausomybė nuo patiekto SM kiekio analizuojamose valyklose	51
20 pav. Biodujų susidarymo priklausomybė nuo patiekto BSM kiekio analizuojamose valyklose	51
21 pav. Specifinio biodujų susidarymo priklausomybė nuo pūdytuvų apkrovos analizuojamose valyklose	52

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Skirtingų tipų dumblo parametrų palyginimas (Tyagi ir Lo 2013)	12
2 lentelė. Aerobinio dumblo pūdymo privalumai ir trūkumai (Turovskiy 2006).....	15
3 lentelė. Organinių junginių hidrolizėje naudojami fermentai ir jų substratai.....	19
4 lentelė. Anaerobinio pūdymo privalumai ir trūkumai	20
5 lentelė. Termofilinio ir mezofilinio režimų privalumai ir trūkumai (Gebreyessus 2016) ..	21
6 lentelė. Anaerobiniam pūdymo procesui įtakos turintys veiksniai.....	22
7 lentelė. Dumblo tiekimo režimai analizuojamuose valyklose	39
8 lentelė. Parametrai, kurių duomenys rinkami iš nuotekų valyklų	40
9 lentelė. Biologiniam nuotekų valymui reikšmingi užterštumo rodiklių santykiai	42
10 lentelė. Dumblo proporcinės sudėties, aplinkos veiksnių ir technologinių parametrų lyginamosios reikšmės	42
11 lentelė. Atitekančių nuotekų užterštumo rodiklių imties vidurkiai	45
12 lentelė. Atitekančių nuotekų užterštumo rodiklių santykiai	45
13 lentelė. Atitekančių nuotekų lyginamųjų užterštumo rodiklių santykiai.....	46
14 lentelė. Nuotekų užterštumo rodiklių po pirminio valymo imties vidurkiai	46
15 lentelė. Nuotekų užterštumo rodiklių po pirminio valymo santykiai	47
16 lentelė. Nuotekų lyginamųjų užterštumo rodiklių po pirminio valymo santykių skirtumo reikšmės	47
17 lentelė. Dumblo proporcinės sudėties, aplinkos veiksnių ir technologinių parametrų reikšmės	48
18 lentelė. Dumblo proporcinės sudėties, aplinkos veiksnių ir technologinių parametrų lyginamosios skirtumų reikšmės.....	48
19 lentelė. Dumblo pūdymą Alytaus ir Šiaulių valyklose apibūdinančių rodiklių reikšmės ..	49

IVADAS

Nuotekų dumblas – tai šalutinis produktas, paprastai susidarantis pirminio ir antrinio nuotekų valymo procesuose. Intensyvėjant susidariusio nuotekų dumblo kiekiui jo stabilizavimas tapo viena aktualiausių problemų pasaulyje (Suh 2002). Dėl šios priežasties ieškomos ir taikomos dumblo apdorojimo technologijos, kurios leistų sumažinti dumblo kiekius bei sudarytų galimybę jį panaudoti kitose pramonės bei ūkio šakose (Fytli 2008).

Lietuvoje, kaip ir visame pasaulyje, vienas iš dažniausiai taikomų dumblo apdorojimo būdų yra anaerobinis dumblo stabilizavimas, leidžiantis ne tik iki 40 % sumažinti dumblo kiekį sausų medžiagų atžvilgiu, bet ir išgauti biodujas, sumažinti patogeninių organizmų kiekį, suskaidyti lengvai skaidomas organines medžiagas tokiu būdu panaikinant nemalonių kvapų (Vesilind 2003; Perrez-Elvira 2006). Išgautose biodujose metanas sudaro daugiau negu 55 %, todėl jos laikomos vertingu kuru, kurį galima panaudoti nuotekų valyklose bei už jos ribų, pavyzdžiui, elektros ir šilumos gamybai ar kaip biokurą transportui (Budrys 2006).

Siekiant užtikrinti kuo efektyvesnį dumblo kiekio sumažinimą bei biodujų išgavimą, svarbu išanalizuoti pūdymo procesą bei jam įtaką turinčius veiksnius. Dumblo tiekimo režimas vienas iš pagrindinių faktorių, lemiančių dumblo stabilizavimo proceso efektyvumą. Literatūros analizė rodo, kad dumblo tiekimo režimas yra mažai tyrinėtas faktorius pūdymo procese. Praktikoje naudojami skirtingi dumblo tiekimo režimai, tačiau kuris iš jų optimaliausias nenustatyta, todėl šiuo metu yra aktuali šio parametro optimizavimo paieška.

Tyrimo tikslas – išanalizuoti keturiose Lietuvos nuotekų valyklose taikomą dumblo tiekimo režimą į dumblo pūdymo įrenginius ir, įvertinus galimybę tarpusavyje palyginti valyklas pagal dumblo sudėtį ir jose vykdomo dumblo apdorojimo parametrus, nustatyti kuriuo režimu pūdymo procesas vyksta efektyviausiai.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Dumblo rūšys ir jo savybės

Nuotekų dumblas yra įvairialytis (heterogeninis) mikroorganizmų, organinių ir neorganinių atliekų mišinys (Tyagi ir Lo 2013). Intensyvėjant susidariusio nuotekų dumblo kiekiui jo stabilizavimas tapo viena opiausių problemų pasaulyje (Suh 2002). Dėl šios priežasties šiuo metu pasaulyje iki šiol ieškomos vis naujesnės dumblo apdorojimo technologijos, kurios sumažintų dumblo susidarymo kiekius bei užtikrintų jo tolesnį panaudojimą kitose pramonės bei ūkio šakose (Fytily ir Zabaniotou 2008).

Efektyviam susidariusio dumblo perdirbimui ir jo pašalinimui būtina žinoti jo charakteristines savybes. Dumblas susidaręs nuotekų valymo proceso metu yra skirstomas į pagrindines dvi grupes: pirminį (fiziškai ir/arba chemiškai apdorotas) ir antrinį (biologiškai apdorotas). Kartais išskiriamas ir tretinis dumblo tipas, kuris gaunamas po papildomo organinių medžiagų pašalinimo (Fytily ir Zabaniotou 2008). Skirtingų tipų dumblo parametrai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Skirtingų tipų dumblo parametrų palyginimas (Tyagi ir Lo 2013)

Parametras	Pirminis dumblas	Antrinis dumblas
Sausos medžiagos, SM %	2-7	0.4-1.5
Lakios medžiagos, LM (% SM)	60-80	59-68
Azotas (% SM)	1.5-4	2.4-5.0
Fosforas (% SM)	0.8-2.8	0.5-0.7
Kalio oksidas (K_2O % SM)	0-1	0.5-0.7
Celiuliozė (% SM)	8-15	7-9.7
Geležis (Fe, g/kg)	2-4	-
Silicio dioksidas (SiO_2 % SM)	15-20	-
pH	5.0-8.0	6.5-8.0
Riebalai (% SM)	7-35	5-12
Baltymai (% SM)	20-30	32-41
Šarmingumas (mg/L, pvz. $CaCO_3$)	500-1500	580-1100
Organinės rūgštys (mg/L)	200-2000	1100-1700
Energijos kiekis (kJ/kg SM)	23 000-2900	19 000-23 000

1.1.1. Pirminis dumblas

Pirminiuose valymo įrenginiuose susidaro pirminis dumblas. Tai yra pirminio valymo įrenginiuose susidarantis heterogeninis mišinys sudarytas iš nusėdusių suspenduotų medžiagų, riebalų ir naftos produktų dalelių. Paprastai pirminio dumblo sudėtyje būna nuo 2 % iki 7 % sausų medžiagų, tačiau šis skaičius gali kisti priklausomai nuo naudojamo pirminių

nusodintuvų tipo, konstrukcijos bei dumblo šalinimo įrenginio konstrukcijos. Pagrindiniai cheminiai junginiai įeinantys į pirminio dumblo sudėtį yra riebalai, baltymai, azotas, fosforas, kalio karbonatas, celiuliozė ir silicis (Turovskiy 2006). Pirminio dumblo kiekis perteklinio dumblo atžvilgiu gali būti nuo 10 % iki 70 %, tai priklauso nuo nuotekų valymo proceso (Ofverstrom 2013).

Vienas iš privalumų yra tai, jog susidariusio pirminio dumblo nebūtina tankinti, todėl jis geriausiai tinkamas pūdymui (pūdymo metu sumažinama sausų medžiagų iki 45 %). Lyginant su antriniu dumblu, pirminis dumblas pasižymi didesnėmis riebalų ir baltymų koncentracijomis, tačiau savo sudėtyje turi mažiau angliavandenių. Būtent dėl šios priežasties, vykstant anaerobiniam pirminio dumblo pūdymo procesui, susidaro beveik du kartus daugiau dujų ir mažesnis metano kiekis (Sykes 2003).

1.1.2. Antrinis dumblas

Pastebėta, kad dėl patobulinto nuotekų valymo proceso, pastaruoju metu besivystančių valstybių nuotekų valyklose vis sparčiau didėja gaunami antrinio dumblo kiekiai (Tavares 2002). Antrinis dumblas yra koloidų pavidalo mikroorganizmų visuma. Dažnai literatūroje antrinis dumblas dar vadinamas veikliuoju dumblu. Antrinio dumblo sudėtyje sausų medžiagų kiekis yra nuo 0,4 % iki 1,5 %, o pH reikšmės dažniausiai svyruoja nuo 6,5 iki 8,0. Lyginant su pirminiu dumblu, šiame dumble yra mažesni riebalų ir celiuliozės kiekiai, tačiau randama ženkliai didesnės azoto ir baltymų koncentracijos (Turovskiy 2006).

Veiklusis dumblas kontaktuodamas su nuotekų teršalais, absorbuoja juos, o mikroorganizmai teršalus naudoja savo gyvybinei veiklai vykdyti ir oksiduoja juos iki anglies dvideginio, vandens, nitratų, fosfatų ir kt. (Beržinskienė 1999). Esant veikliojo dumblo pertekliui bioreaktoriuje, mikroorganizmuose sukaupti organiniai teršalai, pašalinami kartu su pertekliniu dumblu. Toks dumblas yra takus ir sunkiai atiduoda drėgmę toliau jį apdorojant dumblo įrenginiuose (Vesilind 2003).

1.2. Dumblo stabilizavimas

Nuotekų dumblas yra puiki medžiaga perdirbimui, kuri gali būti efektyviai naudojama žemės ūkyje ar miškininkystėje, pavyzdžiui, kompostų ir biotrašų gamybai arba miško dirvožemių praturtinimui. Deja, nuotekų dumblo pritaikymą žemės ūkio pramonėje riboja jo sudėtyje esantys pavojingi komponentai: patogeniniai mikroorganizmai, organiniai mikroteršalai, sunkieji metalai.

Dumblo stabilizavimas – tai vyksmas, kai lengvai skaidomos organinės medžiagos (ištirpusios ir skendinčios) paverčiamos mineralinėmis arba lėtai skaidomomis. Stabilizavimo

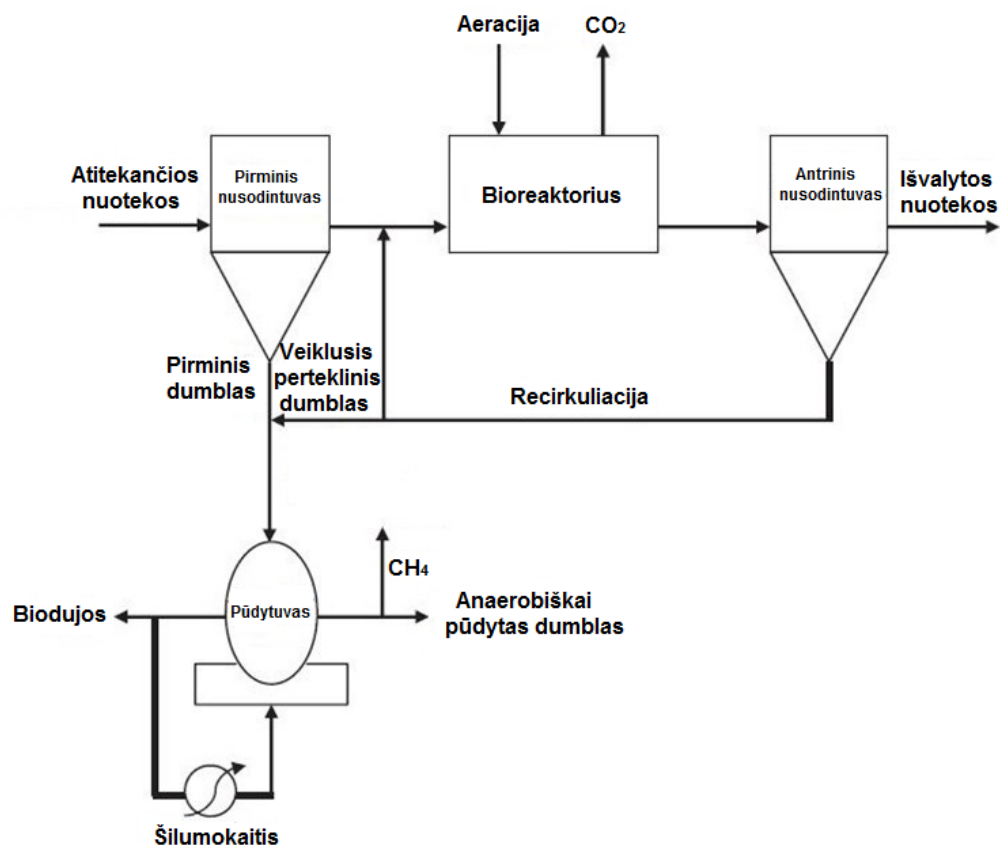
metu sumažinamas dumblo kiekis sausų medžiagų atžvilgiu, patogeninių organizmų kiekis bei suskaidant lengvai skaidomas organines medžiagas panaikinami nemalonūs kvapai. Šiuo metu pasaulyje paplitę dumblo stabilizavimo būdai yra (Vesilind 2003):

- aerobinis stabilizavimas;
- anaeorobinis pūdyimas;
- kompostavimas;
- dumblo stabilizavimas naudojant kalkes;
- dumblo deginimas.

1.2.1. Aerobinis dumblo stabilizavimas

Aerobinio stabilizavimo metu įstančios organinės medžiagos paverčiamos anglies dvideginiu ir vandeniu (Investicinė programa dumblo tvarkymui Lietuvoje 2006). Tai plačiausiai naudojamas dumblo stabilizavimo procesas nuotekų valymo įrenginiuose, kurių našumas mažesnis nei 20000 m³/d (Turovskiy 2006). Šis procesas paremtas organinių junginių oksidacija dalyvaujant mikroorganizmams. Aerobinio stabilizavimo metu reakcijos vyksta uždaruose arba atviruose rezervuaruose, kai į dumblą tiekiamas oras.

Schemoje (1 pav.) pavaizduotas aerobinis dumblo stabilizavimas ir CO₂ išsiskyrimas vykstant biologinei organinių junginių oksidacijai. Aerobinio stabilizavimo proceso metu, priklausomai nuo kietųjų dalelių koncentracijos, atpalaiduojama energija, todėl tai yra egzoterminis procesas. Nuotekų įrenginiuose, ypač ten kur biologiškai šalinamas fosforas ir azotas, aerobinis stabilizavimas atliekamas tiesiog bioreaktoriuose (Cakir 2005).



1 pav. Aerobinio dumblo stabilizavimo schema (Cakir 2005)

Aerobinio pūdymo procesas buvo plačiai taikomas daugelyje šalių, tačiau padidėjus energijos kainoms šis metodas tapo mažiau priimtina. Aerobinio dumblo pūdymo privalumai ir trūkumai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Aerobinio dumblo pūdymo privalumai ir trūkumai (Turovskiy 2006)

Privalumai	Trūkumai
- Lengvai valdomas procesas; - bekvapis galutinis produktas; - bepelenių sausų medžiagų suskaidymas prilygsta anaerobiniam pūdymui.	- Procesas priklausomas nuo temperatūros; - didelės energijos sąnaudos oro tiekimui; - neišgaunamas metanas; - procesas yra priklausomas nuo kietųjų dalelių koncentracijos, dumblo charakteristikų bei maišymo - aeravimo sistemos tipo.

1.2.2. Kompostavimas

Kompostavimas tai biologinis procesas, kurio metu mikroorganizmai ir bestuburiai gyvūnai organines medžiagas (mėšlą, dumblą, lapus, popierių, maisto atliekas ir kt.) paverčia naujos kokybės organika, vadinama kompostu (Eitminavičiūtė 2001). Po dumblo pūdymo,

kompostavimas yra vienas dažniausiai naudojamų procesų, kurio metu efektyviai stabilizuojamas nuotekų dumblas tiek higieniniu, tiek ir biologiniu požiūriu (Mattana 2013).

Organinių atliekų kompostavimas sumažina keliamą pavojų aplinkai, o gauta saugesnė medžiaga yra tinkama tręšti dirvožemiui (Lazcano 2008). Egzoterminės reakcijos metu, vykstant kietų, heterogeninių organinių medžiagų aerobinei oksidacijai, susidaro mineralinės ir stabilios organinės medžiagos. Reakcijos metu taip pat išsiskiria vanduo ir CO₂ dujos. Kompostavimas yra puiki alternatyva dumblo ir kitų rūšių atliekų perdirbimui, o proceso galutinis produktas turi didelę vertę žemės ūkyje (Martins 2016). Pagrindiniai veiksniai turintys įtakos kompostavimo procesui (Eitminavičiūtė 2001):

- deguonis (O₂);
- aeracija;
- maisto medžiagos;
- anglies ir azoto santykis (C/N);
- drėgmė;
- dalelių struktūra;
- pH;
- temperatūra;
- poringumas;
- proceso trukmė.

Kompostavimas gali būti atliekamas rietuvėse, kaupuose arba reaktoriuose. Procesas rietuvėse turi vykti išbetonuotose aikštelėse, įrengiant lietaus bei nuotekų surinkimo sistemą, kad galima būtų išvengti gruntinio vandens bei aplinkos teršimo. Rietuvėse, kurios neturi aktyvios aeracijos, komposto vartymo metu gali susidaryti nemalonūs kvapai.

Kompostavimo kaupuose sistema susideda iš 2,0–2,5 m. aukščio vamzdžių tinklo skirto dumblo filtratui pašalinti ir orui į kaupus tiekti (sistema gali būti ir be oro tiekimo). Kaupų turinio sumaišymas vykdomas specialia technika, o kompostavimo procesas vyksta nuo 30 dienų ir ilgiau.

Kompostavimas reaktoriuose laikomas efektyviausiu ir brangiausiu iš aukščiau minėtų procesų. Visi šio proceso etapai vyksta uždaroje sistemoje, dėl to yra daug lengviau kontroliuoti proceso temperatūrą bei medžiagų išsiskyrimą (Investicinė programa dumblo tvarkymui Lietuvoje 2006).

1.2.3. Dumblo stabilizavimas naudojant kalkes

Maišant dumblą su kalkėmis padidinama vandenilio jonų (pH) koncentracija, tokiu būdu sukeliamos nepalankios sąlygos mikroorganizmų gyvavimui. Priklausomai nuo kalkių dozės ir reakcijos trukmės, vyksta dumblo stabilizacija ir panaikinamas nemalonus kvapas (Samaras 2008). Mažose valyklose su kalkėmis gali būti maišomas skystas dumblas, tačiau ekonomiškėnis sprendimas yra kai kalkės yra įterpiamos į nusausintą dumblą. Reikalinga kalkių dozė apytiksliai apskaičiuojama pagal formulę:

$$D_k = 4,2 + 1,6(SM)$$

čia:

D_k – kalkių dozė, g/l dumblo;

SM – sausų medžiagų kiekis dumble, %.

Dumblui stabilizuoti gali būti naudojamos negesintos ir gesintos kalkės miltų pavidale. Kalkių įterpimui į dumblą yra naudojamos specialios maišyklės, kurių paskirtis yra sumažinti kalkių sąnaudas ir užtikrinti gerą dumblo susimaišymą su kalkėmis, kad reikalinga pH terpė (apie 12–13) būtų pasiekama visame dumblo tūryje. Pagrindinis šio metodo trūkumas yra tas, kad įterpiant kalkes padidėja produkto masė (Matuzevičius, 1996).

1.2.4. Dumblo deginimas

Dumblas gali būti deginamas atskirai arba kartu su kitu kuru, pavyzdžiui komunalinėmis arba gamybinėmis atliekomis (Investicinė programa dumblo tvarkymui Lietuvoje 2006). Vykstant oksidacijai deginamas dumblas paverčiamas į pelenus, o kaip šalutinis produktas išsiskiria anglies dioksidas ir vanduo. Pagrindiniai privalumai taikant šią dumblo apdorojimo technologiją yra esminis dumblo kiekio sumažinimas bei patogeninių bakterijų ir organinių teršalų sunaikinimas. Tai ženkliai sumažina transportavimo kaštus ir taršą, susijusią su dideliu dumblo kiekio transportavimu į galutinio panaudojimo ar deponavimo vietas (Fullana 2004).

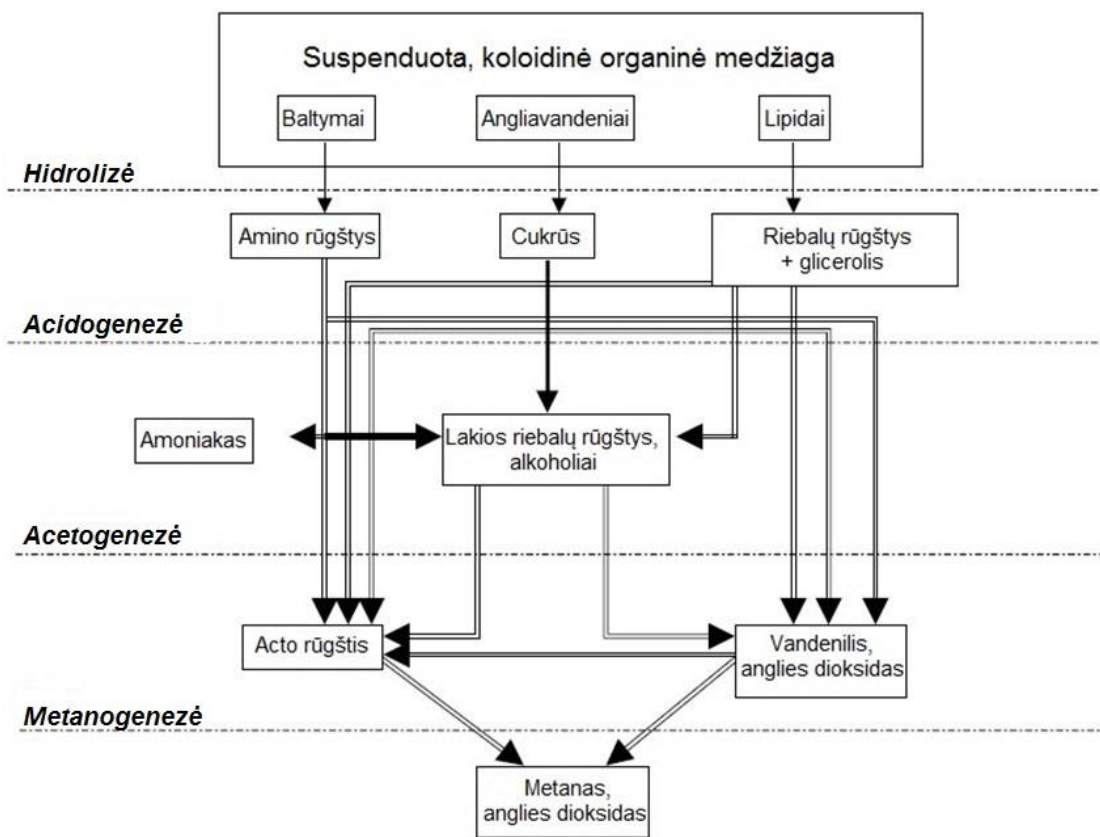
Dumblas deginamas iš karto po sausinimo, arba prieš deginimą dar papildomai džiovinamas. Jei dumblas prieš deginimą nedžiovinamas, degimo procesui palaikyti reikia papildomo kuro. Dumblo džiovinimas prieš deginimą rekomenduojamas didelėse dumblo deginimo įmonėse (Investicinė programa dumblo tvarkymui Lietuvoje 2006).

1.2.5. Anaerobinis dumblo stabilizavimas

Anaerobinis pūdymas tai procesas vykstantis bedeguoninėje aplinkoje, kurio metu veikiant mikroorganizmams suskaidomos biologinės medžiagos. Dėl aktyvios ir sudėtingos mikrobų asociacijos veiklos organiniai junginiai verčiami į anglies dioksidą (CO_2) ir metaną (CH_4) (Wilkie 2005).

Tai vienas iš dažniausiai taikomų dumblo apdorojimo būdų nuotekų valyklose. Apdorojant dumblą anaerobiniu būdu išgaunami biodujų kiekiai (sudėtyje 60–70 % metanas), dumblo kiekis sumažinamas iki 40 % sausų medžiagų, dumblo nebereikia kalkinti bei išsprendžiama blogo kvapo problema (Appels 2008). Siekiant padidinti anaerobinio pūdymo efektyvumą, pavyzdžiui, padidinti biodujų išeigą, sumažinti sausos medžiagos kiekį ir kt., prieš pūdymo procesą, dumblas dažnai paruošiamas fiziniais, cheminiais ar biologiniais

metodais (Perrez-Elvira 2006). Anaerobinis dumblo pūdymo procesas susideda iš keturių etapų: hidrolizės, acidogenezės, acetogenezės ir metanogenezės (2 pav.).



2 pav. Anaerobinio dumblo pūdymo proceso etapai (Reith 2003)

Hidrolizė. Tai pirmasis ir esminis etapas, lemiantis anaerobinio pūdymo efektyvumą. Šiame etape vykdoma biopolimerų (baltymų, lipidų, angliavandenių) hidrolizė, kurios metu organinės medžiagos suskaidomos iki jų monomerinių vienetų. Šis junginių apdorojimas gali būti paremtas fiziniais ir cheminiais metodais (pvz. ekstruzija), tačiau dažniausiai organinių medžiagų skaidymas atliekamas acidogeninių bakterijų ekspresuojamų fermentų pagalba (Reith 2003). Nustatyta, kad hidrolizės reakcijos greitis priklauso nuo skaidomos medžiagos dydžio, paviršiaus ir ant jo esančių adsorbuojamų vietų skaičiaus. Optimali proceso temperatūra nustatoma atsižvelgiant į naudojamo fermento kinetinius parametrus, bakterijų augimui reikalingą temperatūrą ir substrato tirpumą. Skirtingiems junginiams, taikomi skirtingi fermentai (3 lentelė), todėl efektyviai hidrolizei užtikrinti būtina skaidomai medžiagai parinkti tinkamus fermentus (Sanders 2001).

3 lentelė. Organinių junginių hidrolizėje naudojami fermentai ir jų substratai (Sanders 2001)

Organiniai junginiai	Hidrolizuojantys fermentai
Baltymai	Peptidazės (proteinazės, proteazės)
Lipidai	Lipazės
Angliavandeniai	Egzo-gliukanazės, endo-gliukanazės, celobiazės

Acidogenezė. Acidogenezės metu rūgštį gaminančių bakterijų pagalba, hidrolizės metu gauti produktai verčiami į trumposnės grandinės riebiąsias rūgštis: acto, propiono, sviesto ir pieno rūgštis. Taip pat susidaro ir nedidelės vandenilio bei anglies dioksido koncentracijos (Turovskiy 2006). Proceso jautrumas priklauso nuo pH ir temperatūros reikšmių, kurios turi įtakos procese dalyvaujančių fermentų veiklai. Nustatyta, kad acidogenezė efektyvesnė žemesniame pH (4.5–6.3) intervale (Wiese and Konig 2007). Kylant temperatūrai rūgštėja pH, tokiu būdu proporcingai greitėja riebiųjų rūgščių ir alkoholių susidarymo greitis. Acidogenezės metu, optimalaus pH reikšmių diapozono pokyčiui, didelės įtakos turi nuotekų sudėtis bei pasirinkta nuotekų valymo technologija (Yu 2003).

Acetogenezė. Tai trečiasis anaerobinio skaidymo etapas, kurio metu acidogenezės produktai suskaidomi iki acto rūgšties, vandenilio ir anglies dioksido. Išskiriami du šio proceso mechanizmai:

- 1. acetogeninė hidrogenacija;**
- 2. acetogeninė dehidrogenacija.**

Acetogeninės hidrogenacijos metu iš CO₂ ir H₂ pagaminamas acetatas yra vienintelis galutinis šio proceso produktas. Anaerobinio pūdymo metu dažniau naudojama acetogeninė dehidrogenacija, tokiu būdu atliekama fermentinė anaerobinė riebalų rūgščių ilgujų ir trumpųjų grandinių oksidacija. Oksiduotas riebalų rūgštis gali slopinti net silpni daliniai vandenilio slėgiai, todėl jos gali išlikti tik aplinkoje kuri yra simbiozinėje asociacijoje su mikroorganizmais, kurie suvartoja vandenilį (Gavala 2003).

Metanogenezė. Tai paskutinis anaerobinio skaidymo etapas, kurio metu veikiant mikrorganizmams anaerobinėmis sąlygomis iš acetato, vandenilio arba iš anglies dioksido pagaminamas metanas (Abbasi 2012). Šiame procese dalyvauja kelių rūšių bakterijos, kurios naudoja skirtingus biocheminius kelius metanui gaminti (Appels 2008). Metanui išgauti naudojami trys skirtingi biocheminiai būdai (Abbasi 2012):

- **acetotrofinis** ($4\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow 4\text{CO}_2 + 4\text{CH}_4$);
- **hidrogenotrofinis** ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$);
- **metilotrofinis** ($4\text{CH}_3\text{OH} + 6\text{H}_2 \rightarrow 3\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$).

Anaerobinio pūdymo metu naudojami įvairūs pH reikšmių (6.0–8.3) intervalai, tuo tarpu metanogenezė efektyviausiai vyksta esant neutraliam pH. Taip pat labai svarbus parametras šiame etape yra dumblo išbuvimimo trukmė, kuri mezofilinėmis sąlygomis pūdant dumblą yra 15÷20 parų. Nustatyta, jei šio parametro reikšmė per maža - bioreaktoriuje parūgštėja terpės pH ir metanogenezė nevyksta (Reith 2003).

Nors dėl daugelio privalumų anaerobinis pūdydas laikomas populiariausiu dumblo stabilizavimo metodu, deja procesas turi ir trūkumų, galinčių varžyti šio metodo pritaikymą. Anaerobinio pūdymo privalumai ir trūkumai pateikti 4 lentelėje.

4 lentelė. Anaerobinio pūdymo privalumai ir trūkumai (Seng 2009; Monnet 2003, Appels 2008)

Privalumai	Trūkumai
- Proceso metu susidaro biodujos; - dumblo kiekis sumažinamas iki 40 % sausų medžiagų (Seng 2009); - sumažinamas patogeninių organizmų kiekis; - pašalinama apie 80% nemalonaus dumblo kvapo (Monnet 2003).	- Didelės išlaidos dumblo įrenginiams įrengti ir eksploatuoti; - gana lėtas reakcijos greitis; - procesas jautrus įvairiems inhibitoriams; - kitų biodujų sudedamųjų dalių: anglies dioksido (CO_2) ir vandenilio sulfido (H_2S) susidarymas; - padidėjusi sunkiųjų metalų ir įvairių pramoninių atliekų koncentracija dumble sumažina organinių medžiagų skaidymą (Appels 2008).

1.2.5.1. Termofilinis ir mezofilinis dumblo pūdydas

Anaerobinis pūdydas gali būti vykdomas dviem režimais: mezofilinėmis (35–40 °C) arba termofilinėmis (± 55 °C) sąlygomis (Khanal 2008). Šių procesų metu dumblas pūdytuvuose yra periodiškai arba pastoviai maišomas mechaninės maišyklėmis. Maišymas yra būtinas stabiliam pūdymo režimui palaikyti. Rekomenduojamos pūdymo trukmės (Matuzevičius 1996):

- Mezofiliniam režimui - 15÷20 parų,
- Termofiliniam režimui - 7÷10 parų.

Mezofilinis pūdymo procesas, pasižymintis mažesniu energijos kaštų sunaudojimu yra labiau paplitęs dumblo pūdymo būdas. Šio režimo taikymui turi įtakos ir tai, kad jis yra lengviau kontroliuojamas, nes mezofilinės bakterijos nėra tokios jautrios temperatūros pokyčiams. Stabiliam proceso vyksmui užtikrinti rekomenduojama, kad temperatūros pokytis neviršytų ± 1 °C/d. Geriausia, kad temperatūra per dieną nepakistų daugiau nei 0,5 °C/d. Nustatyta, kad, naudojant mezofilinį režimą, proceso metu iš dumblo pašalinama apie 40 % bepelenių sausų medžiagų (Vindis 2009). Kita vertus, daugelis mokslininkų teigia, kad vykdant anaerobinį pūdymą termofiliniu režimu išsiskyrusios biodujos pasižymi geresne kokybe, nei gautos mezofiliniu režimu (Gebreyessus 2016). Palyginimui pagrindiniai anaerobinio pūdymo režimų privalumai ir trūkumai pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Termofilinio ir mezofilinio režimų privalumai ir trūkumai (Gebreyessus 2016)

Privalumai	Trūkumai
MEZOFILINIS REŽIMAS	
- Proceso metu stabilizuojamos organinės medžiagos; - apdorotas dumblas gali būti naudojamas tręšimui; - sumažinamas dumblo kiekis; - procesas lengviau kontroliuojamas; - procesas mažiau jautrus išoriniams veiksniams.	- Didelės investicijos į didelės talpos reaktorius; - sunkieji metalai blokuoja fermentacijos procesą.
TERMOFILINIS REŽIMAS	
- Reakcija vyksta greičiau nei mezofiliniu režimu; - didesnis metano dujų ir mažesnis vandenilio sulfido kiekis biodujų sudėtyje; - trumpesnė išbuvimo trukmė; - nereikalauja didelio tūrio talpos reaktorių; - pašalinamas didesnis patogenų kiekis; - pagerina dumblo dehidratacija; - susidaro mažesnis pūtų kiekis reaktoriuje.	- Reikalauja didelių energijos kaštų; - procesas jautrus temperatūros pokyčiams.

1.2.5.2. Anaerobiniam pūdymo procesui įtakos turintys veiksniai

Anaerobinis pūdymas yra biologinis procesas, kurio efektyvumui įtakos turi įvairūs išoriniai veiksniai. Temperatūra, terpės pH, toksiškumas yra pagrindiniai organinių junginių skaidymą lemiantys parametrai (Reith 2003). Proceso sėkmė taip pat priklauso nuo jame dalyvaujančių fermentų aktyvumo, todėl jų veiklai užtikrinti yra būtini pakankami azoto,

mikroelementų, vandens kiekiai ir parinktos optimalios sąlygos substrato skaidymui (Appels 2008). Literatūroje visi šie veiksniai yra skirstomi į dvi grupes: technologinius parametrus ir aplinkos veiksnius. Žemiau esančioje 6 lentelėje pateikiami visi esminiai parametrai ir veiksniai į kuriuos būtina atsižvelgti norint užtikrinti efektyvų dumblo pūdymo procesą.

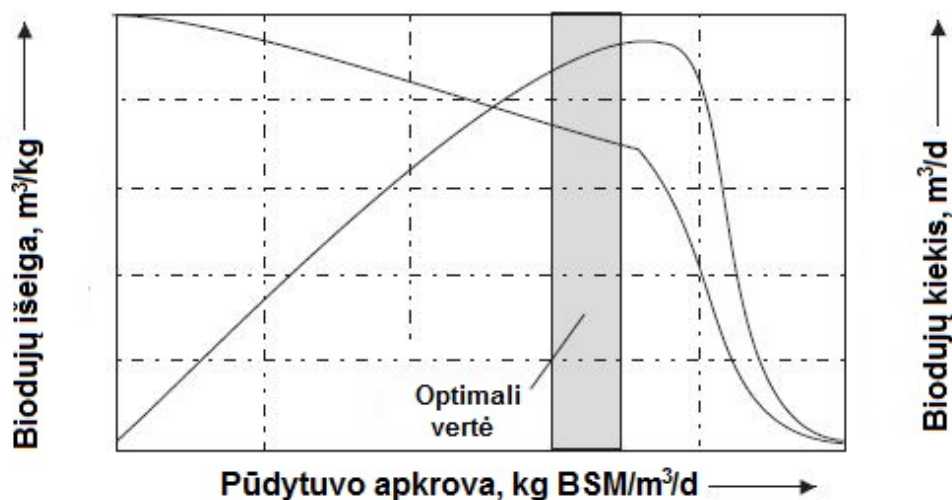
6 lentelė. Anaerobiniam pūdymo procesui įtakos turintys veiksniai (Reith 2003; Appels 2008)

Technologiniai parametrai	Aplinkos veiksniai
- Dumblo tiekimo režimas;	- pH;
- išbuvimo trukmė;	- C/N santykis;
- maišymas;	- toksiškumas;
- koncentracija;	- Redox potencialas;
- pūdytuvo apkrova.	- temperatūra;

C/N santykis. Nustatyta, kad efektyviam anaerobiniam skaidymui optimaliausias anglies ir azoto santykio diapozonas yra 16:1–25:1. Jei C/N santykis viršija 25:1, tada metanogeninės bakterijos sparčiai sunaudoja azotą savo baltymų gamybai, todėl likusi anglis nebegali toliau reaguoti. Jeigu C/N santykis per mažas (<16:1) azotas kaupiasi amoniako pavidalu, tokiu būdu pH reikšmė pakyla virš 8,5 ir sukeliamas toksinis poveikis procese dalyvaujančioms bakterijoms. Siekiant išlaikyti optimalų C/N santykį pūdytuvuose medžiagos turinčios aukštą C/N gali būti sumaišomos su medžiagomis turinčiomis žemą C/N santykį (Ghasimi 2010).

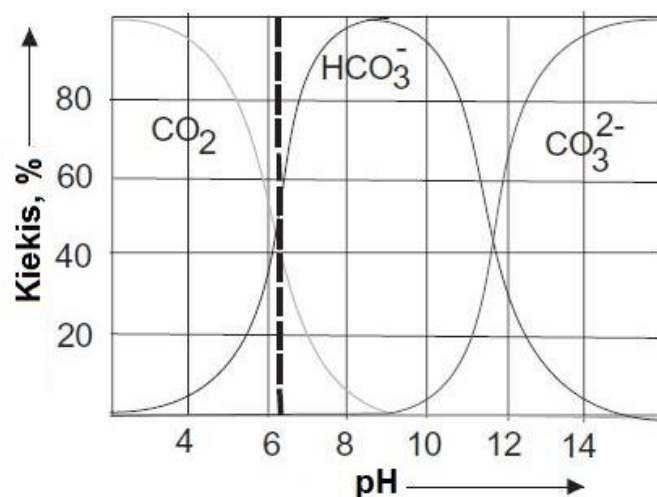
Pūdytuvo apkrova ir koncentracija. Pūdytuvo apkrova priklauso nuo temperatūros, išbuvimo trukmės ir sausų medžiagų kiekio dumble. Išlaidų požiūriu, pūdytuvo apkrova turėtų būti kuo didesnė, tačiau efektyviai biodujų gamybai užtikrinti rekomenduojama naudoti (1–3 kg BSM/m³/d) pūdytuvo apkrovą (3 pav.) (Deublein 2011).

Suspensijos tirštumas apsunkina maišymo procesą, todėl sutrikdomas dujų srautas į bioreaktoriaus paviršių (Abbasi 2012). Nustatyta, kad, optimaliausiu atveju, dumblo koncentracija pūdytuve turėtų svyruoti nuo 4 % iki 9 % (Adekunle 2015). Dujų gamyba ypač sumažėja esant daugiau kaip 12 % bepelenių sausų medžiagų koncentracijai dumble (Deublein 2011).



3 pav. Optimalios pūdytuvo apkrovos įvertinimas (Deublein 2011)

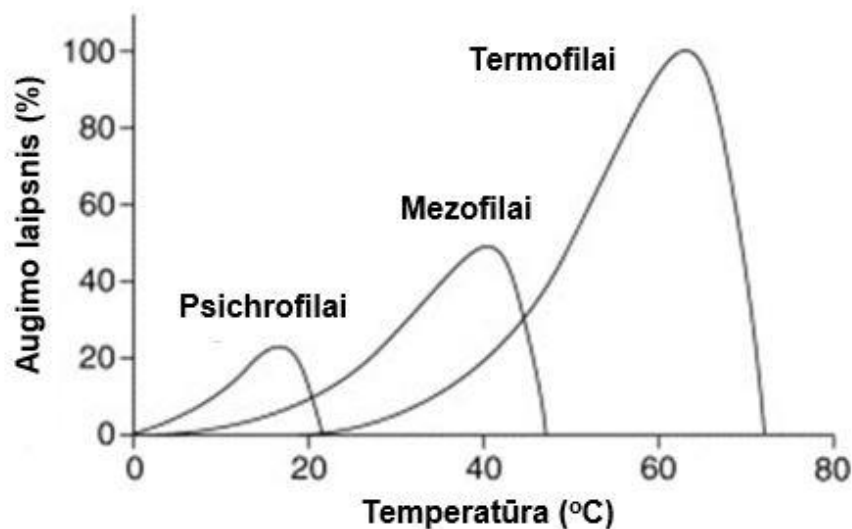
pH. Optimali biodujų gamyba pasiekama 6,7–7,5 pH reikšmių intervale. Anaerobinio skaidymo metu terpės pH kinta: pradinuose etapuose pagaminti dideli organinių rūgščių kiekiai sumažina terpės pH, tačiau tęsiantis procesui padidėja amoniako koncentracija, todėl pH vėl pakyla. Apskritai pH reikšmės kritimas ir proporcingas CO_2 kilimas biodujose yra esminiai anaerobinio skaidymo indikatoriai (Deublein 2011). Kuo aukštesnis terpės pH rodiklis, tuo sistemoje yra didesnė karbonatų koncentracija bei mažesnis anglies dioksido kiekis biodujose (4 pav.). 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 2 g/l. Tokiose situacijose pH mažėjimas gali būti kontroliuojamas pridedant kalkių (Ofverstrom 2009).



4 pav. pH įtaka karbonatų ir anglies dioksido kiekiui biodujose (Deublein 2011)

Temperatūra. Optimali temperatūra nustatoma atsižvelgiant į procese naudojamų bakterijų rūšį. Anaerobiniam pūdymui išskiriamu du temperatūriniai režimai: mezofolinis

(35 ± 2 °C) ir termofilinis (53 ± 2 °C) (Matuzevičius 1996). Didėjant temperatūrai, didėja ir mikroorganizmų aktyvumas (5 pav.). Tačiau pastebėta, jog teršalų skaidymo greitis visiškai sumažėja temperatūrų intervale nuo +40 °C iki +45 °C (Čarkauskaitė 2008).



5 pav. Temperatūros įtaka bakterijų augimo greičiui (Lettinga 2001)

Labai svarbu yra stabilios temperatūros palaikymas, kadangi bakterijos, ypač metano, yra jautrios temperatūros pokyčiams. Temperatūros kitimas gali visiškai sustabdyti pūdymo procesą. Stabiliam procesui rekomenduojama, kad temperatūros pokytis neviršytų ± 1 °C per dieną. Tik esant tinkamai parinktai temperatūrai ir atitinkamai bakterijų rūšiai vyks efektyvus organinių medžiagų skaidymas (Suryawanshi 2010).

Išbuvimo trukmė. Tai organinės medžiagos (substrato) ir mikroorganizmų išbuvimo trukmė pūdytuve, kurios reikia pilnam organinių medžiagų suskaidymui. Hidraulinė išbuvimo trukmė apibūdina skysčio sulaikymo trukmę, o organinių medžiagų išbuvimo trukmė – organinių medžiagų sulaikymo trukmę pūdytuve. Organinių medžiagų išbuvimo trukmė ypač turi įtakos hidrolizės, acidogenezės, metanogenezės reakcijų efektyvumui. Esant per mažai organinių medžiagų išbuvimo trukmei, inhibuojamas procese dalyvaujančių bakterijų augimo greitis, todėl stabilizavimo procesas būna nepakankamai efektyvus. (Aziz 2014). Rekomenduojama projektinė dumblo pūdymo trukmė kai dumblas pūdomas mezofilinėmis sąlygomis yra 15÷20 parų. Ilgesnė, nei teorinė, pūdymo trukmė reikalinga dėl eksploatavimo ypatumų: dumblo apkrovos svyravimų, dumblo maišymo bei šildymo (Turovskiy 2006).

Toksiškumas. Mineralų (natrio, kalio, kalcio, magnio, amonio ir sieros), o ypač lengvųjų metalų jonai (vario, nikelio, chromo, cinko, švino) bei įvairūs detergentai (muilas, antibiotikai, organiniai tirpikliai) yra esminiai elementai trikdančys normalų bakterijų augimą pūdytuve (Chen 2008). Maži mineralų ir lengvųjų metalų kiekai yra reikalingi

mikroorganizmo augimo stimuliavimui, tačiau didelė šių elementų koncentracija augimą veikia neigiamai ir sukelia toksinį poveikį (Abbasi 2012). Pavyzdžiui, amonio sulfato koncentracija neturėtų viršyti 1000 mg/l, tuo tarpu, sulfidų koncentracija turi būti mažesnė nei 200 mg/l, kad nepasirūmėtų toksiniu poveikiu proceso efektyvumui (Turovskiy 2006).

Maišymas. Maišymas yra reikalingas skysčių homogeniškumui palaikyti, o tai lemia proceso stabilumą pūdytuve. Maišymo tikslas yra susieti pūdomą medžiagą su bakterijomis, sustabdyti putų formavimąsi ir išvengti ryškaus temperatūros gradiento viso proceso metu (Abbasi 2012).

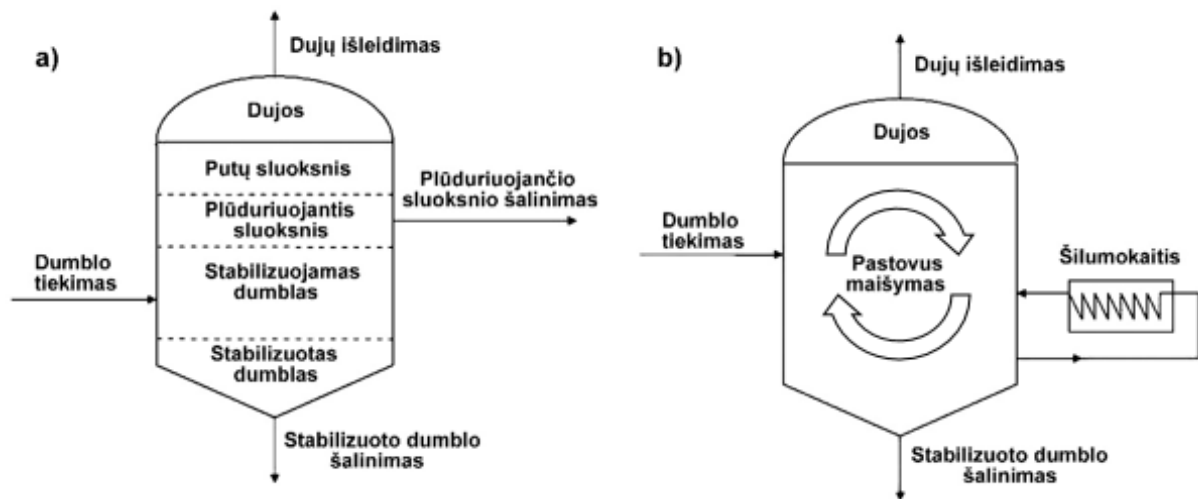
Redox potencialas. Organinių mikroteršėjų irimas biologinio skaidymo metu yra specifinis ir priklauso nuo biomasės sudėties bei redukcinių – oksidacinių sąlygų. Redox potencialas – tai parametras, dar kitaip apibūdinamas kaip dumblo pūdymo aplinkos sąlyga, nuo kurios tiesiogiai yra priklausomas acetogenezės procesas. Kitaip tariant jis apibūdina tiriamos medžiagos pajėgumą prisijungti arba atiduoti elektronus (Falås 2013). Biodujų gamyba yra efektyviausia tuomet, kai redukcijos - oksidacijos potencialo reikšmės svyruoja nuo -300 iki -330 mV (Deublein 2011). Redox potencialo pokytis 10 mV per parą gali reikšti sistemos sutrikimą, kuris matomai gali pasireikšti tik po dviejų savaičių (Wiese ir Konig 2007).

Tiekimo režimas. Tai ypač svarbus technologinis procesas, kuris turi įtakos pūdymo proceso efektyvumui. Dumblas turėtų būti tiekiamas tolygiai arba reguliariais intervalais. Tolygus arba pusiau tolygus dumblo tiekimas skatina stabilų pūdytuvo darbą (Turovskiy 2006). Tiekiant dumblą su pertrūkiais arba vieną kartą per dieną ir rečiau yra sukeliama sudėties bei koncentracijos svyravimai (Appels 2008).

1.2.5.3. Anaerobinio pūdymo įrenginiai

Pagal fizikines savybes ir veikimo principą anaerobiniai pūdytuvai yra skirstomi į vienalaipsnius ir dvilaipsnius anaerobinius reaktorius. Tinkamo anaerobinio pūdytuvo dydžio parinkimas iš esmės priklauso nuo dumblo išbuvimo trukmės reaktoriuje. (Appels 2008).

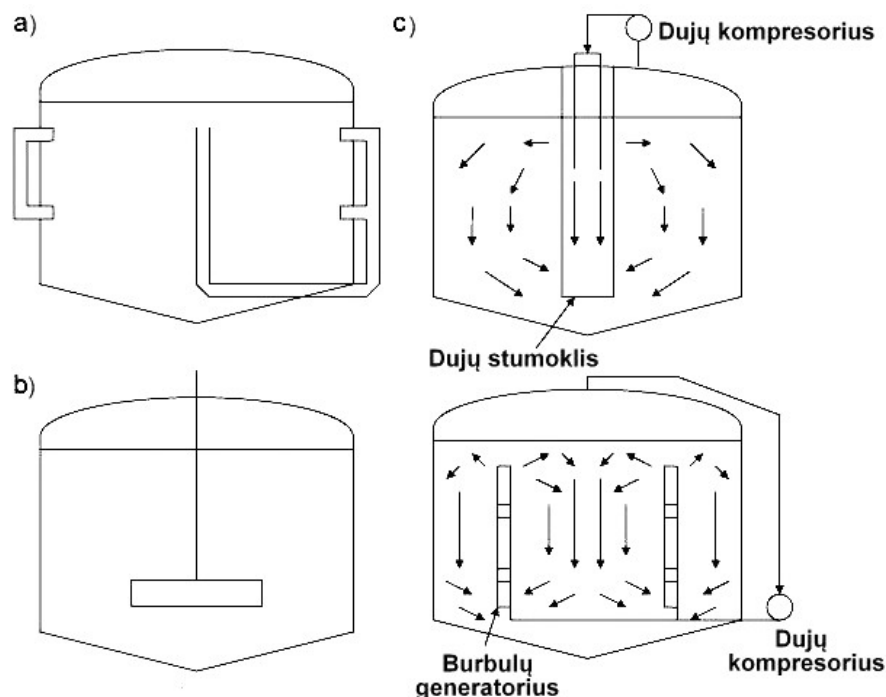
Vienalaipsniai anaerobiniai pūdytuvai. Išskiriamos dvi šių reaktorių grupės: žemos apkrovos ir aukštos apkrovos vienalaipsniai anaerobiniai pūdytuvai (6 pav.).



6 pav. Žemos apkrovos (a) ir aukštos apkrovos (b) vienalaipsniai anaerobiniai pūdytuvai (Appels 2008)

Žemos apkrovos reaktoriai yra paprasčiausio tipo ir rečiausiai naudojami pūdytuvai. Anaerobinio pūdymo procesas šiuose įrenginiuose trunka apie 30–60 parų kadangi dumblas juose nėra nei maišomas, nei šildomas. Nežymus dumбло maišymasis vyksta tik dujų recirkuliacijos pagalba. Dėl silpno maišymo pūdytuve dumblas susisluoksniuoja į keturis sluoksnius: putų, plūduriuojančio dumбло, stabilizuojamo dumбло ir stabilizuoto dumбло sluoksnius (6 pav., a). Stabilizuotas dumblas iš reaktoriaus dugno yra šalinamas periodiškai, o plūduriuojančio dumбло sluoksnis yra šalinamas atskirai ir grąžinamas į nuotekų valymo įrenginius, tam kad būtų kuo mažesnis aktyviojo dumбло nuostolis (Appels 2008).

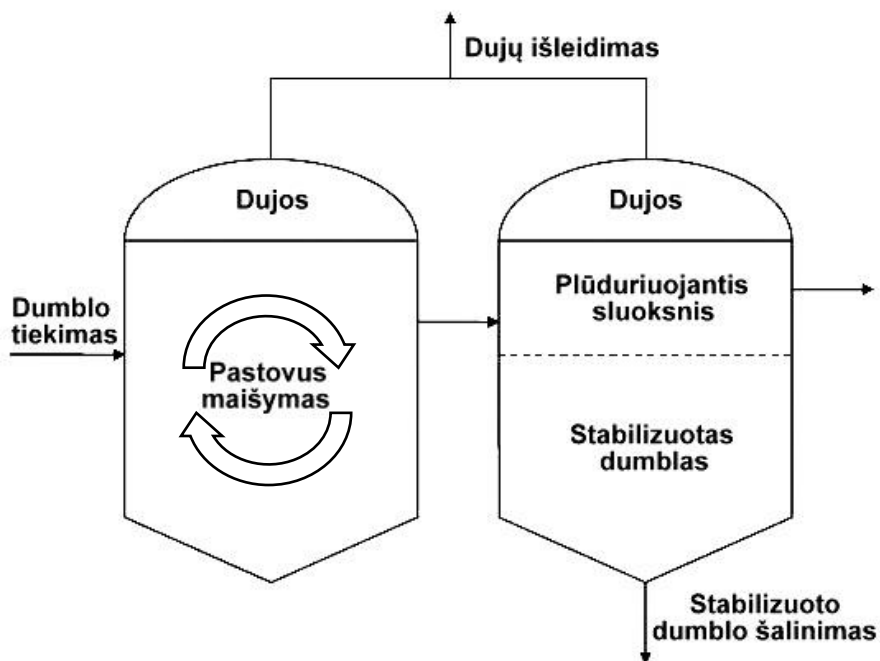
Aukštos apkrovos anaerobiniuose pūdytuvuose dumblas yra nuolat maišomas (6 pav., b). Maišymas užtikrina tolygų dumбло stabilizavimo procesą visame bioreaktoriuje: palaikoma vienoda temperatūra, neleidžiama dumblui nusėsti ant dugno, apsaugo nuo skysto dumбло ir putų sluoksnio susidarymo paviršiuje. Maišymas gali būti mechaninis arba atliekamas dujų pagalba (7 pav.). Dujomis maišoma tiekiant jas per difuzorius, dujinius filtrus ar dujinius vožtuvus, o mechaninis maišymas atliekamas mechaninių maišyklių ar siurblių pagalba (Turovskiy 2006).



7 pav. Reaktorių maišymo būdai: (a) recirkuliaciniu siurbliu, (b) plokščiųjų menčių mechanine maišykle, (c) dujų vamzdinis maišymas (Appels 2008)

Aukštos apkrovos vienalaipsniuose pūdytuvuose dumbliui šildyti yra naudojami išoriniai šilumokaičiai. Pastovus bei nuolatinis dumblo maišymas ir šildymas, sudaro ypač palankias pūdymo sąlygas, dėl šios priežasties sumažėja projektuojamo pūdytuvo tūris, pagerinamas proceso stabilumas ir efektyvumas. Tokio tipo pūdytuvai gali būti projektuojami mezofiliniui arba termofiliniui režimui palaikyti (Appels 2008).

Dvilaipsniai pūdytuvai. Dviejų laipsnių pūdytuvai yra sudaryti iš dviejų, tarpusavyje susietų talpų (8 pav.). Pirmasis reaktorius naudojamas dumblo pūdymui, o antrinis pūdytuvas atlieka kaupimo funkciją, todėl šioje talpoje dumblas nėra nei maišomas, nei šildomas (Appels 2008). Kartais pirminis ir antrinis pūdytuvai yra tokios pačios konstrukcijos, kiekvienas su maišymo ir šildymo įrenginiais. Tokio tipo reaktoriuose dumblo pūdymas gali vykti kitokiu principu: du pūdytuvai yra suprojektuoti taip, kad būtų galima atskirti du pagrindinius anaerobinio pūdymo etapus - acetogenezę ir metanogenezę. Šiuose dvilaipsniuose pūdytuvuose pirmosios dvi fazės (hidrolizė ir acetogenezė) vyksta pirminiame pūdytuve, o metanogenezė antriniame. Dauguma tyrimų parodė, kad taip atskiriant pūdymo fazes stipriai optimizuojamas pūdymo procesas (Vesilind 2003).

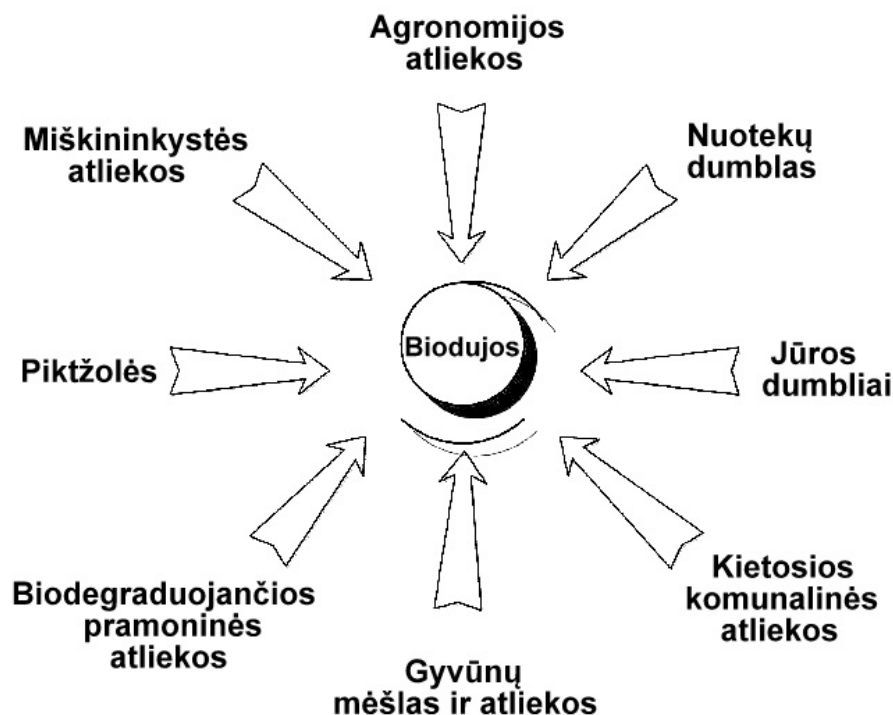


8 pav. Dvilaipsnio anaerobinio pūdytuvo schema (Appels 2008)

Praeityje šie pūdytuvai buvo gana populiarūs, tačiau dėl brangių statybos kaštų didelėms talpoms ir sudėtingo proceso valdymo šiuolaikiniuose nuotekų valymo įrenginiuose jie nebenaudojami (Appels 2008).

1.3. Biodujos

Biodujos yra atsinaujinantis energijos šaltinis, kurį galima gaminti iš visų organinės kilmės atliekų (9 pav.). Tai mišinys, kurio pagrindiniai komponentai yra metano (65–70 %) ir CO₂ (30–35 %) dujos, taip pat aptinkami nežymūs CO, N₂, O₂ ir H₂S kiekiai (Appels 2008). Biodujų kaloringumas yra 35,865 MJ/Nm³, kai metano koncentracija siekia 65 % (Water treatment handbook 2007). Tuo tarpu gamtinių dujų kaloringumas yra 38,0 MJ/Nm³, taigi biodujų kaloringumas yra labai artimas gamtinių dujų kaloringumui. Nors nuo gamtinių dujų, biodujų sudėtis skiriasi metano ir anglies dvideginio kiekiu, tačiau tinkamai apdorotos jos gali būti naudojamos ten, kur ir gamtinės dujos (Monnet 2003).



9 pav. Organinės kilmės atliekos, kurias skaidant susidaro biodujos (Abbasi 2012)

Nuotekų valymas yra veiklos sritis, kurioje sudaromos itin geros sąlygos biodujoms gaminti. Į miesto valymo įrenginius su nuotekomis patenka daug organinių medžiagų, kurios nuotekų valymo proceso metu susikaupia dumble. Priklausomai nuo nuotekų sudėties, biodujų sudėtis gali skirtis (Monnet 2003). Pūdymo metu iš suskaidyto 1 kg organinių bepelelių skendinčiųjų medžiagų išsiskiria 0,75–1,12 m³ biodujų, kurių kiekis svyruoja, priklausomai nuo organinių medžiagų kiekio ir biologinio metaninių bakterijų aktyvumo pūdytuve. Biodujų energinė vertė tiesiogiai susijusi su metano koncentracija. Esant metano daugiau negu 55 %, biodujos laikomos vertingu kuru (Budrys 2006).

Biodujos gali būti naudojamos neapdorotos arba papildomai apdorotos, pagerinant jų savybes (Holm-Nielsen 2009). Pavyzdžiui, anaerobinio proceso metu susidariusias biodujas galima realizuoti tiesiogiai, kaip gamtinių dujų pakaitalą, tačiau prieš jas naudojant reikalingas tinkamas jų išvalymas. Taip pat susidariusios biodujos gali būti naudojamos kaip kuras kūrenti katilams ir gaminti šiluminę energiją, tačiau naudojant biodujas šiai paskirčiai, iš jų turi būti pašalintas sieros vandenilis, dėl kurio gali prasidėti katilų korozija (Monnet 2003). Nustatyta, kad didesnis nei 300–500 ppm H₂S kiekis biodujose ženkliai sumažina energijos konversijos efektyvumą, todėl šiuolaikiniuose biologinio valymo įrenginiuose sieros vandenilio kiekis yra sumažinamas iki 100 ppm ir mažiau. Tai atliekama taikant

biologinį nusierinimo metodą, naudojant aktyviąją anglį. Sieros vandenilio pašalinimo efektyvumas siekia apie 94 %. (Holm-Nielsen 2009). Plačiausiai taikomi biodujų panaudojimo būdai (Persson 2006):

- šilumos gamybai;
- kombinuotos elektros ir šilumos energijos gamybai;
- biokuras transportui;
- cheminių preparatų ir/arba baltymų gamybai.

1.4. Literatūros apibendrinimas

- Nuotekų dumblas – tai šalutinis produktas, paprastai susidarantis pirminio ir antrinio nuotekų valymo procesuose. Viena aktualiausių šių dienų problemų yra vis didėjantys susidarančio dumblo kiekiai. Dėl šios priežasties ieškomos ir taikomos dumblo apdorojimo technologijos, kurios leistų sumažinti dumblo kiekius bei sudarytų galimybę jį panaudoti kitose pramonės bei ūkio šakose.

- Vienas iš dažniausiai taikomų dumblo apdorojimo būdų yra anaerobinis dumblo stabilizavimas. Apdorojant dumblą anaerobiniu būdu išgaunamos biodujos, kuriose metano kiekis svyruoja tarp 60–70 %, dumblo kiekis sumažinamas iki 40 % sausų medžiagų, išsprendžiama blogo kvapo problema.

- Anaerobinio pūdymo metu iš suskaidyto 1 kg organinių bepelenių sausų medžiagų išsiskiria 0,75–1,12 m³ biodujų.

- Anaerobinio pūdymo proceso efektyvumui ir biodujų kiekio susidarymui turi įtakos įvairūs aplinkos veiksniai:

- Optimali temperatūra nustatoma atsižvelgiant į procese naudojamų bakterijų rūšį. Išskiriami du temperatūriniai režimai: mezofilinis (35±2 °C) ir termofilinis (53±2 °C).

- Optimali biodujų gamyba pasiekama 6,7–7,5 pH reikšmių intervale.

- Mineralai, lengvųjų metalų jonai ir detergentai trikdo normalų bakterijų augimą pūdytuve. Pavyzdžiui, amonio sulfato koncentracija neturėtų viršyti 1000 mg/l, tuo tarpu, sulfidų koncentracija turėtų būti mažesnė nei 200 mg/l.

- Biodujų gamyba yra efektyviausia tuomet, kai redukcijos–oksidacijos potencialo reikšmės svyruoja nuo -300 iki -330 mV.

- Norint užtikrinti efektyvų anaerobinį pūdymo procesą, būtina atsižvelgti ir į technologinius parametrus:

- Rekomenduojama dumblo pūdymo trukmė, kai dumblas pūdomas mezofilinėmis sąlygomis, nemažesnė nei 15÷20 parų.

- Efektyviai biodujų gamybai užtikrinti rekomenduojama naudoti 1–3 kg BSM/m³/d pūdytuvo apkrovą.
- Optimaliausiu atveju, dumblo koncentracija pūdytuve turėtų svyruoti nuo 4 % SM iki 9 % SM.
- Literatūros analizė parodė, jog visi anksčiau aprašyti technologiniai parametrai jau yra tyrinėti ir nustatytos jų rekomenduojamos reikšmės. Dumblo tiekimo režimas taip pat yra svarbus technologinis parametras. Literatūroje teigiama, kad dumblas turi būti tiekimas tolygiai arba reguliariais intervalais. Kadangi išsamiau tiekimo parametrai nėra tyrinėti, šiuo darbu siekiama išanalizuoti dumblo tiekimo režimo turi įtaką dumblo pūdymo proceso efektyvumui.

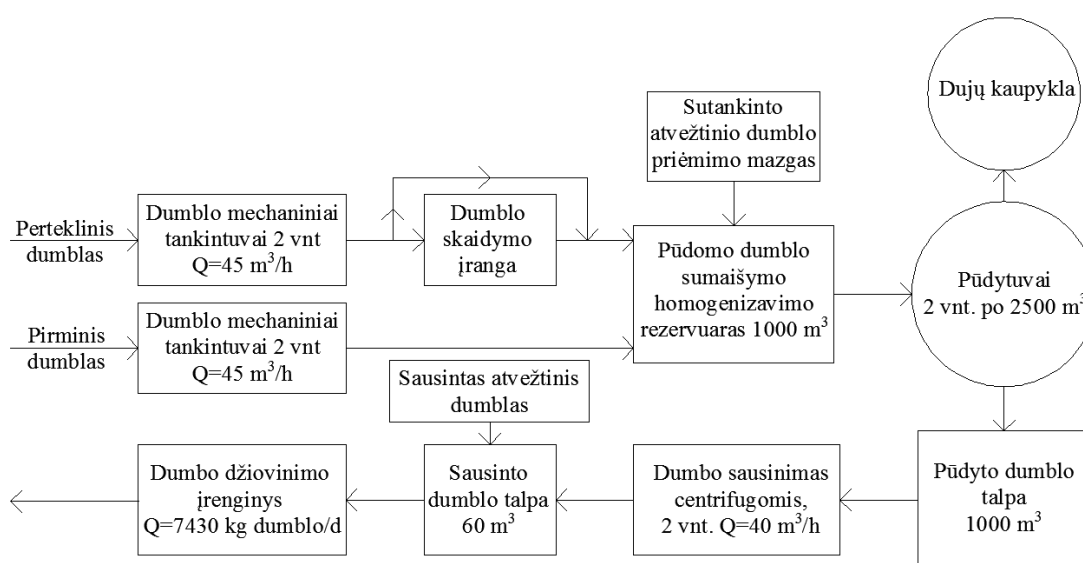
2. TYRIMO OBJEKTŲ DUMBLO APDOROJIMO ĮRENGINIAI

2.1. Alytaus nuotekų valykla

Alytaus miesto dumblo apdorojimo įrenginiai susideda iš šių dalių:

- Pirminio ir perteklinio dumblo tirštinimas;
- perteklinio tankinto dumblo skaidymas;
- dumblo mišinio pūdymas;
- dumblo mišinio sausinimas;
- dumblo mišinio džiovinimas.

Principinė Alytaus nuotekų valyklos dumblo apdorojimo įrenginių schema pagal projektinius duomenis pateikta 10 pav.



10 pav. Principinė Alytaus nuotekų valyklos supaprastinta technologinė dumblo apdorojimo schema (sudaryta autoriaus, duomenys iš UAB „Dzūkijos vandenys“)

Pirminis ir perteklinis dumblas iš nuotekų valymo grandies sutankinamas mechaniniais (būgniniais) tankintuvais. Šiam tikslui įrengta po du įrenginius kiekvienai linijai.

Perteklinis dumblas po tirštinimo tiekiamas į mechaninius aukšto slėgio homogenizavimo įrengimus. Apdorotas dumblas po homogenizavimo nukreipiamas į dumblo sumaišymo rezervuarą į kurį tiekimas ir pirminis tankintas dumblas. Įrengta homogenizavimo įrenginių apėjimo linija, leidžianti tirštiną perteklinį dumblą nukreipti tiesiai į sumaišymo rezervuarą.

Prieš patiekiant dumblo mišinį į pūdymą, skaidytas perteklinis, sutankintas pirminis ir sutankintas atvežtinis dumblas maišomas bendroje talpoje, kurios talpa 1000 m³. Iš šios talpos dumblo mišinys siurblių pagalba tiekiamas 4 valandas su 8 valandų pertrauka į du pūdytuvus.

Pūdytuvuose dumblas pūdomas anaerobinėmis sąlygomis, palaikant mezofilinį režimą. Pastovi dumblo 36 ± 1 °C temperatūra palaikoma šilumokaičio pagalba. Dumblas pūdomas dviejuose pūdytuvuose (11 pav.), abiejų pūdytuvų bendras darbinis tūris – 5000 m³. Įrenginiuose sumontuotos maišyklės, kurios užtikrina efektyvų dumblo maišymą. Pūdytuvuose organinių medžiagų skaidymo metu susidaro biudujos: metanas, anglies dvideginis, sieros vandenilis. Susidariusios dujos nuvedamos į dujų kaupimo talpą.

Iš pūdytuvų pūdytas dumblas siurblių pagalba nukreipiamas į pūdyto dumblo talpą, iš kurios dumblas tiekiamas į dumblo sausinimą. Dumblas Alytaus nuotekų valykloje sausinamas dviejose centrifugose. Nsausintas dumblas nukreipiamas į tarpinę talpą, kurioje sumaišomas su atvežtiniu sausintu dumblu. Iš tarpinės sausinto dumblo talpos dumblas tiekimas į džiovyklą. Proceso metu susidaro galutinis produktas - dumblo granulės, kurios uždaro tipo transporteriu transportuojamos į džiovinto dumblo bunkerį.



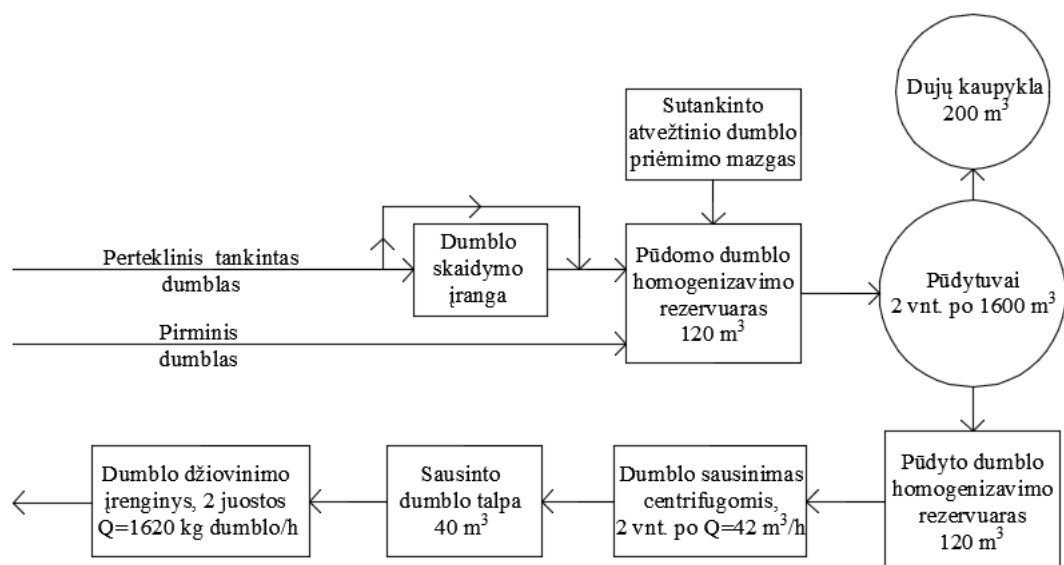
11 pav. Alytaus nuotekų valyklos pūdytuvai (nuotrauka iš asmeninio archyvo)

2.2. Marijampolės nuotekų valykla

Marijampolės miesto dumblo apdorojimo įrenginiai susideda iš šių dalių:

- Perteklinio dumblo tirštinimas;
- perteklinio tankinto dumblo skaidymas;
- dumblo mišinio (pirminio ir perteklinio) pūdymas;
- dumblo mišinio sausinimas;
- dumblo mišinio džiovinimas.

Principinė Marijampolės nuotekų valyklos dumblo apdorojimo įrenginių schema pagal projektinius duomenis pateikta 12 pav.



12 pav. Principinė Marijampolės nuotekų valyklos supaprastinta technologinė dumblo apdorojimo schema (sudaryta autoriaus, duomenys iš UAB „Sūduvos vandenys“)

Valykloje susidaręs pirminis dumblas talpinamas tarpinėje talpoje kartu su tankintu atvežtiniu dumblu bei su tankintu ir skaidytu pertekliniu dumblu. Perteklinis dumblas tankinamas naudojant mechaninius dumblo tankintuvus arba vieną dumblo centrifugą. Iš tarpinės talpos dumblo mišinys tiekiamas 24 valandas per parą į du pūdytuvus.

Pūdytuvuose dumblas pūdomas anaerobinėmis sąlygomis, palaikant mezofilinį režimą. Pastovi dumblo 36 ± 1 °C temperatūra palaikoma šilumokaičio pagalba. Dumblas pūdomas dviejuose pūdytuvuose (13 pav.), abiejų pūdytuvų bendras darbinis tūris – 3200 m³. Įrenginiuose sumontuotos maišyklės, kurios užtikrina efektyvų dumblo maišymą. Pūdytuvuose organinių medžiagų skaidymo metu susidaro biodujos: metanas, anglies dvideginis, sieros vandenilis. Susidariusios dujos nuvedamos į dujų kaupimo talpą. Pūdytas dumblas iš pūdytuvų šalinamas savitaka.

Iš pūdytuvų dumblas patenka į tarpinę talpą, kurioje įrengta panardinama mechaninė maišyklė, neleidžianti dumblui nusėsti ant talpos dugno. Iš tarpinės talpos dumblas transportuojamas į dumblo sausinimą. Dumblas Marijampolės nuotekų valykloje sausinamas dviejose centrifugose, iš kurių viena yra darbinė, kita - atsarginė. Nusausintas dumblas patenka į sausinto dumblo talpą, kurioje taip pat kaupiamas atvežtinis sausintas dumblas iš kitų valyklų. Čia bendras dumblas susimaišo ir nepertraukiamai transportuojamas į dumblo džiovyklą. Nuotekų valykloje dumblas džiovinamas dviejų juostų džiovykla, kurioje susidaro galutinis produktas - džiovinto dumblo granulės.



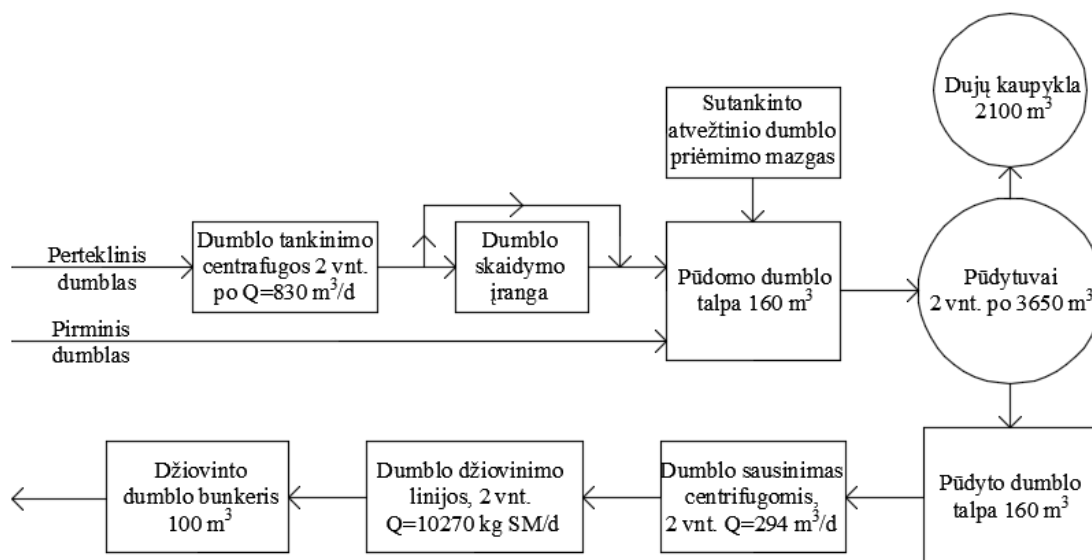
13 pav. Marijampolės nuotekų valyklos pūdytuvai (nuotrauka iš asmeninio archyvo)

2.3. Šiaulių nuotekų valykla

Šiaulių miesto dumblo apdorojimo įrenginiai susideda iš šių dalių:

- Perteklinio dumblo tirštinimas;
- perteklinio tankinto dumblo skaidymas;
- dumblo mišinio (pirminio ir perteklinio) pūdymas;
- dumblo mišinio sausinimas;
- dumblo mišinio džiovinimas.

Principinė Šiaulių nuotekų valyklos dumblo apdorojimo įrenginių schema, pagal projektinius duomenis, pateikta 14 pav.



14 pav. Principinė Šiaulių nuotekų valyklos supaprastinta technologinė dumblo apdorojimo schema (sudaryta autoriaus, duomenys iš UAB „Šiaulių vandenys“)

Perteklinis dumblas iš nuotekų valymo grandies mechaniškai sutankinamas centrifugose. Dumblo tirštinimo centrifugų stotį sudaro dvi centrifugos, kurių kiekvienos našumas 75 % bendro susidarancio perteklinio dumblo kiekio.

Sutirštintas dumblas paduodamas į dumblo dezintegracijos mazgą, kur dumblas yra skaidomas. Dumblo dezintegracija yra elektrinė sistema ir veikia pagal elektrokinetinius principus, kai vamzdynų sistemoje, pro kurią yra leidžiamas dumblas, keleto aukštos įtampos generatorių yra sugeneruojami elektros laukai.

Prieš patiekiant dumblo mišinį į pūdymą, skaidytas perteklinis, pirminis ir sutankintas atvežtinis dumblas maišomas bendroje talpoje, kurios talpa 160 m³. Iš šios talpos dumblo mišinys siurblių pagalba tiekiamas 4 valandas su 2 valandų pertrauka į du pūdytuvus.

Pūdytuvuose dumblas pūdomas anaerobinėmis sąlygomis, palaikant mezofilinį režimą. Pastovi dumblo 37±1 °C temperatūra palaikoma šilumokaičio pagalba. Dumblas pūdomas dviejuose pūdytuvuose (15 pav.), abiejų pūdytuvų bendras darbinis tūris – 7300 m³. Įrenginiuose sumontuotos maišyklės, kurios užtikrina efektyvų dumblo maišymą. Pūdytuvuose organinių medžiagų skaidymo metu susidaro biodujos: metanas, anglies dvideginis, sieros vandenilis. Susidariusios dujos nuvedamos į dujų kaupimo talpą.

Iš pūdytuvų pūdytas dumblas siurblių pagalba nukreipiamas į pūdyto dumblo talpą, iš kurios dumblas tiekiamas į dumblo sausinimą. Dumblas Šiaulių nuotekų valykloje sausinamas dviejose centrifugose. Nusausintas dumblas nukreipiamas į džiovinimą. Proceso metu susidaro galutinis produktas dumblo granulės, kurios transportuojamos konvejeriais į džiovinto dumblo bunkerį.



15 pav. Šiaulių nuotekų valyklos pūdytuvai (nuotrauka iš asmeninio archyvo)

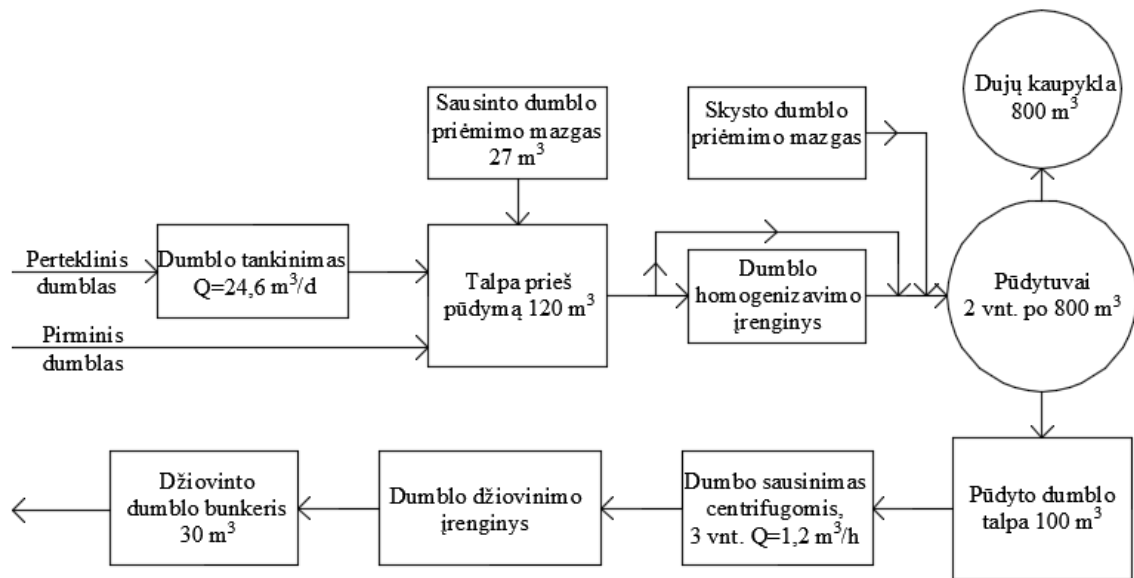
2.4. Tauragės nuotekų valykla

Tauragės miesto dumblo apdorojimo įrenginiai susideda iš šių dalių:

- Perteklinio dumblo tirštinimas;

- dumblo mišinio (pirminio ir perteklinio) skaidymas;
- dumblo mišinio pūdymas;
- dumblo mišinio sausinimas;
- dumblo mišinio džiovinimas.

Principinė Tauragės nuotekų valyklos dumblo apdorojimo įrenginių schema pagal projektinius duomenis pateikta 16 pav.



16 pav. Principinė Tauragės nuotekų valyklos supaprastinta technologinė dumblo apdorojimo schema (sudaryta autoriaus, duomenys iš UAB „Tauragės vandenys“)

Pagal projektą Tauragės nuotekų valykloje yra apdorojamos tokios žaliavinės medžiagos: pirminis, perteklinis dumblas, atvežtinis sausintas, tirštintas dumblas bei atvežtinės maisto pramonės atliekos. Perteklinis dumblas iš nuotekų valymo grandies sutankinamas ir tiekiamas į talpą prieš pūdymą, kur yra sumaišomas su pirminiu bei atvežtiniu dumbliu. Iš rezervuaro mišinys tiekiamas į dumblo homogenizavimo įrenginį, kuriame skaidomas aukšta įtampa. Suskaidytas dumblas siurblių pagalba tiekiamas 6 valandas su 12 valandų pertrauka į pūdytuvus.

Pūdytuvuose dumblas pūdomas anaerobinėmis sąlygomis, palaikant mezofilinį režimą. Pastovi dumblo 36 ± 1 °C temperatūra palaikoma šilumokaičio pagalba. Dumblas pūdomas dviejuose pūdytuvuose (17 pav.), abiejų pūdytuvų bendras darbinis tūris – 1600 m³. Įrenginiuose sumontuotos maišyklės, kurios užtikrina efektyvų dumblo maišymą. Pūdytuvuose organinių medžiagų skaidymo metu susidaro biudujos: metanas, anglies dvideginis, sieros vandenilis. Susidariusios dujos nuvedamos į dujų kaupimo talpą. Pūdytas dumblas iš pūdytuvų gali būti šalinamas arba siurbliu, arba savitaka. Siurbliu dumblas šalinamas tuo atveju, kai pūdytas dumblas į pūdyto dumblo rezervuarą tiekiamas per

dumblas/dumblas šilumokaitį, o savitaka kai dumblas į pūdyto dumblo rezervuarą tiekiamas tiesiai.

Iš pūdytuvų dumblas nukreipiamas į pūdyto dumblo talpą, iš kurios dumblas tiekiamas į dumblo sausinimo centrifugas, kuriose dumblas nusausinamas. Nusausintas dumblas tiekiamas į džiovinimą, kuriame susidaro galutinis produktas dumblo granulės.



17 pav. Tauragės nuotekų valyklos pūdytuvai (Tauragės...2017)

3. TYRIMO METODIKA

3.1. Tyrimų objektas

Šiuo metu Lietuvos nuotekų valyklose yra įrengta 13 dumblo pūdymo įrenginių. Daugumoje iš jų dumblas į pūdytuvus tiekiamas skirtingais tiekimo režimais.

Šiuo tyrimu analizuojamos keturios nuotekų valyklos – Alytaus, Marijampolės, Šiaulių ir Tauragės. Jos pasirinktos dėl mezofilinėmis sąlygomis pūdomo tiek pirminio, tiek perteklinio dumblo ir skirtingų dumblo tiekimo režimų. Analizuojamų nuotekų valyklų tiekimo režimai pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Dumblo tiekimo režimai analizuojamuose valyklose (lentelė sudaryta autoriaus, duomenys gauti iš UAB „Dzūkijos vandenys“, UAB „Sūduvos vandenys“, UAB „Šiaulių vandenys“, UAB „Tauragės vandenys“)

Valykla	Tiekimo režimo ciklas			
	Tiekiamas, h	Pertrauka, h	Ciklo trukmė, h	Ciklų per parą
Alytaus	4	8	12	2
Marijampolės	24	-	24	1
Šiaulių	4	2	6	4
Tauragės	6	12	18	1

3.2. Tyrimų uždaviniai

1. Surinkti analizuojamų valyklų duomenis apie nuotekų kokybės rodiklius prieš valymą ir po pirminio valymo, dumblo mišinio žaliavinių medžiagų kiekius ir aplinkos veiksnius, turinčius įtakos pūdymo procesui. Pasinaudojus surinktais duomenimis apskaičiuoti technologinius parametrus, turinčius įtakos pūdymo procesui.
2. Surinktus ir apskaičiuotus duomenis statistiškai apdoroti.
3. Atlikti surinktų ir statistiškai apdorotų duomenų palyginimą tarp atskirų valyklų;
4. Įsitikinus, kad analizuojamos nuotekų valyklos gali būti tarpusavyje lyginamos pagal anksčiau aprašytus rodiklius, apskaičiuoti dumblo pūdymo procesą apibūdinančius kokybinius rodiklius.
5. Lyginant tarp atskirų valyklų dumblo procesą apibūdinančius kokybinius rodiklius bei metano kiekį biodujose, nustatyti tinkamiausią dumblo tiekimo režimą į dumblo pūdymo įrenginius.
6. Išanalizuoti technologinių parametrų poveikį pūdymo procesui ir nustatyti galimas parametrų tarpusavio priklausomybes.

3.3. Duomenų surinkimas ir apskaičiavimas

Siekiant įvertinti dumblo kokybę, dumblo proporcinę sudėtį ir aplinkos veiksnius iš Alytaus, Marijampolės, Šiaulių ir Tauragės nuotekų valyklų buvo renkami 2015-2016 metų duomenys, kurie gaunami iš nuotekų valyklose technologų pildomų ataskaitų ir SCADA programinės įrangos ataskaitų.

Pagal turimus rodiklius apskaičiuoti technologiniai parametrai: dumblo išbuvimo trukmė pūdytuvuose (d) ir pūdytuvo apkrova bepelenėmis sausomis medžiagomis (kg BSM/m³/d). Parametrai, kurių duomenys buvo surinkti, nurodyti 8 lentelėje, o kurie apskaičiuoti – 1 ir 2 formulėse.

8 lentelė. Parametrai, kurių duomenys buvo renkami iš nuotekų valyklų (lentelė sudaryta autoriaus)

Pavadinimas	Žymėjimas	Mato vnt.
Nuotekų kokybės rodikliai prieš valymą ir po pirminio valymo		
Skendinčiųjų medžiagų koncentracija	SM	mg/l
Biocheminis deguonies suvartojimas per 5 paras	BDS ₅	mg O ₂ /l
Cheminis deguonies suvartojimas	ChDS	mg O ₂ /l
Bendrojo azoto koncentracija	N _b	mg/l
Bendrojo fosforo koncentracija	P _b	mg/l
Dumblo mišinio žaliavinių medžiagų kiekiai		
Pirminio dumblo kiekis	SM _{pirmin.}	kg SM/d
Perteklinio dumblo kiekis	SM _{per ekl.}	kg SM/d
Pirminio dumblo debitas	Q _{pirmin.}	m ³ /d
Perteklinio dumblo debitas	Q _{per ekl.}	m ³ /d
Aplinkos veiksniai, turintys įtakos pūdymo procesui		
pH	-	-
Temperatūra	T	°C

Dumblo išbuvimo trukmė pūdytuvuose apskaičiuota pagal formulę:

$$t = \frac{V}{Q}, \text{ d}; \quad (1)$$

čia: V – pūdytuvų tūris, m³; Q – tiekiamo dumblo mišinio paros debitas, m³/d.

Pūdytuvo apkrova bepelenėmis sausomis medžiagomis apskaičiuota pagal formulę:

$$A = \frac{BSM \cdot Q}{V}, \text{ kg BSM} / \text{m}^3 / \text{d}; \quad (2)$$

čia: BSM – bepelenių sausų medžiagų koncentracija, kg BSM/m³; Q – tiekiamo dumblo mišinio paros debitas, m³/d; V – pūdytuvų tūris, m³.

3.4. Statistinis duomenų apdorojimas

Surinktų ir apskaičiuotų duomenų reikšmės atsitiktiniai dydžiai, todėl jomis naudojantis buvo laikytasi atitinkamų reikalavimų:

1. Rodiklio negali apibūdinti viena kuri nors jo reikšmė;
2. Pagrindiniais rodiklio parametrais laikytini reikšmių aritmetinis vidurkis ir imties standartinis nuokrypis;

Rodiklio aritmetinis vidurkis apskaičiuotas pagal formulę:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad (3)$$

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

Rodiklio imties standartinis nuokrypis apskaičiuotas pagal formulę:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}; \quad (4)$$

Čia: n – rodiklio reikšmių skaičius; $\bar{x}$ – rodiklio reikšmių (x_i) aritmetinis vidurkis; x_i – i-toji rodiklio reikšmė.

Aritmetinis vidurkis taip pat atsitiktinis dydis, todėl nurodomos jo pasiklivimo ribos. Patikimais laikytini dydžiai, kurių tikimybė yra intervale nuo 2,5 % iki 97,5 % (95 % patikimumo pasikliautinis intervalas), nepatikimos reikšmės atmetamos ir nepaisomos.

Pagal apskaičiuotus rodiklius tikrintas duomenų patikimumas. Pasirinkus 95 % patikimumo pasikliautinąjį intervalą, statistiškai patikimos reikšmės turėjo tenkinti sąlygą:

$$|x_i - \bar{x}| \leq 2s; \quad (5)$$

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

Šios sąlygos netenkinančios rodiklio reikšmės atmetos, nes yra už 95% patikimumo pasikliautinąjį intervalo ribos. Atmetus nepatikimas reikšmes, rodiklio reikšmių aritmetinis vidurkis bei imties standartinis nuokrypis skaičiuotas iš naujo ir vėl tikrinta aukščiau nurodyta sąlyga. Tai kartota kol liko tik šią sąlygą tenkinančios rodiklio reikšmės.

3.5. Nuotekų valyklų palyginimas

Norint nustatyti tinkamiausią dumblo tiekimo režimą, reikia įsitikinti, kad analizuojamose valyklose būtų analogiška:

1. Pirminio ir perteklinio dumblo kokybė.

2. Tiekiamo į pūdymo procesą dumblo mišinio proporcinė sudėtis.
3. Aplinkos veiksniai, turintys įtakos pūdymo procesui.
4. Technologiniai parametrai, turintys įtakos pūdymo procesui.

Pirminio dumblo kokybė vertinta lyginant atitekančių nuotekų užterštumo rodiklių santykių reikšmes, tuo tarpu perteklinio dumblo kokybė – lyginant nuotekų užterštumo rodiklių, po pirminio valymo santykių, reikšmes. Santykiui skaičiuoti naudojami iš apdorotų duomenų gauti imties vidurkiai. Pasirinkti biologiniam nuotekų valymui reikšmingi užterštumo rodiklių santykiai pateikti 9 lentelėje.

9 lentelė. Biologiniam nuotekų valymui reikšmingi užterštumo rodiklių santykiai (lentelė sudaryta autoriaus)

Lyginamasis santykis	Santykių skirtumas, %					
	Alytus-Šiauliai	Alytus-Marijampolė	Alytus-Tauragė	Šiauliai-Marijampolė	Šiauliai-Tauragė	Marijampolė-Tauragė
$\frac{BDS_5}{P_b}$	-	-	-	-	-	-
$\frac{BDS_5}{N_b}$	-	-	-	-	-	-
$\frac{ChDS}{BDS_5}$	-	-	-	-	-	-
$\frac{SM}{BDS_5}$	-	-	-	-	-	-

Dumblo mišinio žaliavinių medžiagų proporcinė sudėtis vertinta pagal pirminio ir perteklinio dumblo procentinį kiekį dumblo mišinyje. Dumblo proporcinės sudėties, aplinkos veiksnių ir technologinių parametru lyginamosios reikšmės pateiktos 10 lentelėje.

10 lentelė. Dumblo proporcinės sudėties, aplinkos veiksnių ir technologinių parametru lyginamosios reikšmės (lentelė sudaryta autoriaus)

Parametrai	Rodiklių skirtumas tarp atskirų valyklų, %
Dumblo mišinio žaliavinių medžiagų proporcijos	
Pirminis dumblas, %	-
Perteklinis dumblas, %	-
Aplinkos veiksniai, turintys įtakos pūdymo procesui	
pH	-
Temperatūra, °C	-

Parametrai	Rodiklių skirtumas tarp atskirų valyklų, %
Technologiniai parametrai, turintys įtakos pūdymo procesui	
Išbuvimo trukmė, d	-
Apkrova bepelenėmis sausomis medžiagomis, kg BSM/m ³ /d	-

Visi anksčiau aprašyti parametrai lyginti tarp atskirų valyklų su sąlyga, kad jų reikšmės neturi skirtis daugiau kaip 30 %. Pastaroji vertė pasirinkta atsižvelgiant į tai, kad gamybinėmis sąlygomis sudėtinga užtikrinti technologinių parametru pastovumą, vienodą dumblo mišinio proporcinę sudėtį, nes rezultatai 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 jos yra analogiškos ir gali būti lyginamos tarpusavyje.

3.6. Kokybinių rodiklių skaičiavimas

Įsitikinus, kad analizuojamų valyklų lygintų parametru reikšmės nesiskiria daugiau kaip 30 %, apskaičiuoti dumblo pūdymo procesą apibūdinantys kokybiniai rodikliai: pūdymo metu suskaidytas bepelenių sausų medžiagų kiekis, sausų ir bepelenių sausų medžiagų pašalinimo/suskaidymo efektyvumas pūdymo proceso metu ir specifinis biodujų susidarymas.

Pūdymo metu suskaidytas bepelenių sausų medžiagų kiekis apskaičiuotas pagal formulę:

$$BSM_{susk} = \left(\frac{BSM_{1,\%} \cdot a_1 \cdot Q_1}{100} \right) - \left(\frac{BSM_{2,\%} \cdot a_2 \cdot Q_2}{100} \right), \text{ kg/d}; \quad (6)$$

čia: $BSM_{1,2,\%}$ – bepelenės sausos medžiagos, išreikštos procentais atitinkamai prieš ir po pūdymo proceso, %; $a_{1,2,\%}$ – sausų medžiagų koncentracija atitinkamai prieš ir po pūdymo proceso, kg SM/m³; $Q_{1,2}$ – tiekiamo ir šalinamo dumblo mišinio iš pūdytuvų paros debitas, m³/d.

Sausų medžiagų pašalinimo efektyvumas pūdymo proceso metu apskaičiuotas pagal formulę:

$$E_{SM} = \frac{SM_1 - SM_2}{SM_1} \cdot 100, \%; \quad (7)$$

čia: SM_1 – sausų medžiagų koncentracija prieš pūdymo procesą, kg SM/m³; SM_2 – sausų medžiagų koncentracija po pūdymo proceso, kg SM/m³.

Bepelenių sausų medžiagų suskaidymo efektyvumas pūdymo proceso metu apskaičiuotas pagal formulę:

$$E_{BSM} = \frac{BSM_1 - BSM_2}{BSM_1} \cdot 100, \% \quad (8)$$

čia: BSM_1 – bepelenių sausų medžiagų koncentracija prieš pūdymo procesą, kg BSM/m³; BSM_2 – bepelenių sausų medžiagų koncentracija po pūdymo proceso, kg BSM/m³.

Specifinio biodujų kiekio susidarymas apskaičiuotas pagal formulę:

$$D = \frac{Q_{dujų}}{BSM_{susk}}, \text{ m}^3 / \text{kg susk. BSM} / \text{d}; \quad (9)$$

čia: $Q_{dujų}$ – pagamintų biodujų kiekis, m³/d; $BSM_{susk.}$ – pūdymo metu suskaidytas bepelenių sausų medžiagų kiekis, kg BSM/d.

Tinkamiausias dumblo tiekimo režimas nustatomas lyginant atrinktų valyklų dumblo pūdymą apibūdinančius kokybinius rodiklius ir metano kiekį biodujose.

3.7. Parametrų priklausomybių nustatymas

Parametrų priklausomybės tikrinamos siekiant nustatyti, kaip vieno rodiklio pokytis gali turėti įtakos kito rodiklio kitimui, pavyzdžiui, technologinių parametrų įtaka dumblo pūdymo proceso efektyvumui. Šiame darbe analizuotos priklausomybės tarp technologinių ir proceso parametrų. Analizuoti technologiniai parametrai: apkrova (kg BSM/m³/d), išbuvimo trukmė (d), tiektas BSM ir SM kiekis į pūdymo procesą (kg BSM/d, kg SM/d). Analizuoti proceso parametrai: biodujų susidarymas (m³/d), specifinis biodujų susidarymas (m³/kg susk. BSM/d) ir suskaidytas bepelenių sausų medžiagų kiekis (kg/d).

Nustatytą priklausomybę nulemia koreliacijos koeficientas. Koreliacijos koeficientas parodo ryšio stiprumą tarp dviejų ir daugiau kintamųjų, jo reikšmės svyruoja nuo 0 iki 1. Koreliacijos ryšys yra tuo stipresnis, kuo koreliacijos reikšmė yra arčiau vieneto reikšmės.

4. REZULTATAI

4.1. Nuotekų valyklų palyginimas

4.1.1. Nuotekų valyklų palyginimas pagal pirminio ir perteklinio dumblo kokybę

Atlikus surinktų duomenų statistinį apdorojimą, atitekančių į analizuojamas nuotekų valyklas nuotekų užterštumo rodiklių imties vidurkiai pateikti 11 lentelėje.

11 lentelė. Atitekančių nuotekų užterštumo rodiklių imties vidurkiai (lentelė sudaryta autoriaus, duomenys gauti iš UAB „Dzūkijos vandenys“, UAB „Sūduvos vandenys“, UAB „Šiaulių vandenys“, UAB „Tauragės vandenys“)

Rodikliai, mg/l	Nuotekų valykla			
	Alytaus	Marijampolės	Šiaulių	Tauragės
SM	389 (imtis 53)	422 (imtis 42)	269 (imtis 52)	367 (imtis 14)
BDS ₅	523 (imtis 51)	404 (imtis 42)	319 (imtis 52)	258 (imtis 14)
ChDS	1260 (imtis 25)	1076 (imtis 38)	655 (imtis 27)	653 (imtis 15)
N _b	86,4 (imtis 23)	68,2 (imtis 42)	74,1 (imtis 42)	53,8 (imtis 12)
P _b	11,3 (imtis 51)	8,81 (imtis 37)	7,72 (imtis 55)	12,9 (imtis 15)

Pagal 11 lentelėje pateiktus imties vidurkius apskaičiuoti atitekančių į analizuojamas nuotekų valyklas užterštumo rodiklių santykiai, kurie pateikti 12 lentelėje.

12 lentelė. Atitekančių nuotekų užterštumo rodiklių santykiai (lentelė sudaryta autoriaus, duomenys gauti iš UAB „Dzūkijos vandenys“, UAB „Sūduvos vandenys“, UAB „Šiaulių vandenys“, UAB „Tauragės vandenys“)

Lyginamasis santykis	Nuotekų valykla			
	Alytaus	Marijampolės	Šiaulių	Tauragės
BDS ₅ /P _b	46,3	45,9	41,3	20,0
BDS ₅ /N _b	6,05	5,93	4,31	4,80
ChDS/BDS ₅	2,41	2,67	2,06	2,53
SM/BDS ₅	0,74	1,05	0,84	1,42

Pasinaudojus 12 lentelės duomenis apskaičiuotos atitekančių nuotekų lyginamųjų užterštumo rodiklių santykių skirtumo reikšmės, kurios pateiktos 13 lentelėje.

13 lentelė. Atitekančių nuotekų lyginamųjų užterštumo rodiklių santykių skirtumo reikšmės (lentelė sudaryta autoriaus)

Lyginamasis santykis	Santykių skirtumas, %					
	Alytus-Šiauliai	Alytus-Marijampolė	Alytus-Tauragė	Šiauliai-Marijampolė	Šiauliai-Tauragė	Marijampolė-Tauragė
BDS ₅ /P _b	11	1	57	10	52	56
BDS ₅ /N _b	29	2	21	27	10	19
ChDS/BDS ₅	15	10	5	23	19	5
SM/BDS ₅	12	29	48	19	41	27

Išanalizavus atitekančių nuotekų užterštumo rodiklių santykių reikšmes ir atsižvelgus į sąlygą, kad lyginamos reikšmės neturi skirtis daugiau kaip 30 %, nustatyta, kad Alytaus, Šiaulių, Marijampolės nuotekų valyklų apskaičiuoti lyginamųjų santykių skirtumai atitinka minėtąją sąlygą ir gali būti lyginamos tarpusavyje pagal atitekančių nuotekų užterštumo rodiklius.

Iš 13 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad iš visų lyginamųjų santykių skirtumo reikšmių Tauragės nuotekų valyklos BDS₅/P_b, SM/BDS₅ rodiklių santykių reikšmės skyrėsi daugiau kaip 30 %, atitinkamai nuo 52 % iki 57 % ir nuo 41 % iki 48 %. Įvertinus gautas reikšmes, Tauragės nuotekų valykla neatitinka nustatytų tyrimo parametrų, todėl negali būti palyginta su kitomis analizuotomis nuotekų valyklomis.

Toliau analizuojamų Alytaus, Šiaulių ir Marijampolės nuotekų valyklų užterštumo rodiklių po pirminio valymo imties vidurkiai pateikti 14 lentelėje.

14 lentelė. Nuotekų užterštumo rodiklių po pirminio valymo imties vidurkiai (lentelė sudaryta autoriaus, duomenys gauti iš UAB „Dzūkijos vandenys“, UAB „Sūduvos vandenys“, UAB „Šiaulių vandenys“)

Rodikliai mg/l	Nuotekų valykla		
	Alytaus	Marijampolės	Šiaulių
SM	119 (imtis 27)	121 (imtis 44)	118 (imtis 56)
BDS ₅	232 (imtis 26)	215 (imtis 41)	222 (imtis 53)
N _b	80,3 (imtis 32)	53,4 (imtis 28)	68,6 (imtis 57)
P _b	8,91 (imtis 31)	6,53 (imtis 36)	6,15 (imtis 59)

Analizuojamose nuotekų valyklose, duomenų rinkimo laikotarpiu nebuvo matuojamas ChDS po pirminio valymo, todėl šis užterštumo rodiklis nevertintas. Pagal 14 lentelėje pateiktus imties vidurkius apskaičiuoti užterštumo rodiklių po pirminio valymo santykiai, kurie pateikti 15 lentelėje.

15 lentelė. Nuotekų užterštumo rodiklių po pirminio valymo santykiai (lentelė sudaryta autoriaus, duomenys gauti iš UAB „Dzūkijos vandenys“, UAB „Sūduvos vandenys“, UAB „Šiaulių vandenys“)

Lyginamasis santykis	Nuotekų valykla		
	Alytaus	Marijampolės	Šiaulių
BDS_5/P_b	26,0	32,9	36,1
BDS_5/N_b	2,89	4,03	3,24
SM/BDS_5	0,51	0,56	0,53

Pasinaudojus 15 lentelės duomenimis apskaičiuotos lyginamųjų užterštumo rodiklių po pirminio valymo santykių skirtumo reikšmės, kurios pateiktos 16 lentelėje.

16 lentelė. Nuotekų lyginamųjų užterštumo rodiklių po pirminio valymo santykių skirtumo reikšmės (lentelė sudaryta autoriaus)

Lyginamasis santykis	Santykių skirtumas, %		
	Alytus- Šiauliai	Alytus-Marijampolė	Šiauliai-Marijampolė
BDS_5/P_b	28	21	9
BDS_5/N_b	11	28	20
SM/BDS_5	4	9	5

Išanalizavus lyginamųjų nuotekų užterštumo rodiklių po pirminio valymo santykių skirtumo reikšmes ir atsižvelgus į sąlygą, kad lyginamosios reikšmės neturi skirtis daugiau kaip 30 %, nustatyta, kad Alytaus, Šiaulių, Marijampolės nuotekų valyklos gali būti palyginamos ir pagal nuotekų užterštumo rodiklius po pirminio valymo.

Atsižvelgus į 13 ir 16 lentelėse pateiktas lyginamųjų santykių skirtumo reikšmes, kurios neviršija 30 %, konstatuojama, kad Alytaus, Šiaulių ir Marijampolės valyklose susidarancio pirminio ir perteklinio dumblo kokybė gali būti laikoma analogiška.

4.1.2. Nuotekų valyklų palyginimas pagal dumblo mišinio proporcinę sudėtį, aplinkos veiksnius ir technologinius parametrus

Dumblo proporcinės sudėties, aplinkos veiksnių ir technologinių parametrų reikšmių imties vidurkiai pateikti 17 lentelėje.

17 lentelė. Dumblo proporcinės sudėties, aplinkos veiksnių ir technologinių parametrų reikšmės (lentelė sudaryta autoriaus, duomenys gauti iš UAB „Dzūkijos vandenys“, UAB „Sūduvos vandenys“, UAB „Šiaulių vandenys“)

Parametrai	Nuotekų valykla		
	Alytaus	Marijampolės	Šiaulių
<i>Dumblo mišinio žaliavinių medžiagų proporcijos</i>			
Pirminis dumblas, %	68,4 (imtis 36)	62,9 (imtis 32)	69,5 (imtis 40)
Perteklinis dumblas, %	31,6 (imtis 36)	37,1 (imtis 32)	30,5 (imtis 40)
<i>Aplinkos veiksniai, turintys įtakos pūdyimo procesui</i>			
pH	7,31*	7,35*	7,26*
Temperatūra, °C	36,7*	36,6*	37,2*
<i>Technologiniai parametrai, turintys įtakos pūdyimo procesui</i>			
Išbuvimo trukmė, d	39,4 (imtis 22)	20,5 (imtis 40)	46,2 (imtis 41)
Apkrova bepelenėmis sausomis medžiagomis, kg BSM/m ³ /d	0,72 (imtis 20)	1,10 (imtis 43)	0,78 (imtis 51)

***Pastaba.** pH ir temperatūra nustatyta remiantis SCADA programinės įrangos grafika, kurių intervalas 2015-2016 metai.

Pasinaudojus 17 lentelės duomenimis apskaičiuotos dumblo proporcinės sudėties, aplinkos veiksnių ir technologinių parametrų lyginamosios skirtumų reikšmės, kurios pateiktos 18 lentelėje.

18 lentelė. Dumblo proporcinės sudėties, aplinkos veiksnių ir technologinių parametrų lyginamosios skirtumų reikšmės (lentelė sudaryta autoriaus)

Parametrai	Rodiklių skirtumas, %		
	Alytus-Šiauliai	Alytus-Marijampolė	Šiauliai-Marijampolė
<i>Dumblo mišinio žaliavinių medžiagų proporcijos</i>			
Pirminis dumblas, %	2	8	9
Perteklinis dumblas, %	3	15	18
<i>Aplinkos veiksniai, turintys įtakos pūdyimo procesui</i>			
pH	1	1	1
Temperatūra, °C	1	0	2
<i>Technologiniai parametrai, turintys įtakos pūdyimo procesui</i>			
Išbuvimo trukmė	15	48	56
Apkrova bepelenėmis sausomis medžiagomis, kg BSM/m ³ /d	8	35	29

Atlikus dumblo proporcinės sudėties, aplinkos veiksnių ir technologinių parametrų analizę ir atsižvelgus į sąlygą, kad lyginamos reikšmės neturi skirtis daugiau kaip 30 %, nustatyta, kad pagal šiuos rodiklius tarpusavyje gali būti lyginamos Alytaus ir Šiaulių nuotekų valyklos.

Iš 18 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad Marijampolės nuotekų valykla negali būti palyginta su kitomis analizuotomis valyklomis, nes technologiniai parametrai skyrėsi daugiau nei 30 %: išbuvimo trukmė nuo Šiaulių ir Marijampolės valyklų skyrėsi atitinkamai 48 % ir 56 %, o apkrova bepelenėmis sausomis medžiagomis nuo Alytaus valyklos – 35 %.

Atlikus analizuojamų valyklų palyginamąją analizę pagal pirminio ir perteklinio dumblo kokybę, tiekiamo į pūdymo procesą dumblo mišinio proporcinę sudėtį, aplinkos veiksnius bei technologinius parametrus, nustatyta, kad Alytaus ir Šiaulių nuotekų valyklos yra tinkamos tarpusavio palyginimui siekiant nustatyti tinkamiausią dumblo tiekimo režimą.

4.2. Dumblo pūdymo įrenginių rezultatai

Įsitikinus, kad Alytaus ir Šiaulių nuotekų valyklos yra tinkamos tarpusavio palyginimui, pagal turimus duomenis apskaičiuoti dumblo pūdymą apibūdinantys rodikliai. Apskaičiuotos rodiklių reikšmės pateiktos 19 lentelėje.

19 lentelė. Dumblo pūdymą Alytaus ir Šiaulių valyklose apibūdinančių rodiklių reikšmės (lentelė sudaryta autoriaus)

Parametrai	Alytaus valykla	Šiaulių valykla
<i>Pūdytą dumblą apibūdinantys rodikliai</i>		
BSM sumažėjimas pūdymo metu, %	47,1	49,2
BSM dalis SM kiekio atžvilgiu prieš pūdymą, %	75,3	76,7
BSM dalies SM kiekio atžvilgiu sumažėjimas pūdymo metu, %	12,2	17,1
<i>Specifinis biodujų susidarymas ir biodujų kokybė</i>		
Specifinio biodujų kiekio susidarymas, m ³ /kg BSM pašalinto/d	1,29	1,30
Metano kiekis biodujose, %	64,9	70,7

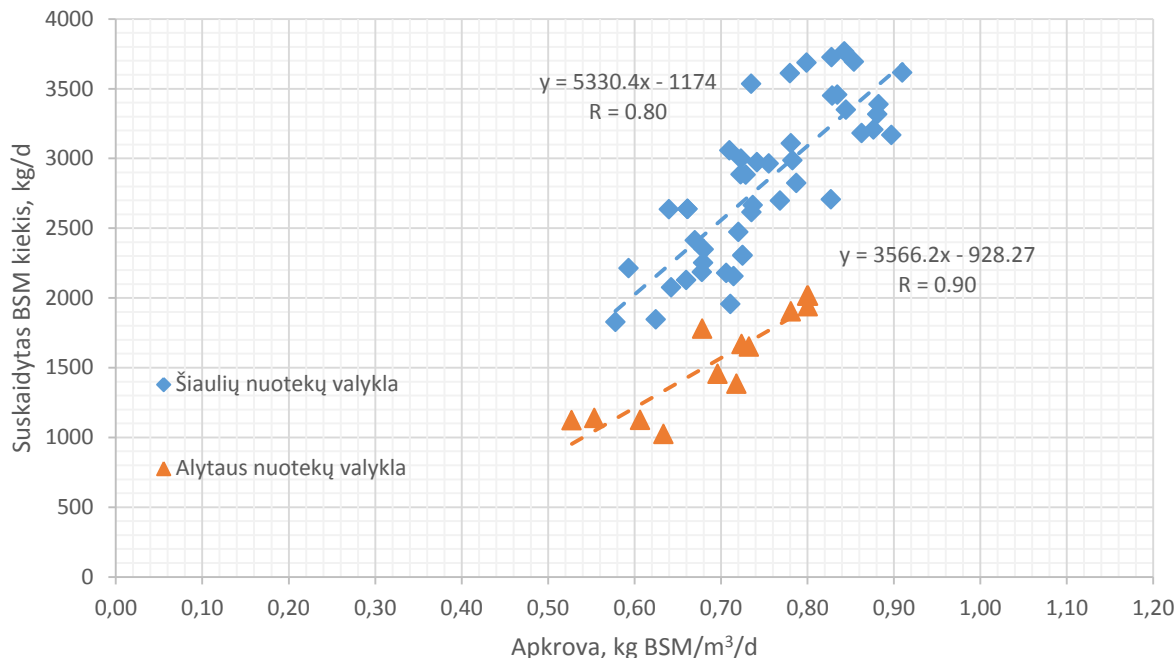
Šiaulių nuotekų valykloje dumblo tiekimo į pūdytuvus ciklas buvo 2 kartus trumpesnis nei Alytaus valykloje ir atitinkamai sudarė 6 h ir 12 h (7 lentelė). Nors dumblo tiekimo trukmė ciklo metu buvo ta pati (4 h), tačiau pertrauka Alytaus atveju buvo 4 kartus ilgesnė ir ji ciklo metu truko 2 h Šiaulių valykloje bei 8 h Alytaus valykloje. Išanalizavus 19 lentelėje pateiktus dumblo pūdymo kokybės rodiklius, galima konstatuoti, kad trumpesnis dumblo tiekimo į pūdymo grandį ciklas, kai jo metu tiekimo trukmė sudaro 4 h, sąlygojo geresnius pūdymo rezultatus:

- BSM dalies SM kiekio atžvilgiu sumažėjimas pūdymo proceso metu buvo didesnis 29 %.
- Specifinio biodujų kiekio susidarymas buvo didesnis 1,0 %.
- Metano koncentracija biodujose buvo didesnė 8,2 %.

4.3. Dumblo pūdymo įrenginių parametrų priklausomybės

4.3.1. Bepelenių sausų medžiagų pašalinimas pūdymo procese

Suskaidytų pūdymo procese bepelenių sausų medžiagų priklausomybė nuo pūdytuvų apkrovos pateikta 18 paveiksle.



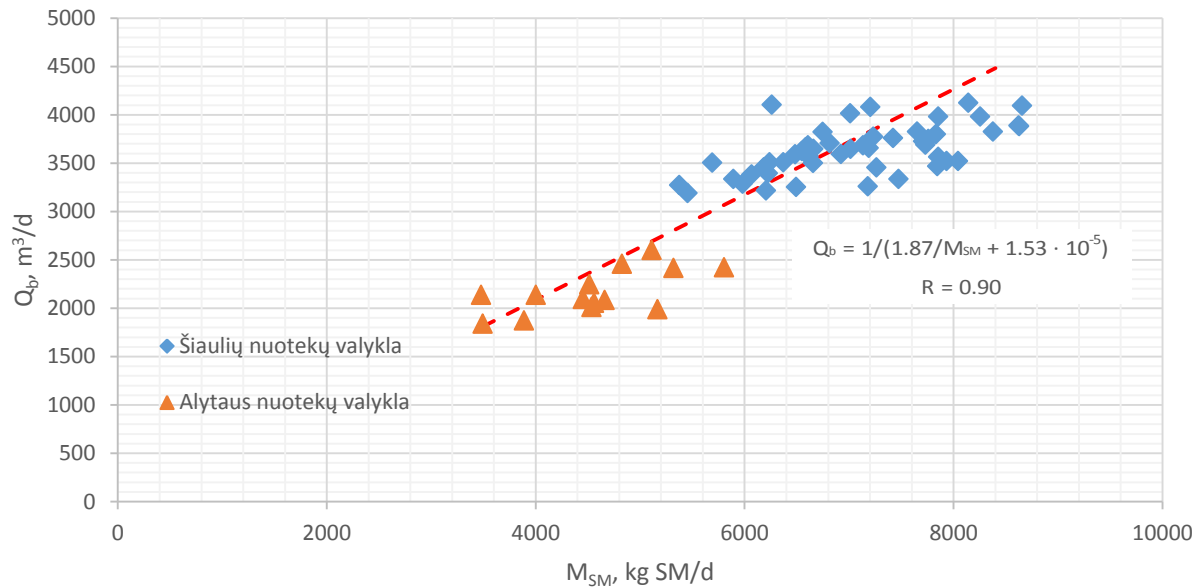
18 pav. Suskaidytų BSM kiekio priklausomybė nuo pūdytuvų apkrovos analizuojamose valyklose (sudaryta autoriaus, duomenys gauti iš UAB „Dzūkijos vandenys“, UAB „Šiaulių vandenys“)

Iš 18 pav. matyti, kad suskaidytas BSM kiekis priklauso nuo pūdytuvų apkrovos visose valyklose. Tarp apkrovos ir suskaidyto BSM kiekio nustatyta tiesinė priklausomybė. Apkrovos reikšmėms didėjant BSM suskaidytas kiekis taip pat didėja. Gauti koreliacijos koeficientai $R=0,90$ ir $R=0,80$ (atitinkamai Alytaus ir Šiaulių valyklai) rodo stiprią priklausomybę tarp analizuotų parametrų. Alytaus nuotekų valykloje suskaidytas BSM kiekis gali būti prognozuojamas pagal pūdytuvuose palaikomą apkrovą, kai apkrovos reikšmės yra 0,53-0,80 kg/BSM/m³/d ribose, o Šiaulių nuotekų valykloje, kai apkrovos reikšmės yra 0,58-0,91 kg/BSM/m³/d ribose.

Apibendrinant gautus rezultatus nustatyta, kad suskaidytų pūdymo procese bepelenių sausų medžiagų priklausomybė nuo pūdytuvų apkrovos galioja kiekvienai analizuotai valyklai individualiai. Norint sumažinti BSM kiekį dumble, o tuo pačiu ir dumblo tūrį, pūdytuvuose turi būti palaikoma $\geq 0,80$ apkrova, t. y. į pūdytuvus tiekiamas ne mažesnis pagal BSM dumblo kiekis kaip 3889 kg BSM/d Alytuje ir 6432 kg BSM/d Šiauliuose.

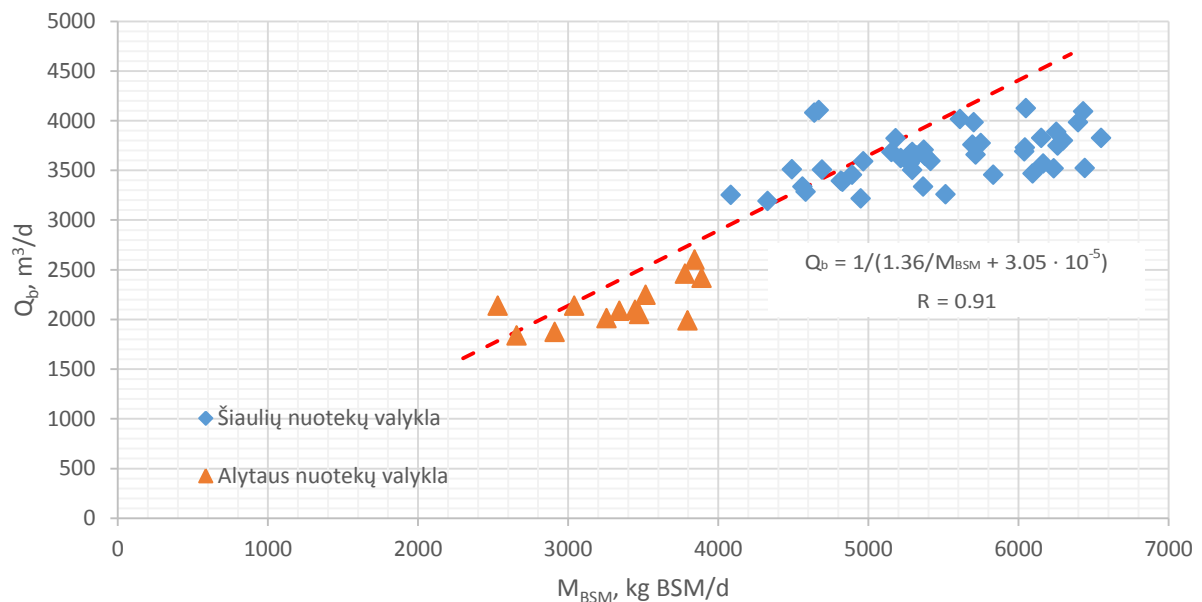
4.3.1. Biodujų susidarymas pūdymo metu

Pūdymo metu susidariusių biodujų kiekio priklausomybė nuo patiekto SM kiekio į pūdymo procesą pateikta 19 paveiksle.



19 pav. Biodujų susidarymo priklausomybė nuo patiekto SM kiekio analizuojamose valyklose: Q_b – dujų kiekis, m^3/d , M_{SM} – SM kiekis prieš pūdymą, $kg\ SM/d$ (sudaryta autoriaus, duomenys gauti iš UAB „Dzūkijos vandenys“, UAB „Šiaulių vandenys“)

Pūdymo metu susidariusių biodujų kiekio priklausomybė nuo patiekto BSM kiekio į pūdymo procesą pateikta 20 paveiksle.

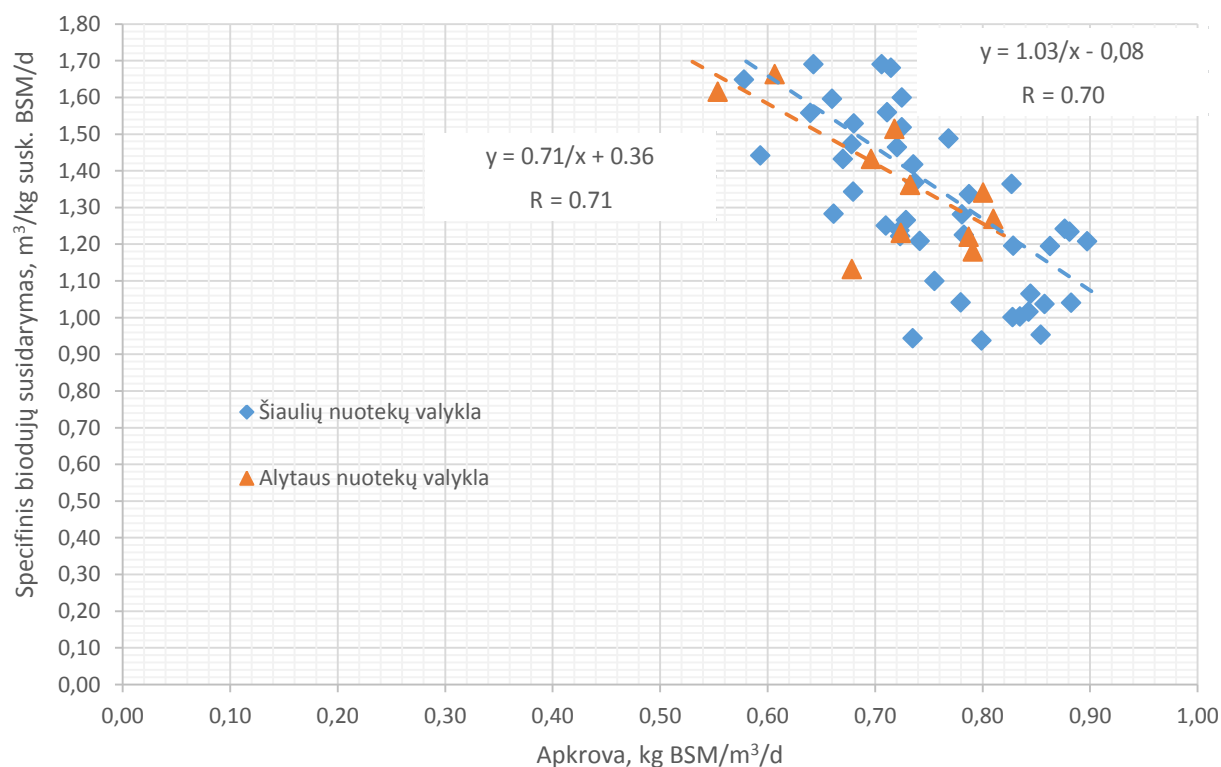


20 pav. Biodujų susidarymo priklausomybė nuo patiekto BSM kiekio analizuojamose valyklose: Q_b – dujų kiekis, m^3/d , M_{BSM} – BSM kiekis prieš pūdymą, $kg\ BSM/d$ (sudaryta autoriaus, duomenys gauti iš UAB „Dzūkijos vandenys“, UAB „Šiaulių vandenys“)

Iš 19 ir 20 paveikslų matyti, kad biodujų susidarymas priklauso nuo patiekto į pūdymo procesą SM ir BSM kiekio. Tarp šių parametrų nustatyta atvirkštinė tiesinė priklausomybė. SM ir BSM kiekiui, kuris tiekiamas į pūdymą, didėjant susidaręs biodujų kiekis taip pat didėja. Gauti koreliacijos koeficientai 19 paveiksle ($R=0,90$) ir 20 paveiksle ($R=0,91$) rodo stiprią priklausomybę tarp analizuotų parametrų.

Pagal 19 paveiksle pateiktą priklausomybę, atsižvelgiant į tiekiamą SM kiekį (3478-8657 kg SM/d) prieš pūdymą, susidarantis biodujų kiekis gali būti apskaičiuojamas pagal gautą priklausomybės formulę: $Q_b=1/(1.87/M_{SM} + 1.53 \cdot 10^{-5})$. Pagal 20 paveiksle pateiktą priklausomybę, atsižvelgiant į tiekiamą BSM kiekį (2531-6432 kg BSM/d) prieš pūdymą, susidarantis biodujų kiekis gali būti apskaičiuojamas pagal gautą priklausomybės formulę: $Q_b=1/(1.36/M_{BSM} + 3.05 \cdot 10^{-5})$.

Sąlyginio biodujų susidarymo (m^3/kg BSM pašalinto) ir faktinės apkrovos ($kg\ BSM/m^3/d$) priklausomybės pateiktos 21 paveiksle.



21 pav. Specifinio biodujų susidarymo priklausomybė nuo pūdytuvų apkrovos analizuojamose valyklose (sudaryta autoriaus, duomenys gauti iš UAB „Dzūkijos vandenys“, UAB „Šiaulių vandenys“)

Iš gautos priklausomybės matyti, kad, esant didesnei pūdytuvų apkrovai, susidaro mažesni biodujų kiekiai vienam suskaidytų BSM kilogramui.

Šiaulių nuotekų valykloje viena iš didžiausių specifinio biodujų susidarymo reikšmių ($1,65\ m^3/kg$ suskaidytų BSM) pasiekta esant mažiausiai faktinės dumblo apkrovos reikšmei

(0,58 kg BSM/m³/d). Viena iš mažiausių reikšmių tyrimo metu (1,04 m³/kg suskaidytų BSM), pasiekta esant didžiausiai faktinei apkrovai (0,91 kg BSM/m³/d). Tarp šių parametru nustatyta atvirkštinė tiesinė priklausomybė. Gautas koreliacijos koeficientas $R=0,70$ rodo pakankamai stiprią priklausomybę tarp palaikomos apkrovos ir specifinio biodujų susidarymo. Šiaulių nuotekų valykloje specifinis biodujų susidarymas gali būti prognozuojamas pagal pūdytuvuose palaikomą apkrovą, kai jos reikšmės yra 0,58-0,91 kg/BSM/m³/d ribose.

Analogiška priklausomybė būdinga ir Alytaus nuotekų valykloje. Specifinio biodujų susidarymo reikšmės didžiausios (1,62–1,66 m³/kg pašalintų BSM), kai pūdytuvų apkrova yra mažiausia (0,53–0,61 kg BSM/m³/d). Esant vienai iš didžiausių apkrovos reikšmių (0,80 kg BSM/m³/d), sąlyginis biodujų susidarymas sumažėja (1,18 m³/kg pašalintų BSM). Tarp šių parametru nustatyta atvirkštinė tiesinė priklausomybė. Koreliacijos koeficientas analizuotoje valykloje $R=0,70$ rodo pakankamai stiprią priklausomybę tarp palaikomos apkrovos ir specifinio biodujų susidarymo. Alytaus nuotekų valykloje specifinis biodujų susidarymas gali būti prognozuojamas pagal pūdytuvuose palaikomą apkrovą, kai jos reikšmės yra 0,53-0,80 kg/BSM/m³/d ribose.

Analizės metu nustatyta, kad pūdytuvuose didinant apkrovą nuo 0,53 kg/BSM/m³/d iki 0,91 kg/BSM/m³/d, specifinis biodujų susidarymas sumažėjo 1,8 karto, tačiau susidarantis biodujų kiekis padidėjo 2,2 karto. Galima teigti, kad Alytaus ir Šiaulių nuotekų valyklose reikėtų palaikyti analizės metu fiksuotas didžiausias apkrovos reikšmes, t. y. 0,91 kg/BSM/m³/d Šiaulių nuotekų valykloje ir 0,80 kg/BSM/m³/d Alytaus nuotekų valykloje. Analizės metu gauta priklausomybė tarp apkrovos ir specifinio biodujų susidarymo parametru atitinka tendenciją, nurodytą literatūros apžvalgoje (3 pav.).

Sąlyginio biodujų susidarymo (m³/kg BSM pašalinto) ir faktinės apkrovos (kg BSM/m³/d) priklausomybė galioja kiekvienai analizuotai valyklai individualiai, todėl kitoms valykloms negali būti taikoma.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Tyrimo metu nustatyta, kad Alytaus ir Šiaulių nuotekų valyklos yra tinkamos tarpusavio palyginimui pagal pirminio ir perteklinio dumblo kokybę, dumblo mišinio kokybę, aplinkos veiksnius ir technologinius parametrus, nes lygintos parametrų reikšmės neviršijo nustatytos 30 % nuokrypio ribos. Alytaus nuotekų valykloje dumblo tiekimo į pūdytuvus vieno ciklo trukmė 12 h, tuo tarpu, Šiaulių nuotekų valykloje ciklo trukmė 2 kartus trumpesnė - 6 h. Analizuojamose valyklose dumblas į pūdymo grandį vieno ciklo metu tiekiamas vienodą laikotarpį – 4 h, tačiau pertraukos trukmė skyrėsi, Alytaus nuotekų valykloje pertraukos trukmė buvo 8h, Šiaulių nuotekų valykloje – 2h.
2. Du kartus trumpesnis dumblo tiekimo į pūdymo grandį ciklas, kai jo metu tiekimo trukmė sudarė 4 h, o pauzė – 2 h, sąlygojo 29 % didesnę BSM dalies SM kiekio atžvilgiu sumažėjimą pūdymo proceso metu ir 8,2 % didesnę metano koncentraciją biodujose.
3. Gamybinėmis sąlygomis sudėtinga užtikrinti technologinių parametrų pastovumą ir vienodą dumblo mišinio proporcinę sudėtį. Siekiant nustatyti optimalų tiekimo ciklų skaičių bei tiekimo–pauzės trukmės santykį cikle optimalaus dumblo tiekimo režimo nustatymo tyrimą rekomenduojama atlikti laboratorinėmis sąlygomis.
4. Gautos koreliacijos koeficiento reikšmės ($R=0,80$ ir $R=0,90$) rodo stiprią tiesinę priklausomybę tarp apkrovos ir suskaidyto BSM kiekio. Alytaus ir Šiaulių nuotekų valyklose suskaidytas BSM kiekis gali būti prognozuojamas pagal pūdytuvuose palaikomą apkrovą, kai jos reikšmės yra $0,55\text{--}0,85 \text{ kg/BSM/m}^3/\text{d}$ ribose.
5. Atlikus koreliacijos analizę, nustatytas stiprus koreliacinis ryšys ($R=0,90$) tarp patiekto SM kiekio į pūdymo procesą ir susidariusių biodujų kiekio. Susidarantis biodujų kiekis gali būti prognozuojamas pagal tiekiamą SM kiekį į pūdymo procesą, kai jo reikšmės yra $3478\text{--}8657 \text{ kg SM/d}$ ribose, ir apskaičiuojamas pagal gautą priklausomybės formulę: $Q_b=1/(1.87/M_{SM} + 1.53 \cdot 10^{-5})$.
6. Pūdytuvuose didinant apkrovą nuo $0,53 \text{ kg/BSM/m}^3/\text{d}$ iki $0,91 \text{ kg/BSM/m}^3/\text{d}$, specifinis biodujų susidarymas sumažėjo 1,8 karto, tačiau susidarantis biodujų kiekis padidėjo 2,2 karto. Alytaus ir Šiaulių nuotekų valyklose rekomenduojama palaikyti ne mažesnes, nei analizės metu fiksuotas didžiausias apkrovos reikšmes, t. y. $0,91 \text{ kg/BSM/m}^3/\text{d}$ Šiaulių nuotekų valykloje ir $0,80 \text{ kg/BSM/m}^3/\text{d}$ Alytaus nuotekų valykloje.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Abbasi T., Tauseef S. M., Abbasi S. A. (2012). Anaerobic digestion for global warming control and energy generation—an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3228-3242.
2. Abbasi T., Tauseef S. M., Abbasi S. A. (2012). Biogas energy. *New York: Springer Verlag*, 169.
3. Adekunle, K. F., Okolie, J. A. (2015). A review of biochemical process of anaerobic digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 6 (03), 205.
4. Appels L., Baeyens J., Degreè J., Dewil R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in energy and combustion science*, 34 (6), 755-781.
5. Aziz H. A., Mojiri A. (2014). *Wastewater Engineering: Advanced Wastewater Treatment Systems*. IJSR Publications.
6. Beržinskienė J. *Vandens mikrobiologija. Mokomoji knyga*, 1999. Vilnius:Technika. 144p.
7. Bolzonella D., Pavan P., Batistoni P., Cecchi F. (2005). Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of the solid retention time in the wastewater treatment process. *Process Biochemistry* 40, 1453–1460.
8. Budrys R. (2006). Nuoteku valymo dumblo (NVD) ir biodegraduojančių (BDA) atliekų tvarkymas, iš 9-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios 2006 m. kovo 30 d., pranešimo medžiaga. Vilnius, 30–39.
9. Cakir F. Y., Stenstrom, M. K. (2005). Greenhouse gas production: a comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology. *Water Research*, 39(17), 4197-4203.
10. Chen Y., Cheng J. J., Creamer K.S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: a review. *Bioresource Technology*, 99(10), 4044–64.
11. Čarkauskaitė I. Perteklinio dumblo anaerobinio stabilizavimo įtakos fosforo išsiskyrimui į dumblo vandenį tyrimai. Baigiamasis magistro darbas. Vilnius, 2008. 53 p.
12. Deublein D., Steinhauser, A. (2011). *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*. John Wiley & Sons.
13. Eitminavičiūtė I., Bagdanavičienė Z., Kisielis V., Janeliauskienė D. *Vilniaus miesto nuotekų valyklos dumblo ekologinis įvertinimas*. Vilnius: Technika. 2001. 60-62 p.

14. Falås P., Longrée P., Jansen J. la C., Siegrist H., Hollender J., Joss A. (2013). Micropollutant removal by attached and suspended growth in a hybrid biofilm – activated sludge process. *Water research* 47, 4498-4506.
15. Fytili D., Zabaniotou A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(1), 116-140.
16. Fullana A., Conesa J. A., Font R., Sidhu S. (2004). Formation and destruction of chlorinated pollutants during sewage sludge incineration. *Environmental science & technology*, 38(10), 2953-2958.
17. Gavala H. N., Angelidaki I., Ahring B. K. (2003). Kinetics and modeling of anaerobic digestion process. *In Biomethanation I*, 57-93.
18. Gebreyessus G. D., Jenicek P. (2016). Thermophilic versus Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge: A Comparative Review. *Bioengineering*, 3(2), 15.
19. Ghasimi S., Idris A., Chuah T., Tey B. (2010). The effect of C:N:P ratio, volatile fatty acids and Na levels on the performance of an anaerobic treatment of fresh leachate from municipal solid waste transfer station. *African Journal of Biotechnology*, 8 (18), 4572–81.
20. Holm-Nielsen J. B., Al Seadi T., Oleskowicz-Popiel P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource technology*, 100(22), 5478-5484.
21. Investicinė programa dumblo tvarkymui Lietuvoje (2006). *Galimybių studija. II tomas. Dumblo tvarkymo Lietuvoje investicinė programa*.
22. Yu H. Q., Fang H. H. (2003). Acidogenesis of gelatin-rich wastewater in an upflow anaerobic reactor: influence of pH and temperature. *Water research*, 37(1), 55-66.
23. Khanal S. K. (2008). Anaerobic biotechnology for bioenergy production. *Principles and Application Willey and Blackwell*, 161-86.
24. Lazcano C., Domínguez J. (2011). The use of vermicompost in sustainable agriculture: impact on plant growth and soil fertility. *Soil nutrients*, 10, 1-23.
25. Lettinga G., Rebac S., Zeeman G. (2001). Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. *TRENDS in Biotechnology*, 19(9), 363-370.
26. Martins M. N. C., de Souza V. V., Silva Souza T. (2016). Genotoxic and mutagenic effects of sewage sludge on higher plants. *Ecotoxicology and environmental safety*, 124, 489-496.

27. Mattana S., Petrovicová B., Landi L., Gelsomino A., Cortés P., Ortiz O., Renella G. (2014). Sewage sludge processing determines its impact on soil microbial community structure and function. *Applied Soil Ecology* 75, 150-161.
28. Matuzevičius A. (1998). *Nuotekų valymas aktyviuoju dumblu*. Vilnius: Technika.
29. Mažeikienė A., Valentukevičienė M. (2012). *Biotechnologijos vandentvarkoje*. Vilnius: Technika.. 100-112 p.
30. Minalga R. (2010). *Atliekų šalinimo logistika*. Vilnius: Justitia.
31. Monnet F. (2003). An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes. *Final Report. Scotland*, 48.
32. Ofverstrom S. (2009). *Nuotekų dumblo apdorojimo anaerobiniu būdu tyrimai ir vertinimas*. Disertacinio darbo ataskaita. Vilnius, 72 p.
33. Perrez-Elvira S. I, Nieto Diez P., Fdz-Polanco F. (2006). Sludge minimisation technologies. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 5, 375–398.
34. Persson M., Jönsson O., Wellinger, A. (2006). Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. *Bioenergy task* 37, 1-34.
35. Reith J. H., Wijffels R. H., Barten, H. (2003). Bio-methane and bio-hydrogen: status and perspectives of biological methane and hydrogen production. *Dutch Biological Hydrogen Foundation*.
36. Samaras P., Papadimitriou C. A., Haritou I., Zouboulis A. I. (2008). Investigation of sewage sludge stabilization potential by the addition of fly ash and lime. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1), 1052-1059.
37. Sanders W. T. M. (2001). Anaerobic hydrolysis during digestion of complex substrates. *Wageningen Universiteit*.
38. Santosh Y., Sreekrishnan T. R., Kohli S., Rana V. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques - a review. *Biores. Technol.* 95:1–10.
39. Seng B., Khanal S. K., Visvanathan C. (2010). Anaerobic digestion of waste activated sludge pretreated by a combined ultrasound and chemical process. *Environmental Technology* 31:3, 257-265.
40. Sykes R. M. (2003). Biological wastewater treatment processes. *Water Research*, 16(11), 1501.
41. Suh Y. J., Rousseaux P. (2002). An LCA of alternative wastewater sludge treatment scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*, 35(3), 191-200.

42. Suryawanshi P., Chaudhari A., Kothari R. (2010). Thermophilic anaerobic digestion: the best option for waste treatment. *Critical Reviews in Biotechnology*, 30 (1), 31–40.
43. Tavares C.R.G., Benatti C.T., Dias Filho B.P. (2002). Treatment of Sewage Sludge Generated in Municipal Wastewater Treatment Plants. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 98–100
44. Tyagi V. K., Lo S. L. (2013). Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 708-728.
45. Turovskiy I. S., Mathai P. K. (2006). Wastewater sludge processing. *John Wiley & Sons*.
46. Vesilind P.A. (2003). Wastewater Treatment Plant Design. *Water Environment Federation*, 209.
47. Vindis P., Mursec B., Janzekovic M., Cus F. (2009). The impact of mesophilic and termophilic -anaerobic digestion on biogas production. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 36/2, 192-198.
48. Wiese J., Konig R. (2007). Application Report: Laboratory analysis & Process analysis, BiogasPlant Monitoring. *EnerCess GmbH & HACH LANGE GmbH*, 12 p.
49. Wilkie A. C. (2005). Anaerobic digestion: biology and benefits. *Dairy Manure Management: Treatment, Handling, and Community Relations*, 63-72.
50. Zuokaitė E. (2011). Kompostuojamo nuotekų dumblo tyrimai ir dujinių emisijų mažinimo būdai. *Daktaro disertacijos santrauka*, Vilnius, 20 p.