



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Egidijus Stravinskas

**DETERGENTŲ VALYMAS IŠ NUOTEKŲ TAIKANT SUSPENDUOTO  
SLUOKSNIO METODĄ**

**WASTE WATER CLEANING FROM DETERGENTS BY USING  
SUSPENDED LAYER METHOD**

Baigiamasis magistro darbas

Technologijos mokslų sritis

Mechanikos inžinerijos mokslo kryptis

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 62409T111

Aplinkos apsaugos įrenginių projektavimo ir gamybos specializacija

Vilnius, 2010

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

\_\_\_\_\_  
(Parašas)

doc. dr. Mindaugas Jurevičius

(Vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(Data)

Egidijus Stravinskas

**DETERGENTŲ VALYMAS IŠ NUOTEKŲ TAIKANT SUSPENDUOTO  
SLUOKSNIO METODĄ**

**WASTE WATER CLEANING FROM DETERGENTS BY USING  
SUSPENDED LAYER METHOD**

Baigiamasis magistro darbas

Technologijos mokslų sritis

Mechanikos inžinerijos mokslo kryptis

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 62409T111

Aplinkos apsaugos įrenginių projektavimo ir gamybos specializacija

**Vadovas** doc. dr. Vytautas Striška

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(Parašas)

\_\_\_\_\_  
(Data)

**Konsultantas** lekt. A. Petrėtienė

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(Parašas)

\_\_\_\_\_  
(Data)

**Konsultantas** \_\_\_\_\_

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(Parašas)

\_\_\_\_\_  
(Data)

Vilnius, 2010

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

**Mechanikos** fakultetas

**Mašinų gamybos** katedra

ISBN ISSN

Egz. sk. 1

Data **2010-05-15**

**Mechanikos inžinerijos** studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Detergentų valymas iš nuotekų taikant suspenduoto sluoksnio metodą**

Autorius **Egidijus Stravinskas**

Vadovas doc. dr. **Vytautas Striška**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐

užsienio

### **Anotacija**

Baigiamajame darbe pateikta: detergentų paplitimas, jų fizikinės, cheminės savybės, klasifikacija ir daroma žala aplinkai. Analizuojami detergentais užterštų nuotekų valymo metodai. Analizuojami dujų burbuliukų susidarymo detergentų tirpaluose ypatumai, aprašomos dinaminės ir statišškai stabilios putos, pateikiama putų aparatų charakteristika. Pateikiamos suspenduoto sluoksnio charakteristikos ir jo galimybės detergentams iš nuotekų valyti. Darbo tikslas – ištirti suspenduoto sluoksnio įtaką valant detergentus iš nuotekų.

Darbą sudaro 7 dalys: įvadas; tyrimo objektas ir problemos aprašymas; detergentais užterštų nuotekų valymas, putų burbuliukų ir putų susidarymo ypatumai, putų aparatai; suspenduoto sluoksnio charakteristikos ir jo galimybės panaudojant detergentams iš nuotekų valyti; eksperimentinė dalis; išvados; literatūros sąrašas.

Eksperimentinėje dalyje teoriškai apskaičiuoti suspenduoto sluoksnio parametrai, aprašomas eksperimentinis stendas, jo veikimo principas, naudotos matavimo priemonės, pateikta eksperimento atlikimo metodika, pagal gautus eksperimentinius duomenis apskaičiuoti kintamieji suspenduoto sluoksnio parametrai. Darbo pabaigoje analizuojami gauti rezultatai ir pateikiamos darbo išvados.

Darbo apimtis – 67 p. teksto be priedų, 21 iliustracija, 4 lentelės, 24 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

**Reikšminiai žodžiai:** paviršiaus aktyvios medžiagos (PAM), putos, suspenduotas sluoksnis, vandens paviršiaus įtempimas, vandens valymas, vanduo.

Vilnius Gediminas Technical University

**Mechanical** faculty

**Machine engineering** department

ISBN      ISSN

Copies No. 1

Date **2008-05-15**

**Mechanical engineering** study programme master thesis.

Title: **Waste water cleaning from detergents by using suspended layer method**

Author **Egidijus Stravinskas**

Academic supervisor doc. dr. **Vytautas Striška**

Thesis language

☒ Lithuanian

☐ Foreign (English)

### **Annotation**

Thesis submits the spread of detergents, their physical, chemical properties, classification and environmental damage. There are analyzed various waste water cleaning methods of detergents. Froth formation in detergent leaches, dynamic and static stability of foams and basic information about froth devices are given. The characteristics of the suspended layer and its use in water treatment of detergents are given. The aim of this work – is to explore the suspended layer in cleaning waste water of detergents.

Final work consists of seven parts: introduction; the subject matter and the problem description; water purification of synthetic detergents, characteristics of froth bubbles and froth formation, froth machines; suspended layer characteristics and the possibility of using it in waste water cleaning of detergents; experimental part; conclusions and references.

Experimental part includes theoretically calculated suspended layer parameters, description of the experimental stand, its operating principle, instruments used during the experimental procedures, calculations of suspended layer variable settings according to the experimental data. In the end the results are analyzed and the conclusions are included.

Thesis consists of: 67 p. text without appendixes, 21 picture, 4 tables, 24 bibliographical entries.

Appendixes included.

**Keywords:** froth, surface active elements (SAE), suspended layer, water, water treatment, water surface tension.

## TURINYS

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS .....                                                                                                              | 6  |
| LENTELIŲ SĄRAŠAS .....                                                                                                               | 7  |
| ĮVADAS .....                                                                                                                         | 8  |
| 1. TYRIMO OBJEKTAS IR PROBLEMOS APRAŠYMAS .....                                                                                      | 10 |
| 1.1. Paviršinio aktyvumo medžiagų (PAM) reikšmė, gamybos lygis, vartojimas, paplitimas ir didžiausios leistinos koncentracijos ..... | 10 |
| 1.2. Paviršinio aktyvumo medžiagų klasifikavimas ir nomenklatūra .....                                                               | 14 |
| 1.3. Paviršinio aktyvumo medžiagų vandeninių tirpalų savybės .....                                                                   | 16 |
| 1.4. Bendrosios žinios apie sintetinius ploviklius SP .....                                                                          | 19 |
| 1.5. Gamtos apsauga nuo ploviklių poveikio .....                                                                                     | 20 |
| 2. DETERGENTAIS UŽTERŠTŲ NUOTEKŲ VALYMAS, PUTŲ BURBULIUKŲ IR PUTŲ SUSIDARYMO YPATUMAI, PUTŲ APARATAI .....                           | 23 |
| 2.1. Dujų burbuliukų susidarymo detergentų tirpaluose ypatumai .....                                                                 | 25 |
| 2.2. Fizikiniai cheminiai putų susidarymo proceso ypatumai .....                                                                     | 27 |
| 2.3. Dinaminės ir statiškos stabilios putos .....                                                                                    | 29 |
| 2.4. Putų aparatai: trumpa charakteristika ir panaudojimas .....                                                                     | 33 |
| 3. SUSPENDUOTO SLUOKSNIO CHARAKTERISTIKOS IR JO GALIMYBĖS PANAUDOJANT DETERGENTAMS IŠ NUOTEKŲ VALYTI .....                           | 37 |
| 4. EKSPERIMENTINĖ DALIS .....                                                                                                        | 42 |
| 4.1. Teoriniai suspenduoto sluoksnio skaičiavimai .....                                                                              | 42 |
| 4.2. Eksperimentinio stendo aprašymas .....                                                                                          | 51 |
| 4.3. Matavimo priemonės .....                                                                                                        | 53 |
| 4.4. Eksperimento atlikimo metodika .....                                                                                            | 54 |
| 4.5. Eksperimentinio rezultatų sulavinimas su teoriniais skaičiavimais .....                                                         | 59 |
| IŠVADOS .....                                                                                                                        | 63 |
| LITERATŪROS SĄRAŠAS .....                                                                                                            | 64 |
| PRIEDAI .....                                                                                                                        | 66 |

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

|                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1 pav.</b> Liotropinės mezamorfinės būsenos struktūros, sudarytos iš micelinių agregatų                                                                                                                                    | 18 |
| <b>2 pav.</b> Putų burbuliukų susidarymas                                                                                                                                                                                     | 27 |
| <b>3 pav.</b> Įvairių veiksnių įtaka putų susidarymui                                                                                                                                                                         | 30 |
| <b>4 pav.</b> Statiškai stabilių putų karkasas                                                                                                                                                                                | 32 |
| <b>5 pav.</b> Dvigubi jonų sluoksniai                                                                                                                                                                                         | 34 |
| <b>6 pav.</b> Putų srauto struktūra                                                                                                                                                                                           | 35 |
| <b>7 pav.</b> Dinaminių putų įrenginys                                                                                                                                                                                        | 36 |
| <b>8 pav.</b> Struktūrinių putų įrenginys                                                                                                                                                                                     | 37 |
| <b>9 pav.</b> Srauto judėjimo per kietų dalelių sluoksnį schemos ir srauto greičio įtaka sluoksnio hidrauliniams pasipriešinimui                                                                                              | 39 |
| <b>10 pav.</b> Srautų skverbimosi pro grūdinės įkrovos pseudoverdantįjį sluoksnį                                                                                                                                              | 41 |
| <b>11 pav.</b> Eksperimentinis stendas                                                                                                                                                                                        | 53 |
| <b>12 pav.</b> Slėgio reguliatorius CYL–1                                                                                                                                                                                     | 54 |
| <b>13 pav.</b> Rotametas RAGG                                                                                                                                                                                                 | 54 |
| <b>14 pav.</b> Suspenduoto sluoksnio formavimas su granulėmis, kurių tankis $\rho_1 = 840 \text{ kg/m}^3$                                                                                                                     | 55 |
| <b>15 pav.</b> Suspenduoto sluoksnio formavimas su granulėmis, kurių tankis $\rho_2 = 910 \text{ kg/m}^3$                                                                                                                     | 56 |
| <b>16 pav.</b> Suspenduoto sluoksnio formavimas su granulėmis, kurių tankis $\rho_3 = 950 \text{ kg/m}^3$                                                                                                                     | 56 |
| <b>17 pav.</b> Suspenduoto sluoksnio formavimas su granulėmis, kurių tankiai: $\rho_4 = 2500 \text{ kg/m}^3$ ; $\rho_5 = 2700 \text{ kg/m}^3$                                                                                 | 56 |
| <b>18 pav.</b> Putų stulpelio aukštis valant iš nuotekų detergentus naudojant suspenduotą sluoksnį ir nenaudojant suspenduoto sluoksnio. Detergentai – skalbimo milteliai, skirti plauti rankomis, koncentracija 1 g/l        | 58 |
| <b>19 pav.</b> Putų stulpelio aukštis valant iš nuotekų detergentus naudojant suspenduotą sluoksnį ir nenaudojant suspenduoto sluoksnio. Detergentai – skalbimo milteliai, skirti plauti rankomis, koncentracija 0,5 g/l      | 58 |
| <b>20 pav.</b> Putų stulpelio aukštis valant iš nuotekų detergentus naudojant suspenduotą sluoksnį ir nenaudojant suspenduoto sluoksnio. Detergentai – skalbimo milteliai, skirti plauti skalbimo mašiną, koncentracija 1 g/l | 59 |

**21 pav.** Putų stulpelio aukštis valant iš nuotekų detergentus naudojant suspenduotą sluoksnį ir nenaudojant suspenduoto sluoksnio. Detergentai – skalbimo milteliai, skirti plauti skalbimo mašiną, koncentracija 0,5 g/l 59

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1 lentelė.</b> PAM naudojimo sritys                                                                                                        | 12 |
| <b>2 lentelė.</b> PAM poreikis JAV rinkoje                                                                                                    | 13 |
| <b>3 lentelė.</b> Anijoninių ir nejoninių sintetinių veikliųjų paviršinių medžiagų didžiausios leidžiamos koncentracijos (DLK)                | 15 |
| <b>4 lentelė.</b> Anijoninių detergentų koncentracija nuotekose po valymo naudojant suspenduotą sluoksnį ir nenaudojant suspenduoto sluoksnio | 60 |

## IVADAS

Detergentai yra svarbiausios sudedamosios dalys medžiagų, kurios padeda mažinti vandens paviršiaus įtempimą, plaunant ar skalbiant gerai pašalina nešvarumus. Dėl savo savybių PAM naudojamos daugelyje veiklos sričių: skalbimo ir valymo priemonėms gaminti, sintetinio kaučiuko, cheminio pluošto ir plastmasių gamyboje, metalo apdirbimo, statybos, tekstilės, celiuliozės, naftos, odos pramonėje, vaistinių medžiagų, kosmetikos priemonių, lako, dažų, plastmasės gamyboje bei žemės ūkyje, kaip emulsikliai apdorojant grūdus ir augalus pesticidais. Šios medžiagos plačiai naudojamos buityje kaip skalbimo milteliai, plovimo skysčiai, šampūnai ir kitos valymo priemonės.

Detergentas [lot. *detergens* (kilm. *detergentis*) – valantis], chemikalas, kurio vandeniniu tirpalu plaunami užteršti paviršiai, [23].

Paviršiaus aktyviosios medžiagos (PAM) – detergentai, tai etileno oksido junginiai su aukštesnės klasės alkoholiais, rūgštimis, alkilofenoliais, riebiųjų rūgščių amidais, [12].

„Aplinkos apsaugos terminų žodyne“ detergento, ploviklio pateikiami du apibrėžimai: 1 skalbimo medžiagos arba jų mišiniai, kurių vandeniniais tirpalais valomi (plaunami) nešvarūs paviršiai; 2 paviršinio aktyvumo medžiaga teršalams šalinti nuo kietųjų paviršių, [14].

Žmogaus gyvenimą palengvinantys detergentai pridaro daug žalos, juose esantys fosfatai kartu su buitinais, pramoniniais, žemės ūkio nutekamaisiais vandenimis ir nuoplovomis patenka į vandens telkinius ir teršia natūralią aplinką. Turi įtakos vandenyje vykstantiems cheminiams ir biologiniams procesams: keičia vandens skonį ir kvapą, paviršinį įtempimą – dėl to kinta deguonies ir temperatūros režimai, be to, stabdoma organinių medžiagų mineralizacija, kai kurių vandenyje gyvenančių organizmų vystymasis, ardoma žuvų žiaunų gleivinė. Detergentų neskaldo mikrobai ir jie tik pamažu išnyksta iš vandens ir dirvožemio, [15].

Svarbu, kad žmogus racionaliai naudotų detergentus arba ieškotų kitokių, ne tokių kenksmingų valiklių. Jau dažniau prekyboje atsiranda priemonių, neturinčių fosfatų. Būtina atsiminti, kad detergentų negalima pilti į atvirus vandens telkinius, upes ar ežerus, o tik į specialiai tam paruoštas vietas.

Sprendžiant gamtosauginius klausimus, tokius kaip naujų, efektyvių nukenksminimo, valymo, utilizavimo metodų kūrimas, tyrimas ir realizavimas, vis aktualesne problema tampa efektyvių, ekonomiškų technologinių procesų paieškos, tyrimo ir tuos procesus realizuojančių aparatų kūrimo uždaviniai.



Iki pastarojo laiko nesukurti ekonomiškai, efektyvūs nutekamojo vandens, užteršto sunkiaisiais angliavandeniliais, sintetinėmis dervomis, įvairiomis organinėmis ir mineralinėmis medžiagomis, susidarančiomis chemijos, naftos perdirbimo, metalurgijos, maisto ir kitose pramonės šakose, valymo metodai. Šiuo metu egzistuojantys valymo metodai pasižymi daugeliu trūkumų, o atskirais atvejais negali būti panaudoti „iš principo“, pavyzdžiui, užteršus nutekamąjį vandenį didelės koncentracijos detergentais. Sintetiniais detergentais užteršto nutekamojo vandens negalima išvalyti biocheminiais metodais, nes detergentai nesioksiduoja, stabdo aktyviojo dumblo vystymąsi arba net „žudo“ jį. Detergentai apsunkina vandens valymą cheminiais būdais, o valant terminiais metodais, pavyzdžiui, nugarinant, susidariusios putos visiškai sutrikdo technologinį procesą. Nutekamojo vandens, užteršto detergentais, valymo problemos sprendimas yra daugelio mokslininkų, inžinierių ir konstruktorių dėmesio centre, tačiau problema, nepaisant aktualumo, dar iki galo neišspręsta.

# 1. TYRIMO OBJEKTAS IR PROBLEMOS APRAŠYMAS

## 1.1. Paviršinio aktyvumo medžiagų (PAM) reikšmė, gamybos lygis, vartojimas, paplitimas ir didžiausios leistinos koncentracijos

PAM molekulių struktūros ypatumai nulemia dvi pagrindines jų savybes: adsorbciją iš tirpalo fazių ribos paviršiuje ir stambių agregatų (micelių) susidarymą tirpale. PAM dėl šių dviejų savybių naudojamos daugelyje pramonės šakų, žemės ūkyje, transporto srityje bei sprendžiant ekologines problemas.

Išskiriamos trys šakų grupės, kurių plėtojimas glaudžiai susietas su PAM naudojimu.

Pirmajai grupei priskiriamos gamybos, kuriose PAM naudojamos jau daugelį metų ir jų asortimentas bei kokybiniai rodikliai nuolat gerinami. Tai įvairių rūšių sintetiniai plovimo, farmaciniai ir kosmetiniai preparatai, pagalbinės tekstilės medžiagos, emulsikliai naudojami polimerų sintezėje, kaučiukų, lateksų gamybose.

Antrąją grupę sudaro šakos, kuriose PAM asortimentas ir reikalavimai jų kokybei suformuluoti neviseiškai, tačiau ateityje jos gali būti pagrindinis PAM vartotojas. Tai energetinio komplekso šakos: naftos ir dujų gavyba ir pirminis perdirbimas, anglies pramonė, mašinų gamybos kompleksas; įvairios paskirties techniniai plovimo preparatai, konservavimo tepalai, tepimo ir aušinimo skysčiai ir kt., taip pat chemijos ir miško kompleksas: celiuliozės, popieriaus ir gaminių iš popieriaus gamyba.

Trečiąją grupei priskiriamos greitai tobulėjančios ir daug mokslo tyrimų reikalaujančios šakos, kur PAM kol kas naudojamos tik laboratoriniuose ir bandomosios gamybos tyrimuose: biotechnologija, elektronika, gyvūnų ir augalų biologinės apsaugos preparatai. Dauguma gamtinių ir dirbtinių medžiagų pagaminama cheminės technologijos ir biotechnologijos procesuose, vykstančiuose dažniausiai heterogeninėmis sąlygomis. Todėl PAM adsorbcija tarpfazinėje riboje turi esminės įtakos procesų greičiui ir vyksmo kryptčiai. Jos pakeičia vilgymo ir dispergavimo sąlygą taip pat įvairių dispersinių sistemų (putų, emulsijų, suspensijos, aerozolių) stabilumą.

PAM naudojimas įvairiose srityse dabar yra vienas iš svarbiausių ir neretai vienintelis technologinių procesų intensyvinimo, gamybos našumo didinimo, produkcijos kokybės gerinimo ir resursų ekonomijos būdas, [12].

**Pasaulinė PAM gamyba ir vartojimas.** PAM gamyba išsivystė per paskutiniuosius 50 metų. 1939 m. pasaulyje buvo pagaminta 14 tūkst. tonų PAM, 1960 m. – 1,8 mln. tonų, 1985 m. – 6,5 mln. tonų. Stambiausi PAM gamintojai pasaulyje yra JAV, Japonija ir Vokietija.

1990 m. pasaulinė PAM gamybos apimtis buvo apie 15 mln. tonų. Muilų gamyba tais pačiais metais siekė 8 mln. tonų ir jie daugelyje pasaulio šalių yra vis dar svarbiausia kasdieninio naudojimo PAM. Be muilų, kiekybiškai svarbiausia PAM klasė yra alkilbenzensulfonatai, kurių pagaminta apie 2 mln. tonų.

Parduodamos PAM daugiausia yra sudedamosios dalys galutiniams produktams, į kurių kompozicijas be PAM dedama ir paviršinio aktyvumo neturinčių medžiagų. Daugeliu atvejų nežinoma, koks PAM sunaudojimas gaminant atskirus gaminius, nes nežinoma pramoninių produktų sudėtis. Todėl nėra tikslių duomenų apie bendrą PAM sunaudojimą. PAM sunaudojimą atskirose srityse JAV, Japonijoje ir Vakarų Europoje atspindi duomenys, pateikti 1 lentelėje, [12].

1 lentelė. PAM naudojimo sritys

| Pramonės šaka                              | PAM suvartojimas, mln. t. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Plovimo ir valymo                          | 1900                      |
| Kosmetikos ir farmacijos                   | 300                       |
| Tekstilės ir pluoštų                       | 200                       |
| Odų ir kailių                              | 50                        |
| Dažiklių, dangų ir plastikų                | 200                       |
| Celiuliozės ir popieriaus                  | 100                       |
| Kalnakasybos, flotacijos ir naftos gamybos | 300                       |
| Metalo apdirbimo                           | 130                       |
| Statybinių medžiagų ir statybos            | 50                        |
| Augalų apsaugos                            | 100                       |
| Maisto                                     | 200                       |
| Kitos                                      | 400                       |

**PAM gamyba ir vartojimas ateityje.** Manoma, kad svarbiausios PAM gamybos ir vartojimo tyrimo ir plėtojimo kryptys tokios:

- biologiškai yrančių PAM sintezė iš naftos žaliavos;
- PAM asortimento plėtimas naudojant įvairias angliavandenilių frakcijas ir cheminę žaliavą tikslingam jų vartojimui konkrečiose srityse;
- nuolatinis PAM vartojimo pramonėje ir buityje plėtimas;
- PAM gamybos iš atsinaujinančių žaliavų (sojų, kokoso, palmių ir kitų rūšių aliejų bei gyvulinės kilmės riebalų) ir vartojimo sferų plėtimas.

PAM naudojimas labai įvairus. Pripažintas jų vaidmuo muilų ir ploviklių (detergentų) sudėtyje. Paviršinio aktyvumo agentai yra veiksmingos pagalbinės medžiagos daugelyje įvairių gamybos procesų. Pavyzdžiui, PAM iš riebiųjų rūgščių azoto darinių naudojamos apsaugai nuo oksidacijos ir rūgštinės korozijos. Jos taip pat naudojamos trąšų gamyboje, kai reikia išvengti smulkiagrūdės medžiagos sulipimo į gabalus, dervų ir asfalto emulsavimui, pigmentų dispergavimui ir suminkštinimui, odos suminkštinimui ir hidrofobizavimui.

PAM taikymas toks platus, kad jos svarbios modernizuojant ir plėtojant pramonę. PAM sėkmingai naudojamos įsisavinant gamtinius resursus, pavyzdžiui, norint padidinti atrakinį vilgumą naftos išgavimo procesuose, tuo palengvinti naftos išlaisvinimą nuo paviršių. 1995 m. JAV PAM naudojamų asmens higienai ir namų priežiūrai gamyba padidinta 2 % ir bendrosios rinkos dydis pasiekė 4,3 bilijonus dolerių.

Neseniai PAM pradėtos naudoti vietoje chloro junginių, pakeičiant, pavyzdžiui, ozoną sueikvojančius chloro ir fluoro turinčius angliavandenilius. Sukurtos siloksaninės PAM tinkamos putų poliuretanų gamybai ir įgalinančios atsisakyti vandenilio chlorido ir fluorintų angliavandenilių naudojimo. Siloksaninės PAM sudaro smulkesnes narvelinės struktūros putas su geresne termine izoliacija, negu daugelis kitų PAM. PAM pradėtos naudoti emulsinėje polimerizacijoje, norint pagerinti akrilinių polimerų savybes.

Nepaisant potencialių galimybių pramoniniam taikymui, PAM gamintojai daugiausia dėmesio skiria plataus vartojimo gaminių gamybai (1 ir 2 lentelės).

2 lentelė. PAM poreikis JAV rinkoje (1990 m. bendras – 7 bilijonai svarų)

| Vartojimo sritis                 | Poreikis |
|----------------------------------|----------|
| Muilams                          | 10 %     |
| Plovikliams                      | 16 %     |
| Pramoniniams procesams           | 42 %     |
| Indų plovikliams                 | 7 %      |
| Šampūnams                        | 6 %      |
| Pramoniniam valymui              | 6 %      |
| Maisto produktų gamybai          | 5 %      |
| Kosmetikai ir tualetų reikmenims | 1 %      |
| Kitam naudojimui                 | 7 %      |

PAM sunaudojimo didėjimas ar mažėjimas vartojamųjų gaminių gamyboje ateityje nulems ar plis jų naudojimas kitose srityse, [12].

**Taršos paplitimas dėl antropogeninės veiklos.** Įvairiose pasaulio šalyse paviršinio aktyvumo medžiagos naudojamos tūkstančiais tonų per metus ir dauguma jų patenka į aplinką. Tokios taršos pavyzdys gali būti dokumentuota Vakarų Vokietijos 1980 metų statistinė apskaita, pagal kurią tais metais Vokietija suvartojo 27 000 tonų PAM ir iš jų 23 000 tonų rasta nuotekose. PAM nuodingumas gamtai ir patys bendriausi PAM poveikio ir kenksmingumo aplinkai efektai:

- 1) tokios PAM kaip alkilbenzensulfonatai 0,1 mg/l koncentracija suteikia vandeniui nemalonų prieskonį. 0,2 mg/l koncentracija stabilizuoja nemalonus kitų medžiagų kvapus vandenyje;
- 2) gerina naftos produktų ir kitų organinių medžiagų emulsavimą vandenyje ir kartu jų sklaidimą, stabilizuoja jau esamas emulsijas;
- 3) koncentruoja medžiagas, pavyzdžiui, pesticidus interfazinėje mikroninio vandens sluoksnio plėvelėje;
- 4) sudaro putas, kuriose koncentruojasi: pačios PAM, kitos organinės medžiagos, patogeniniai mikroorganizmai, vėjas skatina tokios formos teršalų kompleksų migraciją;
- 5) susidariusi mikropilvelė ar putos ant vandens paviršiaus sutrikdo vandens telkinio aeraciją, todėl sustoja savaiminis jo valymas, mažėja dumblių gyvybingumas;
- 6) iš visų hidrobiontų nuo PAM labiausiai kenčia žuvis, nes PAM adsorbuojasi ant jų žiaunų, sutrikdo dujų apykaitą ir deguonies patekimą į kraują;
- 7) PAM greitina kitų kancerogeninių medžiagų veikimą.

Pagrindinės žmogaus veiklos sritys, kur naudojamos PAM: Buitis (skalavimo priemonės); Medicina (farmakologija – dezinfekuojančios medžiagos); Parfumerijos ir kosmetikos gamyba, vartojimas; Maisto pramonė; Mikrobiologijos pramonė; Odos, kailių apdirbimas; Popieriaus (celiuliozės) pramonė; Poligrafija; Metalurgija (galvanika), mašinų gamyba; Kalnakasyba; Naftos ir dujų gavyba; Tekstilės pramonė (nuotekos turi iki 2,5 g/l anijoninių PAM); Organinės sintezės chemijos pramonė (nuotekos turi iki 10 g/l nejonogeninių PAM); Sintetinių skalavimo priemonių gamyba (nuotekos turi iki 10 g/l PAM); Transportas ir žemės ūkis, [12].

## Sintetinių veikliųjų paviršiaus medžiagų DLK

3 lentelė. Anijoninių ir nejoninių sintetinių veikliųjų paviršinių medžiagų didžiausios leidžiamos koncentracijos (DLK) [8]

| Medžiagos pavadinimas                                 | Mata-vimo viene-tas | DLK, į nuotekų surinkimo sistemą | DLK, į gamtinę aplinką | DLK, vandens telkinyje – priimtuve | <i>Ribinė koncentracij a<sup>1</sup>, į nuotekų surinkimo sistemą</i> | <i>Ribinė koncentracij a<sup>1</sup>, į gamtinę aplinką</i> |
|-------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Sintetinės veiklios paviršinės medžiagos (anijoninės) | mg/l                | 10                               | 1,5                    | -                                  | 2                                                                     | 0,6                                                         |
| Sintetinės veiklios paviršinės medžiagos (nejoninės)  | mg/l                | 15                               | 2                      | -                                  | 3                                                                     | 0,8                                                         |

Pastabos:

<sup>1</sup> Ribinė koncentracija – ribinė didžiausia apskaičiuota, išmatuota arba planuojama medžiagos koncentracija, iki kurios šios medžiagos normuoti/kontroliuoti dar nereikia.

### 1.2. Paviršinio aktyvumo medžiagų klasifikavimas ir nomenklatūra

Pagrindinis plovimui naudojamų pramoninių preparatų komponentas – paviršinio aktyvumo medžiaga (PAM). Amfifiliškumas yra svarbiausia PAM charakteristika. Polinė amfifilinės molekulės dalis yra hidrofilinė, o nepolinė – hidrofobiška.

Priklausomai nuo tirpumo įvairiose terpėse, PAM skirstomos į: 1) vandenyje tirpias, 2) vandenyje mažai tirpias ir 3) aliejuose tirpias.

Atsižvelgiant į cheminę sudėtį ir elgesį tirpaluose, PAM skirstomos į anijonines, katijonines, amfolitines ir nejonines; pirmosios trys sudaro joninių PAM grupę, [12].

**Anijoninės PAM.** Tai junginiai, kurie vandenyje disocijuoja susidarant paviršiuje aktyviam anijonui ir metalo katijonui ar kietam elektronų donorui.

Anijoninės PAM sudaro didžiausią visų gaminamų PAM dalį – apie 60 %.

Šiai grupei priskiriamas natrio laurisulfatas (natrio dodecilsulfatas), kuris yra aktyvus rūgštinėje terpėje. Ši PAM yra brangi, todėl dažniausiai naudojama gaminant kosmetikos priemones, šampūnus, dantų pastas. Pigesnės PAM gaminamos iš naftos perdirbimo produktų. Pvz.:

alkilfenislsulforūgšties natrio druskos tipo detergentai gaminami iš propeno, benzeno, sulfato rūgšties ir bazės, dažniausiai natrio karbonato.

Šio tipo detergentai yra šakotos struktūros ir todėl jų neardo mikroorganizmai. Šiuo metu jų gamyba, o kartu ir vartojimas yra ribojami siekiant išvengti vandenų užterštumo.

Efektyvios paviršiuje aktyvios medžiagos yra tos, kurių sudėtyje yra fosfatų. Fosfatai veikia kaip ir vandens minkštintojai, nes sudaro tirpius kompleksinius junginius su  $\text{Ca}^{2+}$  ir  $\text{Mg}^{2+}$  jonais, [12].

**Katijoninėm PAM** vadinami tokie amfifiliniai junginiai, kurie vandeniniame tirpale disocijuoja ir yra pusiausvyroje su paviršiuje aktyviu katijonu ir atitinkamu anijonu.

Katijoninės PAM plovimo procesuose naudojamos kaip minkštinančios ir antistatinės pagalbinės medžiagos paviršiniam įvairių gaminių apdorojimui po to, kai jie plauti anijoninėm ar nejoninėm PAM. Katijoninės PAM molekulė dažniausiai turi azoto, fosforo ar sieros atomą, kuris būna teigiamo krūvio nešėjas.

Kartu su amfolitinėmis PAM, katijoninės PAM sudaro apie 7 % nuo PAM gamybai naudojamų sintetinių plovimo priemonių, [12].

**Amfolitinės PAM** – tai tokie amfifiliniai junginiai, kurie disocijuodami šarminėje terpėje jonizuojasi iki paviršiuje aktyvaus katijono. Esant tam tikrai pH vertei, kai jonizuotų PAM molekulės aktyvių teigiamų ir neigiamų centrų krūvių skaičius susilygina, molekulė įgyja nejoninių junginių savybių. Be didelio kiekio sintetinių amfolitinių paviršiuje aktyvių medžiagų šiai grupei priskiriamos gamtinės (baltymai), modifikuotos (celiuliozės dariniai, baltymų hidrolizatai) PAM.

Amfolitinės PAM naudojamas vietoje anijoninių PAM gaminant šampūnus vaikams, nes mažiau dirgina akis ir nesukelia ašarojimo, [12].

**Nejoninėmis PAM** vadinami amfifiliniai junginiai, kurie tirpaluose nedisocijuoja ir nesudaro jonų. Jos skiriasi nuo anijoninių tuo, kad jų amfiliškumą sąlygoja funkcinės grupės, turinčios tik solvatavimo savybių, bet ne polinkį disocijuoti.

Nejoninės PAM labai gerai emulguoja riebalus ir nešvarumus, tačiau gauta suspensija lyginant su anijoninėmis PAM ir nešvarumų emulsija, yra nestabili. Etoksilatų alkoholiai labiau tirpsta šaltame vandenyje nei šiltame, todėl šios PAM naudojamos gaminant skystus ploviklius, skirtus plauti šaltame vandenyje.

Iš nejoninių ploviklių labiausiai yra paplitę alkanolių ir alkilfenolių oksietileniniai dariniai, kurie sudaro apie 30 % visų gaminamų PAM, [12].

### **1.3. Paviršinio aktyvumo medžiagų vandeninių tirpalų savybės**

Labai praskiestuose vandeniniuose tirpaluose PAM yra monodispersinės ir, vykstant hidrofilinei ir hidrofobinei adsorbcijai pagal fazių taisyklę (Gibso lygtį), koncentruojasi tarpfazinėse ribose. Didinant PAM koncentraciją tirpalo tūryje, jos koncentracija paviršiuje didėja, kol pastarasis visiškai pasidengia PAM molekulėmis ar jonais.

Jeigu sistemos tūryje esančios PAM koncentracija neviršija jos koncentracijos tarpfaziniame paviršiuje, molekulės ar jonai yra monodispersiniame pavidale. Jei toliau didinant PAM koncentraciją sistemos tūryje, ji pradeda viršyti koncentraciją paviršiuje, tuomet PAM agreguojasi ir susidaro didesni jos molekulių agregatai – micelės.

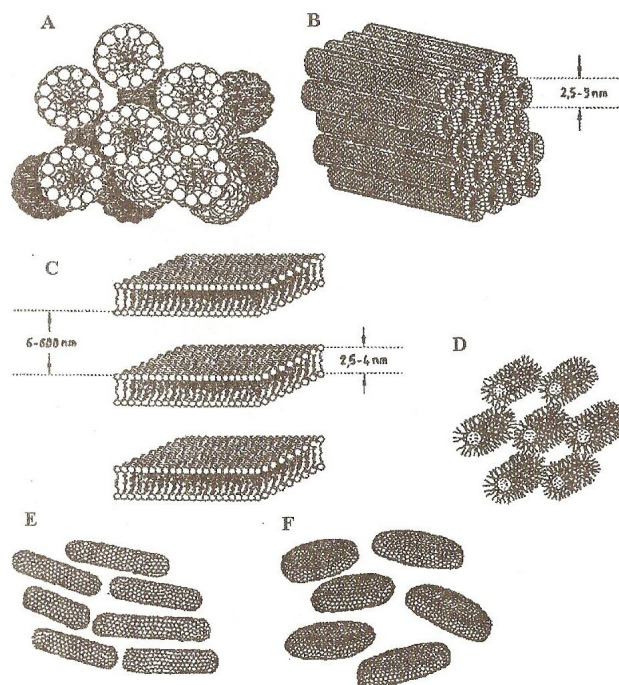
Micelėse PAM molekulės ar jonai orientuoti hidrofilinėmis grupėmis link vandens fazės, o hidrofobinėmis grupėmis – link micelės vidaus.

PAM molekulės ar jonai agreguojasi į micleles esant griežtai ribotoms koncentracijoms. Jei PAM koncentracija tirpale toliau didinama, micelių skaičius tūrio vienetu didėja, bet nedidėja monodispersinių ištirpusių molekulių ar jonų skaičius. Esant tam tikrai PAM koncentracijai tūryje, kai fazės paviršius labai ar visiškai padengtas, susidaro micelės ir tuomet paviršinė įtempis jau nepriklauso nuo bet kokio PAM koncentracijos tūryje padidėjimo.

Didinant PAM koncentraciją, dalelių skaičius tirpale didėja iki pasiekia kritinę micelių susidarymo koncentraciją, o paskui staigiai sumažėja, nes susidaro micelės. Tuomet pakinta ir visos koligatyviosios tirpalo savybės (priklausančios tik nuo dalelių skaičiaus, o ne nuo jų prigimties). Pavyzdžiui, tirpalo garų slėgis ir osmosinis slėgis, o joninių PAM atveju taip pat ir ekvivalentinis laidumas, pakinta esant kritinei micelių koncentracijai.

Keletas micelių, kurios yra sudedamosios liotropinių mezomorfinės būsenos sistemų dalys, schematiškai iliustruotos 1 paveiksle, [12].





1 pav. Liotropinės mezamorfinės būsenos struktūros, sudarytos iš micelinių agregatų: A – kubinės struktūros fazės; B – heksagoninės fazės; C – lamelinės fazės; D – inversinės heksagoninės fazės; E – nematinės cilindrinės fazės; F – nematinės disko fazės

**Būdingosios PAM tirpalų savybės.** Ištirpusi PAM adsorbuojasi tarpfazinėje riboje, sudaro micleles ir todėl suteikia tirpalams svarbias savybes: vilgumą, plovimo gebą, soliubilizavimą, emulsijų ir suspensijų stabilizavimą, kalcio muilų dispergavimą, putojimą.

*Vilgymas.* Tai procesas, kurio metu fazių sąlyčio riba tarp dujų ir kieto kūno pakeičiama tarpfazine riba tarp dujų ir kieto kūno. Kai PAM adsorbuojasi tarpfazinėje riboje taip, kad jų hidrofilinės grupės nukreipiamos į vandens fazę. Jei šios hidrofilinės grupės adsorbuojasi kieto kūno paviršiuje, o hidrofobinės grupės nukreiptos į vandens fazę, kietas kūnas pasidaro hidrofobiškas ir šis efektas naudojamas technologijose (pavyzdžiui, suteikiant tekstilės gaminiams vandens stūmos savybę, minkštumą), rūdos flotacijoje.

*Plovimas.* Jei skystis, o ypač PAM tirpalas, pakeičia skysčio lašelius ar juose esančias netirpias kietas daleles, kurios yra kieto kūno paviršiuje, ir šiuos pakeistus lašelius ar kietas daleles emulguoja ar disperguoja, procesas vadinamas plovimu.

*Soliubilizacija* yra vandenyje netirpios ar mažai tirpios medžiagos ištirpinimas PAM tirpale susidarant šių medžiagų micelėms. Kita vertus, įdėjus PAM, vanduo gali būti soliubilizuotas hidrofobiškame tirpiklyje. Tokiu būdu susidaro inversinės struktūros micelės, kuriose hidrofobinės

PAM grupės nukreiptos išorėn, o hidrofilinės grupės nukreiptos vidun (1 pav.). Soliubilizacija, panašiai kaip ir paviršinės įtempties bei tarpfazinės ribos įtempties sumažėjimas, yra būdinga PAM vandeninių tirpalų savybė.

*Emulsijų stabilizavimas* yra dviejų skysčių, kurie netirpsta ar mažai tirpsta vienas kitame, dispersinės sistemos stabilizavimas. Emulsijų stabilizavimas pagrįstas tuo, kad tarpfazine riba tarp dispersinės terpės ir dispersinės fazės padengiama PAM sluoksniu, kuris priešinasi dispersinės fazės lašelių koalescencijai. Tokios emulsijos yra metastabilios sistemos ir vadinamos makroemulsijom. Jos skiriasi nuo termodinamiškai patvarių mikroemulsijų.

*Suspensijų stabilizavimas* yra skystyje smulkiai disperguotų kietų dalelių apsauga nuo koaguliavimo ir sulaikymas nuo sedimentacijos. Kai PAM adsorbuota kieto kūno ir skysčio tarpfazinėje riboje, ji apsaugo disperguotas kietas daleles nuo agregacijos ir koaguliacijos sferiškai ekranuodama, jei PAM joninė, toks efektas gaunamas dėl elektrostatinės stūmos. Be to, tam tikromis sąlygomis PAM geba deflokuliuoti koaguluotas suspensijas nesant mechaniniam poveikiui.

*Kalcio muilų dispergavimas.* Daugelis PAM, turinčių santykinai dideles ar kelias hidrofilines atomų grupes, gali disperguoti vandenyje ribotai tirpstančias riebalų rūgščių kalcio ir natrio druskas.

*Putojimas.* Tirpale PAM linkę susikaupti dujų burbulų, tarpfazinėje riboje ir susiorientuoja taip, kad hidrofobinės molekulių dalys nukreiptos į burbulo vidų. Kai kylantis burbulas atitrūksta nuo skystos fazės paviršiaus, jo plėvelėje esanti PAM lieka prikibusi prie burbulo paviršiaus. Susidaro dvisluoksnė lamelė, sudaryta iš dviejų plėvelių kuriose hidrofilinės PAM molekulių grupės nukreiptos vidun, o hidrofobinės priešingai – lamelės išorėn (2 pav.). Tirpalas yra tarp dviejų monomolekulinio storio plėvelių. Daug tokių burbulų sudaro putas. Putų savybės susiję su lamelių mechaninėmis savybėmis ir priklauso nuo dinaminių reiškinių pasireiškiančių lamelėse ar ant lamelių (plėvelės ir tarp lamelių esančio skysčio klampos, paviršiaus plėvelių elastingumo, PAM difuzijos ir sklidumo, elektrinės stūmos, van der Valso ryšių tarp dviejų lamelės plėvelių, pralaidumo dujoms, kuris gali skatinti lamelių išdžiūvimą ir suirimą), [12].

## 1.4. Bendrosios žinios apie sintetinius ploviklius SP

Paviršinio aktyvumo medžiagos (PAM) yra tik žaliava ploviklių (detergentų) gamybai. Komponentų parinkimą ir sintetinių ploviklių (SP) gamybos plėtojimąsi sąlygoja ne tik PAM prigimtis ir savybės, bet ir jų kokybė naudojime. Svarbūs ir kiti veiksniai: SP gamybos ir naudojimo plėtojimosi tendencijos, žaliavų resursai, gamybos technologija ir reikalavimai gamtos apsaugai.

1986 m. pasaulinė SP gamybos apimtis buvo daugiau negu 30 mln. tonų. SP gamyba ir vartojimas pasaulyje netolygiai pasiskirstę. Vakarų ir Rytų Europos šalyse, Šiaurės Amerikoje ir Japonijoje, kur gyvena apie 25 % pasaulio gyventojų, sunaudojama du trečdaliai visos produkcijos.

SP gamybos plėtojimasis susijęs su daugeliu veiksnių. Tačiau svarbiausias iš jų yra reikalavimas sumažinti energijos sąnaudas. Daug reikalavimų keliama džiovinimo išpurškimo būdu procesams, kurie turi įtakos visai SP pramonei. Šiems reikalavimams priskiriami: PAM terminis ir hidrolitinis atsparumas bei mažas lakumas, o kai PAM yra suspensijoje – maža jos įtaka klampai ir komponentų tirpumui, geba sudaryti patvarias granules, suteikti pakankamą jų birumą ir miltelių tirpumą.

Vis plačiau taikomas granuliuotų SP gavimo metodas. Birios medžiagos sumaišomos su rišančiąją skysta PAM, sunaudojant mažai energijos. Gaunamas produktas apibūdinamas santykinai dideliu tariamuoju tankiu. Visiškai atsisakius džiovinimo, ne tik išvengiama imlios energijai vandens pašalinimo stadijos, bet ir neišmetama dulkių į atmosferą. Ekologiniu požiūriu SP gamyboje pageidautini alkilsulfatai, alkilpolioksietilensulfatai, sulfonalkan-karboksirūgščių druskos, alkansulfonrūgštys, alkilbenzensulfonrūgštys ir alkensulfonrūgštys. Šie junginiai atitinka reikalavimus biologiniam irstamumui. Anijoninės PAM gaminamos iš riebalų ir aliejų, išskyrus alkansulfonarus, turi pranašumą šiuo požiūriu, lyginant su produktais pagamintais iš naftos perdirbimo pramonės teikiamos žaliavos.

Nejoninės PAM, kurių pagrindas alkanoliai, taip pat atitinka paminėtus reikalavimus, nes biologiškai irstanti jų dalis siekia 80–90 %.

Ateityje reikalavimai žemam biologiniam atsparumui bus griežtinami. Tai gali priversti plovimo priemonių gamybą didžiąja dalimi vartoti natūralius riebalus ir aliejus.

SP sudėtyje taip pat ribojamas ir neorganinių fosfatų kiekis. Šie junginiai ateityje turi būti pakeisti aktyviaisiais priedais, [12].

## 1.5. Gamtos apsauga nuo ploviklių poveikio

Paviršinio aktyvumo medžiagos ir sintetinių plaunančių priemonių komponentai patenka į aplinką ir neigiamai veikia gyvuosius organizmus. Šios medžiagos gali susikaupti vandens telkiniuose bei dirvoje ir turėti žalingos įtakos florai ir faunai, o kartais – sunaikinti žuvis ir kitą vandens gyvūniją. Kiekvienoje šalyje nustatoma ribinė leistina PAM koncentracija (RLK) gamtiniuose vandenyse. Daugumoje šalių ši koncentracija 0,2–0,8 mg/l. Atmosferos ore 3 km atstume nuo plaunančių medžiagų gamyklų jų koncentracija neturi viršyti 0,03–0,05 mg/m<sup>3</sup>.

Nutekamieji vandenys užteršti PAM, patekdami su povandeniniais vandenimis į vandens telkinius, sulėtina savaiminio išsivalymo procesus. Netgi esant 0,8–2,0 mg/l koncentracijai, PAM sukelia stiprų putojimą ir pažeidžia deguonies mainus vandens telkiniuose, neigiamai paveikia pakrančių augalus. Miestų nutekamuosiuose vandenyse PAM koncentracija neturi viršyti 2,5–5,0 mg/l. Pirminio vilnos apdorojimo įmonių, kailių ir tekstilės fabrikų nutekamuosiuose vandenyse PAM koncentracija svyruoja nuo 5 iki 200 mg/l. PAM buitiniuose ir pramoniniuose nutekamuosiuose vandenyse pažeidžia biocheminio valymo įrengimų darbą.

Biocheminio valymo proceso esmę sudaro organinių medžiagų oksidinimas fermentais, kuriuos pagamina bakterijos ir kiti mikroorganizmai. Tyrimų duomenys parodė, kad maždaug 40 % teršalų, esančių nutekamuosiuose vandenyse, oksidinami iki CO<sub>2</sub> ir H<sub>2</sub>O, o likę 60 % pavirsta mikroorganizmų ląsteline medžiaga.

Nutekamųjų vandenų biocheminis valymas vyksta, veikiant aerobiniams mikroorganizmams, biofiltruose ar natūraliomis sąlygomis (filtravimo ir laistymo laukuose).

SP biocheminio suardymo problema sprendžiama visame pasaulyje. Išsivysčiusiose šalyse priimti įstatymai, leidžiantys vartoti tik tokius SP, kurie biochemiškai suyra (ne mažiau 80 %).

Dažniausiai biocheminio valymo procesas įvertinamas biologiškai sunaudojamo deguonies (BDS) kiekiu per nustatytą laikotarpį.

Pagal biologinį ištamumą visos PAM skirstomos į 3 grupes.

*Pirmajai grupei* priskiriamos "biologiškai minkštos" PAM. Jos sunaudoja deguonies proporcingai jų koncentracijai vandenyje. Šios grupės medžiagos 6 h bėgyje sunaudoja 30–40 % deguonies kiekio, reikalingo teoriškai visiškam PAM suoksidinimui. Dinaminiu metodu, imituojančiu valymo įrengimų darbą, nustatoma, kad pašalinamų PAM kiekis sudaro 80 %. Pilno skilimo greitis priklauso nuo pradinės PAM koncentracijos vandens telkinyje. Pirmosios grupės

medžiagos, esant pradinei jų koncentracijai 1 mg/l, iki galo suyra per 0,5–1,5 s, o esant 5,0 mg/l koncentracijai – per 1,5–5,0 paras.

*Antrajai grupei* priskiriamos PAM, kurios yra žymiai lėčiau ir, be to, neproporcingai sunaudoja deguonį didinant jų koncentraciją vandenyje.

*Trečiąją grupę* sudaro "biologiškai kietos" PAM. Šios grupės PAM irimo greitis, didinant jų koncentraciją nutekamuosiuose vandenyse, mažėja. Daugiau negu 30 dienų laikotarpyje suyra tik 35–40 %. PAM koncentracijos nutekamuosiuose vandenyse padidinimas iki 10 mg/l sukelia didelį putojimą ir turi įtakos oksidavimo procesams, vykstantiems vandens telkinyje. Daugumoje šalių leidžiama vartoti tik pirmos ir antros grupių PAM, kurios iš nutekamųjų vandenų pasišalina biologiškai suirdamos (daugiau negu 80 %).

PAM irimo intensyvumas nutekamųjų vandenų biocheminio valymo ir savaiminio vandens telkinių išsivalymo procese priklauso nuo jų cheminės struktūros.

*Anijoninių PAM biocheminio irimo greitis ir pilnumas* priklauso nuo alkilo radikalo ilgio ir sandaros. Junginiai, turintys linijinę molekulių struktūrą (alkilinę grandinę), suyra žymiai greičiau ir pilniau negu šakotos molekulių struktūros junginiai. Kuo didesnis šakotumo laipsnis, tuo sunkesnis biologinis valymas. Pirminiai ir antriniai alkilsulfatai su n-alkilo grandine priskiriami "biologiškai minkštų" PAM grupei. Iš visų sintetinių anijoninių PAM biocheminio valymo procese tokie alkilsulfatai greičiausiai oksidinasi. Sunkiau suyra alkilbenzensulfonatai. Jie priskiriami antrajai grupei.

SP skalbimo, indų plovimo metu patenka į žmogaus organizmą, todėl svarbi dar viena jų savybė – toksiškumas. Toksiškumo kriterijumi yra mirtina dozė pusei bandomųjų gyvūnų, išreikšta gramais vienam gyvo svorio kilogramui. Kuo mažesnė jų vertė, tuo toksiškesnė SP.

Nejoniniai sintetiniai plovikliai, paruošti iš alkanolių ir rūgščių, mažiausiai toksiški iš visų SP. Anijoninės PAM toksiškesnės negu nejoninės PAM, pagamintos iš alkanolių. Alkilsulfatai mažiausiai toksiški iš visų anijoninių PAM.

Katijoninių PAM toksiškumas 10 kartų didesnis negu nejoninių.

Mirtina sintetinių plovimo priemonių dozė žuvims – 3,5–18 mg/l. Mikroorganizmai, esantys upėse ir ežeruose, pakeičia PAM koncentraciją nuo 60 iki 125 mg/l.

Esant 0,125–0,5 % PAM koncentracijoms (tokieose tirpaluose skalbiama) rankų oda pažeidžiama labai retai. Tačiau skalbiant ilgai, pavyzdžiui, nuo 5 iki 10 dienų (po 3 h per dieną), odos pažeidimas didėja.

Mūsų dienomis PAM pramonės plėtojimąsi apsprendžia reikalavimai, kuriuos kelia ploviklių, valiklių ir kosmetikos pramonės šakos iki šiol sunaudojančios didžiąją dalį PAM.

Nuo 1960 m. yra nauji reikalavimai PAM, kurios naudojamos ploviklių ir valiklių kompozicijose, biologiniam irštamumui. Todėl didelėmis pastangomis tetrapropilbensulfonatas buvo pakeistas linijiniu alkilbensulfonatu. Be to, pasirodė nonilfenolio etoksilatas, riebiųjų alkoholių etoksilatai, pagaminti ne tik iš natūraliųjų žaliavų, bet ir iš sintezės produktų. Kitas ekologinis veiksnys – reikalavimas sumažinti ar pašalinti iš ploviklių kompozicijų fosfatus – kartu su reikalavimu naudoti biologiškai greičiau irštančias PAM.

Panašus reikalavimas gaminti daugiau „minkštesnių“ – biologiškai greičiau irštančių produktų buvo noras daugiau naudoti natūralių produktų ir PAM, pagamintų iš atsinaujinančių augalinės kilmės medžiagų. Todėl atsirado potencialios galimybės žaliavas pagamintas naftos chemijos gamyklose pakeisti atsinaujinančiom žaliavom, pirmiausia, kokoso riešutų, palmių ir palmių branduoliniu aliejais, kurie yra santykinai nebrangūs ir prieinami pramoniniams tikslams, [12].

*Pagrindinė problema* yra kasmet didėjantis detergentų vartojimas ir gamybos mastai. Dėl to didėja nuotekų užterštų detergentais kiekiai. Nors šią problemą bandoma spręsti įvairiais būdais: mažinant detergentų vartojimo ir gamybos apimtis, ribojant lėtai biologiškai yrančių „biologiškai kietų“ detergentų gamybą ir vartojimą, bet iki galo ji dar neišspręsta. Detergentai su buitinais, detergentų gamybos pramoniniais vandenimis patenka į nuotekas. Nuotekų valyklose iki galo neišvalius, detergentai patenka į natūralius vandens telkinius ir teršia natūralią aplinką.

Darbe pagrindinis dėmesys skiriamas efektyviam detergentų valymui iš nuotekų. Darbo tikslas – ištirti suspenduoto sluoksnio panaudojimo galimybes detergentų valymui iš nuotekų.

## 2. DETERGENTAIS UŽTERŠTŲ NUOTEKŲ VALYMAS, PUTŲ BURBULIUKŲ IR PUTŲ SUSIDARYMO YPATUMAI, PUTŲ APARATAI

Vienas iš pramoninių, PAM užterštų, nutekamųjų vandenų valymo metodų yra jų pašviesinimas *naudojant koaguliantus ir flokulantus*. Koaguliacijos metu susidarę dribsniai turi didelį lyginamąjį paviršių ir adsorbuoja iš vandeninio tirpalo stambiamolekulinius junginius ir PAM micleles, [12].

*Metodo privalumai.* Efektyviai padidina flotacijos bei filtracijos procesų efektyvumą.

*Metodo trūkumai.* Ribojama paviršiaus aktyviųjų medžiagų koncentracija. Koaguliantus ir flokulantus tikslinga naudoti, jei PAM koncentracija neviršija 20 mg/l. Pagrindinis trūkumas – dažnai geležies koaguliantai nudažo nuotekas ruda spalva bei didina vandens rūgštingumą. Koaguliantus ir flokulantus naudojant nuotekų valymui reikalingos lėto maišymo maišyklės, dribsnių formavimosi kameros, įvairūs dozatoriai ir reagentų paruošimo (sumaišymo) talpos, tai didina technologines valymo schemos sudėtingumą ir nuotekų išvalymo kainą, [16].

Buitinėms nuotekoms užterštoms fekalijomis, detergentais, maisto atliekomis, nuoplovomis, popieriumi ir kita tarša valyti yra *naudojamas biologinis nuotekų valymo metodas*. Šis metodas pagrįstas mikroorganizmų gebėjimu skaidyti nuotekose esančią taršą. Biologiniame nuotekų valyme naudojami mikroorganizmai, kurių yra ir gamtinėje aplinkoje. Tai aerobiniai (gyvenantys aplinkoje, kurioje yra deguonies) ir anaerobiniai (gyvenantys aplinkoje, kurioje nėra deguonies) mikroorganizmai.

*Pagrindinis metodo trūkumas* yra tas, kad jis negali būti panaudotas didelės koncentracijos detergentams iš nuotekų valyti, nes detergentai nesioksiduoja, stabdo aktyviojo dumblo vystymąsi arba net „žudo“ jį, tai gali sutrikdyti visą nuotekų valymo procesą, [10].

Taikomi nutekamųjų vandenų *flotacinio apdorojimo metodai*: flotacija paduodant orą per porėtas medžiagas; flotacija mechaniškai disperguojant orą; flotacija išskiriant iš tirpalo orą; biocheminė flotacijai kt.

*Flotacijos privalumai.* Proceso nenutrūkstamumas, mažos energijos sąnaudos, paprasti įrenginiai.

*Flotacijos trūkumai.* Taikant flotacijos metodą pavyksta sumažinti anijoninių ir nejoninių PAM mišinio koncentraciją nutekamuose vandenyse tik iki 45–50 %, [12].

Literatūroje aprašomos nutekamųjų vandenų, užterštų PAM, valymo *grįžtamojo osmoso* metodų galimybės. Tirpalai filtruojami, esant slėgiui per specialias pusiau laidžias

membranas, kurios praleidžia vandens molekules ir visiškai ar dalinai sulaiko ištirpusių medžiagų molekules ar jonus, [12].

*Metodo privalumai.* Taikant membraninius procesus, sumažėja energijos sąnaudos. Taikant atvirkštinę osmozę nėra perėjimo fazių, atskiriant priemaišas, procesas vykdomas kambario temperatūroje ir be papildomų cheminių medžiagų.

*Metodo trūkumai.* Kaip trūkumus galima įvardinti tai, kad proceso efektyvumas labai priklauso nuo naudojamų membranų. Metodo naudojimą riboja, tai, kad prieš valant nuotekas, jas, reikia paruošti. Jos turi turėti kuo mažiau mechaninių priemaišų ir, priklausomai nuo naudojamos membranos, ribojama ištirpusių cheminių medžiagų koncentracija. Pagrindinio elemento – membranos gamybos technologija pakankamai komplikauta, tai didina įrenginio ir bendrą nuotekų išvalymo kainą, [16].

*Adsorbicija* naudojama nukenksminti nuotekoms, kuriuose yra fenolių, herbicidų, pesticidų, PAM, dažiklių ir kitų medžiagų. Adsorbcinis valymas plačiai naudojamas lokalinuose valymo įrenginiuose, esant juose nedidelėms teršalų koncentracijoms. [16]

*Metodo privalumai.* Leidžia vienu metu nukenksminti keletą medžiagų. Adsorbentai gaminami daugiausia iš celiuliozės ir popieriaus pramonės atliekų, tai leidžia sumažinti nuotekų išvalymo kainą. Taip sprendžiamos atliekų naikinimo, žaliavų išsaugojimo, vandens valymo problemos.

*Metodo trūkumai.* Nesant pastoviam arba vienodam vandens užterštumo lygiui bei esant daugiakomponentei nuotekų sudėčiai, adsorberių projektavimas yra pagrįstas bandymų duomenimis ir empirinėmis formulėmis, kurios remiasi masteliniu perėjimu iš mažagabaritinių į stambiagabaritinius įrenginius. Perėjimo iš laboratorinių ir maketinių pavyzdžių į pramoninius įrengimus problema adsorbciniame procese yra viena iš sudėtingiausių. Dažniausiai adsorberio matmenų didinimas sumažina jo našumą, [16].

Vienas patogesnių ir pigesnių metodų PAM iš nutekamųjų vandenų pašalinti yra *putų sudarymo metodas*. Putos – dispersinė sistema iš dujų (oro) burbuliukų, atskirtų plona skysčio plėvele. [14]. Taikant šį metodą, PAM adsorbuojasi tirpalo ir dujų fazės riboje ir nuolat pašalinamos nuo paviršiaus mechaniniu būdu.

*Metodo privalumai.* Šis metodas, gali būti naudojamas, kai nuotekose yra ištirpusių priemaišų, taip pat priemaišų, agresyvių technologinių įrengimų atžvilgiu, [12]. Nuotekų valymo proceso nenutrūkstamas, mažos energijos sąnaudos, paprasti įrenginiai. Nuotekų valymo proceso efektyvumas gali būti padidinamas įvedant suspenduotą sluoksnį.



Putas galima išgauti dviem būdais [7]:

- dispersiniu;
- kondensuojančiu.

Dispersiniu būdu putos susidaro intensyviai sąveikaujant putas sudarančiam tirpalui ir orui. Technologiškai dispersija gaunasi praeinant dujų srautui per skysčio sluoksnį (barbotažinėse arba aeracinėse sistemose, aparatuose su „putų sluoksniu“, naudojamuose išeinančių dujų išvalymui, kai kurių tipų putų generatoriuose, turinčiuose tinkliuką, drėkinamą putas sudarančiu tirpalu); veikiant judantiems įrenginiams į skystį dujinėje aplinkoje arba veikiant judantiems skysčiams į porėtą pertvarą (technologiniuose aparatuose, maišant maišyklėmis, perpilant skysčius); inžektuojant orą judančia tirpalo srove.

Kondensacinis putų gavimo būdas pagrįstas sistemos fizikinių parametrų kitimu, kuris prisotina (darbinės terpės) tirpalą dujomis. Šitam būdai priklauso putų susidarymas cheminių reakcijų ir mikrobiologinių procesų metu, dėl kurių išsiskiria putos.

Lengviau įgyvendinamas dispersinis būdas. Šis būdas gali būti realizuojamas įvairaus tipo putų aparatuose, proceso efektyvumui padidinti naudojant suspenduotą sluoksnį.

## 2.1. Dujų burbuliukų susidarymo detergentų tirpaluose ypatumai

Žinoma, kad, skystyje, susidedančiame iš kelių komponentų, tarpfaziniame paviršiuje yra daugiau tų komponentų, kurių molekulės skysčio tūryje pritraukiamos silpniau. Adsorbcijos „ $\Gamma$ “ kiekis tirpalo – dujų fazių riboje nusakomas Gibso lygtimi:

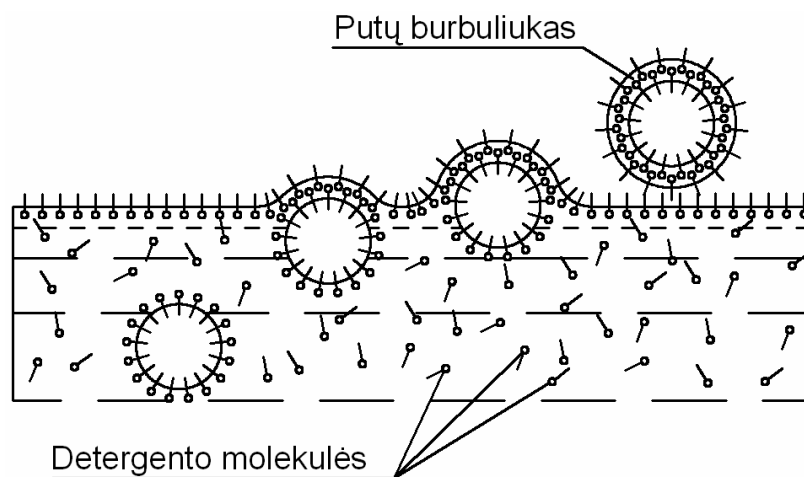
$$\Gamma = \frac{c}{RT} \cdot \frac{d\sigma}{dc} \cdot [7] \quad (1)$$

Visos tirpios medžiagos, priklausomai nuo jų gebos adsorbuotis ant tirpalo – dujų ribos ir įtakoti „ $\Gamma$ “ dydį, skirstomos į tris grupes:

1. Medžiagos, tolygiai pasiskirsčiusios tarp paviršinio sluoksnio ir tirpalo tūrio. Šios medžiagos neturi įtakos paviršiaus įtempimui ( $\Gamma = 0$ ).

2. Medžiagos, besistengiančios pasitraukti iš tirpalo paviršiaus į tirpalo tūrį. Šios medžiagos – neaktyvios paviršiaus medžiagos ( $\Gamma < 0$ ). Jos didina paviršiaus įtempimą.

3. Medžiagos, besistengiančios pereiti iš tirpalo tūrio į jo paviršių. Šios medžiagos – aktyvios paviršiaus medžiagos arba detergentai ( $\Gamma > 0$ ). Jos mažina paviršiaus įtempimą, [7].



2 pav. Putų burbuliukų susidarymas

Detergentų buvimas tirpale sąlygoja statiskai stabilių putų susidarymą. 2 paveiksle pavaizduotas putų burbuliukų susidarymo mechanizmas. Detergentų tirpale atsiradusio burbuliuko paviršiuje susidaro adsorbcinis sluoksnis, kurio formavimosi greitis priklauso nuo detergento molekulių difuzijos iš tirpalo prie burbuliuko paviršiaus greičio. Pasiekus tokiam burbuliukui tirpalo paviršių, burbuliukas apsigaubia dvigubu orientuotų detergento molekulių sluoksniu. Gebėjimo sudaryti putas požiūriu, visus detergentus galima skirstyti į dvi stambias grupes: silpnus ir stiprius detergentus.

„Silpni detergentai“ nesudaro struktūrų nei adsorbciniuose sluoksniuose, nei tirpalo tūryje. Jie tik pakeičia skysčio paviršiaus lipumą dvipusių plėvelių ribose. Šių detergentų dėka susidaro vietiniai paviršiaus įtempimo skirtumai. „Stiprūs detergentai“ sudaro adsorbciniuose sluoksniuose klampias ir tvirtas erdvinės struktūras, kliudančias putų plėvelių plonėjimui ir trūkimui. Kaip tik tai tokių detergentų dėka susidaro statiskai stabilios putos.

Dujų burbuliukų kilimas stiprių detergentų tirpaluose žymiai skiriasi nuo jų kilimo mechanizmo grynuose skysčiuose. Skystyje ištirpusios detergento molekulės adsorbuojasi ant skysčio dujų tarpfazinio paviršiaus. Kylant dujų burbuliukui, adsorbuotų detergento molekulių paviršinis tankis bus mažesnis, o galinėje dalyje – didesnis negu pusiausvyros su pradiniu tirpalu atveju. Tokio tankio netolygumo dėka sumažės paviršiaus įtempimas galinėje burbuliuko dalyje ir, tuo pačiu, atsiras jėga, veikianti išilgai burbuliuko paviršiaus ir stabdanti paviršinį judėjimą bei trukdanti toliau detergento molekulėms kauptis burbuliuko gale. Detergento molekulės stengiasi grįžti iš burbuliuko galo, kur jų koncentracija didelė, į jo priekį, kur molekulių koncentracija yra maža. Tokiame burbuliuke išnyksta vidinis judėjimas ir burbuliukas kyla panašiai kaip kietas rutuliukas, t.y. jo greitis žymiai sumažėja. Stambių burbuliukų kilimo greitis sumažėja net 2–3

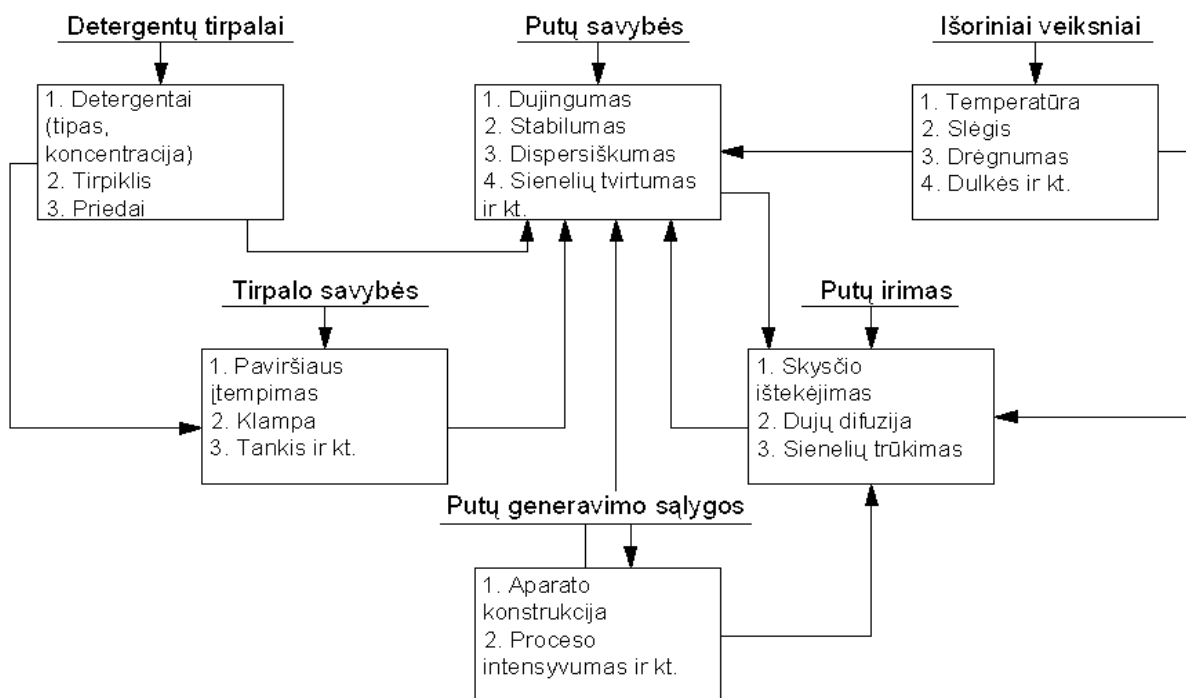
kartus palyginus su jų kilimo greičiu gryname vandenyje. Mažų burbuliukų ( $d < 0,01$  cm) kilimo greitis sumažėja apie 1,5 karto. Burbuliukai, kurių skersmuo yra  $d < 1,5$  mm, išplaukia  $\sim 12$  cm/s greičiu ( $Re = 10-100$ ). Tuo tarpu  $d > 1,5$  cm skersmens burbuliukų ( $Re \gg 100$ ) kilimo greitis nepriklauso nuo burbuliukų dydžio ir siekia  $\sim 18-19$  cm/s. Intensyvaus barbotazo metu dujų burbuliukai beveik liečia vienas kitą ir todėl priekyje kylantis burbuliukas savo galu liečia iš paskos judančio burbuliuko priekį (susidaro burbuliukų srautas). Šiuo atveju detergento molekulės tolygiau pasiskirsto burbuliukų paviršiuje, paviršiai pasidaro paslankesniais ir tuo metu žymiai sumažėja kylančių burbuliukų stabdymas, kilimo greitis beveik susilygina su kilimo grynuose skysčiuose greičiu. Kildamas burbuliukas kontaktuoja su detergentų tirpalu tam tikrą ribotą laiko tarpą. Tuo atveju, jeigu adsorbcinė pusiausvyra tarp detergentų tirpalo tūrio ir dujų – skysčio tarpfazinio paviršiaus suspėja nusistovėti burbuliuko kilimo metu, tai tolesnis burbuliuko buvimas tirpale nebepadidina adsorbuoto detergento molekulių skaičiaus. Iš kitos pusės, burbuliuko buvimo tirpale laikas priklauso nuo tirpalo sluoksnio storio, [7].

## 2.2. Fizikiniai cheminiai putų susidarymo proceso ypatumai

Skysčio tūryje atsiradusio burbuliuko viduje yra paviršiaus įtempimo jėgų atsveriamas  $2\sigma/r$  perteklinis slėgis. Į skysčio paviršių pakilęs burbuliukas pakliūna į kitas sąlygas - burbuliuke pakyla perteklinis slėgis, pažeidžiama pusiausvyra. Tuo atveju, jeigu burbuliuko sienelių (plėvelės) stiprumas yra nepakankamas, tai perteklinis slėgis gali burbuliuką suardyti. Grynai skysčiai pasižymi mažu paviršiaus stiprumu ir dideliu paviršiaus įtempimu, taip pat, ir dideliu pertekliniu slėgiu burbuliuko viduje. Susidaręs gryname skystyje burbuliukas, pasiekęs paviršių, suyra. Kaip tik todėl statiskai stabilios putos nesusidaro iš grynų skysčių, jos formuojasi tiksliai iš stiprių detergentų, mažinančių paviršiaus įtempimą, tirpalų. Esant nedideliame paviršiaus įtempimui ir, mažam pertekliniam slėgiui, burbuliuko sienelių stiprumas būna pakankamas tam, kad burbuliukas kurį laiką nesuirtų skysčio paviršiuje. Obarčas, tyrinėjęs putų susidarymą kai kurių spiritų ir rūgščių vandeniniuose tirpaluose, nustatė, kad pagrindinis šio proceso veiksnys yra tirpalo heterogeniškumo laipsnis, t.y. detergento molekulių koncentracijos paviršiniame sluoksnyje ir tirpalo tūryje skirtumas. Stipriausiai putoja tirpalai, pasižymintys maksimaliu heterogeniškumu. Nuosekliai didinant detergento koncentraciją putų susidarymo intensyvumas auga tol, kol tirpalo heterogeniškumas tampa maksimaliu. Toliau augant koncentracijai putų susidarymo intensyvumas ima mažėti, nes mažėja koncentracijų skirtumas. Putų susidarymo intensyvumo sumažėjimas paaiškinamas tuo, kad augant

detergento molekulių koncentracijai, sumažėja molekulių difuzijos iš pagrindinio tirpalo tūrio link paviršinio sluoksnio greitis. Kaip tiktai todėl prisotinti tirpalai, lygiai taip pat kaip ir grynai skysčiai, nesudaro statiskai stabilių putų (tokių tirpalų heterogeniškumas artimas nuliui). Kitur tvirtinama, kad detergento koncentracijai didėjant, putojimo intensyvumas auga iki tam tikros maksimalios reikšmės, o po to išlieka pastoviu iki detergento tirpumo tirpale ribos, t.y. iki sotaus tirpalo susidarymo momento. Putojimo intensyvumo stabilizavimasis, augant detergento koncentracijai, siejamas su stambių konglomeratų (micelių) susidarymu. Kaip tiktai tada pasibaigia adsorbcinio monosluoksnio, pasižyminčio didžiausiu mechaniniu stiprumu, formavimas.

Putojimo proceso intensyvumui turi įtakos ne tiktai detergento koncentracija, bet ir daugelis kitų fizinių, cheminių, techninių veiksnių, bei pačio technologinio proceso ar eksperimento vykdymo sąlygos. Daugybė besikeičiančių parametrų (3 pav.), kurių poveikį ne visada galima iki galo nustatyti, praktikoje neleidžia matematiškai tiksliai aprašyti putų susidarymo proceso, tuo pačiu, rodo kaip yra sunku lyginti skirtingus tyrimų rezultatus, juos apibendrinti ir taikyti praktikoje. Kaip tiktai todėl putų susidarymo eksperimentiniai tyrimai yra empirinio ar pusiau empirinio pobūdžio, o teoriniai tyrimai apsiriboja tiktai atskirų specifinių klausimų nagrinėjimu. Prie tokių klausimų galima priskirti temperatūros įtakos putų susidarymui bei statiskai stabilių putų mechaninėms savybėms tyrimus. Kai kur tvirtinama, kad teigiamų temperatūrų srityje detergentų tirpalų putojimo intensyvumas, augant temperatūrai, didėja, pasiekia maksimumą, o po to ima mažėti. Putų susidarymo intensyvumo augimas didėjant temperatūrai nuo 20 °C iki 40–50 °C paaiškinamas tuo, kad auga perteklinis dujų slėgis burbuliukų erdvėje, susidaro micelės, mažėja paviršiaus įtempimas ir pan. Putojimo intensyvumo sumažėjimas toliau augant temperatūrai (>60 °C) sietinas su putų sienelių mechaninio stiprumo sumažėjimu. E.Gotte nustatė, kad minimali detergento koncentracija, būtina SSP susidarymui, praktiskai nepriklauso nuo temperatūros. Analogišką išvadą patvirtina kiti tyrimai, kurie parodė, kad pasikeitus tirpalo temperatūrai nuo 10 °C iki 40 °C, putų susidarymo kiekybinės charakteristikos beveik nepasikeičia. Ši išvada labai svarbi SSP aparatų, skirtų nutekamojo vandens nukenksminimui, darbui, nes pramoninio nutekamojo vandens temperatūra, netgi vasaros laikotarpiu, retai kada didesnė negu 30 °C. Mažėjant tirpalo paviršiaus įtempimui, jo putojimo intensyvumas didėja, nes mažėja darbo, būtino to pačio tūrio putų gavimui, kiekis, [7].



3 pav. Įvairių veiksnių įtaka putų susidarymui

Tirpalo temperatūros įtaka putų susidarymo procesui išnagrinėta gana detalai. Temperatūros pasikeitimas nuo 10 °C iki 30 °C neturi didesnės įtakos putojimo intensyvumui.

Tokiu būdu, detergentų koncentracijos pasikeitimas tirpale turi įtakos putų susidarymo intensyvumui. Minimali detergentų koncentracija, atitinkanti maksimalų putų susidarymo intensyvumą, yra skirtinga skirtingoms detergentų rūšims, [7].

### 2.3. Dinaminės ir statiška stabilios putos

Stabilus putų sluoksnis arba srautas susidaro tuo atveju, kai egzistuoja dinaminė pusiausvyra tarp laiko bėgyje atsirandančių ir suyrančių burbuliukų. Barbotažinis režimas perina į putų režimą tuo atveju, kai redukuotas dujų greitis:

$$w_g = \varphi \cdot w_b, [7] \quad (2)$$

čia:  $w_b$  – burbuliuko kilimo greitis.

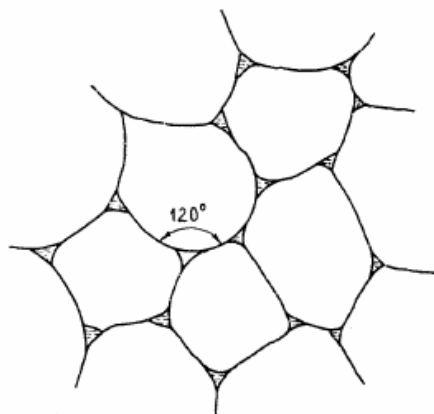
Esant tokiam  $w_g$  laiko bėgyje tiekiamų dujų kiekis negali būti pernešamas atskirai kylančiais burbuliukais. Šis režimas vadinamas *struktūrinėmis putomis* (StP), sudarytomis iš atskirų

dujų gardelių, atskirtų skysčio plėvelėmis. Burbuliukai (gardelės) kyla į viršų, didėja jų skersmuo bei auga sluoksnio dujingumas. Nustojus tiekti dujas, tokios putos suyra, nes burbuliukai, išplaukę į skysčio paviršių „sprogsta“ (didelis perteklinis slėgis burbuliuko viduje, nestiprios burbuliukų sienelės). Struktūrinių putų režimas egzistuoja tikrai esant redukuotam dujų greičiui  $w_g < 0,5$  m/s. Šis režimas yra žymiai sudėtingesnis negu barbotажinis arba judrių *turbulizuotų dinaminių putų* (TDP) režimas. Turbulizuotų dinaminių putų režimas susidaro tuo atveju, kai redukuotas dujų greitis  $w_g = 1,0$ – $3,5$  m/s ir kai laisvasis rėtinės skerspjūvio plotas yra  $>40$  %. Dinaminės turbulizuotos putos – tai stipriai turbulizuota dujų – skysčio sistema, susidedanti iš pusiau išsverto skysčio sluoksnio (plėvelių, srovių) persipynusio su dujų burbuliukais ir srovėmis.

Struktūrinės putos (StP) – tai pereinamasis režimas tarp barbotажinio režimo ir turbulizuotų, dinamiškai stabilių putų (TDP). Struktūrinių putų režimas pereina į turbulencinių dinaminių putų režimą tuo atveju, kai redukuotas dujų greitis  $w_g > 1,0$  m/s ir, kai esant rėtinės kiaurymių skersmenim  $d_0 > 30$  mm, generuojami didelį kinetinės energijos kiekį turintys burbuliukai, sugebantys suardyti sluoksnio struktūrą, turbulizuoti sistemą. Dinaminės putos, yra statiskai nestabilios sistemos, t.y. nustojus tiekti dujas tokios putos momentaliai suyra (gryni skysčiai) arba pereina į kitą, stabilesnę būklę (detergentų tirpalai).

Putų susidarymo procesas detergentų tirpaluose vyksta kiek kitaip negu grynuose skysčiuose. Barbotажinis režimas detergentų tirpaluose egzistuoja tuo atveju, kai redukuotas dujų greitis  $w_g < 0,03$  m/s; struktūrinių putų režimo atveju  $w_g = 0,03$ – $0,07$  m/s. Kai  $w_g > 0,07$  m/s, struktūrinių putų režimas pereina į kitą režimą, pasižymintį ypatingai dideliu burbulų skersmeniu, tuštumų ir dujų kamščių susidarymu. Dujų greičio padidėjimas šitaip keičia srauto struktūrą tikrai tuo atveju, jeigu detergentų koncentracija tirpale yra mažesnė už minimalią kritinę koncentraciją. Tuo atveju, kai detergento koncentracija tirpale yra didesnė už kritinę, augant dujų greičiui, struktūrinių putų režimas dalinai pereina į turbulizuotų dinaminių putų režimą (2 pav.). Detergentų tirpaluose, skirtingai nuo grynų skysčių, generuojamos ne tikrai dinamiškai stabilios putos (StP ir TDP), bet ir statiskai stabilios putos (SSP). Statiskai stabilių putų burbuliukai pradžioje būna sferiniai. Laikui bėgant sferiniai burbuliukai palaipsniui virsta taisyklingais erdviniais daugiakampiais. Paviršiniame putų sluoksnyje esantys burbuliukai gana greitai įgauna daugiakampe formą. Tuo tarpu žemesniuose sluoksniuose esantys burbuliukai žymiai ilgiau išlieka sferiški, jų sienelių storis plonėja lėčiau, nes plonėjant ir yrant viršutinių sluoksnių burbuliukų sienelėms, atsipalaidavęs tirpalas teka žemyn, padidindamas žemesnių sluoksnių burbuliukų stabilumą bei lėtindamas jų irimo procesą. Palaipsniui nutekant (drenuojantis) tirpalui, žemesniųjų sluoksnių burbuliukų sienelės plonėja (sausėja), [7].

**Putų stabilumas. Stabilumo įtaka putų susidarymo procesui.** Putų susidarymo procesas iš esmės priklauso nuo putų stabilumo. Egzistuoja daugelis veiksnių, dėl kurių detergentai turi įtakos statiskai stabilių putų burbuliukų stabilumui. Šie veiksniai: kinetinis, struktūrinis – mechaninis, termodinaminis.



4 pav. Statiškai stabilių putų karkasas

Statiškai stabilių putų karkasas sudarytas iš beveik plokščių skystų plėvelių (4 pav.), kurios tuo pat metu yra ir atskirų putų gardelių (burbuliukų) sienelės. Toje vietoje, kur ribojasi trys plėvelės, burbuliukai jungiasi  $120^\circ$  kampu. Jungimosi vietose, taip vadinamuose Plato kanaluose, skystis turi stipriai įgaubtą paviršių ir čia skysčio slėgis bus žymiai mažesnis negu plokščiose plėvelių vietose. Slėgių skirtumo dėka skystis „siurbiamas“ iš plokščių putų karkaso vietų (sienelių) į įgaubtas vietas (Plato kanalas) ir putų sienelės savaime plonėja. Tačiau aprašytas reiškinys galimas tiksliai skysčio tūryje, nes paviršiuje jis neįmanomas dėl Marangoni – Gibso efekto veikimo.

Pereito šimtmečio pabaigoje Marangoni išsakė mintį, kad plonos plėvelės sugeba reaguoti į vietinius plėvelės storio pasikeitimus „užgydydamos“ pažeistas, suplonėjusias sritis. Statiškai stabilių putų burbuliuko plėvelė turi sugebėti reaguoti į vietinius ištempimus – paviršiaus įtempimo padidėjimu, o į vietinius suslėgimus – paviršiaus įtempimo sumažėjimu. „Užgydoma“ paviršiniam skysčio sluoksniui pertekant iš žemų paviršiaus įtempimo sričių (didelė detergentų molekulių koncentracija) į sritis su padidintu paviršiaus įtempimu (maža detergento molekulių koncentracija). Šis efektas (Marangoni – Gibso efektas) ir sudaro kinetinio veiksnio poveikio esmę. Nustatyta, kad kinetinio veiksnio poveikis didžiausias nejudrioms putų struktūroms, gautoms iš silpnų detergentų.

Struktūrinį – mechaninį putų stabilumo veiksnį pirmieji tyrė, remdamiesi Plato pastebėjimais, P.Rebinderis ir B.Deriaginas. Plato pirmasis iškėlė mintį apie putų plėvelėse

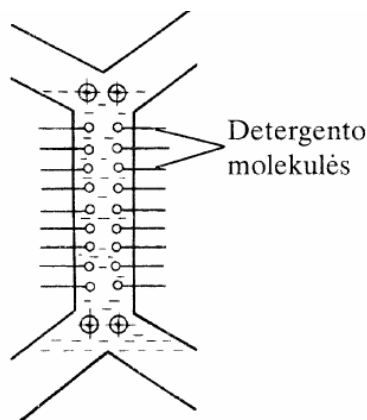
egzistuojančius ypatingai klampus ir mechaniškai tvirtus adsorbcinius detergento molekulių sluoksnius. Tarp atskirų adsorbcinio sluoksnio molekulių veikiančios sankabos jėgos bei pačių molekulių judrumas užtikrina gana greitą deformacijų, susidariusių skysčiui ištekėjus iš burbuliukų plėvelių, pašalinimą. A.Trapeznikovas įrodė, kad struktūrinis – mechaninis veiksnys pasireiškia tuo, jog statiškai stabilių putų paviršiuje susidarę klampūs adsorbciniai detergento molekulių sluoksniai sumažina skysčio ištekėjimą iš plėvelių bei suteikia putų plėvelėms mechaninį tvirtumą.

Mintį apie termodinaminio putų stabilumo veiksnio egzistavimą iškėlė B.Deriaginas. Putų burbuliuo plėvelėje, sudarytoje iš paviršinių dvigubų jonų sluoksnių (5 pav.) atsiranda teigiama slėgio dedamoji, besistengianti nutolinti (atstumti) vieną nuo kitos gretimų burbuliukų sienelės. Šio reiškinio dėka burbuliukų sienelės išlieka gana storos.

Manoma, kad statiškai stabilių putų stabilumas priklauso nuo visų trijų stabilumo faktorių veikimo. Tačiau, negali būti vieningos putų stabilumo teorijos, kad putų, gautų iš skirtingų detergentų skirtingais būdais, stabilumas bus skirtingas ir sunkiai nusakomas bendrais dėsningumais.

Kadangi viena iš plačiausių sričių, kurioje naudojamos statiškai stabilios putos, yra nutekamojo vandens, užteršto organinėmis ir mineralinėmis druskomis, rūgštimis, elektrolitais ir pan., valymas, tai šių medžiagų įtaka putų stabilumui turi nepaprastai svarbią reikšmę. Neorganinių druskų priedai detergentų tirpaluose veikia putų susidarymo procesą bei putų stabilumą. Iš vienos pusės, jie didina stabilumą, o iš kitos pusės – sumažina adsorbcinės pusiausvyros skysčio – dujų tarpfaziniame paviršiuje nusistovėjimo laiką. Be to, putų burbuliukų, susidariusių iš atskiestų elektrolitų, dvigubų plėvelių difuzinės atmosferos yra gerokai išretėjusios ir, tuo pačiu, atostūmio jėgos, veikiančios tarp tų difuzinių sluoksnių, yra silpnesnės. Laikui bėgant difuziniai sluoksniai susiglaudžia, plėvelės pasiekia kritinį storį ir trūksta. Nedidelės elektrolito koncentracijos padidina difuzinių sluoksnių krūvį bei atostūmio slėgį, trukdantį plonėti plėvelėms ir suirti putoms. Putų stabilumas, augant metalų (vario, kalio, natrio ir t.t.) druskų koncentracijoms detergentų tirpaluose – didėja, pasiekia maksimumą ir pradeda mažėti. Stabilumo didėjimą galima paaiškinti tuo, kad druskų struktūriniai elementai, pakliuvę tarp adsorbcinių putų plėvelės sluoksnių, padidina plėvelės klampą ir sulėtina skysčio ištekėjimą iš jos, [7].





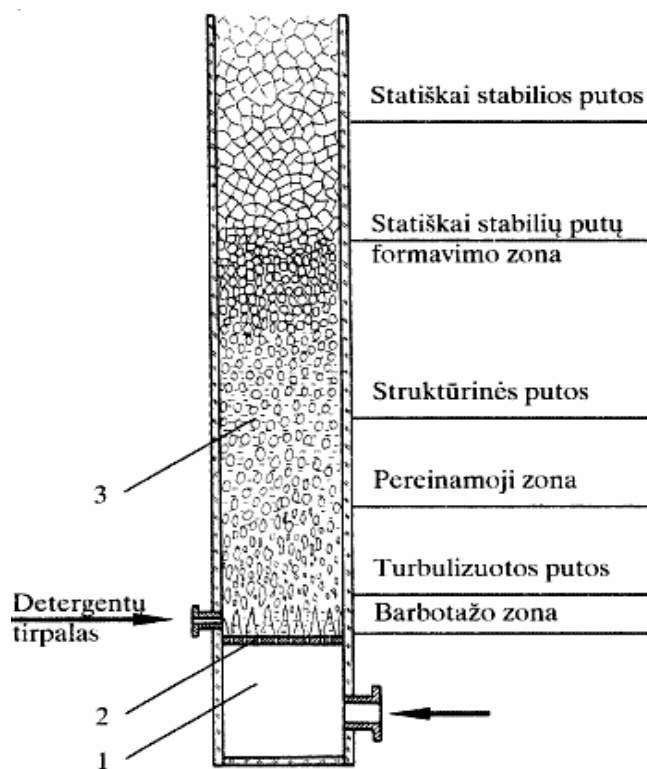
5 pav. Dvigubi jonų sluoksniai

Kiekvienu konkrečiu atveju vieno ar kito stabilumo veiksnio poveikis gali būti visiškai skirtingas; vieno ar kito veiksnio svyravimas ir įtaka putų stabilumui taip pat priklauso nuo druskų, elektrolitų, detergentų ir kt. priemaišų prigimties, koncentracijos tirpale, bei į putų sudarymo procesą įvedamo suspenduoto sluoksnio, [7].

## 2.4. Putų aparatai: trumpa charakteristika ir panaudojimas

Dažnai įvairiose pramonės šakose procesai vyksta tiesiogiai kontaktuojant dujoms su skysčiu. Tokių procesų: absorbcijos, desorbcijos, garinimo, kondensacijos, degimo ir kt. intensyvumas priklauso nuo abiejų fazių (dujų ir skysčio) tarpusavio kontakto paviršiaus dydžio. Šiuolaikiniuose aparatuose didžiuliai tarpfazinio kontakto paviršiai sukuriama dviem pagrindiniais būdais: išsklaidant skystį dujose (skruberio tipo įrenginiuose) arba išsklaidant dujas skystyje (barbotažinio tipo aparatuose). Pastariesiems (barbotažiniams) priskirtini ir vadinamieji putų aparatai, besiskiriantys konstrukcija, putų struktūra bei režimais.

6 pav. pavaizduota putų srauto, susidarančio vertikaliame kanale barbotuojant dujas į detergentų tirpalo sluoksnį, struktūra. Dvifazės sistemos struktūra, priklausomai nuo kanalo aukščio, kinta: barbotažo zoną keičia turbulencinių putų zona, pereinanti į struktūrinių putų zoną, o ši palaipsniui virsta statišškai stabilių putų zona. Turbulencinės ir struktūrinės putos yra dinamiškai stabilios, kitaip tariant nustojus tiekti dujas, šios putos visiškai suyra (jeigu dujos buvo barbotuojamos per gryną, švarų skystį) arba pavirsta statišškai stabiliomis putomis (jeigu dujos buvo barbotuojamos per detergentų tirpalo sluoksnį). Statišškai stabilios putos nesuyra (kelias sekundes ar net dienas ir ilgiau) nustojus tiekti (barbotuoti) dujas, [7].



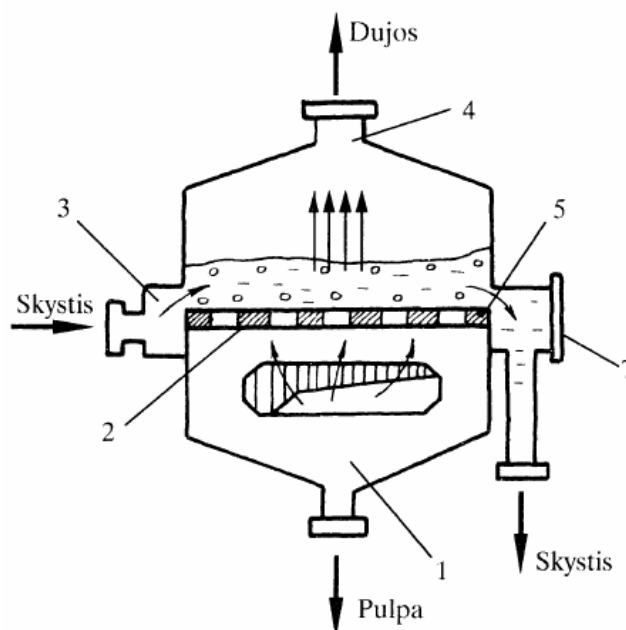
6 pav. Putų srauto struktūra:

1 – dujų (oro) kamera; 2 – rėtinė; 3 – putų kanalas

Penktojo dešimtmečio pabaigoje pasirodė aparatai, kuriuose šilumos ir masės mainų procesai vyksta stipriai turbulizuotų dinaminių putų (TDP) sluoksnyje. Šie aparatai sėkmingai naudojami įvairioms fizinėms, cheminėms reakcijoms tarp skysčio ir dujų vykdyti: adsorbcijai, desorbcijai, distiliacijai, šildymui, aušinimui, garinimui, dujų valymui, sausinimui ir pan.

Dinaminių putų sluoksnis šiuose aparatuose susidaro barbotažinių dujų (oro, degimo produktų ir pan.) srovei intensyviai maišantis su detergentais neužteršto skysčio sluoksniu. Dinaminių putų aparato pavyzdys – tai 7 pav. pavaizduotas vienos lentynos oro valymo aparatas. Pagrindinė įrenginio dalis – horizontali arba pasvirusi rėtinė 2, pagaminta iš perforuoto metalinio, keraminio ar plastmasinio lakšto. Bendras rėtinės kiaurymių plotas sudaro apie 10–40 % aparato skerspjūvio ploto. Skystis tiekiamas ant rėtinės per 3 atvamzdį, o dujos (dulkėtas oras) pakliūna į porėtinę erdvę per 7 difuzorių ir, perėjusios rėtinę, barbotuoja į skystį, priversdamos pastarąjį suputoti. Išvalytas oras išteka per 4 atvamzdį, o dinaminės putos persilieja per 5 slenkstį ir suyra, nuskaidrėjęs skystis išteka 6 vamzdžiu. Vienos lentynos dinaminių putų aparatai naudojami gana plačiai, paprasta jų konstrukcija. Tačiau šie aparatai turi ir daugelį trūkumų, pagrindinis – sunku reguliuoti darbo režimą: bent kiek sumažėjus dujų greičiui – padidėja skysčio pratekėjimas per

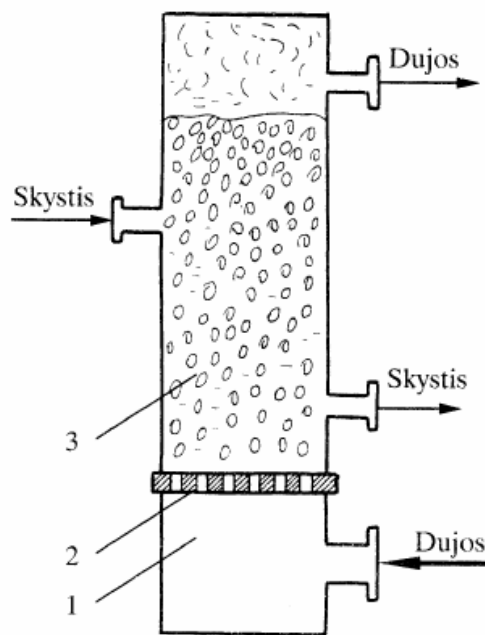
rėtinės kiaurymės; pakilus dujų greičiui – suintensyvėja skysčio lašelių, pusrų išnešimas, krinta valymo kokybė, [7].



7 pav. Dinaminių putų įrenginys:

- 1 – suspensijos talpa; 2 – rėtinė; 3 – skysčio tiekimo atvamzdis; 4 – dujų išleidimo atvamzdis;  
5 – slenkstis; 6 – persipylimo dėžė; 7 – dujų tiekimo difuzorius

Šeštojo dešimtmečio pabaigoje, septintojo pradžioje pasirodė putų aparatai, veikiantys struktūrinių putų (StP) režime. Skirtingai negu dinaminių putų aparatuose, struktūrinių putų įrenginiuose (8 pav.) dujų – skysčio sistemos turbulencija yra nedidelė, procesai intensifikuojami ypatingai padidinus tarpfazinio kontakto paviršių ir kontakto laiką. Kaip rodo tyrimai, tarpfazinio kontakto paviršius struktūrinėse putose gali siekti  $100\text{--}800\text{ m}^2/\text{m}^3$ . Dėl šios priežasties struktūrinių putų aparatai šiuo metu labai plačiai naudojami vykdyti įvairius cheminių reakcijų lydimus heterogeninius procesus, tokius kaip: parafininių angliavandenilių oksidacija oro deguonimi, želatinos valymas nuo ištirpusių detergentų, švino sulfido absorbavimas iš hidrozolių ir pan., [7].



8 pav. Struktūrinių putų įrenginys:

1 – dujų kamera; 2 – rėtinė; 3 – struktūrinių putų kolona

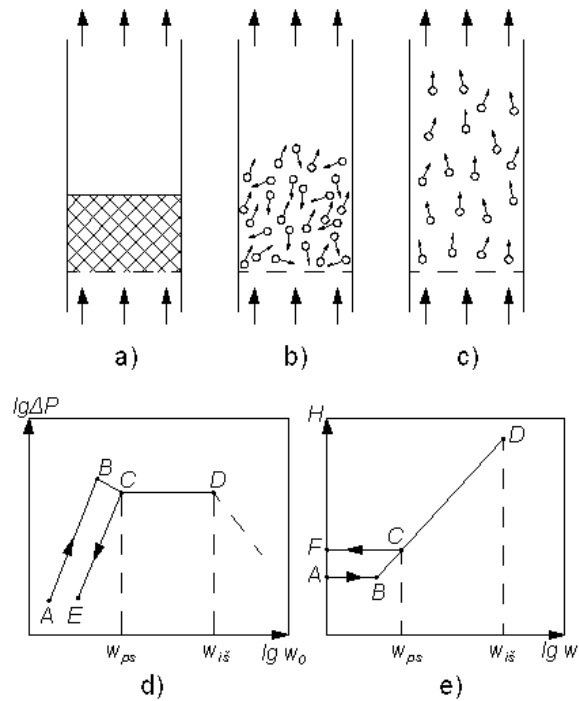
Be minėtų sričių, putos ir putų aparatai plačiai naudojami flotaciniuose įrenginiuose; putų separacijos procesuose; valant paviršius nuo kietų ir skystų teršalų; putų plastmasių; putų betono; putų stiklo gamyboje; maisto pramonėje; įsisavinant dujų ir naftos telkinius ir t.t., [7].

Putų aparatuose norint suaktyvinti putų susidarymą papildomai gali būti įvestas suspenduotas sluoksnis. Suspenduotam sluoksniui formuoti tikslinga naudoti PE, PP, PVC arba PET plastiko, netinkančias perdirbti, antrines žaliavas. Plastiką turi būti susmulkintas į 2–3 mm dydžio daleles. Kontaktuojami su dalelėmis oro burbuliukai smulkiau disperguojami, didėja jų kontaktinis paviršiaus plotas. Dėl dalelių ir oro burbuliukų tarpusavio sąveikos ir trinties suaktyvėja putų susidarymas ir PAM putų pavidalu iškyla į paviršių. Nuo paviršiaus putos gali būti pašalinamos konvejeriniu įrenginiu.

### **3. SUSPENDUOTO SLUOKSNIO CHARAKTERISTIKOS IR JO GALIMYBĖS PANAUDOJANT DTERGENTAMS IŠ NUOTEKŲ VALYTI**

Skirtingoje literatūroje suspenduotas sluoksnis dar vadinamas: pseudoverdančiąja medžiaga [1], suspenduotąja medžiaga, skendinčiąja medžiaga. [14] „Aplinkos apsaugos terminų žodyne“ pateikiami suspenduotos medžiagos ir skendinčios medžiagos apibrėžimai: 1 dispersinė sistema, susidedanti iš smulkių kietojo kūno dalelių, pasiskirsčiusių skystyje; 2 visos kietosios dalelės, kurios ilgesnį laiką išlieka ore arba išmetamos dujose, nes yra per mažos, kad turėtų apčiuopiamą nusėdimo greitį, [14].

Grūdinio sluoksnio perėjimas į pseudoverdančiąją būseną leidžia intensyvinti daugelį technologinių procesų (pvz., adsorbciją, džiovinimą, šilumos mainus ir kt.), taip pat sudaro sąlygas maišyti birias medžiagas. Dalelės turi būti mažos, tada padidėja jų kontakto su skysčiu arba dujomis paviršius ir sumažėja sluoksnio hidraulinis pasipriešinimas, todėl paspartėja šilumos ir masės mainų procesai. Šilumos ir masės mainų procesų greitis padidėja dar ir dėl to, kad pseudoverdančiojo sluoksnio sąlygomis visas dalelių paviršius yra apiplaunamas srauto, esant gana dideliame abiejų fazių srautų greičiui. Priklausomai nuo skysčio arba dujų greičio galimos trys pagrindinės grūdinės medžiagos sluoksnio būsenos (9 pav.), [1].



9 pav. Srauto judėjimo per kietų dalelių sluoksnį schemas ir srauto greičio įtaka sluoksnio hidrauliam pasipriešinimui:

a – nejudamasis sluoksnis; b – pseudoverdantis sluoksnis; c – sluoksnio dalelės juda su dujų (skysčio) srautu; d – sluoksnio hidraulinio pasipriešinimo; e – jo aukščio  $H$  priklausomybė nuo fiktyviojo srauto greičio

Nejudamos būsenos grūdinės medžiagos sluoksnis būna tada, kai srauto greitis  $w$  mažesnis už jo kritinį sluoksnio perėjimo į pseudoverdančiąją būseną greitį  $w_{ps}$  (9 pav., a). Tokio sluoksnio hidraulinis pasipriešinimas didėja didėjant greičiui (9 pav., d, linija ABC), o poringumas ir sluoksnio aukštis lieka pastovūs (9 pav., e, linija ABC). Pasiekus tam tikrą kritinį greitį  $w_{ps}$ , atitinkantį tašką C (9 pav., d ir e), hidraulinis sluoksnio pasipriešinimas tampa lygus jo sunkio jėgai  $G$  visame aparato skerspjūvyje  $S$ , t. y.

$$\Delta p = G / S . [19] \quad (3)$$

Dydį  $G$  galima išreikšti taip:

$$G = S \cdot h \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_t - \rho) \cdot g . [19] \quad (4)$$

Tada:

$$\Delta p = (\rho_t - \rho) \cdot g(1 - \varepsilon) \cdot H_d \cdot [19] \quad (5)$$

Pasiekus kritinį greitį  $w_{ps}$  sluoksnis tampa takus, jo dalelės sraute intensyviai juda įvairiomis kryptimis (9 pav., b). Sluoksnyje atsiranda dujų burbuliukų „peršokimų“, o jo laisvame paviršiuje - „bangų“ ir „fontanėlių“, todėl sluoksnio poringumas ir aukštis didėja (9 pav., e). Tokios būsenos sluoksnis primena verdantį skystį, todėl jis buvo pavadintas pseudoverdančiuoju. Sluoksnis turi dar gana ryškią viršutinę ribą, skiriančią jį nuo perėjusio srauto. Linija BC (9 pav., d ir e) atspindi dalelių sankabos jėgų įtaką.

Toliau didėjant srauto greičiui iki vertės  $w_{i\delta}$ , esant pastoviam hidrauliniam pasipriešinimui, dalelės juda ir maišosi intensyviau; sluoksnio poringumas ir aukštis didėja (linija CD. 9 pav., d ir e). Srauto greičiui viršijus  $w_{i\delta}$  pseudoverdantysis sluoksnis suyra ir srautas pradeda nešti sluoksnio daleles (9 pav., c). Dalelių masinio išnešimo reiškinys vadinamas hidrauliniu arba pneumatiniu transportu ir naudojamas pramonėje birioms medžiagoms transponuoti. Greitis  $w_{i\delta}$  vadinamas išnešimo arba dalelių laisvo sklaidymo greičiu. Pastarasis pavadinimas atsirado dėl to, kad kai  $w = w_{i\delta}$ , sluoksnio poringumas tampa toks didelis, jog dalelės juda nepriklausomai vienos nuo kitų, laisvai sklaido nenusėsdamos ir srautas jų neišneša (taškas D), (9 pav., d ir e), t. y. dalelių sunkio jėga tampa lygi pasipriešinimo jėgai, kuri atsiranda srautui aptekant daleles.

Mažinant srauto greitį, vyksta atvirkščias procesas. Pseudoverdančiojo sluoksnio hidraulinio pasipriešinimo priklausomybę nuo greičio (9 pav., d) vaizduoja linija CE, o ne BA. Linijų sudaryta histerezės kilpa aiškinama tuo, kad pseudoverdantysis sluoksnis tampa poringesnis, nei buvo prieš pseudovirimą. Tai reiškia, kad nejudančio sluoksnio hidraulinis pasipriešinimas po pseudovirimo tampa mažesnis, negu buvo prieš perėjimą į pseudovirimą. Jeigu po to vėl prasideda pseudovirimas, tai histerezės kilpa nesusidaro.

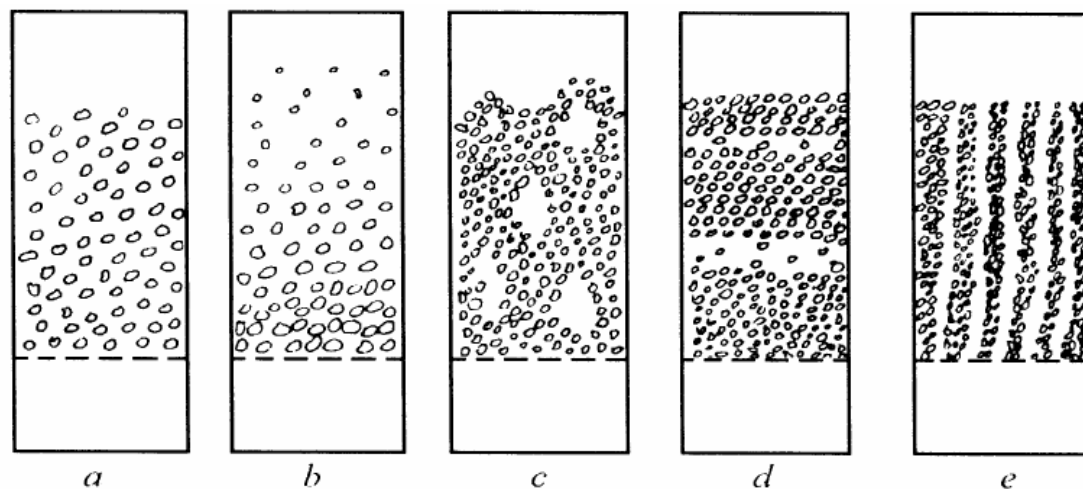
Taigi sluoksnio pseudoverdančiajai būsenai palaikyti darbinis srauto greitis  $w$  turi būti intervale  $w_{ps} < w < w_{i\delta}$ . Darbinio ir pseudovirimo pradžios greičių santykis vadinamas pseudovirimo koeficientu  $K_{ps}$ :

$$K_{ps} = w / w_{ps} \cdot [1] \quad (6)$$

Pseudovirimo koeficientas apibūdina dalelių maišymosi intensyvumą. Kiekvienam konkrečiam procesui nustatoma optimali  $K_{ps}$  vertė, intensyvus dalelių maišymasis pasiekiamas tada, kai  $K_{ps} = 2$ .

Pseudoverdančiojo sluoksnio struktūra priklauso nuo to, koks srautas (skysčio ar dujų) grūdinio sluoksnio daleles pakėlė į pseudoverdančiąją būseną.

Tolyginis pseudoverdantysis sluoksnis gaunamas lašelinių skysčių srautui pakeliant daleles į pseudoverdančiąją būseną (10 pav., a). Šiuo atveju srauto greičiui viršijus  $w_{ps}$ , susidaro sąlygos sluoksnio aukščiui tolygiai didėti be didesnių sluoksnio viršutinės ribos svyravimų, [1].



10 pav. Srautų skverbimosi pro grūdinės įkrovos pseudoverdantįjį sluoksnį: a – tolygusis skysčio judėjimas; b – tolygusis dujų judėjimas; c – dujų burbulų Judėjimas; d – stūmoklinis dujų judėjimas; e – judėjimas atvirais pseudoverdančiojo sluoksnio kanalais

Realių procesų metu pseudoverdantysis grūdinės medžiagos sluoksnis dažniau yra sudaromas dujų srauto. Paprastai gaunamas netolygus pseudoverdantysis sluoksnis, kuriam būdingi dideli pseudovirimo skaičiai (10 pav., b). Tačiau dalis dujų juda ne tik tankia mase, bet ir gana dideliais burbulais (10 pav., c). Šie burbulai ištekdami iš sluoksnio suyra, dėl to sluoksnio aukštis smarkiai svyruoja. Didėjant dujų greičiui ir  $K_{ps}$ , sluoksnio netolygumas ir burbulų dydis didėja (kartais jis gali prilygti aparato skersmeniui), tuomet prasideda virš burbulų esančių sluoksnio dalelių stūmoklinis judėjimas (10 pav., d). Burbulams ištekant iš pseudoverdančiojo sluoksnio, dalis sluoksnio pametėjama į viršų, todėl dalelės išnešamos dujų srauto. Toks pseudovirimas kartais vadinamas stūmokliniu. Dėl stūmoklinio pseudovirimo pablogėja kontaktas tarp dalelių ir dujų,



todėl pablogėja proceso sąlygos. Jeigu į pseudoverdančiąją būseną pakeliamos smulkios sulimpančios medžiagos dalelės, tai, kai srauto greičiai nedaug didesni už  $w_{ps}$ , susidaro per visą sluoksnį einantys atviri kanalai (10 pav., e), dėl kurių gali būti pažeistas sluoksnio tolygumas. Šiuo atveju daug dujų prateka tokiais kanalais, t. y. dujų srautas persoka arba aplenkia nepaliesdamas viso sluoksnio dalelių. Didėjant dujų greičiui, šie kanalai dažnai visai išnyksta arba išlieka tik sluoksnyje, esančiame tiesiai virš atraminio paskirstymo tinklelio.

Aparato su pseudoverdančiuoju grūdinės medžiagos sluoksniu darbas priklauso nuo atraminio paskirstymo tinklelio konstrukcijos. Tinklelis turi ne tik sulaikyti grūdinės medžiagos daleles aparato darbo pradžioje ir pabaigus darbą, bet ir tolygiai paskirstyti skysčio arba dujų srautus visame aparato skerspjūvyje.

Suspenduotas sluoksnis dėl savo savybių leidžiantis intensyvinti daugelį technologinių procesų, spartinti šilumos ir masės mainus, šiame darbe naudojamas detergentų iš nuotekų šalinimo efektyvumui didinti. Sluoksnio dalelės kontaktuodamos su dujų burbuliukais didina kontaktinį paviršiaus plotą bei trintį, dėl to suaktyvėja putų susidarymas. Didesnis putų sluoksnio susidarymas sąlygoja efektyvesnį detergentų pašalinimą iš nuotekų. Detergentai šalinami putų pavidalu, [1].

Formuojant suspenduotą sluoksnį putojimo proceso intensyvumui turi įtakos ne tikai detergento koncentracija, bet ir daugelis kitų fizinių, cheminių, techninių veiksnių: į putų sudarymo procesą įvedamo suspenduoto sluoksnio, bei pačio technologinio proceso ar eksperimento vykdymo sąlygų. Daugybė besikeičiančių parametrų (3 pav.), kurių poveikį ne visada galima iki galo nustatyti, praktikoje neleidžia matematiškai tiksliai aprašyti putų susidarymo proceso, tuo pačiu, rodo kaip yra sunku lyginti skirtingus tyrimų rezultatus, juos apibendrinti ir taikyti praktikoje, [7].

Dalelių perėjimo į pseudoverdantįjį sluoksnį greitis  $w_{ps}$  patikimiausiai nustatomas eksperimentiškai, naudojant laboratorinius arba pusiau gamybinius standus, [1]. Tam tikslui būtinas eksperimentinis stendas. Reikalinga apskaičiuoti ir eksperimentiškai gauti: darbinius greičius  $w$ , pseudovirimo greičius  $w_{ps}$  ir pseudovirimo koeficientus  $K_{ps}$ .

## 4. EKSPERIMENTINĖ DALIS

### 4.1. Teoriniai suspenduoto sluoksnio skaičiavimai

**Suspenduoto sluoksnio hidrodinamika, kai dalelių tankis  $\rho_1 = 840 \text{ kg/m}^3$**

Kietų dalelių sluoksnio poringumas  $\varepsilon$ , apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\varepsilon = \frac{V_{sl} - V_d}{V_{sl}}, [19] \quad (7)$$

čia:  $V_{sl}$  – dinaminio suspenduoto sluoksnio tūris [ $\text{m}^3$ ];  $V_d$  – dalelių tūris [ $\text{m}^3$ ].

Optimalus suspenduotas sluoksnis su granulėmis, kurių tankis  $\rho_1 = 840 \text{ kg/m}^3$  gaunamas, kai dinaminio ir statinio suspenduotų sluoksnių santykis 8,7, tuomet, dalelių tūris  $V_d$  apskaičiuojamas:

$$V_d = S \cdot H_s, \quad (8)$$

čia:  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [ $\text{m}^2$ ];  $H_s$  – statinio suspenduoto sluoksnio aukštis [m], (11 pav. b).

$$V_d = S \cdot H_s = 19,63 \cdot 10^{-4} \cdot 0,03 = 5,89 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3.$$

Dinaminio suspenduoto sluoksnio tūris skaičiuojamas pagal formulę:

$$V_{sl} = S \cdot H_d, \quad (9)$$

čia:  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [ $\text{m}^2$ ];  $H_d$  – dinaminio suspenduoto sluoksnio aukštis [m], (11 pav. b).

$$V_{sl} = S \cdot H_d = 19,63 \cdot 10^{-4} \cdot 0,26 = 5,10 \cdot 10^{-4} m^3 .$$

Tada, kietųjų dalelių sluoksnio poringumas:

$$\varepsilon = \frac{V_{sl} - V_d}{V_{sl}} = \frac{5,10 \cdot 10^{-4} - 5,89 \cdot 10^{-5}}{5,10 \cdot 10^{-4}} = 0,88 .$$

Pagrindinė suspenduoto sluoksnio charakteristika yra hidraulinis pasipriešinimas  $\Delta p$ , jis yra pastovus ir apskaičiuojamas pagal (3) formulę:

$$\Delta p = G / S = const.,$$

čia:  $G$  – medžiagos svoris sluoksnyje [kg], įvertinant Archimedo jėgą;  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [m<sup>2</sup>].

Hidraulinį pasipriešinimą  $\Delta p$  dar galima apskaičiuoti pagal (5) formulę:

$$\Delta p = (\rho_t - \rho) \cdot g(1 - \varepsilon) \cdot H_d ,$$

čia:  $\rho_t$  – terpės tankis [kg/m<sup>3</sup>];  $\rho$  – dalelių tankis [kg/m<sup>3</sup>];  $g$  – laisvojo kritimo pagreitis [m/s<sup>2</sup>];  $\varepsilon$  – kietų dalelių sluoksnio poringumas;  $H_d$  – dinaminio suspenduoto sluoksnio aukštis [m], (11 pav. b).

$$\Delta p = (\rho_t - \rho) \cdot g(1 - \varepsilon) \cdot H_d = (1000 - 840) \cdot 9,81 \cdot (1 - 0,88) \cdot 0,26 = 48,97 .$$

Reinoldso kriterijaus vertę  $Re_{ps}$ , kurią pasiekus prasideda pseudovirimas, galima apskaičiuoti pagal lygtį:

$$Re_{ps} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}} , [19] \quad (10)$$

čia:  $Ar$  – Archimedo kriterijus, kuris nusako skysčio greitį priklausomai nuo dalelių dydžio ir terpės.

Archimedo kriterijus skysčiams apskaičiuojamas pagal formulę:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_t^2 \cdot g}{\mu^2} \cdot \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_d}, [19] \quad (11)$$

čia:  $d$  – dalelės skersmuo [m];  $\rho_t$  – terpės tankis [ $\text{kg/m}^3$ ];  $\rho_d$  – dalelių tankis [ $\text{kg/m}^3$ ];  $g$  – laisvojo kritimo pagreitis [ $\text{m/s}^2$ ];  $\mu$  – dinaminės klampos koeficientas [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ].

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_t^2 \cdot g}{\mu^2} \cdot \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_d} = \frac{5^3 \cdot 10^{-9} \cdot 1000^2 \cdot 9,81}{1^2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1000 - 840}{840} = 23,35 \cdot 10^4.$$

Tuomet Reinoldso kriterijus bus:

$$Re_{ps} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}} = \frac{23,35 \cdot 10^4}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{23,35 \cdot 10^4}} = 59,53.$$

Suspenduoto sluoksnio pseudoverdančiajai būsenai palaikyti darbinis srauto greitis  $w$  turi būti intervale  $w_{ps} < w < w_{iš}$ . Darbinio ir pseudovirimo pradžios greičių santykis vadinamas pseudovirimo koeficientu  $K_{ps}$  ir skaičiuojamas pagal (6) formulę [1]:

$$K_{ps} = w / w_{ps},$$

čia:  $w$  – srauto greitis [ $\text{m/s}$ ];  $w_{ps}$  – kritinis sluoksnio perėjimo į pseudovirimo būseną greitis [ $\text{m/s}$ ].

Archimedo kriterijaus (11) išraiškoje visi dydžiai yra žinomi. Tada pagal (10) lygtį apskaičiavus  $Re_{ps} = w_{ps} \cdot d \cdot \rho / \mu$ , nustatomas ieškomasis greitis  $w_{ps}$ . Žinant jį, galima apskaičiuoti darbinį srauto greitį  $w$  (pagal žinomą  $K_{ps}$  vertę) [1].

$$w_{ps} = \frac{Re_{ps} \cdot \mu}{d \cdot \rho} = \frac{59,53 \cdot 1^2 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-9} \cdot 1000} = 11,9 m/s.$$

Žinoma, kad optimali pseudovirimo koeficiento vertė:  $K_{ps} = 2$ . Iš (6) formulės apskaičiuojamas greitis  $w$ :

$$w = K_{ps} \cdot w_{ps} = 2 \cdot 11,9 = 23,8 m/s.$$

### **Suspenduoto sluoksnio hidrodinamika, kai dalelių tankis $\rho_2 = 910 \text{ kg/m}^3$**

Kietų dalelių sluoksnio poringumas  $\varepsilon$ , apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\varepsilon = \frac{V_{sl} - V_d}{V_{sl}},$$

čia:  $V_{sl}$  – dinaminio suspenduoto sluoksnio tūris [ $\text{m}^3$ ];  $V_d$  – dalelių tūris [ $\text{m}^3$ ].

Optimalus suspenduotas sluoksnis su granulėmis, kurių tankis  $\rho_1 = 910 \text{ kg/m}^3$  gaunamas, kai dinaminio ir statinio suspenduotų sluoksnių santykis 13, tuomet, dalelių tūris  $V_d$  apskaičiuojamas:

$$V_d = S \cdot H_s,$$

čia:  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [ $\text{m}^2$ ];  $H_s$  – statinio suspenduoto sluoksnio aukštis [m], (11 pav. b).

$$V_d = S \cdot H_s = 19,63 \cdot 10^{-4} \cdot 0,02 = 3,93 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3.$$

Dinaminio suspenduoto sluoksnio tūris skaičiuojamas pagal formulę:

$$V_{sl} = S \cdot H_d,$$

čia:  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [ $\text{m}^2$ ];  $H_d$  – dinaminio suspenduoto sluoksnio aukštis [m], (11 pav. b).

$$V_{sl} = S \cdot H_d = 19,63 \cdot 10^{-4} \cdot 0,26 = 5,10 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3.$$

Tada, kietųjų dalelių sluoksnio poringumas:

$$\varepsilon = \frac{V_{sl} - V_d}{V_{sl}} = \frac{5,10 \cdot 10^{-4} - 3,93 \cdot 10^{-5}}{5,10 \cdot 10^{-4}} = 0,92.$$

Pagrindinė suspenduoto sluoksnio charakteristika yra hidraulinis pasipriešinimas  $\Delta p$ , jis yra pastovus ir apskaičiuojamas pagal (3) formulę:

$$\Delta p = G / S = \text{const.},$$

čia:  $G$  – medžiagos svoris sluoksnyje [kg], įvertinant Archimedo jėgą;  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [ $\text{m}^2$ ].

Hidraulinį pasipriešinimą  $\Delta p$  dar galima apskaičiuoti pagal (5) formulę:

$$\Delta p = (\rho_t - \rho) \cdot g(1 - \varepsilon) \cdot H_d,$$

čia:  $\rho_t$  – terpės tankis [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];  $\rho$  – dalelių tankis [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];  $g$  – laisvojo kritimo pagreitis [ $\text{m}/\text{s}^2$ ];  $\varepsilon$  – kietų dalelių sluoksnio poringumas;  $H_d$  – dinaminio suspenduoto sluoksnio aukštis [m], (11 pav. b).

$$\Delta p = (\rho_t - \rho) \cdot g(1 - \varepsilon) \cdot H_d = (1000 - 910) \cdot 9,81 \cdot (1 - 0,92) \cdot 0,26 = 18,36.$$

Reinoldso kriterijaus vertę  $Re_{ps}$ , kurią pasiekus prasideda pseudovirimas, galima apskaičiuoti pagal lygtį:

$$\text{Re}_{ps} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}},$$

čia:  $Ar$  – Archimedo kriterijus, kuris nusako skysčio greitį priklausomai nuo dalelių dydžio ir terpės.

Archimedo kriterijus skysčiams apskaičiuojamas pagal formulę:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_t^2 \cdot g}{\mu^2} \cdot \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_d},$$

čia:  $d$  – dalelės skersmuo [m];  $\rho_t$  – terpės tankis [ $\text{kg/m}^3$ ];  $\rho_d$  – dalelių tankis [ $\text{kg/m}^3$ ];  $g$  – laisvojo kritimo pagreitis [ $\text{m/s}^2$ ];  $\mu$  – dinaminės klampos koeficientas [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ].

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_t^2 \cdot g}{\mu^2} \cdot \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_d} = \frac{3^3 \cdot 10^{-9} \cdot 1000^2 \cdot 9,81}{1^2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1000 - 910}{910} = 2,62 \cdot 10^4.$$

Tuomet Reinoldso kriterijus bus:

$$\text{Re}_{ps} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}} = \frac{2,62 \cdot 10^4}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{2,62 \cdot 10^4}} = 11,67.$$

Suspenduoto sluoksnio pseudoverdančiajai būsenai palaikyti darbinis srauto greitis  $w$  turi būti intervale  $w_{ps} < w < w_{iš}$ . Darbinio ir pseudovirimo pradžios greičių santykis vadinamas pseudovirimo koeficientu  $K_{ps}$  ir skaičiuojamas pagal (6) formulę [1]:

$$K_{ps} = w / w_{ps},$$

čia:  $w$  – srauto greitis [ $\text{m/s}$ ];  $w_{ps}$  – kritinis sluoksnio perėjimo į pseudovirimo būseną greitis [ $\text{m/s}$ ].

Archimedo kriterijaus (11) išraiškoje visi dydžiai yra žinomi. Tada pagal (10) lygtį apskaičiavus  $Re_{ps} = w_{ps} \cdot d \cdot \rho / \mu$ , nustatomas ieškomasis greitis  $w_{ps}$ . Žinant jį, galima apskaičiuoti darbinį srauto greitį  $w$  (pagal žinomą  $K_{ps}$  vertę) [1].

$$w_{ps} = \frac{Re_{ps} \cdot \mu}{d \cdot \rho} = \frac{11,67 \cdot 1^2 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-9} \cdot 1000} = 3,89 m/s.$$

Žinoma, kad optimali pseudovirimo koeficiento vertė:  $K_{ps} = 2$ . Iš (6) formulės apskaičiuojamas greitis  $w$ :

$$w = K_{ps} \cdot w_{ps} = 2 \cdot 4,73 = 9,46 m/s.$$

### **Suspenduoto sluoksnio hidrodinamika, kai dalelių tankis $\rho_3 = 950 \text{ kg/m}^3$**

Kietų dalelių sluoksnio poringumas  $\varepsilon$ , apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\varepsilon = \frac{V_{sl} - V_d}{V_{sl}},$$

čia:  $V_{sl}$  – dinaminio suspenduoto sluoksnio tūris [ $\text{m}^3$ ];  $V_d$  – dalelių tūris [ $\text{m}^3$ ].

Optimalus suspenduotas sluoksnis su granulėmis, kurių tankis  $\rho_1 = 950 \text{ kg/m}^3$  gaunamas, kai dinaminio ir statinio suspenduotų sluoksnių santykis 5,2, tuomet, dalelių tūris  $V_d$  apskaičiuojamas:

$$V_d = S \cdot H_s,$$

čia:  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [ $\text{m}^2$ ];  $H_s$  – statinio suspenduoto sluoksnio aukštis [m], (11 pav. b).

$$V_d = S \cdot H_s = 19,63 \cdot 10^{-4} \cdot 0,05 = 9,82 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3.$$



Dinaminio suspenduoto sluoksnio tūris skaičiuojamas pagal formulę:

$$V_{sl} = S \cdot H_d ,$$

čia:  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [ $m^2$ ];  $H_d$  – dinaminio suspenduoto sluoksnio aukštis [m], (11 pav. b).

$$V_{sl} = S \cdot H_d = 19,63 \cdot 10^{-4} \cdot 0,26 = 5,10 \cdot 10^{-4} m^3 .$$

Tada, kietųjų dalelių sluoksnio poringumas:

$$\varepsilon = \frac{V_{sl} - V_d}{V_{sl}} = \frac{5,10 \cdot 10^{-4} - 9,82 \cdot 10^{-5}}{5,10 \cdot 10^{-4}} = 0,8 .$$

Pagrindinė suspenduoto sluoksnio charakteristika yra hidraulinis pasipriešinimas  $\Delta p$ , jis yra pastovus ir apskaičiuojamas pagal (3) formulę:

$$\Delta p = G / S = const. ,$$

čia:  $G$  – medžiagos svoris sluoksnyje [kg], įvertinant Archimedo jėgą;  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [ $m^2$ ].

Hidraulinį pasipriešinimą  $\Delta p$  dar galima apskaičiuoti pagal (5) formulę:

$$\Delta p = (\rho_t - \rho) \cdot g(1 - \varepsilon) \cdot H_d ,$$

čia:  $\rho_t$  – terpės tankis [ $kg/m^3$ ];  $\rho$  – dalelių tankis [ $kg/m^3$ ];  $g$  – laisvojo kritimo pagreitis [ $m/s^2$ ];  $\varepsilon$  – kietų dalelių sluoksnio poringumas;  $H_d$  – dinaminio suspenduoto sluoksnio aukštis [m], (11 pav. b).

$$\Delta p = (\rho_t - \rho) \cdot g(1 - \varepsilon) \cdot H_d = (1000 - 950) \cdot 9,81 \cdot (1 - 0,80) \cdot 0,26 = 25,51 .$$

Reinoldso kriterijaus vertę  $Re_{ps}$ , kurią pasiekus prasideda pseudovirimas, galima apskaičiuoti pagal lygtį:

$$Re = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}},$$

čia:  $Ar$  – Archimedo kriterijus, kuris nusako skysčio greitį priklausomai nuo dalelių dydžio ir terpės.

Archimedo kriterijus skysčiams apskaičiuojamas pagal formulę:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_t^2 \cdot g}{\mu^2} \cdot \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_d},$$

čia:  $d$  – dalelės skersmuo [m];  $\rho_t$  – terpės tankis [ $\text{kg/m}^3$ ];  $\rho_d$  – dalelių tankis [ $\text{kg/m}^3$ ];  $g$  – laisvojo kritimo pagreitis [ $\text{m/s}^2$ ];  $\mu$  – dinaminės klampos koeficientas [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ].

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_t^2 \cdot g}{\mu^2} \cdot \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_d} = \frac{3^3 \cdot 10^{-9} \cdot 1000^2 \cdot 9,81}{1^2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1000 - 950}{950} = 1,39 \cdot 10^4.$$

Tuomet Reinoldso kriterijus bus:

$$Re_{ps} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}} = \frac{1,39 \cdot 10^4}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{1,39 \cdot 10^4}} = 6,89.$$

Suspenduoto sluoksnio pseudoverdančiajai būsenai palaikyti darbinis srauto greitis  $w$  turi būti intervale  $w_{ps} < w < w_{iš}$ . Darbinio ir pseudovirimo pradžios greičių santykis vadinamas pseudovirimo koeficientu  $K_{ps}$  ir skaičiuojamas pagal (6) formulę [1]:

$$K_{ps} = w / w_{ps},$$

čia:  $w$  – srauto greitis [m/s];  $w_{ps}$  – kritinis sluoksnio perėjimo į pseudovirimo būseną greitis [m/s].

Archimedo kriterijaus (11) išraiškoje visi dydžiai yra žinomi. Tada pagal (10) lygtį apskaičiavus  $Re_{ps} = w_{ps} \cdot d \cdot \rho / \mu$ , nustatomas ieškomasis greitis  $w_{ps}$ . Žinant jį, galima apskaičiuoti darbinį srauto greitį  $w$  (pagal žinomą  $K_{ps}$  vertę) [1].

$$w_{ps} = \frac{Re_{ps} \cdot \mu}{d \cdot \rho} = \frac{6,89 \cdot 1^2 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-9} \cdot 1000} = 2,2 \text{ m/s}.$$

Žinoma, kad optimali pseudovirimo koeficiento vertė:  $K_{ps} = 2$ . Iš (6) formulės apskaičiuojamas greitis  $w$ :

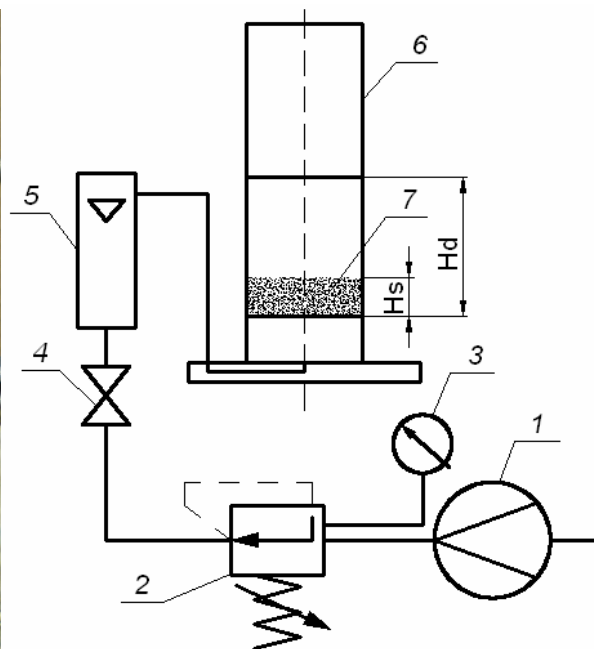
$$w = K_{ps} \cdot w_{ps} = 2 \cdot 2,2 = 4,4 \text{ m/s}.$$

## 4.2. Eksperimentinio stendo aprašymas

Eksperimentinėje dalyje nustatinėjami optimalūs suspenduoto sluoksnio parametrai ir tiriamas suspenduoto sluoksnio efektyvumas valant detergentus iš nuotekų. Šiems tikslams įgyvendinti naudojamas eksperimentinis stendas, kurio bendras vaizdas ir schema pavaizduota 11 pav. Stendas sukurtas remiantis 4.1 punkte atliktais skaičiavimais.



a)



b)

11 pav. Eksperimentinis stendas: a) bendras vaizdas; b) eksperimento stendo schema: 1 – kompresorius; 2 – slėgio reguliatorius; 3 – manometras; 4 – sklendė; 5 – rotametas; 6 – įrenginys, skirtas suspenduoto sluoksnio parametrams nustatyti; 7 – granulės;  $H_s$  – statinio suspenduoto sluoksnio aukštis;  $H_d$  – dinaminio suspenduoto sluoksnio aukštis

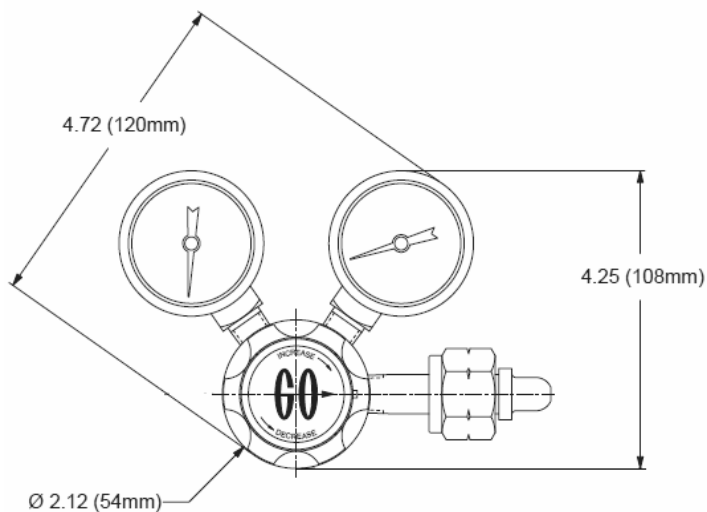
**Stendo veikimo principas.** Kompresoriumi 1 per slėgio reguliatorių 2 į įrenginį 6 tiekiamas oras. Oro slėgis matuojamas manometru 3. Tiekiamo oro debitas reguliuojamas sklende 4, matuojamas rotametu 5. Į įrenginį tiekiamas oras, praėjęs perforuotą pertvarą, disperguojamas į burbuliukus. Burbuliukai kelia granules 7, taip formuojamas dinaminis suspenduotas sluoksnis.

Granulėms kontaktuojant su oro burbuliukais atsiranda trys kontaktai: granulė – granulė, oro burbuliukas – oro burbuliukas, granulė – oro burbuliukas. Granulėms kontaktuojant su oro burbuliukais padidėja kontaktinis paviršiaus plotas bei trintis, intensyvėja putų susidarymas. Susidarant didesniai putų kiekiui iš vandens pašalinama daugiau paviršiaus aktyviųjų medžiagų.

### 4.3. Matavimo priemonės

Ilgio matavimai atliekami liniuote. Matavimo ribos 0–1000 mm.

Slėgio reguliavimas atliekamas slėgio reguliatoriumi CYL–1. Darbinė temperatūra nuo -40 iki +80 °C, maksimalus darbinis slėgis – 24,82 Mpa. Tikslumo klasė RG. Įeinančio slėgio ribos: 0,5–5 bar; išėjimo slėgis 15–150 mbar. Svoris 0,86 kg. 13 pav. [22].



12 pav. Slėgio reguliatorius CYL–1

Oro debitas matuojamas rotametru RAGG (14 pav.). Matavimo ribos esant 20 °C ir atmosferiniam slėgiui (1 bar): 0–100 l/min. Maksimali darbinė temperatūra 100 °C. Tikslumo klasė  $\pm 1,6\%$ , [21].



13 pav. Rotametas RAGG

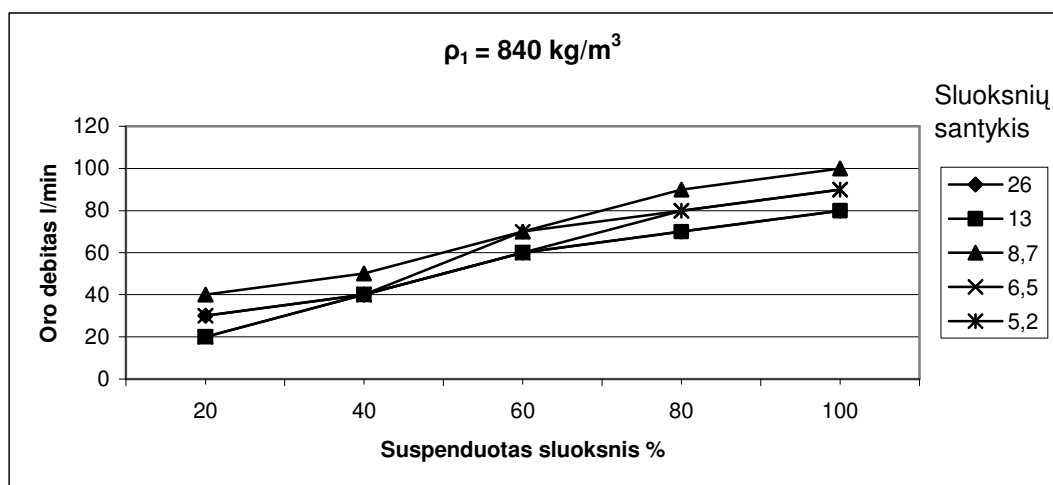
#### 4.4. Eksperimento atlikimo metodika

**Pirma eksperimento dalis.** Pirmoje dalyje nustatinėjami optimalūs suspenduoto sluoksnio parametrai. Suspenduotas sluoksnis formuojamas esant šiems debitams: 20, 40, 60, 80, 100 l/min. Sluoksnis stebimas ir vertinamas vizualiai, nuo 10 iki 100 %, pagal tai, kaip tolygiai granulės, veikiamos oro, užpildo pasirinktą dinaminio suspenduoto sluoksnio aukštį (11 pav. b).

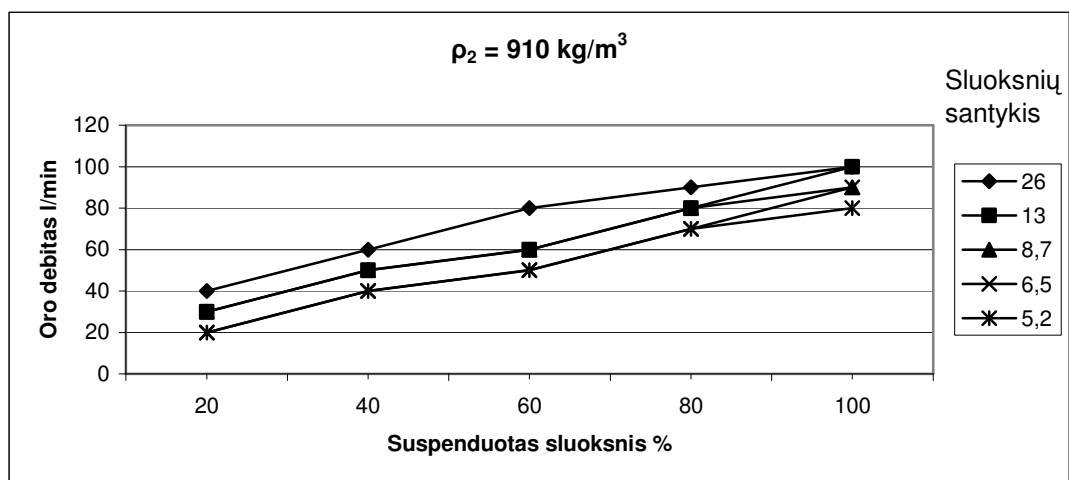
Statinio ir dinaminio suspenduotų sluoksnių santykis keičiamas į įrenginį (11 pav. b, pozicija 6) pripilant didesnę granulių kiekį. Parinkti 5 sluoksnių santykiai: 26, 13, 8,7, 6,5, 5,2.

Eksperimentas atliktas su penkiomis, skirtingus tankius turinčiomis granulėmis:  $\rho_1 = 840 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_2 = 910 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_3 = 950 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_4 = 2500 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_5 = 2700 \text{ kg/m}^3$ .

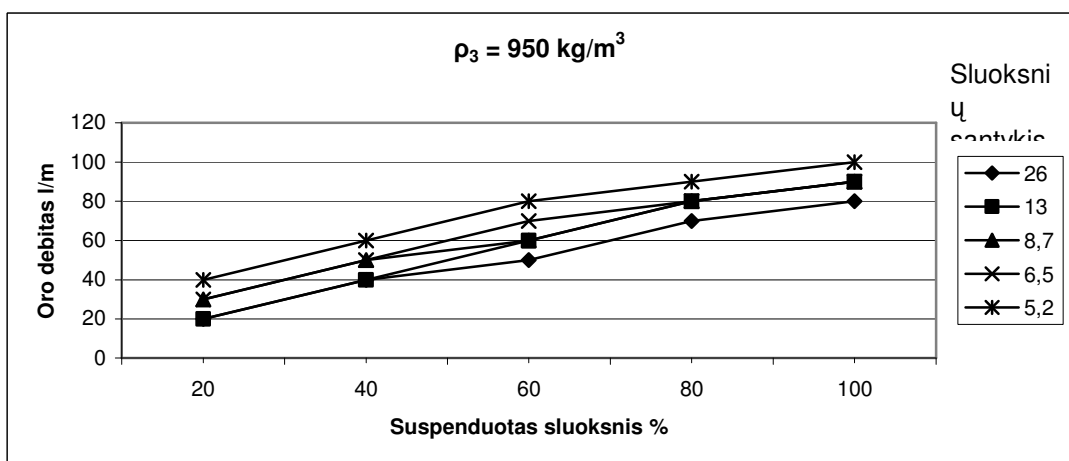
Eksperimento rezultatai formuojant optimalius suspenduoto sluoksnio parametrus pateikti grafiškai 14–17 pav.



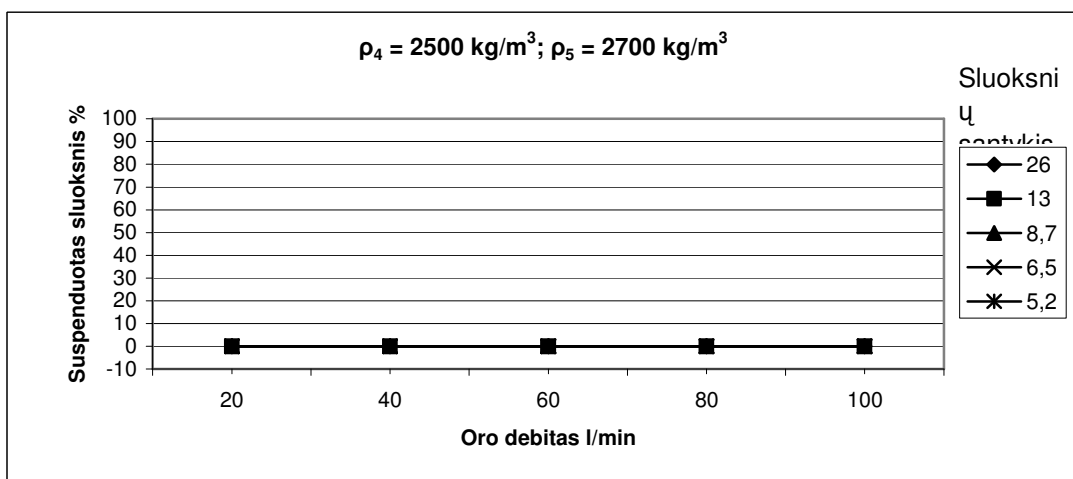
14 pav. Suspenduoto sluoksnio formavimas su granulėmis, kurių tankis  $\rho_1 = 840 \text{ kg/m}^3$



15 pav. Suspenduoto sluoksnio formavimas su granulėmis, kurių tankis  $\rho_2 = 910 \text{ kg/m}^3$



16 pav. Suspenduoto sluoksnio formavimas su granulėmis, kurių tankis  $\rho_3 = 950 \text{ kg/m}^3$



17 pav. Suspenduoto sluoksnio formavimas su granulėmis, kurių tankiai:  $\rho_4 = 2500 \text{ kg/m}^3$ ;  
 $\rho_5 = 2700 \text{ kg/m}^3$

Iš pateiktų rezultatų matyti, kad formuoti suspenduotą sluoksnį su granulėmis, kurių tankis didesnis nei  $2000 \text{ kg/m}^3$ , netikslinga. Esant pasirinktiems oro debitams suspenduotas sluoksnis nesusiformavo. Formuoti suspenduotą sluoksnį, kai debitai didesni, neefektyvu, kadangi padidėja energijos sąnaudos, reikalingos suspenduotam sluoksniui suformuoti. Su granulėmis, kurių tankis  $\rho_1 = 840 \text{ kg/m}^3$ , optimalus suspenduotas sluoksnis susiformavo, kai oro debitas  $100 \text{ l/min.}$ , statinio ir dinaminio suspenduotų sluoksnių santykis 8,7. Su granulėmis, kurių tankis  $\rho_2 = 910 \text{ kg/m}^3$ , optimalus suspenduotas sluoksnis susiformavo, kai oro debitas  $100 \text{ l/min.}$ , sluoksnių santykis 13. Su granulėmis, kurių tankis  $\rho_3 = 950 \text{ kg/m}^3$ , optimalus suspenduotas sluoksnis susiformavo, kai oro debitas  $100 \text{ l/min.}$ , sluoksnių santykis 5,2.

**Antra eksperimento dalis.** Antroje dalyje, turint optimalius suspenduoto sluoksnio parametrus ir norint įsitikinti suspenduoto sluoksnio efektyvumu, buvo atlikti bandymai, kurių metu valytas vandens ir detergentų tirpalas, turintis  $1 \text{ g/l}$  ir  $0,5 \text{ g/l}$  koncentracijas.

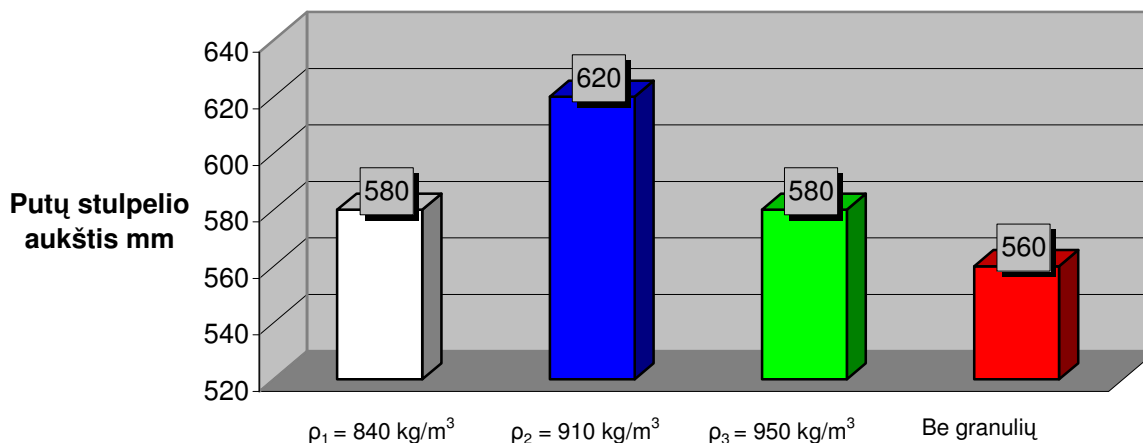
Tirpalams paruošti naudojami skalbimo milteliai, skirti plauti rankomis „TIDE MANUAL“ ir skirti plauti skalbimo mašina „TIDE AUTOMAT“. Skalbimo miltelių, skirtų plauti rankomis „TIDE MANUAL“ sudėtis: 5–15 % anijoninių aktyviųjų paviršiaus medžiagų (APM), fosfatų; <5 % katijoninių APM, deguonies baliklių, polikarboksilatų; optiniai balikliai, fermentai, kvapai, limonene.

Skalbimo miltelių, skirtų plauti skalbimo mašina „TIDE AUTOMAT“ sudėtis: 5–15 % anijoninių APM, deguonies baliklių; <5 % katijoninių APM, nejoninių APM, fosfatų, polikarboksilatų, zeolitų; optiniai balikliai, fermentai, kvapai, citral, geraniol, limonene, linalool, <0,5 % fosforo.

Eksperimento metu detergentai iš vandens valyti naudojant suspenduotą sluoksnį ir nenaudojant suspenduoto sluoksnio. Bandymo metu detergentai iš vandens valyti su granulėmis, kurių tankiai:  $\rho_1 = 840 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_2 = 910 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_3 = 950 \text{ kg/m}^3$ . Nuotekų valymo trukmė  $t = 30 \text{ s.}$  Išvalymo efektyvumas vertinamas vizualiai, pagal susidariusį putų stulpelio aukštį. Rezultatai pateikiami grafiškai 18–21 pav.

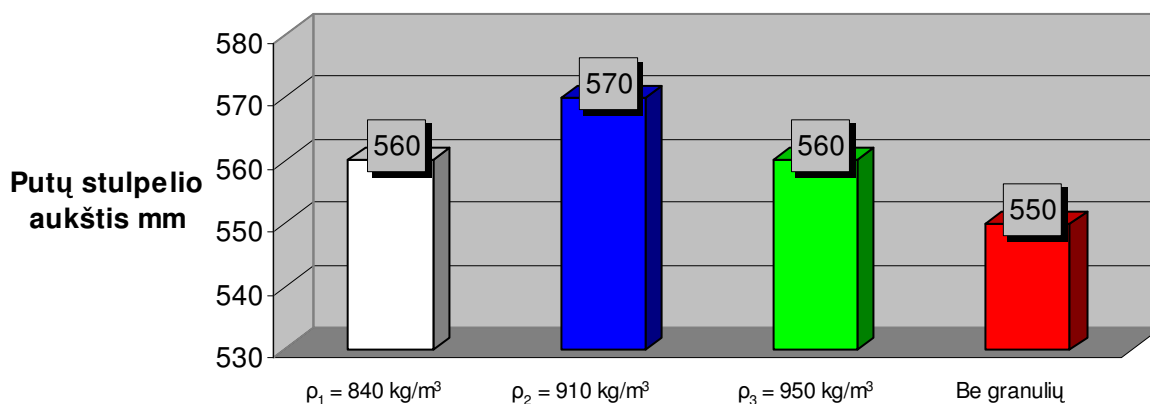


### Skalbimo milteliai, skirti plauti rankomis, koncentracija 1 g/l

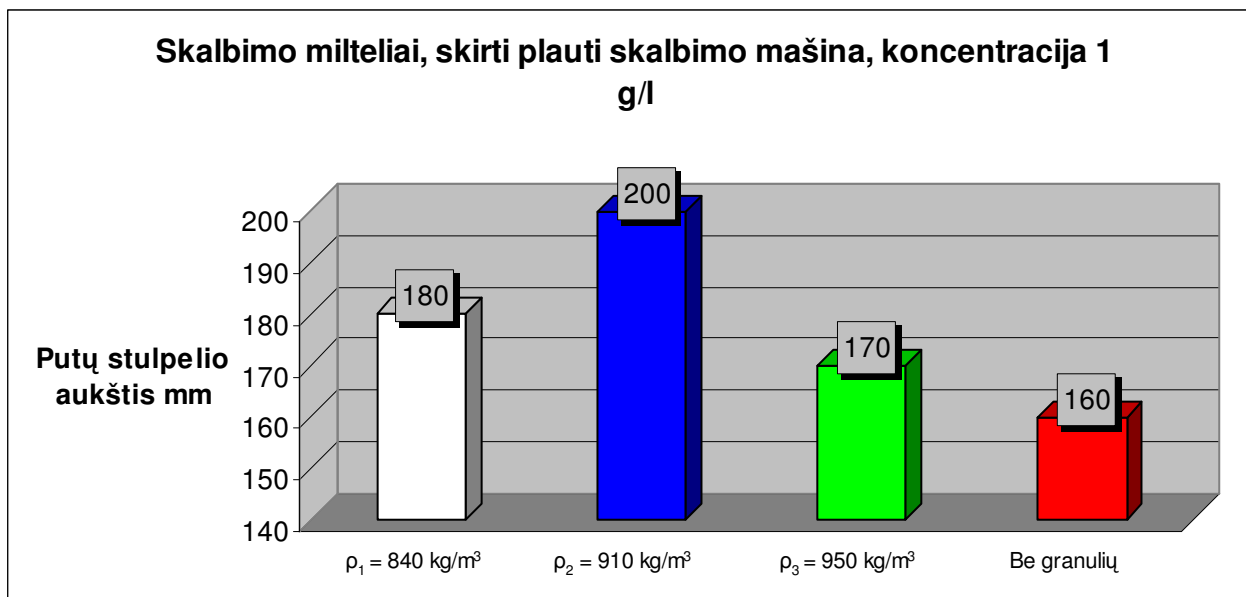


18 pav. Putų stulpelio aukštis valant iš nuotekų detergentus naudojant suspenduotą sluoksnį ir nenaudojant suspenduoto sluoksnio. Detergentai – skalbimo milteliai, skirti plauti rankomis, koncentracija 1 g/l

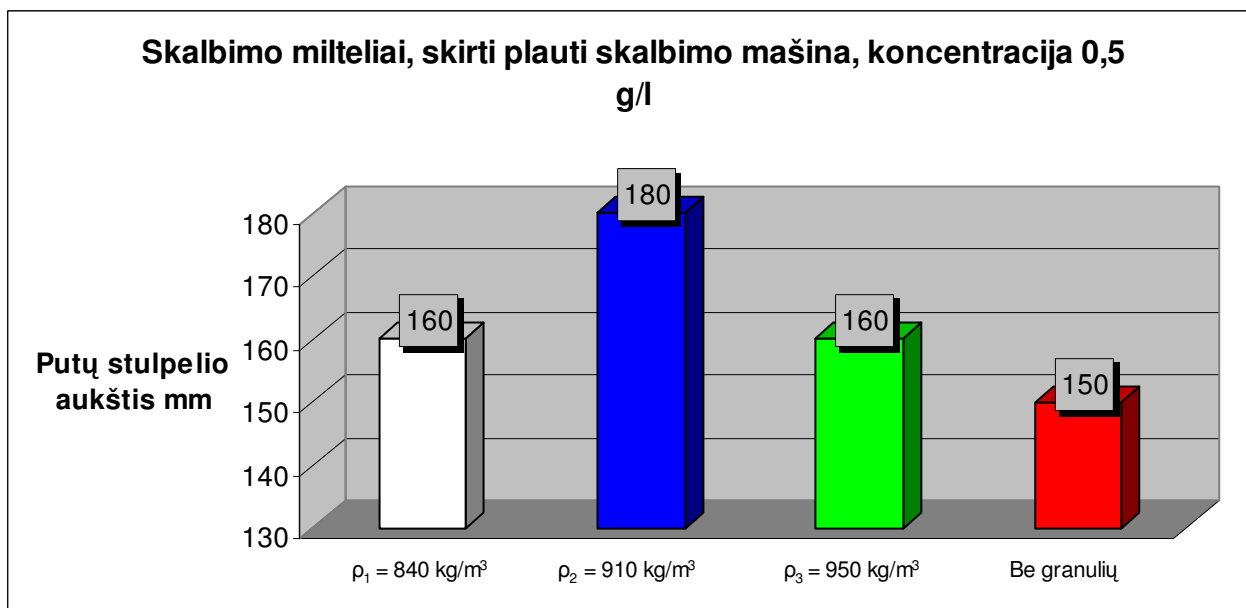
### Skalbimo milteliai, skirti plauti rankomis, koncentracija 0,5 g/l



19 pav. Putų stulpelio aukštis valant iš nuotekų detergentus naudojant suspenduotą sluoksnį ir nenaudojant suspenduoto sluoksnio. Detergentai – skalbimo milteliai, skirti plauti rankomis, koncentracija 0,5 g/l



20 pav. Putų stulpelio aukštis valant iš nuotekų detergentus naudojant suspenduotą sluoksnį ir nenaudojant suspenduoto sluoksnio. Detergentai – skalbimo milteliai, skirti plauti skalbimo mašina, koncentracija 1 g/l



21 pav. Putų stulpelio aukštis valant iš nuotekų detergentus naudojant suspenduotą sluoksnį ir nenaudojant suspenduoto sluoksnio. Detergentai – skalbimo milteliai, skirti plauti skalbimo mašina, koncentracija 0,5 g/l

Iš pateiktų rezultatų matyti, kad valant detergentus iš nuotekų naudojant suspenduotą sluoksnį susidaro didesni putų stulpelio aukščiai. Didžiausi putų stulpelių aukščių skirtumai, valant

detergentus iš nuotekų, naudojant suspenduotą sluoksnį ir nenaudojant suspenduoto sluoksnio, gaunami su granulėmis, kurių tankis  $\rho_2 = 910 \text{ kg/m}^3$ .

Atlikus bandymus su granulėmis, kurių tankis  $\rho_2 = 910 \text{ kg/m}^3$ , paimti 6 mėginiai, kurie ištirti Vilniaus nuotekų valyklos laboratorijoje, [24]. Rezultatai pateikiami 4 lentelėje.

4 lentelė. Anijoninių detergentų koncentracija nuotekose po valymo naudojant suspenduotą sluoksnį ir nenaudojant suspenduoto sluoksnio

|                                                                                               | Skalbimo milteliai,<br>skirti plauti skalbimo<br>mašina 1 g/l | Skalbimo milteliai,<br>skirti plauti skalbimo<br>mašina 0,5 g/l | Skalbimo milteliai,<br>skirti plauti rankomis<br>1 g/l |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Anijoninių detergentų<br>koncentracija nuotekose<br>naudojant suspenduotą<br>sluoksnį mg/l    | 83,4                                                          | 64,0                                                            | 120,0                                                  |
| Anijoninių detergentų<br>koncentracija nuotekose<br>nenaudojant suspenduoto<br>sluoksnio mg/l | 90,0                                                          | 77,0                                                            | 123,0                                                  |

Iš gautų rezultatų matyti, kad valant detergentus iš nuotekų, formuojant suspenduotą sluoksnį su granulėmis, kurių tankis  $\rho_2 = 910 \text{ kg/m}^3$ , pavyko pašalinti daugiau anijoninių detergentų.

## 4.5 Eksperimento rezultatų sulyginimas su teoriniais skaičiavimais

Eksperimentiniuose skaičiavimuose atliekami suspenduoto sluoksnio kintamų dydžių skaičiavimai. Apskaičiuojami darbinis greitis  $w$ , pseudovirimo pradžios greitis  $w_{ps}$  ir pseudovirimo koeficientas  $K_{ps}$ .

### Suspenduoto sluoksnio charakteristikos, kai dalelių tankis $\rho_1 = 840 \text{ kg/m}^3$

Darbinis greitis  $w$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w = \frac{Q_d}{S}, \quad (12)$$

čia:  $Q_d$  – darbinio dujų srauto debitas [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [ $\text{m}^2$ ].

$$w = \frac{Q_d}{S} = \frac{1,67 \cdot 10^{-3}}{19,63 \cdot 10^{-4}} = 0,85 \text{ m/s};$$

Pseudovirimo pradžios greitis  $w_{ps}$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w_{ps} = \frac{Q_{ps}}{S}, \quad (13)$$

čia:  $Q_{ps}$  – pseudovirimo pradžios dujų srauto debitas [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [ $\text{m}^2$ ].

$$w_{ps} = \frac{Q_{ps}}{S} = \frac{3,3 \cdot 10^{-4}}{19,63 \cdot 10^{-4}} = 0,17 \text{ m/s};$$

Pseudovirimo koeficientas  $K_{ps}$  apskaičiuojamas pagal (6) formulę:

$$K_{ps} = \frac{w}{w_{ps}} = \frac{0,85}{0,17} = 5.$$

**Suspenduoto sluoksnio charakteristikos, kai dalelių tankis  $\rho_2 = 910 \text{ kg/m}^3$**

Darbinis greitis  $w$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w = \frac{Q_d}{S},$$

čia:  $Q_d$  – darbinio dujų srauto debitas [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [ $\text{m}^2$ ].

$$w = \frac{Q_d}{S} = \frac{1,67 \cdot 10^{-3}}{19,63 \cdot 10^{-4}} = 0,85 \text{ m/s};$$

Pseudovirimo pradžios greitis  $w_{ps}$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w_{ps} = \frac{Q_{ps}}{S},$$

čia:  $Q_{ps}$  – pseudovirimo pradžios dujų srauto debitas [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [ $\text{m}^2$ ].

$$w_{ps} = \frac{Q_{ps}}{S} = \frac{6,67 \cdot 10^{-4}}{19,63 \cdot 10^{-4}} = 0,34 \text{ m/s};$$

Pseudovirimo koeficientas  $K_{ps}$  apskaičiuojamas pagal (6) formulę:

$$K_{ps} = \frac{w}{w_{ps}} = \frac{0,85}{0,34} = 2,5.$$

**Suspenduoto sluoksnio charakteristikos, kai dalelių tankis  $\rho_3 = 950 \text{ kg/m}^3$**

Darbinis greitis  $w$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w = \frac{Q_d}{S},$$

čia:  $Q_d$  – darbinio dujų srauto debitas [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [ $\text{m}^2$ ].

$$w = \frac{Q_d}{S} = \frac{1,67 \cdot 10^{-3}}{19,63 \cdot 10^{-4}} = 0,85 \text{ m/s};$$

Pseudovirimo pradžios greitis  $w_{ps}$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w_{ps} = \frac{Q_{ps}}{S};,$$

čia:  $Q_{ps}$  – pseudovirimo pradžios dujų srauto debitas [ $m^3/s$ ];  $S$  – įrenginio (11 pav. b, 6 poz.) skerspjūvio plotas [ $m^2$ ].

$$w_{ps} = \frac{Q_{ps}}{S} = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{19,63 \cdot 10^{-4}} = 0,25 m/s;$$

Pseudovirimo koeficientas  $K_{ps}$  apskaičiuojamas pagal (6) formulę:

$$K_{ps} = \frac{w}{w_{ps}} = \frac{0,85}{0,25} = 3,4.$$

Iš skaičiavimų matyti, kad su granulėmis, kurių tankis  $\rho_2 = 910 \text{ kg/m}^3$  eksperimente gautas pseudovirimo koeficientas  $K_{ps} = 2,5$  artimiausias rekomenduojamam teoriniam  $K_{ps} = 2$ , jam esant gauti didžiausi putų stulpelių aukščiai valant nuotekas nuo detergentų (18–21 pav.). Galima teigti, kad teorijoje rekomenduojamas pseudovirimo koeficientas atitinka realias eksperimento sąlygas.

## IŠVADOS

1. Intensyvinant technologinius procesus sąlyginai didėja detergentų sąnaudos produkcijos vienetui, tai įtakoja detergentų koncentracijos didėjimą nuotekose ir viršija didžiausias leistinas koncentracijas (DLK).

2. Naudojami nuotekų valymo metodai neužtikrina reikiamo detergentų išvalymo iš nuotekų, o per dideli jų kiekiai neigiamai įtakoja pačius nuotekų valymo procesus, bei stabdo deguonies tirpumą ir vandenyje gyvenančių organizmų vystymąsi, keičia vandens skonį ir kvapą.

3. Detergentų pašalinimui iš nuotekų tikslinga panaudoti jų savybę – putojimą.

4. Detergentų iš nuotekų valymo efektyvumui didinti tikslinga naudoti suspenduotą sluoksnį suformuojant jį iš granulių, kurių tankis  $\rho_2 = 910 \text{ kg/m}^3$ .

5. Detergentų iš nuotekų valymas naudojant suspenduotą sluoksnį yra 11,1 % efektyvesnis palyginus su paprastu oro barbotazu.

6. Valant detergentus iš nuotekų, suspenduoto sluoksnio formavimui, galima panaudoti plastmasių antrines žaliavas granulių pavidalu.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Balandis A., Kantautas A., Leskauskas B. ir kt. Chemijos inžinerija. I knyga. Kaunas: Technologija, 2006. 473 p.
2. Baltrėnas P., Lygis D., Mierauskas P., Aplinkos apsauga. Vilnius: Enciklopedija, 1996. 287p.
3. Barzdžiukienė, L.D., Celiešienė, V., Kaulakienė, A. Baigiamasis studijų darbas. Kalbininkų patarimai: teorija ir tvarkyba. 2 – asis pataisytas ir papildytas leidimas. Vilnius: Technika, 2004. 123p.
4. Beržeškienė J. Vandens mikrobiologija. Vilnius: Technika, 1999. 144 p.
5. Budrys R., Iljasevičius K. Vandens naudojimas ir tvarkymas smulkiajame versle. Vilnius: 2007. 31 p.
6. Gerdžiūnas P., Plakys V. Bendrieji akademinų darbų įforminimo reikalavimai. Vilnius: Technika, 2004. 75 p.
7. Gylys J., Hidrodinamika, šilumos ir masės mainai statškai stabilių putų sistemose. Kaunas: Technologija, 1998. 386 p.
8. Lietuvos Respublikos Aplinkos ministro įstatymas. Dėl nuotekų tvarkymo reglamento patvirtinimo. 2006 m. gegužės 17 d. Nr. D1-236.
9. Matulis J., Fizikinė chemija. 2 dalis. Vilnius: TEV, 1999. 381 p.
10. Matuzevičius A., Nuotekų valymas aktyviuoju dumblu. Vilnius: Technika, 1998. 78 p.
11. Medekšas H. Gaminių kokybė ir patikimumas Kaunas: Technologija, 2003. 279 p.
12. Musnickas J. Riebalai ir aliejai. Muilai. Paviršinio aktyvumo medžiagos. Plovikliai. Mokomoji knyga. Kaunas: Technologija, 2001. 175 p.
13. Petrėtienė A., Transportininkų kalbos kultūra: mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2009. 200 p.
14. Raškauskas V., Jankevičius K., Zajančkauskas P. Aplinkos apsaugos terminų žodynas. Vilnius. 2000. 519 p.
15. Sakalauskas A., Šulga V., Jankauskas J. Vandentieka. Vandens ruošimas. Vilnius: Technika, 2007. 576 p.
16. Striška V. Aplinkosaugos įrenginiai ir sistemos. Vilnius: Technika, 2001. 256 p.



17. Vekteris V., Kasparaitis A., Kaušinis S. Matavimų teorija praktika. Vilnius: Žiburio leidykla, 2000. 380 p.
18. Тихомиров В. К., Пены: теория и практика их получения и разрушения. Москва: Химия, 1975. 262 p.
19. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Ленинград: Химия, 1981. 560 p.
20. Dėl nuotekų tvarkymo reglamento patvirtinimo. Prieiga per internetą [http://www.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.showdoc\\_l?p\\_id=276576](http://www.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.showdoc_l?p_id=276576) [žiūrėta 2010-05-10]
21. Rotametas. Prieiga per internetą <http://www.elintosprekyba.lt/lt/index> [žiūrėta 2010-05-12].
22. Slėgio reguliatorius. Prieiga per internetą <http://www.interautomatika.lt/> [žiūrėta 2010-05-12]
23. Valstybinė lietuvių kalbos komisija. Prieiga per internetą <http://www.vlkk.lt/lit/6250> [žiūrėta 2010-06-01]
24. Vilniaus nuotekų valyklos laboratorija. Prieiga per internetą <http://www.vv.lt/lt/> [žiūrėta 2010-04-28]

## **PRIEDAI**