



METSÄBIOTALOUDEN
TIEDEPANEELI

METSÄBIOTALOUDEN TIEDEPANEELIN RAPORTTI 1/2024

Lankusta lääkkeisiin

Tuoteportfolion arvonnoususta uutta arvonlisää metsäsektorille

Monika Österberg, Markku Karjalainen, Jussi Lintunen, Tekla Tammelin,
Antti Asikainen, Esa Vakkilainen, Ritva Toivonen, Pasi Virta, Alexander Henn,
Emmi-Maria Nuutinen, Johanna Kohl, Jukka Hassinen



Lankusta lääkkeisiin

Tuoteportfolion arvonnoususta uutta arvonlisää metsäsektorille

Monika Österberg, Markku Karjalainen, Jussi Lintunen, Tekla Tammelin,
Antti Asikainen, Esa Vakkilainen, Ritva Toivonen, Pasi Virta, Alexander Henn, Emmi-Maria Nuutinen,
Johanna Kohl, Jukka Hassinen

VIITTAUSOHJE:

Österberg, M., Karjalainen, M., Lintunen, J., Tammelin, T., Asikainen, A., Vakkilainen, E., Toivonen, R., Virta, P., Henn, A., Nuutinen, E-M., Kohl, J., Hassinen, J. 2024. Lankusta lääkkeisiin - Tuoteportfolion arvonnoususta uutta arvonlisää metsäsektorille. Metsäbiotalouden tiedepaneelin raportti 1/2024. Metsäbiotalouden tiedepaneeli. Helsinki. 36 s.

Pääkirjoittajan ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-3558-9172>



**METSÄBIOTALOUDEN
TIEDEPANEELI**

ISBN 978-952-65456-0-8 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2984-1836 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-65456-0-8>

Copyright: Metsäbiotalouden tiedepaneeli

Kirjoittajat: Monika Österberg, Markku Karjalainen, Jussi Lintunen, Tekla Tammelin, Antti Asikainen,

Esa Vakkilainen, Ritva Toivonen, Pasi Virta, Alexander Henn, Emmi-Maria Nuutinen, Johanna Kohl, Jukka Hassinen

Julkaisija ja kustantaja: Metsäbiotalouden tiedepaneeli, Helsinki 2024

Julkaisuvuosi: 2024

Tiivistelmä

Monika Österberg¹, Markku Karjalainen², Jussi Lintunen³, Tekla Tammelin⁴, Antti Asikainen³, Esa Vakkilainen⁵, Ritva Toivonen⁶, Pasi Virta⁷, Alexander Henn¹, Emmi-Maria Nuutinen⁴, Johanna Kohl³, Jukka Hassinen¹

¹ Aalto-yliopisto, Kemian tekniikan korkeakoulu, Biotuotteiden ja biotekniikan laitos

² Tampereen yliopisto, Arkkitehtuurin yksikkö

³ Luonnonvarakeskus

⁴ Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Tulevaisuuden tuotteet ja materiaalit -liiketoiminta-alue

⁵ LUT-yliopisto, Energiatekniikka

⁶ Helsingin yliopisto, Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta

⁷ Turun yliopisto, Kemian laitos

Metsät ovat Suomen monipuolisen hyvinvoinnin perusta. Metsäteollisuus on yksi suurimmista teollisuuden aloista Suomessa ja sillä on merkittävä rooli Suomen kansantaloudelle. Suomen biotalousstrategiassa tavoitteeksi on asetettu metsäbiotalouden arvonlisän kaksinkertaistamisen vuoteen 2035 mennessä, tinkimättä monimuotoisuus- ja ilmastotavoitteista. Kaikkia metsiin kohdistuvia tavoitteita on kuitenkin vaikea saavuttaa, ja päättäjien on tehtävä valintoja. Näiden valintojen tueksi tarvitaan tutkimukseen perustuvia tarkasteluja, joihin metsien käytön, suojelun ja ilmastotavoitteiden yhdistelmät voidaan perustaa.

Luonnonvarakeskuksen vuonna 2023 julkaisemassa metsäsektorin tulevaisuutta käsittelevässä keskustelunavauksessa todettiin, että Suomessa on potentiaalia metsäpohjaisen arvonlisän moninkertaistamiseen. Arvonlisän moninkertaistaminen edellyttää keskustelunavauksen mukaan kuitenkin sitä, että toimintaympäristöä pystytään muokkaamaan houkuttelevaksi kotimaisten ja kansainvälisten yritysten investoinneille.

Tässä Metsäbiotalouden tiedepaneelin raportissa jatkamme tätä keskustelua. Tarkastelemme tarkemmin metsäsektorin potentiaalista tulevaisuuden tuotepalettia ja siitä muodostuvaa arvonlisää. Tarkasteltavat tuotteet on jaoteltu nykyisten ratkaisujen päivitykseen ja uusiin innovaatioihin. Uusia tarkasteltavia tuoteryhmiä ovat muun muassa joustavat pakkaukset, kehittyneisiin erikoisselluihin perustuvat tuoteryhmät ja ligniinin lukuisat jalosteet.

Merkittävä hakkuumäärien lisääminen ei ole kestävää. Siksi tarkastelemme raportissa skenaariota, jossa arvonlisää tuotetaan hakkuumääriä lisäämättä.

Selvityksemme mukaan avainasemassa metsäsektorin arvonlisän kasvattamisessa ovat arvoketjujen pidentäminen Suomessa ja sivuvirtojen tehokkaampi hyödyntäminen. Yksi lähitulevaisuuden tehokkaista tavoista saavuttaa arvonlisäystä olisi sahatavaran jatkojalostus ristiliimatuksi massiivipuuksi (CLT) tai viilupuuksi (LVL) ja niiden käyttö betonin sijasta kerrostalojen rungoissa. Tulevaisuudessa merkittävän arvonlisän saavuttaminen edellyttäisi uusien materiaali-innovaatioiden kaupallistamista Suomessa. Jos esimerkiksi neljäsosa vientisellusta (tuhat kilotonnia) jatkojalostettaisiin kotimaassa muun muassa nanoselluksi, tekstiilikuiduksi, erikoispakkauksiin ja pakkausbarrier-materiaaleiksi, voisi kolmen miljardin euron arvonlisä olla mahdollinen. Ligniinin laaja jatkojalostus eri tuotteiksi voisi johtaa puolentoista miljardin euron arvonlisään. Skenaariossa kokonaisarvonlisä kasvaa yli 80

prosenttia vuoteen 2019 verrattuna. Kasvu on merkittävä, joskaan ei aivan riittävä arvonlisän kaksinkertaistamiseksi.

Tarvitaan huomattavia investointeja, jotta metsäsektorin nykyistä tuoteportfoliota saadaan laajennettua kohti korkeamman jalostusarvon tuotteita. Myös tutkimukseen ja koulutukseen on satsattava. Suomesta pitää tehdä houkutteleva ympäristö investoinneille ja osaavalle työvoimalle.

Vaikka keskitymme raportissamme lähinnä taloudellisiin muuttujiin, on muistettava, että myös monimuotoisuus- ja ilmastotavoitteet vaikuttavat metsien käyttöä koskeviin päätöksiin. Siksi on tärkeää tarkastella ilmasto- ja ennallistamistoimia sekä biotalouden edistämistä kokonaisvaltaisesti ja tehdä toimenpiteitä, jotka parhaiten edistävät näitä kaikkia.

Tämän raportin tarkoitus on antaa pohja tuleville skenaariotöille. Raportissa esitettyjen lukujen ja arvioiden taustalla on useita oletuksia, joten raportin laskelmiin on suhtauduttava suuntaa antavina. Tästä huolimatta laskelmat on viety sektorin ja kansantalouden tasolle saakka, jotta uusiin tuotteisiin ja niiden tuotantoon liittyviä taloudellisia suuruusluokkia voidaan paremmin arvioida. Kun innovaatiot kehittyvät ja tieto valmistuskustannuksista tai myyntihinnoista lisääntyy, voidaan arvioita tarkentaa.

Metsäbiotalouden tiedepaneelin politiikkasuositukset:

- Biopohjainen teollisuus voi kirittää Euroopan unionin taloudellista kehitystä. EU-politiikan tulee ohjata tutkimusta ja investointeja kohti korkean arvonlisän biopohjaista teollisuutta. Epävarmuus esimerkiksi EU:n omien metsien hyödyntämisen edellytyksistä rapauttaa investointi-ilmapiiriä. Keskeinen epävarmuutta lisäävä tekijä on voimakkaasti kasvanut metsiä koskeva EU-regulaatio: yli 70 ajan yli muuttuvaa politiikkatoimea kohdistuu metsiin.
- Suomesta pitää tehdä houkuttelevampi ympäristö yrittäjille ja kansainvälisille osaajille. On tärkeää, että yliopistoissa kouluttamamme maisterit, diplomi-insinöörit ja tohtorit työllistyvät Suomeen ja integroituvat osaksi suomalaista yhteiskuntaa.
- Biopohjaisten materiaali-innovaatioiden tueksi tarvitaan rahoitusta soveltavaan monitieteiseen kehitystyöhön, jonka avulla voidaan varmistaa muun muassa uusien materiaalien valmistuksen teknistaloudellinen potentiaali, kestävyys ja toiminta eri sovelluksissa.
- Puusta tulee valmistaa pitkäikäisiä ja kierrätettäviä tuotteita, jotka sitovat hiiltä. Puupohjaisilla ratkaisuilla voidaan korvata erityisesti rakentamisessa tuotteita, joilla on puutuotteita suurempi hiilijalanjälki. Puu ja puupohjaiset ratkaisut tulee tuoda osaksi koulutusta, teollisen rakentamisen järjestelmiä, ja niitä ohjaavaa politiikkaa.
- Metsä ei ole vain biotalouden materiaalipankki. Päätöksentekijöiden pitää yhteensovittaa metsien käyttöön liittyviä, joskus ristikkäisiä tavoitteita, kuten talouskasvu, ilmasto-, biodiversiteetti- ja virkistyskäyttötavoitteita.

Asiasanat: biotalous, metsäteollisuus, arvonlisä, ligniini, nanosellu, jatkojalostus, puurakentaminen, puutuotteet

Abstract in English

Monika Österberg¹, Markku Karjalainen², Jussi Lintunen³, Tekla Tammelin⁴, Antti Asikainen³, Esa Vakkilainen⁵, Ritva Toivonen⁶, Pasi Virta⁷, Alexander Henn¹, Emmi-Maria Nuutinen⁴, Johanna Kohl³, Jukka Hassinen¹

¹ Aalto University, School of Chemical Engineering, Department of Bioproducts and Biosystems

² Tampere University, The School of Architecture

³ Natural Resources Institute Finland (Luke)

⁴ VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, Sustainable Products and Materials

⁵ LUT University, Energy Technology

⁶ University of Helsinki, Faculty of Agriculture and Forestry

⁷ University of Turku, Department of Chemistry

Forests are the foundation of Finland's diverse well-being. The forest industry is one of the largest industrial sectors in Finland and plays an important role in Finland's national economy. Finland's bioeconomy strategy has set a target of doubling the added value of bioeconomy by 2035 without compromising biodiversity and climate change objectives. However, achieving all forest-related targets is difficult, and choices must be made. To support these choices, research-based analyses are needed to find an optimal balance between forest use, conservation and climate objectives.

A discussion paper on the future of the forest sector published by the Natural Resources Institute Finland in 2023 concluded that Finland has the potential to multiply forest-based added value, provided that the business environment can be made attractive for investments by domestic and international companies.

In this report of the Finnish Forest Bioeconomy Science Panel, we continue this discussion. We look into the potential future product portfolio of the forest sector and the value added it can generate. The products considered are divided into upgrades of existing solutions and new innovations. The new innovations include, for example, flexible packaging, product groups based on advanced specialty fibres and a wide range of lignin products.

It is evident that a significant increase in forest harvesting is not sustainable. Thus, in the report we consider a scenario where value is added without increasing harvest volumes.

According to this report, the key strategies for enhancing the added value of the forest sector include extending the value chains within Finland and making more efficient use of side streams. An impactful approach to value addition in the foreseeable future involves advanced processing of timber into cross-laminated timber (CLT) or laminated veneer lumber (LVL), which could be substituted for concrete in the construction of apartment building frames. In the future, achieving significant added value requires the commercialization of new material innovations in Finland. For example, if a quarter of the exported pulp (1000 kt) were refined into, for example, nanocellulose, textile fibres, special packaging and barrier materials, an added value of €3000 M could be achievable. Extensive refinement of lignin into various products could lead to an added value of €1500 M. In this scenario, the total added value increases by more than 80% compared to 2019. This increase is significant, although not sufficient to double the value added.

Substantial investments are essential for transitioning the existing product portfolio towards higher value-added products. Concurrently, investments in research and education are imperative. Finland must cultivate an operating environment that is appealing for both investments and skilled labour. While this report primarily focuses on economic considerations, it is crucial to acknowledge that forest-related choices are impacted by biodiversity and climate objectives. Thus, a holistic approach is necessary, integrating climate and restoration measures, as well as the advancement of the bioeconomy, to ensure that actions contribute optimally to all objectives.

The aim of this report is to lay the groundwork for future scenario analyses. The figures and estimations herein are based on educated assumptions; therefore, the findings should be regarded as indicative. Nevertheless, the calculations have been extended to the sectoral and national economy levels, aiming to provide a more comprehensive estimation of the economic significance of the new products and their production. As innovations progress and data on manufacturing costs and sales market prices emerge, these estimates can be further refined for greater accuracy.

Policy recommendation of the Finnish Forest Bioeconomy Science Panel:

- The bio-based industry has the potential to accelerate the economic development of the European Union. EU policy should steer research and investments towards high value-added bio-based industries. Uncertainty about the conditions for exploiting the EU's own forests, for example, is eroding the investment climate. A key factor contributing to uncertainty is the proliferation of EU regulation related to forests, with more than 70 fluctuating policy measures affecting forests.
- Finland needs to become a more attractive environment for entrepreneurs and international talent. It is important that our university-educated masters, engineers, and PhDs find employment in Finland and integrate into Finnish society.
- To support bio-based material innovations, funding is needed for applied multidisciplinary development efforts to ensure, among other things, the techno-economic potential, sustainability, and performance of new materials in different applications.
- Wood should be used to make long-lasting and recyclable products that sequester carbon. Wood-based solutions can replace products with a higher carbon footprint than wood products, particularly in the construction sector. Wood and wood-based solutions should be integrated into education, industrial building systems and the policies that govern them.
- Forests are not just a material bank for the bioeconomy. Decision-makers need to reconcile the sometimes contradictory objectives of forest use, such as economic growth, climate, biodiversity and recreation.

Keywords: bioeconomy, forest industry, added value, lignin, nanocellulose, further processing, wood construction, wood products

Sisällys

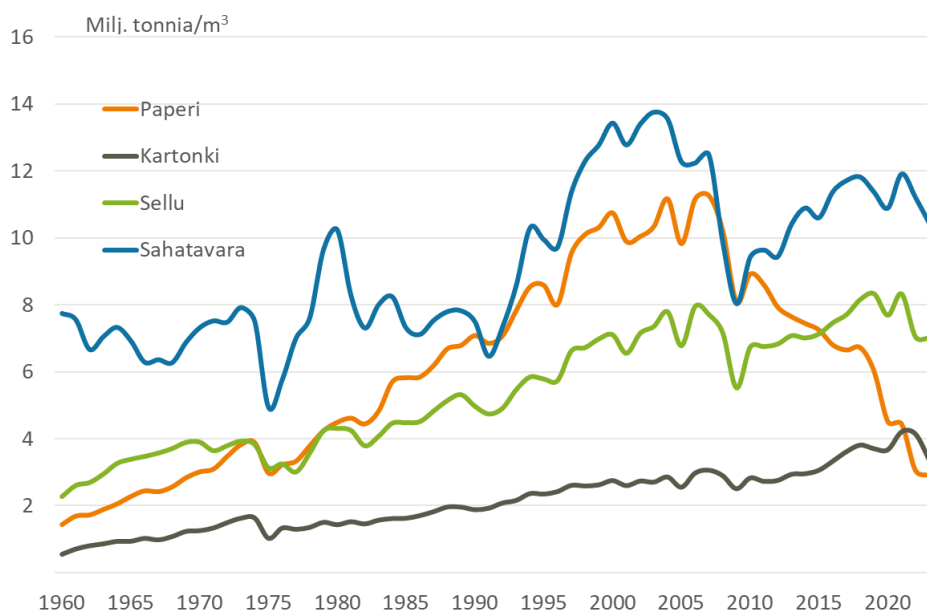
1. Johdanto.....	8
2. Askelmerkkejä kohti metsäsektorin arvonlisän nostoa	10
2.1 Nykyisten ratkaisujen päivitys.....	10
2.1.1 Puurakentaminen.....	10
2.1.2 Pakkausmateriaalit.....	14
2.1.3 Tekstiiliteollisuus	16
2.1.4 Energia	16
2.2 Tulevaisuuden innovaatiot	17
2.2.1 Sivuvirtojen tehokas hyödyntäminen - Ligniini.....	17
2.2.2 Vientisellun jatkojalostus Suomessa	21
2.2.3 Energiatuotteet – CCS ja P2X.....	25
2.3 Metsäsektorin kokonaisarvonlisä.....	26
3. Johtopäätökset ja visio	29
Viitteet	31
Liite. Laskennan toteutus.....	36

1. Johdanto

Metsä on Suomen tärkein uusiutuva luonnonvara niin hyvinvoinnin, talouden kuin ilmastonkin kannalta. Metsän tuottamat hyödykkeet perustuvat pääosin puubiomassan kasvattamiseen ja hyödyntämiseen raaka-aineina, jalosteina ja energiana. Kansallinen biotalousstrategia ”Kestävästi kohti korkeampaa arvonlisää” (Valtioneuvosto 2022) tavoittelee biotalouden arvonlisän kaksinkertaistamista vuoteen 2035 mennessä verrattuna vuoden 2019 tasoon. Arvonlisäyksen tavoitellaan tapahtuvan ekologisesti, sosiaalisesti ja taloudellisesti kestäväällä tavalla, ottaen huomioon myös Ilmastolakiin kirjattu sitoumus hiilineutraaliudesta vuoteen 2035 mennessä. Metsäteollisuuden luomaan arvonlisään ovat 2000-luvulla vaikuttaneet negatiivisesti paperin kysynnän ja tuotannon lasku, (Kuva 1) mikä on johtanut siihen, että yhä suurempi osa Suomessa valmistetusta sellusta viedään maailmalle jatkojalostamattomana.

Viime vuosien globaali laskusuhdanne yhdistettynä geopolittisiin jännitteisiin on vaikuttanut merkittävästi metsäsektorin toimintaympäristöön. Venäjän vuonna 2022 Ukrainassa käynnistämän hyökkäyssodan johdosta asetettujen pakotteiden vuoksi puun tuonti Venäjältä lakkasi, minkä oletettiin lisäävän painetta kasvattaa kotimaisen puun korjuuta. Metsäteollisuuden tuotteiden kysyntä on kuitenkin vähentynyt merkittävästi muun muassa inflaation ja korkojen nousun myötä, mikä on heijastunut koko toimialan tuotantomäärien laskuun Suomessa (Metsäteollisuus ry 2024).

Viime vuosien laskusuhdanteesta huolimatta on kuitenkin selvää, että merkittävä hakkuumäärien lisääminen Suomen metsissä ei ole kestävää, joten arvonlisän tuottamiseksi tarvitaan muita keinoja. Tässä Metsäbiotalouden tiedepaneelin raportissa luodaan katsaus innovaatioihin, jotka eivät vielä ole tuotannollisessa mittakaavassa, mutta voivat keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä nostaa metsäsektorin tuotannon arvoa Suomessa. Raportissa hahmotellaan myös toimia, politiikkaympäristöä ja TKI-panostuksia, joilla voidaan vauhdittaa näiden innovaatioiden matkaa laboratorioista tuotantolinja- ja laitosinvestointeihin saakka, sekä skenaarioiden riskitekijöitä ja rajoitteita.



Kuva 1. Metsäteollisuuden tuotantomäärät Suomessa (Metsäteollisuus ry 2024).

Raportissa tarkastellaan idullaan olevia, jo pilotoituja tai tuotantoa lähestyviä metsäpohjaisia tuotteita, sekä hahmotellaan niiden potentiaalisia tuotantovolyymejä, ja mahdollista arvonlisää. Korkeampaan arvonlisään tähtäävät tuotteet ja ratkaisut voidaan jakaa kahteen kategoriaan; nykyisten ratkaisujen päivitys ja tulevaisuuden innovaatiot. Ensimmäiseen kategoriaan kuuluvat muun muassa puurakentamisen uudet ratkaisut, puupohjaiset tekstiilituotteet ja kuitupohjaiset pakkaukset.

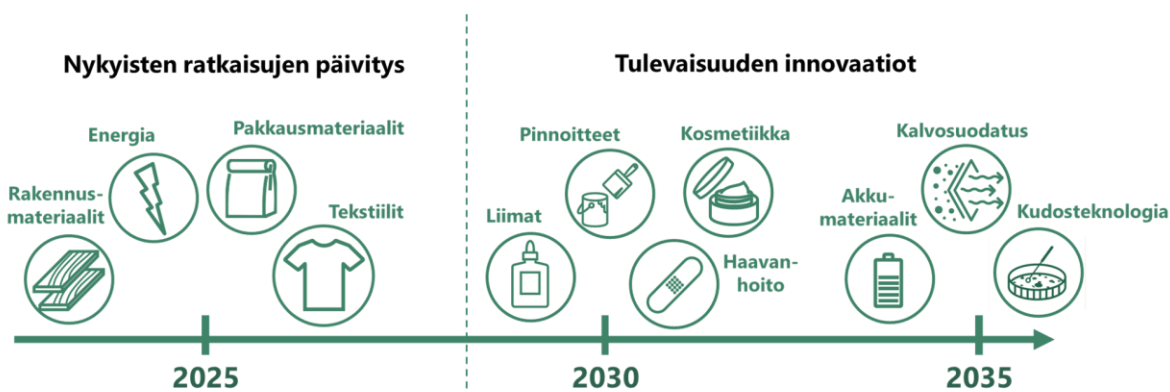
Tulevaisuuden tuotteista tarkastelun kohteiksi on valittu nanoselluloosan ja ligniinin hyödyntäminen materiaaleissa sekä lupaavimmat biolääketieteen sovellukset. Raportissa esitetyt luvut ja arviot varsinkin kauempana tuotantomittakaavasta olevien tuoteryhmien osalta ovat karkeita ja siksi raportin laskelmiin on suhtauduttava suuntaa antavina. Tästä huolimatta raportin laskelmat on viety sektorin ja kansantalouden tasolle saakka, jotta uusiin tuotteisiin ja niiden tuotantoon liittyviä taloudellisia suuruusluokkia voidaan paremmin arvioida.

Luonnonvarakeskuksen keskustelunavaus (Lintunen ym. 2023) tarkasteli Suomen biotalousstrategian mukaista biotalouden arvonlisän kaksinkertaistamistavoitetta metsäsektorin osalta. Keskustelunaloitteen tarkastelua rajoitti uusiin tuotteisiin liittyvän tiedon saatavuus ja siten tavoitteen saavuttaminen rakentui suhteellisen pienen tuoteportfolion varaan. Tässä työssä tarkasteltua tuoteportfoliota laajennetaan erityisesti sellun ja ligniinin jatkojalostusmahdollisuuksien osalta. Tässä työssä ei myöskään pakoteta metsäsektorin arvonlisäystä biotalousstrategian mukaiselle kaksinkertaiselle tasolle, vaan tuotteiden tuotantotasot perustuvat skenaarioihin raaka-aineen saatavuudesta ja tulevasta markkinakysynnästä.

Tarkastelu rajataan teknisiin ja taloudellisiin muuttujiin ja esimerkiksi biodiversiteettiin tai ilmastokysymyksiin liittyvä problematiikka on rajattu tarkastelun ulkopuolelle. Lähtöoletuksena on, että uudet tuotteet ja tuotanto eivät lisää metsäraaka-aineiden kulutusta tai vastaavasti luo nykyistä tuotantoa enemmän epäedullisia ympäristö- ja ilmasto vaikutuksia. On myös huomionarvoista, että metsäsektorin tuotteet ovat laajalti yhteensopivia kiertotalouden periaatteiden kanssa. Paperi- ja kartonkikuidut kestävät kierrätystä selkeästi muovia paremmin: Paperikuitua voidaan kierrättää 5–7 kertaa ja kartonkikuitua jopa yli 20 kertaa ennen kuin niiden mekaaniset ominaisuudet heikkenevät (Eckhart 2021). Biopohjaiset lähtöaineet mahdollistavat myös biohajoavien materiaalien kehityksen esimerkiksi sovelluksiin, joissa materiaalien talteenotto käyttöympäristöstä on haastavaa.

2. Askelmerkkejä kohti metsäsektorin arvonlisän nostoa

Suomen metsäsektorin talouskasvu edellyttää tuotantoketjujen murrosta. Ilmastotavoitteita silmällä pitäen metsäsektorin kasvu ei voi jatkossa perustua ainoastaan volyymiperusteiseen hakkuumäärien lisäämiseen. Vaikkakin metsät muodostavat edelleen Suomessa hiilidioksidin nettonielun, kääntyi Suomen maankäyttösektori vuonna 2021 kokonaisuudessaan hiilinielusta hiilidioksidin päästölähteeksi (Luonnonvarakeskus 2022). Jotta metsäsektorin tärkeä rooli Suomen taloudelle pystytään säilyttämään ilmastokestävällä tavalla, on siirryttävä lankkujen ja sellun viennistä kohti arvokkaampien tuotteiden valmistusta. Tässä raportissa paneudumme tuoteryhmiin ja skenaarioihin, joilla Suomen metsäsektorin arvonlisää on mahdollista nostaa. Tarkastellut keinot lisätä metsäsektorin arvonlisää jaettiin raportissa kahteen kategoriaan: nykyisten ratkaisujen päivitykseen ja tulevaisuuden innovaatioihin (Kuva 2). Ensimmäisessä kategoriassa käsitellään arvonlisää tuovia ratkaisuja rakennusmateriaaleissa, pakkausmateriaaleissa ja puupohjaisissa tekstiileissä sekä siinä, miten uusilla investoinneilla voidaan parantaa metsäteollisuuden energiatehokkuutta. Pidemmän tähtäimen innovaatioissa keskitymme sellun jatkojalostukseen nanoselluksi sekä tekstiilikuiduiksi sopivaan muotoon. Nanosellua voidaan käyttää haavanhoidossa, kalvosuodatuksessa tai jopa solu- ja kudosteknologiassa. Toinen merkittävä keino arvonlisän kasvattamiseksi on sivuvirtojen tehokkaampi hyödyntäminen. Tässä raportissa keskitymme erityisesti ligniinin hyödyntämismahdollisuuksiin. Hemiselluloosa ja kuoriuutteet ovat myös mielenkiintoisia sivuvirtoja (Amorim ym. 2019, Abik ym. 2023), mutta niitä ei käsitellä tässä raportissa. Lyhyesti voidaan todeta, että hemiselluloosan kohdalla haaste liittyy raaka-aineen valmistusprosessiin. Polymeeristen hemiselluloosien erotuskustannukset ovat korkeat, mikä rajoittaa kiinnostusta niiden potentiaaliin käyttökohteisiin. Monosakkaridit nähdään kuitenkin hyödyllisinä kemikaalien rakennusaineina.



Kuva 2. Esimerkkejä nykyisistä biopohjaisista ratkaisuista ja tulevaisuuden innovaatioista.

2.1 Nykyisten ratkaisujen päivitys

2.1.1 Puurakentaminen

Puurakentamisen edistäminen on kirjattu Suomen hallitusohjelmiin aina 1990-luvun puolivälistä lähtien. Pitkäikäiset ja kierrätettävät puutuotteet kasvattavat hiilensidontaa ja torjuvat ilmastonmuutosta. Puurakentaminen on perusteltua myös kotimaisen työn ja aluetalouden näkökulmista. Puun jatkojalostusta, tuottavuutta ja arvonlisää voidaan nostaa puurakentamisen avulla. Suomen metsät kasvavat vuosittain 103 milj. m³ runkopuuta. Vuotuisesta noin 12 milj. m³

sahatavaratuotannostamme menee vientiin 75 %. Vuonna 2021 Suomen uudisrakennuksiin käytettiin 0,89 milj. m³ ja korjausrakentamiseen 0,78 milj. m³ puuta. (Forecon Oy 2022). Voidaan todeta, että Suomessa rakentamiseen käytettävä puumäärä on metsävaroihimme nähden hyvin vähäistä.

Suomen uudistettu rakentamislaki (139/2022) astuu voimaan 1.1.2025 (Ympäristöministeriö 2023), josta alkaen rakennusten ympäristövaikutusten hiilijalanjälkitarkastelut tulevat rakennuslupavaiheessa pakollisiksi. Tämän myötä puun suosio kotimaisena, paikallisena, uusiutuvana ja ympäristöystävällisenä rakennusmateriaalina tulee nousemaan. Puurakentamisella arvonlisä voitaisiin nostaa merkittävästi lisäämättä hakkuita, jos mekaanisen metsäteollisuuden tuotteita jatkojalostettaisiin nykyistä enemmän kotimaassa. Tämä edellyttää määrätietoista yhteiskunnallisia toimenpiteitä ja muutoksia sekä monitieteistä tutkimusta ja uusia innovaatioita.

Suomen rakennuskannasta kaksi kolmasosaa on asuinrakentamista. Maassamme on lähes 3,2 miljoonaa rekisteröityä asuntoa, ja viimeisen kahdenkymmenen vuoden ajan on rakennettu 35 000–45 000 uutta asuntoa vuosittain, eli asuinrakennuskantamme uudistuu reilun prosentin vuosivauhdilla. Suomessa on noin puoli miljoonaa kesämökkiä, ja joka vuosi rakennetaan seitsemän tuhatta uutta vapaa-ajan rakennusta lisää. Vapaa-ajan rakennuksista lähes 99 % on puurakenteisia. Omakotitaloja rakennetaan maahamme 7 500 kpl vuosittain, ja niistä puurunkoisia on yli 85 %. Suomi on Espanjan jälkeen Euroopan kerrostalovaltaisain maa: 47 % Suomen kaikista asunnoista sijaitsee kerrostaloissa. Vuosittaisista uudisasunnoista noin kolme neljäsosaa rakennetaan edelleen kerrostaloihin. Yli kaksikerroksisia puukerrostaloja on saanut rakentaa Suomeen vuodesta 1995 lähtien. Jos mukaan lasketaan myös kaksikerroksiset pienkerrostalot, on puukerrostalojen markkinaosuus tällä hetkellä noin 6 %.

Tässä raportissa nostetaan tarkasteluun kaksi keskeistä muutosskenaariota puun käytöstä rakentamisessa, joiden avulla kotimaisen puun arvonlisää voitaisiin nostaa nykyisillä, kaupallisesti käytettävillä tekniikoilla merkittävästi:

1) Tulevaisuudessa maamme kerrostalojen rungot tehtäisiin betonin sijaan kotimaisesta ristiinliimatusta massiivipuusta (CLT) tai vaihtoehtoisesti viilupuusta (LVL).

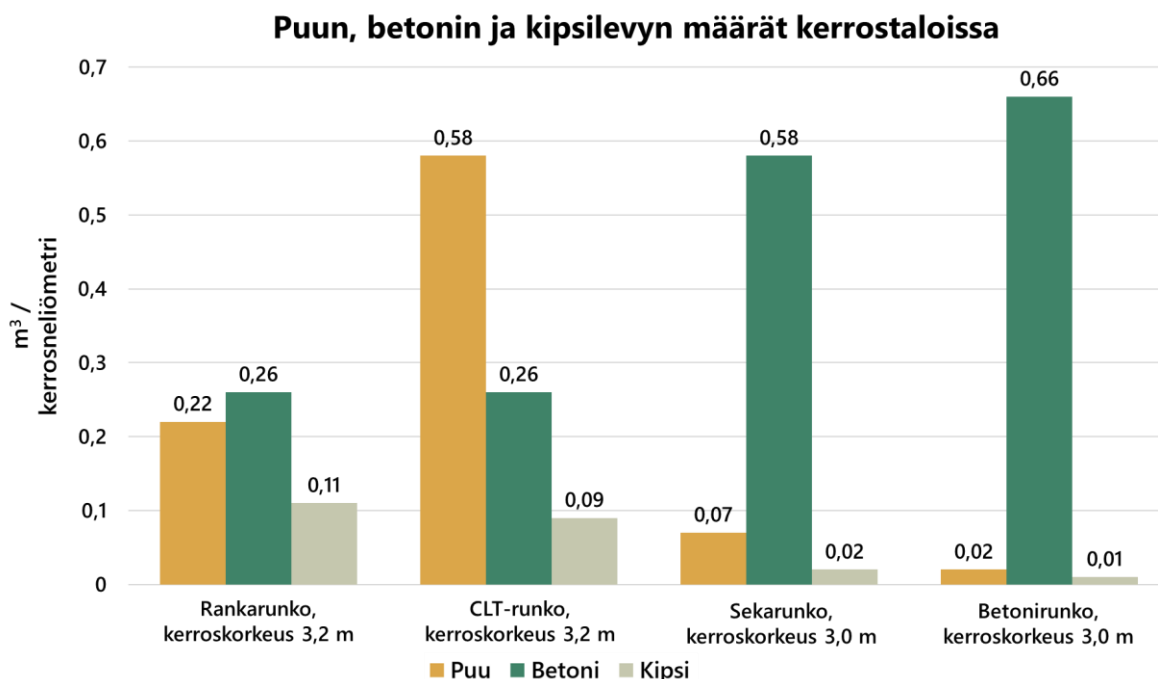
2) Rakennusten lämmöneristeinä sallittaisiin maamme palomääräysten (Ympäristöministeriön asetus 848/2017 rakennusten paloturvallisuudesta) muutosten myötä myös puukuitupohjaiset lämmöneristeet yli kaksikerroksisissa rakennuksissa.

Molemmissa skenaarioissa saavutettaisiin samalla merkittäviä ilmastohyötyjä, kun päästö- ja energiantensiivisiä rakennusmateriaaleja (betoni, mineraalivillat) korvattaisiin edellä mainituilla kotimaisilla puutuotteilla.

Arvonlisäskenaariot

1) Suomen vuotuiset kerrostalot tehtäisiin tulevaisuudessa kotimaisesta CLT:stä

Suomen puurakentamisen suurimmat kasvumahdollisuudet ovat kerrostalorakentamisessa. CLT-rungot ja tilaelementtirakentaminen ovat yleistyneet eniten maamme puukerrostalojen tuotannossa. Suomeen on rakennettu aikavälillä 2018–2023 vuosittain noin 35 000 uutta kerrostaloasuntoa. Suomalaisen kerrostaloasunnon keskikoko on noin 70 kerrosalaneliometriä (k-m²). CLT-runkoiseen puukerrostaloon menee keskimäärin 0,58 m³ puuta kerrosalaneliometriä kohden. Sekarunkoisten tai betonirunkoisten kerrostalojen tapauksessa puun määrä rakenteessa on huomattavasti vähäisempi (Kuva 3).



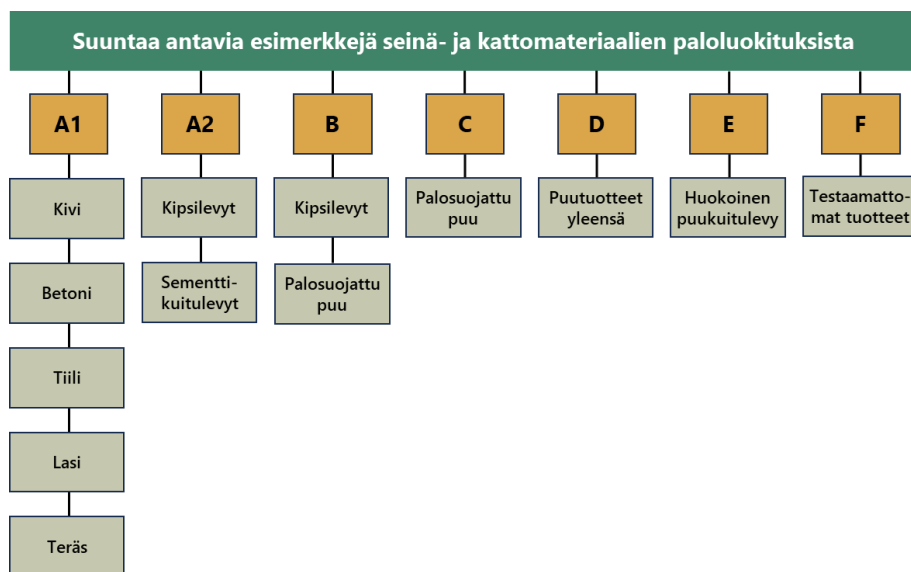
Kuva 3. Puun, betonin ja kipsilevyn määrät kerrostaloissa. Materiaalimenekki laskettu kuusikerroksiselle asuinrakennukselle (~1 500 kerrosneliometriä) maanpäällisellä väestönsuojalla.

Jos kaikki vuotuiset kerrostaloasunnot rakennettaisiin tulevaisuudessa CLT-runkoisina, niihin sitoutuisi puuta 1,4 milj. m³ (35 000 asuntoa x 70 k-m²/asuntoa x 0,58 m³/k-m²).

Sahatavaran ostohinta teollisuudelle on noin 300 €/m³, ja kotimaisen CLT:n myyntihinta on noin 1 000 €/m³. Tätä taustaa vasten sahatavaran viennin sijaan puuta kannattaisi jalostaa Suomessa CLT:ksi ja käyttää sitä laajalti uusien kerrostalojen runkomateriaalina betonin sijaan. Liiman osuus CLT:n painosta on noin 1 % ja liiman hinta 1 €/kg. CLT:n liimauksissa olisi tulevaisuudessa mahdollista käyttää myös ligniinipohjaisia liimoja nykyisten polyuretaani- tai muoviliimojen sijaan. Tälläkin muutoksella olisi positiivinen vaikutus Suomen metsäsektorin arvonlisään, mitä tarkastellaan tarkemmin luvussa 3.2.1.

2) Rakennusten lämmöneristeinä käytettäisiin pääsääntöisesti puukuitupohjaisia lämmöneristeitä

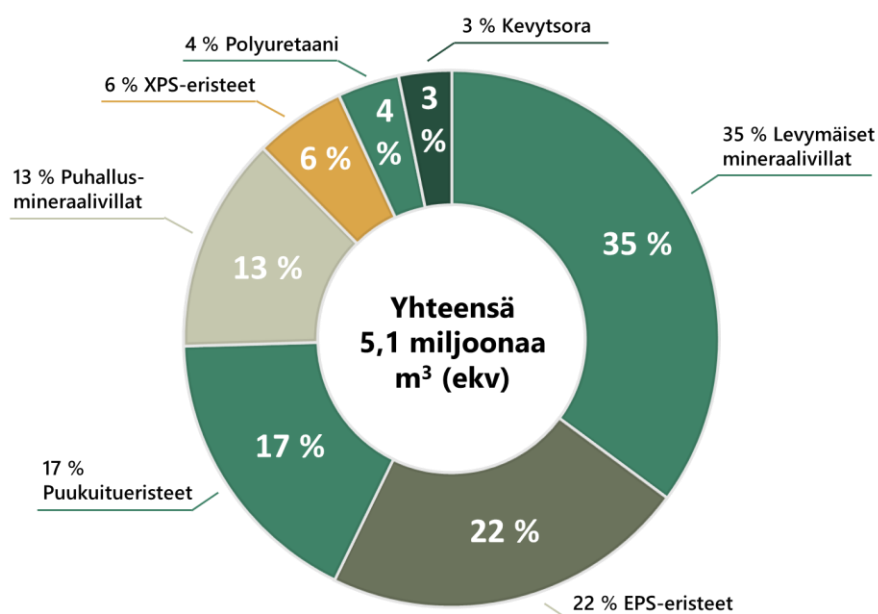
Rakentamisen ympäristönäkökohtien merkitys on jatkuvasti lisääntymässä kaikkien EU-maiden rakentamissääädöksissä. Tämä suuntaus johtaa ekologisten ja uusiutuvien rakennusmateriaalien käytön lisäämiseen sekä rakennusten energiatehokkuuden parantamiseen esimerkiksi rakennusten lämmöneristämistä tehostamalla. Puukuitupohjaisia lämmöneristeitä voitaisiin käyttää laajemminkin rakentamisessa, mutta Suomessa niiden käyttö on maamme palomääräyksissä pääsääntöisesti kielletty yli kaksikerroksisissa rakennuksissa. Yleisimmät Suomessa käytettävät rakentamisen lämmöneristeet ovat mineraalivilloja (lasi- ja kivivilla), jotka kuuluvat yli kaksikerroksisilta rakennuksilta vaadittavaan lämmöneristeiden paloluokkaan A2. Puukuitupohjaisilla lämmöneristeillä voidaan päästä paloluokkaan B saakka, kun niissä käytetään palonsuoja-aineita (Kuva 4). Puukuitupohjaisten lämmöneristeiden salliminen Suomessa yli kaksikerroksisissa rakennuksissa edellyttää palomääräystemme muutosta.



Kuva 4. Suuntaa antavia esimerkkejä seinä- ja kattomateriaalien paloluokituksista.

Yleisimmät markkinoilla olevat puukuitupohjaiset lämmöneristeet ovat kierrätetystä sanomalehtipaperista valmistettu puhallettava tai levymäinen selluvillaeriste ja puhtaasta puukuidusta valmistettu levymäinen lämmöneriste. Selluvillassa sanomalehtipaperin osuus on noin 90 % ja loput 10 % on palonestoaineita (boorihappoa ja magnesiumsulfaattia). Puhtaasta puukuidusta valmistetussa lämmöneristelevyissä puun osuus on noin 80 % ja loput 20 % on vettä ja palonsuojakemikaaleja (mm. ammoniumsulfaattia).

Metsiemme energiapuujakeita (risut, oksat, hake ja sahanpuru) hankintahinta on noin 20 €/m³, jos käyttöpaikka on lähellä. Usein energiajakeelle ei edes löydy suurien kuljetuskustannusten takia ostajaa. Puukuitupohjaisten lämmöneristeiden myyntihinta on noin 145 €/m³. Suomessa rakennusten lämmöneristeiden markkinoiden kokonaisvolyymi on noin 5,1 milj. m³ (Kuva 5). Mahdollistamalla ja siirtymällä laaja-alaisesti uudis- ja korjausrakentamisessa kotimaassa valmistettuihin puukuitupohjaisiin lämmöneristeisiin, metsiemme puun käytön arvonlisää voitaisiin lisätä merkittävästi.



Kuva 5. Lämmöneristeiden käyttö Suomessa vuonna 2022 eristemateriaaleittain. Rakennusten lämmöneristemarkkinan kokonaisvolyymi on noin 5,1 milj. m³ (Rakennustutkimus RTS Oy 2023)

Tekstissä esitetyt lukuarvot perustuvat puutuotteita valmistavien yritysten tuotannon asiantuntijoiden haastatteluihin: CLT Finland Oy ja Hunton Oy.

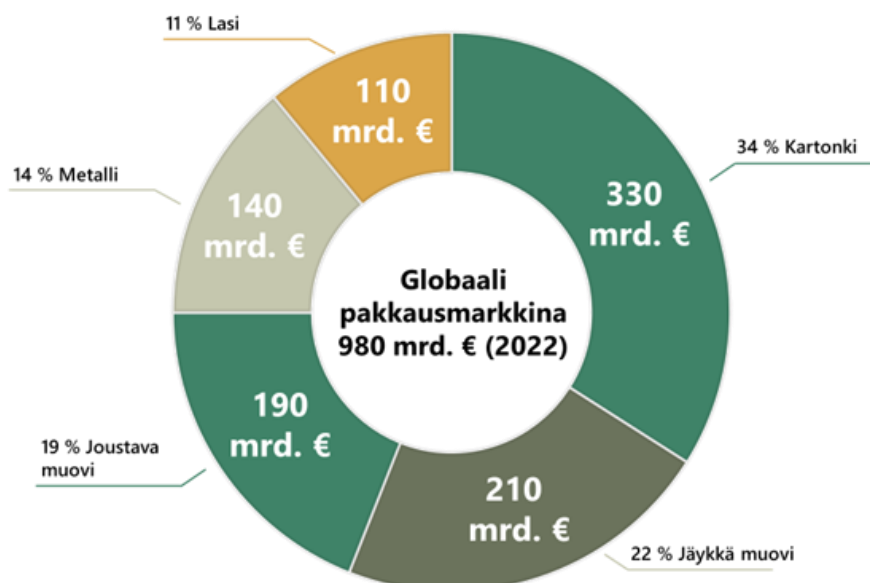
2.1.2 Pakkausmateriaalit

Kierrätettävillä kuitu- ja selluloosapohjaisilla pakkausmateriaaleilla on merkittävä rooli kierto- ja biotalouden arvoketjuissa, erityisesti kilpailtaessa synteettisten muovipakkausten kanssa. Kuitupakkausten kierrätysaste on viime vuosina vaihdellut 70–90 % välillä, (Eurostat 2023 1), kun taas pakkausmuovien kierrätysaste Euroopassa on ollut noin 40 %. (Eurostat 2023 2). Globaalisti jopa 90 % muovimateriaaleista jää kierrätyksen ulkopuolelle (Plastics Europe 2023), ja pakkausmuovijäte on tunnistettu merkittäväksi mikromuovin lähteeksi. Suuren volyymin kuitumateriaalien kasvumahdollisuudet ja niistä saatava arvonlisä ovat kuitenkin rajallisia johtuen rajallisesta, vaikkakin uusiutuvasta, kuituraaka-aineresurssista sekä pakkausmateriaalien alhaisesta hinnasta. Tällä hetkellä synteettiset muovit, kuten polyeteeni ja polypropeeni, ovat hinnaltaan erittäin kilpailukykyisiä ja suorituskyvyltään etenkin ruokapakkauksissa usein ylivoimaisia. Lähitulevaisuudessa on kuitenkin odotettavissa uusia innovatiivisia pakkausratkaisuja, kuten kalvopakkaukset ja barrier-materiaalit, joiden ominaisuudet ovat kilpailukykyisiä perinteisiin muovipakkauksiin verrattuna jopa joustavien pakkausten kentässä (Koppolu 2024, Khakalo ym. 2020). Kuitupohjaisten pakkausten markkinaosuuden mahdolliseen kasvuun vaikuttavat etenkin fossiilista alkuperää oleviin materiaaleihin kohdistuva sääntely, kuluttajien kasvavat vaatimukset, kuluttajietoisuus sekä ympäristökysymykset (Technavio 2023).

Pakkausbarrier-materiaali on suoja- tai estomateriaali (kalvo tai päällyste), jonka tehtävänä on suojata pakkauksessa olevaa tuotetta yhdisteiden, kuten hapen, kosteuden tai rasvan siirtymiseltä tuotteen ja ympäristön välillä. Yleisimmin barrier-materiaaleja käytetään pakkauksissa suojaamaan tuotetta liiallisilta kosteuden muutoksilta ja/tai hapettumiselta. (Vähä-Nissi ym. 2020.)

Tässä raportissa tarkastellaan globaalia pakkausmarkkinan arvoa ja arvioidaan kuitupohjaisten pakkausmateriaalien kasvumahdollisuutta markkinaraporttien avulla. Tuoreen pakkausmarkkinaraportin mukaan globaalin pakkausmarkkinan arvo vuonna 2022 oli 980 mrd. €, ja sen arvioitiin kasvavan 1 200 mrd. € tasolle vuoteen 2027 mennessä.

Kuvassa 6 on esitetty globaalin pakkausmarkkinan jakautuminen materiaaliluokittain. Kartonkipakkaukset muodostavat suurimman markkinan 34 % osuudella koko pakkausmarkkinasta, ja sen vuotuiseksi kasvuprosentiksi on arvioitu ~4 % vuosina 2022–2027. Kartonkipakkausilla voitaisiin saavuttaa 1.4 mrd. €:n arvonlisä Suomeen. Vuonna 2019 arvonlisäksi oli arvioitu 0.7 mrd. € (Lintunen ym. 2023), joten arvioimme sovellukselle huomattavaa kasvupotentiaalia. Tämä johtuu toisaalta siitä, että kartongin kokonaistuotanto kasvaa ja samalla pakkausmateriaalin suorituskyky on korkeammalla tasolla mikä mahdollistaa korkeamman hinnan.



Kuva 6. Globaalin pakkausmarkkinan jakautuminen eri materiaaliluokkiin. Pakkausmateriaalien arvioidut vuotuiset kasvuprosentit vuosina 2022–2027 ovat seuraavat: kartonki 3,9 %, jäykkä muovi 3,9 %, joustava muovi 4,2 %, metalli 4,1 % ja lasi 3,5 %. (Muokattu Technavio 2023 markkinaraportista).

Tämän lisäksi sisällytämme raporttiimme arvion myös joustavista selluloosapohjaisista pakkauksista, mitkä toisaalta analysoimassamme markkinaraportissa tunnistettiin, mutta niiden mahdollista osuutta joustavien pakkausmateriaalien kentässä ei ollut ennustettu. Toinen markkinakatsaus (Metsä Group 2023) arvioi muiden kuitupohjaisten (pois lukien kartonki) pakkausmateriaalien vuotuiseksi kasvupotentiaaliksi 2 % vuosina 2021–2026, mikä tuo lisää mahdollisuuksia nostaa arvonlisää muun muassa nanoselluloosapohjaisten pakkausbarrier-materiaalien kautta.

Kuitupohjaisten pakkausten markkina on kasvussa ja voi mahdollisesti korvata perinteistä pakkaamista erityisesti elintarvikesektorilla. Ekologisempaa vaihtoehtona kuitupohjaiset pakkausratkaisut pyrkivät ottamaan markkinaosuutta muovisilta kalvopakkausilta (joustava & jäykkä muovi), liittyen laajempaan trendiin ei-fossiilisten pakkausmateriaalien suuntaan. Kalvopakkausmarkkinan arvon on arvioitu olevan ~140 mrd. € vuonna 2023 ja sen odotetaan kasvavan noin 4 % vuosittain (Future Market Insights 2022). Toisaalta selluloosapohjaisten pakkauskalvojen arvioitu markkina-arvo on ~790 milj. € vuonna 2024 ja niiden taas odotetaan kasvavan noin 5 % vuosittain (Future Market Insights 2023).

Kuitupohjaiset kartonkipakkaukset muodostavat tällä hetkellä 34 % kaikista pakkauksista, ja niiden odotetaan jatkavan kasvuaan tasaisella vuotuisella kasvuprosentilla (Technavio 2023). Pakkauskalvoissa voidaan odottaa suurempaa kasvupotentiaalia. Tällä hetkellä selluloosakalvopakkaukset kattavat vain 0,57 % kaikista kalvopakkausista, mutta, sääntelyn, kuluttajien kasvavien vaatimusten ja kuluttajietoisuuden sekä ympäristökysymysten myötä kuitupohjaisille ratkaisuille voi avautua merkittäviä mahdollisuuksia myös kalvopakkausten saralla (Future Market Insights 2022, 2023). Tässä raportissa olemme arvioineet selluloosapohjaisten joustavien pakkauskalvojen ja nanoselluloosaan perustuvien pakkausbarrier-materiaalien tuottamaksi arvonlisäksi 690 M€ (Kuva 10; PakkausPlus -kategoria) sillä oletuksella, että ko. materiaalien valmistukseen tarvittava sellukuituosuus voidaan lohkaista vientisellun osuudesta, kuten kappaleessa *Vientisellun jatkojalostus Suomessa* on esitetty.

2.1.3 Tekstiiliteollisuus

Suomessa tehdään merkittävää selluloosapohjaisten tekstiilikuitujen kehitystyötä. Halu uusiin kuituihin syntyy puuvillan riittämättömyydestä ja öljypohjaisten kuitujen haasteista. Erilaisia kuituinnovaatioita ovat mm. Spinnova, Kuura, Infinna, Norratex, Biocelsol ja Ioncell. Osa teknologioista on lähestymässä kaupallistamista ja osa on vielä kehittymässä yliopistojen ja tutkimuslaitosten laboratorioissa. Positiivista on, että Suomessa on jo useampi koetehdas.

Globaalisti polyesteri ja puuvilla kattavat suurimman osan globaalista kuitutuotannosta. Yhteensä maailmassa käytetään erilaisia tekstiilikuituja noin 113 milj. tonnia vuodessa (2020). Tästä luonnonkuitujen osuus on ollut n. 32 milj. tonnia, josta puuvillan osuus yksinään on ollut n. 26 milj. tonnia. Globaali tekstiilikuitujen tuotanto ja kulutus ovat lähes kolminkertaistuneet viimeisten 30 vuoden aikana. Luonnonkuitujen tuotanto ei ole merkittävästi kasvanut, vaan kasvu on tullut lähes yksinomaan tekokuitujen tuotannon nopeasta kasvusta. (Suomen Tekstiili ja Muoti 2022)

Sellupohjaisten kuitujen arvonlisäyspotentiaali syntyy sellun jatkojalostamisesta, ei niinkään sellun lisätuotannosta. Raaka-ainepohjan kestävyuden takaamiseksi myös tekstiilikierätykseen on panostettava. Arvonlisäyspotentiaaliin vaikuttaa se, kuinka pitkälle tekstiiliarvoketju pystytään Suomessa ulottamaan. Lyhimmillään arvoketju kattaa vain kuidun valmistamisen ja sen kehräämisen, mutta arvoketjua voidaan pidentää tekstiilien ja aina vaatteiden valmistuksella. On luultavaa, että jos tekstiilikuitujen valmistus Suomessa kasvaa volyymeiltään merkittäväksi, ei suurinta osaa kuidusta kuitenkaan jatkojalosteta Suomessa. Suomalainen tekstiiliteollisuus lienee kilpailukykyisintä design-vaatteiden markkinoilla, joiden volyymit ovat pieni osa koko tekstiiliteollisuuden volyymistä.

Tekstiilikuiduksi jalostettava sellu on pois muusta käytöstä. Käytännössä tekstiilikuitujen valmistaminen sellusta syrjäyttää joko kotimaista tai ulkomaista paperin ja kartongin tuotantoa. Suomen arvonlisäyksen kannalta edullisinta olisi, jos tekstiilikuiduksi jalostettaisiin nykyään vientiin menevää sellua, jolloin tekstiilikuitujen tuotanto ei syrjäyttäisi kotimaista paperin- ja selluntuotantoa.

Aiemmin julkaistu keskustelunavaus metsäteollisuuden arvonlisän kaksinkertaistamisesta nojautui pitkälti tekstiilikuidun tuotannon kasvattamiseen (Lintunen ym. 2023). On kuitenkin huomionarvoista, että tekstiilikuitujen valmistuskapasiteetti Suomessa on vielä rajallinen. Kuituteknologioiden kehittäjien lähivuosien tehdasinvestointien yhteenlaskettu kapasiteetti Suomessa on noin 100–150 kt (Suomen Tekstiili ja Muoti 2021). Tässä raportissa tekstiilikuidun tuotantovolyyminä Suomessa vuonna 2035 on arvioitu 300 kt. Jos oletamme, että 1 000 kt nykyisestä 3 000–4 000 kt vientiin menevästä sellusta voidaan jatkojalostaa Suomessa, tämä mahdollistaisi 700 kt vientisellun käyttöä muihin korkean jalostusasteen tuotteisiin, kuten suodatinkalvoihin, haavanhoitoon ja kudosteknologiaan.

2.1.4 Energia

Suomessa ei ole merkittäviä mahdollisuuksia lisätä biomassan käyttöä suoraan energiaksi. Sen sijaan metsäteollisuuden energiatehokkuuden parantaminen, uudet prosessiratkaisut ja sivuvirtojen tehokkaampi käyttö johtavat suurempaan uusiutuvan sähkön tuotantoon ja ulkoisten tehdaspolttoaineiden pienempään käyttöön.

Fossiilisten polttoaineiden vähentäminen

Globaalisti tarkastellen metsäteollisuus käyttää merkittävästi fossiilisia polttoaineita muun muassa hiilisähkön tuottamiseen. Suomessa metsäteollisuuden polttoaineista jo 90 % oli uusiutuvia vuonna 2022. Selluteollisuudessa tärkeimmät fossiiliset polttoaineet ovat meesaunien käyttämä maakaasu ja öljy. Turvetta ja hiiltä ei käytännössä enää käytetä. Jo neljä tehdasta Suomessa on investoinut kaasuttimeen, jolla ajetaan meesaunia. Kun kaasutuksessa käytetään polttoaineena puun kuorta, jäävät fossiiliset polttoaineet historiaan. Meesaunikaasuttimien määrä kasvaa hitaasti uusintainvestointien kautta.

Suurempi sähköntuotanto

Äänekosken ja Kemin biotuotetehtaiden uudet soodakattilat, jotka pystyvät tuottamaan noin 250 % sellutehtaan sähköntarpeesta ovat erinomainen esimerkki Suomen pitkäjänteisestä innovaatiopolitiikasta. Näissä uusissa tehtaissa mustalipeästä pystytään innovatiivisten prosessiratkaisujen avulla tuottamaan sähköä pelkällä soodakattilalla 1,4 megawattituntia ilmakuivaa tonnia kohti (MWh/ADt), kun suurin osa nykyisistä tehtaista joutuu tyytymään noin 0,5 MWh/ADt tuotantoon. Sekä Kemin että Äänekosken biotuotetehtaat ovatkin lisänneet uusiutuvan sähkön tuotantoa Suomessa noin prosenttiyksiköllä. Kun uusi talteenotto maksaa 300–500 M€ ja sen takaisinmaksuaika on energian kautta noin kymmenen vuotta, niin uusiutuvan sähkön lisätuotannon nopeuttaminen vaatisi tukia.

Energiatehokkuus

Suomi on pystynyt tehostamaan koko metsäteollisuuden energian käyttöä yli 2 % vuodessa (Kähkönen ym. 2019). Tämä on Suomelle merkittävä saavutus ja kansalliset toimijat kuten Motiva ovat tähän vaikuttaneet. Merkittävimpiä muutoksia ovat olleet tehostunut vesien käyttö, mustalipeän korkeampi kuiva-ainepitoisuus ja paperikoneinnovaatiot. Mikäli Suomen metsäteollisuus pystyy uusintainvestointeihin, niin suotuisa kehitys jatkuu tulevaisuudessa.

2.2 Tulevaisuuden innovaatiot

2.2.1 Sivuvirtojen tehokas hyödyntäminen - Ligniini

Hakkuiden lisäämisen ei ole ilmasto- ja ympäristövaikutusten vuoksi kestävää. Siksi on tärkeää harkita tehokkaampia tapoja hyödyntää myös metsäalan sivuvirtoja. Tämä mahdollistaa metsästä saatavan arvon kasvattamisen ilmasto- ja biodiversiteettivoitteilta tinkimättä. Yksi mielenkiintoisimmista sivuvirroista on ligniini. Suomessa syntyy sellutuotannon yhteydessä noin 4 miljoonaa tonnia hyödyntämiskelpoista ligniiniä, joka pääasiassa käytetään höyryn ja energian tuotantoon. Usein kuitenkin ligniiniä syntyy enemmän kuin mihin tehtaan soodakattilan kapasiteetti riittää. Tämä avaa mahdollisuuksia hyödyntää ligniiniä materiaaleissa edistäen samalla sellun lisätuotantoa ja lisäten metsäalan kannattavuutta (Dessbesell, 2020).

Hyödyntämiskelpoisen ligniinin määrä Suomessa (4 Mt) on laskettu oletuksella, että selluntuotanto on 8 Mt, mikä perustuu kahden viime vuoden keskimääräiseen tuotantomäärään (Metsäteollisuus ry. Tilastot):

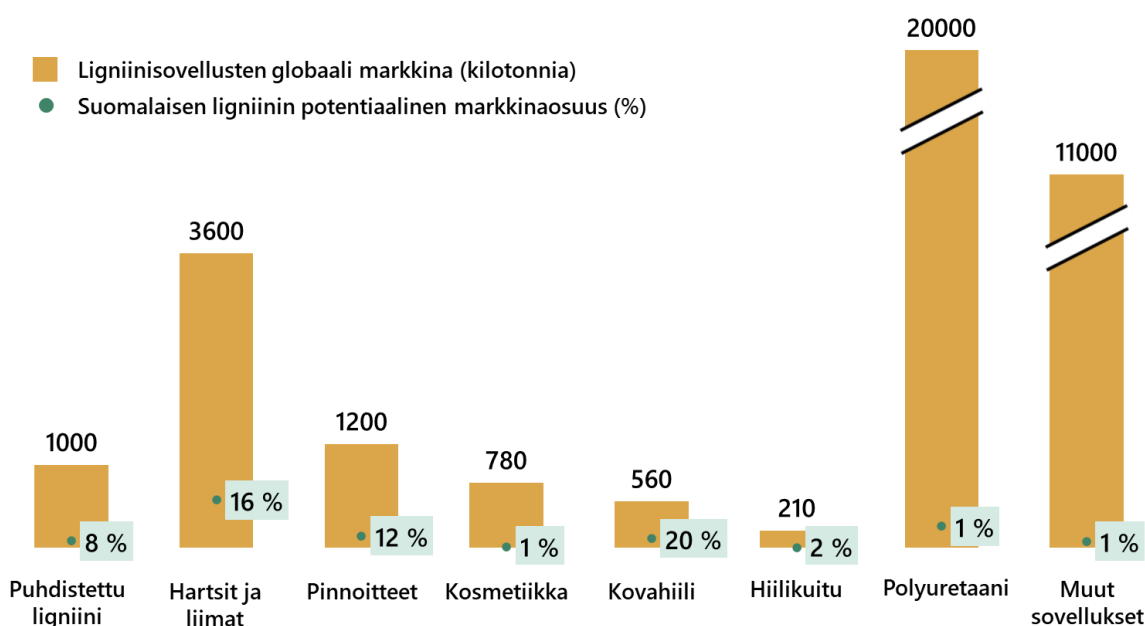
$$\text{ligniini määrä} = \left(\frac{\text{sellutuotanto}}{\text{keskim. saanto}} \right) * \text{keskim. ligniinin määrä puussa} = \left(\frac{8}{0,5} * 0,25 \right)$$

Seuraavassa tarkastellaan ligniinin hyödyntämistä erilaisissa tuotteissa kahdessa eri skenaariossa olettaen, että joko 20 % tai 40 % tuotetusta ligniinistä voidaan käyttää muuhun kuin energiatuotantoon. Tämä vastaisi vuosittain noin 0,8 tai 1,6 miljoonaa tonnia ligniiniä. On huomionarvoista, että muutokset selluntuotantomäärissä vaikuttavat suoraan ligniinin saatavuuteen. Varovaisessa skenaariossa, jossa 20 % ligniinistä hyödynnetään tuotteissa, arvioitu ligniinistä saatava arvonlisä olisi noin 670 miljoonaa euroa vuodessa (Kuva 8). Tämä laskelma perustuu oletukseen ligniinin laajasta hyödyntämisestä eri sovelluksissa. Kunkin sovelluksen osuus käytettävissä olevasta ligniinistä on arvioitu seuraavien kriteerien perusteella:

- Sovelluksen globaalin markkinan koko (Kuva 7).
- Kuinka paljon tuotteesta voidaan korvata ligniinillä.
- Teknologian valmiusaste
- Arvonlisäpotentiaali/Laskennallinen voittomarginaali

Jos tarkasteltava sovellus on jo kaupallinen tai lähellä kaupallistamista, sen markkina on suuri tai jos tuotteeseen voidaan käyttää paljon ligniiniä, oletettiin, että suurempi osuus käytettävissä olevasta ligniinistä hyödynnettäisiin kyseisessä sovelluksessa. Koska ligniini ei ole vielä laajamittaisessa käytössä, on voittomarginaalien arviointi haastavaa. Marginaaleja on kuitenkin pyritty arvioimaan ottamalla huomioon ligniinin muokkaus- tai puhtaustarve kyseisessä sovelluksessa suhteessa korvattavan aineen hintaan. Esimerkiksi, kun ligniiniä käytetään vaneriliimoissa, tiedetään, että ligniinillä voidaan korvata ainakin 40 % fenolista. Fenolin hinta on noin 1,2–1,5 €/kg, joten ligniinin hinta saa maksimissaan olla 1.5 €/kg. Ligniinin tuotantokustannus arvioitiin vertaamalla samanlaisiin prosesseihin ja haastatteleamalla asiantuntijoita teollisuudesta. Myyntihinta asetettiin lähelle korvattavan aineen hintaa.

Arvio potentiaalisten ligniinisovellusten globaaleista markkinoista ja suomalaisen ligniinin potentiaalisesta markkinaosuudesta



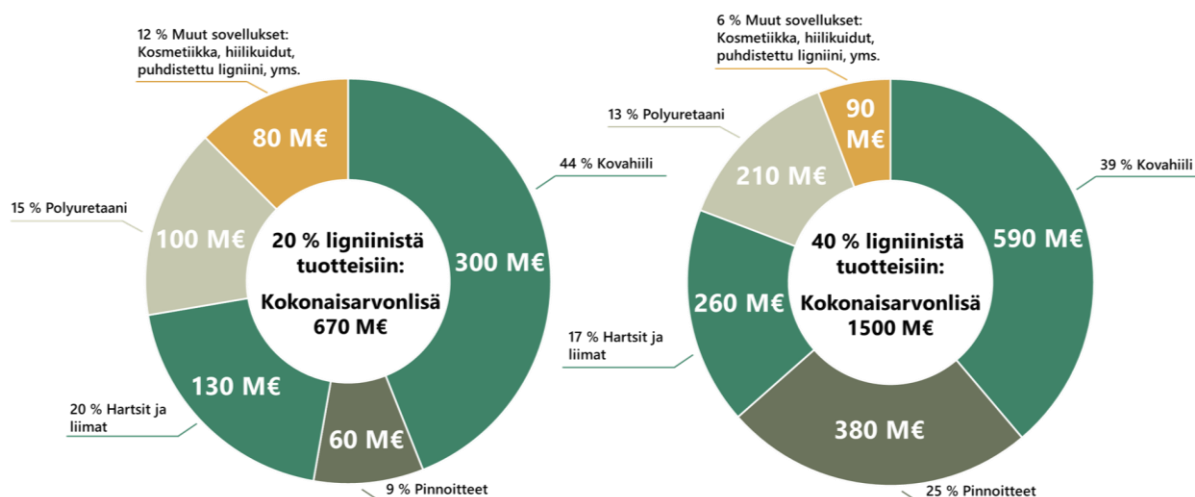
Kuva 7. Arvio potentiaalisten ligniinisovellusten globaaleista markkinoista ja suomalaisen ligniinin potentiaalisesta markkinaosuudesta.

Raporttia varten tehtyjen arvioiden perusteella suurimman arvonlisän tuottavat sovellukset ovat kovahiili, hartsit ja liimat sekä polyuretaani (Kuva 8). Ligniinin käyttö liimana on suhteellisen kehittynyt sovellus. Suomessa on kehitetty useita teknologioita tuottaa reaktiivisia ligniinejä, jotka mahdollistavat esimerkiksi fenolin korvaamisen puuliimoissa käytettävissä fenoli-formaldehydihartseissa, tai jopa täysin formaldehydittömän puuliiman, jossa ligniinipitoisuus on yli 90 % (Henn ym. 2022). Kovahiili puolestaan viittaa ligniinistä valmistettuun hiileen, joka voisi korvata akuissa käytetyn fossiilipohjaisen grafiitin. Esimerkki tästä on Stora Enson lanseeraama Lignode® materiaali, jota on tuotettu vuodesta 2021 lähtien Sunilan sellutehtaan yhteydessä olevalla koelaitoksella. Sellutehtaan sulkeminen vuonna 2023 näyttäytyi takaiskuna Lignoden tuotannolle, mutta Stora Enson strategia biopohjaisten materiaali-innovaatioiden kehittämiseksi säilyy kuitenkin ennallaan, ja yhtiö onkin ilmoittanut

tutkivansa kilpailukykyisiä sijoituspaikkoja Lignoden kaupallisen mittakaavan tuotannolle. Kategoriaan ”muut sovellukset” sisällytettiin jo tällä hetkellä merkittäviä käytössä olevia sovelluksia, kuten esimerkiksi ligniinin depolymerointi ja käyttö aromaattisten kemikaalien lähteenä, ligniinin käyttö betonin notkistimena sekä tuotteet, joilla oli vain vähäinen merkitys arvonlisään, joko pienen volyymin, kuten ligniinin käyttö UV-suojana aurinkovoiteissa tai pienen arvonlisän takia (puhdistettu ligniini).

Toisaalta voidaan todeta, että lähes samaan tulokseen n. 800 M€ arvonlisään päästään myös, jos ligniiniä hyödynnetään pääasiassa betonin notkistimena (Lintunen ym. 2023). Toisin sanoen, jos materiaalisovelluksiin hyödynnetään 20 % ligniinistä, niin ligniinisovelluksen valinnalla ei näytä olevan merkittävää vaikutusta ligniinistä saatavaan arvonlisään. Vallitsevan geopoliittisen tilanteen ja uusiutuvan energian lisääntyvän tarpeen myötä on todennäköistä, että seuraavan viiden vuoden aikana suurin osa ligniinistä suunnataan edelleen energiantuotantoon ja vain vähäinen osa käytetään materiaalisovelluksiin, mikä vähentää ligniinin merkitystä metsäbiotalouden arvonlisään.

Tuuli- ja aurinkovoiman käyttö on selkeässä kasvussa Suomessa. Ilmastonmuutoksen torjumiseksi on myös tärkeää vähentää puun ja metsäjätteiden liiallista polttoa. Viime aikoina on ollut havaittavissa pyrkimyksiä tähän suuntaan. Vuoden alussa käynnistyi merkittävä päästöttömään selluntuotantoon pyrkivä metsäteollisuuden ja tiedeyhteisön yhteishanke, Emission Free Pulping -ohjelma, jonka tavoitteena on vähentää merkittävästi biomassan polttoa (Teknologian Tutkimuskeskus VTT 2024). Ottaen huomioon nämä tulevaisuuden näkymät, tehtiin toinen skenaariolaskema, missä 1,6 miljoonaa tonnia, eli noin 40 % nykyisestä ligniinituotannosta käytettäisiin materiaaleihin ja kemikaaleihin. Tämä skenaario ei todennäköisesti toteudu lähivuosina, mutta 40 % ligniiniä on mahdollista ottaa talteen modernissa, energiatehokkaassa tehtaassa (Argyropoulos ym. 2023) ja tämä skenaario voisi siten toteutua lähestyttäessä vuotta 2035 ja johtaisi noin 1500 M€ arvonlisään. Kuvassa 8 on esitetty eri ligniinisovellusten osuus arvonlisästä käyttäen joko 20 % tai 40 % ligniinistä tuotteisiin.



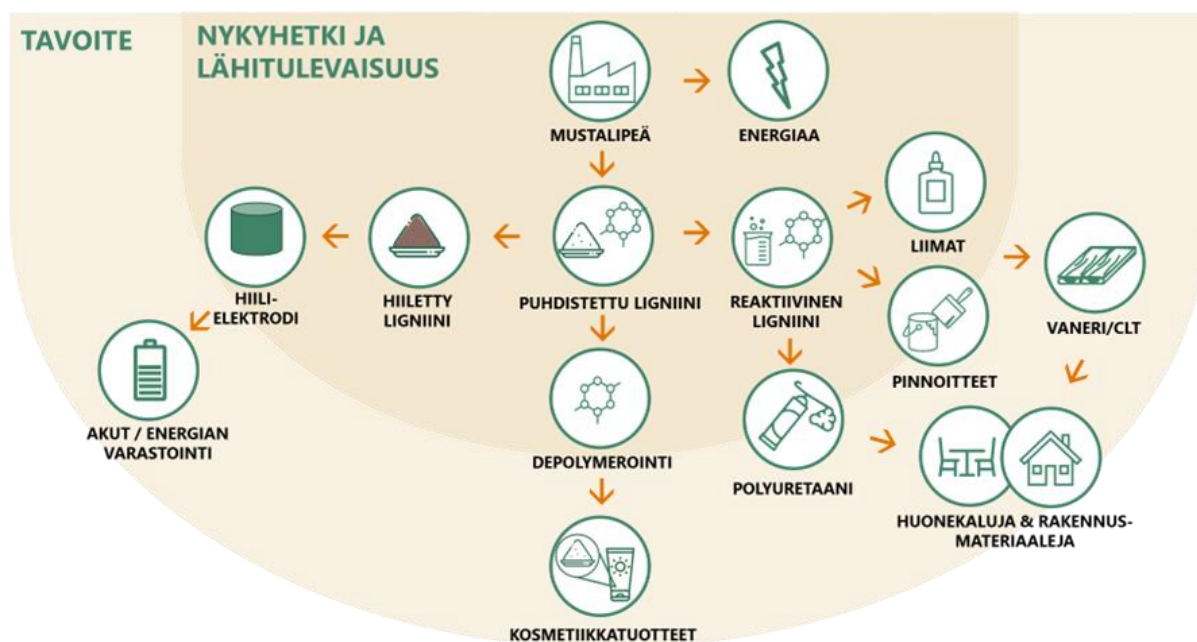
Kuva 8. Eri ligniinisovellusten osuus ligniinin arvonlisästä olettaen, että 20 % (800 kt) tai 40 % (1 600 kt) ligniinistä jatkojalostettaisiin tuotteisiin.

Hiilletyllä ligniinillä, kuten kovahiilellä voidaan korvata grafiittia esimerkiksi litium- ja natriumioniakkujen anodimateriaalina ja sitä voidaan laajemminkin käyttää energian varastointiin liittyvissä sovelluksissa. Globaalin akkumarkkinan ennustetaan kymmenkertaistuvan viidessä vuodessa liikkumisen sähköistymisen ja suurten energian varastointijärjestelmien tarpeen lisääntymisen seurauksena. Akkualan yritykset suunnittelevat investoivansa Suomeen lähivuosina yli kuudella miljardilla eurolla. (Teknisen Kaupan Liitto ry 2023) Näihin sovelluksiin voidaan käyttää suuria määriä ligniiniä, koska sen väri ja heterogeenisuus eivät ole näissä sovelluksissa esteitä. Kovahiilimateriaalin myyntihinta voi myös olla suhteellisen korkea, mikä kasvattaa potentiaalista arvonlisää (20 €/kg).

Näistä syistä johtuen kovahiilen potentiaali arvioitiin suureksi ja siihen allokoitiin tässä raportissa 40 % käytettävissä olevasta ligniinistä. Toisaalta on tärkeää muistaa, että luotettavien valmistuskustannustietojen löytäminen on vielä haastavaa, saannot ovat edelleen melko matalia (35–45 %) ja markkina on vasta muodostumassa.

Huonon reaktiivisuuden ja niukan liukoisuuden vuoksi sellunkeittoprosessista peräisin olevaa ligniiniä täytyy usein muokata kemiallisesti tai fraktioida ennen sen käyttöä esimerkiksi liimoissa tai hartseissa. Viime aikoina ligniinin käyttömahdollisuuksia on kuitenkin pystytty lisäämään myös uudella, huomiota herättäneellä tavalla: valmistamalla ligniinistä nanohiukkasia. Nämä pyöreät, veteen dispergoituvat hiukkaset ovat erinomaisia emulgointiaineita ja avaavat mahdollisuuksia hyödyntää ligniiniä uusissa sovelluksissa kuten aurinkovoiteissa (Österberg ym. 2020). Ligniininanohiukkasten avulla voidaan saavuttaa parempia ominaisuuksia myös pinnoitteissa. Tässä raportissa lisättiin pinnoitteisiin allokoitua ligniiniosuutta 40 %-skenaariossa, koska nanopartikeliteknologian voidaan olettaa kehittyvän (Henn ym. 2021). Ligniinin kyky suojata haitalliselta UV-säteilyltä ja hapettumiselta tuo lisäarvoa sekä pinnoitteille että kosmetiikkatuotteille. On kuitenkin huomioitava, että ligniinin ruskea väri rajoittaa käytettävän ligniinin määrää näissä sovelluksissa. Teknis-taloudellisen analyysin mukaan nanohiukkasten valmistusprosessi on skaalattavissa, ja LignoSphere-niminen startup-yritys pyrkii kaupallistamaan teknologiaa.

Kuten puurakentamisessa, myös ligniinin hyödyntämisessä on olennaista, että jalostusarvo Suomessa nousee. Kuvassa 9 on esimerkkejä ligniinin arvoketjuista mustalipeästä ligniinipitoisiin pinnoitteisiin, liimoihin tai akkumateriaaleihin.



Kuva 9. Esimerkkejä ligniinin jalostamisen arvoketjuista.

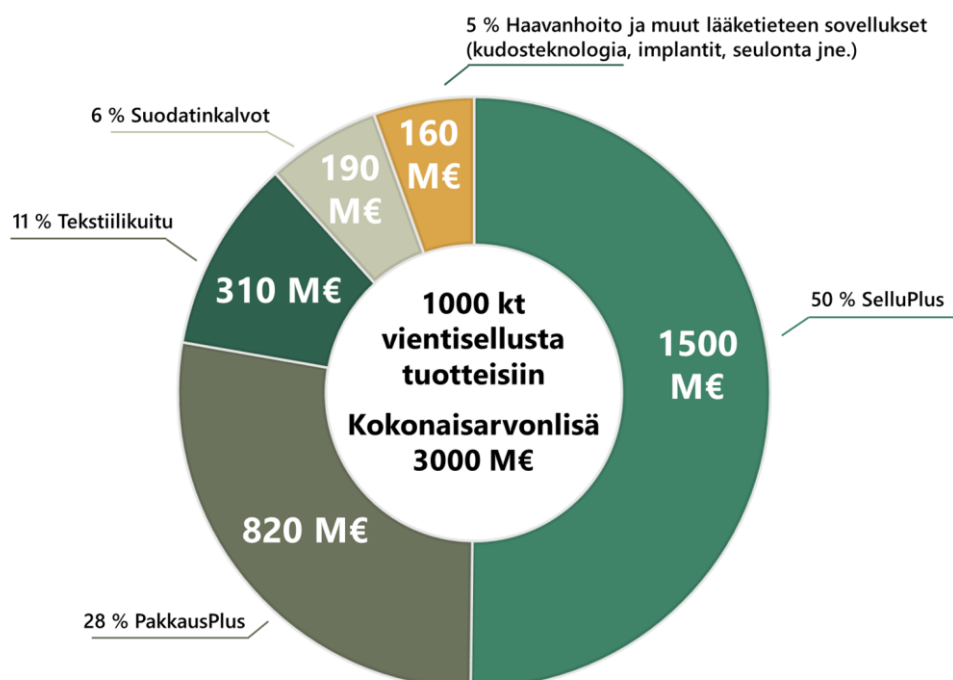
Suomessa on jo useita jatkojalostusyhtiöitä, kuten Prefere, Kiilto, Teknos ja Tikkurila, jotka mahdollistavat arvoketjun pidentämisen kotimaassa. Suomalaisen ligniinin käyttö ulkomaisen fenolin tai fossiilisen grafiitin sijaan edustaa sekä taloudellisesti että ekologisesti kestävä kehitystä.

2.2.2 Vientisellun jatkojalostus Suomessa

Markkinasellun jatkojalostus Suomessa voisi avata mahdollisuuksia arvonlisän nostoon ilman että pitäisi lisätä puun hakkuumääriä. Tässä raportissa tarkastelemme selluloosapohjaisia materiaaliratkaisuja, jonka raaka-aineeksi käytettäisiinkin osaa vientiin tarkoitettua sellukuidusta, 1 000 kt, mikä vastaa noin 25 % vientisellun kokonaismäärästä. Valitsimme arvonlisälaskentaan tuotteita ja sovelluksia, joissa selluloosa eri muodoissaan on osoittanut sekä erityistä toiminnallisuutta että kykyä korvata fossiilipohjaisia raaka-aineita. Tuotekategoriat mahdollisine lisäarvoineen on esitelty kuvassa 10.

Kuvassa 10 esitetyistä materiaalikategorioista SelluPlus koostuu nanoselluloosan tuotannosta (mikro- ja nanofibrilloidut laadut) sekä tekstiilien valmistukseen käytettävästä liuotetusta selluloosasta. Arvonlisä tästä kategoriasta olisi 1 500 M€. PakkausPlus taas sisältää joustavat pakkaukset ja pakkausbarrierimateriaalit, missä erityisesti nanoselluloosalla on sekä toiminnallisuuden (matala hapenläpäisy) että muovien korvaavuuden kannalta tärkeä merkitys. Tarkempi katsaus pakkauksiin on esitetty *Pakkausmateriaalit*-kappaleessa. Tekstiilikuitukategoria tarkoittaa jatkojalostetumpaa selluloosamateriaalia, joka soveltuu langan valmistukseen eli arvonlisä tuotettua tonnia kohden on suurempi kuin SelluPlus-kategorian materiaaleilla.

Suodatinkalvot, haavanhoito ja lääketieteelliset sovellukset perustuvat pääasiassa nanoselluloosan käyttöön aktiivisena materiaalikomponenttina ja edustavat korkean arvon, mutta matalamman volyymin tuotteita. Arvonlisätuotteiksi valittiin juuri yllä olevat esimerkit perustuen sekä tuoreisiin ja lupaaviin tutkimustuloksiin (Heise ym. 2021, Leppänen ym. 2022, Solin ym. 2023), markkinaraporttiin (Future Markets 2023) sekä siihen, että sovellukset ovat jo osin kaupallistamispolulla. Yleisesti ottaen nanoselluloosan, erityisesti nanokiteisen selluloosan (NCC/CNC) ja mikro/nanofibrilloidun selluloosan (MFC/NFC/CNF) käytön oletetaan olevan kasvussa, sillä ne edustavat uusiutuvia, biohajoavia, samanaikaisesti vahvoja ja keveitä materiaaleja, mikä tekee niistä houkuttelevia raaka-aineita kestävän kehityksen mukaisiin tuotteisiin. Mekaanisten, kemiallisten ja entsyymaattisten esikäsittelyjen avulla voidaan valmistaa räätälöityjä materiaaleja, joilla on poikkeuksellisia fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia (korkea aktiivinen pinta-ala, bioyhteesopivuus, kalvonmuodostuskyky, vedensidontakyky, matala hapenläpäisevyys, antimikrobiset ominaisuudet ja jopa elävien solujen elinvoimaa ylläpitävä ominaisuus) johtuen nanomittakaavan rakenteesta yhdistettynä pinnan spesifiseen kemiaan (Kontturi ym. 2018, Aguilar-Sanchez ym. 2021, Rissanen ym. 2021). Näitä edellä lueteltuja ominaisuuksia ei ole toistaiseksi täysimääräisesti hyödynnetty biopohjaisissa materiaaliratkaisuissa, mikä voisi mahdollistaa lisäarvon tuottamisen metsäsektorille.



Kuva 10. Potentiaalinen kokonaisarvonlisä, jos sellukuitua jatkojalostettaisiin eteenpäin Suomessa.

Tutkimus aihepiirissä on ollut aktiivista, ja tuotteita on jo markkinoilla erityisesti Japanissa. Esimerkiksi japanilainen Asics on käyttänyt CNF:ää juoksukengissään ja suuret paperitehtaat, kuten Nippon Paper ja Oji Holdings, ovat perustaneet merkittäviä selluloosananokuidun tuotantoon keskittyviä laitoksia. Myös metsä- ja kemianteollisuus Euroopassa, Kanadassa ja Yhdysvalloissa ovat mukana tässä kehityksessä. Markkinaraportin perusteella tämänhetkiset mikrofibrilloidun ja nanofibrilloidun selluloosan tuotantomäärät ovat alhaiset ja useimmat tuottajat myyvät selluloosananokuituja noin 50–100 € kilohinnalla. [Future Markets 2023] Monet tuottajat mainitsevat, että hintojen olisi laskettava alle 10 euroon kilolta, jotta nanoselluloosalaadut voisivat olla kilpailukyisiä suuren volyymin sovelluksissa. Tuottajat pyrkivätkin kehittämään alhaisemman kustannustason tuotantomenetelmiä tai kehittämään materiaalia korkeamman arvon sovelluksiin. Onkin huomionarvoista, että pitkälle jatkojalostetun, solukasvatukseen soveltuvan steriilin nanoselluloosan kilohinta on monituhattainen edellä mainittuihin hintoihin verrattuna (GrowDex®). Nanoselluloosan kalvonmuodostuskyky on oleellinen ominaisuus erityisesti kalvosuodatuksessa ja joustavien pakkausten ja pakkausbarrier-materiaalien kentässä sekä haavanhoitoratkaisuissa. Nanoselluloosakalvojen valmistukseen on olemassa teolliseen mittakaavaan skaalattavia teknologioita (Koppolu 2024, Khakalo ym. 2020), joten näiden ns. kalvomaisten välituotteiden valmistuksen kustannuserä ei ole lisäarvolaskelmissamme enää merkittävä lisäerä.

Kalvosuodattimet

Kalvosuodattimia eli membraaneita käytetään vesien ja liuottimien puhdistukseen, eli nano- ja mikrokokoaluokan partikkelien ja molekyylien talteenottoon ja erotteluun nesteympäristöstä. Globaalin kalvopuhdistusmarkkinan arvon ennustetaan olevan 2,1 mrd. € vuonna 2026, ja niiden odotetaan kasvavan 6,8 prosentin vuosivauhdilla vuosina 2021–2026. Päätekijöitä markkinoiden kasvulle ovat kalvopuhdistusteknologian kasvava käyttö jätevedenkäsittelyssä, tehokkaiden puhdistusmenetelmien kysynnän kasvu elintarvike- ja juomatuotannossa sekä terveyslisäravinteiden ja lääkkeiden tuotannossa. Lisäksi keskiluokan ostovoiman kasvu ja tarve laadukkaisiin tuotteisiin lisäävät vesisuodattimien ja käänteisosmoosikäsittelytekniikan kysyntää kotitalouksissa. Tärkeimpänä tekijänä tehokkaalle vedensuodatusteknologialle on kuitenkin se, että noin miljardi ihmistä kärsii puhtaasta juomaveden puutteesta.

Synteettiset materiaalit dominoivat membraanimarkkinoita, mutta tämäkin teollisuuden ala etsii vaihtoehtoisia fossiilista alkuperää korvaavia materiaaleja samoilla perusteilla kuten esim. joustavien pakkausmateriaalien tuottajat. Vuonna 2020 selluloosa-asettaattikalvoilla oli 36 % osuus kalvopuhdistusmarkkinoista (IndustryARC 2024). Selluloosapohjaiset johdannaiset soveltuvat vesi- ja alkoholiliuoksille ja niitä käytetään mm. biologisissa ja kliinisissä analyyseissä, steriilisyystesteissä ja säteilymittauksissa sekä monissa muissa sovelluksissa. Sekä markkinaraportin (Future Markets 2023) että Suomessakin edistetyn tutkimuksen perusteella (Pöhler ym. 2022) nanoselluloosakalvoilla on todettu selkeä potentiaali sekä korvaamaan synteettisiä kalvomateriaaleja että selluloosa-asettaattikalvoja epäpuhtauksien, saasteiden, kemikaalien ja biologisten aineiden suodatuksessa. Nanoselluloosakalvolla on kerätty vedestä jopa nanokokoisia muovipartikkeleita (Leppänen ym. 2022). Laskelmiemme perusteella nanoselluloosakalvoilla, mitkä edustavat kalvosuodatusteknologian välituotetta (suodatusyksikön aktiivinen materiaali) voitaisiin saavuttaa 190 M€ arvonlisä. Haasteena on erityisesti se, että Suomessa ei ole tällä hetkellä juurikaan alan toimijoita edistämään kehitysvaiheessa olevaa teknologiaa.

Nanoselluloosan lääketiedesovellutukset

Korkealaatuiset, steriilit nanoselluloosahydrogeelit ja -kalvot ovat kasvavassa määrin modernin lääketieteen kiinnostuksen kohteena (Jorfi & Foster 2015, Orelma 2018). Bioyhteesopiva ja biohajoava selluloosamateriaali toimii myös monissa vaativissa biomateriaalisovelluksissa, eli elävää kudosta korvaavissa, tuottavissa tai hoitavissa materiaaleissa. Tutkimus- ja kehitystoiminta on Suomessa aktiivista, ja vahva kansainvälisesti kilpailukykyinen osaamisohjamme sekä olemassa olevaa infrastruktuurimme tukevat alan innovaatioita. Suomalaisia innovaatioita ovat UPM Biomedicals:n CNF-hydrogeeleihin perustuvat haavanhoitosidos sekä solukasvatukseen soveltuvat hydrogeelit. Nanoselluloosan biohajoavuus ja -yhteesopivuus ovat avanneet mahdollisuuksia sen käyttöön lääkeaineiden apu- ja kantaja-aineena (Paukkonen ym. 2017), haavanhoitosidoksena, solu- ja kudosteknologiaan soveltuvana kasvualustana, kuten esimerkiksi kasvatettavien kudosisimplanttien alustana/materiaalina. Korkealaatuinen nanofibrilloitu selluloosa on sellukuidusta valmistettava erittäin korkean arvonlisän tarjoava jatkojalostustuote, joskin volyymit ovat mahdollisen mittavankin tuotannon ja käytön kasvun toteutuessa hyvin pieniä. Tämä on huomioitu arvonlisälaskelmissamme. Lääketeollisiin tuotteisiin liittyvä nanoselluloosan kokonaistarve globaalisti on kaupallisesta markkinaraportista saadun arvion mukaan vuonna 2023 ollut vain 15 tonnia (Future Markets 2023). Raportin perusteella tuotannon odotetaan 20 kertaistuvan vuoteen 2035 mennessä. Tällöin saatavien tulojen odotetaan kasvavan nykyisestä arviosta eli vajaasta 0,7 miljoonasta eurosta 9 miljoonan euron suuruusluokkaan. Nanoselluloosan lääke- ja terveysalan sovellusten kehityksessä on tällä hetkellä parikymmentä teollista toimijaa, joista suomalaisittain aktiivinen ja kansainvälisestikin merkittävä on UPM.

Mekaaninen kestävyys, pehmeys ja korkea vedensidontakyky tekevät nanoselluloosasta ihanteellisen materiaalin **haavasidoksiin** edistämään uuden ihon muodostumista, suojaamaan haavaa sekundaarisilta infektioilta sekä lievittämään myös potilaan kipuja (Koivuniemi ym. 2019, 2021, Hakkarainen ym. 2016, Kiiskinen ym. 2019). Ihmisten ikääntymiseen ja ylipainoisuuteen liittyvät sairaudet sekä vaikeasti hoidettavat infektiot tekevät kroonisista haavoista maailmanlaajuisesti merkittävän klinisen haasteen ja täten haavanhoidosta kasvavan markkinan. NFC-pohjaisille haavanhoitositeille voidaankin odottaa kasvavaa kysyntää. Suomessa tällä alueella merkittävä toimija on UPM, ja UPM:n kaupallinen Fibdex-haavanhoitosidos soveltuu erityisesti isojen haavojen, ihonsiirtojen ja vaikeiden palovammojen hoitoon.

Elämän ylläpidon mahdollistavana materiaalina NFC-hydrogeelien uudemmat innovaatiot liittyvät **solu- ja kudosteknologiaan**. Solujen adheesiota ja toimintaa tukevana materiaalina se soveltuu solunkasvatusalustoiksi kudostallien ja -implanttien runkorakenteeksi (Chang ym. 2020, Lou ym. 2014, Harjumäki ym. 2019, Heuer ym. 2020). Näiden loppukäyttökohteiden ja niihin liittyvien teknologioiden kehitys on edelleen tutkimus- ja kehitysvaiheessa. Esimerkiksi UPM:n kaupallinen GrowDex-geeli on tarkoitettu lähinnä tutkimuskäyttöön ja myös lääkeaineiden massaseulontaan teollisuudessa. Nanoselluloosapohjaisen solukasvatuksen eduksi luetaan steriiliys, tasalaatuisuus ja kyky jäljitellä hyvin

ihmiskehon ympäristöä. Kasvatusympäristö soveltuu entistä tarkempaan lääkeaineseulostaan, jossa voidaan hyödyntää potilaan omia soluja (mahdollistaen yksilöllisen hoidon). Lähitulevaisuuden mahdollisuuksia ja aktiivisia tutkimuskohteita ovat biotulostetut kudokset ja implantit. Hydrogeelin on myös osoitettu soveltuvan hyvin biologisten lääkeaineiden, solujen sekä kudosmallien varastointiin ja kuljetukseen (Auvinen ym. 2019, Koivunotko ym. 2021, Merivaara ym. 2021). Näiden käyttöalueiden merkitys lääketieteessä tulee arviomme mukaan kasvamaan, vrt. nukleiinihappo- ja proteiinipohjaiset lääkkeet kuten koronarokotteet ja vasta-aineet sekä soluterapiat (Egli & Manoharan 2023, Dumontet ym. 2023, Martins ym. 2022, <https://inflammes.utu.fi/>, <https://www.genecellnano.fi/>).

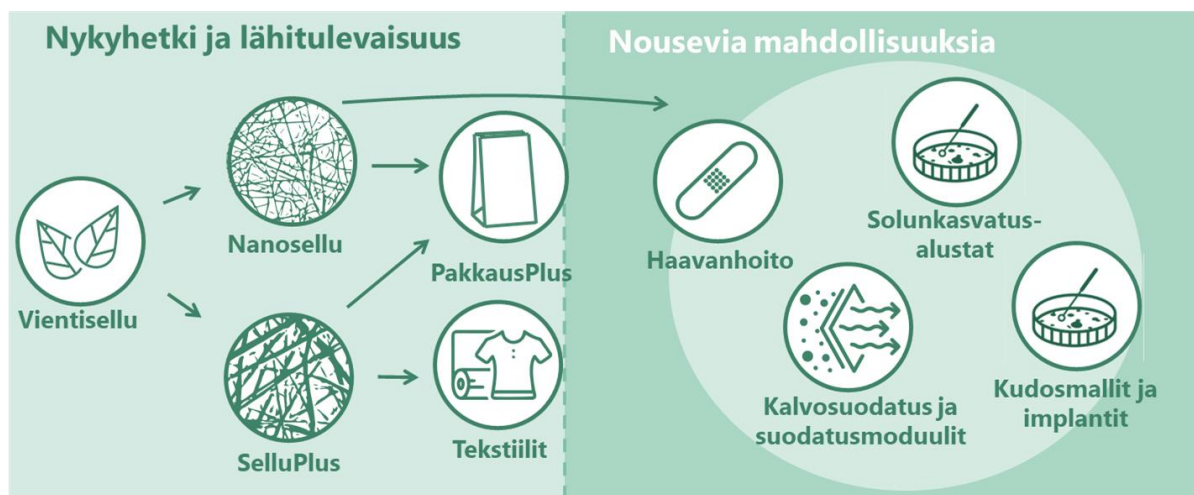
Vientisellunjalostuksen arvonlisäyslaskenta

Laskennan lähtökohtana oli SelluPlus-kategoriaan kuuluvien tuotteiden nanosellu, mikrosellu ja liuotettujen erikoissellujen valmistus. Käytännön laskennassa tuotteet ryhmiteltiin kahteen tuoteryhmään, jotka vastaavat eri kustannustason erikoisselluja. Matalamman kustannuksen jae käytettiin laskelmassa joustavien pakkausten, tekstiilikuitujen ja kehittyneiden kartonkipakkausten valmistamiseen. Korkeamman kustannuksen jae käytettiin vastaavasti edellä kuvattuihin nanosellujalosteisiin. Matalamman kustannustason erikoissellun tuotantoprosessia ja -kustannuksia arvioitiin de Assis ym. (2018) artikkelin kuvaaman selluloosapohjaisten mikro- ja nanofibrillien tuotantorakenteen perusteella. Vastaavasti korkeamman kustannustason erikoissellun kuvaamisessa käytettiin Penloglou ym. (2023) tekemiä arvioita. Näiden tuotantokustannusten pohjalta sellutuotteiden hinnoiksi asetettiin 2 €/t ja 7 €/t.

Hinnat ovat verrattain alhaisia. Ne kuvastavat Future Markets 2023 markkinaraportissa hahmoteltua tulevaisuutta, jossa tuotantokustannukset ovat teknisen kehityksen myötä saatu laskettua sellaiselle tasolle, että näiden erikoisselluihin perustuvat jatkojalosteet olisivat kilpailukykyisiä ei-sellupohjaisiin vaihtoehtoihin nähden. On myös syytä huomata, että laskennassa kaikki erikoissellut jalostetaan toisiksi tuotteiksi, ei sellujen hintataso vaikuta arvoketjujen kokonaisarvonlisäykseen, koska sellun myyntitulot ovat seuraavan vaiheen panoskustannuksia ja ne summautuvat arvonlisälaskennasta pois.

Tarkastelussa mukana olevien sellun jatkojalosteiden suurin kustannuserä muodostuu valmistuksessa käytetystä erikoissellusta. Koska nanosellukalvojen valmistuksesta ei ollut käytettävissä teknistaloudellista analyysiä, käytettiin kalvonvalmistuksen tuotantokustannuksina paperin valmistuksen tuotantokustannuksia. Vaikka kalvojen tuotantokustannukset olisivat käytännössä tätä korkeammat, olisivat ne edelleen vähäiset suhteessa nanoselluraaka-aineen hintaan. Koska sellujen hinnat arvioitiin maltillisiksi, jatkojalosteiden kysyntätasot arvioitiin vastaavasti melko korkealle tasolle suhteessa Markkinaraportin kysyntäprojektiioihin. Jalosteiden suhteelliset tuotantomäärät asetettiin kuitenkin vastaamaan markkinaraportin näkemyksiä kysynnän suhteellisista volyyymeistä.

Nanosellutuotteille arvioitiin myös voittomarginaalit. Tässä lähtökohtana olivat sekä arvio tuotannon volyymistä – niin että suureen volyymiin yhdistettiin pienempi marginaali – että tuotteissa tarvittavat erikoisominaisuudet kuten puhtausvaatimukset. Lisäksi on hyvä muistaa, että tarkastellut tuotteet ovat sellupohjaisia välituotteita, joista voidaan jalostaa varsinaisia lopputuotteita. Siltä osin kuin näiden lopputuotteiden valmistus tapahtuu Suomessa, nanosellupohjaisten arvoketjujen arvonlisäys voisi olla tämän raportin arviota merkittävästikin suurempi. Kuvassa 11 on esitetty yhteenveto sellukuidun jatkojalostuksen kautta mahdollisista arvonlisää tuovista ratkaisuista.



Kuva 11. Sellukuidun jatkojalostuksen kautta mahdollisia arvonlisää tuovia ratkaisuita.

2.2.3 Energiatuotteet – CCS ja P2X

Vihreä siirtymä mahdollistaa lisäarvoa metsäteollisuudesta. Lisäarvo syntyy nykyisen sivuvirran, biopohjaisen hiilidioksidin hyödyntämisestä. Euroopan komissio on ehdottanut, että merkittävä määrä hiiltä, noin 450 MtCO₂ekv, otettaisiin vuosittain talteen, kuljetettaisiin ja pumpattaisiin maan alle. Jos tämä hiilidioksidi olisi biopohjaista, muodostaisi se teknisen hiilinielun. Suomen virallinen tavoite on olla 2035 hiilineutraali. Kun maankäytön sektorilla on hiilinielun kanssa haasteita, voisivat tekniset hiilinielut auttaa Suomen tavoitteen saavuttamisessa.

Tekniset hiilinielut – BECCS

Biomassa sitoo kasvaessaan ilmastasta hiilidioksidia. Jos esimerkiksi puubiomassan poltossa vapautuva hiilidioksidi otetaan talteen, nesteytetään, kuljetetaan laivalla Pohjanmerelle, jossa se pumpataan meren pohjan alle pysyvään varastoon, niin tämä hiilidioksidi muodostaa teknisen hiilinielun, jolla Suomen hiilineutraalisuustavoitetta voidaan tukea. Talteenotto maksanee nykyhinnoin edullisimmillaan 30–60 €/tCO₂ ja kuljetus ja varastointi 10–20 €/tCO₂. Etuna voidaan pitää, että Suomessa biopohjaista hiilidioksidia tuotetaan jo noin 28 MtCO₂ vuodessa, joten laajakaan talteenotto ei vaatisi puubiomassan lisäkäyttöä. Periaatteessa, jos EU-pohjaiset markkinat syntyisivät, voisi Suomi auttaa toisia EU maita, sopivaa korvausta vastaan, jopa 10 MtCO₂ kokoisella biopohjaisella ja jo olemassa olevalla lähteellä. 10 000 0000 tCO₂/a talteenotto savukaasuista vaatii 4000 M€ investoinnit (Karjunen ym. 2022).

Sähköiset tuotteet – P2X

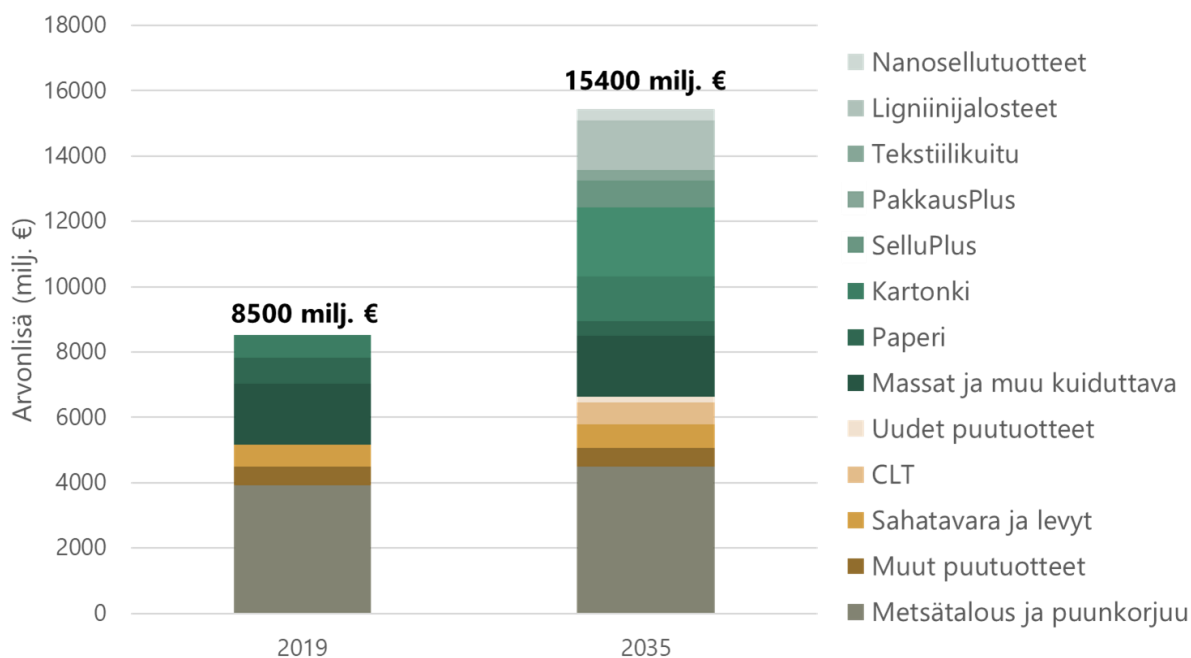
Ensimmäisiä P2X-laitoksia on jo Suomessa rakenteilla. P2X-teknologioissa yksi keskeisimmistä prosesseista on veden elektrolyysi, jossa vettä hajotetaan sähköllä vedyksi ja hapeksi. Vety ja talteen otettu biopohjainen hiilidioksidi voidaan sopivan katalyytin avulla muuntaa metaaniksi, metanoliksi tai liikennepolttoaineiksi. Paras korvausarvo saadaan, kun tuotetaan sähköistä metaania liikennepolttoaineiksi. Tämän liiketoiminnan tulevaisuuteen vaikuttaa olennaisesti EU:n mahdollinen polttomoottoriautokielto. Jos 10 000 0000 tCO₂/a muunnetaan e-tuotteiksi (sähköiset polttoaineet ja sähköiset kemikaalit), se vaatii 15 000 M€ investoinnit ja lisäksi 30 000 M€ investoinnit vihreän lisäsähkön tuotantoon, kuten aurinko- ja tuulivoimaan. Lisäsähkön tuotantoinvestointeja syntyy Suomeen ilman valtion merkittävää lisävaikutusta.

Useassa hankkeessa on pohdittu metanolin tuotantoa. Fossiiliton eMetanoli tulee olemaan merkittävä laivapolttoaine. Metanolista voidaan jo tehdä kemianteollisuuden tuotteita kuten liimoja. Uusiutuvalla metanolilla on jo markkinat ja siitä maksetaan selvästi fossiilista metanolia enemmän. Jos 10 000 0000 tCO₂/a muunnetaan metanoliksi, niin tarvitaan 9 000 MW sähköä ja saadaan aikaan

7 500 000 tMeOH. Tämän tuotteen liikevaihto olisi 7 000–8 000 M€. Energiatuotteita käsitellään tarkemmin tulevilla raporteilla.

2.3 Metsäsektorin kokonaisarvonlisä

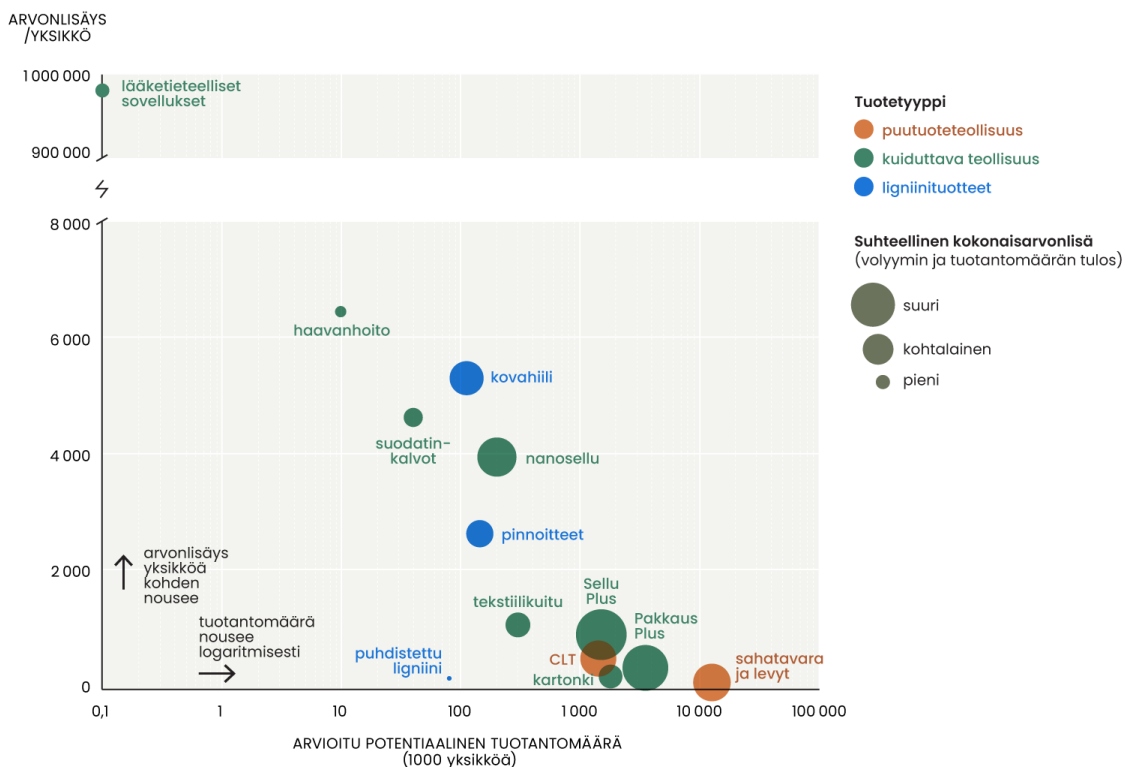
Laskemalla yhteen yllä tarkastellut metsäsektorin tuoteportfolioiden arvioidut arvonlisät, saadaan vuoden 2035 kokonaisarvonlisäksi noin 15 600 milj. € (Kuva 12). Skenaariossa kokonaisarvonlisä kasvaa siis yli 80 % vuoteen 2019 verrattuna. Kasvu on merkittävää, mutta jää noin 20 % aiemman skenaariotyön arviosta (Lintunen ym. 2023). Tässä raportissa tarkasteltiin skenaariota, jossa hakkuumäärät pidettiin nykyisellä tasolla ja oletettiin, että vientisellusta 1 000 kt voitaisiin jatkojalostaa Suomessa, ligniinistä 40 % voitaisiin jalostaa polttamisen sijaan materiaalikäyttöön, ja että kotimaista CLT:tä ja puupohjaisia eristeitä voitaisiin käyttää kerrostalorakentamisessa. Skenaarion toteutuminen vaatii myös merkittäviä edistysaskelia tekstiili- ja pakkausentässä.



Kuva 12. Metsäsektorin arvonlisäykset lähtötilanteesta (2019) ja arvio potentiaalista (2035).

Arvioitaessa uusien innovaatioiden mahdollista taloudellista vaikuttavuutta on tärkeää ottaa huomioon sekä tuotteen suhteellinen arvonlisä että potentiaalinen tuotantomäärä, joka riippuu markkinakoosta ja tulevaisuuden arvioidusta tuotantokapasiteetista. Arvonlisän ja potentiaalisen tuotantomäärän välisiä suhteita on havainnollistettu kuvassa 13. Ääriesimerkkinä voidaan pitää lääketieteellisiä sovelluksia, joissa arvioitiin, että keskimääräinen arvonlisä olisi noin 1 000 €/kg, mutta tuotantomäärät jäisivät alle yhden tonnin. Kaavion toisessa kulmassa on esimerkiksi sahatavara ja kartonki, joita tuotetaan yli satatuhatta kertaa lääketieteellisiä tuotteita enemmän, mutta arvonlisäys tuotettua yksikköä kohti on huomattavasti vähäisempi. Ison tuotantovolyymien johdosta sekä kartonki että pakkausplus, joka sisältää pakkausbarrier-materiaalit ja joustavat pakkaukset, tuovat kuitenkin merkittävää arvonlisää. Ligniiniä tarkastellessa huomataan, että arvonlisä tuotantoyksikköä kohden nousee, kun puhdistettu ligniini jatkojalostetaan pinnoitteiksi tai kovahiileksi, joiden potentiaaliset tuotantomäärät ovat myös merkittäviä.

Metsätaloustuotteiden arvonlisäys ja arvioitu potentiaalinen tuotantomäärä



Kuva 13. Esimerkkejä tarkasteltujen tuotteiden arvioidusta sijoittumisesta arvonlisäys-tuotantomäärä-akselistolle. Huomaa, että tuotantomäärää kuvaava akseli on logaritminen. Ympyröiden koot kuvastavat tuotteiden arvioituja arvonlisiä suhteessa toisiinsa.

Skenaarion mukaan metsäsektorin arvonlisää on mahdollista kasvattaa Suomessa korkeamman jalostusarvon materiaalien avulla. Tämän kehityksen toteutuminen edellyttää uusien materiaali-innovaatioiden kaupallistamista kotimaassamme. Keskeinen kysymys onkin, miten innovaatioiden kehittymistä ja menestymistä voidaan tukea. Merkittäviä tekijöitä ovat muun muassa seuraavat:

1) Perustutkimuksen ja soveltavan tutkimuksen vaaliminen. Radikaalit innovaatiot perustuvat tyypillisesti pitkäjänteiseen perustutkimukseen, jonka tuloksia viedään eteenpäin soveltavassa tutkimuksessa. Suomessa on korkeatasoista puunjalostuksen ja uusien puupohjaisten tuotteiden osaamista, ja tieteellistä julkaisemista tarkasteltaessa Suomi on yksi aktiivisimmista maista Kiinan, Yhdysvaltojen ja Intian jälkeen uusien innovatiivisten puupohjaisten materiaalien kuten nanosellun tai nanoligniinin tutkimisessa. Suomen Akatemian rahoittama lippulaivaohjelma on mahdollistanut pitkäjänteistä ja monitieteellistä metsäsektoria edistävää tutkimusta FinnCERES- ja UNITE-lippulaivoissa tehdyn työn muodossa (<https://www.finnceres.fi/>, ja <https://uniteflagship.fi/fi/etusivu/>). Lippulaivojen työ on luonut vankan perustan uusille innovaatioille, ja onkin tärkeää, että metsäbiotalouteen liittyvä tutkimus jatkuu lippulaivaohjelmassa myös nykyisen lippulaivakauden jälkeen. Biopohjaisten materiaali-innovaatioiden tueksi tarvitaan rahoitusta soveltavaan monitieteiseen kehitystyöhön, jonka avulla voidaan varmistaa muun muassa uusien materiaalien valmistuksen teknistaloudellinen potentiaali, kestävyys ja toiminta eri sovelluksissa. Toinen viimeaikainen merkittävä TKI-satsaus on Opetus ja kulttuuriministeriön vuonna 2024 alkava tohtorikoulutuspilotti, jossa yliopistoille suunnataan 255 miljoonaa euroa tuhannen uuden tohtorin kouluttamiseen tavoitteena lisätä Suomen kilpailukykyä ja luoda edellytyksiä innovaatioille (Opetus- ja kulttuuriministeriö 2024). Tohtorikoulutuspiloteista CIMANET-verkosto keskittyy biokierrotalouteen kouluttaen 67 uutta asiantuntijaa tukemaan metsäsektorin ja biopohjaisen teollisuuden uusiutumista (<https://www.aalto.fi/en/doctoral-education-pilot/cimanet-doctoral-education-pilot>).

2) Innovaatioiden rahoitus. Tutkimuksen ja osaajien lisäksi materiaali-innovaatiot vaativat tyypillisesti merkittäviä investointeja tuotannon skaalaukseen jo yritystoiminnan alkuvaiheessa. On erittäin positiivista, että Suomessa on yksityisiä toimijoita, jotka sijoittavat ennakkoluulottomasti metsäsektorin ja biotalouden startupeihin ja innovaatioihin. Toisaalta yliopistojen ja julkisten rahoittajien jäykät käytänteet voivat luoda haastavia tilanteita potentiaalisille startup-tiimeille. Tutkimuksen ja kaupallistamisen välinen kuilu on metsäsektorin innovaatioissa tyypillisesti leveä, ja sen ylittämiseen tarvitaan edelleen uusia rahoitusmuotoja. Jotta innovaatiot päätyvät tuotannolliselle tasolle, edellytyksenä on suotuisan investointi-ilmapiirin luominen ja ylläpito. Arvonlisää nostavat investoinnit voivat olla mittakaavaltaan olennaisesti pienempiä kuin ensivaiheen jalostus. Niiden integrointi olemassa olevaan teollisuusinfrastruktuuriin on usein myös tarkoituksenmukaista logistiikan, energiantuotannon ja jäte- ja sivutuotevirtojen hallinnan kannalta. Suomi tarvitsee investointipääomia ja kriittistä analyysiä siitä, mitkä kuluttajamarkkinoita lähempänä olevat arvoketjun osat voidaan tehdä kilpailukykyiseksi Suomessa.

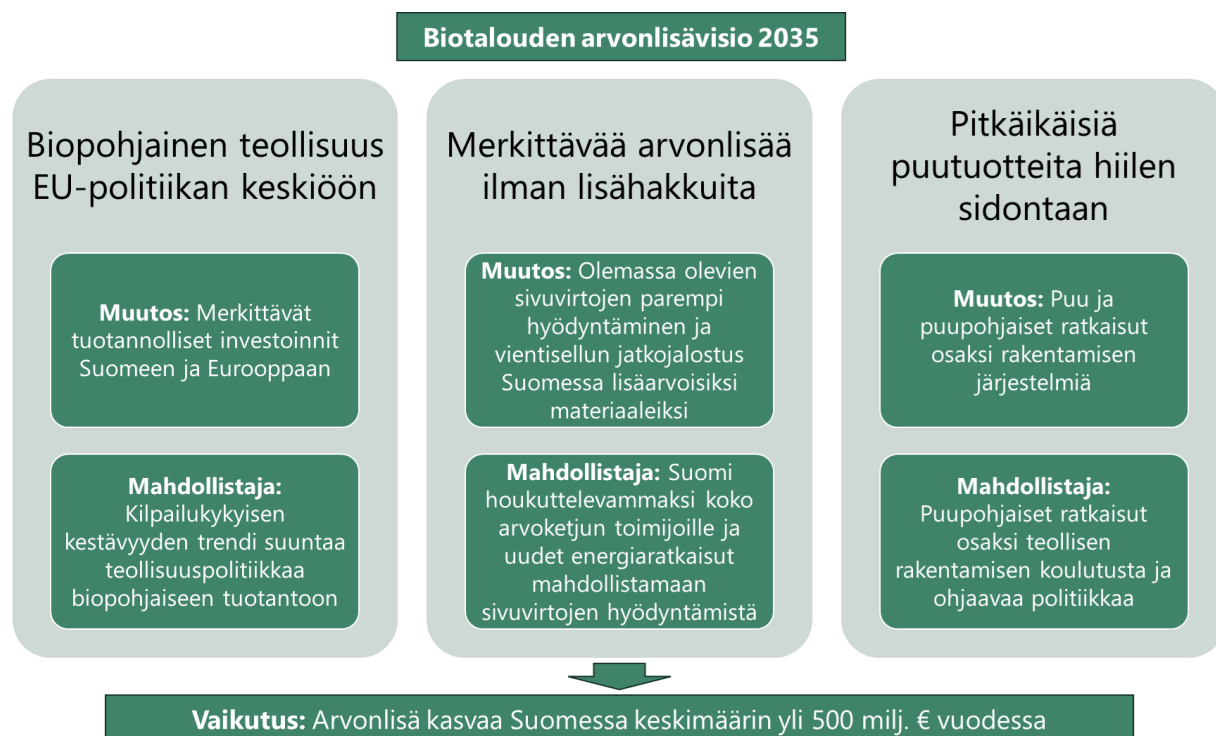
3) Suomesta houkuttelevampi ympäristö yrittäjille ja kansainvälisille osaajille. Suomessa täytyy tehdä aktiivisesti työtä ulkomaalaisten osaajien houkuttelemiseksi kotimaahamme. On tärkeää, että yliopistoissa kouluttamamme maisterit, diplomi-insinöörit ja tohtorit integroituvat osaksi suomalaista yhteiskuntaa. CIMANET-tohtorikoulutusprojektissa pyritään aktiivisesti edesauttamaan kansainvälisten osaajien työllistymistä Suomeen, erityisesti yrityksiin ja tutkimuslaitoksiin. Myös VTT:n 2023 lanseeraama PhD- ja postdoc-ohjelma sekä Luken 2024 käynnistämä tohtoriohjelma tukevat asiantuntijakoulutusta ja vastavalmistuneiden tohtorien työllistymistä.

Suuri viimeaikainen muutos maamme toimintaympäristössä on mittava uusiutuvan ja vähäpäästöisen sähkön tuotantokapasiteetin nousu. Tämä muuttaa jatkossa metsäsektorin tuotannon businesslogiikkaa ja voi mahdollistaa energiantensiivistenkin tuotteiden valmistuksen ja toisaalta puuraaka-aineen säästeliäämmän käytön, kun energiaa ei tarvitse tuottaa samassa määrin puubiomassasta. On myös huomionarvoista, että uusien materiaali-innovaatioiden lisäksi hiilidioksidin talteenotossa ja uusissa energiatuotteissa on merkittävää potentiaalia kasvattaa metsäsektorin arvonlisää ilmastokestävällä tavalla. Myös tähän kehitykseen vaaditaan merkittäviä investointeja ja tukea poliittisella sääntelyllä.

3. Johtopäätökset ja visio

Metsäsektorin arvonlisän merkittävä lisääminen ei onnistu ilman suuria rakenteellisia muutoksia. Muun muassa arvoketjujen pidentäminen kotimaassa, investoinnit, tutkimuspanostukset, yrittäjyyden tukeminen, osaavan työvoiman saatavuus ja vihreä energia ovat keskeisiä tekijöitä kotimaisen arvonlisän kasvattamisen kannalta. Johtopäätöksenä voidaan kuitenkin todeta, että ligniinin, sellukuitujen ja mekaanisten puutuotteiden jalostusasteiden nosto Suomessa sekä sivuvirtojen tehokkaampi hyödyntäminen toisivat merkittävää arvonlisää Suomeen ilman lisähakkuita. Aiemmassa skenaariotyössä (Lintunen ym. 2023) kuvailtu Suomen biotalousstrategian mukainen arvonlisän kaksinkertaistaminen tulee kuitenkin olemaan erittäin haasteellista vuoteen 2035 mennessä.

Metsää ei tule kohdella ainoastaan hiilinieluna tai materiaalipankkina. Ilmasto-, ennallistamis- ja biotalouden edistämistoimia tehtäessä on tärkeää arvioida niiden kustannustehokkuutta ja ympäristövaikutuksia kriittisesti ja kokonaisvaltaisesti, ottaen huomioon niiden yhteisvaikutukset. On keskeistä ymmärtää, että ihmiskunta tarvitsee materiaaleja nyt ja tulevaisuudessa. Olemme tällä hetkellä liian riippuvaisia lineaarisesta fossiilisten raaka-aineiden käytöstä, mikä aiheuttaa ihmiskunnalle esimerkiksi mikromuovisaasteen ja ilmastonmuutoksen myötä haasteita, joiden vaikutuksia emme vielä edes täysin tiedä. Puupohjaiset materiaalit tarjoavat näille materiaaleille kestävämmän vaihtoehdon, ja niiden valmistuksella on usein matalampi hiilijalanjälki kuin niillä tuotteilla mitä ne korvaavat. Maailman metsävarat eivät kuitenkaan riitä korvaamaan kaikkia fossiilisia materiaaleja, eikä ominaisuuksiltaan soveltuvia puupohjaisia materiaaleja ole vielä kehitetty kaikkiin sovelluksiin. Metsäteollisuuden tarve kasvattaa materiaalien tuotantoa on myös helposti ristiriidassa luonnon monimuotoisuuden säilyttämisen kanssa. Kestävän metsänhoidon myötä metsäsektorilla on kuitenkin mahdollisuus tuottaa positiivisia vaikutuksia ilmastoon ja ympäristölle.



Biopohjainen teollisuus EU-politiikan keskiöön. EU on jäänyt taloudellisessa kehityksessä jälkeen Yhdysvaltoihin ja Kiinaan verrattuna. Biopohjainen teollisuus voi nostaa unionille tuottamaansa arvonlisää. Tämä edellyttää voimakkaita toimia tuotannollisten investointien saamiseksi ja pitämiseksi EU:n alueella sekä sen analyysiä, kuinka jatkojalostus saadaan kannattavaksi ja kilpailukykyiseksi. Vaikka korkean arvonlisän tuotteiden jalostus ei ole samassa määrin riippuvainen pitkäaikaisesta raaka-aineen saatavuudesta, epävarmuus esimerkiksi EU:n omien metsien hyödyntämisen edellytyksistä rapauttaa investointi-ilmapiiriä. Keskeinen epävarmuutta lisäävä tekijä on voimakkaasti kasvanut metsiä koskeva EU-regulaatio: yli 70 ajan yli muuttuvaa politiikkatoimea kohdistuu metsiin, aiheuttaen epävarmuutta metsänomistajien kesken ja nostaten puuta käyttävän teollisuuden puunhankintakustannuksia (Väätäinen ym. 2023).

Merkittävää arvonlisää uusista innovaatioista ilman lisähakkuita. Markkinasellua kannattaa jatkojalostaa tekstiilikuiduksi ja nano- ja mikrofibrilliselluloosaksi, joita voitaisiin käyttää raaka-aineina esimerkiksi suodattimissa, pakkausbarrier-materiaaleina ja lääketieteen sovelluksissa. Näiden sovellusten arvonlisäpotentiaali on suuri, jos jatkojalostus pysyy Suomessa pidentäen kotimaista arvoketjua. Keskeistä onkin, kuinka Suomesta tehdään houkuttelevampi ympäristö investoinneille, yrittäjille ja kansainvälisille osajille. Sivuvirrat kannattaa myös hyödyntää tehokkaasti. Tässä raportissa keskityttiin ligniiniin, jota kannattaisi ottaa enemmän talteen ja jatkojalostaa materiaaleiksi ja tuotteiksi. Erityisesti kovahiili energian varastointiin, pinnoitteet, hartsit ja liimat ovat selkeitä lisäarvoa tuovia sovelluksia. Tämä muutos edellyttää kuitenkin investointeja kotimaiseen arvoketjuun ja uusia ratkaisuja korvaamaan nykyinen ligniinin poltosta syntyvä energia.

Ilmastonmuutoksen hillintä pitkäikäisten puutuotteiden avulla. Sahatavaran viennin sijasta puuta kannattaisi jalostaa CLT:ksi tai viilupuuksi (LVL) Suomessa ja käyttää kerrostalojen rungoissa betonin sijasta. Lisäksi ylijäämäenergiapuuta kannattaisi jalostaa puukuitupohjaisiksi lämmöneristeiksi ja käyttää rakentamisessa mineraalivillaläisterien sijasta. Pitkäikäiset ja kierrätettävät puupohjaiset tuotteet kasvattavat hiilensidontaa ja torjuvat ilmastonmuutosta. On tärkeää, että puupohjaiset ratkaisut otetaan tulevaisuudessa tiiviimmin osaksi rakentamista ohjaavaa politiikkaa.

On myös huomionarvoista, että metsäsektorin tuotteet ovat laajalti yhteensopivia kiertotalouden periaatteiden kanssa. Nykyisillä raaka-ainevarannoilla tulee jatkuvasti haastavammaksi kattaa ihmiskunnan vuosittain kasvavia materiaaliarpeita ilman massiivista fossiilisten materiaalien valmistuksen lisäämistä. Onkin suoraviivaista ennustaa, että kiertotalouden merkitys tulee kasvamaan globaalisti. Kiertotalouden mukaisissa energiatuotteissa ja biopohjaisen hiilidioksidin talteenotossa on myös merkittävää potentiaalia kasvattaa tulevaisuudessa metsäsektorin arvonlisää ilmastokestäväällä tavalla.

Tässä raportissa ei käsitelty kaikkia metsäbiotalouden kentässä olevia raaka-aineita tai tuoteryhmiä. Esimerkiksi puun kuoriuutteet ja hemiselluloosa ovat merkittäviä sivuvirtoja, jotka tarjoavat mielenkiintoisia mahdollisuuksia lääketieteessä, ruokasovelluksissa, tai kemikaalien prekursoreina. FinnCERES lippulaiva ohjelmassa on osoitettu lignoselluloosakomponenttien toiminnallisuutta täysin uusissa sovelluksissa. Esimerkkeinä voidaan todeta selluloosaan perustuvat optiset materiaalit, sensorit ja diagnostiikka (www.finnceres.fi). Uusien sovellusten kohdalla jatkotutkimuksen tarve on ilmeinen, jotta lupaavat tutkimustulokset pääsevät innovaatio- ja kaupallistamispolulle. Raportin tuloksia tarkasteltaessa on myös tärkeää ottaa huomioon, että luotettavien ennusteiden tekeminen innovaatiotasolla olevista tuotteista on haastavaa.

Viitteet

- Abik, F., Palasingh, C., Bhattarai, M., Leivers, S., Ström, A., Westereng, B., Mikkonen, K. S. & Nypelö, T. 2023. Potential of Wood Hemicelluloses and Their Derivates as Food Ingredients. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 71 (6), 2667–2683. DOI: 10.1021/acs.jafc.2c06449.
- Amorim, C., Silvério, S., Prather, K. & Rogrigues, L. 2019. From lignocellulosic residues to market: Production and commercial potential of xylooligosaccharides. *Biotechnology Advances* 37, 107397. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2019.05.003.
- Aguilar-Sanchez, A., Jalvo, B., Mautner, A., Nameer, S., Pöhler, T., Tammelin, T. & Mathew A.P. 2021. Waterborne nanocellulose coatings for improving the antifouling and antibacterial properties of polyethersulfone membranes. *Journal of Membrane Science* 620, 118842. DOI: 10.1016/j.memsci.2020.118842.
- Argyropoulos, DDS, Crestini, C., Dahlstrand, C., Furusjö, E., Gioia, C., Jedvert, K., Henriksson, G., Hulteberg, C., Lawoko, M., Pierrou, C., Samec, J.S.M., Subbotina, E., Wallmo, H., & Wimby, M. 2023. Kraft Lignin: A Valuable, Sustainable Resource, Opportunities and Challenges. *ChemSusChem* 16, e202300492. DOI: 10.1002/cssc.202300492.
- Auvinen, V.-V., Merivaara, A., Kiiskinen, J., Paukkonen, H., Lauren, P., Hakkarainen, T., Koivuniemi, R., Sarkanen, R., Ylikomi, T., Laaksonen, T. & Yliperttula, M. 2019. Effects of nanofibrillated cellulose hydrogels on adipose tissue extract and hepatocellular carcinoma cell spheroids in freeze-drying. *Cryobiology* 91, 137–145. DOI: 10.1016/j.cryobiol.2019.09.005.
- Chang, H.-T., Heuer, R. A., Oleksijew, A. M., Coots, K. S., Roque, C. B., Nella, K. T., McGuire, T. L. & Matsuoka, A. J. 2020. An engineered three-dimensional stem cell niche in the inner ear by applying a nanofibrillar cellulose hydrogel with a sustained-release neurotrophic factor delivery system. *Acta Biomaterialia* 108, 111–127. DOI: 10.1016/j.actbio.2020.03.007.
- de Assis, C.A., Iglesias, M.C., Bilodeau, M., Johnson, D., Phillips, R., Peresin, M.S., Bilek, E.M., Rojas, O.J., Venditti, R. & Gonzalez, R., 2018. Cellulose micro- and nanofibrils (CMNF) manufacturing-financial and risk assessment. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 12(2), pp.251–264.
- Dessbesell, L. Paleologou, M., Leitch, M., Pulkki, R. & Xu, C. 2020. Global lignin supply overview and kraft lignin potential as an alternative for petroleum-based polymers *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 123, 109768. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109768.
- Dumontet, C., Reichert, J. M., Senter, P. D., Lambert, J. M. & Beck, A. 2023. Antibody-drug conjugates come of age in oncology. *Nature Reviews* 22, 641–661. DOI: 10.1038/s41573-023-00709-2.
- Eckhart, R. 2021. Recyclability of carton board and carton. *Enlanninkielinen käännös tutkimuksesta Wochenblatt für Papierfabrikation* 11/2021 <https://www.procarton.com/wp-content/uploads/2022/01/25-Loops-Study-English-v3.pdf>
- Egli, M. & Manoharan, M. 2023. Chemistry, structure and function of approved oligonucleotide therapeutics. *Nucleic Acids Research* 11, 2529–2573. DOI: 10.1093/nar/gkad067.
- Eurostat 2023. EU packaging waste generation with record increase. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20231019-1>. Viitattu 27.3.2024.
- Eurostat 2023. Recycling rates of packaging waste for monitoring compliance with policy targets, by type of packaging - Paper and cardboard packaging.

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WASPACR_custom_1717115/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=d73804e4-e7d8-464d-9d5d-c9f1019d3fcf. Viitattu 27.3.2024.

Forecon Oy 2022. Puun käytön määrä Suomessa. https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/c6a6a9dc-0592-494e-82cd-00ec8d20065e/65832289-76ba-426e-a84a-7d3145c33ee6/RAPORTTI_20230308132013.pdf. Forecon Oy 3.2.2022. Viitattu 10.3.2024.

Future Market Insights 2022. Cellulose Film Packaging Market. <https://www.futuremarketinsights.com/reports/cellulose-film-packaging-market>. Viitattu 10.3.2024.

Future Market Insights 2022. Packaging Films Market. <https://www.futuremarketinsights.com/reports/packaging-films-market>. Viitattu 10.3.2024.

Future Markets 2023. The Global Market for Micro and Nanocellulose 2024–2034: Microfibrillated cellulose, Cellulose Nanofibers, Cellulose Nanocrystals and Bacterial Nanocellulose. <https://www.futuremarketsinc.com/the-global-market-for-micro-and-nanocellulose-2024-2034/>. Viitattu 10.3.2024.

Hakkarainen, T., Koivuniemi, R., Kosonen, M., Escobedo-Lucea, C., Sanz-Garcia, A., Vuola, J., Valtonen, J., Tammela, P., Mäkitie, A., Luukko, K. & Yliperttula, M. 2016. Nanofibrillar cellulose wound dressing in skin graft donor site treatment. *Journal of Controlled Release* 244, 292–301. DOI: 10.1016/j.jconrel.2016.07.053.

Harjumäki, R., Nugroho, R.W.N., Zhang, X., Lou, Y.-R., Yliperttula, M., Valle-Delgado, J.J. & Österberg, M. 2019. Quantified forces between HepG2 hepatocarcinoma and WA07 pluripotent stem cells with natural biomaterials correlate with *in vitro* cell behavior. *Scientific Reports* 9, 7354. DOI:10.1038/s41598-019-43669-7.

Heise, K., Kontturi, E., Allahverdiyeva, Y., Tammelin, T. Linder, M. B., Nonappa & Ikkala, O. 2021. Nanocellulose: Recent Fundamental Advances and Emerging Biological and Biomimicking Applications. *Advanced Materials* 33, 2004349. DOI: 10.1002/adma.202004349.

Henn, K. A., Forsman, N., Zou, T. & Österberg, M. 2021. Colloidal Lignin Particles and Epoxies for Bio-Based, Durable, and Multiresistant Nanostructured Coatings. *ACS Applied Materials & Interfaces* 13 (29), 34793–34806. DOI: 10.1021/ACSAMI.1C06087.

Henn, K.A., Forssell, S., Pietiläinen, A., Forsman, N., Smal, I., Nousiainen, P., Bangalore Ashok, R.P., Oinas, P. & Österberg, M. 2022. Interfacial catalysis and lignin nanoparticles for strong fire- and water-resistant composite adhesives. *Green Chemistry* 24 (17), pp. 6487–6500. DOI: 10.1039/d2gc01637k.

Heuer, A., Oleksijew, A., Coots, K. S., Christial, B. R., Nella, K. T., McGuire, T. L. & Matsuoka, A. J. 2020. An engineered three-dimensional stem cell niche in the inner ear by applying a nanofibrillar cellulose hydrogel with a sustained-release neurotrophic factor delivery system. *Acta Biomaterialia* 108, 111–127. DOI: 10.1016/j.actbio.2020.03.007.

IndustryARC 2024. Membrane Filtration Market - Forecast (2024–2030). <https://industryarc.com/Report/19572/membrane-filtration-market.html>. Viitattu 10.3.2024.

Jorfi, M. & Foster, E. J. 2015. Recent Advances in Nanocellulose for Biomedical Applications. *Journal of Applied Polymer Science* 132, 41719. DOI: 10.1002/APP.41719.

Karjunen, H., Sikiö, P., Lassila, J., Vilppo, J., Räisänen, O., Inkeri, E., Tynjälä, T. & Laaksonen, P. 2022. South-East Finland Hydrogen Valley Project report, LUT Scientific and Expertise Publications. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-852-2>. Viitattu 26.3.2024.

Khakalo, A., Mäkelä, T., Johansson, L. S., Orelma, H., & Tammelin, T. 2020. High-throughput tailoring of nanocellulose films: From complex bio-based materials to defined multifunctional architectures. *ACS Applied Bio Materials* 3(11), 7428–7438. DOI: 10.1021/acsabm.0c00576.

Kiiskinen, J., Merivaara, A., Hakkarainen, T., Kääriäinen, M., Miettinen, S., Yliperttula, M. & Koivuniemi, R. 2019. Nanofibrillar cellulose wound dressing supports the growth and characteristics of human mesenchymal stem/stromal cells without cell adhesion coatings. *Stem Cell Research & Therapy* 10, 292. DOI: 10.1186/s13287-019-1394-7.

Koivuniemi, R., Hakkarainen, T., Kiiskinen, J., Kosonen, M., Vuola, J., Valtonen, J., Luukko, K., Kavola, H. & Yliperttula, M. 2020. Clinical study of nanofibrillar cellulose hydrogel dressing for skin graft donor site treatment. *Advances in Wound Care* 9(4), 199–210. DOI: 10.1089/wound.2019.0982.

Koivuniemi, R., Xu, Q., Snirvi, J., Lara-Saez, I., Merivaara, A., Luukko, K., Nuopponen, M., Wang, W. & Yliperttula, M. 2021. Comparison of the Therapeutic Effects of Native and Anionic Nanofibrillar Cellulose Hydrogels for Full-Thickness Skin Wound Healing. *Micro* 1, 194–214. DOI: 10.3390/micro1020015.

Koivunotko, E., Merivaara, A., Niemelä, A., Valkonen, S., Manninen, K., Mäkinen, H., Viljanen, M., Svedström, K., Diaz, A., Holler, M., Zini, J., Paasonen, L., Korhonen, O., Huotari, S., Koivuniemi, A. & Yliperttula, M. 2021. Molecular Insights on Successful Reconstitution of Freeze-Dried Nanofibrillated Cellulose Hydrogel. *ACS Applied Bio Materials* 4, 7157–7167. DOI: 10.1021/acsabm.1c00739.

Kontturi, E., Laaksonen, P., Linder, M. B., Nonappa, Gröschel, A. H., Rojas, O. J., & Ikkala, O. 2018. Advanced materials through assembly of nanocelluloses. *Advanced Materials* 30(24), 1703779. DOI: 10.1002/adma.201703779.

Koppolu, R. 2024. High-throughput Processing of Nanocelluloses into Barrier Coatings: A Focus on Nanocellulose Rheology and Multilayer Barrier Properties. Väitöskirja, Åbo Akademi. https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/188696/koppolu_rajesh.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Kähkönen, S., Vakkilainen, E., & Laukkanen, T. 2019. Impact of Structural Changes on Energy Efficiency of Finnish Pulp and Paper Industry. *Energies* 12 (19), 23–30. DOI: 10.3390/en12193689.

Leppänen, I., Lappalainen, T., Lohtander, T., Jonkergouw, C., Arola, S. & Tammelin, T. 2022. Capturing colloidal nano- and microplastics with plant-based nanocellulose networks. *Nature Communications* 13:1814. DOI: 10.1038/s41467-022-29446-7.

Lintunen, J., Kohl, J., Buchert, J., Asikainen, A., Jyske, T., Maunuksela, J. & Lehto, J. 2023. Suomi elää metsästä myös 2035 – Keskustelunavaus metsäsektorin arvonlisän kaksinkertaistamiseen. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 14/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 21 s.

Lou, Y.-R., Kanninen, L., Kuisma, T., Niklander, J., Noon, L. A., Burks, D., Urtti, A. & Yliperttula, M. 2014. The Use of Nanofibrillar Cellulose Hydrogel as a Flexible Three-Dimensional Model to Culture Human Pluripotent Stem Cells. *Stem Cells and Development* 23, 380–392. DOI: 10.1089/scd.2013.0314.

Luonnonvarakeskus 2022. Kasvihuonekaasuinventaarion ennakkotiedot vahvistavat: maankäyttösektori päästölähde vuonna 2021, metsät pysyivät edelleen nettonieluna.

<https://www.luke.fi/fi/seurannat/maatalous-ja-lulucfsektorin-kasvihuonekaasuinventaarion/kasvihuonekaasuinventaarion-ennakkotiedot-vahvistavat-maankayttosektori-paastolahde-vuonna-2021-metsat-pysyivat-edelleen-nettonieluna>.

Luonnonvarakeskus 14.12.2022. Viitattu 21.3.2024.

Luonnonvarakeskus 2024. Kiinteiden puupolttoaineiden kulutus väheni lämpö- ja voimalaitoksissa vuonna 2023 – metsähakkeen poltto edelleen kasvussa. <https://www.luke.fi/fi/uutiset/kiinteiden-puupolttoaineiden-kulutus-vaheni-lampo-ja-voimalaitoksissa-vuonna-2023-metsahakkeen-poltto>

[edelleen-kasvussa](https://www.luke.fi/fi/uutiset/kiinteiden-puupolttoaineiden-kulutus-vaheni-lampo-ja-voimalaitoksissa-vuonna-2023-metsahakkeen-poltto-edelleen-kasvussa)<https://www.luke.fi/fi/uutiset/kiinteiden-puupolttoaineiden-kulutus-vaheni-lampo-ja-voimalaitoksissa-vuonna-2023-metsahakkeen-poltto-edelleen-kasvussa>. Luonnonvarakeskus 15.3.2024. Viitattu 21.3.2024.

Martins, A., Oshiro, M. Y., Albericio, F., de la Torre, B., Pereira, G. J. V. & Gonzaga, R. V. 2022. Trends and Perspectives of Biological Drug Approvals by the FDA: A Review from 2015 to 2021. *Biomedicines* 10, 2325. DOI: 10.3390/biomedicines10092325.

Merivaara, A., Zini, J., Koivunotko, E., Valkonen, S., Korhonen, O., Fernandes, F. M. & Yliperttula, M. 2021. Preservation of biomaterials and cells by freeze-drying: Change of paradigm. *Journal of Controlled Release* 336, 480–498. DOI: 10.1016/j.jconrel.2021.06.042.

Metsä Group 2023. The global packaging market. <https://www.metsagroup.com/metsaboard/investors/operating-environment/global-packaging-market/>. Viitattu 10.3.2024.

Metsäteollisuus 2024. Metsäteollisuuden tuotantomäärät. <https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/metsateollisuuden-tuotantomaarat>. Metsäteollisuus ry 8.2.2024. Viitattu 10.3.2024.

Opetus- ja kulttuuriministeriö 2024. Yliopistoille lisärahoitus tuhannen uuden tohtorin kouluttamiseen. <https://okm.fi/-/yliopistoille-lisarahoitus-tuhannen-uuden-tohtorin-kouluttamiseen>. Opetus- ja kulttuuriministeriö 7.2.2024. Viitattu 26.3.2024.

Orelma, H. 2018. Puun merkitys lääketieteessä. *Duodecim* 134, 1389–1394. <https://www.duodecimlehti.fi/duo14412>. Viitattu 27.3.2024.

Paukkonen, H., Kunnari, M., Lauren, P., Hakkarainen, T., Auvinen, V.-V., Oksanen, T., Koivuniemi, R., Yliperttula, M. & Laaksonen, T. 2017. Nanofibrillar cellulose hydrogels and reconstructed hydrogels as matrices for controlled drug release. *International Journal of Pharmaceutics* 532, 269–280. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2017.09.002.

Penloglou, G., Basna, A., Pavlou, A. & Kiparissides, C., 2023. Techno-Economic Considerations on Nanocellulose's Future Progress: A Short Review. *Processes* 11(8), p.2312. DOI: 10.3390/pr11082312.

Plastics Europe 2023. Plastics – the fast Facts 2023. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>. Viitattu 27.3.2024.

Pöhler, T., Mautner, A., Aguilar-Sanchez, A., Hansmann, B., Kunnari, V., Grönroos, A., Rissanen, V., Siqueira, G., Mathew, A.P. & Tammelin, T. 2022. Pilot-scale modification of polyethersulfone membrane with a size and charge selective nanocellulose layer. *Separation and Purification Technology* 285, 120341. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.120341.

Rakennustutkimus RTS Oy 2023. Lämmöneristemarkkinat, toimialaraportti, lokakuu 2023. Rakennustutkimus RTS Oy.

Rissanen, V., Vajravel, S., Kosourov, S., Arola, S., Kontturi, E., Allahverdiyeva, Y. & Tammelin, T. 2021. Nanocellulose-based mechanically stable immobilization matrix for enhanced ethylene production: a framework for photosynthetic solid-state cell factories. *Green Chemistry* 23, 3715–3724. DOI: 10.1039/D1GC00502B

Solin, K., Vuoriluoto, M., Khakalo, A. & Tammelin, T. 2023. Cannabis detection with solid sensors and paper-based immunoassays by conjugating antibodies to nanocellulose. *Carbohydrate Polymers* 304, 120517. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.120517.

Suomen Tekstiili ja Muoti 2021. Ekologisia tekstiilikuituja Suomesta – missä mennään tällä hetkellä? <https://www.stjm.fi/uutiset/ekologisia-tekstiilikuituja-suomesta-missa-mennaan-talla-hetkella/?fbclid=IwAR1QRnsQuS8-3mDvUxuoniEqpMi6WtQ2qZ-H9yvZkFHblWltSdsPPfhYSZU>. Suomen Tekstiili ja Muoti 16.6.2021. Viitattu 10.3.2024.

Suomen Tekstiili ja Muoti 2022. Tekstiilikuituopas. https://www.stjm.fi/wp-content/uploads/2022/02/Tekstiilikuituopas_korjattu.pdf. Suomen Tekstiili ja Muoti 2022. Viitattu 10.3.2024.

Technavio 2023. Packaging Market by End-user, Type, and Geography - Forecast and Analysis 2023–2027 (2023).

Teknisen Kaupan Liitto ry 2023. Maailman ensimmäinen akkuteollisuuden edunvalvontajärjestö Suomeen. <https://tekninen.fi/uutishuone/maailman-ensimmainen-akkuteollisuuden-edunvalvontajarjesto-suomeen/>. Teknisen Kaupan Liitto ry 6.4.2023. Viitattu 10.3.2024.

Teknologian Tutkimuskeskus VTT 2024. Kohti päästötöntä sellun valmistusta: Metsäteollisuus ja tiedeyhteisö yhdistävät voimansa. <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/kohti-paastotonta-sellun-valmistusta-metsateollisuus-ja-tiedeyhteiso-yhdistavat>. Teknologian Tutkimuskeskus VTT 17.1.2024. Viitattu 10.3.2024.

Tilastokeskus 2024. Arvonlisäys. <https://www.stat.fi/meta/kas/arvonlisays.html>. Viitattu 21.3.2024.

Valtioneuvosto 2022. Suomen biotalousstrategia: Kestävästi kohti korkeampaa arvonlisää, <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163967>. Valtioneuvosto, 1.4.2022. Viitattu 10.3.2024.

Vähä-Nissi, M., Rautkoski, H. & Kataja, K. 2020. Barrieerit suojaavat sisältöä. https://www.pakkaus.com/wp-content/uploads/2020/06/Pakkaus_04_2020_termit.pdf. Package-Heroes-hanke. Viitattu 3.4.2024.

Väätäinen, K. Mutanen, A., Routa, J. & Järvinen E. 2023. Selvitys: EU:n politiikkatoimilla puunkorjuun kustannuksia ja työvoimatarvetta lisäävä vaikutus. <https://www.luke.fi/fi/uutiset/selvitys-eun-politiikkatoimilla-puunkorjuun-kustannuksia-ja-tyovoimatarvetta-lisaava-vaikutus>. Luonnonvarakeskus 21.3.2023. Viitattu 26.3.2024.

Ympäristöministeriö 2023. Eduskunta hyväksyi rakentamisen päästöjä pienentävät ja digitalisaatiota edistävät lait. <https://ym.fi/-/eduskunta-hyvakysi-rakentamisen-paastoja-pienentavat-ja-digitalisaatiota-edistavat-lait>. Ympäristöministeriö 1.3.2023. Viitattu 26.3.2024.

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta 2017/848. Annettu Helsingissä 28.11.2017. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170848>

Österberg, M, Sipponen, M. H., Mattos, B., ja Rojas, O.J. 2020. Spherical lignin particles: a review on their sustainability and applications. Green Chemistry 22, 2712–2733. DOI: 10.1039/D0GC00096E.

Liite. Laskennan toteutus

Arvonlisäys on kansantalouden tilinpidon käsite ja Tilastokeskus (2024) määrittelee sen seuraavasti: Arvonlisäys (brutto) tarkoittaa tuotantoon osallistuvan yksikön synnyttämää arvoa. Tässä työssä yksikkö tulee ymmärtää tuotantolaitoksiksi, jotka osallistuvat tuotteen valmistamiseen. Arvonlisäys laskettiin määritelmänsä mukaisesti vähentämällä yksikön tuotoksesta tuotannossa käytetyt välituotteet (tavarat ja palvelut). Laskennan kannalta keskeistä oli siis määrittellä sekä tuotos, eli tuotteen hinta kertaa tuotannon määrä, että välituotekustannukset. Koska tarkastelu kohdistui uusiin tuotteisiin ja tulevaisuuden markkinatilanteeseen, ei tuotteiden hintoja, tuotannon määriä tai välituotekäyttöjä voitu arvioida tilastojen perusteella, vaan ne perustettiin arvioihin tulevaisuuden markkinoista ja tuotantoteknologioista. On siis selvää, että laskelmat perustuvat kirjallisuuden ja asiantuntija-arvioiden perusteella tehtyyn ennakkointiin. Raportoidut luvut tulee siis ymmärtää suuntaa antaviksi suuruusluokka-arvioiksi.

Laskelman lähtökohtana oli Luonnonvarakeskuksen keskustelunaloite (Lintunen ym. 2023), jossa tarkasteltiin Biotalousstrategiassa asetettua arvonlisäyksen kaksinkertaistamistavoitetta. Tässä työssä on seurattu osittain samoja oletuksia, mutta täydennetty metsäteollisuuden tuotepalettia laajemmalla joukolla uusia tuotteita. Keskeisenä oletuksena on, että metsäteollisuuden puunkäyttö pysyy vuoden 2019 tasolla. Arvonlisän kasvattaminen ei siis perustu kasvaneeseen puunkäyttöön. Puunkäyttö myös jakaantuu kuiduttavan ja mekaanisen metsäteollisuuden kesken samoin kuin vuonna 2019. Lisäksi useiden tuotteet kuten massat, paperi, sahatavara, hemiselluloosa ja teollisuuden haarojen muiden mallinnuksen ulkopuolisten tuotteiden tuotannot ja siten arvonlisät pysyvät samalla tasolla kuin aiemmassa keskustelunaloitteessa. Myös metsätalous ja puunkorjuu -toimialan arvonlisän oletettiin kehittyvän samoin (4,5 mrd. €). Energiatuotteiden arvonlisäyksen tarkastelu rajattiin pois tästä työstä.

Tässä työssä uusia piirteitä ovat kehittyneisiin erikoisselluihin perustuvat tuoteryhmät, ligniinin lukuisat jalosteet, kehittyneiden kartonkien perustaminen erikoissellukomponenttiin, CLT:n osalta tarkastelun päivittäminen ja puukuitueristeen mukaanotto tarkasteluun. Laajempi tuotepaletti mahdollisti aiempaan keskustelunaloitteeseen verrattuna maltillisemmän Suomessa tehtävän vientisellun jatkojalostuksen (1 milj. t vs. yli 3 milj. t) ja tekstiilikuitujen pienemmän roolin arvonlisän kasvattamisessa.

Tuotannon määrien arvioinnissa käytettiin sekä raaka-ainepotentiaaliin perustuvaa rajoitetta, mutta myös asiantuntija-arvioihin ja kirjallisuuteen perustuvia arvioita markkinoiden suuruudesta. Tuotantomäärien kanssa yhdenaikaisesti arvioitiin myös tuotteiden hintatasoja. Esimerkiksi mikro- ja nanosellun osalta oletettiin teknisen kehityksen mahdollistavan suhteellisen maltilliset hintatasot, minkä vuoksi oli perustellumpaa olettaa tuotteiden markkinoiden koot suhteellisen isoiksi. Koska tulevaisuuden hinta-arvioita ei juuri ollut tarjolla, arvioitiin tuotteiden hintoja tuotantokustannusten ja kateprosenttien perusteella. Tuotantokustannukset määräytyvät tuotantoteknologian ja panoshintojen perusteella. Koska esimerkiksi erikoissellut ovat arvoketjussa seuraavan tuotteen välituotteita, erikoissellujen hintataso ei vaikuta sektorin arvonlisän kokonaistasoon, koska niihin liittyvät tuotokset kumoutuvat pois arvoketjun seuraavan tason kustannuksina. Siten tarkastelun kokonaisarvonlisäys riippuu erityisesti arvoketjun viimeisten tuotteiden hinta-arvioista.

Tuotantoteknologiatietaa tarvittiin edellä kuvatun hinta-arvion muodostamisessa, mutta myös välituotekustannusten arvioinnista. Teknologiakuvaus oli käytettävissä riittävällä tarkkuudella vain osalle tuotteista ja osalle tuotteista oli tyydyttävä kirjallisuudesta saataviin tuotantokustannusarvioihin. Jotta tuotantokustannuksista päästiin välituotekustannuksiin, piti tuotantokustannustiedoista eritellä pääomakustannukset sekä arvioida työvoimakustannusten osuutta. Jos työvoimakustannuksista ei ollut saatavilla tarkempaa tietoa, arvioitiin niitä kansantalouden vuositilinpidon toimialakohtaisista tilastoista, tuotannoltaan vastaavanlaisten toimialojen työvoimakustannusosuuden perusteella.



METSÄBIOTALOUDEN
TIEDEPANEELI

METSÄBIOTALOUDEN TIEDEPANEELI

www.metsatiedepaneeli.fi