



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **Sulfaattisellun valmistuksen sivuvirtojen hyödyntäminen**

Emmi Ruotsalainen

PROSESSITEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Heinäkuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Sulfaattisellun valmistuksen sivuvirtojen hyödyntäminen

Emmi Ruotsalainen

Oulun yliopisto, Prosessitekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2021

28 sivua

Työn ohjaaja yliopistolla: TkT Elisa Koivuranta

Tässä kandidaatintyössä käsitellään sulfaattimenetelmällä valmistetun sellun sivuvirtojen hyödyntämistä kiertotalouden ja jätehierarkian näkökulmasta. Työssä käydään ensimmäisenä läpi kiertotalouden talousmallin peruseriaatteet, jätehierarkian tasot sekä sellun valmistus sulfaattimenetelmällä. Työssä esitellään sulfaattisellun valmistuksessa syntyvät sivuvirrat, sekä nykyisiä ja mahdollisia sivuvirtojen hyödyntämisen ja arvottamisen tapoja. Työssä keskitytään etenkin uusiin sekä kehitteillä oleviin sivuvirtojen hyödyntämistapoihin, mutta esitellään myös perinteisiä sivuvirtojen käyttökohteita. Työssä pohditaan myös, mille jätehierarkian tasolle sivuvirtojen hyödyntämiskeinot sijoittuvat, sekä esitetään taulukkomuotoinen yhteenveto, josta tasot käyvät ilmi. Työssä arvioitiin, että sulfaattisellun valmistuksen sivuvirroilla on suuri hyödyntämispotentiaali, ja suurta osaa sivuvirroista osataan jo hyödyntää. Uusia kehitteillä olevia sovellutuksia on syytä ottaa tulevaisuudessa huomioon, sekä jatkaa kehitys- ja tutkimustyötä, jotta selluteollisuus jatkaisi kehitystään kohti vihreämpää ja hiilineutraalimpaa suuntaa.

# SISÄLLYSLUETTELO

## TIIVISTELMÄ

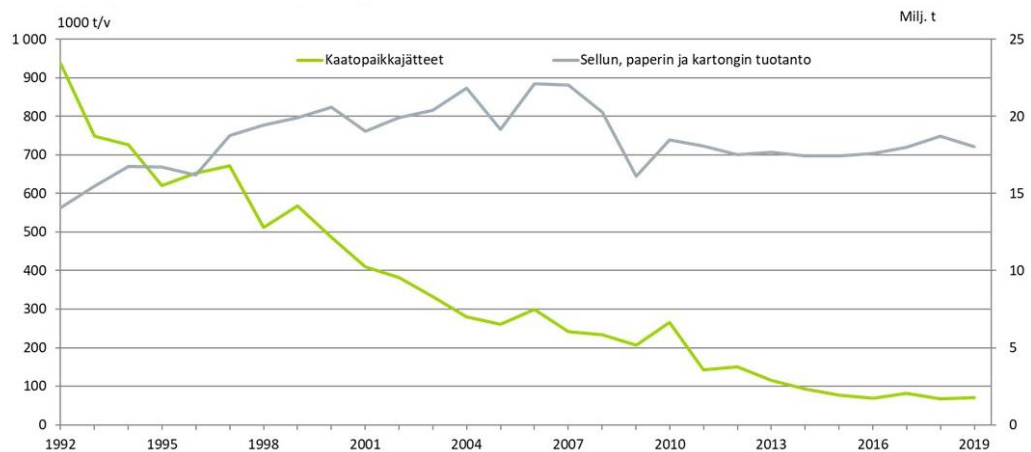
## SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto .....	4
2 Kiertotalous .....	6
3 Jätehierarkia .....	9
3.1 Ennakointi ja vähentäminen .....	9
3.2 Kierrätys ja uudelleenkäyttö .....	9
3.3 Energian talteenotto .....	10
3.4 Loppusijoitus .....	10
4 Sellun valmistus sulfaattimenetelmällä .....	12
4.1 Kuitulinja .....	12
4.1.1 Puunkäsittely .....	12
4.1.2 Keitto .....	13
4.1.3 Pesu .....	14
4.1.4 Happidelignifiointi ja valkaisu .....	14
4.1.5 Jälkikäsittely ja kuivatus .....	15
4.2 Kemikaalikierto .....	15
4.2.1 Haihdutus .....	16
4.2.2 Soodakattila .....	17
4.2.3 Kaustisointi ja meesauuni .....	17
5 Sivuvirtojen hyödyntäminen .....	19
5.1 Kuorijäte .....	19
5.2 Lentotuhka .....	20
5.3 Meesa ja viherlipesakka .....	21
5.4 Mustalipeä .....	22
5.5 Uuteaineet .....	22
6 Yhteenveto .....	24

## LÄHDELUETTELO

# 1 JOHDANTO

Kiristynyt ympäristölainsäädäntö, ilmastonmuutos- ja hiilineutraalisuuspainotukset sekä energiatehokkuuden tavoittelu on ajanut selluteollisuuden murrokseen. Sen tuotoksena sellun valmistus sekä siihen liittyvät prosessit ovat jatkuvan tutkimuksen ja kehityksen alla, joiden tavoitteena on tehdä sellun valmistuksesta mahdollisimman energiatehokas, ympäristöystävällinen sekä hiilineutraali prosessi. Sellun valmistuksessa syntyy useita sivuvirtoja, ja vielä vajaa kolmekymmentä vuotta sitten lähes kaikki näistä päätyivät loppusijoitukseen kaatopaikalle, tai polttoon energianlähteeksi. Kuva 1. esittää, kuinka vuodesta 1992 vuoteen 2019 mennessä kaatopaikalle päätyvän jätteen määrä on jo vähentynyt noin 95 %, mutta kehitettävää vielä on.



Kuva 1. Massa- ja paperitehtaiden kaatopaikkajätteet Suomessa 1992–2019.

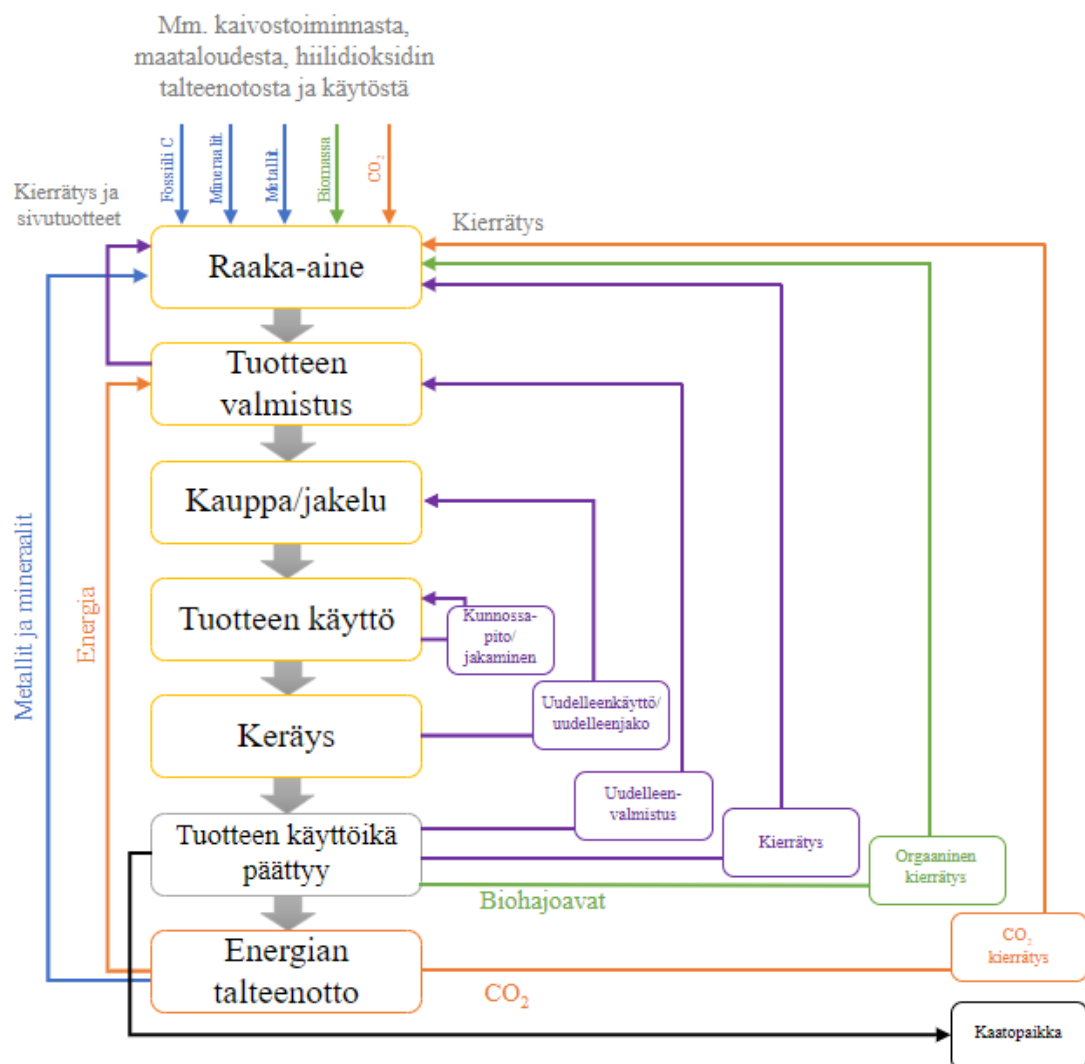
(Metsäteollisuus ry, 2020)

Sulfaattisellun valmistuksessa noin puolet puuaineksesta liukenee sellun keiton aikana keittoliuokseen. Liuennut puuaines on pääasiassa ligniiniä, joka päätyy poltettavaksi soodakattilaan. Myös puun kuori voidaan polttaa energiaksi. Tämä tarkoittaa sitä, että yli puolet tehtaalte tulevasta puuaineksesta poltetaan. (Ek et al. 2009) Kun puolet tehtaalte tulevasta puuaineksesta päätyy poltettavaksi, hiilen kiertokulku on hyvin lyhyt, eli hiili vapautuu ilmakehään palamisen yhteydessä hiilidioksidin muodossa. Tämä on vain yksi esimerkki sivuvirroista, joiden vaihtoehtoisia käyttökohteita sekä hyödyntämistapoja käydään tässä työssä läpi.

Työssä esitellään kiertotalouden ja jätehierarkian käsitteet, sekä käydään läpi sulfaattisellun valmistuksen sivuvirrat, ja erilaisia keinoja, miten näitä voitaisiin hyödyntää paremmin kiertotalouden periaatteiden mukaisesti jätehierarkian paremmilla tasoilla. Työssä on rajattu käsittelyalueen ulkopuolelle prosessissa syntyvien jätevesien käsittely sekä niissä syntyvät sivuvirrat.

## 2 KIERTOTALOUS

Kiertotalous haastaa perinteisen lineaarisen talousmallin. Se on talousmalli, jossa tuotteiden, materiaalien sekä resurssien arvo halutaan säilyttää taloudessa mahdollisimman kauan niin, että hyödyntämiskelvottoman materiaalin syntyminen minimoidaan. Kiertotaloutta voidaan kuvata ympyrämallilla, sillä kuten nimikin viittaa, resurssit halutaan pitää mahdollisimman kauan kierrossa, mutta kuva 2. avaa kiertotaloutta hieman monimutkaisemmalla tasolla. Kiertotalouden tavoitteena on tuottaa mahdollisimman vähän jätettä sekä tuotteiden tuotannon mutta myös kulutuksen aikana. Myös esimerkiksi materiaalien ja resurssien hukkakäyttö pyritään minimoimaan. (Carus et al. 2018)



Kuva 2. Kiertotalouden malli (mukaillen Nova-Institute 2016)

Kuva 2. esittää kiertotalouden kokonaisvaltaista mallia. Se kuvaa kiertotaloutta aina siihen tulevista eri materiaalivirroista niiden hyödyntämis- ja kierrätystapoihin asti. Materiaalivirrat ovat lähtöisin esimerkiksi kaivosteollisuudesta, maataloudesta, fossiilisten resurssien hankinnasta ja hiilidioksidin talteenotosta. Kaivosteollisuuden materiaalivirtoja ovat muun muassa metallit ja mineraalit, kun taas maatalouden, vesitalouden ja metsäteollisuuden materiaalivirtoja ovat erilaiset biomassat, joista tuotetaan muun muassa ruokaa, rehua, bioenergiaa sekä biopohjaisia materiaaleja ja tuotteita. Fossiilisia resursseja ovat esimerkiksi raakaöljy, maakaasu ja hiili. Raaka-aineita saadaan myös tuotteiden ja materiaalien kierrätyksestä, sekä tuotannon sivuvirroista. Raaka-aineista valmistetaan tuotteita, joita myydään ja käytetään, jonka jälkeen ne siirtyvät jätehierarkian kiertoon eri tasoille. (Carus et al. 2018)

Keskeinen piirre kiertotaloudelle on prosessien ja tuotteiden suunnittelu siten, että prosessi ja tuotteiden käyttö tai kulutus tuottaisivat mahdollisimman vähän jätettä. Kun suunnitteluvaiheessa otetaan huomioon jätteen minimointi tai jopa kokonaan jätteen poistaminen, pystytään luomaan prosesseja, jotka mahdollistavat uudelleenvalmistuksen, ja tuotteita, jotka voidaan käyttää uudelleen tai kierrättää uusiomateriaaliksi. Jätteen luokitellaan ilmastonmuutosta aiheuttavat kaasut, vaaralliset aineet, maan, ilman ja vesistöjen saastuminen, mutta myös rakenteellinen jäte kuten liikennehuuhkat ja -tukokset. Jätteen poissuunnittelu on yksi tärkeimpiä keinoja, jolla pyritään säilyttämään materiaalien ja tuotteiden arvo talouden kierrossa. (Webster 2017)

Kiertotalouden talousmallissa pyritään säilyttämään materiaalit ja tuotteet mahdollisimman kauan ja tehokkaasti talouden kierrossa. Kiertotalous siis suosii tuotteita ja prosesseja, jotka säästävät energiaa, työtä ja materiaaleja, joka tarkoittaa sitä, että tuotteiden tulisi olla kestäviä, muunneltavia, uudelleenkäytettäviä tai -valmistettavia sekä kierrätettäviä. Tällaisiin tuotteisiin sopii parhaiten biopohjaiset materiaalit, joiden kiertoon kuuluu kierto taloudessa, mutta myös luonnossa. (Webster 2017)

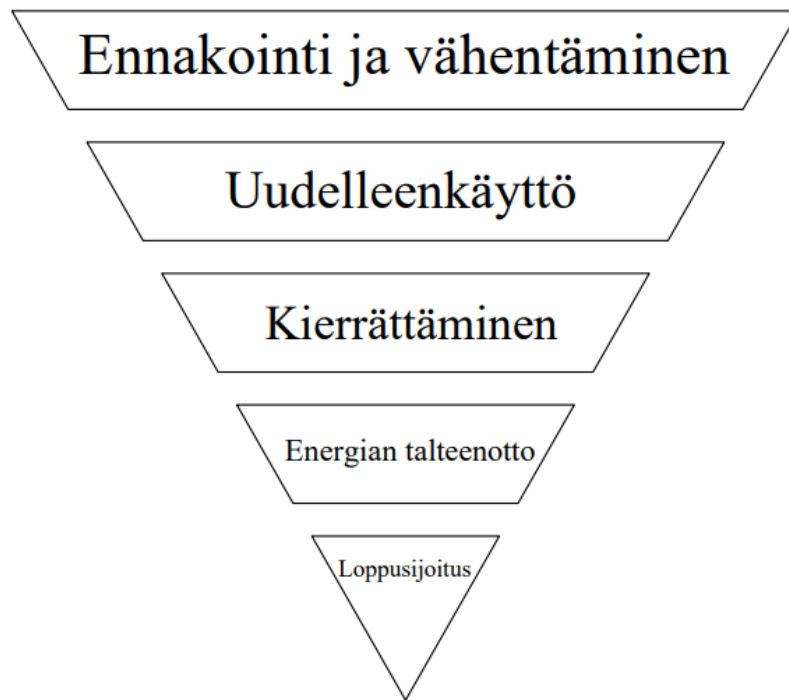
Kiertotalouden yksi keskeisistä piirteistä on pyrkiä käyttämään uusiutuvia energia- ja materiaalilähteitä. Uusiutuva energia on kiertävää, eli se johdetaan uusiutuvista lähteistä. Uusiutuvan energian lähteinä voidaan käyttää muun muassa tuulen, veden, maalämmön ja auringon energiaa. (Webster 2017) Suomessa myös puuenergia, eli muun muassa

metsä- ja selluteollisuuden sivutuotteisiin pohjautuva energia luokitellaan uusiutuvaksi energiaksi. (Bioenergia 2021)



### 3 JÄTEHIERARKIA

Jätehierarkia on termi, jota käytetään kuvaamaan jätehuollon toiminnan tärkeysjärjestystä, ja se määritellään EU:n jätedirektiivissä. (European Commission 2010) Jätehierarkian eri tasot ovat esitettynä kuvassa 3.



Kuva 3. Jätehierarkian tasot. (mukailtu Lakeuden Etappi 2021)

#### 3.1 Ennakointi ja vähentäminen

Ensisijaisesti tärkeintä on ennakoivilla teoilla vähentää ja jopa estää syntyvän jätteen määrää. Mikäli jätteen syntymistä ei voi estää, tulisi sen olla uudelleenkäytettävä, kierrätettävä, tai se tulisi voida hyödyntää talteen otettavana energiana. (Lakeuden Etappi 2021)

#### 3.2 Kierrätys ja uudelleenkäyttö

Kierrätyksellä tarkoitetaan sitä, että materiaali käytetään uudelleen hyödyksi jollain muulla tavalla. Esimerkiksi kotitalouden paperi- ja kartonkijätteet voidaan kierrättää ja

käyttää hyödyksi uusien tuotteiden valmistuksessa. Uudelleenkäytöllä taas tarkoitetaan sitä, ettei tuotteesta tule välissä jätettä. Iso osa kaatopaikalle joutuvasta loppusijoitusjätteestä sekä poltettavasta jätteestä voitaisiin tosiasiassa kierrättää, tai jopa käyttää uudelleen. Kierrätyksellä ja uudelleenkäytöllä voidaan siis vähentää kaatopaikalle ja poltettavaksi joutuvaa jätettä, sekä neitseellisten raaka-aineiden tarvetta ja energian kulutusta. (European Commission 2010)

Etenkin niukasti saatavilla olevia raaka-aineita, kuten elektroniikan sisältämiä arvometalleja, mutta myös muita materiaaleja, kuten paperia, lasia, muovia ja muita metalleja, tulisi pyrkiä kierrättämään mahdollisimman tehokkaasti. Käyttämällä kierrätettyjä materiaaleja neitseellisten sijaan voidaan huomattavasti vähentää energian kulutusta. Esimerkiksi alumiinitölkin kierrättäminen säästää noin 95 % energiaa uuden tölkin valmistuksessa, verrattuna neitseellisistä materiaaleista valmistettuun tölkkiin. (European Commission 2010)

### **3.3 Energian talteenotto**

Jätteiden polttamista jätteenpolttolaitoksilla kutsutaan energian talteen ottamiseksi. Polttolaitoksille joutuu suurin osa kotitalousjätteistä kierrätyksen lisäksi. Jätteen polttoa kutsutaan energian talteenotoksi siksi, koska sillä tuotetaan sähköä, höyryä ja lämpöä. Tehtaan yhteydessä voidaan myös polttaa prosessin tuottamia jätteitä, ja näin tuottaa energiaa tehtaan tarpeisiin, ja jopa ulkopuolisillekin tahoille, kuten kotitalouksille. (European Commission 2010)

Energian talteenotossa suurin ongelma muodostuu jätteiden epätäydellisestä palamisesta. Palamisreaktiossa voi vapautua vaarallisia kemikaaleja, dioksideja ja happokaasuja. Näiden syntymisen estämiseksi jätteen poltto vaatii tarkasti kontrolloidut olosuhteet. Näin minimoidaan ja mahdollisuuksien mukaan jopa estetään vaarallisten kaasumaisten aineiden syntyminen. (European Commission 2010)

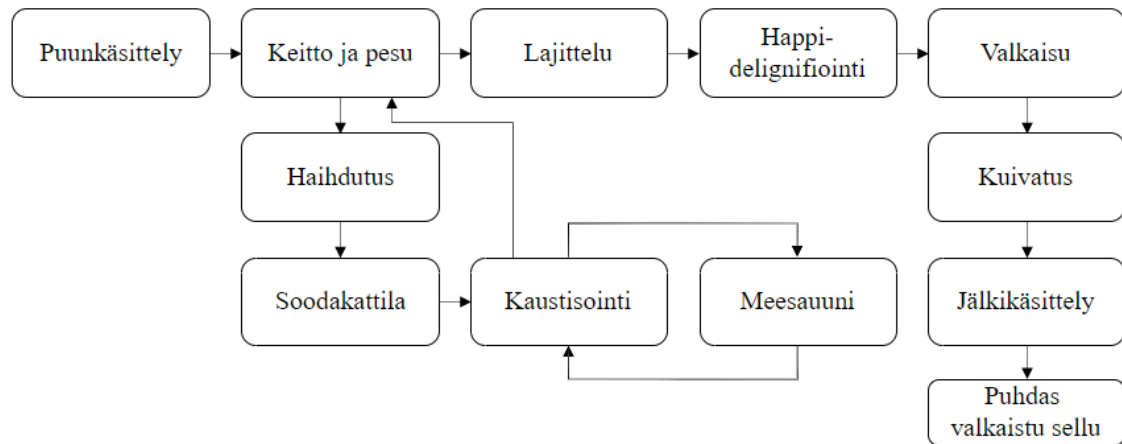
### **3.4 Loppusijoitus**

Käytöstä poistetut kulutustuotteet sekä prosesseissa syntyvät sivutuotteet, joita ei voida hyödyntää kierrättämällä tai energian talteenotossa, joutuvat loppusijoitettavaksi

kaatopaikoille. Kaatopaikka on viimeinen vaihtoehto jätteen sijoitukselle. Jätteiden loppusijoittaminen kaatopaikalle myös maksaa, ja on vahvasti lainsäädännön ohjaamaa. Loppusijoitettava jäte voi sisältää kemikaaleja ja raskasmetalleja, ja biohajoava jäte voi myös hajotessaan vapauttaa raskasmetalleja. Kemikaalit ja raskasmetallit voivat vuotaa suodosveden mukana ympäristöön. Tämä saastuttaa maaperää ja vesistöjä aiheuttaen muun muassa terveysriskin alueen eläimille ja ihmisille. (European Commission 2010)

## 4 SELLUN VALMISTUS SULFAATTIMENETELMÄLLÄ

Sulfaatti- eli kraft-menetelmä on yksi suosituimmista sellunvalmistusmenetelmistä. Sulfaattimenetelmällä on monia etuja verrattuna muihin kemiallisiin sellunvalmistusmenetelmiin. Menetelmää voidaan käyttää tuottaessa sekä valkaistua että valkaisuamatonta sellua, ja siinä voidaan käyttää raaka-aineena sekä havu- että lehtipuuta. Sulfaattimenetelmän suurin etu on kemikaalikierto, jonka avulla keittokemikaalit saadaan otettua talteen, ja käytettyä uudelleen. Samalla tuotetaan höyryä ja energiaa prosessin tarpeisiin. (Ek et al. 2009) Sellun valmistus sulfaattimenetelmällä on kuvattuna vuokaaviona kuvassa 4.



Kuva 4. Sellun valmistus sulfaattimenetelmällä.

### 4.1 Kuitulinja

#### 4.1.1 Puunkäsittely

Puu tulee useimmiten kuorimolle tukkeina. Jos tukit ovat jäisiä, ne täytyy sulattaa ennen kuorintaa. Sulatus tapahtuu sulatuskuljettimella, jonka jälkeen tukit kuoritaan, eli niistä poistetaan tarpeeksi kaarna lopputuotteen laadun takaamiseksi. (Ek et al. 2009) Kaarna poistetaan, sillä kaarna ei sisällä juurikaan hyödyllisiä kuituja, tummentaa sellua ja kuluttaa turhaan keittokemikaaleja. Kuorintajäte voi sisältää kaarnan lisäksi pieniä kiviä ja hiekkaa. Kuorintajäte pestään tukeilta pois ennen haketusta. Kuorintajäte on puunkäsittelyssä syntyvä sivuvirta. (Pöykiö et al. 2019)

Kuorinnan jälkeen puu haketetaan oikean kokoiseksi hakkeeksi. Kun hake on sopivan kokoista ja paksuista sekä tasalaatuista, keittokemikaalit ja lämpö jakautuvat tasaisesti ja nopeasti myöhemmin keitossa, ja tuotteesta tulee tasalaatuista. Hakepalan tärkein ominaisuus on paksuus. Mikäli hake on liian paksua, delignifikaatio on epätasaista, ja tämä lisää keiton jälkeistä rejktiä. (Ek et al. 2009)

#### 4.1.2 Keitto

Puuaines sisältää selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä. Keiton tarkoituksena on delignifointi, eli selluloosakuitujen vapauttaminen ligniiniä liuottamalla. Ligniini on monimutkainen ja -haarainen orgaaninen yhdiste, ja sitä on pääasiassa solujen välisessä välilamellissa. Ligniinin poistaminen helpottaa hakkeen kuituuntumista, mutta on myös eduksi myöhemmissä vaiheissa, mikäli massa valkaistaan. Ligniini antaa massalle ruskean sävyn, ja mitä vähemmän massassa on jäännösligniiniä, sitä helpompi se on valkaista. (Ek et al. 2009)

Kuitujen delignifointi tapahtuu keittokattilassa, jossa puuhake upotetaan keittoliuokseen ja kuumennetaan 150–170 °C lämpötilaan, sekä korkeaan paineeseen. Keiton lämpötila on riippuvainen muun muassa käytetystä puulajikkeesta. Keiton aikana muodostuu helposti haihtuvia yhdisteitä, joita kerätään jatkuvasti talteenoton vuoksi, mutta myös jotta kattilassa säilyisi haluttu paine. Kerätyt kaasut lauhdutetaan, jotta haihtuneet aineet, kuten raakatärpätti, saadaan otettua talteen. Raakatärpätti erotetaan lauhteesta, ja tislataan edelleen eri jakeisiin. Kerättyjen kaasujen seassa on myös lauhtumattomia yhdisteitä. (Ek et al. 2009)

Keittoliuos koostuu regeneroidusta valkolipeästä ja kierrätetystä mustalipeästä. Mustalipeä sisältää keittokemikaalit, sekä siihen keitossa liunneen orgaanisen aineksen. Valkolipeä sisältää natriumhydroksidia ja natriumsulfidia, joiden tarkoituksena on liuottaa mahdollisimman paljon ligniiniä ja vähän selluloosaa, sillä selluloosakuidut halutaan pitää mahdollisimman ehjinä ja vahvoina. Natriumhydroksidi pilkkoo ligniiniä ja näin edesauttaa sen liukenemista, mutta se liuottaa myös osittain selluloosaa. Natriumsulfidi vähentää tätä selluloosan liukenemista, sekä pilkkoo ligniiniä ja nopeuttaa keittoa. Natriumsulfidi voi myös parantaa saantoa käytettävän puulajin mukaan. Natriumsulfidin haittana on sen haju, mutta syntyvät hajukaasut voidaan esimerkiksi

polttaa. Vaikeampi haitta on natriumsulfidin aiheuttama korroosio, mutta oikeanlaisilla materiaalivalinnoilla voidaan välttyä myös siltä. (Ek et al. 2009)

#### **4.1.3 Pesu**

Sulfaattisellun valmistuksessa massa pestään ensimmäisen kerran keiton jälkeen, ja uudelleen happidelignifioinnin ja valkaisuun jälkeen. Pesun tarkoitus on puhdistaa massa käyttäen mahdollisimman vähän pesuvettä. (Ek et al. 2009)

Massa pestään ensimmäisen kerran keiton jälkeen, jolloin kyseessä on niin sanottu ruskean massan pesu. Ruskean massan pesussa tarkoituksena on ottaa talteen mustalipeä, joka sisältää käytetyt keittokemikaalit sekä liuennutta orgaanista ainetta. Mustalipeän talteenotto mahdollistaa lipeän uudelleenkäytön kemikaalikierron kautta. Ruskean massan pesu on tärkeää, sillä mitä puhtaammaksi massa pestään, sitä vähemmän joudutaan käyttämään resursseja massan valkaisuun. Pesussa pyritään käyttämään mahdollisimman vähän pesuvettä taloudellisuuden vuoksi, mutta myöskin siksi, että mustalipeää ei haluta laimentaa liikaa. Suuri vesipitoisuus alentaa myös jatkokäsittelyn, kuten haihdutuksen taloudellisuutta. (Ek et al. 2009)

Massa pestään myös happidelignifioinnin ja valkaisuun jälkeen. Massasta pyritään etenkin pesemään liuennut ligniini pois, sillä se vaikuttaa massan vaaleuteen. Tässä pesuvaiheessa käytetään usein vastavirtapesua, jossa puhtain massa pestään puhtaimmalla pesuvedellä. (Ek et al. 2009)

Happidelignifioinnin ja valkaisuun jälkeisissä pesuissa syntyvä jätevesi on yksi sivuvirroista. Happidelignifioinnin jätevedet ohjataan kemikaalikiertoon, jossa jätevesien sisältämä orgaaninen aines päätyy poltettavaksi soodakattilaan. Valkaisuun jätevedet ohjataan jätevedenpuhdistamolle. (Ek et al. 2009)

#### **4.1.4 Happidelignifiointi ja valkaisu**

Happidelignifioinnissa poistetaan sellusta siihen jäänyttä jäännösligniiniä käyttäen happea ja alkalia. Happidelignifiointi on siis suora jatkumo ligniinin poistolle, joka jo keiton aikana alkoi. Ennen tätä prosessia massa pestään, sillä massaan jäänyt orgaaninen aines vaikeuttaa happidelignifioinnin reaktioita. (Ek et al. 2009)

Happidelignifiointi on hellävaraisempi ja selektiivisempi ligniinin poistossa kuin keitto. Tällä voidaan laskea ligniinipitoisuutta alemmaksi ilman, että riskeerataan saannon pientyminen. Saannon pientyminen on yleistä, kun sellua keitetään hyvin alhaiseen ligniinipitoisuuteen. Happidelignifioinnin tavoitteena on päästää mahdollisimman vähän orgaanista ainetta kulkeutumaan eteenpäin prosessissa. Näin jatkovalkaisussa kemikaalien kulutus ja lujuustason lasku säilyy minimissä. Tämä lisää taloudellisuutta, sekä alentaa päästöjä. (Ek et al. 2009)

Valkaisu jatkaa sellun delignifiointia, eli sen tarkoituksena on happidelignifioinnin tavoin sellun jäännösligniinin poistaminen. Valkaisun tavoite on sellun vaalentaminen, vaaleuden pysyvyyden parantaminen ja yleisesti sellun puhdistaminen. Sellu valkaistaan useassa vaiheessa, sillä se antaa parhaan tuloksen sekä laadullisesti että taloudellisesti. Valkaisulle oleellinen osa on myös massan pesu, jossa liuennut ligniini ja muut orgaaniset aineet huuhdotaan massasta pois. (Ek et al. 2009)

Happidelignifioinnin ja valkaisun jälkeisissä pesuissa pesuveteen irtoaa liuennutta ligniiniä. Happidelignifioinnin pesuvesistä suodettu ligniini ja muu liuennut aines johdetaan kemikaalikiertoon, ja lopulta poltetaan soodakattilassa. Valkaisun pesuvedet johdetaan jätevesienkäsittelyyn. (Ek et al. 2009)

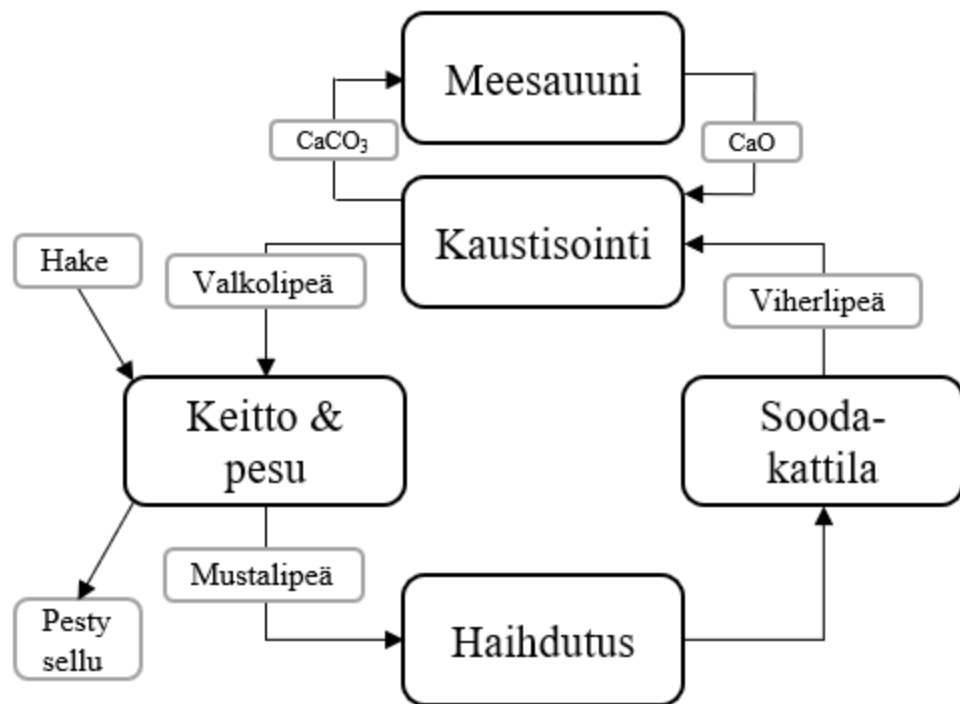
#### **4.1.5 Jälkikäsittely ja kuivatus**

Jälkilajittelussa poistetaan viimeisetkin epäpuhtaudet. Epäpuhtaudet luokitellaan usein raskas- ja kevytrejektiin. Raskasrejekti on kuitua raskaampaa, ja kevytrejekti kevyempää. Epäpuhtaudet halutaan poistaa, sillä ne vaikuttavat erityisesti massan ulkonäköön, mutta voivat myös huonontaa massasta valmistettavan tuotteen pintaominaisuuksia. Massa kuivataan kuivauskoneella, ja siitä leikataan selluarkkeja. (Ek et al. 2009)

## **4.2 Kemikaalikierto**

Sulfaattimenetelmän etu sellunvalmistusmenetelmänä on sen kemikaalikierto, jonka aikana keitossa syntynyt mustalipeä regeneroidaan uudelleen valkolipeäksi. Kemikaalikierron tärkeimpiä vaiheita ovat sellun keitto, mustalipeän haihdutus,

soodakattila, sekä kaustisointi ja meesauuni. (Ek et al. 2009) Kuvassa 5. esitetään kemikaalikierto vuokaaviona.



Kuva 5. Kemikaalikierto.

#### 4.2.1 Haihdutus

Keiton jälkeen ruskea sellumassa pestään, jolloin sellu ja mustalipeä erotetaan toisistaan. Mustalipeällä tarkoitetaan sellusta keiton jälkeen erotettavaa liuosta, joka sisältää keittoliuoksen käytetyt keittokemikaalit sekä puusta keittoliuokseen liunneen ligniinin ja muut orgaaniset yhdisteet. Haihduttamolle tuleva mustalipeä, eli niin kutsuttu pesulipeä, on kuiva-ainepitoisuudeltaan 15–16 %. Haihduttamalla poistetaan vettä mustalipeästä, jotta sen kuiva-ainepitoisuus kasvaisi. Tämä on erityisen tärkeää seuraavaa vaihetta varten, jossa mustalipeä poltetaan soodakattilassa. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden tulee olla 80–85 % soodakattilaan mennessään, ja jotta tähän päästään, on haihdutuksessa useita eri prosessivaiheita. (Ek et al. 2009)

Haihduttamalla otetaan talteen keitossa syntyneitä sivutuotteita. Ennen haihdutusta mustalipeästä erotetaan suopaa kahdessa eri vaiheessa, sillä suovan liukoisuus lipeään on



pesulipeässä suuri. Suovan erotusta parantaa pidempi viiveaika, jonka aikana suopa ehtii erottua lipeän pinnalle. (Ek et al. 2009)

Itse haihdutuksen aikana veden mukana höyrystyy metanolia, joka tiivistetään lauhteeseen, ja erotetaan vedestä ja muista lauhuneista aineista strippauskolonnissa. (Ek et al. 2009)

#### **4.2.2 Soodakattila**

Soodakattilassa otetaan talteen prosessikemikaalit sekä poltossa syntyvä lämpöenergia. (Ek et al. 2009) Mustalipeän sisältämä natrium ja rikki otetaan talteen polttamalla. Poltossa natriumsulfaatti pelkistyy natriumsulfidiksi. Pelkistymisreaktiot tapahtuvat soodakattilan alaosassa. Koska reaktiot eivät ole täydellisiä, osa rikkiyhdisteistä ei pelkisty natriumsulfidiksi, ja osa natriumyhdisteistä reagoi hiilidioksidin kanssa muodostaen natriumkarbonaattia. Reduktioaste kertoo, kuinka suuri osa natriumsulfaatista on pelkistynyt natriumsulfidiksi. (Ek et al. 2009) Soodakattilassa syntynyt kemikaalisula sisältää natriumsulfaattia, natriumsulfidia ja natriumkarbonaattia. Kemikaalisulasta muodostuu viherlipeää, kun se liuotetaan laihavalkolipeään tai veteen. (Ek et al. 2009)

Soodakattilan palamisreaktio on epätäydellinen, jonka seurauksena savukaasujen mukana poistuu suuria määriä lentotuhkaa. Lentotuhka on yksi soodakattilassa muodostuvista sivuvirroista, ja se erotetaan savukaasuista savukaasusuodattimilla ja -pesureilla. (Ek et al. 2009)

Soodakattilalla tuotetaan höyryä prosessin eri vaiheiden lämmitystarpeisiin, sekä sähköä turbiinin avulla. (Ek et al. 2009)

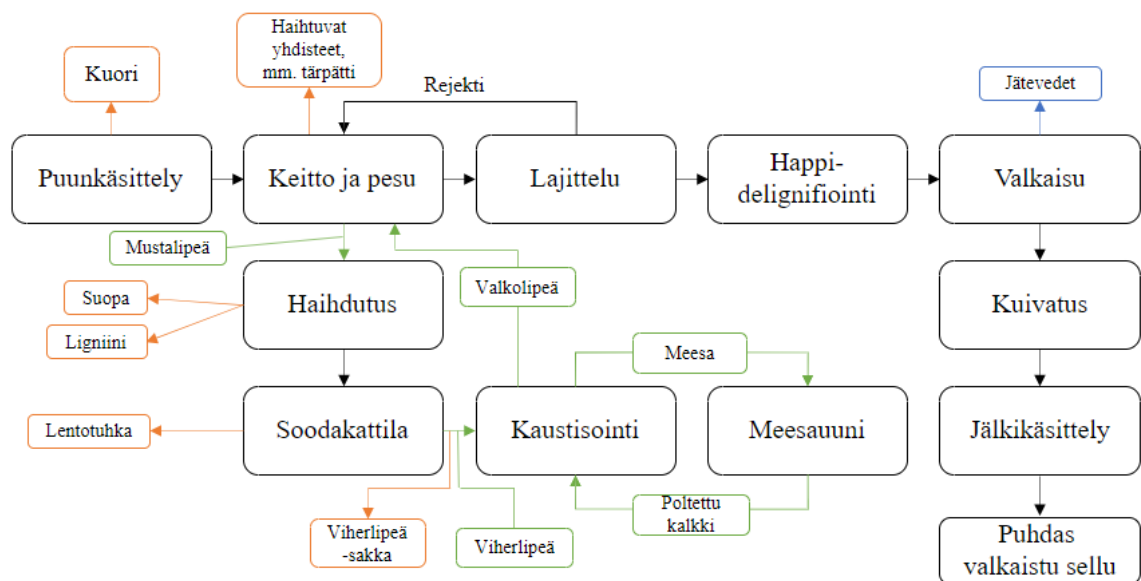
#### **4.2.3 Kaustisointi ja meesauuni**

Ennen kaustisointia viherlipeää puhdistetaan suodattamalla siitä pois epäpuhtauksia, jossa syntyvää sivuvirtaa kutsutaan viherlipeäsakaksi. Tämän jälkeen suodatettuun viherlipeään sekoitetaan poltettua kalkkia. Tätä kutsutaan kaustisoinniksi. Poltettu kalkki liukenee viherlipeän sisältämään veteen muodostaen kalsiumhydroksidia, joka taas reagoi viherlipeän natriumkarbonaatin kanssa muodostaen meesaa, eli kalsiumkarbonaattia.

Meesan ja valkolipeän seosta kutsutaan kalkkimaidoksi. Kalkkimaidosta erotetaan muodostunut meesa sekä valkolipeä toisistaan. Meesa regeneroidaan meesauunissa poltetuksi kalkiksi, jota käytetään taas uudelleen kaustisoinnissa. Meesauunissa tapahtuvassa reaktiossa syntyy poltetun kalkin lisäksi hiilidioksidia. Valkolipeää käytetään uudelleen sellun keitossa. (Ek et al. 2009)

## 5 SIVUVIRTOJEN HYÖDYNTÄMINEN

Sulfaattisellun valmistuksessa syntyvät sivuvirrat ovat pääosin lähtöisin uusiutuvan raaka-aineen lähteistä. Näitä raaka-aineita voidaan käyttää sellaisinaan, valmistaa uusiksi tuotteiksi tai muuntaa uusiutuvaksi energiaksi. (Mandeep et al. 2020) Kuvassa 6. on esitetty sellun valmistus sulfaattimenetelmällä. Siinä on esitettyä myös prosessissa syntyvät sivuvirrat, sekä sisällytetty kemikaalikierto.



Kuva 6. Sellun valmistus sulfaattimenetelmällä sivuvirtoineen

### 5.1 Kuorijäte

Kun sellutehtaalle tulevat tukit kuoritaan, eli niiden kaarna poistetaan, syntyy kuorijätettä. Kuorijäte voidaan polttaa sellutehtaaseen integroidussa voimalaitoksessa, joka tuottaa energiaa tehdasintegraatin tarpeisiin (Ek et al. 2009). Kuorijäte on usein kuitenkin hyvin kostea. Tämän vuoksi sen polttaminen ei ole taloudellista, ja vaihtoehtoisia käyttötarkoituksia tutkitaan. (Pöykiö et al. 2019) Kaarnan polttaminen lyhentää hiilen kiertokulkua, ja vapauttaa hiilen ilmakehään hiilen oksideina hyvin nopeasti.

Biomassaa, kuten kaarnaa, voidaan muuntaa termokemiallisilla prosesseilla, kuten pyrolyysillä, biohiileksi ja nestemäisiksi polttoaineiksi. Biohiilellä on potentiaalisia

käyttötarkoituksia esimerkiksi maanparannusaineena. Vaikka asiaa on tutkittu laajasti, markkinat biohiilelle ovat Suomessa vasta alkaneet avautumaan. (Pöykiö et al. 2019)

Kaarna voi sisältää raskasmetalleja, mutta Pöykiön et al. (2019) mukaan suomalaisen puun kaarnan raskasmetallipitoisuudet ovat alhaisemmat, kuin Suomen lain vaatimat raskasmetallipitoisuuksien raja-arvot maanrakennusaineelle, sekä metsälannoitteena käytettävälle tuhkalle. Tämä tarkoittaa sitä, että kaarnaa voitaisiin käyttää metsälannoitteena. Louhittavat mineraalit, joista lannoitteita usein valmistetaan, ovat rajoitetusti käytettävissä oleva raaka-aine. Kaarnapohjaisella lannoitteella voitaisiin korvata mineraalipohjaisia lannoitteita. Orgaanisen aineksen lisääminen maaperään parantaa sen laatua ja samalla vähentää eroosiota. (Pöykiö et al. 2019)

## 5.2 Lentotuhka

Biomassan poltossa syntyy suuria määriä lentotuhkaa, jotka usein loppusijoitetaan kaatopaikalle. Koska loppusijoitus ei ole taloudellisesti järkevää, erilaisia lentotuhkan hyödyntämistapoja tutkitaan jatkuvasti. (Pöykiö et al. 2012) Lentotuhkan koostumus vaihtelee paljon riippuen poltetun biomassan koostumuksesta. (Agrela et al. 2019) Soodakattilassa syntyvä lentotuhka sisältää pääasiassa natriumsulfaattia ja natriumkarbonaattia (Huutinen 2008), kun taas sellutehtaan voimalaitoksen biopoltossa syntynyt lentotuhka sisältää pääasiassa muun muassa albiittia, kalsiittia, kalkkia ja piioksidia, kun polton raaka-aineena on käytetty pääasiassa puunkuorta, haketta, sahanpuruja ja muuta vastaavaa puhdasta biomassaa. (Pöykiö et al. 2012)

Pöykiön et al. (2012) mukaan Suomen lain vaatimat raskasmetallipitoisuuksien raja-arvot metsälannoitteelle eivät ylity suomalaisesta puhtaasta biomassasta syntyneessä lentotuhkassa, joten sitä voidaan käyttää metsälannoitteena. Lentotuhkan käyttäminen metsälannoitteena vähentäisi loppusijoituksen sekä mineraalipohjaisten lannoitteiden tarvetta. (Pöykiö et al. 2012) Lentotuhkaa ei voida kuitenkaan sellaisenaan käyttää lannoitteena, vaan se täytyy ensin rakeistaa käsittelyn helpottamiseksi. (Rakeistus Oy 2021)

Lentotuhkaa voidaan käyttää meesan sekä viherlipesakan kanssa klinkkerin valmistuksessa, sillä nämä aineet sisältävät paljon klinkkerille tärkeitä komponentteja,

kuten alumiinioksidia, piioksidia ja kalsiumoksidia. Lentotuhkalla on hyvin alhainen vesipitoisuus ja pieni partikkelikoko. Nämä ominaisuudet ovat ihanteellisia sementin tuotantoon. (Mandeep et al. 2020 & Simão et al. 2017) Simão et al. (2017) ovat todenneet, että lentotuhkaan, meesaan ja viherlipeäsakkaan pohjautuvasta klinkkeristä valmistettu sementti saavutti puristuslujuuden sekä muut fyysiset ominaisuudet, jotka ovat verrattavissa sementin nykyisiin standardeihin. Näin ollen lentotuhkalla on tulevaisuudessa potentiaalia olla tärkeä raaka-aine ympäristöystävällisemmän klinkkerin valmistuksessa.

### **5.3 Meesa ja viherlipeäsakka**

Meesa sisältää pääasiassa kalsiumkarbonaattia, ja tavallisesti se regeneroidaan meesauunissa poltetuksi kalkiksi. Meesan regenerointi meesauunissa on kuitenkin hyvin energiaintensiivinen prosessi, ja se vapauttaa hiilidioksidia ilmakehään. (Ek et al. 2009)

Viherlipeäsakka suodatetaan viherlipeästä ennen kaustisointia. Se on kosteaa, ja se sisältää raskasmetalleja, joten sen jatkohyödyntäminen on haasteellista. Useimmiten viherlipeäsakka loppusijoitetaan kaatopaikalle. Se on kuitenkin koostumukseltaan niin kosteaa, että loppusijoitusta varten viherlipeäsakkaan usein sekoitetaan esimerkiksi tuhkaa tai kiviainesta. Tätä sekoitusta voidaan toisaalta loppusijoituksen sijaan käyttää maaperän rakennuksessa, kuten suurien kenttien tai teiden pohjustuksessa. (UPM 2016)

Viherlipeäsakalla voidaan korvata perinteinen kalkkikivi savukaasujen puhdistuksessa, sillä se suodattaa rikkipäästöjä samalla tasolla kuin kalkkikivi. Kalkkikivi on louhittava mineraali, joten sen korvaaminen sellun valmistuksen sivutuotteella viherlipeäsakalla säästää luontoa, mutta pienentää myös savukaasujen puhdistuskustannuksia. (Tyhtilä 2015)

Meesan ja viherlipeäsakan hyödyntämistä klinkkerin valmistamisessa on tutkittu, ja Simão et al., (2017) ovat todenneet, että lentotuhkaan, meesaan ja viherlipeäsakkaan pohjautuvasta klinkkeristä valmistettu sementti saavutti nykyisiä sementin standardeja vastaavat fyysiset ominaisuudet. Näin ollen meesa ja viherlipeäsakka ovat tulevaisuudessa potentiaalisia tärkeitä raaka-aineita ympäristöystävällisemmän klinkkerin valmistuksessa.

## 5.4 Mustalipeä

Yleisin käyttökohde mustalipeälle sulfaattisellun valmistuksessa on energiantuotanto soodakattilassa polttamalla, mutta samalla soodakattilan kapasiteetti on yksi sellun tuotannon kasvattamisen pullonkauloista. Mustalipeä sisältää noin 35–40 % ligniiniä, joka lisää lämpökuormaa soodakattilalle. Jopa osan ligniinin erotus mustalipeästä ennen soodakattilaa pienentäisi sen lämpökuormaa, sekä avaisi mahdollisuuden ligniinin jo käytössä oleville sekä kehitettäville käyttökohteille. (Ek et al. 2009)

Ligniini on epäsäännönmukainen biopolymeeri, ja sille on jo kehitetty sekä on edelleen kehitteillä useita eri käyttökohteita. Ligniiniä voidaan soodakattilapolton tavoin sellaisenaan käyttää voimalaitoksella raaka-aineena energian tuotannossa, mutta siitä voidaan valmistaa myös kehittyneempiä polttoaineita, sekä hyödyntää myös muilla tavoin. (Valmet, 2021)

Ligniinistä on mahdollista valmistaa bioöljyä, joka voidaan jatkojalostaa fossiilivapaaksi biodieseliksi ja biobensiiniksi. (RenFuel 2021a) Ligniinipohjaisia materiaaleja voidaan käyttää korvaamaan perinteisiä fossiilipohjaisia muoveja. Ligniinipohjaisia biomuoveja valmistettaessa on pystytty saavuttamaan korkealaatuisia, 100 % uusiutuvia materiaaleja, joiden vahvuus ja joustavuus on säädettävissä ja helposti prosessoitavissa. Biomuovit soveltuvat myös hyvin komposiittimateriaaleihin. (RenFuel 2021b)

Ligniinipohjaista biomuovimateriaalia voidaan myös sekoittaa uuden tai kierrätetyn fossiilipohjaisen muovimateriaalin sekaan, osaltaan vähentäen muovin valmistuksesta syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä. (Lignin Industries 2021)

Ligniiniä voidaan käyttää korvaamaan fenoleja hartsiliiman valmistuksessa. Ligniinipohjaista hartsiliimaa käytetään muun muassa vanerilevyjen valmistuksessa, vähentäen vanerintuotannon hiilijalanjälkeä huomattavasti. (Stora Enso, 2020)

## 5.5 Uuteaineet

Sulfaattisellun valmistuksessa erotetaan useita erilaisia uuteaineita. Tutuimpia näistä ovat suopa, raakatärpätti ja metanoli. (Ek et al. 2009)

Raakasuopa sisältää alkalisen keittoliuoksen ansiosta saippuoituneita hartsihappoja ja rasvoja, jotka voidaan hapottaa raakamäntyöljyksi. Raakamäntyöljyä jatkojalostetaan tislamalla eri jakeita, ja sen päätuotteet ovatkin mäntyhartsi ja mäntyrasvahappo, mutta saadaan myös muun muassa mäntypikeä ja tislattua mäntyöljyä. Mäntyrasvahapolle, mäntyöljylle ja sekatisleille on useita perinteisiä käyttökohteita, kuten mäntysuovan valmistus sekä käyttö maali- ja liimateollisuuden raaka-aineena. (Ek et al. 2009)

Mäntyöljystä voidaan myös valmistaa biodieseliä ja naftaa, kuten UPM Lappeenrannan biojalostamo tekee. UPM BioVerno biodieselin raaka-aineena toimii raakamäntyöljy, jonka jalostamo saa viereiseltä sellutehtaalta. Biodieseliä valmistetaan vetykäsittelyteknologialla. Biodieselillä päästään pienempiin pakokaasupäästöihin, se aiheuttaa 80 % vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä ja palaa puhtaammin kuin perinteinen fossiilipohjainen diesel. Fyysiset ominaisuudet sekä laatu ovat samalla tasolla fossiilipohjaisen dieselpolttoaineen kanssa. (UPM 2021a) Myös UPM BioVerno naftan raaka-aineena toimii raakamäntyöljy, ja naftaa voidaan käyttää korvaamaan fossiilisia raaka-aineita benssiinissä, sekoitteena polttoaineissa ja kemianteollisuuden raaka-aineena. (UPM 2021b)

Raakatärpätti on myös perinteinen sellutehtaan sivuvirta. Raakatärpättistä valmistetaan tärpättiä tislamalla. Tärpätin perinteisiä käyttökohteita ovat muun muassa maaliteollisuus, jossa sitä käytetään liuottimena ja ohenteena, sekä lääke- ja parfyymiteollisuus. (Ek et al. 2009)

Metanolia höyrystyy haihdutuksen aikana, ja höyry lauhdutetaan lauhteeksi, josta metanoli erotetaan vedestä ja epäpuhtauksista (Ek et al. 2009). Metanolin erotustehokkuus on yleensä noin 90 % (Kuparinen 2019). Puhdistettua metanolia voidaan käyttää energianlähteenä soodakattilalle tai meesauunille, sekä biometanolia voidaan myös käyttää muun muassa polttoaineena. (Andritz 2021)

## 6 YHTEENVETO

Sulfaattisellun valmistusmenetelmä on yksi kehitetyimmistä sellunkeiton tekniikoista, mutta muun muassa ilmastonmuutoksen ja ympäristölainsäädäntöjen paineen alla on kiinnitettävä huomiota myös prosessissa syntyvien sivuvirtojen hyödyntämiseen kiertotalouden periaatteiden mukaisesti mahdollisimman hyvällä jätehierarkian tasolla.

Sulfaattisellun valmistuksessa syntyvät suurimmat sivuvirrat, joiden hyödyntämispotentiaalia on vielä valjastamatta, ovat kuorijäte, lentotuhka, meesa, viherlipeäsakka, uuteaineista muun muassa mäntyöljy, sekä mustalipeän ligniini.

Taulukko 1. Sivuvirrat jätehierarkian tasoilla

Sivuvirta	Nykyisiä käyttökohteita	Jätehierarkian taso	Potentiaalisia käyttökohteita	Jätehierarkian taso	Jätehierarkian tasot
Kuurijäte	Poltto	4	Biohiili & nestemäinen polttoaine	3	1. Ennakointi ja vähentäminen
			Metsälannoite	3	
Lentotuhka	Loppusijoitus	5	Metsälannoite	3	2. Uudelleenkäyttö
			Klinkkeri	3	
Meesa	Regenerointi	2	Regenerointi	2	3. Kierrättäminen
			Klinkkeri	3	
Viherlipeäsakka	Loppusijoitus	5	Maaperän rakennus	3	4. Energian talteenotto
			Savukaasujen puhdistus	3	
			Klinkkeri	3	
Mäntyöljy	Mäntysuopa, maali- ja liimateollisuus	3	Biodiesel	3	5. Loppusijoitus
			Bionafta	3	
Ligniini	Poltto	4	Biodiesel	3	
			Biobensiini	3	
			Biomuovit	3	
			Komposiittimateriaalit	3	
			Ligniiniinipohjainen hartsiliima	3	
Keskiarvo =		3,8	Keskiarvo =		2,9

Taulukkoon numero 1 on koottu edellä mainitut sivuvirrat, niiden nykyiset ja potentiaaliset käyttökohteet, sekä jätehierarkian tasot. Jätehierarkiatarvo on määritetty numeerisella arvolla 1–5, jossa numero 1 kuvaa parasta tasoa, eli ennakointia ja vähentämistä, ja numero 5 kuvaa loppusijoitusta. Taulukosta nähdään, ettei mikään potentiaalisista käyttökohteista sijoitu jätehierarkian tasolle 1, sillä työ pohjautui lähinnä uusiin ja kehitteillä oleviin uudelleenkäytön ja kierrätyksen tapoihin. Jätehierarkian tasoista on laskettu numeerinen keskiarvo sekä nykyisille, että potentiaalisille käyttökohteille.

Kuurijäte poltetaan yleensä lisäenergian tuottamiseksi tehdasalueelle tai lähialueen kotitalouksille. Kuorijätettä voidaan jatkojalostaa biohiileksi ja nestemäiseksi biopolttaineeksi, tai käyttää sellaisenaan metsälannoitteena. Koska kuorijätettä syntyy



sellutehtaan kuorimolla valtavia määriä, edellä mainitut käyttötavat eivät todennäköisesti tule kuluttamaan tarpeeksi kuorijätettä etenkin suurella biotuotetehtaalla. Biohiilen markkinoiden kehittyessä sen menekki tulee kuitenkin todennäköisesti kasvamaan, ja kuoripohjainenkin metsälannoite hakee vielä sijaa markkinoiltaan. Kuorijätettä hyödynnetään siis todennäköisesti vielä tulevaisuudessakin energiantuotannossa muiden uusien sekä edelleen kehitteillä olevien käyttökohteiden rinnalla.

Lentotuhkalle on viime vuosina kehitetty erilaisia hyödyntämistapoja, joista merkittävimmät tällä hetkellä ovat metsälannoite sekä klinkkeri. Jotta lentotuhkaa voidaan hyödyntää metsälannoitteena, se täytyy käytettävyyden kannalta ensin rakeistaa, joka lisää lentotuhkan vaatimaa käsittelyä, ja näin ollen myös kustannuksia. Mineraalipohjaisten lannoitteiden raaka-aineiden ehtyessä tullaan todennäköisesti jatkossa kiinnittämään enemmän huomiota uusiutuvista raaka-aineista lähtöisin oleviin lannoitteisiin.

Lentotuhkaa voidaan viherlipeäsakan kanssa yhdessä käyttää niin sanotun ekoklinkkerin valmistukseen. Rakennusalan kilpailun kasvaessa etsivät yritykset jatkuvasti uusia ympäristöystävällisempiä ratkaisuja vedotakseen ilmastotietoiseen kuluttajaan, joten ekoklinkkerillä on mahdollisuus menestyä hyvin sementin raaka-aineena.

Viherlipeäsakkaa voidaan loppusijoituksen sijasta klinkkerin valmistuksen lisäksi käyttää maaperän rakennusaineena lentotuhkaan sekoitettuna esimerkiksi suurien kenttien ja teiden pohjusteena, sekä savukaasujen puhdistuksessa.

Mäntyöljy on yksi havupuun uuteaineista, joita on jo pitkään osattu hyödyntää muun muassa mäntysuovan sekä maali- ja liimateollisuuden raaka-aineena. Selluteollisuuden isot toimijat ovat kuitenkin kehittäneet mäntyöljylle myös uusia käyttökohteita, joilla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita, kuten biodieseliä ja bionaftaa, ja näiden valmistus on Suomessakin jo käynnissä teollisessa mittakaavassa.

Ligniinin suurin käyttökohde tällä hetkellä on energian tuottaminen sellutehtaan sähkön ja höyryn tarpeisiin. Sellutehtaiden tuotantokapasiteettia pyritään kasvattamaan jatkuvasti kysynnän kasvaessa, ja soodakattilan kapasiteetti luo tähän usein pullonkaulan. Suurimman kuorman soodakattilalle tuo mustalipeään liunneen ligniinin määrä. Koska moderni soodakattila tuottaa huomattavan ylimäärän energiaa tehtaan tarpeisiin verraten,

on mahdollista erottaa osa mustalipeän ligniinistä ennen soodakattilaa ilman, että soodakattilan energiantuotanto tippuu tarvitun tason alle.

Ligniinillä on sivuvirroista jopa eniten potentiaalia hyödyntämisen kannalta, sillä se on monimutkainen epäsäännöllinen hiilivety, jota pystytään manipuloimaan useilla eri tavoilla. Siitä voidaan esimerkiksi erilaisin prosessein valmistaa biopolttoaineita sekä biomuovin raaka-ainetta, jota voidaan käyttää myös esimerkiksi komposiittimateriaalien valmistuksessa. Ligniinipohjaiset biopolttoaineet ovat tulevaisuudessa yksi keino korvata fossiilipohjaisia polttoaineita, ja tämä voi olla jopa kannattavampaa ja taloudellisempaa kuin sähköautojen valmistaminen, sillä biopohjaisten polttoaineiden käyttö ei välttämättä vaadi suuria muutoksia nykyisten kulkuneuvojen polttomoottoreihin, eikä vaadi kalliiden ja harvinaisten metallien kaivamista sähköakkujen valmistusta varten. Ligniini on myös hyvä ehdokas perinteisen hartsiliiman korvaajaksi, ja sitä käytetäänkin jo teollisessa mittakaavassa esimerkiksi vanerin valmistuksessa.

Taulukosta 1. nähdään, että sivuvirtojen potentiaalisten käyttökohteiden taso jätehierarkiassa on parempi kuin nykyisillä käyttökohteilla. On kuitenkin huomioitava, että osa potentiaalisten käyttökohteiden kehityksestä ei ole vielä valmiilla tasolla markkinoille, tai tuotteille ei välttämättä ole vielä suuria markkinoita. Joillekin sivutuotteille nähdään perinteinen käyttötapa edelleen kannattavana, joka voi osaltaan hidastaa uusien hyödyntämiskeinojen käyttöönottoa. Uudet hyödyntämiskeinot voivat vielä olla myös nykyhetkellä taloudellisesti kannattamattomia, mutta useimmilla on kuitenkin tulevaisuudessa nähtävissä suurta potentiaalia. Uusia kehitteillä olevia sovellutuksia on siis syytä ottaa tulevaisuudessa huomioon, sekä jatkaa kehitys- ja tutkimustyötä, jotta selluteollisuus jatkaisi kehitystään kohti vihreämpää ja hiilineutraalimpaa suuntaa.

## LÄHDELUETTELO

AGRELA, F., CABRERA, M., MORALES, M.M., ZAMORANO, M. and ALSHAAER, M., 2019. 2 – Biomass, fly ash and biomass bottom ash. In: J. DE BRITO and F. AGRELA, eds, *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*. Woodhead Publishing, pp. 23-58.

ANDRITZ, 2021. A-Recovery+ chemical recovery concept for methanol purification in kraft mills. Available: <https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/pulp-production/kraft-pulp/a-recovery-plus/methanol-purification> [06.19.2021].

BIOENERGIA, 2021. Puuenergia. Available: <https://www.bioenergia.fi/tietopankki/puuenergia/> [27.6.2021].

CARUS, M. and DAMMER, L., 2018. The “Circular Bioeconomy” – Concepts, Opportunities and Limitations. *Nova-Institute*.

EK, M., GELLERSTEDT, G. and HENRIKSSON, G., 2009. *Pulping Chemistry and Technology*. Berlin: De Gruyter.

EUROPEAN COMMISSION, 2010. *Being wise with waste: the EU's approach to waste management*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

HUUTINEN, M., KORHONEN, R., PIMIÄ, T., URPALAINEN, S., 2008. Voimalaitostekniikka. Keuruu: Opetushallitus, Otavan Kirjapaino. p. 72.

KUPARINEN, K., 2019. *Transforming the chemical pulp industry - from an emitter to a source of negative CO2 emissions*, Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT.

LAKEUDEN ETAPPI, 2021. Jätehuolto osana arjen kiertotaloutta. Available: <https://www.etappi.com/jateneuvonta/jatehierarkia-ohjaa-toimintaa/> [7.1.2021].

LIGNIN INDUSTRIES, 2021. Refines Forest Lignin to Bioplastic. Available: <https://www.lignin.se/> [12.06.2021].

MANDEEP, KUMAR, G.G. and SHUKLA, P., 2020. Insights into the resources generation from pulp and paper industry wastes: Challenges, perspectives and innovations. *Bioresource technology*, vol. 297.

METSÄ GROUP, 2021. Metsä Groupin sivuvirtoja hyödynnetään monella arvokkaalla tavalla. Available: <https://www.metsagroup.com/fi/Media/Pages/Case-arvokkaat-sivuvirrat.aspx>. [7.1.2021]

NOVA-INSTITUTE, 2016. "Comprehensive Concept of Circular Economy" - Graphic | Renewable Carbon Publications. Available: <https://renewable-carbon.eu/publications/product/comprehensive-concept-of-circular-economy-%e2%88%92-graphic/>.

PÖYKIÖ, R., NURMESNIEMI, H., MANSKINEN, K. and DAHL, O., 2012. Forest Fertilizer Properties of the Bottom Ash and Fly Ash from a Large-Sized (115 Mw) Industrial Power Plant Incinerating Wood-Based Biomass Residues. *Journal of the University of Chemical Technology & Metallurgy*, vol. 47, pp. 43-52.

PÖYKIÖ, R., WATKINS, G. and DAHL, O., 2019. Evaluation of the utilization potential of debarking residue based on the requirements of Finnish waste legislation. *Clean Technologies & Environmental Policy*, vol. 21, pp. 463-470.

RAKEISTUS OY, 2021. Tuhkantuottajille.

Available: <https://www.rakeistus.fi/palvelut/tuhkantuottajille/> [2.4.2021].

RENFUEL, 2021a. Bio-Based Plastic of Forest Lignin... LIGNISOL replace fossile plastics. Available: <https://renfuel.se/materials/?lang=en> [12.06.2021].

RENFUEL, 2021b. The Future is Already Here... LIGNOL turns all vehicles into environmental friendly cars. Available: <https://renfuel.se/bio-energy/?lang=en> [12.06.2021].

SIMÃO, L., JIUSTI, J., LÓH, N.J., HOTZA, D., RAUPP-PEREIRA, F., LABRINCHA, J.A. and MONTEDO, O.R.K., 2017. Waste-containing clinkers: Valorisation of alternative mineral sources from pulp and paper mills. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 109, pp. 106-116.

STORA ENSO, 2020. Developing a Lignin Based Resin for Plywood.

Available: <https://www.storaenso.com/en/newsroom/news/2020/6/developing-a-lignin-based-resin-for-plywood> [12.06.2021].

TYHTILÄ, J., 2015. UPM kehitti viherlipeäsakalle uusiokäyttöä – sellunkeittojätteellä voimalaitosten rikkipestöt pienemmiksi. *Yle Uutiset*. Available: <https://yle.fi/uutiset/3-7969445> [27.6.2021]

UPM, 2021a. UPM BioVerno -diesel.

Available: <https://www.upmbiofuels.com/fi/liikennepolttoaineet/upm-bioverno-diesel-polttoaine/> [25.6.2021].

UPM, 2021b. UPM BioVerno Nafta. Available: [https://www.upmbiofuels.com/fi/kemikaalit/\[25.6.2021\]](https://www.upmbiofuels.com/fi/kemikaalit/[25.6.2021]).

UPM, 2016. The moist green liquor dregs are a recycling challenge.

Available: <https://www.upm.com/news-and-stories/articles/2016/12/the-moist-green-liquor-dregs-are-a-recycling-challenge/> [2.4.2021].

VALMET, 2021. Uses of Lignin. Available: <https://www.valmet.com/pulp/other-value-adding-processes/lignin-extraction/lignin-uses/> [12.06.2021].

WEBSTER, K., 2017. *The Circular Economy: A Wealth of Flows*. 2nd ed. Ellen MacArthur Foundation Publishing.