



# Ligniinin uudet sovelluskohteet

Juho Salo

OPINNÄYTETYÖ  
Marraskuu 2022

Biotuote- ja prosessitekniikka  
Prosessitekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Biotuote- ja prosessitekniikan tutkinto-ohjelma  
Prosessitekniikka

SALO, JUHO:  
Ligniinin uudet sovelluskohteet

Opinnäytetyö 43 sivua  
Marraskuu 2022

---

Ligniinistä on tiedetty jo pitkälti yli sata vuotta. Ensimmäinen maininta ligniinistä tehtiin jo 1800-luvulla, mutta vasta viime vuosikymmeninä sitä on alettu tutkia tarkemmin ja sille on yritetty kehittää muitakin käyttötapoja kuin polttaminen. Ligniini on toiseksi yleisin biopolymeeri selluloosan jälkeen, mutta suurin osa nykyään erotetusta ligniinistä poltetaan energiaksi. Nykyisestä selluntuotannosta ja sen sivuvirroista saadusta ligniinistä riittäisi runsaasti potentiaalista raaka-ainetta erilaisiin sovelluksiin.

Opinnäytetyö tarkoituksena oli selvittää, mitä uusia sovelluksia Suomessa on tällä hetkellä ligniinin hyödyntämiseen, sekä tarkastella, millaisia ligniiniin liittyviä projekteja on ollut ja millaisia on käynnissä. Työ tehtiin Tampereen ammattikorkeakoululle kirjallisuusselvityksenä antamaan tietoa ligniinin tutkimuksesta ja sovelluksista.

Tietoa sovelluksista ja hankkeista haettiin suurimmalta osin erilaisista verkkolähteistä. Ensin selvitettiin, kuka tekee ligniiniin liittyvää tutkimusta tai kenellä on ligniiniin liittyviä sovelluksia. Tämän jälkeen tarkasteltiin eri toimijoiden sovelluksia ja hankkeita tarkemmin. Sovellukset saattoivat olla eri kehitysvaiheissa: jotkut olivat teorian testauksessa tai pilottivaiheessa, kun taas toiset oli jo kaupallistettu. Työtä varten haastateltiin myös UPM:n ligniiniliiketoiminnasta vastaavaa Suvi Pietarista.

Viime vuosilta löytyi useampia ligniiniin liittyviä sovelluksia, jotka ovat eri kehitysvaiheessa. Muutamia vielä käynnissä olevia hankkeita ja projektejakin löytyi. Sovelluksia ja projekteja on tuotettu ja toteutettu sekä akateemisella puolella että teollisuudessa. Kaikki tähän työhön sisällytetyt sovellukset ovat julkisesti löydettävissä. Yrityksillä on varmasti käynnissä myös sellaisia projekteja, jotka eivät ole julkisia ja joista ei ole vielä tietoa saatavilla.

Kaikkia sovelluksia tulisi jatkokehittää. Jatkokehityksellä ja lisätutkimuksella voidaan parantaa tuotteiden ja sovellusten ominaisuuksia sekä tehdä niiden valmistuksesta tehokkaampaa. Uusiutumattomista ja haitallisista aineista valmistetuille tuotteille tarvitaan vaihtoehtoisia korvaajia. Vaikka valmistusta ja ominaisuuksia ei saataisikaan parannettua, tutkimus tuo lisää ymmärrystä ja tietoa ligniinistä ja sen ominaisuuksista.

---

Asiasanat: ligniini, sovellus, tutkimus

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Bioproduct and Process Engineering  
Process Engineering

SALO, JUHO:  
New Applications for Lignin

Bachelor's thesis 43 pages  
November 2022

---

Lignin has been known for more than a hundred years. Earliest mentions date back to the 1800s but only recently interest towards it has risen. The result of this newfound interest is that industries and universities are studying lignin more actively. Lignin-based products and applications would help replacing fossil-based goods, thus helping to solve problems that come from using fossil products.

The objective of this thesis was to chart current studies on lignin and what applications there are for lignin. This study was made for Tampere University of Applied Sciences (TAMK). The purpose was to give TAMK information about who studies lignin and what applications there are currently and to gather information for TAMK about the programs and projects, where lignin is being developed.

Information about lignin was mainly collected from online sources. This included various websites, publications on the internet and news. Those who had products or projects with lignin were first charted. Then these products and projects were reviewed more closely. Moreover, a representative of UPM was interviewed about the company's lignin products and projects.

In recent years businesses have begun to offer lignin-based products and there are many ongoing projects to study lignin. Both businesses and universities have developed products and uses for lignin. As awareness of the need for renewable raw materials grows, it is expected that the need and consumption of lignin-based products would increase in the future. So, investment and continuous development is important.

---

Key words: lignin, applications, new

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	LIGNIINI .....	8
3	TUTKIMUSMENETELMÄT .....	11
4	YHTEISTYÖT JA LAAJEMMAT HANKKEET .....	14
	4.1. Selluteollisuus .....	14
	4.2. COLIAD-projekti .....	14
	4.3. FinnCERES .....	15
	4.4. ProLignin .....	16
	4.5. ExpandFiber .....	17
5	KORKEAKOULUJEN KEHITYSHANKKEITA .....	19
	5.1. Tampereen yliopiston projekti .....	19
	5.2. Aalto yliopiston puunsuoja-aine .....	19
	5.3. Aalto-yliopiston liima .....	20
	5.4. Aalto-yliopiston ligniinipartikkelit .....	21
	5.5. Oulun ja Jyväskylän yliopistojen tutkimusprojekti .....	21
	5.6. Kajaanin yliopistokeskuksen hanke .....	22
6	YRITYSTEN PROJEKTEJA JA SOVELLUKSIA .....	24
	6.1. Stora Enson NeoLigno® .....	24
	6.2. Stora Enson NeoFiber® .....	24
	6.3. Stora Enson Lignode® .....	25
	6.4. UPM:n liima .....	26
	6.5. UPM:n biojalostamo .....	26
	6.6. UPM:n edustajan haastattelu .....	27
	6.6.1 Muistiinpanot .....	27
	6.7. RenFuelin Lignol® .....	28
7	MUIDEN TOIMIJOIDEN HANKKEITA .....	30
	7.1. CatLignin .....	30
	7.2. LigniOx .....	31
	7.3. Ligniini käyttö polymeerien lujite- ja täyteaineena .....	32
	7.4. Ligniini lääketieteessä .....	33
8	POHDINTA .....	34
	LÄHTEET .....	37
	TAULUKOT JA KUVAT .....	45

**ERITYISSANASTO**

Mustalipeä	Sellunkeitossa jäljelle jäänyt keittoliemi, sisältää ligniinin ja keittokemikaalit.
Ionineste	Ioniliuotin, suoloja
Mikromuovi	Alle 5 mm kokoisia muovin kappaleita. Sisältävät myös muovin lisäaineita kuten pehmentimet ja väriaineet.
Viskoosi	Selluloosapohjainen muuntokuitu, jota käytetään tekstiiliteollisuudessa.
Kemiallinen massa	Massa/sellu, joka on saatu irrottamalla kuidut toisistaan keittämällä puuhaketta ja kemikaaleja.
Mekaaninen massa	Massa/sellu, joka on saatu hiomalla tai hiertämällä puuta niin että kuidut irtoavat toisistaan.
Kraft-ligniini	Mustalipeästä erotettu ligniini, saadaan erotettua keittämällä mustalipeää korkeassa lämpötilassa ja paineessa natriumhydroksidin ja natriumsulfidin kanssa.

## 1 JOHDANTO

Suomessa on paljon metsää ja siihen liittyvää teollisuutta. Suomessa arvioidaan olevan puuta noin 2,5 miljardia kuutiometriä. Hyvällä metsän hoidolla Suomen metsät kasvavat enemmän kuin niitä hakataan. Tarkemmin sanottuna metsissä oleva puun kuutiomäärä kasvaa, ei itse metsän pinta-ala. Toivottavasti näin tulee olemaan myös jatkossa. (Luke n.d.)

Suomen metsistä hakataan tai poistuu luontaisesti vuosittain noin 92 miljoonaa kuutiometriä puuta ja vuotuinen kasvu on noin 103,5 miljoonaa kuutiometriä. Poistumaan kuuluu hakkuiden jäljiltä metsiin jäävä hakkuujäte. (MMM n.d.) Koska Suomessa on paljon metsää ja siihen liittyvää teollisuutta kiinnostaa raaka-aineen, eli puun, parempi hyödyntäminen. Teollisuudelle olisi edullista, jos puusta saatu raaka-aine voitaisiin käyttää tarkemmin. (Metsäteollisuus 2021.)

Paperi- ja kartonkiteollisuus valmistaa raaka-ainetta tarpeisiinsa pääsääntöisesti kahdella tavalla, joko kemiallisesti tai mekaanisesti. Kemiallisessa valmistuksessa puusta käytetään lopputuotteeseen noin 40–45 % puun kuivapainosta. (Metsäteollisuus 2020)

Mekaanisesti valmistettu massa sisältää noin kaksinkertaisen määrän puun kuivapainosta kuin kemiallisesti valmistettu. Kemiallisessa valmistuksessa noin puolet kuivapainosta hyödynnetään vain energiaksi suuremmassa mittakaavassa. (UPM 2015)

Tämän työn tarkoituksena on selvittää ja tarkastella mitä uusia sovelluksia ligniinin hyödyntämiseen on ja mitä muita tapoja on kehitteillä. Varsinkin sellaiset sovellukset olisivat parhaimpia, joilla voitaisiin korvata tehtaan käyttämiä raaka-aineita suoraan tai muuttamatta prosessia. Näin ei tarvittaisi investointeja ennen ligniinin käyttöönottoa. Metsäteollisuus hyödyntää tällä hetkellä vain pienen osan ligniinistä muuten kuin polttamalla, erilaisten käyttötapojen luominen toisi mahdollisuuden myydä erotettua ligniiniä muille toimijoille.

Työssä tarkastellaan myös uusien sovellusten kehitys- ja kaupallistamisasteita. Millä kohtaa kehityskaarta sovellus on ja milloin se olisi mahdollisesti saatavana laajempaan käyttöön. Tarkastellaan mihin sovelluksiin kannattaisi panostaa ja arvioidaan sovellusten jatkokehitys kelpoisuutta

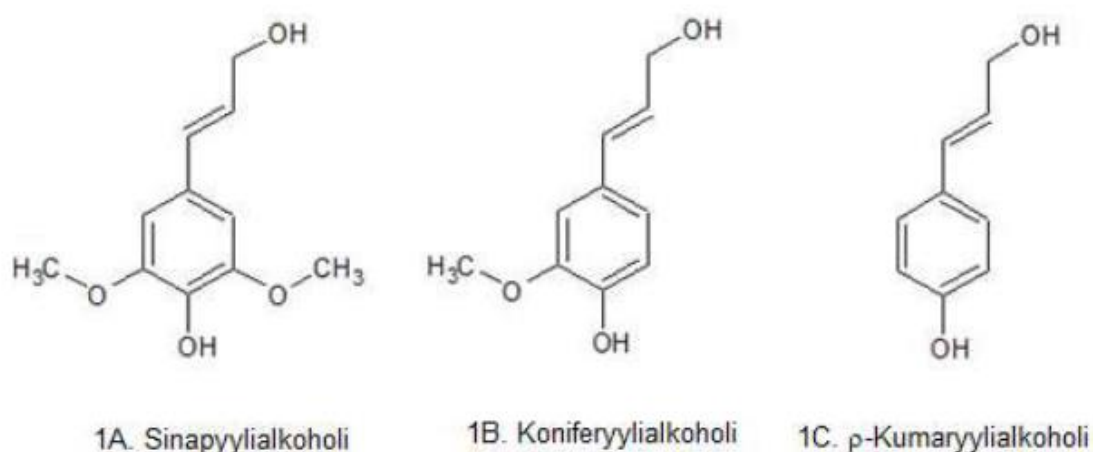
## 2 LIGNIINI

Ligniini on luonnossa esiintyvä polymeeri, jota esiintyy kaikissa kasveissa. Se on selluloosan jälkeen yleisin luonnon polymeeri. Ligniiniä on kaikissa kasveissa, mutta eniten ligniiniä on puissa. Ligniinin osuus lehtipuissa ja ruohokasveissa on noin 17–25 % ja havupuissa 30 % kuivapainosta. (Koivisto 2020, 11 & Myllymäki 2014, 9.)

Ligniini sijaitsee kasvien soluseinissä. Se toimii sitovana aineena selluloosasan ja hemiselluloosan välissä lujittaen rakenteen. Ligniinillä vahvistamalla solurakenteesta ja koko kasvin rakenteesta tulee mekaanisesti kestävä. (Koivisto 2020, 11 & Myllymäki 2014, 9.)

Ligniini toimii kasveissa myös antimikrobisena aineena. Se suojaa kasvia haitallisilta mikrobeilta ja taudinaiheuttajilta. (Koivisto 2020, 11.)

Ligniini, toisin kuin selluloosa ja hemiselluloosa, on hydrofobinen aine. Se eristää soluseinämässä olevat kuljetuskanavat, joita pitkin vesi, ravinteet, jätteet, hivenaineet ja muut kulkevat pitkin kasvia. (Koivisto 2021, 11). Alhaalla on yleisimmät monomeerit, joista ligniini muodostuu. Nämä monomeerit polymeroituvat ja muodostavat erilaisia sidoksia ja haaroja. Näitä monomeereja kutsutaan monolignoleiksi. (Hinkka 2020, 12.)



Kuva 1. Ligniinin yleisimpien monomeerien rakenne. (Hinkka 2020, 12)

Kun ligniini erotetaan selluntuotannon yhteydessä, tulee siitä aina teknistä ligniiniä, koska luonnon ligniiniä on mahdoton erottaa sellaisenaan. (Rönkä 2021,



5.) Ligniinin käytössä ongelmia tuottaa epäpuhtaus, liukenemattomuudesta ja moolimassajakaumasta. Suurin ongelma näistä on liukenemattomuus. Yleensä ligniinin molekyyli­massaa tarvitsee pienentää eli pilkkoa sitä pienempiin osiin. (Rönkä 2021. s 10) Alhaalla kuva erotetusta ja kuivatusta ligniinistä.



Kuva 2. Erotettua ja kuivatua ligniiniä (Stora Enso n.d.)

Suomessa tuotettiin sellua vuonna 2018 8.2 miljoonaa tonnia (Metsälehti 2020.) ja vuonna 2019 8.3 miljoonaa tonnia. (Metsäteollisuus 2019.)

Maailma sellun tuotanto oli vuonna 2020 189 miljoonaa tonnia. (Tiseo 2022.) Ligniiniä sellu- ja paperitehtaat tuottavat maailmassa vuosittain noin 70 miljoonaa tonnia. Tästä 88% on lignosulfonaatteja, joita saadaan sulfiitiselunkeiton sivutuotteena, kraft-ligniiniä 9% ja orgaanisilla liuottimilla saatua ligniiniä 2%. (Bajwa, Bajwa, Pourhashem & Ullah. 2019.)

Ligniiniä voidaan erottaa puumassasta myös fraktioimalla. Tässä menetelmässä lignoselluloosan ainesosat erotetaan ligniiniin, selluloosaan ja hemiselluloosaan. Yksi tällainen fraktiointi menetelmä on  $\gamma$ -valerolaktonilla (GVL) fraktiointi. Tässä GVL/vesi fraktioinnissa  $\gamma$ -valerolaktoni toimii liuottimena, jolla ainesosat saadaan erilleen. Ligniini voidaan sen jälkeen eristää keittoliuoksesta puhtaampana kuin muilla menetelmillä, näin saatu ligniini on rikitön ja sillä on matala sokeripitoisuus. (Aalto yliopisto 2021.)

Suurin osa tuotetusta ligniinistä, noin 60 miljoonaa tonnia, poltetaan energiaksi ja lämmöksi. Tästä voitaisiin erottaa noin neljäsosa ligniiniksi ja käyttää muuhun kuin energian tuotantoon, eli vuosittain noin 15 miljoonaa tonnia. (Uusi puu 2017.) Potentiaalista raaka-ainetta erilaisiin sovelluksiin olisi kyllä saatavilla, varsinkin jos saataisiin enemmän tuotettua muita, puhtaampia ja kuivempia, ligniini laatuja kuin lignosulfonaatteja.

### 3 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli etsiä tietoa siitä mitkä tahot tekevät ligniiniin liittyvää tutkimusta ja millaisia sovelluksia ligniiniin hyödyntämiseen on kehitetty. Työ tehtiin Tampereen ammattikorkeakoululle antamaan tietoa ligniiniin liittyvästä tutkimuksesta ja sovelluksista.

Kirjallisuuskatsaukset voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin, kuvaileva kirjallisuuskatsaus, systemaattinen kirjallisuuskatsaus ja meta-analyysi. Tämä opinnäytetyö tehtiin käyttäen kuvailevan kirjallisuuskatsauksen menetelmää. Kuvailevassa tutkimusmenetelmässä kootaan yhteen tietoa aiheesta sen tarkastelua ja jäsentelyä varten. Tämä tutkimusmenetelmä on aineistolähtöistä ja siinä etsitään vastauksia tutkimuskysymykseen/kysymyksiin. Kuvaileva kirjallisuuskatsaus on vapaamuotoinen, sen toteuttamiseen ei ole tarkkoja sääntöjä tai rajoituksia. (Kinnunen 2016, 14. Piilonen, Schnabel 2021, 15.)

Kuvaileva kirjallisuuskatsaus on yleiskatsaus tutkittavaan aiheeseen eikä aineiston valintaa rajaa tiukat säännöt. Tutkittavaa ilmiötä pystytään kuvaamaan tarvittaessa laaja-alaisesti ja sen ominaisuuksia luokittelemaan. Tätä metodologia voidaan käyttää itsenäisesti tai muiden metodien kanssa, kuten esimerkiksi systemaattisen kirjallisuuskatsauksen kanssa. (Salminen 2011.)

Tutkimuskysymys työssä oli, kuka tutkimusta tekee ja mitä sovelluksia ligniinistä on? Aluksi selvitettiin, kuka tekee ligniiniin liittyvää tutkimusta ja kehitystä. Tämän jälkeen tarkasteltiin näiden toimijoiden sovelluksia tarkemmin. Tiedonhaku tapahtui suurimmaksi osin internetin avulla.

Alla olevassa taulukossa on ne hakulauseet ja sanat, joilla tulokset pääasiassa saatiin.

Google-haku	
Hakulauseet	Hakusanat
*ligniini* AND *tutkimus* OR *kehitys*	ligniini, lignin
*ligniini* AND *tutkimus* AND *vuotta*	FinnCERES
*ligniini* AND *sovellukset*	UPM
*ligniini* AND *rakenne*	Stora Enso
ligniinin erottaminen	mikromuovi
	metsä
	RenFuel
	viskoosi
	ExpandFiber
	Prolignin
	lignoboost

Taulukko 1. Googlen hakulauseet ja hakusanat.

Alapuolella on Tampereen yliopiston ja Tampereen ammattikorkeakoulun kirjaston hakuohjelmalla tehdyt haut.

Andor-haku	
Hakulauseet	Hakusanat
*ligniini* AND *tutkimus*	ligniini
*ligniini* AND *sovellus*	

Taulukko 2. Andorin hakulauseet ja hakusanat

Edellä olevat haut eivät edusta koko tiedonhaun laajuutta, monia pienempiä ja vähän isompiakin hakuja ei listassa ole. Tällaiset haut olivat muun muassa tekstissä olevien linkkien seuraamista sekä erilaisten sanojen ja termien tarkistamista. Taulukoista löytyy tärkeimmät tehdyt haut.

Hakujen tuloksena tuli yleensä erilaisia internetjulkaisuja, yritysten ja muiden tahojen verkkosivuja, verkossa saatavilla olevia tutkimuksista ja uutisia. Saadut

tulokset arvioitiin ja niistä valittiin sopivimmat aiheet, joita tarkasteltiin tarkemmin. Esimerkiksi Andor-hauissa oli huomattavan paljon erilaisia patenteja.

Työn aikana tehtiin myös yksi haastattelu työhön liittyen. Haastattelu tehtiin UPM:n edustajalle ja siinä keskusteltiin UPM:n ligniiniin liittyvistä projekteista ja tuotteista. Jotain sellaisia hankkeita on myös menossa, jotka eivät ole julkisia. Tällaisista hankkeista ja projekteista haastateltava ei voinut kertoa.

## 4 YHTEISTYÖT JA LAAJEMMAT HANKKEET

Tässä kappaleessa on listattu vastaan tulleet eri toimijoiden väliset tutkimus- ja kehitys yhteistyöt sekä muut laajemmat projektit. Tällaiset olivat yleensä oppilaitosten välisiä, oppilaitosten ja yrityksiä välisiä tai yritysten välisiä. Osassa hankkeita oli huomattavasti enemmän osallistujia.

### 4.1. Selluteollisuus

Selluteollisuudessa on aina ollut tarve löytää entistä tehokkaampia tapoja erottaa ligniini sellusta. Tämän erotuksen jälkeen sellusta voidaan tehdä paperia ja kartonkia. Tuotteita voidaan tehdä myös mekaanisesta massasta, jossa ligniini on massan seassa.

Sellunkeiton aikana ligniini erotetaan muusta keittoliemestä ennen kuin sellua voidaan käyttää paperin ja kartongin valmistukseen. Jäljelle jäänyt jäännöslieppi, jota kutsutaan mustalipeäksi, käsitellään prosessissa käytettyjen kemikaalien takaisin saamiseksi. Kierrättämättä jäänyt osa liemestä poltetaan energiaksi. (UPM n.d. Metsä Fibre n.d.)

Ligniinin tutkimuksen yhteydessä on saatu ymmärrystä ligniinin ominaisuuksista ja sen käyttäytymisestä prosesseissa.

Mustalipeän poltto on yleensä ollut prosessin pullonkaula, joten jos ligniini saadaan tehokkaasti pois jäljelle jäävästä liemestä nopeuttaa se liemen käsittelyä. Tehokkaampi mustalipeän käsittely kasvattaisi tehtaan kapasiteettia ilman suuria investointeja. (Mäntyranta 2014.)

### 4.2. COLIAD-projekti

Aalto yliopiston ja VTT:n tutkijat tekivät yhteistutkimuksen vuosina 2016–2018 nimeltä COLIAD-projekti. COLIAD-projektissa etsittiin yritysten kanssa keinoja tehdä ligniinistä korkean jalostusasteen biotuote, jota voitaisiin tuottaa huomattavia määriä. Projektissa onnistuttiin kehittämään yksinkertaisella valmistustavalla pallomaisia ligniinipartikkeleita, joiden halkaisija on noin kaksisataa nanometriä. Pallojen koko ja pintaominaisuuden tällä menetelmällä

ovat tasaisia ja niiden pintakemiaa on helppo muokata. Partikkelit voidaan helposti sekoittaa veteen tai muihin väliaineisiin ja sitä kautta saada haluttuun kohteeseen. (Ashok, Xiao 2021. Aalto-yliopisto 2018.)

Ligniinistä valmistettujen pallomaisia partikkeleita voidaan käyttää osittain korvaamaan liimoissa oleva fenoli sekä niiden on testattu pärjäävän muille pinnoitteille puun UV-suojana. Mahdollisia sovelluskohteita on myös vedenpuhdistuksessa, lääkeaineidenkuljetuksessa ja biokatalyyttien kuljettajamateriaalina. (Ashok, Xiao 2021.)

Yksinkertaisen valmistusmenetelmän ansiosta partikkeleiden tuotanto soveltuu hyvin teolliseen tuotantoon. Lisätutkimus ja jatkokehitys avaavat tulevaisuudessa myös muita sovelluskohteita kuin edellä mainitut. (Aalto-yliopisto 2018.)

### **4.3. FinnCERES**

FinnCERES on VTT:n ja Aalto yliopiston yhteinen ligniinin, selluloosa ja hemiselluloosan hyödyntämiseen tähtäävä työryhmä/osaamiskeskittymä. Tarkoituksena on tehdä edellä mainituista aineista erilaisiin sovelluksiin käytettäviä aineita ja korvata fossiilisista raaka-aineista tehtyjä materiaaleja. Mukana on ollut alusta asti myös metsäteollisuuden edustajia Suomesta ja ulkomailta. FinnCeresillä on käynnissä useita tutkimusprojekteja, joiden parissa työskentelee noin 200 tutkijaa. (VTT 2018.)

FinnCERES-työryhmän tarkoituksena on etsiä ja kehittää tulevaisuuden ratkaisuja metsäteollisuudelle. Tämä tarkoittaa uusia lignoselluloosaan perustuvia tekniikoita ja sovelluksia. Tutkijat tarkastelevat lignoselluloosan ominaisuuksia molekyyli- ja nanotasolla. Tutkijat testaavat miten kyseinen materiaali käyttäytyy ja miten sitä voisi hyödyntää erilaisissa sovelluksissa. Yksi tärkeä tutkimussuunta on löytää vaihtoehtoja muoville. Sellaisella aineella pitäisi olla muovia vastaavat ominaisuudet, mutta se olisi biohajoavaa ja sen pitäisi olla suhteellisen edullista valmistaa. (FinnCERES n.d. & Biotalous 2019.)

Muovin korvaaminen kokonaan tuskin onnistuu, ainakaan pitkään aikaan, mutta muovin korvaamista biomateriaalilla erilaisissa tuotteissa kuten pakkauksissa,

tekstiileissä ja suodattimissa kehitetään. Biomateriaalia käytön soveltuvuutta tutkitaan myös elektroniikassa ja optiikassa, Energian tuotannossa ja -varastoinnissa. (FinnCERES n.d & Biotalous 2019.)

Hankkeessa tutkitaan selluloosan käyttöä nano- ja optoelektronikassa, puolijohteissa ja energian varastoinnissa. Nämä sovellukset perustuvat nanosellun kykyyn taittaa valoa ainutlaatuisella tavalla. Nanosellua sisältäviä komponentteja saadaan hankkeen tutkijoiden mukaan odottaa vielä muutama vuosi. Hankkeen alussa arvioitiin, että elektroniikassa sovelluksia saattaa tulla viiden vuoden jälkeen. (VTT 2018.)

#### **4.4. ProLignin**

ProLignin-hanke oli Woodwisdom-netin ja Era-net bioenergian rahoittama projekti, johon osallistui Suomesta VTT, Valmet ja Stora Enso. VTT toimi myös hankkeen ja Suomen koordinaattorina. Hankkeeseen osallistui 16 toimijaa, yrityksiä ja korkeakouluja. Hanke alkoi 1.1.2012 päättyi 31.12.2014. (Helsingin yliopisto 2022) Hankkeen tarkoitus oli kehittää ja tutkia kestävä kehityksen kannalta parempia tuotteita saatavilla olevasta ligniinistä sekä tarkastella muista kuin puusta ja sellunkeitosta saatavan ligniinin käyttökelpoisuutta. (Liitiä 2014, Era-net Bioenergy n.d.)

Projektissa tarkasteltiin erilaisista lähteistä saatujen ligniinien eroja ja niiden soveltuvuutta erilaisiin käyttökohteisiin. Tutkittaviin ligniinilaatuihin kuuluivat kraft-ligniini ja hyrdolyysi-menetelmällä saatava raaka-aine, joka sisältää ligniiniä. Sooda ja sooda AQ ligniini (soda lignin, soda AQ lignin), höyryräjähdys ligniini (steam explosion) ja orgaanisella liuottimella erotettu ligniini (organosolv lignin). (Liitiä 2014.)

Laaduista tutkittiin niiden kemiallista koostumusta, muun muassa fenolin määrää ja molekyyliainetta. Tarkastelun jälkeen tutkittiin ligniinilaatujen sopivuutta erilaisiin sovelluksiin. Tarkoituksen oli kartoittaa ja etsiä sopivin ligniinilaatu erilaisiin sovelluksiin. (Liitiä 2014.)



Projektissa tutkittiin ligniinilaatujen soveltuvuutta lämpökovettuviin ja LPF (lignin-phenol-formaldehyde) hartseihin, käytettäväksi lastulevyjen ja vanerien tekoon. Lisäksi tutkittiin ligniiniä sisältävän polyuretaani hartsin soveltuvuutta vaahtoihin ja valuhartseihin. Muita hankkeen kohteita oli hartsien käyttö ruoka- ja juomapakkausten päällystyksessä. Ligniini pohjaisen epoksihartsin kehittäminen ja käytön tutkiminen metallin päällystyksessä, elektroniikan eristyksessä, kuidun vahvistajana muoveissa ja liimaamisessa. (Liitiä 2014.)

Ligniini pohjaisen kestopuovin käyttöä komposiiteissa tarkasteltiin projektin aikana sekä ligniini-polyetyleni sekoituksen käyttöä kuituvahvisteisissa komposiiteissa. Lisäksi projektin aikana tutkittiin ligniinipohjaisten levitys- ja notkistusaineiden käyttöä. (Liitiä 2014.)

Hankkeessa todettiin, että PF (phenol-formaldehyde) hartsien reaktiivisuutta saatiin parannettua käsittelemällä niitä fenolilla ja emäksisellä aineella tehdyllä reaktiolla. Polyuretaani vaahdot ja valuhartsit antavat hyviä mekaanisia ominaisuuksia vähän käytettynä.

Metallipakkausten päällystäminen hartsilla onnistui hyvin. Hartsit tarttui hyvin ja kesti. Ligniini pohjaisten kestopuovien käytössä komposiiteissa onnistuttiin myös, ne sopivat yhteen hyvin muiden aineiden kanssa. Ainakin projekteissa mukana olleissa komposiiteissa. (Liitiä 2014.)

Hankkeesta oli hyötyä koko arvoketjulle, ligniinin erottamisesta sovellusten kehittämiseen. Hankkeen aikana saatiin uutta tietoa ligniinistä, sen laadusta ja mahdollisista sovelluksista. Hankkeen aikana erilaiset toimijat tekivät tutkimusta yhdessä ja saivat näin luotua uusia suhteita sekä syvensivät yhteistyötään. (Liitiä 2014.)

#### **4.5. ExpandFiber**

ExpandFiber on Fortumin ja Metsä Groupin yhteinen tutkimus- ja kehitysprojekti. Hanke aloitti toimintansa 2020 ja kestää vuoteen 2024. Sen tarkoituksena on jalostaa puusta saatavia biomassoja, muun muassa ligniiniä, ja kehittää niiden käyttöä. Jalostuksen ja kehityksen lisäksi tarkoituksena on kaupallistaa kehitetyt tuotteet. Tarkoituksena on vastata biopohjaisten ja ympäristöystävällisten

tekstiilien ja muiden tuotteiden kasvavaan kysyntään sekä vähentää tuotteiden hiilijalanjälkeä. (ExpandFiber n.d.)

Hankeeseen kuuluu 80 jäsentä, joista 68 on suomalaisia ja 12 ulkomaalaisia. Mukana on yrityksiä ja toimijoita teollisuudesta, palvelu/teknologia alalta sekä korkeakouluja ja yliopistoja. Käynnissä on useita projekteja, jotka keskittyvät erilaisiin biotuotteisiin ja eri materiaaleihin. Esimerkiksi Fortum keskittyy oljen tutkimiseen ja hyödyntämiseen. (ExpandFiber n.d.)

Laajempi tarkoitus on luoda toimijoiden kesken yhteistyöalusta, jossa eri toimialoilta olevat toimijat voivat tehdä yhteistyötä. (Business Finland 2021)

Tämän laajan toiminta- ja yhteistyöympäristön avulla toimijat saavat kilpailuetua. Yhteistyön tarkoitus on myös luoda sekä ylläpitää alustaa, jolla voi testata ideoiden ja teknologioiden toimivuutta. (ExpandFiber n.d.)

Ligniinin osalta hankkeen tavoitteet ovat tehokkaampi erotus sivuvirroista sekä etsiä sovelluksia, joilla ligniiniä voidaan käyttää kestopuoveissa, liimoissa ja biokomposiiteissa. Tutkia ligniinin käyttöä aineiden erottamiseen liuoksessa. Kehitellä sovelluksia, joilla voitaisiin estää aineiden vajoamista pohjaan tai paakkuuntumista. Lisäksi tutkia ja kehittää ymmärrystä ligniinin pintakemiasta. Tuntemisen ja ymmärryksen lisääminen auttaisi kehittämään ja luomaan uusia sovelluksia. (ExpandFiber n.d.)

## **5 KORKEAKOULUJEN KEHITYSHANKKEITA**

Tässä kappaleessa on esitelty eri koulujen ligniiniin liittyviä projekteja ja hankkeita. Näissä hankkeissa on tarkoitus saada jokin käytännön sovellus aikeiseksi tai parantaa ja kehittää jo olemassa olevaa sovellusta. Vaikka mitään konkreettista hyötyä ei suoraan tulisikaan, niin hankkeen aikana saatu ymmärrys ja tieto auttavat tulevia projekteja ja sovelluksia.

### **5.1. Tampereen yliopiston projekti**

Tampereen yliopistossa on meneillään hanke, joka tähtää ligniinin hyödyntämiseen kehittämällä uusia molekyyli ja solutason työkaluja. Novo Nordisk Foundation on antanut Tampereen yliopistolle rahoitusta ligniinin hyödyntämisen tutkimukseen. Tutkimushankkeen nimi on Improving metabolic diversity and efficiency of bacteria for lignin valorization. Tutkimusta johtaa Suvi Santala ja ryhmään kuuluu hänen lisäksi 5 muuta tutkijaa. Projekti alkoi 2021 ja kestää viisi vuotta. (Aatinen 2021 & Tampereen yliopisto n.d.)

Tutkimuksessa kehitetään teknologioita, joilla ligniinille saadaan ominaisuuksia, joita sillä ei luonnossa ole. Tarkoituksena on muokata bakteereja synteettisen biologian ja metaboliamuokkauksen avulla, näillä muokatuilla bakteereilla muunnellaan sitten ligniiniä. (Aatinen 2021.)

Tämän bioteknisen hankkeen tarkoituksena on muuttaa ligniiniä niin että sillä voisi korvata fossiilisia raaka-aineita esimerkiksi voiteluaineissa. Hankkeen aikana tehdään tutkimusyhteistyötä ulkomaalaisten tahojen kanssa. Yksi taho on yhdysvaltalainen Georgian yliopisto ja toinen on myös yhdysvaltalainen Kansallisen uusiutuvan energian laboratorio. (Aatinen 2021.)

### **5.2. Aalto yliopiston puunsuoja-aine**

Aalto yliopistossa on kehitteillä biopohjainen puunsuoja. Aalto yliopiston kemiantekniikan tutkijat ovat kehittäneet ligniinistä puunsuoja-ainetta. Kehittäjien mukaan ligniinistä valmistettu aine on lupaava, se säilyttää puun luonnollisen rakenteen, suojaa tahroilta ja auringolta. Aineella on hyvät antibakteeriset ja UV-

säteilyltä suojaavat ominaisuudet. Se auttaa suojaamaan puuta myös jäätymisestä. (Aalto-yliopisto 2021.)

Tällä hetkellä monet suoja-aineet ovat öljypohjaisia. Monet sisältävät myös haitallisia ja öljypohjaisia kemikaaleja. Kasveista valmistetut pinnoitteet taas eivät kestä kulutusta ja niitä yleensä käytetään yhdessä synteettisten aineiden kanssa parantamaan niiden ominaisuuksia. Näin saadaan kyllä vähennettyä öljypohjaisten ja ympäristölle haitallisen kemikaalien käyttöä, mutta olisi parempi, jos ei olisi tarvetta käyttää synteettisiä aineita lisänä. (ACS Publications 2021.)

Myrkyttömillä ja luonnonmukaisemmilla pinnoitteilla olisi helpompi noudattaa kemikaalimääräyksiä ja ne olisivat myös turvallisempia. Turvallisempia valmistaa, käyttää ja lopulta varmaankin miellyttävämpi vaihtoehto myös loppukäyttäjälle. (ACS Publications 2021.)

Esimerkiksi ihmisten terveyteen ja otsonikerrokseen vaikuttavia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä on säännelty. Myös muiden pinnoiteteollisuudessa käytettävien kemikaalien kuten bisfenoli A:n, formaldehydin ja titaanioksidin käyttöä säädellään. Ligniinipohjaisessa pinnoitteessa ei olisi edelle mainitun kaltaisia ongelmia. (Aalto-yliopisto 2021.)

### **5.3. Aalto-yliopiston liima**

Aalto-yliopistossa on kehitetty liima, joka korvaa formaldehydin puurakentamisessa. Liiman pääraaka-aine on ligniini. Aikaisemmat ligniinipohjaiset liimat vaativat pitkät esikäsitteily kemikaaleilla ennen kuin ligniiniä voitiin käyttää formaldehydin korvaajana. Uudessa valmistustavassa valmistaminen ei kestä kuin muutamia minuutteja, tuntien sijasta. Valmistuksessa ei myöskään tarvitse lämmittää raaka-aineita enempää kuin muiden liimojen valmistuksessa, joten se on energia tehokkaampaa. Sivutuotteina tulee suolaa ja natriumhydroksidiä tai lipeää. Liima valmistetaan puhdistetusta kraftligniinistä. (Aalto yliopisto 2022.)

Kun muissa ligniinipohjaisissa liimoissa ligniini pitoisuus on yleensä 20-50% niin tässä uudessa liimassa se on yli 90%. Tällä liimalla on yhtä hyvät ominaisuudet

kuin muillakin liimoilla ja lisäksi se on palamista hidastavaa. Koska se on myrkytöntä, valmistuksessa ja loppukäytössä ei ole kemikaaleille altistumisen vaaraa. Näin puurakentamisesta saadaan turvallisempaa ja puun käyttö rakentamisessa onkin lisääntynyt viime aikoina. Syitä puurakentamisen lisääntymiseen on muun muassa raaka-aineiden hinta ja ympäristötietoisuus. (Aalto yliopisto 2022.)

#### **5.4. Aalto-yliopiston ligniinipartikkelit**

Lignosphere™ on Aalto yliopiston pieniin ligniinipalloihin keskittyvä tutkimushanke. Hankkeessa valmistetaan ja tutkitaan halkaisijaltaan noin 200 nanometrin kokoisia ligniinipalloja, jotka kestävät happamia olosuhteita ja liuottimia. (Aalto yliopisto 2022.)

Nämä pienet ligniinipallot mahdollistavat ligniinin käytön liimoissa, pinnoitteissa ja komposiiteissa. Lignosphere partikkeleita voidaan valmistaa edullisesti mustalipeästä jo tehtaalla olemassa olevalla laitteistolla suljetussa prosessissa. Näin saadaan myös talteen käytetyt liuottimet, eikä tarvita juurikaan uusia kemikaaleja. (Lignosphere™ n.d.)

Kehitys- ja tutkimustyö näiden ligniinipallojen kanssa jatkuu. Näille partikkeleille löytyy varmasti uusia käyttökohteita tulevaisuudessa sekä partikkelien ominaisuuksia voidaan paremmin hyödyntää tulevissa sovelluksissa. (Lignosphere™ n.d.)

#### **5.5. Oulun ja Jyväskylän yliopistojen tutkimusprojekti**

Vuonna 2020 julkistiin artikkeli missä käsiteltiin ligniinillä vahvistettujen tanniini- ja furaanivaahtojen valmistusta ja ominaisuuksia. Tutkimus tehtiin Oulun ja Jyväskylän yliopistojen yhteistyönä ja mukana oli myös Fifth Innovation Oy. Artikkelit ei varsinaisesti tähdännyt sovellusten löytämiseen vaan oli enemmänkin mielenkiinnosta ja ymmärryksen vuoksi tehty. Tutkimuksessa mainitaan biopoltoaineiden tarve tulevaisuudessa, joiden valmistukseen voitaisiin käyttää tässä tutkimuksessa saatuja tietoja. (Varila, Romar, Luukkonen, Hilli & Lassi 2020.)

Näissä vaahdoissa avainasemassa on aineet, jotka sitovat ja pitävät muut aineet yhdessä. Tällaisia sitovia aineita voivat olla alkoholit ja aldehydit, kuten formaldehydi, glutaraldehydi ja furfuryylialkoholi. Formaldehydin käyttöä tulisi välttää sen myrkyllisyyden takia. Projektissa tutkittiin syntyvien materiaalien mekaanista suorituskykyä, tiheyttä, pintaan syntyvien huokosten tiheyttä ja laatua. Kokeissa käytettiin kolmea erilaista ligniinilaatua, havupuusta saatua kraft-ligniiniä, lehtipuista saatua kraft-ligniiniä sekä hydrotermisesti erotettua ligniiniä. (Varila, Romar, Luukkonen, Hilli & Lassi 2020.)

Tulosten mukaan hiiltyneiden ligniinillä vahvistettujen tanniinifuraanivaahdot olivat jopa kymmenen kertaa vahvempia kuin ligniinillä vahvistamattomien. Parhaat ominaisuudet saatiin, kun ligniinipitoisuus oli 25% kaikilla ligniinilaaduilla. Huokosten ominaisuudet vaihtelivat hiukan eri ligniineillä. Huokoisuus oli suurimmaksi osaksi mikrokokoista, mutta suurempaa huokoisuus kokoa saatiin lehtipuun kraft-ligniinillä ja hydrotermisesti erottelulla ligniinillä. (Varila, Romar, Luukkonen, Hilli & Lassi 2020.)

Tutkimuksessa todettiin, että testatuilla ligniinilaaduilla voidaan valmistaa ligniinillä vahvistettuja tanniivaahdoja. Näillä vaahdoille saadaan haluttuja ominaisuuksia ja niitä voidaan käyttää erilaisiin sovelluksiin. Näitä vaahtoja voitaisiin käyttää rakentamismateriaaleissa, adsorptiossa ja kaasujen varastointi materiaaleissa. (Varila, Romar, Luukkonen, Hilli & Lassi 2020.)

## **5.6. Kajaanin yliopistokeskuksen hanke**

Kajaanin yliopistokeskuksella oli projekti, jonka tavoitteena oli parantaa syntyvien ligniinijakeiden liukoisuutta ja kehittää niiden käyttöä. Projektissa oli mukana Oulun yliopiston Kajaanin Mittaustekniikanyksikkö, Kuitu- ja partikkelitekniikanyksikkö ja mukana oli myös Kainuun St1:n bioetanolin tuotantolaitos. Pää tavoitteena oli testata ja kehittää ligniinijakeiden käyttöä maali- ja liimateollisuudessa.

Ligniinjakeiden liukoisuuden parantaminen oli yksi hankkeen tavoitteista. Se auttaisi sovellusten löytämisessä teollisuudessa. Hankkeessa syntyvien tulosten

hyödyntämistä ja jatkotoimenpiteitä selvitetään mukana olleiden yritysten kanssa.  
(Oulu 2022.)

## 6 YRITYSTEN PROJEKTEJA JA SOVELLUKSIA

Tässä kappaleessa on esitelty yritysten ligniiniin liittyviä tuotteita ja projekteja. Kappaleessa esitellyt sovellukset ja tuotteet ovat saatavilla kuluttajille, mutta kehitys niiden ympärillä varmasti jatkuu. Yritysten sovelluksissa korvataan olemassa oleva, yleensä fossiilipohjainen, tuote ympäristöystävällisemmällä ja turvallisemmalla.

### 6.1. Stora Enson NeoLigno®

NeoLigno® on Storan Enson kehittämä ja vuonna 2021 lanseeraama kraftligniinistä valmistettu sideaine. Se ei sisällä haitallisia kemikaaleja kuten formaldehydiä ja isosyanaattia. Stora Enson mukaan nämä biopohjaiset sideaineet täyttävät samat tekniset vaatimukset kuin fossiilipohjaiset sideaineet. Tässä tapauksessa vaatimuksina on muun muassa tartuntalujuus ja kosteudenkestävyys. (Stora Enso n.d.)

Tämän sideaineen käyttökohteita ovat Stora Enson tuotemerkit NeoLigno® Trim lastulevylle sekä NeoLigno® Therm eristeille. Kyseisiä tuotteita valmistavat yritykset voivat hankkia näitä sideaineita ja tehdä näin ympäristöystävällisempiä tuotteita. (Stora Enso n.d.)

NeoLigno® sideaineilla voidaan suoraan korvata vanha sideaine muuttamatta prosessia. Näin ollen sen käyttöönotto on yksinkertaista. Koska tämä biopohjainen sideaine ei sisällä haitallisia kemikaaleja on sen käyttö turvallisempaa sekä helpompaa kun ei tarvitse suojautua yhtä paljon. (Stora Enso n.d.)

### 6.2. Stora Enson NeoFiber®

NeoFiber® on Stora Enson kehittämä hiilikuitu, joka valmistetaan selluloosasta ja ligniiniinistä. Tällä hetkelle hiilikuidut valmistetaan pääasiassa öljypohjaisesta polyakryylnitriilistä ja sen jalostaminen hiilikuiduksi kuluttaa paljon energiaa. Kuumentamiseen perustuvassa valmistuksessa vapautuu myös myrkyllisiä kaasuja. (Stora Enso n.d.)



Stora Ensolla ja Cordenkalla on kehitysyhteistyö, jossa NeoFiber®:iä valmistetaan muuttamalla selluloosa ensin viskoosiksi ja sekoittamalla se sitten ligniinin kanssa. Näin saadaan liuos, josta valmistetaan alkuvaiheen kuitulankaa. Tämä kuitulanka muutetaan hiilikuiduksi lämpökäsittelyllä. Tarkempi prosessin kulku on salainen. (Stora Enso 2020.)

Selluloosaan ja ligniiniin pohjautuva hiilikuitu on Stora Enson mukaan yhtä hyvää mekaanisilta ominaisuuksiltaan kuin öljypohjainen hiilikuitu. Tämä biopohjainen hiilikuitu voidaan valmistaa huomattavasti vähemmällä kuormituksella ympäristölle ja siitä valmistetuilla tuotteilla on pienempi hiilijalanjälki. (Stora Enso n.d.)

### **6.3. Stora Enson Lignode®**

Stora Enso tutkii ja kehittää ligniinistä vaihtoehtoa akuissa käytetyille grafiitille. Lignode® -akussa ligniini korvaa grafiitista valmistetun anodin. Ensin ligniini erotetaan puusta sellun valmistuksen yhteydessä ja sitten se jalostetaan kovahiilijauheeksi. Tästä jauheesta valmistetaan kovahiilielektrodit, jotka korvaavat nykyisin akuissa olevat elektrodit. (Stora Enso n.d.)

Nykyään iso osa grafiitista on synteettisesti valmistettu öljyteollisuuden sivuvirroista. Näiden sivuvirtojen hyödyntäminen on hankalaa ja energiaa kuluttavaa. Valmistukseen kuuluu korkeanhiilipitoisuuden omaavien aineiden, kuten öljykoksin ja kivihiilitervapien, kuumentamista 2500–3000° asteeseen. Näin korkeassa lämpötilassa muut aineet haihtuvat ja syntyvä grafiitti järjestyy kristallimaiseen rakenteeseen. (King n.d.)

Luonnon grafiitti taas täytyy kaivaa maasta ja puhdistaa kemikaaleilla. Luonnon grafiitin saaminen käyttökelpoiseksi vaatii paljon energiaa ja ympäristölle haitallista kaivostoimintaa. (Mäntyranta 2019.) Stora Enson tavoitteena on valmistaa jopa tehokkaampi akku kuin nykyiset akut ovat. Tavoitteena on parempi teho, eli suurempi lataus- ja purkunopeus. (Stora Enso n.d.)

Maailman akkumarkkinoiden ja kysynnän kasvaessa olisi tärkeää löytää ratkaisuja, miten tähän kysyntään voitaisiin vastata niin että luonnonvarat riittävät. Stora Enson kehittämä teknologia skaalautuu hyvin ja olisi valmis teollisen mittakaavan tuotantoon. (Stora Enso n.d.)

Ligniinistä valmistettavat akun anodit auttaisivat ilmastonmuutoksen torjunnassa, kun raaka-aine tulisi jo olemassa olevasta sivutuotteesta ja olisi ainakin osittain biopohjaista. Tästä olisi myös hyötyä ja suuria mahdollisuuksia metsäteollisuudelle. Metsäteollisuus voisi myydä uusia biotuotetta sekä niihin liittyvää osaamista valmistuksessa ja käytössä muualle. (Mäntyranta 2019.)

#### **6.4. UPM:n liima**

UPM:llä on ligniinistä kehitetty vanerin teossa käytettävä liima. UPM käyttää tätä liimaa omassa vanerin tuotannossaan. Liima valmistetaan kraft-ligniinistä, jota tuotetaan sellutehtaan prosessin mustalipeästä. Ligniini ja lisäaineet keitetään, jonka jälkeen syntynyt hartsi varastoidaan. Ennen itse käyttöä hartsiin sekoitetaan kovetinta ja vettä. Sekoituksen jälkeen valmis liima pumpataan väliaikaiseen säiliöön ja siitä prosessiin. (UPM Plywood n.d.)

UPM korvaa nykyisin tällä liimalla vähintään 50 % käytetystä fenolista omassa vanerin valmistuksessaan. Tällä liimalla valmistettu vaneri on yhtä hyvää ominaisuuksiltaan kuin täysin fenolilla valmistettu vaneri. Tavoite on, että kaikki vanerin valmistusaineet tulevat metsästä. Biopohjaisella liimalla valmistettu vaneri sopii paremmin sisä- ja asuintiloihin, koska se sisältää vähemmän vaarallisia kemikaaleja. (UPM Plywood n.d.)

#### **6.5. UPM:n biojalostamo**

UPM rakentaa Saksassa uutta biojalostamoja Leunaan. Rakentaminen tai ainakin suunnittelu ja resurssointi alkoi syksyllä 2020 ja tehtaan on tarkoitus käynnistyä vuoden 2022 loppuun mennessä. Tehdas on monituotetehtas, jonka tarkoitus on käyttää mahdollisimman montaa puun komponenttia ja näin luoda arvoa koko puusta saatavalle biomassalle. (Paperi ja puu 2020.)

Tehtaan päätuote tulee olemaan biomonoetyleeniglykoli, jolla on sovelluksia muun muassa tekstiileissä, pakkauksissa, PET-pulloissa ja jäänestoaineena. (Paperi ja puu 2020) Yksi tehtaan tulevista tuotteista on ligniinipohjaiset täyteaineet, joita voidaan käyttää erilaisissa kumituotteissa. Niitä voidaan käyttää hiilimustan ja silikan korvaamiseen. (UPM 2020.)

## **6.6. UPM:n edustajan haastattelu**

Tässä on muistiinpanot UPM:n edustajan Suvi Pietarisen kanssa käydystä keskustelusta. Sain sellaisen käsityksen, että muitakin ligniiniin liittyviä hankkeita tai projekteja olisi menossa tai tulossa, mutta edustaja ei voinut kertoa niistä. Kaikki muistiinpanoissa olevat asiat ovat julkisesti saatavilla.

### **6.6.1 Muistiinpanot**

Ligniiniin liittyvää tutkimusta ja kehitystä on tehty aktiivisemmin noin 10 vuotta. Ensimmäiset kehitetyt tuotteet olivat hartseja. Nykyään näitä hartseja käytetään WISA-vanerien liimauksessa. Ligniiniin pohjainen liima korvaa 50 % fenolista ja voi korvata 80 %. Tavoitteena on kokonaan fenolin korvaaminen liimassa.

UPM on tehnyt tutkimusyhteistyötä ruotsalaisen Lignin Industriesin kanssa ligniinin käyttämiseen erilaisissa muovituotteissa. Näin saataisiin korvattua ainakin osa muovin fossiilipohjaisista aineista. Yhtenä haasteena on sekoitemuovin kierrätettävyys. Nykyinen kierrätysprosessi ei sovellu sekoitemuoveille, tällaiset muovit tällä hetkellä todennäköisesti poltettaisiin energiaksi. Jos saataisiin kokonaan biohajoava muovi tehtyä, voitaisiin sitä käyttää kertakäyttöisenä. Sijoittaa esimerkiksi maahan niin että pakkaus vapauttaa sisältönsä ja sen jälkeen hajoaa.

UPM on tutkinut ja kehittänyt ligniinipohjaisten täyteaineiden käyttöä hiilimustan korvaajana kumi- ja muovituotteissa. Käyttökohteita on esimerkiksi johtojen suojakumi ja vedenkestävän pahvin suojakalvona. UPM rakentaa Saksan Leunaan uutta biojalostamo, joka pystyy tuottamaan suurempia määriä täyteainetta. Tehdas on jo melkein valmis, koeajot alkavat syksyllä

Tukholman yliopistossa työskentelevä Mika Sipponen tutkii ligniiniä ja siihen liittyviä sovelluksia. Edustajan mukaan hänen tutkimuksistaan saattaisi tulevaisuudessa tulla ligniiniin liittyviä kaupallisia sovelluksia.

### 6.7. RenFuelin Lignol®

Ruotsalainen RenFuel on kehittänyt ligniinistä valmistetun biopohjaisen ligniiniöljyn, Lignol®.

RenFuel ja Preem aloittivat yhteistyöhankkeen 2018 rakentaakseen maailman ensimmäisen ligniinin käsittely laitoksen. Laitos rakennettiin Rottneroksen Vallvikin sellutehtaalle Ruotsiin. Laitos valmistui 2021 ja laitos on siitä lähtien valmistanut ligniiniöljyä. Tästä ligniiniöljystä Preem sitten valmistaa erilaisia polttoaineita. (Rottneros 2018)

Prosessi voidaan skaalata sellutehtaan mukaan ja liittää suoraan tehtaan omaan prosessiin. (RenFuel n.d.)

Valmistuksessa mustalipeä kerätään sekoitussäiliöön, johon lisätään kantajanestettä. Näin saadaan mustalipeään orgaaninenfaasi ja vesifaasi. Kantajanesteenä toimii sopiva öljy, kuten dieselöljy joku rasvahappo tai triglyseridi. Kantajanesteen lisäämisen jälkeen seos johdetaan reaktoriin. (Rönkä 2021, 26-27.)

Reaktorissa suurin osa vedestä haihdutetaan ja liuenneet kemikaalit ja ligniini muuttuvat kiinteään muotoon. Tämän jälkeen ligniini liuotetaan orgaaniseen faasiin esteröimällä. Kun ligniini on saatu kantajanesteeseen, keittokemikaalit voidaan erottaa suodattamalla. Tämän jälkeen ligniinin erotus tapahtuu monivaiheisella pesulla ja pesun päätteeksi saadaan ligniiniöljyä. (Rönkä 2021, 26-27.)

Ligniiniöljystä voidaan valmistaa biobensiiniä tai biodieseliä korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Ligniinistä valmistetulla biopolttoaineella on suurin piirtein samat ominaisuudet kuin fossiilisilla polttoaineilla, yhtenevä rakenne, energiasisältö ja suorituskyky. Tällä hetkellä ligniiniöljyllä korvataan vain osa polttoaineen valmistukseen tarvittavasta öljystä. Preem jatkaa kehitystyötä

uusiutuvien energialähteiden kanssa ja yrittää kasvattaa niiden osuutta polttoaineessa. (RenFuel n.d. & Preem n.d.)

## 7 MUIDEN TOIMIJOIDEN HANKKEITA

Tässä kappaleessa on esitelty muiden toimijoiden kuin yritysten ja korkeakoulujen tekemiä ligniiniin liittyviä tutkimuksia ja hankkeita. Tällaiset hankkeet ovat valtiollisen toimijan tai henkilön tekemiä. Esimerkiksi valtiollisen toimijan kehittämän sovelluksen etuna on että valtio saa siitä enemmän hyötyä.

### 7.1. CatLignin

CatLignin on VTT:n kehittämä ja patentoima tapa erottaa teollisuuden energiaksi menevästä mustalipeästä termisellä prosessilla reaktiivista ligniiniä. Tällä prosessilla saadaan ligniiniä, joka eroaa kemiallisilta ominaisuuksiltaan muista tällä hetkellä saatavilla olevista ligniineistä. (Uusi Puu n.d.)

Tämä tekniikka ja laitteisto voidaan integroida suoraan sellutehtaan prosessiin. Tämän jälkeen tehtaan omaa prosessia säätämällä voidaan muokata erotetun ligniinin rakennetta ja saada halutunlaisia ominaisuuksia. Nykyisillä erotustavoilla, yleensä suodattaminen ja saostaminen, ei voida kovin paljoa vaikuttaa erotettavan ligniinin rakenteeseen, vaan ligniinin rakenne ja ominaisuudet riippuvat käytetystä raaka-aineista ja tehtaan keitto-olosuhteista. (Uusi Puu n.d.)

CatLignin reaktiivista ligniiniä voidaan käyttää korvaamaan fenoli fenoli-formaldehydihartseissa. Myös liimoissa tarvittavan formaldehydin määrä saadaan näin pienennettyä. Näin voidaan vähentää kemikaalien kulutusta ja saada tuotteesta ympäristöystävällisempi. Sitä voidaan käyttää myös parantamaan säänkestoa sekä korvaamaan fossiilipohjaisia ja kalliita lisäaineita muovi- ja kumituotteissa. (Hanne Wikberg. 2017 & Cision 2017.)

CatLignin voitti jaetun ykkössijan VTT:n LigniOx-betoninnotkistin ratkaisun kanssa Uusi puu -kilpailussa 2017. Kilpailussa etsittiin puupohjaisia ratkaisuja globaalien ilmiöiden aiheuttamiin haasteisiin. Kilpailussa palkittiin parhaat puupohjaisia materiaaleja hyödyntävät ratkaisut. (Uusi Puu n.d.)

CatLignin on testattu tehdasolosuhteissa ja todettu toimivaksi ratkaisuksi erottaa ligniini mustalipeästä. Edellä mainitun muokattavuuden ansiosta se erottuu toisista ligniinin erotustavoista. Näin erotetun ligniinin käyttökohteet olisivat moninaisemmat. Teknologia on valmis laajempaankin käyttöön ja sen kaupallistamista kehitetään.

Kiinnostusta on Suomen lisäksi myös maailmalla ja suuremman kaupallistamisen odotetaan tapahtuvan muutaman vuoden sisällä. (Cision 2017.)

CatLigninin hyödyntäminen tarjoaa uusia mahdollisuuksia koko tuotantoketjussa. Sellunkeiton ohella otettaisiin talteen ligniini, jota sitten käyttäisivät liimojen ja puutuotteiden tekijät. Lopulta ligniinistä valmistetut tuotteet päätyisivät aina loppukäyttäjälle asti. (Uusi puu n.d.)

Näin saataisiin biopohjaisia ja ympäristöystävällisempiä tuotteita. Sellutehtaat saisivat enemmän arvoa muuten vain energiaksi menevästä sivuvirroista, kun ne myisivät erotettua ligniiniä. Lisäksi kemiallisesti sellua valmistavat tehtaat saisivat sivuvirtojen jalostusastetta korkeammaksi.

## **7.2. LigniOx**

LigniOx on VTT:n vuonna 2017 kehittämä ligniinipohjainen betonin notkistin. Tällä LigniOx-menetelmällä valmistetuilla notkistimilla voidaan korvata nykyisin käytettyjä öljypohjaisia notkistimia. Potentiaaliset markkinat ovat siis suuret, noin 10 miljoonaa tonnia vuodessa. (Uusi puu n.d.)

Hanke oli osa Euroopan Unionin biopohjaisen teollisuuden yhteistyöhanketta, joka oli osa EU:n Horisontti 2020 -ohjelmaa. LigniOx:ia on ollut kehittämässä VTT: kanssa useita yrityksiä, kuten Metsä Fibre, ANDRITZ ja St1. Mukana on ollut myös useita ulkomaalaisia yrityksiä, Dow Saksasta, CIMV ja Vertech Group Ranskasta, Biochemtex Italiasta, Exergy Isosta-Britanniasta ja VITO Belgiasta. (Cision 2017.)

LigniOx-menetelmässä sivuvirrasta saatu ligniini muutetaan erillisessä tehtaaseen integroidussa prosessissa vesiliukoiseksi alkalin ja hapen avulla ja suodatuksen jälkeen voidaan käyttää. Tämä menetelmä on yleiskonsepti

LigniOx:in valmistukseen. Se sopii laitokseen, jossa erotellaan ligniini tai se hankitaan suoraan jostain muualta. (LigniOx n.d.)

Toinen vaihtoehto on erottaa ligniini mustalipeästä ensin saostamalla ja sen jälkeen käsitellä se alkalilla ja hapella. Tässä valmistustavassa tarvitaan vähemmän alkalia, yleensä natriumhydroksidia ja saadaan talteen natriumia ja rikkiä. Näin ei myöskään synny niin paljon ligniinin valmistuksessa tyypillistä lentotuhkaa. (LigniOx n.d.)

Tämä biopohjainen notkistin toimi paremmin kokeissa kuin yleisemmin käytetty lignosulfonaattinotkistin ja oli myös lupaava verrattuna synteettiseen tehonotkistimeen verrattuna. Paremman suorituskyvyn lisäksi LigniOx on halvempaa valmistaa kuin öljypohjaiset notkistimet. LigniOx soveltuu myös maalien, kipsin ja painovärien notkistamiseen, kun se on muutettu vesiliukoiseksi. (Uusi puu n.d.)

LigniOx:in soveltuvuutta erityishiilenmustan, special carbon black, käyttöön on myös tutkittu. Näitä aineita käytetään muun muassa maaleissa, musteissa, elektroniikassa ja muissa erityiskohteissa. (Penta carbon n.d.) Yleensä erityishiilenmustan notkistamiseen on käytetty anionisia polyelektrolyyttejä, mutta niiden käyttö on kallista ja kestänytöntä. (Fearon, Liitiä & Kalliola 2021.)

### **7.3. Ligniini käyttö polymeerien lujite- ja täyteaineena**

Vuonna 2019 Marko Laitinen teki Tampereen yliopistolle kirjallisuusselvityksen ligniinin käytöstä polymeerimateriaalien lujite- ja täyteaineena. Työ tehtiin kirjallisuusselvityksenä ja siinä arvioitiin ligniinin yhteensopivuutta erilaisten polymeerien kanssa. Työssä esiteltiin ligniinin kemiallista rakennetta ja erilaisia ligniinin erotustapoja. (Laitinen 2019, 1.)

Yhteenvedossa pääteltiin, että ligniinillä on potentiaalia lujite- ja täyteaineeksi polymeereissä. Ligniiniä voitaisiin käyttää lujite- ja täyteaineena erilaisissa muoveissa. Lopussa arvioitiin ligniinin yhteensopivuutta erilaisten polymeerien kanssa sekä ligniinin vaikutusta lujite- ja täyteaineena. Tämän lisäksi esiteltiin mahdollisia sovelluskohteita, joissa ligniini olisi lujite- tai täyteaineena. (Laitinen 2019, 28.)



Ligniinin saatavuus teollisuuden sivuvirtana antaa hyvän pohjan sen käyttämiseen korvaamaan polymeerejä. Suurimmaksi haasteeksi arvioitiin erotusmenetelmien monimutkaisuus ja ligniinin rakenteen heikentyminen erotusprosessissa. (Laitinen 2019, 28.)

#### **7.4. Ligniini lääketieteessä**

Ligniinillä voi tulevaisuudessa olla myös lääketieteessä sovelluksia. Ligniini on lääketieteellisesti aktiivinen, kun taas selluloosa ja hemiselluloosa ovat passiivisia. Ligniiniä voitaisiin tulevaisuudessa käyttää jopa viruksen torjuntaa. Lignosulfonaatteja muodostuu, kun sulfiittisellunkeiton yhteydessä ja näillä lignosulfonaateilla on antioksidanttisia ominaisuuksia. Niiden on myös havaittu estävän Hi-viruksen lisääntymistä ilman myrkyllisyyttä soluille. (Orelma 2018.)

Ligniinin on havaittu soveltuvan erityisesti liima- ja hiilikuitusovelluksiin. Näin ollen sitä voisi käyttää tulevaisuudessa implanteissa ja muissa tukirakenteissa ihmisen kehossa. Kun käytettävät materiaalit ovat turvallisempia on niistä tehdyt osat myös turvallisempia. (Orelma 2018.)

## 8 POHDINTA

Maailmassa kulutetaan joka vuosi enemmän fossiilisiin aineisiin perustuvia tuotteita. Suurin osa polttoaineista perustuu öljyyn tai fossiilisiin aineisiin ja monissa arkipäivän tuotteissa on muovia. (Muoviyhdistys n.d.) Öljyvarannot kuitenkin ovat rajalliset, joten niihin perustuvia tuotteita täytyy ainakin osaksi korvata uusiutuvilla raaka-aineilla. Lopullinen tavoite pitäisi olla öljyn korvaaminen mahdollisimman pitkälle biopohjaisella aineella tai aineilla, ligniinillä ja sen erilaiset sovellukset olisivat ainakin osa tätä. Muita biopohjaisia mahdollisia korvavia aineita voisi olla selluloosa ja hemiselluloosa.

Muovi ja varsinkin merissä oleva mikromuovi ovat suuria haasteita. Muovia tuotetaan ja kulutetaan koko ajan enemmän mikä lisää myös muovijätteen määrää. Osa tästä jätteestä päätyy meriin ja muuttuu ajan kuluessa mikromuoviksi. Mikromuovien vaikutuksia ei vielä tunneta tarkkaan. Pelätään että hajottuaan mikroskooppiseksi muovi päätyy ihmisten ja eläinten kehoon ja elimiin. Mikromuovit vievät kehoon erilaisia kemikaaleja, kuten väriaineita ja pehmentimiä. Eikä niiden pitkän aikavälin vaikutusta kehoon tiedetä. Muovi- ja mikromuovijäte aiheuttaa jo ennen tätä ongelmia eläimille ja ympäristölle.

Muovin korvaaminen biopohjaisella ja biohajoavalla aineella olisi kestävyys- ja ympäristön kannalta tärkeää. Kuitenkin tällä hetkellä tehokkain tapa vastata muovin haasteisiin olisi kierrätyksen parantaminen. Haasteena on löytää ja kehittää tapoja saada biohajoavia tuotteita, joilla on samat ominaisuudet kuin muovista tehdyillä ja niiden valmistaminenkin pitäisi olla suhteellisen samanlaista kuin muovin. Tehtaille kynnys käyttää biopohjaista materiaalia olisi matalampi, jos siihen voisi siirtyä ilman investointeja.

Oletan että kustannukset tehtaille biopohjaisista materiaaleista on tällä hetkellä korkeammat kuin fossiilista materiaaleista. Prosessit eivät välttämättä toimisi samalla tapaa biopohjaisilla materiaaleilla. Tämän vuoksi biomateriaalit pitäisi monesti olla suoraan vanhaan prosessiin sopivia, tehtaiden ei tarvitsisi tehdä muutoksia ja kynnys käyttää niitä olisi varmasti alempi. Oletan että raaka- aineen hintakin on korkeampi biomateriaalilla kuin fossiililla aineilla. Jatkuvalla

tutkimuksella ja kehityksellä raaka-aineen hintaakin saadaan tulevaisuudessa alennettua, kun erotus- ja valmistusprosessit kehittyvät.

Aalto yliopiston kehittämä ligniinipohjainen puunsuoja vaikuttaa lupaavalta. Sen ominaisuudet ovat jopa paremmat kuin nykyisin käytetyillä aineilla. Se ei tarvitse fossiilipohjaisia ja haitallisia kemikaaleja. Sen käyttäminen olisi loppukäyttäjälle ja puun käsittelijällekkin miellyttävämpää.

Haasteena on tuotteen oletettavasti kalliimpi hinta muihin tuotteisiin nähden. Mahdollisesti myös prosessin skaalautuminen teolliseen mittakaavaan. Tulevaisuudessa prosessia kehittämällä ja mahdollisesti lainsäädännön avulla, esimerkiksi jokin tietty osuus liimasta pitäisi olla biopohjaista, saataisiin tämä aine laajempaan käyttöön.

Ligniinpohjainen betonin notkistin, LigniOx, toimii testeissä paremmin kuin muut notkistimet ja sitä voidaan saada suoraan tehtaaseen liitetystä prosessista. Yleisemmän käytön esteenä toimii varmaankin tarvittavat investoinnit tehtaaseen sekä voiko sitä valmistaa suuremmassa mittakaavassa.

Todennäköisesti jatkokehitystä tämän parissa tehdään. Kehittäminen kannattaa sillä saadaanhan tällä korvattua synteettisesti valmistettuja öljypohjaisia notkistimia. Hyvänä puolena on se, että tätä voi käyttää muihinkin tuotteisiin, kuten maaleihin, kipsiin ja painoväreihin.

Stora Ensolla on muutama kaupallistettu ligniini sovellus, NeoLigno®, NeoFiber® ja Lignode®. Näistä Neoligno on sideaine puulle, joita on muitakin saatavilla, mutta on hyvä, että on vaihtoehtoja fossiilipohjaisille liimoille. Tässä, kuten muissakin uudemmissa tuotteissa, haasteina ovat hinta ja prosessin skaalautuvuus. Hinta on todennäköisesti muita sideaineita korkeampi tällä hetkellä. Kehitys tämänkin osalta varmasti jatkuu. Prosessia saadaan paremmaksi, mikä puolestaan lisää aineen houkuttelevuutta.

Selluloosasta ja ligniinistä valmistettu hiilikuitu NeoFiber® voidaan valmistaa pienemmällä kuormituksella ympäristölle ja korvata fossiilipohjaisia hiilikuituja. Hinta tässäkin tapauksessa on varmaankin korkeampi tavallisiin hiilikuituihin verrattuna, mutta jatkokehitys ehdottomasti kannattaa. Tulevaisuudessa

hiilikuidun kysyntä vain kasvaa ja olisi ympäristön kannalta parempi, jos ainakin osa tästä hiilikuidusta olisi biopohjaista.

Renfuelin ligniiniöljy, Lignol®, ja siitä tehty biopolttoaine on erinomaisen hyvä ligniinipohjainen sovellus. Sillä voidaan korvata öljypohjaisesta aineesta noin puolet nykyisissä polttoaineissa. Uusiutuvien polttoaineiden määrä oli noin viidennes myynnistä Ruotsissa. Maailmalla uusiutuvien polttoaineiden myynti on noin prosentin kokonaismyynnistä. (Preem n.d.)

Jatkokehitykseen ligniiniöljyn ja siitä valmistettavan polttoaineen osalta kannattaa panostaa. Tulevaisuudessa toivottavasti käytetään enemmän uusiutuvista raaka-aineista valmistettuja polttoaineita. Siksi tuotannon lisääminen on tärkeää. Yritys tähtääkin maailman laajuisesti, että vuonna 2030 uusiutuvien polttoaineiden myynti olisi 15%.

## LÄHTEET

UPM. n.d. Verkkosivu. Kuinka sellua valmistetaan. Viitattu 2.7.2022.

<https://www.upmpulp.com/fi/vastuullinen-sellu/kuinka-sellua-valmistetaan/>

Metsä Fibre. n.d. Verkkosivu. Sellun valmistus. Viitattu. 2.7.2022.

<https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/sellun-tuotanto/>

Tamminen, T. 22.1.2019. Verkkosivu. Maailmassa tuotetaan joka vuosi yli 300 miljoonaa tonnia muovia – ioninesteet auttavat pienentämään kuormaa. Viitattu 6.7.2022. <https://www.unifi.fi/uutiset/maailmassa-tuotetaan-joka-vuosi-yli-300-miljoonaa-tonnia-muovia-ioninesteet-auttavat-pienentamaan-kuormaa/>

Kouhia, A. n.d. Verkkosivu. Ekologinen Ioncell-selluloosakuitu on tulevaisuuden tuote Viitattu 6.7.2022. <https://www.tekstiiliopettajaliitto.fi/toiminta/lehti/ioncell/>

Mäntyranta, H. 1.9.2020 Verkkosivu. Puu tunkeutuu elektroniikkaan – sähköakuista tehdään ekologisempia puupohjaisilla osilla. Viitattu 10.6.2022. <https://forest.fi/fi/artikkeli/puu-tunkeutuu-elektroniikkaan-sahkoakuista-tehdaan-ekologisempia-puupohjaisilla-osilla/#a9693d3b>

Mäntyranta, H. 24.6.2014. Verkkosivu. Liuskekaasun käyttö tuo tilaa ligniinille. Viitattu 5.7.2022. <https://forest.fi/fi/artikkeli/liuskekaasun-kaytto-tuo-tilaa-ligniinille/>

Uusi Puu. 2017. Verkkosivu. CatLignin – Biopohjaisia liimoja selluteollisuuden ligniinistä. Viitattu 23.6.2022. <https://www.uusipuu.fi/ratkaisut/biopohjaisia-liimoja-ligniinista/>

Aalto-yliopisto 18.5.2022. Verkkosivu. Aalto-yliopisto perustajaosakkaaksi ekologista tekstiilikuitua kehittävään Ioncell-yhtiöön. Viitattu 14.7.2022.

<https://www.sttinfo.fi/tiedote/aalto-yliopisto-perustajaosakkaaksi-ekologista-tekstiilikuitua-kehittavaan-ioncell-yhtioon?publisherId=37936456HYPERLINK>

Ashok, R. Xiao, Y. 4.2021. Verkkojulkaisu. COLIAD - Production process of colloidal lignin particles. Viitattu 1.7.2022

<https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2021-04/coliad-2019-po.pdf>

Aalto-yliopisto 16.7.2021. Verkkosivu. Biopohjainen puunsuoja päihittää perinteiset synteettiset vaihtoehdot. Viitattu 6.6.2022.  
<https://www.sttinfo.fi/tiedote/biopohjainen-puunsuoja-paihittaa-perinteiset-synteettiset-vaihtoehdot?publisherId=37936456>

Österberg, M. Henn, K. Forsman, N. Zou, T. 15.7.2021. Verkkojulkaisu. Colloidal Lignin Particles and Epoxies for Bio-Based, Durable, and Multiresistant Nanostructured Coatings. Viitattu 8.6.2022.  
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.1c06087>

Stora Enso n.d. Verkkosivu. Miten valmistamme akkuja puusta: Lignode® by Stora Enso. Viitattu 10.7.2022. <https://www.storaenso.com/fi-fi/products/lignin/lignode>

Stora Enso n.d. Verkkosivu. Biopohjainen sideaine, joka on valmistettu ligniinistä ja joka soveltuu lastulevyn ja eristeiden valmistukseen. Viitattu 18.7.2022. <https://www.storaenso.com/fi-fi/products/bio-based-materials/neoligno-by-stora-enso>

Stora Enso n.d. Verkkosivu. NeoFiber® by Stora Enso – uusiutuvaa hiilikuitua selluloosasta ja ligniinistä. Viitattu 18.7.2022. [https://www.storaenso.com/fi-fi/products/bio-HYPERLINK \"https://www.storaenso.com/fi-fi/products/bio-based-materials/neofiber\"based-materials/neofiber](https://www.storaenso.com/fi-fi/products/bio-HYPERLINK \)

Stora Enso 6.5.2020. Verkkosivu. Stora Enso and Cordenka partner to develop bio-based carbon fiber materials. Viitattu 18.7.2022.  
<https://www.storaenso.com/en/newsroom/press-releases/2020/5/stora-enso-and-cordenka-partner-to-develop-bio-based-carbon-fiber-materials>

RenFuel n.d. Verkkosivu. LIGNOL® is made of lignin in a patented, environmental friendly catalytic process. Viitattu 19.7.2022.  
<https://renfuel.se/technology/>

Rottneros 24.5.2018. Verkkojulkaisu. Preem and RenFuel to create the world's first lignin plant for biofuels. Viitattu 19.7.2022.  
<https://news.cision.com/rottneros-ab/r/preem-and-renfuel-to-create-the-world-s-first-lignin-plant-for-biofuels,c2530611>

Luke(luonnonvarakeskus) n.d. Verkkosivu. Ligniinissä kiinni olevat proteiinit ja eksovesikkelit ligniinin biosynteesissä. Viitattu 16.6.2022.

<https://www.luke.fi/fi/projektit/direxo>

Oulu 24.3.2022. Verkkosivu. Uusia menetelmiä kehitteillä Kainuussa syntyvien teollisuuden sivuvirtojen hyödyntämiseen. Viitattu 23.7.2022.

<https://www.oulu.fi/fi/kajaanin-yliopistokeskus/uutiset/uusia-menetelmia-kehitteilla-kainuussa-syntyvien-teollisuuden-sivuvirtojen-hyodyntamiseen>

Metsäteollisuus 10.1.2020. Verkkosivu. Innovaatioiden sampo: Uusiutuva ja biohajoava sellu. Viitattu 13.7.2022.

<https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/innovaatioiden-sampo>

Maa- ja metsätalousministeriö n.d. Verkkosivu. Suomen metsävarat. Viitattu 13.7.2022. <https://mmm.fi/metsat/suomen-metsavarat>

Rönkä. T-M. 2021. Tekniikan kandidaattityö. Modifioitujen ligniinituotteiden valmistus. S. 26–27, S.5–10. Viitattu 19.7.2022.

[https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/162643/Kandidaatinty%C3%B6\\_R%C3%B6nk%C3%A4\\_Tuuli\\_2021.2.pdf?sequence=1](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/162643/Kandidaatinty%C3%B6_R%C3%B6nk%C3%A4_Tuuli_2021.2.pdf?sequence=1)

Preem n.d. Verkkosivu. Sustainable products. Viitattu 23.7.2022.

<https://www.preem.com/in-english/investors-old/corral/sustainability-report-2017/focus-areas/sustainable-products/>

LigniOx n.d. Verkkosivu. LigniOx technology based on alkali-O<sub>2</sub> oxidation is a cost-efficient and environmentally friendly way to convert lignin into versatile dispersants. Viitattu 28.7.2022. <https://ligniox.eu/ligniox-technology/>

Uusi puu n.d. Verkkosivu. LigniOx - Ligniinistä ekologinen vaihtoehto betonin notkistimille. Viitattu 28.7.2022. <https://www.uusipuu.fi/ratkaisut/ekologinen-betonin-notkistin/>

Cision 18.12.2017. Verkkosivu. Suomalaista LigniOx-teknologiaa kehitetään yritys yhteistyönä betoninnotkistin markkinoille. Viitattu 24.7.2022.

<https://news.cision.com/fi/vtt-info/r/suomalaista-ligniox-teknologiaa-kehitetaan-yritys-yhteistyona-betoninnotkistinmarkkinoille,c2415854>

Fearon, O. Liitiä, T. Kalliola, A. 2021. Verkkójulkaisu. Novel lignin based dispersants for special carbon black. Viitattu 28.7.2022. [https://ligniox.eu/wp-content/uploads/2022/01/VTT\\_Bio-Polimeri-004.pdf](https://ligniox.eu/wp-content/uploads/2022/01/VTT_Bio-Polimeri-004.pdf)

King, H. n.d. Verkkosivu. Graphite. Viitattu 17.7.2022. <https://geology.com/minerals/graphite.shtml>

Penta carbon n.d. Verkkosivu. Special carbon blacks. Viitattu 31.7.2022. <https://pentacarbon.de/en/special-carbon-blacks/>

Pisto, V. 8.3.2018. Verkkosivu. Suomessa muhii jättipotti – tehdas eristi puusta aineen, josta voi tehdä ympäristöystävällisiä maaleja ja liimoja. Viitattu 31.7.2022. <https://yle.fi/uutiset/3-10098485>

Aatinen, A. 28.4.2021. Verkkosivu. Ligniinin hyötykäyttöä vauhdittavat geenimuunnellut bakteerit - tutkimukselle miljoonarahoitus. Viitattu 8.6.2022 <https://www.tuni.fi/fi/ajankohtaista/ligniinin-hyotykayttoa-vauhdittavat-geenimuunnellut-bakteerit-tutkimukselle>

UPM Plywood n.d. Verkkosivu. A new bond with nature. Viitattu 2.8.2022. <https://www.wisaplywood.com/wisa-biobond/>

Kajaanin yliopistokeskus. 24.3.2022. Verkkosivu. Uusia menetelmiä kehitteillä Kainuussa syntyvien teollisuuden sivuvirtojen hyödyntämiseen. Viitattu 23.7.2022. <https://www.oulu.fi/fi/kajaanin-yliopistokeskus/uutiset/uusia-menetelmia-kehitteilla-kainuussa-syntyvien-teollisuuden-sivuvirtojen-hyodyntamiseen>

Biotalous 4.12.2019. Verkkosivu. FinnCERES - biomateriaalien uuden aikakauden kynnyksellä Viitattu 8.6.2022. <https://www.biotalous.fi/finnceres-biomateriaalien-uuden-aikakauden-kynnyksella/>

VTT 22.10.2018. Verkkosivu. FinnCERES vie materiaalien biotalouden uudelle tasolle. Viitattu 8.6.2022. <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-jat tarinat/finnceres-vie-materiaalien-biotalous-uudelle-tasolle>

FinnCERES n.d. Verkkosivu. Key Research Themes. Viitattu 14.7.2022. <https://www.finnceres.fi/research-themes>



Metsäteollisuus 4.12.2019. Verkkosivu. Vaurautemme lähde: Sellu ja sen jatkojalosteet. Viitattu 8.8.2022.

<https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/vaurautemme-lahde>

Metsälehti 12.2.2020. Verkkosivu. Sellun tuotannossa tehtiin viime vuonna Suomen ennätys – 8,3 miljoonaa tonnia. Viitattu 8.8.2022.

<https://www.metsalehti.fi/uutiset/sellun-tuotannossa-tehtiin-viime-vuonna-suomen-ennatys-83-miljoonaa-tonnia/>

Tiseo, I. 25.2.2022. Verkkosivu. Production of pulp worldwide 2020, by region. Viitattu 8.8.2022. <https://www.statista.com/statistics/1177459/global-pulp-production-by-region/>

Orelma, H. 2018. Verkkójulkaisu. Puun merkitys lääketieteessä. Viitattu 8.8.2022. <https://www.duodecimlehti.fi/duo14412>

Aalto yliopisto 10.8.2022. Verkkosivu. Eco-glue can replace harmful adhesives in wood construction. Viitattu 14.8.2022. <https://www.aalto.fi/en/news/eco-glue-can-replace-harmful-adhesives-in-wood-construction>

Lignosphere™ n.d. Verkkosivu. It's all wood: Strong, simple and sustainable. Viitattu 15.8. 2022. <https://www.lignosphere.fi/technology>

Aalto yliopisto 30.4.2022. Verkkosivu. LignoSphere - Spherical lignin particles as a platform material for sustainable adhesives and beyond. Viitattu 15.8.2022. <https://research.aalto.fi/fi/projects/spherical-lignin-particles-as-a-platform-material-for-sustainable>

Bajwa, D.S., Bajwa, S.G., Pourhashem, G., Ullah, A.H. 1.12.2022. Verkkójulkaisu. A concise review of current lignin production, applications, products and their environmental impact. Viitattu 15.8.2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669019305382>

ExpandFiber n.d. Verkkójulkaisu. What is ExpandFiber?. Viitattu 14.8.2022. <https://www.expandfibre.com/content/uploads/2022/06/05-2022-ExpandFibre-general-presentation.pdf>

Business Finland 1.2.2021. Verkkosivu. ExpandFiber: Biomassasta kuluttajatuotteita ja materiaaleja kestäväällä tavalla. Viitattu 14.8.2022. <https://www.businessfinland.fi/ajankohtaista/caset/2021/expandfibre-biomassasta-kuluttajatuotteita-ja-materiaaleja-kestavalla-tavalla>

Lignin Industries AB. n.d. Verkkosivu. Refines forest lignin to bioplastic. Viitattu 22.8.2022. <https://www.lignin.se/>

Lignin Industries AB. n.d. Verkkosivu. Technology. Viitattu 22.8.2022. <https://www.lignin.se/technology>

Myllymäki, T. 1.4.2014. Pro Gradu -tutkielma. Ligniinin rakenne ja kemiallinen muokkaus. S. 9. Viitattu 19.7.2022. [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/136539/Teemu\\_Myllymaki\\_Pro\\_Gradu\\_01042014.pdf](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/136539/Teemu_Myllymaki_Pro_Gradu_01042014.pdf)

Koivisto, M. 2020. Opinnäytetyö. Ligniinin hyödyntäminen ja entsyymaattinen käsittely. S. 11. Viitattu 19.7.2022. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/334455/Koivisto\\_Matti.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/334455/Koivisto_Matti.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Tampereen yliopisto n.d. Verkkosivu. Bakteerien metabolian muokkaaminen ja tehostaminen ligniinin valorisoimiseksi (MetaBUG). Viitattu 29.8.2022. <https://www.tuni.fi/fi/tutkimus/bakteerien-metabolian-muokkaaminen-ja-tehostaminen-ligniinin-valorisoimiseksi-metabug>

Cision 1.2.2017. Verkkosivu. Reaktiivinen ligniini alentamaan puutuotteiden ympäristövaikutuksia. Viitattu 23.6.2022. <https://news.cision.com/fi/vtt-info/r/reaktiivinen-ligniini-alentamaan-puutuotteiden-ymparistovaikutuksia,c2178104>

Muoviyhdistys n.d. Verkkosivu. Muovit päästölähteestä hiilinieluksi. Viitattu 24.7.2022. <https://www.muoviyhdistys.fi/2020/09/07/muovit-paastolahteesta-hiilinieluksi/>

Paperi ja puu 23.9.2020. Verkkosivu. Vuosien työ kantaa hedelmää. Viitattu 18.8.2022. <https://paperijapuu.fi/vuosien-tyo-kantaa-hedelmaa/>

UPM 30.1.2020. Verkkosivu. UPM investoi uuden sukupolven biokemikaaleihin ja edistää muutosta fossiilisista raaka-aineista kestäviin vaihtoehtoihin. Viitattu 18.8.2022. <https://www.upm.com/fi/tietoa-meista/medialle/tiedotteet/2020/01/upm-investoi-uuden-sukupolven-biokemikaaleihin-ja-edistaa-muutosta-fossiilisista-raaka-aineista-kestaviin-vaihtoehtoihin/>

Kinnunen, E. 4.2016. Opinnäytetyö. Laurea ammattikorkeakoulu. Näkökulmia seksuaaliseen hyvinvointiin -kuvaileva kirjallisuuskatsaus. S. 14. Viitattu 6.9.2022.

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/111095/Kinnunen\\_Essi.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/111095/Kinnunen_Essi.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Piilonen, S. Schnabel, H. 4.2021. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Lapsen ja nuoren tukeminen perheenjäsenen kuollessa. S. 15–17. Viitattu 6.9.2022.

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/494628/Piilonen\\_Sofia\\_Schnabel\\_Henna.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/494628/Piilonen_Sofia_Schnabel_Henna.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

Salminen, A. 2011. Verkkojulkaisu. Vaasan yliopisto. Mikä kirjallisuuskatsaus? Viitattu 12.9.2022. [https://www.uwasa.fi/materiaali/pdf/isbn\\_978-952-476-349-3.pdf](https://www.uwasa.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-349-3.pdf)

Era-net Bioenergy n.d. Verkkosivu. Sustainable forest management. Viitattu 4.8.2022 <https://eranetbioenergy.net/joint-call-5/>

Liittä, T. 11.11.2014. Verkkojulkaisu. ProLignin -High-Value Products from Lignin Side-Streams of Modern Biorefineries. Viitattu 4.8.2022 <https://eranetbioenergy.net/wp-content/uploads/2020/11/9.-ProLignin-final.pdf>

Helsingin yliopisto 2022. Verkkojulkaisu. ProLignin-modernien biojalostamoiden sivuvirroista eristettyjen ligniinien jalostaminen arvokkaiksi lopputuotteiksi. Viitattu 5.8.2022. <https://researchportal.helsinki.fi/sv/projects/high-value-products-from-lignin-side-streams-of-modern-biorefiner>

Hinkka, H 3.2020. Verkkojulkaisu. Kasvisoluseinässä esiintyvät ligniini rakenteet, entsyymaattiset reaktiot ja ligniini-hiilihydraatti kompleksi

malliaineenesterisidosten entsyymattinen hajottaminen esteraaseilla. Viitattu 6.10.2022.

[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/322643/Hinkka\\_Harri\\_tutkielma\\_2020.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/322643/Hinkka_Harri_tutkielma_2020.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Stora Enso n.d. Verkkosivu. Ligniini. Viitattu 6.10.2022.

<https://www.storaenso.com/fi-fi/products/lignin>

Aalto yliopisto 4.10.2021. Verkkosivu.  $\gamma$ -valerolaktonibiojalostamo. Viitattu 6.10.2022. <https://www.aalto.fi/fi/biotuotteiden-ja-biotekniikan-laitos/g-valerolaktonibiojalostamo>

Varila, T. Romar, H. Luukkonen, T. Hilli, T. Lassi, U. Verkkojulkaisu.

Characterization of lignin enforced tannin/furanic foams. Viitattu 9.10.2022.

[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020300736?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=757ee8d31cc4d983](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020300736?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=757ee8d31cc4d983)

Laitinen, M. 2019. Verkkojulkaisu. Ligniini polymeerimateriaalien lujite- ja täytemateriaalina. S.1, S.28. Viitattu 25.10.2022.

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/117759/LaitinenMarko.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Uusi puu n.d. Verkkosivu. Uusi puu -kilpailu 2017. Viitattu 23.6.2022.

<https://www.uusipuu.fi/kilpailu/kilpailu-2017/>

## TAULUKOT JA KUVAT

Taulukko 1. Googlen hakulauseet ja hakusanat.

Taulukko 2. Andorin hakulauseet ja hakusanat

Kuva 1. Ligniinin yleisimpien monomeerien rakenne

Kuva 2. Erotettua ligniiniä