



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SAHANPURUN UUDET KÄYTTÖKOHTEET

Karoliina Pesonen

Ympäristötekniikka

Kandidaatintyö

Maaliskuu 2019



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SAHANPURUN UUDET KÄYTTÖKOHTEET

Karoliina Pesonen

Ohjaaja: Elisa Koivuranta

Ympäristötekniikka

Kandidaatintyö

Maaliskuu 2019

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Ympäristötekniikan koulutusohjelma		Pääaineopinnojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Pesonen, Karoliina		Työn ohjaaja yliopistolla Koivuranta, E, TkT	
Työn nimi Sahanpurun uudet käyttökohteet			
Opintosuunta Kuitu- ja partikkelitekniikka	Työn laji Kandidaatintyö	Aika Maaliskuu 2019	Sivumäärä 26 s.
Tiivistelmä <p>Ympäristöntilan heikentyminen ja muutokset kulutustottumuksissa ovat lisänneet kiertotalouden mukaista ajattelumallia, jonka tavoitteena on materiaalien kestävä käyttö ja tuotteiden elinkaaren pidentäminen sekä niiden arvon mahdollisimman pitkä säilyminen. Teollisuuden tuotannon yhteydessä syntyy suuria määriä materiaalia sivuvirtoina ja niiden käyttö on ollut potentiaalia alhaisempaa. Sivutuotteiden uusien käyttökohteiden selvittämisestä on siten tullut tärkeää. Sahanpuru on yksi suurimmista sivuvirroista, jonka käyttökohteet ovat olleet tähän asti hyvin rajalliset.</p> <p>Metsien kasvu on lisääntynyt merkittävästi viimeisen kymmenen vuoden aikana ja kasvun on ennustettu jatkuvan edelleen. Metsien kasvu merkitsee sahateollisuuden lisääntymistä ja sitä myötä myös sivutuotteena syntyvän sahanpurun määrän kasvua. Sahanpurua käytetään tällä hetkellä pääasiassa energian tuottamiseen polttamalla, jolloin sen elinkaari jää hyvin lyhyeksi. Polttamisen sijaan sahanpurulle on etsitty myös muita käyttömuotoja. Työn tarkoituksena on selvittää kirjallisuuden avulla, millaiset ominaisuudet sivutuotteena syntyvällä sahanpurulla on sen jalostettavuuden kannalta sekä tarkastella sahanpurun uusia käyttökohteita viimeaikaisten tutkimusten pohjalta.</p> <p>Sahanpuru koostuu muun puuaineen tapaan pääasiassa selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä, jonka vuoksi se soveltuu monenlaisiin käyttökohteisiin. Sahanpurun ominaisuudet, kuten raekoko, kosteus, tiheys tai purun sisältämän kuoren pitoisuus voivat vaikuttaa sen käyttömahdollisuuksiin. Sahanpurusta voidaan keittää sellua, jota käytetään hyvin monenlaisten paperituotteiden valmistamiseen. Purua käytetään myös biopoltoaineiden valmistuksen raaka-aineena. Sahanpurusta saadaan valmistettua entsyymaattisen hydrolyysin ja fermentoinnin avulla etanolia. Sahanpuru on lisäksi yksi yleisimmistä biokomposiittien raaka-aineista. Biokomposiitit ovat yleistyneet viime vuosina erityisesti rakennusmateriaaleina ulkorakentamisessa. Viime vuosina on myös selvitetty sahanpurun hyödyntämismahdollisuuksia vedenpuhdistuksessa ioninvaihdon avulla. Lisäksi on tutkittu sahanpurun sisältämän hemiselluloosan käyttömahdollisuuksia elintarvikesovelluksissa, kuten osana erilaisia emulsioita.</p> <p>Sahanpurusta valmistettujen tuotteiden tuotanto on vielä toistaiseksi vaihtelevaa. Esimerkiksi Suomessa on toiminnassa bioetanolia ja purusellua valmistavat tuotantolaitokset. Toisaalta taas elintarvikesovellukset ja vedenpuhdistaminen sahanpurun avulla ovat vasta tutkimusvaiheessa. Sahanpurun hyödyntämisessä on myös ollut haasteita. Sen käyttöä merkittävimmin rajoittaa kuljettamisen heikko kannattavuus. Purun kuljettaminen pitkiä matkoja sen syntypaikalta jalostuspaikalle ei ole taloudellisesti kannattavaa. Sahanpurusta on kuitenkin onnistuttu valmistamaan hyvin monipuolisia ja lupaavia biotuotteita. Näiden avulla sivutuotteena syntyneen sahanpurun elinkaari on pidentynyt ja arvo lisääntynyt. Tämän vuoksi sahanpurusta valmistettujen biotuotteiden kehittämistä tulee jatkaa tulevaisuudessa ja tutkia uusia hyödyntämismahdollisuuksia.</p>			
Muita tietoja			

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

1	JOHDANTO	5
2	SAHANPURU RAAKA-AINEENA	7
2.1	Puukuitujen ominaisuudet ja kemiallinen rakenne	7
2.1.1	Puukuitujen ominaisuudet	7
2.1.2	Puukuitujen kemiallinen rakenne	7
2.1.3	Sahanpurun kemiallinen rakenne	9
2.2	Sahanpurun ominaisuudet	10
3	SAHANPURUN KÄYTTÖKOHTEET	12
3.1	Sahanpurusta selluksi	12
3.1.1	Sahanpurusellun valmistus	12
3.1.2	Sahanpurusellun ominaisuudet ja tuotteet	12
3.2	Biopolttoaineet	13
3.3	Biokomposiitit	14
3.3.1	Biokomposiittien rakenne	14
3.3.2	Biokomposiittien valmistus ja käyttökohteet	15
3.4	Sahanpuru vedenpuhdistuksessa	16
3.5	Sahanpuru elintarvikesovelluksissa	17
3.5.1	Hemiselluloosan erotusmenetelmiä sahanpurusta	17
3.5.2	Hemiselluloosa biotuotteissa	18
3.6	Muut käyttökohteet	18
4	HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET JA HAASTEET	20
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	22
	LÄHDELUETTELO	23

1 JOHDANTO

Sahanpurua syntyy sahateollisuuden sivutuotteena sahausprosessin eri vaiheissa. Sahatavaran tuotantoon ja metsäteollisuuden tuotteiden valmistukseen sekä vientiin puuta hakattiin Luonnonvarakeskuksen mukaan vuonna 2017 yhteensä noin 63,3 miljoonaa kuutiota, josta tukkipuun osuus oli 43 % (Luonnonvarakeskus 2018). Suomessa sahateollisuus tuotti vuonna 2018 lähes 12 miljoonaa kuutiota sahatavaraa (Sahateollisuus ry 2018). Tällä hetkellä Suomessa toimii 27 suurta sahalaitosta (Metsäteollisuus ry 2019). Runkopuun hakkuumäärät ovat lisääntyneet viimeisen kymmenen vuoden aikana runsaasti ja hakkuumäärät kasvavat vielä tulevaisuudessa metsien kasvun lisääntyessä. Tämän seurauksena myös sahateollisuus tuottaa entistä enemmän sahatavaraa. Silloin myös sivuvirtana syntyvän sahanpurun määrä kasvaa voimakkaasti, sillä tukkipuun tilavuudesta syntyy sahatavaran laadun ja sahaustavan mukaan noin 10 prosenttia sahanpurua (Koljonen ym. 2009, s. 66). Viimeaikaisten tilastojen mukaan sivutuotteena sahanpurua syntyy keskimäärin yli kolme miljoonaa kuutiota vuosittain (Korpinen 2010, s. 2).

Nykyisin sahanpurun pääasiallinen käyttökohde on poltto energiantuotannoksi. Purua käytettiin energiantuotantoon vuonna 2017 lähes 2,8 miljoonaa kuutiota (Luonnonvarakeskus 2019). Sahateollisuudessa purulla tuotetaan energiaa sahalaitosten läheisyydessä sahatuotannon ylläpitämiseksi, esimerkiksi tuotetun sahatavaran kuivaamiseksi. Sahanpurua puristetaan lisäksi pelleteiksi ja briketeiksi energiantuotantoon esimerkiksi yksityisten kuluttajien käyttöön (Alakangas ym. 2016, s. 95). Polttaminen on aina materiaalien lopullinen käyttökohde, jolloin sen elinkaari jää hyvin lyhyeksi, vaikka mahdollisuuksia olisi jalostamiselle ja hyödyntämiselle monella muulla tavalla.

Viime vuosina ympäristötilan heikkenemisen, ilmastonmuutoksen, ylikulutuksen ja väestön kasvun seurauksena esiin on noussut ajatus kiertotaloudesta (Ympäristöministeriö 2018). Kiertotaloudella tarkoitetaan materiaalien kestäväää käyttöä, jossa tuotteet pyritään säilyttämään käytössä ja kierrossa mahdollisimman pitkään (Sitra 2014; Ympäristöministeriö 2018). Pitkään kierrossa olevien tuotteiden on tarkoitus säilyttää arvonsa tai kasvat-
taa sitä. Kiertotaloudella on useita ympäristöhyötyjä ja ilmastovaikutuksia, kuten uusiutumattomien luonnonvarojen korvaaminen uusiutuvilla sekä jätteiden ja päästöjen vähentäminen (Sitra 2014). Ellen MacArthur Foundationin raportin (2013) mukaan kiertotalous perustuu hyvään suunnitteluun, jossa muun muassa jätevirtojen poistamiseen pyritään jo

suunnitteluvaiheessa. Tuotteiden elinkaarta pyritään pidentämään niiden muunneltavuuden avulla. Lisäksi kiertotalous perustuu uusiutuvan energian käyttöön ja asioiden kokonaisvaltaiseen tarkasteluun eri näkökulmista kaikkien mahdollisuuksien selvittämiseksi.

Kiertotalouden lisäksi viime vuosina on pyritty löytämään muoville uusia korvaavia vaihtoehtoja. Muovin korvaamista puuperäisillä tuotteilla on tutkittu ja kehitetty. Esimerkiksi markkinoille on tulossa puupohjaisista materiaaleista valmistettu biohajoava puupilli, joka korvasi muovijäteongelmaa tuottavat perinteiset muovipillit (Stora Enso 2018). Uusiutuvasta materiaalista kehitetyt muovia korvaavat biohajoavat tuotteet vähentäisivät uusiutumattomien raaka-aineiden käyttöä muovin valmistuksessa sekä vähentäisivät muovin aiheuttamia ympäristöongelmia.

Kiertotalousajattelun sekä muovituotteiden korvaamisen pohjalta teollisuuden prosessien sivuvirtojen uusien hyödyntämismahdollisuuksien selvittämisestä ja tutkimisesta on tullut yhä tärkeämpää. Uusilla innovaatioilla voidaan saada paitsi ympäristöhyötyjä, myös taloudellisia ja yhteiskunnallisia etuja, uusien liiketoimintojen, kasvavan liikevaihdon ja työllistymisen muodossa (Ympäristöministeriö 2018). Näitä etuja voidaan saavuttaa pidentämällä prosesseista syntyvien sivutuotteiden elinkaarta. Etenkin metsien kasvun ja sahateollisuuden lisääntyessä puusta saatavien uusiutuvien materiaalien hyödyntämismahdollisuuksien selvittäminen on tärkeää. Tämän kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on selvittää, millaiset ominaisuudet sivutuotteena syntyvällä sahanpurulla on sen jalostettavuuden kannalta sekä tarkastella sen uusimpia käyttökohteita viimeaikaisten tutkimusten pohjalta.

2 SAHANPURU RAAKA-AINEENA

2.1 Puukuitujen ominaisuudet ja kemiallinen rakenne

2.1.1 Puukuitujen ominaisuudet

Puu koostuu puusoluista eli puukuiduista, joiden ominaisuudet vaihtelevat puun rungon eri osissa (Kärkkäinen 2007, s. 19). Lisäksi kuitujen ominaisuuksiin vaikuttavat puulaji, puun ikä ja puun kasvunopeus. Puusoluja kutsutaan havupuilla trakeideiksi ja lehtipuilla putkilosoluiksi (Kärkkäinen 2007, s. 27, 46). Trakeidit ja putkilosolut poikkeavat osittain ominaisuuksiltaan toisistaan, vaikka niiden tehtävät puussa ovat pääosin samat. Havupuuden kuidun pituudet ovat lehtipuita huomattavasti pidempiä. Männyllä kuidun pituus on keskimäärin 3,0 mm ja kuusella 3,1 mm, kun taas koivulla kuidun pituus on 0,9–1,2 mm (Sjöström 1989, s. 17–18). Havupuusolut voivat olla halkaisijaltaan suurempia kuin lehtipuusolut. Lisäksi havupuilla solujen halkaisijoissa sekä soluseinämän paksuudessa on enemmän vaihtelua kuin lehtipuilla. Havupuun kuidun pituus vaihtelee hyvin paljon puun eri osissa. Kuidun pituus on suurimmillaan rungon keskiosissa ja kuidun pituus lyhenee latvaa ja puun tyveä kohti. Lisäksi kuidut pitenevät ydinpuusta kohti pintapuuta. (Kärkkäinen 2007, s. 29)

Vuodenaika vaikuttaa puun kasvuun, sillä puut kasvavat vain kasvukaudella, keväisin ja kesäisin. Puiden kasvurytmi näkyy puukuitujen pituudessa ja paksuudessa. Keväisin syntyneet puukuidut ovat pituudeltaan lyhempiä kuin kasvukauden lopussa syntyneet kesäpuun solut sekä havupuilla että lehtipuilla (Sjöström 1989, s. 17). Puun keväällä syntyneet solut ovat paitsi lyhempiä, niiden soluseinät ovat myös huomattavasti ohuempia kuin kesäpuusolujen. Kuusella ja männyllä seinämän paksuus on kevätkuussa keskimäärin 2–4 μm ja kesäpuussa 4–8 μm (Sjöström 1989, s. 17; Kärkkäinen 2007, s. 106). Koivulla soluseinän paksuus on taas 3–4 μm (Sjöström 1989, s. 18). Kuidun pituus muuttuu puun vanhetessa. Nuorpuun kuidut ovat lyhempiä ja soluseinämiltään ohuempia kuin myöhemmin syntyneessä aikuispuussa (Kärkkäinen 2007, s. 29).

2.1.2 Puukuitujen kemiallinen rakenne

Kuitujen paksut soluseinät koostuvat kemiallisista komponenteista, jotka muodostavat kuitujen rakenteen. Kuidut muodostuvat hiilihydraateista (selluloosa ja hemiselluloosa),

ligniinistä sekä uuteaineista ja epäorgaanisista aineista (Saka 1991, s. 59). Kuitujen soluseinät sisältävät eniten selluloosaa (Saka 1991, s. 64). Selluloosa muodostaa rungon, jonka ympärillä ovat ligniini ja hemiselluloosa. Ligniinin ja hemiselluloosan tehtävänä on säädellä solussa seinämän vesipitoisuutta (Kärkkäinen 2007).

Puun kuiduilla on siis paksu soluseinärakenne ja sen vuoksi selluloosan määrä puuaineesa on hyvin suuri. Pohjoismaisissa kuusessa, männyssä ja koivussa selluloosan osuus kuiva-aineesta on noin 40 % (Sjöström 1989, s. 55). Selluloosan tehtävänä on antaa kuidulle lujuutta. Selluloosamolekyylit ovat lineaarisia polymeerejä, joka muodostuvat glukosiyksiköistä (Kärkkäinen 2007, s. 102). Selluloosamolekyylit voivat olla hyvin pitkiä ja sisältää erittäin suuren määrän, jopa 10 000 glykosiyksikköä (Sjöström 1989, s. 21). Tämän vuoksi molekyylit ovat jäykkiä, suorja ja vahvoja ja tekevät kuiduista lujia. Pitkät selluloosamolekyylit liittyvät lisäksi usein toisiinsa kimpuiksi eli mikrofibrilleiksi niiden reunamilla olevien hydroksyyliyhymien vetysidosten avulla. Näiden sidosten avulla selluloosamolekyylit muodostavat kuiturakenteen (Sjöström 1989, s. 56; Kärkkäinen 2007, s. 102). Ominaisuudeltaan selluloosa on hydrofiilistä, mutta se ei liukene veteen.

Selluloosan lisäksi puun kuitujen soluseinissä on huomattava määrä hemiselluloosaa, noin 20–30 % puuaineesa (Sjöström 1989, s. 61). Sjöströmin (1989, s. 61) mukaan hemiselluloosan koostumus ja rakenne ovat erilaiset havu- ja lehtipuilla sekä puun eri osissa rungossa, oksissa tai juurissa. Hemiselluloosamolekyylit eivät ole rakenteeltaan selluloosamolekyyliden tapaan suorja vaan ne voivat haaroittuneita ja niillä voi olla sivuryhmiä. Hemiselluloosat ovat heteropolysakkarideja eli ne muodostuvat useista monosakkariidisyksiköistä. Havupuilla pääasiallinen hemiselluloosa-aines on galaktoglukomannaani, joka on hieman haaroittunut. Nämä molekyylit hajoavat helposti pienemmiksi yksiköiksi erityisesti happojen vaikutuksesta. Toinen havupuille yleinen hemiselluloosa-aines on arabinoglukuroniksyylaani, joka on edellistä haaroittuneempi. Lehtipuilla yleisimmät hemiselluloosat ovat glukuroniksyylaani eli ksyylaani ja glukomannaani, jota on puun kuiva-aineessa pieniä määriä, vain 2–5 %. Haaroittuneisuuden vuoksi hemiselluloosamolekyylit liukenevat kohtalaisen hyvin veteen. Hemiselluloosat vahvistavat myös kuidun rakennetta yhdessä selluloosan kanssa. (Sjöström 1989, s. 61)

Ligniini on yksi tärkeimmistä aineista puun kuiduissa selluloosan ja hemiselluloosan ohella. Ligniiniä puuaineesa on noin 20–30 % kuivapainosta ja sen määrä vaihtelee havu- ja lehtipuiden välillä, havupuissa ligniiniä on enemmän kuin lehtipuissa (Sjöström

1989, s. 72). Sen tehtävä kuiturakenteessa on toimia sidosaineena ja yhdistää kuidut toisiinsa kovalenttisten sidosten avulla (Sjöström 1989, s. 81; Riaz ja Ashraf 2012, s. 70). Ligniini lisää siis puun lujuutta. Ominaisuuksiltaan ligniini on amorfinen aine eli sillä on epäsäännöllinen rakenne (Riaz ja Ashraf 2012, s. 70). Koostumukseltaan se on verkottunut polymeeri, joka muodostuu fenyylipropaaniyksiköistä (Riaz ja Ashraf 2012, s. 70).

Roudan ym. (2017) selvityksen mukaan selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin lisäksi puuaineessa on pieniä määriä uuteaineita. Uuteaineita on keskimäärin havupuissa noin 3 % ja lehtipuissa noin 5 %. Niitä on erityisesti puun kuoressa, sydänpuussa ja pihkatiehyeissä. Uuteaineet antavat puulajeille niiden luonteenomaisen värin ja hajun. Lisäksi ne suojaavat puuta vaurioilta, kuten hyönteisten hyökkäyksiltä tai sienten aiheuttamilta tuhoilta. Ne voivat myös toimia puun ravinnon varastoinnissa. Uuteaineiden koostumus vaihtelee puulajien lisäksi kasvuolosuhteiden ja puun osien mukaan. (Routa ym. 2017)

Puussa on uuteaineiden lisäksi hieman epäorgaanisia aineita. Näiden aineiden osuus on yleensä vain 0,1–1 % puun kuivapainosta (Fengel ja Wegener 1989, s. 217). Yhdisteet ovat kuitenkin välttämättömiä puun elintoiminnoille. Puun epäorgaanisia aineita ovat muun muassa kalsium, kalium ja magnesium (Fengel ja Wegener 1989, s. 217).

2.1.3 Sahanpurun kemiallinen rakenne

Puun kuitujen ominaisuudet vaihtelevat muun muassa vuodenajan ja ympäristötekijöiden seurauksena, jolloin niiden kemiallisten aineidenkin osuudet vaihtelevat sekä puulajeittain että puun eri osissa. Puuainetta sahattaessa syntynyt sahanpuru koostuu kuitenkin samoista kemiallisista komponenteista selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä kuin muukin puuaines. Sahanpurussa olevien kuitujen pituus on kuitenkin huomattavasti runkokuun kuidun pituutta lyhempi. Kuidun pituus purussa on 1,0–1,2 mm (Korpinen 2010, s. 2), kun runkokuussa männyn ja kuusen kuidun pituus on 3,0–3,5 mm (Sjöström 1989, s. 17).

Sahausprosesseissa sahataan usein tyvitukkeja, joka on puun runkojen vanhinta osaa. Tällöin syntynyt sahanpuru sisältää enemmän runkojen sydänpuuta. Sydänpuun solut ovat lyhempiä ja niissä on kapeampi soluseinä kuin myöhemmin syntyneessä aikuispuussa. Lisäksi sydänpuussa on matalampi selluloosapitoisuus, mutta korkeampi hemiselluloosa- ja ligniinipitoisuus sekä korkeampi uuteaineiden pitoisuus. Kemiallisten komponenttien osuuksissa sahanpurun hakkeen välillä ei kuitenkaan ole eroja. (Korpinen 2010, s. 3)

2.2 Sahanpurun ominaisuudet

Sahanpurua syntyy hakkeen tapaan sahausprosessin useissa eri vaiheissa ennen sahatavaran kuivausta sekä tasaamalla (Varis ym. 2017 s. 204). Suomessa sahatavaran tuotantolaitosten raaka-aineena käytetään pääasiassa havupuuta, kuusta ja mäntyä, mutta myös lehtipuita. Käytetty puulaji vaikuttaa syntyvän sahanpurun määrään ja laatuun, mutta ne riippuvat myös hyvin monista muista tekijöistä (Uusvaara 1974, s. 28).

Purun tärkein ominaisuus on sen raekokojakauma, joka voidaan selvittää seulomalla, kuten tapahtuu purun erottaminen hakkeestakin. Purun raekokojakaumaan vaikuttavat erityisesti sahaustapa, vuodenaika, erityyppisten purulajien yhdistäminen, tukkien varastoimistapa sekä puuaineen laatu (Uusvaara 1974, s. 28). Purun kokoon ensisijaisesti vaikuttaa sahakoneiden erilaiset katkaisu- ja leikkaustavat (Taulukko 1). Puun syitä poikisuuntaan leikkaavat sahaustavat tekevät purusta pienirakeisempaa ja sen myötä käyttöarvoltaan heikompaa. Myös pyörö- ja vannesahan purut eroavat toisistaan (Uusvaara 1974, s. 28). Sahausmenetelmien lisäksi purun ominaisuuksiin vaikuttavat muun muassa tukin syöttönopeus sahaan sekä terän paksuus. Purun raekoko on yleensä noin 1–6 mm välillä (Taulukko 1). Uusvaaran (1974, s. 30) tutkimuksen mukaan keskimääräinen purun raekoko on 1–2 mm. Hienojakoisia alle millimetrin rakeita ja toisaalta suuria yli kuuden millimetrin rakeita purussa oli vain muutamia prosentteja. Purun raekokojakaumaa voidaan säädellä seulomalla, jolloin liian suuret ja liian pienet rakeet saadaan erotettua (Metsäteollisuuden työnantajainliitto 1983, s. 17).

Taulukko 1. Sahanpurun raekokojakauma eri sahausmenetelmillä (mukailtu Metsäteollisuuden työnantajainliitto 1983, s. 17).

Jae (mm)	Osuus (%)	
	Kehyssaha	Vannesaha
>6,35	3,9	0,3
6,35–3,18	18,2	4
3,18–2,16	15,9	3,5
2,16–1,03	44,9	57,7
1,03–0,638	12,7	26,8
0,638–0,30	2,4	6,2
<0,30	2,2	1,5

Talviolosuhteet vaikuttavat puun sahaukseen. Jäätynyttä puuta sahattaessa purun raekoko pienenee eli talviajan puru on hienojakoisempaa kuin kesäaikana syntynyt puru (Uusvaara 1975, s. 32). Lisäksi talviaikaan syntyneen purun laatua heikentää sen jäätyminen sekä lumi ja jää, jotka sekoittuvat sen joukkoon (Metsäteollisuuden työnantajainliitto 1983, s. 16). Sen lisäksi, että talviaikaan syntynyt hienojakoinen puru on haastavampaa hyödyntää, purun käytettävyyteen vaikuttaa sen sisältämä kuoripitoisuus. Puun joukossa olevasta kuoresta on haittaa purun käyttämiselle, erityisesti sellua valmistettaessa kuori kuluttaa kemikaaleja ja alentaa sellun saantoa sekä aiheuttaa värivikoja (Uusvaara 1974, s. 24; Korpinen 2010, s. 2). Uusvaara (1974, s. 24) havaitsi, että havupuiden sahanpurussa kuoren osuus on vielä suurempi talvella kuin kesällä. Männyn purussa kuorta oli kesällä 0,4 % ja talvella 1,3 % eli vuodessa keskimäärin 0,7 %. Kuusella vastaavasti kesällä 0,5 % ja talvella 2,7 % eli keskimäärin vuodessa 1,3 %. Sahanpurun keskimääräisen kuoriprosentin tulisi olla enintään prosentti, jotta se ei vaikuttaisi purun hyödyntämiseen.

Purun käyttömahdollisuuksiin vaikuttaa raekoon ja kuoripitoisuuden lisäksi sen kosteus, paino, tiheys ja lämpöarvo. Purun kosteuteen vaikuttavat muun muassa vuodenaika, käytettävien tukkien varastointiaika ja varastointiajan pituus. Kesäisin purusta haihtuu enemmän vettä, jolloin se on huomattavasti talviaikaan syntyynyttä purua kuivempaa. Talvella taas kosteutta lisää purun joukossa olevat lumi ja jää. Purun kosteus on vuodenaikat huomioiden keskimäärin hieman yli 50 %. (Uusvaara 1974, s. 18) Purun painoon vaikuttaa suoraan sen kosteus. Purun painoa voidaan mitata sekä tuore- että kuivatiheyden avulla. Keskimäärin männyn tuoreen sahanpurun irtokuutio painaa 336 kg ja kuusen 298 kg (Uusvaara 1974, s. 19). Tuore puru on haketta kevyempää sekä kuusella että männyllä. Kuivapainoa mitattaessa tulokseen vaikuttaa oleellisesti puuaineen paino ja raekoko. Männyn purun irtokuution kuivapaino on kuusen kuivapainoa suurempi. Männyllä irtokuutio purua painaa keskimäärin 142 kg ja kuusella 137 kg (Uusvaara 1974, s. 22). Sahanpurua käytetään paljon energiaksi, koska sen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on 18,9 MJ/kg (Alakangas ym. 2016, s. 86), mikä on samaa luokkaa kuin puun kuoren lämpöarvo. Sahanpurun energiatiheys on irtokuutiolla 0,45–0,70 MWh, joka on hieman alhaisempi kuin hakkeella, mutta lähes saman suuruinen kuin puun kuorella (Alakangas ym. 2016, s. 205).

3 SAHANPURUN KÄYTTÖKOHTEET

3.1 Sahanpurusta selluksi

3.1.1 Sahanpurusellun valmistus

Sahanpurua voidaan käyttää osana sellun valmistusta hakkeen seassa. Pelkästä sahanpurusta on myös mahdollista valmistaa sellua. Korpisen (2010 s. 7–9) mukaan purusellun valmistus vaatii kuitenkin eritystekniikkaa, sillä sahanpuru eroaa keittomateriaalina tavallisesta hakkeesta. Sahanpuru on haketta tiiviimpää ja muodostaa siten myös tiiviimmän matriisin keittolipeän kanssa. Tiiviys rajoittaa keittolipeän virtausta puuaineen läpi tai estää sen kokonaan. Purusellun valmistus tavallisella eräkeittomenetelmällä on haastavaa tai lähes mahdotonta, muun muassa keittolipeän heikon kierrätettävyyden kannalta. Toisaalta purusellun valmistukseen ei sovellu myöskään jatkuva- eli vuokeitto, koska sahanpuru aiheuttaa tukkeumia ja ongelmia keiton lopetuksissa. Sahanpurun keittämiseen on kuitenkin suunniteltu monenlaisia muita keittomenetelmiä. Yleisin menetelmä sellun valmistukseen on Messing-Durkee (M&D) keitin. Tällä menetelmällä keittoaika on 15 minuutista puoleen tuntiin. Keittoaikaan vaikuttavat lämpötila sekä kemikaalien kulutus. Lämpötila on normaalisti 170–185 celsiusastetta ja keittolipeän ja puun suhde on 4–5:1. Tätä keittomenetelmää hyödynnetään Suomessa UPM Kymmene Oy:n Pietarsaaren sellutehtaalla. Keittolipeän imeyttäminen tehdään alhaisissa lämpötiloissa ja valmistus viimeistellään eri keittimessä. Pietarsaaren sellutehtaan kapasiteetti on tuottaa sahanpurusta valmistettua sellua 40 000 tonnia vuodessa. (Korpinen 2010, s. 7–9)

Sahanpurusta valmistetun sellun saanto on usein heikompi verrattuna hakkeesta valmistettuun selluun. Sahanpurusellun saanto vaihtelee 2,1–2,7 % välillä. Vaihteluun vaikuttavat sahanpurun raekoko, erityisesti erittäin pienen jauhomaisen purun osuus. Alhaisempaa saantoa olisi mahdollista nostaa lisäämällä keittoon antrakinonia, joka toimii katalyyttinä tai polysulfidia. (Korpinen 2010, s. 9)

3.1.2 Sahanpurusellun ominaisuudet ja tuotteet

Sahanpurusta valmistetun sellun ominaisuudet poikkeavat verrattuna perinteiseen hakkeesta valmistettuun selluun. Purusellun lujuusominaisuudet ovat sellaisenaan heikommat kuin perinteisen sellun. Sahanpurusellua voidaan kuitenkin yhdistää jopa 30 % tavallisen havu- tai lehtipuusellun joukkoon ennen kuin lujuusominaisuudet alkavat muuttua.

Sahanpurusta valmistelulla sellulla on myös useita positiivisia ominaisuuksia. Se on ominaisuuksiltaan verrattavissa lehtipuuselluun. Purusellulla on hyvä bulkki, imeytymiskyky, opasiteetti eli läpinäkymättömyys sekä huokoisuus. Sitä on helppo kuiduttaa ja jauhaa uudelleen. Purusellulla on lisäksi tasaisempi pinta, parempi mittapysyvyys sekä printtavuus kuin perinteisellä sellulla. (Korpinen 2010, s. 14)

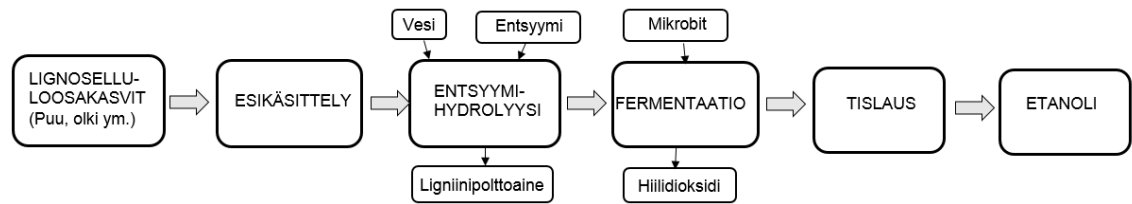
Purusellua voidaan käyttää hyvin moniin paperituotteisiin. Yksi tärkeä purusellun käyttökohde on laminaattipaperit, joita voidaan käyttää lastulevyjen ja vanerien pinnoittamiseen. Purusellua voidaan käyttää myös erilaisiin pakkausmateriaaleihin, kuten pahviin, voimapaperiin sekä säckipaperiin, joka on hiomatonta voimapaperia. Lisäksi sitä voidaan käyttää suodatinpapereissa ja pehmopapereissa tai perinteisissä kopiopapereissa. (Korpinen 2010, s. 15)

3.2 Biopolttoaineet

Biopolttoaineilla tarkoitetaan biomassasta suoraan tai epäsuorasti tuotettua polttoainetta. Biomassa käsittää biologisesta alkuperästä olevat aineet, puubiomassan, kasvibiomassan, hedelmäbiomassan ja vesibiomassan (Alakangas ym. 2016, s. 8). Biopolttoaineita voidaan valmistaa useilla eri menetelmillä ja hyvin monista raaka-aineista tai niiden sekoituksista. Biopolttoaineita ovat esimerkiksi biodiesel, bioöljy ja bioetanoli.

Suomessa St1 Biofuels Oy Kajaanissa valmistaa bioetanolia pääasiassa sahanpurusta. Purun lisäksi tuotantoprosessissa voidaan käyttää haketta ja kierrätyspuuta. Kajaani Cellunolix- hankkeen ympäristövaikutusten arviointiohjelman (2016) selvityksen mukaan bioetanolin valmistuksen tuotantoprosessi perustuu termokemialliseen raaka-aineen esikäsittelyyn, entsymaattiseen hydrolyysiin ja fermentointiin sekä lopullisen etanolin erottamiseen vesiseoksesta tislamalla (Kuva 1). Hydrolyysissa sahanpurun sisältämästä selluloosasta ja hemiselluloosasta muodostuu sokereita entsyymien ja veden avulla (Zheng ja Rehmann 2014). Fermentoinnilla taas tarkoitetaan käymistä, jossa etanolia syntyy sokereista hiivan avulla (Zheng ja Rehmann 2014). Etanolin lisäksi tuotantoprosessissa syntyy useita sivutuotteita, esimerkiksi biokaasua ja ligniinipitoisia kiintoainemassoja, joita voidaan hyödyntää energiana. Lisäksi ligniinipitoisia kiintoainemassoja voidaan jatkojalostaa arvokkaammiksi tuotteiksi. Syntynyttä bioetanolia lisätään tavalliseen bensiiniin,

joka soveltuu tankattavaksi FlexiFuel-autoihin. Kajaanissa sijaitsevan tehtaan valmistuskapasiteetti on kymmenen miljoonaa litraa etanolia vuodessa. (Kajaani Cellunolix- hankkeen ympäristövaikutusten arviointiohjelma 2016)



Kuva 1. Biopolttoaineen valmistusvaiheet (mukailtu Lampinen 2009, s. 268).

3.3 Biokomposiitit

3.3.1 Biokomposiittien rakenne

Komposiiteilla tarkoitetaan materiaaleja, jotka koostuvat vähintään kahdesta raaka-aineesta, jotka ovat yhdistetty toisiinsa. Biokomposiiteissa ainakin toinen valmistusmateriaali on peräisin luonnonkuituista. Biokomposiiteissa luonnonkuidut toimivat lujitteina ja antavat materiaalille lujuutta ja jäykkyyttä (Pickering ym. 2016). Luonnonkuitujen ohella komposiiteissa on muotoa ja rakennetta antava aine, esimerkiksi muovi.

Luonnonkuituina biokomposiiteissa voidaan käyttää hyvin monia puu- tai ruohovartisia kasveja. Niiden selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin hydrofiilisuus muodostaa hydrofobisten muovien kanssa heikkoja sidoksia (Pickering ym. 2016). Sidosten parantamiseksi kuituja käsitellään, muun muassa kemiallisesti, vähentääkseen niiden veden imeytymistä (Pickering ym. 2016). Luonnonkuituista puuta käytetään usein biokomposiittien raaka-aineena. Puuaineen osuus komposiiteissa on yleensä yli 30 % (Huber ym. 2010). Komposiiteissa käytettävä puuainee on usein sahanpurua (Keskisaari 2017, s. 18). Purun lisäksi puuainee voidaan käyttää metsähaketta, jättepuuta tai pellettejä.

Biokomposiiteissa rakennetta muodostavina muoveja voivat olla kestumuovit, kertamuovit tai biopolymeerit (Pickering 2016). Yleisimpiä kestumuoveja ovat polyeteeni (PE), polypropeeni (PP) ja polyvinyylidikloridi (PVC). Komposiiteissa käytettäviä kertamuoveja ovat esimerkiksi polyesteri, polyuretaani ja epoksi (Pickering ym. 2016). Kestumuovit ovat kuitenkin ekologisempia materiaaleja kuin kertamuovit, sillä ne ovat osittain kierrätettäviä (Pickering ym. 2016). Biopolymeerien, kuten polylaktidin (PLA)

käyttö komposiiteissa on ympäristöystävällisempää, sillä ne ovat muoveja biohajoavampia ja vähentävät fossiilisista lähteistä olevien materiaalien käyttöä (Rosa ja Lenz 2013).

Näiden materiaalien lisäksi biokomposiitit saattavat sisältää hieman lisäaineita, jotka parantavat muovin ja luonnonkuitujen yhdistymistä sekä vaikuttavat valmistettavan tuotteen ominaisuuksiin (Rosa ja Lenz 2013). Lisäaineita voivat olla erilaiset voiteluaineet pinnan laadun parantajina ja kiinnitys- tai liima-aineet lujittamassa rakennetta. Lisäaineita voivat myös olla erilaiset väri- tai vaahdotusaineet.

3.3.2 Biokomposiittien valmistus ja käyttökohteet

Biokomposiitteja valmistetaan yleisimmin ekstruusio- ja valumenetelmillä. Ekstruusio eli suulakepuristusmenetelmä on jatkuvaprosessi, jossa käytettävä puun ja muovin raaka-aineseos puristetaan suulakkeen läpi halutun muotoiseksi tuotteeksi (Huber ym. 2010, s. 416). Prosessissa hyödynnetään lämpöä, kitkaa ja painetta raaka-aineseoksen saamiseksi homogeeniseksi ja helposti muokattavaksi (Huber ym. 2010, s. 417). Valumenetelmässä raaka-aineseos puristetaan muottiin ja jäähtymisen jälkeen valmistuote irrotetaan muotista (Huber ym. 2010, s. 409). Valumenetelmällä on mahdollista tuottaa yksityiskohtaisempia tuotteita kuin ekstruusiomenetelmällä, joka soveltuu paremmin esimerkiksi putkimaisten tuotteiden valmistukseen.

Komposiittien tarkoituksena on yhdistää kahden materiaalin hyvät ominaisuudet. Luonnonkuitujen, kuten puusta saatavan sahanpurun käytöllä komposiiteissa on useita etuja verrattuna keinotekoisiin materiaaleihin. Kuiduilla on hyvät mekaaniset ominaisuudet, matala tiheys ja ne ovat biohajoavia, uusiutuvia sekä edullisia (Pickering ym. 2016).

Valmistusmenetelmä ja biokomposiitissa käytetyt raaka-aineet vaikuttavat tuotteiden ominaisuuksiin, esimerkiksi veto- ja taivutuslujuuteen, iskunkestävyyteen, työstettävyyteen, säänkestävyyteen ja mittapysyvyyteen. Komposiiteissa käytettävän puun määrä lisää yleensä taivutus- ja vetolujuutta, mutta alentaa iskunkestävyyttä. Puun osuuden lisääminen heikentää kuitenkin kosteuden kestävyyttä, joka altistaa tuotteen muun muassa sienivaurioille. Myös komposiiteissa käytettävä puulaji vaikuttaa biokomposiittituotteiden ominaisuuksiin. (Keskisaari 2017)

Biokomposiittituotteita voidaan hyödyntää hyvin monenlaisiin kohteisiin ja uusia käyttökohteita kehitellään jatkuvasti. Pääasiassa biokomposiitteja käytetään rakentamisen tuotteissa, kuten terassi- ja pihalaudoituksissa ja rakenteissa. Lisäksi niitä voidaan käyttää korvaamassa perinteisiä puutuotteita esimerkiksi kattorakenteita ja ulkoverhouksia. Biokomposiitteja on myös käytetty ovissa ja ikkunoiden rakenteissa. Komposiittien muovailtavuuden ansioista niistä on voitu valmistaa myös monimutkaisempia ja yksityiskohtaisempia rakenteita esimerkiksi autoihin. (Smith ja Wolcott 2006)

3.4 Sahanpuru vedenpuhdistuksessa

Sahanpurua on suunniteltu käytettäväksi vedenpuhdistuksessa. Keräsen (2017) tutkimuksessa selvitettiin, kuinka teollisuuden sivutuotteena syntyviä materiaaleja voitaisiin hyödyntää vedenpuhdistuksessa. Tutkimuksessa testattiin männyn sahanpurua ja kuorta, kuusen ja koivun kuorta sekä turvetta vedenpuhdistusmateriaaleina. Tutkimusta varten niitä modifioitiin kemiallisesti. Kemiallinen modifiointi mahdollisti veden haitallisten aineiden tarttumista materiaaliin. Puhdistus menetelmä perustui ioninvaihtoon, jossa keskityttiin nitraatin poistoon jätevedestä. Tutkimuksessa oli synteettisiä ja oikeita jätevesiä, joiden avulla arvioitiin materiaalien soveltuvuutta teollisiin menetelmiin. Tutkimusta tehtiin anionin vaikutusta tutkivien kokeiden, kuten lämpötilan, pH:n, kinetiikka- ja kolonninkokeiden avulla.

Keräsen (2017) tutkimuksen tulokset osoittivat, että kaikki materiaalit, puru, kuori ja turve, poistivat yli 70 % nitraattia pH:n alueilla 3–10. Materiaaleista parhaiten nitraattia vedestä poisti männyn sahanpuru, jota oli kationisoitu. Lisäksi sahanpuru toimi laajalla lämpötila alueella 5–70 celsiusasteessa. Sahanpuru oli kolonninkokeiden perusteella parhaiten palautuvissa ja sitä oli mahdollista käyttää uudelleen. Tätä tuotetta testattiin myös kaivos- ja kemiantehtaan jäteveden puhdistukseen ja tuloksista havaittiin, että se poisti nikkeliä, uraania, vanadiinia ja kobolttia. Männyn sahanpuru vaikutti toimivan hyvin veden puhdistuksessa, mikä vahvisti kestävien vedenkäsittelytekniikoiden etsimistä kasvavien vesiongelmien ratkaisemiseksi. Keräsen (2017) tutkimus osoitti, että biopohjaisia tuotteita voidaan käyttää ioninvaihtomateriaalina ja niiden kehittämistä voidaan jatkaa teollisuuden jätevesien käsittelyyn tulevaisuudessa.

3.5 Sahanpuru elintarvikesovelluksissa

3.5.1 Hemiselluloosan erotusmenetelmiä sahanpurusta

Sahanpurun sisältämää hemiselluloosaa on eristetty paineistetulla kuumavesiuutolla. Kilpeläinen ym. (2012) selvittivät eri lämpötilojen vaikutusta hemiselluloosan saantoon koivun sahanpurusta paineistetussa kuumavesiuutossa, joka tehtiin läpivirtausastiassa. Tutkimuksen tulokset osoittivat, ettei menetelmässä koivun sahanpurusta erottunut ainoastaan ksylaania ja muita hemiselluloosan molekyylejä vaan myös hieman ligniiniä ja uuteaineita. Tulosten mukaan optimaalisin lämpötila haluttujen hemiselluloosamolekyylien saamiseksi oli 180 celsiusastetta, jolloin epäpuhtauksien määrä oli pienin. (Kilpeläinen ym. 2012)

Kilpeläinen ym. (2013) tarkastelivat myös pH:n vaikutusta hemiselluloosan erottamiseen koivun sahanpurusta paineistelussa kuumavesiuutossa, jossa käytettiin niin ikään läpivirtausastiaa. Kokeilussa oli kolme eri pH-tasoa ja lämpötilaa. Tulokset osoittivat, että käytettäessä tavallista vettä uutteen pH-taso laski viidestä kolmeen. Kun menetelmässä käytettiin pH-puskuria, pH-taso pysyi tasaisena ensimmäisen 30 minuutin aikana. Uutetun ksylaanin saanto oli kuitenkin heikompi pH-puskuria käytettäessä kuin pelkällä vedellä uutettuna. Toisaalta pH-puskuria käytettäessä oli mahdollista saada ksylaania sahanpurusta suuremmalla moolimassalla. (Kilpeläinen ym. 2013)

Kilpeläinen ym. (2014) selvittivät samalla paineistelulla kuumavesiuutolla läpivirtausastiassa koivun sahanpurusta hemiselluloosan uuttoa eri pakkaustiheyksillä. Tutkimuksessa tarkasteltiin 180 celsiusasteen lämpötilassa ja 60 minuutin ajan uuttoa sahanpurun tiheyksillä 0,2–0,7 kg/l. Tuloksista selvisi, että suuremmilla tiheyksillä uutteen pitoisuudet olivat suuremmat. Lisäksi suuremmilla tiheyksillä uutun alussa saatiin enemmän ksylaania ja ligniiniä kuin pienemmillä tiheyksillä. Kilpeläisen ym. (2014) tutkimuksessa tarkasteltiin pakkaustiheyden lisäksi sahanpurun raekoon vaikutusta uuttoon. Sahanpurun raekoot olivat 0,063–0,2 mm, 0,2–0,63 mm ja 0,63–2,0 mm. Tuloksista havaittiin, että suurin ksylaanin määrä saatiin pienimmällä raekoolla. Lisäksi havaittiin, että suuremmissa pakkaustiheyksissä purun raekoolla ei ollut enää suurta vaikutusta saantoon. (Kilpeläinen ym. 2014)

Hemiselluloosaa on lisäksi eristetty rikkihapon avustuksella. Stoffel ym. (2017) tutkivat kaksiosaista menetelmää, jossa sahanpurusta poistetaan uuteaineet emäksen avulla ja hemiselluloosa saatiin erilleen rikkihapolla katalysoidussa höyryräjäytyksessä. Hemiselluloosan erottaminen tapahtui korkeasti paineistetussa höyryreaktorissa, lämpötilan ollessa 180–200 celsiusastetta, 5–10 minuutin ajan ja rikkihapon konsentraation ollessa 1:100–3:100 puun kuivapainosta. Stoffelin ym. (2017) tutkimus osoitti tämän olevan tehokas hemiselluloosan erotusmenetelmä.

3.5.2 Hemiselluloosa biotuotteissa

Sahanpurusta erotetusta hemiselluloosasta on kehitelty viime vuosina uusia lupaavia biotuotesovelluksia muun muassa ruoka- ja lääketuotteisiin, kosmetiikkaan sekä teollisuuden tuotantoon (Liu ym. 2014). Koivun sahanpurusta eristettyä nanokuituista selluloosaa on hyödynnetty erilaisten kalvojen valmistamisessa (Liu ym. 2014). Kalvoja voidaan käyttää muun muassa erilaisissa pakkauksissa, kuten elintarvikepakkausten ikkunoissa. Liun ym. (2014) tutkimuksen mukaan nanokuituisesta selluloosasta valmistetut kalvot olivat mekaanisilta ominaisuuksiltaan yhtä hyviä tai parempia kuin vertailussa olut perinteisen sulfaattisellun tuotteet.

Hemiselluloosan soveltuvuutta erilaisiin emulsioihin on tutkittu. Emulsioita käytetään yleisesti monissa tuotteissa, esimerkiksi elintarvikkeissa emulsioihin kuuluvat muun muassa kermat, levitteet ja kastikkeet (Mikkonen ym. 2016). Mikkosen ym. (2016) tutkimuksessa koivun ja kuusen sahanpurusta paineistetulla kuumavesiuutolla eristetystä galactoglukomannaanista ja ksylaanista valmistettiin emulsioita. Näistä valmistettujen emulsioiden etuina olivat pieni pisarakoko ja ne pysyivät stabiilina pidempään jopa usean kuukauden ajan kuin perinteiset emulsiot (Mikkonen ym. 2016). Lisäksi Lehtonen ym. (2017) havaitsivat, että kuusen galaktoglukomannaanin fenolijäämät lisäävät öljy-vesipohjaisten emulsioiden stabilisuutta.

3.6 Muut käyttökohteet

Sahanpurulle on kehitetty useita uusia käyttökohteita, perinteisesti sitä on polttamisen lisäksi käytetty muun muassa raaka-aineena puulevyjen valmistuksessa. Sahanpurusta valmistetaan yhdessä muiden puunjalostuksen sivutuotteiden, hakkeen, lastujen, kierrätyspuun ja pienpuun kanssa lastulevyjä (Varis ym. 2017, s. 200). Sivutuotteiden osuus lastulevyteollisuudessa oli 39 % koko Euroopassa vuonna 2016 (Varis ym. 2017, s. 205).

Lastulevyjä varten sivutuotteena syntynyt puu prosessoidaan lastuiksi, joiden joukkoon lisätään korkeassa lämpötilassa kovettuvaa liimaa, jotka kuumapuristetaan paineen avulla levyksi. Lastulevyjä voidaan käyttää rakennuslevyksi sisäverhouksiin ja lattiaranteisiin sellaisenaan tai jalostaa edelleen. Tyypillinen jaloste on melamiinipinnoitettu lastulevy. Lastulevyjä käytetään yleisesti huonekalu- ja kalusteteollisuudessa, esimerkiksi kalusteiden rungoissa. Lastulevyjä on hyödynnetty myös pakkauksissa tai betonimuoteissa. Levyjen kosteuden, palon ja lahon kestoa voi parantaa pinnoitteilla tai liimaan sekoitettavilla lisäaineilla. (Varis ym. 2017, s. 205).

Puulevyteollisuudessa sahanpurua hyödynnetään myös kuitulevyjen valmistuksessa. Varrin ym. (2017, s. 222) mukaan kuitulevyt valmistetaan paineen ja lämmön avulla, jotka liittävät puukuidut toisiinsa. Kuitujen tarttuminen tapahtuu puun omilla tarttumisominaisuuksilla ja huopautuksella. Levyjen valmistuksessa voidaan käyttää pieniä määriä liimaa tai muita lisäaineita, mutta pelkästään puunkuidut antavat levyille lujuuden, sitkeyden ja lämpimyyden. Kovia kuitulevyjä käytetään rakentamisessa, huonekaluissa ja kalusteissa, pakkaamisessa ja autoteollisuudessa (Varis ym. 2017, s. 225). Huokoisia kuitulevyjä käytetään yleensä rakentamiseen, ne soveltuvat esimerkiksi tuulensuojalevyiksi ulkoseiniin ja kattoihin. Huokoiset kuitulevyt parantavat rakenteissa myös lämmöneristystä (Varis ym. 2017, s. 226). Pieniä määriä sahanpurua voidaan hyödyntää MDF-kuitulevyissä (medium density fibre board). MDF-levyjä käytetään muun muassa laminoitujen lattialevyjen runkomateriaaleissa, puusepäniteollisuudessa, listojen valmistuksessa sekä ovi- ja ikkunateollisuudessa (Varis ym. 2017, s. 230).

Sahanpurua on myös hyödynnetty moniin tarkoituksiin sellaisenaan ilman jalostamista. Purua on käytetty esimerkiksi eläinten kuivikkeissa (Koljonen ym. 2009, s. 67). Sahanpurun ominaisuuksien vuoksi purua on aiemmin hyödynnetty eristeinä muun muassa rakenteissa. Sahanpuru on soveltunut eristeeksi myös lumensäilömiseen. Lunta on säilötty kesän yli eristettynä sahanpuruun, sillä se estää lumensulamista ilman kautta (Skogsberg 2005, s. 19). Lumensäilömistä sahanpurussa ovat hyödyntäneet useat laskettelukeskukset, ensilumen rinteiden ja latujen aukaisemiseksi jo varhaisessa vaiheessa syksyllä. Lisäksi sahanpurua on käytetty ulkoilu- ja lenkkireiteiksi tarkoitettujen polkujen päällysteinä.

4 HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET JA HAASTEET

Sahanpurulle on kehitelty viime vuosina lisää uusia käyttökohteita monenlaisiksi lupauksiksi biotuotteiksi. Sahanpurun hyödyntämiseen ja jalostamiseen uusiksi tuotteiksi laajemmille markkinoille vaikuttaa kuitenkin sahanpurun käytön kannattavuus. Sahanpuru syntyy yleensä pienissä tuotantolaitoksissa, jotka ovat etäällä toisistaan (Koljonen ym. 2009, s. 66). Sahanpurun kuljettaminen pitkiä etäisyyksiä ei ole kannattavaa, jolloin sen hyödyntäminen ei ole mahdollista, vaikka pienten yksiköiden tuottamat purumäärät muodostaisivatkin yhdessä merkittävän käyttöpotentiaalin (Koljonen ym. 2009, s. 66). Sahanpurun jalostamisen tulisi siis tapahtua lähellä sahateollisuuden tuotantolaitoksia, jotta sen hyödyntäminen olisi mahdollisimman kannattavaa.

Viime vuosina kasvavat purumäärät ovat luoneet haasteita ja muodostuneet jopa ongelmaksi. Sahateollisuudessa syntynyttä purua on käytetty energiantuotantoon vähemmän kuin aikaisemmin, kun esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden hinnat laskivat (Sahateollisuus ry 2016). Purun hinta on laskenut viime vuosien aikana huomattavasti metsähaketta sekä kuorta alhaisemmaksi, kun hintoja tarkasteltiin euroina megawattituntia kohti ja raaka-aineen toimitettuna käyttöpaikalle (Sahateollisuus ry 2016). Purun käytön väheneminen lisää myös ongelmia sen varastoitavuudessa. Purun säilyttäminen vaatii paitsi tilaa, se myös pilaantuu helposti tai voi syttyä palamaan itsestään, jolloin sen käyttöarvo menetetään (Sahateollisuus ry 2016).

Sahanpurua on kuitenkin hyödynnetty monissa käyttökohteissa ja purusta valmistettuja tuotteita on saatavilla laajasti. Sahapurusta on valmistettu sellua jo pitkään (Uusvaara 1974, s. 33). Sellun valmistusmenetelmiä on kehitetty pitkälle ja niiden tuotanto on kasvanut. Korpisen (2010) mukaan Suomessa sijaitsevan Pietarsaaren sellutehtaan kapasiteetti on tuottaa sahapurusta valmistettua sellua 40 000 tonnia vuodessa. Sahanpurusellua on hyödynnetty erilaisiin paperituotteisiin, jotka ovat monipuolisessa käytössä.

Sahanpuru on myös erittäin perinteisesti käytetty raaka-aine puulevyteollisuudessa (Uusvaara 1974, s.34). Purusta valmistettuja lastu- ja kuitulevyjä on käytetty rakentamisessa ja huonekaluteollisuudessa jo hyvin varhaisista vaiheista alkaen. Rakentamisen tarkoitukseen levyteollisuuden ohelle kehitetyt biokomposiitit, ovat tulleet yleisimmiksi viime vuo-

sien aikana. Niiden valmistusta on lisätty ja niiden saatavuus on yleistynyt. Biokomposiitteja on myytävänä useissa rakennustarvikeliikkeissä niin yrityksille kuin yksityisille kuluttajillekin.

Myös biopolttoaineiden valmistus ja käyttö on yleistynyt viime vuosina. Kajaani Cellunolix- hankkeen ympäristövaikutusten arviointiohjelman (2016) mukaan St1 Biofuels Oy:n Kajaanissa sijaitsevan tehtaan valmistuskapasiteetti on tuottaa kymmenen miljoonaa litraa etanolia vuodessa. Lisäksi saman ympäristövaikutusten arviointiohjelman (2016) mukaan samalle sijaintipaikalle on suunnitteella toinen suurempi bioetanolin tuotantolaitos, jonka kapasiteetti olisi tuottaa etanolia 50 miljoonan litraa. Bioetanolin valmistaminen polttoaineeksi on siis kasvamassa myös tulevaisuudessa.

Rakentamisen tuotteisiin sahanpuru soveltuu lähes sellaisenaan ja siitä valmistettavien tuotteiden kehittäminen on viety jo pitkälle. Toisaalta sahanpuru soveltuu jalostettavaksi pidemmälle sen rakenteen ja ominaisuuksien perusteella. Muutaman edellisen vuoden aikana on sahanpurua modifioimalla onnistuttu hyödyntämään sitä muun muassa jätevedenpuhdistuksessa. Vedenpuhdistusta purun avulla on kokeiltu Keräsen (2017) tutkimuksessa vasta melko pienessä mittakaavassa. Samoin Kilpeläisen (2012, 2013 ja 2014) tutkimuksissa, jossa sahanpurusta eristettiin hemiselluloosaa, jota hyödynnettiin esimerkiksi erilaisissa emulsioissa. Menetelmää oli kokeiltu vasta pienessä mittakaavassa ja laboratorio-olosuhteissa. Menetelmien laajentaminen ensin pilottivaiheeseen ja siitä tuotantoon suuressa mittakaavassa vie aikaa ja usein tarvitaan lisää tutkimusta, kuinka menetelmä ja menetelmät toimivat, kun käytetään suurempia raaka-ainemääriä ja olosuhteita. Yleensä prosessin vieminen eteenpäin teolliseen mittakaavaan ja tuotteiden valmistamiseen vaatii myös rahoitusta. Nämä viime vuosina kehitteillä olleet menetelmät ovat kuitenkin antaneet lupaavia tuloksia sahanpurun hyödynnettävyydestä pitkälle jalostetuissa käyttökohteissa.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Sahanpurulla on sen kemiallisen koostumuksen ansioista hyvät mahdollisuudet jalostamiseen erilaisiin käyttökohteisiin. Sahanpurua voidaan käyttää biotuotteiden raaka-aineena sellaisenaan tai toisaalta eristää siitä vain haluttuja osia, esimerkiksi hemisellulosa. Sahanpurun jalostaminen biotuotteiksi vaatii monenlaisia valmistusmenetelmiä ja osin poikkeavia olosuhteita. Tuotannon laajentamista ja sahanpurun hyödyntämistä sekä jalostamista tällä hetkellä rajoittaa erityisesti sen käytön kannattavuus. Sahanpurun kuljettaminen pitkiä matkoja tuotantolaitoksille ei ole kannattavaa. Sahanpurupohjaisten tuotteiden valmistus olisi kannattavinta vain suurimpien tuotantolaitosten yhteydessä tai välittömässä läheisyydessä.

Tällä hetkellä on kehitetty ja kehitteellä hyvin monipuolisia ja lupaavia biotuotteita, joiden kehittämistä on jatkettava edelleen. Sahanpurun ominaisuuksien ansiosta vaikuttaa siltä, että siitä olisi mahdollista kehittää myös lukuisia uusia biotuotteita. Uusien tuotteiden keksimiseen ja kehittämiseen tulee keskittyä myös tulevaisuudessa. Sahanpurusta valmistetuilla biotuotteilla on pystytty pidentämään puumateriaalin elinkaarta kiertotalouden ajattelun mukaisesti. Lisäksi sivutuotteena syntyneestä purusta on pystytty luomaan lisäarvoa biotuotteiden muodossa. Sahanpurusta valmistetut biotuotteet ovat myös vähentäneet muovin käyttöä ja olleet yhtenä ratkaisuna maailmalla olevaan muovijäteongelmaan. Sivuvirroista kehitetyt biohajoavat biotuotteet voivat korvata tulevaisuudessa uusiutumattomia materiaaleja hyvin monella tavalla ja monipuolisesti, kun kehittämissä työtä jatketaan.

LÄHDELUETTELO

Alakangas, E., Hurskanen, M., Laatikainen_Luntama, J. & Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Teknologian tutkimuskeskus VTT. ISBN 978-951-38-8419-2.

Ellen MacArthur Foundation. 2013. Towards the circular economy – Economic and the business rationale for an accelerated transition. 96 s. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf> [viitattu 18.2.2019].

Fengel, D. & Wegener, G. 1989. Wood chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin, New York: Walter de Gruyter. 613 s. ISBN 3-11-012059-3.

Huber, T., Graupner, N. & Müssig, J. 2010. Natural fibre composite processing: a technical overview. Teoksessa: Müssig, J. Industrial application of natural fibres: structure, properties and technical applications. John Wiley & Son Ltd. ISBN 978-0-470-69508-1.

Kajaani Cellunolix-hanke ympäristövaikutusten arviointi. 2016. [verkkodokumentti]. St1 Biofuels Oy. Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B6142DE8C-0028-4AC5-81E4-E9384678EB06%7D/121551> [viitattu 15.2.2019].

Keränen, A. 2017. Water treatment by quaternized lignocellulose. Acta Universitas Ouluensis C Technica 608. University of Oulu. 81 s. ISBN 978-952-62-1514-3.

Keskisaari, A. 2017. The impact of recycled raw materials on the properties of wood-plastic composites. Acta Universitas Lappeenrantaensis 768. Lappeenranta University of Technology. 84 s. ISBN 978-952-335-154-7.

Kilpeläinen, P., Kitunen, V., Hemming, J., Pranovich, A., Ilvesniemi, H. & Willför, S. 2014. Pressured hot water flow-through extraction of birch sawdust – Effects of sawdust density and sawdust size. Nordic pulp & paper research journal 29(4). s. 547–556.

Kilpeläinen, P., Kitunen, V., Pranovich, A., Ilvesniemi, H. & Willför, S. 2013. Pressurized hot water flow-through extraction of birch sawdust with acetate pH buffer. BioResources 8(4). s. 5202–5218.

Kilpeläinen, P., Leppänen, K., Spetz, P., Kitunen, V., Ilvesniemi, H., Pranovich, A. & Willför, S. 2012. Pressured hot water extraction of acetylated xylan from birch sawdust. *Nordic pulp & paper research journal* 24(4). s. 680–688.

Koljonen, T., Ruska, M., Flyktman, M., Forström, J., Kiviluoma, J., Kirkinen, J., Lehtilä, A. & Pahkala, K. 2009. Energiaressit ja -markkinat. Teknologian tutkimuskeskus VTT tiedotteita 2489. 110 s. ISBN 978-951-38-7546-6.

Korpinen, R. 2010. On the potential utilisation of sawdust and wood chip screenings. Laboratory of fibre and cellulose technology. Department of chemical engineering. Åbo Academi university. 84 s. ISBN 978-952-12-2417-1

Kärkkäinen, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Helsinki: Metsäkustannus. 486 s.

Lampinen, A. 2009. Uusiutuvan liikenne-energian tiekartta. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulun julkaisu B:17. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Joensuu. ISBN 978-951-604-101-1. 437 s.

Lehtonen, M., Merinen, M., Kilpeläinen, P. O., Xu, C., Willför, S. M. & Mikkonen, K. S. 2017. Phenolic residues in spruce galactoglucomannans improve stabilisation of oil-in-water emulsion. *Journal of colloid and interface science* 512. s. 536–547.

Liu, J., Korpinen, R., Mikkonen, K. S., Willför, S. & Xu, C. 2014. Nanofibrillated cellulose priginated from birch sawdust after sequential extractions: a promising polymeric material from waste to films. *Cellulose* 21. s. 2587–2598.

Luonnonvarakeskus. 2018. Runkopuun hakkuut uuteen ennätykseen – yli 72 miljoonaa kuutiometriä. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.luke.fi/uutiset/runkopuun-hakkuut-uuteen-ennatykseen-yli-72-miljoonaa-kuutiometriä/> [viitattu 5.2.2019].

Luonnonvarakeskus. 2019. Kiinteiden puupolttoaineiden kokonaiskäyttö maakunnittain. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/> [viitattu 17.2.2019].

Metsäteollisuuden työnantajainliitto. 1983. Sahateollisuuden sivutuotteet: Käsittele puuta oikein 13. Helsinki. 44 s. ISBN 951-9309-53-5.

Metsäteollisuus ry. 2019. Metsäteollisuus ry:n jäsenyritysten sahat Suomessa. [verkko-dokumentti]. Saatavissa: <https://www.metsateollisuus.fi/tilastot/sahateollisuus/> [viitattu 17.2.2019].

Mikkonen, K. S., Merger, D., Kilpeläinen, P., Murtomäki, L., Schmidt, U. S. & Wilhelm, M. 2016. Determination of physical emulsion stabilization mechanisms of wood hemicelluloses via rheological and interfacial characterization. *Soft matter* 12. s. 8690–8700.

Pickering, K. L., Aruan Efendy, M. G. & Le, T. M. 2016. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied science and manufacturing* 83. s. 98–112.

Riaz, U. & Ashraf, S. M. 2012. Lignin: Properties and applications. Teoksessa: Paterson, R. J. (toim.) *Lignin: Properties and applications in biotechnology and bioenergy*. New York: Nova Science Publishers, Inc. s. 69–138.

Rosa, D. S. & Lenz, D. M. 2013. Biocomposites: Influence of matrix nature and additives on the properties and biodegradation behaviour. [verkkodokumentti]. *Biodegradation – Engineering and Technology*. Saatavissa: <https://doi.org/10.5772/56290> [viitattu 16.2.2019].

Routa, J., Brännström, H., Anttila, P., Mäkinen, M., Jänis, J. & Asikainen, A. 2017. Wood extractives of Finnish pine, spruce and birch – availability and optimal sources of compounds: A literature review. *Natural resources and bioeconomy studies* 73/2017. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 55 s. ISBN 978-952-326-495-3.

Sahateollisuus ry. 2018. Sahatavaran tuotanto Suomessa ja Ruotsissa 2000-2018. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.sahateollisuus.com/sites/all/files/media/tiedostot/sahatavaran_tuotanto_1809.pdf [viitattu 5.2.2019].

Saka, S. 1991. Chemical composition and distribution. Teoksessa: Hon, D. N.–S., Shiraishi, N. (toim.) *Wood and cellulosic chemistry*. New York: Marcel Dekker, Inc. s. 59–88.

Sitra. 2014. Kiertotalouden mahdollisuudet Suomelle. Sitran selvityksiä 84. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://media.sitra.fi/2017/02/23221555/Selvityksia84.pdf> [viitattu 5.2.2019].

Sjöström, E. 1989. Puukemia: teoreettiset perusteet ja sovellutukset. 4. painos. Helsinki: Otakustantamo. 241 s. ISBN 951-672-077-3.

Skogsberg, K. 2005. Seasonal snow storage for space and process cooling. Doctoral thesis. Luleå University of technology, Department of civil and environmental engineering, Division of architecture and infrastructure.

Smith, P. M. & Wolcott, M. P. 2006. Opportunities for wood/natural fiber-plastic composites in residential and industrial applications. *Forest products journal* 56(3). s. 4–11.

Stoffel, R. B., Neves, P. V., Felissia, F. E., Ramos, L. P., Gassa, L. M. & Area, M. C. 2017. Hemicellulose extraction from slash pine sawdust by steam explosion with sulfuric acid. *Biomass and bioenergy* 107. s. 93–101.

Stora Enso. 2018. Stora Enso ja startup-yritys Sulapac kehittävät yhdessä uusiutuvan ja biohajoavan pillin. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.storaenso.com/en/newsroom/regulatory-and-investor-releases/2018/12/stora-enso-ja-startup-yritys-sulapac-kehittavat-yhdessa-uusiutuvan-ja-biohajoavan-pillin> [viitattu 28.2.2019].

Uusvaara, O. 1974. Teollisuudessa käytettävän sahanpurun ominaisuudet. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 83. s. 1–43.

Varis, R.(toim.), Akkanen, I., Jännes, T., Kekki, M., Kiiski, T., Kortelainen, V.-M., Lind-Kohvakka, S., Liski, K., Mäkinen, T., Pajuoja, H., Rainio, J., Räsänen, T., Silvennonen, I., Tarvainen, I., Tornainen, P. & Tynkkynen, T. 2017. *Puulevyteollisuus*. Porvoo: Bookwell Oy. 272 s. ISBN 978-952-68627-3-6.

Zheng, J. & Rehmann, L. 2014. Extrusion pretreatment of lignocellulosic biomass: a review. *International journal of molecular sciences* 15. s. 18967–18984.