



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Energiatehnoloogia instituut

PUIDUKOOREPRESSI REOVEE KASUTAMISE VÕIMALUSED BIOGAASI TOORAINENA

UTILISATION OF WASTE WATER FROM BARK PRESSING AS FEEDSTOCK FOR BIOGAS

Üliõpilane: Sten Erik Tuuleveski
/nimi/

Üliõpilaskood 206484EACB

Juhendaja: Inna Kamenev, vanemlektor
/nimi, amet/

(Tiitellehe pöördel)

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.

“31.” mai 2024

Autor: Sten Erik Tuuleveski

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“31.” mai 2024

Juhendaja: Inna Kamenev

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

“.....”20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees Oliver Järvik

/ allkirjastatud digitaalselt /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Sten Erik Tuuleveski

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Puidukoorepressi reovee kasutamise võimalused biogaasi toorainena, mille juhendaja on Inna Kamenev,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Sten Erik Tuuleveski
31.05.2024

/allkirjastatud digitaalselt/

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Energiatehnoloogia instituut
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Sten Erik Tuuleveski, 206484EACB
Õppekava, peeriala: EACB, Keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia
Juhendaja(d): Inna Kamenev, vanemlektor, 56692170
Konsultant: Siim Tammeväli, arendusjuht
Combimill Sakala OÜ, 5567 4348, siim.tammevali@combimill.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Puidukoorepressi reovee kasutamise võimalused biogaasi toorainena
(inglise keeles) Utilisation of waste water from bark pressing as feedstock for biogas

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Koostada ülevaade Combimill Sakala OÜ saeveskis kasutatavast tehnoloogiast ja võimalike uuendustega
2. Koostada ülevaade biogaasi tootmisest
3. Analüüsida võimalust puidukoorepressi reovee kasutamiseks biogaasi tootmise lähtena
4. Kirjutada bakalaureusetöö

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Ülevaate koostamine Combimill Sakala OÜ saeveskis kasutatavast tehnoloogiast	21.02.2024
2.	Kirjutamine ülevaade koostamine biogaasi tootmisest	6.04.2024
3.	Puidukoorepressi reovee biogaasi tootmise toorainena kasutamise võimaluse analüüsimine	6.05.2024
4.	Bakalaureusetöö kirjutamine	28.05.2024

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "31."mai 2024.a

Üliõpilane: Sten Erik Tuuleveski.. ".....".....20.....a
/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Inna Kamenev. ".....".....20.....a
/allkirjastatud digitaalselt/

Konsultant: Siim Tammeväli ".....".....20.....a
/allkirjastatud digitaalselt/

Programmijuht: Oliver Järvik ".....".....20.....a
/allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

EESSÕNA	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
1. SISSEJUHATUS.....	8
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	9
2.1 Ettevõtte üldisloomustus	9
2.2 Biogaasi tootmise tehnoloogia	12
2.3 Anaeroobse kääritamise biogaasi tootmisel	16
2.3.1 Anaeroobse kääritamise mehhanism	16
2.3.2 Anaeroobset kääritamist mõjutavad faktorid	18
2.4 Biogaasi tootmine puidu- ja paberitööstuses.....	22
3. BIOGAASI TOOTMISE VÕIMALUSED PUIDUTÖÖSTUSE REOVEEST	26
3.1 Puidutööstuse ettevõttes kasutatav tehnoloogia	26
3.2 Männikoore pressimise reovee iseloomustus.....	31
3.3 Hinnangud biogaasi tootmise võimaluste kohta ettevõttes.....	34
KOKKUVÕTE	37
SUMMARY	38
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	39
LISAD	43

EESSÕNA

Käesolev keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia eriala bakalaureuseõppe lõputöö „Puidukoorepressi reovee kasutamise võimalused biogaasi toorainena“ on sooritatud Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia instituudis. Lõputöö teema pakuti välja ettevõtte Combimill Sakala OÜ poolt ning on seotud ettevõttes lahendamist vajavate probleemidega. Käesolevas töös uuriti koorepressist saadava reovee potentsiaali biogaasi toorainena.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks uurida, kas on võimalik Combimill Sakala OÜ puidutööstuse reovett kasutada biogaasi tootmiseks. Põhilised lähteandmed on pärit ettevõttest Combimill Sakala OÜ ning lõputöö koostamisel aitas kaasa ka Combimill Sakala OÜ arendusjuht Siim Tammeväli ning teised ettevõtte töötajad. Töö autor tänab neid ning oma juhendajat Inna Kamenevit lõputöö koostamise abistamisel. Samuti soovib autor tänada ka ettevõtet Saalasti OÜ.

Lühendite ja tähiste loetelu

BHT – biokeemiline hapnikutarve

B_R - mahukoormus

C – süsinik

c – orgaanilise aine kontsentratsioon

CFB - tsirkuleeriv keevkihtgaasistumisseade (circulating fluidised bed gasifier)

CH₄ - metaan

DFB - kaheosaline keevkihtreaktor (dual fluidized bed reactor)

ECSB - välimise ringlusega bioreaktor (external circulation sludge bed reactor)

GWh – gigavatt-tund

KA – kuivaine

KHT – keemiline hapnikutarve

m – lisatud substraadi mass ajaühikus

MW – megavatt

N – lämmastik

NH₄ – ammooniumlämmastik

P – fosfor

pm³ – puistekuupmeeter'

V – ööpäevas lisatud substraadi maht

V_R – käärimiskambri ruumala

VS – kuumutuskadu (volatile solids)

1. SISSEJUHATUS

Puidutööstus on Eesti üks suurim tööstussektor ning ekspordiallikas. Viimastel aastatel on aga selle sektori tulud langenud, mis on puidutööstuse ettevõtete tegevust raskendanud. Kuid halvem majandusolukord sunnib ettevõtteid oma tehnoloogilisi protsesse optimeerima ning ka uusi innovatiivseid lahendusi otsima, alates ladustumisala efektiivsemast kasutamisest kuni töötlusprotsesside automatiseerimiseni. Tulemusena vähenevad ettevõtte kulud, mis aitab hetke majanduslangust üle elada ning kasvu ajal paremat kasumit teenida.

Combimill Sakala OÜ on viimase kahe aasta jooksul otsinud efektiivsemat lahendust oma ladustumisaladele. Üks lahendustest on männikoore kiirem ning efektiivsem kasutamine, kasutades mehaanilist koorepressi. Sellise seadme kasutamisel tekib koore pressimisest saadav reovesi, mille käitlemine on Combimill Sakala OÜ-le probleemiks, kuna reovee jäätmejaama viimine on ettevõttele väga kulukas. Üks võimalikest lahendustest oleks reovee utiliseerimine biogaasi toorainena ettevõtte siseselt. Kui biogaasi tootmine on võimalik, siis see võimaldaks Combimill Sakala OÜ-l lahendada reovee käitlemisega seotud probleemid, annaks ettevõttele uue soojusenergia allika ning samuti väheneks jäätmekogus ja läbi selle ka ettevõtte keskkonnajälg.

Seega, käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on uurida, kas on võimalik Combimill Sakala OÜ puidutööstuse reovett kasutada biogaasi tootmiseks.

2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Käesolevas peatükis esitatakse ettevõtte üldiseloostus ja selgitatakse puidutööstuse reoveest biogaasi tootmise vajadust. Samuti antakse ülevaade biogaasi tootmise rakendustest puidu- ning paberitööstuse ettevõtetes ning biogaasi tootmise etappidest ja anaeroobse kääritamise mehhanismist.

2.1 Ettevõtte üldiseloostus

Combimill Sakala OÜ asub Suure-Jaani vallas, Kõidama külas, 110 000 m² suurusel tootmisalal ning pakub tööd 53 töötajale [1].

Combimill Sakala OÜ alustas tegevust 2012. aastal pärast endise Sakala Saeveski AS-i varade ostmist. Varem tegutses sellel territooriumil alates 1947. aastast Suure-Jaani metsamajand, mis tegeles nii metsamajandamisega kui ka puidu töötlemisega. Peale nimetatud ettevõtete on territooriumil veel tegutsenud palju erinevaid ettevõtteid, mis samuti tegelesid puidutöötlemisega [2].

Combimill Sakala OÜ on Combiwoodi gruppi kuuluv saeveski. Peamisteks tegevusvaldkondadeks on männi ümarpalgist servatud saematerjali ehk laudade ning prusside lõikamine. Samuti tegeletakse saematerjali kuivatamise ja sorteerimisega [2].

Ettevõttes toodetud materjalist läheb ligikaudu 95% Eestis asuvatele järeltöötlejatele, ukse- ja akna-, komponendi- ning liimpuitkilbitehastesse. Tootmismahud on viimastel aastatel jäänud 120 000 – 130 000 m³ vahele. Tabelis 2.1 on esitatud saematerjali tootmismahud aastatel 2020 – 2023 [1].

Tabel 2.1 Combimill Sakala OÜ saematerjali tootmismahud 2020 – 2023 [1]

Aasta	Maht [m ³]
2020	122 544
2021	128 807
2022	122 444
2023	113 291

Kõrvaltoodangu tootmismahud tabelis 2.2 näitavad, et viimaste aastate jooksul on saepuru ja hakkpuidu toodang praktiliselt samaks jäänud, aga männikoore tootmismahud

on kasvanud viimaste aastatega märkimisväärselt. Männikoore mahu kasvu seletab uus koorija, mis soetati 2021. aastal.

Tabel 2.2 Combimill Sakala OÜ kõrvaltoodangu tootmismahud aastatel 2020 - 2023 [1]

Liik	2020	2021	2022	2023
Koor [pm³*]	38 576,5	47 645,0	50 139,5	44 034,5
Puru [pm³]	102 594,0	110 299,0	108 174,0	97 268,3
Hakkpuut [pm³]	163 194,0	168 484,0	162 797,0	149 885,7

*pm³ – puistekuupmeeter, ühe m³ suurusel mahus vabalt sisalduv puitkütuse (tavaliselt hakkepuidu aga ka halgude) kogus [3].

Kõik Combimill Sakala OÜ-sse sisenevad ümarpalgid ladustatakse alguses kindlal alal. Seejärel need sorteeritakse ning saadetakse koorimisliinile. Koor ning muu kõrvaltoodang saadetakse katlamajja kütuseks ning palk liigub edasi saeliini, kus seda ka edasi töödeldakse.

Combimill Sakala OÜ kasutab kahte alaliselt männikoorel töötavat biokatelt võimsustega 3,5 ja 2,8 MW, mille põhieesmärgiks on toota soojusenergiat saematerjali kuivatamise tarbeks. Samuti kasutatakse saadud soojusenergiat kontoriruumide ning tootmistehaste kütmiseks. Biokatelde kütmiseks saadakse toorainet ümarpalgi koormisest, tootmisliinide alt, praagist ning hakkurist.

Biomassi kasutava katlamaja kasutamisel tuleb arvestada, et koos kütusehoidlaga vajab selline katlamaja suuremat tööala kui fossiilkütusel töötav ekvivalentne katlamaja. Enamikul juhtudel on võimalik välja vahetada fossiilkütuste katlad biokateldega minimaalse pindala muutusega, aga kütusehoidla nõuab lisaruumi. Samuti tuleb biokatelde kasutamisel arvestada tuha eemalduse ning paigutusega [4].

Combimill Sakala OÜ-s kasutatakse hetkel kütusehoidlana aunasid, mille kogupindala ettevõtte territooriumil on ligikaudu 6300 m². Aunade kõrgus võib mõnes kohas ulatuda kuni 4 meetrini. Aunade ladustamisala piirid on asendiplaanil (joonis 2.1) näidatud punaste joontega.



Joonis 2.1 Aerofoto aunade ladustamisaladest [1]

Seoses kõrvaltoodangu viimaste aastate kõrgemate mahtudega on ettevõttel probleem nii palkide kui ka katla kütuse jaoks täiendava ladustamisala leidmisega. Kuna ettevõtte territooriumi laiendamine on keeruline ja kulukas protsess, siis otsitakse efektiivsemat lahendust hetkel olemasolevatele ladustamisaladele.

Üks idee on kasutada mehaanilist koorepressi, mis lubaks vähendada aega, mis kulub männikoorel ümarpalgi koorimisalalt biokatlasse jõudmiseks. Kiirem koore töötlemine lubaks vähendada aunade ladustamisala, mis looks rohkem ruumi palkide hoiustamiseks ning see omakorda suurendaks ettevõtte produktiivsust ja ühtlasi ka ettevõtte majandusliku tulu.

Tööstusliku koorepressimise patente esitati juba 1920-ndatel aastatel. Biomassi tahendamise tehnoloogia seisneb selle pressimises läbi pikliku silindri. Kaasajal Skandinaavias kasutatav tehnoloogia seisneb Soome ettevõtte Saalasti patendil, kus puukoor tahendatakse pressimisega kõrgel rõhul kahe ekstsentrilise rulli vahel, millest üks on avadega ja kuhu voolab biomassist väljapressitav reovesi [5].

Investeeringes ja mehaanilise pressi kasutusele võttes tekib reovee käitlemise probleem. Combimill Sakala OÜ prognoosib, et kasutades koorepressi tekib nende viimaste tootmismahude andmetel umbes 200 t reovett. Ligikaudu 8,5 t sellest hulgast saaks Combimill Sakala kasutada oma puidukuivatites puidu niisutamiseks, mis on osa

saematerjali valmistamise eeltötlusest. Ülejäänud reovee käitlemiseks ettevõttel hetkel kindel plaan puudub.

Üheks võimalikuks lahenduseks on tekkinud reovee kasutamine biogaasi tootmise toorainena. Seoses sellega on käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks analüüsida võimalust toota biogaasi Combimill Sakala OÜ tootmises tekkinud reoveest.

2.2 Biogaasi tootmise tehnoloogia

Biogaas on orgaaniliste ainete (biojätmete) anaeroobse käärimise tulemusena tekkiv gaas, mis koosneb põhiliselt süsinikdioksiidist ja metaanist. Biogaasi puhastamise ja väärindamise produktiks on biometaan ehk nn rohegaas [6].

Biogaasi tootmisel võivad lähteaineteks olla biojätmed, reovesi ja reoveesete, põllumajandusjätmetest ning erinevat päritolu biomassi. Biogaasi koostis on järgmine: 50–70% metaani (CH₄), 30–40% süsinikdioksiidi (CO₂) ja teised gaasilised komponendid nagu näiteks vesinik H₂, ammoniaak NH₄ ja divesiniksulfiid H₂S [6]. Biogaasi koostist on esitatud ka tabelis 2.3.

Tabel 2.3 Biogaasi ja biometaani koostis [6]

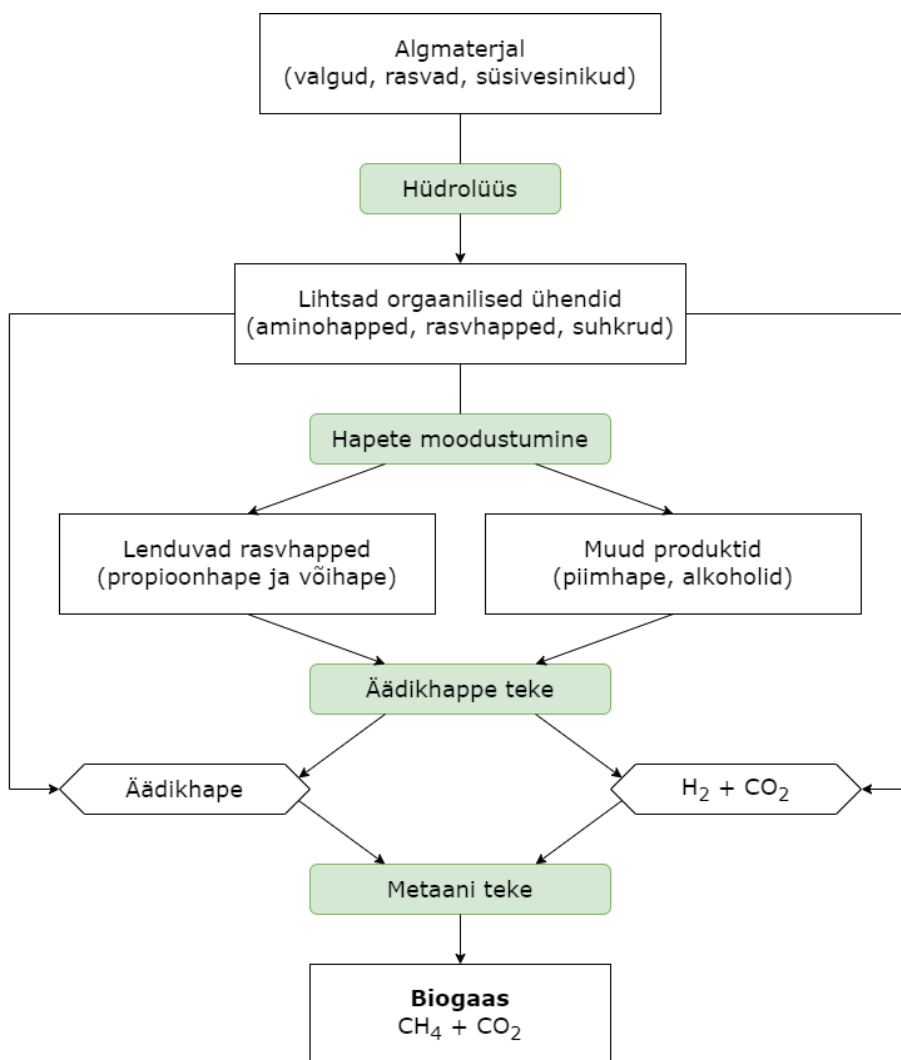
Aine	Kontsentratsioon biogaasis, % (maht)	Nõutav kontsentratsioon biometaanis, % (maht)
CH₄	50 - 75	> 90
CO₂	25 - 45	< 2,5
H₂	< 1	< 0,1
NH₄	< 2	< 0,02
H₂S	< 1	< 0,00003

Biogaasi on võimalik saada loomuliku protsessi käigus soodest, rabadest ja prügilatest ning spetsiaalseid kääriteid kasutades sõnnikust, reoveest, rohtsest biomassist ja teistest biolagunevatest jätmetest [6]

Biogaas on gaas, mis tekib orgaaniliste ainete anaeroobsel biooksüdatsioonil ehk käärimisprotsessil. Esimeses etapis muudetakse hüdrolüüsil algmaterjal (nt süsivesinikud, valgud, rasvad) lihtsamateks orgaanilisteks ühenditeks (nt aminohapped, suhkrud, rasvhapped). Selles sammus osalevad bakterid toodavad ensüüme, mis protsessi biokeemiliselt teostavad [7].

Tekkinud vaheproduktid lagundatakse atsidogeneesiprotsessis happeid tootvate bakterite abil edasi lenduvateks orgaanilisteks hapeteks (äädik-, propioon- ja võihappeks) ja süsihappegaasiks ning vesinikuks. Lagundamise ajal tekib vähesel määral ka alkohole ja piimhapet [7].

Tekkinud produktid liiguvad atsetogeneesiprotsessi, kus bakterite abil saadakse biogaasi eelaineid (äädikhape, vesinik, süsihappegaas). Äädikhapetakterid peavad moodustama tiheda elukeskkonna metaanibakteritega, kuna liiga kõrge vesinikusisaldus on kahjulik äädikhapet tootvatele bakteritele. See on vajalik vesinikust metaani tekkeks ning sobiva elukeskkonna loomiseks happeid tootvatele bakteritele. Viimases etapis, metanogeneesiprotsessis, tekib atsetogeneesi produktidest metaan [7]. Joonises 2.2 on välja toodud lihtsustatud skeem biogaasi tekkest.



Joonis 2.2 Lihtsustatud skeem biogaasi tekkest [7]

Kääriti (reaktor) on biogaasi tootmise põhiseade. Tänapäeval on kasutusel järgmised käärititüübid [6]:

- standardtootlikkusega kääriti;
- kõrge tootlikkusega kääriti;
- kaheastmeline kääriti;
- mesofiilne kääriti;
- termofiilne kääriti.

Kääritis genereeritud gaas juhitakse tavaliselt gaasihoidlasse ning sealt koostootmisjaama või puhastusseadmesse, kus biogaasist saadakse soojust, elektrit või mootorikütust. Biogaasi kütteväärtus on 5-7 kWh/m³. Kütteväärtus sõltub metaani kontsentratsioonist antud biogaasis. See omakorda sõltub tooraine toitainete sisaldusest, niiskusest ja jäätme tüübist. Biogaasikääritist väljuv kääritusjääk suunatakse hoidlatesse või edasisesele töötlusele [6].

Jäätmete kasutamine biogaasi tootmise toorainena võimaldab täiendada reoveepuhastusjaamade tehnoloogiat ning hoida kokku raha, materjali ja energiat, kui jäätmete töötlemine toimub nende tekkekohas. Samuti ei sõltu biogaasi tootmine fossiilkütuste kaevandamisest [8].

Positiivne on ka asjaolu, et biogaasi tootmise kääritusjääk on vähem ebameeldivate lõhnaga kui näiteks reoveepuhastite jääkmuda (s.t on võimalik vähendada atmosfääri saastet). Samuti on kääritusjärgis vähenenud patogeenide, umbrohuseemnete jne hulk. Kääritusjärgist on võimalik toota orgaanilist väetist [6].

Kuna CH₄ neelab soojuskiirgust 20-30 korda rohkem kui CO₂, siis jäätmete kasutamine biogaasi saamiseks on tunduvalt keskkonnasõbralikum kui nende jäätmete lagunemine prügilates, kus tekkiv metaan eraldub atmosfääri ning on seal kahjulikum kui CO₂. CO₂, mis tekib biogaasi põletamisel on ohutum kasvuhoonegaas kui metaan [8].

Biogaasi saab toota põhimõtteliselt kahe tootmisprotsessiga [7]:

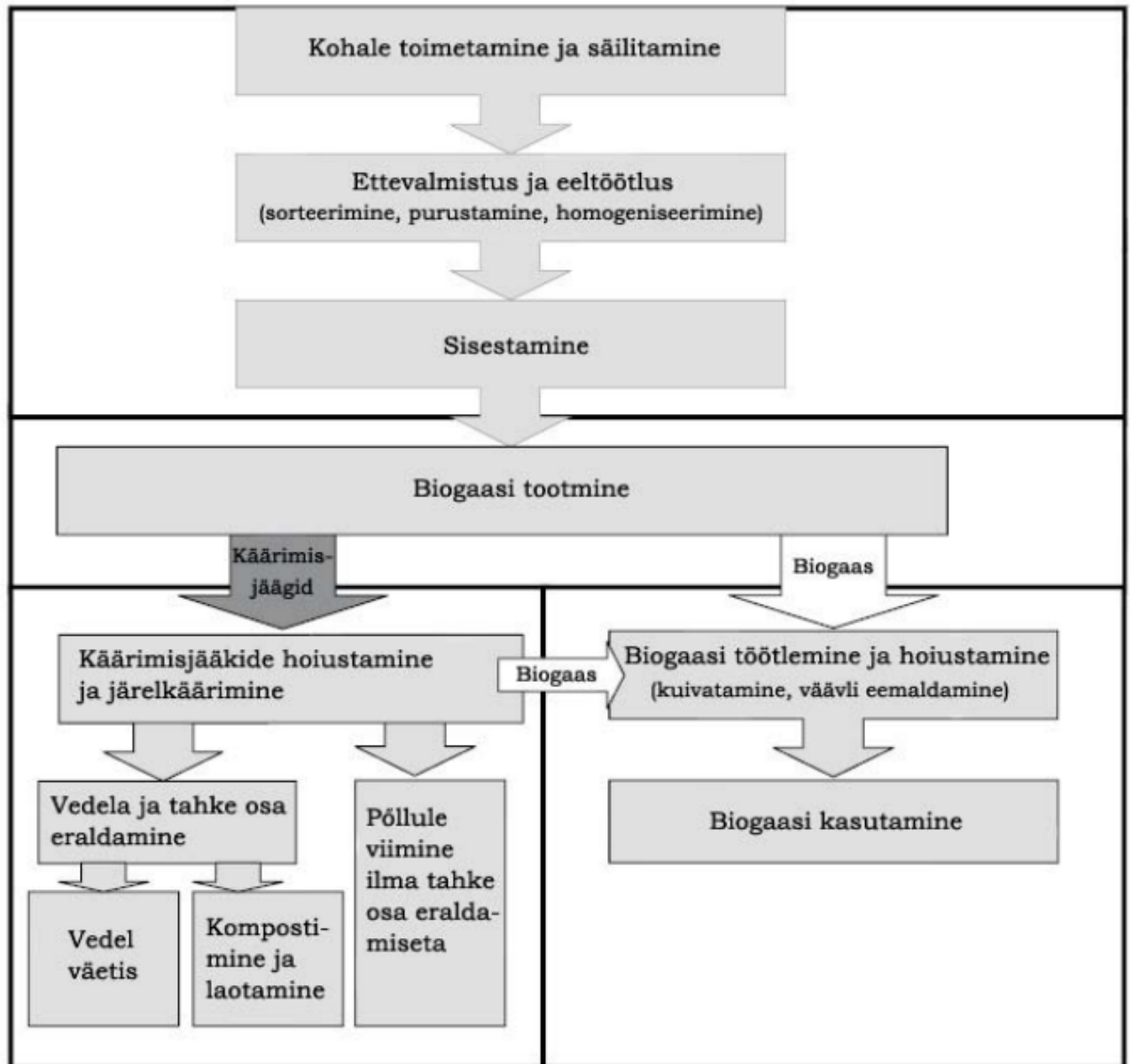
- biogaasi tootmine üheastmeliselt, ühes käärimiskambris;
- biogaasi tootmine kaheastmeliselt s.t hüdroolüüs ja atsidogenees toimuvad eraldatud kambrites (erinevate optimaalsete tingimuste tõttu).

Eelnevalt kirjeldatud biogaasi tootmistehnoloogia koosneb põhimõtteliselt neljast etapist [7]:

1. Tooraine transport, hoiustamine eeltöötlemine ja sisestamine.
2. Anaeroobne kääritamine, biogaasi genereerimine kääritis (reaktoris).

3. Biogaasi puhastamine ja kasutamine.
4. Kääritusjäägi ladustamine ja kasutamine.

Joonisel 2.3 on esitatud biogaasi tootmistehnoloogia üldskeem.



Joonis 2.3 Biogaasi tootmistehnoloogia üldskeem [7]

2.3 Anaeroobse kääritamine biogaasi tootmisel

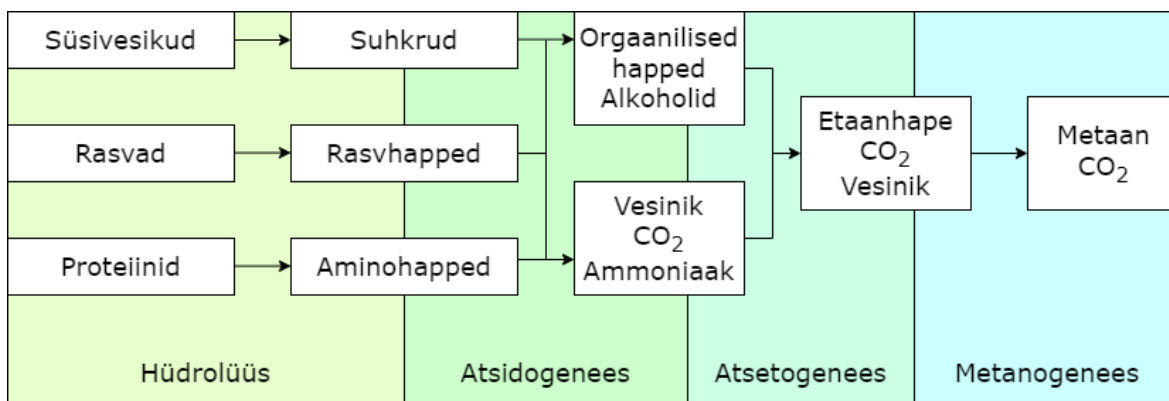
2.3.1 Anaeroobse kääritamise mehhanism

Anaeroobse kääritamise s.o orgaanilise aine anaeroobse biolagundamise saab jagada neljaks erinevaks etapiks, mille käigus orgaaniline aine muundatakse biogaasiks.

Anaeroobse kääritamise etapid on järgmised:

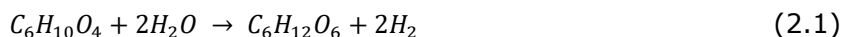
- hüdroolüüs;
- fermentatsioon ehk atsidogenees;
- atsetogenees;
- metanogenees.

Joonisel 2.4 on näidatud orgaaniliste ainete anaeroobse käärimise etapid.



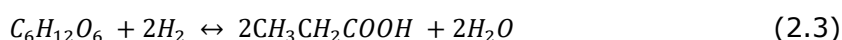
Joonis 2.4 Orgaanilise ainete käärimise etapid [7].

Hüdroolüüsil lagundatakse orgaanilised polümeerid lahustuvateks monomeerideks. Süsivesikud, rasvad ja proteiinid lagundatakse vastavalt suhkruteks, pikaahelalisteks rasvhapeteks ning aminohapeteks [9]. Hüdroolüüsil toimuvad ensüümreaktsioonid, mis toimuvad tänu mikroorganismide poolt toodetud rakuvälistele ensüümidele [10, 11]. Orgaaniliste ainete lagunemine glükoosiks toimub järgmiselt [9]:

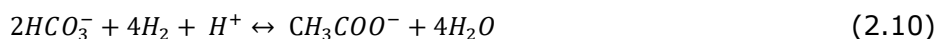
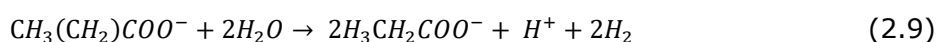
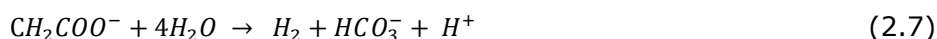
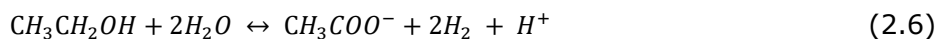
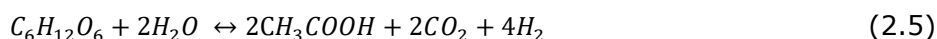


Hüdroolüüsi kiirus oleneb osakeste suuruselt, pH-st, ensüümide tootlikkusest ja nende difusioonist ning adsorptsioonist hüdroolüüsitava materjali osakeste pinnale [12].

Fermentatsioonil lagundatakse hüdroolüüsil tekkinud produktid lenduvateks orgaanilisteks hapeteks, süsihappegaasiks ja vesinikuks. Vähesel määral tekib ka alkohole ja piimhapet ning fermentatsioonil tekivad ka NH₃ ja H₂S [9, 13]:



Atsetogeneesi toimub orgaanilistest hapetest kui ka süsihappegaasist äädikhappe süntees. Selles etapis muundatakse lenduvad rasvhapped ning alkoholid atsetaadiks ja vesinikuks. Vastavad reaktsioonivõrrandid on järgmised [9, 13]:



Süsihappegaasi tarbivad anaeroobsed mikroorganismid, mistõttu on H_2 kui vaheprodukti kontsentratsioon anaeroobse kääritamise jaoks olulise tähtsusega. Reaktsioon toimub vaid siis, kui H_2 osarõhk on piisavalt madal [14].

Metanogeneesi muundatakse atsetaadi, vesiniku, süsihappegaasi, metanaadi ja teised ühesüsinikulised ühendid metaaniks, mis liiguvad gaasifaasi. Anaeroobses keskkonnas toodetakse metaani peamiselt kolme protsessiga [9]:

- atsetaadi lagundamine metaaniks ja süsihappegaasiks



- süsihappegaasi taandamine metaaniks

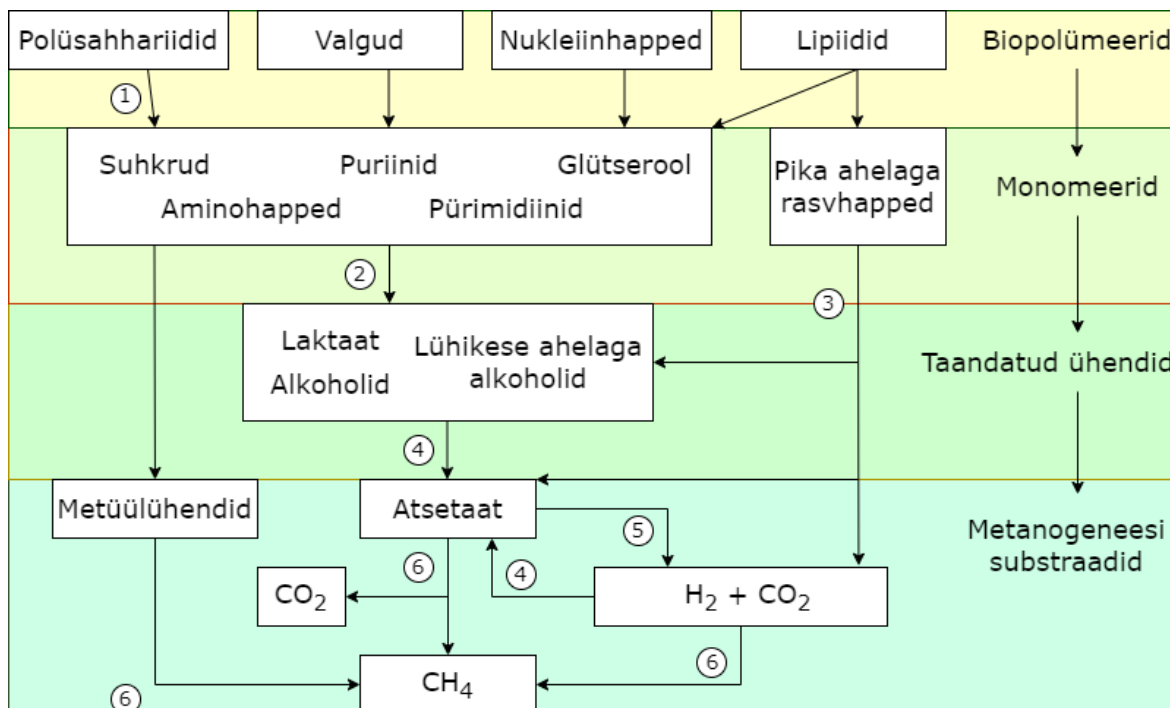


- metüleeritud süsinikuühendite muundamine metaaniks



70% metaani kogutoodangust maailmas saadakse atsetaadi lagundamisest. Ainult 30% toodetud metaanist tekib vesinikust, süsihappegaasist või metanaadist [12].

Kõik eelnevalt välja toodud reaktsioonid ning lagundamise etapid on näidatud ka alloleval orgaanilise aine anaeroobse lagundamise skeemil (joonis 2.5).



Joonis 2.5 Orgaanilise aine anaeroobse lagundamise tähtsamad etapid. (1) depolümeriseerumine ja hüdrolyüs, (2) fermentatsioon, (3) β -oksüdatsioon, (4) atsetogenees, (5) atsetaadi oksüdatsioon, (6) metanogenees [15]

2.3.2 Anaeroobset kääritamist mõjutavad faktorid

Eduka anaeroobse kääritamise teostamiseks on vaja arvestada mitmete faktoritega, mis kogu protsessi oluliselt mõjutavad. Optimaalsetel tingimustel läbi viidud anaeroobse kääritamise tulemusena saadakse toorgaas, mille koostis on esitatud tabelis 2.4.

Tabel 2.4 Toorbiogaasi koostis [16]

Aine	Nimetus	Sisaldus, % (maht)
CH ₄	Metaan	50-75
CO ₂	Süsinikdioksiid	25-45
H ₂ O	Veeaur	2-7
O ₂	Hapnik	<2
N ₂	Lämmastik	<2
NH ₃	Ammoniaak	<1
H ₂	Vesinik	<1
H ₂ S	Divesiniksulfiid	<1

Järgnevalt kirjeldatakse erinevate faktorite mõju anaeroobsele kääritamisele.

Hapniku kontsentratsioon käärituskambris, mida tuleb hoida nii nullilähedaselt, kui võimalik või üldse olematuna. Niikaua, kui hapniku tase jääb sellesse vahemikku, suudavad substraati lagundavad bakterid kääriskambris hapniku ära kasutada enne, kui hapnikku mitte taluvad bakterid kahjustada saavad.

Temperatuur peab olema protsessi jaoks sobivas vahemikus. See sõltub bakteritüüpidest, mida kasutatakse käärimisprotsessis. Temperatuuri jäämine kõrgemale või madalamale optimaalsest temperatuurist toob kaasa bakterite elutegevuse inhibeerumise või mõningatel juhtudel isegi bakterite pöördumatud kahjustused. Optimaalse temperatuurivahemiku järgi eristatakse kolme erinevat gruppi baktereid:

- psührofiilsete ehk külmalembeliste bakteritele on sobiv temperatuurivahemik umbes 25 °C. Sellel temperatuuril ei toimu käärimiskambri soojendamist, substraadi lagunemiskiirus on madal ning gaasiteke on pidurdatud;
- mesofiilsete bakterite jaoks optimaalne temperatuur jääb 32 – 42 °C vahemikku. Suurim osa metaani tootvatest bakteritest elavad selles temperatuuri vahemikus. Enamus seadmetes on temperatuur selles vahemikus, et tagada kõrge saagisega gaasi teke ning protsessi stabiilsus;
- termofiilsete ehk soojalembeliste bakterite jaoks on ideaalne temperatuur vahemikus 50 – 57 °C. Seda temperatuurivahemikku kasutatakse substraadi puhastusprotsessis, kus eemaldatakse tervist ohustavad haigusetkitajad või substraatidel, mis ise on kõrge temperatuuriga. 50 – 57 °C vahel tekib ka kõige rohkem gaasi, kuid tuleb arvestada ka käärimisprotsessi suurema energiakuluga ning madalama protsessi stabiilsusega.

pH sobiv vahemik on hüdrofüüsi- ning atsidogeneesi protsessis 4,5 – 6,3. pH võib ka kõrgem olla, kuid see toob kaasa protsesside aktiivsuse languse. Äädikhapet ja metaani tootvad bakterid vajavad elutegevuseks pH vahemiku 6,8 – 7,5. Madalama pH juures on metaanibakterite elutegevus on pärssitud ning substraatide lisamine sel juhul tuleb lõpetada, et metaanibakterid saaksid aega happeid lagundada.

Süsiniku ja lämmastiku vahekord. Tooraine C:N on oluline protsessi stabiilses toimimises. Kõrge C ja väikese N korral ei suudeta protsessis olevat süsinikku täielikult vabastada ja metaani tekib vähemal määral. Vastupidisel juhul tekib ammoniaak, mis juba väikestel kontsentratsioonidel inhibeerib bakterite kasvu või hävitab nende populatsiooni täielikult. Optimaalne on hoida toitainete C:N:P:S suhet järgmisena 600:15:5:1. See tagab jätkusuutliku bakterite elutegevuse.

Lähteaine massi kuivainesisaldus käärimiskambris on tähtis, kuna selle järgi otsustatakse, kas toimub kuiv- või märgkääritamine. Märgkääritamine on teostatav, kui kääritatava materjali kuivainesisaldus on väiksem kui 15%. Kõrgema kuivaine sisalduse korral pole mass enam pumbatav.

Inhibiitorid on ained, mis juba väiksemates kontsentratsioonides mõjuvad bakteritele mürgiselt ning mõjutavad protsessi negatiivselt. Inhibiitoreid võivad sisaldada lähteained ning neid võib potentsiaalselt tekkida ka protsessi jooksul. Bakterite elutegevust takistavateks inhibiitoriteks on näiteks ammoniaak, antibiootikumid, lahustid, raskmetallid. Nende inhibiitorite kontsentratsioonide piirväärtusi on keeruline määrata, kuna erinevate ainete inhibeeriv toime sõltub paljudest erinevatest faktoritest.

Käärimiskambri mahukoormus ja viibeaeg

Biogaasijaamade ehitamisel tuleb tagada optimaalne investeringute maht ühe m³ tekkiva biogaasi tekkimiseks. Selleks, et tooraine potentsiaal biogaasi toorainena täielikult ära kasutada, on vaja pikka viibeaega käärimiskambri ning selletõttu ka suurema mahuga reaktoreid ja mahuteid biogaasi hoiustamiseks. Nende faktorite optimumi leidmiseks on loodud kaks eksploatatsiooniparameetrit, mahukoormus ja hüdrauliline viibeaeg [7].

Mahukoormus näitab, mitu kilogrammi orgaanilist kuivainet käärimiskambri ruumalaühiku (m³) kohta ajaühikus (päev) töödelda saab (võrrand 2.16) [7]:

$$B_R = \frac{m \cdot c}{V_R}, \quad (2.16)$$

kus B_R – mahukoormus, kg/m³*p

m – lisatud substraadi kogus ajaühikus, kg/p

c – orgaanilise aine kontsentratsioon, %/100

V_R – käärimiskambri ruumala, m³

Hüdrauliline viibeaeg on substraadi käärimiskambri viibimise aeg sisestamisest kuni väljumiseni (võrrand 2.17) [7]:

$$HVA = \frac{V_R}{V}, \quad (2.17)$$

kus HVA – hüdrauliline viibeaeg

V_R – käärimiskambri ruumala, m³

V – ööpäevas lisatud substraadi maht, m³/p

Mahukoormuse suurenemisega saab käärimiskambri viia rohkem substraati ning seejuures väheneb viibeaeg. Käärimisprotsessi stabiilsuse tagamiseks on vaja valida optimaalne hüdrauliline viibeaeg, kus kambri sisu pideva vahetamisega ei viiks välja rohkem baktereid, kui neid juurde kasvab. Viibeaeg peab olema kasutatava lähteainega piisavalt pikk, et saada kõrgem biogaasi saagis, kuna lühikese viibeajaga ei jõua bakterid oma töö lõpetada, mis omakorda tähendab substraadi poolikut lagunemist.

Teades lisatava substraadi kogust, saab selle lagunemiskiiruse ning viibeaja abil arvutada ka vajaliku käärimiskambri mahu [7].

Biogaasi tootmise lähteaine

Biogaasi on kõige kasulikum toota orgaanilistest ühenditest, mis on jääktoormetes ning mis ootavad edasist utiliseerimist. See põhimõte teeb biogaasi soodsaks nii majanduslikust kui ka keskkondlikust aspektist [17].

Biogaasi saagis ning kvaliteet sõltub suurel määral lähteainetest. Biogaasi koostis mõjutab omakorda edasist biogaasist biometaanitootmist. Lähteaineks sobib enamik biomassi liike [18].

Euroopas enim biogaasi tootmiseks kasutatavad biomassi kategooriad on järgmised [16]:

- toiduproduktide tootmisjäätmel;
- puu-, juur- ja teraviljade ning toiduõlide tootmisjäätmel;
- suhkru tootmise tööstusjäätmel;
- piimatoodete tööstusjäätmel;
- pagaritoodete jäätmel;
- alkoholsete ja mitte-alkohoolsete jookide tootmisjäätmed;
- puidu- ja mööblitööstuse ning paberi- ja tselluloositööstuse jäätmel;
- tekstiilitööstuse, naha ja karusnaha töötlemise jäätmel;
- vee ja reovee- ja vee puhastamine ja töötlemine aeroobsete ning anaeroobsete protsesside jäätmel;
- munitsipaalbiojäätmel.

Nõuded kääritusseadmetele

Kääritusseadmetele on olemas ka teatud nõuded. Nad peavad tagama anaeroobsed tingimused seadmes tegutsevatele mikroorganismidele ning vastu pidama rõhu kõikumistele. Samuti on vaja saavutada biogaasi tootmiseks ja bakterite aktiveerimiseks keskkonnas temperatuur vähemalt 20°C, sest käärimisprotsessis osalevad mikroorganismid on temperatuuri suhtes tundlikud [18].

Peamisteks probleemideks anaeroobsel töötlemisel on selle metanogeensete organismide aeglane kasv ning protsessi stabiilsust mõjutavad ühendid biomassis või nende üleküllastumine töötlemisel. Aeglast kasvu saab kiirendada kasutades kääriteid, milles biomassi viibimisaeg on pikem, ning substraatide üleküllasust saab vältida kontrollides selle vooluhulka [19].

2.4 Biogaasi tootmine puidu- ja paberitööstuses

Eestis on 2024.a seisuga 20 aktiivset biogaasi tootvat ettevõtet, kuid ainult üks neist, Estonian Cell AS, on seotud puidutööstusega. Estonian Cell AS toodab põhiliselt haavapuitmassi, mida kasutatakse paberi ning kartongi tootmiseks, kuid on ühtlasi ka Eesti suurim biogaasi tootja, kuigi biogaasist toodetud elektrienergiat võrku ei anta. [6].

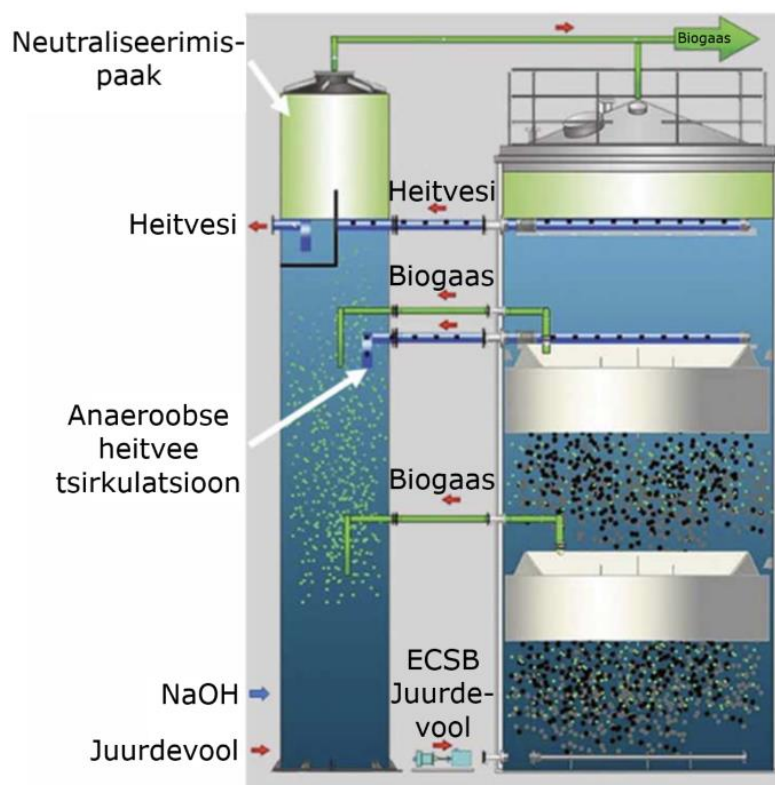
Biogaasi tootmine Estonian Cell AS-s

Estonian Cell AS toodab biogaasi juba aastast 2014 ning aastast toodavad nad reovee jäätmetest kuni 8 miljonit m³ 75% metaanisisaldusega biogaasi. Ettevõtte toodetava biogaasi energeetiline väärtus on enam 50 GWh aastas. Protsessis toodetav biogaas tarbitakse soojusenergiana ettevõttesiseselt ära või tarnitakse see oma partneritele, kes väärindavad selle maagaasi ekvivalendiks ehk biometaaniks [20].

Biogaasi tootmise toorainena kasutab ettevõtte puitmassi töötlemisest tulenevat reovett ning selle setteid, mida töödeldakse anaeroobselt territooriumil olevas veepuhastusjaamas [21].

Üks tehnoloogiatest, mida Estonian Cellis biogaasi tootmiseks kasutatakse on ECSB-reaktor (välimise ringlusega bioreaktor). ECSB süsteem koosneb kahest osast – neutraliseerimispaagist ja granuulmudaga põhireaktorist. Kõigepealt eeltöödeldakse reovesi ning suunatakse neutraliseerimispaaki. Retsirkulatsioonipump pumpab seejärel reovee graanulmuda kihti, mis asub ECSB-reaktori põhjas. Reovesi liigub reaktori ülemisse ossa läbi faasiseparaatorite, mis püüab anaeroobset biomassi ning toimub saasteainete lagundamine, s.t keemilise hapnikutarbe (KHT) vähendamine. Puhastatud reovesi suunatakse süsteemist võimalikult aeglaselt välja läbi ülevoolu ning biogaas kogutakse neutraliseerimispaagi tipus edasiseks töötlemiseks. Joonises 2.6 on toodud ka skeem ECSB-reaktorist [22].

ECSB-reaktorite eelisteks on nende hea stabiilsus, ülesvoolukiirus ja muda separeerimisvõimekus, kus reaktori ülemises osas tekkivad värsked mudagraanulid liiguvad kasvades ehk massi suurenedes reaktori alumisse ossa. Kuna reaktori põhjas olevate mudagraanulite mineraalainesisaldus on suur, siis selle ärastamisega reaktori põhjast on võimalik vältida ummistusi [23].

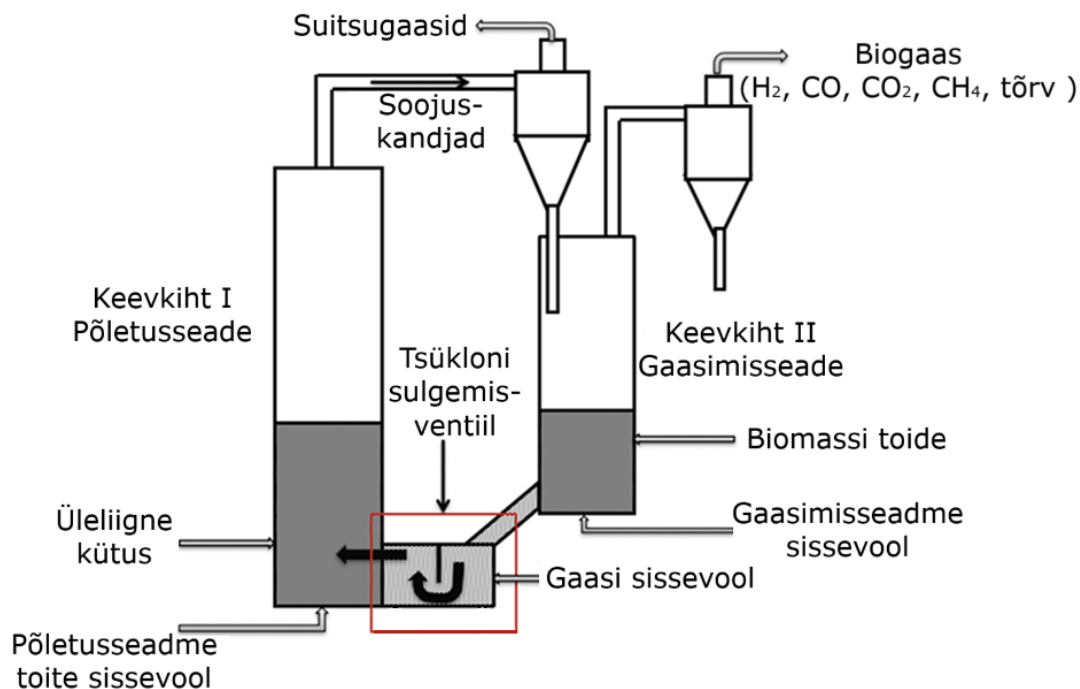


Joonis 2.6 ECSB-reaktori skeem [24]

Biogaasi tootmine Gothenburg Biomass Gasification jaamas

Rootsis algatati aastal 2005 GoBiGas (Gothenburg Biomass Gasification) projekt, kus Göteborgi linnas ehitati eksperimentaalne kaugküttejajaam, mis kasutas puidutööstuse jääke toorainena biogaasi tootmisel. Jaam tootis 20 MW suuruses soojusenergiat Göteborgi linnale ning lisaks ka vähemal määral kütust masinatele. Eksperimentaalse jaama projekt toimus aastatel 2013 – 2018 [25].

Jaama biogaasi tootmine põhines kaheosalise keevkihtreaktori (DFB) tehnoloogial. DFB reaktoris on kaks keevkihti. II keevkihis toimub biomassi muundamine toorgaasiks ning tsirkuleerivas I keevkihis põletatakse toorgaasi kambrist tulevaid jääke, mis annab vajaliku soojuse kogu protsessi jaoks. Bioreaktori kääriskiema skeem on esitatud ka joonisel 2.7 [26].



Joonis 2.7 DFB reaktori skeem [26]

Eksperimentaalse jaama eesmärkideks olid:

- Saavutada tootlikkus 20 MW,
- Saavutada 65% efektiivsus biomassist biometaanitootmisel,
- Saavutada pidev tööaeg 8000 h/aasta.

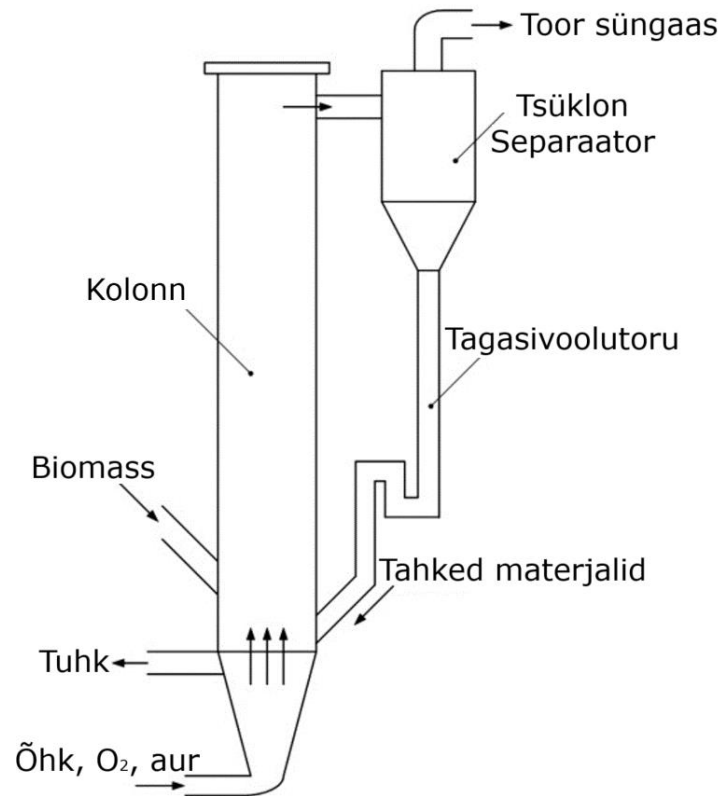
Tootlikkus 20 MW saavutati kasutades toorainena pelleteid. Jaamas saavutati 63%-ne biomassi konversioon biometaaniks, kuna kasutati madalama kütteväärtusega ning kuiva ja tuhavaba kütust. Eksperimenti läbi viies märgati, et protsessi optimeerides oleks olnud võimalik saavutada 70% konversioon. Jaama parimaks pidevaks tööajaks jäi 1750 h/aastas, kuid ka siin leiti võimalusi selle parandamiseks tulevikus [25].

Biogaasi tootmine Soomes Vaasa biogaasijaamas

Soomes Vaasa biogaasijaam on osa tänaseni töötavast Vaskiluodon Voima koostootmisjaamast. 2012. a tööd alustanud 140 MW-e biogaasijaam toodab soojusenergiat kohalikule elanikkonnale kasutades tsirkuleeriva keevkihi gaasistumisseadet (CFB). Põhiliseks tooraineks selles seadmes on metsatööstuse jäätmed, mis enne seadmesse juhtimist ka kuivatatakse, kasutades jaamas tekkivat liigsoojust [27].

Tsirkuleeriva keevkihi gaasistumisseadme tehnoloogia seisneb biomassi osalisel põletamisel kasutades kontrollitud õhuhulka. Seade koosneb reaktorist, tsüklonist ja tagasisaatvast torust. Biomass viiakse seadme alumisse ossa, kus temperatuur on

tavaliselt 800 – 1000 °C. Osa biomassist muutub puidusöeks või tõrvaks ning osa muutub läbi hetero- ja homogeensete reaktsioonide gaasiks. Mõlemad produktid liiguvad tsüklonisse, kus tahked ning vedelad osad saadetakse läbi toru tagasi reaktori põhja, kus nende soojust kasutatakse eelnevalt kirjeldatud protsessides [28]. CFB seadme skeem on toodud ka joonisel 2.8.



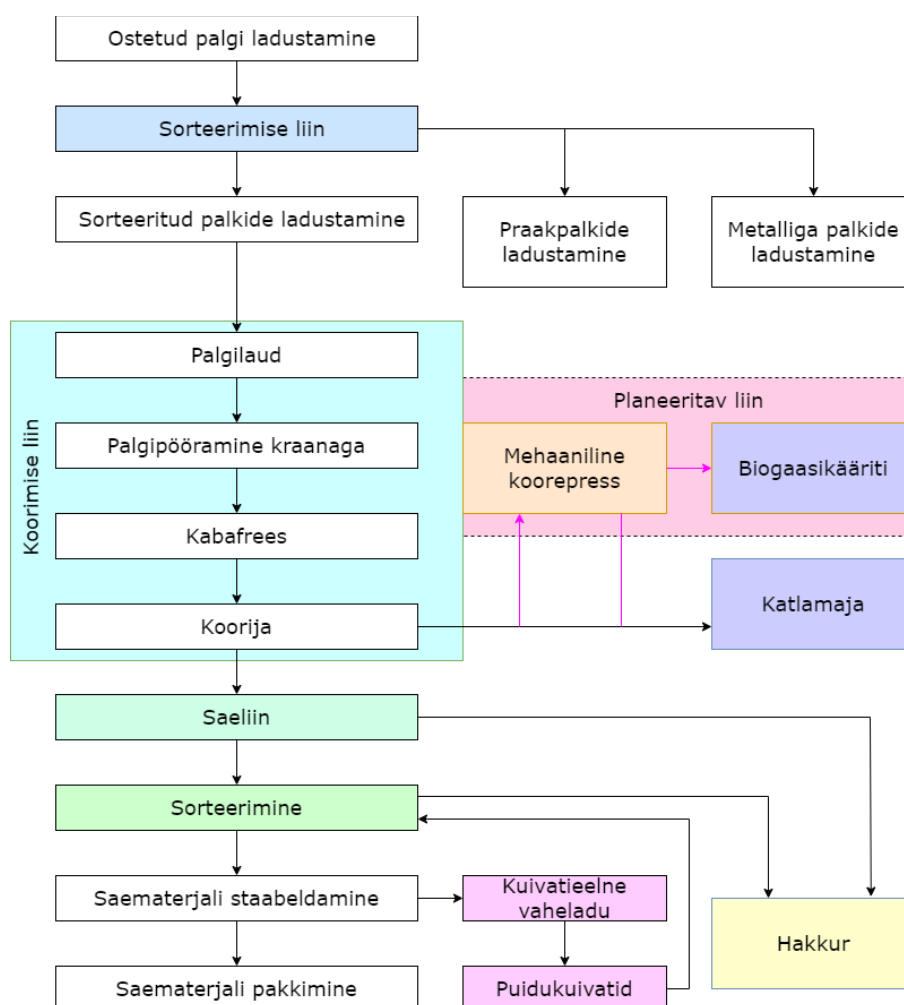
Joonis 2.8 CFB seadme skeem [29]

3. BIOGAASI TOOTMISE VÕIMALUSED PUIDUTÖÖSTUSE REOVEEST

Käesolevas peatükis analüüsitakse Combimill Sakala OÜ-s männipalgi ja tema koore töötlemise tehnoloogilisi protsesse alates ladustamisalast kuni katlamajani. Samuti analüüsitakse ka Combimill Sakala OÜ-s kasutatavat biokatelt. Antakse ülevaade koore pressimisel saadavast reoveest ning hinnatakse selle potentsiaali biogaasi toorainena.

3.1 Puidutööstuse ettevõttes kasutatav tehnoloogia

Combimill Sakala OÜ saeveski lihtsustatud põhimõtteline tootmisskeem koos potentsiaalse, planeeritava koorepressiga on esitatud joonisel 3.1. Koorepressi kasutamine ja lisamine tehnoloogilisse liini võimaldab antud pressimisel saadud reoveest toota biogaasikäärtsi biogaasi.



Joonis 3.1 Combimill Sakala lihtsustatud tootmisskeem koos potentsiaalse biogaasi liiniga [1]

Saeveski praeguse tehnoloogia kirjeldus

Järgnevalt kirjeldatakse ja iseloomustatakse käesoleval ajal kasutatavat saeveski tootmisetappe.

Ümarpalgi sorteerimisliinil läbib ümarpalk konveieri abil automatiseeritud liinil metalliotsija ning lasermõõdiku. Lasermõõdik annab informatsiooni arvutiprogrammile ja sorteerib palgid 29 eri diameetriga palgiklassi olenemata ümarpalgi pikkusest. Tõukurid seejärel suunavad ümarpalgi vastavalt klassile oma palgitaskusse. Männipalgid sorteeritakse kolme eraldi suurusklassi (tabel 3.1), mis omakorda jagunevad eraldi veel väiksemateks klassideks [30].

Tabel 3.1 Männipalgi suurusklassid [30]

Suurusklass	Diameetri vahemik (mm)
Peenpalk	100 – 219
Keskklass	220 – 309
Jämepeenpalk	310 – 479

Koorimisliini alguses läbivad palgid uuesti mõõdiku, mis kontrollib palkide asetsemist tootmisliinil, diameetrit ja pikkust. Arvuti teeb lasermõõtmise põhjal otsuse, kas palk suunatakse praaki või tootmisse. Töötamiseks sobilikud ümarpalgid suunatakse kahele erinevale mehhaniseeritud liinile. Esimene liiniosa viib palgid koorimisele ning teine liin viib palgid ümberpööramisele, sest palgi lahti saagimine toimub alati ladva poolsest otsast [30].

Palgi koorimiseks valitakse hetkel tootmises kasutatava saekava järgi palgiklass. Ümarpalkidel kasutatakse antud saekavale vastavat kabafreesi ning kooritakse. Saadud männikoor suunatakse kraapkonveierite abil tsentrifugaal koorpurustisse, millel oli sisseehitatud nelja noaga ketas, kuid liiga peenikese fraktsiooni tõttu ei suutnud etteande tigutransportöör biomassi edasi suruda. Selle tõttu muudeti sisseehitatud ketas kahe noaliseks. Erinevat klassi palkide koored jaotatakse kolme eri suuruse kabafreesi järgi (tabel 3.2) [30].

Tabel 3.2 Kabafreeside klassid [30]

Kabafreesi klass	Kabafreesi suurus (mm)
Väike kabafrees	260
Keskmine kabafrees	350
Suur kabafrees	450

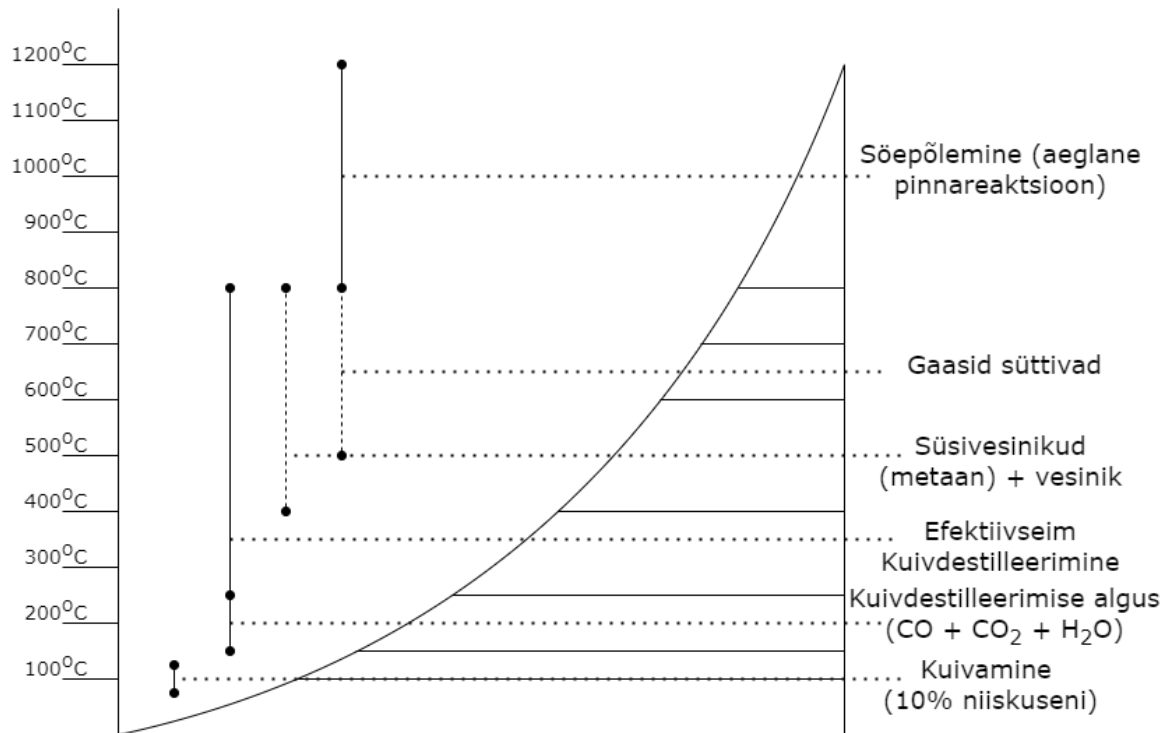
Katlamaja Combimill Sakala OÜ territooriumil kasutab soojusenergia tootmiseks kahte Soome ettevõtte Sermeti poolt valmistatud biokatelt võimsustega 3,5 ning 2,8 MW. Nende põhieesmärk on soojusenergia tootmine saematerjali kuivatamiseks. Samuti kasutatakse soojust ka tootmisüksuste ja kontoriruumide kütmiseks [30].

Sermet 3V-katel on kolme lõõriga leegitoru tüüpi katel, kus esimeses lõõris asuvad leegitoru ja pöördkamber. Teises ja kolmandas lõõris paiknevad ainult leegitorud. Katla koldet moodustava leegitoru mõõtmed on välja arvatud vastavalt leegi kuju ning suuruse nõuetele. Eelnevalt mainitud kateldes asetseb leegitoru nende keskel [31].

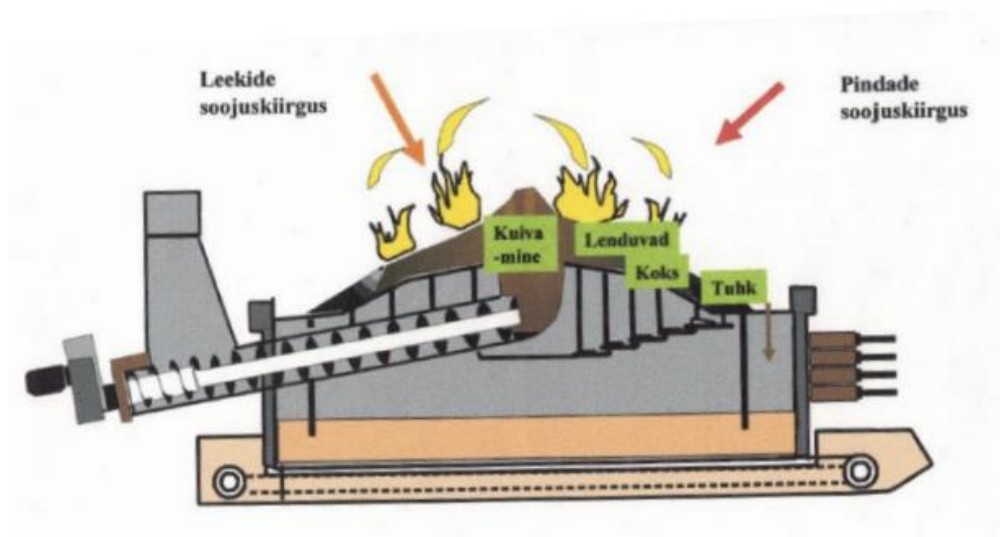
Katlaid ning luuke isoleerivad mineraalvatid ja -plaadid. Katelt isoleeriv mineraalvatt on omakorda ümbritsetud teraskesta sisse kinnitatud stucco-alumiiniumplaadist ning luuki katab veel tulekindel müüritis [31]

Katlas toimub loomulik vee tsirkulatsioon. Kõige esimese ühenduse kaudu siseneb tagasivooluvesi ja kõige tagumise ühenduse kaudu väljub kuum vesi. Siseneva vee ühendus on varustatud vee juhtplaadiga, mis segab külma tagasivooluvett kuuma katlaveega. Katlasse tagasi voolava vee temperatuur tõstetakse vähemalt 70 °C-ni [31].

Põlemisprotsessis toimub niiskuse aurumine umbes 100 °C juures ning seda saab kiirendada biokütuse peenema fraktsioonimise ja niiskussisalduse madaldamisega. Pürolüüs ehk lenduvate ainete gaasistumine algab 150-200 °C saavutamisel [31]. Joonistel 3.2 ja 3.3 on vastavalt esitatud ka Sermeti biokatelde põlemise etapid ning nende põletussüsteem.



Joonis 3.2 Kütuse põlemise etapid Sermeti biokatlamaaja [31]



Joonis 3.3 Combimill Sakalas kasutatavate biokatelde põletussüsteem [31]

Üldjuhul toimub katelde hooldamine Combimill Sakala OÜ-s vastavalt vajadusele, suvise tootmisseisaku ajal ning rikete korral. Põlemisest tulevat tuhka kontrollitakse jooksvalt ja katlaid puhastatakse samuti vastavalt vajadusele [1].

Toorainet, mida kasutatakse biokatelde kütmiseks, saab ettevõtte ümarpalgi koorimisest, tootmisliinide alt, praagist ja hakkurist. Katelde kütmine on automaatne protsess, seega tuleb ainult etteandjasse viia hakkpuitu ja männikoort. Combimill Sakala OÜ katlamajas töötab üks inimene, kes viibib 8 tundi päevas territooriumil ning

ülejäanud aja valves. Katlamaja ja saematerjali kuivatite jaoks töötavad veel kaks inimest. Katlamaja operaator jälgib katelde temperatuure ning juhul, kui temperatuur langeb katlas liiga madalale, siis kuivatioperaator sulgeb soojaventiilid. Kuivatioperaator tegeleb kuivatite temperatuuride ja protsesside jälgimisega vastavalt graafikule [30].

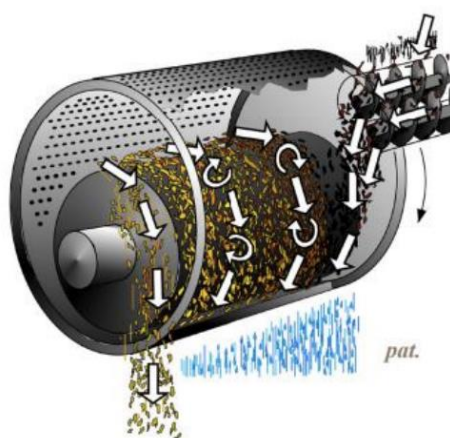
Planeeritav mehaaniline pressimine

Koorepressi lisamine tehnoloogilisse liini võimaldab pressimisel saada reovett, mille biokeemiline hapnikutarve (BHT) ja KHT on kõrged, s.t reovees on kõrgem orgaaniliste süsinikühendite sisaldus ning on olemas potentsiaalne võimalus toota järgnevalt biogaasikärritis biogaasi.

Mehaaniline pressimine põhineb Skandinaavias Soome ettevõtte Saalasti patendil, kus puukoort tahendatakse kõrgrõhu all ekstsentrilise rulli vahel, millest üks on avadega ning kuhu ka suunatakse biomassist tulenev reovesi [5].

Koore niiskussisalduse vähendamine on positiivne muutus. See suurendab materjali kütteväärtust ja energiatihedust ning vähendab transpordi energiaühiku maksumust [32]. Samas liigniiske biomassi põletamine vähendab biokatla kasutegurit ning suurendab suitsugaaside mahtu. Samuti mehaanilist pressi kasutades tuleb arvestada ka reovee käitlemise ning pressi kõrgema energiatarbimisest kaasnevate kuludega [33].

Saalasti mehaanilise pressi tehnoloogia seisneb niiske biomassi liikumises pöörleva etteande tigutransporditööri abil silindrilise kujuga trummlisse, kus vesi pressitakse surve abil välja (joonis 3.4). Pressimise tulemuseks väheneb niiskusesisaldus biomassis kuni 45%-ni ning reovett koguneb vooluhulgaga 2-3 m³/h. Saalasti OÜ põhjal peab üks või kaks korda aastas hooldustöid tegema pressile ja liiniosadele, kuid peamiselt sõltub see masina tööeest [34]. Saalasti OÜ mehaanilise pressi skeem on esitatud ka joonisel 3.4.



Joonis 3.4 Saalasti OÜ mehaanilise pressi skeem

Saetööstused toodavad suurel hulgal puidukoort esmase töötlemise käigus, mille pressimisel tekib kõrvalsaadusena reovett, mis sisaldab väga mitmekülgset hulka polüfenoolühendeid, mis jällegi omakorda sisaldavad antioksidante [35].

Planeeritav biogaasikääriti

Kuna lõputöös käsitletakse puidukoore pressimisel tulevenvat reovett, siis peatükis 2.4 nimetatud biogaasiseadmetest sobiks pressiveele kõige paremini AS Estonian Cellis kasutatav ECSB reaktor. ECSB süsteem on loodud biogaasi tootmiseks kasutades reovett võrreldes teiste tehnoloogiatega, mis kasutatavad tahkeid materjale biogaasi tootmise toormeks. Samuti sobiks ECSB reaktor ka Combimill Sakala OÜ-s kasutatava tehistiigiga, kuhu hetkel voolavad töötlusprotsessidega kokku puutunud veed. Seda tiiki saaks kasutada ka kohana, kuhu saaks juhtida ECSB reaktori läbinud heitvesi, kuid siinkohas tuleks arvestada ka reaktorist tuleva vee kogusega ning võimaliku tehistiigi laiendamisega.

3.2 Männikoore pressimise reovee iseloomustus

Käesoleva uurimustöö raames analüüsiti ettevõtte reoveepuhasti heitvee ja nelja erineva männikoore pressimisel saadud reovee koostist.

Uuritav reovesi saadi pressimisel männikoorest, mis oli ümarpalgist juba eraldatud ning võetud pressimisele vahetult enne koore viimist selle ladustumisalale. Analüüsiti järgmiseid reoveesid:

- ettevõtte reoveepuhasti heitvett, mida kasutatakse ladustumisalal olevate ümarpalkide niisutamiseks;
- värske koore reovesi ehk minimaalselt ladustumisalal olnud ümarpalgi koore pressivesi;
- 2 nädalat ladustusosalal olnud ümarpalgi koore pressivesi;
- 2 nädalat ladustusosalal olnud ümarpalgi koore pressivesi, mis saadeti Soome Eurofini laborisse;
- 1 kuu seisnud palgi küljes olevat koore pressivett.

Tuleb ka märkida, et 2 nädalat on ettevõttes keskmine ümarpalkide ladustumisaeg enne nende töötlusesse saatmist, mistõttu on vastavat reovett analüüsitud ka Eurofini laboris.

Joonisel 3.4 on kujutatud foto männikoore pressimisel saadud reoveest.



Joonis 3.4 Foto reoveest [36]

Tabelis 3.4 on esitatud nende reovete iseloomustus. Analüüsid olid teostatud Eesti Keskkonnauuringute Keskuse Tartu osakonna (EKUK) poolt ja üks analüüs tehti Soomes Eurofinsi laboratooriumis. Eurofinsi analüüs on täies mahus tõlgituna ka välja toodud lisa 1.

Tabel 3.4 Männikoore pressimisel saadud reovee koostis

Näitajad	Ühik	Puhasti heitvesi	Värskest koorest saadud reovesi	2 nädalat seisnud koorest saadud reovesi I	2 nädalat seisnud koorest saadud reovesi II	1 kuu seisnud koorest saadud reovesi
				EKUK analüüs	Eurofinsi analüüs	
Biokeemiline hapnikutarve (BHT₇)	mgO ₂ /l	25	21000	53000	9400	6600
Hõljuvaine	mg/l	10	2400	940	16000	5200
Keemiline hapnikutarve (KHT_{Cr})	mg/l	45	73000	68000	44000	20000
pH		7,6	5,0	4,8	4,6	4,8
Üldfosfor (P_{üld})	mg/l	0,24	94	58	Ei analüüsitud	39
Üldlämmastik (N_{üld})	mg/l	1,2	110	100	140	150
Naftasaadused (süsivesinikud C₁₀-C₄₀)	µg/l	<20	740	3800	Ei analüüsitud	4000
Fenool	µg/l	6,7	1500	7900	Ei analüüsitud	8400
o-kresool (2- metüülfenool)	µg/l	<1,5	<75	<75	86	990
p,m-kresool (4 ja 3-metüül- fenool)	µg/l	9,3	<75	98	65	240
2,3- Dimetüülfenool	µg/l	<1,5	<75	<75	<25	<15
2,6- Dimetüülfenool	µg/l	<1,5	<75	<75	<5	64
3,4- Dimetüülfenool	µg/l	<1,5	<75	<75	<5	52
3,5- Dimetüülfenool	µg/l	<1,5	<75	<75	<25	<15

Tabelist 3.4 on näha, et biogaasi tootmiseks sobivaimad koore pressiveed on värskel koor ning kaks nädalat seisnud männikoore. Sobilikuks biogaasi tooraineks teevad need pressivate kõrge biokeemiline ja keemiline hapnikutarve, mis aitab hoida head C:N:P suhet. Suurem näitajate vahe, mis tekkis kaks nädalat seisnud koore pressivee ja Soome saadetud pressivee vahel tuli selle tõttu, kuna Eurofinsi saadetud reovesi oli pressitud Eestis ning jõudis laborisse alles paari päeva pärast.

3.3 Hinnangud biogaasi tootmise võimaluste kohta ettevõttes

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida, kas on võimalik Combimill Sakala OÜ puidutööstuse reovett kasutada biogaasi tootmiseks.

Arvestades, et Combimill Sakala OÜ-s on palkide keskmine ladustamisaeg kaks nädalat, siis analüüsitakse bakalaureusetöös kaks nädalat seisnud koore pressivee potentsiaali biogaasi toorainena.

Seda pressivett on iseloomustatud peatükis 3.2. Kuid on teada, et selle potentsiaali biogaasi tootmiseks on vähe uuritud, selle kohta puuduvad kirjandusandmed. Järelikult tuleb männikoore pressivee näitajaid võrrelda populaarsemate biogaasi toorainete näitajatega ning selle põhjal hinnata pressivee võimalikku biogaasi saagist.

Selleks, et saada männikoore pressivee kohta samu näitajaid, mis on teiste biogaasi toorainete kohta toodud erinevates allikates ja andmebaasides, tehti 2 nädalat seisnud koorest saadud pressiveele üks täpsustav analüüs Eesti Keskkonnauuringute Keskuse Tartu osakonna poolt. Tabelis 3.5 on toodud selle analüüsi tulemused.

Tabel 3.5 Männikoore pressivett iseloomustavad näitajad

Näitaja	Ühik	Väärtus
Ammooniumlämmastik	mgN/l	9,4
Biokeemiline hapnikutarve (BHT₇)	mgO ₂ /l	8600
Hõljuvaine	mg/l	2300
Keemiline hapnikutarve (KHT_{cr})	mg/l	31000
Kuivjääk 105 °C	mg/l	14000
pH		4,5
Põletusjääk 550 °C	mg/l	99,4
Üldfosfor (P_{üld})	mg/l	47
Üldlämmastik (N_{üld})	mg/l	100
Üldorgaaniline süsinik (TOC)	mgC/l	6600
Üldsüsinik (TC)	mgC/l	6800
Naftasaadused (süsivesinikud C₁₀-C₄₀)	µg/l	6100

Biogaasi saagise hindamisel on olulisemateks näitajateks järgmised:

- süsiniku ja lämmastiku suhe substraadis (C:N), siinkohal tuleb ka märkida, et tegemist on üldorgaanilise süsiniku ja üldlämmastiku suhtega;
- substraadi kuivaine ehk kuivjääk 105 °C (KA) % kogu mahust;

- substraadi kuumutuskadu ehk põletusjääk 550 °C (VS) % kuivainest;
- substraadi lämmastiku (N), ammoniumlämmastiku (NH₄) ja fosfori (P) % kuivainest.

Kui kogumahuks võtta 1 liiter, siis tabeli 3.5 andmetel saame leida olulisemad näitajad männikoore pressiveele, mis on esitatud tabelis 3.6.

Tabel 3.6 Männikoore pressivee olulisemad näitajad

Substraat	C:N suhe	KA, %	VS, % kuivainest	N	NH ₄	P
				% kuivainest		
Männikoore pressivesi	66	1,4	0,71	0,71	0,07	0,34

Enim kasutatavate biogaasi tootmise substraatide vastavad näitajad on esitatud Tabelis 3.7.

Tabel 3.7 Enim kasutatavate substraatide näitajad [7, 16, 37, 38]

Substraat	C:N suhe	KA, %	VS, % kuivainest	N	NH ₄	P
				% kuivainest		
Sealäga	3-10	7	70-80	6-18	3-17	2-10
Veiseläga	6-20	8-11	80	2,6-6,7	1-4	0,5-3,3
Kanasõnnik	7	32	80	5,4	0,39	-
Puuvilja jääk	25-40	25-45		1-1,2		0,5-0,6
Põhk	80-100	30-35	80-90	4	0,57	0,71
Muruniide	12-25	12	90	2-3		1,5-2
Maisisilo	60-73	20-35	85-94	1,1-2	0,15-0,3	0,71
Pulp		13		0,5-1	0,04	0,1-0,2

Kui võrrelda männikoore pressivett enim kasutatavate biogaasi toorainetega on näha, et C:N suhe on pressiveel sobiv töötuseks ning võib isegi olla mingil määral kõrgem või madalam. Pressivee kuivaine ja eriti kuumutuskadu on väiksemad, kui võrdlusel olevatel substraatidel. Lämmastiku, ammoniumlämmastiku ja fosfori kontsentratsioonid on lähedased nendele väärtustele, mis on pulbil ehk tärglisetootmise jäägil. Arvestades ka pressivee C:N suhet võib öelda, et männikoore pressivee iseloomulikud näitajad on sobilikud anaeroobseks töötuseks biogaasi tootmisel.

Kuna pressivee näitajad on kõige lähemal pulbi näitajatele, siis saab järeldada, et biogaasi saagis pressivee korral võib olla sama, mis pulbil ehk 80-90 m³/t värske massi kohta ning CH₄ sisaldus jääks 52 – 65 % vahele.

Siinkohal tuleb arvestada ka pressivee madala kuivaine sisaldusega (KA) ja kuumutuskaoga (VS), mis tähendab, et pulbiga sama suure saagise saamiseks, oleks vaja leida sobivad meetodid pressivee tahendamiseks, mis tõstaks pressivee kuivaine sisaldust. Et saagis oleks 80-90 m³/t, on vaja töödelda palju rohkem pressivett võrreldes pulbiga. Sellega kaasneks protsessi suurem energiakulu ning läbi selle väheneks ettevõtte majanduslik kasum. Samuti tuleb arvestada saadava biogaasi suhteliselt madala metaanisisisaldusega, mis sarnaselt madala kuivaine sisaldusega, vähendab majandusliku kasu männikoore pressivee kasutamisel biogaasi tootmise toorainena.

Üks võimalus, mida võiks kasutada Combimill Sakala OÜ-s selle asemel, et tahendada pressivett, on rakendada Floconi ettevõtte poolt pakutavat veepuhastuse tehnoloogiat. Nimelt, saadakse nendes seadmetes puhas vesi ja jääkmuda flokid, mida võib kasutada biogaasi tootmise toorainena. Selline jääkmuda aga erineb käesoleva töö männikoore pressiveest märkimisväärselt ning nõuaks täpsutavat uuringut selle biogaasi tooraine potentsiaali leidmiseks.

Järeldused

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida, kas on võimalik Combimill Sakala OÜ puidutööstuse reovett kasutada biogaasi tootmiseks. Kirjandusallikate ja reovee omaduste analüüsi põhjal võib järeldada järgmist:

- männikoore pressivett on võimalik kasutada tooraine biogaasi tootmiseks;
- eelnev analüüs näitab, et kirjeldatud puudujääkide tõttu oleks protsess kulukas ning majanduslik kasu kaheldav. Seda juhul, kui männikoore pressivett enne anaeroobset kääritamist ei eeltöödeldata ega suurendamaks selle kuivaine ja kuumutuskaos sisaldust;
- töö autori arvates on vajalikud edasised eksperimentaalsed uuringud sellel teemal. Konstrueerides pilootkäärity, mis kasutab toorainena puidukoore pressivett, saaks katseliste töödega palju täpsemad ning selgemad tulemused pressivee potentsiaali kohta biogaasi toorainena, mis oleks kasulikud mitte ainult Combimill Sakala OÜ-le, kuid kogu puidutööstuse sektorile üldisemalt.

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureuseõppe lõputöö eesmärgiks oli uurida Combimill Sakala OÜ planeeritava puidukoorepressi reovee potentsiaali biogaasi tootmise toorainena.

Bakalaureusetöö koosneb kahest osast. Esimeses osas esitatakse ettevõtte üldiseloostus ning selgitatakse puidutööstuse reoveest biogaasi tootmise vajadust. Antakse ka ülevaade biogaasi tootmise etappidest, anaeroobse kääritamise mehhanismidest ning biogaasi tootmise rakendustest puidu- ja paberitööstuse ettevõtetes.

Teises osas analüüsitakse Combimill Sakala OÜ-s olevaid tehnoloogilisi protsesse ning ettevõttes kasutatavaid biokatlaid. Samuti antakse ülevaade ka koore pressimisel saadavast reoveest ning hinnatakse selle potentsiaali biogaasi toorainena.

Kirjandusallikate ja reovee omaduste analüüsi põhjal võib järeldada, et männikoore pressivett on võimalik kasutada tooraine biogaasi tootmiseks. Vajalikud on edasised eksperimentaalsed uuringud, mis annaksid täpsema informatsiooni biogaasi tootmise saagise ning majandusliku kasumlikusse kohta.

SUMMARY

The aim of this bachelor's thesis was to investigate the potential of wastewater from the planned wood bark press at Combimill Sakala OÜ as a raw material for biogas production.

The thesis consists of two parts. In the first part, the general description of Combimill Sakala OÜ is presented, and the need for biogas production from wood industry wastewater is explained. An overview of the biogas production stages, anaerobic fermentation mechanisms, and biogas applications in wood and paper industry is also provided.

The second part analyzes the technological processes at Combimill Sakala OÜ and the bio boilers used in the company. Additionally, an overview of the wastewater obtained from bark pressing is given, and its potential as a raw material for biogas production is assessed.

Based on the analysis of literature sources and wastewater properties, it can be concluded that pine bark press water can be used as a raw material for biogas production. Further experimental studies are needed to provide more precise information on the biogas yield and economic viability of pine bark press water.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Tammeväli, S., Combimill Sakala OÜ erakogu Powerpoint ettekanne, 2023.
- [2] Combimill Sakala OÜ [Võrguväljaanne], www.combimill.ee. [Kasutatud 23.04.2024].
- [3] Digiõppevaramu [Võrguväljaanne], www.vara.e-koolikott.ee/h5p/embed/5960 [Kasutatud 25.04.2024].
- [4] V. Vares, Ü. Kask, P. Muiste, T. Pihu, S. Soosaar, Biokütuse kasutaja käsiraamat, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2005.
- [5] A. Holmberg, S. Stenström, Dewatering and Drying of Bark, Department of Chemical Engineering, Lund University, 2014.
- [6] MTÜ Eesti Biogaasi Assotsiatsioon [Võrguväljaanne], www.eestibiogaas.ee [Kasutatud 22.04.2024].
- [7] A. Normak, E. Vollmer, K. Orupõld, A. Kaasik, Ü. Kask, Biogaasi tootmine ja kasutamine – Käsiraamat, Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009.
- [8] HomeBiogas [Võrguväljaanne], www.homebiogas.com [Kasutatud 22.04.2024].
- [9] P. Merlin Christy, L. R. Gopinath, D. Divya, A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms, Department of biotechnology, Vivekanandha College of Arts and Sciences for Women, 2014.
- [10] I. Angelidaki, D. Karakashev, D. J. Batstone, C. M. Plugge, A. J. M. Starns, Biomethanation and its potential, 2011.
- [11] H. Insam, I. Franke-Whittle, M. Goberna, Microbes in Aerobic and Anaerobic Waste Treatment, Springer-Verlag, 2010.
- [12] K. Ziemiński, M. Frąc, Methane fermentation process as anaerobic digestion, Institute of Fermentation Technology and Microbiology, Technical University of Lodz, 2012.

- [13] F. A. Shah, Q. Mahmood, M. M. Shah, A. Pervez, S. A. Asad, *Microbial Ecology of Anaerobic Digesters: The Key Players of Anaerobiosis*, Scientific World Journal, 2014.
- [14] M. Madigan, J. Martinko, D. Stahl, D. Clark, *Brock Biology of Microorganisms*, Pearson, 2010.
- [15] W. Lv, F. L. Schanbacher, Z. Yu, *Putting microbes to work in sequence: Recent advances in temperature-phased anaerobic digestion processes*, Bioresource Technology, 2010.
- [16] T. Al Seadi, D. Rutz, H. Prassl, M. Köttner, T. Finsterwalder, *Biogas Handbook*, University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.
- [17] Elering AS [Võrguväljaanne], www.biometaan.info [Kasutatud 26.04.2024].
- [18] P. Iovane, M. Migliori, A. Molino, *Biomethane production by biogas with polymeric membrane module*, Elviser Ltd., 2016.
- [19] J. F. Malina, F. G. Pohland, *Design of Anaerobic Processes for the Treatment of Industrial and Municipal Wastes*, Technomic Publishing Company, Inc., 1992.
- [20] AS Estonian Cell, *Keskkonna ja vastutustundliku ärijuhtimise aruanne 2023*, 2023.
- [21] AS Estonian Cell, *Keskkonnanaruanne 2020* AS Estonian Cell, 2020.
- [22] Hydroflux Industrial New Zealand [Võrguväljaanne], www.hydrofluxindustrial.nz/products/hydrothane-anaerobic/ [Kasutatud 02.05.2024].
- [23] V. Kõrgmaa, M. Kriipsalu, *Reoveepuhastuse käsiraamat*, LIFE IP CleanEST, 2023.
- [24] V. Diamantis, A. Aivasidis, *Performance of an ECSB reactor for high-rate anaerobic treatment of cheese industry wastewater: effect of pre-acidification on process efficiency and calcium precipitation*, Democritus University of Thrace, 2018.
- [25] A. Larsson, I. Gunnarsson, F. Tengberg, *The GoBiGas Project: Demonstration of the Production of Biomethane from Biomass via Gasification*, Göteborg Energi AB, 2018.

- [26] N. Hanchate, S. Ramani, C. S. Mathpati, V. H. Dalvi, Biomass gasification using dual fluidized bed gasification systems: A review, Department of Chemical Engineering, Institute of Chemical Technology, 2020.
- [27] Verdict Media Limited [Võrguväljaanne], <https://www.renewable-technology.com/projects/vaasa-bio-gasification-power-plant> [Kasutatud 24.05.2024].
- [28] International Flame Research Foundation [Võrguväljaanne], <https://ifrf.net/research/handbook/what-is-fluidised-bed-gasification-of-biomass> [Kasutatud 24.05.2024].
- [29] W. Doherty, A. Reynolds, K. David, The effect of air preheating in a biomass CFB gasifier using ASPEN Plus simulation, Department of Mechanical Engineering, Dublin Institute of Technology, 2009.
- [30] E. Orobko, Liigniiske männikoore kütmiseks kasutamise võimalused Combimill Sakala OÜ näitel, Eesti Maaülikool, 2023.
- [31] J. Remes, Sermet OÜ biokatlamaja kasutusjuhend, 1999.
- [32] E. Anerud, S. Krigstin, J. Routa, H. Brännström, M. Arshadi, C. Helmeste, D. Bergström, G. Egnell, Dry matter losses during biomass storage, IEA Bioenergy, 2019.
- [33] H. Li, Q. Chen, X. Zhang, K. N. Finney, V. N. Sharifi, J. Swithenbank, Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: A case study, Sheffield University Waste Incineration Centre, 2011.
- [34] M. Rekonen, Saalasti OÜ mehaanilist pressi tutvustas esitlus, 2023.
- [35] K. Peeters, E. S. Esakkimuthu, C. Tavzes, K. Kramberger, A. M. Višnjevec, The Potential Value of Debarking Water as a Source of Polyphenolic Compounds for the Specialty Chemicals Sector, Licensee MDPI, 2023.
- [36] S. Rönkä, M. Åbacka, Teams meeting with Combimill and Saalasti 22.10.2023, 2023.

[37] C. M. Liu, H. R. Yuan, D. X. Zou, Y. P. Liu, B. N. Zhu, X. J. Li, Improving Biomethane Production and Mass Bioconversion of Corn Stover Anaerobic Digestion by Adding NaOH Pretreatment and Trace Elements, Creative Commons Attribution License, 2015.

[38] Carry On Composting [Võrguväljaanne], <https://www.carryoncomposting.com/416920203.html> [Kasutatud 28.05.2024].

LISAD

Lisa 1 Eurofinsi analüüs tõlgituna

Näitaja	Ühik	Väärtus
Üldised veega seotud uuringud		
pH		4,6
Juhtivus 25°C	mS/m	87
Hõljuvaine	mg/l	16000
BHT₇	mg/l	9400
KHT_{Cr}	mgO ₂ /l	44000
Kloriid (Cl⁻)	mg/l	31
Sulfaat (SO₄)	mg/l	35
Üldlämmastik (N)	mg/l	140
Ammooniumlämmastik (NH₄)	mg/l	1,1
Nitraat (NO₃)	mg/l	4
Nitriit (NO₂)	mg/l	0,37
Fosfaatfosfor (PO₄-P)	mg/l	26
Elemendid, üldkontsentratsioonid, HCl/HNO₃		
Arseen (As)	µg/l	3,2
Elavhõbe (Hg)	µg/l	2,8
Fosfor (P)	µg/l	64000
Kaadmium (Cd)	µg/l	7,1
Kaalium (K)	µg/l	290000
Kroom (Cr)	µg/l	190
Vask (Cu)	µg/l	710
Plii (Pb)	µg/l	47
Nikkel (Ni)	µg/l	210
Tsink (Zn)	µg/l	4200

Lisa 1 Eurofinsi analüüs tõlgituna (jätk)

Näitaja	Ühik	Väärtus
Bensiini fraktsioon		
C₅ – C₁₀	mg/l	11
Klooritud alifaatsed süsivesinikud		
Diklorometaan	µg/l	<5
Vinüülkloriid	µg/l	<1
1,1-Dikloroetüleen	µg/l	<1
cis-Dikloroetüleen	µg/l	<1
trans-Dikloroetüleen	µg/l	<1
Trikloroetüleen	µg/l	<1
Tetrakloroetüleen	µg/l	<1
Triklorometaan	µg/l	<5
Tetraklorometaan	µg/l	<5
1,2-Diklorometaan	µg/l	<1