



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

TTÜ materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

# PIIMATÖÖSTUSTE REOVETE PUHASTAMISE TEHNOLOOGIAD

TECHNOLOGIES FOR DAIRY WASTEWATER TREATMENT

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Tatjana Rein  
/nimi/

Üliõpilaskood: 176525KAKM

Juhendaja: Marina Trapido, professor  
/nimi, amet/

Tallinn 2019

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....Marina Trapido.....

/ nimi ja allkiri /

**TTÜ materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut**

**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Tatjana Rein, 176525KAKM.....(nimi, üliõpilaskood)  
**Õppekava, peeriala:** Keemia- ja keskkonnakaitse tehnoloogia, KAKM02/09...(kood ja nimetus)  
**Juhendaja(d):** professor, Marina Trapido, 6202855.....(amet, nimi, telefon)  
**Konsultandid:** .....(nimi, amet)  
.....(ettevõtte, telefon, e-post)

**Lõputöö teema:**

(eesti keeles) Piimatööstuste reovete puhastamise tehnoloogiad

(inglise keeles) Technologies for dairy wastewater treatment

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Anda ülevaadet maailmas piimatööstuse reovete puhastamiseks kasutatavate tehnoloogiate kohta
2. Anda ülevaadet Eestis kasutatavate piimatööstuste reovete puhastamiseks kasutatavate tehnoloogiate kohta
3. Võrrelda Eestis ja mujal kasutatavaid tehnoloogiaid

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

| Nr | Ülesande kirjeldus             | Tähtaeg    |
|----|--------------------------------|------------|
| 1. | Algmaterjalide otsing          | 1.03.2019  |
| 2. | Kirjanduse ülevaate koostamine | 5.04.2019  |
| 3. | Andmete analüüs ja kokkuvõtte  | 13.05.2019 |

**Töö keel:** eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** "27" ...mai...2019.a

**Üliõpilane:** Tatjana Rein ..... "....." .....201....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Marina Trapido ..... "....." .....201....a  
/allkiri

**Konsultant:** .....  
"....." .....201....a

/allkiri/

# SISUKORD

|   |    |
|---|----|
| Lühendite ja tähiste loetelu .....  | 6  |
| SISSEJUHATUS .....  | 7  |
| 1. PIIMATÖÖSTUS.....  | 8  |
| 1.1 Piima tootmine ja tarbimine .....   | 9  |
| 1.2 Piimatoodete tootmine ja tarbimine .....                                  | 10 |
| 1.3 Eesti piimatööstused.....   | 12 |
| 2 PIIMATÖÖSTUSE REOVESI .....   | 14 |
| 2.1 Piimatööstuse reovee koostis .....  | 15 |
| 2.2 Reovetele sätestatud normid .....   | 18 |
| 3 PIIMATÖÖSTUSTE REOVETE PUHASTAMINE.....                                     | 20 |
| 3.1 Piimatööstuste reovete puhastamise vajalikus .....                        | 21 |
| 3.1.1 Mõju keskkonnale .....  | 21 |
| 3.2 Füüsikalis-keemiline töötlemine .....                                     | 22 |
| 3.2.1 Gravitatsiooniline rasvapüüdja .....                                    | 24 |
| 3.2.2 Lahustunud õhu flotatsiooniseade.....                                   | 24 |
| 3.2.3 Keemiline sadestamine ja koagulatsiooni-flokulatsiooni protsessid ..... | 25 |
| 3.2.4 Adsorptsioon .....  | 26 |
| 3.2.5 Membraanprotsess .....  | 27 |
| 3.2.6 Elektrokeemiline töötlus .....  | 27 |
| 3.2.7 Füüsikalis-keemilise töötamise efektiivsus .....                        | 28 |
| 3.3 Anaeroobne töötlemine.....  | 30 |
| 3.3.1 Anaeroobne filter .....   | 30 |
| 3.3.2 Ülesvooluline anaeroobne hõljuvkihtreaktor .....                        | 31 |
| 3.3.3 Ülesvooluline anaeroobne biokile-täidisreaktor.....                     | 32 |
| 3.3.4 Anaeroobse töötlemise võrdlus .....                                     | 33 |
| 3.4 Aeroobne töötlemine.....  | 34 |
| 3.4.1 Nõrgfilter .....  | 34 |
| 3.4.2 Aktiivmuda protsess .....   | 35 |
| 3.4.3 Annuspuhasti.....   | 36 |
| 3.4.4 Kasutatavate reaktorite võrdlus.....                                    | 37 |
| 3.4.5 Süvapuhasustus .....  | 38 |

|   |    |
|---|----|
| 3.5 Aeroobse ja anaeroobse töötlemise võrdlus .....           | 38 |
| 4 EESTIS KASUTATUD TEHNOLOOGIAD.....                          | 40 |
| 4.1 Põltsamaa Epiima juustutööstuse eelpuhastus seadmed ..... | 41 |
| 4.2 Estover juustutööstuse reoveepuhasti .....                | 43 |
| 4.3 Vigala piimatööstuse reoveepuhasti.....                   | 44 |
| 5 PIIMATÖÖSTUSTE REOVETE PUHASTAMISE VÄLJAKUTSED .....        | 46 |
| 5.1 Ebaühtlane tootmistsükkel .....                           | 46 |
| 5.2 Rasva edasikandumine.....                                 | 46 |
| 5.3 pH kõikumised .....                                       | 47 |
| 5.4 Kõrge energiakulu .....                                   | 48 |
| KOKKUVÕTE .....   | 49 |
| SUMMARY .....   | 51 |
| KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....                            | 53 |

## Lühendite ja tähiste loetelu

m<sup>3</sup>/d- kuupmeetrit päevas

HA – hõljuvaine

KHT – keemiline hapnikutarve

BHT<sub>7</sub> – 7-päevane biokeemiline hapnikutarve

P<sub>üld</sub> – üldine fosfor

N<sub>üld</sub> – üldine lämmastik

ie - inimekvivalent

HRT - hüdrauliline viibeaeg (hydraulic retention time)

DAF - lahustunud õhu flotatsioon (dissolved air flotation)

TOC – üldorgaaniline süsinik (total organic carbon)

TKN - Kjeldahli järgi määratud üldlämmastik (total Kjeldahl nitrogen)

SBR – annuspuhasti (sequencing batch reactor)

MSBR - membraan annuspuhasti (membrane-sequencing batch reactor)

MBBR - liikuva kihiga biokile reaktor (moving bed biofilm reactor)

UASB – ülesvooluline anaeroobne hõljuvkihtreaktor (upflow anaerobic sludge blanket)

UAFB – ülesvooluline anaeroobne biokile-täidisreaktor (upflow anaerobic fixed-bed reactor)

## SISSEJUHATUS

Maailmas on piima tootmine ja piimatoodete tarbimine pidevalt kasvamas. Tegemist on areneva valdkonnaga, millele on püsiv ja kasvav nõudlus. Piimatööstused on Eestis samuti tähtsal kohal kuna eestlased tarbivad palju piimatooteid ja osa toodangust eksporditakse välismaale.

Piimatehastes tekib piimatoodete tootmise käigus keskkonnale kahjulik reovesi. Tegemist on kõrgelt kontsentreeritud tööstusliku reoveega, mis loodusesse sattumisel rikub looduslike veekogude tasakaalu. Seetõttu on väga oluline, et piimatööstuste reovesi oleks reostusainetes puhastatud ja vastaks loodusesse juhtimise ajal keskkonna normidele.

Piimatööstuse reovee puhastamiseks seisavad ettevõtted tehnoloogilise valiku ees, milliseid reoveepuhastustehnoloogiaid kasutada ja milline sobiks nende tööstusele kõige paremini. Käesoleva töö eesmärgiks on uurida võimalike tehnoloogilisi lahendusi, mida maailmas kasutatakse ning võrrelda neid Eestis kasutatavate tehnoloogiatega. Piimatööstuste reovesi erineb olmereoveest selle poolest, et selles sisalduvad reostusained on oluliselt kõrgema kontsentratsiooniga ja reovees esineb omapäraseid aineid nagu piimarasv ning vadak. Nende ainete tõttu vajab piimatööstuste reovesi olmereoveest erinevat puhastamise tehnoloogiat.

Piimatööstuse reovee koostist ja kogust mõjutab tehase toodangu sortiment ning kasutatavad tehnoloogiad. Teades reovee koostist on võimalik valida erinevate reovee puhastamise tehnoloogiate vahel. Töö annab ülevaate piimatööstuste reovete puhastamise võimalikest maailmas kasutatavatest tehnoloogiatest. Tehnoloogiad on esitatud töös jaotatud osades, milleks on füüsikalisk-keemilised ja anaeroobsel ning aeroobsel protsessil põhinevad töötlemisviisid.

Töös on kirjeldatud mõningad Eestis kasutatavad tehnoloogiad ja toodud näiteks kasutusel olevaid piimatööstuste reovee puhastamise võimalusi. Käsitletud on piimatööstuste reovete puhastamisel sagedamini esinevaid raskuseid ja eripäraseid ning on välja toodud mõningad soovitud piimatööstuste reovee puhastamiseks.

Võtmesõnad: piimatööstuse reovesi, füüsikalisk-keemiline töötlus, aeroobne töötlus, anaeroobne töötlus.

Key words: dairy wastewaters, physico-chemical treatment, aerobic treatment, anaerobic treatment.

# 1. PIIMATÖÖSTUS

Piima tootmine on Eestis olnud sajandite pikkuse traditsiooniga ja piimandus on Eesti põllumajanduse üheks alustalaks. Eesti piimaliidu tunnuslauseks on: „Piim on Eesti valge kuld“. Piim on meie toidulaua üks tähtsamaid ning kasulikumaid tooteid, sest see on väga toiteaine rikkas. Piima kasutatakse nii vastsündinute, kui ka loomade toitmiseks ning tänapäeval toodetakse sellest väga palju erinevaid tooteid. Samuti kasutatakse piima laialdaselt ka erinevate toodete valmistamiseks nagu näiteks pagaritooted.

Piimatööstuses toodetakse toorpiimast järgmiseid tooteid:

- tarbijapiim;
- või, koor, hapukoor;
- juust, kohupiim;
- jogurt, erinevad desserdid;
- kondenspiim;
- kuivatatud piim (piimapulber), jäätis.

Nimetatud toodete valmistamisel kasutatakse selliseid protsesse nagu jahutamine, pastöriseerimine ja homogeniseerimine. Tüüpilised kõrvalsaadused on petipiim, vadak ja nende derivaadid. [1]

Eestis käsitletakse piimatööstusena üldstatult piimatöötlemise sektori ettevõtteid, kelle põhitegevusala EMTAK 2008 (Eesti Majanduse Tegevusalade Klassifikaator) kood C105 kohaselt on:

- värsket piima töötlemine, rõõsa koore tootmine, siia ei kuulu lehmatoorpiima, lamba, kitse jne toorpiima tootmine;
- juustu, sh vadakujuustu ja kohupiima tootmine (riivitud juust, sulatatud juust, sinihallitusjuust jm juustud);
- muude piimatoodete tootmine:
  - piimapõhiste jookide tootmine;
  - kuiv või kontsentreeritud piima tootmine;
  - tahket piima või koore tootmine;
  - või ja muude piimarasvade ning piimarasvavõiete tootmine;
  - jogurti tootmine;



- fermenteeritud või hapendatud piima ja koore tootmine;
- kaseiini ja laktoosi tootmine;
- jäätise jm söödava jää tootmine (nt sorbett), siia ei kuulu toidujää tootmine. [2]

Piimatootmine on Eestis üks kasumlikumatest tööstusharudest, kuna antud toodetele on alati nõudlust. Sellest lähtuvalt on piimandus orienteeritud turu nõudlusele vastavate kõrge lisandväärtusega piimatoodete tootmisele (sh kasvaval määral mahetooded) ning ekspordile, mis muudab Eesti piimatootmise jätkusuutlikuks ning konkurentsivõimeliseks (Piimanduse strateegia 2012-2020).

Kaasaegsed piimatootmise ettevõtted ja tehased teostavad komplektset toorainete töötlemist ning toodavad laia tootevalikut. Need on varustatud mehhaniseeritud ja automatiseeritud liinidega, mis võimaldab toodete villimist nii pudelitesse, pakenditesse, konteineritesse, pastörisaatoritesse, jahutitesse, separaatoritesse, aurustitesse, juustutootjatesse kui ka pakendamismasinatesse. Piimatööstusele on iseloomulik toorpiima järjestikune ümberkujundamine pastöriseeritud ja hapupiimaks, jogurtiks, kõva-, pehme- ja kodujuustuks, kooreks ja või -toodeteks, jäätiseks, piimaks ja vadakupulbriteks, laktoosiks, kondenspiimaks, samuti mitmesugusteks dessertideks. [3]

## 1.1 Piima tootmine ja tarbimine

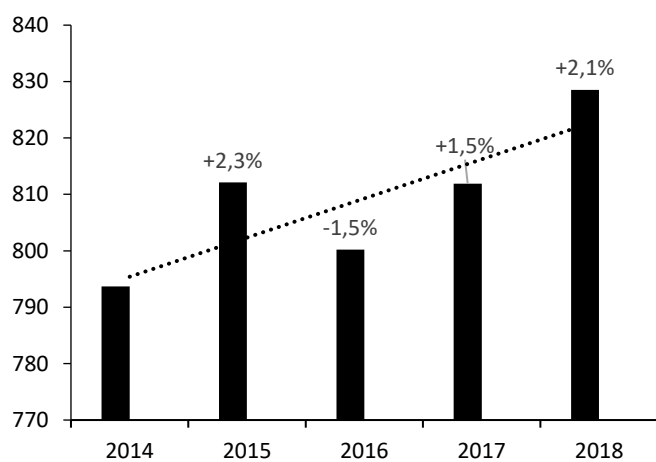
2018 aastal toodeti maailmas hinnanguliselt 829 miljonit tonni piima. Prognoositakse, et suurem osa piima tootmisest maailmas koondub Aiasse kus suurtootjateks on India, Hiina, Türgi ja Pakistan. Alates 2017 aastast on Indiast saanud maailma piima tipptootja, teisel kohal on Euroopa Liit. Prognoositakse, et India piima toodang peaks suurenema ligi 173 miljoni tonnini, kinnitades riiki kui maailma tipptootjat. [4] Maailmas tarbitakse keskmiselt 108,6 kg piima inimese kohta (tabel 1). Maailma piima tootmise kogus on tõusutrendis.

Maailma piimatootmise ülevaadet andev raport „Overview of the Agricultural Outlook 2017-2026“ kirjeldab, et maailma piimaturul kasvab nõudlus või ja teiste piimatoodete järele. Nõudluse kasv tuleb peamiselt arengumaade keskklassi sissetuleku suurenemisest. Inimeste ostujõud kasvab ja prognoositakse piima ja piimatoodete tarbimise suurenemist.

Tabel 1. Maailma piima toodang ja tarbimine. [4]

|                                   | 2014<br>tegelik | 2015<br>tegelik | 2016<br>tegelik | 2017<br>tegelik | 2018<br>prognoos |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Piima kogutoodang milj. tonni     | 793,7           | 812,1           | 800,2           | 811,9           | 828,5            |
| Piima tarbimine ühe inimese kohta | 109,2           | 110,5           | 107,2           | 107,5           | 108,5            |

Kasvava nõudluse rahuldamiseks eeldatakse, et 2026. aastaks suureneb piimatoodang maailmas 178 mln tonni ehk 22% võrra. [2] Piimaturu nõudlus suureneb ka maailma kasvava populatsiooni tõttu. Joonisel 1 on näha, et alates 2014 aastast on piima tootmine on kasvanud. 2018 ja 2017 aastate vahemiku kasv on olnud 2,1%.



Joonis 1. Maailma piima toodangu kasv 2014-2018, miljon tonni (autori koostatud tabel 1 põhjal).

Eestis on keskmine piima tarbimine 108,3 kg piima inimese kohta (tabel 2), mis on väga sarnane maailma keskmise tarbimisega 108,6 kg (tabel 1).

Tabel 2. Eestis piima tarbimine inimese kohta, kg.

|           | 2014  | 2015  | 2016  | 2017  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| Joogipiim | 117,2 | 108,5 | 103,9 | 103,7 |

Allikas: Statistikaameti andmebaas, andmed võetud 21.märts 2019.

## 1.2 Piimatoodete tootmine ja tarbimine

Kuna maailma piima nõudmine ja tootmine on tõusutrendis, siis on seda ka piimatoodete tootmine. Eestis toodetakse samuti aina rohkem piimatootmeid, millest osa läheb välisurule. 2017. aastal eksporditi piimatootmeid käibelt varasemast 31% rohkem ja toorpiima väljavedu suurenes 21%. [2]

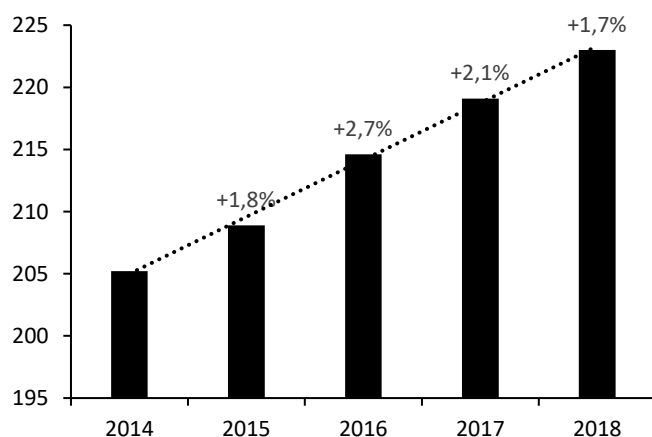
Oodatakse ka uusi välisurgude avanemist ja ekspordi suurenemist. Statistikaameti andmebaasi andmetel toodeti Eestis 2017 aastal 790 600 tonni piima.

Piimatoodete toodangu koguste ülevaadet annab tabel 3. 2014-2018 aastate vahemikus on piimatoodete toodang kasvanud kokku 17 800 tonni, mis teeb 8,4%.

Tabel 3. Eestis piimatoodete toodang grupiti 2014-2018, tuhat tonni.

|                                    | 2014  | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Joogipiim                          | 90,7  | 95,5  | 99,2  | 100,2 | 104,7 |
| Koor                               | 26,7  | 23,6  | 25,7  | 27,3  | 29    |
| Hapendatud piim                    | 37,3  | 38,1  | 39,5  | 40    | 39,7  |
| Lõssipulber                        | 5,5   | 3,5   | 1,7   | 2,9   | ..    |
| Või ja muud piimarasvatooted       | 4,5   | 5,1   | 5,2   | 4,3   | 4,8   |
| Juust, k.a kohupiim (värske juust) | 40,5  | 43,1  | 43,3  | 44,4  | 44,8  |
| Piimatoodete toodang kokku         | 205,2 | 208,9 | 214,6 | 219,1 | 223   |

Allikas: Statistikaameti andmebaas, andmed võetud 21.märts 2019.



Joonis 2. Piimatoodete toodangu kasv 2014-2018, tuhat tonni (autori koostatud tabel 2 põhjal).

2017 aastal toodeti 219 1000 tonni piimatooteid ja 2018 aastal Eestis 223 000 tonni piimatooteid, mis on 1,7% rohkem kui 2017 aastal (joonis 2). Kokku tarbiti piimatooteid 2017 aastal 183 100 tonni ehk 138,5 kg ühe inimese kohta (tabel 4).

Tabel 4. Eestis piimatoodete tarbimine kokku, tuhat tonni.

|                                    | 2014  | 2015  | 2016  | 2017  |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Joogipiim                          | 154   | 142,7 | 136,7 | 136,6 |
| Koor                               | 5,7   | 7,4   | 7,9   | 8,1   |
| Lõssipulber                        | 1,8   | 1,1   | 2,2   | 1,7   |
| Või ja muud piimarasvatooted       | 2,8   | 4,7   | 4,8   | 4,4   |
| Juust, k.a kohupiim (värske juust) | 28,5  | 34,8  | 31,4  | 32,3  |
| Piimatoodete toodang kokku         | 192,8 | 190,7 | 183   | 183,1 |

Allikas: Statistikaameti andmebaas, andmed võetud 21.märts 2019.

### 1.3 Eesti piimatööstused

Piimatöötlemise sektori moodustavad Eestis ligikaudu 25 piimatööstuse ettevõtet ja talu, millest viis suuremat tööstust annavad 70% kogu piimatööstuse müügitulust (ilma Tere AS-i andmeteta).

[2] Eesti suurimad piimatööstused on Valio, Epiim, Tere AS, AS Saaremaa Piimatööstus, OÜ Estover Piimatööstus ja Farmi Piimatööstus. Varutud toorpiimast ostis töötleva tööstuse poolelt PRIA andmetel Valio Eesti AS 24,5%; Piimandusühistu Epiim 12,2%; Tere AS 6,3%; AS Saaremaa Piimatööstus 6,2%; OÜ Estover Piimatööstus 6,1% ja AS Farmi Piimatööstus 3,4%. [2]

Valio Eesti on 1992. aastal asutatud üks suurimaid kohalikke piimatööstuse ettevõtteid, mis toodab ja turustab peamiselt Kesk – ja Lõuna-Eesti farmide piimast valmistatud värskaid piimatooteid ja juustusid. Valio Eesti täiendab oma tootevalikut igal aastal, tootes kokku ligi 300 erineva piima- ja juustutoote. Valio Eesti tooted valmivad kahes Lõuna-Eestis paiknevas tehases – Valio Laeva Meiereis (Valmaotsa küla) ja Valio Võru juustutehases (Võru linn). Mõned tuntud Valio brändid on Alma, Valio Gefilus, Valio PROfeel, Valio Atleet, Valio Royal Gouda, Eesti juust. [5]

Epiim on üks Eesti suuremaid juustu- ja või tootjaid ning eksportijaid. Epiima tootmisüksused on Põltsamaa meierei (Põltsamaa linn) ja Järva-Jaani koorejaam. 2013. aasta suvel käivitas ettevõtte Järva-Jaanis kõige moodsama ja keskkonnasäästlikuma pihustuskuivati, mille abil toodetakse vadaku-, lõssi- ja piimapulbrit, monoliit- ja väikepakendatud võid ning külmutatud koort. Igal aastal toodetakse Järva-Jaanis 8000 tonni piimapulbreid ning lisaks ka 3000 tonni kvaliteetset 82-protsendist Eesti võid. [6]

Tere AS peamiseks tegevusaladeks on toorpiima kokkuost, piimatoodete tootmine ja müük. Mõned tuntud Tere brändid on Emma, Hellus, Merevaik, Kohuke, FIT!. Tere tootmisüksused asuvad Viljandis ja Põlvas. [7]

AS Saaremaa Piimatööstus on piimanduse alal suurte kogemuste ja pikaajaliste traditsioonidega ettevõtte, mis on tegutsenud juba esimese Eesti Vabariigi aegadest alates. Selle aja jooksul on tegutsenud erinevates struktuurilistes vormides ning aastast 1996 oldi koos lihatööstusega Saaremaa Liha- ja Piimaühistu omanduses. Alates 1. aprillist 2007 on AS Saaremaa Piimatööstus eraldiseisev ettevõtte, mille peamiseks tegevuseks on piima kokkuost. Seda väärindavad juustuks ja võiks Eesti ühes kaasaegsemas tööstuses ligi 90 töötajat. Enamjaolt kuuluvad Saaremaal toodetud juustud Edam-Gouda tüüpi poolkõvade juustude hulka. Olulise osa moodustavad ka suitsutatud juustud, mille valmistamisel kasutatakse naturaalselt suitsu. Koore, mis jääb juustu tootmisest üle,

kasutatakse Saaremaa või valmistamiseks. [8] Saaremaa Piimatööstuse tootmisüksus asub Kuressaare linnas.

Farmi Piimatööstus on Maag Piimatööstuse esikaubamärk. Farmi piimatööstus on Eesti kapitalil põhinev piimatööstus ja see on Eesti vanima, Kunda piimatööstuse järglane, mis asutati ligi 160 aastat tagasi. Farmi toodeteks on kodujuustud, jogurtid ka kreeka tüüpi jogurt, jogurtishake, toorjuustud. Farmi Piimatööstuse tootmisüksused asuvad Annikveres ja Jõhvis. [9]

Estover kontserni ettevõtted toodavad juustu, kodujuustu, võid, ricotta-kohupiima, mozzarellat ja sulatatud juustu. Tootmisüksus asub Kaarlijärve külas. [10]

Avatud talude andmebaasis on kokku 27 talu, mis tegelevad piimatootmisega ja/või piimatoodete valmistamisega. Andmebaasi saab vaadata maainfo kodulehel - <https://www.maainfo.ee>.

## 2 PIIMATÖÖSTUSE REOVESI

Tööstusliku reovee kontsentratsioon ja koostis sõltub toodangust, töötlemismeetoditest ja tehase konstruktsioonist.

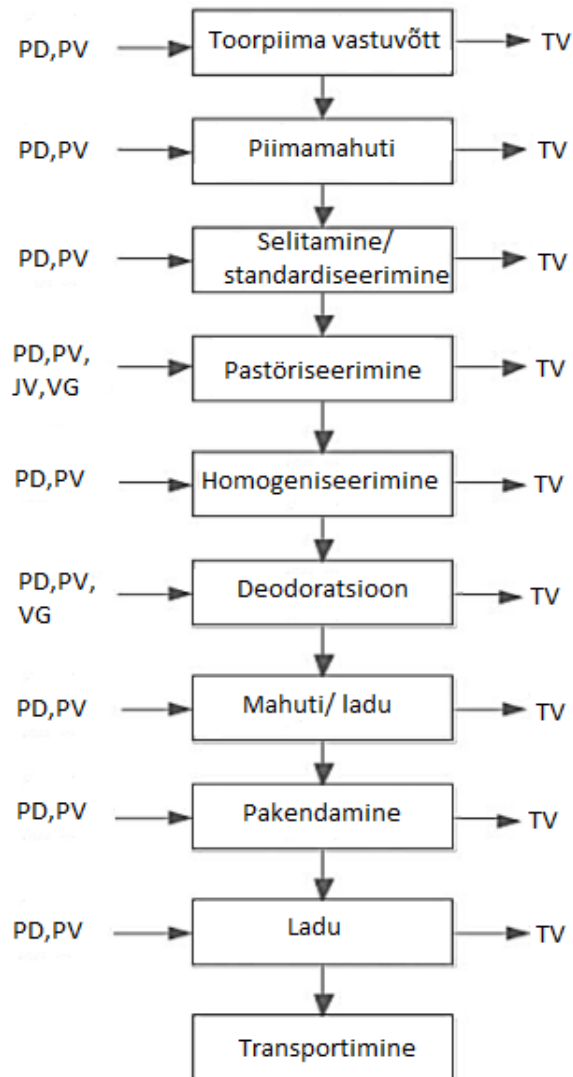
Piimatööstuste reovett võib jaotada kolme kategooriasse:

- jahutusvesi,
- olmereovesi,
- tööstuslik reovesi.

Jahutusvesi ei sisalda tavaliselt saasteaineid ja seda juhitakse sademevee torude võrgustikku. Olmereovesi juhitakse olmereovee puhastusjaama. Tööstuslik reovesi tekib piima ja piimatoodete lekkimisel töötlemisprotsesside käigus ning piimatoodete kokkupuutuvate seadmete puhastamisest. Piimatööstuse reovesi võib sisaldada ka saastunud materjalidest või tootmisprotsessidest tulenevaid patogeene. [11]

Piima vastuvõtmisel kontrollitakse ja mõõdetakse piima kvaliteeti ning koostist. Toorpiim on oma olemuselt emulsioon- segu piima-rasvagloobulitest ning mitmesugustest tahketest ainetest ja veest. Jättes toorpiima seisma tekib pinnale rasvagloobulitest moodustuv rasvakork, millest allapoole jääb nõ rasvavaba piim- sisuliselt lõss. [9] Edasi läheb piim jahutisse ja seejärel see pastöriseeritakse. Pastöriseerimine on piima kuumutamine, mida tehakse selleks, et piim oleks puhas ja säilitaks oma parimaid omadusi.

Homogeniseerimine - on tavaliselt kaheetapiline protsess. Kõigepealt surutakse umbes 60 kraadini kuumutatud piim suure survega läbi sõela, lõhustades rasvaosakesed mehaaniliselt väga väikesteks. Nii väikesed aineosakesed on lihtsamini allutatavad imendumisprotsessile soolestikus. Lõpus kindlustatakse, et emulsioon jääks püsivaks. [9] Erinevate autorite kirjeldatud piimatööstuse reovee tüüpilised allikad on toodud joonisel 3.



Joonis 3. Piimatööstuse reovee allikad. [12]

PD - pesemis- ja desinfitseerimisvahendid; PV – pesuvesi; VG – voog; JV – jahutusvesi; TV – tööstusvesi.

## 2.1 Piimatööstuse reovee koostis

Piimatööstuse reoveed sisaldavad suurtes kogustes piima koostisosi nagu kaseiin ja anorgaanilised soolad ning pesemiseks kasutatavaid puhastus- ja desinfitseerimisvahendeid. Kõik need komponendid põhjustavad reovees kõrgeid BHT ja KHT kontsentratsioone. Piimatööstuse reovesi

on üldiselt valget värvi ja tavaliselt natuke leeliselisene, kuid muutub kiiresti happeliseks piimhappe fermenteerimise tõttu. Hõljuvaine osakaal on märkimisväärne peamiselt juustutootmistel. [12]

Piimatööstuse reoveed sisaldavad suhkruid ja valke, rasvu ning võivad sisaldada ka lisaainete jääke.

Piimatööstuse reovee parameetrid on:

- biokeemiline hapnikutarve (BHT), mille keskmine väärtus on 0,8-2,5 kilogrammi (kg/t) tonni piima kohta töötlemata heitvees;
- keemiline hapnikutarve (KHT), mis on tavaliselt umbes 1,5 korda suurem BHT tasemest;
- hõljuvaine on 100–1 000 milligrammi liitri kohta (mg/l);
- lahustunud tahkete ainete kogus: fosfor (10–100 mg/l) ja lämmastik (umbes 6% BHT tasemest). [1]

Tabel 5. Erinevate piimatööstuste reovete reostusnäitajate kontsentratsioonid.

| Allikas                                  | KHT mg/l         | BHT mg/l           | pH        | Hõljuvaine mg/l   | Allikas |
|--|------------------|--------------------|-----------|---|---------|
| Piima ja piimatoodete tehas              | 10251,2          | 4840,6             | 8,34      | 5802,6  | [13]    |
| Piimatööstuse reovesi                    | 1900 -<br>2700   | 1200 -<br>1800     | 7,2 - 8,8 | 500 - 740   | [14]    |
| Piimatööstuse reovesi                    | 2500 -<br>3000   | 1300 -<br>1600     | 7,2 - 7,5 | 8 000 - 10 000  | [15]    |
| Vadak                                    | 71 526           | 20 000             | 4,1       |   | [16]    |
| Bhandara ühistu<br>piimatööstuse reovesi | 1400 -<br>2500   | 800 -<br>1000      | 7,1 - 8,2 | 1045 - 1800   | [17]    |
| Pressitud vadak                          | 80000 -<br>90000 | 120000 -<br>135000 | 6         |   | [18]    |
| Aavini piimatööstuse<br>pesuvesi         | 2500 -<br>3300   |                    | 6,4 - 7,1 |   | [19]    |
| Piimatööstuse reovesi                    | 2100             | 1040               | 7 - 8     |   | [20]    |
| Piima ja piimatoodete tehas              | 10251,2          | 4840,6             | 8,34      | HA 5802,6<br>N <sub>üld</sub> 663<br>P <sub>üld</sub> 153,6 | [13]    |

Tabelis 5 on näha, et piimatööstuste reovees sisalduvad väga kõrged BHT ja KHT kontsentratsioonid. Reovee KHT kontsentratsioon jääb vahemiku 1400-3300mg/l, kuid võib ulatuda kuni 10 000mg/l. Tavaliselt jääb BHT kontsentratsioon üldiselt vahemiku 1200-4000 mg/l. Kui reovette sattub vadak, koor või täispiim, siis BHT kontsentratsioonid võivad kasvada kuni 20 000mg/l.



Tabel 6. Erinevate piimatööstuste reovete reostusnäitajad. [21]

| Reovee päritolu             | KHT mg/l           | BHT <sub>5</sub> mg/l | pH                | Hõljuvaine mg/l    | N <sub>üld</sub> mg/l | P <sub>üld</sub> mg/l |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| Koore tootmine              | 2000-6000          | 1200-4000             | 8-11              | 350-1000           | 50-60                 |                       |
| Piima ja piimatoodete tehas | 10251,2            | 4840,6                | 8,34              | 5802,6             | 663                   | 153,6                 |
| Sega piimatööstus           | 1150-9200          |                       | 6-11              | 320-970            | 14-272                | 8-68                  |
| Juustu vadak                | 68814 <sup>1</sup> |                       |                   |                    | 1462 <sup>1</sup>     | 379 <sup>1</sup>      |
| Juust                       | 1000-7500          | 588-5000              | 5,5 – 9,5         | 500-2500           |                       |                       |
| Toorpiim                    | 4656 <sup>1</sup>  |                       | 6,92 <sup>1</sup> |                    |                       |                       |
| Juust                       | 5340 <sup>1</sup>  |                       | 5,22 <sup>1</sup> |                    |                       |                       |
| Piimapulber/ või            | 1908 <sup>1</sup>  |                       |                   |                    |                       |                       |
| Sega piimatööstus           | 63100 <sup>1</sup> |                       | 3,35 <sup>1</sup> | 12500 <sup>1</sup> |                       |                       |
| Juustu vadak                | 61000 <sup>1</sup> |                       |                   | 1780 <sup>1</sup>  | 980 <sup>1</sup>      | 510 <sup>1</sup>      |
| Juust                       |                    |                       | 4,7 <sup>1</sup>  | 2500 <sup>1</sup>  | 830 <sup>1</sup>      | 280 <sup>1</sup>      |

<sup>1</sup>Keskmine väärtus

Ülal toodud tabelites 5 ja 6 on näha, et piimatööstuste reovete pH kõigub väga suures vahemikus 3.35 - 11. Seda võib otseselt seostada erinevate kasutatavate pesuainetega. Leeliseliseid pesuaineid kasutatakse tavaliselt lipiidide seebistamiseks ja valguliste ainete tõhusaks eemaldamiseks, nende ainete pH on tavaliselt 10–14. Samal ajal happelised desinfitseerivad vahendid ja happelised puhastusvahendid, mida kasutatakse mineraalsete sadestuste eemaldamiseks on pH-tasemega 1,5–6,0. [22]

Koore, või, juustu ja vadakutootmine on peamised kõrge BHT allikad reovees. Konkreetsete piimakomponentide jäätmekoormuse ekvivalendid on:

- 1 kg piimarasva = 3 kg KHT;
- 1 kg laktoosi = 1,13 kg KHT;
- 1 kg valku = 1,36 kg KHT. [11]

Erinevate piimatoodete ja derivaatide reostusnäitajad on toodud tabelis 7.

Tabel 7. Erinevate piimatoodete ja derivaatide reostusnäitajad. [11]

| Toode                  | Rasvasisaldus | BHT <sub>5</sub> mg/l | BHT <sub>7</sub> mg/l |
|------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|
| Koor                   | 40%           | 400 000               | 450 000               |
| Täispiim               | 4%            | 120 000               | 135 000               |
| Rasvata piim           | 0,05%         | 70 000                | 80 000                |
| Vadak                  | 0,05%         | 40 000                | 45 000                |
| Kontsentreeritud vadak | 60%           | 400 000               | 450 000               |

## 2.2 Reovetele sätestatud normid

Piimatööstuste reoveed sisaldavad suurtes kogustes bioloogiliselt lagunevaid aineid, mis väljenduvad kõrgetes BHT kontsentratsioonides. Sellise koostisega reovesi ei sobi otse kanalisatsiooni või loodusesse juhtimiseks ja vajab puhastamist. Piimatööstusel on tööstusliku reovee käitlemiseks kaks võimalust:

- rajada kohalik puhasti,
- suunata reovesi ühiskanalisatsiooni.

Esimese variandi puhul peab ettevõtte taotlema veeerikasutusluba heitvee suublasse juhtimiseks ja heitvesi peab vastama vee erikasutusloas kehtestatud normidele. Eestis loodusesse juhtivale heitveele normid üldiselt sõltuvad puhasti suuruselt, mida väljendatakse IE-des. IE-de järgi määratakse vee erikasutusloasse normid ja puhastatud vesi peab nendele vastama. Normid on kehtestatud Vabariigi Valitsuse määruse „Reovee puhastamise ning heit- ja sademevee suublasse juhtimise kohta esitatavad nõuded, heit- ja sademevee reostusnäitajate piirmäärad ning nende nõuete täitmise kontrollimise meetmed” lisa 1 kohaselt. Normid on toodud tabelis 8.

Tabel 8. Heitvee reostusnäitajate piirväärtused ja reovee puhastusastmed. [23]

| Reostusnäitaja   | Reoveekogumisala reostuskoormus  |             |              |                  |                    |
|------------------|----------------------------------|-------------|--------------|------------------|--------------------|
|                  | Alla 300 ie                      | 300-1999 ie | 2000-9999 ie | 10 000-99 999 ie | 100 000 ja enam ie |
|                  | Reostusnäitaja piirväärtus, mg/l |             |              |                  |                    |
| BHT <sub>7</sub> | 40                               | 25          | 15           | 15               | 15                 |
| KHT              | 150                              | 125         | 125          | 125              | 125                |
| P <sub>üld</sub> | Ei kohaldata                     | 2           | 1            | 0,5              | 0,5                |
| N <sub>üld</sub> | Ei kohaldata                     | 60          | 45           | 15               | 10                 |
| Hõljuvaine       | 35                               | 35          | 25           | 15               | 15                 |

Piimatööstuse reovete juhtimisel ühiskanalisatsiooni peavad need vastama ühiskanalisatsiooni lubatud piirkontsentratsioonidele. Tabelites 9 ja 10 on toodud näitena kahe reoveepuhasti ühiskanalisatsiooni vastuvõtava reovee normid. Põlva reoveepuhasti võtab vastu Tere piimakombinaadi eelpuhastatud reovett ja Põltsamaa reoveepuhastile jõuab eelpuhastatud juustutööstuse Epiima reovesi.

Tabel 9. Põlva vee ühiskanaliseerimise juhitava reovee reostusnäitajate piirväärtused. [24]

| Reostusnäitaja   | Mõõtühik | I grupp        | II grupp                      | Lubatud piirkontsentratsioon |
|------------------|----------|----------------|-------------------------------|------------------------------|
| BHT <sub>7</sub> | mg/l     | kuni 850       | 851 – 1399                    | 1400                         |
| Hõljuvaine       | mg/l     | kuni 400       | 401 – 799                     | 800                          |
| P <sub>üld</sub> | mg/l     | kuni 15,0      | 15,1 – 19,9                   | 20                           |
| N <sub>üld</sub> | mg/l     | kuni 74,0      | 74,1 – 99,9                   | 100                          |
| KHT              | mg/l     | kuni 1500      | 1501 – 2499                   | 2500                         |
| pH               |          | 6,00 kuni 9,00 | 5,5 – 5,99 või<br>9,01 – 9,50 | alla 5,49 või üle 9,51       |
| Rasvad           | mg/l     | kuni 60        | 61 – 79                       | 80                           |
| Naftasaadused    | mg/l     | kuni 0,60      | 0,61-0,99                     | 1,0                          |

Tabel 10. Põltsamaa linna ühiskanaliseerimise juhitava reovee reostusnäitajate piirväärtused. [25]

| Reostusnäitaja   | Mõõtühik | I grupp        | II grupp                    | Lubatud piirkontsentratsioon |
|------------------|----------|----------------|-----------------------------|------------------------------|
| BHT <sub>7</sub> | mg/l     | kuni 999       | 999 – 1499                  | 1500                         |
| Hõljuvaine       | mg/l     | kuni 619       | 619 – 999                   | 1000                         |
| P <sub>üld</sub> | mg/l     | kuni 19,0      | 19,1 – 29,9                 | 30                           |
| N <sub>üld</sub> | mg/l     | kuni 99,0      | 99,0 – 149,0                | 150                          |
| pH               |          | 6,00 kuni 9,00 | 5,0 – 5,9 või<br>9,1 – 10,0 | alla 5,0 või üle 10,0        |
| Rasvad           | mg/l     | kuni 50        | 50 – 160                    | 160                          |

Piirkontsentratsioonid on määratud konkreetsete reoveekogumisalade puhastite võimsuste järgi ja sellepärast võivad need erineda. Mõlema piimatööstuse reovett vastuvõtva puhasti korral on piiratud BHT<sub>7</sub> 1400 ja 1500 mg/l. Ülevalpool toodud tabelite põhjal on näha, et piimatööstuste reovee BHT on piirmäärast oluliselt kõrgem, seega reovett tuleb kindlasti enne ühiskanaliseerimise suunamist eelpuhastada.

### 3 PIIMATÖÖSTUSTE REOVETE PUHASTAMINE

Piimatööstuse reovee puhastamise võimalused sõltuvad sellest kas reovesi suunatakse ühiskanalisatsiooni või soovitakse vett puhastada ise. Kui reovesi suundub ühiskanalisatsiooni, siis tuleb reoveest eemaldada rasv, tasakaalustada pH ja vähendada hõljuvaine sisaldust. Tavaliselt hõlmab piimatööstuste reovete puhastamine mehaanilisi, füüsikalisi-keemilisi ja bioloogilisi meetodeid. [3]

Mehaaniline puhastus eemaldab reoveest lahustumatuid osakesi nagu ujupraht, liiv ja hõljuvaine. Põhilised seadmed mehaaniliseks puhastuseks on sõelad, võred, liiva- ja rasvapüünised ja eelsetitid. Kuna piimatööstuse reovetes ei sisaldu palju tahkeid osakesi, siis tavapärased mehaanilised puhastusprotsessid ei taga vajaliku tulemust. [3]

Tootmisüksuste tootmisprotsessid võivad olla väga ebaühtlased ja tootmisvee hulk võib ööpäevas oluliselt muutuda. Samuti muutub oluliselt pH ja reostuskoormuse näitajad. Optimaalne pH bioloogilise puhastuse jaoks on vahemikus 6,5-8,5. pH väärtustel alla 6,5 ja üle 10 on kahjulik mõju bioloogilise puhastuse mikroobikogukonnale ja suureneb torude korrosiooni tekkimise oht. Seetõttu on pH ühtlustamine vajalik reovee juhtimisel nii oma puhastile kui kanalisatsiooni. pH korrigeerimiseks kõige sagedamini kasutatavad kemikaalid on  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ,  $NaOH$ ,  $CO_2$  või lubi. [22]

Kui piimatööstuse reoveed on ebaühtlase vooluhulgaga, temperatuuriga, pH-ga või reostusnäitajate koormusega, siis tuleb need reoveed ühtlustada. Reostusnäitajate ja pH ühtlustamiseks on soovitatav kasutada mahutit, mille suurus oleks vähemalt 12-24 tunni tootmisvee kogus. [26] Korralik ühtlustusmahuti tagab stabiilsema edasise füüsikalist ja keemilist puhastust ning võimaldab kasutada vähem reagente.

Kirjanduses soovitakse luua lisamahuti avariiliste väljavoolude jaoks nagu näiteks on seda vadak, koor, toorpiim. Mahuti tuleb luua nii, et eriti kõrge reostuskoormusega komponendid saab juhtida eraldi mahutisse, kust saab neid hiljem ühtlaselt doseerida ühtlustusmahutisse. Nii saab tagada stabiilsemat ja ühtlasemat reostuskoormust edasisele puhastusprotsessile.

### 3.1 Piimatööstuste reovete puhastamise vajalikus

Piimatööstus on üks maailma peamisi ja kõige saastavamaid tööstusharusid. Piimatööstuse reoveed sisaldavad väga kõrgetes kontsentratsioonides reoained. Piima 1 liitri töötlemisel tekib umbes 0,2–10 liitrit tööstuse reovett. [27] Keskmiselt tekib 2,5 liitrit reovett piima 1 liitri töötlemisel. [28]

Paljudes riikides on piima tootmise ja piimatoodete tööstuste reovesi üks allikatest mis tekitab olulist reostust looduslikule veekeskkonnale. Paljud uuringud on läbiviidud, et vähendada piimatööstuste reovee kahjulikku mõju. [29]

Kui reoveed juhitakse puhastamata kujul loodusesse võib see põhjustada kalakasvule kahjulikku mõju ja kahjustada kasulikele mikroorganismidele ja taimi. Mis omakorda viib veekogude eutrofeerumiseni ja ebahügieenini. Eestis on tööstuste reoveed kontrollitavad keskkonnaameti poolt. Ettevõtetel peab olema kehtiv vee erikasutusluba ja heitvesi peab vastama vee erikasutusloas kehtestatud normidele.

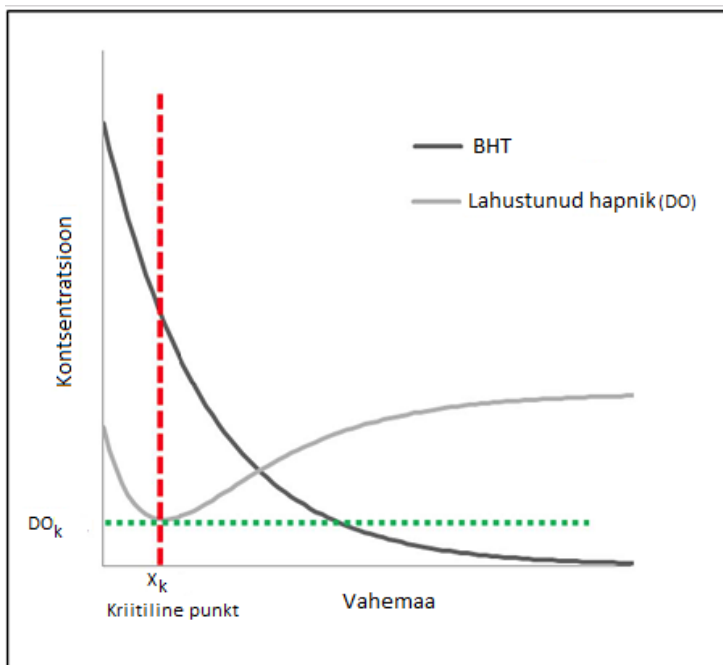
#### 3.1.1 Mõju keskkonnale

Piimatööstuse reovees sisalduvate keskkonnale kahjulike orgaanilisi komponente võib liigitada valkudeks, laktoosiks ja rasvaks. Nende mõju keskkonnale on erinev, sõltuvalt nende biolagundatavusest ja lahustuvusest.

Üks oluline näitaja looduslikus veekogus, mida mõjutab reostus on lahustunud hapniku sisaldus vees. Hapniku sisaldus vees on väga oluline seal elavatele kaladele ja teistele veeorganismidele, sest need hingavad vees lahustunud gaasilise hapniku molekulid. Lahustunud hapnik satub vette atmosfäärist, taimede fotosünteesist ja lisajõgede või heitvee voogudest. Atmosfäärist satub hapnik veepinna kaudu vee liikumise ajal. Mida intensiivsem on veepinna liikumine, seda suurem on vees lahustunud hapniku hulk. Hapniku kontsentratsioon vees sõltub nii hapniku mikroorganismide tarbimisest kui ka atmosfäärist taastumise kiirusest. Kui lahustunud hapniku kontsentratsioon on madal, siis ei ole veeloomadel midagi hingata ja nad surevad.

Joonisel 4 on toodud BHT mõju lahustunud hapniku sisaldusele jões Streeter–Phelps mudeli näol. Mudel kirjeldab lahustunud hapniku (DO) ja biokeemilise hapnikutarbimise (BHT) lagunemise sõltuvust jões või voolus. Reostuse sattumisel vette, toimub lahustunud hapniku kontsentratsiooni

kiire langus, kuni saavutatakse kriitiline punkt. Selles kriitilises punktis toimub tavaliselt ka veeorganismide suremine. Kui kriitiline punkt on ületatud, toimub jões reaeratsioon ja BHT lagunemine ning lahustunud hapniku kontsentratsioon aeglaselt kasvab.



Joonis 4. Streeter–Phelps mudel - BHT mõju lahustunud hapniku sisaldusele. [30]

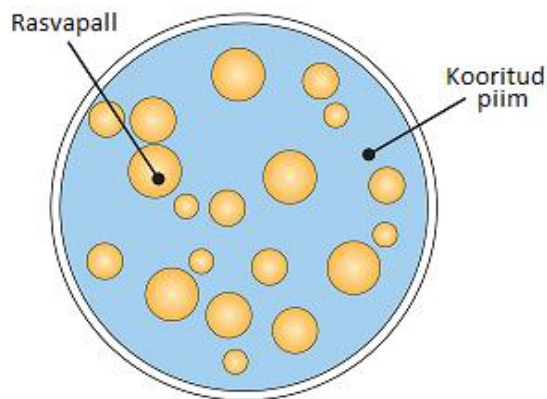
Lahustunud hapniku sisalduse vees mõjutab ka vee temperatuur - soe vesi seob vähem hapnikku kui külm. See tõttu võib olla reostuse mõju soojal perioodil väga kriitiline kalade ja zooplanktoni jaoks. Jõgede hapnikusisalduse tavaline alampiir on umbes 6 mg/l, mis lähtub tundlike kalaliikide (tavaliselt forelli ja lõhe) suutlikusel elada. [12]

### 3.2 Füüsikalise-keemiline töötlemine

Tavalised reovee puhastusseadmed on võimelised piimatööstuste reovees sisalduvat orgaanilisest ainet lagundada ja tulla toime ka reostuskoormuse piikidega. Kuid üks orgaanilise aine, nimelt rasv, on puhastusseadmetele suureks väljakutseks. Rasval on eriti kõrge BHT näitaja ja see kleepub torude seintele ning põhjustab ummistusi, samuti kerkib see pinnale ning takistab setitite tööd.

Füüsikalis-keemiline töötlemine lagundab ja vähendab piimarasva ning võimaldab hõljuvainete, kolloidsete ja lahustunud ainete eemaldamist. Probleemid rasvaga tekkivad täispiima tootmisel, piima ja vadakude eraldamisel, juustu ja või tootmisel, samuti piimapudelite villimisel. [3]

Piimatööstuse reovee rasvasisaldus sõltub peamiselt toodetavate toodete valikust ja tootmistehnoloogiast. Täispiima tootmisel tekkinud reovesi sisaldab rasva samas vormis kui looduslik piim, sest piimalekked on sellise tootmise peamine reovee saastamise allikas. Piimarasvad kujutavad endast väga väikeseid palle, mida ümbritseb membraan (joonis 5). Membraan koosneb fosfolipiididest, lipoproteiinidest, valkudest, nukleiinhapetest, ensüümidest, mikroelementidest (metallid) ja seotud veest. Piimarasvade läbimõõdud on vahemikus 0,1 kuni 20  $\mu\text{m}$ . Keskmine suurus on 3 - 4  $\mu\text{m}$  ja ühes piima milliliitris sisaldub neid umbes  $10^{10}$ . [11]



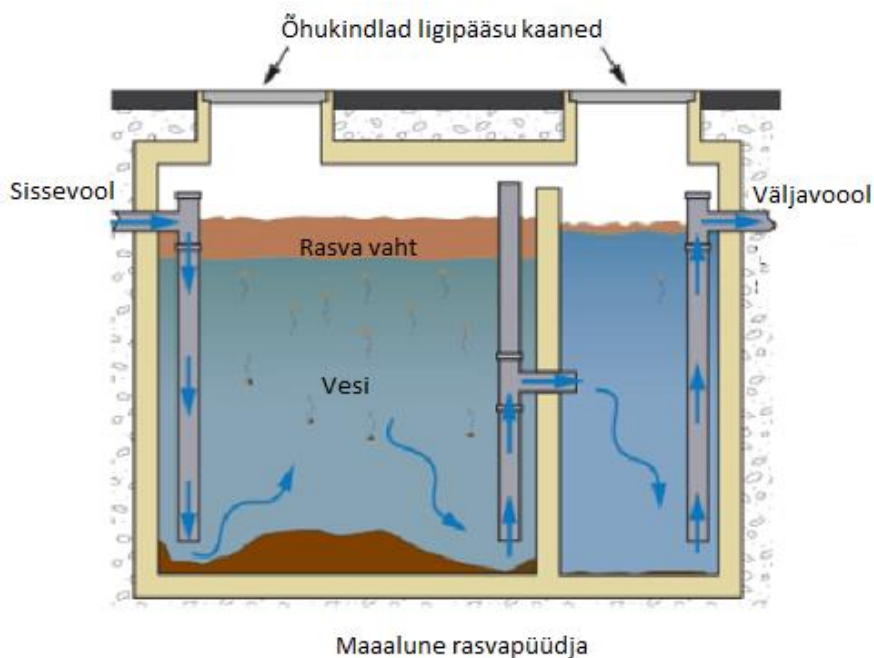
Joonis 5. Piimarasvad kooritud piimas. [11]

Kõrge rasvasisaldusega toodete valmistamisel nagu koor, hapukoor ja või eraldatakse piimast suuremad rasvapallid. Need kleepuvad omavahel kokku ja membraan puruneb ning moodustuvad suuremad tükid. Piimarasvad kerkivad pinnale väga aeglaselt või üldse mitte ja see tõttu on vaja rasva sisaldusega reoveed töödelda keemiliselt.

Füüsikalis-keemiliseks töötlemiseks kasutatakse järgmiseid meetodeid: koagulatsioon, flokulatsioon, adsorptsioon ja membraanprotsess. Üldjuhul on koagulatsioon ja flokulatsioon tööstusreovee esmane puhastuse protsess.

### 3.2.1 Gravitatsiooniline rasvapüüdja

Üheks võimaluseks rasvaeemalduseks on gravitatsiooniline rasvapüüdja. Mõnel juhul piimatööstuse reovete puhastamisel kasutatakse gravitatsioonilist rasvapüüdjat. [22]



Joonis 6. Rasvapüüdja põhimõtteline skeem. [31]

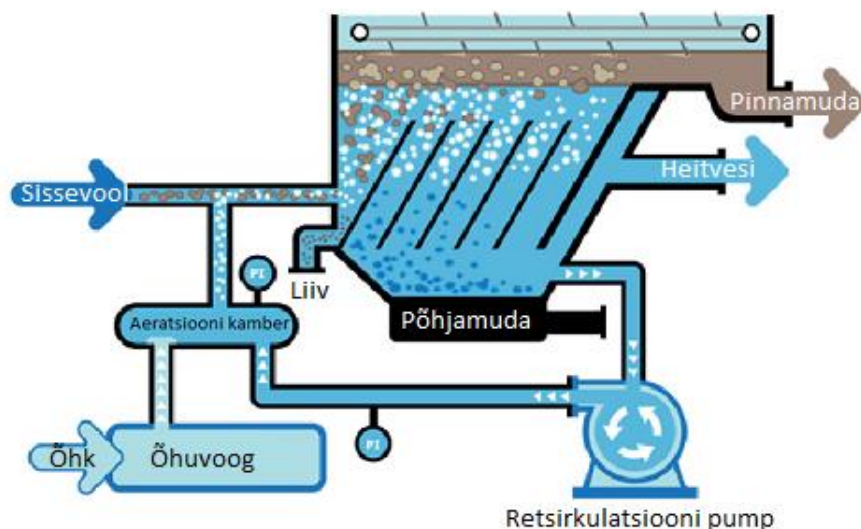
Reovesi juhitakse mahutisse, kus on projekteeritud rasvale lõks (joonis 6). Rasv tõuseb pinnale ja reovesi voolab altpoolt järgmisesse mahutisse, kus toimub veel kord sama protsess. Pinnale kerkinud rasv eemaldatakse paakautoga ligipääsu kaante kaudu. On olemas automaatseid rasvapüüdjaid, kus rasva eemaldus toimub automaatselt spetsiaalsete pinnalt koorivate seadmete abil. Osad rasvapüüdjad hoiavad ka teatud temperatuuri, et ei toimuks rasva tahkumist seadmes, selle jahtumisel. Automaatsed rasvapüüdjad on efektiivsemad, kui tavalised.

### 3.2.2 Lahustunud õhu flotatsiooniseade

Gravitatsioonilisest rasvapüüdjast palju efektiivsem seade rasva eraldamiseks on flotatsiooniseade. Flotatsiooniseadmes rasva eemaldamiseks kasutatakse aereerimist. Meetod põhineb lahustunud õhu flotatsiooni meetodil, mille puhul suunatakse rõhu all 400-600 kPa vette peenmulli. Õhumullid ühilduvad rasvaga ja kiiresti kerkivad pinnale. Pinnalt eemaldatakse rasva mehhaaniliselt või käsitsi.



Flotatsiooniseadmeid paigaldatakse vahetult piimatööstuse kõrvale, kus reoveed läbivad seda pideva voona. [11]



Joonis 7. Lahustunud õhu flotatsiooni seade (DAF). [32]

Reovesi juhitakse DAF seadmesse (joonis 7) ja segatakse kokku retsirkuleeriva vooga, mis on õhuga küllastunud. Segunemise ajal turbulentses keskkonnas kinnituvad mikroskoopilised mullid tahkete osakeste külge, andes neile piisava ujuvuse DAF mahuti pinnale. Tahked ained kogunevad DAF ülemisse ujuvasse kihti, kus kaabitsa abil lükatakse see kiht õrnalt reoveesette kogumismahutisse. Veest raskemad tahked ained kogunevad põhja. Osa puhastatud reoveest suunatakse retsükklisse, kus seda uuesti aereeritakse ja segatakse sisenevale voole juurde. Rasvainerest puhastatud reovesi voolab välja keskmisest kihist. Lahustunud õhu flotatsioon koosmõjus koagulantide ja flokulantidega annab oluliselt parema tulemuse.

### 3.2.3 Keemiline sadestamine ja koagulatsiooni-flokulatsiooni protsessid

Keemiline sadestamine eemaldab peamiselt kolloidid, lahustunud ja suspendeeritud ained piima tööstuse reoveest. Tavaliselt hõlmab keemiline sadestamine reaktiivi oksüdatsiooni ja ained eraldatakse settimise teel. Kemikaale nagu rauda või alumiiniumsoolad lisatakse primaarsetesse settimisrajatistesse. [29] Keemilise sadestamisega on võimalik siduda fosforit ja raskmetalle.

Mõned füüsikalise-keemilised protsessid nagu keemiline sadestumine, kolloidide agregatsioon ja koagulatsioon-flokulatsiooniprotsessid on omavahel koosmõjus. [29] Tihti seadmetes sadestumine, koagulatsioon ja flokulatsioon toimuvad samaaegselt. Koagulatsiooni-flokulatsiooni protsessi käigus moodustatakse suuremad flokid, mis on raskemad ja sadestuvad kergemini. Tänapäeval on võimalik koagulatsiooni-flokulatsiooniprotsessi abil sadestada fosforit ja raskmetalle. Koagulatsioon on protsessi esimene samm ja seda kasutatakse süsteemi stabiliseerimiseks kemikaalide abil näiteks raua või alumiinium soolade nagu  $Al_2-(SO_4)_3$ ,  $FeCl_3$ ,  $FeSO_4$  [3] abil. Teine samm protsessis on flokulatsioon, mille abil destabiliseeritud osakesed tulevad kokku ja moodustuvad suuremad flokid. Neid saab kergesti eraldada gravitatsioonilise settimise teel. Näiteks juustutööstuse reovee reaktsioonis  $FeSO_4/H_2O_2$ -ga saavutatakse kuni 80% rasva eemaldamist (algkontsentratsioon 1,931 mg/l). [3]

Keemilise sadestamise ja koagulatsiooni-flokulatsiooni protsessid on väga efektiivsed, kuid on suhteliselt kallid kasutatavate kemikaalide kulukuse pärast ja vajavad oskusliku personali. Samuti hapendavad need protsessid reovett ja tuleb tegeleda eraldi pH reguleerimisega lisades leeliselisi kemikaale. Flotatsiooniseadme väljuv voog on väga madala fosfori sisaldusega. Olukorras kus järgmise etapina on kasutusel bioloogilise puhastuse aktiivmuda protsess on vaja lisada reovette fosforit näiteks fosforhappe näol. pH ja fosfori reguleerimiseks kasutatavad kemikaalid tõstavad samuti kemikaalide kulu. Protsessi puhastusefektiivsus sõltub kasutatud kemikaalidest, reovee koostisest ja viibeajast.

### 3.2.4 Adsorptsioon

Viimastel aastatel on palju uuritud adsorptsiooni protsesse piimatööstuse reovete puhastamiseks. Esineb palju erinevaid adsorbentite liike sealhulgas aktiivsüsi, sünteetiline polümeer ja ränidioksiidil põhinevad adsorbendid. Kõige laiemalt levinud on aktiivsüsi, kuna see on kuluefektiivne ja võimeline adsorbeerida laia valikut orgaanilisi ühendeid. [29]

Samuti on läbi viidud uuringuid, kus kasutati mõningaid odavaid adsorbente koos pulbrilise aktiivsõega (PAC) piimajäätmete töötlemiseks. Leiti, et PAC vähendas lahustunud tahkeid aineid (TDS) paremini võrreldes teiste adsorbentidega, nagu saepuru, kookospähkli ja riisi tolm. [39] Adsorbendideks piimatööstuse reovete töötlemiseks on katsetatud ka odavamaid adsorbente nagu kivisõe tuhk, riisi kest ja maitseained.

Riisi kest on riisiterade kaitsev väliskest, mis on riisi jahvatustööstuse kõrvalsaadusena suuresti kättesaadav. Riisi kesta saab piimatööstuse reovete töötlemisel efektiivselt kasutada adsorbendina, kuna see võib viia eemaldamiseni kuni 92,5% ulatuses, mida on võimalik saavutada adsorbendi doosiga 5 g/l 30 ° C temperatuuri ja pH 2 juures. [33] Kuid riisi kesta kasutamisega kaasnevad mitmeid KHT-laadimisega seotud probleeme, sest riisikoore välispinnal olevad ränidioksiidid ja sisepindadel olevad lisandid (rasvad ja vahad) põhjustavad sobimatut seost aktiivsete kohtade ja molekulide vahel. [33] Seega on riisi kesta kasutamine piimatööstuse reovete puhastamiseks palju lubav kuid vajab lisa uuringuid riisi kesta modifikatsioonidega.

### **3.2.5 Membraanprotsess**

Membraantehnoloogia on olnud kasutusel reoveepuhastuses suhteliselt lühikest aega viimase 20 - 30 aasta jooksul. See on arenev tehnoloogia, mis välistab klassikaliste süsteemide mitmeid puudusi. Membraanprotsess on efektiivne vahend enamiku reoveepuhastuste jaoks. See võib olla kasutusel eraldi või koos teiste reoveepuhastus süsteemidega. Membraanbioreaktorid eraldavad tõhusalt tahket ja vedeliku. Nende abil heitvees saavutatakse kõrget puhastusefektiivsust ja reoveepuhastuse seadmed on väiksemad ning liigmuda juurdekasv madal.

Membraanprotsessid on väga paljulubavad meetodid. Nendeks on mikrofiltratsioon, ultrafiltratsioon, nanofiltratsioon, dialüüs, elektrodialüüs ja pöördosmoos. Membraanfiltratsioon on tahkete ja kolloidsete ainete eemaldamine või eraldamine vedelikust, mis selekteeritakse membraani abil tavaliselt 0,0001–1,0 µm. [29]

### **3.2.6 Elektrokeemiline töötlus**

Elektrokeemilise töötamise põhi protsessiks on elektrolüüs. Piimatööstuste reovete puhastamiseks kasutatakse elektrokoagulatsiooni, elektroflotatsiooni ja anoodseid oksüdatsiooniprotsesse. [29] Nendest kõige efektiivsem ja levinum meetod piimatööstuste reovete puhastamiseks on elektrokoagulatsioon.

Elektro – tähendab elektrilise laengu rakendamine veele ja koagulatsioon - kolloidse osakeste pinna laengu vähendamise protsess, mis võimaldab suspendeeritud ainel moodustada suuri veest

eraldiseisvaid osakesi. [34] Reovee puhastamine elektrokoagulatsiooniga on väga sarnane keemilise koagulatsiooni protsessiga. Elektrood eraldab metalliioone ( $Fe_2^+$ ,  $Fe_3^+$  või  $Al_3^+$ ), mis on aktiivsete koagulantide eelkäijad ja osalevad reovee kolloidide negatiivsete laengute neutraliseerimisel. [35] Elektrokoagulatsiooni läbiviimiseks kasutatakse erinevatest materjalidest elektroode näiteks rauast, alumiiniumist, roostevaba terasest ja grafiitist elektroode. Elektrokoagulatsiooni protsessil on piimatööstuste reovete puhastamisel erinevad eelised nagu keskkonnasõbralikkus, mitmekülgsus, energiatõhusus, turvalisus, valikulisus, automatiseeritavuse ja kulutasuvuse tagamine.

### 3.2.7 Füüsikalise-keemilise töötuse efektiivsus

Tabelis 11 on toodud füüsikalise-keemiliste töötuste viisid ja nende puhastusefektiivsused.

Tabel 11. Erinevate töötusviiside efektiivsused.

| Töötuse viis                                | Karakteristikud   | Puhastusefektiivsus (%)  | Allikas |
|---|---|--|---------|
| Koagulatsioon                               | Kemikaal: Raudsulfaat ja raudkloriid.   | BHT: 64% (raudsulfaat) ja 85% (raudkloriid)                                    | [36]    |
| Koagulatsioon                               | Kemikaal: Raudsulfaat ja raudkloriid.   | BHT: 64% (raudsulfaat) ja 85% (raudkloriid)                                    | [37]    |
| Koagulatsioon                               | Kemikaal: Alumiinium- ja raudsulfaat  | KHT: 68% (alumiiniumsulfaat) ja 62% (raudsulfaat)                              | [38]    |
| Adsorptsioon                                | Kruus, süsi   | BHT: 80 %  | [39]    |
| Adsorptsioon                                | Phoslock® betoniit  | Fosfaat: 100% aeg 15 min   | [40]    |
| Membraan protsess                           | Pöördosmoos   | TOC: 99.8% ; TKN: 96%  | [27]    |
| Membraan protsess                           | Pöördosmoos   | KHT: 97.8%   | [41]    |
| Membraan protsess                           | Ultrafiltratsioon + pöördosmoos (vesi oli eeltöödeldud koagulandi ja söe pulbri PAC abil) | KHT 98%  | [42]    |
| Membraan protsess                           | Membraan bioreaktor (MBR) + nanofiltratsioon (NF)   | MBR: KHT: 98%, Lämmastik: 86%, Fosfor 89%<br>NF: KHT: 99.9%, Hõljuvaine: 93.1% | [43]    |
| Elektrokoagulatsioon                        | Al anood  | Fosfor: 89%, Lämmastik: 81%, KHT: 61%  | [44]    |
| Elektrokoagulatsiooni kombineeritud süsteem | Raua ja alumiiniumi elektroodid   | KHT: 79,2%   | [45]    |
| Elektrokeemiline protsess                   | Sn-Sb-Ni titaaniumiga kaetud anoodid (keemiliselt eeltöödeldud vesi)                      | KHT: 99% aeg 15min   | [46]    |

|                               |   |  |      |
|-------------------------------|---|--|------|
| Elektrokeemiline oksüdatsioon | IrO <sub>2</sub> -Pt kaetud anoodid                     | KHT: kuni 96,7%  | [47] |
| Elektroflokulatsioon          | Raua elektrodid   | Orgaaniline aine: 97,4%                                    | [48] |
| Elektrokoagulatsioon          | Al elektrodid   | KHT: 87%   | [35] |
| Elektrokoagulatsioon          | Al elektrodid (elektrolüüdina kasutati kaaliumkloriidi) | KHT: 98,84%; BHT <sub>5</sub> : 97,95%; Hõljuvaine: 97,75% | [49] |

Keemilise sadestamise puhul on raudkloriidi efektiivsus kõrgem kui raudsulfaadi ja alumiiniumsulfaadi oma. Keemilisel sadestamisel sõltub efektiivsus kemikaali doosist ja pH-st. Piimatööstuste reovete keemilise sadestamiseks tuleb eelnevalt viia läbi katsetusi, et leida parim kemikaal vee puhastamiseks.

Pöördosmoosi kõrge puhastusefektiivsus tagab heitvee kõrget kvaliteeti ning võimaldab selle taaskasutamist. Pöördosmoosiga puhastatud vee kvaliteet on sarnane oma parameetritelt aurukondensaadile, nii et seda saab uuesti kasutada samade rakenduste jaoks nagu kütmine, puhastamine ja jahutamine. [27] Vee kvaliteet pärast pöördosmoosi on võrreldav piimatööstuses kasutatava protsessivee omadustega ja see sobib taaskasutamiseks. [42]

Elektrokeemilised meetodid on piimatööstuse reovee töötlemiseks väga mugavad viisid mis tagavad erinevate parameetrite nagu hõljuvaine, üdfosfor, lämmastik ja KHT kontsentratsioonide märgatavat vähenemist. Elektrokeemiliste meetodite efektiivsus sõltub viibeajast, kasutatud elektrodide materjalist ja nendele rakendatud pingest.

### 3.3 Anaeroobne töötlemine

Mitmetes uuringutes on jõutud järeldusteni, et piimatööstuse reovee anaeroobne puhastamise meetod on väga efektiivne. Anaeroobset töötlemist kasutatakse reovete puhul, mille KHT ületab 1200 mg/l. Anaeroobsetes tingimustes lagundavad mikroobid reovees sisalduvad orgaanilised saasteained metaaniks ja süsinikdioksiidiks. Nendest moodustuvat biogaasi saab ettevõttes kasutada energiaallikana. Tavaliselt koosneb biogaas 60,0 - 90,0% CH<sub>4</sub> (metaanist) ja 10,0 - 40,0% CO<sub>2</sub> (süsinikdioksiidist). Anaeroobse lagundamise protsess on aeglane protsess, kuid sellel on kõrge potentsiaal metaani tootmiseks samal ajal vähendades KHT ja BHT kontsentratsioone. Anaeroobse kääritamise uuringud näitavad, et piimatööstuse reovesi on väga hea metaangaasi tootmiseks, mida saab kasutada kütuse valmistamiseks. [16]

Tavaliselt on piimatööstuse reovesi soe ja see soodustab anaeroobset töötlemist veelgi. [50] Reovee jääksoojust on võimalik kasutada hoonete kütmiseks soojusvahetuse tehnoloogiate abil. Üheks võimaluseks on soojusvahetust lahendada firma HUBER poolt pakutava Wastewater Heat Exchanger RoWin seadme abil.

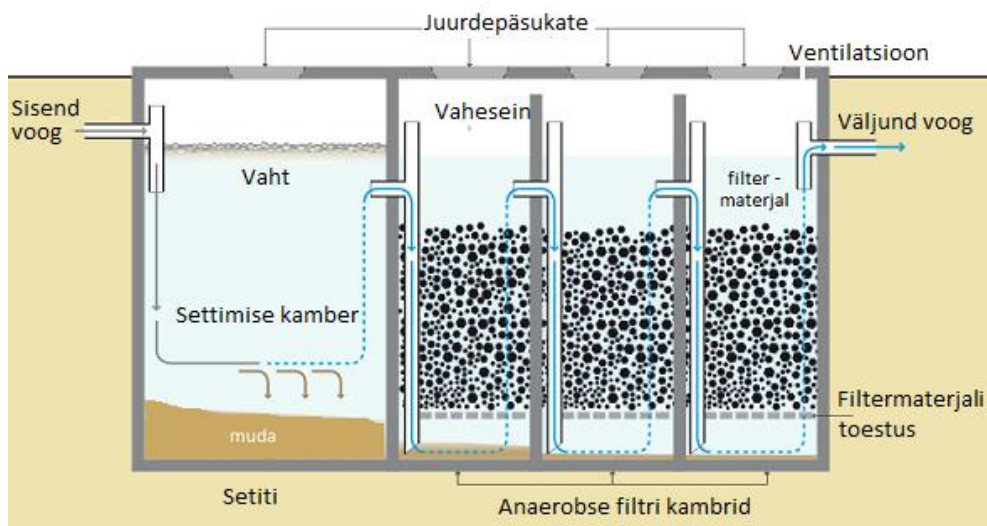
Kõige levinumad anaeroobse töötlemise kasutatavad tehnoloogiad on anaeroobne filter ja ülesvooluline anaeroobne hõljuvkihtreaktor (UASB). Kasutatakse ka erinevaid modifikatsioone nendest ja ühe või mitme faasilist töötlemist.

#### 3.3.1 Anaeroobne filter

Laialdase kasutuse anaeroobse töötlemise tehnoloogias leiab anaeroobne filter. Kui piimatööstuse reovees on madal hõljuvaine kontsentratsioon, siis sobib anaeroobseks töötlemiseks paremini anaeroobne filter (joonis 8). Kasutatakse ülesvoolu ja allavoolu anaeroobseid filtreid. Tihedamini on kasutusel ülesvoolu anaeroobne filter kui allavoolu anaeroobne filter.

Anaeroobne filter on fikseeritud kihiga bioloogiline reaktor, millel on üks või mitu järjestikust filtreerimiskambrit. Reovee voolamise ajal läbi filtri jäävad selles sisalduvad orgaanilised osakesed filtermaterjali kinni ja aktiivne biomass, mis on kinnitatud filtermaterjali pinnale lagundab neid. Anaeroobne filter võib eemaldada kuni 90% hõljuvainest ja BHT-st, kuid tavaliselt on eemaldamise protsent vahemikus 50 kuni 80. Üldlämmastiku eemaldamine on piiratud ja tavaliselt ei ületa see 15%.

Selleks, et vältida filtri ummistusi paigaldatakse tavaliselt selle ette settimise kamber. Seal settib muda põhja kust on seda võimalik eemaldada ja selle tõttu üldine filtri koormus jääb sellevõrra väiksemaks. Anaeroobse filtri projekteeritakse ülevoolu filtrina, et vältida filtermaterjali väljakannet filtrist. Selleks peab olema veetase vähemalt 0,3 m filtermaterjali tasemest kõrgemal.



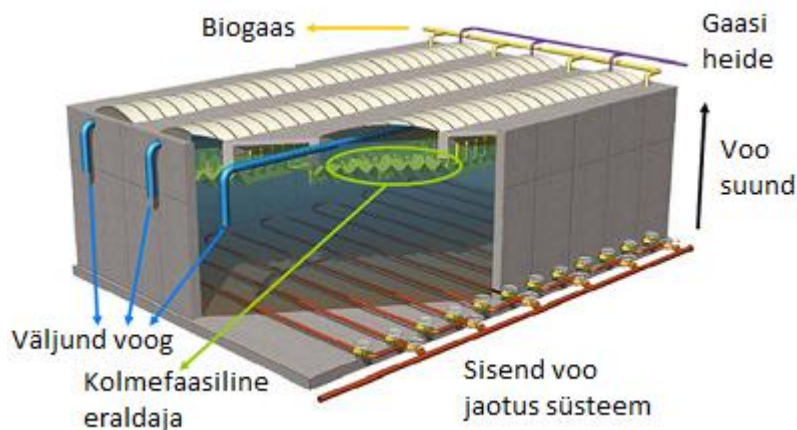
Joonis 8. Anaeroobne filter. [51]

Kõige olulisem parameeter, mis mõjutab filtri tööd on hüdrauliline viibeaeg. Soovitatakse, et see oleks 12 kuni 36 tundi. Filtermaterjaliks valitakse selline materjal, mis maksimaalselt suurendab aktiivse biomassi kinnitamise pinda ning poorsust. Sobilikud materjalid filtri täitmiseks on kivikillustik, PVC torud, graniitkivid, PVC Raschigi rõngad, RPF lehed, plasttorud ja pimss. [14]

### 3.3.2 Ülesvooluline anaeroobne hõljuvkihtreaktor

Kõige levinum anaeroobse töötlemise reaktor on ülesvooluline anaeroobne hõljuvkihtreaktor (UASB - upflow anaerobic sludge blanket). UASB reaktor võimaldab samaaegselt töödelda reovett ja toota biogaasi.

Ülesvoolulise anaeroobse hõljuvkihtreaktori tööpõhimõtte on kujundatud joonisel 9. Reovesi liigub ülespoole läbides anaeroobset hõljuvkihti, kus mikroorganismid lagundavad reovees sisalduvaid aineid, eelkõige vähendades rasvu ja KHT-d. Muda moodustub mikroorganismidest, mis moodustavad looduslikult graanulid (pelletid), mille läbimõõt on 0,5 kuni 2 mm ja mis omavad suurt settimise kiirust ning seetõttu ei kandu reaktorist välja isegi kõrgete hüdrauliliste koormuste ajal. [52]



Joonis 9. Ülesvooluline anaeroobne hõljuvkihtreaktor (UASB). [26]

Viibeaga reaktoris reguleeritakse ringlussevõetud heitvee ja sissevoolu reovee hulga abil. Anaeroobse käärimise protsessist tulenevalt vabanevad gaasimullid, mis liikudes ülespoole tagavad vajaliku muda segunemise ja reaktor ei vaja mehaanilist segajat. Reaktori ülaosas asub kolmefaasiline separaator, kus eraldatakse vedelikufaas tahkete ainete ja gaasi faasidest. [26] Biogaasi kogutakse reaktori ülaosas, puhastatud vesi juhitakse väljavoolu ja muda settib tagasi reaktorisse.

UASB reaktoril on järgmised eelised:

- suur mahuline koormus - KHT koormus  $>5 \text{ kg/m}^3\text{-d}$ ;
- võtab vähe ruumi – madal maa maksumus;
- ei vaja hapniku varustust – energiatõhusam;
- talub suurt orgaanilist koormust;
- talub hüdraulilise koormuse muutust. [52]

### 3.3.3 Ülesvooluline anaeroobne biokile-täidisreaktor

Ülesvooluline anaeroobne biokile-täidisreaktor (UAFB – Upflow anaerobic fixed-bed reactor) sarnaneb väga oma tööpõhimõtetelt UASB reaktoriga. Erinevus seisneb sellest, et reaktori sees on paigaldatud filtermaterjal fikseeritud kihina kuhu saab kinnituda aktiivne biomass. Võib öelda, et ülesvooluline anaeroobne biokile-täidisreaktor koosneb UASB reaktorist ja anaeroobsest filtrist, sest fikseeritud kihi materjalideks kasutatakse tavaliselt samu täidismaterjale mida kasutatakse ka anaeroobse filtri täitmiseks. Filtermaterjali valitakse nii, et see suurendaks biomassi kinnitamiseks



kasutavad pinda ja suurenenud poorsus vähendaks reaktori üldmahtu ning fikseeritud kihi ummistusi.

UAFB reaktoril on mitmeid eeliseid aeroobsete ja tavaliste anaeroobsete reaktorite ees, näiteks kiire käivitamine ja minimaalsed tööhäired ning võime taluda löökoormusi. [14] Löökoormuste puhul ei näita UAFB märkimisväärseid kõrvalekaldeid käärutamisprotsessis. Reaktor talub seisaku perioode ja käivitamine peale seda ei ole problemaatiline. [14] Võrreldes teistega on anaeroobsel fikseeritud kihiga reaktoril lühemad hüdraulilised viibeajad (HRT).

### 3.3.4 Anaeroobse töötlemise võrdlus

Anaeroobse töötlemise KHT puhastusefektiivsus jääb üldiselt vahemiku 80-95% sõltuvalt laetavast koormusest. Tabelis 12 on toodud erinevate anaeroobsete reaktorite koormusmäärad ja puhastusefektiivsuse protsent.

Tabel 12. Erinevate anaeroobsete reaktorite efektiivsus piimatööstuste reovete puhastamisel. [52]

| Reaktori tüüp               | KHT koormus kg/ m <sup>3</sup> -d | Puhastusefektiivsus %                 | Gaasitootlikus   | Allikas |
|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--|---------|
| Ülesvoolu anaeroobne filter | 1-10                              | 80-95                                 |  | [52]    |
| Allavoolu anaeroobne filter | 5-15                              | 80-87                                 |  | [52]    |
| Anaeroobne filter           | 5-6                               | 90                                    |  | [53]    |
| UASB                        | 5-30                              | 85-95                                 |  | [52]    |
| UASB                        | 1,3-2,2                           | KHT: 87,06<br>BHT: 94,50<br>HA: 56,54 | keskmine: 125,55 m <sup>3</sup> /p<br>reaktori maht 120,12m <sup>3</sup><br>metaani sisaldus 75% | [17]    |
| UASB                        |                                   | KHT: 70–90                            | keskmine: 400 m <sup>3</sup> /p<br>reaktori maht 650m <sup>3</sup><br>metaani sisaldus 70%       | [22]    |
| UAFB                        | 5,4                               | KHT: 87                               | keskmine: 9,8 l/p<br>reaktori maht 3l<br>metaani sisaldus 77%                                    | [14]    |

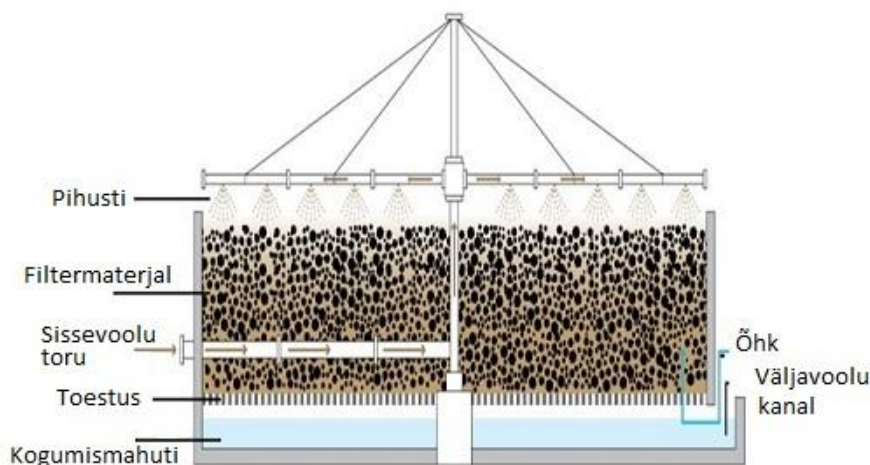
Anaeroobset protsessi tulemuslikus sõltub pH-st, hüdraulilisest viibeajast, reaktori mahust ja peale tulevast koormusest (BHT, KHT kontsentratsioonid) Optimaalne UASB reaktori jaoks pH anaeroobse protsessi jaoks on vahemikus 6,9 kuni 7,4. [17] Gaasitootlikus on keskmiselt 1 m<sup>3</sup> reaktori kohta 1,64 m<sup>3</sup>(arvutatud autori poolt tabel 12 andmete põhjal).

### 3.4 Aeroobne töötlemine

Piimatööstuse reoveed sobivad hästi kõrge orgaanilise aine sisalduse tõttu aeroobseks töötlemiseks. Aeroobne bioloogiline töötlemine hõlmab mikroobide lagunemist ja jäätmete oksüdeerumist hapniku juuresolekul. Kõik heitvete puhastamisel kasutatavad bioloogilised protsessid leiavad aset ka looduses. Aeroobse puhastamise meetod põhineb hapniku vajavate mikroorganismide võimel lagundada orgaanilisi ja mittemetallilisi anorgaanilisi ühendeid, moodustades süsihappegaasi, vett, nitraate, sulfaate, lihtsaid madala molekulmassiga orgaanilisi kõrvalprodukte ja biomassi. [54] Piimatööstuse reovee töötlemiseks kasutatakse aeroobseid töötlemisprotsesse, nagu näiteks aktiivmuda, nõrgfilter, aereeritud laguunid või nende kombinatsioonid. [50] Kõik piimatööstuse reovees sisalduvad ühendid on biolagunevad, välja arvatud valgud ja rasvad, mis ei ole kergesti lagunevad.

#### 3.4.1 Nõrgfilter

Nõrgfilter (joonis 10) omab suurt pindala ja on täidetud erineva materjaliga. Täitematerjaliks kasutatakse kivimeid, kruusa, purustatud PVC-pudeleid või spetsiaalselt eelnevalt valmistatud plastmeediat. [51]



Joonis 10. Nõrgfiltri tööpõhimõtte. [51]

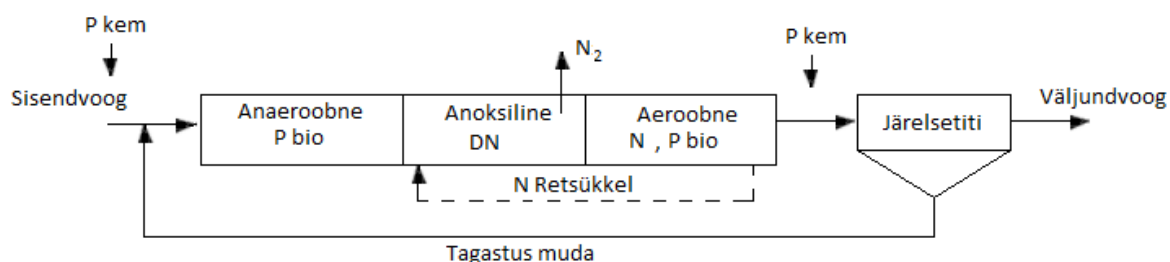
Eelsetitatud reovesi tilgutatakse või pritsitakse pidevalt filtri pinnale. Seda tehakse pöörleva pihusti abil sel viisil puutub reovesi õhuga ja toimub loomulik aeratsioon. Reovesi liigub läbi filtri ja puutub kokku filtermaterjali katva biokilega. Suur pind tagab suure biokile moodustumise. Organismid, mis

moodustavad õhukest biokilet, oksüdeerivad orgaanilist ainet reovees süsinikdioksiidiks ja veeks, luues samal ajal uut biomassi. Sisekihid biomassi sees võivad olla anaeroobsed või anoksilised. Nõrgfilter vajab nii eelsetitit kui järelsetiti. Eelsetitit on vaja, et vältida ummistusi ja eemaldada liigset muda reoveest. Kuna filtrist võivad aegajalt kanduda biomassi osad, siis on vajalik ka järelsetiti, kus saab need kinni püüda ning eemaldada.

### 3.4.2 Aktiivmuda protsess

Aktiivmuda protsess tähendab mitmekambrilist reaktorit. Tavaliselt koosneb see aeratsiooni kambrist, kus reovett koos aktiivmudaga segatakse ja aereeritakse ning settimise kambrist, kus muda settib põhja ja sealt suunatakse see tagasi aeratsiooni kambrisse. [51] Protsessis kasutatakse väga kontsentreeritud kujul mikroorganisme – aktiivmuda, mis lagundab orgaanilisi aineid. Orgaaniliste ainete lagundamise ajal suureneb aktiivmuda kogus ja seetõttu tuleb juurde kasvanud aktiivmuda e. liigmuda eemaldada. Aktiivmuda protsess võimaldab saavutada väga kõrge kvaliteediga heitvett.

Aktiivmuda protsessi kasutavad erinevad reaktori konfiguratsioonid. Reaktor võib olla konstrueeritud bioloogiliseks nitrifikatsiooniks ja denitrifikatsiooniks, samuti bioloogiliseks fosfori eemaldamiseks. Nende protsesside jaoks konstrueeritakse anaeroobseid, anoksilise ja aeroobseid tsoone (joonis 11). Anaeroobses ja aeroobses tsoonis toimub fosfori bioloogilise ärastuse esimene ja teine etapp (P<sub>bio</sub>). Aeroobses tsoonis toimub lämmastiku ärastuse esimene etapp ehk nitrifikatsiooni protsess (N) ja anoksilises tsoonis denitrifikatsiooni (DN) protsess, mille lõpp-produktiks on protsessist õhku eralduv gaasiline lämmastik. Lämmastiku ärastuse tõhustamiseks kasutatakse vajadusel lämmastiku (N) retsükliit. Kui fosfori bioloogiline ärastus ei taga soovitud tulemust, siis kasutatakse lisaks fosfori keemilist ärastust (P<sub>kem</sub>). Selleks lisatakse kemikaale tavaliselt kas otse reovette või enne järelsetitit.



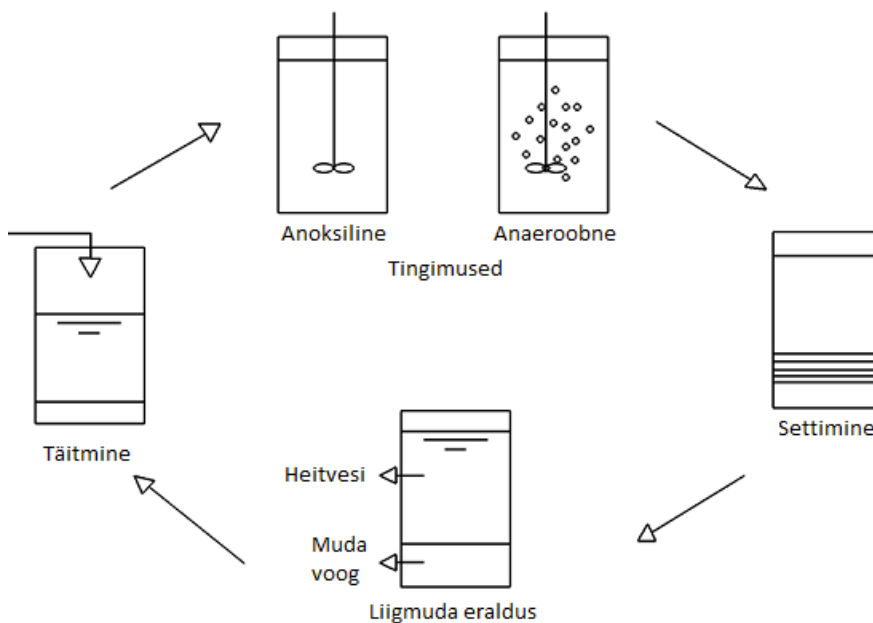
Joonis 11. Aktiivmuda protsess (autori koostatud).

Aeroobses tsoonis peab olema tagatud reovee segamine ja õhustamine. Tavaliselt aeratsioonikambris hoitakse lahustunud hapniku kontsentratsiooni 2-4 mg/l. Viibeaeg reaktoris sõltuvalt temperatuurist jääb BHT eemaldamiseks 3 kuni 5 päeva ja nitrifikatsiooni puhul 3 kuni 18 päeva. [51]

Aktiivmuda protsess on üks etappidest reovee puhastamises. Tavaliselt eelneb aktiivmuda protsessile mehhaaniline töötlemine ja vajadusel eelsetiti. Aktiivmuda protsessile võib järgneda näiteks süva- või järelpuhastuse etapp.

### 3.4.3 Annuspuhasti

Aktiivmuda reovee puhastusetapid toimuvad annuspuhasti puhul ühes mahutis, seetõttu ei ole setiti eraldi mahutina vajalik. Reovesi puhastatakse annuste kaupa ja puhastusprotsess toimub aja järgi. Uus annus vett juhitakse reaktorisse peale seda kui eelmine reovesi on segatud, aereeritud, setitatud ja välja lastud.



Joonis 12. Annuspuhastis toimuvate protsesside skeem. [55]

Reovee puhastus toimub viies erinevas etapis (joonis 13). Esimeses etapis toimub mahuti täitumine reoveega ja sel ajal on mahutis anoksilised tingimused mis on vajalikud denitrifikatsiooniks. Teine etapp on õhustamine ja saavutatakse aeroobsed tingimused, mis on vajalikud nitrifikatsiooniks. Edasi toimub settimise etapp ja puhastatud heitvesi pumbatakse välja, eemaldatakse liigmuda.

### 3.4.4 Kasutatavate reaktorite võrdlus

Piimatööstuse reovete puhastamisel kasutatavate reaktorite efektiivsus on toodud tabelis 13. Enamus aeroobsetest reaktoritest annavad häid puhastuse tulemusi. Laialt levinud aeroobsete reaktorite hulgas on annuspuhasti (SBR) ja membraan annuspuhasti (MSBR). Viimane annab väga kõrget puhastusefektiivsust.

Tabel 13. Piimatööstuse reovete aeroobse töötlemise kasutatavate reaktorite tingimused.

| Reovee tüüp            | Reaktori tüüp        | BHT vähendatud % | KHT vähendatud % | Viibeaeg (päev) | BHT/KHT koormus kg/ m <sup>3</sup> p | Allikas |
|------------------------|----------------------|------------------|------------------|-----------------|--------------------------------------|---------|
| Piimatoodete tööstus   | MSBR                 | 97-98            |                  |                 |                                      | [56]    |
| Piima tootmise tööstus | MSBR                 | 83 ± 0,2         | 89,3 ± 0,1       |                 | 1,34 (BHT)                           | [57]    |
| Piima tootmise tööstus | SBR                  | 79,9 ± 0,3       | 87,0 ± 0,2       |                 |                                      | [57]    |
| Piima tootmise tööstus | MSBR                 | 97,9 ± 0,1       | 97,9 ± 0,0       |                 | 0,68 (BHT)                           | [57]    |
| Lahjendatud täispiim   | Perioodiline reaktor |                  | 57-63            |                 |                                      | [58]    |
| Juustu tööstus         | MBBR                 |                  | >80              |                 | 5,0 (KHT)                            | [59]    |
| Piimatoodete tööstus   | Aktiivmuda reaktor   | 99               |                  | 0,82            |                                      | [60]    |
| Vadaku permeaat        | Perioodiline reaktor |                  | >90              | 0,41-0,833      |                                      | [61]    |
| Juustu tööstus         | SBR                  |                  | 99,5             |                 |                                      | [62]    |
| Piimatoodete tööstus   | SBR                  |                  | 80,2             | 1               |                                      | [63]    |

### 3.4.5 Süvapuhastus

Kuna piimatööstuse reoveed on reostuskoormuselt muutlikud, siis võib aktiivmuda protsessis esineda tööhäireid, mille tulemuseks on muda pundumine ja setiti pinnalt väljakandumine heljumi näol. Seetõttu viimaseks bioloogilise puhastuse etapiks võib valida mõne süvapuhastuse tehnoloogiat. Piimatööstuste reovete järel-/süvapuhastuseks kasutatakse näiteks biotiike ja pöördosmoosi seadmeid.

Biotiikides toimub reovee bioloogiline puhastus. Need on kunstlikult rajatud piklikud või serpentiini kujulised veekogud, mille sügavus on tavaliselt 1-1,2 m. Vesi voolab tiikidest aeglaselt läbi ja sellel ajal toimub heljumi settimine ning kõik looduses leitavad vee puhastusprotsessid nagu: mikroorganismide ja veetaimede poolt toitainete tarbimine; fotosüntees; orgaanika lagunemine ja uue biomassi kasv; patogeensete organismide, bakterite ja sooleparasiitide munade hävimine. Biotiikide miinuseks on see, et nendel on teatud isepuhastusvõime piir. Kui biotiikidesse suunatakse pikaajaliselt suure hõljuvaine sisaldusega reovett või puhasti avarii korral puhastamata reovett võib juhtuda, et biotiigi isepuhastusvõime piir saab ületatud. Sel juhul tiik ei taga väljundvoos oodatud tulemust ja hiljem läheb roiskuma. Selline tiik vajab mehaanilist puhastust ja uuesti käivitamist.

Membraantehnoloogial põhinev pöördosmoos on väga tõhus, kuid selle kasutamisega kaasneb suur hulk jääkvett. Ühe osa vee puhastamiseks moodustab jääkvee kogus neli osa.

## 3.5 Aeroobse ja anaeroobse töötlemise võrdlus

Aeroobse töötlemise puhul on biomassi juurdekasv oluliselt suurem, kui anaeroobse töötlemise puhul. Biomassi juurdekasv sõltub reostuskoormusest, mida kõrgem see on seda rohkem biomass kasvab. Kuna piimatööstuste reoveed on kõrge reostusainete sisaldusega, siis saab biomass kasvuks vajalike toitaineid. Biomassi kasvu soodustab ka soe reovee temperatuur. Suurema reoveekoormuse tõttu vajab aeroobne töötlus suuremat reaktori mahtu. Aeroobse töötlemise puhul tuleb arvestada biomassi juurdekasvust tingitud suurt liigmuda hulka ning selle utiliseerimisega kaasnevad lisa kulutused. Piimatööstuste reovee aeroobse ja anaeroobse töötlemise eeliste ja puuduste võrdlus on esitatud tabelis 14.

Anaeroobse töötuse puhul ei sisaldu protsessis biomassi kasvu jaoks vajaliku hapniku ja biomassi juurdekasv on minimaalne. Mõlemad töötuse viisid võimaldavad saavutada vajalikku heitvee puhastusefektiivsust ning mõlema protsessi puhul on oluline eeltötlus rasvaemalduseks.

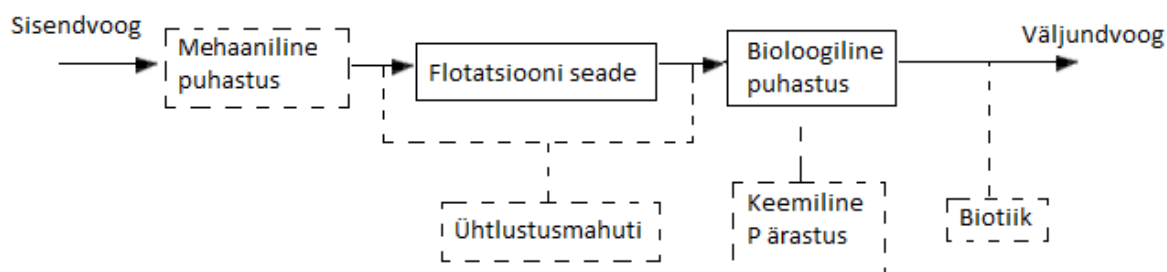
Tabel 14. Piimatööstuse reovee aeroobse ja anaeroobse töötlemiste eeliste ja puuduste võrdlus.

| Faktor               | Aeroobne protsess  | Anaeroobne protsess   |
|----------------------|--|---|
| Reaktori suurus      | Vajab suuremat mahtu   | Vajab väiksemat mahtu   |
| Väljavoolu kvaliteet | Võimaldab saavutada vajaliku puhastusefektiivsust                    | Võimaldab saavutada vajaliku puhastusefektiivsust                   |
| Energia vajadus      | Protsess vajab rohkem energiat                                       | Võimaldab toota energia allikana biogaasi                           |
| Biomassi juurdekasv  | Biomassi juurdekasv on suur  | Biomassi juurdekasv on väike  |
| Reovee koormus       | Mida suurem on reoveekoormuses seda suurema mahuga on reaktorit vaja | Vajab kõrgeid reoveekoormusi KHT alates 1200 mg/l                   |
| Rasv                 | Protsess vajab eeltötlusena rasvaemaldust                            | Rasva sisaldus reovees mõjub pärssivalt anaeroobsele töötusele [64] |
| Löötkoormus          | Tundlik löötkoormuste suhtes   | Vähem tundlik löötkoormuste suhtes                                  |

Aeroobne protsess on energiakulukam, kuna biomassi kasvu jaoks on vaja aeratsiooni seadmete abil tuua protsessi piisavalt hapniku. Samuti kulub liigmuda eemaldamiseks ja järeltöötlemiseks täiendav energia. Anaeroobne protsess võimaldab aga toota biogaasi ja kasutada seda energia allikana.

## 4 EESTIS KASUTATUD TEHNOLOOGIAD

Eestis piimatööstuste reovete puhastamiseks kasutatud tehnoloogiate kokkuvõtlik skeem on toodud joonisel 13.



Joonis 13. Piimatööstuste reovee puhastusskeem (autori koostatud).

Puhastus koosneb tavaliselt keemilisest koagulatsioonist, millele järgneb flotatsioon. Vajadusel kasutatakse eelnevalt mehhaanilist puhastust. Flotatsiooniseadmest suundub vesi aeroobsesse protsessi, kus toimub puhastus aktiivmuda abil. Aktiivmuda protsess on reguleeritud nii, et toimuks bioloogiline fosfori ja lämmastiku ärasustus. Vajadusel kasutatakse ka keemilist fosfori ärasust. Selleks doseeritakse aktiivmuda protsessi Eestis laialt selleks otstarbeks levinud kemikaali Kemira PIX-115, mis kujutab endast raudsulfaadi lahust. Vee ühtlustamine on lahendatud kahel viisil kas enne flotatsiooniseadet või enne bioloogilist puhastust. Ühtlustusmahuti on kasutusel mõnel lahendusel. Mõnedel puhastitel on kasutusel järelpuhastuseks biotiik. Tabelis 15 on toodud mõnede piimatööstuste kohtpuhastite tehnoloogilised lahendused.

Tabel 15. Piimatööstuste reoveepuhastid. [54]

| Puhastusseadme nimi      | Ettevõtte nimi        | Oluline tööstusreovesi | Puhastusmeetod  | Keem. P kasutamine |
|--------------------------|-----------------------|------------------------|---|--------------------|
| Järva-Jaani puhasti      | Järva-Jaani Teenus OÜ | Piimatoodete tootmine  | Mehh.+ flotatsioon + P bio + P kem                      | vajadusel          |
| Laeva Meierei biopuhasti | Valio Eesti AS        | Piimatoodete tootmine  | Mehh.+ flotatsioon + N ja P bio + biotiik               |                    |
| Võru Juustu puhasti      | Võru Juust AS         | Piimatoodete tootmine  | Mehh.+ flotatsioon + N ja P bio                         |                    |
| Estover Juustu tööstus   |                       | Piimatoodete tootmine  | Ühtlustust + flotatsioon + N ja P bio + P kem + biotiik | vajadusel          |
| Vigala Piimatööstus      |                       | Piimatoodete tootmine  | Ühtlustust +Mehh. +rasvapüüdja+ N ja P bio              |                    |



Tööstused, mis juhivad reovett ühiskanalisatsiooni omavad tavaliselt eelpuhastusseadmeid. Nendeks on ühtlustusmahuti ja flokulaatsiooni-flotatsiooniseade. Tabelis 16 on toodud näiteid tehnoloogilistest lahendustest reoveepuhastitel, mis võtavad lisaks olmereoveele ka piimatööstuste eeltöödeldud reovett.

Tabel 16. Reoveepuhastid, mis võtavad vastu piimatööstuse reovett. [54]

|                               |                          |                      |                                       |               |
|-------------------------------|--------------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------|
| Paide reoveepuhasti           | Paide Reoveepuhasti OÜ   | Piima ja olme        | Mehh.+ eelsetiti + N ja P bio + P kem | tavaliselt ei |
| Põltsamaa linna reoveepuhasti | Põltsamaa Varahalduse OÜ | Piima, toidu ja olme | Mehh.+ N ja P bio+ biotiik            | tavaliselt ei |
| Põlva linna reoveepuhasti     | Põlva Vesi AS            | Piima, liha ja olme  | Mehh.+ N ja P bio + P kem             | vajadusel     |

Reoveepuhastitel, mis võtavad vastu tööstuste reovett puuduvad rasvapüüdjad või flotatsiooniseadmed. Sellepärast on väga oluline, et puhastitele juhitud reovesi oleks eelpuhastatud ja vastaks ühiskanalisatsiooni juhitava reovee reostusnäitajate piirväärtuste normidele.

## 4.1 Põltsamaa Epiima juustutööstuse eelpuhastus seadmed

Epiima juustutööstuse reovesi koosneb peamiselt ettevõtte tööstusprotsessidest tulenevast reoveest. Keskmine päevane vooluhulk on 350 m<sup>3</sup>. Kuna tegemist on juustutööstusega, siis reovees sisaldub kõrgetes kontsentratsioonides reostusaineid. 2006 aastal mõõdetud juustutööstuse reovee seitsme mõõtepäeva keskmised ja maksimaalsed kontsentratsioonid ning reostuskoormused on toodud tabelis 17.

Tabel 17. Juustutööstuse Epiim reovee kontsentratsioonid enne eelpuhastus seadmeid. [65]

| Reostusnäitaja   | Kontsentratsioon mg/l (va pH) | Maksimaalne kontsentratsioon mg/l |
|------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| KHT              | 10 614                        | 15 500                            |
| BHT <sub>7</sub> | 7686                          | 13 000                            |
| Heljum           | 854                           | 1 110                             |
| N <sub>üld</sub> | 211                           | 290                               |
| P <sub>üld</sub> | 62                            | 84                                |
| Rasv             | 45                            |                                   |
| pH               | 2 - 13                        |                                   |

Piima tööstuses kasutatavad seadmete leeliseliste ja happeliste pesuainete tõttu kõigub reovee pH vahemikus 2-13. Pesuainena kasutatav lämmastikhape võib olla üheks kõrgete üldlämmastiku kontsentratsioonide põhjuseks. Reovee eeltöötlemiseks kasutatakse Redox flokulaatorit, pH reguleerimist ja Dewa flotaatorit (joonis 14). Eelnevalt reovett ühtlustatakse ühtlustusmahutis.



Joonis 14. Flotaator ja flokulaator. [26]

Redox flokulaator kujutab endast pikka spiraalset toru, mis võimaldab kemikaalide reageerimiseks vajaliku viibeaga. Kõigepealt doseeritakse toru alguses koagulant, milleks on raudsulfaadi lahus ( $\text{FeSO}_4$ ) ja toimub koagulatsioon. Peale koagulatsiooni muutub voog happeliseks. Flokulatsiooniks kasutatakse polümeeri, mille abil seotakse osakesed suuremateks helvesteks. Enne flotatsiooni mahutisse juhtimist toimub pH reguleerimine ja pH tõstmiseks lisatakse seebikivi ( $\text{NaOHCl}$ ).

Toruflokulaatori eelisteks on väga täpne kemikaalide doseerimine, lühike viibeag ja ummistusvaba töötamine. Täpne kemikaalide doseerimine võimaldab hoida kokku kemikaalikus. Lühike viibeag, mida tagab turbulents segamine, säästab kasutatava seadme pinda.

Flokulaatorist suundub vesi edasi flotatsiooniseadmesse, kus toimub õhu abil osakeste kerkimine pinnale ja settimine põhja. Peale kerkinud rasv tihendatakse ja kogutakse pinnalt kooriva kaabitsa abil eraldi mahutisse. Sealt transportitakse rasv paakauto abil biogaasi tootmisjaama. Põhja settinud muda juhitakse ära automaatse pneumaatilise ventiili abil. Seadme oodatud tulemused on  $\text{BHT}_7$  - 60 %; Hõljuvaine - 90 % ; Rasv - 90 %.

Koagulatsiooni - flokulatsiooni protsesse kasutatakse peamiselt suspendeeritud, kolloidse ja hõljuvaine eemaldamiseks reoveest. Peale seda on võimalik vett juhtida ühiskanalisatsiooni.

## 4.2 Estover juustutööstuse reoveepuhasti

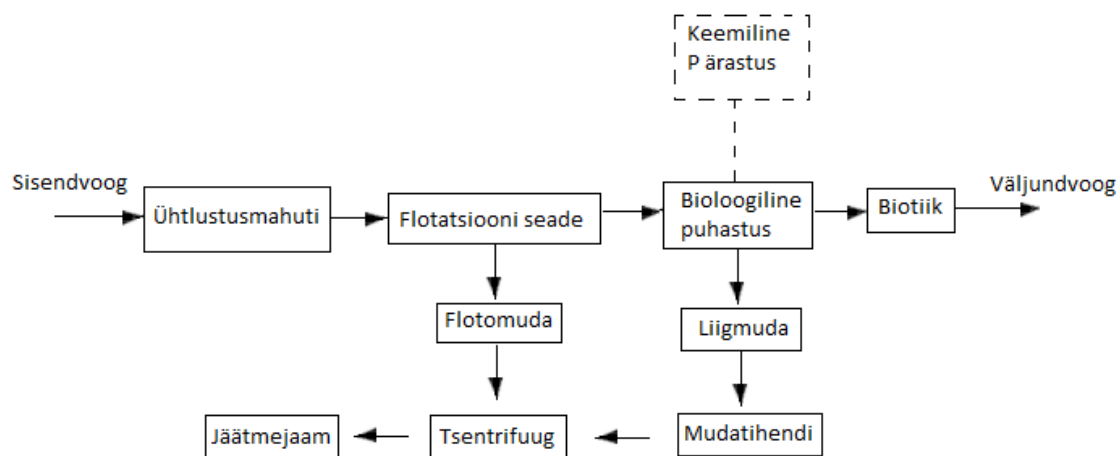
Estover juustutööstuse toodete valik on väga lai. Piimatoodete tehases toodetakse erinevaid juustusorte, kohupiima, võid, jogurteid ja desserte. Tööstuse reovesi koondub ettevõtte kohtpuhastile. Päevas keskmiselt töödeldakse 250m<sup>3</sup> reovett ja keskmine reoveekoostis aastal 2008 on toodud tabelis 18.

Tabel 18. Estover reoveepuhasti siseneva reovee kontsentratsioonid.

| Reostusnäitaja   | Reostusnäitaja kontsentratsioon mg/l |
|------------------|--------------------------------------|
| BHT <sub>7</sub> | 2100                                 |
| Hõljuvaine       | 560                                  |
| N <sub>üld</sub> | 96                                   |
| P <sub>üld</sub> | 23                                   |
| pH               | 6 - 9                                |

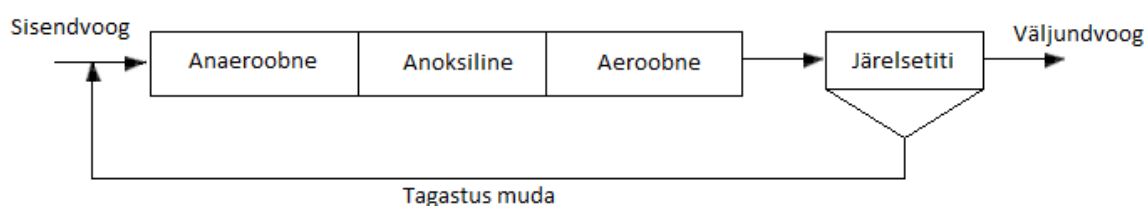
Allikas: Estover juustutööstuse reoveepuhasti projekt, 2009.

Kohtpuhasti tehnoloogiline skeem on toodud joonisel 15. Reovee puhastamine algab reovee ühtlustamisega ühtlustusmahutis. Edasi suundub reovesi füüsikaline-keemiline puhastuse. Kasutusel on flokulaaator ja flotatsiooniseade.



Joonis 15. Estover juustutööstuse reoveepuhasti skeem (autori koostatud).

Kasutatavad kemikaalid koagulatsiooniks on raudsulfaadi lahus ja flokuleerimiseks polümeer. Flotaatoris toimub ka pH reguleerimine seebikivi (NaOHCl) abil. Järgmine reovee puhastamise etapp toimub aktiivmuda protsessi abil rõngaspuhasti tüüpi aerotankis. Aktiivmuda puhastus toimub klassikalise skeemi abil anaeroobne -> anoksiline -> aeroobne tsoon (joonis 16). Aerotankis toimub fosfori ja lämmastiku bioloogiline ärastus. Aeratsiooni seadmeteks on kasutusel Celpox tüüpi aeraatorid koos soojusvahetussüsteemiga. Celpoxi soojusvahetuse jaoks on ümber bioreaktori toru paigaldatud spiraalne metallvöö, kus ringleb soojusvaheti vedelik.



Joonis 16. Aktiivmuda protsess Estover reoveepuhastil (autori koostatud).

Aerotankis toimub fosfori ja lämmastiku bioloogiline ärastus. Aerotanki läbides setitakse heitvesi järelsetitis. Viimane järelduhastuse etapp on biotiik. Flotatsiooniseadmes eraldatav flotomuda ja aktiivmuda protsessist eraldatud ning tihendatud liigmuda tsentrifugeeritakse. Tsentrifugeeritud reoveesete viiakse jäätmejaama.

### 4.3 Vigala piimatööstuse reoveepuhasti

Vigala piimatööstus on spetsialiseerunud Mozzarella juustude tootmisel. Piimatööstuse uus reoveepuhasti rajati 2010 aastal. Tegemist on annuspuhastiga. Puhastisse juhitud reovesi koosneb peamiselt ettevõtte tööstusprotsessidest tulenevast reoveest ja läheduses asuvast hooldekodu reovest. [66]

Piimatööstuses on tootmine ülepäeviti ning sellest lähtuvalt on vooluhulgad väga kõikumad. Kõigepealt ühtlustatakse reovett 85m<sup>3</sup> suuruses ühtlustusmahutis. [66] Edasi puhastatakse vett mehhaaniliselt kaarvõre abil. Kaarvõrele järgneb rasvapüünis. Edasi läheb vesi bioloogilise aktiivmuda puhastusse, kasutusel on annuspuhastuse tehnoloogia. Puhastil on projekteeritud kaks paralleelset liini, kus on võimalik viia läbi fosfori ja lämmastiku bioloogiline ärastus. Keskmine

ööpäevane vooluhulk on 98 m<sup>3</sup>. [66] Reoveepuhasti siseneva reovee kontsentratsioonid on toodud tabelis 19.

Tabel 19. Reoveepuhasti siseneva reovee kontsentratsioonid. [66]

| Reostusnäitaja   | Andmed projektist mg/l | Analüüsitulemused<br>25-26.08.2015 mg/l |
|------------------|------------------------|---|
| KHT              | 1 400                  | 2 200                                   |
| BHT <sub>7</sub> | 900                    | 700                                     |
| Hõljuvaine       | 867                    | 600                                     |
| N <sub>üld</sub> | 160                    |   |
| P <sub>üld</sub> | 27                     | 31                                      |
| pH               |                        | 4,4                                     |

Eesti Keskkonnauuringute Keskuse poolt läbi viidud uuringu käigus olid puhastil tuvastatud mitmed projekteerimise ja opereerimise probleemid, millistega saab tutvuda järgmisel aadressil:  
[https://www.envir.ee/sites/default/files/lisa\\_6\\_projekteerimise\\_ja\\_kaitamise\\_hinnangud.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/lisa_6_projekteerimise_ja_kaitamise_hinnangud.pdf)

## 5 PIIMATÖÖSTUSTE REOVETE PUHASTAMISE VÄLJAKUTSED

### 5.1 Ebaühtlane tootmistsükkel

Üks levinumatest eripäradest piimatööstuste reovete puhastamisel on muutuvad reostusnäitaja kontsentratsioonid ja ebaühtlane vooluhulk. Muutused tootmisprotsessides toovad kaasa mahtude suurenemine või vähenemise ja reostusnäitajate kontsentratsioonide kõikumisi. Näiteks Vigala piimatööstuse reaalne reostuskoormus on umbes 30% suurem, kui projekteerimisel aluseks võetud koormus. Põhjuseks on piimatööstuse tootmismahude suurenemine. Puhasti sissevoolus on suurenenud ööpäevane vooluhulk ning sellest tulenevalt on vajadus suurema ühtlustusmahuti järele. [66] Vooluhulgad on ööpäevas väga muutuvad. Näiteks öösiti tootmist ei toimu ja reovett ei tekki.

Koormuste ja vooluhulkade kõikumine on väga suureks probleemiks, millest tuleneb aktiivmuda ebaühtlane koormamine ja reoveepuhasti tööhäired. [65] Madala koormusega aktiivmudal on kõrge potentsiaal niitjate organismide tekkeks ja arenguks ning pundumise oht.

AS Laeva Meierei reoveepuhasti peamiseks tööd häirivaks teguriks on ülekoormus. Ülekoormuse tõttu on raske hoida õhutusambrites vajaliku lahustunud hapniku sisaldust. Puhasti on projekteeritud reovee kogusele 270-280 m<sup>3</sup>/d, kuid nüüd on see toodangu mahu tõusu pärast ulatub kuni 500 m<sup>3</sup>/d. [54]

Vältimaks ülekoormusi puhastusseadmete projekteerimisel tuleb maksimaalselt arvestada võimaliku toodangu muutustega ja võimaldama puhastuskonstruksioonidel töötada erinevatel režiimidel. Samuti ettevõtte tootmismahude planeerimisel peaks arvestama võimalike reoveepuhastusseadmete tööhäiretega reovee hulga suurenemise tõttu.

### 5.2 Rasva edasikandumine

Piimatööstuse reovesi, mis on suunatud aeroobsesse töötlemisse ei tohi sisaldada rasva, vadakut, koort või teisi kõrgete reostusnäitajate kontsentratsioonidega aineid. Aktiivmuda protsess ei talu järsku koormuse tõusmist või näiteks vadaku kanaliseerimisel järsku pH langemist. [65]

Kui esineb tõrkeid flotatsiooniseadme töös või kemikaalide doseerimises kandub osa rasvast edasi järgmisesse etappi. Kui see on aktiivmuda protsess, siis rasva mõju avaldub niitjate organismide arengus ja viskoosse pruuni vahu tekkimises. Rasv soodustab niitjate bakterite paljunemist nagu näiteks *M. parvicella*, *Nocardia* [54]. Niitjad bakterid põhjustavad vahutamist ja mõjutavad halvasti muda settimisomadustele ja mudaindeksile. Muda on hõre ja ei setti. Kui peale flotatsiooni suunatakse vesi kanalisatsiooni, siis võib esineda selle ummistusi. Osades uuringutes on toodud välja, et rasva sisaldus pärsib ka anaeroobseid protsesse, kuna rasvad on kaua ja raskesti lagundatavad.

### 5.3 pH kõikumised

pH kõikumistele on tundlikud nii aeroobsed, anaeroobsed kui füüsikalise-keemilised protsessid. Tõrked flotaatori töös, näiteks kemikaalide otsa saamine või vale doosi kasutamine võib põhjustada järgmistes etappides probleeme.

Flotaatorist väljuv vesi ei ole aktiivmudale soodsas suhtes BHT:N:P = 100:5:1. Keemiliseks sadestamiseks kasutatav koagulant seob väga hästi fosforit ja fosfori sisaldus flotaatorist väljuvas reovees on seetõttu aktiivmuda protsessi jaoks liiga madal. Selline reovesi vajab korrigeerimist fosfori lisamisega näiteks fosforhappe näol. Fosforhappe üledoseerimisel on aga oht bioloogiasse juhitava reoveel muutuda happeliseks.

AS Laeva Meierei kohtpuhastil on nii flotatsiooniseadme kui aerotanki juhitava reovee pH õiges vahemikus hoidmisega raskusi. pH reguleerimisel esineb raskusi ja selle põhjuseks on toodud välja kemikaalide kõrget maksumust ja flotaatori ees asuva pH meetri sissevoolutorude sagedast ummistumist piimarasva ja/või kohupiimaga. [54] Üheks võimalikuks probleemi lahenduseks nähakse efektiivse mehaanilise võre paigaldamist flotaatori ette. Väga oluline on hoida pH-d seadmetele ja protsessidele vajalikus vahemikus, sest sellest sõltub nende puhastusefektiivsus.

## 5.4 Kõrge energiakulu

Tabelites 20 ja 21 on toodud olmereovee BHT<sub>5</sub> ja BHT<sub>7</sub> kontsentratsioonid. Võrreldes olmereoveega sisaldab piimatööstuste reovesi 3-4 korda rohkem bioloogilist koormust BHT<sub>7</sub>.

Tabel 20. Erineva reostuse olmereovee reoainete kontsentratsioonid

| Reoaine kontsentratsioon      | Tugevalt reostatud reovesi, mg/l | Keskmiselt reostatud reovesi, mg/l | Vähe reostatud reovesi, mg/l | Allikas |
|-------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------|---------|
| Olmereovesi, BHT <sub>5</sub> | 300                              | 200                                | 100                          | [67]    |
| Olmereovesi, BHT <sub>5</sub> | 400                              | 220                                | 110                          | [68]    |

Kui arvestada olmereovee BHT<sub>7</sub> koefitsientiga BHT<sub>7</sub>=1,15 BHT<sub>5</sub> [69], siis tabeli 20 põhjal saab järgmiseid BHT<sub>7</sub> andmeid: tugevalt reostatud reovee BHT<sub>7</sub>=345 mg/l, keskmiselt reostatud reovee BHT<sub>7</sub>=230 mg/l ja vähe reostatud reovee BHT<sub>7</sub>=115 mg/l (tabel 21).

Tabel 21. Arvutatud olmereovee BHT<sub>7</sub> väärtused.

| Reoaine kontsentratsioon      | Tugevalt reostatud reovesi, mg/l | Keskmiselt reostatud reovesi, mg/l | Vähe reostatud reovesi, mg/l |
|-------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Olmereovesi, BHT <sub>7</sub> | 345                              | 230                                | 115                          |
| Olmereovesi, BHT <sub>7</sub> | 460                              | 253                                | 127                          |

Kõrge BHT<sub>7</sub> vajab aereerimiseks rohkem hapnikku. Aereerimisedame Celpoxi keskmine energiatarve, s.o. keskmine energiakulu eraldatud BHT<sub>7</sub>- kilogrammi kohta, on 0,2- 0,5 kWh/kg BHT<sub>7</sub>. Tavalistel õhustussüsteemidel on see näitaja piirides 0,8 - 1,5 kWh/kg BHT<sub>7</sub>. [70]

Tugevalt reostatud olmereovee BHT<sub>7</sub> on umbes kolm korda madalam, kui piimatööstuste reovee BHT<sub>7</sub>. Seetõttu kulub piimatööstuse reovete aeratsiooniks ka energiat umbes kolm korda rohkem, kui olmereovee puhastamiseks. Piimatööstuste reovete aereerimiseks on vaja rohkem aereerimisseadmeid ja kulub rohkem elektrienergiat 1m<sup>3</sup> reovee töötlemiseks.



## KOKKUVÕTE

Piimatööstuste reoveed on väga kõrgete reostusainete kontsentratsioonide sisaldusega ja võivad sisaldada rasva ning mõnel juhul vadakut ja piima. Väga oluline on, et piimatööstuse reoveed saaksid korralikult puhastatud enne looduslike veekogudesse suunamist. Puhastamiseks kasutatakse kas piimatööstuse enda kohtpuhastit või kogutakse ja suunatakse reoveed ühiskanalisatsiooni. Piimatööstuste reovett ühiskanalisatsiooni võrku suunamisel peab reovesi vastama ühiskanalisatsiooni piinormidele. Piimatööstuse reovesi puhastamata kujul nende normidele üldiselt ei vasta ja puhastamata kujul ei ole seda ühiskanalisatsiooni võimalik juhtida. Reovees sisalduv rasv võib põhjustada trasside ummistusi ja kõrged reoainete kontsentratsioonid mõjutada vastuvõtva reoveepuhasti bioloogilise puhastuse tervist.

Piimatööstuste reovee puhastamine on tavaliselt mitmeetapiline protsess. Kui reovett suunatakse ühiskanalisatsiooni, siis piisab kolmest etapist. Nendeks tavaliselt on reovee ühtlustamine ja keemiline koagulatsioon ning flotatsioon. Piimatööstuse puhastamine kohtpuhastil võib koosneda mitmest etapist, mis sõltuvad konkreetse piimatööstuse reovee koostisest.

Puhastustehnoloogiate valik peaks lähtuma sellest, et piimatööstuse reoveed on tihti ebaühtlased nii koostise kui koguse poolest ning sõltuvad palju tootmistsüklitest. Antud töö raames uuritud piimatööstuse reovete puhastustehnoloogiatest on osad kasutusel ka Eestis, kuid on ka neid tehnoloogiad mida ei kasutata.

Füüsikalise-keemilise töötlemise viisidest on väga efektiivne keemilise sadestumine ja flokulatsiooni-flotatsiooniseadmed ning elektrokeemilised meetodid. Keemilise sadestumise ja flokulatsiooni-flotatsiooni tehnoloogia miinuseks on kasutatavate kemikaalide suur kulu ja kõrge hind. Parima efektiivsusega keemilise sadestumiseks kasutatav reagent oli raudkloriid. Üheks palju lubavaks ja soodsaks tehnoloogiaks osutus uuringu käigus elektrokeemiline koagulatsioon alumiinium elektroodide kasutamisel.

Aeroobsete variantidest on sobilikum annuspuhasti, kuna reovett saab puhastada annuste kaupa ja reguleerida puhasti parameetreid vastavalt antud reovee vajadustele. Läbivoolu aktiivmuda protsess on väga tundlik koormuste ja reovee koguste osas. Aktiivmudal põhinevatel protsessidel on autori soovitus kasutada viimaseks etapiks süvapuuhastust. Kuna aeroobsete protsesside puhastuse kulukus sõltub otseselt puhastatava reovee BHT kontsentratsioonist, siis on oluline

kasutada eelpuhastuse seadmeid ja valida neid selliselt, et toimuks võimalikult efektiivne BHT eemaldamine enne aeroobset puhastust. Kõrged BHT kontsentratsioonid vajavad aktiivmuda puhastuse korral suurt lahustunud hapniku hulka ja see omakorda kajastub kõrges elektritarbimises.

Anaeroobsetest tehnoloogiatest on palju lubav UAFB reaktor, mis on paindlik löökoormuste vastuvõtmiste ja seisaku perioodide suhtes ning selle käivitamisel esineb vähem probleeme.

Antud töös uuritud tehnoloogiatest sobiks kõige paremini piimatööstuste reovete puhastamiseks anaeroobsed UAFB ja UASB reaktorid või elektrokeemiline koagulatsioon ja aktiivmuda protsessil põhinev membraan annuspuhasti (MSBR). Autori andmetel ei ole Eestis kasutusel UAFB ja UASB reaktoreid ega keemilist koagulatsiooni, see tõttu on soovitus uurida tehnoloogilisi lahendusi ja tasuvust põhjalikumalt järgmistes töödes.

Piimatööstuste reovee temperatuur on üldiselt piisavalt kõrge, et tasuks ära soojusvahetuse süsteem. Vaid ühel antud töös uuritud ettevõttel on kasutusel reovee soojuse soojusvahetuse süsteem. Antud töös on reovee soojuse ja biogaasi potentsiaali uuritud andmete alusel nende ressurss arvestatava suurusega ja autori soovitus on võimalusel kasutada piimatööstuse reovee biogaasi ning soojuse potentsiaali.

Antud töö raames uuritud piimatööstuste reovete töötlemise viisidest ei ole ühelgi ettevõttel kasutatud anaeroobset reovee töötlemist. Anaeroobse töötlemise meetod on paljulubav ja vajab kindlasti tehnoloogiate valikul kaalumist. Samuti võimaldavad anaeroobse kääritamise UASB ja UAFB reaktorid biogaasi tootmist, mida saab kasutada kütuse allikana. Piimatööstuste reovee biogaasi potentsiaal jääb antud töös uuritud ettevõtetel üldiselt kasutamata.

## SUMMARY

Wastewater from dairy industries has very high concentrations of pollutants. Dairy industry wastewater contains fat and in some cases whey and milk. It is very important that wastewater from the dairy industry can be properly treated before being discharged into natural water bodies. Dairy wastewater can be treated on dairy industry local wastewater treatment plant or sewage is collected and sent to the public sewerage system. Wastewater from dairy industries when discharged into the public sewerage network must comply with the limit values for public sewerage. Wastewater from the dairy industry in unpurified form does not generally meet these norms, and it is not possible to manage it in unpurified form. The grease in the wastewater can cause blockages in the pipelines and high concentrations of pollutants affect the health of the biological treatment of the receiving wastewater treatment plant.

For the dairy industry's wastewater treatment, companies are faced with technological choices. Which wastewater treatment technologies to use and what would best suit their industry. This study explores possible technological solutions used in the world and compares them with the technologies used in Estonia. The work provides an overview of possible technologies used by the dairy industry to clean the wastewater. Technologies are presented in work-divided parts, such as physico-chemical and anaerobic and aerobic processes.

Some of the technologies used in Estonia have been described in the thesis, and for example the available wastewater treatment options of dairy industries are presented. Difficulties and peculiarities of the treatment of wastewater from the dairy industry have been discussed more frequently and some recommendations for the treatment of wastewater from the dairy industry are outlined.

Of the technologies studied in this work, anaerobic UAFB and UASB reactors or electrochemical coagulation and activated sludge process-based membrane dose cleaner (MSBR) would be best suited for the treatment of wastewater from dairy industries. According to the author, there are no UAFB and UASB reactors or chemical coagulation in Estonia, which is why it is recommended to study technological solutions and profitability more thoroughly in the following works.

The dairy industry's wastewater temperature is generally high enough to pay off the heat exchange system. Only one company studied in this work has a heat exchange system for wastewater. In this

work, based on the data of the heat and biogas potential of wastewater, their resource is considerable and the author's recommendation is to use the biogas and heat potential of the dairy industry, if possible.

No company has used anaerobic wastewater treatment to treat wastewater from dairy industries studied in this work. The method of anaerobic treatment is very promising and certainly needs consideration. The UASB and UAFB reactors for anaerobic digestion also allow biogas production that can be used as a fuel source. The dairy industry's waste water biogas potential remains largely untapped.

Key words: dairy wastewaters, physico-chemical treatment, aerobic treatment, anaerobic treatment.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] World Bank Group, „Dairy Industry,” *Pollution Prevention and Abatement Handbook*, lk. 295, 1998.
- [2] J. Lukk, „Piimatööstuse 2017. aasta ülevaade,” Maaeluministerium, 2018.
- [3] A. Kolev Slavov, „Dairy Wastewaters – General Characteristics and Treatment Possibilities – A Review,” *Food Technology and Biotechnology*, doi: 10.17113/ftb.55.01.17.4520, lk. 14-28, 2015.
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations, „Food Outlook,” 2018.
- [5] „Valio Eesti”, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.valio.ee/ettevottest/valio-eesti-tutvustus/>. [Kasutatud 13.03.2019].
- [6] „Epiim”, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.epiim.ee/ettevottest/>. [Kasutatud 12.03.2019].
- [7] „Tere Piim”, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tere.eu/ettevottest>. [Kasutatud 13.03.2019].
- [8] „Saaremaa piimatööstus”, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.saarejuust.ee/tootmine/>. [Kasutatud 14.03.2019].
- [9] „Farmi piimatööstus”, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.farmi.ee/>. [Kasutatud 12.03.2019].
- [10] „Estover Piimatööstus”, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.estover.ee/et/tootmine/>. [Kasutatud 12.03.2019].
- [11] Tetra Pak international SA, *Dairy Processing Handbook*, lk.380-486, 2015.
- [12] B. S. Shete ja N. P. Shinkar, „Dairy Industry Wastewater Sources, Characteristics & its Effects on Environment,” *International Journal of Current Engineering and Technology*, kd. 3, nr 5, lk. 1611-1615, 2013.
- [13] O. Cristian, „Characteristics of the untreated wastewater produced by food industry,” *Universităţii din Oradea*, kd. 15, lk 709-714, 2010.
- [14] U. B. Deshannavar, R. K. Basavaraj ja N. M. Naik, „High rate digestion of dairy industry effluent by upflow anaerobic fixed-bed reactor,” *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, kd. 4, nr 6, lk. 2895-2899, 2012.
- [15] J. I. Qazi, M. Nadeem, S. S. Baig, S. Baig ja Q. Syed, „Anaerobic Fixed Film Biotreatment of Dairy Wastewater,” *Middle-East Journal of Scientific Research*, kd. 8, nr 3, lk. 590-593, 2011.
- [16] D. P. Deshpande, P. J. Patil ja S.V. Anekar, „Biomethanation of Dairy Waste,” *Research Journal of Chemical Sciences*, kd. 2, nr 4, lk. 35-39, 2012.
- [17] M. Gotmare, R. M. Dhoble ja A.P Pittule , „Biomethanation of Dairy Waste Water Through UASB at Mesophilic Temperature Range,” *International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies*, kd. 8, nr 1, lk. 1-9, 2011.
- [18] R. Kabbout, M. Baroudi, F. Dabboussi, J. Halwani ja S. Taha , „Characterization, Physicochemical and Biological Treatment of Sweet Whey (Major Pollutant in Dairy Effluent),” *2011 International Conference on Biology, Environment and Chemistry*, Singapore, 2011.
- [19] G. Sathyamoorthy ja M. Saseetharan, „Dairy Wastewater Treatment by Anaerobic Hybrid Reactor – a study on the Reactor Performance and Optimum Percentage of Inert Media Fill inside Reactor,” *Res. J. Chem. Environ*, kd. 16, nr 1, lk. 51-56, 2012.

- [20] A. Arumugam ja P. L. Sabarethinam, „Performance of a threephase fluidized bed reactor with different support particles in treatment of dairy wastewater,“ *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, kd. 3, nr 5, lk. 42-44, 2008.
- [21] B. Demirel, O. Yenigun ja T.T. Onay, „Anaerobic treatment of dairy wastewaters: a review,“ *Process Biochemistry*, nr 40, lk. 2583–2595, 2005.
- [22] T. J. Britz, C. van Schalkwyk ja Y.-T. Hung, „Treatment of dairy processing wastewaters,“ *Waste Treatment on the food processing Industry*, lk 1-25, 2006.
- [23] Riigiteataja, „Reovee puhastamise ning heit- ja sademevee suublasse juhtimise kohta esitatavad nõuded, heit- ja sademevee reostusnäitajate piirmäärad ning nende nõuete täitmise kontrollimise meetmed,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/104122012001>. [Kasutatud 02.05.2019].
- [24] Riigiteataja, „Põlva valla ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni kasutamise eeskiri,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/403032018048>. [Kasutatud 20.04.2019].
- [25] Riigiteataja, „Põltsamaa valla ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni kasutamise eeskiri,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/428082018007>. [Kasutatud 20.04.2019].
- [26] М. Есин ja А. Ромашко, „Очистка сточных вод предприятий молочной промышленности,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <http://myproject.msk.ru/ru/my-project/stati/ochistka-stochnyh-vod-predpriyatij-molochnoj-promyshlennosti/>. [Kasutatud 18.03.2019].
- [27] M. Vourch, B. Balannec, B. Chaufer ja G. Dorange, „Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for water reuse,“ *Desalination*, nr 219, lk. 190–202, 2008.
- [28] E. Ramasamy, S. Gajalakshmi, R. Sanjeevi, M. Jithesh ja S. Abbasi, „Feasibility studies on the treatment of dairy wastewaters with,“ *Bioresource Technology*, nr 93, lk. 209–212, 2004.
- [29] T. Yonar, Ö. Sivrioğlu ja N. Özengin, *Physico-Chemical Treatment of Dairy Industry Wastewaters: A Review*, lk. 182-187, 2018.
- [30] „Wikipedia,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Streeter%E2%80%93Phelps\\_equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Streeter%E2%80%93Phelps_equation). [Kasutatud 02.05.2019].
- [31] J. D. Motta ja R. S. Parnas, „Creating Renewable Energy from the Effective Management of Fats, Oils, and Grease,“ *Water and Energy Conference*, 2015.
- [32] „JWC Environmental,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.jwce.com/knowledge-center/what-is-a-daf/>. [Kasutatud 28.04.2019].
- [33] U. Pathak, P. Das, P. Banerjee ja S. Datta, „Treatment of Wastewater from a Dairy Industry Using Rice Husk as Adsorbent: Treatment Efficiency, Isotherm, Thermodynamics, and Kinetics Modelling,“ *Journal of Thermodynamics*, kd. 2016, lk. 1-7, 2016.
- [34] G. M. Kamath, Dr. G. Narayana ja Dr. Y. R. Reddy, „Treatment of Dairy Wastewater Using Electrocoagulation,“ *International Journal of Recent Engineering Research and Development*, kd. 2, nr 8, lk. 93-99, 2017.
- [35] D. Sharma, „Treatment of dairy waste water by electro coagulation using,“ *International Journal of ChemTech Research*, kd. 6, nr 1, lk. 591-599, 2014.
- [36] A. Hamdani, M. Chennaoui, O. Assobhei ja M. Mountadar, „Dairy effluent characterization and treatment by coagulation decantation,“ *Le Lait*, kd. 84, nr 3, lk. 317-328, 2004.
- [37] Y. M. Dabhi, „Physicochemical treatment of dairy plant wastewater using ferrous sulfate and ferric chloride coagulants,“ *International Journal of Basic and Applied Chemical Sciences*, kd. 3, nr 4, lk. 9-14, 2013.

- [38] M. Loloei, H. Alidadi, G. Nekonam ja Y. Kor, „Study of the coagulation process in wastewater,” *International Journal of Environmental Health Engineering*, kd. 2, nr 5, lk. 17-21, 2013.
- [39] P. Dessai ja S. Prasanna, „Treatment of dairy wastewater using low cost adsorbents,” *IJSRET*, kd. 5, nr 12, lk. 592-593, 2016.
- [40] E. Kurzbaum ja O. Bar Shalom, „The potential of phosphate removal from dairy wastewater and municipal wastewater effluents using a lanthanum-modified bentonite,” *Applied Clay Science*, kd. 123, lk. 182-186, 2016.
- [41] A. Suarez, T. Fidalgo ja F. Riera, „Recovery of dairy wastewaters by reverse osmosis. Production of boiler water,” *Separation and Purification Technology*, kd. 133, lk. 204-211, 2014.
- [42] B. Sarkar, P. Chakrabarti, A. Vijaykumar ja V. Kale, „Wastewater treatment in dairy industries: Possibility of reuse,” *Desalination*, kd. 195, nr 1-3, lk. 141-152, 2006.
- [43] L. H. Andrade, F. D. S. Mendes, J. C. Espindola ja M. C. S. Amaral, „Reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreaktor and nanofiltration: technical and economic feasibility,” *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, kd. 32, 2015.
- [44] S. Tchamango, C. P. Nansu-Njiki, E. Ngameni, D. Hadjiev ja A. Darchen, „Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes,” *Science of the Total Environment*, kd. 408, lk. 947-952, 2010.
- [45] Y. Yavuz, E. Öcal, A. Koparal ja Ü. Öğütveren, „Treatment of dairy industry wastewater by EC and EF processes using hybrid Fe-Al plate electrode,” *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, kd. 86, nr 7, lk. 964-969, 2011.
- [46] T. Yonar ja O. Sivrioglu, „Electrochemical degradation of dairy effluent using novel Sn/Sb/Ni-Ti anodes,” *3rd International Conference on Electrochemistry*, Berlin, 2017.
- [47] V. Markou, M.-C. Kontogianni, Z. Frontistis, A. G. Tekerlekopoulou, A. Katsaounis ja D. Vayenas, „Electrochemical treatment of biologically pre-treated dairy wastewater using dimensionally stable anodes,” *Journal of Environmental Management*, kd. 202, lk. 217-224, 2017.
- [48] M. S. Melchior, M. Piovesan, V. R. Becegato, V. A. Becegato, E. B. Tambourgi ja A. T. Paulino, „Treatment of wastewater from the dairy industry using electroflocculation and solid whey recovery,” *Journal of Environmental Management*, kd. 182, lk. 574-580, 2016.
- [49] E. Bazrafshan, H. Moein, F. K. Mostafapour ja S. Nakhaie, „Application of Electrocoagulation Process for Dairy Wastewater Treatment,” *Journal of Chemistry*, kd. 2013, lk. 1-8, 2013.
- [50] J. P. Kushwaha, V. C. Srivastava ja I. D. Mall, „An Overview of Various Technologies for the Treatment of Dairy Wastewaters,” *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, kd. 51, nr 5, lk. 442-452, 2011.
- [51] E. Tilley, L. Ulrich, C. Lüthi, P. Reymond ja C. Zurbrügg, *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*. 2nd Revised Edition, Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, lk. 108-125, 2014.
- [52] Environmental Technology Business Forum, „Modified Upflow Anaerobic Sludge Bed,” 2003.
- [53] Francisco Omil, Juan M Garrido, Belén Arrojo ja Ramón Méndez, „Anaerobic filter reactor performance for the treatment of complex dairy wastewater at industrial scale,” *Water Research*, kd. 37, nr 17, lk. 4099-4108, 2003.
- [54] V. Kõrgmaa, „Reoveesette töötlemise strateegia väljatöötamine, sh ohutu taaskasutamise tagamine järelevalve tõhustamise, keemiliste- ja bioloogiliste indikaatornäitajate rakendamise ning kvaliteedi süsteemide juurutamise abil. II Etapp,” Eesti Keskkonnauuringute Keskus, lk. 22-101, 2010.

- [55] „Wastewater Engineering Group,” [Võrgumaterjal]. Available: [http://wastewaterengineering.com/sbr\\_sequencing\\_batch\\_reactors.htm](http://wastewaterengineering.com/sbr_sequencing_batch_reactors.htm). [Kasutatud 20.04.2019].
- [56] T.-H.Bae, S.-S. Han, T.-M.Tak „Membrane sequencing batch reactor system for the treatment of dairy industry wastewater,” *Process Biochemistry*, kd. 39, nr 2, lk. 221-231, 2003.
- [57] S. Sirianuntapiboon, N. Jeeyachok ja R. Larplai, „Sequencing batch reactor biofilm system for treatment of milk industry wastewater,” *Journal of Environmental Management*, kd. 76, lk. 177-183, 2005.
- [58] L. Loperena, M. Ferrari, A. Diaz, G. Ingold, L. Perez, F. Carvallo, D. Travers, R. Menes ja C. Lareo, „Isolation and selection of native microorganisms for the aerobic treatment of simulated dairy wastewaters,” *Bioresource Technology*, kd. 100, lk. 1762-1766, 2008.
- [59] G. Andreottola, P. Foladori, M. Ragazzi ja R. Villa, „Dairy wastewater treatment in a moving bed biofilm reactor,” *Water science and technology*, kd. 45, nr 12, lk. 321-328, 2002.
- [60] H. Fang, „Aerobic treatment of dairy wastewater,” *Biotechnology Techniques*, kd. 1 nr 4, lk. 1-4, 1990.
- [61] P. Bickers ja R. Bhamidimarri, „Aerobic treatment of reverse osmosis permeate in the dairy industry for reuse,” *Water science and technology*, kd. 38, nr 4-5, lk. 61-67, 1998.
- [62] M. Torrijos, P. Sousbie, R. Moletta ja J. Delgenes, „High COD wastewater treatment in an aerobic SBR: treatment of effluent from a small farm goat’s cheese dairy,” *Water Sci Technology*, kd. 50, nr 10, lk. 259-267, 2004.
- [63] X. Li ja R. Zhang, „Aerobic treatment of dairy wastewater with sequencing batch reactor systems,” *Bioprocess Biosyst Eng*, kd. 25, nr 2, lk. 103-109, 2002.
- [64] G. Vidal, A. Carvalho, R. Mendez ja J.M. Lema, „Influence of the content in fats and proteins on the anaerobic,” *Bioresource Technology*, kd. 74, lk. 231-239, 2000.
- [65] A. Kuusik, „Eksperdi arvamus Põltsamaa linna reoveepuhasti puhastusprotsessi häirete kohta,” 2006.
- [66] V. Kõrgmaa, T. Tenno, A. Kivirüüt, V. Värk, K. Karabelnik, P. Pitk ja E. Tõnisberg, „Lisa 6. Hinnangud reoveepuhastite projekteerimisele ja käitamisele,” Eesti Keskkonnauuringute Keskus, lk. 164-173, 2016.
- [67] O. Qteishat, S. Myszograj ja M. Suchowska-Kisielewicz, „Changes of wastewater characteristic during transport in sewers,” *Wseas Transactions on Environment and Development*, kd. 7, nr 11, lk. 349-367, 2011.
- [68] M. & Eddy, *Wastewater Engineering*, lk 109, 1991.
- [69] A. Maastik ja O. Sökk, *Reoveepuhasti operaatori õpik*, Tallinn: TTÜ Kirjastus, lk 19-22, 2009.
- [70] J.I.T, „Celpox tööpõhimõte,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://jit.ee/wp-content/uploads/2014/11/Broz-Celpox.pdf>. [Kasutatud 03.03.2019].