

LAPPEENRANNAN–LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Kandidaatintyö

**Ligniini kemiallisessa metsäteollisuudessa ilmastonmuutoksen
näkökulmasta**

**Lignin in the chemical forest industry in a climate change
perspective**

Työn tarkastaja: Professori, TkT Risto Soukka
Työn ohjaaja: Laboratorioinsinööri, TkL Simo Hammo

Lappeenrannassa 28.5.2020

Carl Freyberg

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Carl Freyberg

Ligniini kemiallisessa metsäteollisuudessa ilmastonmuutoksen näkökulmasta

Kandidaatintyö

2020

30 sivua, 11 kuvaa ja 1 liite

Työn tarkastaja: Professori, TkT Risto Soukka

Työn ohjaaja: Laboratorioinsinööri, TkL Simo Hammo

Hakusanat: ligniini, sellutehdas, lignoboost, uusiutuvat raaka-aineet, komposiitti, eriste

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, kuinka kemiallisen metsäteollisuuden sivuvirran ligniinin ominaisuuksia voitaisiin hyödyntää. Ligniiniä käytetään pääsääntöisesti metsäteollisuuden polttoaineena, mutta uusien innovaatioiden avulla sitä voidaan hyödyntää monissa sovelluksissa. Työssä pohditaan ligniinin hyödyntämistä raaka-aineena ilmastonmuutoksen näkökulmasta.

Työ toteutetaan kirjallisuustyönä hyödyntäen tieteellisiä julkaisuja, internet-sivuja, lehtiartikkeleita ja alan kirjallisuutta. Kirjallisuuskatsauksessa selvitetään metsäteollisuuden historiaa ja ilmastopolitiikan kehittymistä. Lisäksi perehdytään sellun valmistukseen ja ligniinin ominaisuuksiin. Työssä selvitetään XPS- ja EPS-eristeiden valmistusmenetelmiä ja ligniinin hyödyntämistä komposiittieristeen valmistamisessa. Ympäristövaikutuslaskelmassa tutkitaan perinteisen öljypohjaisen eristeen ja komposiittieristeen ilmastovaikutusta.

Kemiallinen metsäteollisuus voi kehittyä ratkaisijaksi bio- ja kiertotaloudessa. Kehitteillä on menetelmiä, joilla sivuvirtoja voidaan hyödyntää. Öljypohjaiset tuotteet ovat tulevaisuudessa mahdollista korvata uusiutuvista raaka-aineista valmistetuilla tuotteilla. Puuperäiset raaka-aineet ovat hiilineutraaleja ja tämä tukee EU:n ilmastostrategiaa.

Ligniinillä on potentiaalia toimia osatekijänä ilmastonmuutosta vastaan. Kehitteillä olevat ligniinisovellukset mahdollistavat osittain tai kokonaan fossiilisten raaka-aineiden korvaamisen. Ligniiniä sisältävä komposiittieriste vähentää hiilijalanjälkeä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
LUT School of Energy Systems
Degree Programme in Environmental Technology

Carl Freyberg

Lignin in the chemical forest industry in a climate change perspective

Bachelor's thesis

2020

30 pages, 11 pictures and 1 appendice

Examiner: Professor, TkT Risto Soukka

Instructor: Laboratory engineer, TkL Simo Hammo

Keywords: lignin, pulp mill, lignoboost, renewable raw materials, composite, insulation

The goal of this Bachelor's thesis is to figure out how the properties of lignin in the side-stream of the chemical forest industry could be utilized. Lignin is mainly used as a fuel for the forest industry, but with new innovations, it can be utilized in many applications. The thesis also considers the use of lignin in applications from the perspective of climate change.

The thesis is carried out as literary review, utilizing scientific publications, websites, journal articles and literature in the field. The literature review examines the history of the forest industry and the development of climate policy. In addition, the production of pulp and the properties of lignin are studied. The thesis investigates the production methods of XPS and EPS insulators and the utilization of lignin in the production of composite insulation. The environmental impact calculation examines the climate impact of traditional oil-based insulation and composite insulation.

The chemical forest industry can develop into a solution in the bio and circular economy. Methods are being developed to exploit side streams. In the future, it will be possible to replace oil-based products with products made from renewable raw materials. Wood-based raw materials are carbon neutral and this supports the EU's climate strategy.

Lignin has the potential to act as a factor in combating climate change. Lignin applications under development allow for the partial or complete replacement of fossil raw materials. Lignin-containing composite insulation reduces the carbon footprint.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	5
1 JOHDANTO	6
1.1 Taustaa	7
1.2 Työn tavoitteet	10
1.3 Tutkimusmenetelmä, rajaukset ja rakenne	10
2 KEMIALLISEN SELLUN VALMISTUS	12
2.1 Sulfaattisellun valmistus	12
2.1.1 Puun käsittely	13
2.1.2 Keittoprosessi	13
2.1.3 Pesu ja lajittelu	14
2.1.4 Happidelignifiointi ja valkaisu	14
2.2 Mustalipeän käsittely	14
2.3 Ligniini	15
2.3.1 Ligniinin erottaminen	17
3 HYÖDYNTÄMINEN	19
3.1 Energia	19
3.2 Eriste	20
3.2.1 EPS- ja XPS-eristeiden valmistus	20
3.2.2 Ligniinikomposiittieriste	22
4 YMPÄRISTÖVAIKUTUSLASKELMA	25
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	28
6 YHTEENVETO	30
LÄHTEET	31

LIITTEET

Liite 1. Ligniinikomposiittieristeen vaikutus ilmastonmuutokseen

SYMBOLILUETTELO

m	massa	[kg]
V	tilavuus	[m ³]

Alaindeksit

a	annus suom. vuosi
c	komposiitti
f	fossiilinen
PS	polystyreeni
scen	skenaario

Lyhenteet

adt	air dry ton, tonni 90-prosenttisesti kuivaa sellua
CO ₂	hiilidioksidi
ekv	ekvivalentti
EPS	Expanded PolyStyrene suom. paisutettu polystyreeni
EU	Euroopan Unioni
kg	kilogramma
milj	miljoonaa
t	tonni
pH	potenz H ⁺ suom. vedyn happamuus eli happamuuden yksikkö
XPS	Extruded Polystyrene insulation suom. suulakepuristettu polystyreeni
vrk	vuorokausi

1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos on puhuttanut suurta yleisöä jo vuosikymmenen ajan. Tutkijat ovat varoitaneet kestävämmästä tilanteesta jo pidemmän aikaa. Väestönkasvu ja kaupungistuminen ohjaavat kulutusvalintoja ja vaikuttavat, miten ja mitä resursseja käytämme. (Ripple et al. 2020, 8–9). Metsäteollisuudella voi olla tulevaisuudessa suuri rooli bio- ja kiertotaloudessa. Fossiilisten raaka-aineisiin perustuvat tuotteet ovat mahdollista tulevaisuudessa korvata kokonaan tai osittain puupohjaisilla tuotteilla. (MMM 2020.)

Puuperäinen raaka-aine luokitellaan hiilineutraaliksi. Kemiallinen metsäteollisuus toimii nykypäivänä muuten hiilineutraalisti lukuun ottamatta energialähteenä käytettäviä fossiilisia polttoaineita. Toisaalta nykyaikainen sellutehdas voi olla täysin hiilineutraali, kun hyödynnetään tehtaan sivuvirtoja polttoaineen valmistamiseen. Fossiiliset polttoaineet kuten maakaasu ja polttoöljy voidaan korvata esimerkiksi puuta kaasuttamalla tai erottamalla mustalipeästä ligniiniä. (Hammo, puhelinhaastattelu 23.4.2020.)

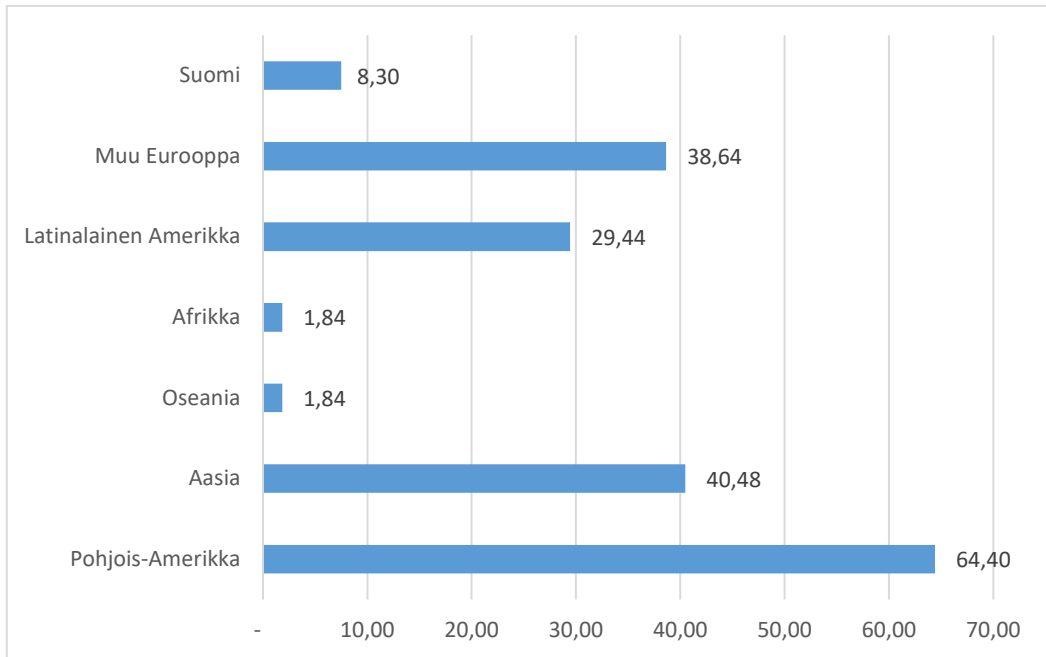
Sellun tuotannon ja sen sivuvirtojen sovelluksista on ollut paljon keskustelua julkisuudessa, mutta sellunkeiton sivutuotteen ligniinin huomio on jäänyt vähemmälle muussa kuin energian tuotannossa. Sellutehtaiden ympärille kehittyi koko ajan lisää erilaisia ratkaisuja sivuvirtojen hyödyntämiseen ja päästöjen vähentämiseen. Maailmalla on tarvetta fossiilisesta öljystä vapaille ympäristöystävällisille materiaaleille. Tähän voi olla ratkaisuna erilaiset materiaalit, jotka ovat valmistettu ligniinistä.

Metsäteollisuus on tällä hetkellä murroksen vaiheessa. Maailmalla metsäteollisuustuotteidemme kasvava kysyntä on lisännyt sellun ja kartongin tuotantoa. Paperin valmistus on vähentynyt 14 vuoden aikana 50 prosentilla. (Metsäteollisuus 2020a.) Perinteisten tuotteiden tilalle on etsittävä uusia markkina-alueita niin taloudellisten kuin ilmastonvaikutusten kannalta. Biopolttoainetuotanto ei välttämättä ole ainut ratkaisu. Ligniini voi olla erinomainen vaihtoehto öljypohjaisten materiaalien korvaajaksi. Tässä työssä keskitytään ligniinin hyödyntämiseen rakennusten eristeiden valmistamisessa.

1.1 Taustaa

Metsäteollisuuden historia vie 1600-luvulle, jolloin Suomen ensimmäinen tärkeä vientituote oli terva. Länsi-Euroopassa 1700-luvulla kasvaville kaupungeille, kaivoksille ja telakoille Suomen vesisahojen tuottamat lankut ja laudat tarjosivat rakennus- ja raaka-aineita. Varsinaisen läpimurto metsäteollisuudelle 1800-luvun puolivälissä tuli sahateollisuuden kehittyessä ja vei Suomen uuden kehityksen tielle. Metsien jalostaminen sahatavaraksi ja paperituotteiksi alkoi 1800-luvun lopulla. 1900-luvun alussa suomalaista taloudellista hyvinvointia rakennettiin saha- ja paperiteollisuuden muodostaman kokonaisuuden avulla. Käännekohdaksi voidaan pitää 1900-luvun puoliväliä, kun sotakorvausten kiihdyttämä metalliteollisuus alkoi valmistaa paperikoneita. Tämä loi Suomeen poikkeuksellisen metsäklusterin tuomaan nykypäiväänkin ulottuvaa aineellista hyvinvointia. (Metsäteollisuus 2007.) Suomi on erittäin riippuvainen metsäteollisuuden toimintaan tukeutuva valtio. 1980-luvun alussa suurien investointien ja tuotannon uudestaan suuntautumisen johdosta käynnistyi voimakas muutosprosessi. Tämän johdosta maahamme syntyi maailman suurimpia metsäteollisuusyrityksiä. (Luke 2012.)

Metsäteollisuuden merkitys kansantaloudessa on tärkeä. Vuonna 2017 metsäteollisuuden tuotannon arvo oli 22,3 mrd. euroa. Metsäteollisuus tuottaa Suomessa sellua noin 8,3 milj. tonnia vuodessa. (Metsäteollisuus 2019.) Kuvassa 1 on esitetty maailman sellutuotantoa alueittain. Sellun tuotanto voisi tarjota paljon mahdollisuuksia bio- ja kiertotaloudelle. Pohjois-Amerikka ja Aasia ovat suuria luonnonvaroja kuluttavia alueita. Kehittämällä sellun tuotantoa ja sivuvirtojen hyödyntämistä voitaisiin alueellisesti vähentää ilmastonmuutosvaikutusta tuottamalla kestäviä raaka-aineita.



Kuva 1. Vuoden 2017 sellun kokonaistuotanto maailmassa oli 175 miljoonaa tonnia. (Metsäteollisuus 2020b ja SIS 2019)

1900-luvun jälkimmäisellä puoliskolla kansainvälinen yhteisö YK:n johdolla huolestui ilmaston heikentyneestä tilasta. Rio de Janeirossa järjestettiin YK:n ympäristö- ja kehityskonferenssi, missä kestävän kehityksen turvaamista ja luonnonvarojen riittämistä tuleville sukupolville. (UN 1992.)

Vuonna 1997 Kioton ilmastokokouksessa saatiin aikaan ilmastopolitiikkaan keskeinen sopimus. Sopimusta kritisoitiin päästömääräyksiensä toteuttamisesta eri maille, koska päästötasoksi määritettiin 1990-luvun taso. Näin ollen Intialle, Brasilialle ja Kiinalle ei tullut velvoitteita, vaikka niiden päästöt olivat kasvaneet tuntuvasti. (Globalis 2005.)

Joulun alla vuonna 2015 pidettiin Pariisin ilmastokokous. Siellä saatiin aikaan uusi ilmastopopimus, jonka tavoitteena on rajoittaa ilmaston lämpeneminen 1,5 asteeseen. Sopimuksen tavoitteena oli pysäyttää ilmastomuutos. (UN 2015.) Pariisin sopimus tulivoimaan 4. marraskuuta 2016, kun sopimuksen oli ratifioinut 55 maata, joiden osuus maailman kasvihuonepäästöistä on vähintään 55 % (EU 2019.) Vuonna 2017 Yhdysvaltain presidentti Donald Trump ilmoitti maansa vetäytyvän Pariisin ilmastopopimuksesta taloudellisista syistä ja vetäytyminen virallistettiin vuoden 2019 marraskuussa (Dennis, 2019.)

2000-luvulla EU on velvoittanut ja kannustanut jäsenvaltioitaan yhä kunnianhimoisempaan ilmastopoliittikkaan. Tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 40 prosentilla vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 1990 tasoon. Vuonna 2018 Euroopan komissio julkaisi pitkän aikavälin strategian hiilineutraaliuden saavuttamiseksi EU:ssa vuoteen 2050 mennessä. Tavoitteena on siis, että EU:n alue olisi täysin hiilineutraali, eli hiilidioksidipäästöt olisivat korkeintaan samaa tasoa kuin hiilinielujen kapasiteetti. Hiilineutraaliutta voidaan tavoitella esim. päästöjen kompensoimisella. Investoimalla uusiin puhtaisiin vähähiilisiin teknologioihin, energiatehokkuuteen, uusiutuviin energialähteisiin voidaan näin kompensointia toteuttaa. (EU 2019.)

Suomen valtio on asettanut tavoitteeksi 100-prosenttisen hiilivapaan energian käytön vuoteen 2045. Suomi pyrkii tavoitteisiinsa korostaen maan uusiutuvien metsien hyödyntämistä energian ja biopolttoaineiden lähteenä. (Peisa, 2017.)

Suurin osa kasvihuonekaasuista muodostuu prosesseista, joissa tuotetaan energiaa. Muita päästöjen tuottajia ovat maankäyttöön liittyvät prosessit, metsä- ja maatalous. Kuvassa 2 esitetään EU:n 28 jäsenvaltion päästöjen jakautumista toimialoittain. Energian osuus sisältää energiantuotannon muodonmuutoksen (sähkön tuotanto) ja joukon teollista toimintaa. (European Commission Eurostat 2019.)



Kuva 2. Kuvassa kasvihuonepäästöjen jakautuminen EU:n alueella toimialoittain vuonna 2017 (European Commission Eurostat).

1.2 Työn tavoitteet

Tässä työssä tutkitaan puun ligniinin hyödyntämistä ilmastonmuutoksen näkökulmasta. Työn tavoitteena on selvittää, millainen rooli ligniinillä voisi olla erilaisissa tuotteissa. Ligniinillä tässä työssä tarkoitetaan vain kemiallisen sellutehtaan prosessissa erotettavaa ligniiniä. Tämän kandidaatin työn tutkimuskysymys on seuraava:

Miten ligniiniä voitaisiin hyödyntää muutoin kuin energiantuotannossa?

Työssä etsitään vastauksia alakysymyksiin, joilla pyritään vastaamaan tutkimusongelman tarkentaviin kysymyksiin. Alakysymykset kuuluvat seuraavasti:

- Miten ligniiniä voitaisiin hyödyntää eristeiden valmistuksessa?
- Minkälaisia vaikutuksia ilmastonmuutoksen näkökulmasta öljystä valmistetun tuotteen korvaamisella olisi?

Alakysymyksillä pyritään tarkastelemaan tutkimusongelmaa yksityiskohtaisemmin ja samalla selvittämään ligniinin hyödyntämismahdollisuuksia ilmastonmuutoksen näkökulmasta.

1.3 Tutkimusmenetelmä, rajaukset ja rakenne

Tämä työ on tehty Lappeenrannan teknilliselle yliopistolle osana kurssia BH60A4001 Ympäristötekniikan kandidaatintyö. Kandidaatintyö tehdään kirjallisuustyönä. Työssä hyödynnetään erilaisia tieteellisiä julkaisuja, internet-sivuja, lehtiartikkeleita ja alan kirjallisuutta. Työssä on hyödynnetty mahdollisimman uusia julkaisuja tämän tutkimuksen alalta.

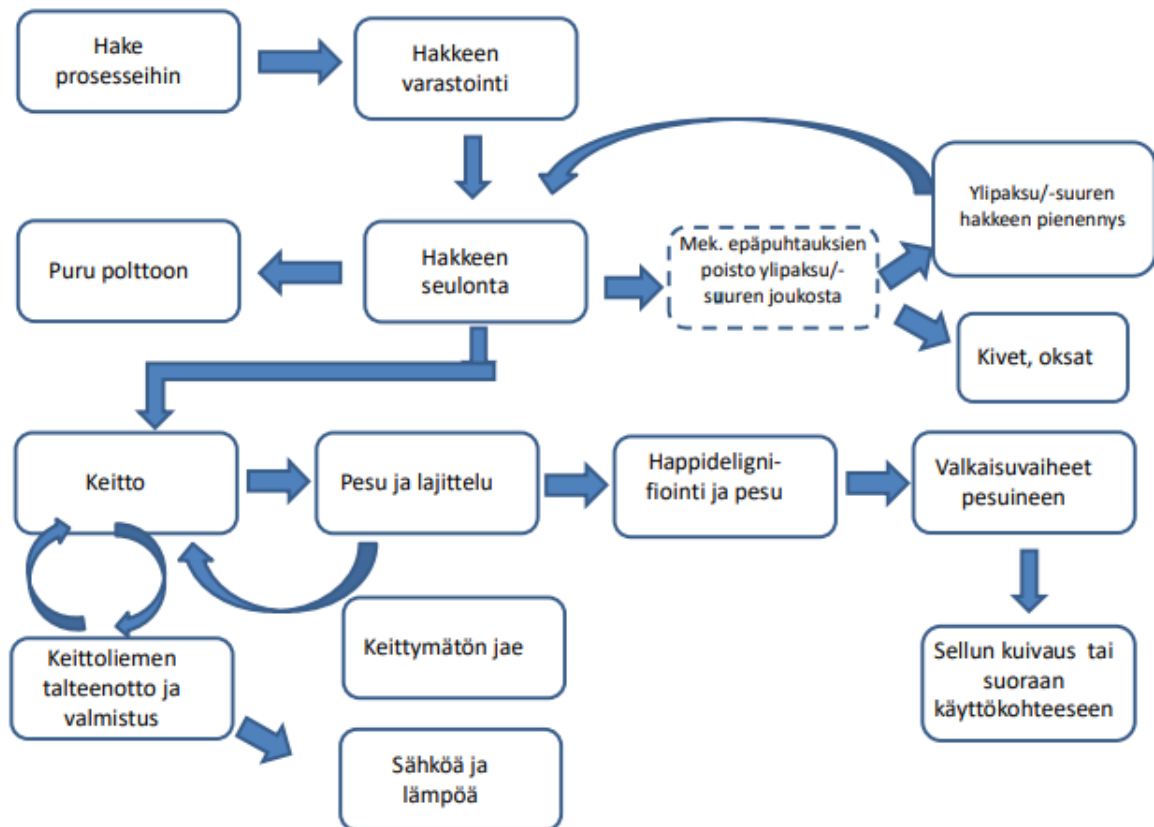
Teollisuuden nopean kehityksen takia lähteiksi on valittu mahdollisimman uusia julkaisuja, mutta perustiedoissa käytetään vanhempiakin julkaisuja. Kandidaatintyö perustuu lähdemateriaalien tutkintaan ja niiden analysoimiseen.

Aihepiiri on rajattu käsittelemään kemiallista metsäteollisuutta. Työn tutkimuksen kohteeksi on valittu kemiallisen sellun valmistuksessa erotettava ligniini. Työssä ei oteta kantaa tuotteiden taloudellisiin vaikutuksiin. Tarkastelun kohteeksi on valittu ligniinistä valmistettava komposiittieriste ilmastonmuutoksen näkökulmasta. Työ rajataan ympäristövaikutuslaskelmissa kasvihuonekaasupäästöjen yhteenlaskettuun ilmastoa lämmittävään vaikutukseen ja verrataan päästöjä CO₂ ekvivalenteina. Työssä on tehty oletuksia päästöjen suhteen, koska uuden ja kehittyvän alan tutkimuksista ei ole tietoja niiden osalta vielä saatavilla.

Toisessa luvussa käsitellään lyhyesti kemiallisen sellun valmistusta ja siihen liittyvää lipeälinjakokonaisuutta. Toisessa luvussa esitellään myös ligniinin ominaisuuksia ja sen erottamista puusta. Kolmannessa luvussa käsitellään erilaisia tapoja hyödyntää ligniiniä ja perehdytään myös erotetun ligniinin käyttämistä energianlähteenä. Neljännessä luvussa suoritetaan lähdemateriaalin avulla laskelmia ilmastonvaikutuksen kannalta. Kaksi viimeistä lukuä käsittävät johtopäätökset ja yhteenvedon.

2 KEMIALLISEN SELLUN VALMISTUS

Sellun valmistaminen Suomessa perustuu sulfaattimenetelmään ja myös valtaosa maailmassa tehdystä sellusta perustuu myös tähän menetelmään (SMY 2020.) Kuvassa 3 on esitetty sulfaattisellutehtaan prosessikaavio.



Kuva 3. Perinteisen sulfaattisellutehtaan prosessikaavio

2.1 Sulfaattisellun valmistus

Sulfaattisellun valmistus perustuu puuhakkeen keittämiseen valkolipeän kanssa korkeassa lämpötilassa. Sulfaattisellua käytetään pääsääntöisesti paperin valmistukseen. Sulfaattimenetelmä on saanut nimensä prosessissa käytettävän kemikaalin natriumsulfaatin mukaan. (Gustafsson Jan et al. 2011, 203.)

2.1.1 Puun käsittely

Valmistusprosessi alkaa puun vastaanottamisesta. Raaka-aine tuodaan tehtaalle junalla, kuorma-autolla, uittamalla tai laivalla. Prosessissa pyritään käyttämään puu mahdollisimman tuoreena ja pitää raaka-ainereservit pienenä. Sellupuunkuorimolla puu kuoritaan kuorimarummussa ja kuoriminen tehdään mahdollisimman tarkasti välttämällä kuoren pääsemistä sellu hakkeen joukkoon. Kuori madaltaa sellumassan vaaleutta, jos sitä pääsee prosessiin. Kuorimarummun jälkeen on hakkuri, jossa puu haketetaan. Puun hakettamisen laatu on myös tärkeää sellumassan laadun kannalta ja tämän jälkeen hake siirretään seulottavaksi. (Willför et al. 2011, 92,94,96 ja 130.)

2.1.2 Keittoprosessi

Seulomosta hake siirretään hihnakuuljettimilla sellun keittämölle. Keittoprosessin tarkoituksena on erottaa ligniinin sitomat puukuidut toisistaan. Sellun keitossa käytetään valkolipeää eli natriumhydroksidia (NaOH) ja natriumsulfidin (Na₂S) seosta. Ligniinin liuottamiseen käytetään natriumhydroksidia ja natriumsulfidin tehtävä on nopeuttaa keittoreaktiota ja vähentää selluloosan liukenemistä. Keittoprosessiin syötetään siis haketta ja valkolipeää. Keiton tuloksena saadaan sellua, laihamustalipeää ja valkolipeä kierrätetään uudelleen keittoon. Sulfaattikeittomenetelmiä on kahta erilaista, erä- ja vuokeitto. Eräkeitto koostuu useista erillisistä vaiheista. Vuokeitossa haketta ja keittokemikaaleja syötetään keittimen yläpäähän ja massaa poistetaan keittimen alapäästä. Keitin on jaettu vyöhykkeisiin, jossa keiton eri vaiheet tapahtuvat. Keiton vaiheita ovat hakkeen syöttö, imeytysvaihe, keittovaihe, pesuvaihe ja massan poisto. (KnowPulp 2011a.)

Kappaluvulla kuvataan kuidussa jäljellä olevan jäännösligniininipitoisuutta. Sellun keitossa tavoitteena on poistaa ligniini, mutta ligniinin tehokas poistaminen voi johtaa myös selluloosan liukenemiseen. Keittoprosessin ajomalli pyritään optimoimaan, siten että selluloosaa ei liukene liikaa ja massanvalkaisukemikaaleja käytetään mahdollisimman vähän. Valkaistavalle massalle ominainen kappaluku on 14-20 lehtipuilla ja 25-30 havupuilla. (KnowPulp 2011b.)

2.1.3 Pesu ja lajittelu

Sellumassa pestään keittämisen jälkeen ja laihamustalipeä siirretään haihduttamolle. Pesun tehtävänä on puhdistaa massan jatkokäsittelyä varten. Pesun avulla ruskehtavasta massasta voidaan erotella keittokemikaalit uudelleen käyttöä varten ja puuaines (ligniini) hyödynnetään soodakattilassa energiantuotannossa. Pesun yhteydessä on pyrkimys käyttää mahdollisimman vähän vettä, jotta mustalipeän haihduttaminen olisi tehokasta. Massan pesu myös vähentää valkaisukemikaalien käyttöä, helpottaa massan käsittelyä, estää massan lujisuuden heikkenemistä happidelignifioinnissa. (Tervola et al. 2011, 384.)

Epäpuhtauksien erottamista massasta kutsutaan lajitteluksi. Massa sisältää keiton jälkeen erilaisia epäpuhtauksia, esimerkiksi oksia ja tikkuja. Nämä pyritään erottamaan massasta ennen valkaisua. (KnowPulp 2011c.)

2.1.4 Happidelignifointi ja valkaisu

Happidelignifioinnin tarkoitus on poistaa massasta jäännösligniiniä eli laskea kappalukua. Kemikaalina käytetään happikaasua. Happidelignifointi on hellävaraisempi tapa laskea kappalukua, kuin vastaavaan kappalukuun keittäminen. Happidelignifioinnilla on suuri merkitys tehtaan päästöihin, sillä matalampi kappaluku vähentää valkaisukemikaalien tarvetta ja ympäristölle haitallisia yhdistettä jätevesissä. (Chirat et al. 2011, 552.)

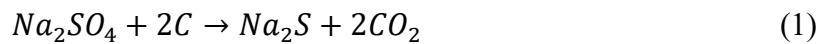
Sellun valkaisun tarkoituksena on puhdistaa, ja vaalentaa massaa jäännösligniiniä poistamalla. Tavoitevaaleus saavutetaan tarvittavan lujisuuden puitteissa ja näin ollen valkaisu suoritetaan useassa vaiheessa. Jokaisen vaiheen välissä on massapesu, jolloin liuennut ligniini poistuu. (Chirat et al. 2011, 460, 462.)

2.2 Mustalipeän käsittely

Sellun valmistuksen pesuvaiheessa massasta erotetaan ja otetaan talteen ligniiniä sisältävää laihaa mustalipeää kuiva-ainepitoisuudeltaan noin 15-16 prosenttista. Pesurilta laihamustalipeä siirretään talteenoton haihduttamolle ja sitä vahvistetaan vahvalla mustalipeällä noin

20 % kuiva-ainepitoisuuteen. Haihduttamon tarkoitus on höyryn avulla nostaa kuiva-ainepitoisuus noin 80 % tuntumaan, jolloin mustalipeää kutsutaan vahvalipeäksi. Haihduttamot ovat 5-8 vaiheisia ja loppu vaiheessa saattaa olla useampi yksikkö vaihetta kohden. Haihduttamon yksiköt ovat numeroitu päinvastaisessa järjestyksessä eli laihamustalipeä saapuu vaiheeseen 5-7 ja polttolipeä poistuu vaiheesta 1. Haihduttamon tehtävänä on ottaa talteen myös muut keitossa syntyvät sivutuotteet kuten suopa, tärpätti ja metanoli. (KnowPulp 2011d.) Suovasta tehdään nykyään mäntyöljyä, tärpätti ja metanoli poltetaan.

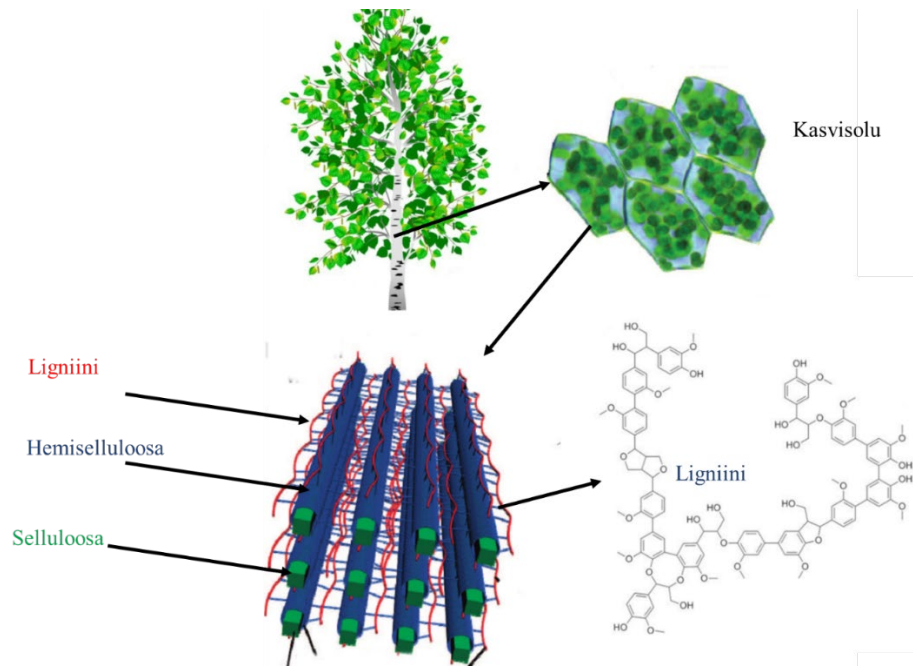
Mustalipeä poltetaan soodakattilassa ja siitä palaa orgaaninen puuaines. Soodakattilan tehtävänä on mustalipeän sisältämän keittokemikaalien talteenotto, regenerointi ja lämmön talteenotto. Soodakattilan alaosassa on ali-ilmamäärä, jolloin se toimii pelkistävänä. Näin mustalipeän sisältämä natriumsulfaatti Na_2SO_4 pelkistyy natriumsulfidiksi Na_2S reaktioyhtälön 1 mukaisesti. (KnowPulp 2011e.)



Palamaton kemikaalisula johdetaan sularännejä pitkin liuottajaan. Sula liuotetaan veteen tai laihavalkolipeään ja se muuttuu viherlipeäksi. (KnowPulp 2011e.)

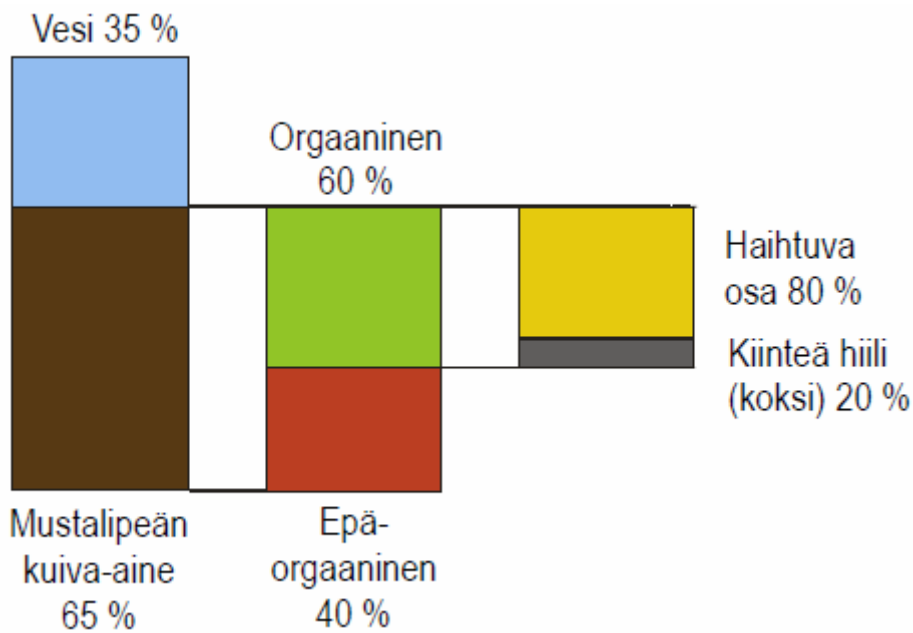
2.3 Ligniini

Tärkeimmät rakennusaineet puussa ovat selluloosa, hemiselluloosat ja ligniini. Ligniiniä esiintyy pääsääntöisesti kasvisolun sisemmässä soluseinässä. Ryhmälle heterogeenisiä aromaattisia polymeerejä käytetään yhteistä nimitystä ligniini. Ligniinipitoisuus havupuilla on 24–33 % ja lehtipuilla 16–25 %. Ligniini tehtävät ovat luoda puulle mekaaninen lujuus ja sitoa puun selluloosakuidut toisiinsa, kuten kuvassa 4 on esitetty. Muiden kasvien ligniinipitoisuudet ovat pääpiirteisesti pienempiä. Vehnässä ligniinin osuus on noin 15–20 massaprosenttia. (McKendry 2002, 39, 42.) Ligniinin tehtävänä on myös suojata kasvisoluja mikrobeilta. Ligniinin koostumus on pääosin hiiltä ja vetyä. (Vanholme et al. 2010, 895.)



Kuva 4. Puun rakennusaineet, ligniinin sijainti kasvisolussa ja sen rakenne.

Kuvassa 5 on esitelty ligniniä sisältävän mustalipeän ainesosat. Orgaaninen osuus kuvaa ligniinin osuutta mustalipeässä. (Alakangas 2000, 78.)



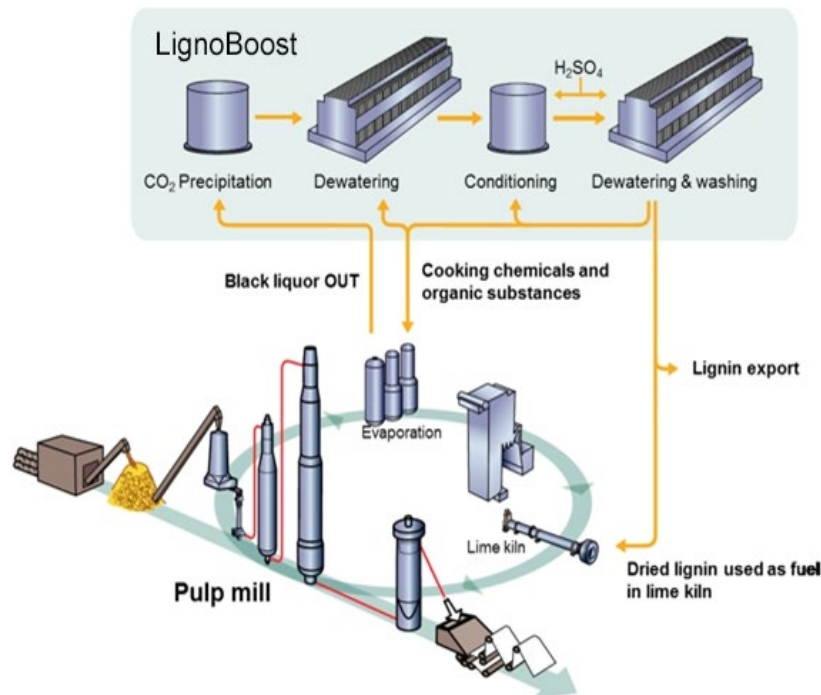
Kuva 5. Mustalipeän pääainesosat. (Alakangas 2000, 79).

Ligniini on maailman suurin luonnon raaka-ainevaranto massaan nähden heti toisena selluloosan jälkeen. Pääsääntöisesti mustalipeän sisältämä ligniini poltetaan nykypäivänä soodakattilassa. (Gosselink et. all. 2004, 121–122.)

2.3.1 Ligniinin erottaminen

Ligniinin käyttöä muuhun, kuin energian lähteenä tutkitaan ympäri maailmaa. Ligniinin erottamiseen mustalipeästä on kehitetty eri menetelmiä, mutta tässä työssä keskitytään kaupallistettuun LignoBoost-menetelmään. Menetelmä on alun perin kehitetty sellutehtaan tehokkuuden parantamiseksi. Polttoon menevän mustalipeän lämpöarvo laskee ligniiniä erottamalla. Näin mahdollista nostaa, joskus pullonkaulana olevan soodakattilan käyttökapasiteettiä ja samalla nostaa sellutehtaan tuotantokapasiteettiä. (Wallmo 2009, 13.)

Ligniini voidaan erottaa mustalipeästä Lignoboost:in avulla kuvan 6 mukaisesti. Sellutehtaan haihduttamolta LignoBoost-laitokseen ohjataan 30–45 % kuiva-ainepitoisuudeltaan olevaa mustalipeää välisäiliöön. Jotta ligniinin saostuminen saadaan aloitettua, syötetään mustalipeän joukkoon hiilidioksidia pH:n alentamiseksi. (Valmet 2020.)



Kuva 6. Ligniinin erotus Lignoboost-laitteistolla prosessikaaviona esitettynä. (Valmet 2020.)

Mustalipeä ohjataan ensimmäisen puristinosan läpi tasaussäiliöön ja siihen lisätään rikkihappoa pH:n alentamiseksi. Rikkihapon lisäämisen tarkoitus on myös muokata ligniinin liukoisuusominaisuuksia ja poistaa epäpuhtauksia. Saostunut ja happokäsitelty ligniiniliete siirtyy toiseen puristusvaiheeseen. Toisessa puristusvaiheessa ligniini pestään ja kuivataan hapettomassa tilassa. Kuivattu ligniini voidaan siirtää energialähteeksi meesauunille tai pakattavaksi kaupallisiin tarkoituksiin. (Hamaguchi 2012, 2302.)

Sellutehtaassa missä tuotetaan noin 650 000 adt. kg sellua voidaan mustalipeästä erottaa 10 % ligniiniä ja tämä mahdollistaa vuosittain 33 000 t.kg ligniinin tuotannon (Per Tomani 2013.) Näin ollen voidaan laskea, että keskimäärin 1 000 adt/kg tuotettua sellua kohden voidaan tuottaa noin 50 kg ligniiniä.

3 HYÖDYNTÄMINEN

Nykyaikaisen sellutehtaan energiaylijäämää voidaan hyödyntää ligniinin erottamisella mustalipeästä. Tämä mahdollistaa sellutehtaalte mahdollisuuden kehittää uusia taloudellisia tuloja, kun ligniini saadaan tuotteistettua tai sitä käytetään tuotantokustannuksien vähentämiseksi esim. energialähteenä. (Tomani 2009, 44.)

Ligniinin soveltumista liimakäyttöön on tutkittu useissa tutkimuksissa. Nykyään vanerin, kova- ja lastulevyjen sekä laminaattien valmistukseen käytetään fenoliformaldehydihartsin pohjaisia liimoja. (Aalto 2018.) VTT on kehittänyt uuden teknologian CatLignin, jolla voitaisiin tuottaa vaihtoehdon myrkyllisille fenoleille. Ligniinin hiilijalanjälki on vain 20 % verrattuna fenoleihin. Esimerkiksi vanerin hiilijalanjäljestä puolet tulee hartsin käytöstä. Maailmassa tuotetaan kuusi miljoonaa tonnia formaldehydihartseja vuosittain. (VTT 2017.) Ligniiniä voidaan hyödyntää myös petrokemikaaleihin perustuvan hiilikuidun valmistamisessa ja asfaltissa käytettävän bitumin korvikkeena (Per Tomani 2013).

3.1 Energia

LignoBoost mahdollistaa ligniinin käytön sellutehtaan meesauunin energialähteenä ligniinijauheena. Muita tapoja on käyttää ligniiniä fossiilisia polttoaineita käyttävissä polttolaitoksissa, joissa on kloridien aiheuttamaa korroosio-ongelmaa. Kuivattua ligniiniä voidaan puristaa pelletiksi. Kuivattua ligniiniä voidaan myös sekoittaa tavallisen polttihakkeen sekaan. (Tomani 2009, 53–54 s.)

Sulfaattisellutehdas, joka tuottaa 1500 t/vrk mustalipeää voi tuottaa siitä 25–35 MW sähköä. Sellusta valmistettavien tuotteiden kysynnän lisääntyessä, lisääntyy sellun tuotanto. Selluntuotannon kasvaminen lisää myös poltettavan mustalipeän määrää. Tällöin voi tulla tilanne, että mustalipeää on liikaa suhteessa soodakattilan polttokapasiteettiin. Erotettu ligniini voidaan hyödyntää meesauunin polttoaineena. (Tran ja Vakkilainen 2012, 1–2.)

Stora Enson Sunilan tehtaalla hyödynnetään LignoBoost:lla erotettua ligniiniä meesauunin polttoaineena. Tarkoituksena on ollut korvata 70 % maakaasusta ja saada laskettua hiilidioksidipäästöjä 27 000 t.kg:lla. (Valmet 2020.)

3.2 Eriste

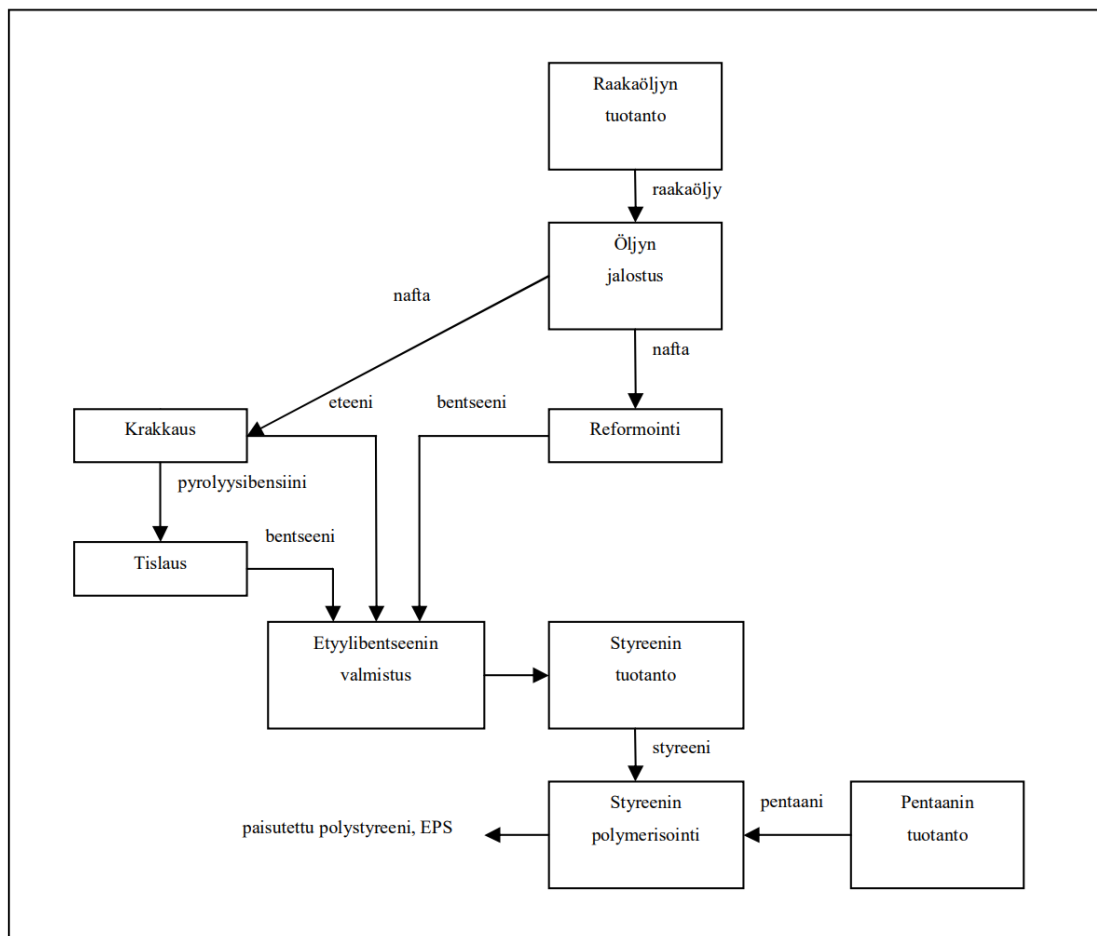
Historiallista käännekohtaa muovivaahtojen kehityksestä pidetään aikaa toisen maailmansodan jälkeen 1940- ja 1950-luvulla. Tuolloin keinotekoiset eristeet kuten muovista valmistetut vaahdot ja mineraalivillat veivät markkinat luonnon materiaaleilta. Yhdysvaltalainen Dow Chemical Company toi markkinoille ensimmäisen suulakepuristetun XPS-eristeen vuonna 1943 nimellä Styrofoam. Paisutetun polystyreenin (nykyään EPS-eriste) kaupallisti saksalainen IG Farbenindustrie AG vuonna 1950. (Bozsaky 2011, 53.)

Suomessa käytettiin fossiilisista raaka-aineista valmistettuja eristeitä 1980–2016 välisenä aikana yhteensä 16,0 milj. m³. Tämä tulos kattaa polystyreenin käytön ulkoseinissä ja yläpohjassa 1,8 milj. m³ osuudella, kun taas alapohjan eristämiseen käytettiin 14,2 milj. m³. Alapohjien eristämiseen EPS- ja XPS-eristeitä on käytetty sen hyvän puristuslujuuden ja vettyttömyyden takia. (Hämäläinen 2017, 12.)

Euroopassa käytetään vuosittain yli 1,8 milj. tonnia polystyreenituotteita. Euroopan polystyreeni valmistajat ovat esittäneet täyden toimitusketjun raaka-aineiden tuottajista valmistajiin ja kierrättäjiin. Varmistaakseen EU:n vuodelle 2030 asettamat tavoitteet kierrätettävyydelle nykyistä kierrätysaloitetta nopeutetaan ja jatketaan. Euroopassa tulee vuosittain noin 0,560 milj. tonnia kierrätettäväksi soveltuvia polystyreeni eristeitä. Näistä on arvioitu, että 0,257 milj. tonnia olisi mahdollisuus hyödyntää kierrätysraaka-aineena. (EUMEPS 2018.)

3.2.1 EPS- ja XPS-eristeiden valmistus

Suomessa valmistettavien XPS- ja EPS-eristeitä valmistetaan pääraaka-aineina polystyreeni. Polystyreenin valmistukseen voidaan käyttää maakaasua tai raakaöljyä. (AVI 2013.) Polystyreenin valmistusta EPS:ksi on kuvattu kuvassa 7.

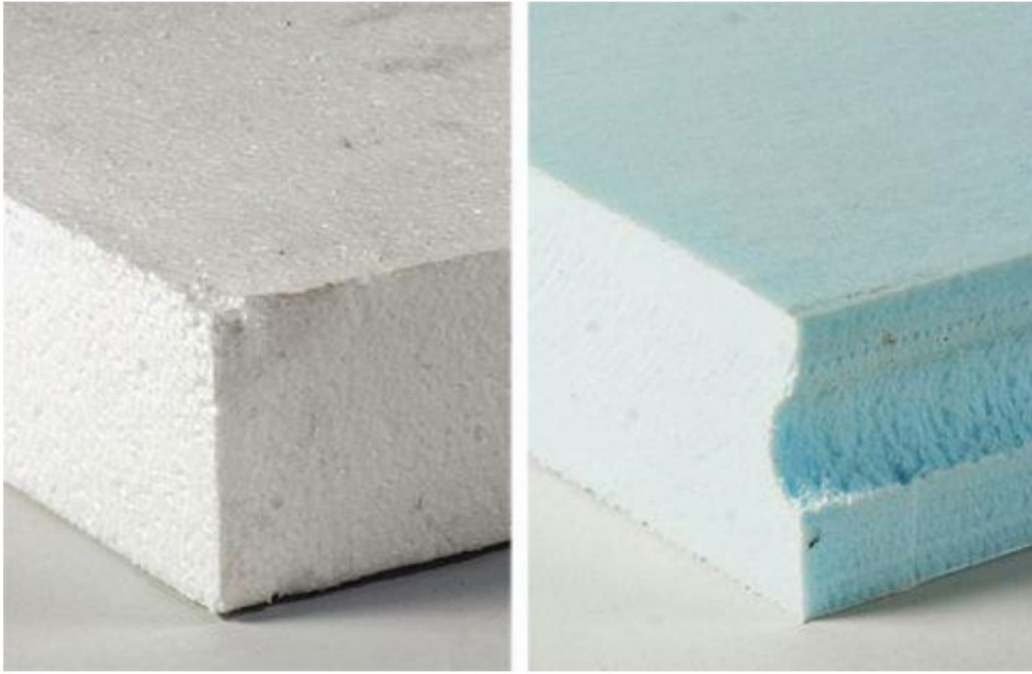


KUVA 7. EPS: valmistusprosessi. (Grönman 2009, 86)

EPS valmistusprosessissa raakaöljy jalostetaan ensin naftaksi eli dieselöljyksi. Parafiinihiilivedyistä muodostuva nafta kuumennetaan ja jäädytetään nopeasti krakkauksessa. Näin saadaan hiilivedyt pilkkoutumaan pienemmiksi ja saadaan erotettua seoksen jakeet, jotka koostuvat pääasiassa eteenistä, propeenista ja buteenista. Polystyreenin valmistukseen tarvittavaa bentseeniä tuotetaan kahdella eri tavalla: naftan katalyyttisellä reformoinnilla ja tislamalla krakkauksessa syntyviä sivutuotteita jatkuvasti. Pentaania imeytetään styreeniin ponnekaasuksi ja vesihöyryn avulla työstetään EPS:ää. Näin saadaan pentaani reagoimaan styreenihelmien kanssa. Ilma täyttää solurakennetta, paisuttavaa styreenihelmiä, joten ne liimaantuvat yhteen. (Grönman 2009, 86–87.)

XPS-eristeen valmistaminen erottuu EPS:n valmistamisesta vain loppuvaiheessa. Ponnekaasuna käytettävää pentaania sekoitetaan sulaan polystyreeniin korkeassa paineessa. Suuttimen läpi sulamassa puristetaan kovalla paineella muotin väliin normaaliin ilmanpaineeseen,

jolloin massa paisuu toivottuun muotoon ja kovettuu. Kuvassa 8 on esitetty valmiin EPS:stä ja XPS:stä rakenne-ero. (Sulotek Oy 2020.) EPS-levyjen tiheys on n. 18 kg/m³ ja XPS-levyjen tiheys on n. 32 kg/m³ (Finnfoam 2020.)



Kuva 8. Kuvassa vasemmalla EPS-levy, josta näkyy styreenihelmirakenne ja oikealla XPS-levy jonka solurakenne on tiiviimpi. (Sharkey 2009, 5.)

Aikaisemmin kuvassa 8 esitetyillä prosesseilla on paljon vaikutusta hiilijalanjälkeen. EPS- ja XPS-levyjen raaka-aineet ovat peräisin fossiilisista lähteistä. PlasticsEuropen mukaan hiilijalanjälki EPS-eristeille olisi kasvihuonekaasupäästöjen yhteenlaskettua ilmastoaluetta lämmitävää vaikutusta käyttäen 2370 CO₂ ekv. g/kg IPCC 2007 määritelmän mukaan. (PlasticsEurope 2015.)

3.2.2 Ligniini-komposiittieriste

Ligniinin soveltuvuutta komposiittien valmistamiseen ei ole tutkittu kovin paljon. Viime aikoina kiinnostus fossiilisten polymeerien korvaamiseen biotuotteilla on kasvanut.

Nykyiset XPS- ja EPS-eristeet ovat kevyitä (95 % ilmaa), halpoja jalostaa ja omaavat erinomaiset eristysominaisuudet. PS-tuotteiden kierrättäminen ja niiden öljypohjaiset raaka-aineet ovat ongelmallisia. Ligniinin ja PS:n yhdistelmä on toimiva, kun se valmistetaan polymeroinnilla. Peräkkäiset massasuspensiopolymeroinnit ja sulasekoitus ovat eniten käytettyjä menetelmiä, joilla saadaan ligniini vaahtoamaan seokseen. Victor et al. (2018) onnistuivat korvaamaan komposiitissa 20 % sulfaattiligniinillä. Ongelmana aluksi oli ligniinissä havaittu hapettuminen, mutta se onnistuttiin korjaamaan muuttamalla iniaattorin ja suspendoivan aineen määrää. (Rosenau et al. 2018, 121.)

Teknisillä ligniineillä on suuri potentiaali korvata fossiilisia eristeitä. Tällä hetkellä ligniinin osuuden ylärajaa komposiitissa pidetään 40 %:ssa. (Ghavidel 2019.) Ligniinin vaahdottaminen teolliseen massatuotantoon ei ole vielä mahdollista, koska kaikkia teknisiä ja kemiallisia ongelmia ei ole vielä ratkaistu. (Rosenau et al. 2018, 128.)

Ligniinin ominaisuudet komposiittieristeen palonkestävyysominaisuuksiin vaikuttavat luopaavilta. Laboratorio-olosuhteissa ligniinistä valmistettua vaahtoa testattiin polttamalla sitä Bunsenlampulla (1 500 °C:ssa) 30 sekunnin ajan. Vaahdosta oli havaittavissa vain muutamia hehkuvia kohtia ja muutaman sekunnin päästä kokeen jälkeen ei ollut liekkiä havaittavissa. Ligniini voi mahdollistaa hyvät palo-ominaisuudet komposiitille verrattuna tavalliseen polystyreeniin, joka täytyy käsitellä bromilla palo-ominaisuuksien saavuttamiseksi. (Tondi Gianluca et al. 2016, 2982.)

Hamburg-Harburgin yliopistossa tutkitaan ligniiniperusteisen aerogeelin soveltumista komposiittiin. Hankkeessa tutkitaan ligniinin soveltumista polyuretaanieristeen komponentiksi. Kokeissa on onnistuttu sekoittamaan ligniiniä komposiittiin jopa 78 %, joka ylittää polystyreeni- tai kivivillaeristeiden lämmönjohtokyvyn ominaisuudet. (FNR 2018.) Kuvassa 9 on esitetty ligniinipohjainen komposiitti eriste.



Kuva 9. Tutkijat ovat onnistuneet valmistamaan ligniinipohjaisen komposiittieristeen. (FDR 2018.)

4 YMPÄRISTÖVAIKUTUSLASKELMA

Tässä kappaleessa suoritetaan laskelmia ligniinikomposiittieristeiden ja perinteisten fossiilipohjaisten eristeiden välillä kasvihuonekaasupäästöjen osalta. Ligniinin erottamisprosessin vaikutuksista kasvihuonekaasupäästöihin esim. Lignoboost-menetelmällä ei löytynyt lähde- materiaaleista. Käytetään oletuksena, että erottamisprosessi vaatii niin vähän energiaa, että sillä ei ole vaikutusta päästöihin ja ilman erottamista sitä käytettäisiin kuitenkin energianlähteenä soodakattilassa. Tässä tullaan tarkastelemaan komposiitin vaikutuksia kasvihuonepäästöjen perusteella.

Edellä esitetyssä luvussa [3.2.1](#) esitettiin vuosien 1980–2016 välisenä aikana Suomessa käytettäneen yhteensä 16 milj. m³ EPS- ja XPS eristeitä. Tässä työssä esitetään neljä erilaista skenaariota, joissa vertaillaan ligniinin määrän ilmastovaikutusta komposiittieristeen valmistamisessa, verrattuna perinteiseen eristeeseen. Seuraava skenaario 2 esittää tilannetta, jossa kulutuksesta puolet eli 0,22 milj. m³ vuodessa hyödynnettäisiin komposiittieristeellä, jossa 25 % öljypohjaista raaka-ainetta on korvattu ligniinillä. Kolme muuta skenaariota ligniinin osuuden vaihdellessa komposiitissa on esitetty liitteessä 1.

Ratkaistaan öljypohjaisten eristeiden kulutus keskimäärin vuodessa seuraavassa laskussa 1.

$$V_{kulutus,a} = \frac{16 \cdot 10^6 m^3}{36 a} = 444\,000 m^3 \quad (1)$$

Seuraavassa laskussa 2 ratkaistaan fossiilisten eristeiden kokonaismassa vuodessa. Ligniinin lisää eristelevyn tiheyttä, joten käytetään oletuksena, että eristelevyn tiheys on keskimäärin 40 kg/m³.

$$m_{eristeet,a} = 40 \frac{kg}{m^3} * 444\,000 m^3 \approx 17,8 * 10^6 \frac{kg}{a} \quad (2)$$

Fossiilisten eristeiden valmistamisen tuottama päästöt vuodessa ratkaistaan laskun 3 mukaisesti. Päästöille käytetään kappaleessa [3.2.1](#) esitettyä lukuarvoa.

$$m_{CO_2ekv,f,a} = 2370 \frac{g}{kg} * \left(17,8 * 10^6 \frac{kg}{a}\right) \approx 42,2 * 10^6 \frac{kg}{a} \quad (3)$$

Oletuksena käytetyn tiedon mukaan 25 %:sen ligniini-komposiitin hiilijalanjäljeksi saadaan 1778 gCO₂ekv/kg. Tämän avulla saadaan laskettua komposiittituotannon vuotuinen hiilijalanjälki laskussa 4 komposiitin tuotannon ollessa 50 % kulutuksesta.

$$m_{CO_2ekv,c,a} = 1778 \frac{g}{kg} * 17,8 * 10^6 \frac{kg}{a} * 50 \% \approx 15,82 * 10^6 \frac{kg}{a} \quad (4)$$

Tämän skenaario 2:n, jossa komposiitin osuudeksi tuotannosta on valittu 25 % saadaan kokonaishiilijalanjäljeksi laskun 5 mukaan.

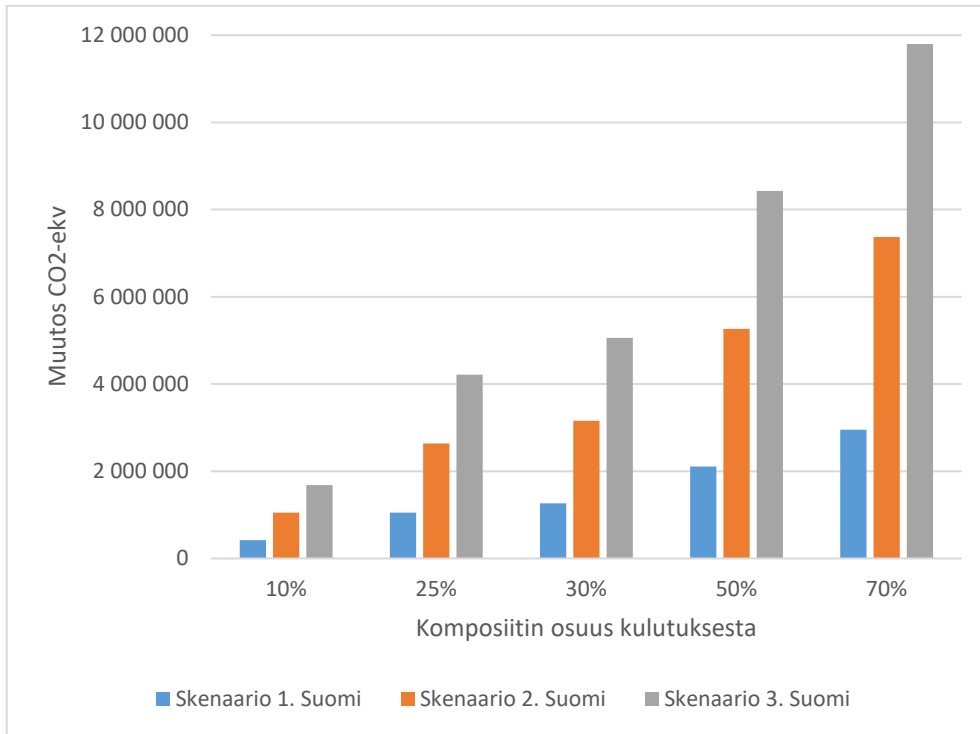
$$m_{CO_2ekv,scen2,a} = 15,82 * 10^6 \frac{kg}{a} + (50 \% * 42,2 * 10^6 \frac{kg}{a}) \approx 36,9 * 10^6 \frac{kg}{a} \quad (5)$$

Komposiitin vaikutus ilmastopäästöihin vuodessa on esitetty seuraavissa laskuissa 6 ja 7.

$$m_{CO_2ekv,erotus,kg} = (42,2 - 36,9) * 10^6 \frac{kg}{a} \approx 5,6 * 10^6 CO_2ekv \frac{kg}{a} \quad (6)$$

$$m_{CO_2ekv,erotus,\%} = 100 - \frac{36,9}{42,2} * 100\% \approx 12,6\% \quad (7)$$

Liitteen 1 mukaan on tehty vertailua seuraavaan kuvaan 10 päästöjen vähenemisestä eri skenaarioiden ja komposiitin kulutuksen suhteen.

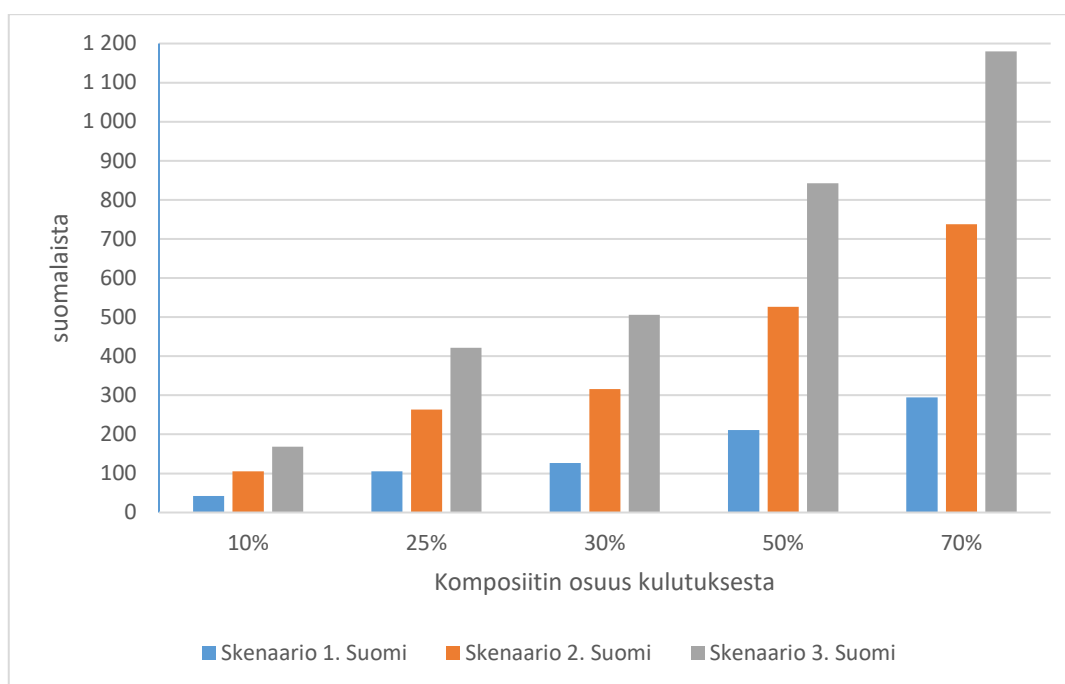


Kuva 10. Komposiitin osuus eri skenaarioiden välillä esitettyinä CO₂-ekv muutoksen suhteen.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Laskelmissa keskityttiin polystyreenin korvaamiseen ligniinikomposiittieristeellä. Laskelmista on havaittavissa, että muutos kasvihuonepäästöihin on kohtuullinen jo vaatimattomimmassa skenaariossa yksi. Pelkästään jo Suomen skenaarioissa päästöt auttaisivat EU:n asettamiin päästötavoitteisiin ylätymisessä. Eristemarkkinoiden osuus Suomen ilmastopäästöihin on kuitenkin aika marginaalinen.

On arvioitu, että yhden suomalaisen hiilijalanjälki olisi 10 000 CO₂-ekv. Pienimmänkin skenaarion mukaan se kattaisi vähintään 40 suomalaisen hiilijalanjäljen. Ottamalla vertailukohdaksi toinen ääripää skenaariosta kolme saadaan päästöjen säästöllä katettua yli tuhannen suomalaisen päästöt vuodessa. Skenaarioiden toteutuminen vaatii, että kulutus pysyisi arvioidulla tasolla. Kuvassa 11 on esitetty monenko suomalaisen hiilijalanjälkeä eri skenaariot vastaavat.



Kuva 11. Komposiitin osuus eri skenaarioiden välillä esitettynä suomalaista hiilijalanjälkeä kohden. (Zakzeski et al. 2010, 3554.)

Kierrätettävästä polystyreenijätteestä, minkä potentiaali EU:n alueella on 0,257 milj. tonnia tarjoaisi suuren mahdollisuuden hyödyntää sitä ligniini-komposiitista valmistetuissa eristeissä. Tämä mahdollistaisi komposiittieristeiden osalta vähentää fossiilisten raaka-aineiden käyttöä ja näin ollen tekisi eristeistä vielä enemmän ympäristöystävällisiä.

Poliittinen ohjaus hiilineutraaliuteen voisi johtaa tilanteen siihen, että täysin fossiilisen eristeiden ja niiden valmistaminen/käyttäminen tehtäisiin mahdottomaksi. Tämä loisi lähes rajattomat mahdollisuudet hyödyntää ligniiniä eristeiden valmistamisessa.

Tähän mennessä on ligniinin osuutta kokeiltu 10–80 % osuudella komposiittieristeiden valmistamisessa. Tulevaisuus näyttää voidaanko ligniiniä käyttää kokonaan eristeen valmistamiseen.

Sellun tuotanto on Suomessa noin 8,3 miljoonaa tonnia. Tästä määrästä olisi Per Tomanin mukaan mahdollista erottaa ligniiniä 50 kg/t. Tämä tarkoittaisi, että pelkästään Suomalais-ten sellutehtaiden ligniinituotantopotentiaali voisi olla 415 000 t.kg. Vaikka ligniinin osuus olisi komposiittieristeessä jopa 100 %, jäisi ligniiniä muihin sovelluksiin vielä lähes 400 000 t.kg.

6 YHTEENVETO

Metsäteollisuudella on pitkät perinteet suomalaisessa teollisuudessa. Erilaiset vaiheet ja käännekohdat maamme historiassa ovat vieneet meidät tervan, lankkujen ja paperin valmistamisen kautta yhdeksi maailman innovatiivisimmista metsäteollisuusmaista. Kemiallinen metsäteollisuus voi osoittautua tärkeäksi tekijäksi bio- ja kiertotaloudessa.

Kansainvälinen keskustelu ilmaston heikentyneestä tilasta sai alulle ilmastonmuutoksen ottamiseksi huomioon päätöksen teossa. Alku kangertelun jälkeen saatiin maita osallistumaan ilmastopöytäkirjaan. EU:n kunnianhimoinen tavoite ilmastopolitiikkaan ohjaa EU:n aluetta 100 % ilmastoneutraalisuuteen vuoteen 2050 mennessä. Tavoitteen saavuttamiseksi on tärkeää tehdä investointeja uusiin puhtaisiin vähähiilisiin teknologioihin, energiatehokkuuteen, uusiutuviin energialähteisiin.

Sulfaattisellun valmistuksen yhteydessä erottuva mustalipeä ja sen sisältämä ligniini tarjoaa mahdollisuuden moniin uusiin sovelluksiin. LignoBoost on kaupallistettu menetelmä ligniinin erottamiseen. Tällä hetkellä erotettua ligniiniä käytetään pääsääntöisesti polttoaineena. Tutkijat ovat löytäneet monia muita eri sovelluksia, missä ligniini korvaa fossiilipohjaisen raaka-aineen. Tällaisia ovat esimerkiksi liimat, hiilikuitu, bitumi ja lääketieteelliset sovellukset.

Tässä työssä perehdyttiin ligniinin rooliin osana komposiittia fossiilisissa EPS- ja XPS-eristeissä. Ligniini tarjoaa tulevaisuudessa uuden mahdollisuuden eristeiden valmistamiseen. Tutkimuksissa ligniinin osuutta eristeissä on kokeiltu 10–80 % välillä ja tulokset ovat olleet lupaavia. Meneillään olevan saksalaistutkimuksen mukaan, polyuretaanista ja ligniinistä valmistetusta komposiitista odotetaan tulevan erittäin varteenotettava tuote kaupallistettavaksi.

LÄHTEET

Aalto-yliopisto. 2018. Uutiset: Ligniinin avulla eroon fossiilisista materiaaleista. [viitattu: 28.3.2020]. Saatavissa: <https://www.aalto.fi/fi/uutiset/ligniinin-avulla-eroon-fossiilisista-materiaaleista>

Bozsaky Dávid. 2011. The historical development of thermal insulation materials. Periodica Polytechnica. Architecture 2010. Vol.41(2) 49-56 s.

Chirat et al. 2011. Chemical Pulping Part 1, Fibre Chemistry and Technology. Chapter 4 Bleaching. Second Edition. Helsinki: Paper Engineer's Association. 749 s. Book 6 (Part 1). ISBN 978-952-5216-41-7

Dennis Brady. 2019. Trump makes it official: U.S. will withdraw from the Paris climate accord. The Washington Post. [verkkodokumentti]. [viitattu: 4.3.2020]. Saatavissa: <https://www.washingtonpost.com/climate-environment/2019/11/04/trump-makes-it-official-us-will-withdraw-paris-climate-accord/>

EU. 2019. What is carbon neutrality and how can it be achieved by 2050?. [verkkodokumentti]. Euroopan parlamentti. [viitattu: 7.3.2020]. Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/priorities/ilmastonmuutos/20190926STO62270/mita-hiilineutraalius-tarkoittaa-ja-miten-se-saavutetaan-2050-menessa>

EU. 2020. Pariisin ilmastopimus. [verkkodokumentti]. Päivitetty: 6.3.2020. Eurooppa-neuvosto. [viitattu: 7.3.2020]. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/climate-change/paris-agreement/>

EUMEPS. 2020. EUMEPS SUBMITTED VOLUNTARY PLEDGE. The European Manufacturers of EPS. [viitattu: 1.4.2020]. Saatavissa: https://eumeps.org/content/7-news/eumeps-submitted-voluntary-pledge/20180914_the-eumeps-voluntary-pledge.pdf

European Union. 2019. Eurostat Greenhouse gas emission statistics. [verkkodokumentti]. Päivitetty: 1.7.2019. [viitattu: 22.3.2020]. Saatavissa: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics

Finnfoam. 2020. Koostumus ja rakenne. [verkkodokumentti]. [viitattu: 4.3.2020]. Saatavissa: <https://www.finnfoam.fi/tuotteet/finnfoam-eristelevyt/koostumus-ja-rakenne>

FNR. 2018. Ein großer Schritt auf dem Weg zu ligninbasierten Aerogelen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. [verkkodokumentti]. [viitattu 1.4.2020]. Saatavissa: https://www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/archiv/archiv-nachricht/?tx_news_pi1%5Bnews%5D=9220&tx_news_pi1%5Bcontrol%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=216c91568639a8aa0158678801aa6ce7

Grönman Kaisa. 2009. Mahdollisuudet pakkausten hiilijalanjäljen pienentämiseen. Case: kuituvos. [tutkimusraportti]. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Saatavissa: <https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/45494/isbn%209789522147905.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Hamaguchi Marcelo et al. 2012. Alternative Technologies for Biofuels Production in Kraft Pulp Mills—Potential and Prospects. *Energies*. Vol. 5. No. 7. 2288-2309 s. ISSN: 1996-1073

Hammo Simo. 2020. TkL. Laboratorioinsinööri. LUT-yliopisto. Lappeenranta. Puhelinhaastattelu. 27.5.2020.

Hämäläinen Lauri. 2017. HBCD:n kartoitus Suomen rakennuskannassa. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Rakennusalan työjohto. Tampere. 15 s.

Ghavidel Nasim & Fatehi Pedram. 2019. Synergistic effect of lignin incorporation into polystyrene for producing sustainable superadsorbent. *RCA Advances*. Royal Society Chemistry. February 2019. 1763-19652 s. ISSN 2046-2069

Globalis. 2005. Kioton pöytäkirja. [verkkodokumentti]. Päivitetty: 13.4.2016. Suomen YK-liitto. [viitattu: 3.3. 2020]. Saatavissa: <https://www.globalis.fi/view/content/2812/full/1/1958>

Gosselink R.J.A.et al. 2004. Co-ordination network for lignin—standardisation, production and applications adapted to market requirements (EUROLIGNIN). Industrial Crops and Products. [verkkodokumentti]. Department of Fibre and Paper Technology, Agrotechnology & Food Innovations. ISSN 0926-6690.

Grönman Kaisa. 2009. Mahdollisuudet pakkausten hiilijalanjäljen pienentämiseen. Tutkimusraportti. Lappeenranta teknillinen yliopisto. 124 s. ISBN 978-952-214-789-9

Gustafsson Jan et al. 2011. Chemical Pulping Part 1, Fibre Chemistry and Technology. Chapter 2: Pulping. Second Edition. Helsinki: Paper Engineer's Association. 749 s. Book 6 (Part 1). ISBN 978-952-5216-41-7

KnowPulp. 2011a. Keitto. Sellunvalmistuksen oppimisympäristö. [verkkodokumentti]. VTT Industrial Systems. [viitattu: 15.3.2020]. Saatavissa: <http://www.knowpulp.com> (vaatii lisenssin)

KnowPulp. 2011b. Sellun keiton periaate. Sellunvalmistuksen oppimisympäristö. [verkkodokumentti]. VTT Industrial Systems. [viitattu: 15.3.2020]. Saatavissa: <http://www.knowpulp.com> (vaatii lisenssin)

KnowPulp. 2011c. Lajittelu. Sellunvalmistuksen oppimisympäristö. [verkkodokumentti]. VTT Industrial Systems. [viitattu: 15.3.2020]. Saatavissa: <http://www.knowpulp.com> (vaatii lisenssin)

KnowPulp. 2011d. Haihduttamo. Sellunvalmistuksen oppimisympäristö. [verkkodokumentti]. VTT Industrial Systems. [viitattu: 15.3.2020]. Saatavissa: <http://www.knowpulp.com> (vaatii lisenssin)

KnowPulp. 2011e. Tulipesäprosessi. Sellunvalmistuksen oppimisympäristö. [verkkodokumentti]. VTT Industrial Systems. [viitattu: 15.3.2020]. Saatavissa: <http://www.know-pulp.com> (vaatii lisenssin)

Luke. Luonnonvarakeskus. 2012. Suomen metsät 2012: Suomen metsät ja metsätalous pähkinänkuoressa. [viitattu: 2.3.2020] Saatavissa: <http://www.metla.fi/mefinfo/kestavyys/SF-1-forest-industry.htm>

Metsäteollisuus. 2007. SUOMEN METSÄTEOLLISUUDEN HISTORIA 1600-LUVULTA NYKYPÄIVÄÄN AINUTLAATUISENA KIRJASARJANA. [viitattu: 21.3.2019] Saatavissa: <https://www.metsateollisuus.fi/tiedotteet/suomen-metsateollisuuden-historia-1600-luvulta-nykypaivaan-ainutlaatuisena-kirjasarjana/>

Metsäteollisuus. 2019. Metsäteollisuus on yksi suurimmista teollisuuden toimialoista Suomessa. [viitattu: 2.3.2020]. Saatavissa: <https://www.metsateollisuus.fi/tilastot/10-Mets%C3%A4teollisuus/Julkinen-FI/a90Mets%C3%A4teollisuus%20on%20yksi%20suurimmista%20teollisuuden%20aloista%20Suomessa.pptx>

Metsäteollisuus. 2020a. Paperin ja kartongin tuotannon kehitys. [viitattu: 20.5.2020]. Saatavissa: https://www.metsateollisuus.fi/tilastot/15-Massa-%20ja%20paperiteollisuus/Julkinen-FI/f10_-_Paperi_ja_kartonki_tuotanto_vuosittain_10v.pptx

Metsäteollisuus. 2020b. SELLUN TUOTANTO SUOMESSA. [viitattu: 10.3.2020]. Saatavissa: https://www.metsateollisuus.fi/tilastot/15-Massa-%20ja%20paperiteollisuus/Julkinen-FI/f10_-_Sellun_tuotanto_vuosittain_10v.pptx

MMM. Maa- ja metsätalousministeriö. 2020. Kiertotalous: Metsät ja puu kiertotaloudessa. [viitattu 20.5.2002]. Saatavissa: https://mmm.fi/documents/1410837/7764238/Kiertotalous_mets%C3%A4t_ja_puu_kiertotaloudessa_072019.pdf/5ab38304-49d2-65e9-2fc2-5eaefc6a6e23/Kiertotalous_mets%C3%A4t_ja_puu_kiertotaloudessa_072019.pdf

Paper Technology, Agrotechnology & Food Innovations, Wageningen. 121-129 s. [viitattu: 18.3.2020]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669004000652>

Peisa Jyrki. 2017. Maatalous- ja ympäristöministeriö. [viitattu: 2.3.2020] Saatavissa: [https://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Ministeri_Tiilikainen_Suomesta_hiilineut\(42208\)](https://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Ministeri_Tiilikainen_Suomesta_hiilineut(42208))

PlasticsEurope. 2015. Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers: Expandable Polystyrene. Saatavissa: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/eco-profiles>. Huomautukset: vuokaaviosta etsittävä EPS.

Ripple et al. 2020. World Scientists' Warning of a Climate Emergency. Bioscience. Vol. 70 No.1. Oxford University Press. 8-12 s. ISSN 1525-3244.

Rosenau Thomas et al. 2018. Lignin-based foams as insulation materials. Holzforschung. vol 73. De Gruyter. 117-130 s. ISSN 0018-3830

Sharkey Martin James. 2019. SOURCES, CONCENTRATIONS, AND SCREENING OF HAZARDOUS BROMINATED FLAME RETARDANTS FROM WASTE STREAMS IN IRELAND. Väitöskirja. National University of Ireland Galway. 107 s.

Tondi Gianluca et al. 2016. Lignin-based Foams: Production Process and Characterization. BioResources. vol 11(2). Salzburg University of Applied Sciences. 2972-2986 s. ISSN 1930-2126.

Tomani Per. 2009. THE LIGNOBOOST PROCESS. Cellulose Chemistry and Technology 44(1). Innventia AB. 44-58 s. ISSN 0576-9787.

Tomani Per. 2013. Update on LignoBoost lignin and Applications. Svenska Pappers- och Cellulosaingenjörsföreningen. [viitattu: 29.3.2020] Saatavissa: http://www.spci.se/shared/files/Per_Tomani_SPCI_2013_UT.pdf

..

Tran Honghi ja Vakkilainen Esa. 2012. The Kraft chemical recovery process. Tappi.org. Saatavissa: <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/1-1.pdf>

SIS. 2019. Skogsindustrin i världen. [verkkodokumentti]. Skogs Industrierna Sverige. [viitattu 10.3.2020]. Saatavissa: <https://www.skogsindustrierna.se/om-skogsindustrin/branschstatistik/skogsindustrin-i-varlden/>

SMY. 2020 Sulfaattisellu (kraft pulp). [verkkodokumentti]. Suomen metsähoitoyhdistys. Saatavissa: <https://smy.fi/sanasto/sulfaattisellu-kraft-pulp/>

Sulotek Oy. 2020. Mistä materiaaleista. [verkkodokumentti]. [viitattu: 29.3.2020] Saatavissa: https://sulotek.fi/fi/Mist%C3%A4_materiaaleista

Tervola Pekka et al. 2011. Chemical Pulping Part 1, Fibre Chemistry and Technology. Chapter 3: Washing, screening and cleaning of pulp. Second Edition. Helsinki: Paper Engineer's Association. 749 s. Book 6 (Part 1). ISBN 978-952-5216-41-7

UN. United Nations. 1992. United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), Earth Summit. [verkkodokumentti]. [viitattu: 3.3.2020] Saatavissa: <https://sustainabledevelopment.un.org/milestones/unced>

UN. 2015. What is the Paris Agreement? [verkkodokumentti]. Päivitetty: 22.08.2018. United Nations. [viitattu: 3.3.2020] Saatavissa: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/what-is-the-paris-agreement>

Valmet. 2020. LignoBoost process. [verkkodokumentti]. [viitattu: 15.3.2020]. Saatavissa: <https://www.valmet.com/pulp/other-value-adding-processes/lignin-separation/lignoboost-process/>

Vanholme, R. et al. 2010. Lignin Biosynthesis and Structure. Plant physiology. Vol.153. American Society of Plant Biologists. 895-905 s.

VTT. 2017. Reactive lignin for reducing the environmental impacts of wood products. [verk-
kodokumentti]. [viitattu 3.4.2020]. Saatavissa: [https://phys.org/news/2017-02-reactive-lig-
nin-environmental-impacts-wood.html](https://phys.org/news/2017-02-reactive-lig-
nin-environmental-impacts-wood.html)

Wallmo Henrik. 2009. Increase production in your recovery boiler with LignoBoost. Metso
Power AB. 24 s.

<http://www.tappi.org/content/events/09IBBC/papers/49.1.pdf>

Willför Stefan et al. 2011. Chemical Pulping Part 1, Fibre Chemistry and Technology. Chap-
ter 1: Raw materials. Second Edition. Helsinki: Paper Engineer's Association. 749 s. Book
6 (Part 1). ISBN 978-952-5216-41-7

Zakzeski Joseph et al. 2010 The Catalytic Valorization of Lignin for the Production of Re-
newable Chemicals. Chemical Reviews. American Chemical Society (ACS), 110(6). 3552–
3599 s.

Ligniini- ja komposiittieristeiden vaikutus ilmastonmuutokseen

Skenaario 1. Suomi					
Ligniinin osuus kompositissa	10 %				
Eristeiden kulutus vuodessa (tilavuus)	444 444	m ³			
Eristeiden kulutus vuodessa (massa)	17 777 778	kg			
Fossiilisen hiilijalanjälki CO ₂ -ekv	2 370	g/kg			
Hiilijalanjälki kompositille CO ₂ -ekv	2 133	g/kg			
Hiilijalanjälki fossiiliselle CO ₂ -ekv vuodessa	42 133 333	kg			
Eristelevyn tiheys	40	kg/m ³			
Tapaus	1.	2.	3.	4.	5.
Kompositin osuus kulutuksesta (%)	10 %	25 %	30 %	50 %	70 %
Komposiitti (m ³ /a)	44 444	111 111	133 333	222 222	311 111
Komposiitti (kg/a)	1 777 778	4 444 444	5 333 333	8 888 889	12 444 444
Hiilijalanjälki kompositille (kg)	3 792 000	9 480 000	11 376 000	18 960 000	26 544 000
Hiilijalanjälki scenaarion mukaan (kg)	41 712 000	41 080 000	40 869 333	40 026 667	39 184 000
CO₂-ekv erotus perinteiseen (kg)	421 333	1 053 333	1 264 000	2 106 667	2 949 333
CO₂-ekv erotus perinteiseen (%)	1 %	2 %	3 %	5 %	7 %
Skenaario 2. Suomi					
Ligniinin osuus kompositissa	25 %				
Eristeiden kulutus vuodessa (tilavuus)	444 444	m ³			
Eristeiden kulutus vuodessa (massa)	17 777 778	kg			
Fossiilisen hiilijalanjälki CO ₂ -ekv	2 370	g/kg			
Hiilijalanjälki kompositille CO ₂ -ekv	1 778	g/kg			
Hiilijalanjälki fossiiliselle CO ₂ -ekv vuodessa	42 133 333	kg			
Eristelevyn tiheys	40	kg/m ³			
Tapaus	1.	2.	3.	4.	5.
Kompositin osuus kulutuksesta (%)	10 %	25 %	30 %	50 %	70 %
Komposiitti (m ³ /a)	44 444	111 111	133 333	222 222	311 111
Komposiitti (kg/a)	1 777 778	4 444 444	5 333 333	8 888 889	12 444 444
Hiilijalanjälki kompositille (kg)	3 160 000	7 900 000	9 480 000	15 800 000	22 120 000
Hiilijalanjälki scenaarion mukaan (kg)	41 080 000	39 500 000	38 973 333	36 866 667	34 760 000
CO₂-ekv erotus perinteiseen (kg)	1 053 333	2 633 333	3 160 000	5 266 667	7 373 333
CO₂-ekv erotus perinteiseen (%)	2 %	6 %	8 %	13 %	18 %
Skenaario 3. Suomi					
Ligniinin osuus kompositissa	40 %				
Eristeiden kulutus vuodessa (tilavuus)	444 444	m ³			
Eristeiden kulutus vuodessa (massa)	17 777 778	kg			
Fossiilisen hiilijalanjälki CO ₂ -ekv	2 370	g/kg			
Hiilijalanjälki kompositille CO ₂ -ekv	1 422	g/kg			
Hiilijalanjälki fossiiliselle CO ₂ -ekv vuodessa	42 133 333	kg			
Eristelevyn tiheys	40	kg/m ³			
Tapaus	1.	2.	3.	4.	5.
Kompositin osuus kulutuksesta (%)	10 %	25 %	30 %	50 %	70 %
Komposiitti (m ³ /a)	44 444	111 111	133 333	222 222	311 111
Komposiitti (kg/a)	1 777 778	4 444 444	5 333 333	8 888 889	12 444 444
Hiilijalanjälki kompositille (kg)	2 528 000	6 320 000	7 584 000	12 640 000	17 696 000
Hiilijalanjälki scenaarion mukaan (kg)	40 448 000	37 920 000	37 077 333	33 706 667	30 336 000
CO₂-ekv erotus perinteiseen (kg)	1 685 333	4 213 333	5 056 000	8 426 667	11 797 333
CO₂-ekv erotus perinteiseen (%)	4 %	10 %	12 %	20 %	28 %
Skenaario 4. EU					
Ligniinin osuus kompositissa	25 %				
Eristeiden kulutus vuodessa (tilavuus)	40 000 000	m ³			
Eristeiden kulutus vuodessa (massa)	160 000 000	kg			
Fossiilisen hiilijalanjälki CO ₂ -ekv	2 370	g/kg			
Hiilijalanjälki kompositille CO ₂ -ekv	1 778	g/kg			
Hiilijalanjälki fossiiliselle CO ₂ -ekv vuodessa	3 792 000 000	kg			
Eristelevyn tiheys	40	kg/m ³			
Tapaus	1.	2.	3.	4.	5.
Kompositin osuus kulutuksesta (%)	10 %	25 %	30 %	50 %	70 %
Komposiitti (m ³ /a)	4 000 000	10 000 000	12 000 000	20 000 000	28 000 000
Komposiitti (kg/a)	160 000 000	400 000 000	480 000 000	800 000 000	1 120 000 000
Hiilijalanjälki kompositille (kg)	284 400 000	711 000 000	853 200 000	1 422 000 000	1 990 800 000
Hiilijalanjälki scenaarion mukaan (kg)	3 697 200 000	3 555 000 000	3 507 600 000	3 318 000 000	3 128 400 000
CO₂-ekv erotus perinteiseen (kg)	94 800 000	237 000 000	284 400 000	474 000 000	663 600 000
CO₂-ekv erotus perinteiseen (%)	3 %	6 %	8 %	13 %	18 %
Skenaario x. Suomi polyuretaani					
Ligniinin osuus kompositissa	70 %				
Eristeiden kulutus vuodessa (tilavuus)	444 444	m ³			
Eristeiden kulutus vuodessa (massa)	17 777 778	kg			
Fossiilisen hiilijalanjälki CO ₂ -ekv	2 370	g/kg			
Hiilijalanjälki kompositille CO ₂ -ekv	711	g/kg			
Hiilijalanjälki fossiiliselle CO ₂ -ekv vuodessa	42 133 333	kg			
Eristelevyn tiheys	40	kg/m ³			
Tapaus	1.	2.	3.	4.	5.
Kompositin osuus kulutuksesta (%)	10 %	25 %	30 %	50 %	70 %
Komposiitti (m ³ /a)	44 444	111 111	133 333	222 222	311 111
Komposiitti (kg/a)	1 777 778	4 444 444	5 333 333	8 888 889	12 444 444
Hiilijalanjälki kompositille (kg)	1 264 000	3 160 000	3 792 000	6 320 000	8 848 000
Hiilijalanjälki scenaarion mukaan (kg)	39 184 000	34 760 000	33 285 333	27 386 667	21 488 000
CO₂-ekv erotus perinteiseen (kg)	2 949 333	7 373 333	8 848 000	14 746 667	20 645 333
CO₂-ekv erotus perinteiseen (%)	7 %	18 %	21 %	35 %	49 %