



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 9/2023

Kaskadivisio:

**Alueellisesti mukautuva biokiertoaloes –
kaskadiprosessoinnilla biomassosta
lisäarvoa, hyvinvointia ja resurssiviisautta**

Tuula Jyske, Kimmo Rasa, Pasi Korkalo ja Johanna Kohl (toim.)

Kaskadivisio:

**Alueellisesti mukautuva
biokiertoaloes –
kaskadiprosessoinnilla biomassoista
lisäarvoa, hyvinvointia ja
resurssiviisautta**

Tuula Jyske, Kimmo Rasa, Pasi Korkalo ja Johanna Kohl (toim.)



Viittausohje:

Jyske, T., Rasa, K., Korkalo, P. ja Kohl, J. 2023. Kaskadivisio: Alueellisesti mukautuva biokiertoal-
lous – kaskadiprosessoinnilla biomassoista lisäarvoa, hyvinvointia ja resurssiviisautta. Luonnon-
vara- ja biotalouden tutkimus 9/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 28 s.

Viittausohje yksittäiseen artikkeliin, jos kyseessä on toimitettu raportti:

Lång, K. & Kekkonen, H. 2023. Kosteikkoviljelyn arvoketjut: ympäristöhyötyjä ja biotuotteita.
Julkaisussa: Jyske, T., Rasa, K., Korkalo, P. ja Kohl, J. (toim.). Kaskadivisio: Alueellisesti mukautu-
va biokiertoal- lous – kaskadiprosessoinnilla biomassoista lisäarvoa, hyvinvointia ja resurssivii-
sautta. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 9/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 28 s.



ISBN 978-952-380-607-8 (Painettu)
ISBN 978-952-380-608-5 (Verkkajulkaisu)
ISSN 2342-7647 (Painettu)
ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)
URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-608-5>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)
Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2023
Julkaisuvuosi: 2023

Toimittajat: Tuula Jyske, Kimmo Rasa, Pasi Korkalo ja Johanna Kohl

Kirjoittajat: Tuula Jyske, Kimmo Rasa, Pasi Korkalo, Johanna Kohl, Erkki Verkasalo, Olli Dahl,
Marketta Rinne, Jyri Maunuksela, Hannu Ilvesniemi, Saija Rasi, Marleena Hagner, Marja Uusitalo,
Markku Vainio, Kristiina Lång, Hanne Kekkonen, Marja Lehto, Minna Kahala, Susanne Heiska,
Eila Järvenpää, Sari Mäkinen, Jaakko Hiidenhovi, Titta Kotilainen, Ilkka Leinonen, Merja Saarinen,
Päivi Abernethy, Matleena Kniivilä, Pasi Rikkinen ja Jutta Kauppi

Kannen kuva: Vastavalo / Juha Määttä

Kuvat ja grafiikat: Jouni Hyvärinen

Taitto: Saara Pönkkö

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

Esipuhe

Paitsi COVID-19-pandemia ja Venäjän hyökkäys Ukrainaan, myös globaalisti niukkenevat luonnonvarat korostavat tarvetta arvioida taloutemme riippuvuuksia ja haavoittuvuuksia omavaraisuudessa ja siten kehittää paikallisten uusiutuvien luonnonvarojen käyttöä: niiden logistiikkaa, kokonaisvaltaista prosessointia ja uudelleenkäyttöä.

Kiertotalous on kokonaisvaltainen talousjärjestelmän murros, jonka päätavoitteena on talouden toimiminen ympäristön kantokyvyn rajoissa. Biokiertotalous taas perustuu uusiutuviin luonnonvaroihin pohjaavan biotalouden kehittämiseen siten, että biomassat sekä niiden sisältämät yhdisteet ja ravinteet hyödynnetään tehokkaasti ja kestävästi samalla, kun lisätään myös uutta liiketoimintaa ja alueellista hyvinvointia. Koko biotalous perustuu tavoitteelliseen ja kestäväan uusiutuvien luonnonvarojen käyttöön. Biokiertotalous edistää jo käyttöön otetun raaka-aineen kokonaisvaltaista hyödyntämistä, mikä säästää parhaimmillaan rahaa ja luonnonvaroja sekä samalla vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Biokiertotalous on kehitysaskel/loikka nykyiselle lineaariselle talousjärjestelmälle, jossa materiaalit kulutuksen jälkeen hylätään. Parhaimmillaan biokiertotalouden ratkaisut jatkavat materiaaliin sitoutuneen arvon kiertoa taloudessa pitkään. Luken biokiertotaloustutkimus tarjoaa elinkeinoelämälle ja koko yhteiskunnalle lisäarvoa tuottavia, tutkimukseen perustuvia ratkaisuja kestäväan alkutuotantoon, tuotevalmistukseen ja palvelumalleihin, huoltovarmuuteen ja omavaraisuuteen sekä pidemmällä tähtäimellä myös vihreään siirtymään markkinaehtoisesti.

Tässä biokiertotalouden kaskadikäytön visiotyössä piirrämme esiin tulevaisuuskuvain mahdollisia kehityskulkuja biomassojen resurssiviisaaseen käyttöön Suomessa. Nostamme esimerkkien avulla laajempaan keskusteluun uudenlaisia, alueellisia biomassan prosessoinnin mahdollisuuksia, niihin liittyviä haasteita sekä tunnistettujen haasteiden ylittämiseen tarvittavia toimenpiteitä ja rakenteellisia muutoksia. Tärkein kysymys on, miten luoda uutta liiketoimintaa ja alueiden omavaraisuutta erilaisten biomassojen prosessoinnilla toimialarajat ylittävissä teollisissa symbiooseissa.

Keskitymme esimerkeissämme biomassojen kokonaiskäyttöön kaskadiprosessoinnin ja -käytön periaatteella. Kaskadiprosessoinnilla tarkoitamme biomassojen mahdollisimman kokonaisvaltaiseen käyttöön tähtäävää, eri yksikköoperaatioiden ketjuista muodostuvaa prosessointia erilaisiksi jatkojalostettaviksi välituotteiksi, lopputuotehyödykkeiksi ja palveluiksi. Tavoitteena on, että prosessien kaikki pää- ja sivuvirrat hyödynnetään hukkan/hävikin välttämiseksi tai minimoimiseksi. Kaskadikäytön määritelmä laajentaa näkökulmaa kattamaan myös tuotteiden ensimmäisen käyttökohteen jälkeisen uudelleenkäytön.

Tulevaisuus ei toteudu juuri koskaan sellaisena kuin sitä ennakoimme. Siksi on tärkeää rakentaa ja analysoida tietoisesti vaihtoehtoisia tulevaisuuskuvia. Jo ennakointiprosessi itsessään avaa näkyvää esimerkiksi epävarmuuksista ja mahdollisuuksista. Tulevaisuutta pohtiessamme nostamme tietoisuutta muutostarpeista yhteiskunnassamme. Liian usein biokiertotalouden ratkaisut sivuutetaan vielä siksi, etteivät ne ole kannattavia tässä ja nyt, niiden toteuttaminen vaatii liikaa investointeja tai uusien biopohjaisten tuotteiden markkina on kehittymätön. Tämän raportin tarkoituksena on peilata toimintaympäristön muutosta ja tarvittavia pidemmän aikavälin kehityskulkuja.

Visiomme on kohdennettu uusiutuvia biomassoja prosessoiville ja biotuotteita ja niihin liittyviä palveluja tarjoaville tai suunnitteleville yrityksille samoin kuin kiertotalouden kehittämistä tukeville julkisen sektorin päättäjille ja kehittäjäyhteisöille. Toivomme, että esitetyt tulevaisuuskuvat herättävät biokiertotalouden kaikkia sidosryhmiä pohtimaan kestävyystavoitteiden saavuttamista ja vihreää siirtymää yhteiskunnassa pitemmällä aikavälillä. Visiotyön tulosten on tarkoitus innostaa jatkopohdintaan ja tulkintaan siitä, mitä tällaiset visiot tarkoittaisivat yritysten omassa liiketoiminnassa, toimialojen kehittämisprosesseissa tai alueellisessa kehitystyössä. Tätä varten tarvitaankin laajempaa keskustelua siitä, millä tavalla esitetyt tulevaisuuskuvat voisivat olla toteutettavissa, millaisin reunaehdoin ja mikä on pitkillä aikavälillä mahdollista.

Helsingissä 17.1.2023
Kirjoittajat

Sisällys

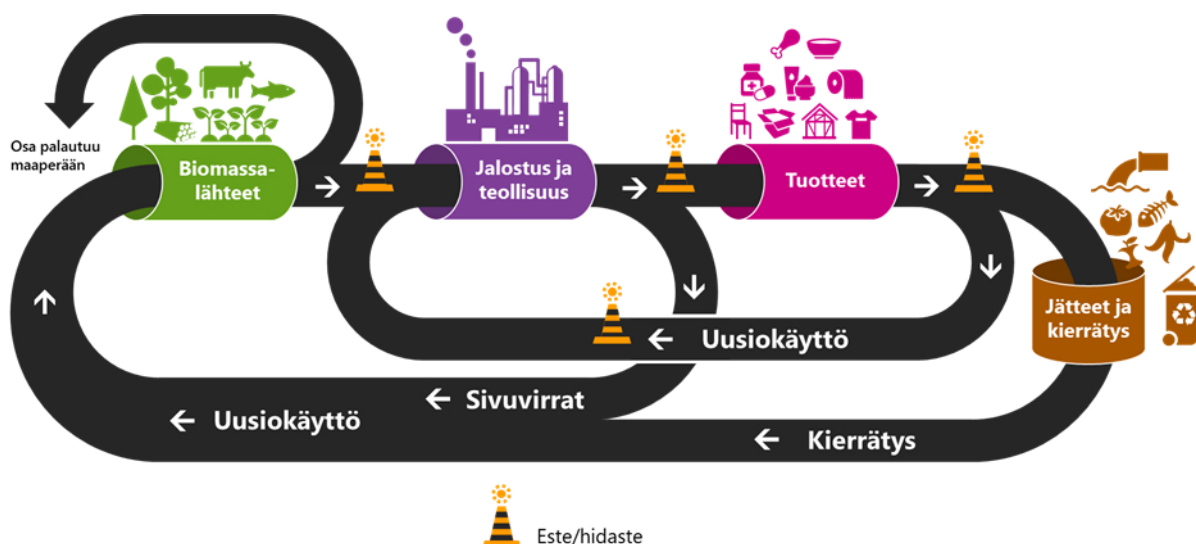
1. Johdanto.....	4
2. Esimerkkitarkastelut.....	9
Esimerkki 1. Visio alueelliseen kaskadiprosessointiteknologiaan pohjautuvista toimintamalleista, sekä bio- ja kiertotalouden toimijoiden muodostamista aroverkoista.....	9
Esimerkki 2. Visio uusiutuvista energiamuodoista osana biomassojen alueellista kaskadiprosessointia.....	15
Esimerkki 3. Nurmibiojalostamo tuottaa vuonna 2030 ruokaa, rehuja, lannoitteita, energiaa ja materiaaleja.....	16
Esimerkki 4. Kosteikkoviljelyn arvoketjut: ympäristöhyötyjä ja biotuotteita.....	17
Esimerkki 5. Yritysten yhteistyö lisää elintarviketuotannon sivujakeiden materiaalitehokkuutta ja kannattavuutta.....	18
3. Lopuksi - Kaskadiprosessoinnin ja -käytön reunaehdoista.....	22
Kiitokset.....	24
Sanasto.....	25
Viitteet.....	26

1. Johdanto

Lyhyt oppimäärä biomassojen kaskadiprosessointiin. Mitä on alueellinen biokiertoisuus 30 vuoden kuluttua?

Erkki Verkasalo, Olli Dahl ja Marketta Rinne

Vuonna 2050 **globaalisuus** elinkeinoelämässä ja kaupankäynnissä sekä valtioiden ja liittoumien **omavaraisuustarpeet ja protektionismi** kilpailevat visioina ja taistelevat keskenään raaka-aineiden ja energian hyödyntämisessä ja tuote- ja palvelumarkkinoilla. Ilmastonmuutoksen hillintä ja **fossiilisten raaka-aineiden** kuten muovin ja **energian korvaaminen uusiutuville raaka-aineilla** ovat edistyneet, mutta niiden vahvistaminen on edelleen ajankohtaista teollisuudessa, rakentamisessa ja liikenteen ratkaisussa. Huoli ympäristön tilasta ja paine ruoantuotannon kestävyuden lisäämiseen ja ruokaturvan takaamiseen kasvavalle väestölle globaalisti vaikuttavat ratkaisevasti maankäyttöön ja luonnonvarojen hyödyntämiseen



Kuva 1. Biokiertoisuus on elämän edellytys: alueellinen toiminta ja yhdistelmät hajautettuja ja keskitettyjä tuotantomalleja mahdollistavat raaka-aineiden kestävä käyttö.

Kaskadiprosessoinnin määritelmä

Kaskadiprosessointi tarkoittaa sitä, että raaka-aineesta (biomassan pää- tai sivuvirta) erotetaan toisiinsa peräkkäin kytkeytyvillä teknologisilla yksikköprosesseilla erilaisia arvo-komponentteja ja biotuotteita siten, että koko biomassa tulee täysimääräisesti hyödynnettyä mahdollisimman korkean lisäarvon tuotteiksi, ravinteiksi ja energiaksi, välttämällä samalla uusien hyödyntämättömien sivutuotteiden synnyn. Esimerkkejä kaskadiprosessoinnista on mm. metsäteollisuuden prosesseissa syntyvän kuorisivuvirran vesiliukoisten fenolisten arvokomponenttien uuttaminen ja jäljelle jäävän prosessirejektin ohjaaminen edelleen esimerkiksi hidaspölylyysiin eli kuivatislaukukseen ja mädätysprosessiin (yhtenä syötteenä muun biomassan kanssa), jolloin rejektistä saadaan biohiiltä, puuetikkaa, mädätettä ja energiaa (Rasi ym. 2019). Mädätejännös ja uutettu kuorirejektin voidaan edelleen hyödyntää vaikkapa maanparannusaineena (Peltoniemi ym. submitted).

Lähtökohtia ja perusteluja – Suomen biomassojen jalostuksen näkymä vuonna 2050

Entä jos 30 vuoden kuluttua neitseellisten raaka-aineiden käytön rajoitukset ja raaka-aine- ja elintarvikepula ovat johtaneet biopohjaisten hybridiratkaisujen yleistymiseen (yhdistettynä muihin raaka-aineisiin ja materiaaleihin), kierrätys- ja uusiokäytön merkittävään kasvuun ja ennen jätteiksi tai sivutuotteiksi luokiteltujen materiaalien tärkeään rooliin ja sovelluksiin erityisesti kaskadikäytössä – mutta myös uusimuotoisissa bioenergian käyttötavoissa ja elintarviketuotannossa. Puuraaka-aineista ja elintarvikkeista on pula maailmanlaajuisesti mutta myös Suomessa kysynnän kasvun ja tuotannolle käytettävissä olevan alan rajallisuuden ja rajoitusten vuoksi – huolimatta metsä- ja maataloustuotannon tehostamisesta siihen käytettävällä alalla.

Suomella on monia biomassojen tuotantoon liittyviä erityispiirteitä. Selkeä vahvuutemme on suuri maapinta-ala väestöön suhteutettuna, joten olemme biomassan tuotannon suurvalta henkeä kohti. Toisaalta maa-alastamme peltopinta-alan osuus on EU:n pienin, joten metsäbiomassojen tuotanto korostuu. Myös pohjoiset olosuhteet vaikuttavat biomassojen tuotantoon eli kasvunopeuteen ja oloihimme sopiviin kasvilajeihin. Peltoviljelyssä nurmien suuri osuus korostuu ilmastomme takia, mutta pelloilla tuotetaan myös viljoja ja monenlaisia erikoiskasveja, jotka soveltuvat mm. proteiinien, öljyjen ja bioaktiivisten yhdisteiden tuottamiseen. Palkokasveja (apilat, herneet, pavut) käyttämällä pystytään sitomaan ilmakehän tyypeä kasveille käyttökelpoiseen muotoon ja tuomaan systeemiin biogeenistä tyypeä. Peltokasvien lajikirjo ja satoisuus on kasvanut vuoteen 2050 mennessä ilmaston lämpenemisen myötä.

Entä jos vuonna 2050 kaskadisuus määritellään ja sitä sovelletaan elinkeinoelämässä kansallisten ja paikallisten lähtökohtien perusteella, vaikka globaali ja eurooppalainen regulaatio ovat harmonisoineet toiminnallisia periaatteita ja poliittisia ratkaisuja ja tiukentaneet kaupallisia menettelytapoja. Biomassan käyttömahdollisuudet ovat sidoksissa ensisijaisesti maankäyttöön, vaikka biomassan edut raaka-aineena ja tuotepohjana tunnustetaan: mihin tarkoitukseen ja kuka saa käyttää maapinta-alaa?

Digitaalinen murros ja alustatalous toimivat biokiertoalouden mahdollistajina. Datan monipuolinen hyödyntäminen ja keinoöly ohjaavat raaka-aineiden ja materiaalien tehokasta kiertoa. Mm. lohkoketjujen kehittyminen mahdollistaa biomassojen kokonaisvaltaisen käytön suunnittelun aina korjuuketjusta loppukäyttökohteeseen asti. Digitaalisen murroksen tiedollinen, teknologinen ja sosioekonominen perusta (Leinonen ym. 2017) pysynee vuonna 2050, mutta uudet radikaalit innovaatiot ja kokeilut sekä eettisyys haastavat perinteisiä tekniikoita ja teknologioita.

Biojalostamot ja raaka-ainepohja vuonna 2050

Entä jos hoidetuista luonnonmetsistä on biotaloudessa siirrytty lähes kokonaan viljely- ja sekametsiin sekä puun ja muiden kasvilajien tuotantoon turvetuotannosta vapautuvilla mailla ja muilla metsitettävillä ns. joutomailla. Kehityksen kulku riippuu kuitenkin maankäytön poliittisesta ohjauksesta. Talousmetsissä ja maataloudessa tehtävät toimenpiteet hiilensidonnalla ja monimuotoisuuden ylläpitämiseksi ovat edistyneet jo ennen kansainvälisessä vertailussa hyvältä tasolta, mutta aiempaa suurempi osa metsä- ja maatalouspinta-alasta on siirtynyt pois talouskäytöstä. Tämän seurauksena käytettävissä olevan puuraaka-aineen ja maatalouden tuotannon määrä on pienentynyt, mutta tätä kompensoi tuotannon tehostaminen käytettävissä olevalla pinta-alalla, eräiltä osin myös ilmastonmuutoksen aiheuttama kasvun edellytysten parantaminen boreaalisella ilmastovyöhykkeellä.

Biotuote- ja elintarviketeollisuus tuottaa nyt vähemmästä enemmän ja pienemmällä henkilöstömäärällä ja hyödyntää aikaisempaa enemmän kierrätysraaka-aineita. Biojalostamot ovat keskittyneet sellaisille seuduille sekä teollisuuspuistoihin ja muihin teollisiin ekosysteemeihin.

hin, joissa raaka-aineen ja energian saanti on turvattu (höyry ja sähkö). Ns. vihreät energiamuodot ovat kehittyneet huomattavasti, ne on määritelty regulaatioissa ja teolliset investoinnit voivat perustua vain niiden hyödyntämiseen.

Perus- ja sivuvirtaraaka-aineiden hankinta-alueet ovat nykyistä laajempia ja edellyttävät resurssi- ja energiatehokkaita logistisia ja organisatorisia innovaatioita. Erilaisten raaka-aineiden lajittelu käyttötarkoituksen mukaan korostuu ja alkuperän luotettava todentaminen on ehdoton vaatimus raaka-aine- ja tuotekaupassa.

Suurteollisuus ja PK-teollisuus vuonna 2050

Entä jos teollisuuden ekosysteemit eli teolliset symbioosit, joissa yhdistyvät neitseellisten raaka-aineiden, sivutuotteiden ja jätteiden hyödyntäminen, ovat vallitsevia tuotannollisia ratkaisuja biomassojen hyödyntämisessä. Suomessa teolliset ratkaisut ulottuvat konsernitason integraatioista alueellisiin yritysverkostoihin ja paikallisiin teollisuuspuistoihin, joihin molempiin kytkeytyy spin-off-tyyppistä yritystoimintaa metsä-, agro-, vesiviljely- ja teollisten biomassojen kokonaisvaltaiseksi hyödyntämiseksi sekä liiketoiminnan ja kilpailukyvn edellytysten varmistamiseksi.

Vuonna 2050 biomassan kaskadikäyttö on tullut osaksi arkipäivää ja uusia entisestä suurteollisuudesta (erityisesti metsäteollisuudesta) riippumattomia pieniä ja keskisuuria (PK) yrityksiä on syntynyt biojalostukseen runsaasti erityisesti niille alueille Suomessa, joihin suuren metsäteollisuuden biomassan hankinta ei enää kohdistu. Nämä biojalostamot työllistävät ihmisiä ja edistävät aluetaloutta yhä enemmän. Koulutusta on uudistettu vastaamaan biokiertoalouden osaamisen tarpeita.

Entä jos biojalostuksen PK-yritykset käyttävät raaka-aineenaan metsä- ja maatalouden sivuvirtoja ja enenevässä määrin nopeakasvuista biomassaa, jota on ryhdytty kasvattamaan suopohjaisilla pelloilla, entisillä turvetuotantoalueilla kosteikkoviljelmien ja metsissä, joissa perinteisten valtapuulajien menestymisen edellytykset ovat muuttuneet ilmastonmuutoksen myötä (vrt. havupuut, joita erilaiset luonnontuhot uhkaavat aikaisempaa enemmän, ja erilaiset lehtipuut, jotka ovat yleistymässä niille sopivilla kasvupaikoilla). Biomassalaaduksi on valikoitunut puita ja muita kasveja, jotka viihtyvät lämmenneessä ilmastossa ja kestävät bioottisia luonnontuhoja (tuulet ja myrskyt, kuivat kaudet, pohjoista kohti levinneet tuholaiset ja taudit). PK-biojalostamoiden kohtuullinen energian tarve katetaan pääosin itse tuotetulla tai teollisuuspuistossa tuotetulla sähköllä. Biomassaa käytetään vuonna 2050 suoraan lämmöntuotantoon vähemmän kuin ennen. Biomassat ovat kuitenkin osana tulevaisuuden energiaratkaisuja (katso esimerkki 2, kuva 5), mukaan lukien liikennepolttoaineiden valmistus. Biomassaa käytetään sen sijaan optimoitusti ja yhä tehokkaammin uusien kuitutuotteiden, kemikaalien ja erilaisten lisäarvotuotteiden valmistamiseen.

Biojalostamoiden sivuvirroista jalostetaan hiilipitoisia kierrätyslannoitevalmisteita, joilla korvataan keinolannoitteita ja alkutuotannon hiilivajetta (maaperästä häviävä hiili). **Elintarvikkeiden tuotannossa ja kotieläinten ja kalan kasvatuksessa tarvittavat raaka-aineet ja rehut tulevat entistä useammin kasvi-, eläin- ja puuntuotannon biomassasta (pää- ja sivujakeet) samoin kuin maaperän kunnostuksen ja vedenpuhdistuksen ratkaisut** (mm. erilaiset vedenpuhdistuspolymeerit, maaperän puhdistaminen kasvien avulla eli fytoimediaatio).

Suuri metsäteollisuus vastaa valtaosasta metsien käyttöä isoissa tuotantolaitoksissa, joissa uudet kuitupohjaiset pakkaus- ja rakennustuotteet sekä korkean lisäarvon ligniini-, hemiselluloosa- ja uuteainepohjaiset tuotteet ovat kasvavassa roolissa. Vuonna 2050 Suomi on vähentänyt raakasellun vientiä sellaisenaan ulkomaille ja on rakentamassa perinteisen metsäteollisuuden arvoketjun laajennusta koko arvoketjun osalta mm. tekstiiliteollisuuden ympärille. Itse biomateriaalikehityksessä fossiilimuovien korvaamisesta on jo vuonna 2050 osin siirrytty tuottamaan funktionaalaisia tuotteita, eli esimerkiksi selluloosan ja ligniinin luontaisia ominaisuuksia hyödynnetään tuottamaan lisäarvoa. Biomimikointi tuotesuunnittelussa on paljon yleisempää kuin ennen.

Tämä metsäteollisuus ei työllistä ihmisiä suoraan samassa määrin kuin vielä 2020-luvulla, mutta tarvitsee edelleen huomattavasti erilaisia ulkopuolisia palveluita ja urakointia. Kokonaisuudessaan **työllistämisvastuu on yhä enemmän PK-yrityksillä**. Biojalostuksen PK-yrityksistä merkittävä osa on kasvanut maailmanluokan toimijoiksi omilla erikoistumisalueillaan tuotannossa ja teknisten palveluiden myynnissä. **”Materiaalit palveluna” (“materials-as-services”) -tyyppiset konseptit ovat arkipäivää, jolloin ei enää osteta omistajuutta vaan käyttöoikeutta kiertäville materiaaleille**. Tämä **mahdollistuu digitalisaation ja pilvipalveluiden avulla**. Lohkoketjut tekevät materiaaleista seurattavia ja sitä kautta ketjut ovat toimivia. Myös keinoäly on jo ihmistä älykkäämpää ja algoritmit toimivat logistiikkaohjaajina.

Metsä- ja puuteollisuuden sivutuotteiden markkinat ovat laajentuneet monipuolisesti sellun, paperin ja kartongin valmistuksesta ja perinteisestä bioenergiasta bioteknologian ja kemianteollisuuteen ja tekstiili-, akku- ja muuhun teknologiateollisuuteen. Selluteollisuus on integroitunut kotimaassa ja maailman markkinoilla näiden uusien toimialojen arvoketjuihin.

Kiertotalous edellyttää uutta yrittäjyyttä ja uudenlaisia omistusrakenteita sekä korkeaa tietotaitoa luonnonvarataloudessa. Perheyrittysten sukupolvenvaihdokset, ammattitaitoisen työvoiman ja asiantuntijoiden saatavuuden vahvistaminen, nuorten mielenkiinnon herättäminen ja koulutus- ja valmennusohjelmista huolehtiminen ovat avainasemassa kehitettäessä yritysten toimintaa ja otettaessa käyttöön kaskadisuusperiaatteen mukaisia strategioita ja toimintatapoja.

Puutuoteala ja puurakentaminen vuonna 2050

Entä jos vuonna 2050 puutuoteteollisuus toimii maksimaalisessa laajuudessa, resurssitehokkaasti ja täysin suljetuilla kierroilla raaka-aineen saatavuuden mahdollistamissa rajoissa ja on onnistunut lisäämään merkittävästi jatkojalosteiden osuutta liikevaihdosta uusilla rakentamisen ja sisustamisen tuotteilla ja hyvinvointikokonaisuuksilla. **Puun ja muiden biomateriaalien hybridiratkaisut ovat vakiintuneet rakentamisessa ja raskaiden kuormien pakkauksissa. Puu- ja hybridirakennukset ovat suosittu asumismuoto** haja-asutusalueiden ja taajamien lisäksi suurissa kaupungeissa. Teollisen puu- sekä hybridirakentamisen kehittäminen, onnistuneet mallikohteet ja yleisen osaamisen ja koulutuksen ajantasaisuus ovat tehneet puusta kilpailukykyisen rakennusmateriaalin monikerrosrakennusten rakentamisessa, monissa rakennuskohteissa ohi betonin ja teräksen. Asujien ja **loppukäyttäjien toiveet ja julkinen sääntely vaikuttavat keskeisesti rakennustapaan ja -materiaaliin**. Kysynnän takaavat puurakentamisen hiilijalanjälki ja hiilikädenjälki, pitkäikäiset rakennukset, niiden muunneltavuus, rakennusosien uudelleenkäyttö ja kierrätettävyys, korkea laatu, funktionaalisuus ja ekosuunnittelun käyttöönotto, puhumattakaan hyödyistä ihmisten terveydelle ja hyvinvoinnille.

Entä jos vuonna 2050 puu on vakiinnuttanut asemansa julkisten palvelukeskusten, liike- ja toimistotilojen ja **infrastruktuurin rakentamisessa** ja tehnyt läpimurron vastuullisuuttaan korostavassa vuokra- ja omistusasuntojen kaupunkirakentamisessa. Puu on vahvistanut jo ennestään vahvaa markkinaosuuttaan omakoti- ja rivitalojen, vapaa-ajan ja kakkosasuntojen ja matkailukohdeiden rakentamisessa. Teollisen puurakentamisen osaaminen on kansainvälisesti korkealla tasolla, ja puurakentamisen vienti on kasvanut merkittävästi. Vihreän siirtymän rakennusmääräykset, kaavoitus ja ympäristölainsäädäntö tukevat uudisrakentamista ja varsinkin korjausrakentamista puusta. Puuta sisältävistä **rakennus-, purku- ja pakkausjätteistä valmistettavat uudet kaskadi-tuotteet tukevat kiertotaloutta** ja voivat edistää uudelleen- ja korjausrakentamista, mutta täydentävät ennen kaikkea raaka-aineiden tarjontaa puusivuvirtoja käyttävälle toimialarajat ylittävälle teollisuudelle.

Kaupunkien ja haja-asutusalueiden synergia

Entä jos vuonna 2050 kaupungistuminen ja palveluiden keskittyminen on jatkunut, mutta hidastuu. Maaseudun elinvoima on kohentunut ja haja-asutusalueiden pitäminen asuttuna on entistä pa-

remmin mahdollista yhteiskunnan ja elinkeinoelämän edellä mainittujen kehitysaskelten ja vihreän siirtymän ansiosta. Tämä edellyttää riittävää työvoima- ja yrittäjäpohjaa maakuntien biotaloudessa. Pandemiat ja etätö ovat antaneet sysäyksen ihmisten asumiseen ja työskentelyyn aikaisempaa enemmän maaseudulla ja pienemmissä taajamissa, hankkimaan kakkosasuntoja ja panostamaan entistä enemmän erilaisten ekosysteemipalveluiden käyttöön.

Metsätalous, puuta käyttävät teollisuus ja yrittäjäyys ja teollisuuden sivuvirtojen synty lähteet sijaitsevat aiempaa enemmän kaupunkialueiden ulkopuolella, kun taas kaupungeissa käytetään monipuolisesti puusta saatavia tuotteita, rakennetaan entistä enemmän puusta, yhdistetään rakennetussa ympäristössä talot, pihapiiri ja viherympäristö sekä muu infrastruktuuri ja synnytetään valtaosa rakentamisen ja asumisen jätteistä. Kokonaisuus ja sen integroiminen yhteen on tärkeä osa suomalaisen yhteiskunnan maaseudun ja kaupunkien positiivista vuorovaikutussuhdetta ja tasapainoista kehitystä.

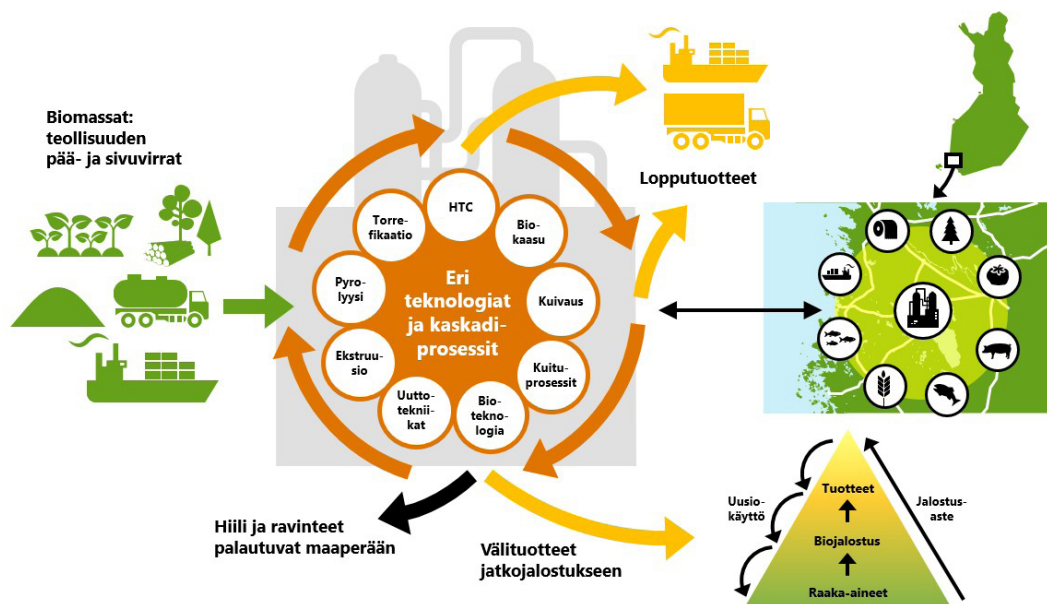
Toimenpide-ehdotuksia	
Ohjausmenetelmä	
Lainsäädäntö ja regulaatiiviset toimet	<ul style="list-style-type: none"> • Kaskadisuus-periaatteiden määrittely ja kansallinen soveltaminen lainsäädännössä ja regulaatiossa ottaen huomioon Suomen tarpeet ja mahdollisuudet materiaali- ja energiakäytöissä – edellytys biomassan kaskadikäytön kehittymiselle. • Uusien biojalostamojen ja metsäteollisuuden investointien ympäristöluvut ja julkisen rahoituksen ehdot: sivumateriaalivirtojen ja ylimääräenergian käyttösuunnitelma pakolliseksi, tuetaan virtojen täysimääräistä hyödyntämistä tavoitteena suljetut kierrot ja erittäin energiatehokkaat ratkaisut. • Fossiilisten raaka-aineiden ja energialähteiden substituution edistäminen velvoittavalla lainsäädännöllä, tuki- ja verotuspolitiikalla ja julkisten hankintojen määräyksissä. • Ravinteiden ja hiilen kierron edistäminen velvoittavalla lainsäädännöllä, tuki- ja verotuspolitiikalla ja julkisten hankintojen määräyksissä, mm. kierrätyslannoitteet, biohiili ja -kaasu, hiilen ja kasvihuonekaasujen talteenotto ja edelleen hyödyntäminen.
Mittaus ja ohjeistus	<ul style="list-style-type: none"> • Kattava ohjeistus hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen laskentaan ja soveltamiseen teollisuus- ja kuluttajatuotteissa, mm. rakentamisessa, asumisessa ja työpaikoilla. • Rakennusmääräysten ja muun regulaation ajantasaistaminen tukemaan ja mahdollistamaan korjaus-, muutos- ja uudelleenrakentamista ja rakennus-, purku- ja pakkausmateriaalien kierrätystä. • Rakentamislupiin ja tontinluovutusehtoihin rakennusten ja rakenteiden materiaali-, jäte- ja elinkaarisuunnitelma ja rakennuksen elinkaaren kattava päästöjen raja-arvojen ja jätehuollon vastuiden määrittely. • Teollisuuden ja rakentamisen kaatopaikkajätteiden kieltäminen (siirtymäjalla).
Koulutus	<ul style="list-style-type: none"> • Valtakunnallinen koulutus- ja yrittäjävalmennusohjelma biokiertotalouden ja vihreän siirtymän tulevaisuuden osaamisen kattamiseksi.
Rahoitus	<ul style="list-style-type: none"> • Puu- ja hybridirakentaminen: vihreän siirtymän TKI- ja investointitukien laajamittainen hyödyntäminen, eurooppalaisista ja suomalaisista lähteistä. • Aluepoliittiset ohjelmat ja rahoitusohjelmat tukemaan vahvasti vihreää siirtymää ja uusia teollisia ekosysteemejä biojalostuksessa ja puuta eri muodoissaan käyttävässä teollisuudessa sekä kaupungit – maaseutu elinvoimaisuuden tasapainottamisessa.

2. Esimerkkitarjastelut

Esimerkki 1. Visio alueellisista kaskadiprosessointiteknologioihin pohjautuvista toimintamalleista sekä bio- ja kiertotalouden toimijoiden muodostamista arvoverkoista

Kimmo Rasa, Pasi Korkalo, Jyri Maunuksela, Hannu Ilvesniemi, Saija Rasi, Marleena Hagner ja Marja Uusitalo

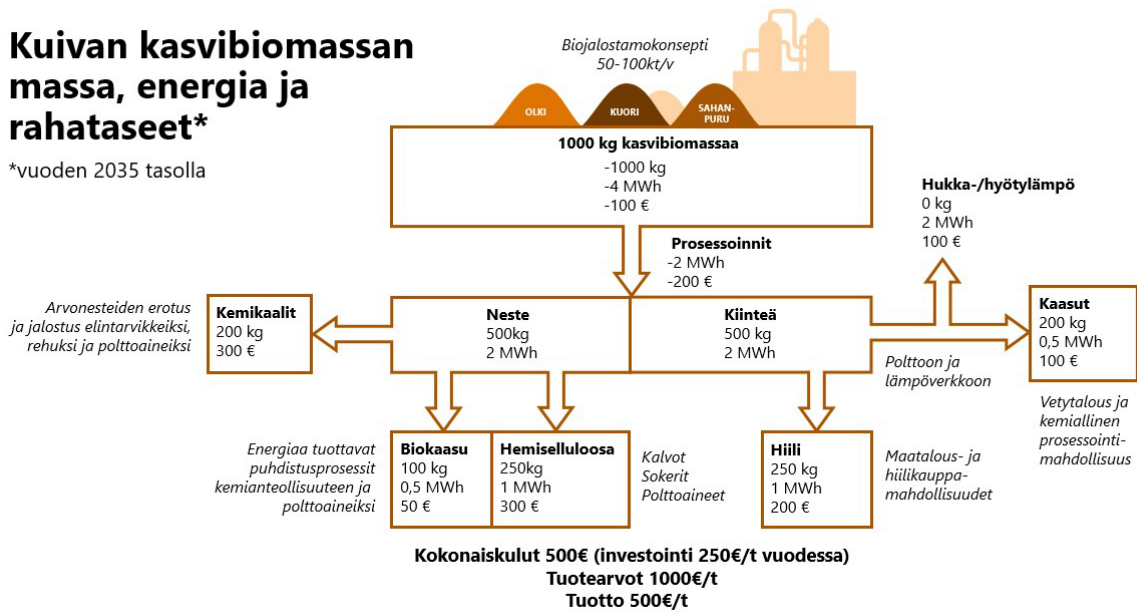
Alueelliseen kaskadiprosessointiin pohjautuvan hajautetun biojalostamon tehtävänä on hyödyntää lähiympäristön moninaisia ja vuodenaikojen mukaan vaihtelevia biomassoja (Kuva 2A). Jalostamo tuottaa sekä lopputuotteita että välituotteita kuljetettavaksi jatkojalostukseen, kun taas osa biomassan ravinteista ja hiilestä palaa takaisin alueen maaperään. Esimerkkejä alueella syntyvistä biomassasivuvirroista ovat olki, kuori, sahanpuru, lanta, kasvitähteet, kalan perkuujäte, yhdyskuntien biojäte ja jätevesiliete. Logistiikka toteutetaan muuntuvala tieliikennekalustolla noin 50 km:n säteellä jalostamosta ja tässä hyödynnetään logistisia ratkaisuja, joissa maksimoidaan kuljetustehokkuus-, hygieni- sekä muut turvallisuusvaatimukset (Winqvist ym. 2022). Toimintamallin sisällä sijaitsee merisatama, mikä mahdollistaa raaka-aine- ja tuotelogistiikan toteuttamisen myös laivaliikenteenä pidemmille välimatkoille.



Kuva 2A. Alueelliset hajautetut tuotantojärjestelmät tarjoavat jatkossa toimeentuloa ja liiketoimintamahdollisuuksia kaupungeille ja maaseutuyhteisöille. Biomassan kokonaisvaltainen käyttö saavutetaan kaskadiprosessointikonsepteilla. Oheisen esimerkkikuvan biomassalähteet sijaitsevat 50 km säteellä biojalostamosta.

Kuivan kasvi­biomassan massa, energia ja rahataseet*

*vuoden 2035 tasolla



Kuva 2B. Esimerkki biomassan käytöstä kaskadiprosessissa, sen taloudesta, massa- ja energiataseista sekä tuotteiden monipuolisuudesta. Tulevaisuuden tavoitteena on nostaa biomassojen käytön tehokkuutta askeleittain. Kuvassa 2B on hahmoteltu vuoden 2035 saavutettavaa kannattavuutta (askel d). Tavoitetasot muodostuvat seuraavasti: a) Nykyisten uudentyyppisten biojalostamoinvestointien tuottavuuden turvaaminen lyhyellä aikajänteellä ja uuden ajattelun istuttaminen bioteollisuusympäristöön. Pääajatuksena on sivutuotteiden laajeneva hyötykäyttö ja jatkojalostus. b) Biomassan kokonaisvaltaisen hyödyntämisen tehostaminen ja uusiutuvan energian lisääminen (ks. Kuva 3, 5). c) Prosessoinnin tehostaminen arvotuotteiden suuntaan. d) Alhaisimpien tuoteratkaisujen kuten polton ja kuidunvalmistuksen korvaaminen muilla tuoteratkaisuilla ja jatkojalosteilla (tekstiilit, kemikaalit, hiilituotteet, ravinteet). Kuvassa 2B nestemäinen jae hyödynnetään kemikaaleina sekä materiaalien ja biokaasun tuotannossa. Kiinteästä jakeesta voidaan erottaa kuitua ja ligniiniä tai pyrolysoida sellaisenaan ja tuottaa energiaa sekä hiiltä ja kemikaaleja eri käyttökohteisiin (Kuva 4, <https://naturpolis.fi/mannynkuoresta-arvotuotteeksi-olisiko-se-mahdollista-koillismaalla/>, Rasa ym. 2021).

Prosessiteknologia perustuu osin moduuliratkaisuihin ja on siten sekä helposti skaalautuva että tarvittaessa siirreltävä. Mukautuvan biojalostamon perusteknologiat ovat anaerobiprosessi biokaasun tuotannossa, termokemiallisen konversion tekniikat, kuten kuiville biomassoille soveltuvat torrefikaatio ja pyrolyysi, sekä vesipitoisille biomassoille sopiva märkäpyrolyysi, erilaiset uuttotekniikat ja tarvittavat nesteenerotus- ja kuivausteknologiat. Aurinko- ja tuulienergian (Kuva 5) ohella mukautuva laitoskokonaisuus kykenee hyödyntämään biokaasu- ja pyrolyysiprosesseissa syntyviä energia- ja lannoitejakeita sen mukaan, minkälaiseen kokoonpanoon ketjutettu kokonaisuus on järjestelty. Täysin uudenlaiset prosessiteknologiat ja niiden yhdisteltävyys lisäävät resurssiviisasta materiaalien prosessointia (Kuva 2B) (Ho ym. 2022, Kotilainen ym. 2021, Lokka ym. 2021, Viherä-Aarnio ym. 2022).

Prosessien ajojärjestys ja prosessiparametrien muunneltavuus mahdollistaa alueen erilaisen sesonkiluonteisten biomassojen tehokkaan hyödyntämisen ja tuotannon ohjaamisen kysyntäperusteisesti. Siirreltävien moduuliratkaisujen ansiosta osa teknologiasta on sijoitettavissa tarpeen mukaan biomassalähteiden välittömään läheisyyteen, jolloin raaka-aineet voidaan esikäsitellä tai prosessoida puolivalmisteiksi jo biomassojen tuotantoalueella. Menetelmän etuna on kyky muodostaa paremmin säilyvää ja liikuteltavaa raaka-ainetta sekä toteuttaa osa teknologiaketjutusten prosessivaiheista ennen materiaalin siirtoa biojalostuskeskukseen. Esimerkkejä biojalostamon tuote­portfoliosta ovat biokaasuprosessista saatavat biomuovien

ja polttonesteiden valmistukseen sopivat orgaaniset hapot (Rasi ym. 2022, Bartek ym. 2021), polttoaineeksi tai kemikaalien lähtöaineeksi nesteytetty biometaani (FarmGas-PS2-hanke: <https://www.youtube.com/watch?v=7uZFQQgeal4>), kasviperäisistä sokereista konvertoituneet bulkkikemikaalit lähtöaineiksi ja reagensseiksi hienokemikaalien tuotantoon, hemiseluloosasta torrefikaatiolla tuotettu puuetikka kasvinsuojeluaineena (Korkalo ym. 2022) tai sovelluksissa, joissa tavoitteena on happamuuden säätö (Keskinen ym. 2018), torrefikaatiolla esikäsitelty biomassa biohiilen raaka-aineeksi, biohiili aktiivihiilen lähtöaineena (Rasa ym. 2021), märkäpyrolyysin välituotteet jalostettavaksi liikennepolttoaineiksi sekä orgaaniset lannoitevalmisteet käytettäväksi maa- ja metsätalouden hiili- ja ravinnelähteinä (Heikkinen ym. 2019, Keskinen ym. 2021, Sarvi ym. 2021).

Visioidaan, että esimerkin 2A biojalostamossa käytetyt teknologiat saavuttavat maturiteetin 2030-luvun tienoilla. Teknologioiden joustavuus on lisääntynyt, niiden ketjuttaminen on onnistuttu optimoimaan, moninaisten välituotteiden jatkojalostus korkean lisäarvon tuotteiksi on pitkälle edistynyt ja niiden kysynnällä on vahva kasvutrendi.

2030-luvulla ensimmäiset teollisen mittakaavan pilottijalostamot ovat nousseet alueille ja globaali kysyntä erilaisille biojalostamotuotteille alkaa tuottaa paikallista jatkojalostusteollisuutta vientivetoisen kysynnän rinnalle. 2050-luvulla tuotteiden maltillisen volyymin aiheuttamat haasteet on selätetty korkean lisäarvon tuotteiden ja tehokkaiden logistiikkaratkaisuiden avulla. Jalostamon kampanjamuotoinen prosessointi mahdollistaa samanaikaisesti jatkuvan työllisyyden, lisäarvotuotteista saatavan arvonlisän maksimoinnin sekä kokonaiskestävyyden ja hiilinegatiivisuuden yli tarkastelujakson.

Kuvassa 2B esitetään fraktiointeihin, termisiin prosesseihin ja pilot-kokeisiin perustuva asetelma, jossa tuotetaan ja jatkoprosessoidaan erilaisia päätuotteita ja sivutuotteita mahdollisimman korkealla biomassan hyödyntämistäasteella. Kuvasta 2B nähdään, että biomassojen prosessoinnille voidaan saada kannattavuutta pitkällä aikavälillä tarkasteltuna. Taloudellinen ajattelu ja mahdollisuudet perustuvat erilaisten prosessivaihtoehtojen optimaaliseen yhdistämiseen. Materiaalin yliprosessointi heikentää saantoja, lisää prosessointikustannuksia ja alentaa kokonaiskannattavuutta. Biomassan arvostuksen myötä tuotearvot kohoavat ja syntyy poliittista painetta ohjata yhteiskuntaa lainsäädännöllä biomassan kestävään käyttöön. Kohonnut arvostus nostaa hintoja ja mahdollistaa raaka-aineiden kaskadikäytön uudelleen prosesseihin.

Uudenlaiset teknologiat ja niiden yhdistelmät mahdollistavat raaka-aineiden resurssivii- saamisen prosessoinnin (Rasi ym. 2019), koska ne huomioivat myös syntyvien sivuvirtojen laadun ja mahdollistavat niiden paremman jatkojalostuksen. Biomassaa käytetään energiantuotantoon vain rajatusti prosessoinnin lämpöä tuottavina reaktioina. Biomassan komponentit hyödynnetään mahdollisimman alkuperäisessä muodossaan. Biomassasta erotetaan kaupallisesti hyödyllisiä jakeita komponentti komponentilta hyvällä saannolla ja ilman turhia prosessivaiheita. Tärkeää on, että prosessointi etenee vaihe vaiheelta siten, että seuraavat vaiheet helpottuvat. Lopputuotteet eivät ole vain täysin puhtaita jakeita, vaan saantoihin kiinnitetään erityistä huomiota ja pyritään löytämään yhdistelmätuotteita, jotka korvaavat monia nykyisin käytettyjä raaka-aineita. Bioraaka-aineilla ei korvata vain fossiilisia matalan arvon tuotteita, koska biomassat eivät siihen riitä. Sen sijaan valmistetaan tuotteita, jotka ovat kierrätettäviä, sitovat hiiltä pitkään ja hyödyntävät biomassan luonnollisia ominaisuuksia monipuolisesti.

Erilaiset konversio- ja rikastustekniikat ovat avainasemassa uusien prosessien suunnittelussa. Eri käyttömuotojen kannalta hyödyllisten kemiallisten yhdisteiden määrää lisätään ja vähemmän hyödylliset yhdisteet käytetään niissä tuotteissa, joissa niiden aineominaisuudet ovat parhaimmillaan. Näin jalostetaan tuotteita, jotka ovat aineominaisuuksiltaan ja käyttö-

kelpoisuuksiltaan alkuperäistä biomassaa parempia, kierrätettävämpiä ja stabiilimpia. Sivuvirtojen tehokkaalla jatkokäytöllä hiileksi, biokaasuksi tai lannoitteeksi varmistetaan niiden hyödyllisyys kokonaistalouden kannalta.

Myös energian- ja ruoantuotannon yhdistävät biokiertotalouskokonaisuudet käyttävät vuonna 2050 alueiden keskeisiä orgaanisia sivuvirtoja (Kuva 3). Ekosysteemeihin voidaan rakentaa mukaan esimerkiksi sähkön ja kaukolämmön tuotantoa, joka perustuu alueen metsien sivuvirtoihin sekä elintarviketuotantoa kuten kalan kiertovesikasvatusta tai kasvi- tai kasvuhuoneita. Lisäksi ekosysteemeissä on jäte- ja sivuvirtoja hyödyntäviä prosesseja kuten biokaasun tuotantoa tai hyönteiskasvatusta. Ekosysteemeissä huomioidaan veden, lämmön, sähkön ja erilaisten orgaanisten sivuvirtojen kiertojärjestelmien sisällä.

Myös energian- ja ruoantuotannon yhdistävät biokiertotalouskokonaisuudet käyttävät vuonna 2050 alueiden keskeisiä orgaanisia sivuvirtoja (Kuva 3). Ekosysteemeihin voidaan rakentaa mukaan esimerkiksi sähkön ja kaukolämmön tuotantoa perustuen alueen metsien sivuvirtoihin sekä elintarviketuotantoa kuten kalan kiertovesikasvatusta tai kasvi- tai kasvuhuoneita. Lisäksi ekosysteemeissä on jäte- ja sivuvirtoja hyödyntäviä prosesseja kuten biokaasun tuotantoa tai hyönteiskasvatusta. Ekosysteemeissä huomioidaan veden, lämmön, sähkön ja erilaisten orgaanisten sivuvirtojen kierto järjestelmien sisällä.



Kuva 3. Teollisen symbioosin eri toimiyksiköt, sisäiset resurssivirratt, syötteet ja ulostulot vaikuttavat toisiinsa ja tuottavat taloudellista etua, mutta kustannukset ja kannattavuus vaihtelevat kunkin ajan hetken raaka-aineiden ja energian saatavuuden sekä hinnan mukaan (Lokka ym. 2021).

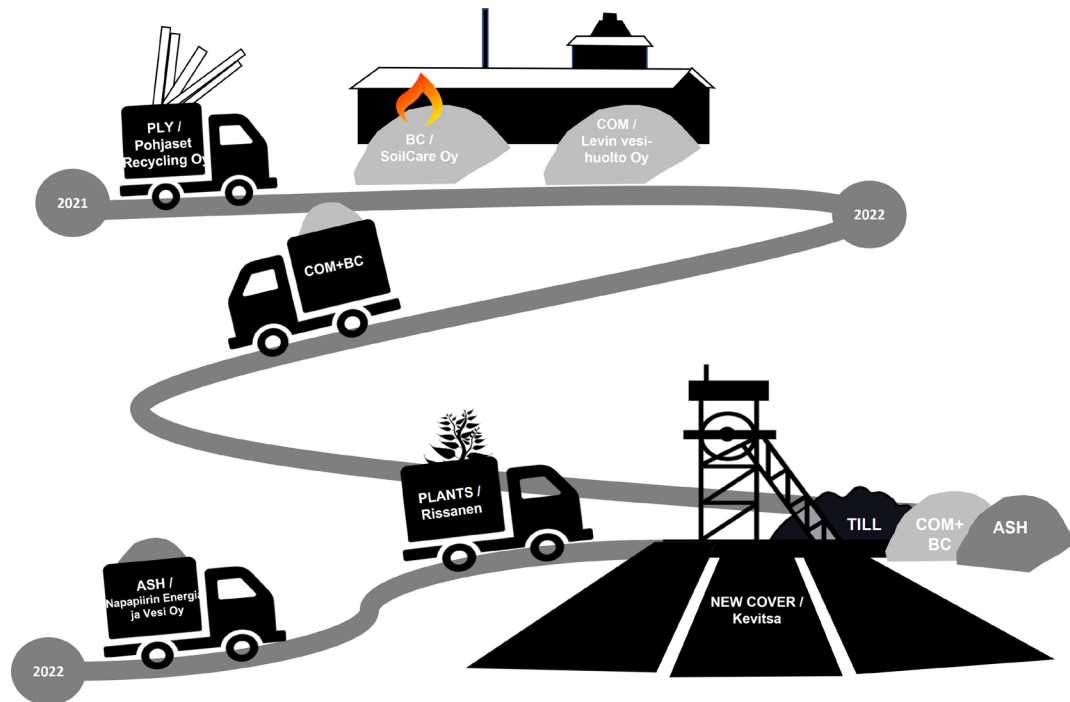
Kiertotalouden ekosysteemin tavoitteena on, että kaikki tuotantosuunnat saavat kiertotalouskokonaisuuteen kuulumisesta taloudellista etua. Haasteeksi muodostuvat yksiköiden väliset riippuvuudet ja niiden tasapainottaminen vuoden jokaisena tuntina (Lokka ym. 2021). Myös symbioosin eri yksiköiden tuotantokustannukset vaihtelevat raaka-aineiden ja energian saatavuuden sekä hinnan mukaan. Nopeat muutokset

maailman tilanteessa, kuten energian ja lannoitteiden hinnoissa, vaikuttavat merkittävästi esimerkin kaltaisten symbioosien kannattavuuteen ja myös siihen, rakennetaanko symbioosi esimerkiksi energian vai ruoantuotannon ympärille. 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.

2030-luvulla kierrätys- ja sivuvirtamateriaalien kestävässä kaskadikäytössä bio- ja kiertotalouden toimijat muodostavat alueellisia arvoverkkoja

Visioraportissa on korostettu biomassan kaskadihyödyntämisen alueellisia ratkaisuja, jotka voivat olla hyvinkin erilaisia sekä raaka-ainevirtojen että tuotteiden käyttökohteiden mu-

kaan. (Kuva 2A). Pohjoisen harvaan asutun seudun biomassojen kaskadihyödyntämisen tulevaisuusvisiota haastavat vaihtelevat ja jatkuvalta saatavuudeltaan epävarmat raaka-aineet sekä meri- ja rautatieliikennemahdollisuuksien vaillinaisuus. Tällöin kaskadihyödyntämisen visio poikkeaa pienelle alueelle keskitetystä mukautuvasta teknologiakeskittymästä. Pohjoisen alueen huomioivassa 2030-luvun visiossa kierrätys- ja sivuvirtamateriaalien kestävässä kaskadikäytössä bio- ja kiertotalouden toimijat tulevat muodostamaan alueellisia arvoverkkoja (Kuva 4). Kansallista arktista kiertotaloutta on edistetty tuomalla eri bio- ja kiertotalouden toimijat yhteen ja muodostamalla alueille kiertotalouteen perustuvia arvoketjuja, jotka alkavat sivuvirtamateriaalien syntysijoilta ja päättyvät esimerkiksi viherrakentamiseen tai kaivannaisjätteiden peittoratkaisuihin.



Kuva 4. Kierroksia biopeittoon -hankkeessa vuonna 2021 yritysten kanssa pilotoitu arvoketju, jossa purkupuun biohiilestystä ja kompostointia pilotoitiin ja käsitellyt materiaalit kuljetettiin Boliden Kevitsa Oy:n kaivoksen sivukivikasaluueelle kasvualustaksi. Kuva Marja Uusitalo/Luke.

Esimerkiksi Lapin alueella on tarjota runsaasti kierrätys- ja sivuvirtamateriaaleja puupohjaisen biohiilen tuotantoon muun muassa rakennuspurku- ja harvennuspuuna. Alueella on myös muita hyödyntämistä kaipaavia sivuvirtoja kuten jätevesiliete sekä varsinaiseen lannoitekäyttöön sopimaton energiatuhka.

Kuvan 4 esimerkissä alueen sivuvirtamateriaalien tuottajat, käsittelijät ja prosessoijat (mm. vesihuoltolaitokset, kierrätyspalvelut, biohiilen tuotanto, kompostointi) sekä loppukäyttäjät (mm. viherrakentaminen, kaivosteollisuus) muodostavat yhdessä arvoketjuja. Keskeisenä tavoitteena on tuottaa kaivosteollisuuden rikastushiekka ja sivukivikasojen maisemointiin kasvualustoja peittoratkaisujen ja maisemoinnin tueksi (Hagner ym. 2021, Heiskanen ym. 2022). Neliökilometrien laajuiset peittoratkaisut tarvitsevat toteutuakseen arvoketjuja, joiden avulla tiivistetään Lapin alueen kuntien, bio- ja kiertotalouden toimijoiden sekä kaivosteollisuuden yhteistyötä ja lisätään samalla alan yritysten liiketoimintamahdollisuuksia. Samalla erilaisten sivuvirta- ja jätejakeiden hyötykäyttö kasvaa ja kaivoisten liiketoiminnan kestävyys ja hyväksyttävyytys paranevat. Suurin osa kaivosyhtiöistä hyötyy tuotantoketjusta, joka valmistaa alueella syntyvistä sivuvirroista sivukivi- ja rikastushiekka-alueelle sopivaa kasvualustaa. Kaivosyhtiön ei kannata kuljettaa raaka-aineita kaukaa tai valmistaa kas-

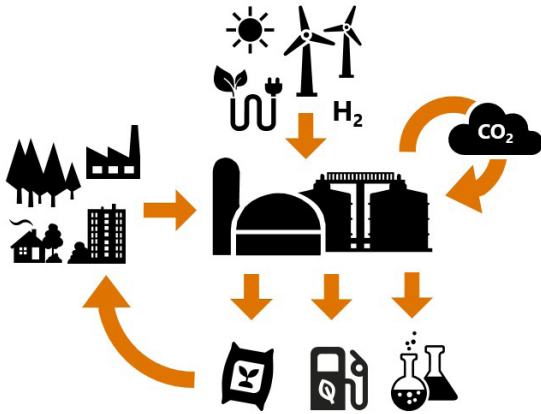
vualustaa itse. Siksi arvoketjuja kehitettäessä onkin tarpeen selvittää, löytyykö paikallisia yrityksiä, joilla on kiinnostusta alkaa valmistaa kaivosalueelle kasvualustaa ja tuottaa myös kyseisiin olosuhteisiin sopeutuneita kasveja, tai olisiko alueen kannattavaa investoida esimerkiksi omaan biohiililaitokseen. Myös kaivosalueella käytettävän biopeiton laatu pitää optimoida siten, että sen valmistus on kustannustehokasta, mutta se täyttää myös kaivosalueiden jälkihoidon vaatimukset.

Lapissa arvoketjujen muodostamisessa haasteena ovat pitkät välimatkat, jolloin logistiikan ja kannattavuuden suunnittelussa on otettava tarkoin mukaan sekä hiilijalanjäljen että talouden mittarit. Kiertotaloudessa on usein mukana menetelmien kehitysvaiheessa olevia nuoria yrityksiä, jolloin toimintaan voi liittyä raaka-aineen saatavuuteen ja laatuun liittyviä riskejä. Lisäksi arvoketjussa voi olla kooltaan, omistuspohjaltaan ja tuotantovolyymiltaan erilaisia yrityksiä, joiden tarpeet on sovittava yhteen, esimerkkeinä perheyritys, kunnallinen jäteyhtiö ja kansainvälinen kaivosyhtiö.

Vision toteutuminen on vaatinut tarkkalinjaista alueiden rajausta, sillä suuressa harvaan asutussa maassa logistiikan mahdollisuudet ja raaka-aineiden saatavuus vaihtelevat paljon. Arvoketjun kaikkien vaiheiden on oltava kannattavia sekä talouden että ympäristön mittareilla mitattuna. Tärkein toimi on koota alueiden yritysverkostot yhteen. Kehitetyille kasvualustaratkaisuille on myös saatava viranomaisten hyväksyntä käyttökohteessaan.

Esimerkki 2. Visio uusiutuvista energiamuodoista osana biomassojen alueellista kaskadiprosessointia

Saija Rasi ja Markku Vainio



Kuva 5. Vety ja hiili osana orgaanisten jäte- ja sivujakeiden kaskadiprosessointia

Energiasektorin vähähiilisyystavoitteet nostavat esiin vedyn roolin tulevaisuuden energiaratkaisuna. Vety on mahdollisuus uusiutuvan energian varastointiin, mutta se on myös tärkeä synteettisten polttoainien ja kemikaalien raaka-aine. Uusiutuva vety onkin jatkossa kilpailtu raaka-aine. Vuonna 2021 tuotettiin 82 % kaikesta tuotetusta vedystä fossiilisella energialla ilman hiilidioksidin talteenottoa ja lähes kaikki loppu syntyi petrokemianteollisuuden sivutuotteena (IEA 2022). Uusiutuvalla vedylle nouseekin markkinat, mm. EU:n vetystrategian (Euroopan komissio 2020) mukaan Euroopassa syntyy 180–450 miljardin euron investointeja uusiutuvaan vetyyn vuoteen 2050 mennessä.

Useat vetyyn perustuvat polttoaineet ja kemikaalien raaka-aineet sekä erilaiset proteiiniainemisteet tarvitsevat myös hiilen lähteen. Vuonna 2023 hiilidioksidin kustannukset ovat nousseet ja saatavuus heikentynyt maakaasutoimitusten vaikeutuessa Euroopassa, sillä edelleen suuri osa hiilidioksidista tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla. Tulevaisuuden vetytaloudella on useita liitännäispintoja biomassojen prosessointiin; visiomme mukaisesti vuonna 2050 tuotetaan aidosti uusiutuvia tuotteita, mahdollisimman pitkälle ilman fossiilisen energian tuotantopanoksia.

Useat vetyyn perustuvat polttoaineet ja kemikaalien raaka-aineet sekä erilaiset proteiiniainemisteet tarvitsevat myös hiilen lähteen. Vuonna 2023 hiilidioksidin kustannukset ovat nousseet ja saatavuus heikentynyt maakaasutoimitusten vaikeutuessa Euroopassa, sillä edelleen suuri osa hiilidioksidista tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla. Tulevaisuuden vetytaloudella on useita liitännäispintoja biomassojen prosessointiin; visiomme mukaisesti vuonna 2050 tuotetaan aidosti uusiutuvia tuotteita, mahdollisimman pitkälle ilman fossiilisen energian tuotantopanoksia.

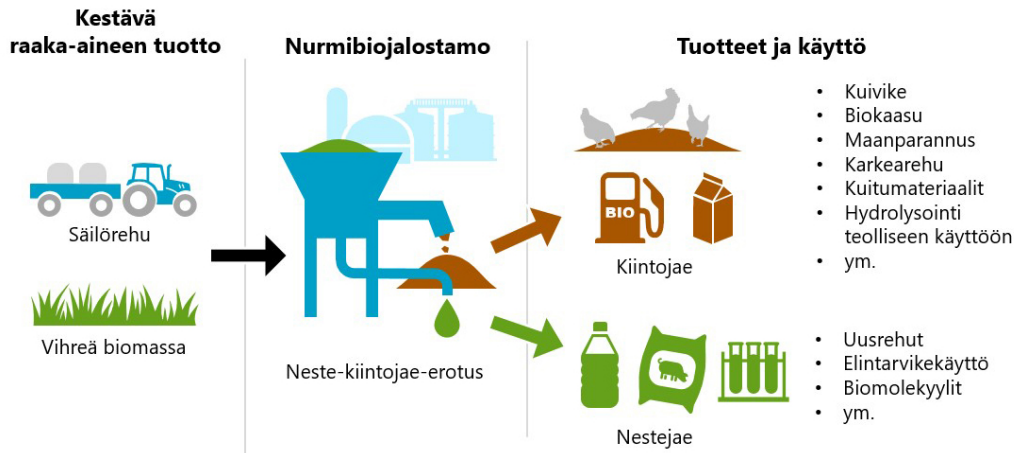
Uusiutuvan sähköntuotannon lisäksi (Kakoulaki ym. 2021) vihreää vetyä tuotetaan esimerkiksi orgaanisista jäte- ja sivujakeista joko termisillä prosesseilla (esim. kaasutus) tai biologisella prosessilla (esim. pimeä fermentaatio, Rasi ym. 2022). Sekä termisissä että biologisissa prosesseissa syntyy vedyn lisäksi hiiltä, hiilidioksidina ja/tai hiilimonoksidina. Orgaaniset raaka-aineet eivät riitä kattamaan vedyn kasvavaa tarvetta, mutta uusiutuvan hiilen kasvava kysyntä voi nostaa orgaanisten jäte- ja sivujakeiden arvoa merkittävästi, mikä mahdollistaa pienienkin vetyvirtojen hyödyntämisen. Sivujakeiden paikallinen hyödyntäminen edistää myös hajautettua uusiutuvan energian tuotantoa ja kiertotaloutta. Esimerkiksi lannoiteteollisuuden voimakas riippuvuus vedystä on jo vuonna 2023 nostanut lannoitteiden hintoja, joten uusiutuvaan energiaan ja kiertotalouteen painottuvia, paikallisia ratkaisuja syntyy vuoteen 2050 mennessä.

Ennen vetyinfran voimakasta rakentamista vetyä voidaan myös varastoida metaanina joko synteettisen tai biologisen metanoinnin avulla, jolloin myös maakaasuun perustuvaa infrastruktuuria voidaan hyödyntää siirtymävaiheessa (Ijäs 2022).

Paikallinen ja hajautettu vedyn ja hiilidioksidin tuotanto on mahdollisuus, mutta se tuo myös haasteita, sillä perinteisesti taloudellisuus on perustunut suuruuden ekonomiaan. Tutkimusta ja kehitystyötä tarvitaan, jotta vuoden 2050 hajautetut/paikalliset ratkaisut voivat tuottaa turvallisia, uusiutuviin raaka-aineisiin perustuvia tuotteita ja energiaa kustannustehokkaasti ja ympäristöystävällisesti (Kuva 2A). Alueiden rooli on merkittävä, sillä vetytalouteen siirtyminen vaatii usean toimialan yhteistyötä.

Esimerkki 3. Nurmibiojalostamo tuottaa vuonna 2030 ruokaa, rehuja, lannoitteita, energiaa ja materiaaleja

Marketta Rinne



Kuva 6. Lunastamatonta potentiaalia uudenaikaisissa biojalostamokonsepteissa.

2030-luvulla uusia biokiertoalouden edistämisen mahdollisuuksia tuo myös nurmibiojalostamo. Nurmibiojalostamossa ennen lähinnä nautojen rehuksi soveltuvasta nurmibiomasasta valmistetaan uusia tuotteita kuten proteiinijakeita, yksimahaisille eläimille soveltuvia uusrehuja, bioenergiaa, kierrätyslannoitteita ja materiaaleja (Keto ym. 2021). Nurmen käytön monipuolistaminen on perusteltua, sillä se tuottaa ilmastossamme noin kaksinkertaisen kuiva-ainesadon viljoihin verrattuna (Luke 2022) ja sen viljelyalue ulottuu viljaa ja erikoiskasveja pohjoisemmaksi. Monivuotisena kasvustona nurmilla on useita vahvuuksia, kuten hiilen sidonta maaperään, maan rakenteen parantaminen ja eroosion vähentäminen, tehokas ravinnetalous ja positiiviset biodiversiteetti-vaikutukset. Tämän takia nurmia on vuoteen 2035 mennessä visiomme mukaisesti saatu myös sellaisten alueiden viljelykiertoon, joilla ei nautakarjataloutta harjoiteta (Tampio ym. 2019). Ekosysteemipalvelujen arvottamista ja dokumentaatiota onkin kehitetty vuoteen 2035 mennessä näiden hyötyjen osoittamiseksi.

Nurmibiomassan koostumukseen voidaan vaikuttaa viljelytekniikalla, mutta tyypillisesti se sisältää noin puolet kuitua, joka on huomattavasti vähemmän lignifikoitunutta kuin puukuitu eli helpommin prosessoitavaa. Kuidun lisäksi muita pääkomponentteja ovat proteiini, sokeirit ja kivennäisaineet. Palkokasveja käytettäessä nurmet ovat omavaraisia typpilannoituksen suhteen, nurmien kasvinsuojelutarpeet ovat vähäisiä, nurmien satovarmuus on varsin hyvä ja monivuotisina kasvustoina ne eivät kuormita kevään työhuippuja maataloilla. Nurmisadon monipuolinen käyttö voidaan nähdä myös huoltovarmuustekijänä, joka parantaa yhteiskunnan muutosjoustavuutta.

Tanskan jo toiminnassa olevien nurmibiojalostamojen mukaisesti Suomeen on vuoteen 2035 mennessä rakennettu biojalostamoja ja niiden vaatimia yritysekosysteemejä. Nurmi ja siitä prosessoidut fraktiot ovat tuoretuotteita, joten logistiikkaan, säilöntään ja prosessien kehittämiseen on panostettu. Nautakarjataloudesta tuttu säilörehun valmistus eli nurmibiomas- san säilöntä maitohappokäymiseen perustuen on yksi vaihtoehto tuoreen nurmen käytölle, joka mahdollistaa myös biojalostamon ympärivuotisen toiminnan. Uusien prosessien teknologisen ja taloudellisen optimoinnin tueksi tarvittavat innovaatiot ja tutkimus ovat edenneet vuoteen 2035 mennessä. Nurmibiojalostamo voisi kytkeytyä osaksi Kuvan 2A mukaista alueellista hajautettua kaskadiprosessointikonseptia sekä toimia yhtenä toimintayksikkönä Kuvan 3 mukaisessa teollisessa symbioosissa.

Esimerkki 4. Kosteikkoviljelyn arvoketjut: ympäristöhyötyjä ja biotuotteita

Kristiina Lång ja Hanna Kekkonen



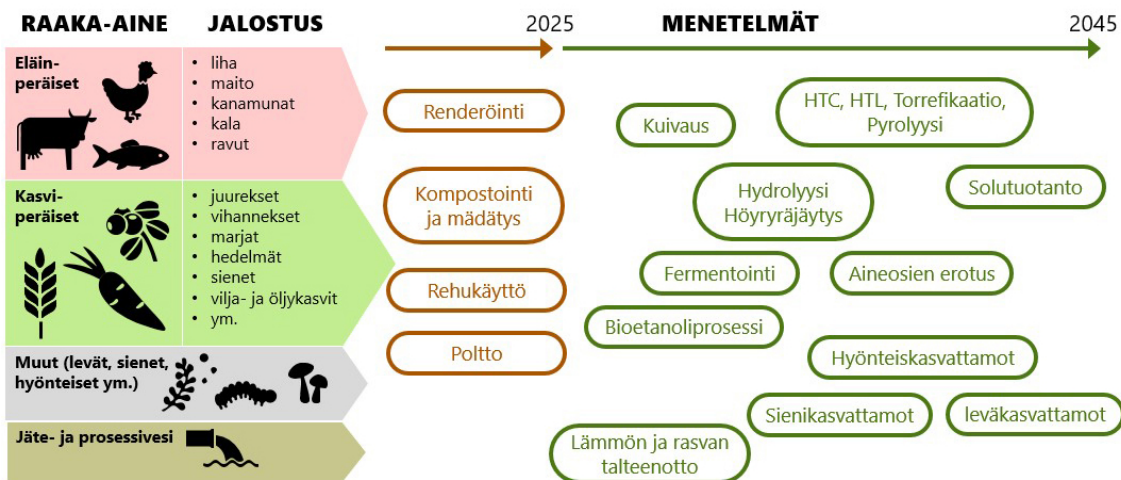
Kuva 7. Kosteikkoviljelyyn soveltuvia kasveja ja niiden käyttömahdollisuuksia.

Kosteikkoviljely on tapa käyttää turvepeltoja tai entisiä turvetuotantoalueita vetettyinä biomassan tuotantoon (Wichtmann ym. 2016). Kosteikkoviljelyssä pyritään siihen, ettei pohjaveden pinta laskisi alemmaksi kuin 20 cm:n korkeudelle maan pinnasta. Näin voidaan vähentää ojituksen aiheuttamaa turpeen hajoamista ja siitä tulevia kasvihuonekaasupäästöjä (Bianchi ym. 2021). Kosteikkoviljely sopii myös pelloille, joissa ojituksen heikko toimivuus aiheuttaa haasteita tavanomaiselle viljelylle. Märässä ympäristössä voidaan tuottaa esimerkiksi ruokohelpeä, pajua, rahkasammalta tai osmankäämiä (Kuva 7). Myös lyhytkiertoinen puunviljely voi tulla kyseeseen; märässä oloissa viihtyviä lajeja ovat hieskoivu ja leppä.

Entä jos vuonna 2050 turvepeltoja ei enää viljellä tehokkaasti kuivattuna. Osa on poistettu tuotannosta, osalla monivuotisen kosteikkokasvuston juuristo kantaa koneiden painon ja osassa pohjaveden pintaa lasketaan, kun isoja koneita tarvitaan. Esimerkkien 1–3 jalostamot käyttävät myös kosteikkoviljeltyjä biomassoja. Jo mainittujen käyttötarkoitusten lisäksi kosteikkoviljeltyjä raaka-aineita käytetään kasvualustoissa, tekstiiliteollisuudessa (kuidut ja väriaineet) ja rakennusmateriaaleissa sekä elintarvike- ja lääketeollisuudessa. Suomessa on muutama iso toimija, jotka tekevät korjuu-urakointia ja välittävät erilaisia biomassoja niiden tarvitsijoille. Markkinoille on kehitetty märkiin oloihin soveltuvia maatalouskoneita. Kuluttajat ostavat mielellään kosteikkoviljelyyn perustuvia tuotteita, koska niiden ympäristövaikutuksista viestitään tehokkaasti.

Esimerkki 5. Yritysten yhteistyö lisää elintarviketuotannon sivujakeiden materiaalitehokkuutta ja kannattavuutta

Marja Lehto, Minna Kahala, Susanne Heiska, Eila Järvenpää, Sari Mäkinen, Jaakko Hiidenhovi ja Titta Kotilainen

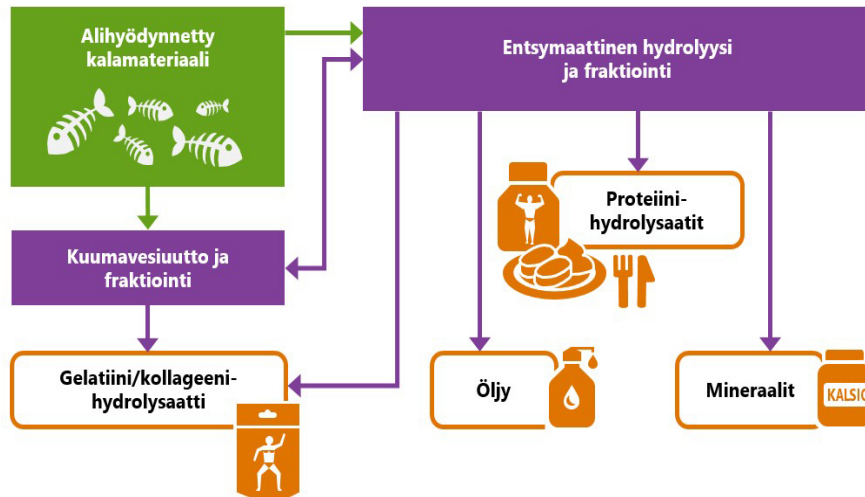


Kuva 8. Elintarvikeyrityksissä syntyvien sivutuotteiden käsittely on jatkossa osa tuotantoa päätuotteen rinnalla. Teolliset ekosysteemit ja eri aikajäniteillä kehittyvät teknologiat lisäävät materiaalitehokkuutta ja kannattavuutta. Digitalisaatio mahdollistaa uudet arvoketjut ja jakelukanavat. Tutkimus tukee kokonaisvaltaista muutosta sekä yhteiskunnan päätöksenteossa ja suunnittelussa että yritysten, kotitalouksien ja kuluttajien asenteissa.

Entä jos vuonna 2050 maataloudessa tuotettavat ja elintarviketeollisuudessa käytettävät raaka-aineet hyödynnetään kokonaisuudessaan (Kuva 2A) ja kaikki elintarvikkeeksi kelpaava, ihmisten ravitsemuksen kannalta merkittävä käytetään elintarvikkeina. Sivuvirroista saadaan merkittäviä määriä proteiineja ja kuituja, jotka ovat kriittisiä tekijöitä ravitsemuksessa ja ruokaturvassa. Nopeasti kehittyvien prosessiteknologioiden avulla arvokkaita aineosia tuotetaan sivuvirroista elintarvikkeiksi sekä rehu-, kosmetiikka-, tekniseen ym. käyttöön (Taulukko 1). Tuotteiden kestävyys on erittäin tärkeää sekä kuluttajien että yhteiskunnan kannalta. Kotimarkkinan lisäksi tuotteita viedään ulkomaille. Eläinperäisten sivutuotteiden käyttö elintarviketuotantoeläinten rehussa lisääntyy, mikä edistää Suomen rehuvalkuaisomavaraisuutta ja huoltovarmuutta. Tuoteanalytiikka ja kehittyvät prosessit auttavat purkamaan EU-lainsäädännön normeja ja näin mahdollistavat sivutuotteiden laajemman rehukäytön. Suomalaisen kalateollisuuden jalostuksessaan käyttämästä raaka-aineesta syntyvät sivuvirrat jalostetaan korkean lisäarvon ainesosiksi, kuten proteiini-, kollageeni- ja gelatiini-valmisteiksi ja liukoiseksi mineraaleiksi (Kuva 8). Ainesosia käytetään elintarvikkeiden lisäksi biomateriaaleissa, terveyttä edistävässä ravintolisissä ja kosmetiikkatuotteissa. Kannattavan tuotannon edellytykset syntyvät etenkin useamman yrityksen sivuvirtoja yhdistämällä (Kuva 2A).

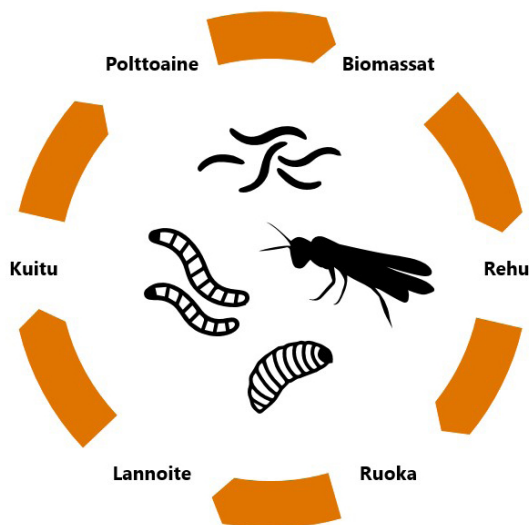
Esimerkiksi solumaatalous tuottaa raaka-aineita ja ruokaa kasvattamalla mikrobeja, eläin- tai kasvisoluja hallituissa olosuhteissa bioreaktoreissa. Solukasvatuksen ravintoaineina käytetään vuonna 2050 alkutuotannon ja elintarviketeollisuuden pää- ja sivuvirroista sekä puu-pohjaisista sivutuotteista saatavia yhdisteitä, kuten sokereita, typpi yhdisteitä ja mineraaleja. Solutehtaiden avulla tuotetaan lihan tai kalan kaltaisia tuotteita tai ravintoaineita, kuten proteiinia, rasvaa, vitamiineja ja aromiaineita. Solumaatalouden tuotteissa käytetään usein

geneettisesti muokattuja organismeja (GMO). Entä jos ne eivät ole enää vuonna 2050 kiellettyjä kaupallisissa elintarvikesovelluksissa? Tämän aikaan saaminen on vaatinut lainsäädännön muutosta ja myös uutta osaamista uusien menetelmien käyttöönottoon vuodesta 2023 vuoteen 2050 mennessä.



Kuva 9. Esimerkkejä kalasivuvirtojen kaskadiprosessointitavoista uusiksi tuotteiksi (Hiidenhovi ym. 2021).

Entä jos broilerintuotannossa puolestaan syntyvien **höyhenten hyödyntäminen** laajenee toimialarajat ylittävään kaskadikäyttöön vuoteen 2035 mennessä. Kevyet, huokoiset ja vettä hylkivät höyhenet koostuvat pääasiassa kuitumaisesta proteiinista, keratiinista. Höyhenistä tehdään rehua, lannoitteita, maanparannusaineita ja biokaasua, ja vuonna 2035 ne voidaan myös erotella ja puhdistaa. Tällöin niitä voidaan käyttää sellaisenaan, murskata, jauhaa tai prosessoida (esim. hydrolysoida tai höyryräjäyttää) tuotteiksi, joita ovat mm. eristeet, akustiikkalevyt, pakkausmateriaalit, erilaiset maataloussovellukset (kuivikkeet, kasvualustat), komposiitit, geopolymeerit, liimat tai palonestoaineet (Lehto ym. 2023). Höyhenet ovat luokan 3 eläinperäistä sivutuotetta ja niiden hyödyntämisessä täytyy noudattaa sivutuoteasetuksen vaatimuksia.



Kaiken kaikkiaan kasvi- ja eläinperäiset sivutuotteet ovat helposti pilaantuvia ja ne sisältävät runsaasti vettä. Märän materiaalin kuljettaminen hyödyntämispaikkaan on haastavaa ja kallista. Sivujakeiden jatkokäsittely tai kuljetus (Winqvist ym. 2022) tulee tehdä nopeasti ja mieluummin lähellä niiden syntypaikkaa. Säilöntämenetelmin saadaan sivutuotteiden säilyvyydelle lisäaikaa ja se mahdollistaa suurempien sivutuotemäärien keräämisen yhteen jatko-prosessointia tai kuljetusta varten (Lehto ym. 2020).

Kuva 10. Hyönteisbiokonversio tuottaa sivuvirroista mm. lannoitteita, kasvunparanteita ja rehuja.

Hyönteiset muuntavat tehokkaasti erilaisia biomassoja arvokkaammiksi tuotteiksi sekä puhdistavat ja hygienisoivat jätteitä (Kuva 9). Vuonna 2050 visiomme mukaisesti EU:ssa hyönteisten kasvatuksessa hyödynnetään paitsi puhtaita, kasviperäisiä sivuvirtoja, maitoa ja munaa, myös ennen ei-sallittuja eläinperäisiä sivuvirtoja, biojätettä ja lantaa, jotka ovat lajityypillistä ravintoa hyönteisille. Niiden käytön turvallisuutta ruokaketjuun päätyvien hyönteisten kasvatuksessa on tutkittu ja käyttö mahdollistunut uuden tiedon myötä vuoteen 2050 mennessä. Myös kaskadiprosessista saatavat massat, biokaasutusjäännös, sienikasvatusalustat ym. käytetään osaksi hyönteisten rehuja. Elintarvikeketjuun sopimattomalla biomassalla kasvatettu hyönteinen tai sen rasvajakeet hyödynnetään biokaasuntuotannossa.

Hyönteisistä saatavalla kitiinillä on sovelluksia elintarvikkeissa ja lääketeollisuudessa. Hyönteiskitiinillä korvataan kestävämpiä kitiinintuotantoa ja se on jatkossa halutumpi, virhemauton vaihtoehto kaloista saadulle kitiinille (joissa on tyyppillisesti sivumakuja). Hyönteistuotannon sivuvirtana syntyvää hyönteislantaa eli frassia käytetään lannoitteena ja maanparannuksessa (kun se on käsitelty sivutuoteasetuksen mukaisesti). Hyönteisen tuotantomenetelmiä optimoiden frassista saadaan erikoislannoitteita, jotka aktivoivat kasvien luontaisia puolustusreaktioita ja vähentävät kasvinsuojeluaineiden käytön tarvetta ja parantavat kasvien kykyä käyttää mineraalilannoitteita.

Entä jos hyönteisistä prosessoitua valkuaista ja rasvaa käytetään vuonna 2050 EU:ssa sian, siipikarjan, vesiviljelyeläinten ja lemmikkien rehuissa. Hyönteisten luomusertifiointi tulee ehkä mahdolliseksi lähitulevaisuudessa. Hyönteisrehulla on tutkimusnäyttöä positiivisista vaikutuksista eläinten hyvinvointiin ja terveyteen. Hyönteisproteiinin tuotantokustannukset ovat laskeneet teknologiakehityksen myötä ja hinta alentunut kilpailukykyiselle tasolle muiden proteiinilähteiden kanssa. Hyönteisrehusektori on kasvanut, erityisesti Euroopassa, kun hyönteisistä tuotantoeläiminä tiedetään enemmän: hyönteistenkin rehustuksessa hiilihydraattien ja proteiinin suhde sekä aminohappokoostumus ovat tärkeitä.

Vuonna 2050 prosessoituja hyönteiselintarvikkeita on saatavilla superfood-tuotteina eri kullattajaryhmille (Heiska ym. 2020).

Taulukko 1. Hyödyntämisen ajureita ja esteitä elintarviketuotannon sivutuotteille sekä esimerkkimenetelmiä ja niiden toteutumisen ajureita ja esteitä.

Elintarviketuotannon sivutuotteiden ja tuotantomenetelmien hyödyntäminen: Ajurit ja esteet

	SIVUTUOTTEET			MENETELMÄT			
	Eläinperäiset sivutuotteet	Kasvissivujakeet	Jätevedet	Hyönteiskasvatus	Sienikasvatus	Leväkasvatus	Solutuotanto, maatalous
Käyttökohteet	Elintarvikkeet, rehut, terveys-, kosmetiikka- ja tekniset tuotteet, maanparannusaineet, energia	Elintarvikkeet, rehut, terveys-, kosmetiikka- ja tekniset tuotteet, maanparannusaineet, energia	Maanparannusaineet, energia	Hyönteiset elintarvikkeiksi ja rehuiksi, sivutuotteet maanparannusaineiksi, tekniseen käyttöön, kosmetiikkaan	Sienet elintarvikkeiksi, rehuiksi ja biomaterialeiksi, käytetyt kasvualustat maanparannusaineiksi	Levistä erilaisia arvotuotteita, kosmetiikka-, lääke-, elintarvike- ja rehuteollisuuden, energiaksi	Elintarvikkeet, rehut
Käsittely	Hydrolyysi, fermentointi, höyryräjätys, ainesosien erotus. Kompostointi, mädätys, pyrolyysi, biodieselprosessi Kuivaus	Kuivaus, fermentointi, ainesosien erotus, kompostointi, mädätys, bioetanoli-prosessi	Anaerobinen ja aerobinen, MBR, RO, mikro /ultra/ nano-suodatus, DAF, sähkö-kemiallinen käsittely ym. lämmönvaihdin	Kompostointi, mädätys, biodieselin valmistus	Sienisivujakeen erottelu, kasvualustojen valmistus	Kasvatus hydroponisesti tai bioreaktorissa, levä-biomassan keruu ja prosessointi. Levät poistavat ravinteita vesistä.	Geenitekniikka, biotekniikka, automaatio- ja prosessitekniikka, mikrobien kasvatus, laskenta, mallinnus.
Hyödyntämisen ajurit	Tuotannon tehostaminen, ympäristönäkökohdat, korvaa rehujen ja lannoitteiden tuontia, uusiutuvan energian lähde,	Tuotannon tehostaminen, ympäristönäkökohdat, korvaa rehujen ja lannoitteiden tuontia, uusiutuvan energian lähde, kiinnostus uusiutuviin/kierrätys materiaaleihin	Ravinteiden, rasvan ja lämmön hyödyntäminen. Puhdistettu vesi kiertoon prosessi-, huuhtelu-, jäähdytysvetenä	Tuotanto ei paikkasidonnainen, ympäristönäkökohdat. Haitta-aineiden hajotus ja massan hygienisointi. Elintarviketeollisuuden sivujakeita hyödynnetään hyönteisravintona.	Kasvualustana kasvissivujakeita, mäsäkiä ym.. Tuotanto ei paikkasidonnainen	Jätevesien lämmön, ravinteiden ja hiilidioksidin hyödyntäminen – kalankasvatus, kasvihuoneet	Tuotanto ei paikkasidonnainen. Ympäristönäkökohdat. Elintarviketuotannon sivujakeita solujen ravinnoksi
Hyödyntämisen esteet	Lainsäädäntö, logistiikka, säilyvyys, halutaan vegaanisia tuotteita, volyymit, kustannustehokkuus	Säilyvyys, logistiikka, volyymit, tuotannon kausiluonteisuus, laatu, kustannustehokkuus	Lainsäädäntö	Lainsäädäntö (eläinperäiset sivutuotteet, elintarvike- ja rehukäyttö)	Elintarvikelainsäädäntö	Valon ja lämmön tarve - rajoittaa ympärivuotista ulkokasvatusta. Lainsäädäntö	GMO- ja elintarvike ym. lainsäädäntö, osaaminen, kustannukset. Energian kulutus.
Esimerkkejä	Kalasisivut, verit tuotteet ja sisäelimet elintarvikkeiksi, lemmikkien ruuat, biodieselä eläinrasvasta, ihmisten varaosat, gelatiini, kollageeni, mineraalit	Viljamäskien, omena- ja marjapuristekakkujen käyttö elintarvikkeissa, kuitujakeet, väri- ja makuaineosat, märehtijöiden rehut, hyönteisten rehut, bioetanoli	Biodiesel	Proteiinivalmisteet, toukanpurulannoite, muovien hajotus. Lannan ja jätteen käsittely. Rasva ja kitiini eläinten erikoisrehuksi.	Biopolymeeripakkaukset, antibiootit	Leväbiomassa kalanrehuksi. Tuotteita esim. lipidit, biokaasu, biodiesel, lannoitteet, biopolymeeripakkaukset	Lihan tai kalan kaltaisia tuotteita tai ainesosia – proteiineja, rasvaa, vitamiineja, makuaineita ym.

3. Lopuksi - Kaskadiprosessoinnin ja -käytön reunaehdoista

Ympäristövaikutusten arviointi päätöksenteon tukena alueellisten biomassojen kaskadikäytön kehittämisessä

Ilkka Leinonen ja Merja Saarinen

Tuotekohtaisen ympäristövaikutusten elinkaariarvioinnin (E-LCA) soveltaminen on välttämätöntä, jotta voitaisiin varmistua siitä, että kaskadivision toteuttaminen tuottaa taloudellisten hyötyjen lisäksi myös ympäristöhyötyjä ja erityisesti auttaa saavuttamaan kansalliset ja kansainväliset ilmastotavoitteet. Monituotejärjestelmät ja kiertotalous tuovat omat haasteensa tähän tarkasteluun. Tarkastelun lähtökohtana on oltava vaihtoehtoisten tuotejärjestelmien vertailtavuus, ja tällöin tarkasteltavana on usein tuotteita, joiden käyttötarkoitusten toiminnallisuus poikkeaa toisistaan. Kiertotalouden tuottamat tuotteet sisältävät raaka-aineita, jotka ovat syntyneet toisissa tuotantoketjuissa niiden varsinaisten tai ensisijaisten tuotteiden ohella sivutuotteina tai jätteinä. Toisin sanoen kiertotalouden tuotteiden taustalla on aina niin sanottuja monituotejärjestelmiä. Monituotejärjestelmän tuotteiden elinkaaristen ympäristövaikutusten arvioinnissa resurssien, päästöjen ja ympäristövaikutusten kohdistamisen menettely (allokointi) on erityisen keskeisessä roolissa, koska se vaikuttaa paljon arvioinnin lopputuloksiin. Kohdistamisen menettelytapoja on useita ja eri menettelyt sopivat eri tilanteisiin. Kohdistamisen menettelyn valinta pitääkin aina valita tutkimuksen tavoitteen ja soveltamisalan mukaan ja perustella huolellisesti ja läpinäkyvästi.

Elinkaariarviointia ohjaavan kansainvälisen standardin mukaan allokontia pitää välttää aina, kun se on mahdollista. Se tapahtuu joko jakamalla kohteena oleva prosessi alaprosesseihin ja tarkastelemalla erikseen sen syötteitä ja tuotoksia tai laajentamalla tuotejärjestelmä kattamaan rinnakkaistuotteisiin liittyvät toiminnot. Jos allokonti on välttämätöntä tehdä, se voi ensisijaisesti perustua kyseisen monituotejärjestelmän tuotteiden tai toimintojen välillä vallitseviin fysikaalisiin suhteisiin (esim. massa tai energiasisältö) tai toissijaisesti niiden välisiin muihin suhteisiin, kuten taloudelliseen arvoon.

Käytännössä tuotteiden ympäristövaikutusten elinkaariarviointien allokoinneissa turvaudutaan usein taloudelliseen arvoon, esim. hintasuhteisiin, sen takia että se on helppoa ja sen ajatellaan heijastavan tuotannon insentiiviä, kannustetta. Tällöin sille tuotteelle, jonka taloudellinen merkitys tuotteen tuottajalle on suurin, kohdistetaan myös suurin osa ympäristövaikutuksista. Kiertotalousratkaisussa sivuvirtojen taloudellinen merkitys usein muuttuu, mikä lisää vaihtelua ja epävarmuutta tuotteiden ympäristövaikutustuloksiin.

Kiertotalouden ympäristövaikutuksissa on yleensä kyse yhtä tuotetta laajemman järjestelmän, jopa uuden teollisen ekosysteemin, ympäristövaikutuksista. Näissä järjestelmissä eri tuotteiden tuotanto on tiiviissä suhteessa toisiinsa ja riippuvaista toisistaan. Ratkaisevia ovatkin usein tämän kokonaisjärjestelmän aiheuttamat vaikutukset eivätkä niinkään järjestelmän yhden tuotteen vaikutukset. Sen takia tuotejärjestelmän laajentaminen niin, että se sisältää kaikki kyseisen tuotantojärjestelmän tuotteet, voi usein olla perusteltu menetelmällinen valinta. Vertailevissa tutkimuksissa vertailukohteena olevan tuotejärjestelmän pitää silloin sisältää kaikki tarkasteltavan monituotejärjestelmän tuotteiden funktioita vastaavat tuotteet. Usein vastaavien tuotteiden valinta ei ole itsestään selvää, joten niille on tärkeää tarkastella myös erilaisia vaihtoehtoja ja perustella valinnat huolellisesti.

Ympäristövaikutusten lisäksi elinkaariarvioinnilla voidaan tarkastella myös taloudellisia vaikutuksia, missä on mahdollista ottaa huomioon koko elinkaaren aikaiset kustannukset sekä tuotannon että kulutuksen näkökulmista. Lisäksi siinä on mahdollista tarkastella tuotteesta aiheutuvia kustannuksia yhteiskunnalle, eli niin sanottuja ulkoisvaikutuksia, ja arvioida niiden mahdollista

taloudellista vaikutusta tuotannolle pitemmällä aikavälillä. Aivan oma lukunsa tulee olemaan tulevaisuudessa kiertotalouden sosiaalisten vaikutusten arvioinnilla ja sen kytkemisellä osaksi ympäristö- ja taloudellisten vaikutusten arviointia luotettavasti.

Erytisesti tuotejärjestelmän laajentamiseen perustuva elinkaariarvointi tuottaa kiertotalouden tuotekehitykseen monipuolista ja perusteltua tietoa, joka auttaa päätöksentekoa monissa eri vaiheissa. Entä jos 2030-luvulla LCA-menetelmät ovat kehittyneet siten, että biomassojen kaskadiprosessoinnin taloudellisen ja ympäristöllisen kestävyuden tarkastelu tehokkaasti ja luotettavasti on arkipäivää kaikissa yrityksissä.

Kiertotalouden murros vaatii tuekseen monimuotoista yhteiskunnallista muutosta ja tutkimusta

Päivi Abernethy, Matleena Kniivilä, Pasi Rikkonen ja Jutta Kauppi

Sivuvirtojen hyödyntäminen ja niihin liittyvä kiertotalousmurros ei ole pelkästään teknologinen kysymys, vaan vaatii toteutuakseen monimuotoista yhteiskunnallista muutosta poliittisesta päätöksenteosta ja yksilötason asenteista tuotesuunnittelun ja tuotantoprosessien uudistamiseen. Biokiertoalouden murros edellyttää uudenlaista kokonaisvaltaista lähestymistapaa, joka ottaa sosiaalisen ja ekologisen kestävyuden huomioon koko tuotantoketjussa. Jokaisessa tuotantovaiheessa, alkutuotannosta jätteiden käsittelyyn, monet eri yhteiskunnalliset tekijät vaikuttavat kehitettyjen tuotteiden suosioon ja kestävyteen sekä tuotannon taloudelliseen kannattavuuteen. Yhteiskunnalliseen muutokseen yksilö- ja yritystasolla vaikuttavat mm. arvot, tieto, kapasiteetti, päätösmekanismit, sosiaalinen ympäristö kuin myös koko yhteiskunnan luoma ohjausjärjestelmä. Siksi tehokkaan biokiertoalouden edistämiseksi on kriittisen tärkeää, että biomassojen pää- ja sivuvirtojen teknologisessa kehitystyössä yhdistetään luonnontieteellinen ja tekninen tietämys taloudellisten reunaehtojen määrittämään toteutettavuuteen ja politiikkaohjauksen realiteetteihin. Kiertotalouden edistämiseksi tarvitaan myös tutkimusta, joka auttaa ymmärtämään alkutuottajien, yritysten, päätöksentekijöiden ja muiden sidosryhmien, kuten kuluttajien, tarpeita, tietoa ja päätöksentekokriteereitä.

Kuten todettua, yhteiskunnan rooli mahdollistajana vihreässä siirtymässä on keskeinen. Jos mietitään julkisohjauksen kokonaisuutta (taloudellista, normi- ja määrä- ja informaatio-ohjausta), uusille toimialoille ja uusille innovaatioille on tärkeää, että kehittämissivuvaiheessa on riittävästi juurikin informaatio-ohjausta eli erilaisia demonstraatio- ja pilotointiesimerkkejä ja kehittämissivualustoja, joita TKI-toimijat yhdessä yritysrajojen kanssa edistävät. Itse normi- ja määräohjaus tulee yleensä jälkijättöisesti ja taloudellisen ohjauksen kannusteet liittyvät eniten riski- ja kokeilurahoitukseen kuin pidempiaikaiseen kehittämissiv- tai investointitukeen. Kuitenkin on huomattava, että jo olemassa olevat, perinteiseen liiketoimintaan kiinnitetyt tuki- ja veroedut yhteiskunnassa vaikuttavat siihen, miten korkeampien kaskaditasojen hyödyntämisen uudet mahdollisuudet pääsevät toteutumaan. Osana uusia biokiertoalouden tuote- ja palveluinnovointiprosesseja tarvitaan siis ruohonjuuritason esteiden ja edistävien tekijöiden perkausta hyvinkin tapauskohtaisesti. Siksi muutos vakiintuneesta järjestelmästä uuteen ottaa väkisin aikansa.

Monitieteelliset tutkimusprosessit, joissa innovoidaan uusia ratkaisuja, luodaan dialogia ja tuodaan yhteen tietoa erilaisilta osaamisalueilta, ovat tärkeitä mekanismeja paitsi sovellettavaman tieteen tekemisessä myös yhteiskunnallisen muutoksen eteenpäin viemisessä. Kun tutkijat ymmärtävät ja huomioivat paremmin alkutuottajien käytännön haasteita ja paikallista asiantuntemusta, biomassojen tuotanto- ja jatkojalostusprosesseihin on helpompi innovoida uusia ratkaisuja. Esimerkiksi biokaasututkimus, joka teknologisten ratkaisujen lisäksi auttaa ratkaisemaan tilojen kokoon liittyvät taloudelliset ja kapasiteetilliset haasteet osallistamalla maatalousyrittäjät, paikalliset yritykset ja päättäjät aktiivisesti mukaan koko tutkimusprosessiin, edistää konkreettisesti biokiertoalouden muutosta käytännössä. Kun yritykset ja tutkijat kehittelevät uusia innovatiivisia tuotteita yhdessä maanomistajien ja muiden sidosryhmien kanssa, luodaan ratkaisuja, jotka tehokkaammin ottavat huomioon sekä käytännön haasteet että paikalliset vah-

vuudet. Monitieteellisyys auttaa ymmärtämään yhteiskunnallisia haasteita kokonaisvaltaisemmin, luomaan yhteisymmärrystä ja parantamaan päätöksenteossa käytettävää tietopohjaa.

EU on eri politiikoissaan ja strategioissaan voimakkaasti korostanut tarvetta hyödyntää sivuvirtoja mahdollisimman korkean jalostusasteen tuotteiden tuotannossa. Sen lisäksi on korostettu sitä, että vihreän murroksen ei tulisi lisätä yhteiskunnallista eriarvoisuutta. Yleisesti voidaan sanoa, että oikeudenmukaista yhteiskunnallista muutosta tukevat TKI-toimenpiteet ja niiden käytäntöön vienti osallistavat sidosryhmien edustajia aktiivisesti läpi koko prosessin, mukaan lukien TKI-kysymysten kehittämisen. Näin kyetään paremmin huomioimaan eri sidosryhmien asiantuntemus omien tarpeidensa ja haasteidensa suhteen – oli kyseessä alkutuottajan kokonaisvaltainen käytännön ammatillinen osaaminen ja hänen paikallistietonsa, yritysten tuotannolliset vaatimukset ja markkinoiden ymmärtäminen tai poliittisten päätöksentekijöiden hallinnolliset tietotarpeet.

Kansallisesti visiotyö ja siitä johdetut toimenpiteet kiinnittyvät tiiviisti tukemaan alueellisten ekosysteemien, TKI- sekä yrityssektorin biokiertoalouden arvoketjujen kasvutavoitteita. Konkretiasolla alueet ovat määritelleet elinvoimaisuutta tukevat tavoitteensa niin alueiden erikoistumisstrategioiden, kansainvälistymisen kuin myös keskeisten alueiden veturikaupunkien erikseen tekemien ekosysteemisopimusten kautta. Tiiviiksi rakentuvilla ja oikein hyödynnetyillä innovaatiotoiminnan paikallisilla yhteistyöverkostoilla on koko Suomen biokiertoalouden kilpailukykyä voimistava vaikutus.

Kansainvälisillä markkinoilla biokiertoalouden pitää sisällään lukuisia eri merkityksiä. Tämä tuo visiolle säännöllisen päivittämistarpeen – mikä johtuu markkinoiden nopeista muutoksista, vihreiden investointien ohjautumisesta eri alueille sekä EU-tason sääntelyn kehityksestä. Nähtävissä kuitenkin on, että globaalistikin suurten biokiertoalouden murrokseen vastaavien ratkaisujen taustalla merkittävänä tekijänä vaikuttavat tulevaisuudessa arvoketjun toimijoiden keskinäiset ekosysteemit, yhteenliittymien vahvuus, tunnettuus ja luotettavuus.

Tulevaisuutta rakennetaan jo tänään ja niinpä ratkaisuilamme on vaikutusta tulevien sukupolvien elämään ja mahdollisuuksiin. Entä jos biokiertoalouden on valtavirtaistunut vuonna 2050 ja olemme siirtyneet tämänkin raportin esimerkkien myötä lineaarisesta taloudesta biokiertoalouteen? Matkalla olemme jo, mutta millaisen tiekartan tarvitsisimme? Tässä visiotyössä on jo eväitä siihenkin.

Kiitokset

Antti Asikainen, Miitta Eronen, Henrik Heräjärvi, Maria Hyvönen, Susanna Hämäläinen, Meri Kallasvuori, Hanna-Maija Karikallio, Liisa Keto, Petri Kilpeläinen, Risto Korpinen, Jani Lehto, Johanna Leppänen, Antti Majava, Pertti Marnila, Eero Mikkola, Antti Mutanen, Matti Pastell, Krista Peltoniemi, Jani Pulkkinen, Johanna Routa, Pekka Saranpää, Elina Tampio, Miika Tapio, Sirja Viitala, Erika Winquist ja Kari Ylivainio.

Sanasto

Märkäpyrolyysi	Vesipitoiselle orgaanisperäiselle biomassalle soveltuva konversiotekniikka (vrt. pyrolyysi). Menetelmän avulla biomassaa muunnetaan neste- ja kiintoainetuotteiksi lämmön ja veden avulla.
Fermentointi	Fermentaatio on prosessi, jossa mikrobit pilkkovat orgaanisia yhdisteitä ja tuottavat erilaisia aineenvaihduntatuotteita, esim. alkoholeja ja happoja. Voidaan käyttää myös säilöntämenetelmänä.
Ekstruusio	Suulakepuristustekniikka, jossa polymeeriset muovin kaltaiset tuotteet voidaan lämmityksen ja puristuksen avulla muotoilla käyttötarkoituksi.
HTC (Hydrothermal Carbonization)	Hydroterminen hiilestys (ks. märkäpyrolyysi). Kiinteiden ja energiatiheiden tuotteiden, kuten biohiilen, tuotantoon soveltuva prosessitekniikka.
HTL (Hydrothermal Liquefaction)	Hydroterminen nesteytys (ks. märkäpyrolyysi). Nestemäisten ja energiatiheiden tuotteiden, kuten bioöljyn, tuotantoon soveltuva prosessitekniikka.
Hydrolyysi	Kemiallinen reaktio, jossa yhdiste hajoaa vettä lisättäessä takaisin lähtöaineikseen.
Höyryräjäytys	Märkä biomassaa lämmitetään ja paineistetaan suljetussa tilassa. Paine lasketaan nopeasti, jolloin vesihöyryn tilavuus kasvaa ja "höyry räjähtää". Tämän seurauksena osa biomassan kuiduista rikkoutuu.
Pyrolyysi (hidas, nopea ja flash)	Kuivalle orgaanisperäiselle biomassalle soveltuva konversiotekniikka. Konversioprosessissa kuiva biomassaa muunnetaan korkean lämpötilan avulla neste-, kaasu- ja kiintoainetuotteiksi. Tuotteiden saannot ja soveltuvuus erilaisiin hyötykäyttökohteisiin riippuu käytetyn pyrolyysin prosessinopeudesta. Pyrolyysiprosessit voidaan jakaa päätyyppeihin lämmitysnopeutensa mukaan: hidas, nopea ja flash.
Torrefikaatio	Kuivalle orgaanisperäiselle biomassalle soveltuva konversiotekniikka. Konversioprosessissa kuiva biomassaa muunnetaan kohotetun lämpötilan avulla neste-, kaasu- ja kiintoainetuotteiksi. Tuotteiden saannot ja soveltuvuus erilaisiin hyötykäyttökohteisiin riippuu merkittävästi käytetystä raaka-aineesta. Menetelmä sopii tuottamaan lisäarvotuotteita lignoselluloosaperäisistä biomassoista sekä raaka-aineiden esikäsittelymenetelmäksi erilaisille pyrolyysitekniologioille (ks. pyrolyysi)

Viitteet

Bartek, L., Strid, I., Henryson, K., Junne, S., Rasi, S. & Eriksson, M. 2021. Life cycle assessment of fish oil substitute produced by microalgae using food waste. Sustainable Production and Consumption 27. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.04.033>

Bianchi, A., Larmola, T., Kekkonen, H., Saarnio, S. & Lång, K. 2021. Review of greenhouse gas emissions from rewetted agricultural soils. Wetlands 41:108. <https://doi.org/10.1007/s13157-021-01507-5>

Euroopan Komissio 2020. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikeskustelulle ja elueiden komitealle. Vetystrategia ilmastoneurtoille Euroopalle. Bryssel 8.7.2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=FI>

FarmGas-PS2 hanke: <https://www.youtube.com/watch?v=7uZFQQqeal4>

Hagner, M., Uusitalo, M., Ruhanen, H., Heiskanen, J., Peltola, R., Tiilikkala, K. & Mäkitalo, K. 2021. Amending mine tailings cover with compost and biochar: effects on vegetation establishment and metal bioaccumulation in the Finnish subarctic. Environmental Science and Pollution Research <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14865-8>

Heiska, S., Korhonen, K., Marnila, P., Muilu, T., Mäki, M. & Välimaa, A.-L. 2020. Hyönteiset elinkeinona – Mahdollisuuksia Pohjois-Pohjanmaalla ja muualla Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 72/2020. 28 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-062-5>

Heikkinen, J., Keskinen, R., Soine, 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. p. 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.028>

Heiskanen, J., Ruhanen, H. & Hagner, M. 2022. Effects of compost, biochar and ash mixed in till soil cover of mine tailings on plant growth and bioaccumulation of elements: A growing test in a greenhouse. Heliyon e08838 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08838>

Hiidenhovi, J., Järvenpää, E., Kahala, Katajajuuri, J.-M., Kotilainen, T., Leppänen, J., Luostarinen, S., Mattila, P. & Mäkinen, P. 2021. Kiertotalous ruokajärjestelmässä. Teoksessa: Kotilainen, T., Kärkkäinen, K., Mäkinen, S., Niemi, J., Pastell, M. & Vilkki, J. Innovatiivinen ruokajärjestelmä, Tutkimusohjelman loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 25/2021. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-187-5>

Ho, T. M., Abik, F., Hietala, S., Isaza Ferro, E., Pitkänen, L., Juhl, D.W., Vosegaard, T., Kilpeläinen, P.O. & Mikkonen, K.S. 2022. Wood lignocellulosic stabilizers: effect of their characteristics on stability and rheological properties of emulsions. Cellulose 30: 753–773.

IEA 2022. Global Hydrogen Review. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>

Ijäs, M. 2022. Biomethanation potential in biogas and bioethanol plants in Finland. Master's Thesis. University of Tampere. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202210187668>

Kakoulaki, G., Kougiyas, I., Taylor, N., Dolci, F., Moya, J & Jäger-Waldau, A. 2021. Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. Energy Conversion and Management 228: 113649. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113649>

Keskinen, R., Hyväluoma, R., Wikberg, H., Källi, A., salo, T. & Rasa, K. 2018. Possibilities of using liquids from slow pyrolysis and hydrothermal carbonizations in acidification of animal slurry. Waste and Biomass Valorization 9, 1429–1433. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9910-4>

Keskinen, R., Nikama, J., Kaseva, J. & Rasa, K. 2021. Feasibility of nitrogen-enriched chars as circular fertilizers. Waste and Biomass Valorization. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01471-5>

Keto, L., Perttilä, S., Särkijärvi, S., Immonen, N., Kytölä, K., Alakomi, H.-L., Hyytiäinen-Pabst, T., Tsitko, I., Saarela, M. & Rinne, M. 2021. Effect of silage juice feeding on pig production performance, meat quality and gut microbiome. Livestock Science 254: 104728. [doi https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104728](https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104728)

Korkalo, P., Hagner, M., Jänis, J., Mäkinen, M., Kaseva, J., Lassi, U., Rasa, K. & Jyske, T. 2022. Pyrolygineous Acids of Differently Pretreated Hybrid Aspen Biomass: Herbicide and Fungicide Performance. Frontiers in Chemistry 9: 821806. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.821806>

Kotilainen, T., Kärkkäinen, K., Mäkinen, S., Niemi, J., Pastell, M. & Vilkki, J. 2021. Innovatiivinen ruokajärjestelmä: Tutkimusohjelman loppuraportti.

Lehto, M., Erkamo, E., Kuisma, R., Mäki, M., Haikonen, T., Jallinoja, M. & Kymäläinen, H.-R. 2021. Elintarviketuotannon sivujakeiden hyödyntäminen: Liha-, kala- ja kasvistuotannon sivujakeet. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 68/2020. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 94 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-281-0>

Lehto, M., Högel, H., Marttila, J., Miettinen, P., Hiidenhovi, J. & Heräjärvi, H. 2023. Höyhenten ja poistotekstiilien jalostusarvon nosto ja uudet käyttökohteet. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus xx/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki 54 s. [Painossa].

Leinonen, A., Åkerman, M., Kruus, K., Asikainen, A., Muhonen, T. & Kohl, J. (toim.). 2017. Bittejä ja biomasaa - Tiekartta digitalisaation vauhdittamaan biotalouteen. VTT VISIONS 11. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. ISBN 978-951-38-8605-9. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8605-9>. 108 p.

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.

Luke 2022. Virallisten lajikekokeiden tulokset. <http://px.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/maatalous/?rxid=410-d8271-72f5-455f-8b46-f5ec2f191f6d>

Peltoniemi, K., Velmala, S.-K., Fritze, H., Jyske, T., Rasi, S., Pennanen, T. 2023. Impacts of coniferous bark-derived organic amendments on microbial communities in arable soil – a microcosm study. FEMS Microbiology Ecology. [Accepted manuscript].

Rasa, K., Viherä-Aarnio, A., Rytönen, P., Hyväluoma, J., Kaseva, J. & Jyske, T. 2021. Quantitative analysis of feedstock structural properties can help to produce willow biochar with homogenous pore system. Industrial Crops & Production 166: 113475. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113475>

Rasi, S., Vainio, M., Blasco, L., Kahala, M., Leskinen, H. & Tampio, E. 2022. Changes in volatile fatty acid production and microbiome during fermentation of food waste from hospitality sector. Journal of Environmental Management 308: 114640. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114640>

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>

Sarvi, M., Hagner, M., Velmala, S., Soinne, H., Uusitalo, R., Keskinen, R., Ylivainio, K. & Rasa, K. Bioavailability of phosphorus in granulated and pyrolyzed broiler manure. 2021. Environmental Technology & Innovation 23: 101584. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101584>

Tampio, E., Winqvist, E., Luostarinen, S. & Rinne, M. 2019. A farm-scale grass biorefinery concept for a combined pig feed and biogas production. Water Science and Technology 80: 1043–1052. doi: 10.2166/wst.2019.356

Koljonen, T., Kurttila, M & Honkatukia, J. 2021. Suomen biotalouden kestävä kasvun skenaario - Taustaselvitys Suomen biotalousstrategian päivitykseen. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2021:57.

Wichtmann, W., Schröder, C. & Joosten, H. (Eds.) 2016. Paludiculture - Productive use of Wet Peatlands: Climate Protection - Biodiversity - Regional Economic Benefits. Schweizbart Science Publishers, Stuttgart

Winqvist, E., Joutsjoki, V., Lokka, J., Lehtonen, E., Anttila, P., Ronkainen, A., Suokannas, A., Holmström, E., Lindblad, J., Routa, J., Brännström, H., Järvenpää, E., Saranpää, P., Väätäinen, K., Kankaanhuhta, V., Lötjönen, T., Niemeläinen, O., Saarni, K., Rahkonen, R., Setälä, J., Helin, J. & Rikkonen, P. 2022. Biotalousraaka-aineet ja materiaalivirrat hyötykäyttöön logistiikkaa tehostamalla: Synteesiraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 83/2022. Luonnonvara-keskus. Helsinki. 83 s.

Viherä-Aarnio, A., Jyske, T. & Beuker, E. (toim.). 2022. Pajut biokierratotaloudessa : Materiaaleja, arvoaineita, ympäristöhyötyjä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 129 s.



**Löydät meidät
verkosta**

luke.fi

