

SAVONIA



OPINNÄYTETYÖ - YLEMPI AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
MONIALAINEN

BIOKAASUTUOTANNON TEHOSTA- MINEN

TEKIJÄ Tea Martikainen

Koulutusala Yhteiskuntatieteiden, liiketalouden ja hallinnon ala	
Tutkinto-ohjelma Kestävän tulevaisuuden asiantuntija	
Työn tekijä Tea Martikainen	
Työn nimi Biokaasutuotannon tehostaminen	
Päiväys	18.2.2025
	26 + 3
Yhteistyötaho Eurotrading Oy	
<p>Opinnäytetyössä selvitettiin hiivenäinellisten vaikutusta biokaasutuotannon tehostamiskeinona tapaustutkimuksen kohteena olevassa biokaasulaitoksessa. Työssä tarkasteltiin biokaasun ja sen tuotannon tehostamisen merkitystä kestäväen kehityksen näkökulmasta. Tavoitteena oli tuottaa tietoa biokaasutuotannon tehostamiseen ja kestävien ratkaisujen edistämiseen.</p> <p>Tutkimuskysymykset olivat:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Saadaanko biokaasulaitoksen tuotantoa tehostettua hiivenäinellisten avulla? 2. Mitä merkitystä biokaasutuotannon kehittämällä ja tehostamisella oli kestäväen kehityksen näkökulmasta? <p>Tutkimus toteutettiin tapaustutkimuksena, jonka teoreettinen tietopohja perustui kirjallisuuteen, aikaisempiin tutkimuksiin ja muihin julkaisuihin. Tapaustutkimuksessa tarkasteltiin biokaasulaitoksen tilaa ja tuotantoa kolmen kuukauden ajan. Empiirinen aineisto koostui laboratorioanalyysistä, tuotantotiedoista, asiantuntijan kommentteista ja kyselyaineistosta. Käytettävä hiivenäineseos räätälöitiin alkuanalyysien perusteella biokaasulaitoksen tarpeisiin vastaavaksi. Biokaasutuotannon kehitystä seurattiin hiivenäineseoksen käytön aikana. Lietenäytteet analysoitiin ennen hiivenäinien käyttöä alkuvaiheessa, tutkimuksen keskivaiheella ja lopussa. Työn toimeksiantajana toimi Eurotrading Oy, jonka toimialaan kuuluvat biokaasulaitosten apuaineet ja maatalouden ruokintaratkaisut. Työssä tehtiin yhteistyötä Schaumann BioEnergy Consult GmbH:n ja ISF Analytics GmbH:n kanssa, joissa analysoitiin lietenäytteet ja valmistettiin hiivenäinelliset. Tapaustutkimuksen kohteena oli suomalainen elintarviketeollisuudenlaitoksen yhteydessä toimiva biokaasulaitos, jonka yksilöiviä tietoja tutkimuksessa ei julkaistu.</p> <p>Tutkimuksen tulosten perusteella havaittiin kaasun tuotannon tehostuneen merkittävästi ja tehostumisen edistävän kestäväen kehityksen tavoitteita. Biokaasulaitoksen haasteellinen syöteohja ja korkeat ammoniakkipitoisuudet loivat haasteita prosessiin. Tulokset tehostuneesta tuotannosta tukivat aikaisempia tutkimuksia, joiden mukaan kaasun tuotantoa oli saatu tehostettua vehnää ja eläinten lantaa sisältävillä syötteillä sekä elintarviketeollisuuden syötteillä. Uutta tietoa saatiin siitä, että kaasun tuotanto tehostui haasteellisesta syöteohjasta ja korkeasta ammoniakkipitoisuudesta huolimatta. Kestävyysnäkökulmasta tämä tarkoitti sitä, että olemassa olevia syötteitä voitiin hyödyntää tehokkaammin ja kiertotalouden raaka-aineesta saatiin tuotettua enemmän arvoa. Tehostetun biokaasutuotannon myötä saatiin enemmän biokaasulla tuotettua höyryä elintarviketeollisuuden tarpeisiin, mikä vähensi fossiilisten polttoaineiden tarvetta ja niistä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä.</p> <p>Jatkotutkimusaiheet: Biokaasulaitosten toteutuneet tuotantomäärät suhteessa tuotantopotentiaaliin, biokaasun käytön taloudellinen merkitys teollisuudessa verrattuna fossiilisiin lähteisiin, fossiilisten polttoaineiden käytön vähentyminen biokaasutuotannon myötä eri teollisuuden aloilla, biokaasutuotannon mahdollisuudet teollisuuslaitosten yhteydessä.</p>	
Avainsanat Kestävä kehitys, kiertotalous, biokaasu, hiivenäinelliset, tapaustutkimus	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	4
2	KESTÄVÄN KEHITYKSEN KESKEISET KÄSITTEET	5
2.1	Kate Raworthin kestävyysdonitsi ja Agenda 2030 -toimintaohjelma	5
2.2	Kiertotalous ja elintarvikejäte.....	6
3	BIOKAASU UUSIUTUVAN ENERGIAN LÄHTEENÄ	7
3.1	Biokaasun nykytila ja potentiaali	7
3.2	Biokaasun koostumus ja tuotanto	7
3.2.1	Biokaasutuotannon vaiheet ja lämpötilat	8
3.2.2	Happamuus, alkaliteetti ja haihtuvat rasvahapot	9
3.2.3	Ravinteet ja hivenaineet biokaasun tuotannossa	9
3.3	Biokaasun tuotantoa haittaavat inhibitiot.....	10
4	TYÖN TOTEUTUS JA MENETELMÄT	11
4.1	Tarkoitus ja tavoite	11
4.2	Toimeksiantaja ja toimintaympäristö	11
4.3	Tapaustutkimuksen aineistonkeruu, tutkimuksen kulku ja analysoinnin menetelmät.....	12
5	TULOKSET	14
6	POHDINTA.....	17
6.1	Johtopäätökset ja tulosten tulkinta	17
6.2	Johtopäätökset tuloksiin vaikuttavista olosuhteista.....	19
6.3	Eettisyys ja luotettavuus.....	20
6.4	Menetelmän vahvuudet, heikkoudet ja vaihtoehtoiset lähestymistavat	21
6.5	Kehittämissuhteet ja jatkotutkimusaiheet	21
	LÄHTEET	23
	LIITE 1: KATE RAWORTHIN KESTÄVYYSDONITSI.....	27
	LIITE 2: PLANETAARISET RAJAT	28
	LIITE 3: AGENDA2030 -TAVOITTEET	29

1 JOHDANTO

Vuosi 2024 todettiin maailman lämpimimmäksi vuodeksi ja keskimääräinen globaali lämpötila ylitti ensimmäistä kertaa Pariisin ilmastopimuksessa asetetun 1,5 °C:n rajan esiteolliseen tasoon verrattuna. Rajoja ylitettiin kasvihuonekaasupitoisuuksissa, ilmakehän ja meriveden pintalämpötiloissa, mikä johti äärimmäisiin sääilmiöihin, kuten tulviin, helleaaltoihin ja metsäpaloihin. Pääasiallinen syy on ihmisen aiheuttamaa ja tiedot korostavat ilmastomuutoksen kiihtyviä vaikutuksia. (Copernicus 2025). Maailmanpankin What a Waste 2.0 -raportin mukaan maailma on kehittymässä siten, että jätteitä syntyy väestönkasvua nopeammin ja jätemäärä tulisi tuplaantumaan nykyisestä vuoteen 2050-mennessä (Kaza, Yao, Bhada-Tata & Van Woerden 2018, 11.) Elintarvikejäte on merkittävä haaste, sillä vuonna 2022 EU:ssa syntyi yli 59 miljoonaa tonnia elintarvikejätettä ja Suomessa yli 600 miljoonaa kiloa, mikä tuo tarpeen kehittää kiertotalousratkaisuja. (Eurostat 2024, Luke n.d.b). Kiertotalouden periaatteiden mukaisesti jätteiden syntyä pyritään vähentämään ja materiaalit pyritään pitämään käytössä mahdollisimman pitkään (Tieteen termipankki 2020.) Periaatteet tukevat Maailman ympäristökomission raporttiin vuonna 1987 kirjattua kestävän kehityksen määritelmää, jonka mukaan kestävä kehitys on sellaista kehitystä, joka vastaa nykyisten tarpeiden täyttämistä vaarantamatta tulevien sukupolvien mahdollisuuksia (United Nations General 1987, 51.) Yhdistyneiden kansakuntien Agenda 2030-tavoitteet ovat keskeinen väline kestävyystavoitteiden saavuttamisessa. Biokaasutuotanto on yksi keino edistää näitä tavoitteita, erityisesti veden- ja ilmanlaadun parantamisessa sekä liikenteen päästöjen vähentämisessä. Biokaasu on uusiutuvaa energiaa, joka voi korvata fossiilisia polttoaineita ja siten vähentää ympäristökuormitusta (Valtioneuvoston kanslia 2020, 49, 57, 72, 78, Al Seadi ym. 2008).

Biokaasu on yksi potentiaalinen osa tulevaisuuden energijärjestelmää, mutta sen tuotanto Suomessa on vielä vähäistä. Potentiaalia kasvattamiselle löytyy, sillä kiertotalouden kautta saatavia raaka-aineita on runsaasti saatavilla. (Biokaasuvision 2030 2024, 1.) Biokaasu on lisätty mukaan jakeluvaihtoehtoon vuonna 2022, minkä odotetaan lisäävän biokaasun kysyntää erityisesti liikennepolttoaineena (TEM 2021.) Biokaasu nostetaan esiin useiden alojen vähähiilietkartoissa ja kysynnän arvioidaan kasvavan erityisesti meriliikenteessä, raskaassa tieliikenteessä ja teollisuudessa. Kotimaisen biokaasun avulla voidaan vahvistaa kansallista huoltovarmuutta ja lisätä energian ja ravinteiden omavaraisuutta. (Biokaasuvision 2030 2024).

Biokaasun tuotanto on mikrobiologinen prosessi, jossa ravinteiden tasapainolla on merkitystä prosessin toimivuuteen. Biokaasun tuotantoon hyödynnettävät orgaaniset jätteet sisältävät yleensä kaikkia mikrobien tarvitsemia ravinteita, mutta ne eivät välttämättä ole oikeassa tasapainossa, jolloin myöskään hajoaminen ei ole optimaalista. Ravinteiden riittämätön saanti voi aiheuttaa esteitä ja häiriöitä tuotannossa ja vähentää tuotannon tehokkuutta. (Al Seadi ym. 2008, 27). Aikaisempien tutkimuksien mukaan hivenaineilla voi olla estäviä, stimuloivia tai myrkyllisiä vaikutuksia anaerobiselle hajoamiselle riippuen aineiden pitoisuuksista (Matheri, Belaid, Ngila 2016, 5).

Opinnäytetyö toteutetaan tapaustutkimuksena ja sen tarkoituksena on selvittää, voidaanko biokaasutuotantoa tehostaa hivenainelisien avulla tapaustutkimuksen kohteena olevassa biokaasulaitoksessa ja siellä vallitsevissa olosuhteissa. Tavoitteena on tuottaa tietoa kestävien ratkaisujen edistämiseen biokaasutuotannon kehittämisen kautta. Opinnäytetyössä tarkastellaan biokaasun ja sen tehostamisen merkitystä kestävyuden näkökulmasta.

2 KESTÄVÄN KEHITYKSEN KESKEISET KÄSITTEET

Maailman ympäristökomission raportti "Our Common Future" määrittelee kestävän kehityksen siten, että se vastaa nykyisten tarpeiden täyttämistä vaarantamatta tulevien sukupolvien mahdollisuuksia (United Nations General 1987, 51.) Vuonna 2016 voimaan tullut Pariisin ilmastopöytäkirja on ensimmäinen maailmanlaajuinen, oikeudellisesti sitova sopimus, jonka tavoitteena on rajata lämpötilan nousu 1,5 °C:een, mikä vähentäisi merkittävästi ilmastomuutoksen aiheuttamia riskejä ja vaikutuksia. (Neuvoston päätös 2016/1841/EU).

Kestävän kehityksen yhteydessä puhutaan usein kestävyiden kolmesta ulottuvuudesta, eli sosiaalisesta, ympäristöllisestä ja taloudellisesta kestävydestä. Ekologinen kestävyys keskittyy biologisen monimuotoisuuden ja ekosysteemien säilyttämiseen. Taloudellinen kestävyys tarkoittaa tasapainoista ja kestävästä kasvua, joka ei perustu pitkän aikavälin velkaantumiseen tai varantojen hävittämiseen. Sosiaalinen kestävyys perustuu hyvinvoinnin mahdollistamiseen tasapuolisesti sukupolvelta toiselle. (Ympäristöministeriö 2024, Opetushallitus 2024).

2.1 Kate Raworthin kestävyysdonitsi ja Agenda 2030 -toimintaohjelma

Kestävää kehitystä voidaan havainnollistaa Kate Raworthin kestävyysdonitsilla (liite 1), jossa vihreä vyöhyke edustaa ihmisten hyvinvointia maapallon kantokyvyn rajoissa. Donitsin keskellä ovat sosiaaliseen kestävyteen liittyvät asiat, ja ulkokehällä on ekologiseen kestävyteen liittyviä tekijöitä. Taloudellinen osuus sijoittuu vihreän kehän alaosaan. Se mahdollistaa yhteiskunnan toiminnan ja palvelut. Kestävyysdonitsi kuvaa kestävyiden ulottuvuuksien suhdetta toisiinsa. Kestävyiden osa-alueet ovat monin tavoin kytköksissä toisiinsa, mikä tarkoittaa niillä olevan keskinäisriippuvuuksia. (Valtioneuvoston kanslia n.d.b). Sosiaalisen kestävyiden mittarit perustuvat kestävän kehityksen Agenda2030 -tavoitteisiin ja ekologiset ulottuvuudet alan tutkijoiden määrittelyyn (Doughnut Economics Action Lab 2020.) Donitsin keskelle jäävä alue kuvaa ihmisiä, joille perustarpeet eivät toteudu ja ulomman kuoren yli menevillä osioilla planetaaristen rajojen ylittämistä (Raworth 2018.)

Planetaarisia rajoja tarkastellaan yhdeksän tekijän kautta: maaperän muutokset (land system change), biodiversiteetin väheneminen (biosphere integrity), ilmansaasteet (atmospheric aerosol loading), otsonikato (stratospheric ozone depletion), ilmastomuutos (climate change), merten happamoituminen (ocean acidification), kemialliset saasteet (novel entities), typpi- ja fosforikuormitus (biochemical flows) ja makean veden väheneminen (fresh water change). Näistä kuusi on ylitetty (liite 2). Ylittämättä on merten happamoituminen, otsonikato ja ilmansaasteet. (Richardson ym. 2023). Maaperän muutoksilla tarkoitetaan luonnollisten maisemien häviämistä, mikä heikentää ekologisia toimintoja, kuten hiilen sidontaa, kosteuden kierrätystä ja eläinten elinympäristöjä. Biodiversiteettikadolla tarkoitetaan elävien organismien ja ekosysteemien monimuotoisuuden, laajuuden ja terveyden heikkenemistä. Ilmansaasteet ja ilmakehän aerosolikuormitus tarkoittavat ilmassa olevien hiukkasten lisääntymistä, mikä vaikuttaa ilmastoon muuttaen lämpötila- ja sademalleja. Otsonikerros suojaa haitalliselta ultraviolettisäteilyltä ja sen oheneminen lisää haitallista UV-säteilyä. Ilmastomuutos johtuu kasvihuonekaasujen ja aerosolien lisääntymisestä, mikä nostaa lämpötiloja ja muuttaa ilmastomalleja. Merten happamoituminen vaikuttaa meriekosysteemeihin ja vähentää merten hiilensidontaa. Kemialliset saasteet pitävät sisällään esimerkiksi mikromuovia ja ydinjätteitä. Typpi- ja fosforikuormitus pitää sisällään ravinnekiertojen häiriintymistä. Makean veden väheneminen vaikuttaa luonnollisiin toimintoihin, kuten hiilen sidontaan ja biodiversiteettiin. (Stockholm resilience

centre 2023). Ilmakehän saasteiden ja muutosten keskeisin syy on ihmisen toiminta, kuten fossiilisten polttoaineiden käyttö. Fossiiliset polttoaineet lisäävät ilman hiilidioksidipitoisuutta ja tyypeä johtaen ilmaston lämpenemiseen ja ravinteiden epätasapainoon. Ilmansaasteet linkittyvät vahvasti muihin planetaarisiin rajoihin. Muutokset millä tahansa ympäristön osa-alueella voivat vaikuttaa ilmastomuutokseen korostaen planetaaristen rajojen keskinäistä suhdetta. Lämpenemisen vaikutuksia ovat muun muassa sään ääri-ilmiöiden, kuten rankkasateiden, tulvien, helleaaltojen ja kuivuuden lisääntyminen sekä jäätiköiden sulaminen ja merenpinnan nousu. (Caesar ym. 2024, 33, 54, 60).

Agenda2030 on YK:ssa vuonna 2015 sovittu maailman kaikkien maiden kestävän kehityksen työtä ohjaava toimintaohjelma, joka tähtää äärimmäisen köyhyyden poistamiseen sekä kestäväan kehitykseen, jossa ympäristö, talous ja ihminen otetaan tasavertaisesti huomioon (liite 3.). Toimintaohjelma sisältää 17 tavoitetta, jotka tulisi saavuttaa vuoteen 2030 mennessä (Valtioneuvoston kanslia n.d.a). Biokaasutuotannon avulla voidaan edistää Agenda 2030 -toimintaohjelman tavoitteita, kuten vesistöjen, ilmanlaadun ja omavaraisuuden parantamista. Kun fossiilisia polttoaineita korvataan biokaasulla, säästetään luonnonvaroja, hillitään liikenteen päästöjä ja ilmaston lämpenemistä. Kiertotalouden raaka-aineita hyödyntämällä voidaan hallita jätteiden aiheuttamia ympäristövaikutuksia. Kiertotalouden ja ravinnekierron avulla voidaan hyödyntää lantaa ja orgaanisia jätteitä vähentäen vesistöjen ravinnekuormitusta ja ympäristökuormaa. (Jameel ym. 2024, Valtioneuvoston kanslia 2020, 49, 57, 72, 78, Valtioneuvoston kanslia n.d.a., Al Seadi ym. 2008, 11). Biokaasutuotannon lisääminen tukee elinvoimaisuutta luoden taloudellista kasvua ja uusia työpaikkoja. Globaali biokaasuala loi vuonna 2023 noin 316 000 työpaikkaa, eniten työpaikkoja tuli Kiinaan, Intiaan ja Saksaan. (Valtioneuvoston kanslia 2020, 57, World Bioenergy Association (WBA) 2024, 41–43).

2.2 Kiertotalous ja elintarvikejäte

Kiertotalous on talousmalli, joka toimii maapallon kantokyvyn rajoissa ja on vaihtoehto perinteiselle lineaariselle taloudelle. Sen tavoitteena on vähentää neitseellisten luonnonvarojen käyttöä ja pitää tuotteet, materiaalit ja resurssit käytössä mahdollisimman pitkään, vähentäen samalla jätteen syntymistä. Kiertotaloudessa korostuvat tuotesuunnittelu, huollettavuus, korjattavuus, yhteiskäyttö ja kierrätysraaka-aineiden hyödyntäminen. (Tieteen termipankki 2020). Kiertotalousajatteluun liittyy energiatehostuminen, uusiutuvien energianlähteiden käyttö ja materiaalitehostuminen, mukaan lukien kierrätettyjen materiaalien hyödyntäminen neitseellisten sijaan (Ruokamo ym. 2021, 17–19.)

Elintarvikejäte kattaa syötäväksi tarkoitetun ruoan sekä ei-syötäväksi tarkoitettuja osia, joita ei hyödynnetä ihmisravintona tai muina arvojakeina. Ruokahävikki puolestaan viittaa käyttämättömään syömäkelpoiseen ruokaan. (Luke n.d.a.). Vuonna 2022 EU:ssa syntyi yli 59 miljoonaa tonnia elintarvikejätettä ja Suomessa yli 600 miljoonaa kiloa, joista noin 400 miljoonaa kiloa oli ruokahävikkiä. Suurin osa jätteestä tulee kotitalouksilta ja elintarviketeollisuudesta. (Eurostat 2024, Luke n.d.b). Jätehierarkia on EU:n jätepolitiikan ja -lainsäädännön perusta, jonka tavoitteina ovat jätteen syntymisen vähentäminen ja luonnonvarojen käytön tehostaminen. Jätehierarkiassa suositteluimmat vaihtoehdot ovat jätteiden ehkäisy ja uudelleenkäyttö, jonka jälkeen tulee kierrätys, hyödyntäminen energiana ja viimeisenä keinona jätteen loppusijoitus. (EUR-Lex n.d.). Jätehierarkia ja kiertotalous korostavat jätteen ennaltaehkäisyä, uudelleenkäyttöä ja hyödyntämistä. Suomessa kompostoitii ja käsiteltiin 395 000 tonnia biojätettä, mutta biojätteen osuus sekajätteen joukossa on ollut keskimäärin 32 % (vuosina 2021–2023) ja jätteet päätyivät polttolaitoksille. (KIVO n.d., Välinen 2024).

3 BIOKAASU UUSIUTUVAN ENERGIAN LÄHTEENÄ

Biokaasu on anaerobisten bakteerien tuottamaa kaasuseosta, joka syntyy orgaanisten materiaalien hajoamisesta hapen puutteessa. Biokaasun arvokkain osa on metaanikaasu; mitä korkeampi on metaanikaasun osuus, sitä parempi on biokaasun laatu ja tuotanto taloudellisempaa. (Jameel ym. 2024). Biokaasu sisältää paljon energiaa ja sitä voidaan käyttää sellaisenaan lämmön ja sähköntuotantoon tai jalostaa biometaaniksi, jolloin sitä voidaan käyttää myös liikenteessä ja teollisuudessa (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry n.d.) Biokaasun tärkeimmät hyödyt ovat uusiutuvan energian tuotanto, jätteen määrän ja patogeenien vähentäminen, orgaanista ainetta sisältävän jätteen muuntaminen korkealaatuiseksi lannoitteeksi, kasvillisuuden, maan ja veden suojeleminen sekä tuottavuuden lisääminen karjataloudessa ja maataloudessa (Jameel ym. 2024).

Biokaasun tuotantoa voidaan mitata tilavuusyksiköissä kuutiometreinä (m^3), jolla kuvataan tuotantomäärän tilavuutta tai energiasisältöä kuvaavina jouleina ja watteina. Kuutiometrin muuttaminen energiaksi, kun metaanipitoisuus on 65 %: $1 m^3$ biokaasua = $0,65 m^3$ metaania, $1 m^3$ metaania = 34 MJ energiaa, $1 m^3$ biokaasua = 22 MJ energiaa, $1 m^3$ biokaasua päivässä = 8 060 MJ/vuodessa. $1 MWh = 3600 MJ$, $1 MWh = 0,0036 TJ$. (IRENA 2016, 12).

3.1 Biokaasun nykytila ja potentiaali

Vuonna 2023 Suomessa tuotetun biokaasun määrä väheni edellisvuodesta 2 % ja oli yhteensä 3310 terajoulea (TJ) ja väheni edellisvuodesta. Suurin osa tuotetusta biokaasusta hyödynnetään lämmön ja sähkön tuotannossa. Suomen biokaasun teknistaloudellinen tuotantopotentiaalin arvioidaan olevan 10 terawattituntia (TWh) vuodessa, mutta täyttä raaka-ainepohjaa hyödynnettäessä potentiaali voisi olla jopa 25 TWh. Vuosina 2024–2027 rakenteilla tai suunnitteilla on 42 uutta biokaasun ja biometaanin tuotantolaitosta. (Tilastokeskus 2024, Suomen biokaasu ja Biokierto ry 2024, Virolainen-Hynnä 2024). Maailmanlaajuisesti biokaasua tuotettiin lähes 40 miljardia m^3 vuonna 2021. Vuonna 2022 Euroopassa tuotettiin 21 miljardia m^3 biokaasua, joista suurin tuottaja oli Saksa. Italia, Tanska ja Yhdistynyt kuningaskunta ovat Euroopan nopeimmin kasvavia maita biokaasuntuotannossa. Brasiliassa tuotanto on kasvanut runsaasti ja Intiassa kasvua odotetaan uusien poliittisten linjausten myötä. (World Bioenergy Association (WBA) 2024, 38, Observ'ER 2024, 55).

EU:n tavoite uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian osuudesta liikenteen loppukulutuksesta vuoteen 2030 mennessä on 14 %, kun sen osuus vuonna 2023 oli 10,1 %. Jakeluvolvoitteella määritellään uusiutuvien polttoaineiden osuutta jakelijalle kulutukseen toimittamien liikennepolttoaineiden määrästä (European Environment Agency 2024.) Jakeluvolvoitteen tarkoitus on edistää uusiutuvien polttoaineiden käyttöä fossiilisten korvaamiseksi ja vähentää liikenteen päästöjä (Energiavirasto n.d.) Biokaasun avulla voidaan edistää jakeluvolvoitteen tavoitteita. Biokaasua voitaisiin hyödyntää nykyistä enemmän raskaan liikenteen polttoaineena. Suomessa jakeluvolvoite on nykyisin 13,5 % ja tavoitteena on nostaa se 34 %:iin vuoteen 2030 mennessä. (Sipilä & Lottonen 2024, 4, 22).

3.2 Biokaasun koostumus ja tuotanto

Biokaasu sisältää 25–75 % metaania (CH_4), 25–45 % hiilidioksidia (CO_2), 0–3 % typpeä (N_2), 0–5 % rikkivetyä (H_2S) ja pieniä määriä muita kaasuja ja hivenaineita. (Suomen Kaasuyhdistys n.d, 13.) Anaerobinen hajoaminen eli mädätys on orgaanisen aineen mikrobiologinen hajoamisprosessi, jonka lopputuotteena on biokaasua ja mädätysjäätännöstä (Al Seadi ym. 2008, 114.) Mädätysjäätännös

on hajonnut substraatti, joka sisältää runsaasti makro- ja mikroravinteita ja soveltuu käytettäväksi kasvien lannoitteena (Al Seadi ym. 2008, 7.) Biokaasun tuotantoon voidaan hyödyntää erityyppisiä raaka-aineita, kuten lantaa, biojätteitä, teollisuuden sivuvirtoja, jätevesilietettä ja kasvinviljelyssä syntyviä tähteitä. Näitä biokaasuprosessiin hyödynnettäviä orgaanisia aineita kutsutaan syötteiksi. (Al Seadi ym. 2008, 13). Biokaasutuotto ja metaanipitoisuus vaihtelevat syötteen koostumuksen mukaan (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 21.) Lehmän lannan biokaasutuotto on 15 - 20 m³ märkäpainoltaan tuhatta syötekiloa kohden, biojätteen tuotto on 150 - 250 m³ ja teurastamojätteen 250 m³ (Luoma, Peltonen, Helin & Teräväinen 2006, 69.) Biokaasulaitoksen sijainnilla, lopputuotteen käytöllä ja syötteiden saatavuudella on merkitystä valittaviin syötteisiin, sillä kuljetusetäisyys vaikuttaa suoraan syötteiden hintaan ja laitoksen kannattavuuteen (Al Saedi ym. 2008, 19, 34.)

Anaerobisessa mädätyksessä tuotettu biokaasu jakautuu kolmeen alasektoriin, jotka on jaoteltu jätteen alkuperän ja käsittelyn mukaan. Nämä ovat kaatopaikkakaasu, lietteenkäsittelykaasu ja muu biokaasu. Kaatopaikkakaasu muodostuu eloperäisen jätteen hajotessa kaatopaikalla. Lietteenkäsittelykaasu syntyy kaupunkien ja teollisuuden jätevesipuhdistamoilla kerätyistä lietteistä. Muu biokaasu -kategoria sisältää monenlaisia syötteitä ja käsittelytapoja sisältäen muun muassa maatalouden sivutuotteet ja yhteiskäsittelylaitokset, joissa voidaan käsitellä eri syötteiden sekoituksia. (Observ'ER 2024, 50). Anaerobinen prosessi voidaan jakaa märkiin ja kuiviin prosesseihin, perustuen syötteiden ominaisuuksiin. Anaerobisia reaktoreita on sekä märkä- että kuivaprosesseille, termofiiliisiin ja mesofiiliisiin prosesseihin, sekä erä- ja jatkuvatoimisiin järjestelmiin. Lisäksi ne voivat olla joko yksivaiheisia tai monivaiheisia prosesseja. (Tabatabaei & Ghanavati 2018, 20–24).

3.2.1 Biokaasutuotannon vaiheet ja lämpötilat

Hajoamisprosessi voidaan jakaa neljään vaiheeseen: hydrolyysin, asidogeneesiin, asetogeneesiin ja metanogeneesiin. Hydrolyysillä tarkoitetaan biokemiallisen hajoamisprosessin ensimmäistä vaihetta, jossa pilkotaan hiilihydraattien, proteiinien ja rasvojen koostumusta. Asidogeneesillä tarkoitetaan toista vaihetta, jossa hydrolyysissä muodostuneet sokerit ja aminohapot pilkotaan haihtuviksi rasvahapoiksi (etikkahappo, propaanihappo, butaanihappo), alkoholiiksi, vedyksi ja hiilidioksidiksi. Kolmas vaihe on asetogeneesi, jossa haihtuvista rasvahapoista ja alkoholeista tuotetaan etikkahappoa, vettä ja hiilidioksidia. (Al Saedi y. 2008, 22–23). Metanogeneesi on viimeinen vaihe, jonka aikana etikkahaposta, vedystä ja hiilidioksidista muodostuu metaania ja hiilidioksidia (Gerardi 2003, 7.)

Biokaasutuotanto voidaan jakaa lämpötilan suhteen kolmeen alueeseen: psykrofiilinen (5–20 °C), mesofiilinen (30 °C – 35 °C) ja termofiilinen (50 °C – 60 °C) (Gerardi 2003, 147–148.) Lämpötila vaikuttaa vahvasti metaania muodostavien bakteerien toimintaan. Useimmat metaania muodostavat bakteerit toimivat mesofiilisellä ja termofiilisellä alueella. Termofiilisessä lämpötilassa materiaali hajoaa tehokkaammin ja patogeenit tuhoutuvat paremmin, mutta sitä on vaikeampi hallita ja se vaatii enemmän energiaa. Lämpötilalla on suora yhteys tuotantoaikaan ja matalimmassa lämpötilassa prosessi on hitain. (Gerardi 2003, 89–91). Hyvä sekoittaminen kuuluu anaerobisen prosessin toimintaan oleellisesti. Se tehostaa mädätysprosessia jakamalla bakteerit, substraatit ja ravinteet koko mädättämön alueelle samalla tasoittaen lämpötilaa. (Gerardi 2003, 117).

Viipymäaika eli HRT (hydraulic retention time) kertoo siitä, kuinka kauan syöte viipyy reaktorissa (Al Seadi ym. 2008, 28.) Viipymäajan pituuteen vaikuttaa käsiteltävän materiaalin ominaisuudet, kuten kiintoaineen ja kuiva-aineen määrä, prosessilämpötila, reaktorin tilavuus ja sekoitus. Mesofiilisellä

prosessilla tyypillinen viipymäaika on 12–30 vuorokautta ja termofiilisellä noin 15 vuorokautta. (Rahikainen 2012, s. 9). Orgaaninen kuormitus eli OLR (Organic loading rate) kertoo reaktorin orgaanisesta kuormituksesta eli vuorokaudessa syötetyn haihtuvan kiintoaineen määrää suhteessa reaktorin tilavuuteen ($\text{kg VS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 72.)

3.2.2 Happamuus, alkaliteetti ja haihtuvat rasvahapot

Anaerobisessa prosessissa lukuisat olosuhteet ovat kytköksissä toisiinsa. Metaania muodostavat bakteerit ovat herkkiä muutoksille ja siksi esimerkiksi pH:n, alkaliteetin ja haihtuvien rasvahappojen ylläpito optimaalisten raja-arvojen sisällä on tärkeää. (Gerardi 2003, 79). pH on happamuuden ja emäksisyyden mitta. Lyhenne tulee sanoista power of hydrogen ja tarkoittaa vedyn voimaa. Anaerobinen hajoaminen tapahtuu pH-alueella 5,5–8,5. Optimaalinen pH-arvo mesofiilisen mädätyksen kannalta on 6,5–8 ja termofiilissä korkeampi. Ammoniakki voi nostaa pH-arvoa, kun taas haihtuvien rasvahappojen kertyminen laskee pH-arvoa. (Helmestine 2019, Al Seadi ym. 2008, 25–26).

Alkaliteetti on seurausta orgaanisten tyyppiyhdisteiden, kuten aminohappojen ja proteiinien, hajoamisesta sekä hiilidioksidin tuotannosta orgaanisten yhdisteiden hajoamisesta. Aminohappojen ja proteiinien hajotessa vapautuu amino-ryhmiä ($-\text{NH}_2$), mikä tuottaa ammoniakkaa ja muodostaa alkaliteettia. Proteiinipitoiset syötteet ja syöttömäärän nosto vaikuttaa nostavasti alkaliteettiin. Riittävä alkaliteetti on välttämätöntä oikean pH:n hallitsemiseksi. Se toimii puskurina, joka estää nopeita pH:n muutoksia. Gerardin mukaan optimaaliset toimintaolosuhteet metaania muodostaville bakteereille alkaliteetin osalta on 1500–3000 mg/l. (Gerardi 2003, 80, 99–100).

Haihtuvat rasvahapot eli VFA (volatile fatty acids) -yhdisteet ja niiden pitoisuus on oleellista anaerobisen prosessin vakaudelle. Haihtuvia rasvahappoja ovat etikkahappo, propionihappo, voihiappo, isovoihiappo, valeriinihappo, isovaleriinihappo ja kapriinihappo. Näitä happoja kutsutaan haihtuviksi hapoiksi, koska ne voivat haihtua tai höyrystyä ilmakehän paineessa. Kaikki haihtuvat hapot liukenevat veteen. Anaerobisen prosessin epävakaas johtaa usein VFA-yhdisteiden kertymiseen ja suurissa pitoisuuksissa ne voivat estää prosessin toimintaa. (Al Seadi ym. 2008, 26, Calt 2015, 45, Gerardi 2003, 71). pH-pitoisuus ja VFA-yhdisteet vaikuttavat anaerobisen prosessin tehokkuuteen ja vakauteen, mutta niiden yksittäiset arvot eivät kerro koko totuutta laitoksen tilasta. Samat pitoisuudet voivat olla optimaalisia toiselle mädättämölle ja toiselle ne voivat olla estäviä. (Al Seadi ym. 2008, 26).

3.2.3 Ravinteet ja hivenaineet biokaasun tuotannossa

Anaerobiseen prosessiin tarvitaan riittävästi makroravinteita ja mikroravinteita, sillä niiden puutostilat vaikuttavat hajoamisen tehokkuuteen. Makroravinteita ovat ne, jota prosessiin tarvitaan eniten. Tärkeimpiä makroravinteita ovat typpi, fosfori, hiili, rikki, vety ja happi. Typpi ja fosfori ovat ravinteita, joita bakteerit tarvitsevat suhteellisen suurina määrinä. Anaerobinen prosessi tarvitsee makroravinteiden lisäksi mikroravinteita, joista osa on raskasmetalleja. Raskasmetalleiksi määritellään alkuaineet, joilla on ympäristöä saastuttavia tai myrkyllisiä ominaisuuksia. Lyijy, elohopea, kadmium ja arseeni ovat tyypillisesti myrkyllisiä. Tärkeimmät hivenravinteet metaanibakteerien toiminnalle ovat koboltti, nikkeli, rauta ja sinkki. Muita metaania muodostavien bakteerien entsyymeihin vaikuttavia hivenaineita ovat molybdeeni, seleeni ja volframi. Tarpeellisia mikroravinteita ovat myös sulfidi ja aminohapot; metioniini ja kysteiini, joista saadaan rikkiä. (Gerardi 2003, 96–98, Rahikainen 2012, 16, Schattauer, Abdoun, Weiland, Plöchl & Heiermann 2011, Gronauer ym. 2009, 127–130).

Riittävät ravinteet auttavat minimoimaan haihtuvien rasvahappojen kertymisestä aiheutuvia häiriöitä prosessissa. Orgaaninen jäte sisältää usein tarvittavia ravinteita, mutta niiden tasapaino voi olla väärä. Ravinteiden ja hivenaineiden riittämätön saanti sekä substraatin liian korkea sulavuus voivat aiheuttaa esteitä ja häiriöitä biokaasun tuotannossa. (Gerardi 2003, 96–98). Suurina pitoisuuksina hivenaineet voivat olla toksisia ja inhiboida anaerobista prosessia. Tutkimusten mukaan suuret määrät nikkeliä, kobolttia tai molybdeenia laskivat metaanin tuottoa sitä merkittävästi. Raskasmetallien biokaasuprosessia stimuloivat ja inhiboivat vaikutukset riippuvat niiden pitoisuuksista, biosaatavuudesta ja olosuhteista kuten pH:sta ja lämpötilasta. (Matheri, Belaid, Ngila 2016, 4–5, Pobeheim ym. 2010). Biosaatavuuteen vaikuttaa muun muassa olomuoto, esimerkiksi metalliset hivenaineet ovat mikrobien käytössä vain liukoisessa muodossa ja biosaatavilla oleva määrä on yleensä vain muutama prosentti metallin kokonaispitoisuudesta. Olosuhteiden monimutkaisuus tekee biosaatavilla olevien hivenaineiden pitoisuuksien arvioinnista vaikeaa ja tutkimusten välillä on hyvin ristiriitaista tietoa suositeltavista ja inhiboivista pitoisuuksista. (Rahikainen 2012, 17–18).

Aiemmat tutkimukset osoittavat, että hivenaineiden lisääminen voi tehostaa biokaasuntuotantoa. Tutkimuksessa, jossa lisättiin rautaa, kobolttia, molybdeenia ja nikkeliä elintarvikejätteestä koostuvaan syötteeseen, metaanin tuotto nousi 35,5 %. (Zhang, Zhang & Li 2015). Rautaa, nikkeliä, kobolttia, molybdeenia ja volframia sisältävällä hivenainelisällä saatiin 24 % suurempi biokaasun tuotto, kun syötteenä oli vehnää ja eläinten lantaa (Nordell, Nilsson, Nilsson Påledal, Karisalmi & Moestedt 2016.) Nikkeliä, kobolttia, molybdeenia ja seleeniä sisältävällä hivenainelisällä todettiin merkittävä vaikutus metaanin tuottoon, kun syötteenä oli teurastamojätteet. Metaanin tuotto laski 35 prosenttiin, kun hivenaineita ei lisätty. (Otrner, Rameder, Rachbauer, Bochmann & Fuchs 2015).

3.3 Biokaasun tuotantoa haittaavat inhibitiot

Inhibitiot ovat yleisiä tuotannon tehokkuuteen vaikuttavia haasteita anaerobisessa prosessissa. Inhibiatio tarkoittaa haitallisten kemiallisten tai fysikaalisten tekijöiden vaikutusta, joka häiritsee prosessia ja voi heikentää metaanin tuotantoa. (Janhunen 2024, 20, He, Liu, Tian, He, & Cheng 2024). Syötteen voi sisältää inhibiitoita aiheuttavia haitallisia aineita, kuten puhdistusaineita ja antibiootteja.

Merkittäviä inhibiittoreita ovat vapaa ammoniakki (NH_3) ja ammoniumioni (NH_4^+), jotka syntyvät proteiinien hajoamisesta ja voivat estää anaerobista prosessia liiallisina pitoisuuksina. (Yenigün & Demirel 2013, He, Liu, Tian, He, & Cheng 2024). Korkeat ammoniakkipitoisuudet ovat yleisiä proteiinipitoisissa syötteissä ja eläinperäisiä lietteitä sisältävissä syötteissä. Vapaan ammoniakin pitoisuus on suoraan verrannollinen lämpötilaan, joten ammoniakin estämisen riski on suurempi termofiilissä kuin mesofiilissä lämpötiloissa. pH:n ja lämpötilan nousu lisäävät inhibitiota, koska nämä tekijät lisäävät vapaan ammoniakin osuutta. Ammoniakin estävän vaikutuksen vuoksi ammoniakkipitoisuus tulisi pitää alle 80 mg/l. (Al Seadi ym. 2008, 27).

4 TYÖN TOTEUTUS JA MENETELMÄT

4.1 Tarkoitus ja tavoite

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, voidaanko biokaasutuotantoa tehostaa hivenainelisien avulla tapaustutkimuksen kohteena olevassa laitoksessa ja siellä vallitsevissa olosuhteissa. Tavoitteena oli tuottaa tietoa biokaasulaitoksien tuotannon tehostamiseen sekä kestävien ratkaisujen edistämiseen. Opinnäytetyössä tarkasteltiin biokaasun ja sen tehostamisen merkitystä kestävyuden näkökulmasta.

Tutkimuskysymykset olivat:

1. Saadaanko biokaasulaitoksen tuotantoa tehostettua hivenainelisien avulla?
2. Mitä merkitystä biokaasutuotannon kehittämällä ja tehostamisella on kestävä kehityksen näkökulmasta?

Työ tehtiin tapaustutkimuksena, joka lähtökohtaisesti sisältää useita tutkimusmenetelmiä. Tapaustutkimusta voidaan pitää tutkimustapana tai -strategiana ja sen tarkoitus oli kerätä monipuolinen aineisto tutkittavan tapauksen ja olosuhteiden ymmärtämiseksi. Vaikka tapaustutkimuksessa on tarkoitus syventyä yhteen tapaukseen, joissakin tilanteissa tuloksia voidaan yleistää muihin samankaltaisiin tapauksiin. Tapaustutkimusta voidaan käyttää kyseenalaistamaan tai vahvistamaan aiemmin esitettyä tai siinä kehitettyä teoreettista näkemystä. Teoreettisesti väitteen paikkansapitävyys vahvistuu, kun samaa ilmiötä käsitteleviä tapaustutkimuksia tehdään lisää. (Bamberg, Jokinen & Laine 2015, 9–10, 26–31). Tapaustutkimuksessa tutkimusprosessi on monimuotoinen, iteratiivinen ja projektimainen, jossa tutkija voi palata aiempiin vaiheisiin, tarkentaa tutkimusta ja kehittää vuoropuhelua teorian ja empirian välillä. Tutkimuskysymykset ohjaavat aineiston keruuta, analyysia, tulosten jalostamista, johtopäätösten muotoilua ja raportointia. Tapaustutkimuksessa voidaan käyttää eri analyysimenetelmiä ja tutkimus voidaan toteuttaa monin eri tavoin eikä työvaiheiden järjestys ole ennalta määrätty. (Eriksson & Koistinen 2014, 22–23, 33–34, 40–42).

4.2 Toimeksiantaja ja toimintaympäristö

Tapaustutkimus on usein kontekstuaalista, jolloin tapausta halutaan ymmärtää osana tiettyä ympäristöä. Kontekstin muodostaa tapauksen ympäristö ja monitasoisista kontekstia voidaan hahmottaa ulommalla ja sisemmällä kontekstilla. (Eriksson & Koistinen 2014, 7, Pettigrew 1997, 340–341). Tässä tutkimuksessa ulompi konteksti muodostui kestävä kehityksen ja kiertotalouden periaatteista, jossa käsiteltiin jätteiden vähentämistä ja uusiutuvan energian tuotantoa sekä biokaasua yhtenä ratkaisuna ympäristöhaasteisiin, kuten elintarvikejätteiden hallintaan ja fossiilisten polttoaineiden vähentämiseen. Sisempi konteksti kohdistui biokaasulaitukseen, jossa tarkasteltiin hivenainelisien vaikutusta. Tutkimus suoritettiin käytännön ympäristössä ja tulokset perustuivat olemassa oleviin olosuhteisiin.

Työn toimeksiantaja oli Eurotrading Oy, jonka toimialaan kuuluvat maatalouden ruokintaratkaisut ja biokaasulaitosten apuaineet. Toimeksiantajan lisäksi työssä tehtiin yhteistyötä Schaumann BioEnergy Consult GmbH:n ja ISF Analytics GmbH:n kanssa. Schaumann BioEnergy Consult on biokaasulaitoksilla käytettävien apuaineiden valmistaja ja tarjosi asiantuntijakonsultaatiota biokaasun

alalta ohjeistaen apuaineiden tarpeesta, annostelusta ja käytöstä. ISF Analytics GmbH on Schumannin laboratorio ja tutkimuskeskus, jossa lietenäytteet analysoitiin.

Tutkimuksessa tarkasteltiin toimeksiantajan asiakasta, joka on elintarviketeollisuuden yhteydessä toimiva suomalainen biokaasulaitos. Syötteenä laitos käyttää elintarviketeollisuuden sivuvirtana tulevaa ei-syötävää elintarvikejätettä (50 %) ja tukisyötteitä kuten lietelantaa. Sivuvirrat sisältävät pääsääntöisesti liha-luumassoja. Runsaasti kovaa luuta sekä paljon tyyppiä ja fosforia sisältävät syötteet ovat biokaasuprosessille haastavia biologisesti ja vaatii prosessiin mekaanista lujuutta. Laitoksella hyödynnetään jatkuvatoimista kuivamädätystekniikkaa. Prosessin myötä syötteistä tehdään biokaasua ja siitä edelleen höyryä, jota käytetään elintarvikkeiden valmistuksessa. Toiminta mahdollistaa elintarvikelaitokselta syntyvän hukan hyödyntämisen ja jätteen minimoinnin kiertotalouden periaatteiden mukaisesti. Biokaasulaitos voi hyödyntää syötteitä maksimissaan noin 10 000 tonnia vuosittain ja saman verran kyseisiä syötteitä vuosittain saatavilla. Mikäli laitos ei toimi täydellä teholla, osa ylimääräisestä syötteestä varastoidaan ja loput kompostoidaan. Täydellä kapasiteetilla laitos voi tuottaa 8000 MWh energiaa, mikä riittäisi kattamaan biokaasulaitoksen yhteydessä toimivan elintarviketeollisuuden laitoksen energiantarpeen kokonaisuudessaan. Tämä tarkoittaa 28,8 TJ energiaa ja nestekaasun päästökerroin ollessa 64,90 t/TJ vuotuisella tasolla hiilidioksidipäästöjä on mahdollista vähentää 1870 tonnia. Puutteellista tuotantoa täydennetään nestekaasulla. Tapaustutkimuksen kohteena olevan yrityksen tiedot ovat peräisin yrityksen edustajilta. Yrityksen yksilöiviä tietoja ei tuoda esille tutkimuksessa eikä sillä ole vaikutusta tutkimuksen lopputulokseen.

4.3 Tapaustutkimuksen aineistonkeruu, tutkimuksen kulku ja analysoinnin menetelmät

Tämä tutkimus voidaan luokitella selittäväksi ja intensiiviseksi tapaustutkimukseksi, sillä se tarkasteli monimutkaisten tapahtumien välisiä suhteita ja keskittyi syvällisesti yhteen erityiseen biokaasulaitokseen sekä sen ympärillä oleviin tekijöihin. (Eriksson & Koistinen 2014, 13, 18). Tutkimusaineisto ja -menetelmät määrittyivät tutkimuskohteen ja -kysymysten perusteella. Aineistonkeruussa käytettiin tapaustutkimukselle tyypillisesti monipuolisia menetelmiä, jotka täydensivät toisiaan ja loivat kokonaiskuvaa tutkittavasta aiheesta. Aineistotriangulaation mukaisesti aineistoa kerättiin eri lähteistä ja eri tavoin (Bamberg, Jokinen & Laine 2015, 9–10, 24, 26–31.) Teoreettinen tietopohja perustui aikaisempiin tutkimuksiin, kirjallisuuteen ja julkaisuihin lisäten ymmärrystä tutkimusaiheesta. Empiirisen aineiston kautta syvennettiin ymmärrystä tutkittavan tapauksen ongelmasta ja aiheutuneista syy-seuraussuhteista. Empiirinen aineisto sisälsi biokaasulaitokselle tehtävien lietenäytteiden laboratorioanalyysijä, kyselyaineistoa, asiantuntijan analyysitulintoja sekä biokaasulaitoksen tuotannon monitoroinnin kautta saatuja tietoja. Biokaasulaitoksen tilaa tutkittiin lietteestä tehtyjen laboratorioanalyysien ja tuotannonseurannan avulla. Lähtötilanne kartoitettiin esitietolomakkeella, joka sisälsi tietoja muun muassa biokaasulaitoksen tuottaman kaasun laadusta, määrästä, reaktoreiden lukumäärästä, tuotantolämpötilasta sekä syötteen määrästä ja laadusta. Alkukartoitus sisälsi myös lietenäytteen, joka analysoitiin laboratoriossa. Ensimmäisten lietenäytteistä tehtyjen analyysien perusteella laitokselle määriteltiin sopivat hivenaineliset. Suositeltu koostumus perustui mädätysjäännöksen analyysistä havaittuihin puutteisiin verrattuna ISF:n (Irene Schumann Forschung) kehittämään hivenaineita koskevaan vaatimusstandardiin. Vaatimusstandardin mukaiset viitearvot ovat ISF:n sisäistä tietoa. (ISF GmbH 2024b, Bruni 2024). Hivenaineiden vaikutusta seurattiin lietenäytteistä tehtävien seuranta-analyysien ja biokaasulaitoksen tuotannon monitoroinnin kautta. Kolmen kuukauden hivenainelisien käytön jälkeen otettiin viimeiset lieteanalyysit ja kerättiin esitietolomaketta vastaavat

tiedot biokaasulaitokselta. Tietoja täydennettiin kyselyllä sekä tuotannon monitoroinnin kautta saatavilla tiedoilla syötteistä ja kaasun tuotosta. Kysely sisälsi avoimia kysymyksiä, joiden avulla saatiin huomiota käytännön kokemuksista, havaintoja tutkimuksen vaiheista ja vaikutuksista. Täydentäviä tietoja kerättiin myös sähköpostikeskustelun kautta. Aineistoa jäsennettiin ja analysoitiin kronologisesti verraten alku- ja lopputilannetta keskenään. Aineistojen ja menetelmien pohjalta tehtiin johtopäätöksiä siitä, onko biokaasuntuotantoa saatu tehostettua hivenainelisien avulla ja onko asialla ollut merkitystä kestäväen kehityksen näkökulmasta. Biokaasuntuotannon kehittämisen ja tehostamisen merkitystä kestäväen kehityksen näkökulmasta pohdittiin teoreettisen viitekehyksen pohjalta peilaten tutkimuksen aikana saavutettuihin tuloksiin. Tutkimuksen kulkua havainnollistetaan kuvassa 1.



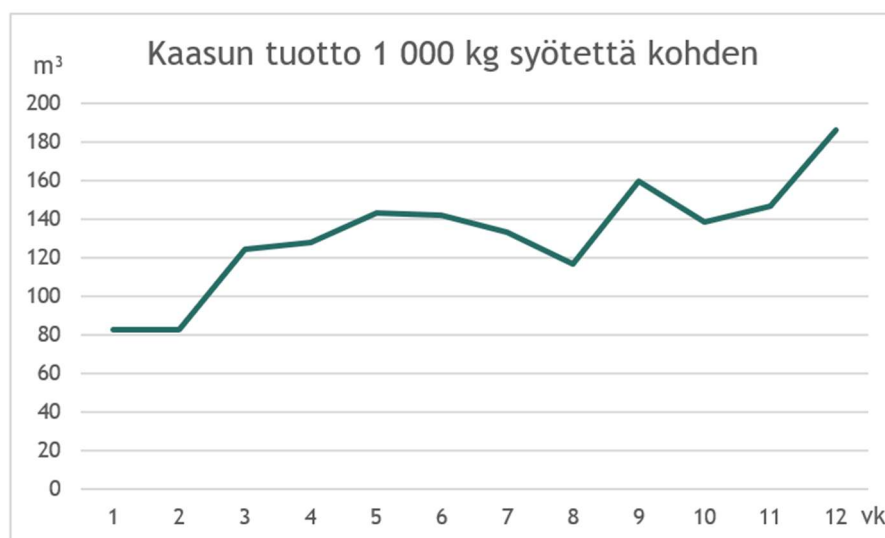
Kuva 1. Opinnäytetyön ja tutkimuksen kulku.

Laboratoriotutkimusten menetelmät: ICP-OES, Standardi: DIN EN 12880, kaasugromatografia, ISE (International Soil-analytical Exchange Programme). Lietenäytteiden makro-, mikroravinteet ja hivenaineet tutkittiin ICP-OES-analyysitekniikalla, jolla saatiin kattavat ja standardien mukaiset analyysit. ICP-OES tulee sanoista Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer eli induktiivisesti kytketty plasmaoptinen emissiospektrometri. Se on monipuolinen alkuaineanalyysitekniikka, jolla näytteestä voidaan määrittää 70 eri alkuainetta. Herkkyys ICP-OES-analyysitekniikalla metallien hivenaineanalytiikkaan on hyvä. (Rahikainen 2012, 8, 20–21). DIN EN 12880 on standardi kuivajätteen ja vesipitoisuuden määrittämiseksi. Happojen määrittämiseen käytettiin kaasukromatografiaa, joka on haihtuvien yhdisteiden erotteluun, tunnistamiseen ja määrittämiseen soveltuva analyysimenetelmä. (Eskeli ym. n.d.). Lietenäytteestä tutkittiin makro-, mikroravinteita ja hivenaineita: kalsium, kalium, magnesium, natrium, fosfori, rikki, alumiini, arseeni, boorin, kadmium, koboltti, kromi, kupari, rauta, mangaani, molybdeeni, nikkeli, lyijy, seleeni, volframi ja sinkki. Alkuaineanalyysien lisäksi lietenäytteistä tutkittiin pH, alkaliteetti, haihtuvat orgaaniset hapot, epäorgaaninen hiili, ammoniumtyyppi, kuiva-aineet ja orgaaniset kuiva-aineet, etikka-, kapriini-, propioni-, voi-, isovoi-, valeriini-, iso-valeriinihapot ja etikkahapokvivalentti. Etikkahapokvivalentti laskettiin etikkahapon ja kapriinihapon moolipanosta ja toimii indikaattorina haihtuville rasvahapoille. Hahtuvien rasvahappojen tilannetta voidaan seurata yksittäisistä arvoista tai etikkahapokvivalentista. Tavoitetilassa etikkahapokvivalentti on mahdollisimman alhainen. (ISF GmbH 2024a, Bruni 2025).

5 TULOKSET

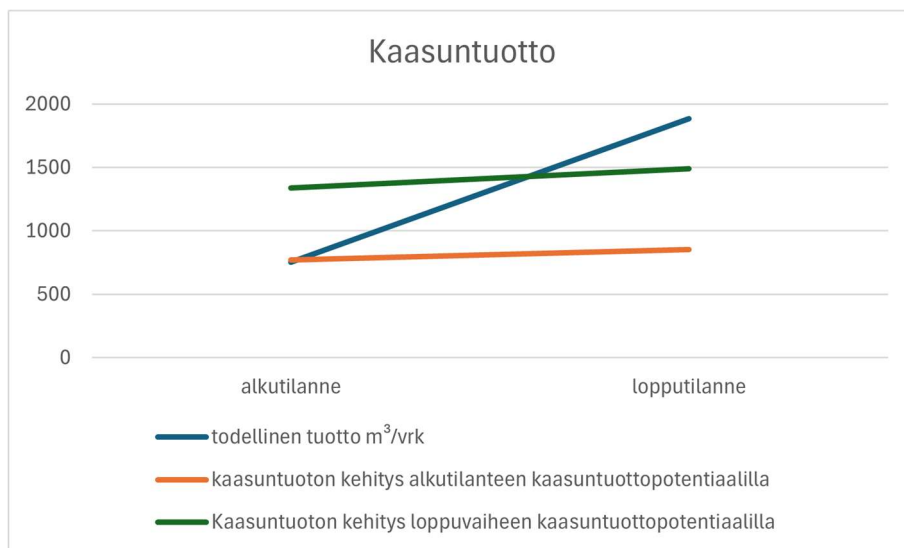
Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, saadaanko biokaasuntuotantoa tehostettua hivenainelisien avulla tapaustutkimuksessa mukana olevalla biokaasulaitoksella ja selvittää biokaasutuotannon merkitystä kestäväen kehityksen näkökulmasta. Tutkimusaineiston perusteella voidaan todeta, että tutkimuksen aikana biokaasutuotanto tehostui alkutilanteeseen nähden merkittävästi ja biokaasulaitos sai tuotettua enemmän biokaasua yhtä syötekiloa kohden tutkimuksen loppuvaiheessa (kuvio 1.)

Tuotantotietojen perusteella viimeisessä mittauksessa kaasun tuotanto oli noussut merkittävästi alkutilanteeseen nähden. Lähtötilanteessa kaasuntuotanto oli 753 m³/vrk ja viimeisessä mittauksessa tuotetun kaasun määrä oli 1883 m³/vrk. Syötteen määrä vaihteli hieman kolmen kuukauden aikana. Syötteen määrä alkutilanteessa oli 9,1 t ja lopputilanteessa 10,1 t. Alkutilanteessa kaasun tuotto yhtä syötetonna kohden oli 82,75 m³/vrk ja loppuvaiheessa 186,44 m³/vrk. Tämä tarkoittaa prosentuaalisesti noin 125 %:n nousua kaasuntuotossa yhtä syötetonna kohden.



Kuvio 1. Kaasutuotannon kehitys syötetonna kohden (viikoittainen vuorokausituotto).

Olosuhteet kaasun tuotannossa vaihtelivat tutkimuksen aikana. Kun otetaan huomioon syötteiden teoreettiset kaasuntuottopotentialit, selviää teoriatasolla, kuinka paljon kaasuntuoton kasvusta voidaan selittää syötteiden muutoksella, mikäli kaasuntuotto olisi optimaalisella tasolla. Käytetään lehmän lannan kaasuntuottopotentialina arvoa 15 m³/kg. Luumassan biokaasuntuottopotentialin puuttuessa, käytetään teurastamojätteen kaasuntuottopotentialia 250 m³/kg. Muita syötteitä oli käytössä vähäisiä määriä ja niiden vaikutus on laskettu lannan kertoimella. Näiden arvojen avulla päästään hyvin lähelle alkutilanteen toteutunutta tuottoa (poikkeama noin 2 %). Alkutilanteessa syötteen potentiaalinen tuotto oli pienempi, sillä se sisälsi suhteessa enemmän lietelantaa, kuin tuotantopotentiaalliltaan parempaa luomassaa. Alkuvaiheessa laskennallinen syötekilokohtainen tuottopotentiaali oli keskimäärin 0,0855 m³ kg, kun se loppuvaiheessa oli 0,149 m³ kg. Mikäli syötteiden kaasuntuottopotentiali olisi ollut loppuvaiheen mukainen koko tutkimuksen ajan, olisi kaasuntuotto ollut alkuvaiheessa 1342 m³/vrk ja loppuvaiheessa 1489 m³/vrk, jolloin kaasuntuoton kehitys olisi johtunut ainoastaan syötteen määrällisestä noususta (kuvio 2). Tuotto oli kuitenkin 1833 m³/vrk, mikä tarkoittaisi noin 26 %:n nousua biokaasuntuotossa syötteiden tuotantopotentiaalimuutosten huomioonjälkeen.



Kuvio 2. Todellinen kaasuntuotto verrattuna kaasuntuottopotentiaaliin, mikäli syötepohja olisi pysynyt samana.

Alla olevan laskutoimituksen mukaan tutkimuksen loppuvaiheessa saavutetulla biokaasun tuotantomäärällä tuotettua biokaasua hyödyntävän elintarviketeollisuuden laitoksen hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää noin 981 tonnia vuodessa.

Vuorokausituotto: $1883 \text{ m}^3 \cdot 22 = 41\,426 \text{ MJ}$

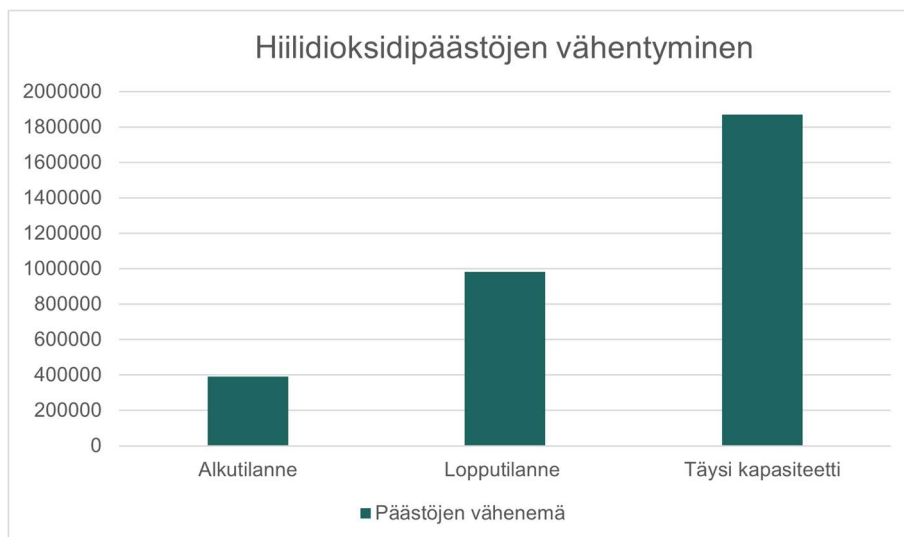
Vuosituotto: $41\,426 \text{ MJ} \cdot 365 = 15\,120\,490 \text{ MJ}$

Vuosituotto megawattitunneiksi muutettuna: $15\,120\,490 \text{ MJ} \div 3600 = 4\,200,14 \text{ MWh}$

Megawattitunnit terajouleiksi muutettuna: $4\,200,14 \text{ MWh} \cdot 0,0036 = 15,12 \text{ TJ}$

Hiilidioksidipäästöt nestekaasun päästökertoimen mukaan $64,90 \text{ t/TJ} \cdot 15,12 \text{ TJ} = 981,32 \text{ t}$

Tuotetulla biokaasulla elintarviketeollisuuden laitos korvaa nestekaasua, mikä aiheuttaa 981,32 tonnin vähennyksen hiilidioksidipäästöihin. Tämä vastaa noin 127 suomalaisen vuotuisia hiilidioksidipäästöjä. Lähtötilanteessa tuotannon ollessa $753 \text{ m}^3/\text{vrk}$ hiilidioksidipäästöjä biokaasun käytön myötä saatiin 392,42 tonnia mikä vastaa noin 51 suomalaisen vuotuisia hiilidioksidipäästöjä. Vaikka tuotanto lähtötilanteesta parani, tavoitetila on täydellä kapasiteetilla toimiva laitos, jonka hiilidioksidivähennys olisi 1870 tonnia, mikä vastaisi noin 243 suomalaisen vuotuisia päästöjä (kuvio 3). Päästökertoimenä on 7,7 tonnia, mikä on Suomen ympäristökeskuksen laskema kansalaisten yksityisestä kulutuksesta aiheutuva hiilijalanjälki vuonna 2021. (STT 2024). Laskelmassa ei ole huomioitu biokaasuntuotannon aiheuttamia päästöjä.



Kuvio 3. Vuositasolla vähennetyt hiilidioksidipäästöt, kun nestekaasu korvataan biokaasulla.

Kestävän kehityksen näkökulmasta biokaasulaitos on pystynyt tuottamaan enemmän biokaasua ja elintarviketeollisuuden jalostettavaa höyryä samalla syötemäärällä. Tämä mahdollistaa elintarviketeollisuuden laitokselle enemmän uusiutuvan ja vähäpäästöisen energian hyödyntämistä nestekaasun sijaan. Tulokset viittaavat siihen, että olemassa olevia syötteitä on voitu hyödyntää tehokkaammin, ja kiertotalouden raaka-aineista on saatu enemmän arvoa biokaasun tuotannon lisäämisen myötä, vaikka tuotanto ei vielä olekaan täydessä tehossaan. Suuremman biokaasuntuotannon myötä uusiutumattomien, fossiilisten polttoaineiden tarve on ollut pienempi ja sitä myötä luonnonvaroja on säästetty. Tehostuneella biokaasutuotannolla voidaan todeta olevan merkitystä kestäväen kehityksen mukaisten toimien edistämisessä.

Tulokset tukivat aikaisempia tutkimuksia, joiden mukaan biokaasuntuotantoa oli saatu tehostettua vehnää ja eläinten lantaa sisältävillä syötteillä sekä elintarviketeollisuuden koostuvilla syötteillä (Nordell, Nilsson, Nilsson Påledal, Karisalmi & Moestedt 2016, Zhang, Zhang & Li 2015.). Uutta tietoa saatiin siitä, että kaasun tuotanto tehostui haasteellisesta syöteperhjasta ja korkeasta ammoniakkipitoisuudesta huolimatta.

6 POHDINTA

6.1 Johtopäätökset ja tulosten tulkinta

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, saadaanko biokaasutuotantoa tehostettua hivenainelisien avulla tapaustutkimuksen kohteena olevassa laitoksessa ja mitä merkitystä biokaasutuotannon kehittämishäällä ja tehostamisella on kestävän kehityksen näkökulmasta. Tavoitteena oli tuottaa tietoa biokaasulaitoksien tuotannon tehostamiseen sekä kestävien ratkaisujen edistämisen taustalle.

Tutkimustulosten perusteella voidaan havaita kaasun tuotannon tehostuneen ja tehostumisen edistävän kestävän kehityksen tavoitteita. Hivenaineiden lisäksi tehostuneeseen tuotantoon on voinut vaikuttaa syötteiden muutokset ja sitä myötä biokaasuntuottopotentiaalin nousu. Syötteiden kaasuntuottopotentiaali kasvoi tutkimuksen aikana, millä voidaan selittää suurin osa kaasuntuoton kehityksestä. Alkuvaiheessa syötteenä hyödynnettiin enemmän lietelantaa, jossa kaasuntuottopotentiaali on vähäisempi, kuin luumassassa, jota biokaasulaitoksen tuotantotietojen mukaan loppuvaiheessa hyödynnettiin enemmän. Kaasuntuottopotentiaali perustuu Luoma ym. (2006) määrittelemiin lehmän lannan (15–20 m³) ja teurasjätteen (250 m³) kaasuntuottoihin. (Luoma, Peltonen, Helin & Teräväinen 2006, 69.) Syötteiden kaasuntuottopotentiaalien tuoman luonnollisen kasvun jälkeen kaasuntuotto lisääntyi noin 26 %, mikä voidaan yhdistää hivenainelisien vaikutuksiin. Kiertotalouden keskeisten periaatteiden mukaisesti tehostunut biokaasutuotanto mahdollistaa olemassa olevien syötteiden tehokkaamman hyödyntämisen, jolloin jätettä syntyy vähemmän ja materiaalien kierto tehostuu (Tieteen termipankki 2020.) Tehostuneella biokaasun tuotannolla voidaan vastata paremmin tarpeeseen korvata fossiilisia polttoaineita ja hillitä niiden aiheuttamia ilmastovaikutuksia, kuten hiilidioksidipäästöjä. (Al Saedi ym. 2008, 11). Todellinen hiilidioksidipäästöjen vähenemä vaatisi biokaasutuotannosta aiheutuvien päästöjen selvittämisen, mikä rajautui tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

Tutkimusaineiston perusteella voidaan todeta myös se, että laitoksen tila ei ole stabiili, sillä ammoniuminhibitorit haittaa prosessia. Ammoniakkipitoisuus on reilusti yli 80 mg/l, jonka Al Saedi ym. (2008) määrittelee ylärajaksi, jotta ammoniakki ei aiheuttaisi estäviä vaikutuksia. Jotta tuotanto olisi vakaalla pohjalla, ammoniuminhibitorit tulisi saada hallintaan. Haasteita ammoniuminhibition kanssa aiheutuu käytössä olevista syötteistä. (Al Saedi ym. 2008, 27, Bruni 2024).

Työn tulokset tukevat aikaisempia tutkimuksia, joissa biokaasun tuotantoa on saatu tehostettua hivenainelisien avulla elintarvikejätteistä koostuvilla syötteillä sekä vehnää ja lehmän lantaa sisältävillä syötteillä (Zhang, Zhang & Li 2015, Nordell, Nilsson, Nilsson Påledal, Karisalmi & Moestedt 2016.) Uutta tietoa saatiin siitä, että tuotanto tehostui myös tilanteessa, jossa oli lähtökohtaisesti haasteelliset syötteet ja tuotannon tehokkuuteen vaikuttavia haasteita.

Kestävyyssnäkökulmaa tarkasteltiin Agenda 2030 -toimintaohjelman tavoitteiden ja kestävyysdonitsin osa-alueiden kautta. Biokaasun tuotannolla, sen kehittämishäällä ja tehostamisella voidaan todeta olevan selviä yhteyksiä kestävän kehityksen edistämiseen. Tutkimuksen tulokset tukevat teoriatietoa siitä, että biokaasun avulla voidaan edistää useita Agenda 2030-tavoitteita (kuva 4), kuten vesistöjen, ilmanlaadun ja omavaraisuuden parantamista. Ympäristövaikutuksia voidaan vähentää liikenteen päästöjen kautta ja kiertotaloutta tehostamalla. Fossiilisia polttoaineita biokaasulla korvattaessa, säästetään luonnonvaroja, hillitään liikenteen päästöjä ja ilmaston lämpenemistä. (Al Saedi ym. 2008, 11). Tutkimuksen tuloksissa tarkastellaan asiaa hiilidioksidipäästöjen vähenemisen kautta, mikä vaikuttaa positiivisesti ilmanlaatuun. Kiertotalouden raaka-aineita hyödyntämällä hallitaan ja

vähennetään jätteiden aiheuttamia ympäristövaikutuksia. Kiertotalouden ja ravinnekierron avulla voidaan vähentää vesistöjen ravinnekuormitusta ja ympäristökuormaa. (Valtioneuvoston kanslia 2020, 49, 57). Samalla kun hillitään jätteiden aiheuttamia ympäristövaikutuksia kiertotalouden raaka-aineita hyödyntämällä ja säästetään luonnonvaroja vähentämällä fossiilisten polttoaineiden käyttöä, tehokkaan biokaasutuotannon myötä edistetään myös edullisen ja puhtaan energian tuotantoa ja lisätään energiaomavaraisuutta (Biokaasuvision 2030 2024). Mikäli samoilla käytössä olevilla raaka-aineilla ja prosesseilla saadaan tehokkaampi tuotanto, luodaan positiivista taloudellista kehitystä ja kestävyttä alalle. Taloudellinen kehitys alalla voi johtaa uusiin työpaikkoihin luoden sosiaalista kestävyttä, kuten kasvavan biokaasutuotannon myötä on tapahtunut Kiinassa, Intiassa ja Saksassa. (World Bioenergy Association (WBA) 2024, 41–43).



Kuva 5. Agenda 2030 -tavoitteet, joita voidaan Valtioneuvoston kanslian mukaan edistää biokaasun avulla. (Valtioneuvoston kanslia n.d.a.)

Samalla, kuin edistetään Agenda 2030-tavoitteita, edistys tasapainottaa Kate Raworthin kestävyysdonitsin osa-alueita. Biokaasutuotannon tehostamisen vaikutuksia tapaustutkimuksessa tarkasteltiin enimmäkseen ekologisen kestävyden kautta. Kestävyysdonitsin planetaaristen rajojen osa-alueiden toteutumaa ja siihen vaikuttavia tekijöitä voidaan tarkastella planetaarisia rajoja kuvaavan donitsikaavion avulla, joka kertoo globaalilla tasolla missä on epäonnistuttu ja mihin on pyrittävä ekologisen kestävyden suhteen (liite 2). Teoreettisen viitekehyksen perusteella positiivisia vaikutuksia saadaan myös biokemiallisiin virtoihin eli typpi- ja fosforikuormitukseen vaikuttaen myös makean veden muutoksiin. Vahvasti toisiinsa sidoksissa olevilla osa-alueilla on keskinäisriippuvuuksia ja osa-alueet vaikuttavat toisiinsa. Hillitsemällä planetaaristen rajojen ylittymistä hillitään ilmastonmuutoksen aiheuttavia maan ja meren elämään vaikuttavia sään ääri-ilmiöitä, kuten rankkasateita, tulvia, kuivuutta ja helleaaltoja. (Valtioneuvoston kanslia n.d.b., Jameel ym. 2024, Caesar ym. 2024, 33, 54, 60).

Aiheen ajankohtaisuus ja merkitys perustuu kiireellisten toimien tarpeeseen ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Vuoden 2024 ollessa mittaushistorian lämpimin vuosi ja globaalin lämpötilan ylittäessä ensimmäistä kertaa Pariisin ilmastopöytäkirjassa asetetun 1,5 °C:n rajan johtaen äärimmäisiin sääilmiöihin, luovat tarvetta kestävien toimien kehittämiseksi (Copernicus 2025). Ilmastokriisi luo painetta toimia vastuullisemmin luonnon monimuotoisuuden säilyttämiseksi ja päästöjen vähentämiseksi samalla kuin Venäjän sota on luonut painetta tehostaa energiaomavaraisuutta. Ottaen huomioon Maailmanpankin What a Waste 2.0 -raportin, jonka mukaan maailma on kehittymässä siten, että jätemäärä tulisi tuplaantumaan nykyisestä vuoteen 2050-mennessä, jätteiden hyötykäytön tärkeys korostuu entisestään (Kaza, Yao, Bhada-Tata & Van Woerden 2018, 11.) Syötteiden osalta alalla riittää hyvin potentiaalia kehittämiseksi ja biokaasuntuotanto sopii edistämään esimerkiksi elintarvikejätteen kiertotaloutta. (Eurostat 2024, Luke n.d.b).

Opinnäytetyöllä oli merkitystä omaan oppimiseeni. Tutkimuksen myötä käsitykseni biokaasusta, sen tuotannosta ja merkityksestä laajentui. Tutkimuksen kokonaisuus laajensi tietämystäni myös kestävä kehityksen mukaisien toimien arvioinnista sekä tapaustutkimuksen kokonaisuudesta. Pääsin tutustumaan aiheeseen monipuolisesti kirjallisuuden ja aikaisempien tutkimusten sekä analyysien ja alan asiantuntijoiden näkökulmasta. Tutkimuksen kokonaisuus oli monitahoinen ja haasteellinen, minkä kiteyttää tutkimuksen alkuvaiheessa eteen tullut kommentti ”Biokaasuntuotanto on ongelmanratkaisua”, mikä kuvaa prosessia hyvin monitahoisesti ratkaisten sekä kiertotalouden ongelmia ja tarttuen haasteeseen edistää kestävä kehityksen mukaisia toimia, samalla kuin monimutkaiset prosessit vaativat ratkaisuja ongelmiin toimivan ja tehokkaan tuotannon toteuttamiseksi. Opinnäytetyö pysyi oman suunnitelman mukaisessa aikataulussa, mutta oma aikataulu ei ollut yhteneväinen opinnäytetyön ryhmänohjaukseen, minkä vuoksi ryhmämuotoinen ohjaus tässä työssä ei ollut hyödyllinen. Raportoinnissa jouduin tekemään useita päätöksiä siitä, miten asiat esitetään, jotta kokonaisuus on selkeä ja ymmärrettävä, artikkelimuotoiseen raporttiin riittävän lyhyt, huomioon ottaen myös tapaustutkimuksen anonymiteetin sekä hivenainevalmistajan liikesalaisuudet.

6.2 Johtopäätökset tuloksiin vaikuttavista olosuhteista

Tutkimuksessa tarkasteltiin biokaasulaitoksen tilaa lietenäytteiden analyysien perusteella. Lähtötilanteessa havaittiin, että laitoksen hivenainepitoisuudet, kuten kalium, boori, nikkeli ja mangaani, olivat hieman optimaalisista arvoista matalampia. Korkealla puolestaan oli ammoniumtyyppi, fosfori, natrium ja kalsium. Korkea ammoniumtyypen määrä toi ilmi, että hivenainevajauksien lisäksi biokaasulaitoksella suurin ongelma on ammoniuminhibitio. Ammoniuminhibitio-ongelmaa kyseisellä laitoksella oli havaittu jo entuudestaan ja ongelman on todettu aiheutuvan käytössä olevasta syöteohjasta. Ammoniuminhibitio oli läsnä koko tutkimuksen ajan. Laitoksen tarpeeseen räätälöity hivenaineseos määriteltiin lähtötilanteen analyysien perusteella. Seos sisälsi laitoksen tarpeeseen suhteutetut määrät rautaa, sinkkiä, mangaania, nikkeliä, kuparia, kobolttia, molybdeeniä, seleeniä, booria ja volframia. Hivenainelisiä käytettiin tutkimuksen aikana päivittäin 0,5 kg. Tuotteen koostumus on Schauermann Bioenergy:n sisäistä tietoa, jota ei julkaistu (Bruni 2024).

Prosessin pH -pitoisuus pysyi melko stabiilina tutkimuksen ajan: lähtötilanne 8,2 ja lopputilanne 8,3, kun optimaalinen pH-arvo mesofiilisen mädätyksen kannalta Al Saedi ym. (2008) mukaan on 6,5–8 (Al Saedi ym. 2008, 26). Prosessin lämpötila oli tutkimuksen aikana 38 °C ja HRT oli 43 vuorokautta, mikä on melko pitkä verraten mesofiilisen prosessin tyypilliseen viipymäaikaan, joka on 12–30 vuorokautta (Rahikainen 2012, s. 9). Syötettä lisättiin prosessiin jatkuvasti 24 kertaa vuorokaudessa ja syötteen määrää lisättiin prosessin aikana. Syötesuhteissa tuli muutosta tutkimuksen aikana. Alkuvaiheessa syötteenä oli suhteessa enemmän lietelantaa ja loppuvaiheessa puolestaan enemmän luumassaa. Mahalantaa tuli mukaan syöteohjaan tutkimuksen puolivälissä. Käytetyillä syötteillä on eri kaasuntuottopotentiaalit, mikä vaikuttaa lopputulokseen kaasuntuottoa nostavaksi. Kuiva-ainepitoisuus nousi alkutilanteen 12,9 %:sta 15,4 %:iin. Orgaaninen kuormitus (OLR) lisääntyi tutkimuksen aikana, mikä kertoo reaktorin orgaanisen kuormituksen lisääntymisestä. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 72.) Tutkimuksen loppuvaiheessa biokaasulaitoksen käyttämä syötemäärä oli puolet maksimista eli noin 5 000 tonnia vuodessa. Tämä tarkoittaa, että elintarviketeollisuuden sivuvirtana tulevaa syötettä olisi tarjolla enemmän, kuin nykyisellään hyödynnetään, mikä tukee Biokaasuvision esittämää näkemystä saatavilla olevien syötteiden runsaudesta (Biokaasuvision 2030 2024, 1.) Syöttö-

määrän ohella myös tuotanto oli noin 50 % tasolla. Alkaliteetti ylitti Gerardin (2003) mukaan optimaaliset rajat (1500–3000 mg/l) ja oli nousujohteista koko tarkastelujakson ajan. Nousujohteisuus voi olla seurausta siitä, että syötemäärää on jatkuvasti nostettu ja syöte sisältää runsaasti proteiinia. Vaikka riittävän suuri alkaliteetti tasapainottaa prosessia, liian korkea määrä kertoo stressitilasta, kuten tässä tapauksessa. Haihtuvien rasvahappojen yksittäiset arvot ja etikkahaptoekvivalentti nousivat alkutilanteesta ja niiden korkea määrä kertoo myös ammoniuminhibitiosta. Analyysitulosten perusteella voidaan todeta, että laitoksen tuotannon tila on jatkunut stressitilassa voimakkaan ammoniuminhibition vuoksi. (Gerardi 2003, 80, 99–100, Bruni 2024).

Lietteistä tehtyjen laboratorioanalyysien myötä saatiin arvokasta tietoa laitoksen tilasta ja lisättiin ymmärrystä biokaasulaitokselle tärkeistä seurattavista arvoista. Tutkimuksessa hivenaineiden vaatimusstandardin mukaiset viitearvot ovat ISF:n sisäistä tietoa, minkä vuoksi tutkimuksessa ei voinut syventyä enemmän niihin. Analyysien tulkitseminen olisi voinut olla antoisampaa, mikäli käytetyt viitearvot olisivat olleet tiedossa, sillä tässä tapauksessa hivenaineiden pitoisuuksien arviointi tapahtui asiantuntijakonsultin kautta. Hivenaineseoksen koostumustiedot puolestaan ovat Schaumann Bio-Energyn sisäistä tietoa, minkä vuoksi tuotteen vaikuttaviin aineisiin ja niiden pitoisuuksiin ei voinut syventyä tarkemmin (Bruni 2024). Tämä voi vaikuttaa myös tutkimuksen hyödynnettävyyteen. Tapauksitutkimuksen kohteena oleva biokaasulaitos pysyy tutkimuksessa anonyyminä, minkä vuoksi laitokselta peräisin olevia tietoja ei voitu tuoda esille lähteissä.

6.3 Eettisyys ja luotettavuus

Opinnäytetyö on toteutettu Tutkimuseettisen neuvottelukunnan hyvien tieteellisten käytäntöjen mukaisesti. Hyvän tieteellisen käytännön peruseriaatteita ovat luotettavuus, rehellisyys, arvostus ja vastuunkanto. Hyvän tieteellisen käytännön periaatteilla varmistetaan toiminnan laatua, suunnitellaan, toteutetaan, arvioidaan ja viestitään avoimesti, osoitetaan arvostusta ja kannetaan vastuu tieteellisen toiminnan elinkaaresta. (Tutkimuseettinen neuvottelukunta 2023, 11–12).

Opinnäytetyön tekemiselle on huolehdittu tarvittavat sopimukset, luvat ja suostumukset ja selvitetty eettisen ennakoarvioinnin tarpeellisuudesta. Työssä on noudatettu tietosuojalainsäädäntöä sekä salassapittoa, luottamuksellisuuteen ja vaitioloon liittyviä velvoitteita. Tapauksitutkimukseen osallistuva yritys on mukana vapaaehtoisesti ja yrityksen tiedot pidetään anonyymeinä. Tutkimus ei sisällä arkaluontoisia kysymyksiä eikä siihen osallistunut alaikäisiä. Tutkimukseen osallistuvalla yrityksellä on kerrottu opinnäytetyön tarkoitus. Tutkimusprosessi on kuvattu avoimesti. Aineistonkeruun monipuolisuudella vahvistetaan tuloksien ja johtopäätösten luotettavuutta.

Tutkimusaineisto on tallennettu ja käsitelty sähköisesti. Tutkimusaineistoa on hyödynnetty työn tuloksissa, mutta luottamuksellisia yritystietoja ei ole julkaistu. Aineiston laadun ja luotettavuuden varmistamiseksi alkuperiset dokumentit säilytetään muuttumattomina omassa kansiossaan, jotta alkuperäinen tieto pysyy muuttumattomana ja on tarkistettavissa. Aineisto on selkeästi jäsennelty ja säilytetty suojatussa paikassa. Opinnäytetyön tulokset ovat julkisia ja toimeksiantajalla on rinnakkaisoikeus niiden käyttöön. Tutkimuksen päätyttyä arvokkaimmat tiedot voidaan arkistoida tarpeen mukaan.

6.4 Menetelmän vahvuudet, heikkoudet ja vaihtoehtoiset lähestymistavat

Tapaustutkimuksen päämääränä oli lisätä ymmärrystä tutkittavasta tapauksesta ja sen olosuhteista monipuolisen aineiston avulla. Empiirisen aineiston ohella kirjallisuudesta löytyi yhteyksiä kestävästä kehityksen aihealueisiin sekä biokaasun teoriapohjaan, mikä syvensi aiheen kokonaisuuden ymmärrystä. Kerätty aineisto ja toteutetut toimenpiteet ilmensivät tutkimuksen tuloksia, jotka olivat riippuvaisia biokaasulaitoksen haasteista ja siellä vallitsevista olosuhteista. Käytettyjen menetelmien, kuten laboratoriotutkimusten, kyselyiden ja asiantuntijahaastatteluiden avulla laajennettiin ymmärrystä aiheesta ja saatiin konkreettista tietoa prosessista. Tapaustutkimuksen monipuoliset aineistonkeruumenetelmät auttoivat löytämään tapauksen haasteet ja syventämään aiheeseen liittyvää ymmärrystä.

Toiminnassa olevalla biokaasulaitoksella tehtävä tutkimus loi myös omat haasteensa, sillä olosuhteet vaihtelevat luontaisesti tuotannon tarpeiden mukaan verrattuna esimerkiksi laboratoriossa tehtäviin stabiileihin tutkimusolosuhteisiin. Tämän tyyppisen tutkimuksen heikkoutena voidaan pitää myös sitä, että yhteen tapaukseen kohdistuvan tapaustutkimuksen tulokset eivät ole yleistettävissä suoraan muihin laitoksiin tai konteksteihin. Biokaasulaitosten vaihtelevat olosuhteet tekevät tulosten vertailusta vaikeaa ja vaikuttaa toistettavuuteen. Tapaustutkimuksen monipuoliset menetelmät kerryttivät valtavasti aineistoa, mikä toi haasteita tutkimuksen rajaamiseen ja laajan kokonaisuuden raportoinnin lyhyeen artikkelimuotoon. Tässä tapauksessa raportointiin perinteinen opinnäytetyöraportti olisi voinut sallia aiheen perusteellisempaa esittelyä.

Mikäli tutkittavalla laitoksella olisi ollut kaksi reaktoria, joista toisessa olisi voinut tehdä verrokkitutkimuksen ilman hivenainelisiä käyttäen samaa syöte pohjaa, olisi saatu hyvää vertailupohjaa tuloksille. Vaihtoehtoisia lähestymistapoja aiheen tutkimiselle olisi ollut laboratoriotason kokeelliset tutkimukset tai usean biokaasulaitoksen vertaileva tutkimus tai pidempiaikainen seuranta. Laboratoriotason kokeellisten tutkimusten kautta voitaisiin testata erilaisia hivenainelisien yhdistelmiä ja niiden vaikutuksia biokaasuntuotantoon stabiileissa olosuhteissa. Tässä jäisi kuitenkin huomioimatta biokaasulaitoksen luonnolliset olosuhteet ja tapaustutkimuksessa mukana olleen yrityksen haasteelliseen syöte pohjaan ei olisi saatu verrattavia tuloksia. Useita biokaasulaitoksia vertaileva tutkimus, voisi tuoda lisätietoa hivenainelisien vaikutuksista eri syöte pohjiin. Pidempiaikaisen seurannan myötä olisi voinut saada laajempaa näkemystä olosuhteiden muutosten vaikutuksista prosessiin.

6.5 Kehittämisehdotukset ja jatkotutkimusaiheet

Jotta biokaasulaitoksen ekologista kestävyttä ja hiilidioksidipäästöjen vähenemää voisi arvioida tarkemmin, sen taustalle tulisi selvittää laitoksen toiminnasta aiheutuvat päästöt kokonaisuudessaan esimerkiksi hiilijalanjälkilaskennan ja elinkaarianalyysin avulla. Taloudellisen kestävyuden arvioimiseksi biokaasutuotannon kustannuksista ja hyödyistä voisi tehdä taloudellista arviointia verraten muihin energianlähteisiin, jolloin sen hyötyjä voisi arvioida ja hyödyntää liiketoimintamallien kehittämisessä.

Uusien biokaasulaitosten luomisen taustalle olisi mielenkiintoista ja tärkeää selvittää suomalaisilla teollisuuslaitoksilla syntyvien sivuvirtojen potentiaalia biokaasutuotantoon, kuinka paljon potentiaalisilla sivuvirroilla voisi tuottaa energiaa ja korvata fossiilisia polttoaineita. Tätä voisi pohtia myös ta-

loudellisesta aspektista. Toisaalta olisi tärkeää myös selvittää toiminnassa olevien laitosten toteuttamia tuottomääriä suhteessa tuotantopotentiaaliin, mitä kautta voisi lähteä pohtimaan, onko tuotanto optimaalista.

Jatkotutkimusaiheet:

1. Biokaasutuotannon mahdollisuudet teollisuuslaitosten yhteydessä. Selvitys potentiaalisista teollisuuden yrityksistä, joilla syntyy biokaasutuotannon syötteenä sopivaa sivutuotetta ja olisi mahdollista tuottaa biokaasua omien prosessien energiantarpeeseen.
2. Biokaasun tuotannon myötä fossiilisten polttoaineiden käytön väheneminen ja sen vaikutukset eri teollisuudenaloilla.
3. Biokaasulaitosten biokaasuntuottomäärät suhteessa tuotantopotentiaaliin.
4. Biokaasun käytön taloudellinen merkitys teollisuudessa verrattuna muihin energianlähteisiin, esimerkiksi verrattuna fossiilisiin lähteisiin.

LÄHTEET

- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. & Janssen, R. 2008. Biogas handbook. Julkaisija: Etelä-Tanskan yliopisto Esbjerg. Saatavissa: <http://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>. Viitattu 16.4.2024.
- Bamberg, J., Jokinen, P. & Laine, M. 2015. Tapaustutkimuksen taito. 3 painos. Gaudeamus Helsinki University Press.
- Biokaasuvisio2030, 2024. Suomen Biokierto ja Biokaasu ry, Bioenergia ry, Maa- ja metsätaloustuotajain Keskusliitto MTK, Suomen Kaasuyhdistys ry, Suomen Kiertovoima ry, Elintarviketeollisuusliitto ry, Kierrätysteollisuus ja Suomen Lähienergialiitto ry 2024. Julkilausuma. Julkaistu 14.8.2024. https://biokaasu2030.fi/wp-content/uploads/2024/08/Biokaasuvisio2030_14082024.pdf. Viitattu 18.11.2024.
- Bruni, E. 2024. Schaumann BioEnergy Consult GmbH. About analysis. Yksityinen sähköpostiviesti. 28.11.2024. Viestin saaja: Tea Martikainen.
- Bruni, E. 2025. Schaumann BioEnergy Consult GmbH. HAC-EQ. Yksityinen sähköpostiviesti 15.1.2025 Viestin saaja: Tea Martikainen.
- Caesar, L., Sakschewski, B., Andersen, L. S., Beringer, T., Braun, J., Dennis, D., Gerten, D., Heilemann, A., Kaiser, J., Kitzmann, N.H., Loriani, S., Lucht, W., Ludescher, J., Martin, M., Mathesius, S., Paolucci, A., te Wierik, S., Rockström, J. 2024. Planetary Health Check Report 2024. First edition. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany. Verkkojulkaisu. https://www.planetaryhealthcheck.org/storyblok-cdn/f/301438/x/a4efc3f6d5/planetaryhealthcheck2024_report.pdf. Viitattu 14.1.2025.
- Copernicus 2025. The 2024 Annual Climate Summary. Global Climate Highlights 2024. 2024 - a second record-breaking year, following the exceptional 2023. Julkaistu 10.1.2025. Päivitetty 17.1.2025. <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024>. Viitattu 27.1.2025.
- Doughnut Economics Action Lab 2020. What is the Doughnut? 15.7.2020. <https://doughnuteconomics.org/tools/what-is-the-doughnut>. Viitattu 13.1.2025.
- Eriksson, P & Koistinen, K. 2014. Monenlainen tapaustutkimus. Kuluttajatutkimuskeskuksen tutkimuksia ja selvityksiä 11. E-kirja. Kuluttajatutkimuskeskus. Helsinki 2014. <http://hdl.handle.net/10138/153032>
- Eskeli, H., Hamara, J., Laukkanen, M., Lehtonen, P., Luoto, K., Vihavainen, M. & Ylihärtilä, A. n.d. Laboratorioanalyysit. 2.5. Kaasukromatografia. http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/laboratorio/analyysimenetelmat_2-5_kaasukromatografia.html Viitattu 27.12.2024.
- EUR-Lex n.d. Jätehierarkia. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=LEGIS-SUM:waste_hierarchy. Viitattu 30.12.2024.
- European Environment Agency 2024. Use of renewable energy for transport in Europe. EEA:n virallinen verkkosivusto. Julkaistu 30.10.2024. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/use-of-renewable-energy-for>. Viitattu 18.10.2024.
- Eurostat 2024. Food waste and food waste prevention – estimates. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Food_waste_and_food_waste_prevention_-_estimates. Viitattu 30.12.2024.
- Gerardi, M., 2003. The Microbiology of Anaerobic Digesters. Julkaisija: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. Saatavissa: http://cdn.preterhuman.net/texts/science_and_technology/nature_and_biology/MicroBiology/The%20Microbiology%20of%20Anaerobic%20Digesters%20-%20Michael%20H.%20Gerardi.pdf. Viitattu 16.4.2024.
- Gronauer, A., Andrade, D., Bauer, C., Effenberger, M., Heuwinkel, H., Lebuhn, M. & Marin-Perez, C. 2009. Prozessoptimierung – ein Zusammenspiel von Technik und Mikrobiologie. Gülzower Fachgespräche, Tagungsband "Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven", Band 32,

- Veranstaltung am 15./16. September 2009 in Weimar, S. 120–140. Saatavilla: http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_400-gfg32_biogas-kongress.pdf. Viitattu 3.1.2025.
- He, K., Liu, Y., Tian, L., He, W. & Cheng Q. 2024. Review in anaerobic digestion of food waste. *Science direct*. Artikkele. Volume 10, Issue 7. Julkaistu 15.4.2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024042312>. Viitattu 31.10.2024.
- Helmestine, A. 2019. What Does pH Stand For? ThoughtCo verkkosivusto. Päivitetty 3.5.2019. <https://www.thoughtco.com/what-does-ph-stand-for-608888>. Viitattu 27.11.2024.
- IRENA (International Renewable Energy Agency) 2016. Measuring small-scale biogas capacity and production, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Statistics_Measuring_small-scale_biogas_2016.pdf. Viitattu 3.1.2025.
- ISF GmbH 2024a. Analysiraportit syys-, loka- ja marraskuu. Ei julkisia.
- ISF GmbH 2024b. Biogas research. ISF Schaumann Forschung verkkosivusto. <https://www.is-forschung.de/en/biogas-1469.htm>. Viitattu 20.12.2024.
- Jameel, M., Mustafa, M., Ahmed, H., Mohammed, A., Ghazy, H., Shakir, M., Lawas, A., Mohammed, S., Idan, A., Mahmoud, Z., Sayadi, H. & Kianfar, E. 2024. Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. Artikkele. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101549>. Viitattu 20.12.2024.
- Janhunen, Maarit 2024. Biokaastuotannon perusteet. Opetusmateriaali. Bio- ja kiertotalous. Savonia ammattikorkeakoulu.
- Kaza, Y., Bhada-Tata & Van Woerden 2018. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development Series. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1329-0. Viitattu 3.1.2025.
- KIVO (Suomen kiertovoima ry) n.d. Koostumustietopankki. <https://kivo.fi/yymmarramme/koostumustietopankki/>. Viitattu 9.1.2025.
- Kymäläinen, M. & Pakarinen O. 2015. Biokaasuteknologia, Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Suomen Biokaasu ry. Hämeen ammattikorkeakoulu. Forssa Print Oy. <https://www.theseus.fi/handle/10024/104180>
- Luke n.d.a. Määritelmät. Luonnonvarakeskuksen verkkosivusto. <https://projects.luke.fi/ruokahavikki-seuranta/elintarvikejate-ja-ruokahavikki/>. Viitattu 30.12.2024.
- Luke n.d.b. Ruokahävikin ja elintarvikejätteen määrä. Luonnonvarakeskuksen verkkosivusto. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/indikaattorit/agrikaattori-capvaikuttavuusindikaattorit-20232027/ruokahavikin-ja-elintarvikejätteen-maara>. Viitattu 30.12.2024.
- Luoma, H., Peltonen, S., Helin J. & Teräväinen H. 2006. Maatilayrityksen bioenergian tuotanto. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy. ProAgria Maaseutukeskusten Liiton julkaisuja nro 1027. Tieto tuottamaan 115.
- Matheri, N. Anthony, M., Belaid, M., Seodigeng T. & Ngila, J. 2016. The Role of Trace Elements on Anaerobic Co-digestion in Biogas Production. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2016 Vol II. June 29 - July 1, 2016, London, U.K.* https://www.iaeng.org/publication/WCE2016/WCE2016_pp784-789.pdf
- Neuvoston päätös 2016/1841/EU ilmastomuutosta koskevan Yhdistyneiden kansakuntien puitesopimuksen nojalla hyväksytyn Pariisin sopimuksen tekemisestä Euroopan unionin puolesta. Euroopan unionin virallinen lehti 19.10.2016. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32016D1841>. Viitattu 27.1.2025.
- Nordell, E., Nilsson, B., Sören Nilsson Påledal, S., Karisalmi, K. & Moestedt, J. 2016. Co-digestion of manure and industrial waste – The effects of trace element addition. *Science direct. Waste Management*. Volume 47, Part A, January 2016, Pages 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.032>. Viitattu 3.1.2025.

Observ'ER 2024. The state of renewable energies in Europe. Edition 2023. 22nd EurObserv'ER Report. Verkkajulkaisu. <https://www.eurobserv-er.org/category/all-annual-overview-barometers/>. Viitattu 29.10.2024.

Pettigrew A, M., 1997. What is a processual analysis? *Scandinavian Journal of Management*, Volume 13, Issue 4, December 1997, pages 337–348. [https://doi.org/10.1016/S0956-5221\(97\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0956-5221(97)00020-1). Viitattu 17.2.2025.

Rahikainen, M. 2012. Ravinteet ja hivenaineet biokaasun tuotannossa ja bioreaktorilietteen ICP-OES -hivenaineanalytiikka. Pro gradu tutkielma. Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos 2.2.2012. Viitattu 25.11.2024.

Raworth, K. 2018. A healthy economy should be designed to thrive, not grow. Video. https://www.ted.com/talks/kate_raworth_a_healthy_economy_should_be_designed_to_thrive_not_grow/transcript?subtitle=en. Viitattu 13.1.2025.

Raworth, K & Guthier, C. 2017, *Doughnut Economics: seven ways to think like a 21st century economist*. London: Penguin Random House. <https://doughnuteconomics.org/tools/doughnut-diagrams-in-25-languages>. Viitattu 10.1.2025.

Richardson, K., Steffen W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S.E., Donges, J., Drücke, M., Fetzer, I., Hofmann, M., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., Petri, S., Porkka, M., Rahmstorf, S., Schaphoff, s., Thonicke, K., Tobian, A., Virkki, V., Wang-Erlandsson, L., Weber, Lisa & Rockström, Johan 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances* 13.9.2023. Vol 9, Issue 37. DOI: 10.1126/sciadv.adh245. Viitattu 13.1.2025.

Ruokamo, E., Savolainen, H., Seppälä, J., Sironen, S., Räisänen, M., & Auvinen A. 2021. Kiertotalous vähähiilisuuden edistäjänä ja luonnon monimuotoisuuden turvaajana. Ympäristöministeriön julkaisuja 2021:6. Verkkajulkaisu. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162901>. Viitattu 29.10.2024.

Schattauer, A., Abdoun, E., Weiland, P., Plöchl, M. & Heiermann, M. 2011. Abundance of trace elements in demonstration biogas plants. *Biosystems Engineering*. Volume 108, Issue 1, January 2011, Pages 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.10.010>. Viitattu 3.1.2025.

Stockholm Resilience Centre 2023. Planetary boundaries. Stockholm University. <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>. Viitattu 14.1.2025.

STT 2024. Oy Suomen Tietotoimisto. Suomalaisten kulutuksen hiilijalanjälki miltei puolittunut 2000-luvulla 14 hiilidioksiditonista 7,7 tonniin. Tiedote 11.4.2024. <https://www.sttinfo.fi/tiedote/70136371/suomalaisten-kulutuksen-hiilijalanjalki-miltei-puolittunut-2000-luvulla-14-hiilidioksiditonista-77-tonniin?lang=fi>. Viitattu 15.1.2025.

Suomen Biokierto ja Biokaasu ry 2024. Biokaasu tilastot. Päivitetty 13.3.2024. Verkkosivusto. <https://biokierto.fi/tilastot/biokaasutilastot/>. Viitattu 25.11.2024.

Suomen kaasuyhdistys n.d. Biokaasun turvallisuusohje. Verkkajulkaisu. Saatavissa: <https://www.kaasuyhdistys.fi/julkaisut/biokaasun-turvallisuusohje>. Viitattu 17.4.2024.

Tabatabaei, M. & Ghanavati, H. 2018. *Biogas: Fundamentals, process, and operation*. Springer International Publishing AG. ProQuest Ebook Central.

Tieteen termipankki 2020. Ympäristötieteet: kiertotalous. Saatavissa: <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Ympäristötieteet:kiertotalous>. Viitattu 20.12.2024.

Tilastokeskus 2024. Tuotetun biokaasun määrä väheni 2 % vuonna 2023. Suomen virallinen tilasto (SVT). Verkkajulkaisu. <https://stat.fi/julkaisu/clin1x4fjwu6d0cutajc4ucrc>. Viitattu 18.10.2024.

Tutkimuseettinen neuvottelukunta 2023. Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa 2023. Tutkimuseettisen neuvottelukunnan HTK-ohje 2023. Tutkimuseettisen neuvottelukunnan julkaisuja 2/2023. 1. painos. Helsinki 2023. Verkkajulkaisu. https://tenk.fi/sites/default/files/2023-03/HTK-ohje_2023.pdf. Viitattu 13.11.2024.

Työ- ja elinkeinoministeriö, TEM 2021. Biokaasu ja sähköpolttoaineet sisällytetään liikennepolttoainoiden kansalliseen jakeluvelvoitteeseen. Tiedote 29.6.2021. <https://tem.fi/-/biopolttoaineet-jakeluvelvoitteeseen>. Viitattu 18.11.2024.

United Nations General 1987. Report of the World Commission on Environment and Development : note / by the Secretary-General. <https://digitallibrary.un.org/record/139811?v=pdf#files>. Viitattu 29.10.2024.

Valtioneuvoston kanslia n.d.a. Suomen kestävän kehityksen toimikunta. Kestävä kehitys ja Agenda 2030. Kestävän kehityksen globaali toimintaohjelma Agenda2030. Verkkosivu. <https://kestavakehitys.fi/agenda-2030>. Viitattu 28.10.2024

Valtioneuvoston kanslia n.d.b. Suomen kestävän kehityksen toimikunta. Kestävä kehitys ja Agenda 2030. Mitä on kestävä kehitys? Verkkosivu. <https://kestavakehitys.fi/kestava-kehitys-ja-agenda2030>. Viitattu 30.12.2024.

Valtioneuvoston kanslia 2020. Valtioneuvoston selonteko kestävän kehityksen globaalista toimintaohjelmasta Agenda2030:sta. Kohti hiilineutraalia hyvinvointiyhteiskuntaa. Valtioneuvoston kanslian julkaisuja 2020:7. Julkaistu 8.10.2020. Verkkajulkaisu. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162475>. Viitattu 28.10.2024.

Virolainen-Hynnä, A. 2024. Biokaasun tuotanto ja käyttö Suomessa 2030, 2035 ja 2040. Suomen biokierto & biokaasu ry:n julkaisuja. Suomen Biokierto ja Biokaasu ry Helsinki. Verkojulkaisu. <https://biokierto.fi/wp-content/uploads/2024/05/Biokaasun-tuotanto-ja-kaytto-Suomessa-2030-2035-ja-2040-artikkeli-10052024-1.pdf>

Välinen, N. 2024. Tiedote: Biojätteen kierrätyksessä edelleen petrattavaa. Julkaistu 1.3.2024. Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. <https://biokierto.fi/tiedote-jatetilastot-biojätteen-maara-ja-sekajätteen-joukkoon-paatyneen-biojätteen-maara-vahenivat-vuonna-2022/>. Viitattu 30.12.2024.

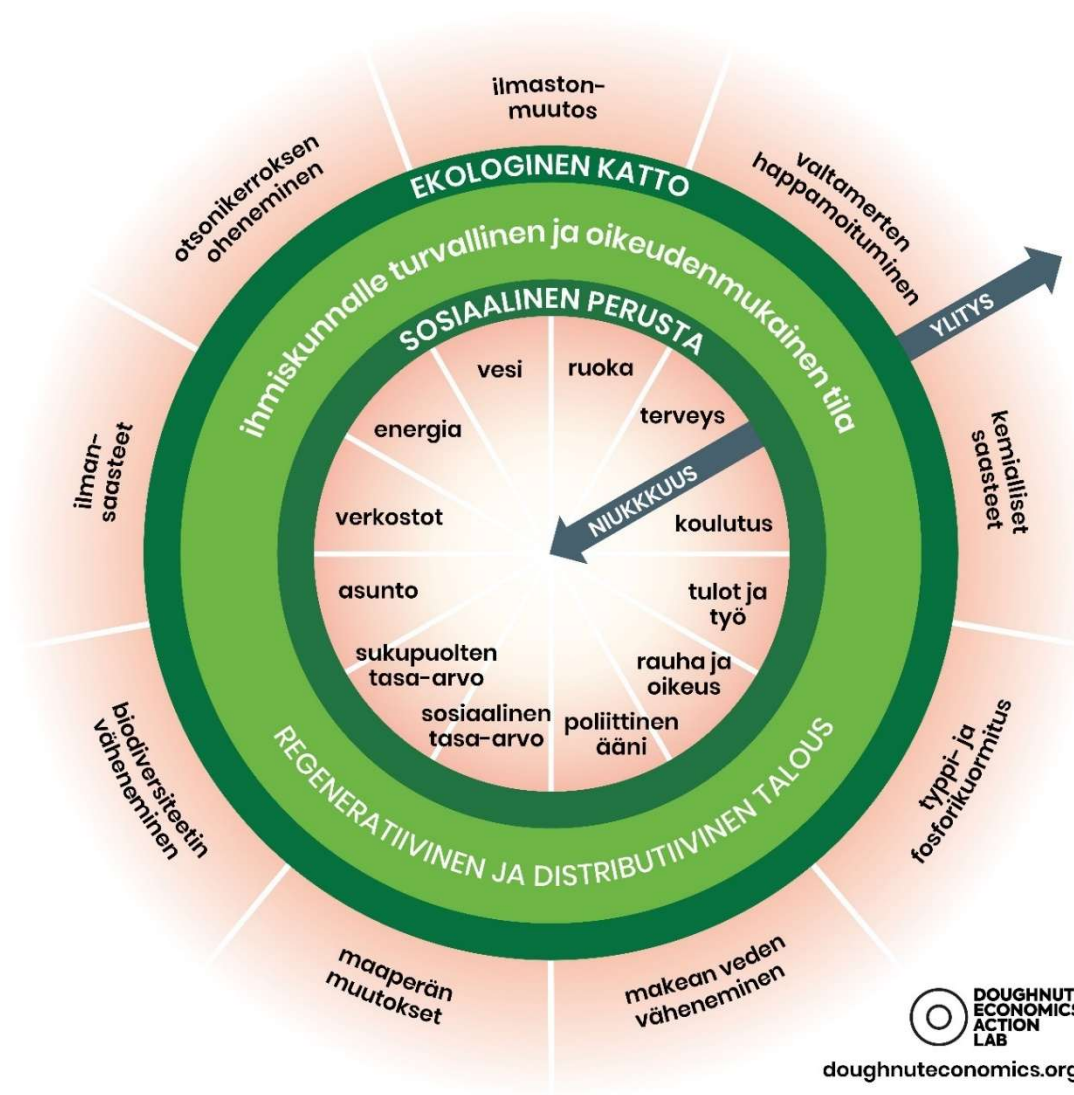
World Bioenergy Association (WBA) 2024. Global bioenergy statistics report. 11th edition. Verkkajulkaisu. https://www.worldbioenergy.org/uploads/241023_GBS_Report.pdf. Viitattu 29.10.2024.

Yenigün, O. & Demirel, B. 2013. Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. Science direct. Volume 48, Issues 5–6, May–June 2013, Pages 901-911. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359511313001657>. Viitattu 31.10.2024.

Ympäristöministeriö 2024. Mitä on kestävä kehitys? Ympäristöministeriön verkkosivu. Päivitetty 15.3.2023. <https://ym.fi/mita-on-kestava-kehitys>. Viitattu 19.11.2024.

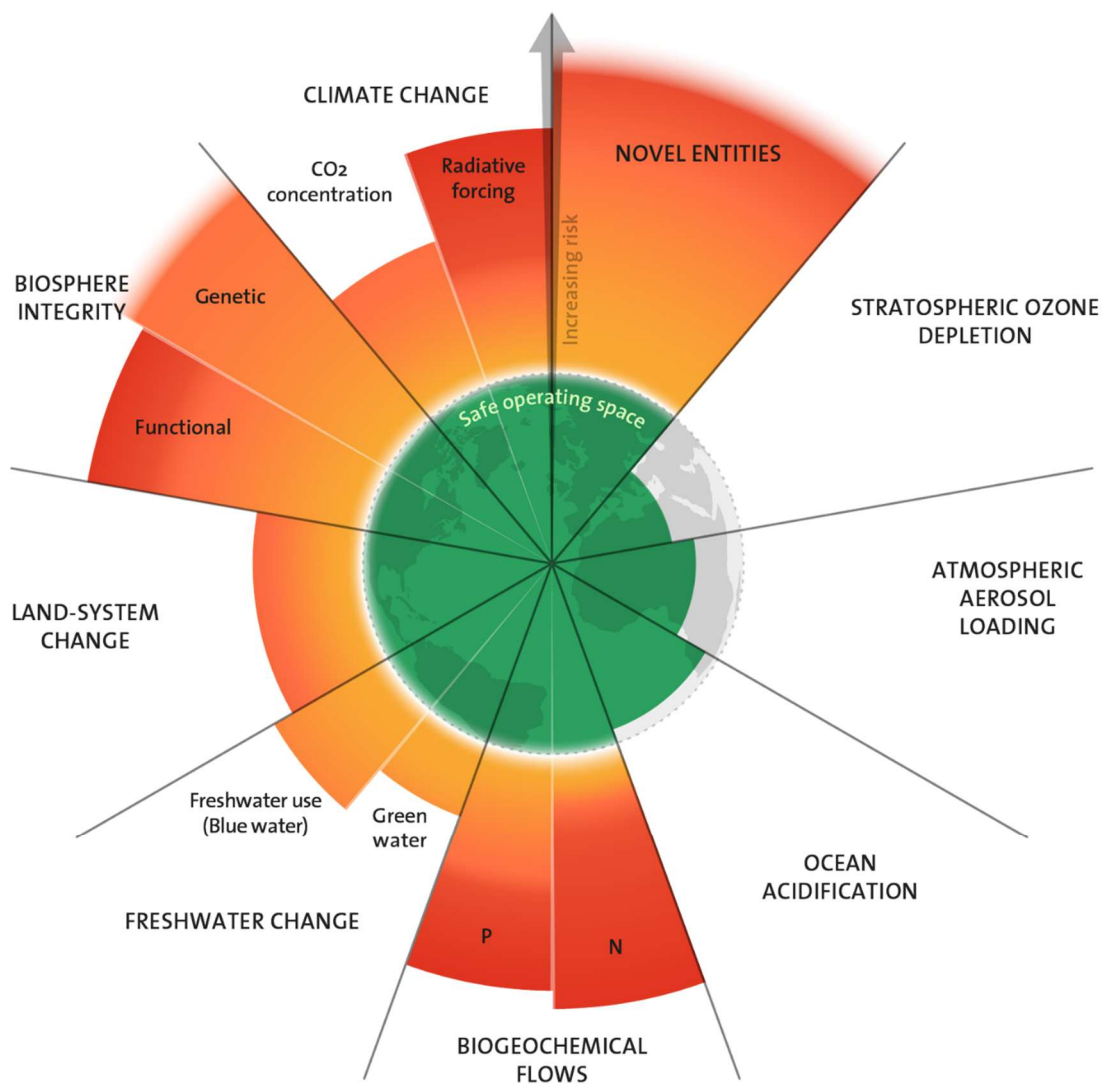
Zhang, W., Zhang, L. & Li, A. 2015. Enhanced anaerobic digestion of food waste by trace metal elements supplementation and reduced metals dosage by green chelating agent [S, S]-EDDS via improving metals bioavailability. Science direct. Volume 84. Pages 266-277. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.07.010>. Viitattu 3.1.2025.

LIITE 1: KATE RAWORTHIN KESTÄVYYSDONITSI



Sosiaalisten ja planetaaristen rajojen donitsi CC-BY-SA 4.0 (Raworth & Guthier 2017.)

LIITE 2: PLANETAARISET RAJAT



Planetaaristen rajojen tila vuonna 2023 CC BY-NC-ND 3.0 (Stockholm Resilience Centre, perustuen Richardson ym. 2023 analyysiin.)

LIITE 3: AGENDA2030 -TAVOITTEET



Agenda2030 Kestävän kehityksen tavoitteet (Valtioneuvoston kanslia n.d.a.)