

**TEOLLISUUDEN JÄTEVESIEN BIOKAASUPOTENTIAALIN KARTOITUS
KANTA-HÄMEEN ALUEELLA**



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö
Bio- ja elintarviketekniikka, Hämeenlinna
Kevät 2023
Jenny Schulz

Bio- ja elintarviketekniikka

Tekijä Jenny Schulz

Työn nimi Teollisuuden jätevesien biokaasupotentiaalin kartoitus Kanta-Hämeen alueella

Ohjaaja Maritta Kymäläinen

Tiivistelmä

Vuosi 2023

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutustua korkeakuormitteisten jätevesien puhdistukseen käytettävien anaerobitekniikoiden toimintaperiaatteisiin kirjallisuudesta ja koota niiden käytöstä esimerkkejä eri sovelluskohteista. Työn tavoitteena oli kartoittaa Kanta-Hämeen alueen elintarviketeollisuuden jätevesien biokaasu- ja ravinnepotentiaaleja. Opinnäytetyö tehtiin Hämeen ammattikorkeakoulun HAMK Bio -tutkimusyksikölle Vesistä biovoimaa ja ravinteita (BioVeRa) -tutkimushankkeelle.

Toiminnallisessa osassa selvitettiin alueen yrityksiä ja niiden laatu- ja ympäristövastaavia haastatteleamalla, millaisia jätevesiä alueen elintarviketeollisuuden yrityksissä syntyy ja millaisia biokaasuntuotto- ja ravinteiden talteenotto- ja kierrätysmahdollisuuksia niissä on.

Työn tuloksena syntyi kuvaukset viiden eri anaerobisen tekniikan toimintaperiaatteista korkeakuormitteisten jätevesien puhdistuksessa, käyttösovellusesimerkkejä ja alustavaa kartoitusta Kanta-Hämeen alueen elintarviketeollisuuden jätevesien kuormituksista ja ravinteista. Jätevesien kuormitustietojen avulla saatiin laskennalliset tulokset alueen jätevesien biokaasuenergiapotentiaalista ja tietoja ravinteiden määristä elintarviketeollisuuden jätevesissä.

Saatujen tulosten perusteella jätevedet soveltuisivat puhdistettavaksi jollakin korkeakuormitteisellä anaerobitekniikalla. Jotta alueen elintarviketeollisuuden jätevesiä voitaisiin hyödyntää kunnolla biokaasuntuotossa, tarvittaisiin tarkempia tietoja jätevesien koostumuksesta, niiden sisältämästä kuormituksesta ja syntyyn vaikuttavista tuotantoprosesseista sekä jätevesien määristä. Tekniikoista tarvittaisiin niiden kustannuksia ja mahdollisesti laboratoriomittakaavan kokeita alueen jätevesillä.

Avainsanat Korkeakuormitteinen anaerobitekniikka, teollisuuden jätevesi, biokaasu, kemiallinen hapenkulutus, elintarviketeollisuus

Sivut 34 sivua ja liitteitä 2 sivua

The aim of the thesis was to study the operating principles of high-rate or anaerobic techniques, i.e., bioreactors used for biogas production and the purification treatment of high-load wastewater based on the literature and to compile examples of their use from different applications. The goal was also to report the biogas and nutrients potential in food industry wastewater in the Kanta-Häme region. The commissioner of the thesis was HAMK Bio Research Unit, and the study was conducted for the Vesistä biovoimaa ja ravinteita (BioVeRa, Water Biopower and Nutrients) research project.

In the literature review of the thesis, various high-rate (anaerobic) technologies and their operating principles were introduced, and their application examples were compiled in a chart. In the functional part, the food industry companies in the area and their quality and environmental managers were interviewed. Based on the interviews, information on quality and quantities of industrial wastewater generated in Kanta-Häme and the biogas production and their nutrient recovery opportunities was compiled.

The thesis resulted in a description of the operating principles of five different high-rate (anaerobic) technologies, application examples and a preliminary reporting of the wastewater loads and nutrients of the food industry in Kanta-Häme. The wastewater load data and its chemical oxygen demand COD were used to obtain calculated results on the biogas energy potential of wastewater in the area and information on the amount of nutrients in wastewater of the food industry.

Based on the results, the wastewater would be suitable for purification by some high-rate technology. In order for wastewater from the food industry in the region to be used properly for biogas production, more detailed information would be needed on the composition of the wastewater, the load they contain and the production processes as well as the amounts of wastewater. Moreover, the maintenance and operational cost estimations of the technologies and laboratory scale experiments for the wastewaters would be essential.

Keywords High-rate system bioreactors for biogas production, industrial wastewater, biogas, chemical oxygen demand, food industry

Pages 34 pages and appendices 2 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tutkimuskysymykset ja menetelmät.....	2
I KIRJALLISUUSKATSAUS		2
3	Anaerobinen jätevesien käsittely ja siihen vaikuttavia tekijöitä.....	2
4	Korkeakuormitteiset jätevedet	3
5	Anaerobisia reaktorityyppejä korkeakuormitteisten jätevesien käsittelyyn	3
5.1	UASB.....	4
5.2	EGSB.....	6
5.3	IC	7
5.4	ABR.....	8
5.5	AnMBR	10
6	Käyttösovellusesimerkkejä	12
II TOIMINNALLINEN OSA.....		13
7	Toteutus.....	13
8	Tulokset ja niiden tarkastelu	14
8.1	Jätevesien kuormitukset	14
8.2	Biokaasuntuottopotentiaalit.....	20
8.3	Muita tuloksia	22
8.4	Alueen jätevesien vertailu kirjallisuuteen.....	22
9	Johtopäätökset	23
10	Pohdinta	24
Lähteet.....		26

Kuvat, kaavat ja taulukot

Kuva 1. Periaatekaavio UASB-reaktorista. (Mukaiillen Tilley ym., 2014)	5
Kuva 2. Periaatekaavio EGSB-reaktorista. (Mukaiillen Zhang, ym., 2008)	6
Kuva 3. Periaatekaavio IC-reaktorista. (Mukaiillen Cui, ym., 2011)	8
Kuva 4. Periaatekaavio ABR-reaktorista. (Mukaiillen Tilley, ym., 2014)	10
Kuva 5. Periaatekaavio AnMBR-reaktorista, joka koostuu CSTR:stä ja ulkoisesta suodatinlaitteistosta. (Mukaiillen Elmoutez, ym., 2023)	11
Kuva 6. Periaatekaavio AnMBR:stä, joka koostuu UASB:sta ja ulkoisesta moniosaisesta suodatinlaitteistosta. (Mukaiillen Elmoutez, ym., 2023)	12
Kuva 7. Yrityksen A jäteveden kuormitustekijät pitoisuuksina (mg/l).	15
Kuva 8. Yrityksen B jäteveden kuormitustekijät pitoisuuksina (mg/l).	15
Kuva 9. Yrityksen C jäteveden kuormitustekijät pitoisuuksina (mg/l).	16
Kuva 10. Yrityksen D jäteveden kuormitustekijät pitoisuuksina (mg/l).	16
Kuva 11. Yritysten jätevesien BOD-pitoisuudet.	17
Kuva 12. Yritysten jätevesien COD-pitoisuudet.....	17
Kuva 13. Yritysten jätevesien kokonaisfosforipitoisuudet.	18
Kuva 14. Yritysten jätevesien kokonaistyyppipitoisuudet.	18
Kuva 15. Kanta-Hämeen alueen elintarviketeollisuuden yritysten A, B, C ja D jätevesien kuormitukset yhteensä.....	19

Kaava 1. Metaanin hapettumisreaktion yhtälö.....20

Taulukko 1. Yritysten A, B, C ja D vuotuiset COD-määrät ja arviot metaanintuottopotentiaaleista esitettyinä eri energian yksiköissä.....21

Taulukko 2. Kooste yritysten A, B, C ja D jätevesien käsittelyyn liittyvistä kysymyksistä ja vastauksista.22

Liitteet

Liite 1 Tekniikkavertailu

Liite 2 Haastattelukysymykset

Lyhenteet

ABR	Anaerobic Baffled Reactor, anaerobinen läpivirtausreaktori
AFBR	Anaerobic Fluidized Bed Reactor, anaerobinen leijupetireaktori
AnMBR	Anaerobic Membrane Bioreactor, anaerobinen kalvobioreaktori
BOD	Biological Oxygen Demand, biologinen hapenkulutus
CH ₄	metaani
COD	Chemical Oxygen Demand, kemiallinen hapenkulutus
CO ₂	hiilidioksidi
CSTR	Completely Stirred Tank Reactor, täyssekoitteinen reaktori
EGSB	Expanded Granular Sludge Bed, laajennettu lietepatjareaktori
FOG	Fats Oils and Grease, rasvoja ja öljyjä
GWh	gigawattitunti, energian kerrannaisyksikkö
H ₂ O	vesi
HRT	Hydraulic Retention Time, hydraulinen viipymäaika reaktorissa
IC	Internal Circulation, sisäisen kierron reaktori
kWh	kilowattitunti, energian kerrannaisyksikkö
m ³	kuutiometri, tilavuuden yksikkö
MWh	megawattitunti, energian kerrannaisyksikkö
mol	mooli, ainemäärän yksikkö
M	moolimassa, yhden moolin atomeja tai molekyyliä paino
O ₂	happi
OLR	Organic Loading Rate, biokaasureaktorin orgaaninen kuormitus

TJ	terajoule, energian kerrannaisyksikkö
TOC	Total Organic Carbon, orgaaninen kokonaishiili
TS	Total Solids, orgaaninen ja epäorgaaninen kuiva-aine
TSS	Total Suspended Solids, liuennut kokonaiskiintoaine
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket, anaerobinen ylösvirtauslietepatjareaktori
VS	Volatile Solids, haihtuva kuiva-aine

1 Johdanto

Monien eri teollisuudenalojen tuotannon sivutuotteena syntyy sellaisia jätevesiä, joissa on paljon orgaanista ainesta ja ravinteita. Tällaiset jätevedet voisi valjastaa uusiutuvan energian ja kierrätyslannoitteiden tuotantoon sekä energian omavaraisuuden lisäämiseen. Tärkeä tekijä näiden niin sanottujen korkeakuormitteisten jätevesien ja kiertotalouden välillä on näistä vesistä saatava biokaasu, jolla voisi korvata maakaasua.

Korkea kuormitus asettaa haasteita tavalliselle jätevesien puhdistukselle aktiivilieteprosessissa, jäteveden puhdistuksessa syntyvä metaani vapautuu ilmakehään ja puhdistusprosessi kuluttaa paljon energiaa. Osa orgaanisen aineksen biokaasun energiantuottopotentialista saadaan hyödynnettyä vasta siinä vaiheessa, kun aktiivilieteprosessista poistettu ylimääräinen liete käsitellään mädättämällä se. Suurin osa jäteveden fosforista saadaan saostettua biolietteeksi ja osan typestä mikrobit käyttävät itse. Aktiivilieteprosessissa suurimman osan typestä mikrobit muuttavat kaasumuotoon, jolloin se ei ole enää hyödynnettävissä ravinteena. (HSY, n.d.)

Yksi teollisuudenala, jossa syntyy korkeakuormitteisia jätevesiä, on elintarviketeollisuus. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kartoittaa Kanta-Hämeen alueella elintarviketeollisuuden toimijoita, joiden tuotannossa syntyy käsiteltäviä sivuvirta- ja jätevesiä ja selvittää näiden jätevesien ravinne- ja energiantuottopotentiaaleja. Kartoituksen lisäksi tavoitteena oli selvittää, minkälaisia erilaisia anaerobisia jätevedenpuhdistustekniikoita korkeakuormitteisille jätevesille on ja, missä niitä on sovellettu.

Opinnäytetyö tehtiin Hämeen ammattikorkeakoulun Bio-tutkimusyksikön Vesistä biovoimaa ja ravinteita (BioVeRa) -tutkimushankkeeseen, jossa keskitytään Kanta-Hämeen alueella teollisuuden jätevesiin biokaasun ja ravinteiden talteenoton näkökulmasta. BioVeRa-hanketta rahoittaa Hämeen liitto, Alueiden kestävän kasvun ja elinvoiman tukemisen (AKKE) rahoituksella (HAMK Bio -tutkimusyksikkö, n.d.)

2 Tutkimuskysymykset ja menetelmät

1. Millaisia erilaisia anaerobitekniikoita on korkeakuormitteisten jätevesien puhdistukseen?
2. Millaisiin jätevesiin anaerobitekniikoita on sovellettu?
3. Mikä on Kanta-Hämeen alueen elintarviketeollisuuden yritysten jätevesien biokaasu- ja ravinnepotentiaali?

Työssä käytetyt menetelmät olivat tiedonhaku kirjallisuudesta ja yritysten internetsivuilta sekä kiinnostavien yritysten edustajien haastattelu. Kirjallisuuskatsauksella saatiin erilaisten tekniikoiden toimintaperiaatteet ja teoriatausta ja lisäksi kirjallisuudesta saatiin eri tekniikoiden vertailut. Yrityksiä haastatteleamalla saatiin tietoa niiden jätevesien kuormituksista.

I KIRJALLISUUSKATSAUS

3 Anaerobinen jätevesien käsittely ja siihen vaikuttavia tekijöitä

Anaerobinen jätevesien käsittely soveltuu vähentämään jätevesissä olevia haitallisia aineita. Hapettomissa olosuhteissa mikrobit hajottavat orgaanisia aineita biokaasuksi. Biokaasu ja sen sisältämä metaani (CH₄) on anaerobisen käsittelyn päätuote. Biokaasuntuotossa on neljä eri vaihetta, jotka ovat hydrolyysi, asidogeneesi, asetogeneesi ja metanogeneesi. (Saravanan, ym., 2023)

Anaerobiseen jätevesien käsittelyyn vaikuttaa useampi tekijä, jotka määräytyvät hajottavien mikrobien mukaan. Lämpötila on tärkeä tekijä. Lämpötilaolosuhteita ovat psykrofiiliset (alle 25 °C) (Sanchez, ym., 2022), mesofiiliset (35–37 °C) ja termofiiliset (50–60 °C) lämpötilat (Alcaraz-Ibarra, ym., 2020). Reaktorin kuormitus (OLR, Organic Loading Rate) ja kuormituksen kesto sekä nesteen viipymäaika (HRT, Hydraulic Retention Time) ovat niinkin tärkeitä anaerobiseen käsittelyyn vaikuttavia tekijöitä. Syötteen kemiallinen hapenkulutus (COD, Chemical Oxygen Demand) on se parametri, jota puhdistuksella halutaan poistaa, ja josta biokaasu tuotetaan. (Yen, ym., 2016) Reaktorin toimintaan

vaikuttaa oleellisesti sen pH, joka on usein neutraali tai tapauskohtainen (Yen, ym., 2016; Kamyab & Zilouei, 2021).

4 Korkeakuormitteiset jätevedet

Jätevedessä oleva orgaaninen aines, kiintoaine ja ravinteista fosfori ja typpi ovat merkittävimpiä kuormittajia tavallisessa yhdyskuntajätevedessä. Jätevesien puhdistus perustuu näiden poistoon. Orgaanisen aineen hajoaminen kuluttaa vesistöistä happea ja ravinteet rehevöittävät vesistöjä. (Sitoumus 2050, n.d.) Orgaanista ainesta voidaan mitata joko biologisena hapenkulutuksena (BOD, Biological Oxygen Demand) tai COD:na. Biologinen hapenkulutus sisältää helposti hajoavien yhdisteiden kuluttaman hapen, mutta kemiallinen hapenkulutus huomioi helposti hajoavan aineksen lisäksi vaikeammin hajoavan aineksen ja on siten usein korkeampi kuin biologinen hapenkulutus. (SciMed., n.d.)

Esimerkiksi elintarviketeollisuudessa syntyy normaalista asumajätevedestä poikkeavia jätevesiä. Nämä vedet ovat yleensä korkeakuormitteisia. (Kokemäen Vesihuolto Oy, n.d.) Teollisuusjätevedet voidaan puhdistaa kunnallisella jätevedenpuhdistamolla, mutta sille määritellään ehdot teollisuusjätevesisopimuksessa, joka solmitaan yrityksen ja jätevedenpuhdistamon välille. Sopimus edellyttää, että yritys tarkkailee jätevesiensä laatua ohjeiden mukaan ja niiden laatu ja määrä voivat vaikuttaa jätevesimaksun suuruuteen. (HSY, n.d.)

Korkeakuormitteinen jätevesi määritellään BOD:n, COD:n, liuenneiden kokonaiskiintoaineiden (TSS, Total Suspended Solids) ja rasvojen ja öljyjen (FOG, Fats, Oils and Grease) avulla (Lin Lau & Trzcinski, 2022). Law Insider sivusto määrittelee korkeakuormitteisen jäteveden sellaiseksi jätevedeksi, jossa on yli 300 mg/l BOD:ta, yli 330 mg/l TSS:ää tai yli 100 mg/l rasvoja ja öljyjä (Law Insider, n.d.).

5 Anaerobisia reaktorityyppejä korkeakuormitteisten jätevesien käsittelyyn

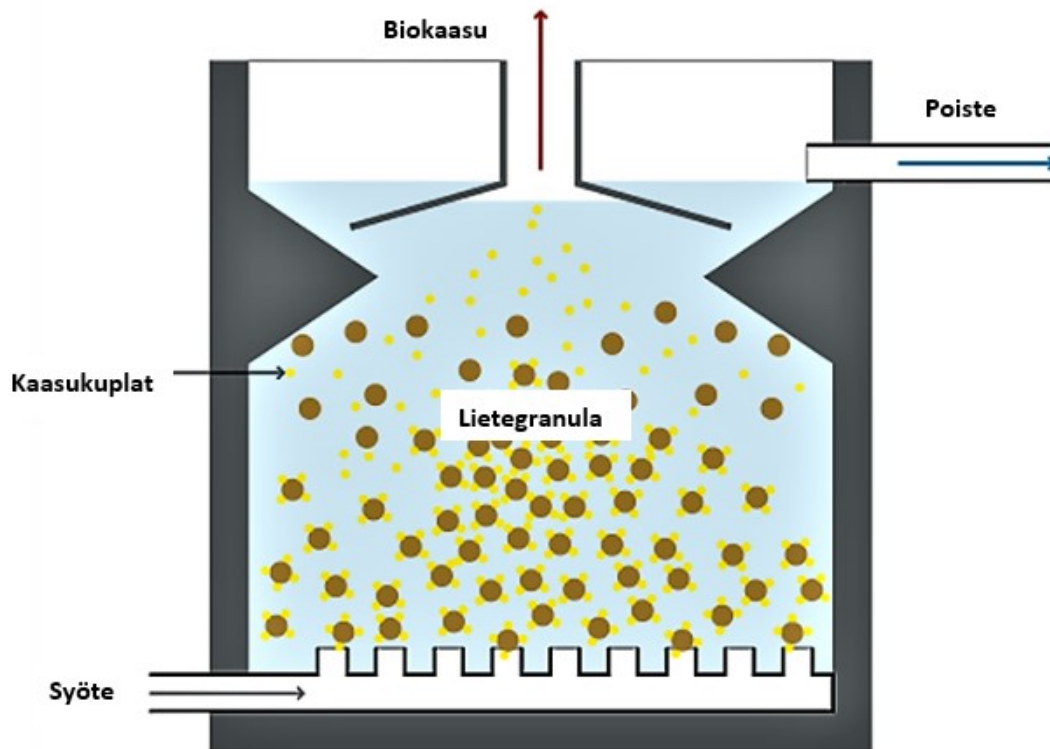
Anaerobisia bioreaktoreita korkeakuormitteisten jätevesien käsittelyyn on useita erilaisia. Niiden tekniikka voi perustua lietepatjaan ja siinä olevaan mikrobigranulaan, kuten

ylösvirtauslietepatjareaktorissa (UASB, Upflow Anaerobic Sludge Blanket) tai sen sovelluksissa: laajennetussa lietepatjareaktorissa (EGSB, Expanded Granular Sludge Bed) ja sisäisen kierron reaktorissa (IC, Internal Circulation) (Cui, ym., 2011; Luo, ym., 2014). Anaerobinen läpivirtausreaktori (ABR, Anaerobic Baffled Reactor) on biofilmiprosessi, joka on sovellettu septitankista ja UASB-reaktorista (Eawag, 2020; Kotcharoen, ym., 2023). Lisäksi yksi korkeakuormitteinen tekniikka eli anaerobinen kalvobioreaktori (AnMBR, Anaerobic Membrane Bioreactor) on kahden tekniikan hybridi. Tekniikka on yhdistelmä anaerobisesta reaktorista ja kalvosuodatuksesta (Parihar, ym., 2023).

5.1 UASB

Yleisin ja eniten käytetty lietepatjareaktori on UASB. Reaktorin toiminta perustuu sen pohjalla olevaan tiiviiseen lietepatjaan ja sen päällä olevaan harvempaan lietepeittoon, joissa tapahtuu biologinen hajotus ja reaktorin yläosassa olevaan erottimeen, joka ohjaa kaasun pois ja estää nestettä ja kiintoainesta pääsemästä kaasun mukaan. Lietepatja muodostuu granuloista eli ryppäinä kasvavista anaerobisista mikrobeista. Reaktoriin syöttö tapahtuu sen pohjasta ja poisto yläosasta. (Chong, ym., 2012) Lisäksi siihen voi kuulua ulkoinen nestekierto, joka lähtee reaktorin yläosasta ja yhdistyy syöttöön ja tulee pohjasta takaisin. UASB-reaktorit ovat korkeita suhteessa niiden halkaisijaan ja muodoltaan ne ovat lieriönmuotoisia. (Logan, ym., 2023) Kuva 1 on havainnollistettu UASB-reaktorin toimintaperiaate.

Kuva 1. Periaatekaavio UASB-reaktorista. (Mukaillen Tilley ym., 2014)



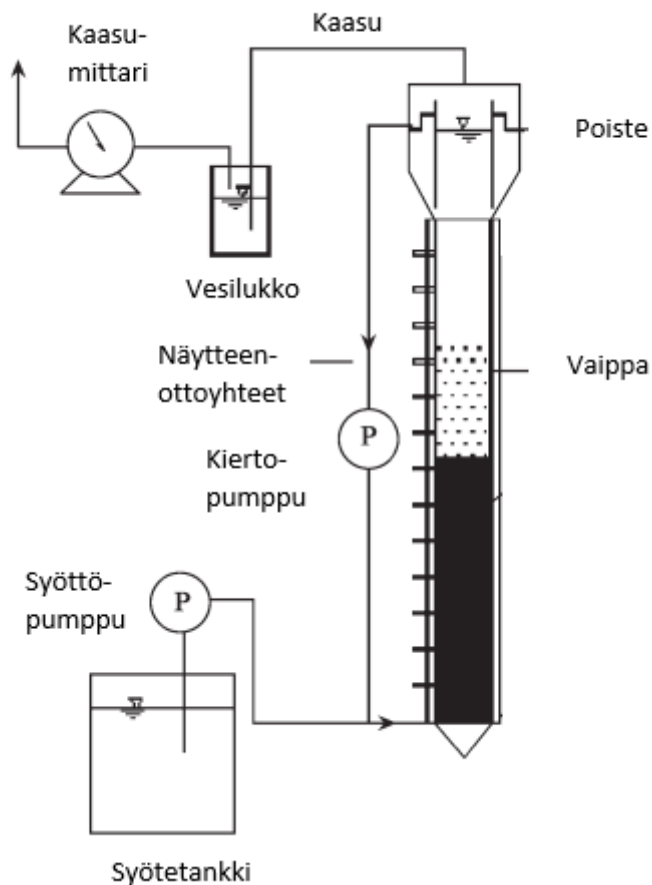
UASB-reaktorit kestävät korkeaa orgaanista kuormitusta ja tyypillisesti niiden kuormitus on 10–15 kg COD/m³*d. Nesteen ylös virtausnopeus reaktorissa voi olla korkeintaan 1,2–1,5 m/h. Lietepatjan tulee olla riittävän paksu ja täyden mittakaavan reaktoreissa sen paksuuden pitää olla vähintään 1,5–2,5 metriä. Tällöin reaktorin pitää olla vähintään neljä metriä korkea, jotta lietepatjan ja lietepeiton lisäksi reaktorissa on tilaa eri olomuotojen (kiinteä—neste—kaasu) erottelijalle. (IWA, n.d.)

Samalla toimintaperiaatteella UASB-reaktorin kanssa toimii anaerobinen leijupetireaktori (AFBR, Anaerobic Fluidized Bed Bioreactor), mutta sen sijaan, että mikrobit olisivat kiinnittyneinä lietegränuloihin, kasvavat ne reaktorissa olevissa kiinteissä partikkeleissa, eli kantaja-aineissa. Kantajiin kiinnittyneet mikrobit täyttävät reaktorin ja ne leijuvat jäteveden virratessa sen läpi ylös ja puhdistavat samalla sitä (Sattler, 2011).

5.2 EGSB

UASB-reaktorin sovellus on EGSB-reaktori eli laajennettu lietepatjareaktori. Reaktori on laajennettu, koska sen ylös virtausnopeus on paljon suurempi kuin tavanomaisessa UASB:ssa, 2–10 m/h. Nopea virtaus ylös on mahdollista, koska näissä reaktoreissa on ulkoinen palautuskierto. Lisäksi EGSB-reaktoreiden korkeus/leveyssuhde on suurempi kuin tavanomaisilla UASB-reaktoreilla ja EGSB:llä se voi olla esimerkiksi 4–5:1. (Faria, ym., 2019; Nicoletta, ym., 2000) Kuva 2 on havainnollistettu EGSB:n toimintaperiaate.

Kuva 2. Periaatekaavio EGSB-reaktorista. (Mukaillen Zhang, ym., 2008)



EGSB-reaktori kehitettiin, koska tavanomaisessa UASB-reaktorissa jätevesi ei ole kovin hyvin kosketuksissa mikrobilietteen kanssa. Osassa UASB-reaktoreita ei ole palautuskiertoa ja ainoa sekoittuminen tulee pohjalta syötettävän nesteen virtauksesta ylöspäin.

Tavanomainen UASB-reaktori on niin ikään paljon leveämpi suhteessa korkeuteen kuin EGSB,

jolloin sen sisään jää helposti katvealueita, joissa jätevesi ja mikrobit eivät pääse kosketuksiin. (Mortezaei, ym., 2018) Nämä ominaisuudet mahdollistavat sen, että EGSB-reaktoreihin voidaan syöttää todella korkeaa kuormitusta, jopa 30 kg COD/m³d asti. (Nicolella, ym., 2000)

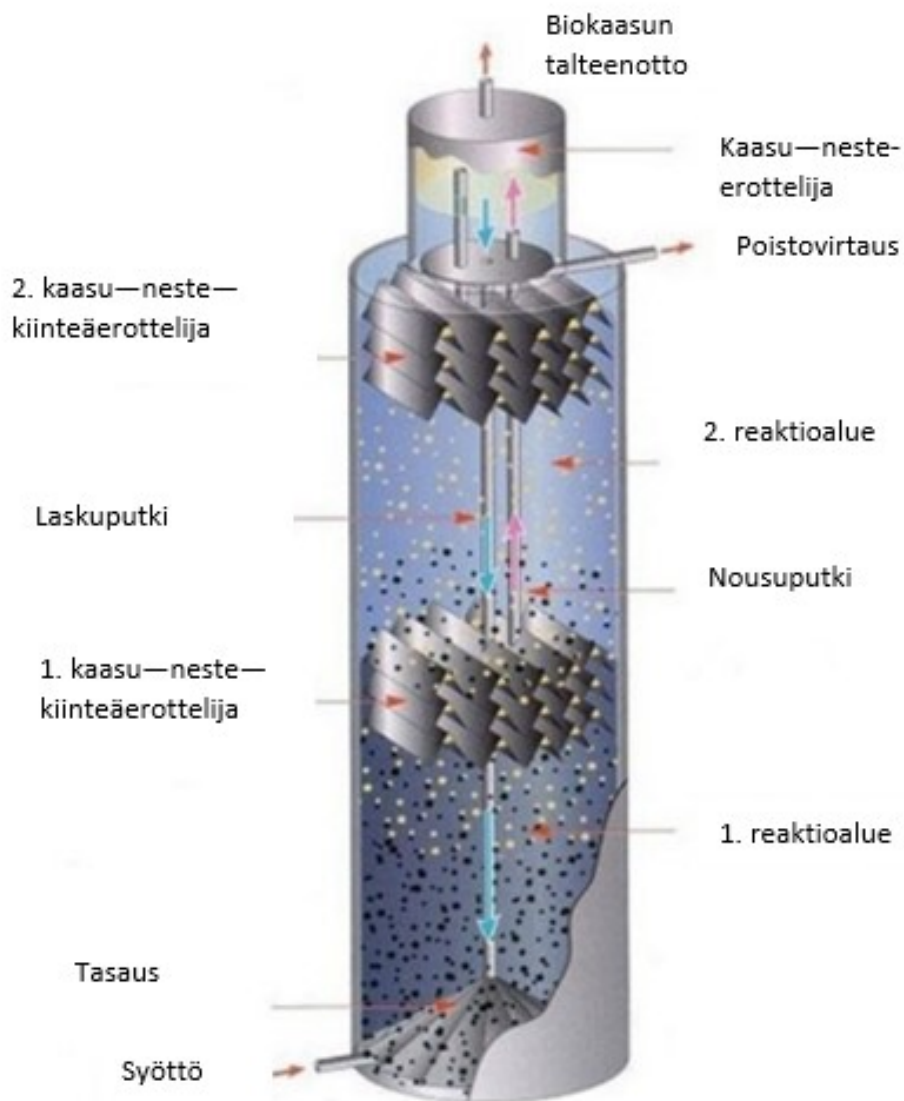
5.3 IC

Toinen UASB-reaktorin sovellus on sisäisen kierron reaktori eli IC-reaktori. Tämä anaerobinen bioreaktori perustuu kahteen sarjaan kytkettyyn UASB-reaktoriin. Tälläkin reaktorilla on suuri korkeuden ja halkaisijan suhde ja sillä on monia etuja, kuten korkea kuormituksen kesto, hyvä stressinsietokyky ja vähäinen tilantarve. (Wang, ym., 2018) Reaktorissa on kaksi päällekkäistä UASB-reaktoria, joilla saadaan ratkaistua ristiriita pitkän lietteen viipymääjan ja lyhyen hydraulisen viipymän väliltä ja kaasuntuottoon perustuva sisäinen kierto. Koska reaktorissa on kaksi päällekkäistä UASB-reaktoria, suurin osa lietteestä pysyy alemmassa reaktorissa ja neste siirtyy alemmasta reaktorista ylempään ja jatkaa puhdistumista vielä matkallaan ylös. (Wang, ym., 2014).

IC-reaktorit kestävät orgaanista kuormitusta 20–50 kg COD/m³d asti ja niiden korkeuden ja leveyden suhde on 4–8:1. Reaktori toimii parhaiten, kun sillä käsitellään korkeakuormitteisia jätevesiä, joissa on paljon helposti biohajoavaa ainesta, koska mitä parempi biokaasun tuotto sitä paremmin jätevesi sekoittuu ja on kosketuksissa mikrobin kanssa. Reaktorilla voidaan käsitellä huonostikin biohajoavaa ainesta sisältävää jätevettä, mutta silloin reaktorin puhdistusteho ei ole yhtä hyvä ja biokaasuntuotto on heikompaa. (Wang, ym., 2014)

Sisäinen kierto syntyy, kun kaasua muodostuu ja nouseva kaasu sekoittaa nestettä reaktorissa. (Wang, ym., 2014) Kun kaasu poistetaan kaasu—neste-erottelijalla reaktorin yläoasta, reaktorin sisällön sekoittuminen perustuu alaspäin valuvan nesteen aiheuttamaan liikkeeseen (Cui, ym., 2011). Reaktorin tehokkuutta voidaan parantaa vielä erillisellä ulkoisella kierrolla. (Wang, ym., 2014) Kuva 3 on esitetty sisäisen kierron reaktori.

Kuva 3. Periaatekaavio IC-reaktorista. (Mukaiillen Cui, ym., 2011)



5.4 ABR

Yksi tapa käsitellä korkeakuormitteisia jätevesiä on johtaa ne anaerobiseen läpivirtausreaktoriin eli ABR:ään. ABR on allasmainen bioreaktori, jonka sisällä on pystysuuntaisilla välilevyillä eroteltuja osastoja, joiden läpi vesi pakotetaan virtaamaan. Pakotettu virtaus aikaansaa sen, että biomassan viipymäaika reaktorissa on pitkä (Lin Lau & Trzcinski, 2022). Teknologia on kehitetty septitankin ja UASB-reaktorin parhaiden

ominaisuuksien pohjalta (Tran, ym., 2022; ks. myös Eawag, 2020). Tekniikassa UASB-reaktorit ovat kytkettyinä vierekkäin reaktorin sisällä (Kotcharoen, ym., 2023).

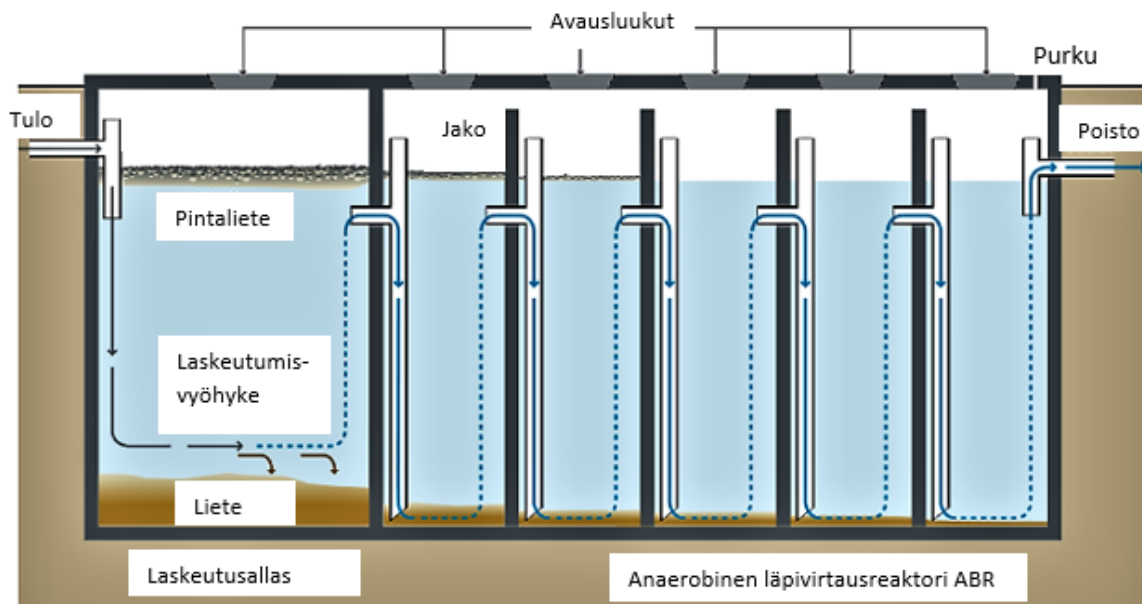
ABR:ssä hydrolysoivat ja orgaanisia happoja muodostavat bakteerit on erotettu metaania muodostavista bakteereista erillisiin lohkoihinsa. Reaktorin sisällä vesi virtaa vuoroin ylöspäin ja vuoroin alaspäin ja näin jätevesi pääsee kosketuksiin kaikkien eri mikrobiryhmien kanssa ja jäteveden orgaaniset aineet muunnetaan biokaasuksi. (Lin Lau & Trzcinski, 2022)

ABR:n hyvä puoli on se, että sillä saadaan eroteltua eri biokaasuntuottovaiheet toisistaan pituussuunnassa, minkä ansiosta prosessia on helppo hallita, sen kustannukset ovat matalat ja prosessi on monivaiheinen. Reaktorissa ei ole ollenkaan liikkuvia osia, jolloin sen rakentaminen on edullista. Eri prosessivaiheiden erottelu on biokaasutuotannon kannalta suotuisaa, koska silloin saadaan aikaan jokaisen vaiheen mikrobeille juuri niille soveltuvat olosuhteet esimerkiksi pH:n osalta. Lisäksi tämä reaktorityyppi kestää hyvin hydraulisia ja orgaanisia kuormituspiikkejä sekä on tehokas COD:n poistaja. (Lin Lau & Trzcinski, 2022)

ABR:ssä mikrobit muodostavat lietettä eli biofilmin, joka toimii niiden kasvualustana ja, johon ne kiinnittyvät (Wang, ym., 2019). ABR:ssä tapahtuu lisäksi UASB-reaktoria epätodennäköisemmin lietteen poishuuhtoutumista. (Lin Lau & Trzcinski, 2022)

Edellä mainitut ominaisuudet mahdollistavat sen, että ABR:llä voidaan puhdistaa erilaisia korkeakuormitteisia teollisuusjätevesiä, jopa sellaisia, jotka sisältävät myrkyllisiä tai ksenobioottisia yhdisteitä. Reaktorin voi rakentaa joko maan pinnalle tai maanalaiseksi. (Lin Lau & Trzcinski, 2022) Kuva 4 on havainnollistettu ABR:n toimintaperiaate.

Kuva 4. Periaatekaavio ABR-reaktorista. (Mukaiillen Tilley, ym., 2014)



5.5 AnMBR

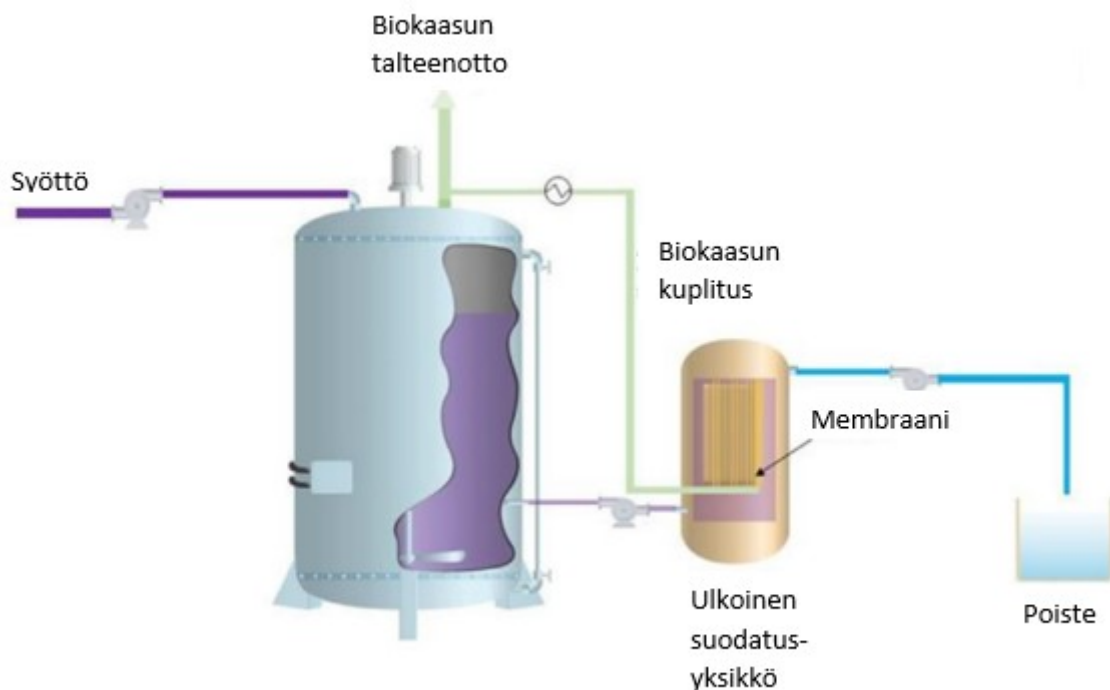
AnMBR on hybridiratkaisu, jossa yhdistyvät anaerobinen bioreaktori ja kalvosuodatusyksikkö. Yleisimmin AnMBR koostuu täysekkoitteisesta reaktorista (CSTR, Completely Stirred Tank Reactor) ja kalvosuodatusyksiköstä (Kuva 5) tai UASB:sta ja kalvosuodatusyksiköstä (Kuva 6). Lisäksi reaktorina voi olla AFBR. Näistä kolmesta reaktorista yleisimmin käytetään CSTR:ää, koska se on helppo rakentaa ja se on varmatoiminen. Toisaalta UASB:n käyttö pidentää kalvon käyttöikää, sillä reaktorista poistettava neste sisältää enää vähän kiintoaineita, jolloin kalvo ei tukkeudu niin helposti, vrt. CSTR:n poiste on lietettä. (Aslam, ym., 2022)

Suodatinyksikkö voi olla joko upotettuna reaktorin sisään tai erillisenä yksikkönään sen ulkopuolella. Ulkoisen suodatinlaitteiston läpi pumpataan nestettä reaktorista ja lopullinen tuote eli puhdas vesi on suodattimen läpäissyttä permeaattia. (Aslam, ym., 2022) Oikein suunnitellulla AnMBR:llä saadaan jopa niin puhdasta vettä, että sillä voidaan suoraan esimerkiksi kastella, saada lisää pohjavettä, tai hyödyntää sitä kaupunki- tai teollisuuskäytössä. (Elmoutez, ym., 2023)

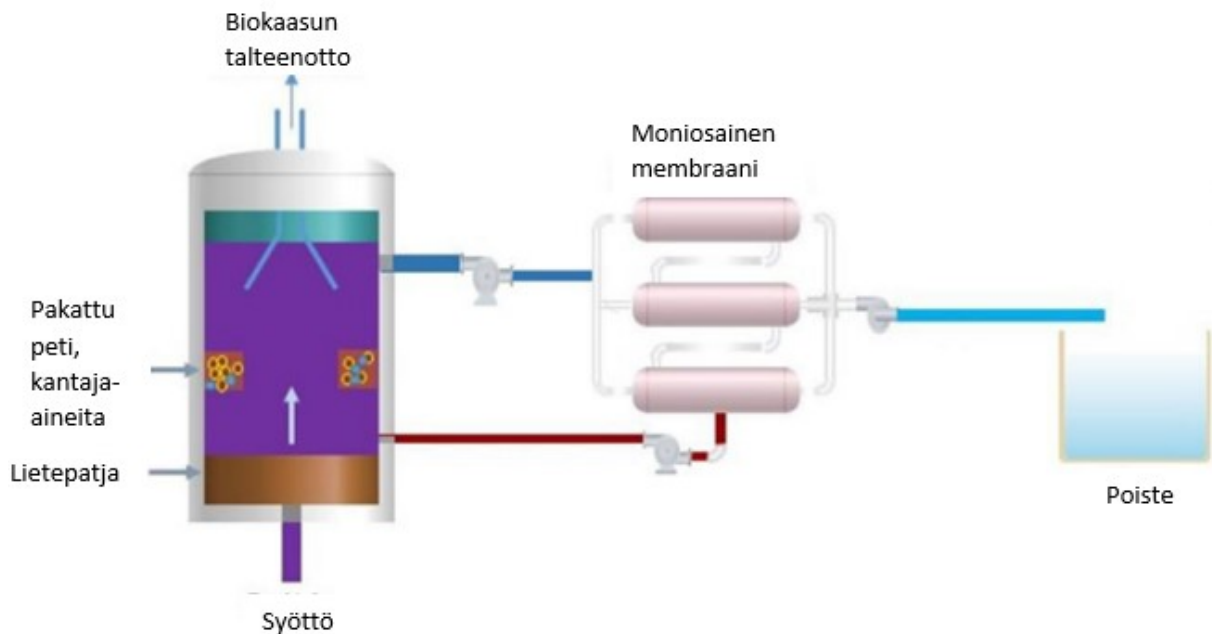
Suurien jätevesimäärien käsittely AnMBR:llä kuluttaa paljon energiaa, mutta sillä voidaan edistää kiertotalouden periaatteita jätevesialalla (Wang, ym., 2023). Kun hydraulinen viipymäaika ja kiintoaineen viipymä erotetaan, tavanomaisen CSTR-reaktorin vaatima tila pienenee. AnMBR-reaktorit toimivat pienillä tilavuuksilla, jolloin viipymä metanogeesissä saadaan pitkäksi ja metaanisaanto paranee. (Elmoutez, ym., 2023)

Tekniikka on kuitenkin herkkä ympäristötekijöiden muutoksille ja erityisesti lämpötilanvaihteluille. Lämpötila on tärkein tekijä AnMBR:n toiminnassa, koska sen avulla prosessi toimii oikein ja saavuttaa tyydyttävät puhdistustulokset. Lämpötila vaikuttaa liukenemiseen ja sillä on suora vaikutus reaktorin biokinetiikkaan ja kemikaalien tasapainotilaan. Jos lämpötila putoaa, reaktori on vaikeuksissa, sillä metaanisaanto pienenee, kun sen liukoisuus nesteeseen kasvaa ja bakteeritoiminta hidastuu ja tämän seurauksena kalvo tukkeutuu. Kalvon tukkeutuminen on pääsyy siihen, miksi AnMBR-tekniikkaa on vaikea käyttää isossa mittakaavassa. (Elmoutez, ym., 2023)

Kuva 5. Periaatekaavio AnMBR-reaktorista, joka koostuu CSTR:stä ja ulkoisesta suodatinlaitteistosta. (Mukaillen Elmoutez, ym., 2023)



Kuva 6. Periaatekaavio AnMBR:stä, joka koostuu UASB:sta ja ulkoisesta moniosaisesta suodatinlaitteistosta. (Mukaillen Elmoutez, ym., 2023)



6 Käyttösovellusesimerkkejä

Tässä luvussa esitellään opinnäytetyössä käsitellyistä tekniikoista lyhyesti käyttösovellusesimerkkejä. Taulukkomuotoiset käyttösovellusesimerkit ovat liitteessä 1. Käyttösovellusesimerkeistä on koottu tiedot reaktorityypeittäin. Sovellusesimerkit ovat samassa järjestyksessä kuin tässä työssä. Ensimmäisenä on UASB ja viimeisenä on AnMBR.

Reaktoreiden käyttösovelluksista selvitettiin niiden sovelluskohde ja mittakaava, joka voi olla laboratorio, pilot tai täysi. Suurimmassa osassa esimerkkejä kokeen kesto kerrottiin. Toimintaparametreista selvitettiin pH, lämpötila (°C), viipymäaika, syötteen COD, kuormitus, syöttö, herkkyys kiintoaineelle ja kiintoaineen poistoteho-%. Tuottoarvoista selvitettiin COD:n poistoteho-% ja biokaasun/metaanin tuotto, ja lisätietoina on maa, jossa kokeilu suoritettiin ja muita lisätietoja.

Esimerkiksi UASB-tekniikalla on laboratoriomittakaavan reaktorilla käsitelty lääkeaineyhdisteitä sisältävää jätevettä (Azizan, ym., 2022); EGSB:llä on puhdistettu

laboratoriomittakaavassa palmuöljyteollisuuden jätevettä (Fang, ym., 2011); IC:llä on puhdistettu soijaproteiinijätevettä pilotmittakaavassa (Guo, ym., 2018); ABR:llä on käsitelty maissitärkkelysprosessin jätevettä (Zhang, ym., 2022) ja AnMBR:llä on puhdistettu laboratoriomittakaavassa liuotinta (DMF, dimetyyliformamidi) sisältävää jätevettä (Kong, ym., 2019). Edellä mainittujen esimerkkien COD:n poistotehot olivat seuraavia: 90 %, 93 %, 90 %, 90 % ja 95 %

II TOIMINNALLINEN OSA

Tähän opinnäytetyöhön valikoitui Kanta-Hämeessä sijaitsevia elintarviketeollisuusyrityksiä. Elintarviketeollisuus on pääsääntöisesti ympäristöluvanvaraista ja laitosten ympäristölupiin sisältyy usein teollisuusjätevesisopimus, jossa on määritelty yrityskohtaisesti rajoja jätevesien sisältämille aineille (Vesilaitosyhdisty ja HSY, 2011, s.5). Elintarviketeollisuuden jätevesissä on hiilihydraatteja, proteiineja ja rasvoja sekä happoja, emäksiä, pesuaineita ja säilöntäaineita. Orgaaniset aineet nostavat jäteveden biologista hapenkulutusta (BHK) ja kiintoainepitoisuutta. Lisäksi elintarviketeollisuuden jätevesissä on paljon typpeä ja fosforia ja sen pH on vaihtelevaa. (Vesilaitosyhdisty ja HSY, 2011, s.52)

7 Toteutus

Työn toteutus alkoi kiinnostavien yritysten pohtimisella yhdessä BioVeRa -tutkimushankkeen toimijoiden kanssa. Kanta-Hämeen maakunnan yrityksiin tutustuttiin ensin niiden internetsivuilta. Lopulta työhön valikoitui viisi yritystä elintarviketeollisuuden eri aloilta. Viidestä yrityksestä saatiin vastaukset neljältä yritykseltä. Yritykset ovat nimettömiä, joten niihin viitataan yrityksinä A, B, C ja D.

Varsinainen opinnäytetyön toiminnallinen osa toteutettiin haastatteluna yrityksille. Haastattelukysymysten laatiminen oli yksi osa haastattelun suorittamista ja kysymykset ovat työssä liitteenä (Liite 2). Haastattelut toteutettiin keskustelemalla, joten kysymykset toimivat runkona keskusteluille. Haastateltavina oli yritysten laatu- ja ympäristövastaavia ja haastattelut käytiin heidän kanssaan etäyhteydellä keväällä 2023. Haastattelukysymykset toimitettiin yritysten edustajille etukäteen. Yrityksille tehdyissä haastatteluissa

painopisteenä olivat jätevesien kuormitukset ja niihin vaikuttavat tekijät, mutta lisäksi selvitettiin yleisesti jätevedeen liittyviä asioita, kuten kausivaihteluja ja nykyistä puhdistusta, kuin myös muita nestemäisiä sivuvirtoja ja niiden hyödyntämistä. Alustavasti selvitettiin yritysten kiinnostusta tämänhetkisellemme puhdistukselle vaihtoehtoisin tekniikoihin tai mahdollisuuksiin.

8 Tulokset ja niiden tarkastelu

Yritysten haastatteluiden pohjalta saatuja tuloksia on esitelty ja tarkasteltu tässä luvussa. Tietojen arkaluonteisuus huomioiden, yritykset on esitetty koodatusti (A, B, C, D). Yritysten tiedot ovat kaikki annettu henkilökohtaisina tiedonantoina. (Yritys A, henkilökohtainen tiedonanto, 24.2.2023), (Yritys B, henkilökohtainen tiedonanto, 2.3.2023), (Yritys C, henkilökohtainen tiedonanto, 10.3.2023) ja (Yritys D, henkilökohtainen tiedonanto, 28.3.2023 ja 31.3.2023)

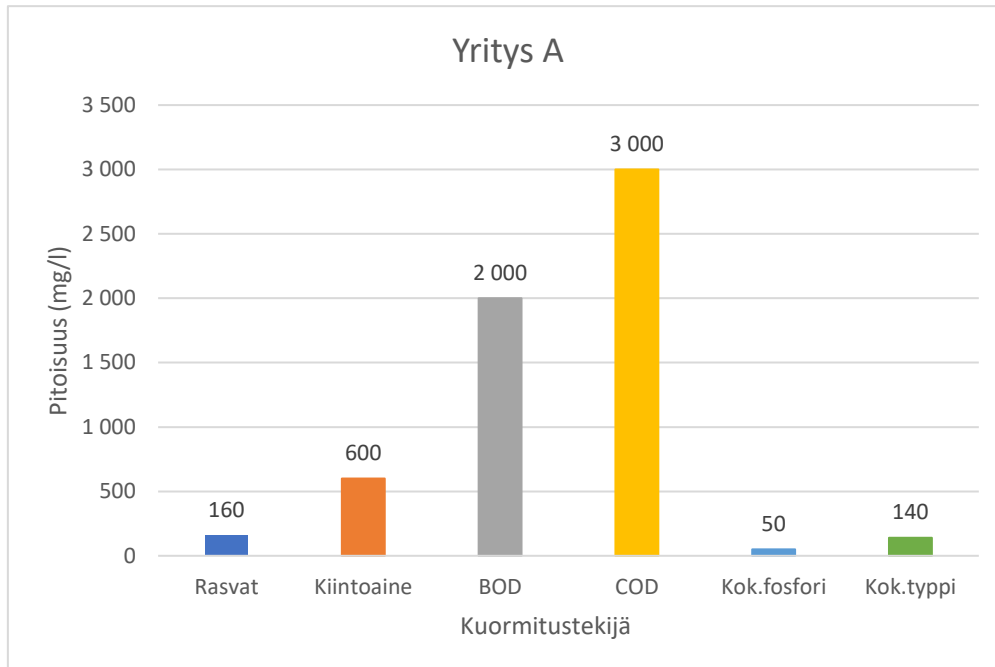
8.1 Jätevesien kuormitukset

Kuormituksina selvitettiin jätevesien vuotuinen määrä, rasvojen, kiintoaineen, BOD:n, COD:n, kokonaisfosforin ja kokonaistypen määrät jätevesissä. Nämä ovat parametreja, joita teollisuuden yritysten on seurattava jätevesistään ympäristölupiansa mukaan. (Vesilaitosyhdisty ja HSY, 2011, s.51) Yritysten jätevesien kuormitukseen vaikuttavia tekijöitä olivat esimerkiksi toimiala ja tuotantoprosessit, tehtaan ympäristölupa ja kunnallisen jätevedenpuhdistamon kanssa sovittu omien jätevesien esikäsittely.

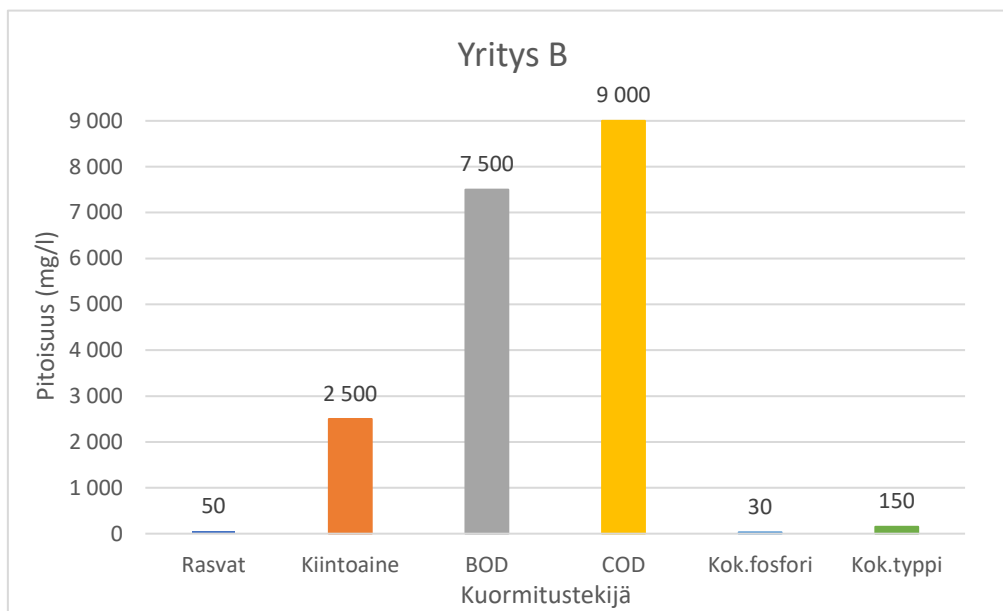
Ensin on esitetty jätevettä kuormittavia aineita yrityskohtaisesti pitoisuuksina. Pitoisuudet ovat vuosikeskiarvoja. Yritysten haastatteluissa saadut kuormitustekijät annettiin hieman eri tavoin. Osa yrityksistä antoi tiedon suoraan pitoisuutena (mg/l) ja osa yrityksistä antoi kuormituksena (kg/d). Lukujen vertailtavuuden vuoksi kaikki tulokset on esitetty muodossa mg/l. Yrityskohtaiset kuormittajien pitoisuudet on esitelty kuvissa Kuva 7, Kuva 8, Kuva 9 ja Kuva 10. Seuraavaksi lisätarkasteluun on otettu kuormittavista tekijöistä biologinen hapenkulutus, kemiallinen hapenkulutus sekä ravinteet fosfori ja typpi. Kuvissa Kuva 11, Kuva 12, Kuva 13 ja Kuva 14 on esitetty kuormitustekijäkohtaiset vertailut. Lisäksi

Kuvassa Kuva 15 on esitetty yritysten A, B, C ja D yhteenlasketut kuormitukset tonneina vuodessa (t/a).

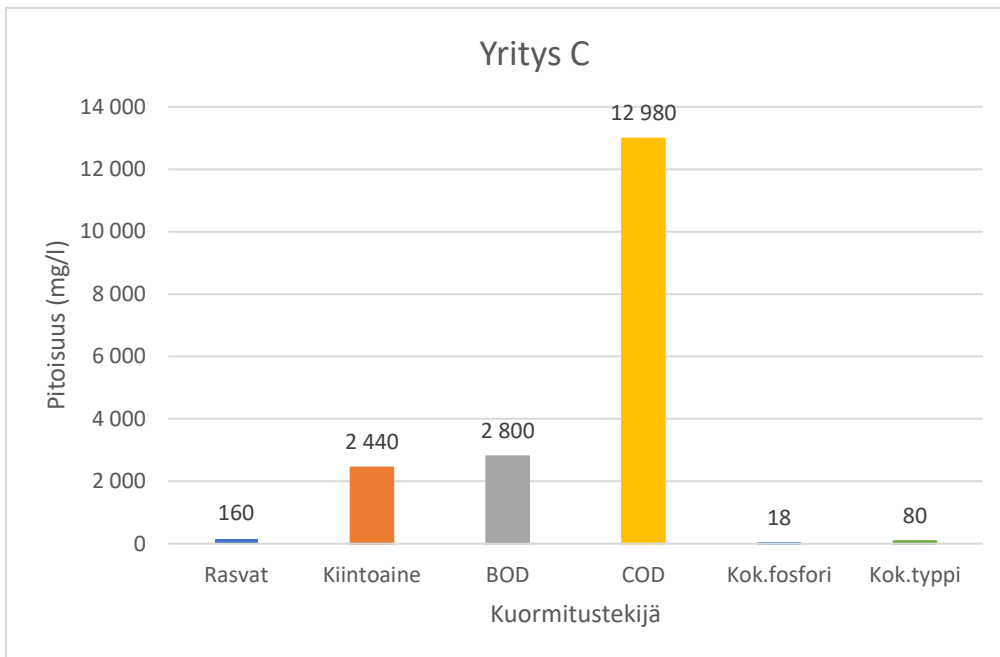
Kuva 7. Yrityksen A jäteveden kuormitustekijät pitoisuuksina (mg/l).



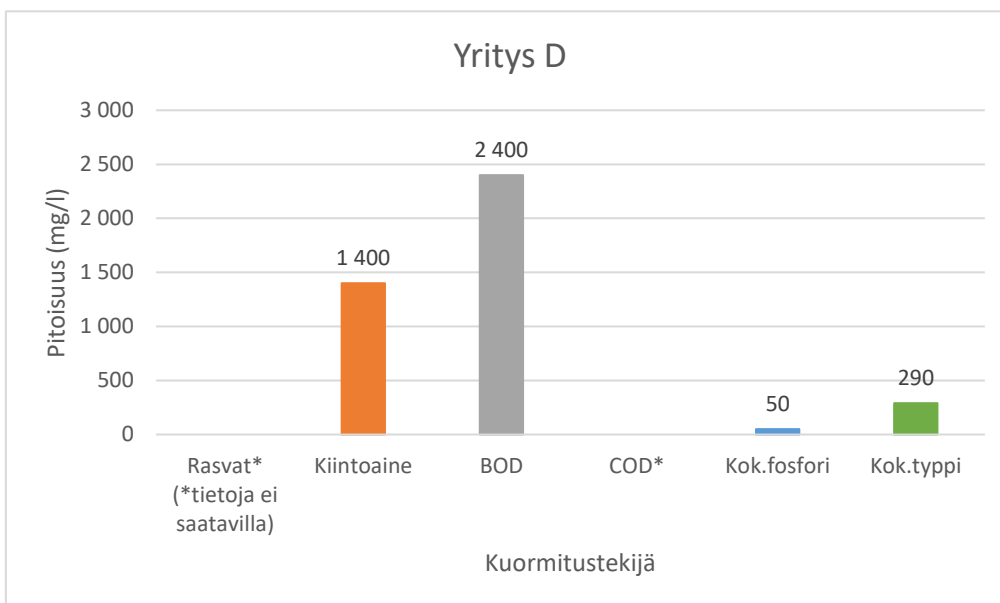
Kuva 8. Yrityksen B jäteveden kuormitustekijät pitoisuuksina (mg/l).



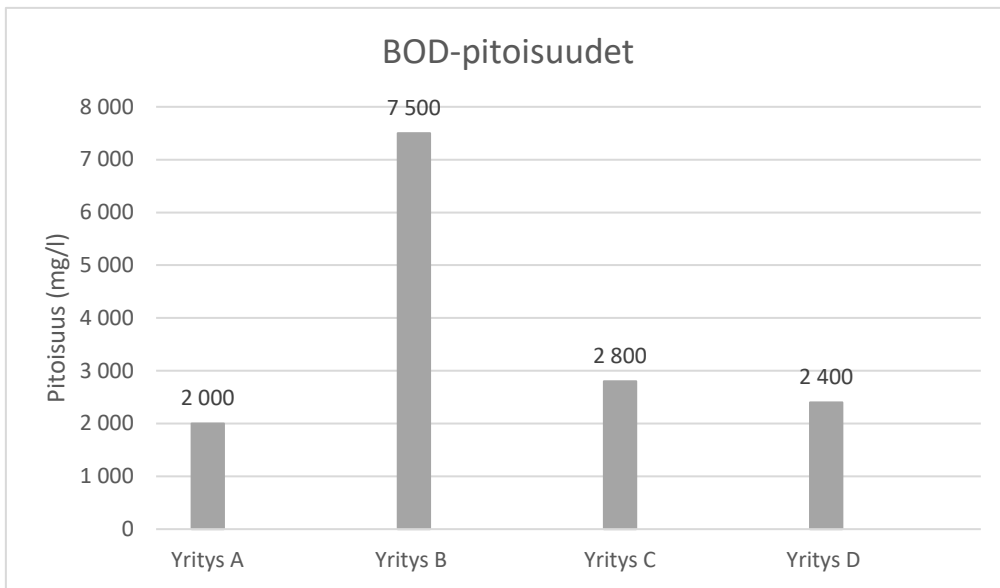
Kuva 9. Yrityksen C jäteveden kuormitustekijät pitoisuuksina (mg/l).



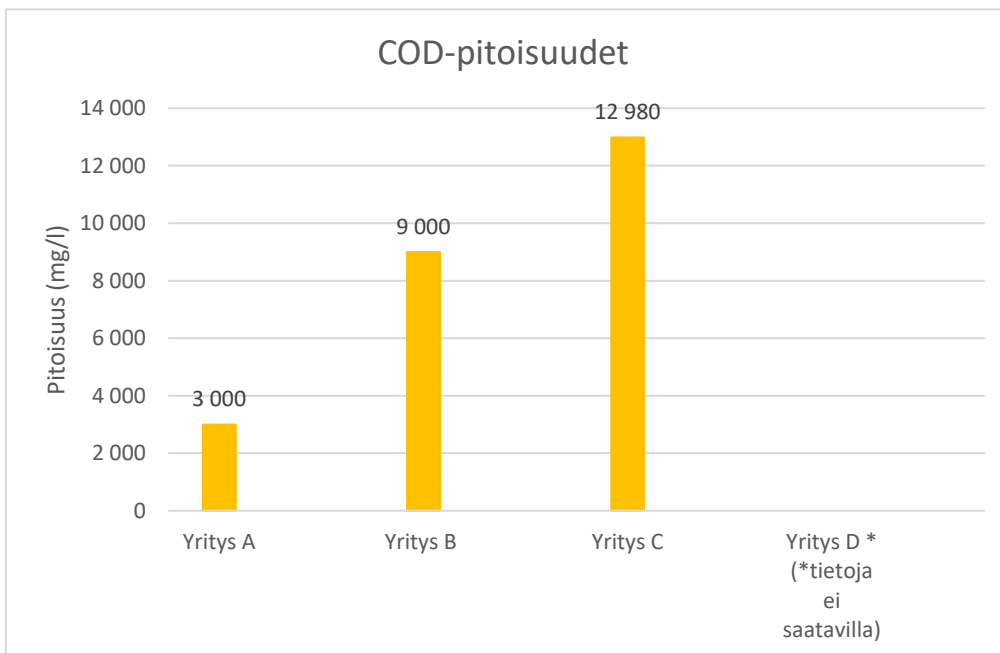
Kuva 10. Yrityksen D jäteveden kuormitustekijät pitoisuuksina (mg/l).



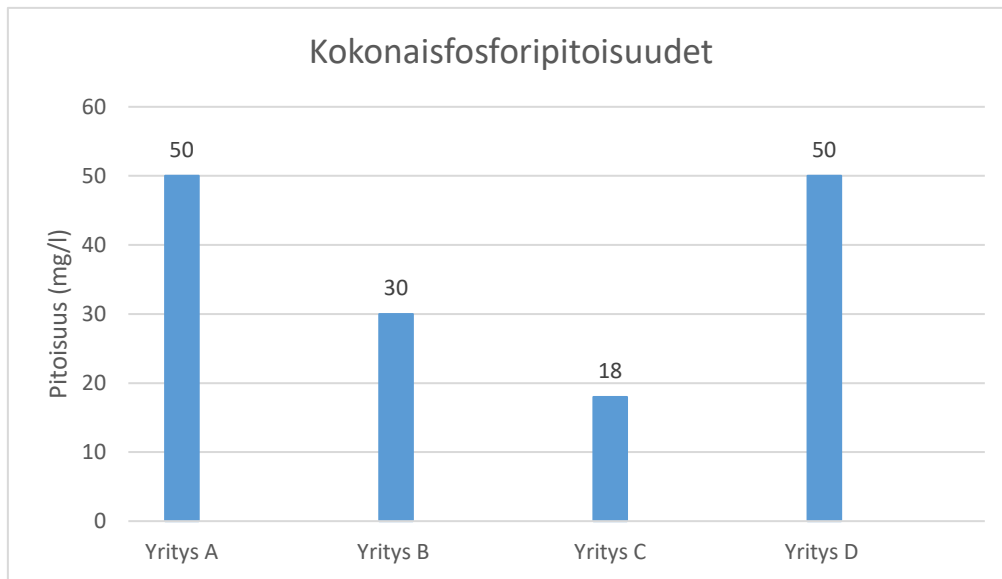
Kuva 11. Yritysten jätevesien BOD-pitoisuudet.



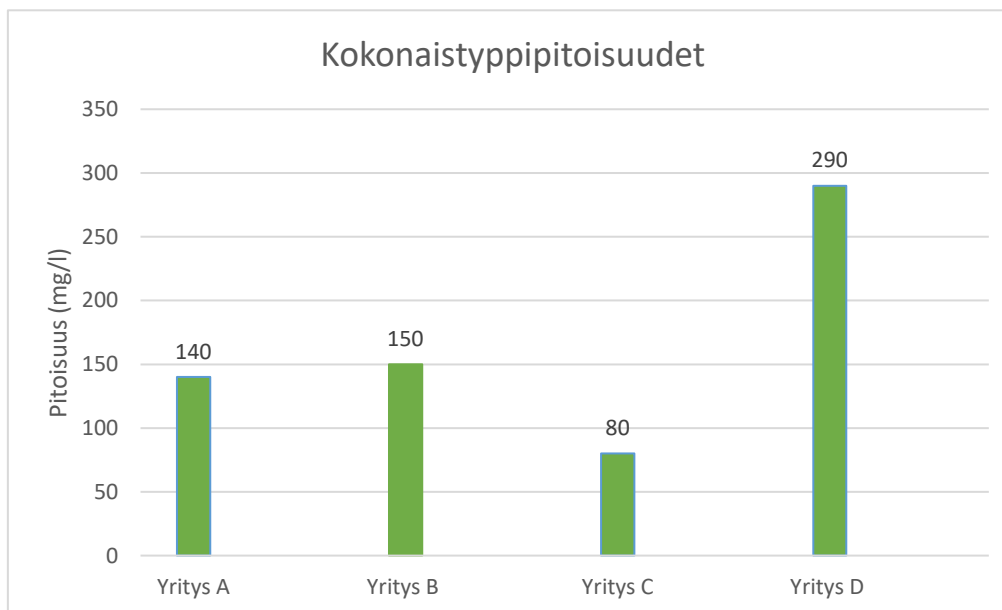
Kuva 12. Yritysten jätevesien COD-pitoisuudet.



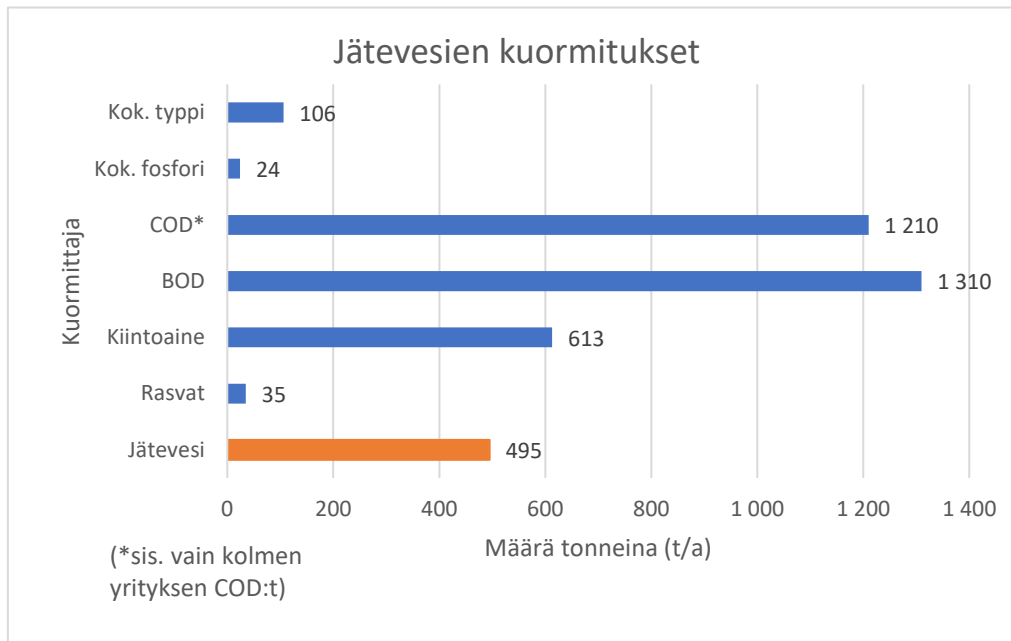
Kuva 13. Yritysten jätevesien kokonaisfosforipitoisuudet.



Kuva 14. Yritysten jätevesien kokonaistyyppipitoisuudet.



Kuva 15. Kanta-Hämeen alueen elintarviketeollisuuden yritysten A, B, C ja D jätevesien kuormitukset yhteensä.



Yrityskohtaisissa tuloksissa kaikilla alueen elintarviketeollisuuden yrityksillä merkittävin kuormituksen aiheuttaja on COD, pois lukien yritys D, jolta kyseistä tietoa ei ollut saatavilla. Seuraavaksi eniten kuormitusta aiheuttaa BOD ja näin se on hyvin linjassa myös kirjallisuuden kanssa, sillä COD:n pitäisikin olla enemmän, koska se sisältää vaikeamminkin hajoavat yhdisteet. COD:n ja BOD:n jälkeen seuraavaksi eniten yritysten jätevesiä kuormittavat kiintoaineet, mutta niitä on huomattavasti vähemmän kuin COD:ta ja BOD:ta. Seuraavaksi eniten kuormittava tekijä riippuu tarkasteltujen yritysten välillä niiden toimialasta ja se on joko rasvat tai kokonaistyyppi. Rasvat sisältyvät COD:hen ja BOD:hen, mutta yritysten on tarkkailtava niitä erikseen ympäristölupiensa velvoittamina. Kokonaisfosforia on selkeästi vähiten yritysten jätevesissä verrattuna muihin kuormittajiin.

Kuormittajakohtaisissa tarkasteluissa selkeästi eniten BOD:ta on yrityksen B jätevesissä. Kolmen muun yrityksen BOD-pitoisuudet ovat keskenään samansuuruiset. Yrityksen C jätevesissä on eniten COD:ta. Tässä kohtaa on vertailtu vain kolmen yrityksen COD:ta, sillä yrityksen D kohdalla sitä ei ollut saatavilla. Kolmantena yritysten välisessä vertailussa on kokonaisfosfori ja se on yrityksillä A ja D sama ja yrityksillä B ja C suunnilleen puolet edellä mainittujen pitoisuuksista. Viimeisenä vertailussa on kokonaistyyppi. Tämän kohdalla yritys D

erottuu muista yrityksistä. Sen kokonaistyyppi on melkein kaksi kertaa suurempi kuin kolmella muulla yrityksellä, joiden kokonaistypet ovat lähellä toisiaan.

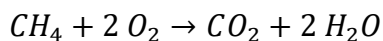
Yritysten jätevesissä eniten kuormitusta aiheuttavat COD, BOD ja kiintoaineet. Ravinteiden osuus näihin kuormittajiin verrattuna on pienin. Ravinteista kokonaistyyppiä on nelinkertainen pitoisuus verrattuna kokonaisfosforiin.

8.2 Biokaasuntuottopotentialit

Yritysten A, B, C ja D jätevesiä koskevien tulosten perusteella on arvioitu Kanta-Hämeen alueen biokaasuntuottopotentialia, jatkossa metaanintuottopotentialia COD:n avulla. Kemiallisen hapenkulutuksen avulla saadaan laskettua teoreettinen maksimituotto, sillä se sisältää sekä helposti että vaikeasti hajoavan orgaanisen aineksen. Käytännössä maksimituottoa on kuitenkin vaikea saavuttaa. (Kymäläinen, 2015, s.29)

Metaanintuottopotentialin arvioinnissa on käytetty apuna metaanin hapettumisreaktion kautta laskettua COD:n ja metaanin välistä suhdetta. Tällä tavalla saadaan laskettua teoreettinen maksimituotto. Metaanin palamisreaktion yhtälö on esitetty alla Kaava 1.

Kaava 1. Metaanin hapettumisreaktion yhtälö.



1 mooli metaania (CH₄) vastaa kahta moolia happea (O₂). Grammoina tämä on 16 g CH₄, jonka moolimassa M(CH₄) = 16 g/mol, ja se vastaa 64 g O₂ (M(O₂) = 32 g/mol). Saadaan, että 1 g happea eli 1 g COD:ta on $m(CH_4) / m(O_2) = (16/64) g = 0,25 g CH_4$. Muutetaan metaanin tiheyden avulla sen paino tilavuudeksi. Metaanin tiheys ρ on 0,72 g/l. Jaetaan kaasun massa sen tiheydellä ($V = \frac{m}{\rho}$) ja saadaan metaanin tilavuudeksi 0,35 l CH₄/g COD:ta, joka vastaa 0,35 m³ CH₄/kg COD:ta. (Kymäläinen, 2015, s.29)

Taulukko 1 on esitetty yrityskohtaisesti vuositasolla COD, metaanintuottopotentiali ja siitä saatava energia sekä wattitunteina että jouleina. Laskuissa on käytetty teoreettista metaanin maksimituottoa (0,35 m³CH₄/kgCOD) metaanintuottopotentialin laskemisessa.

Metaanintuottopotentialit on laskettu COD:n avulla pois lukien yrityksen D kohdalla, jolta oli vain BOD saatavilla. Sen metaanintuotto on laskettu BOD:n avulla.

Taulukko 1. Yritysten A, B, C ja D vuotuiset COD-määrät ja arviot metaanintuottopotentialaaleista esitettyinä eri energian yksiköissä.

	COD (kg/a)	CH₄-potentiali (m³CH₄/a)	Energia (kWh/a)	Energia (MWh/a)	Energia (GWh/a)	Energia (TJ/a)
Yritys A	547 500	191 625	1 916 250	1 916	1,92	6,90
Yritys B	328 500	114 975	1 149 750	1 150	1,15	4,14
Yritys C	330 690	115741	1 157 415	1 157	1,16	4,17
Yritys D (*BOD)	600 000	210 000	2 100 000	2 100	2,10	7,56
Yhteensä	1 206 690	632 341	6 323 415	6 323	6,32	22,77

Yritysten vuosittaisen metaanintuottopotentialit ovat riippuvaisia niiden jätevesien COD:sta, mutta tuloksista huomataan, että yritykset B ja C ovat COD-kuormitukseltaan ja metaanipotentialaaleiltaan hyvin lähellä toisiaan. Niin ikään yritykset A ja D ovat todella lähekkäin sekä COD:n että metaanintuoton osalta. Yrityksen D metaanintuottopotentiali voisi olla jopa korkeampi, jos sen COD olisi tiedossa.

Alueen yritysten jätevesien metaanintuotot on arvioitu optimistisesti, kun laskennassa käytettiin maksimituottoa. Esimerkiksi glutamaattipitoisesta jätevedestä on UASB-tekniikalla saatu tuotettua 0,31 l CH₄/gCOD laboratoriossa (Chen, ym., 2020), glyserolieetteriseosta sisältävästä jätevedestä EGSB-tekniikalla 0,32 m³CH₄/kgCOD laboratoriossa (Ferrero, ym., 2018) ja elintarviketeollisuuden jätevedestä AnMBR-tekniikalla tuotettua 0,40 l CH₄/gCOD pilot-mittakaavassa (Mahat, ym. 2021).

Kun metaanintuottopotentialit muutetaan yrityskohtaisesti biokaasuenergiaksi, saadaan laskennallisesti energiamääriä, joita on mahdollista ilmoittaa eri yksiköissä, esimerkiksi gigawattitunteina tai terajouleina vuotta kohti. Esimerkiksi Kanta-Hämeessä käytettiin vuonna 2020 suunnilleen 8000 (TJ/a) ja vuonna 2021 suunnilleen 10 000 (TJ/a) energiaa, josta elintarviketeollisuudessa käytettiin maakaasuna, eli metaanina, suunnilleen 2000 terajoulea/vuosi. (Tilastokeskus, 2022)

8.3 Muita tuloksia

Jätevesien kuormitustietojen lisäksi yrityksiltä selvitettiin tämänhetkistä muiden sivuvirtojen muodostumista ja hyödyntämistä, nykyisen jätevesienkäsittelyn osalta sitä, puhdistetaanko yritysten jätevedet kunnallisesti ja onko tuotannossa kausittaista vaihtelua, joka vaikuttaisi jäteveden määrään ja laatuun. Lisäksi selvitettiin, olisivatko yritykset kiinnostuneita puhdistamaan jätevetensä jollakin vaihtoehtoisella tavalla kuin tämänhetkinen puhdistus. Tulokset on koostettu Taulukko 2.

Taulukko 2. Kooste yritysten A, B, C ja D jätevesien käsittelyyn liittyvistä kysymyksistä ja vastauksista.

Yritys	Sivuvirtojen käsittely	Kunnallinen puhdistus	Kausittaista vaihtelua	Kiinnostus vaihtoehtoiseen tekniikkaan
A	Rehuksi Biokaasulaitokselle	Kyllä	Ei	Kyllä
B	Rehuksi	Kyllä	Ei	Kyllä
C	-	Kyllä	Kyllä	Kyllä
D	Biokaasuksi	Kyllä	Ei	Kyllä

Tässä yritysten tulokset olivat hyvin saman suuntaisia. Yritysten sellaiset sivuvirrat, jotka eivät ole jätevettä hyödynnetään ensisijaisesti rehuna ja toissijaisesti biokaasuna. Kaikilla yrityksillä on tällä hetkellä kunnallinen jätevedenpuhdistus. Neljästä yrityksestä kolmella ei ollut kausittaista tuotannon vaihtelua. Kaikilla neljällä yrityksellä oli mielenkiintoa vaihtoehtoisiin tapoihin puhdistaa jätevedet, mutta isoimpana epävarmuutta lisäävänä tekijänä olivat kunnalliselle puhdistukselle vaihtoehtoisella tavalla puhdistamisen kustannukset.

8.4 Alueen jätevesien vertailu kirjallisuuteen

Yritysten jätevesien koostumuksen lisäksi metaanituottoon vaikuttaa se, millaisella tekniikalla niitä puhdistetaan. Metaani saadaan talteen, kun jätevedet puhdistetaan anaerobisesti (Auxiliadora López, ym., 2023). Lisäksi anaerobista puhdistusta tukisi se, että neljän työssä tarkastellun elintarviketeollisuuden yrityksen jätevedet ovat kaikki pitoisuuksiltaan korkeakuormitteisia. Korkeakuormitteisuus voidaan määritellä esimerkiksi

siten, että jätevedessä on enemmän kuin 300 mg/l biologisesti happea kuluttavaa ainesta tai enemmän kuin 330 mg/l kokonaiskiintoaineita (Law Insider, n.d.).

Kaikkien yritysten jätevesissä on jonkun verran kiintoaineita ja niiden COD:t ovat vaihtelevia, mutta kaikki vedet soveltuisivat puhdistettaviksi ainakin UASB-tekniikalla. Kuudessa tekniikkavertailuun kootussa UASB-sovelluksen esimerkissä jätevesien COD vaihteli 2000—20 000 mg/l välillä. COD-poistoteho vaihteli niin ikään 57—96 prosentin välillä. EGSB-esimerkeissä COD on paikoin vielä korkeampi kuin UASB-esimerkeissä, joten sillekin tekniikalle yritysten jätevedet soveltuisivat puhdistettaviksi. IC-reaktoriesimerkeissä oli vaihtelevia COD-pitoisuuksia, mutta yritysten jätevedet soveltuisivat sillekin. Toisaalta reaktori ei ehkä toimi optimaalisesti, jos sitä kuormitetaan pienemmällä kuormituksella kuin mitä se kestäisi. Neljäntenä tekniikkavertailussa on ABR-tekniikka ja sen esimerkkikuormitukset olisivat lähimpänä yritysten jätevesien COD-pitoisuuksia. Viidentenä on AnMBR ja tämänkin tekniikan esimerkkikuormitukset ovat sopivalla pitoisuusalueella Kanta-Hämeen yritysten jätevesiä silmällä pitäen.

Viidestä työssä tarkastellusta korkeakuormitteisesta tekniikasta kolme ensimmäistä eli UASB, EGSB ja IC soveltuvat alueen yritysten jätevesille. Esimerkiksi UASB on jo paljon käytetty, joten siihen olisi ainakin tekniikka ja mahdollisesti osaaminenkin jo hyvin olemassa. ABR sietäisi tekniikoista eniten kiintoaineita, mutta ennen sitä jätevedestä pitäisi kuitenkin poistaa isoimmat kiintoaineet. Hybriditekniikka AnMBR olisi tekniikoista haasteellisin operoida, koska suodatinlaitteisto tukkeutuisi helposti.

9 Johtopäätökset

Opinnäytetyön tutkimuskysymykset olivat: 1. Millaisia erilaisia anaerobitekniikoita on korkeakuormitteisten jätevesien puhdistukseen? 2. Millaisiin jätevesiin anaerobitekniikoita on sovellettu? ja 3. Mikä on Kanta-Hämeen alueen elintarviketeollisuuden yritysten jätevesien biokaasu- ja ravinnepotentiaali?

Työssä tutustuttiin viiteen erilaiseen anaerobitekniikkaan korkeakuormitteisten jätevesien puhdistuksessa, jotka ovat UASB, EGSB, IC, ABR ja AnMBR. Näitä tekniikoita on sovellettu

moniin keskenään erilaisiin jätevesiin. Kanta-Hämeen alueen elintarviketeollisuuden yrityksistä neljän biokaasu- ja ravinnepotentiaalit olivat seuraavat: yritys A 191 600, yritys B 115 000, yritys C 115 700 ja yritys D 210 000 m³CH₄/kgCOD vuodessa. Kaikkien yritysten yhteinen ravinnepotentiaali oli 106 tonnia kokonaistyppeä ja 24 tonnia kokonaisfosforia vuodessa.

10 Pohdinta

Alueen elintarviketeollisuuden jätevesistä voisi poistaa osan niiden sisältämästä korkeasta kuormituksesta jollakin opinnäytetyössä käsitellyllä anaerobitekniikalla. Teollisuuden jätevesien anaerobikäsitely toimisi hyvänä esikäsitelynä ennen kunnallista puhdistamoa. Puhdistamon näkökulmasta kuitenkin kaikkea teollisuusvesien kuormitusta ei tulisi poistaa, koska etenkin pienempien jätevedenpuhdistamoiden puhdistusprosessi on mitoitettu huomioimaan teollisuusyritysten korkeakuormitteiset jätevedet. Kunnalliselle puhdistamolle tulevan korkean kuormituksen poistaminen kokonaan voisi häiritä herkkää jätevedenpuhdistusprosessia.

Anaerobitekniikoilla saadaan elintarviketeollisuuden jätevesien sisältämää orgaanista ainesta muunnettua biokaasuksi, mutta jätevesiin jää edelleen niiden sisältämiä ravinteita. Anaerobiprosessissa mikrobikasvu on vähäistä, ja siten myös sen ravinnetarve, joten kokonaisravinnemäärät eivät juurikaan muutu käsittelyn aikana. Yksi vaihtoehto ravinteiden poistoon voisi olla HAMK Bion BioVeRa-hankkeessa tutkimuskohteena oleva mikroleväkasvatus yhdistettynä jäteveden anaerobikäsitelyyn. Jätevesien ravinteikkaassa vedessä kasvanut mikrolevämassa voitaisiin hyödyntää esimerkiksi siten, että levä tuottaisi jotakin arvoyhdistettä, jonka erotuksen jälkeen loppu biomassa voisi olla vielä hyödynnettävissä rehuksi tai biokaasulaitoksella energiaksi.

Alueen yritysten jätevesissä on kuormitusta, mutta täyden mittakaavan reaktoriin vesiä on melko vähän ja kuormitus on vuosikuormitus. Erityisesti, jos jokaisella laitoksella olisi oma teknologia, jolla sen jätevesiä puhdistetaan, pitäisi tekniikka mitoittaa todella tarkasti, ettei se ole yli- tai alimitoitettu. Lisäksi työssä arvioidut yritysten jätevesien metaanintuottopotentialit ovat hyvin optimistisia ja todellisuudessa ei päästäisi niin

korkeisiin tuottoarvoihin, koska jätevedenpuhdistus on biologinen prosessi ja anaerobinen prosessi on monimutkainen. Teollisuuden jätevesien puhdistukseen ei ole olemassa helppoa ratkaisua, koska kuormitus aiheuttaa ongelmia kunnallisella puhdistamolla joko siten, että sitä on liikaa tai siten, että sitä on liian vähän.

Opinnäytetyön tuloksia lukiessa on hyvä huomata, että otanta alueen teollisuuden jätevesistä on erittäin suppea, koska haastattelussa oli vain neljä yritystä. Tällöin ei voida arvioida kattavasti koko Kanta-Hämeen alueen teollisuuden jätevesien biokaasu- ja ravinnepotentiaaleja. Laskennallisten biokaasuntuottoarvojen ja Tilastokeskuksen teollisuuden energiankäytön tilastoon suhteutettuna yritys A voisi saada katettua vuositasolla 6,9: yritys B 4,1: yritys C 4,2 ja yritys D 7,6 terajoulea omasta energiantarpeestaan pelkästään jätevesiensä biokaasuntuotoilla.

Työssä oli tarkastelussa vain elintarviketeollisuuden yrityksiä, koska niitä oli luontevinta lähteä tarkastelemaan. Alueella on kuitenkin paljon muutakin teollisuutta, jossa syntyy käsittelyä vaativia jäte- ja sivuvirtavesiä. Opinnäytetyön aiheen rajaus antaa suuntaa siitä, että maakunnan jätevesissä voisi olla paljonkin biokaasuntuotto- ja ravinnepotentiaaleja.

Pelkästään sovellusesimerkkien perusteella voisi tehdä johtopäätöksen, että alueen elintarviketeollisuuden jätevedet ovat liian laihoja joillekin tekniikoille, mutta pitää huomata, että jokaisen reaktorin pystyy mitoittamaan juuri kyseisen yrityksen jätevesien kuormituksille sopivaksi, jolloin sen toiminta on optimaalista. Jotta työn kirjallisuusosan tekniikoita voitaisiin soveltaa kunnolla Kanta-Hämeen alueen teollisuuden jätevesiin, pitäisi esimerkiksi jätevesien kuormitukseen ja niiden syntyprosesseihin sekä toisaalta puhdistustekniikoihin ja niiden kustannuksiin perehtyä vieläkin syvällisemmin.

Lähteet

- Alcaraz-Ibarra, S., Mier-Quiroga, M.A., Esparza-Soto, M., Lucero-Chavez, M. & Fall, C. (2020). Treatment of Chocolate-Processing Industry Wastewater in a Low-Temperature Pilot-Scale UASB: Reactor Performance and in-Situ Biogas Use for Bioenergy Recovery. *Biomass and Bioenergy* 142(2020), s.105786. ScienceDirect
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105786>
- Alves, I., Del Nery, V., Barbosa, M. Y. U., Damianovic, M. H. R. Z., & Pires, E. C. (2023). Evaluating granulometry and metal content in sludge from UASB reactors treating sugarcane vinasse. *Journal of Water Process Engineering*, 51, 103306.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103306>
- Antwi, P., Li, J., Opoku Boadi, P., Meng, J., Shi, E., Xue, C., Zhang, Y., & Ayivi, F. (2017). Functional bacterial and archaeal diversity revealed by 16S rRNA gene pyrosequencing during potato starch processing wastewater treatment in an UASB. *Bioresource Technology*, 235, 348–357.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.141>
- Aslam, A., Khan, S. J., & Shahzad, H. M. A. (2022). Anaerobic membrane bioreactors (Anmbrs) for municipal wastewater treatment- potential benefits, constraints, and future perspectives: An updated review. *Science of The Total Environment*, 802, 149612. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149612>
- Auxiliadora López, R., Tena, M., Solera, R., & Pérez, M. (2023). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and wine vinasse mixtures in single-stage and sequential-temperature processes. *Fuel*, 348, 128531. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128531>
- Azizan, N. A. Z., Kamyab, H., Yuzir, A., Abdullah, N., Kirpichnikova, I., Oryani, B., & Rezanía, S. (2022). The effects of caffeine, gliclazide, and prazosin on the performance and microbial diversity in an up-flow anaerobic sludge blanket (Uasb) reactor. *Biomass and Bioenergy*, 163, 106511. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106511>
- Chen, H., Liu, G., Wang, K., Piao, C., Ma, X., & Li, X.-K. (2021). Characteristics of microbial community in EGSB system treating with oxytetracycline production wastewater. *Journal of Environmental Management*, 295, s.113055.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113055>

- Chen, H., Wei, Y., Xie, C., Wang, H., Chang, S., Xiong, Y., Du, C., Xiao, B. & Yu, G. (2020). Anaerobic Treatment of Glutamate-Rich Wastewater in a Continuous UASB Reactor: Effect of Hydraulic Retention Time and Methanogenic Degradation Pathway. *Chemosphere* 245(2020), s. 125672. ScienceDirect
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125672>
- Chen, J., Liu, Y., Liu, K., Hu, L., Yang, J., Wang, X., Song, Z., Yang, Y., Tang, M., & Wang, R. (2021). Bacterial community composition of internal circulation reactor at different heights for large-scale brewery wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 331, 125027. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125027>
- Chong, S., Sen, T. K., Kayaalp, A., & Ang, H. M. (2012). The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (Uasb) reactors for domestic sludge treatment – A State-of-the-art review. *Water Research*, 46(11), 3434–3470.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.066>
- Cui, P., Zhou, X., & Zhang, Y. (2011). The feasibility study of cotton pulp wastewater treatment with ic anaerobic reactor. *Procedia Environmental Sciences*, 11, 686–692.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.107>
- Dastyar, W., Amani, T., & Elyasi, Sh. (2015). Investigation of affecting parameters on treating high-strength compost leachate in a hybrid EGSB and fixed-bed reactor followed by electrocoagulation–flotation process. *Process Safety and Environmental Protection*, 95, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.01.012>
- Dereli, R. K., Grelot, A., Heffernan, B., van der Zee, F. P., & van Lier, J. B. (2014). Implications of changes in solids retention time on long term evolution of sludge filterability in anaerobic membrane bioreactors treating high strength industrial wastewater. *Water Research*, 59, 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.03.073>
- Eawag. (2020). *Cross-section of an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor*. [Kuva]. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
<https://sswm.info/factsheet/uasb-reactor>
- Eawag. (2020) *Schematic of the Anaerobic Baffled Reactor*. [Kuva]. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. <https://sswm.info/factsheet/anaerobic-baffled-reactor-%28abr%29>
- Elmoutez, S., Abushaban, A., Necibi, M. C., Sillanpää, M., Liu, J., Dhíba, D., Chehbouni, A., & Taky, M. (2023). Design and operational aspects of anaerobic membrane bioreactor

- for efficient wastewater treatment and biogas production. *Environmental Challenges*, 10, 100671. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100671>
- Fang, C., O-Thong, S., Boe, K., & Angelidaki, I. (2011). Comparison of UASB and EGSB reactors performance, for treatment of raw and deoiled palm oil mill effluent (Pome). *Journal of Hazardous Materials*, 189(1), 229–234. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.025>
- Faria, C. V., Souza, D. F., Pontes, T. M., Amaral, M. C. S., & Fonseca, F. V. (2019). Strategies of anaerobic sludge granulation in an EGSB reactor. *Journal of Environmental Management*, 244, ss. 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.015>
- Ferrero, P., San-Valero, P., Gabaldón, C., Martínez-Soria, V., & Peña-roja, J. M. (2018). Anaerobic degradation of glycol ether-ethanol mixtures using EGSB and hybrid reactors: Performance comparison and ether cleavage pathway. *Journal of Environmental Management*, 213, 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.070>
- Guo, K., Shang, Y., Gao, B., Xu, X., Lu, S., & Qi, Q. (2018). Study on the treatment of soybean protein wastewater by a pilot-scale IC-A/O coupling reactor. *Chemical Engineering Journal*, 343, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.128>
- HAMK Bio -tutkimusyksikkö. (n.d.). *Vesistä biovoimaa ja ravinteita*. <https://www.hamk.fi/projektit/vesista-biovoimaa-ja-ravinteita-biovera/>
- He, H., Liu, L., & Ma, H. (2023). The key regulative parameters in pilot-scale IC reactor for effective incineration landfill leachate treatment: Focus on the process performance and microbial community. *Journal of Water Process Engineering*, 51, 103322. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103322>
- HSY. (n.d.). *Jätevedenpuhdistusprosessi*. Helsingin seudun ympäristöpalvelut. <https://www.hsy.fi/vesi-ja-viemarit/jatevedenpuhdistusprosessi-lyhyesti/>
- HSY. (n.d.). *Poikkeavat jätevedet*. Helsingin seudun ympäristöpalvelut. <https://www.hsy.fi/vesi-ja-viemarit/poikkeavat-jatevedet/#Teollisuusj%C3%A4tevedet>
- IWA. (n.d.). *Up Flow — Anaerobic Sludge Blanket Reactor (UASB)*. The International Water Association. <https://www.iwapublishing.com/news/flow-anaerobic-sludge-blanket-reactor-uasb>

- Jia, R., Sun, D., Dang, Y., Meier, D., Holmes, D. E., & Smith, J. A. (2020). Carbon cloth enhances treatment of high-strength brewery wastewater in anaerobic dynamic membrane bioreactors. *Bioresource Technology*, 298, 122547. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122547>
- Kamyab, B., & Zilouei, H. (2021). Investigating the Efficiency of Biogas Production Using Modelling Anaerobic Digestion of Baker's Yeast Wastewater on Two-Stage Mixed-UASB Reactor. *Fuel* 285(2021), s. 119198. ScienceDirect <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119198>
- Kokemäen Vesihuolto Oy. (n.d.). *Teollisuusjätevedet*. <https://www.kokemaenvesihuolto.fi/viemari/teollisuusjatevedet/>
- Kong, Z., Li, L., Kurihara, R., Zhang, T., & Li, Y.-Y. (2019). Anaerobic treatment of N,N-dimethylformamide-containing high-strength wastewater by submerged anaerobic membrane bioreactor with a co-cultured inoculum. *Science of The Total Environment*, 663, 696–708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.358>
- Kotcharoen, W., Watari, T., Adlin, N., Tran P., T., Satanwat, P., Pungrasmi, W., Powtongsook, S., Takeuchi, Y., Hatamoto, M., Yamazaki, S., & Yamaguchi, T. (2023). Evaluation of an anaerobic baffled reactor (Abr) – downflow hanging sponge (Dhs) system in treatment of black wastewater from a closed recirculating aquaculture system. *Aquacultural Engineering*, 100, 102303. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102303>
- Kymäläinen, M. (2015). Biokaasutuotannon raaka-aineet. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.), *Biokaasuteknologia – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss 21-44). Hämeen ammattikorkeakoulu https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104180/HAMK_Biokaasun_tuotanto_2015_ekirja.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Law Insider. (n.d.). *High-strength wastewater definition*. [Sanakirja]. <https://www.lawinsider.com/dictionary/high-strength-wastewater>
- Li, H., Wang, C., Chen, X., Xiong, L., Guo, H., Yao, S., Wang, M., Chen, X., & Huang, C. (2022). Anaerobic digestion of rice straw pretreatment liquor without detoxification for continuous biogas production using a 100 L internal circulation reactor. *Journal of Cleaner Production*, 349, 131450. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131450>

- Li, C., Wang, R., Yang, X., Zhou, M., Pan, X., Cai, G., Zhang, Y., & Zhu, G. (2021). Deeper investigation on methane generation from synthetic wastewater containing oxytetracycline in a scale up acidic anaerobic baffled reactor. *Bioresource Technology*, 333, 125156. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125156>
- Lin Lau, P. & Trzcinski, A. P. (2022). A review of modified and hybrid anaerobic baffled reactors for industrial wastewater treatment. *Water Science and Engineering*, 15(3), ss. 247-256. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.06.004>
- Liu, J., Tang, Z., Wang, C., Wu, K., Song, Y., Wang, X., Zhang, Z., Zhao, X., Yang, B., Piao, M., Yin, F., & Zhang, W. (2021). Novel technique for sustainable utilisation of water hyacinth using EGSB and MCSTR: Control overgrowth, energy recovery, and microbial metabolic mechanism. *Renewable Energy*, 163, 1701–1710. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.093>
- Logan, M., Tan, L. C., Nzeteu, C. O., & Lens, P. N. L. (2023). Effect of selenate on treatment of glycerol containing wastewater in UASB reactors. *Renewable Energy*, 206, 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.106>
- Loganath, R., & Mazumder, D. (2018). Performance study on organic carbon, total nitrogen, suspended solids removal and biogas production in hybrid UASB reactor treating real slaughterhouse wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), ss.3474–3484. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.05.031>
- Luo, J., Zhou, J., Qian, G., & Liu, J. (2014). Effective anaerobic biodegradation of municipal solid waste fresh leachate using a novel pilot-scale reactor: Comparison under different seeding granular sludge. *Bioresource Technology*, 165, 152–157. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.141>
- Mahat, S. B., Omar, R., Che Man, H., Mohamad Idris, A. I., Mustapa Kamal, S. M., Idris, A., Shreeshivadasan, C., Jamali, N. S., & Abdullah, L. C. (2021). Performance of dynamic anaerobic membrane bioreactor (Danmbr) with phase separation in treating high strength food processing wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105245. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105245>
- Mortezaei, Y., Amani, T., & Elyasi, Sh. (2018). High-rate anaerobic digestion of yogurt wastewater in a hybrid EGSB and fixed-bed reactor: Optimizing through response surface methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 113, ss.255–263. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.10.012>

- Nicolella, C., van Loosdrecht, M. C. M., & Heijnen, S. J. (2000). Particle-based biofilm reactor technology. *Trends in Biotechnology*, *18*(7), 312–320. [https://doi.org/10.1016/S0167-7799\(00\)01461-X](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(00)01461-X)
- Parawira, W., Kudita, I., Nyandoroh, M. G., & Zvauya, R. (2005). A study of industrial anaerobic treatment of opaque beer brewery wastewater in a tropical climate using a full-scale UASB reactor seeded with activated sludge. *Process Biochemistry*, *40*(2), 593–599. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.01.036>
- Parihar, R. K., Chaurasia, S. P., & Midda, M. O. (2023). An overview of anaerobic membrane bioreactors' evolving research statistics for treating wastewater. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.156>
- Roati, C., Fiore, S., Ruffino, B., Marchese, F., Novarino, D., & Zanetti, M. C. (2012). Preliminary evaluation of the potential biogas production of food processing industrial wastes. *American Journal of Environmental Sciences* *8*(3), 291-296. <https://tinyurl.com/bp6a25m4>
- Sanchez, L., Carrier, M., Cartier, J., Charmette, C., Heran, M., Steyer, J.-P., & Lesage, G. (2022). Enhanced organic degradation and biogas production of domestic wastewater at psychrophilic temperature through submerged granular anaerobic membrane bioreactor for energy-positive treatment. *Bioresource Technology*, *353*, 127145. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127145>
- Saravanan, A., Senthil Kumar, P., Rangasamy, G., Hariharan, R., Hemavathy, R. V., Deepika, P. D., Anand, K., & Karthika, S. (2023). Strategies for enhancing the efficacy of anaerobic digestion of food industry wastewater: An insight into bioreactor types, challenges, and future scope. *Chemosphere*, *310*, 136856. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136856>
- Sattler, M. (2011). Anaerobic processes for waste treatment and energy generation. Teoksessa S. Kumar (toim.), *Integrated Waste Management*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/17731>
- SciMed. (n.d.). *What is chemical oxygen demand (COD)?* Haaettu 21.4.2023 osoitteesta <https://www.scimed.co.uk/education/what-is-chemical-oxygen-demand-cod/>
- Sheldon, M. S., & Erdogan, I. G. (2016). Multi-stage EGSB/MBR treatment of soft drink industry wastewater. *Chemical Engineering Journal*, *285*, 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.021>

- Sitoumus 2050. (n.d.). *Yhdyskuntajäteveden puhdistamisen green deal -sopimus*.
<https://sitoumus2050.fi/jatevesi#/>
- Soh, Y. N. A., Kunacheva, C., Webster, R. D., & Stuckey, D. C. (2020). Composition and biotransformational changes in soluble microbial products (Smps) along an anaerobic baffled reactor (Abr). *Chemosphere*, 254, 126775.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126775>
- Tilastokeskus. (2022). *Teollisuuden energiankäyttö kasvoi 3,6 % vuonna 2021*.
<https://www.stat.fi/julkaisu/cku2otx208xjq0c52ldp3uyxg>
- Tran, C.-S., Vo, T.-K.-Q., Dang, T. B., Nguyen, P.-T., Nguyen, K.-Q., Hoang, Q.-H., Le, L.-T., Nguyen, T.-T., & Bui, X.-T. (2022). Anaerobic baffled reactor coupled with membrane bioreactor treating tannery wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 5, 100185. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100185>
- Vesilaitosyhdistys ja HSY. (2011). ss. 51–52 *Teollisuusjätevesiöpas: Asumajätevesistä poikkeavien jätevesien johtaminen viemäriin*. Suomen vesilaitosyhdistys ry.
- Wang, J., Xu, W., Yan, J., & Yu, J. (2014). Study on the flow characteristics and the wastewater treatment performance in modified internal circulation reactor. *Chemosphere*, 117, 631–637. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.088>
- Wang, K. M., Soares, A., Jefferson, B., Wang, H. Y., Zhang, L. J., Jiang, S. F., & McAdam, E. J. (2020). Establishing the mechanisms underpinning solids breakthrough in UASB configured anaerobic membrane bioreactors to mitigate fouling. *Water Research*, 176, s.115754. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115754>
- Wang, K. M., Zhou, L. X., Ji, K. F., Xu, S. N., & Wang, J. D. (2022). Evaluation of a modified internal circulation (Mic) anaerobic reactor for real antibiotic pharmaceutical wastewater treatment: Process performance, microbial community and antibiotic resistance genes evolutions. *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102914.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102914>
- Wang, K., Zhou, L., Meng, S., Wang, Y., Yu, B., & Wang, J. (2023). Anaerobic membrane bioreactor for real antibiotic pharmaceutical wastewater treatment: Positive effect of fouling layer on antibiotics and antibiotic resistance genes removals. *Journal of Cleaner Production*, 409, 137234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137234>

- Wang, S., Parajuli, S., Sivalingam, V., & Bakke, R. (2019). Biofilm in moving bed biofilm process for wastewater treatment. Teoksessa S. Dincer (toim.), *Bacterial Biofilms*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88520>
- Wang, T., Huang, Z., Ruan, W., Zhao, M., Shao, Y., & Miao, H. (2018). Insights into sludge granulation during anaerobic treatment of high-strength leachate via a full-scale IC reactor with external circulation system. *Journal of Environmental Sciences*, 64, 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.06.024>
- Wang, Y., Chen, Y., Xie, H., Cao, W., Chen, R., Kong, Z., & Zhang, Y. (2023). Insight into the effects and mechanism of cellulose and hemicellulose on anaerobic digestion in a CSTR-AnMBR system during swine wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 869, 161776. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161776>
- Xu, M., Gao, P., Chen, H., Huang, X., Xue, Z., Shen, X., Li, C., & Cao, J. (2022). Spatiotemporal distribution of microorganisms in a full-scale anaerobic baffled reactor–anoxic/oxic treatment plant for printing and dyeing wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103090. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103090>
- Yang, H., Li, Z., Chen, Y., & Zhou, Z. (2022). Role of microparticles in membrane fouling from acidogenesis to methanogenesis phases in an anaerobic baffled reactor. *Science of The Total Environment*, 806, 150663. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150663>
- Yang, Y., Zang, Y., Hu, Y., Wang, X. C., & Ngo, H. H. (2020). Upflow anaerobic dynamic membrane bioreactor (Andmbr) for wastewater treatment at room temperature and short HRTs: Process characteristics and practical applicability. *Chemical Engineering Journal*, 383, 123186. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123186>
- Yen, F.-C., Chang, T.-C., Hu, C. C., Laohaprapanon, S., Natarajan, T. S., & You, S.-J. (2016). Feasibility of combined upflow anaerobic sludge blanket-aerobic membrane bioreactor system in treating purified terephthalic acid wastewater and polyimide membrane for biogas purification. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(4, Part A), 4113–4119. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.09.010>
- Zhang, L., Ban, Q., Li, J., & Wang, T. (2022). Simultaneous production of hydrogen-methane and spatial community succession in an anaerobic baffled reactor treating corn starch processing wastewater. *Chemosphere*, 300, 134503. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134503>

Zhang, Y., Yan, L., Chi, L., Long, X., Mei, Z., & Zhang, Z. (2008). Startup and operation of anaerobic EGSB reactor treating palm oil mill effluent. *Journal of Environmental Sciences*, 20(6), 658–663. [Kuva]. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62109-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62109-9)

Liite 1: Tekniikkavertailu

Taustatietoja		Toimintaparametri						Tuottoparametri						
Reaktori	Sovelluskohde	Reaktorin mittakaava	Kokeen kesto	pH	Lämpötila (°C)	Viipymäaika HRT	Syötteen COD (mg/l)	Kuormitus OLR	COD-poisto	Biokaasu/metaa	Maa	Muita huomio	Lähdeviite	
UASB	Glutamaattipitoi	Laboratorio 6 l (Ø 100)	180 päivää	7	35	48 - 2 h, paras 4,5	1916,52 - 2060,72	0,95 - 24,66 (g COD/l*d)	95,5 - 96,5	Metaanintuotto	Kiina	Kokeessa muu	Chen, ym., 2020	
UASB	Suklaaprosessite	Pilot 244 l (0,30 x 0,3)	275 päivää	6,7	18,5 ± 2,9	6,2 h	COD ₇ 2616,3; COD ₅ 2026,5	10,3 (kg COD ₇ /m ³ d)	71,4	Biokaasuntuotto	Meksiko	Kaikki tulokset	Alcaraz-Ibarra, ym., 2020	
UASB	Sokeriruokovina	Pilot 120 l (Ø 19,5 cm)	372 - 617 päi	Ei main	22 ± 3	Ei mainintaa	20 (g/l)	0,3 - 20 (g COD/l*d)	88 ± 7	Biokaasuntuotto	Brasilia	Kokeen pääpa	Alves, ym., 2023	
UASB	Durraolutpanimo	Täysi 500 m ³	2 vuotta	6,5 - 7,	25 - 35	24 h	8240 - 20 000	6 (kg COD/m ³ d)	57	Ei otettu talteen	Zimbabwe	Kiintoaineen p	Parawira, ym., 2005	
UASB	Lääkeaineyhdiste	Laboratorio 5 l	92 päivää	6,87	37	36 - 48 h	COD ₅ n. 2500	1,4 (kg COD/m ³ d)	93 ± 2	Biokaasuntuotto	Malesia		Azizan, ym., 2022	
UASB	Perunatärkkelys	Laboratorio 8,8 l (120 cm)	281 päivää	6	35	72 - 36 h	7,5 - 20 (g/l)	2,7 - 13,2 (kg COD/m ³ d)	Ei mainintaa	Mitattiin, mutta	Kiina	Kokeen pääpa	Antwi, ym., 2017	
EGSB	Palmuöljyteollis	Laboratorio 1,3 l	78 päivää	> 6	55	5 - 10 päivää	COD ₇ 97 (g/l) COD ₅ 88	1,3 - 10,4 (g VS/l*d)	53 - 95	531 - 3527 (ml CH ₄)	Tanska/It	Korkea liuenn	Fang, ym., 2011	
EGSB	Virvoitusjuomate	Laboratorio 24 l (Ø 10)	135 päivää	6,5 - 7,	35 - 37	12 - 60 h	COD ₇ 1167 - 9950	0,7 - 10,9 (kg COD/m ³ d)	93	Biokaasuntuotto	Etelä-Af	Kiintoaineen p	Sheldon & Erdogan, 2016	
EGSB	Jogurttijätevesi	Laboratorio 5,4 l (Ø 1)	Ei mainintaa	6,2 - 7,	35	25 - 100 h	1000 - 15 000	0,38 - 7,68	90	Biokaasuntuotto	Iran	Ei pysty poista	Mortezaei, ym., 2018	
EGSB	Kompostijätteide	Laboratorio 5,4 l (Ø 1)	Ei mainintaa	Ei sääd	35	20 - 96 h	1076 - 10 074	0,45 - 5,66 (kg COD/m ³ d)	52 - 89	Biokaasuntuotto	Iran	Kiintoaineen p	Dastyar, ym., 2015	
EGSB	Glykolieetterise	Laboratorio 19 l (Ø 0,	335	Ei main	25	Ei mainintaa	3,9 - 21,6 (g/l)	9,1 - 54,1 (kg COD/m ³ d)	> 92	Metaanintuotto	Espanja		Ferrero, ym., 2018	
EGSB	Vesihyasinin en	Laboratorio 1,6 l (Ø 8)	180 päivää	7,0 - 7,	19 - 32	0,7 - 2,2 päivää	15 630 - 23 500	7,25 - 22,33 (kg COD/m ³ d)	88	Biokaasuntuotto	Kiina		Liu, ym., 2021	
IC	Lääkeantibiootti	20 l (Ø 0,15 m, k 2,5 m)	115	6,7 - 7,	35 ± 2	3 - 4 päivää	1213 - 18 950	2,7 - 7,2 (kg COD/m ³ d)	92	Biokaasuntuotto	Kiina		Wang, ym., 2022	
IC	Panimojätevesi	Täysi (Ø 11 m, k 21 m)	Yli kaksi vuotta	6 - 10	Ei mainintaa	Ei mainintaa	5000 - 6000	Ei mainintaa	80 - 84,09	Ei mainintaa	Kiina		Chen, ym., 2021	
IC	Riisinkorsien esi	100 l	25 päivää	< 6,0 -	37	Ei mainintaa	4023 - 19 437	1 - 4,21 (kg COD/m ³ d)	85,72	Biokaasuntuotto	Kiina		Li, ym., 2022	
IC	Jätteiden poltos	Pilot 0,25 m ³ (Ø 0,4 m)	77 päivää	7,5	33 ± 2	Ei mainintaa	5000	10 - 30 (kg/m ³ d)	85	Biokaasuntuotto	Kiina		He, ym., 2023	
IC	Soijaproteiinijäte	Pilot 20 m ³ (Ø 2m, k 7)	7 kk	7,0 - 7,	22 - 31	24 h	2000 - 12 000	0,21 - 9,5 (kg COD/m ³ d)	90	Metaanintuotto	Kiina	Syöttö 0,1 - 1,0	Guo, ym., 2018	
IC	Korkeakuormitte	Täysi 730 m ³ (Ø 7,0 m)	106 päivää	Ei main	35 - 37	2,4 - 10,4 päivää	43 045 - 65 000	3,52 - 25,16 (kg COD/m ³ d)	64,5 - 93,4	Biokaasuntuotto	Kiina	Syöttö 70 - 320	Wang, ym., 2018	
ABR	Vesiviljelyvesi, k	Laboratorio 10 l (2,5	500 päivää	8,2	35	5 päivää ensimmä	ilmoitettu kokonai	0,724 gTOC/l/d		Biokaasuntuotto	Japani	Koska kyseess	Kotcharoen, ym., 2023	
ABR	Liukoiset mikrob	Laboratorio 10 l	158 päivää	Ei main	25 ± 1	24 h	500 - 4000	Ei mainintaa	56 - 97	Metaanipitoisuus	Singapore		Soh, ym., 2020	
ABR	Värianejätevede	Täysi 20 000 m ³ päivä	10 kk	7,0 - 9,	30 - 34	24,1 h	565 ± 122	Ei mainintaa	Ei mainintaa	Ei mainintaa	Kiina		Xu, ym., 2022	
ABR	Antibioottijäteve	Skaalattu 26 l (l 10 cm)	49 päivää	4,6 - 6,	35 ± 1	24 h	2000 - 4500	1,0 - 5,0 (g OTC/m ³ d)	95	Biokaasuntuotto	Kiina	Kokeessa tarka	Li, ym., 2021	
ABR	Maiissitärkkelysp	18 l	56 päivää	6,0 - 7,	35 ± 1	Ei mainintaa	10 300 ± 2850	4,0 (kg COD/m ³ d)	90,6	Metannintuotto	Kiina	Kokeessa testa	Zhang, ym., 2022	
ABR	Synteettinen jäte	Laboratorio 13,2 l (4	n. vuosi	6,98 - 7,	32 ± 2	12 h	468,64	Ei mainintaa	92	Biokaasuntuotto	Kiina	Kokeessa tutki	Yang, ym., 2022	
AnMBR	Asumajätevesi	Laboratorio 3,6 l	93 päivää	Ei main	20 - 25	1 - 8 h	272,6 - 283,9	0,82 - 6,8 (kg COD/m ³ d)	60,4 - 77,3	Metaanintuotto	Kiina	Reaktorina yh	Yang, ym., 2020	
AnMBR	Elintarviketeollis	Pilot 10 l (Ø 82 cm, k	280 päivää	6,8 - 7,	35 - 40	0,4 - 1,3 päivää	15 500 - 17 500	3,5 - 7,0 (g COD/l*d)	90	Metaanintuotto	Singapore	Ylösvirtausliet	Mahat, ym., 2021	
AnMBR	Panimojätevesi	Laboratorio 6,8 l	55 päivää	n. 7,8	35	5 päivää	5000 - 10 000	2,23 (kg COD/m ³ d)	98	Ei mainintaa	Kiina/Yh	Reaktoreina ka	Jia, ym., 2020	
AnMBR	Antibioottijäteve	Laboratorio 1,6 l (Ø 0	yli 200 päivä	n. 6,5 -	Ei mainintaa	1,5 päivää	11 000 - 12 000	Ei mainintaa	81	Metaanintuotto	Kiina	Reaktorina laa	Wang, ym., 2023	
AnMBR	Liuotinjätevesi (l	Laboratorio 7 l	250 päivää	7,25 - 7,	35	8 - 24 h	2000	3,14 - 4,16 (g COD/l*d)	94,87	Metaanintuotto	Japani	Membraani up	Kong, ym., 2019	
AnMBR	Bioetanoliilaitoks	Laboratorio 10 l	3 - 6 kk	Ei main	37	10 - 12 päivää	470 - 1070	6,1 - 8,3 (kg COD/m ³ d)	99	Metaanintuotto	Alamkor	Anaerobimem	Dereli, ym., 2014	

Liite 2: Haastattelukysymykset

Kuinka paljon jätevesiä syntyy vuodessa?

Miten jätevedet puhdistetaan tällä hetkellä?

Tarvitseeko jätevesiä esikäsitellä?

Onko tuotannossa kausittaista vaihtelua?

Millaisia ovat kuormitukset? (COD, BOD, rasvat, kiintoaineet ja ravinteista typpi ja fosfori)

Miten sivuvirtoja hyödynnetään?

Olisiko kiinnostusta puhdistaa jätevesiä jollakin vaihtoehtoisella tavalla kuin tällä hetkellä?