



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 64/2021

Teollinen ekosysteemi energian- ja ruoantuotantoon

Jukka Lokka, Päivi Haapalainen, Saija Rasi, Titta Kotilainen,
Ari-Matti Seppänen, Elina Tampio, Jani Pulkkinen, Miika Tapio,
Maria Tuuri, Virpi Lehtinen, Satu Ervasti, Karetta Timonen, Kimmo Rasa,
Petri Välisuo ja Lotta Uotila

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 64/2021

Teollinen ekosysteemi energian- ja ruoantuotantoon

Jukka Lokka, Päivi Haapalainen, Saija Rasi, Titta Kotilainen, Ari-Matti Seppänen,
Elina Tampio, Jani Pulkkinen, Miika Tapio, Maria Tuuri, Virpi Lehtinen, Satu Ervasti,
Kareta Timonen, Kimmo Rasa, Petri Välisuo ja Lotta Uotila



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahoitus

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



LAPIN LIITTO



Sodankylä
Lapin tähtikunta



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Viittausohje:

Lokka, J., Haapalainen, P., Rasi, S., Kotilainen, T., Seppänen, A-M., Tampio, E., Pulkkinen, J., Tapio, M., Tuuri, M., Lehtinen, V., Ervasti, S., Timonen, T., Rasa, K., Välisuo, P. & Uotila, L. 2021. Teollinen ekosysteemi energian- ja ruoantuotantoon. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 64/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 65 s.

Jukka Lokka ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-7239-7022>



ISBN 978-952-380-272-8 (Painettu)
ISBN 978-952-380-273-5 (Verkkójulkaisu)
ISSN 2342-7647 (Painettu)
ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)
URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-273-5>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Jukka Lokka, Päivi Haapalainen, Saija Rasi, Titta Kotilainen, Ari-Matti Seppänen, Elina Tampio, Jani Pulkkinen, Miika Tapio, Maria Tuuri, Virpi Lehtinen, Satu Ervasti, Karetta Timonen, Kimmo Rasa, Petri Välisuo ja Lotta Uotila

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2021

Julkaisu vuosi: 2021

Kannen kuva: Lappi Design

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.juvenesprint.fi>

Tiivistelmä

Jukka Lokka¹, Päivi Haapalainen², Saija Rasi³, Titta Kotilainen³, Ari-Matti Seppänen³, Elina Tampio³, Jani Pulkkinen³, Miika Tapio³, Maria Tuuri², Virpi Lehtinen², Satu Ervasti³, Karetta Timonen³, Kimmo Rasa³, Petri Välisuo² ja Lotta Uotila¹

¹ Sodankylän kunta, Jäämerentie 1, 99601 Sodankylä

² Vaasan yliopisto, Wolffintie 34, 65200 Vaasa

³ Luonnonvarakeskus, Tuotantojärjestelmät, Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki

Uusiutuvien energialähteiden käytön lisääminen ja luonnonvarojen ylikulutuksen pysäyttäminen ovat ajankohtaisia aiheita monella alalla. Tässä raportissa esitellään tuloksia hankkeesta, jonka taustalla vaikuttivat Sodankylän kunnan energiantuotantoon ja alueellisten raaka-ainesten hyödyntämiseen liittyneet kiinnostuksen kohteet.

Tämän hankkeen tavoitteena oli simulointimallin avulla tarkastella energian ja erilaisten sivuvirtojen liikkumista kiertotalousjärjestelmässä, joka yhdistää energian- ja ruoantuotantoa. Tämän lisäksi tarkasteltiin kiertotalousjärjestelmän kannattavuutta sekä kokonaisuuden että sen osien kannalta.

Sodankylä toimi hankkeessa esimerkkialueena. Sodankylän alueella keskeisiä sivuvirtoja ovat metsätalouden harvennuspuuaines, kalojen perkuujäte, hoitokalastusten hankalasti hyödynnettävä pienkalasaalis, poroteurastuksen hyödyntämätön teurasjäte sekä maataloudesta syntyvät muut hyödyntämättömät biopohjaiset jakeet ja jätteet.

Hankkeessa mallinnettiin energian- ja ruoantuotantoa yhdistävää kiertotalouskokonaisuutta eli teollista symbioosia. Kokonaisuutta mallinnettiin simulointimallin avulla. Mallinnuksessa huomioitiin veden, lämmön, sähkön ja erilaisten orgaanisten sivuvirtojen kierto järjestelmän sisällä. Simulointimalliin valittiin mukaan kaukolämmön tuottaminen pyrolyysiprosessilla, kasvuhuonetuotanto, kalan kiertovesikasvatus, hyönteistuotanto sekä biokaasutuotanto.

Teollisen symbioosin simulointi toteutettiin yhdistämällä toisiaan tukevat tuotantosuunnat kokonaisuudeksi, jossa pyrittiin hyödyntämään eri yksiköiden tuottamat jätevirrat seuraavan yksikön raaka-aineena. Tällaisen symbioosin toteuttamisessa haasteeksi muodostuvat yksiköiden väliset riippuvuudet ja niiden tasapainottaminen vuoden jokaisena tuntina. Myös symbioosin eri yksiköiden tuotantokustannukset vaihtelevat raaka-aineiden ja energian saatavuuden sekä hinnan mukaan. Näiden riippuvuuksien ja tuotantokustannusten tarkastelemiseksi toteutettiin aikariippuva simulointimalli, jossa mallinnettiin valittujen tuotantoyksiköiden toimintaa sekä symbioosin sisäisiä energiavirtoja, jotta voitiin varmistaa tasapainon säilyminen ja arvioida symbioosin tuotantokustannuksia mahdollisimman realistisesti.

Simulointimallin perusteella kaikki selvityksessä mukana olleet tuotantosuunnat voisivat olla taloudellisesti mahdollisia Sodankylässä. On kuitenkin huomioitava, että simulointi on tehty karkealla tasolla, eivätkä tulokset vastaa varsinaisia investointilaskelmia. Simuloinnin perusteella kaikki tuotantosuunnat saavat kiertotalouskokonaisuuteen kuulumisesta pientä taloudellista etua. Etua syntyy siirtomaksuttoman sähkön käytöstä sekä joissakin tapauksissa mahdollisen hukkalämmön hyödyntämisestä. Lisäksi etua saadaan pienentämällä yksittäisten tuotantosuuntien ilmastovaikutusta, kun sivujakeet hyödynnetään tuotteina ja prosessien tarvitsema energia tuotetaan uusiutuvalla energialla.

Sivuvirtoja voidaan kierrättää esimerkiksi hyödyntämällä osaa kalankasvatuksesta tulevasta vedestä biokaasulaitoksessa tai biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen kuivajaetta toukkien ravintona. Sivuvirtojen määrät tässä esimerkissä ovat kuitenkin niin pieniä, ettei suurta taloudellista hyötyä synny. Taloudellisen hyödyn sijaan kysymys on ennemminkin jätteiden ja sivuvirtojen kierrätyksestä hyötykäyttöön ilman pitkää ja monimutkaista logistista järjestelmää.

Simulointimallin perusteella energian- ja ruoantuotantoa yhdistävää kiertotalouskokonaisuutta voidaan pitää kiinnostavana ja potentiaalisena tulevaisuuden teollisena tuotantomuotona. Tässä raportissa esiteltyä toimintamallia voidaan hyödyntää kiertotalouskokonaisuuden suunnittelussa ja taloudellisen kannattavuuden arvioinnissa.

Simulointimallin perusteella kiertotalouskokonaisuus voi tuoda joitakin taloudellisia hyötyjä mukana oleville tuotantosuunnille, minkä lisäksi jätteitä ja sivuvirtoja voidaan kierrättää hyötykäyttöön ja vähentää tuotantosuuntien ilmastovaikutusta. Toimintamallin potentiaali liittyykin ennen kaikkea mahdollisiin energia- ja kustannussäästöihin, raaka-aineiden käytön tehostamiseen sekä niiden kautta ilmastopäästöjen vähentämiseen. Näitä voidaan pitää tärkeinä periaatteina tulevaisuuden energian- ja ruoantuotannossa, kun tavoitteena on vähentää uusiutumattomien energialähteiden käyttöä ja luonnonvarojen kulutusta.

Asiasanat: Biohiili, biokaasu, hyönteistuotanto, kalojen kiertovesikasvatus, kasvuhuone, kaukolämpö, kiertotalous, mallinnus, pyrolyysi, simulointi, ympäristövaikutusten arviointi, uusiutuva energia

Sisällys

1. Johdanto	7
2. Älykkäät kaukolämpöjärjestelmät	8
3. Teollisen symbioosin mahdollisia tuotantosuuntia	10
3.1. Hidas pyrolyysi	10
3.1.1. Biohiilen käyttökohteita	10
3.2. Kasvuhuoneet ja vertikaaliviljely	12
3.3. Kalojen kiertovesikasvatus.....	12
3.4. Hyönteiskasvatus	14
3.5. Biokaasun ja mädätejäännöksen tuotanto.....	15
4. Esimerkki teollisen symbioosin mallinnuksesta	19
4.1. Alueen orgaaniset sivuvirrat	19
4.1.1. Metsätalouden sivuvirrat.....	19
4.1.2. Muut alueelliset sivuvirrat	20
4.2. Teollisen symbioosin mahdolliset tuotantosuunnat Sodankylässä	22
4.2.1. Pyrolyysi	22
4.2.2. Kasvuhuone	22
4.2.3. Kalankasvatus	23
4.2.4. Hyönteiset	24
4.2.5. Biokaasu ja ravinnevirrat	27
4.3. Tuotantosuuntien (Symbioosin) mallinnus	28
4.3.1. Kasvuhuoneen simulointi	30
4.3.2. Simuloinnin tulokset.....	33
4.4. Tuotantosuuntien ympäristövaikutusten arviointi	35
4.4.1. Pyrolyysi	35
4.4.2. Biokaasulaitos	37
4.4.3. Kalankasvatuslaitos.....	39
4.5. Kaupallinen selvitys symbioosissa tuotetuille tuotteille.....	40
4.5.1. Biohiili.....	40
4.5.2. Kasvi-/kasvuhuonetuotteet	41
4.5.3. Kalat	42
4.5.4. Toukkakasvatuksen tuotteet.....	44
5. Yhteenveto.....	45
Viitteet.....	48

Liite 1 **53**

1. Johdanto

Sodankylän kunta on ollut aktiivinen erilaisten biotalouteen liittyvien toimintamallien kehittäjänä. Monet kehitettävät asiat ovat liittyneet alueelliseen ruuantuotantoon sekä erilaisiin energiaratkaisuihin. Kunnan kaukolämmön pääenergiälähteenä on ollut turve, jonka potentiaalisista ongelmista suhteessa ilmastonmuutokseen on oltu tietoisia jo pitkään, ja kunnan kaukolämpölaitoksen uusimiseen on haettu erilaisia integroituja ratkaisuja. Tavoitteena on ollut miettiä, millä tavalla energiantuotantoa voidaan hyödyntää kaukolämmön ja sähkön ohessa myös muilla tavoilla.

Sodankylän kunnan alueella on ollut ongelmia löytää markkinoita harvennuspuulle. Tällä on ollut osaltaan vaikutusta kasvumetsien harvennuksissa, ja alueella on kertynyt runsaasti hoitorästejä kasvatusmetsissä. Sodankylän kunnan aluetalouden kannalta olisi positiivista, jos harvennuspuulle saataisiin luotua paikallisia markkinoita. Paikkakunnalla on myös huonosti hyödynnettyjä biopohjaisia virtoja. Näistä keskeisiä ovat mm. kalojen perkuujäte, hoitokalastusten hankalasti hyödynnettävä pienkalasaalis, poroteurastuksen hyödyntämätön teurasjäte sekä maataloudesta syntyvät muut hyödyntämättömät biopohjaiset jakeet ja jätteet.

Biohiileen on viime vuosina kohdistunut kasvavaa kiinnostusta. Käytettäessä biohiiltä maanparrannusaineena, voidaan muun muassa varastoida puustoon sitoutunutta hiiltä pitkiksi ajoiksi. Maaperän humuksen vähenemisestä ja jopa katoamisesta on kasvamassa yksi uusi luontoon ja luonnon moninaisuuteen sekä myös ruuantuotantoon liittyvä globaali uhka.

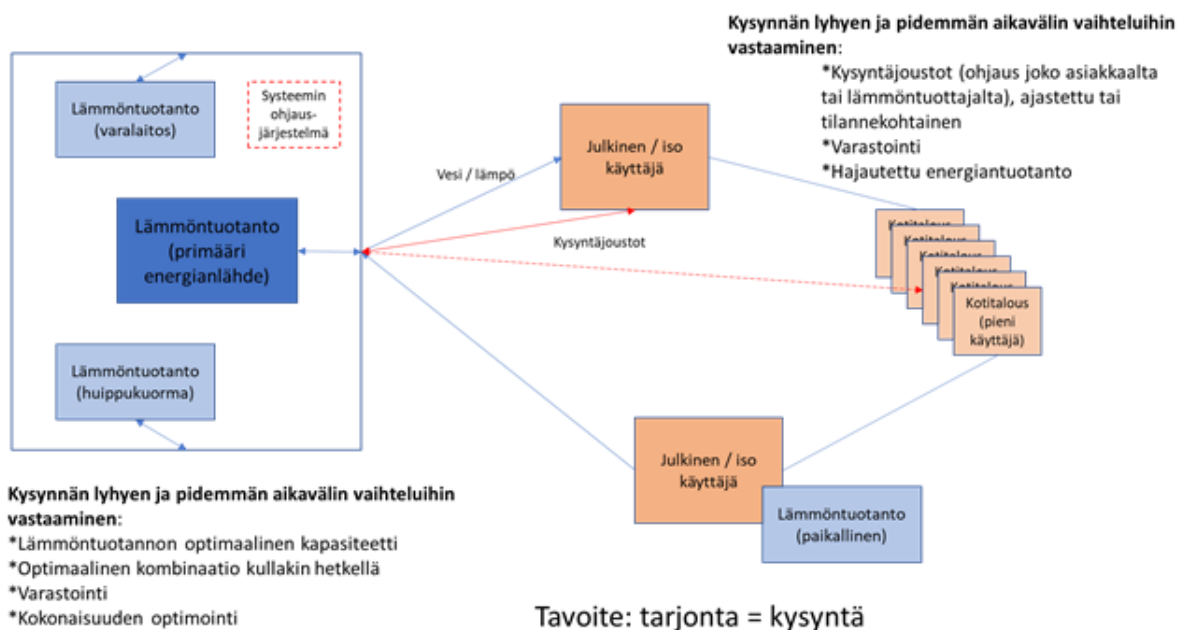
Näiden eri osatekijöiden pohjalta Sodankylän kunnassa nousi ajatus yhdistää eri tuotantosuuntia yhteen tuotantokokonaisuuteen. Heräsi ajatus energiantuotannosta, joka perustuisi pitkälti alueen puutavaraan, erityisesti harvennuspuuhun sekä osittain myös pieneen selluksi käytettävään puutavaraan. Biohiilentuotanto osana energiaprosessia mahdollistaisi jopa hiilinegatiivisen kokonaistuotantojärjestelmän synnyttämisen. Kiinnostusta herätti myös alueen biopohjaisien virtojen kierrättäminen osaksi ravinnontuotantoa ja/tai energiavirtoja.

Tämän hankkeen tavoitteena oli luoda toimintamalli uuden sukupolven kaukolämpölaitokselle. Mallissa keskeisenä ajatuksena oli yhdistää paikallista energian- ja ruuantuotantoa, huomioiden laaja kiertotalouden näkökulma. Toimintamallin tavoitteena oli lisätä ja tehostaa paikallisten raaka-aineiden käyttöä, nostaa alueellista jalostusarvoa, kasvattaa aluetaloutta ja työllisyyttä sekä lisätä alueellista omavaraisuutta energian ja ruuan osalta. Esimerkkinä käytettiin Sodankylän kuntaa.

Tässä raportissa käydään läpi hankkeen (Uuden sukupolven kaukolämpölaitos malli hiilineutraaliin yhdyskuntarakenteeseen - teollinen ekosysteemi energian ja ruuan tuotantoon perustuen paikallisiin raaka-aineisiin sekä kotitalouksien ja tuotantolaitosten sivuvirtoihin) sisältöä ja tuloksia. Hanke on rahoitettu Euroopan aluekehitysrahastosta Lapin liiton kautta.

2. Älykkäät kaukolämpöjärjestelmät

Älykäs kaukolämpöjärjestelmä koostuu useasta eri elementistä (Kuva 1). Pöyryn (2018) Energiategollisuus ry:lle tekemässä raportissa visioidaan, että ”tulevaisuuden energijärjestelmissä eri energiamuodot, tuotantotavat, hajautettu tuotanto ja kysyntäjousto yhdistyvät entistä optimaalisemmin tehden mahdolliseksi siirtymän päästöttömään energijärjestelmään joustavasti ja kustannustehokkaasti”. Kokonaisuuden tavoitteena on kysynnän ja tarjonnan tasapainottaminen niin, että kunakin hetkenä voidaan tarjota kaukolämpöä riittävästi asiakkaiden tarpeisiin kuitenkin samalla huolehtien, että ylituotantoa ei muodostu. Tavoitteen saavuttamisen keskiössä ovat lämmöntuotantoyksiköiden optimaalinen kombinaatio, lämmön varastointi sekä kysyntäjoustot. Lisäksi tarvitaan sopiva ohjausjärjestelmä.



Kuva 1. Älykkään kaukolämpöjärjestelmän elementtejä.

Kaukolämmön tuotanto muodostuu tyypillisesti peruskuormayksiköstä, huippukuorman tasaimiseen tarkoitettuun yksiköstä sekä varalaitoksesta, jota voidaan käyttää, jos peruskuormayksikön tai huippukuormayksikön tuotannossa on ongelmia. Kokonaisuutta suunniteltaessa täytyy huomioida kapasiteetin kokonaisriittävyys (maksimikapasiteetti) ja sopeutuminen kysynnän vaihteluihin. Lisäksi järjestelmän tulee olla taloudellisesti kannattava. Suunnittelun haasteellisuus kasvaa lämmön kysynnän vaihteluiden kasvaessa esimerkiksi ulkolämpötilojen voimakkaan vaihtelun takia.

Kysyntää ja tarjontaa voidaan tasapainottaa joko varastoimalla kaukolämpöä lyhyt- tai pitkäaikaisesti tai hyödyntämällä kysyntäjoustoja. Kaukolämpöjärjestelmissä on perinteisesti käytetty lämpövarastona järjestelmässä kiertävää vettä. Myös järjestelmään kuuluvat rakennukset voivat varata itseensä lämpöenergiaa. Lisäksi lämpöä voidaan varastoida maalämpövarastoihin tai hyödyntämällä kaukolämpöakkuja. Kaukolämpöakku on joko erillinen terässäiliö tai kallioon louhittu varasto, joiden sisältämään nesteeseen voidaan säilöä lämpöenergiaa. Erillisiä vedellä täytettyjä säiliöitä käytetään yleensä lyhyen aikavälin varastointiin, joka voi olla muutamista tunneista viikkoon. Suurempia kalliovarastoja voidaan hyödyntää myös lämmön kausivarastoinnissa. Tällöin varastointi perustuu faasimuutokseen ja kemialliseen reaktioon ja nesteenä käytetään muutakin kuin vettä. Faasimuutokseen perustuva kaukolämpöakuteknologia on

vielä tällä hetkellä melko lapsenkengissä (Raatikainen 2015). Kaukolämpöakut ovat ainakin vielä toistaiseksi varsin kalliita ja niiden kannattavuus tyypillisesti perustuu sähkön ja lämmön yhteistuotannon eli ns. CHP-laitosten toiminnan optimointiin.

Maalämpövarastot voivat perustua joko energiakaivoihin (lämpökaivoihin) tai energiapaaluihin. Näistä käytetään yleisesti englanninkielistä termiä BTES eli Borehole Thermal Energy Storage. Kun perinteinen maalämpöjärjestelmä perustuu yksittäiseen poranreikään asennettuun keruupiiriin, jonka avulla maaperään sitoutunutta lämpöä kerätään, muodostuu maalämpövarasto puolestaan yli kymmenestä poranreikästä, jotka sijaitsevat 3–5 metrin etäisyydellä toisistaan ja muodostavat energiakentän. Tällaiseen energiakenttään voidaan ladata ulkopuolisesta lähteestä tulevaa lämpöenergiaa varastoon käytettäväksi myöhemmin. Varastoitava lämpöenergia voi olla esimerkiksi peräisin auringosta tai teollisuuden hukkalämmöstä (Rakennustieto 2020; Juvonen & Lapinlampi 2013).

Energiakaivot voivat olla matalia eli syvyydeltään 30–50 metriä, perinteisiä eli syvyydeltään 150–300 metriä, keskisyviä eli syvyydeltään 500–2000 metriä tai syviä eli syvyydeltään yli 2000 metriä. Alle 300 metrin syvyydessä maaperän lämpö on peräisin auringosta ja lämpötilat ovat matalampia, kun taas syvemmällä lämpötilat nousevat geotermisen lämmön ansiosta. Energiapaaluja voidaan hyödyntää energiakaivojen sijaan kohteissa, jotka vaativat muutenkin paaluksen (Rakennustieto 2020; Juvonen & Lapinlampi 2013). Energiakaivoihin liittyvien teknologioiden kehittyessä myös niistä saattaa tulla potentiaalinen vaihtoehto kaukolämmön varastoinnissa, mutta tällä hetkellä haasteina ovat investoinnit, jotka voivat kohota korkeiksi sekä veden riittävän lämpötilan saavuttaminen kaukolämpötarkoituksiin tilanteissa, joissa kaukolämmöllä kuumennetaan myös käyttövesi. Lisäksi energiakaivojen hyötysuhde on melko alhainen.

Kysyntäjoustoilla tarkoitetaan lämpöenergian käytön siirtämistä kulutushuipuista muuhun ajankohtaan lämpötilaa säätämällä tai siirtämällä kuumen veden käyttöajankohtaa. Joustoja voidaan toteuttaa joko lämmöntuottaja- tai asiakaslähtöisesti. Kysyntäjoustojen hyötypotentiaali on sitä suurempi, mitä suuremmat ovat erot eri lämmöntuotantolaitoksilla (ns. peruskuorma vs. huippukuorma) tuotetun lämmön kustannuksissa. Myös järjestelmän lämmönvarastointimahdollisuudet vaikuttavat asiaan. Timonen (2018) käy työssään läpi eri tutkimuksissa (mukana sekä todellisia että simuloituja tapauksia) esille tulevia kysyntäjoustojen potentiaalisia säästöjä. Näiden tutkimusten mukaan kysyntäjoustojen avulla voitaisiin parhaimmissa tapauksissa saavuttaa 15–25 % leikkaus huipputehoon ja 5–25 % säästö tuotantokustannuksista. Tällä hetkellä todellisuus on kuitenkin asiantuntijoiden mukaan se, että nykyteknologialla ja nykykokeuksella vuotuisia lämmöntuotantokustannuksia voitaisiin saada vähennettyä noin 1–3 % (Timonen 2018).

Kaukolämpöyhtiöiden asiakkaiden oman energiantuotannon ja kysyntäjoustojen optimaalinen hyödyntäminen vaativat tiivistä yhteistyötä kaukolämpöyhtiön ja asiakkaan välillä tai jopa sitä, että järjestelmää ohjataan kaukolämpöyhtiöstä käsin. Tämän toteuttaminen edellyttää uusia järjestelmiä. Yksi kysyntäjoustojen potentiaalia alentava asia onkin tällä hetkellä tarvittavien ohjausjärjestelmien puute sekä järjestelmäinvestoinnit. On myös mahdollista, että ohjausta ja optimointia hoitaakin joku täysin uusi toimija, ”kolmas osapuoli”, joka toimii linkkinä kaukolämpöyhtiön ja asiakkaan välillä. Vastaavat palvelut ovat edistäneet kysyntäjoustojen hyödyntämistä myös sähkömarkkinoilla. Tällainen toimija voisi tarjota kaukolämpöasiakkaille esimerkiksi tekoälyyn perustuvia oppivia säätöjärjestelmiä tai investoida asiakkaan puolesta energiaa säästäviin ratkaisuihin (Pöyry 2018). Esimerkkejä tällaisista toimijoista Suomessa ovat mm. Leanheat, Fourdeg ja LeaseGreen.

3. Teollisen symbioosin mahdollisia tuotantosuuntia

3.1. Hidas pyrolyysi

Pyrolyysissa biomassaa kuumennetaan hapettomissa olosuhteissa vähintään 350 °C lämpötilaan. Hitaassa pyrolyysissä lämpötilan nousu ja pitoaika maksimilämpötilassa mitataan minuuteissa, kun taas nopea pyrolyysi tapahtuu sekunneissa. Nopeassa pyrolyysissä painotetaan höyrystyvien yhdisteiden hyödyntämismahdollisuuksia, kun taas hitaan pyrolyysin tutkimuksessa pääpaino on ollut hiilipitoisen kiinteän jakeen hyödyntämismahdollisuuksissa. Prosessissa raaka-aineen kemiallinen koostumus muuntuu ja jäljelle jäävä kiinteä tuote on huokoista hyvin mikrobiologista hajotusta kestävää hiiltä. Yleisesti hitaassa pyrolyysissä syntyvät höyrystyvät yhdisteet poltetaan suoraan energiana, mutta niistä osa voidaan lauhduttaa nestemaiseen muotoon. Nestejakeen hyödyntämismahdollisuuksia tutkitaan, mutta kaupallisia sovelluksia on vielä rajallisesti olemassa. Muuttamalla raaka-ainetta ja sen esikäsittelyä tai prosessiteknologiaa ja -parametreja, voidaan jakeiden määrään ja laatuun vaikuttaa merkittävästi.

Pyrolyysin raaka-aineeksi soveltuu hyvin moninaiset sivuvirrat, joskin puupohjaiset materiaalit ovat tyypillisimpiä. Raaka-ainevalikoimaa voidaan kasvattaa ottamalla kuivaus osaksi prosessia. Puu- ja kasvimateriaalien ohella tutkimusta on tehty mm. lantojen, jätevesilietteen ja erilaisten maatalouden sivuvirtojen käsittelystä hitaan pyrolyysin avulla. Pyrolyysi voidaan yhdistää myös kaskadimallin mukaan muihin prosessointitekniologioihin, jossa ennen pyrolyysiä biomassasta voidaan esimerkiksi uuttoteknologioiden avulla erottaa arvokomponentteja ja vasta jäljelle jäänyt kiinteä uuttojäännös prosessoidaan pyrolyysin avulla. Myös syntyvän pyrolyysituotteen käyttö osana seuraavaa prosessiteknologiaa voi tulla kyseeseen. Esimerkiksi Rasi ym. (2019) tutkivat pyrolyysinesteen hyödyntämistä osana biokaasuprosessia.

Pyrolyysi voikin olla mielekästä nähdä osana prosessointikokonaisuutta, mikä parhaimmillaan mahdollistaa biomassan kokonaisvaltaisen hyödyntämisen ja uusien lisäarvotuotteiden tuottamisen samasta raaka-ainevolyymista. Pyrolyysilaitteistoja on saatavilla markkinoilta ja siten prosessin teknologinen valmiusaste on korkea. Laitteistoissa, prosessin optimoinnissa ja laitteistojen liittämässä osaksi prosessointiketjuja (ml. esi- ja jälkikäsittelylaitteistot) on varmasti paljon kehittämismahdollisuuksia.

Pyrolyysiprosessin lopputuotteille, etenkin biohiillelle, on esitetty lukuisia mahdollisia sovelluskohteita. Osa sovelluskohteista on lähinnä ajatuksen tasolla, eikä tietoa sovelluksen toimivuudesta käytännössä ole välttämättä saatavissa. Julkaistujen tulosten yleistettävyyttä hankaloittaa myös suuri vaihtelu biohiilen laadun suhteen, mikä isolta osin aiheutuu käytettyjen raaka-aineiden ja prosessointitekniologioiden eroista. Muun muassa nämä seikat vaikeuttavat biohiilen taloudellisen kannattavuuden arvioimista korvattaessa aiemmin käytettyjä tuotteita tai kehitettäessä uusia sovelluskohteita. Biohiilen markkinoiden voidaankin katsoa olevan raporttia kirjoitettaessa vielä kehitysvaiheessa.

3.1.1. Biohiilen käyttökohteita

Puupohjaisen biohiilen käyttöä maanparannusaineena on kansainvälisessä tutkimuksessa tarkasteltu jo pitkään. Kotimaisessa tutkimuksessa ei ole kuitenkaan voitu osoittaa, että biohiilen vaikutukset viljelijän tai ympäristön kannalta olisivat erityisen merkittäviä (Heikkinen ym. 2019; Soinne ym. 2020). Hitaasti hajoavana materiaalina biohiili kuitenkin säilyy maaperässä pitkään

ja lisää siten maaperän pitkäaikaista hiilivarastoa. Biohiilen laajamittaisen käytön hidasteena on tällä hetkellä sen verrattain korkea hinta. Vaikka useita mahdollisia biohiilen hyötynäkökulmia on esitetty myös kotimaisessa kirjallisuudessa, niiden taloudellisen kannattavuuden arviointi on vielä vaillinaista (Hagner ym. 2013; 2015; 2016).

Kasvualustat, vedenpidätysominaisuudet

Luonnonvarakeskuksessa on tutkittu miten biohiilen raaka-aineena käytetyn biomassan ominaisuudet vaikuttavat syntyvän lopputuotteen laatuun. Tutkimuksissa on keskitytty biohiilen useiden käyttökohteiden kannalta keskeiseen biohiilen huokosrakenteeseen, sekä miten erilaiset biohiilet vaikuttavat erilaisten kasvualustojen vedenpidätysominaisuuksiin (Hyväluoma ym. 2017, 2018; Rasa ym. 2018; Turunen ym. 2020, Rasa ym. 2021; Turunen ym. 2021b). Erilaisilla puu- ja kasvimateriaaleihin pohjautuvien biohiilien on osoitettu vaikuttavan kasvualustojen vedenpidätysominaisuuksiin (Kuoppamäki ym. 2016; Turunen ym. 2020), mutta jätevesilietteen pyrolyysissä syntyneellä hiilellä ei vaikutuksia havaittu (Turunen ym. 2021a). Raaka-aineen rakenteista peräisin olevat biohiilen mikrometrikokoluokan huokokset määräävät pitkälti, miten paljon ja miten tiukasti biohiili voi kasvualustaan lisättyinä vettä pidättää. Biohiiltä käytetään jo osana kaupallisia kasvualustoja. Teoriassa kasvualustan vedenpidätysominaisuuksia voidaan muokata oikealla biohiilivalinnalla haluttuun suuntaan, mutta toiminnan taloudellisesta kannattavuudesta ei ole saatavilla yksiselitteistä tietoa.

Biohiili lannoitevalmisteenä

Pyrolyysin raaka-aineena voidaan käyttää myös ravinnerikkaita biomassoja, jolloin kiinteä lopputuote on mahdollista käyttää lannoitteena. Tutkimuksia on toteutettu lähinnä laboratorio ja astiakoemittakaavassa käyttäen esimerkiksi broilerin ja turkiseläinten lantoja (Keskinen ym. 2019, 2020; Sarvi ym. 2021). Pyrolyysi on todettu konsentroivan ravinteista etenkin fosforia ja tekevän hiilestä hitaammin hajoavaa. Toisaalta ravinteiden liukoisuus heikkenee ja tyypeä hukataan prosessin aikana. Eri raaka-aineista valmistettujen biohiilten typpipitoisuutta voidaan lisätä käyttämällä niitä typpipitoisen nesteen suodatukseen. Keskinen ym. 2021 kuitenkin toteusivat, että parhaimmillaankin typpilisäyksen agronominen vaikutus oli vähäinen ja lisätyn typen määrä riitti parhaimmillaankin täyttämään yhden satokauden typpilannoitustarpeen. Jätevesilietteen kohdalla pyrolyysikokeita on toteutettu myös teollisen mittakaavan pilottilaitoksessa (Lietehiili-hanke, Gasum Oy Topinoja). Tulokset mm. osoittavat pyrolyysin vähentävän monien orgaanisten haitta-aineiden pitoisuuksia (Keskinen ym. 2021, Sarvi ym. 2021 käsikirjoitus). Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY) on käynnistänyt keväällä 2021 testit teollisen pilotmitakaavan pyrolyysilaitteistolla Ämmäsuolla. Koelaitos tuottanee arvokasta tietoa ravinnerikkaiden biomassojen pyrolyysistä käytännön tasolla.

Biohiili raaka-aineena korkean lisäarvon sovelluskohteissa

Hitaalla pyrolyysillä tuotettua biohiiltä voidaan jatkojalostaa kemiallisen tai fysikaalisen aktiivoinnin avulla aktiivihieksi. Kemiallisesti aktivoituissa biohiilissä biohiilen alkuperäinen mikrometrikokoluokan huokosrakenne säilyy (Siipola ym. 2018), mikä korostaa jälleen biohiilen raaka-aineen merkitystä. Biohiileen perustuvan aktiivihieksen laadullisiin ominaisuuksiin voidaan siten vaikuttaa raaka-ainevalinnoilla. Tähdättäessä korkean lisäarvon tuotteisiin biohiilen ja siitä valmistettävien tuotteiden tasalaatuisuuden voidaan olettaa olevan yksi tärkeä laatukriteeri. Nopeakiertoisilla puulajeilla tehdyt tutkimukset osoittavat, että esimerkiksi paju- ja haapaviljelmillä voidaan tuottaa raaka-ainetta huokosrakenteelta hyvin tasalaatuisen biohiilen tuottamiseen (Rasa ym. 2021; Turunen ym. 2021b). Vastaavia tutkimuksia voidaan laajentaa koske-

maan myös muita raaka-aineita, mikäli tasalaatuista biohiiltä vaaditaan raaka-aineeksi tuotettaessa aktiivihiiltä vaikkapa akkuteollisuuden tarpeisiin tähtääviin sovelluskohteisiin. Monet biohiilen perustuvat korkean lisäarvon tuoteinnovaatiot ovat kuitenkin vielä pitkälti kehitysvaiheessa, mutta niiden markkinapotentiaalin voidaan ajatella olevan merkittävä toteutuessaan.

3.2. Kasvuhuoneet ja vertikaaliviljely

Erilaisten salaattien ja yrttien ympärivuotinen tuotanto sisätiloissa ja jopa kokonaan suljetuissa tiloissa on mahdollista LED-tekniikkaan perustuvan valotuksen avulla. Tuotantotavasta puhuttaessa käytetään englanniksi termejä plant factory ja vertical farming. Suomeksi vakiintunutta termistöä ei ole, mutta yleensä puhutaan kasvuhuoneista ja vertikaaliviljelystä.

Vertikaaliviljely tapahtuu suljetussa ympäristössä, jossa kasveja kasvatetaan valaistuissa, toisensa päälle pinotuissa hyllyissä. Sisäviljelystä ympärivuotinen ja paikallinen viljely on riippumaton vaihtelevista sääolosuhteista. Tuotanto on ravinnepäästöjen suhteen suljettu järjestelmä ja veden käyttö on kontrolloitua, kun se kierrätetään. Paikallinen ja lähellä asiakasta tapahtuva tuotanto on myös läpinäkyvää. Parhaimmillaan tuottaja ja asiakas voivat olla jopa päivittäisessä yhteydenpidossa.

Viljely kasvuhuoneissa mahdollistaa pinta-alan tehokkaan käyttämisen, koska viljely tapahtuu useimmiten kerroksissa. Esimerkiksi Frankfurtissa, jossa on 690 000 asukasta, voidaan 25 kerroksen viljelmällä ja 216 m² pinta-alalla tuottaa noin 400 g kasviksia jokaisen asukkaan päivittäisen tarpeen tyydyttämiseksi.

Teknologiaa ja automaatiota ollaan kehittämässä ja ottamassa käyttöön nopeasti alentuneiden kustannusten ja kehittyneen teknologian ansiosta. Esimerkiksi robotiikka ja kasvatusvalot ovat kehittyneet entistä paremmiksi ja halvemmiksi käyttää, minkä lisäksi aurinko- ja tuulienergian hyödyntäminen kasvitehtaiden energialähteenä on lisääntynyt. Kasvitehtaiden suljetuissa ympäristöissä kasvien kasvulle tarvittavat tekijät pystytään hallitsemaan ja tuotannolle haitallisia vaikutuksia, kuten torjunta-aineiden käyttöä ja huonoja sääolosuhteita pystytään merkittävästi vähentämään tai poistamaan.

Esimerkiksi Japanissa on tällä hetkellä noin 120 sisätuotantolaitosta. Tuotantotavan leviämisen suurimpina hidasteina ovat alkuinvestointien korkea hinta ja tuotannon korkea tekninen vaatimustaso. Kerrosviljely sisätiloissa edellyttää merkittäviä investointeja. Toisaalta lopputuotteiden logistiikka-, pakkaus- ja varastointikustannukset voivat pienentyä. Taloudellisuus- ja kestävyyslaskelmissa tulee huomioida myös ympärivuotisuuden aiheuttamat kustannukset, joita mahdollisesti suurempi energiakustannus voi nostaa. Tekniikan kehittyminen, kuten esimerkiksi aurinkopaneelien tehokkuuden paraneminen sekä uudet tekniset innovaatiot voivat kuitenkin pienentää energiakustannuksia tulevaisuudessa. Viljelylaitokset voivat tulla jopa täysin omavaraisiksi energian tuotannossa. Tämä riippuu viljelmän maantieteellisestä sijainnista maapallolla. Taloudellisen kannattavuuden arviointi onkin keskeistä eri hankkeiden suunnittelussa ja toteutuksessa. Kasvitehtaiden sovellukset ja eri mitoitusmahdollisuudet antavat lisäksi aivan uusia mahdollisuuksia myös elintarvikekaupalle, kuten tuoreisiin ja paikallisesti tuotettuihin tuotteisiin pohjautuvan brändin rakentamiselle.

3.3. Kalojen kiertovesikasvatus

Suomessa kasvatetaan noin 15 miljoonaa kiloa ruokakalaa, josta noin 93 % on kirjolohta ja 5 % siikaa. Kotimainen kalantuotanto ei riitä vastaamaan kysyntään, sillä Suomeen tuodun kalan

kiintoaineen poistoa, mikä jo itsessään edesauttaa ravinteiden poistoa, sillä 80 % fosforista ja 20 % typestä on sitoutunut kiintoaineeseen.

Ruokakalatuoannossa on ensisijaisen tärkeää taata myytävien kalojen hyvä laatu. Kiertovesikasvatuksen bioreaktoreiden haitallisena puolena on eri bakteerilajien veteen erittyvät maku- ja hajuhaittoja aiheuttavat yhdisteet kuten geosmiini ja 2-metyyliisoborneoli. Kalojen tehokas raikastaminen puhtaassa vedessä noin 1–2 viikkoa ennen myyntiä on toistaiseksi kustannustehokkain tapa poistaa makuhaittoja aiheuttavat yhdisteet kaloista.

Kiertovesikasvatuksen investointi- ja käyttökulut ovat huomattavasti suuremmat verrattuna perinteiseen verkkoallas- tai läpivirtauskasvatukseen. Lämpöeristetyn hallin kustannukset voivat olla jopa puolet investointikustannuksista, mutta myös sisäinen vedenkäsittelytekniikka nostaa kustannuksia. Suuria kustannuksia on pyritty kompensoimaan rakentamalla megaluokan (> 1 000 t kapasiteetti) laitoksia, mutta arvokkaamman kalalajin kasvatus voi mahdollistaa taloudellisesti kannattavan tuotannon myös pienemmillä laitoksilla. Myös mahdolliset synergiaedut olemassa olevan teollisuuden kanssa voivat edesauttaa taloudellisesti kannattavaan tuotantoon pääsemisessä.

3.4. Hyönteiskasvatus

Uusien tuotantohyönteisten kasvatus on kasvava ala. Investointitahti on kasvanut vuoden 2017 muutamista miljoonasta vuoden 2020 lähes puoleen miljardiin dollariin. Tällä hetkellä Euroopassa tuotetaan noin 10 miljoonaa kiloa hyönteisproteiinia ja vuosituhannen loppuun mennessä tuotannon odotetaan viisikymmenkertaistuvan. Merkittävänä markkinasegmentteinä ovat tällä hetkellä kalan ja lemmikkieläinten rehut. Hyönteisten rehukäyttö edellyttää alkutuotannon tehostamista, joka mahdollistaa raaka-aineen riittävän ja tasaisen saatavuuden sekä kilpailukykyisen hinnan. Teknologiaratkaisujen lisäksi tuotantokustannuksia saadaan laskettua minimoimalla rehu- tai kasvualustakuluja sekä hyödyntämällä hukkalämpöä ja minimoimalla lisälämmityksen tarvetta tehokkaalla tilankäytöllä.

EU-lainsäädännön odotetaan muuttuvan yhä sallivammaksi hyönteiskasvatukselle. Keskeisintä rehuhyönteistuotannon kasvulle on hyönteisistä eristetyn proteiinin salliminen tuotantoeläinten rehussa. Kalanviljelyssä se on sallittu vuodesta 2017 asti ja siipikarjan osalta päätöstä odotetaan lähiaikoina. Kasviperäisiä ruoka- ja rehuteollisuuden sivuvirtoja ja lihaa tai kalaa sisältäviä entisiä elintarvikkeita käytetään laajasti hyönteisten kasvatuksessa. Alan toimijat uskovat lihaa ja kalaa sisältävien entisten elintarvikkeiden sallimisen tapahtuvan muutaman vuoden sisällä. Sen sijaan teurasjätteiden, lannan tai kotitalouksista kerättyjen biojätteiden hyödyntäminen rehuhyönteisten kasvatuksessa ei ole mahdollistumassa lähiaikoina.

Ruoan- ja rehuntuotannon ulkopuolella selkärangattomia on pitkään hyödynnetty biomassojen prosessoinnissa. Tämän aiemman vermikompostoinnin ohelle on syntyneessä biomassojen prosessointi hyönteisten avulla, eli hyönteisten ns. tekninen käyttö. Hyönteiset prosessoivat massoja selvästi lieroja ja mikrobeja nopeammin ja tuovat samalla lisäarvoa. Hyönteisprosessoidun biomassan (frassin) on havaittu olevan vähintään nykyisten orgaanisten lannoitteiden veroisia tuotteita. Sivutuotteena syntyvistä hyönteisistä voidaan eristää rasvaa mm. biodieselin valmistukseen. Lisäksi hyönteisistä saatava kitiini voimistaa kasvien vastustuskykyä.

Tammikuussa 2021 hyönteisalan yrityksiä on Suomessa rekisteröitynyt elintarvikealan ja rehualan toimijoiksi noin 50. Tilat tuottavat lähes poikkeuksetta ruokahyönteisiä ja lajina on kotisirkka. Muutamilla tiloilla on myös jauhomatokasvatusta. Suomen teollisen mittakaavan rehuhyönteistuotantolaitokset ovat toistaiseksi vasta kehittymässä. Hyönteiskasvatus-teknologiaa

kehittää ainakin neljä suomalaista yritystä, joista yksi on keskittynyt voimakkaasti sirkkoihin ja kaksi mustasotilaskärpäseen.

Mustasotilaskärpäsen on kiertotalouden tärkein ja investoiduin hyönteislaji sekä Euroopassa että maailmanlaajuisesti. Se on nopeasti kasvava ja lisääntyvä subtrooppinen hyönteinen (kuva 3), joka kasvaa luonnostaan märässä pilaantuvassa biomassassa ja kykenee mm. ohjaamaan kasvualustan mikrobistoa itselleen hyödylliseen suuntaan. Se kykenee hyödyntämään niin kasvi- kuin eläinperäistä materiaalia mukaan lukien lantaa. Mustasotilaskärpäsen toukan avulla voidaan pienentää biomassan käsittelyn päästöjä ja palauttaa ravinteet nopeammin ruuantuotantoon. Se ei ole tuholainen ja käyttäytymisensä vuoksi se ei näytä levittävän haitallisia tauteja.



Kuva 3. Mustasotilaskärpäsen elinkierto.

3.5. Biokaasun ja mädätejäännöksen tuotanto

Biokaasuprosessissa orgaaninen biomassa hajoaa hapettomissa olosuhteissa. Prosessissa syntyy metaania ja hiilidioksidia sisältävää biokaasua sekä ravinnerikasta mädätejäännöstä. Biokaasuprosessissa voidaan käsitellä lähes kaikenlaisia orgaanisia jäte- ja sivuvirtoja. Tuotettua kaasua voidaan käyttää lämmitykseen, sähköntuotantoon tai siitä voidaan jalostaa liikennepolttoainetta. Jos biokaasulaitos on 20 MW tai suurempi ja kaasulla tuotetaan lämpöä tai sähköä (tai viilennystä), täytyy toiminnassa huomioida uusiutuvan energian direktiivi (RED II, 2018/2001/EU), jossa määritellään kestävyyskriteerit sekä hiilidioksidipäästövähennykset. Jos kaasusta jalostetaan liikennepolttoainetta, on RED II direktiivi huomioitava kaikissa kokoluokissa (ks. Rasi ym. 2020). Muita huomioitavia ovat mm. sivutuoteasetus (1069/2009/EY), joka

asettaa kriteerit eläinperäisten sivuvirtojen, kuten teurastuksen ja kalanperkuujätteiden, käsittelylle sekä lannoitevalmisteastus (MMM 24/11), joka ohjaa ja säätelee mm. lannoitevalmisteiden laatu- ja merkintävaatimuksia (ks. Tampio ym. 2018).

Biokaasuprosessissa kaasuntuotannon ohella jäljellejäävä mädätysjäännös sisältää syötemateriaalien sisältämät kasviravinteet täysin, lukuun ottamatta nimellistä rikin ja typen haihtumista prosessissa. Biokaasuprosessi myös hajottaa syötteen orgaanista ainesta ja muuntaa huomattavan osan orgaaniseen ainekseen sidotuista ravinteista, erityisesti tyypeistä, kasveille käyttökelpoisempaan liukoiseen muotoon (Möller & Müller 2012). Riippuen biokaasulaitoksen prosessissa käytetystä kuiva-ainepitoisuudesta, mädätysjäännös on luonteeltaan joko laimeaa lietettä tai kuivalantamaista massaa.

Perusominaisuuksiltaan mädätysjäännökset soveltuvat sellaisenaan lannoitteiksi kohtalaisen hyvin. Niissä on pääravinteita kasville sopivassa suhteessa, tyypeä ja kaliumia enemmän ja fosforia vähän. Ravinnepitoisuudet vaihtelevat riippuen prosessin syötteistä (Möller & Müller 2012) ja yleisesti mädätysjäännösten ravinnepitoisuudet ovat laimeita. Peltoon levitetyn mädätysjäännöksen ravinteet eivät kaikki ole suoraan kasvien käytettävissä, vaan maaperäeliöillä on keskeinen rooli typen muuntamisessa kasveille käyttökelpoisempaan muotoon ja muiden orgaaniseen ainekseen sitoutuneiden ravinteiden vapauttamisessa. Happamuudeltaan mädätysjäännökset vaihtelevat neutraalin ja emäksisen välimaastossa. Emäksisissä olosuhteissa riskinä on typen haihtuminen ammoniakkinä. Typen haihtumista voidaan hallita säätämällä mädätysjäännöksen pH neutraaliksi (Salo ym. 2015). Suomalaisissa happamissa maaperissä kierrätyslannoitteen mieto emäksisyys ei ole ongelma maan pH:n muutoksen näkökulmasta.

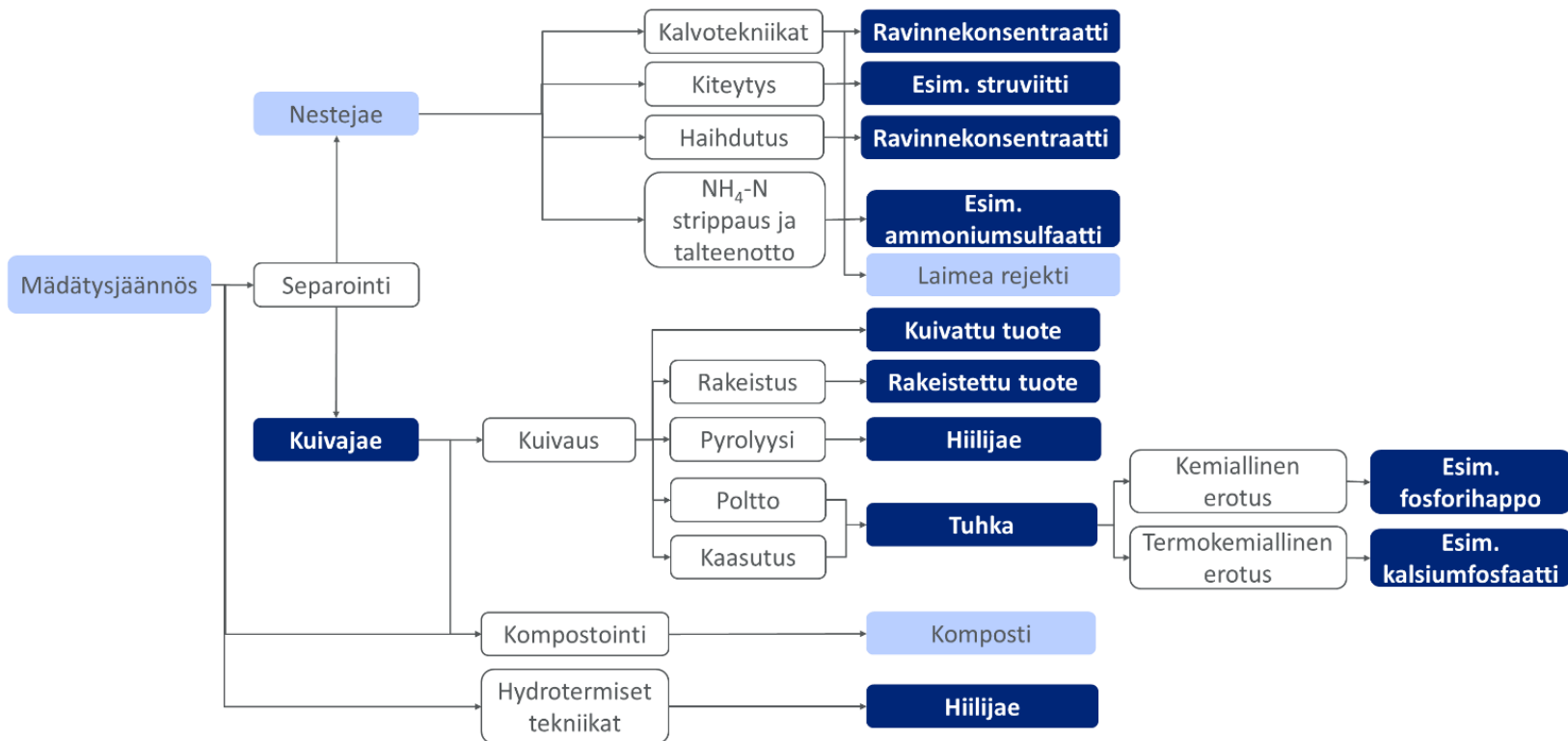
Mädätysjäännöstä voidaan jatkojalostaa erilaisin tekniikoin ja tekniikan valintaan vaikuttaa halutun lopputuotteen ominaisuudet. Vedenerotuksella tavoitellaan erityisesti ravinnepitoisten jakeiden parempaa kuljetettavuutta. Pienemmän tilavuuden omaavia jakeita on taloudellisempaa varastoida ja kuljettaa pidempiä matkoja, millä voidaan vaikuttaa sekä paikallisiin että alueellisiin ravinnetaseisiin tehokkaammin. Jatkojalostuksen avulla voidaan myös erotella tyypeä ja fosforia eri jakeisiin ja muuttaa ravinteiden keskinäisiä suhteita paremmin vastaamaan kasvintuotannon tarpeita. Lisäksi jatkojalostuksen kautta voidaan erottaa ja jalostaa mädätysjäännöksen sisältämää orgaanista ainesta. Mädätysjäännöksen jatkojalostus voidaan toteuttaa eri tavoin, ja mahdollisia jatkojalostusketjuja on lukuisia (kuva 4). Keskeisempänä ja ensimmäisenä vaiheena jalostusketjussa on usein separointi neste- ja kuivajakeisiin. Tulee kuitenkin huomioida, ettei separointi vielä yksinään vaikuta käsiteltävään massamäärään ja kuljetettavuuteen, mutta se mahdollistaa tyypeä ja kaliumia sisältävän nestejakeen sekä fosforia ja orgaanista ainesta sisältävän kuivajakeen erottelun. Separointi voidaan toteuttaa esimerkiksi karkealla ruu- vipuristimella tai fosforin erotuksen suhteen tehokkaammalla, mutta energiaintensiivisemmällä linkoseparoinnilla. Separointiratkaisu voi koostua yhdestä teknologiasta tai useamman yhdistelmästä. Separoinnissa muodostuvan kuivajakeen massa on yleensä noin 7–20 % alkuperäisestä mädätysjäännöksen massasta. Tehokkaan separoinnin jälkeen kuivajakeessa on yleensä suuri osa mädätysjäännöksen sisältämästä fosforista sekä valtaosa orgaanisesta tyypeistä (Pyykönen & Ervasti 2019). Mikäli kuivajakeita halutaan jatkojalostaa ja tiivistää edelleen, tulee sen kuiva-ainepitoisuutta (20–40 %) nostaa entisestään esimerkiksi erilaisten kuivaustekniikoiden avulla, jotta seuraavat prosessivaiheet ovat mahdollisia. Kuivauksen jälkeen kuivattu tuote voidaan käyttää peltolannoitteena kuivalantojen tavoin tai rakeistaa mekaanisesti lannoiterakeiksi/-pelleteiksi, jolloin niitä voidaan käyttää väkilannoiterakeiden levityslaitteistoilla. Näiden kuivien ja termisesti kuivattujen kierrätyslannoitteiden käytöstä on positiivisia kokemuksia peltolevitettyinä maanparannuskäytössä (Ehman & Thumn 2018). Kuivajae voidaan käsitellä myös termisesti korkeissa, yli 300 °C lämpötiloissa, jolloin lopputuotteena on joko tuhka tai biohiili-

mäinen hiilijae. Käsittely korkeassa lämpötilassa laskee kuitenkin jonkin verran kasveille käytökelpoisen fosforin osuutta. Erityisesti jätevesilietteiden polttotuhkien käsittelyyn on kehitetty erilaisia kemiallisia ja termokemiallisia prosesseja, joiden avulla tuhkasta on mahdollista erottaa fosforilannoitustuotteita tai lannoitevalmistukseen soveltuvaa fosforihappoa (Luostarinen ym. 2020).

Separoinnin rejektivesissä on valtaosa mädätysjäännöksen liukoisesta tyyppistä ja kaliumista, mutta myös hieman fosforia. Nestejakeen jatkojalostuksessa tavoitteena on tiivistää ravinnepitoisuuksia erilaisilla prosesseilla. Vettä erottavat kalvosuodatus- ja haihdutusprosessit poistavat vettä ja tuottavat siten ravinnekonentraatteja, joissa on alkuperäistä huomattavasti korkeampi ravinnepitoisuus. Tiivistymisen myötä myös mahdolliset nestejakeessa olevat haitta-aineet konsentroituvat, mikä voi rajoittaa käyttökohteen valintaa. Ammoniumtyypen strippauksella nestejakeen sisältämä liukoinen tyyppi haihdutetaan ammoniakiksi ja sidotaan happoon tai veteen. Lopputuotteena voi käytetystä haposta riippuen olla esimerkiksi ammoniumsulfaatti tai vettä käytettäessä ammoniumvesi. Näitä kaikkia nestemäisiä lannoitteita voidaan käyttää peltolannoitteena joko nestelannoitus- tai lietteenlevityskalustolla. Kiteytettäessä nestejakeesta struviittia tulee varmistaa prosessille otollinen ammoniumtyypen, fosfaattifosforin ja magnesiumin suhde, jolloin struviittikiteitä muodostuu (Luostarinen ym. 2020). Struviitti on sellaisenaan lannoitteeksi soveltuva kideäinen lannoitevalmiste. Yleisimpiä kierrätyslannoitteiden käyttökohteita ja prosessivaihtoehtoja on lueteltu taulukossa 1.

Taulukko 1. Kierrätyslannoitteiden käyttökohteet

Prosessi	Tuote	Käyttökohteet			
		Maatalous	Viherrakentaminen	Kasvihuone	Teollisuus
Mädätys	Mädätysjäännös	x	x		
Separointi	Rejektivesi	x			
	Kuivajae	x	x		
Kalvo ja haihdutus- teknologiat	Konsentraatti	x		x	
NH ₄ -N strippaus ja talteenotto	Ammoniumsulfaatti	x			x
	Ammoniumvesi	x		x	
Kuivaus	Kuivattu tuote	x	x		
Rakeistus	Rakeistettu tuote	x		x	
Pyrolyysi	Biohiili	x	x	x	x
Poltto/kaasutus	Tuhka	x		x	



Kuva 4. Mädätysjäännöksen mahdolliset prosessointitekniikat ja niissä muodostuvat tuotteet. Vaalean sinisissä laatikoissa olevat tuotteet ovat ravinnepitoisuuksiltaan melko laimeita, tumman sinisten laatikoiden tuotteet taas ovat mädätysjäännöstä selkeästi väkevempiä, ravinnesisällöltään erotellumpia ja helpommin kuljetettavia valmisteita.

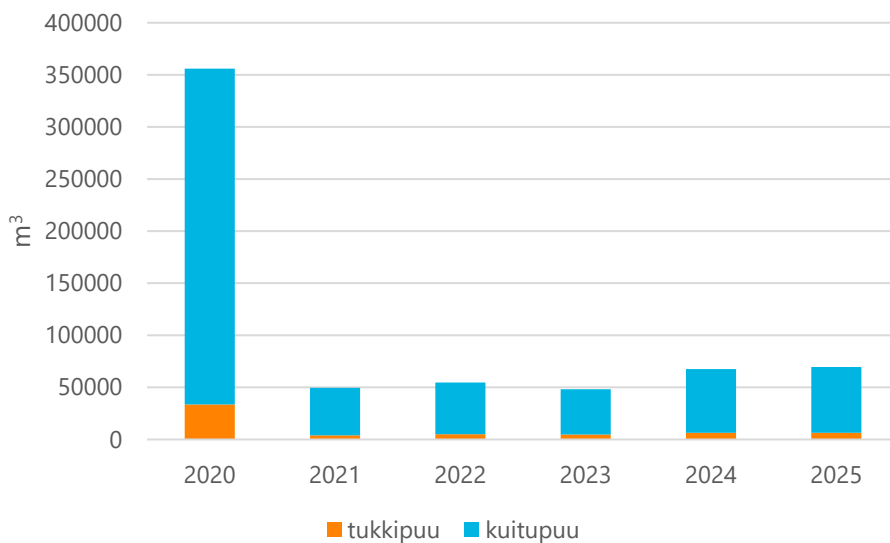
4. Esimerkki teollisen symbioosin mallinnuksesta

Tässä esimerkissä teollisen symbioosin taustalla on Sodankylän alueen orgaaniset sivuvirrat, joiden perusteella lähtöarvot eri tuotantosuunnille on määritelty. Seuraavissa kappaleissa on kuvattu näiden lähtöarvojen perusteella määriteltyjä mallin tuotantosuuntia. Mallia voidaan helposti soveltaa toisenlaisilla alueilla lähtöarvoja muuttamalla.

4.1. Alueen orgaaniset sivuvirrat

4.1.1. Metsätalouden sivuvirrat

Sodankylän alueella on heikon kysynnän vuoksi syntynyt metsänhoidollisia rästejä kaikissa hakkuutyypeissä. Käytettävissä olevan puuraaka-aineen määrän selvittämiseksi tilattiin Metsäkeskukselta laskelma Sodankylän alueen potentiaalista. Tuloksena saatiin palvelu, jonka avulla voidaan haarukoida yksityismetsien potentiaalia mm. etäisyyden, kehitysluokan, hakkuutavan, pääpuulajin tai keskimittan perusteella. Metsäkeskuksen laskelman perusteella Sodankylän alueen (0–100 km säteellä Sodankylän keskustasta) yksityismetsien pienpuun (läpimitta rinnan korkeudelta 4–15 cm) hakkuupotentiaali ensiharvennus- ja harvennushakkuissa on vuosina 2021–2025 keskimäärin noin 52 561 m³ per vuosi. Lisäksi vuodelle 2020 laskettu potentiaali (sisältäen aiemmat rästit) on 322 333 m³ (kuva 5).



Kuva 5. Sodankylän alueen potentiaalinen tukki- ja kuitupuukertymä 2020–2025. Lähde Metsäyhdistyksen laskelma.

Taulukossa 2 on esitetty Sodankylän alueen yksityismetsien kaikkien hakkuutyyppeiden potentiaalinen kanto-, oksa- ja lehtimassa vuosille 2020–2025 (luvut tonneina). Vuoden 2020 luvut sisältävät myös rästissä olevien hakkuuiden luvut.

Taulukko 2. Potentiaalinen kanto-, oksa- ja lehtimassa (tonnia) vuosille 2020–2025. Lähde Metsäyhdistyksen laskelma.

Vuosi	Kantomassa	Oksamassa	Lehtimassa
2020	152 036	151 649	39 033
2021	16 006	16 609	4 332
2022	17 674	18 040	4 721
2023	15 897	16 192	4 257
2024	19 058	19 550	5 150
2025	17 443	18 089	4 922

On syytä huomata, että Metsäkeskuksen arviot kattavat vain yksityisomistuksessa olevat metsät. Kokonaispotentiaalia voidaan arvioida suhteuttamalla saadut luvut alueen omistuspohjaan yksityiset vs. muut metsänomistajat (talousmetsät). Sodankylän alueen talousmetsien omistus eroaa Lapin alueen keskimääräisestä siten, että Sodankylässä noin 2/3 on yksityisomistuksessa ja 1/3 on Metsähallituksen omistuksessa. Taulukossa 3 on esitetty Sodankylän alueen latvusmassa ja kantojen hakkuupotentiaali kaikista Sodankylän alueen metsistä vuosille 2025–2034.

Taulukko 3. Sodankylän alueen latvusmassan ja kantojen hakkuupotentiaali 2025–2034 (m³/v) (Luonnonvarakeskuksen Biomassa-atlas 2020).

Biomassan tyyppi	Määrä
Latvusmassa, mänty, suurin kestävä aines. ja energiapuun hakkuukertymä	95 244
Latvusmassa, kuusi, suurin kestävä aines. ja energiapuun hakkuukertymä	34 603
Latvusmassa, lehtipuu, suurin kestävä aines. ja energiapuun hakkuukertymä	15 819
Kannot, mänty, suurin kestävä aines. ja energiapuun hakkuukertymä	99 261
Kannot, kuusi, suurin kestävä aines. ja energiapuun hakkuukertymä	34 979

4.1.2. Muut alueelliset sivuvirrat

Teollisessa symbioosissa voidaan hyödyntää myös muita alueella muodostuvia biopohjaisia sivuvirtoja. Määriltään suurimpia ovat yleensä maatalouden biomassat ja erityisesti lannat, mutta myös yhdyskunnista ja yritystoiminnasta muodostuu ravinnerikkaita orgaanisia sivuvirtoja. Sodankylän alueella kannattaa huomioida myös erityisesti Lapin maakunnalle ominaiset sivuvirrat, joiden hyödyntäminen on voinut olla heikkoa tai vaikeasti toteutettavaa, ja joille teollinen symbioosi voi tarjota järkevän hyödyntämismahdollisuuden. Tällaisia nimenomaan Lapille ominaisia sivuvirtoja ovat mm. poroteurastuksen, kalatalouden ja matkailutoiminnan sivuvirrat. Tarkempia tietoja muodostuvien sivuvirtojen massa- ja ravinnemääristä on esitetty taulukossa 4.

Maatalouden biomassat

Sodankylän, kuten Lapin maakunnan maatalous yleisestikin perustuu nurmenviljelyyn ja sitä syövien märehtijöiden kasvatukseen. Sodankylän kunnan alueella muodostuu vuosittain 23 000 tonnia erilaisia lantoja, joista 90 % naudon lantoja (lietelanta, kuivalanta ja virtsa). Muita maatalouden sivuvirtoja ovat erilaiset nurmet, säilörehunurmen ylijäämä sekä suojavyöhyke ja ke-

santonurmet, yhteensä noin 1 850 t/v. (Ervasti ym. 2021). Sodankylässä on myös turvetuotannosta poistuvia turvemaita, joilla pystyttäisiin tuottamaan energianurmea noin 290 ha alueella, mikäli se katsottaisiin järkeväksi esimerkiksi uusiutuvan energian direktiivin päästövähennysvaatimusten suhteen.

Yhdyskuntien biohajoavat jätteet

Yhdyskunnissa muodostuvien orgaanisten sivuvirtojen määrät ovat tarkasteltavan tapauksen alueella pieniä, onhan Sodankylän kunnan asukaslukukin vain noin 8 300 (vuosi 2020). Biojätteen muodostumismääriä arvioidaan usein asukaskohtaisilla kertoimilla (77 kg/asukas/v) ja kunnan alueella muodostuvaksi yhdyskuntien biojätteen määräksi on arvioitu 641 t/v (Biomassa-atlas karttapalvelu 2021). Yhdyskuntien biojätteeksi on luettu keittiö-, ruokala- sekä puutarha- ja puistojätteet. Lisäksi matkailutoiminnan vuoksi alueella muodostuu huomattavia määriä biojätettä sekä majoitus- että ravintolatoiminnasta. Muodostuminen tapahtuu pääosin Lapin matkailusesonkina talvikaudella. Alueella ei kuitenkaan tällä hetkellä (toukokuu 2021) ole käytössä biojätteen erilliskeräystä tai käsittelyä, joten kotitalouksien biojätteiden hyödyntäminen vaatisi erillisen keräyssysteemin järjestämisen.

Jätevesilietteet

Jätevesilietteiden (puhdistamolietteet sekä sako- ja umpikaivolietteet) määrät ovat usein sivuvirtojen kokonaismäärästä merkittäviä hiilen ja ravinteiden kierrätyksen kannalta. Niiden käsittelyä ei kuitenkaan aina haluta toteuttaa yhdessä muiden biomassojen kanssa, koska puhdistamo- ja sakokaivolietteitä sisältäville lannoitevalmisteiden käytölle ja käyttökohteille on rajoituksia. Puhdistamolietettä sisältävää lannoitevalmisteita saa käyttää vain kasveille, joita ei käytetä ravinnoksi tuoreena tai eläinrehuna, eli vain esim. viljoille, öljykasveille ja tärkkelysperunalle. Puhdistamolietettä sisältäviä lannoitevalmisteita ei myöskään saa käyttää luonnonmukaiseen tuotantoon sitoutuneilla tiloilla.

Jätevesilietteiden määrä on kuitenkin usein tarpeellista arvioida ravinnekierrätyksen tehostamiseksi. Arviointiin voidaan käyttää esimerkiksi Luken ja SYKEN toteuttaman Ravinnelaskuri työkalun lietemäärän kerrointa, 76,5 g kuiva-ainetta /as/vrk (perustuen VVY:n raportoiimiin valtakunnallisiin lietemääriin, Vilpanen & Toivikko 2017). Sodankylän kunnan alueen puhdistamolietteen määräksi arvioitiin 1 208 t/v.

Muut orgaaniset sivuvirrat

Poroteurastuksen sivuvirtana muodostuvat ruuansulatuselimistöt ja niiden sisällöt ovat nykyisin heikosti hyödynnetty sivuvirta, jota mm. haudataan maahan hyödyntämättömänä. Näin ollen ne ovatkin teollisen symbioosin kannalta hyvin kiinnostavia, koska niiden hyödyntäminen ei kilpaile muiden käyttömuotojen kanssa. Poroteurastukset tapahtuvat kuitenkin vain rajattuna aikana vuodesta, noin syyskuusta tammikuulle. Tämä aiheuttaa sivuvirtojen käytön osalta joko tarpeen säilöä materiaalia tai sopeutua käyttämään sitä jaksottaisesti vain osan aikaa vuodesta.

Samaa jaksottaisuutta on jonkin verran myös kalasivuvirtojen muodostumisessa. Kalasivuvirroissa luonnonvesikalastuksessa sesonki on noin kesäkuulta lokakuulle. Myös talvikuukausina on kalastusta, mutta kelirikkoajat luonnollisesti tuovat pienen tauon kalastukseen.

Taulukko 4. Arvio Sodankylän kunnan alueella muodostuvien sivuvirtojen määristä. (Biomassa-atlas, Luken ja SYKEN Ravinnelaskuri-työkalu sekä Ervasti ym. 2021)

Sivuvirta	Massavirta	Massavirran ominaisuudet		
	t/v	TS (t/v)	N (t/v)	P (t/v)
Nauta, lietelanta	11 700	1 059	59	11
Nauta, kuivalanta	7 500	2 229	40	8
Nurmet, kaikki*	1 845	603	12,9	1,4
Kotitalouksien biojäte	641	179	4	0,6
Puhdistamoliete	1 208	242	13	1,7
Kalasisivuvirrat	129	27	3,1	1,0
Poroteurastuksen sivuvirta, ruuansulatuselimistöt	268	86	3,5	0,4
Matkailun biojäte	62	17	0,4	0,1

TS, kuiva-aine

*ylijäämänurmi 5 % tuotannosta, sekä suojaväyhyke- ja kesantonurmet

4.2. Teollisen symbioosin mahdolliset tuotantosuunnat Sodankylässä

4.2.1. Pyrolyysi

Sodankylän esimerkissä demonstroititiin biohiilen tuottamiseen itävaltalaisista SynCraft teknologiaa. Tuotantoteknologia poikkeaa jonkin verran Suomessa käytetystä biohiilen tuotannosta. Kyseessä on korkealämpöpyrolyysi- ja leijupetiteknikalla tuotettu biohiili. SynCraft prosessi on hermeettinen ja täysin automaattisesti ohjattu prosessi. Kaasumoottori toimii prosessissa imuna, prosessin alkupäässä ruuvi siirtimet siirtävät haketta prosessiin ja prosessissa. Ruuvien syöttönopeudella säädellään prosessin tehoa, joten prosessi ei ole kovin herkkä käytettävän materiaalin (lämpö) ominaisuuksien suhteen.

Pyrolyysin raaka-aineena esimerkkitapauksessa käytettiin Sodankylän alueella syntyviä metsänhoidon sivuvirtoja (hakkeena 30 000 t/a). Laskennassa oletuksena oli, että laitokselle tuotava puuhake kuivataan pyrolyysilaitoksessa tuotettavalla lämpöenergialla. Laitoksesta syntyy tuotteena lämpöä, sähköä sekä biohiiltä.

4.2.2. Kasvuhuone

Tällä hetkellä käytössä olevissa lasi- ja polykarbonaattirakenteisissa kasvuhuoneissa salaattikilon tuottaminen kuluttaa noin 25 kWh energiaa. Kaupalliset kasvuhuoneet Suomessa sijaitsevat alueilla, joiden keskilämpötila on yli 5 °C. Sodankylän keskilämpötila on n. -1,5 °C, mistä tulee suuri lisäys lämmitysenergian tarpeeseen. Tämän vuoksi energiavirtamallinnukset tehtiin lämpöta- loudellisesti paremmalle kasvuhuoneelle. Kasvuhuonekasvatuksessa ei hyödynnetä lainkaan

luonnonvaloa, vaan kaikki kasvien tarvitsema valotus tuotetaan LED-valaisinten avulla, mikä puolestaan lisää sähköenergian kulutusta.

Mallinnusta varten laskettiin, kuinka monta tuntia valotusta kasvuhuoneessa tarvitaan. Kasvuhuoneessa, jossa ulkoa tulevaa säteilyä ei hyödynnetä, valotuksen tarve olisi laskennallisesti 6480 h vuodessa. Vertailun vuoksi, valosummalaskelmat (daily light integral, DLI) tehtiin Ilmatieteenlaitoksen avoimen säteilydatan perusteella. Säteily Sodankylässä on mitattu 280–4 000 nm:n alueella minuutin välein ja laskelmissa käytettiin vuoden 2016 mittaustuloksia. Faust & Loganin (2018) kehittämällä kaavalla laskettiin, paljonko säteilyä on ns. PAR-alueella (photosynthetically active radiation, PAR, 400–700 nm). Oletuksena oli, että kasvihuoneen sisälle päätyy 40 % ulkona olevan säteilyn määrästä. Näin voitiin arvioida, että jos tavoite DLI on 10 mol/m²/d, mikä on salaatinkasvatuksessa hyvä taso, niin lisävalotusta tarvittaisiin kasvihuoneessa 3 064 h vuodessa.

Vertailua jatkettiin ottamalla huomioon Ilmatieteenlaitoksen avoimen lämpötiladatan mukaan tehdyt laskelmat lämmityksestä johtuvaan energiankulutukseen. Tyypillisen kasvihuoneen lämmönläpäisykerroin eli U-arvo on yli 3 W/(Km²). Jo nykyisellä kasvihuonemallilla, jotka ovat rakennettu esim. polyuretaani sandwich-paneeleista, on arvioitu päästävän noin 10–12 kWh/kg kulutukseen. Luku on alle puolet kasvihuoneeseen verrattuna, sillä U-arvo tippuu kunnollisella eristyksellä reilusti alle 1 W/(Km²). U-arvoissa voidaankin saavuttaa erittäin alhaiset arvot, mutta ongelmaksi muodostuu yleensä rakenteen korkea hinta. Uusimman teknologian hyödyntäminen rakennustekniikassa voi mahdollistaa sekä alhaisen U-arvon, alhaisemmat rakennuskustannukset, että ekologisesti kestävä puumateriaalin käytön. Aalto-yliopistossa kehitetty VIS-huone otettiin mallinnuksen state-of-the-art -vaihtoehdoksi.

4.2.3. Kalankasvatus

Tuotantolajiksi valittiin siika, jonka tasainen ja kirjolohta arvokkaampi tuottajahinta mahdollistaa taloudellisesti kannattavan kiertovesikasvatuksen. Tuotantokapasiteetiksi valittiin 70 000 kg vuodessa, suhteuttamalla vesi- ja ravinnejäätymät sekä Sodankylän alueen asiakaspotentiaali teollisen ekosysteemin tasolle. Suomessa on toiminnassa olevia saman kokoluokan kiertovesilaitoksia, joten kokoluokka mahdollistaa kannattavan kalatuotannon.

Kiertovesilaitoksen mitoituksessa on käytetty rehukerrointa 1,2 eli laitos käyttää rehua 84 000 kg vuodessa. Tällöin laitos käyttää happea 84 000 kg, pH-säätöön emästä 16 800 kg, ja vedenkäsittelykemikaaleja 8 400 kg. Siian tuotantoteknisten ominaisuuksien takia maksimitiheyttä ei voi pitää samalla tasolla kirjolohen kanssa, jolloin allaskapasiteettia tarvitaan noin 1200 m³, joka voitaisiin toteuttaa noin 1 400 m² hallissa. Allasvesi vaihdetaan kahdesti tunnissa, jolloin kiertävän veden määrä on 2 400 m³/h. Vedenkäsittelytekniikka pyritään rakentamaan mahdollisimman pienellä nostokorkeudella, jotta energiakustannukset pysyvät pieninä. Energiakulutukseksi arvioitiin 5 kWh/kg rehua, jonka lisäksi 1,5 kWh/kg rehua kuluu jäähdytykseen ja lämmitykseen.

Investointikustannukset arvioitiin kirjallisuuden ja haastattelujen perusteella olevan 20 €/kg per tuotantokapasiteetti. Siian kasvatuksessa tarvitaan kuitenkin paljon allaskapasiteettia, jolloin investointikustannukset voivat olla tätä suuremmat, sillä pelkän lämpöeristetyn hallin investointikustannuksesi arvioitiin 14 €/kg. Työnmääräksi arvioitiin 2,3 htv ja kustannuksiksi sivukuuluineen 3 750 €/htkk.

Laitoksen poistovedet käsitellään omalla pienpuhdistamolla, joka koostuu lieteveden tiivistämisestä ja ulkoisesta vedenkäsittelykentästä. Tiivistetty lietevesi johdetaan biokaasulaitokselle, jonka lisäksi sinne ohjataan kirkkaampaa poistovettä 5 000 m³ vuodessa biokaasulaitoksen pro-

sessivedeksi. Loppu kirkkaampi vesijae ja lieteveden tiivistyksestä jäävä vesi käsitellään puuhakereaktorissa, jossa denitrifikaation avulla poistetaan typpeä. Kalanrehu sisältää noin 672 kg fosforia ja 6 300 kg typpeä, josta kalaan sitoutuu fosforista 336 kg ja tpeestä 3 465 kg. Lieteveden tiivistyksessä saadaan fosforista talteen 300 kg ja hakereaktorissa tpeestä poistuu 1 600 kg. Ravinnekormituksen osalta fosforin ominaiskuormitukseksi tulee 0,4 g ja typen 7 g tuotettua kalakiloa kohden.

Kiertovesilaitos hyödyntää symbioosin omaa sähköntuotantoa, minkä lisäksi kalaperkeet ja kuolleet kalat ohjataan joko hyönteiskasvatukseen tai biokaasutukseen. Teknologia ei ole vielä valmista tehokkaaseen ravinteiden ja hiilidioksidin kierrätykseen kalalaitokselta kasvuhuoneelle, mutta tulevaisuudessa teollinen symbioosi voi saada etua myös tästä. Lisäksi ravinteiden ja hiilidioksidin osuus kasvuhuoneen kustannuksista on niin pieni, ettei ravinteiden kierrätyksen teknisten ratkaisujen katsottu olevan kustannustehokkaita tässä esimerkissä.

4.2.4. Hyönteiset

Hyönteiskasvatamojen koot vaihtelevat; suurimmat mustasotilaskärpäslaitokset ovat yli 10 000 m² ja tuottavat miljoonia kiloja hyönteisproteiinia ja yli sata miljoonaa kiloa orgaanista lannoitetta. Tyypillinen startup-koko on kuitenkin noin 300 m² ja töissä on kahdesta neljään henkilöä, riippuen oman teknologiakehityksen määrästä. Valitun kasvatusteknologian mukaan, kasvatustilan toukkatiheys voi vaihdella 0,2 miljoonasta ainakin 4 miljoonaan toukkaan per neliometri. Tässä kokoluokassa esim. Warner (2014) on kirjannut kapasiteetiksi noin 250 tonnia kuivatoukkaa per vuosi. Tämä vastaa noin 0,35 miljoonaa toukkaa per neliometri. Olettaen että hyödynnetään yleistä kasvatusteknologiaa, tämä tiheys vaatii tasokasvatuksessa 9–14 päällekkäistä kasvatustasoa. Sodankylän arvioissa pohjana käytettiin 300 m² rakennusta, josta puolet on varsinaisessa toukkakasvatuksessa ja tasokasvatusta on kahdellatoista tasolla. Kasvatusalueen toukkatiheydeksi oletettiin ~0,45 miljoonaa toukkaa neliometrillä. Yhdellä paikalla oletettiin tehtävän 26 kasvatusjaksoa vuodessa, eli yksi kahdessa viikossa. Luonnonvarakeskuksen muissa hankkeissa tehtyjen havaintojen perusteella biologisesti toukkien suurin koko saavutetaan 10–13 päivän kohdalla.

Toukkien tuotantoa voidaan arvioida biokonversion avulla. Biokonversio (B) mittaa tuotantoa annettua kasvumassakiloa kohti. Pienin arvo vastaa likimain hyvää lietteenomaista kasvumassaa tai lantaa, toinen tyypillistä esikäsittelemätöntä kasvipohjaista rehua, ja suurin arvo vähäkuituista ihmisravintoa. Kasvualustan kuivahäviämään (H) vaikuttaa mm. massan kuitupitoisuus. Laskelmissa oletettiin kuivahäviämän olevan lineaarisesti yhteydessä biokonversioon ($H = 2B + 0,15$) perustuen yksinkertaistettuun malliin Luonnonvarakeskuksen muissa hankkeissa havaitsemilla arvoilla. Näillä alkutiedoilla voidaan arvioida myyntikuivan frassin, ja toukan tuotantoa suhteessa märkään (vesipitoisuus 75 %) kasvatusmassaan (taulukko 5).

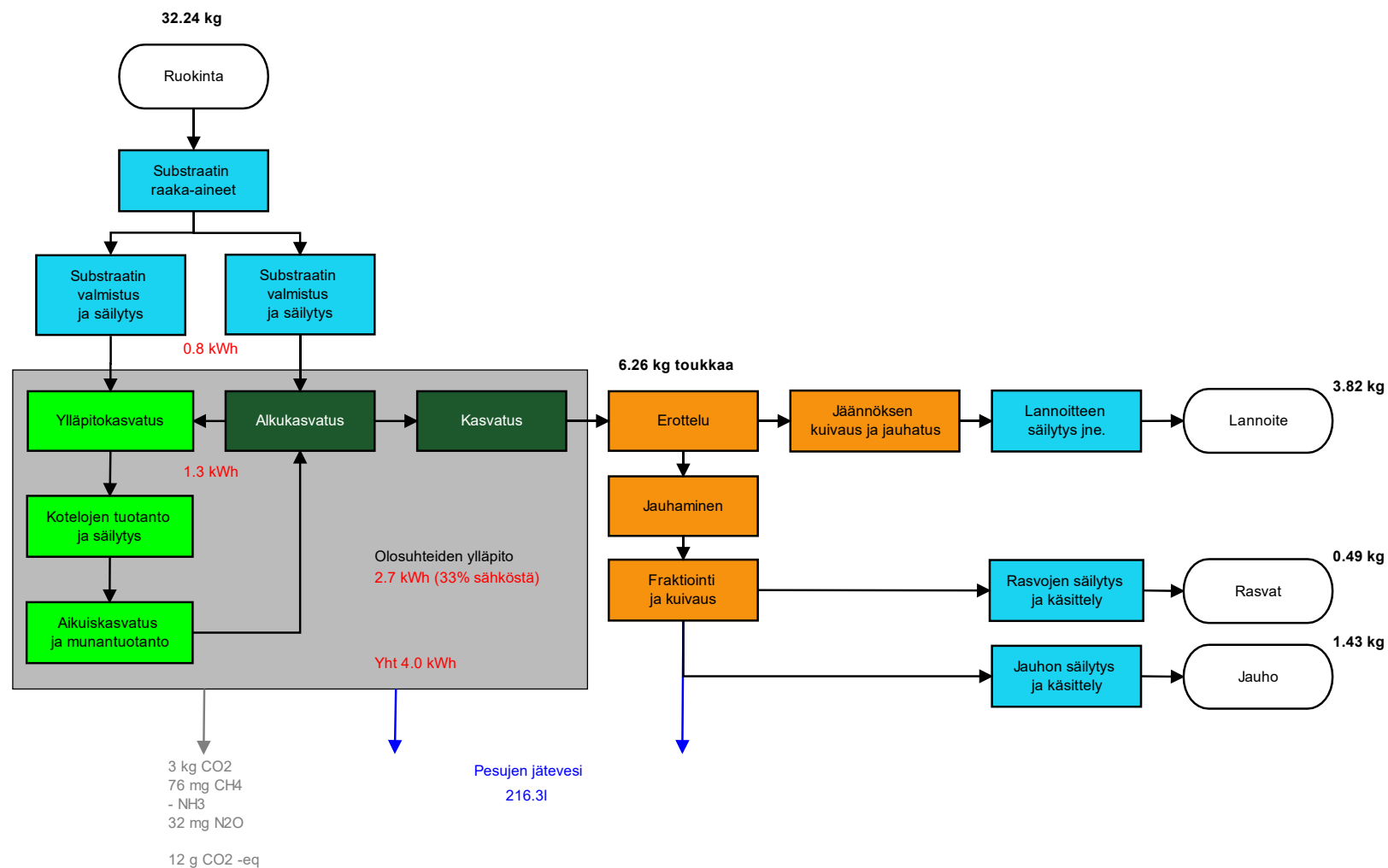
Taulukko 5. Tuotettu toukka ja frassilannoite suhteessa annettuun märkään rehuun/ kasvu-
alustaan.

Biokonversio (ka, %)	Häviämä (ka, %)	Kuivattu toukka (%)	Kuivattu frassi (%)
10	35	2,6	19
20	55	5,2	13
30	75	7,9	7,3

Toukkien kasvatuksessa käytettävät resurssit riippuvat kasvatusteknologiasta ja olosuhteista, ja laskelmissa jouduttiin yksinkertaistamaan tilannetta. Kasvatusmassan määräksi vakioitiin kilogramma tuhatta toukkaa kohti. Kaikkineen märkärehun tarpeeksi arvioitiin 1 754 t vuodessa. Työmäärän arviointi ilman määrättyä teknologiaratkaisua on epävarmaa. Munientuotantoon arvioitiin kuluvan 2 h, rehuntekoon 1 h ja erilaiseen logistiikkaan 15 minuuttia arkipäivää kohti. Jos päivässä käsitellään hieman yli 600 laatikkoa (60 cm x 40 cm) ja vaiheiden työt lasketaan tälle laatikkomäärälle, peruskasvatuksessa työaikaa per laatikko saa mennä vain reilu 1 minuutti, jotta kaksi henkeä voi huolehtia kasvatuksesta. Jos kasvatuksesta huolehtii kolme henkeä, näihin muihin tehtäviin on laatikkoa kohti aikaa ~2,5 minuuttia. Kaksinkertaisella laatikkokoolla työasitetta voidaan edelleen helpottaa. Laitos vaatii hyvän prosessien suunnittelun ja koneistuksen ja laatikkokohtaisen työn minimoinnin. Työtä helpottavat investoinnit luonnollisesti vaikuttavat työmäärään. Laitoksen työntekijämäärän minimi on 2–3 henkilöä.

Laskennassa veden ja sähkön käytön arviointiin käytettiin suuren mittakaavan toukkatuotannon laskettua Smetanan ym. (2019) mallia minimaalisilla muutoksilla (kuva 6). Laskemisen yksinkertaistamiseksi arviot muutettiin ensin arvioiksi tuoretuotekiloa kohtaan. Mukaan laskettiin rehun valmistus ja käsittely, munien tuottaminen, varsinainen toukkakasvatus, tuotteiden valmistus (erottelu, murskaus jne.) ja käsittely sekä sosiaalililat. Tarvittava lämmitysresurssi muunnettiin sähkön määräksi. Näiden perusteella vettä arvioitiin kuluvan 35 litraa tuoretoukkakilogrammaa kohti, sähköä lämmitykseen 1,4 kWh tuoretoukkakilogrammaa kohti ja muuta sähköä 1,3 kWh tuoretoukkakilogrammaa kohti. Tämän oletettiin vastaavan sähkön ja veden käyttöä kaksitoistakerroksellisessa tasokasvatuksessa biokonversiolla 20 %, kun toukkakasvatushuoneiden ala on 150 m². Tämän jälkeen biokonversion, toukka-itiheyden tai alan muuttuessa, veden käytön oletettiin muuttuvan vain suhteessa kasvatusalaan (toukkakasvatushuoneiden pinta-ala kerrottuna päällekkäisten kasvatustasojen lukumäärällä) sekä sähkön ja lämmityksen vain suhteessa toukkakasvatushuoneiden pinta-alaan. Vettä laskettiin kuluvan vuodessa 5,2 m³ x päällekkäisten tasojen lukumäärä x toukkakasvatushuoneneliö. Sähköä kuluu arvion mukaan lämmitykseen n. 2 500 kWh per toukkakasvatushuoneneliö ja muihin laitteisiin ja prosessointeihin n. 2 300 kWh per toukkakasvatushuoneneliö.

Rehun ja substraatin hinta riippuu raaka-aineista ja niiden lähteistä. Kaupallinen kananrehu maksaa noin 200 €/t. Märkärehuna tämä tarkoittaa hintaa 56 €/t. Jos hyönteisille annetaan rehun sijasta jätettä, tämä kulu voi olla jopa negatiivinen eli tuloa. Laskennassa käytettiin arvoa 12 €/t, joka vastaa tilannetta että 80 % substraatista on ilmaista, ja sitä rikastetaan 20 % kaupallista rehua. Mikäli kaikki Sodankylän ekosysteemin separoitu mädätteen kuivajae ohjataan toukkakasvatukseen, ja lisäksi käytetään n. 90 t kaupallista kuivarehua, tarve biojätteelle tai eläinperäisille sivuvirroille olisi 210 tonnia (ka 25 %) vuodessa.



Kuva 6. Smetana ym. 2019 pohjalta muokattu tuotantomalli.

4.2.5. Biokaasu ja ravinnevirrat

Biokaasuprosessin oletettiin hyödyntävän paikallisesti muodostuvia orgaanisia jäte- ja sivuvirtoja ja tuottavan niistä energiaa ja ravinne- sekä hiilipitoista mädätysjäännöstä. Koska alueella ei ole biojätteiden erilliskeräystä, ei yhdyskuntien biojätevirtoja oletettu ohjautuvan biokaasulaitokseen. Myöskään yhdyskuntien tai teollisuuden jätevesilietteitä ei oletettu käsiteltävän biokaasulaitoksessa, sillä käsittelyjäännökselle oletettiin näin laajemmat ja edullisemmat hyötykäyttömahdollisuudet ja -kohteet. Laitoskoko on myös niin pieni, ettei jätejakeiden erillään pitämistä (esim. käsittely eri reaktoreissa) katsottu järkeväksi. Biokaasulaitoksen syötteenä valikoitui siis naudun liete- ja kuivalanta, kalastuksen sivutuotteet, poronteurastuksen sivuvirrat sekä symbioosiin kuuluvan kiertokalakasvatuksen orgaaniset sivuvirrat. Lisäksi oletettiin, että rehuntuotannon sivuvirtoja tai energiantuotantoon viljeltyjä nurmia käytetään lisäsyötteenä. Biokaasulaitoksen prosessiveden oletettiin tulevan kiertokalakasvatuksen poistovedestä (taulukko 6). Korkeampi prosessiveden määrä laimentaisi laitoksen syöteseosta ja aiheuttaisi lisäkustannuksia sekä reaktoritilavuuden osalta että mädätteen käsittelyssä. Kuljetusmatkat arvioitiin keskimääräisten biomassojen sijaintien perusteella (Biomassa-Atlas).

Taulukko 6. Biokaasulaitoksessa käytettävät syötteen ja niiden kuljetusmatkat.

Biomassa	Massavirta t/a	Kuljetusmatka keskimäärin, km
Naudan lietelanta	470	20
Naudan kuivalanta	483	25
Nurmet	2 500	20
Kalan fileoinnin sivutuotteet sekä kalastuksen sivuvirrat	149	54
Poronteurastuksen sivuvirrat	386	54
Kiertokalakasvatuksen lietteet	438	0
Prosessivesi kiertokalakasvatuksesta	5000	0

Biokaasuprosessin oletettiin olevan mesofiilinen (37 °C) märkäprosessi (TS reaktorissa syötemateriaalien mukaisesti noin 11 %). Prosessin toiminnan oletettiin olevan tasaista ympäri vuoden. Biokaasun- ja mädätteen tuotannon laskennassa käytetyt tausta-arvot ja laskentamenetelmät on koottu liitteeseen 1.

Biometaanintuotto tarkasteluun valituilla syötteillä on noin 3 GWh, joka vastaa noin 370 henkilöauton vuotuista kulutusta. Mädätettyä jäännöstä syntyy noin 8800 t/a (TS 5 %, 3,8 gN/kg, 0,5 gP/kg). Oletuksena tässä tarkastelussa on, että jäännös separoidaan ruuviseparaattorilla neste- ja kuivajakeeseen. Kuivajae muodostuu 610 t/a ja se voidaan hyödyntää toukkakasvatuksen syötteenä. Kuivajae voitaisiin myös ohjata lannoituskäyttöön kuivalantamaisena lannoitevalmisteena. Nestejake muodostuu vuosittain 8 200 t, ja se sisältää 90 % mädätejäännöksen alkuperäisestä tyvestä ja 85 % fosforista, koska ruuviseparaattorit eivät ole kovin tehokkaita erottamaan typpi- ja fosforifraktioita toisistaan. Tähän laitosesimerkkiin ruuviseparaattori kuitenkin sopii, koska sen avulla pystyttiin tuottamaan orgaanista ainesta sisältävää

jaetta hyönteiskasvattamon tarpeisiin ja ravinteet ohjaamaan nestejakeen mukana lannoituskäyttöön. Kuivajakeen erottaminen ja ohjaaminen hyönteiskasvatukseen myös vähentää laitoksella tarvittavaa mädätejäännöksen ja sen jakeiden varastointikapasiteettia.

Nestejaetta voitaisiin sen typpi- ja fosforisisällön (3,7 gN/kg, 1,3 gNH₄/kg ja 1,1 gP/kg) mukaisesti käyttää lannoitteena esimerkiksi nurmille tai viljoille. Sen kuiva-ainepitoisuus on lietelannan luokkaa (TS 4 %), jolloin levitys onnistuu lietelannan levityskalustolla. Nurmiä lannoitettaessa (oletus fosforilannoitukselle 14 kg/ha), nestejaetta voitaisiin levittää yhteensä 282 hehtaarille täyttämään näiden peltojen fosforitarve. Typen osalta täydennyslannoitusta muiden lannoitteiden muodossa kuitenkin tarvitaan, mikäli halutaan päästä lähelle esimerkiksi ympäristötuen maksimien mukaista typpilannoitusta. Tarvittava nurmihehtaari määrä Biomassa-atlas karttatyökalan mukaan löytyy alle 20 km etäisyydellä Sodankylän keskustasta.

Mikäli mädätejäännöksen nestejakeen lannoituskäyttöön soveltuvat alat sijaitisivat kauempana biokaasulaitoksesta, olisi nestejaetta myös mahdollista jatkojalostaa. Näin välttyttäisiin veden kuljettamiselta, ja tekniikasta riippuen mahdollistettaisiin mineraalilannoitemaisten lannoitustuotteiden valmistus (esimerkiksi typen strippauksen tai struviittikiteytyksen kautta), joille voisi myös olla enemmän markkinoita. Investoinnit jatkojalostusteknologioihin ovat kuitenkin usein suuria ja sen kannattavuuden ehtona on usein tätä esimerkkiä merkittävästi suurempi mittakaava (Luostarinen ym. 2019a, b).

Usein biokaasulaitokset tekevät sopimuksia lähiseudun viljelijöiden kanssa, jolloin varmistetaan mädätejäännöksen tai siitä jatkojalostettujen tuotteiden menekki pidemmäksi aikaa. Biokaasulaitos vastaa mädätejäännöksen ja siitä prosessoitujen jakeiden varastoinnista laitoksella, riippuen siitä, kuinka usein tuotteita kuljetetaan tilojen omiin varastoihin. Mädätejäännöksen ja laimean nestejakeen osalta tuotteen arvo lannoitemarkkinoilla on usein matala, ja laitokset jopa osallistuvat näiden jakeiden kuljetuskustannuksiin.

4.3. Tuotantosuuntien (Symbioosin) mallinnus

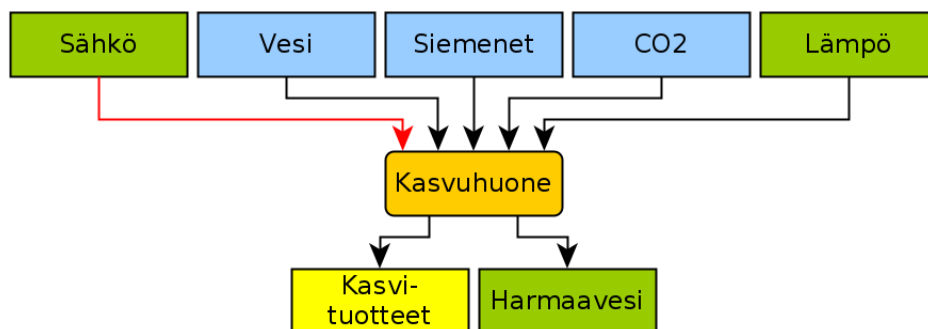
Teollisen symbioosin simulointi toteutettiin yhdistämällä toisiaan tukevat tuotantosuunnat kokonaisuudeksi, jossa pyritään hyödyntämään eri yksiköiden tuottamat jätevirrat seuraavan yksikön raaka-aineena. Haasteena tällaisen symbioosin toteuttamisella on yksiköiden väliset riippuvuudet ja niiden tasapainottaminen vuoden jokaisena tuntina. Myös symbioosin eri yksiköiden tuotantokustannukset vaihtelevat raaka-aineiden ja energian saatavuuden sekä hinnan mukaan. Näiden riippuvuuksien ja tuotantokustannusten tutkimiseksi toteutettiin aikariippuva simulointimalli, jossa mallinnettiin valittujen tuotantoyksiköiden toiminta sekä symbioosin sisäiset energiavirrat, jotta voidaan varmistaa tasapainon säilyminen ja arvioida symbioosin tuotantokustannukset mahdollisimman realistisesti. Toteutettu simulointimalli on esitetty kuvassa 7. Tässä kappaleessa nostetaan esimerkiksi kasvuhuoneen simulointi, muut symbioosin yksiköt mallinnettiin samalla tavoin kuin kasvuhuone, ja materiaalivirrat kytkettiin toisiinsa.

4.3.1. Kasvuhuoneen simulointi

Kasvuhuone on ikkunaton lämpöeristetty tila, jossa kasveja kasvatetaan ympäri vuoden keinovalossa ja tarkasti säädelyissä kasvuolosuhteissa. Vaikka valaistukseen on suunniteltu käytettävien tehokkaita LED-valaisimia, ne tuottavat kuitenkin myös lämpöä. Tämä lämpö riittää kasvuhuoneen lämmittämiseen talvellakin, valaistus ollessa päällä. Yöaikaan valot sammutetaan ja silloin kasvuhuone tarvitsee myös lämmitystä. Kesällä valaistus lämmittää kasvuhuonetta liikaa, jolloin energiaa tarvitaan myös jäähdyttämiseen. Jäähdytys voidaan toteuttaa lämpöpumpulla tai sumuverhoratkaisuilla, jolloin lämpöä saadaan siirrettyä tehokkaasti kasvihuoneesta ulos. Valaistukseen, lämmitykseen ja jäähdytykseen tarvittava energia sekä sähkötarve saadaan pyrolyysiprosessista.

Symbioosin ulkopuolelta kasvuhuoneeseen pitää hankkia siemeniä (mukaan lukien ruukut ja kasvualusta), vettä ja hiilidioksidia. Hiilidioksidia voidaan tuottaa myös symbioosissa mukana olevasta biokaasulaitoksesta, mutta sitä ei tässä mallissa ole otettu mukaan, sillä sen tuomia kustannuksia oli haastava arvioida.

Kasvuhuoneen tuotteina on symbioosin ulkopuolelle myytävät kasvikset, sekä jonkin verran ylimääräistä vettä (kuva 8). Vesi voidaan käsitellä jätevedenkäsittelylaitoksessa, koska tässä symbioosissa biokaasulaitos ottaa vastaan osan kalankasvattamon vedestä, eikä sen kapasiteetti riitä kaiken symbioosissa olevan veden kierrättämiseen.



Kuva 8. Kasvuhuoneen kytkennät suunniteltuun symbioosiin.

Kasvuhuone mallinnettiin jatkuvana prosessina käyttäen Taulukon 7 parametreja. Hetkellisenä ulkolämpötilana käytettiin ilmatieteen laitoksen Sodankylän mittausaseman mittaustuloksia, jotka ovat saatavissa avoimena datana ilmatieteen laitoksen sivuilta. Sähkön hintana käytettiin Nordpoolin tietojärjestelmästä ladattua sähkön tuntihintaa Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla vuonna 2016 (day ahead market).

Hetkelliset materiaalivirrat, energiankulutus ja kustannukset laskettiin Taulukon 8 kaavojen avulla. Koko vuoden kulutukset ja kustannukset laskettiin numeerisella integraatiolla hetkellisarvojen perusteella.

Kasvuhuoneen simulointituloksia, vuoden 2016 tammikuun ensimmäisen puoliskon ajalta energiankulutuksen osalta on esitetty Kuvassa 9. Valaistukseen tarvittavan energian kulutuksen tarve on kasvuhuoneessa vakio, mutta yöaikaisen lämmityksen tarve vaihtelee ulkolämpötilan mukaan. Jäähdytykseen ei alhaisen ulkolämpötilan vuoksi talvelle kulu merkittävästi energiaa. Kuvaan 10 on koottu kasvuhuoneen käyttökustannukset samalta tammikuun alkupuoliskolta. Henkilökunnan palkat ovat suurin kustannuserä, siemenet ja ruukut toiseksi suurin ja sähkön

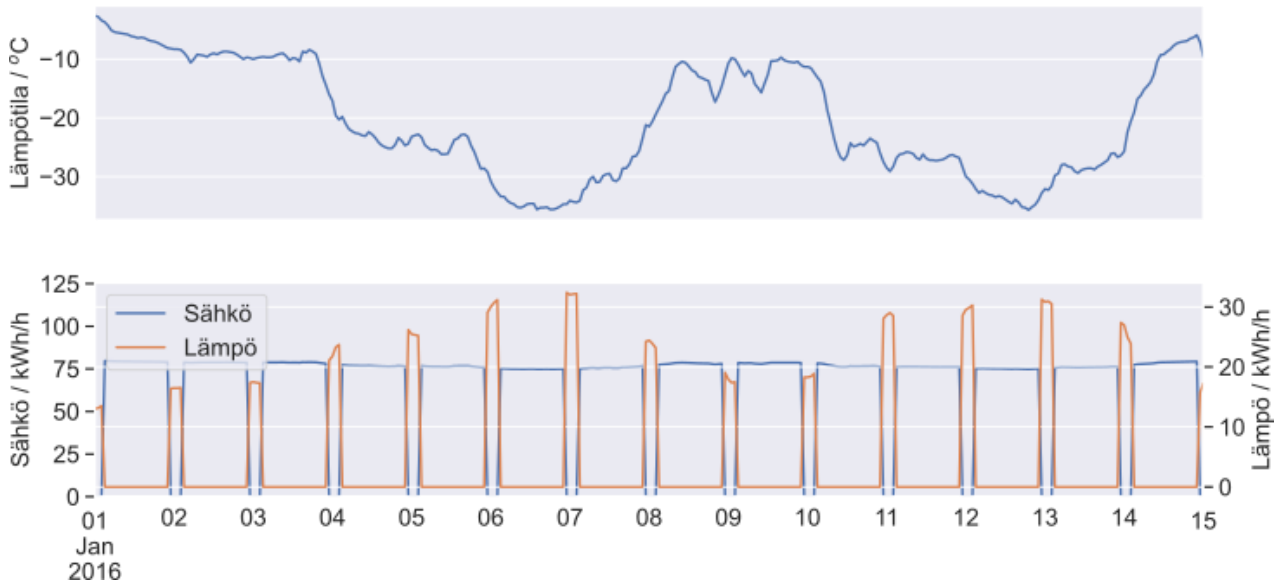
ollessa kolmanneksi suurin menoerä. Sähkön hinnan vaihtelujen vuoksi, kustannukset vaihtelevat säätilan ja sähkön kysynnän mukaan, niiden ollessa yleensä suurimpia talven kylmimpinä päivinä.

Taulukko 7. Kasvuhuoneen mallin parametrit

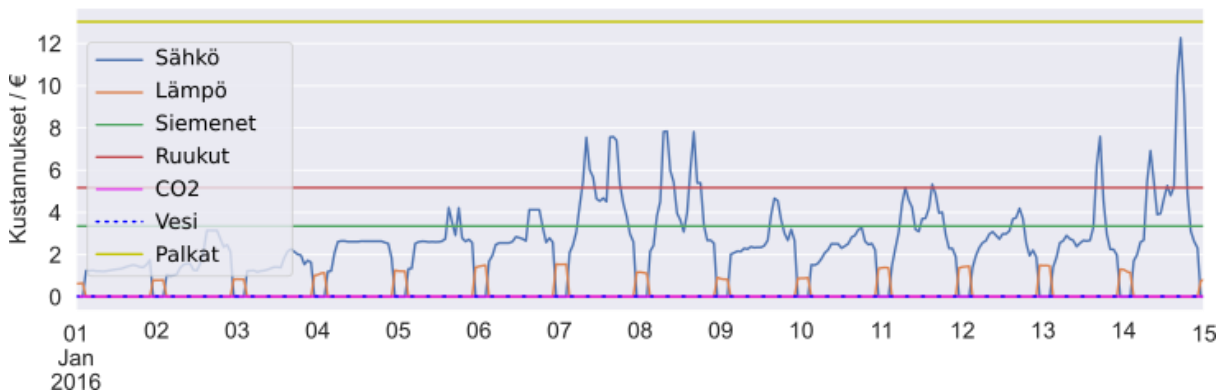
Parametri	Symboli	Arvo	Yksikkö
Kasvatuspinta-ala	A	1203	m ²
Seinäpinta-ala	A _w	560	m ²
Lattiapinta-ala, katon pinta-ala	A _f , A _r	250	m ²
Sisälämpötila päivällä	T _d	22	°C
Sisälämpötila yöllä	T _n	19	°C
Ulko- ja sisälämpötilan erotus	ΔT		°C, K
Yövalaistuksen aika	t _n	22:00 – 03:00	
Katon ja seinien U-arvot	U _w	0,22	W/K/m ²
Lattian U-arvo	U _f	1,7	W/K/m ²
Tuotantotehokkuus	η _t	0,086	kpl / h / m ²
Tarvittava valaistusintensiiteetti, PAR	I	150	μMol / m ² / s
Valaisutehokkuus, LED	η _i	2,7	μMol / Ws
Veden kulutus	V _w	0,020	l / h
Hiilidioksidin kulutus	M _{CO2}	0,3	kg / h
Ilmastonhallinnan tehokerroin	COP	4	
Henkilökunnan tarve / yksikkö	n _h	3	
Kuukausipalkka + sivukulut	S _h	3128	€
Sähkön hinta: Nordpoolin spot-hinta, 2016	P _e		
Sähkövero, veroluokka II	P _{ev}	0,63	€/MWh
Sähkön siirtomaksu, Rovakaira	P _{es}	19	€/MWh
Kaukolämmön hinta, Sodankylä	P _h	48	€/MWh

Taulukko 8. Kasvuhuoneen mallin tärkeimpiä laskentakaavoja, joilla lasketaan koko kasvihuoneen tuottamat ja kuluttamat resurssit tuntia kohti.

Selitys	Kaava	Yksikkö
Valaisuun tarvittava teho päiväaikaan	$P_i = I / \eta_i \cdot A_f$	W
Lämpövuoto	$Q_E = (U_w \cdot (A_w + A_r) + U_f \cdot A_f) \cdot \Delta T \cdot A_f$	W
Lämmitystarve, jos $Q_E - P_i > 0$	$Q_H = Q_E - P_i$	W
Jäähdytystarve, jos $P_i - Q_E > 0$	$Q_C = P_i - Q_E$	W
Sähkön tarve	$P_E = P_i + Q_C / COP$	W
Tuotettujen yksiköiden määrä	$N = \eta_i \cdot A_f$	Kpl / h
Palkkakustannukset	$S = n_h \cdot S_h / (24 \cdot 30)$	€ / h



Kuva 9. Ulkolämpötila ja kasvihuoneen sähkön (P_E) ja lämmön (Q_H) kulutus tammikuun kahden ensimmäisen viikon aikana.



Kuva 10. Kasvuhuoneen käytön kustannukset ovat osittain vaihtelevia johtuen energian kulutuksen ja hinnan vaihteluista.

4.3.2. Simuloinnin tulokset

Simuloinnin perusteella laskettu symbioosin sähköenergian sisäinen tuotanto ja kulutus, sekä energian myynti sähkömarkkinoille, on esitetty taulukossa 9. Pieni osa sähköön tuotannosta riittää kattamaan symbioosin sähkötarpeen, ja suurin osa sähköstä voidaan myydä sähkömarkkinoille. Sähköenergian hinta määräytyy pohjoismaisen yhteismarkkina-alueen, Nordpoolin spot-markkinahinnan perusteella, johon symbioosissa toimimisella ei ole vaikutusta. Sen sijaan sopivilla omistusjärjestelyillä voidaan päästä tilanteeseen, jossa sähköä voidaan siirtää käyttäjälle oman verkon kautta ilman siirtomaksua, jolloin symbioosi vähentää sähköön hankintakuluja 36–44 % (vähentyneiden siirtomaksujen verran). Tässä tapauksessa symbioosista olisi merkittävästi hyötyä sähköenergian kustannusten vähentämisessä, mistä hyötyy erityisesti kasvuhuone, joka tarvitsee paljon sähköä keinovalaistukseen.

Taulukko 9. Sähkön tuotanto ja kulutus symbioosissa, sekä sähköön myynti sähkömarkkinoille.

Tuotantoyksikkö	Tuotto / hankinta (MWh)	Hinta, symbioosi (k€)	Hinta, eriliset yksi- köt (k€)	Ero / k€	Ero %
<i>Sähkön ostajat:</i>					
Kasvuhuone	-590	-20	-32	12	38
Kalankasvatus	-480	-16	-25	9	36
Hyönteiskasvatus	-100	-3	-5.4	2	44
Biokaasureaktori	-230	-7.5	-12	5	37
Sähkömarkkinat	-23000	-749	-749	0	0
Siirtomaksut			27	-27	
Tuotto: Biohiilitehdas	24400	796	796	0	0

Symbioosin sisäinen lämmöntuotanto ja -kulutus on esitetty Taulukossa 10. Symbioosilla voidaan saavuttaa etuja myös lämpöenergian hankkimisessa, mutta tässä tapauksessa oletettiin, että lämpöä ostetaan vakiohinnalla kaukolämpöjärjestelmästä samalla tavoin symbioosissa kuin sitä ilmankin, joten symbioosi ei siksi vaikuttanut lämmön hankintahintaan. Pyrolyysiprosessi ei tällä mitoituksella tuota koko kunnassa tarvittavaa kaukolämmön tarvetta, joten kaukolämpöön tarvitaan myös muuta tuotantoa. Taulukossa 10 tämä on huomioitu ”muu lämmöntuotanto”.

Taulukko 10. Lämmön tuotanto ja kulutus symbioosissa.

Tuotantoyksikkö	MWh	Hinta, (k€)
Lämmönkulutus		
Kasvuhuone	17	0,82
Kalankasvatus	34	1,6
Hyönteiskasvatus	184	8,8
Biokaasureaktori	174	8,4
Kaukolämpö	68 900	3 300
Lämmön tuotanto		
Biohiilitehdas	34 700	1 700
Muu lämmöntuotanto	34 600	1 600

Symbioosista voi olla merkittävää hyötyä prosessiveden kierrätyksessä. Hyöty riippuu kuitenkin eri tuotantosuuntien kokoluokista. Tässä esimerkissä biokaasulaitos jää melko pieneksi, sillä alueella ei ole merkittäviä määriä esimerkiksi yhdyskuntien erilliskerättyä biojätteitä. Muut tuotantosuunnat (kalankasvatus, pyrolyysilaitos, kasvuhuone ja hyönteiskasvatus) esimerkkitapauksessa tuottavat niin suuria määriä vettä, että kaiken käyttäminen biokaasulaitoksen prosessivetenä laimentaisi biokaasulaitoksen syötteitä kohtuuttomasti ja vaikuttaisi erityisesti mädätysjäännöksen hyödyntämiseen. Tässä simuloinnissa oletettiin, että biokaasulaitos pystyy ottamaan prosessivedeksi noin 5 000 m³ vettä ja joka johdettiin sinne kalankasvatuksesta (37 000 m³). Tämän kierrätyksen ansiosta säästettiin kuitenkin noin 9 100 € jäteveden käsittelyn kustannuksia vuodessa. Kalankasvatus on tässä simulaatiossa ainoa veden kierrätyksen hyötyjä, jatkossa tulisi tarkastella tarkemmin kalankasvatuksen poistoveden hyödyntämistä ravinteiden kierrätyksessä, sekä esimerkiksi puun kuivauksesta syntyvän veden hyödyntämistä kasvuhuoneessa tai kalankasvatuksessa.

Muita symbioosin hyötyjä on mm. hyönteiskasvatukseen suunniteltu mädätysjäännöksen kuivajakeen käyttö ravinnoksi, josta hyötyvät sekä biokaasulaitos (kuivajakeen käsittelyn kustannusten pieneminen) että hyönteiskasvatus (pienentyneenä rehukustannuksena).

Simuloinnin avulla pystyttiin yhdistämään sähkön, lämmön ja materiaalivirtojen kierrätyksen taloudelliset vaikutukset koko symbioosin toimintaan ja eritellä näitä vaikutuksia kuhunkin yksikköön. Nämä vaikutukset on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Kokonaisuuden nettovuosituotto ilman investointikuluja osana symbioosia tai erillisinä yksiköinä.

Tuotantoyksikkö	Symbioosi / k€	Erilliset yksiköt / k€	Ero / k€	Ero %
Biohiilitehdas	1 498	1 495	2	0,2
Kasvuhuone	288	277	12	4,3
Kalankasvatus	390	371	19	5,1
Hyönteiskasvatus	858	856	2	0,2
Biokaasureaktori	322	317	6	1,8
<i>Yhteensä</i>	<i>3 356</i>	<i>3 315</i>	<i>41</i>	<i>1,2</i>

4.4. Tuotantosuuntien ympäristövaikutusten arviointi

Teollisen symbioosin ympäristövaikutuksia arvioitiin elinkaariarvioinnin (Life cycle assessment, LCA) avulla. Tarkasteltu ympäristövaikutusluokka on ilmastonmuutos ja laskennassa huomioitiin kasvihuonekaasuista hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄) ja typpioksiduuli (N₂O). Ketjuissa syntyvät päästöt yhteismitallistettiin ilmastovaikutusluokkaan ekvivalenttikertoimilla ja päästöt kohdistettiin lopputuotteille kuten mm. kaukolämmölle (MJ), sähkölle (MJ), biohiillelle (kg), liikennepolttoaineelle (MJ) sekä kalatuotteelle (kg, perattu kala). Laskentamenetelmät ja ketjukuvaukset ovat tarkemmin esitettynä liitteessä 1. Lopulliseen LCA tarkasteluun valikoitui lopulta pyrolyysilaitos, biokaasulaitos sekä kalojen kiertovesikasvatus. Kasvuhuoneen ja hyönteiskasvatuksen osalta tarkastelua ei voitu suorittaa loppuun puuttuvien lähtötietojen vuoksi. Molemista tuotantosuunnista on kuitenkin Luonnonvarakeskuksessa meneillään olevia hankkeita, joissa ympäristövaikutusten arviointia on tulevaisuudessa mahdollista toteuttaa.

4.4.1. Pyrolyysi

Pyrolyysiprosessin eri vaiheista muodostuneet vuosittaiset kokonaispäästöt koostuvat pääasiassa syötteiden ja panosten valmistuksen ja kuljetusten aikaisista päästöistä (taulukko 12). Pyrolyysikaasun tuottaminen reaktorissa katsottiin hallituksi ja päästöttömäksi ja kaasun poltto kaasumoottorissa katsottiin tuottavan puolestaan biogeenistä CO₂ -päästöä eli sitä ei laskennallisesti oteta huomioon sähkön ja lämmön hiilijalanjäljissä. Taulukossa 12 on myös esitettynä biohiilen sitoma hiilidioksidipotentiaali.

Taulukko 12. Pyrolyysiprosessin aikana muodostuneet kokonaispäästöt (kg CO_{2ekv}/laitos/vuosi).

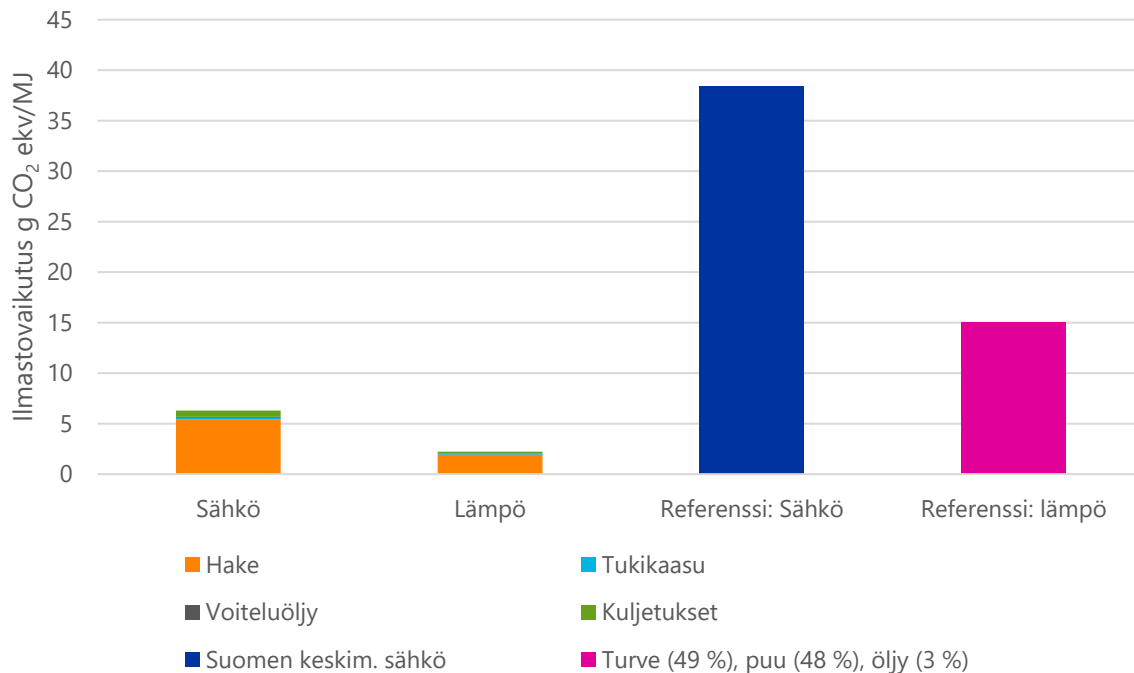
Hake	907 503
Tukikaasu	23 652
Voiteluöljy	12 698
Kuljetukset	102 127
Pyrolyysiprosessi	0
Kaasumoottori (CHP-yksikkö)	26 513 761*
Biohiileen sitoutunut hiilidioksidipäästö	-6 289 329

* biogeeninen päästö

Vuosittaiset kokonaispäästöt allokoidaan massa-allokoinnin eli hiilitaseen mukaisesti pyrolyysikaasulle 0,8 (80 %) ja biohiilelle 0,2 (20 %). Siten tulosten mukaan pyrolyysikaasulle kohdistuu päästöistä toiminnalliselle yksikölle kohdistettuna 11,8 g CO_{2ekv}/MJ ja biohiilelle 0,1 kg CO_{2ekv}/kg biohiiltä. Suurimmat päätöt pyrolyysikaasulle ja biohiilelle muodostuvat hakkeen tuotannosta ja loput tukikaasun valmistuksesta ja käytöstä sekä sen kuljetuksesta pyrolyysilaitokselle.

Hiilensidontaa ei voida katsoa pyrolyysiprosessin ominaisuudeksi, sillä siinä ei tapahdu varsinaista hiilensidontaa vaan hiili jää biohiilen osalta polttamatta hiilidioksidiksi. Jos biohiiltä hyödynnetään maanparannusaineena, sen katsotaan palauttavan ja sitovan hiiltä maaperään esim. pidemmäksi aikaa kuin puuhun sitoutunut hiili, jonka sisältämä hiili vapautuu puun lahotessa ilmakehään. Tässä tapauksessa biohiilen hiilijalanjälkeen (0,1 kg CO_{2ekv}/kg biohiiltä) otetaan mukaan päästöjen lisäksi hiilensidonnan tarkastelu eli kuinka paljon hiilidioksidia on sitoutuneena biohiileen. Siten biohiilen vuositason päästöiksi saadaan 203 tCO_{2ekv} - 6 487 tCO_{2 ekv} = - 6 289 tCO_{2ekv}. ja kohdistettuna toiminnalliselle yksikölle -3,2 tCO_{2 ekv}/t biohiiltä. Tätä hiilijalanjälkilukua voi toimija hyödyntää kompensaaationa toiminnassaan, jos biohiiltä hyödynnetään maanparannusaineena eli biohiiltä käsitellään tavalla, joka estää sen hajoamisen useiden satojen vuosien aikajänteellä ja siten hiilen vapautumisen ilmakehään. Biohiilen sisältämään hiilen loppukäytöllä on suuri merkitys siinä, miten se vaikuttaa hiilensidontaan muissa systeemeissä esim. palauttaako se maanparannusaineena hiiltä maaperään vai toimiiko jätevedenpuhdistuksessa aktiivihiihtä korvaten.

Pyrolyysilaitoksella hakkeesta tuotetun sähkön hiilijalanjälki (6,3 g CO_{2 ekv}/MJ) on huomattavasti pienempi kuin esimerkiksi Suomen keskimääräisen sähkön hiilijalanjälki (38,4 g CO_{2 eq}/MJ, Energiategollisuus 2020) (kuva 11). Myös kaukolämmön hiilijalanjälki (2,2 g CO_{2ekv}/MJ) on huomattavasti pienempi kuin referenssin. Esimerkiksi Suomen keskimääräisen kaukolämmöntuotannon CO₂-päästöt kolmen viimeisen vuoden keskiarvona (jossa yhteistuotanto on jaettu hyödynjakomenetelmällä) on 41 g CO_{2ekv}/MJ (Motiva, Tilastokeskus 2019). Sodankylän alueen kaukolämmön tuotannon polttoaineesta on turvetta 49 %, puuta 48 % ja öljyä 3 % (tiedot vuodelta 2020), joista aiheutuva hiilijalanjälki on noin 60,3 g CO_{2ekv}/MJ.



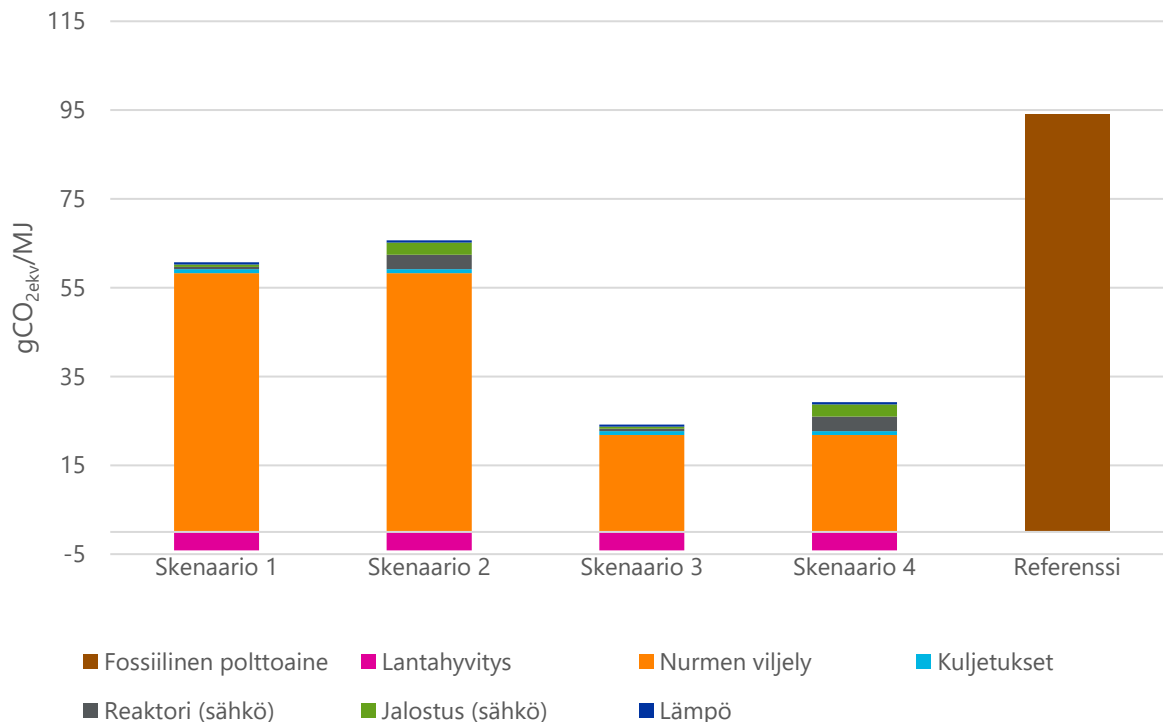
Kuva 11. Pyrolyysilaitoksen sähkön ja lämmön sekä referenssien ilmastovaikutus

Biogeeninen materiaali (tässä hankkeessa metsähake) ajatellaan yleensä hiilineutraaliksi, mitä se ei aina todellisuudessa kuitenkaan ole (esim. metsähake osaltaan pienentää metsän hiilivarastoa, ainakin väliaikaisesti). Jos haketta ei tässä hankkeessa nähtäisi täysin hiilineutraalina materiaalina niin nostaisi se ainakin hieman pyrolyysikaasun ja biohiilen hiilijalanjälkeä, mutta tämä arvioimiseen ei kuitenkaan ole mitään yleisesti hyväksyttyä laskentamenetelmää. Laskentaa on jo Suomessa kuitenkin pohdittu biopohjaisiin polttoaineisiin liittyen, jotka muodostavat hiilivarastoja (Soimakallio ym. 2016, Williams ym. 2016, Soimakallio ym. 2021).

4.4.2. Biokaasulaitos

Biokaasuntuotannon ilmastovaikutusta tarkasteltiin neljän esimerkkiskenaarion avulla, jotka ja-kautuivat sen mukaan, viljelläänkö syötteenä käytettävää nurmea turvemaalla (skenaario 1 ja 2) vai kivennäismaalla (skenaario 3 ja 4). Tarkastelua tehtiin myös sen mukaan, hyödyntääkö reaktori ja kaasunjalostus sähköä ja lämpöä pyrolyysilaitokselta (osana symbioosia, skenaariot 1 ja 3) vai onko laitos erillinen symbioosista, jolloin käytössä on keskimääräistä suomalaista sähköä ja paikallista hakepohjaista lämpöä (skenaariot 2 ja 4).

Tulosten mukaan biokaasusta jalostetun liikennepolttoaineen hiilijalanjälki vaihtelee 20–62 gCO₂ekv/MJ riippuen syötevaihtoehdoista (kuva 12). Kuvassa 12 lantabonus on huomioitu erillisenä, jotta eri vaiheiden ilmastovaikutus saadaan näkyviin.



Kuva 12. Biokaasulaitoksen tuottaman liikennepolttoaineen ja fossiilisen referenssin ilmasto-vaikutus (g CO₂ ekv per MJ).

Hiilijalanjälki on kaikissa eri syötevaihtoehdoissa pienempi kuin REDII mukainen fossiilinen vertailuarvo eli referenssi liikennepolttoaineelle (94 gCO₂ekv/MJ). Tästä huolimatta biokaasulaitos ei pääse REDII direktiivin vaatimiin päästövähennysvaatimuksiin (päästövähennysvaatimus 65 %), jos energialähteenä toimiva nurmi tuotetaan turvemaalla (Taulukko 13). Biokaasulaitoksessa käsiteltävät nurmimassat tulisivat olla tuotettu joko kivennäismaalta (skenaariot 3 ja 4) tai niiden tulisi olla sellaisia nurmia, jotka luokitellaan energiaviraston mukaan jätteeksi (esim. viljelykierrossa olevat nurmet).

Taulukko 13. Biokaasun päästöt nurmen eri tuotantotapojen mukaisesti ja RED II mukaiset päästövähennemät.

Case	Skenaario	gCO ₂ -ekv./MJ	CO ₂ vähenemä (65 % minimi)
1	Nurmi turvemaalta, laitos osana symbioosia	57	39 %
2	Nurmi turvemaalta, laitos erillinen yksikkö	62	34 %
3	Nurmi kivennäismaalta, laitos osana symbioosia	20	79 %
4	Nurmi kivennäismaalta, laitos erillinen yksikkö	25	73 %

Merkittävin päästölähde biokaasun osalta on nurmen viljelyn päästöt, erityisesti, jos nurmea viljellään turvemaalla. Tämän jälkeen tulevat reaktorin sähkön kulutus sekä jalostuksen sähkön kulutus ja niiden merkitys kasvaa, jos uusiutuvan energian sijaan hyödynnetäänkin keskimääräistä suomalaista sähköä. Syötteiden kuljetusten päästöt olivat pienimmät. Jätteiksi luokiteltavien syötteiden (esim. lanta, kalanperkeet, teurasjäte) valmistuksen päästöt olivat nolla. Biokaasuprosessi myös lyhentää lietteen (kalalaitokselta) ja lannan varastointiaikaa ja siten niiden aikaisia päästöjä. Lannan parempi käsittely on huomioitu REDII-direktiivissä lantahyvitysten laskennan kautta (ks. tarkemmin laskentamenetelmät liitteessä 1) ja tämä on huomioitu näissä neljässä lantaa hyödyntävissä eri laitosesimerkeissä (taulukko 13). Kalalaitoksella muodostuvan lietteen osalta oli epäselvää, kuuluvatko ne direktiivin lantahyvitykseen, joten hyvitystä ei kalalietteen osalta huomioitu.

Mädätysjäännökselle ei kohdistu biokaasuprosessin ajalta päästöjä, vaan päästöt kohdistetaan RED-direktiivin mukaisesti biokaasulle. Siten mädätysjäännöksen valmistuksen hiilijalanjälki biokaasuprosessin osalta on nolla.

Mädätysjäännökselle ei laskettu metaanipäästöjä varastoinnista, sillä metaanipäästöjen oletettiin olevan hyvin alhaiset biokaasuprosessin ja jälkikaasuuntumisaltaan jälkeen. Mädätteen varastoinnin aikaisista päästöistä on myös vielä vähän tietoa ja niihin vaikuttaa oleellisesti mm. prosessin viipymä (tätä tutkitaan tällä hetkellä Luken vetämässä KEBIO-hankkeessa).

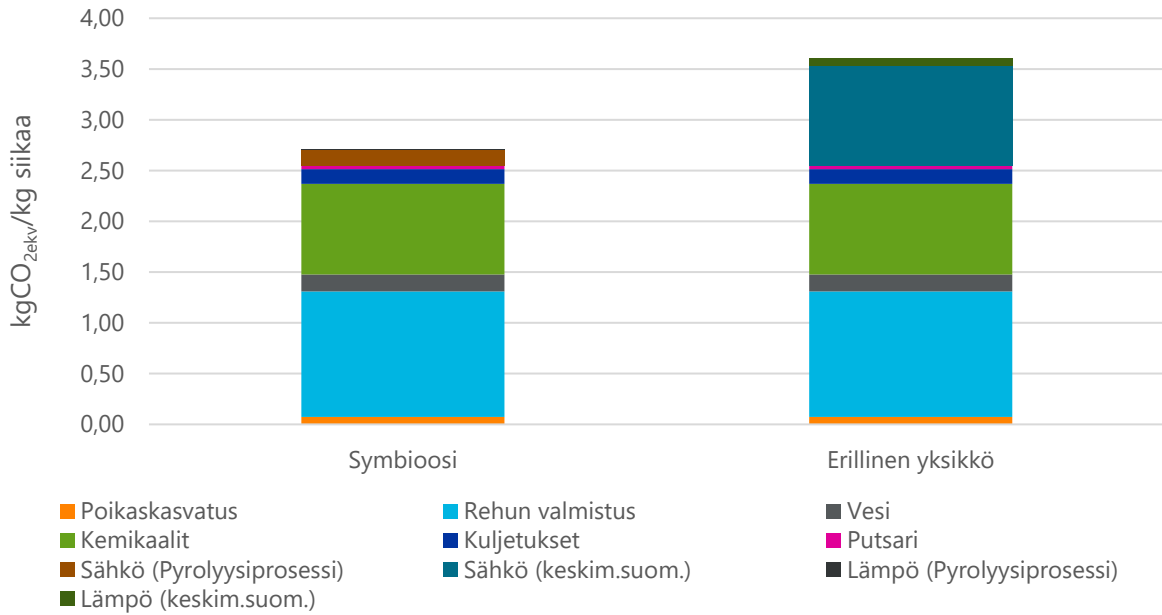
Mädätejäännöksen mahdollista jatkokäsittelyä (esim. separointi ym.) ja peltokäyttöä ei huomioitu. Mädätejäännöksen kautta saadaan kuitenkin ravinteet kierrätettynä hyötykäyttöön esim. pellolla lannoitteena. Peltokäytössä mädätejäännöksen osalta voi kuitenkin muodostua hieman suuremmat päästöt kuin väkilannoitteella, johtuen mädätejäännöksen pienemmistä ravinnepiitoisuuksista ja siten suuremmasta levitys- ja kuljetustarpeesta. Toisaalta tarkasteltaessa päästöjä elinkaarinäkökulmasta on mädätejäännöksen hiilijalanjälki (valmistuksen että käytön osalta) pienempi kuin väkilannoitteen, koska mädätteen valmistuksen aikaiset päästöt nollapäästöisinä pienemmät (Timonen et al. 2019). Mädätejäännöksen mahdollinen jatkokäsittely esim. ravinteiden konsentroimiseksi ja siihen valittavat toimenpiteet (esim. jatkojalostuksen korkea energiakulutus) voivat kuitenkin nostaa päästöjä. Myös mädätejäännöksen ja väkilannoitteen levityksestä aiheutuvia eroja N₂O päästöistä olisi hyvä tutkia tarkemmin, sillä tällä hetkellä niiden arvioimiseksi käytetään keskimääräisiä IPCC (2006, 2019) N₂O -päästökertoimia orgaaniselle lannoitteelle, jotka perustuvat lannan levitykseen.

4.4.3. Kalankasvatustilasto

Tulosten mukaan kiertovesilaitoksella kasvatetun siian hiilijalanjälki on 2,7 kgCO_{2ekv}/kg (perattu kala), kun hyödynnetään pyrolyysilaitoksen tuottamaa sähköä ja lämpöä. Hiilijalanjälki kasvaa merkittävästi (3,6 kg CO_{2ekv}/kg perattu kala), jos energianlähteenä on keskimääräinen suomalainen sähkö ja kaukolämpö (Kuva 13). Suurin siian kiertovesikasvatuksen päästölähde on kalarehunvalmistus (ei sisällä rehun raaka-aineiden kuljetusta rehun valmistajalle) ja toiseksi suurimpana lähteenä kemikaalien valmistus. Sähkön kulutuksen päästöt tulevat toisena, jos energialähteenä toimii suomalainen keskimääräinen sähkö eikä pyrolyysilaitoksen tuottama hakeperäinen uusiutuva sähkö.

Synergiaetua tuo myös biokaasulaitos; kalalaitoksen lietettä kuljetetaan viikon väliajoin biokaasulaitokselle, jolloin lietteen varastointiaika kalalaitoksella on huomattavasti lyhyempi ja päästöt biokaasulaitoksella paremmin hallittavissa. Biokaasuprosessin myötä lyhenevä lietteen varastointiaika vähentää päästöjä verrattuna tilanteeseen, jossa lietettä varastoidaan kalalaitok-

sella pidempiä aikoja. Kalalaitoksen ympäristövaikutuksia vähentää myös se, kun lietettä ei tarvitse biokaasulaitoksen takia jätteenä varsinaisesti jatkokäsitellä tai sijoittaa esim. maaperään. Kalojen kiertovesikasvatuksen aiheuttamasta ilmastovaikutuksesta on tehty vasta vähän laskelmia, joskin uusia tutkimuksia aihepiiristä on parhaillaan käynnissä. Aikaisemman tutkimuksen mukaan (Silvenius ym. 2012.) kirjolohen hiilijalanjälki kiertokasvatustiloksessa on jopa 9 kgCO_{2ekv}/kg (filee) kun merellä kasvatetun kirjolohen hiilijalanjälki on 4,3 kgCO_{2ekv}/kg filettä kohden) (tässä tutkimuksessa hiilijalanjälki per filee oli noin 3,1 kgCO_{2ekv}/kg symbioosissa ja 4,1 kgCO_{2ekv}/kg erillisenä yksikkönä).



Kuva 13. Kalojen kiertovesikasvatustiloksen aiheuttama ilmastovaikutus (g CO_{2ekv}/kg perattua siikaa).

4.5. Kaupallinen selvitys symbioosissa tuotetuille tuotteille

Teollisesta symbioosista syntyvien tuotteiden markkinoita selvitettiin kaupallisen selvityksen avulla. Osana hankkeen markkinaselvitykseen liittyvää osiota tehtiin yhteistyötä Vaasan yliopiston markkinoinnin opiskelijoiden kanssa. Konseptoinnin ja kaupallistamisen projekti -kurssin opiskelijat ideoivat missä muodossa hankkeen lopputuotteet voitaisiin myydä ja keitä potentiaaliset asiakkaat olisivat sekä loivat markkinointikonsepteja ideoille. Tuotteiksi opiskelijatöihin valittiin kiertovesikasvatettu kala, kasvihuonekasvikset, toukat ja biohiili. Seuraavissa kappaleissa on esitetty opiskelijatöiden tärkeimmät huomiot.

4.5.1. Biohiili

Biohiili kiinnostaa tällä hetkellä paljon. Siihen liittyy paljon potentiaalia, mutta sen markkina on vielä kehittymätön ja epävarma. Tietoa biohiilen käyttökohteista kerättiin kirjallisuudesta sekä asiantuntijahaastatteluilta. Asiantuntijahaastatteluiden perusteella biohiilen markkinoiden haasteita ovat erityisesti biohiilen tunnettuus, lopputuotteen hinta, raaka-ainekustannukset, tuotannon ja kysynnän kohtaaminen sekä markkinoiden epätasaiset standardit. Tutkimustietoa on vielä hyvin vähän. Asiakkaiden näkökulmasta keskeiset haasteet ovat tutkimustiedon puute sovelluskohteissa, tunnettuuden puute sekä biohiilen hinta.

Esimerkkeinä käyttökohteista nostettiin kosmetiikkakäyttö sekä lemmikkituotteet, mutta näistä käyttökohteista sekä biohiilen laadusta on vielä heikosti tietoa. Biohiilen käyttöä vedenpuhdistuksessa ja viherrakentamisessa on pilotoitu erilaisissa kohteissa ainakin Suomessa ja Ruotsissa. Erilaiset tuet ovat kannustaneet kokeiluihin. Myös opiskelijaryhmän haastattelemat asiantuntijat olivat osallistuneet pilottikokeiluihin, mutta tulokset olivat jääneet epäselviksi, eikä seurantaan ollut panostettu. Asiantuntijahaastatteluisissa korostui biohiilen laadun merkitys eri käyttökohteiden kannalta. Koska tarkempia koeajoja valitulla pyrolyysiteknologialla ja paikallisilla raaka-aineilla ei voitu hankkeessa toteuttaa, ei biohiilen tarkkaa laatua ja toiminnallisuutta tiedetty. Siksi esimerkiksi biohiilen käyttö hulevesien puhdistamiseen rajautui pois tarkastelusta (suodatustehoa vaikea arvioida).

Kaivosteollisuus on myös potentiaalinen biohiilen hyödyntäjänä, ja niiden tarvitsemat biohiilen määrät ovat valtavia. Kaivosten ennallistamisessa olisi potentiaalia sekä käyttöominaisuuksien takia että imagosyistä, sillä kaivokset joutuvat jo nyt rahastoimaan ennallistamiseen. Myös biohiilen teollinen käyttö metalliteollisuudessa korvaamassa tavallista hiiltä tarkoittaisi käynnistessään valtavaa kysyntää. Epävarmuutta on kuitenkin paljon ja sijoituksissa on riskejä.

Kaupungit ovat potentiaalisia biohiilen hyödyntäjiä ilmastotavoitteiden vuoksi. Ongelmana on kuitenkin päätöksenteon hitaus. Eri yksiköt ja osastot, kuten viherrakentaminen ja vesihuolto toimivat erillään ja tiedonkulussa voi olla haasteita. Asiaa hankaloittaa myös se, että julkisissa hankinnoissa hinta on pääsääntöisesti merkittävin kriteeri. Muitakin hankintakriteerejä voidaan toki asettaa, mutta eri biohiilivaihtoehtojen pisteyttäminen koettiin tässä vaiheessa mahdottomaksi.

Opiskelijaryhmän lopullinen konsepti rakennettiin kahtalaisesti niin, että Sodankylä olisi biohiilen osaamiskeskus, josta tutkimustietoa saataisiin maailmalle. Sodankylä olisi aikainen ajatusjohtaja ja yhteistyöverkoston vetäjä, joka levittäisi tietoa biohiilestä. Palvelukonsepti, tieto ja tunnettuus generoisi liiketoimintaa erilaisissa viherrakentamisen käyttökohteissa. Sodankylän biohiilikonsepti voisi myös konkreettisesti tarjota ratkaisuja kunnille ja kaupungeille ilmastotavoitteisiin pääsemiseksi. Opiskelijaryhmä suunnitteli Pohjolan puhdasta luontoa hyödyntävän brändin, joka käytännön tasolla myös lisäisi tietoisuutta kohteissa. Tuotteiden myynnin lisäksi olisi mahdollista osallistua hiilikompensaatiokauppaan puro.earth-markkinapaikalla myymällä CORC-todistuksia (CO₂ Removal Certificates) ja saada tätä kautta lisätuloja. Sodankylän biohiili-todistukset voisivat olla haluttuja, koska kotimaisista kompensaatiokohteista on puutetta, ja kauppapaikka vaikuttaa luotettavalta, auditointeja vaativalta toimijalta. Kauppapaikka ottaa provision ja liittymiselle voisi tulla hintaa, mutta olemassa oleva järjestelmä helpottaisi kompensaatioon lähtemistä.

Luvun teksti perustuu opiskelijoiden Sini-Pauliina Pihl, Kia Helin, Nelli Alho ja Sauli Ahola tekemään ryhmätyöhön.

4.5.2. Kasvi-/kasvuhuonetuotteet

Kaupallisessa osuudessa selvitettiin Pohjois-Suomen ja Sodankylän lähialueiden toimijoiden kiinnostusta hyödyntää lähellä tuotettuja kasviksia. Markkinaselvityksen perusteella voidaan sanoa, että ravintolat ja lähikaupat ovat kiinnostuneita lähituotetuista ja tuoreista salaatti- ja yrttivalikoimista. Ravintolat käyttävät kasviksia ruuanvalmistuksessa monipuolisesti ja kaupat ottaisivat ne valikoimiinsa. Vastaajat olivat kiinnostuneita myös tavallisesta, pyöreästä tomaatista ja makeasta kirsikkatomaatista, kasvatetuista sienistä syksyn sienisesongin mentyä sekä mansikoista. Myös monipuolinen yrttivalikoima kiinnosti. Tuotteen on oltava laadultaan kilpailukykyinen, jolloin sen hinta voi olla jonkin verran korkeampikin verrattuna kilpaileviin tuotteisiin. Vaasan yliopiston markkinoinnin kurssin opiskelijat työstivät kasviksille ja kasvit tuotteille

kaksi erilaista markkinointikonseptia. Toinen ryhmä keskittyi yritysmarkkinointiin, toinen kuluttajamarkkinointiin. Molemmissa ryhmissä käytettiin sosiaalisessa mediassa julkaistuja kyselyitä, joihin saatiin satoja vastauksia koko Suomen alueelta.

B2B (Business-to-business) -tuotemarkkinointiryhmä kehitti uudenlaisen konseptin ja palveluratkaisun kuluttaja-asiakkaiden näkökulmasta. Ryhmä keskittyi erityisesti siihen, miten viljeltyjä tuotteita myytäisiin. Konseptissaan he yhdistivät rohkeasti innovatiivisen tilausjärjestelmäpalvelun osaksi yritysten ja asiakkaiden arvomaailmaa. Konsepti pitää sisällään koko tuotantoprosessin tuotteiden viljelystä niiden toimittamiseen suoraan ravintolaan ja hävikin hoitoon asti (kuva 11). Asiakkaalle lisäarvo muodostettaisiin räätälöidystä tuotekorista, ei vain yksittäisestä tuotteesta. Tuotekori sisältää toimivan sovellusalustan ja palveluelementtejä, jotka asiakkaat muuten joutuisivat tilaamaan muualta. Sovellusalusta mahdollistaa asiakaslähtöiset, räätälöidyt ratkaisut ja palvelun jatkuvan kehittämisen. Rohkeasti erilaistetun palvelun ja tarjonnan avulla kasvituottaja voisi saavuttaa vahvan kilpailuedun markkinoilla. Yrityksen haasteena on kyky toimia perinteisten organisaatorakenteiden rajojen yli ja vahva asiakaslähtöisyys, jolla lisäarvo tuotetaan. Perinteisen tuotannon tehokkuuden ja optimoinnin ohella myös toimintavarmuus, hinta ja laatu ovat tärkeitä tekijöitä toiminnassa. Tietojärjestelmäpohjainen tilauspalvelu vaatii myös vahvaa IT-osaamista. Ryhmä kehitti kasvituotantoon uudenlaisen palveluratkaisun, joka onnistuessaan toisi kilpailuetua käytön helppouden, palvelun laadun, tuotteiden tasalaatuisuuden ja toimitusnopeuden osalta, unohtamatta tyytyväistä asiakasta.

B2C (Business-to-customer) -tuotemarkkinointiryhmän konseptin yhtenä tavoitteena oli valita kasvilaji tai -lajit, joita voitaisiin viljellä Sodankylässä ja myydä Pohjois-Suomessa siten, että se olisi myös taloudellisesti kannattavaa. Jakelukanavaksi valikoitui kaupat ja asiakkaiksi kuluttaja-asiakkaat. Kauppaketjutoimijan näkökulmasta huomioitiin erityisesti tuotteiden ulkonäkö, kuljetuskestävyys sekä ympärivuotinen saatavuus. Kuluttajien näkökulmassa korostettiin tuotteiden makua ja terveysvaikutuksia. Kasvituotteiksi valikoitui minitomaatit, -kurkut ja -paprikat sekä tavallinen salaatti, rucolasalaatti ja minttu. Kasvisten valinnassa huomioitiin muun muassa sadon suuruus ja viljelyn helppous. Alihankintatuotteiksi valikoitui kotimainen babypinaatti ja kuusenkerkkä. Kuluttajahaastatteluiden ja testauksen avulla ryhmä muodosti kolme konseptiehdotusta Sodankylässä viljellyille ja valmistetuille tuotteille. Tuloksena oli tuoteperhe, joka sisälsi minivihannekset, vihersmoothiepohjan ja salaattisekoituspussein. Tuoteperheen tuotteet on suunnattu kuluttajille, jotka käyttävät vihanneksia säännöllisesti ja arvostavat kotimaisuutta, tuoreutta, puhtautta ja makua. Mahdollisuuksien mukaan tuotteita olisi saatavissa myös muualla Suomessa. Tuotepakkauksiin ryhmä ehdottaa QR-koodia, joka vie yrityksen kotisivuille, ja josta kuluttaja saa lisätietoa yrityksestä, tuotannosta ja tuotteista sekä reseptejä ja vinkkejä tuotteiden valmistamiseen. Tuotteiden hinnoittelua tulisi vielä miettiä ja myös alihankintakustannuksiin sekä pakkaus- ja kuljetusvaihtoehtoihin tulisi löytää olosuhteisiin sopivat ratkaisut.

Luvun teksti perustuu opiskelijoiden tekemään ryhmätööhön. Elli Heikkilä, Iina Latvasalo, Jesse Pakarinen ja Suvanna Leivo (B2B ryhmä) sekä Emilia Raussi, Minja Lehtinen, Heini Jauhola ja Rony Jääsvuo (B2C ryhmä.)

4.5.3. Kalat

Kalanviljelyn kaupallisessa osuudessa selvitettiin Pohjois-Suomen ja Sodankylän lähialueiden toimijoiden kiinnostusta hyödyntää viljeltyä kalaa. Puhelinhaastatteluina tehty markkinaselvitys osoitti, että ravintolat ja lähikaupat ovat kiinnostuneita siasta ja myös uudesta Luonnonvarakeskuksen kasvattamasta nelma-kalasta. Ravintolat käyttävät kalaa monipuolisesti saatavuuden mukaan ja myös kaupat ottavat kalaa valikoimiinsa. Tuoreen kalan on oltava laadultaan

kilpailukykyinen ja hyvänmakuinen. Tällöin sen hinta voi olla jonkin verran korkeampikin verrattuna kilpaileviin tuotteisiin. Kirjoloihen toivottiin olevan viljelty suljetussa ympäristössä, jolloin sitä pidettiin turvallisena ja maukkaampana. Kirjoloihen sijasta suosittiin merilohta, silloin kun sitä oli saatavilla. Nelmasta "valkolihaisesta lohesta" oltiin myös kiinnostuneita. Nelmaa on kuitenkin vain koekasvatuksessa Luonnonvarakeskuksen Laukaan kalanviljelylaitoksella, eikä massatuotanto ole vielä alkanut. Luonnonvarakeskuksen (2021) mukaan Suomessa on kasvatettu kiertovesilaitoksilla myös muita arvokkaampia kalalajeja kuten sampea, nieriää, siikaa, kuhaa ja annoskokoista kirjolohta. Ruokakalatuotanto on Suomessa ollut pitkään lähes yksinomaan kirjolohta (lähes 95 prosenttia tuotannosta). Siika on toiseksi merkittävin viljelylaji. Elin-tarvikkeeksi viljellään lisäksi pieniä määriä nieriää, taimenta ja sampea. Myös kuhan, ahvenen sekä nelman viljelymenetelmiä tutkitaan.

Vaasan yliopiston markkinoinnin opiskelijoiden ryhmä havainnoi ja toteutti useita kyselyitä kulluttajille ja asiantuntijoille. He saivat vastauksia runsaasti koko Suomen alueelta. Vastausten perusteella ryhmä ideoi kolme erilaista konseptia: Sodankylän siika trendiherkkuna, nelma & huippukokkiyhteistyö sekä nelma & ravintolayhteistyö. Konseptin testausvaiheessa todettiin, että ravintolat ovat kiinnostuneita nelmasta, kun hinta ja maku kohtaavat ravintoloiden ja asiakaskunnan tarpeet. Ravintoloissa nelman menekki voisi olla noin 20–25 kg/viikossa ja kaupoissa arviolta noin 10 kg/kauppa/viikko. Testausvaiheessa ryhmä totesi, että fine dining -ravintoloilla on mielenkiintoa uutta suomalaista kalalajia, nelmaa kohtaan. Ravintoloille toimitettaessa toimituksen tulisi olla joustavaa ja toimituksia olisi oltava vähintään kaksi kertaa viikossa. Mikäli konsepti toteutettaisiin pelkissä ravintoloissa, mukaan tarvittaisiin 33–41 ravintolaa, jos menekki olisi 20–25 kg/viikko/ravintola. Ravintoloiden menekki ei luultavasti ole tarpeeksi korkea kattamaan koko tuotantoa, minkä vuoksi ryhmä suosittaa, että 60 % tuotannosta myytäisiin ravintoloihin ja 40 % valittuihin kauppoihin palvelutiskillä myytäväksi.

Viimeistely konsepti "Nelma – koe pohjoisen raikkaus" perustuu kaksivaiheiseen suunnitelmaan. Tuotteena on maukas nelma, joka olisi uusi kalalaji Suomen markkinoilla. Suunnitelmana kaksivaiheisessa konseptissa oli pyrkimys tasapainottaa nelman tuotantoon ja kysyntään liittyvää epävarmuutta sekä jakelutiheyteen liittyviä haasteita, jotka ilmenivät testausvaiheessa. Konsepti keskittyy porrastetusti fine dining -ravintoloihin sekä valittuihin myymälöihin. Loppuasiakas profiloitiin ostovoimaiseksi kulinaristiksi, jonka intohimona on ruokatrendit, elämysruokailu ja uusien makujen kokeminen. Hinnan ollessa korkea ja saatavuuden rajattu, kapea niche-segmentti on todennäköisesti se kannattavin vaihtoehto. Nelma tuodaan markkinoille yhteistyössä fine dining -ravintoloiden ja tunnettujen huippukokkien kanssa, jonka jälkeen aloitetaan partneriyhteistyö. Hyvällä kasvattajapartnerilla on valmiina kumppaniverkostot, logistiikka ja jakelukanavat. Kasvattajapartneri mahdollistaisi tuotannon ja markkinoinnin kustannusten jakamisen, toimitusvarmuuden sekä riittävän tiheän toimitusvälin asiakkaille.

Toimitusvarmuus ja tiheä toimitusväli todettiin tärkeiksi tekijöiksi konseptin testausvaiheessa, joten partnerin saaminen on tärkeää konseptin toimivuuden kannalta. Tuoreuteen ja kotimaisuuteen vaikuttavat kiertovesijärjestelmän sijainti Sodankylässä ja suhteellisen lyhyet toimitusmatkat ympäri Suomen, jolloin kala on syötäessä aina tuoretta. Lisäksi fileoinnin tekeminen vasta vähittäiskaupoissa pitää kalan pidempään tuoreena. Kala toimitetaan ravintoloihin fileenä, sillä ravintoloiden kysyntää voidaan ennakoida esimerkiksi konseptin pilottivaiheen perusteella ja ravintola-alan asiantuntijan mukaan ravintoloissa filee on parempi vaihtoehto sen nopean valmistuksen takia. Lisäksi kiertovesijärjestelmä mahdollistaa aikaisempaa ympäristöystävällisemmän kasvatustavan, joka ei aiheuta vesistöjen rehevöitymistä. Tällöin konseptia voidaan markkinoida kotimaisena ja ympäristöystävällisenä elämyksenä.

Luvun teksti perustuu opiskelijoiden Viivi Lehtinen, Sakari Kosunen ja Roosa Rasi tekemään ryhmätyöhön.

4.5.4. Toukkakasvatuksen tuotteet

Toukkaproteiinin käyttö ravintona rajattiin lainsäädännön asettamien rajoitusten takia pois toukkakasvatuksen potentiaalista lopputuotteista, joten opiskelijaryhmä työsti ideoita toukista saatavan rasvan ja frassin käyttöön. Ryhmä otti käsittelyyn rasvasta saatavan lauriinihapon ja selvitti suomalaisten kosmetiikka- ja maalialan yritysten kiinnostusta sen käyttöön, jos sitä olisi saatavilla. Toinen tutkimussuunta oli frassin käyttö lannoitteena ja sen osalta ryhmä selvitti yksityisten kuluttajien kiinnostusta toukkafrassista saatavan lannoitteen käyttöön.

Kosmetiikka-alan yrityksiltä saatujen vastausten perusteella toukista lähtöisin olevan lauriinihapon ongelmaksi muodostuu sen eläinperäisyys. Useimmille yrityksille käytettyjen raaka-aineiden vegaanisuus on tärkeää. Maalialan yrityksistä ei valitettavasti saatu vastauksia, mutta voi olla, että pienet tuotantomäärät muodostuisivat ongelmaksi, vaikka muutoin kiinnostusta löytäisikin. Sodankylän esimerkin osalta projektiryhmä ei täysin poissulje mahdollisuutta löytää esimerkiksi joku pieni paikallinen saippuanvalmistaja tai muita erikoistuotteita valmistava taho, joka voisi toukkatuotannossa syntynyttä rasvaa hyödyntää. Todennäköisin käyttökohteeksi rasvalle olisi kuitenkin biokaasun tai biodieselin valmistus. Rasvan käyttö samaan kiertotalouskokonaisuuteen kuuluvassa biokaasuyksikössä sopisi kokonaisuuteen hyvin.

Kasvilannoitteita käyttävältä kohderyhmältä saamiensa tietojen pohjalta opiskelijaryhmä ideoi "Viherkylän frassi" -kasviravinnekonseptin, jota kehitettiin edelleen projektiryhmän ja asiakas-testauksen perusteella. Viherkylän frassi olisi toukkaperäistä lannoitetta granulaattimuodossa ja sitä myytäisiin jälleenmyyjien kautta yhden ja kymmenen litran pakkauksissa. Tuotteen erottaisi kilpailijoiden tuotteista mm. hajuttomuus. Pääasialliset kohderyhmät olisivat trendikkäät viherisustajat ja ympäristötietoiset viherpeukalot, jotka kasvattavat sekä syötäviä kasveja omaan käyttöön että kukkia silmäniloksi. Case Sodankylän toukkakasvatuksen osalta saattaisikin olla taloudellisesti kannattavinta, että frassia ei myytäisi eteenpäin sellaisenaan, vaan loppuasiakkaille valmiina tuotteena.

Luvun teksti perustuu opiskelijoiden Aino Hämäläinen, Juuli Jaskari, Eero Löytönen ja Katri Snellman tekemään ryhmätyöhön.

5. Yhteenveto

Hankkeen tavoitteena oli tarkastella seuraavia asioita simulointimallin avulla:

1. Kiertotalouskokonaisuuden kannattavuus sekä osien että kokonaisuuden näkökulmasta.
2. Energian (sekä sähkö- että lämpö) liikkuminen kiertotalouskokonaisuudessa.
3. Kokonaisuuden eri osa-alueiden ”jätteiden” sekä paikallisten sivuvirtojen liikkuminen kokonaisuudessa.

Malliin otettiin mukaan kannattavuuden näkökulmasta suurimpia kustannuksia (pois lukien investoinnit) sekä varovaisuusperiaatetta noudattaen valitut tuotot. Varovaisuusperiaatteella tarkoitetaan tässä esimerkiksi biohiilen kohdalta sitä, että vaikka hyvälaatuisen biohiilen hinta voi oikeassa yhteydessä nousta hyvinkin korkeaksi, on se mallissa kuitenkin arvioitu huonompilaa-tuisen bulkkituotteen perusteella. Tällä menettelyllä pyrittiin saavuttamaan realistisia tuloksia. Simulointi osoittaa, että kaikki selvityksessä mukana olleet tuotantosuunnat voisivat olla taloudellisesti mahdollisia Sodankylässä, mutta on huomioitava, että simuloinnin tulokset ovat karkealla tasolla eivätkä vastaa varsinaisia investointilaskelmia.

Simuloinnin perusteella voidaan todeta, että kaikki tuotantosuunnat saavat kiertotalouskokonaisuuteen kuulumisesta pientä taloudellista etua. Etu syntyy lähinnä siirtomaksuttoman sähkön käytöstä, joka Energiaviraston mukaan voi olla mahdollista tällaisessa kokonaisuudessa tietyin edellytyksin. Myös mahdollisen hukkalämmön hyödyntäminen voisi tuoda etua joillekin lämpöä paljon tarvitseville tuotantosuunnille, mutta tässä kokonaisuudessa esimerkiksi kasvu-huoneen lämmöntarve täyttyy lähes ympäri vuoden valaistuksen avulla ja lisäksi pyrolyysiprosessin tuottama matala-asteinen hukkalämpö kuluu käytännössä hakkeen kuivatukseen.

Kokonaisuudessa kiertävän jäte- ja sivuvirtojen tuoma taloudellinen etu sen sijaan jää alhaiseksi. Jäte- ja sivuvirrat kiertävät yksiköstä toiseen, mutta määrät ovat pieniä, jolloin suurta taloudellista hyötyä ei synny. Hyödyt näkyvät kuitenkin ympäristövaikutusten arvioinnissa, jolle on vaikea asettaa taloudellista arvoa.

Kiertotaloushankkeiden osalla yhdeksi merkittäväksi haasteeksi on havaittu toimintojen organisointi kokonaisuutena. Kiertotalouskokonaisuudet rakentuvat tyypillisesti erilaisten prosessien ympärille, joita sitoo toisiinsa toisesta prosessista syntyvä ja toiseen siirtyvä materiaali- tai energiavirta. Toiminnot ovat kiinni toisissaan pysyvästi tai merkittävällä tavalla vaikeasti korvattavassa olevilla yhteyksillä.

Kiertotalouskokonaisuuteen liittyvät tuotantoprosessit voivat olla myös hyvin paljon toisistaan poikkeavia. Yhden organisaation alle voi olla hankalaa kasata vahvaa osaamista kaikista erilaisista tuotantoprosesseista. Esimerkiksi Sodankylä -esimerkissä tämän hankkeen yhteydessä on tarkasteltu seuraavia erilaisia tuotantoprosesseja:

1. Kaukolämmön tuottaminen ja kaukolämpöverkkotoiminta.
2. Biohiilitehdas ja siihen liittyen biohiilen käsittely ja markkinointi.
3. Sähkön tuotanto ja siihen liittyvät markkinaoperaatiot (etenkin jos toimitaan ns. vihreän sähkön yhteydessä pörssimarkkinoilla).
4. Kasvuhuonetuotanto ja tuotteiden valmistus kauppakuntoon.
5. Elintarvikkeiden mahdollinen jatkojalostus puolivalmisteiksi tai valmiiksi komponenteiksi ruuan valmistukseen tai tarjoiluun.
6. Sisätiloissa tapahtuva kalanviljely sekä käsittely kauppakuntoon.

7. Kalatuotteiden jatkojalostus puolivalmisteiksi tai lopputuotteiksi ravintoloille tai valmiiksi eineksiksi vähittäismarkkinoille.
8. Hyönteisten kasvattaminen sekä hyönteisten alkukäsittely kaupallisiksi tuotejakeiksi (öljy, proteiini ja/tai frassi).
9. Hyönteispohjaisten jakeiden jatkojalostus ja myynti, esim. pienimuotoinen kosmetiikka tai lannoitteiden valmistus.
10. Biokaasun valmistaminen, kaasun käsittely ja myynti sekä mädätyksestä syntyvien jakeiden käsittely (mädäte, typpipitoiset nesteet) ja myynti/jatkokäsittely.
11. Mahdollinen pienten tuotantojakeiden yhteinen verkkokauppa / myynti.

Yllä oleva lista erilaisista toiminnoista havainnollistaa hyvin millainen osaamistarve kiertotalouskokonaisuuksien ympärille voi muodostua. Toisekseen esimerkissä käsiteltävät tuotantovirrat joidenkin jakeiden osalta voivat olla melko pieniä. Tällaisella yhdistelmällä etenkin jatkojalostus voisi olla pienimuotoista, jolloin voi olla järkevintä hakea markkinat paikallisesti tai netin välityksellä erikoistuotteina.

Kiertotalouden ekosysteemeissä eri toiminnot muodostavat mukana olevien toimintojen arvoketjun yhdistelmän, jota voidaan kokonaisuudessaan kutsua ekosysteemin kokonaisarvoketjuksi. Tässä kokonaisuudessa eri osien merkitykset kokonaisuudelle voivat vaihdella suurestikin. Yksi toiminto on aivan keskeinen kiertotalouden ekosysteemille, kun taas toinen vain täydentää kokonaisuutta esimerkiksi yksittäisen sivuvirran hyödyntäjänä tai jatkojalostajana. Toiminnallisen ekosysteemin muodostamien arvoketjujen kannattavuudet voivat myös vaihdella suuresti. Kannattavuus voi olla suoraan toiminnasta johtuvaa, mutta myös kannattavuuden riippuvuus osallistumisesta kiertotalousekosysteemiin voi vaihdella.

Kokonaisuuden tarkastelussa on hyvä pitää mukana nämä kaksi elementtiä:

1. Yksittäisten osien toiminnallinen merkitys kokonaisuudessa: onko toiminta kriittinen, täydentävä vai mukana oleva.
2. Yksittäisten arvoketjujen osa koko ekosysteemin arvoketjun kannattavuudesta.

Toiminnallisella merkityksellä tässä tarkoitetaan, kuinka merkittävää toiminta on koko ekosysteemin toiminnan kannalta. Tarkastelua voidaan tehdä simulaatiotyökalun avulla, jolla määritellään, kuinka merkityksellistä yksittäisten prosessien input – output -tarkastelu on muiden osien näkökulmasta.

Kiertotalouden ekosysteemeissä on hyvä analysoida toimintojen kannattavuutta vähintään kahdessa eri tasossa. Kannattavuuden arvioinnissa voi käyttää esimerkiksi tässä hankkeessa kehitettyä simulointityökalua:

1. Kokonaiskannattavuus järjestelmän osalta
2. Yksittäisten osien kannattavuus

Mikäli pyritään tasapuoliseen ja oikeudenmukaiseen toimintaan koko ekosysteemin kannattavuuden tarkastelussa, voitaisiin käyttää seuraavia periaatteita:

1. Valitaan sellainen kokoonpano eri toimijoita, joiden muodostaman ekosysteemin kokonaisarvonmuodostus (kannattavuus) on kaikkein suurin.
2. Tarkastellaan yksittäisten osien kannattavuutta, jotta sopimusperusteisesti taataan jokaiselle osapuolelle vähintään yhtä suuri osio kuin sillä olisi yksin toimiessa ja loppu arvonlisä jaetaan toimintojen suhteessa.

Toimintojen organisoinnissa on nähtävissä kolme erilaista järjestelymallia:

1. Yksi organisaatio omistaa kaikki kiertotalouden ekosysteemissä olevat toiminnot.
2. Eri arvoketjut ovat eri omistajien omistuksessa. Tasausta toimintojen välillä tehdään ristiinomistuksien avulla.
3. Eri arvoketjut ovat eri omistajien omistuksessa. Tasausta toimintojen välillä tehdään sopimusperusteisten järjestelyiden avulla.

Selkeästi yksinkertaisinta toiminta on, mikäli kaikki toiminnot ovat yhden organisaation hallinnassa. Yhden omistajan alaisuudessa kokonaisuuden optimointi voidaan helposti tehdä ilman, että tarvitsee liikaa ottaa huomioon yksittäisen toiminnan kannattavuutta. Käytännössä kuitenkin eri arvoketjuissa on niin paljon erilaista ydinosaamista, että on sangen epätodennäköistä, että yhteen yritykseen halutaan rakentaa niin paljon erilaista osaamista. Yhden organisaation toimintamalli ei ole mahdoton, mutta erilaisten liiketoimintojen portfolio ei ole isojen yritysten strateginen linjaus ja pienille yrityksille siinä on suuria taloudellisia haasteita.

Yksi mahdollinen toimintamalli yksittäisten arvoketjujen omistajien sekä yhden kokonaisuuden omistuksen välillä on arvoketjujen ristiinomistaminen. Tällöin ajatuksena on, että eri arvoketjut muodostavat omia itsenäisiä yhtiöitään, mutta samalla ne omistavat toistensa osakkeita. Järjestely sitoo arvoketjut yhteen, jolloin toimintojen välistä tulosten tasausta tapahtuu voittojen jakamisen kautta. Hankaluutena ristiinomistuksessa on oikeiden omistussuhteiden suuruuden arviointi sekä omistusperusteiden muutoksissa tapahtuva mahdollinen jäykkyys.

Ristiinomistamista hajautetumpi ja ehkä joustavampi malli on arvoketjujen itsenäisten yhtiöiden välisen toiminnan sitominen yhteen sopimusperusteisesti. Tällöin voidaan sopimusperusteisesti määrittää eri arvoketjujen (yhtiöiden) välinen siirtohinnoittelu sekä muut toiminnan yhteen sitoutumisen ehdot.

Luonnollisesti myös erilaiset hybridimallit ovat mahdollisia, jolloin hyödynnetään sekä ristiinomistusta että sopimuksia. Yksi pidemmälle viety tällainen malli voisi olla yhden vahvan omistajan ympärille koostuva toimintamalli. Siinä yksi taho omistaa kaikki erilliset yhtiöt ja ottaa erityistoimintoihin mukaan pienempiä yrittäjiä. Tällöin investoinneista vastaa keskeinen omistaja. Erityisalojen osaajat tuovat yhtiöön oman osaamisensa ja operatiivisen vastuun sekä toimivat yksittäisissä yrityksissä osaomistajina.

Viitteet

- Biomethane Regions 2012. Introduction to the Production of biomethane from biogas a guide for England and Wales. http://www.severnwye.org.uk/fileadmin/Resources/Severn-Wye/Projects/Biomethane_Regions/Downloads/BMR_D.4.2.1.Technical_Brochure_EN.pdf
- Davis, M. P., Martin, E. A., Moorman, T. B., Isenhardt, T.M. & Soupir, M. (2019). Nitrous oxide and methane production from denitrifying woodchip bioreactors at three hydraulic residence times [2019]. *Journal of environmental management* 2019 Jul 15;242:290-297.
- Ehmann, A., Thumm, U. & Lewandowski, I. 2018. Fertilizing Potential of Separated Biogas Digestates in Annual and Perennial Biomass Production Systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 2. 12 s.
- Ervasti S., Vainio, M. & Tampio, E. 2019. Use of local resources as co-substrates in a farm-scale biogas plant. *Open Agriculture* 1: 650–660.
- Ervasti, S., Tampio, E. & Pyykkönen, V. 2021. Maatilojen biokaasuntuotannon mahdollisuudet Lapissa. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 34/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 53 s.
- Faust, J.E. & Logan J. 2018. Daily light integral: A research review and high-resolution maps of the United States. *HortScience* 53(9): 1250–1257.
- Hagner, M., Kemppainen, R., Jauhiainen, L., Tiilikkala, K. & Setälä, H. 2016. The effects of birch (*Betula* spp.) biochar and pyrolysis temperature on soil properties and plant growth. *Soil & Tillage Research* 163: 224–234.
- Heikkinen, J., Keskinen, R., Soinne, H., Hyväluoma, J., Nikama, J., Wikberg, H., Källi, A., Siipola, V., Melkieor, T., Dupont, C., Campargue, M., Larsson, S.H., Hannula, M. & Rasa, K. 2019. Possibilities to improve soil aggregate stability using biochars derived from various biomasses through slow pyrolysis, hydrothermal carbonization, or torrefaction. *Geoderma* 344: 40–49.
- Hjorth, M., Christensen, K.V., Christensen, M.L. & Sommer, S.G., 2010. Solid-liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30: 153–180.
- Hyväluoma, J., Hannula, M., Arstila, K., Wang, H., Kulju, S. & Rasa, K. 2018. Effects of pyrolysis temperature on the hydrologically relevant porosity of willow biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 134: 446–453.
- Hyväluoma, J., Kulju, S., Hannula, M., Wikberg, H., Källi, A. & Rasa, K. 2017. Quantitative characterization of pore structure of several biochars with 3D imaging. *Environmental Science and Pollution Research* 25: 25648–25658.
- IPCC 2019. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 10: Emissions from Livestock and Manure Management. Intergovernmental panel on climate change.

- ISO (International Organization for Standardization) 2006a. ISO 14040. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. International Organization for Standardization, Brussels.
- ISO (International Organization for Standardization) 2006b. ISO 14044. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Brussels.
- Juvonen, J. & Lapinlammi, T. 2013. Energiakaivo. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas. Ympäristöministeriö. Helsinki. 52 s. + liitteet.
- Keskinen, R., Hyväluoma, J., Sohlo, L., Help, H. & Rasa, K. 2019. Fertilizer and soil conditioner value of broiler manure biochars. *Biochar 1*: 259–270.
- Keskinen, R., Nikama, J., Kaseva, J. & Rasa, K. 2021. Feasibility of nitrogen-enriched chars as circular fertilizers. *Waste and Biomass Valorization*.
- Keskinen, R., Suojala-Ahlfors, T., Sarvi, M., Hagner, M., Kaseva, J., Salo, T., Uusitalo, R. & Rasa, K. 2020. Granulated broiler manure based organic fertilizers as sources of plant available nitrogen. *Environmental Technology & Innovation 18*: 1–12.
- Kuoppamäki, K., Hagner, M. & Setälä, H. 2016. Biochar amendment in green roof substrate affects runoff quality and quantity. *Ecological Engineering 88*: 1–9.
- Ledda, C., Schievano, A., Salati, S. & Adani, F. 2013. Nitrogen and water recovery from animal slurries by a new integrated ultrafiltration, reverse osmosis and cold stripping process: A case study. *Water Research 47*: 6165–6166.
- Lemola, R., Uusitalo, R., Hyväluoma, J., Sarvi, M. & Turtola, E. 2018. Suomen peltojen maalajit, multavuus ja fosforipitoisuus: Vuodet 1996–2000 ja 2005–2009. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 17/2018*. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 209 s.
- Luostarinen, S., Pyykkönen, V., Winqvist, E., Kässi, P., Grönroos, J., Manninen, K. & Rankinen, K. 2016. Maatilojen biokaasulaitokset: Mahdollisuudet, kannattavuus ja ympäristövaikutukset. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2016*. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 60 s.
- Luostarinen, S., Grönroos, J., Hellstedt, M., Nousiainen, J. & Munther, J. 2017a. Suomen normilanta – laskentajärjestelmän kuvaus ja ensimmäiset tulokset. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 47/2017*. Luonnonvarakeskus. Helsinki. [54 s.](#)
- Luostarinen, S., Perttilä, S., Nousiainen, J., Hellstedt, M., Joki-Tokola, E. & Grönroos, J. 2017b. Turkiseläinten lannan määrä ja ominaisuudet. Tilaseurannan ja lantalaskennan tulokset. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 46/2017*. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 30 s.
- Luostarinen, S., Tampio, E., Berlin, T., Grönroos, J., Kauppila, J., Koikkalainen, K., Niskanen, O., Rasa, K., Salo, T., Turtola, E., Valve, H. & Ylivainio, K. 2019a. Keinoja orgaanisten lannoitevalmisteiden käytön edistämiseen. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 2019:5. Maa- ja metsätalousministeriö. Helsinki. 88 s.
- Luostarinen, S., Tampio, E., Niskanen, O., Koikkalainen, K., Kauppila, J., Valve, H., Salo, T. & Ylivainio, K. 2019b. Lantabiokaasutuen toteuttamisvaihtoehdot. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2019*. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 75 s.

- Luostarinen, S., Tampio, E., Laakso, J., Sarvi, M., Ylivainio, K., Riiko, K., Kuka, K., Bloem, E. & Sindhøj, E. 2020. Manure processing as a pathway to enhance nutrient recycling. Report of SuMaNu platform. Natural Resources and Bioeconomy Studies 62/2020. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 76 s.
- Marttinen, S., Tampio, E., Sinkko, T., Timonen, K., Luostarinen, S. & Manninen, K. 2015. Biokaasulaitokset - syötteistä lopputuotteisiin. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 14/2015. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 67 s.
- Mavi 2008. Ravinnetaseet. Ympäristötuen lisätoimenpide lannoituksen ja sadon ravinnemäärien seurantaan. Maaseutuvirasto. 13 s.
- Møller, H.B., Lund, I. & Sommer, S.G. 2000. Solid-liquid separation of livestock slurry: efficiency and cost. *Bioresource Technology* 74(3): 223–229.
- Møller, H.B., Sommer, S.G. & Ahring, B.K. 2002. Separation efficiency and particle size distribution in relation to manure type and storage conditions. *Bioresource Technology* 85(2): 189–196.
- Möller, K. & Müller, T. 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences* 12(3): 242–257.
- Paavola, T., Winquist, E., Pyykkönen, V., Luostarinen, S., Grönroos, J., Manninen, K. & Rankinen, K. 2016. Lantaravinteiden kestävä hyödyntäminen tiloilla ja keskitetyssä biokaasulaitoksessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 33/2016. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 53 s.
- Pöschl, M., Ward, S. & Owende, P. 2010. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy* 87(11): 3305–3321.
- Pöyry 2018. Älykäs kaupunkienergia. Raportti Energiategollisuus ry:lle. Pöyry Management Consulting. Vantaa. 59 s.
- Pyykkönen, V. & Ervasti, S. 2019. Separoinnin mahdollisuudet ja kannattavuustekijät. Julkaisussa: Pulkka, E.-K., Rantala, T., Antikainen, S., Eskelinen, P. & Partanen, J. Lanta liikkeelle ja ravinteet kiertoon: Ravinnerenki ja Lantalogistiikka -hankkeiden tulospöytäkirja. Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja 3/2019. Savonia-ammattikorkeakoulu. 51 s.
- Raatikainen, S. 2015. Kaukolämpöakkuinvestoinnin teknistaloudellinen selvitys. Opinnäytetyö, Savonia-ammattikorkeakoulu. 25 s.
- Rakennustieto 2020. RT-ohjekortti 103137, Lämpöenergian kausivarastointi. Rakennustieto. Helsinki. 12 s.
- Rasa, K., Heikkinen, J., Hannula, M., Arstila, K., Kulju, S. & Hyväluoma, J. 2018. How and why does willow biochar increase a clay soil water retention? *Biomass and Bioenergy* 119: 346–353.
- Rasa, K., Viherä-Aarnio, A., Rytönen, P., Hyväluoma, J., Kaseva, J., Suhonen, H. & Jyske, T. 2021. The structural properties of feedstock determine the structural properties of willow biochar-quantitative analysis. Submitted to *Industrial Crops and Products*.

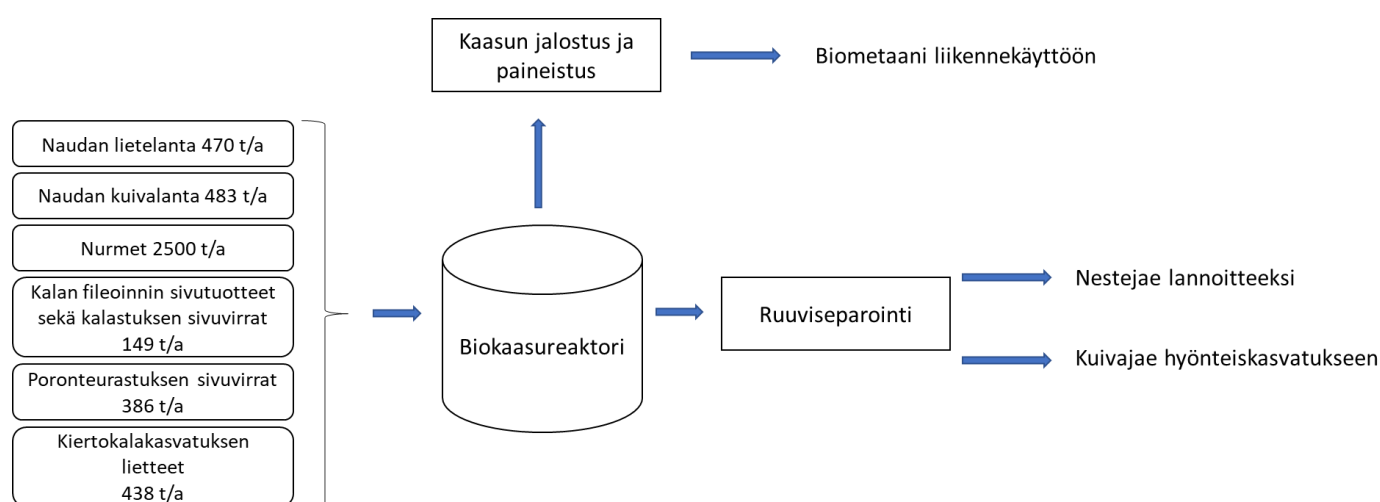
- Rasi, S., Kilpeläinen, P., Rasa, K., Korpinen, R., Raitanen, J-E., Vainio, M., Kitunen, V., Pulkkinen, H. & Jyske, T. 2019. Cascade processing of softwood bark with hot water extraction, pyrolysis and anaerobic digestion. *Bioresources Technology* 292. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121893>
- Rasi, S., Timonen, K., Joensuu, K., Regina, K., Virkajärvi, P., Heusala, H., Tampio, E. & Luostarinen, S. 2020. Sustainability of vehicle fuel biomethane produced from grass silage in Finland. *Sustainability* 12(10): 3994.
- Ruokavirasto 2020. Ympäristökorvauksen sitoumusehdot 2020. Ruokavirasto. Helsinki. <https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/tietoa-meista/asiointi/oppaat-ja-lomakkeet/viljelijat/tuet-ja-rahoitus/oppaat-ja-esitteet/ymparistokorvauksen-sitoumusehdot-2020.pdf>
- Salo, T. Grönroos, J., Luostarinen, S., Kapuinen, P., Manninen, K., Rankinen, K. & Myllyviita, T. 2015. Lietelannan happokäsittely lannan ravinteiden käytön tehostamisen tukena. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 56/201. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 44 s.
- Sarvi, M., Hagner, M., Velmala, S., Soinne, H., Uusitalo, R., Keskinen, R., Ylivainio, K. & Rasa, K. 2021. Bioavailability of phosphorus in granulated and pyrolyzed broiler manure. *Environmental Technology & Innovation* 23: 101584.
- Sarvi, M., Rasi, S., Salo, T., Rasa, K., Vainio, M., Ylivainio, K. & Luostarinen, S. 2021. Pyrolysis as a method for improved phosphorus recycling of fur animal manure. Manuscript in preparation.
- Siipola, V., Tamminen, T., Källi, A., Lahti, R., Romar, H., Rasa, K., Keskinen, R., Hyväluoma, J., Hannula, M. & Wikberg, H. 2018. Effects of biomass type, carbonization process, and activation method on the properties of bio-based activated carbons. *BioResources* 13: 5976–6002.
- Silvenius, F., Mäkinen, T., Grönroos, J., Kurppa, S., Tahvonen, R., Kankainen, M., Vielma, J., Silvennoinen, K., Setälä, J., Kaustell, S. & Hartikainen, H. 2012. Kirjoloheen ympäristövaikutukset Suomessa. MTT 2012. Smetana, S., Schmitt, E. & Mathys, A. 2019. Sustainable use of *Hermetia illucens* insect biomass for feed and food: Attributional and consequential life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling* 144: 285–296.
- Soimakallio, S., Saikku, L., Valsta, L. & Pingoud, K. 2016. Climate change mitigation challenge for wood utilization - the case of Finland. *Environ Sci Technol* 50(10):5127–5134. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.6b00122>
- Soimakallio, S., Kalliokoski, T., Lehtonen, A., Salminen, O. 2021. On the trade-offs and synergies between forest carbon sequestration and substitution. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 26, 4 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09942-9>
- Soinne, H., Keskinen, R., Heikkinen, J., Hyväluoma, J., Uusitalo, R., Peltoniemi, K., Velmala, S., Pennanen, T., Fritze, H., Kaseva, J., Hannula, M. & Rasa, K. 2020. Are there environmental or agricultural benefits in using forest residue biochar in boreal agricultural clay soil? *Science of the Total Environment* 731: 138955.
- Tampio, E., Marttinen, S. & Rintala, J. 2016. Liquid fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: mass, nutrient and energy balance of four digestate liquid treatment systems. *Journal of Cleaner Production* 125, 22–32.

- Tampio, E., Vainio, M., Virkkunen, E., Rahtola, M. & Heinonen, S. 2018. Opas kierrätyslannoitevalmisteiden tuottajille. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 37/2018. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 73 s.
- TEM 2020. Biokaasuohjelmaa valmisteleavan työryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2020:3. Työ- ja elinkeinoministeriö. Helsinki. 64 s.
- Timonen, J. 2018. Kaukolämmön kysyntäjousto kaukolämpötoimijoiden näkökulmasta. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta. 79 s.
- Timonen, K., Sinkko, T., Luostarinen, S., Tampio, E. & Joensuu, K. 2019. LCA of anaerobic digestion: Emission allocation for energy and digestate (in press). Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619320402>
- Turunen, M., Hyväluoma, J., Heikkinen, J., Keskinen, R., Kaseva, J., Hannula, M. & Rasa, K. 2020. Quantifying the pore structure of different biochars and their impacts on the water retention properties of Sphagnum moss growing media. *Biosystems Engineering* 191: 96–106.
- Turunen, M., Hyväluoma, J., Keskinen, R., Kaseva, J., Nikama, J., Reunamo, A. & Rasa, K. 2021a. Pore structure of wastewater sludge chars and their water retention impacts in different soils. *Biosystems Engineering* 206: 6–18.
- Turunen, M., Urbano Tenorio, F., Rasa, K., Hyväluoma, J., Rytönen, P., Kaseva, J., Beuker, E., Suhonen, H. & Jyske, T. 2021b. How clonal differences and within tree heterogeneity affect pore properties of hybrid aspen wood and biochar? *Biomass Conversion and Biorefinery*.
- Vilpanen, M. & Toivikko, S. 2017. Yhdyskuntaliikenteen käsittelyn ja hyödyntämisen tilannekatsaus. Vesi-laitosyhdistyksen monistesarja nro 46. Vesilaitosyhdistys. Helsinki. 38 s.
- VTT LIPASTO 2017. Lipasto liikenteen päästöt. Liikennevälineiden yksikköpäästöt, tieliikenteen tavarankuljetukset, autokohtaiset kertoimet. http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavara-liikenne/tieliikenne/tavara_tie.htm. Päivitetty 6.7.2017
- Williams, A. G., Leinonen, I. & Kyriazakis, I. 2016. Environmental benefits of using turkey litter as a fuel instead of a fertilizer. *Journal of Cleaner Production*, Volume 113, 2016, Pages 167-175, ISSN 0959-6526. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.044>.

Liite 1.

Biokaasulaitoksen massa- ja energiataselaskennan menetelmät

Laitoksen käsittelemän massamäärän ja 25 vrk:n oletetun viipymääjan perustella laitoksen reaktorilavuudeksi saadaan 680 m³. Käsittelykapasiteetiltaan biokaasulaitos on keskikokoinen, ja esimerkiksi tämän kokoisia lantaa käsitteleviä biokaasulaitoksia on Suomessa muutamia (Luostarinen ym. 2019b). Biokaasulaitos koostui syötteen esikäsittelystä (murskaus, sekoitus ja hygienisointi), biokaasureaktorista ja biokaasun jatkokäsittelystä. Biokaasu jalostettiin liikennekäyttöön soveltuvaksi paineistetuksi biometaaniksi (compressed biogas, CBG). Lisäksi mädätteen käsittelyyn tarkasteltiin erilaisia jatkojalostusskenaarioita (kuva 14).



Kuva 14. Biokaasulaitoksen massavirrat.

Biokaasulaitoksen ja mädätteen jatkojalostuksen massa-, ravinne- ja energiatase laskettiin perustuen valittujen biomassojen massamääriin ja ominaisuuksiin. Biokaasulaitoksen energiantuottopotentiaali laskettiin syötemateriaalien metaanintuottopotentiaalin (m³/tVS) ja orgaanisen aineen (VS) pitoisuuden avulla. Lisäksi käytettiin kerrointa 0,9, jolloin noin 90 % massojen kaasuntuottopotentiaalista oletettiin toteutuvan jatkuvatoimisessa biokaasulaitoksessa. Yhden metaanikuution energiasisällöksi oletettiin 9,97 kWh ja liikennepolttoaineen tuotannossa huomioitiin prosessin hyötysuhteet.

Syötteistä biokaasuksi muuttuva massamäärä laskettiin metaanin (0,72 kg/m³) ja hiilidioksidin (1,96 kg/m³) tiheyden sekä oletetun biokaasun koostumuksen avulla (60 % CH₄, 40 % CO₂). Käsittelyjäännöksen massa laskettiin syötteiden kokonaismäärän ja biokaasuun menevän massan määrän erotuksena. Ravinnetaseiden laskennassa oletettiin kokonaisravinteiden säilyvän täysmääräisesti mädätteessä. Ammoniumtyypen liukoistuminen biokaasuprosessissa laskettiin perustuen orgaanisen aineksen hajoamiseen (orgaanisen tyypen ja orgaanisen aineksen hajoamisen suhdelukuna käytettiin arvoa 0,63, Luostarinen ym. 2016).

Taulukko 14. Laskennassa käytetyt biokaasulaitoksen syötemassojen ominaisuudet. Lantojen ominaisuudet perustuvat Ravinlaskuriin ja Normilanta-järjestelmään (Luostarinen ym. 2017a, Luostarinen ym. 2017b) ja metaanipotentialit ovat samat kuin 2020 julkaistussa biokaasuohjelmassa (TEM 2020). Säilörehunurmen ominaisuudet perustuivat Mavin ravinnetaseohjeeseen (Mavi 2008), poro- ja kalaperäiset sivujakeet Ervasti ym. (2019, 2021) ja lieteveden ja prosessiveden tiedot asiantuntija-arvioihin.

Biomassa	Kuiva-aine (%)	Org. aines (%)	N (kg/t)	Liuk. N (kg/t)	P (kg/t)	K (kg/t)	CH ₄ -potentiaali (m ³ /tVS)
Naudan lietelanta	9,0	7,2	5,0	2,9	0,9	5,4	210
Naudan kuivalanta	30,1	25,6	5,4	1,9	1,0	7,3	200
Nurmet	22,0	20,0	7,7	0,3	0,9	5,3	300
Kalat: fileoinnin sivutuotteet	71,2	71	8,1	0,1	1,3	1,2	728
Muu kala	21,3	17	24,2	0,6	7,4	2,8	372
Poronteurastus sivuvirrat	20,2	19	16,8	0,7	1,8	2,1	454
Kiertokalakasvatuksen lietteet	4,0	3,5	0,1		0,1		250
Prosessivesi	0,6	1	0,1		0,0		

Taulukko 15. Energiataseen laskennassa käytetyt kertoimet. CBG:n hyötysuhde perustuu Marttinen ym. 2015 ja Biogas Regions 2012.

	Arvo	Yksikkö
CH ₄ pitoisuus	60	%
1 m ³ CH ₄	9,97	kWh
Metaanin tiheys	0,72	kg/m ³
Hiilidioksidin tiheys	1,96	kg/m ³
Metaanintuoton korjauskerroin	90	%
Paineistetun kaasun (CBG) hyötysuhde	98	%

Matalan kuiva-ainepitoisuuden omaavan mädätteen jatkojalostuksen ensimmäinen vaihe on separointi, jossa neste- ja kuivajae erotetaan toisistaan. Laskennallisesti tarkasteltiin mädätteen separointia sekä ruuvipuristimen että lingon avulla. Ruuvipuristimia käytetään usein pienemässä mittakaavassa, erityisesti maataloilla, kun taas linkoteknologiaa käytetään tehokkaaseen erotteluun suuremmissa mittakaavassa, mutta se on skaalattavissa mihin tahansa mittakaavaan.

Taulukko 16. Separaattorille käytetyt massan erotuskertoimet. Luku kuvaa sitä %-arvoa, joka alkuperäisestä mädätteestä erottuu separoituun kuivajakeeseen. Ruuvi- ja linkoseparaattorien erottelu perustuu kirjallisuuskatsaukseen eri lähteistä (mm. Hjorth ym. 2010, Møller ym. 2000, Møller ym. 2002, Ledda ym. 2013, Luostarinen ym. 2011 ja Paavola ym. 2016).

%	Massa	TS	VS	N	NH ₄ -N	P	K
Ruuvipuristin (kuivajae)	7	30	30	10	5	15	10
Linko (kuivajae)	17	70	70	25	15	90	15

Mädätteen jatkojalostuksessa muodostuvien lannoitevalmisteiden lannoituspotentiaalia tarkasteltiin yksinkertaistetusti vertaamalla biokaasulaitoksen vuodessa tuottamaa lannoitevalmisteiden sisältämää ravinnemäärää (kokonaisfosfori ja liukoinen typpi) keskimääräisiin lannoitustasoihin esimerkkikasveilla. Esimerkkikasveiksi valittiin kokovilja sekä nurmi, joista erityisesti nurmen lannoituksessa olisi Sodankylän alueella potentiaalia. Kokoviljan lannoitustaso oli 10 kgP/ha ja 120 kgN/ha. Nurmelle lannoitustasot olivat 14 kgP/ha ja 200 kgN/ha. Lannoitustasot perustuivat ympäristökorvausjärjestelmän (Ruokavirasto 2020) lannoitusrajoihin tyydyttävän P-luvun ja multavuusluokaltaan multavilla pelloilla. P-luku ja multavuus perustuivat Lapin ELY-keskuksen alueella yleisimpiin luokkiin (Lemola ym. 2018).

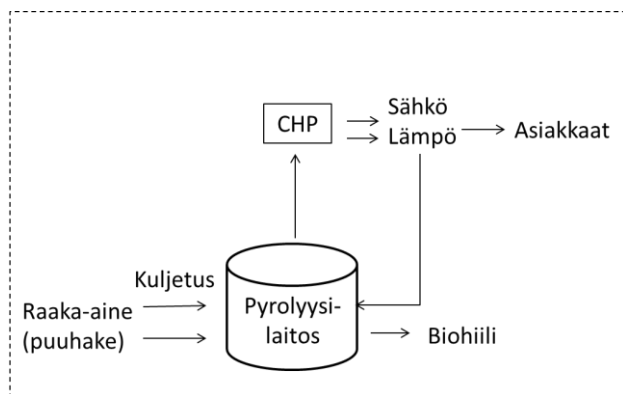
Lannoituslaskenta toteutettiin niin, että mädätteestä jatkojalostetuilla tuotteilla pyrittiin täyttämään kokoviljan/nurmen fosforilannoitustarve täysin. Lisäksi laskettiin typen täydennyslannoitustarve. Typpipitoisille tuotteille lannoitus laskettiin täyttämällä typpilannoitustarvetta ja huomioimalla täydennyslannoitustarve fosforin osalta.

Todellisuudessa lannoitus tulisi optimoida niin, että tuotteiden levitysmäärät ovat käytössä olevalle kalustolle mahdollisia. Fosforin osalta on myös ympäristökorvausjärjestelmän mukaisesti mahdollista ylittää vuotuinen fosforilannoitusmäärä, ja käyttää fosforintasausta 5 vuoden jaksoilla, mikä sallii ylitykset vuotuisessa fosforilannoituksessa. Lisäksi lannoitusta suunniteltaessa tulee huomioida myös nitraattiasetuksen (1250/2014 ja muutos 435/2015) 170 kgN/ha rajoitus lannan ja sitä sisältävien tuotteiden käytössä, jossa typpi huomioidaan kokonaistyyppinä.

Ympäristövaikutuslaskennan materiaalit ja menetelmät

Systemirajaukset ja ketjukuvaukset

Sähkö, kaasu ja biohiili (Pyrolyysilaitos)



Kuva 15. Systemirajaukset pyrolyysilaitokselle.

Pyrolyysilaitoksessa (kuva 15) tarkastelu alkaa syötteenä hyödynnettävästä puuraaka-aineesta (metsänhoidolliset sivuvirrat, ei tukkipuuta), sen tuotannosta (30 000 t/a) ja haketuksesta (hakuri ja sen sähkön kulutus). Hake kuljetetaan alueelta pyrolyysilaitokselle (54 km) käsittelyyn. Hakkeesta 10 000 t/a kuljetetaan puolierävanulla (kokonaismassa 40 t, kantavuus 25 t), 10 000 t/a täysperävaunulla (kokonaismassa 60 t, kantavuus 40 t) ja 10 000 t/a täysperävaunulla (kokonaismassa 64 t). Ajoneuvojen oletettiin tuovan hakkeen täydellä kuormalla laitokselle ja palaavan takaisin tyhjällä kuormalla. Laitoksella ennen syötteen syöttämistä reaktoriin syöte kuivataan ja siinä hyödynnetään pyrolyysilaitoksen itse tuottamaa lämpöenergiaa (55 asteinen lämpö) jota muodostuu sekä reaktorissa että kaasumootorissa.

Hakkeen lisäksi pyrolyysiprosessissa käytetään propaania (5,56 t/a) tukikaasuna pyrolyysin käynnistämiseen. Tukikaasu (propaani) tuodaan säiliöautolla (kokonaismassa 40 t, kantavuus 25 t) pyrolyysilaitoksen säiliöön ja toimitetaan Porvoosta (900 km etäisyydeltä) osana suurempaa logistiikkaketjua.

Reaktorissa hake muutetaan kaasuksi ja tämän ohella muodostuu myös toisena tuotteena biohiiltä (1 944 t/a). Pyrolyysiprosessissa syntyy myös lämpöä (55 asteinen) 6 475 MWh/a, mutta se hyödynnetään kokonaan laitoksen omaan toimintaan (edellä mainittu hakkeen kuivaaminen).

Pyrolyysikaasu ohjataan kaasumootoriin, jossa kaasun polton myötä valmistetaan sähköä 29 280 MWh/v ja lämpöä (95-asteista) 33 995 MWh/v.

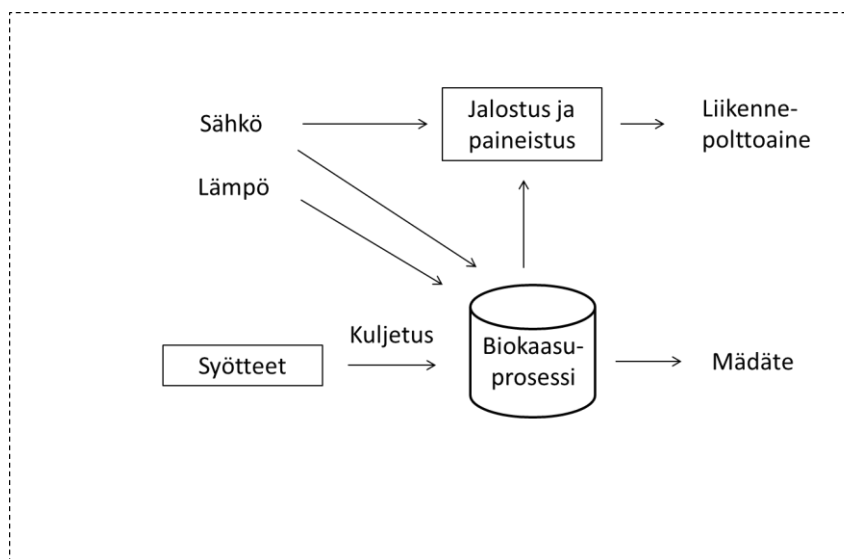
Kaasumootorista syntyy myös 55-asteista lämpöä mutta nämä määrät on sisällytetty edellisessä kappaleessa mainittuihin lämpömääriin 6 475 MWh/a. Tämä 55-asteinen lämpömäärä ei kuitenkaan kata täysin laitoksen omaa tarvetta (7 049 MWh/a) joten lisätarve 574 MWh/a lämpöä otetaan 95 asteisesta lämmöstä eli siten 95-asteista kaukolämpöä päätyy myyntiin lopulta 33 421 MWh/a (33 995 MWh/a – 574 MWh/a).

Voiteluöljyä käytetään kaasumoottorin huoltoon (8,7 t/a) ja sitä oletettiin kuljetettavan Jämsänkoscelta (700 km etäisyydeltä) ibc-konteissa kahtena eränä vuodessa täysperävaunulla (kokonaismassa 60t, kantavuus 40t) osana suurempaa logistiikkaketjua.

Taulukko 17. Pyrolyysilaitoksen energian tuotanto ja kulutus

		MWh/v
Pyrolyysilaitoksen energiakulutus	Sähköenergia	2700
	Lämpöenergia	7049
Pyrolyysilaitoksen energiatuotto	Energiasisältö kaasulle	70 589
	Sähköenergia	29 280
	Lämpöenergia (95 asteinen)	33 995
	Lämpöenergia (55 asteinen)	6 475
Myyntiin (Laitoksen tuotanto-laitoksen oma kulutus)	Sähköenergia	26 580
	Lämpöenergia (55 asteinen)	-574
	Kaukolämpö (95 asteinen)	33 421
	Kokonaisenergiamäärä	60 001

Liikennepolttoaine (Biokaasulaitos)



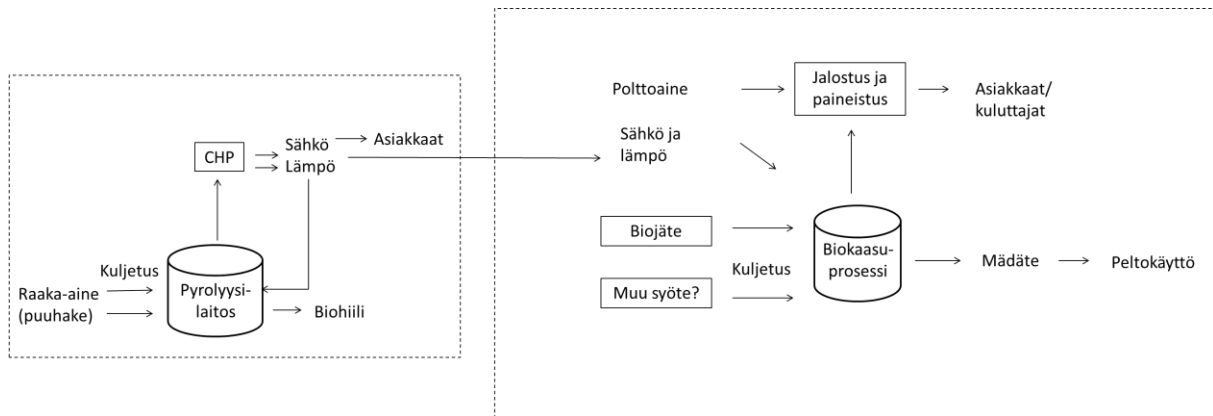
Kuva 16. Systemirajaukset biokaasulaitokselle.

Biomassoja käsittelevässä biokaasulaitoksessa ketjun tarkastelu lähtee syötteenä hyödynnettävien biomassojen valmistuksen päästöistä. Aikaisemmin jätteiksi (esim. biojäte) / hyödynnettävimmiksi (kalaperheet, puhdistamoliete, teurasjäte) luokiteltuja tuotteita hyödynnetään laitoksessa syötteenä sekä tämän lisäksi nurmea ja lantaa (Tauluko 6).

Syötteen kuormataan puoliperävaunurekkoihin (25 t) eri lähteissään ja kuljetetaan biokaasulaitokselle käsittelyyn (0–54 km etäisyydet). Perustarkastelussa puoliperävaunurekka oletettiin palaava takaisin tyhjällä kuormalla sillä laitoksessa muodostuvaa jäännöstä ei kuljeteta paluukuljetuksena takaisin tilalle lannoitteeksi.

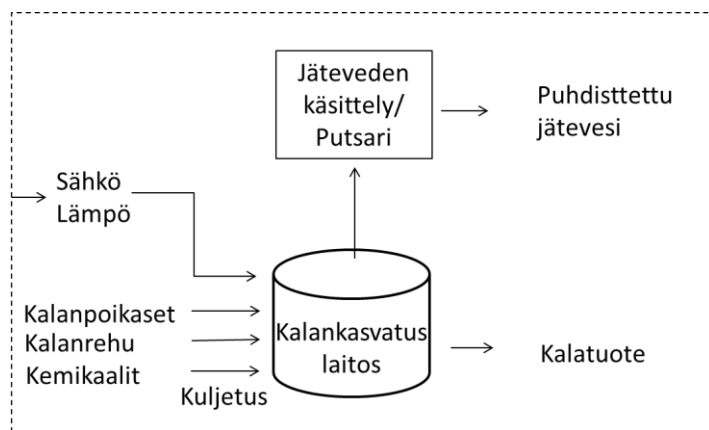
Syöte kuormataan biokaasureaktoriin (polttoainekulutus $0,06 \text{ l/m}^3$), missä muodostuva biokaasu johdetaan jälkikaasuuntumisaltaan yhteydessä olevaan kaasuväylään ja edelleen vesipesuritekniikkaan perustuvaan liikennepolttoaineen jalostusyksikköön. Lannan osalta tapahtui myös sekoitusta ennen kuormausta ja sen polttoainekulutukseksi arvioitiin $0,3 \text{ l/m}^3$. Laitos tuottaa energiaa 2992 MWh/v.

Reaktorin sähkön kulutus on 254 MWh/v, jalostuksen 214,35 MWh/v ja lämpöenergian kulutus 657 MWh/v. Tarkastelut biokaasulaitoksen osalta vaihtelee sen mukaan hyödyntääkö biokaasulaitos ulkopuolelta ostettavaa keskimääräistä suomalaista sähköä ja alueen hakepohjaista lämpöä (kuva 16) vaiko hyödyntääkö se energiaa (kuva 17) osana kiertotalousmallia.



Kuva 17. Systemirajaukset biokaasulaitokselle osana kiertotaloutta.

Siika (Kalankasvatuslaitos)



Kuva 18. Systemirajaukset kalankasvatuslaitokselle.

Tarkastelu lähtee poikaskasvatuksesta. Kalalaitos on sen verran pieni, ettei omaa poikastuotantoa kannata pitää. Kalanpoikasia ostetaan yhteensä 5430 kg (108 600 kpl) vuodessa paikallisilta toimijoilta pohjoisesta. Kuljetusetäisyyden arvioidaan olevan 350 km suuntaansa ja se tehdään kolme kertaa vuodessa $\hat{=}$ 1810 kg kerralla. Siikaa voi kuljettaa noin 50 kg/m³ eli tarvittaisiin vielä lisäksi vettä eli kuljetusmassa olisi kerrallaan noin 36 t. Poikaset kuljetetaan siten täysperävau- nulla (40 t kantavuus) ja tyhjänä takaisin.

Kalarehua kulutetaan 84 t/a. Oletuksena on, että rehu toimitetaan Turusta eli 980 km etäisyy- deltä puoliperävau- nulla osana isompaa logistiikkaketjua. Poikasrehu on hieman erilaista ja se on 5 t/a vuodessa ja sitä valmistetaan myös Turussa.

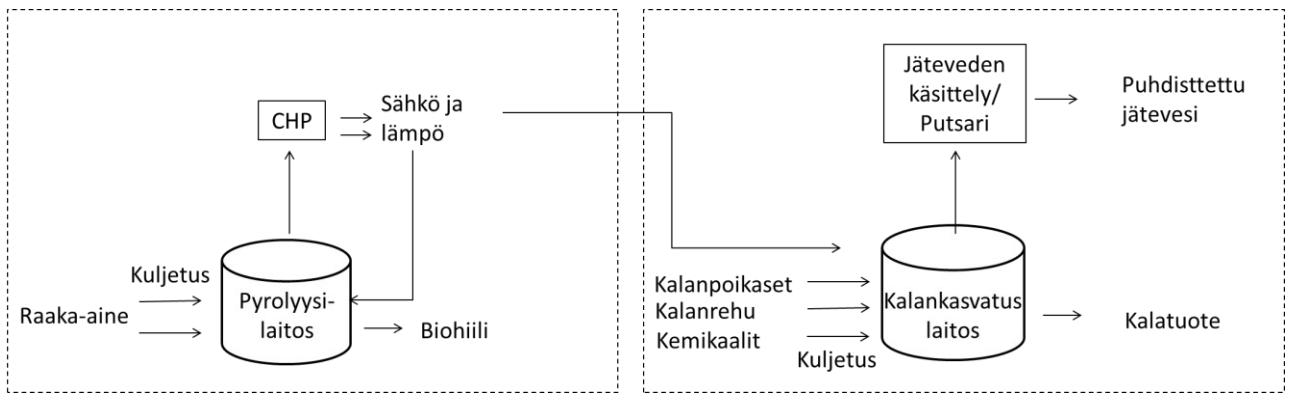
Kalankasvatuslaitos on kiertovesilaitos, jossa tarvitaan energiaa (sähkö) vedenkiertoon sekä energiaa lämmittämiseen. Laitos kuluttaa sähköä 480 MWh/a ja kaukolämpöä 34,2 MWh/a. Kulutettava energia on joko pyrolyysiteknologian ylijäämäenergian hyödyntämistä kiertota- lousnäkökulmasta (kuva 5) tai sitten sähkö ja lämpö ostetaan ulkopuolelta ja on siten suoma- laista keskimääräistä sähköä tai kaukolämpöä.

Veden kulutus on 42 000 m³ vuodessa ja veden pH:n ylläpitämiseksi hyödynnetään soodaa 16,8 t/a. Happea kuluu 1 kg/rehukilo eli 84 t/a yhteensä ja sitä säilytetään nestemäisenä isoissa

säiliöissä. Lietteveden käsittelyyn käytetään alumiinikloridia 2 t/a. Sooda ja alumiinikloridi kuljetetaan Turun varastolta eli noin 980 km etäisyydeltä puoliperävaunulla (25 t kantavuus) ja happi Oulusta kerran kuukaudessa noin 330 km etäisyydeltä puoliperävaunulla (25 t kantavuus).

Jätevettä syntyy 37 200 m³, joka menee laitoksen yhteydessä toimivaan puhdistuslaitokseen, joka on puuhakereaktori, jossa puusta vapautuu orgaanista ainesta, joka käytetään typen poistoon. Asiantuntija-arvion mukaan kalalaitokselta poistuvassa jätevedessä on BOD5 10 mg/l, ja NO₃-N 50 mg/l (TOT-N 55 mg/l) ja jätevesipuhdistamolta poistuvassa vedessä on BOD5 8 mg/l, ja NO₃-N 12 mg/l (TOT-N 17 mg/l).

Tämän lisäksi lietettä muodostuu vuodessa 525 m³ ja se varastoidaan kalalaitoksella 10 m³ säiliössä, josta se kuljetetaan puoliperävaunulla (25 t) viikon välein biokaasulaitokselle syötteenä hyödynnettäväksi.



Kuva 19. Systemirajaukset kalankasvatuslaitokselle osana kiertotaloutta.

Laskentamenetelmät

Ilmastovaikutus kaukolämmölle, ruokatuotteille sekä liikennepolttoaineeksi arvioitiin elinkaariarvioinnin (Life cycle assessment, LCA) avulla noudattaen kansainvälisiä elinkaariarviointimenetelmän standardeja (ISO 2006a, ISO 2006b) sekä soveltaen edellä esitettyjä rajoituksia ja muita oletuksia. Tarkasteltu ympäristövaikutusluokka on ilmastonmuutos ja laskennassa huomioitiin kasvihuonekaasuista hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄) ja typpioksiduuli (N₂O). Ketjuissa syntyvät päästöt yhteismitallistettiin ilmastovaikutusluokkaan ekvivalenttikertoimilla (Taulukko 18)

Taulukko 18. Käytetyt karakterisointikertoimet (RED II direktiivi 2018/2001/EU).

Päästömuuttuja Ilmastonmuutos	Ekvivalenttikerroin kg CO ₂ -ekv/kg
CO ₂	1
CH ₄	23
N ₂ O	296

Ilmastovaikutukset on arvioitu kokonaisketjuille vuositasolla, ja ne on kohdistettu per tuotannon yksikkö riippuen tarkastellusta lopputuotteesta. Esim. sähkön ja lämmön osalta per MJ myyntiin tuotettua energiaa ja ruokatuotteen (siika) osalta per kg myyntiin tuotettua siikaa.

Pyrolyysilaitos: Sähkö, lämpö ja biohiili

Hakkuutähteen (30 000 t/a) tuotannon päästöihin sisällytetään hakeraaka-aineen tuotannon päästöt metsässä sekä hakkurin kuluttaman sähkön päästöt. Tähän ei oletettu sisältyvän kuivausta sillä se tapahtuu vasta pyrolyysilaitoksella eikä kuljetusta keskusvarastoon. Metsähakkeen tuotannon päästöjen osalta hyödynnettiin Ecoinvent-tietokannan dataa: „mäntyhakkeen osalta “ Bundle, energy wood, measured as dry mass {SE}| softwood forestry, pine, sustainable forest management | Cut-off, S” ja kuusesta tehdyn hakkeen osalta “Bundle, energy wood, measured as dry mass {SE}| softwood forestry, spruce, sustainable forest management | Cut-off, S” Haketuksen osalta “Wood chipping, industrial residual wood, stationary electric chipper {RER}| processing | Cut-off, U” joka hyödynsi keskimääräistä suomalaista sähköä. Sähkön päästöt on laskettu vuoden 2020 tietojen perusteella (Energiateollisuus 2020).

Hakkeen kosteusprosentti on 40 ja vastaavasti kuiva-ainepitoisuus 60 %, joten karkeasti arvioituna syötteenä on kuiva-ainetta $30\,000\text{t/a} \cdot 0,6 = 18\,000\text{t/a}$. Tästä puun kuiva-aineesta 50 % on hiiltä (Lähde: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf>) eli $18\,000\text{t/a} \cdot 0,5 = 9\,000\text{t/a}$, joka menee syötteen mukana pyrolyysilaitokseen poltettavaksi. Pyrolyysilaitoksen tuottamassa biohiilessä on hiiltä 91 % (Lähde: <file:///C:/Users/03080529/Downloads/MA-Kaeppler2017-LCA%20Biomassevergaser%20Hatterdorf%20final.pdf>) eli $1\,944\text{t/a} \cdot 0,91 = 1\,769\text{t/a}$. Siten karkeasti arvioituna, pyrolyysikaasuun menee syötteen hiilestä $7\,231\text{t/a}$ ($9\,000\text{t/a} - 1\,769\text{t/a}$) eli se osa joka ei sitoudu biohiileen.

Kuljetusten osalta huomioitiin hakkeen ja muiden panosten (tukikaasu ja voiteluöljy) kuljetus pyrolyysilaitokselle. Kuljetusten dieselin käytön päästöissä hyödynnetään LIPASTO -tietokantaa puoliperävaunulle (kokonaismassa 40t ja kantavuus 25t) sekä täysperävaunulle (kokonaismassa 60 t, kantavuus 40 t). Ajoneuvojen oletettiin tuovan hakkeen täydellä kuormalla ja palaavan takaisin tyhjällä kuormalla. Lisäksi huomioitiin myös dieselin valmistuksen päästöt (Ecoinvent 3).

Tässä työssä ei arvioitu hakkeen keräyksestä ja kuljetuksesta tienvarteen (kuljetusta pyrolyysilaitosta varten) aiheutuvia päästöjä sillä niiden merkitys on todella pieni ja vaikea arvioida tämän hankkeen puitteissa.

Pyrolyysiprosessin käynnistämiseksi käytetään propaania (5,56 t/a) tukikaasuna, jonka valmistuksen päästöjen arvioinneissa hyödynnettiin Simapron Ecoinvent dataa "Propane, burned in building machine {GLO}| market for | APOS, S" johon sisältyy siten myös sen polttamisen päästöt käytön aikana. Reaktorissa syöte poltetaan kaasuksi. ja tämän ohella muodostuu myös toisena tuotteena biohiiltä. Pyrolyysiprosessissa syntyy myös lämpöä (55 asteinen), mutta tämä hyödynnetään kokonaan laitoksen omaan toimintaan eli hakkeen kuivaamiseen (ks. edellinen kappale) eikä sinänsä toimi lopputuotteena jolle kohdistetaan päästöjä. Pyrolyysi on oletettu olevan hallittu prosessi, josta ei pääse karkaamaan khk-kaasuja ilmaan, joten itse pyrolyysiprosessin aikana ei katsota syntyvän päästöjä. Ainoat päästölähteet, jotka tälle hetkellä kohdistuu kaasulle ja biohiillelle muodostuu siis edellä mainittujen panosten valmistuksen ja kuljetusten päästöistä.

Pyrolyysiprosessissa muodostuville tuotteille eli pyrolyysikaasulle ja biohiillelle muodostuvat vuosittaiset kokonaispäästöt hakkeen ja tukikaasun valmistusten ja kuljetusten osalta allokoidaan massa-allokoinnin eli hiilitaseen mukaisesti kaasulle 0,8 (80 %) ja biohiillelle 0,2 (20 %).

Pyrolyysiprosessissa syntyvän biohiilen potentiaalia hiilensitojana voidaan vielä tarkastella päästölaskelmissa, jos sitä hyödynnetään maanparannusaineena. Jos biohiiltä ei polteta energiaksi, moolimassan mukaisesti biohiileen jäävän hiilen määrä on 3,6667 t CO_{2ekv}/t biohiilen sisältämää hiiltä. Jos biohiiltä tuotetaan laitoksessa 1944 tonnia vuodessa ja sen hiilipitoisuus on 91 % eli 1 769,04 t/a hiiltä, niin hiilidioksidina tämä määrä hiiltä vastaa yhteensä 6 487 t CO_{2ekv}/v (1 769,04 t/a * 3,6667 t CO_{2ekv}).

Pyrolyysikaasu ohjataan vielä kaasumoottoriin, jossa kaasun polton myötä valmistetaan sähköä ja lämpöä (95- ja 55-asteista). Kaasumoottorissa hiili palaa hiilidioksidina ilmakehään ja CO₂ -päästöjä muodostuu 3,6667 t CO₂-ekv per pyrolyysikaasun sisältämää hiiltä kohden (tonneissa) eli yhteensä 26 513,76 t CO₂-ekv vuoden aikana. Tosin nämä CO₂ päästöt, jotka muodostuvat hakkeen hiilen poltosta nähdään biogeenisenä ja siten nollapäästöisinä, sillä ne hyödyntävät uusiutuvia energialähteitä. Kaasun sisältämän metaanin määrä arvioitiin myös olemattomaksi, joten metaanipäästöjä ei laskettu mukaan. Kaasumoottoria varten käytetään voiteluöljyä (8,7 t/a), jonka valmistuksen päästöjen arvioinneissa hyödynnettiin Simapron Ecoinvent dataa "Lubricating oil {GLO}| market for | APOS, S". Nämä päästöt olivat siten ainoat päästöt, jotka huomioitiin CHP-moottorin osalta laskemissa.

Pyrolyysikaasulle hiilitaseen mukaan allokoitujen päästöt ja CHP -prosessin aikaiset päästöt allokoidaan vielä lisäksi sähkölle ja lämmölle hyötysuhteen mukaisesti. Päästöt tulee kohdistaa nettoenergialle, joka päättyy laitoksen ulkopuolelle myyntiin oman energian käytön jälkeen. Esim. Laskennassa käytetyt energiantuotannon hyötysuhteet sähkölle 35 % ja lämmölle 50 % (Marttinen ym. 2015). CHP -moottorin tapauksessa allokointi sähkölle ja lämmölle lasketaan kaavoilla 3 ja 4:

$$EC_{el} = \frac{E}{\eta_{el}} \left(\frac{C_{el} \times \eta_{el}}{C_{el} \times \eta_{el} + C_h \times \eta_h} \right) \quad (\text{kaava 3})$$

$$EC_h = \frac{E}{\eta_h} \left(\frac{C_h \times \eta_h}{C_{el} \times \eta_{el} + C_h \times \eta_h} \right) \quad (\text{kaava 4})$$

Missä,

E = kokonaispäästö biokaasulle (kohdistettuna nettoenergialle) ennen kuin se kohdistetaan sähkölle ja lämmölle.

η_{el} : sähkön hyötysuhde 0,35

η_h : lämmön hyötysuhde 0,5

C_{el} : eli sähkön Carnot –hyötysuhde on 1

C_h : eli lämmön Carnot –hyötysuhde on 0,354

Päästöjen arvioinneissa ei otettu huomioon laitoksen tai muun infrastruktuurin (ajoneuvot, tiehuollot ym.) valmistamisen/rakentamisen päästöjä.

Ketjun eri vaiheiden päästöt sekä kokonaispäästö kohdistettiin lopputuotteelle eli per myytäväksi päätyvä sähkö (MJ) ja lämpö (MJ) sekä biohiili (kg).

Liikennepolttoaine (Biokaasulaitos)

Syötteiden valmistuksen päästöt ovat sivuvirtojen tapauksessa nollapäästöisiä sillä niiden tuotannon päästöt kohdistetaan päätuotteelle esim. teurastuksen päästöt lihalle. Myös lanta luokitellaan jätteeksi ja nollapäästöiseksi ympäristövaikutusten laskennassa, sillä sen tuotannon eli esim. karjatalouden ja lietalannan varastoinnin päästöt kohdennetaan allokointisääntöjen mukaisesti lihalle ja maidolle eikä biokaasuprosessille. Lantaa varastoidaan kuitenkin lyhyemmän aikaa maatiloilla biokaasun tuotannosta johtuen, mikä johtaa pienempiin varastoinnin aikaisiin päästöihin. Lannan parempi käsittely on huomioitu direktiivissä lantahyvitysten (-45 g CO_{2ekv}/MJ) kautta ja tämä on huomioitu lantaa hyödyntävissä laitosesimerkeissä.

Syötteistä ainoastaan nurmen kasvatuksen päästöt laskettiin sillä oletuksella, että niiden viljelyä mahdollisesti harjoitetaan puhtaasti energiantuotantoa varten eikä ole jonkin päätuotannon sivuvirtaa. Nurmen tuotannon päästöjen laskennassa hyödynnettiin hyvän satotason päästölukuja: hyvän satotason kivennäismaalla viljellyn heinänurmen ilmastovaikutus on 0,314 kg CO_{2ekv}/kg kuiva-ainetta ja turvemaalla viljellyn heinänurmen ilmastovaikutus on 0,838 kg CO_{2ekv}/kg kuiva-ainetta (Rasi ym. 2020).

Syötteiden kuljetusten polttoainekulutusten päästöt biokaasulaitokselle sisällytettiin. Kuljetukseen kuului myös lietalannan sekoitus ja kaikkien syötteiden kuormaukset ajoneuvoon sekä ajoneuvosta reaktoriin. Kuljetusten dieselin käytön päästöissä hyödynnetään LIPASTO -tietokantaa puoliperävaunulle (kokonaismassa 40t ja kantavuus 25t). Ajoneuvojen oletettiin tuovan syötteet täydellä kuormalla ja palaavan takaisin tyhjällä kuormalla. Lisäksi huomioitiin myös dieselin valmistuksen päästöt (Ecoinvent 3).

Biokaasuprosessin eli kaasun valmistus reaktorissa ja sen päästöt oletettiin hallituksi prosessiksi, jonka aikana ei pääse vapautumaan khk-kaasuja ilmaan. Liikennepolttoaineyksikkö ei hyödynnä omaa sähkön- ja lämmön tuotantoa, koska se tuottaa vain liikennepolttoainetta. Siten reaktoriin tarvittava sähkö ja lämpö ostetaan ulkopuolelta eli tässä huomioitiin energian tuotannon päästöt arvioitaessa reaktorin päästöjä. Reaktorin katsottiin hyödyntävän joko pyrolyysilaitoksen tuottamaa energiaa tai keskimääräistä suomalaista sähköä (Energiateollisuus 2020) ja muualla alueella tuotettua hakepohjaista lämpöä (tämän hiilijalanjäljen oletettiin olevan samaa luokkaa kuitenkin kuin pyrolyysilaitoksen tuottaman hakepohjaisen lämmön).

Kaasun tankkausaseman oletettiin sijaitsevan biokaasulaitoksen yhteydessä.

Ketjun eri vaiheiden päästöt sekä kokonaispäästö kohdistettiin lopputuotteelle eli per myytäväksi päätyvä liikennepolttoaine (MJ).

Tässä hankkeessa biokaasuprosessin aikaiset päästöt allokoidaan sivutuotteille energia-allokoinnilla sillä RES-direktiivin mukaisessa päästölaskennassa päästöt biopolttoaineen ja prosessissa syntyvän sivutuotteen välillä tulee allokoida tuotteiden alempien lämpöarvojen perusteella. Käsittelyjäännöksen lämpöarvo on lähes nolla, joten sen vuoksi kaikki biokaasuketjun päästöt tulee allokoida biokaasulle. Siten ei biokaasulaitoksen jäännökselle voida allokoida päästöjä, koska jäännöksen lämpöarvo on nolla eli toisin sanoen jäännöksen valmistuksen aikaiset päästöt biokaasuprosessin osalta ovat nolla. Päästöjä muodostuu ainoastaan mahdollisen varastoinnin, käsittelyn ja käytön ajalta ja näitä edellä mainittujen vaiheiden päästöjä ei tässä hankkeessa arvioitu.

Kalankasvatustilasto (siika)

Poikaskasvatuksen päästöjen arvioinnissa hyödynnettiin Silvenius et al. (2012) mallinnusta poikaslaitokselle. Poikaslaitoksen osuus kokonaistuotannosta on sen verran pieni, että näitä edellä mainittuja mallinnuksen lukuja voi käyttää eikä mahdolliset pienet poikkeavaisuudet tuo suurta osuutta ympäristövaikutuksiin.

Kalarehun 84 t/a valmistuksen päästöissä hyödynnettiin keskimääräistä kalanrehun päästölaskelmia, koska esim. Raision tarjoamalle siikarehulle (kiertovesikasvatukseen) ei ollut päästölukuja käytettävissä/laskettavissa. Keskimääräisen rehun päästöjen laskennassa käytettiin seuraavia rehusekoituksia ja tiedonantoja: 42 t/a Itämerenrehua (Raisio Aqua:n rehutiedot toimitti Susanna Airaksinen 23.12.2020) ja 42 t/a Biomar rehua (Anders Erlang Østergaard 4.3.2021). Arvioissa käytettävät rehun päästöluvut eivät sisällä raaka-aineiden kuljetuksia rehunvalmistajalle, joten ne on rajattu pois tämän raportin päästöluvuista.

Kemikaalien valmistuksen päästökertoimina käytettiin Ecoinvent 3 tietokantaa seuraavien osalta: "Ammonium chloride {GLO} market for | Cut-off, U", "Oxygen, liquid {RER} market for | Cut-off, U", Soda, powder, at plant/RER U.

Panosten (kalanpoikaset, rehut, kemikaalit) kuljetusten päästöt arvioitiin perustuen LIPASTO päästökertoimien ja etäisyyksien mukaisesti. Kuljetusten dieselin käytön päästöissä hyödynnetään LIPASTO -tietokantaa täysperävaunulle (kantavuus 40t) ja puoliperävaunulle (kantavuus 25t). Ajoneuvojen oletettiin tuovan kalanpoikaset täydellä kuormalla ja palaavan takaisin tyhjällä kuormalla takaisin. Rehu ja kemikaalit oletetaan kuljetettavan osana suurempaa logistiikkaketjua. Lisäksi huomioitiin myös dieselin valmistuksen päästöt (Ecoinvent 3).

Sähkön ja lämmön kulutuksen päästöissä hyödynnettiin 3.1. osiossa esitettyjä pyrolyysilaitoksen tuottaman sähkön ja lämmön päästöjä/hiilijalanjälkiä. Näitä verrattiin vielä siihen, jos sähkö ja kaukolämpö olisi suomalaista keskimääräistä sähköä tai kaukolämpöä. Keskimääräisen suomalaisen sähkön päästöt on laskettu vuoden 2020 tietojen perusteella (Energiatieteellisyys 2020). Kaukolämmön osalta hyödynnettiin keskimääräistä suomalaista kaukolämmön päästökertointa (Tilastokeskus 2019).

Veden kulutuksen päästöjen arvioinnissa käytettiin Ecoinvent 3 tietokannan päästökertointa "Tap water {Europe without Switzerland} tap water production, conventional treatment | Cut-off".

Pienen kiertovesilaitoksen vedet voidaan puhdistaa kalalaitoksen omalla "pienpuhdistamolla". Kiertovesilaitos käyttää hakereaktoria typen poistamiseen. Jäteveden käsittelyn päästöissä BOD

muodostaa metaanipäästöjä ja typpi N₂O -päästöjä. Näitä päästöjä arvioitaessa hyödynnettiin hakereaktorin päästökertoimia (Davis et al 2019).

Kalalaitoksella syntyvän lietteen varastoinnin aikaiset päästöt oletettiin olevan merkityksettömiä koska lietettä kuljetetaan jopa viikon väliajoin biokaasulaitokselle, jossa päästöt ovat paremmin hallittavissa. Kalalaitoksen ympäristövaikutuksia myös vähentää se, kun lietettä ei tarvitse biokaasulaitoksen takia jätteenä varsinaisesti jatkokäsitellä tai sijoittaa esim. maaperään. Päästöhyvityksiä ja lietteen pidempiaikaisen varastoinnin päästöjä ei tässä hankkeessa arvioitu ja tarkkaan vertailtu symbioositapaukseen kanssa, sillä kalalietteen pidempiaikaisen varastoinnin aikaisista metaani- ja typpioksiduulipäästöistä ei löytynyt tietoja.

Ketjun kokonaispäästöt kohdistettiin lopputuotteelle eli per myytäväksi päätyvä (perattu) siika (kg).



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000