

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Lauri Similä

Puunkulutuksen vähentäminen koivu- ja havusulfaattisellun
valmistuksessa

Työn tarkastaja: TkT Professori Esa Vakkilainen

Työn ohjaaja: MMM Lauri Talikka

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Lauri Similä

Puunkulutuksen vähentäminen koivu- ja havusulfaattisellun valmistuksessa

Diplomityö 2019

Tarkastaja: TkT Professori Esa Vakkilainen

Ohjaaja: MMM Lauri Talikka

69 sivua, 29 kuvaa, 2 taulukkoa ja 4 liitettä

Hakusanat: haketus, seulonta, puuhäviö, sellutehdas

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää tapoja vähentää Kaukaan sellutehtaan puunkulutuslukua tuotettua sellutonnia kohden kuitupuiden haketuksen ja seulonnan muutosten avulla. Tavoitteena on kartoittaa nykytilanne sellutehtaan haketus- ja seulontaprosessissa ja erilaisten koeajojen ja hakenäytteiden analysoinnin perusteella selvittää mahdollisten muutosten vaikutus puunkulutukseen. Työn teoriaosuudessa selvitetään koivu- ja havupuun ominaisuuksia ja vaikutuksia sellun valmistusprosessiin. Erilaisien puunkäsittelyn laitteistojen toimintaa tarkastellaan teoriaosuudessa ja arvioidaan niiden vaikutus hakkeen laatuun ja puuhäviöihin. Haketuksen vaikutus sellutehtaan puunkulutukseen muodostuu suurimmilta osin hienoaineksen ja ylisuurten hakepalojen osuuden perusteella. Moderni hakku tuottaa vähemmän hienoainesta erilaisen purkaustavan ja haketusgeometrian johdosta. Työn kokeellisessa osuudessa seurattiin hakkeen palakokojakaumaa eri koeajotilanteissa ja tutkittiin seulomon ylipaksujen hakepalojen käsittelyn optimaalisuutta ja purunerotuksen tasoa. Havaittiin, että kuorimon molemmat hakut tuottavat merkittävän määrän hienoainesta. Lisäksi seulomon havulinjan ylipaksujen hakepalojen erottelu ja käsittely ei ole optimaalista, mikä johtaa häviöihin kuitulinjan prosesseissa. Purunerotuksessa menetetty hake on myös merkittävä häviön lähde. Eri kehitysehdotusten takaisinmaksuaikoja arvioitiin kokeellisen osuuden perusteella.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
School of Energy Systems
Degree Program in Energy Technology

Lauri Similä

Reducing wood consumption in producing softwood and hardwood kraft pulp

Master's thesis 2019

Examiner: D. Sc. Professor Esa Vakkilainen

Supervisor: M. Sc. Master of Forestry Lauri Talikka

69 pages, 29 figures, 2 tables and 4 appendixes

Keywords: chipping, chip screening, wood loss, pulp mill

The goal for this master's thesis is to discover ways to reduce wood consumption in kraft pulp production focused on chipping and chip screening. The purpose is to clarify the current situation in pulp mills' chipping and chip screening process and to study ways to reduce wood consumption based on performed trials and analysing chip samples from different locations. The theoretical part of this thesis studies some pulping features of softwood and hardwood. The effects of different wood handling machinery on chip quality and wood consumption is evaluated in theoretical part. Chipping influences wood consumption based on the amount of non-optimal woodchips, including pins, fines, overthick and oversize chips. Modern chipper generates less fines due to different discharge method and advanced chipping geometry. In the experimental part of this thesis chip size distribution was examined in different chipping trials. The optimality of oversize chip processing and fines screening were also evaluated. Debarking plants' chippers produce significant amount of pins and fines. Overthick screening and processing of softwood chips is not optimal, which causes wood loss in fiberline processes. Fines screening is also substantial source of wood loss. Payback times for different improvements were estimated based on experimental part.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty UPM Kaukaan sellutehtaan puunkäsittelyosastolla puunkulutuksen vähentämiseksi koivu- ja havusulfaattisellun valmistuksessa syyskuun 2018 ja huhtikuun 2019 välisenä aikana. Haluan kiittää työni ohjaajaa Lauri Talikkaa työn tavoitteiden ja koeajojen suunnittelujen avustamisesta. Kiitos kuuluu myös puunkäsittelyosaston toimihenkilöille, operaattoreille ja laitosmiehille, jotka avustivat aina tarvittaessa eri tilanteissa työn aikana. Myös kuitulinjan väelle ja sellutehtaan johdolle suuret kiitokset avusta työn aikana.

Opiskeluaika Lappeenrannassa ja vaihto-opiskelujakso Trondheimissa oli mukava jakso kaikin puolin. Kiitos opiskelutovereilleni ja läheisilleni tuesta opiskelujeni aikana.

Lappeenrannassa 29.04.2019

Lauri Similä

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	6
2	PUURAAKA-AINEEN OMINAISUUDET	7
2.1	Runkopuun rakenne	7
2.2	Kosteus.....	8
2.3	Termiset ominaisuudet.....	9
2.4	Tiheys.....	11
2.5	Lujuus.....	12
2.6	Poikkeavuudet.....	12
3	PUUNKÄSITTELYPROSESSI	14
3.1	Vastaanotto ja sulatus.....	14
3.2	Kuorinta ja kuoren käsittely	16
3.3	Haketus.....	18
3.4	Hakkeen varastointi ja ostohakkeen vastaanotto.....	27
3.5	Seulonta.....	27
4	KAUKAAN SELLUTEHTAAN PUUNKÄSITTELY	30
4.1	Puun ja ostohakkeen vastaanotto	30
4.2	Puun ja hakkeen laadunvalvonta.....	31
4.3	Puun syöttö kuorimolle	32
4.4	Sulatus ja kuorinta.....	32
4.5	Hakkeen varastointi.....	33
4.6	Haketus.....	33
4.7	Havuhakkeen seulonta	35
4.8	Koivuhakkeen seulonta	36
5	KUOREN JA PURUN KÄYTTÖ TEHDASINTEGRAATISSA	38
6	PUUNKULUTUKSEN VÄHENTÄMINEN KAUKAAN SELLU-TEHTAALLA	39
6.1	Kuorimon tarkastelu.....	39
6.1.1	Kuorimon hakkujen tarkastelu ja haketustapahtuman suurnopeuskuvaus	42
6.1.2	Vastaterän vaihdon merkitys haketukseen.....	44
6.2	Seulomon tarkastelu	48
6.2.1	Havuseulomon hakelitistäjän toiminnan tarkastelu	51

7	HAKETUSVERTAILU KAUKAAN JA VERROKKITEHTAAN VÄLILLÄ	55
7.1	Koeajojen kulku verrokkitehtaalla	55
7.2	Koeajojen kulku Kaukaan sellutehtaalla	56
7.3	Tulokset.....	56
7.4	Johtopäätökset.....	57
8	TULOKSET.....	59
8.1	Taloudellinen tarkastelu	60
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	64
10	YHTEENVETO.....	66
11	LÄHDELUETTELO	68

LIITTEET

Liite I	Ylisuurten hakepalojen keittokokeet
Liite II	Vastaterän vaihdon merkitys hakkeen laatuun
Liite III	Haketusvertailu Kaukaan sellutehtaan ja verrokkitehtaan välillä
Liite IV	Taloudellinen tarkastelu

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

L	pituus	[mm]
q	lämpöarvo	[kJ/kg]
R	kuiva-tuoretiheys	[kg/m ³]
m_0	puun massa mitattu kuivana	[kg]
u	leikko	[mm]
V_g	tilavuus puun syiden kyllästymispistettä korkeammassa kosteudessa	[m ³]
$w(H)$	vetypitoisuus	[p-%]
$w(O)$	happipitoisuus	[p-%]
$w(N)$	typpipitoisuus	[p-%]

Kreikkalaiset

ε	syöttökulma	[°]
---------------	-------------	-----

Alaindeksit

d	kuiva-aine
gr	kalorimetrinen
net	tehollinen
p	vakiopaine
V	vakiotilavuus

Lyhenteet

ADS	Air Density Separator
-----	-----------------------

1 JOHDANTO

Kaukaan sellutehdas valmistaa vuosittain 770 000 t valkaistua koivu- ja havusellua. Lisäksi tehtaalla keitetään purusellua Kaukaan sahalta sekä sellutehtaan hakkeen seulonnasta tulevasta purusta. Purusellu sekoitetaan koivuselluun sekaan ja valkaistaan yhdessä koivumassan kanssa. Tehdas on kaksilinjainen, eli havu- ja koivusellulle on omat tuotantolinjansa.

Puukustannus on suurin valmistuskustannuserä sulfaattiselluloosan valmistuksessa. Puun ominaiskulutus on aktiivisesti tehtaalla seurattava suure, joka yhdessä puumarkkinasta muodostuvan puunhinnan kanssa muodostavat kokonaispuukustannuksen. Optimoimalla kuorinta- ja kuitulinjaprosessia voidaan saavuttaa mittavia kustannussäästöjä. Lisäksi optimaalisella kuorinnalla ja haketus- ja seulontaprosessilla vaikutetaan lopputuotteeseen alenevan roskatason, kasvaneen lujuuden sekä alhaisemman uuteainepitoisuuden muodossa.

Työssä on tarkoitus selvittää sellutehtaan kuorimon ja seulomon laitteiston ja ajotavan vaikutuksia koivu- ja havusellun puunkulutukseen ja lopputuotteen laatuun. Teoriaosuudessa selvitetään puuraaka-aineen ominaisuuksien vaikutusta puunkäsittelyprosessiin ja lopputuotteen laatuun sekä puunkäsittelyn laitteiston merkitystä kuitulinjan prosessissa. Työn kokeellisessa osassa selvitetään erilaisten prosessiolosuhteiden merkitystä hakkeen laatuun ja arvioidaan mahdollisia muutostarpeita tulosten perusteella. Kokeellisessa osassa hyödynnetään hakkuun syötettävän puun dimensioita mittaava optista mittalaitetta sekä Kaukaalla sijaitsevan hakelaboratorion ja tutkimuskeskuksen laitteistoa.

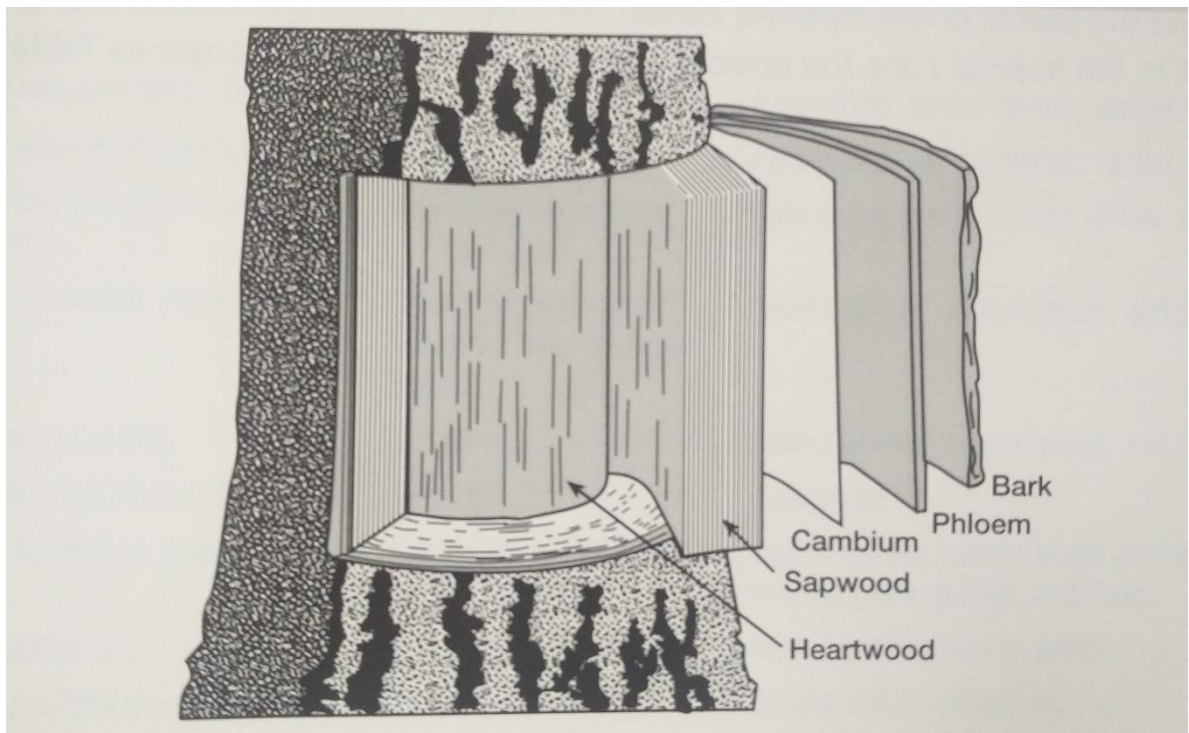
Työn lopuksi selvitetään mahdollisten muutosehdotusten merkitystä sellutehtaan puunkulutuksen ja lopputuotteen laadun kannalta ja suoritetaan taloudellista tarkastelua muutosehdotuksille koeajojen ja teoreettisen tarkastelun avulla. Lisäksi esitetään jatkotutkimuskohteita puunkulutuksen vähentämiseksi.

2 PUURAAKA-AINEEN OMINAISUUDET

Suomessa puuraaka-aineen käyttökohteita ovat ensisijaisesti kemiallinen ja mekaaninen metsäteollisuus sekä polttoainekäyttö lämmön ja sähkön tuotannossa. Suomen kolme vallitsevinta puulajia ovat koivu, mänty ja kuusi, mitä kaikkia käytetään sulfaattisellun raaka-aineena. Tässä kappaleessa keskitytään erityisesti edellä mainittujen puulajien ominaisuuksiin. Sulfaattisellun valmistuksessa ja puuraaka-aineen energiakäytössä kiinnostavimpia ominaisuuksia ovat sekä kuoren että puuaineen kosteus, termiset ominaisuudet, tiheys, lujuus sekä erinäiset poikkeavuudet ja viat. Selluteollisuudessa raaka-aineen korkea laatu on edellytys laadukkaana lopputuotteen valmistukselle.

2.1 Runkopuun rakenne

Puun rakenne, esitelty kuvassa 1, voidaan yksinkertaistetusti puun ytimestä aloittaen luetella seuraavasti: sydänpuu, pintapuu, jälsi, nila ja kuori. Sydänpuu, pintapuu ja jälsi lasketaan puuksi, nila on puun sisäkuori jonka ulompi kerros muuttuu kuoreksi puun kasvaessa.



Kuva 1: Puun rakenne (Kellomäki 1998, 21).

Pintapuun kuidunpituus on sydänpuuta pidempi, minkä johdosta se on etenkin armeeraussellun valmistuksessa hyvä raaka-aine lopputuotteen vetolujuuden kannalta. Kuidunpituus kasvaa männyllä ja kuusella merkittävästi halkaisijan funktiona sydänpuusta kuoreen päin. (UPM Internal 2002)

Kuiva puu koostuu pääasiallisesti kolmesta alkuaineesta: hiili (n. 50%), happi (n. 40%) ja vety (n. 6%). Alkuaineet muodostavat puun primäärisen soluseinämän osat eli hiilihydraatit (selluloosa ja hemiselluloosa) ja ligniinin. Puumassan keskimääräiset soluseinämän koostumusosuudet on esitelty taulukossa 1. (Kellomäki 1998, 128-129)

Taulukko 1: Keskimääräinen soluseinämän ainesosaosuus [%], kuiva puu (Kellomäki 1998, 129).

Soluseinän ainesosa	Havupuut	Lehtipuut
Selluloosa	40-45	40-45
Hemiselluloosa	25-30	25-35
Ligniini	25-35	20-25

Selluloosa ja hemiselluloosa ovat ne puun osat, joista valmistetaan sulfaattisellua. Ligniini on ikään kuin puun liima-aine, joka lujittaa ja sitoo puukuitua yhteen. Ligniini sitoutuu pääasiassa puun hemiselluloosiin sidosten selluloosan kanssa ollessa harvinaisia (Jääskeläinen & Sundqvist 2007, 94). Sulfaattisellun valmistuksessa on tarkoituksena erotella puun kuidut toisistaan vahingoittumana ilman mekaanista työtä poistamalla tarpeeksi ligniiniä raaka-aineesta (Gullichsen 2000, 28).

2.2 Kosteus

Puu on vettä imevä eli hygroskooppinen aine, jolla on kyky sitoa sitä ympäröivän ilman vesihöyryä. Puuaineeseen tulevan ja poistuvan vesihöyryn määrälle on olemassa ympäröivän ilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa vastaava tasapainokosteus. (Kärkkäinen 2007, 177). Kosteusprosentti määritetään yleisesti selluteollisuudessa ja puun polttoainekäytössä puussa olevan veden massan suhteessa puun kokonaisuun (Kellomäki 1998, 162).

Puun kosteus vaihtelee esimerkiksi puulajista, vuodenajasta, puun iästä ja tiheydestä riippuen. Käsiteltävistä puulajeista korkein kosteus on männyllä. Koivulla kosteus vaihtelee havupuita enemmän kesäajan suuremman haihdunnan vuoksi: kosteus on suurimmillaan keväällä ennen lehtien puhkeamista ja syksyllä lehtien pudottua. (Jahkonen et al 2012, 6) Esimerkiksi koivun keskimääräinen kosteusprosentti vaihtelee vuodenajasta riippuen välillä 39...48%, ollen talvella noin 45 % (Kellomäki 1998, 162).

Sulfaattisellun valmistuksessa olisi käsiteltävän puun oltava mahdollisimman tuoretta, toisin sanoen kosteusprosentin oltava kaatotuoreen puun luokkaa. Tämä edesauttaa puun kuorintaa ja haketusta vähäisillä puuhäviöillä ja parantaa hakkeen laatuarvoa. Tuorempi puu heikentää voimalaitokselle menevän jakeen lämpöarvoa kosteusprosentin ollessa korkeampi.

2.3 Termiset ominaisuudet

Puun termisiä ominaisuuksia tarkastellessa voidaan tutkia esimerkiksi lämpölaajenemisen, lämmönjohtavuuden ja lämpökapasiteetin vaikutuksia. Työn kannalta olennaisin tarkasteltava ominaisuus on kuitenkin puun ja kuoren lämpöarvo ja palamisominaisuudet.

Polttoaineen lämpöarvo, yleisesti ilmoitettaessa megajouleina polttoainekiloa kohti (MJ/kg), voidaan esittää kolmella eri tavalla: kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo on lämpöenergian määrä massayksikköä kohti, joka vapautuu täydellisen palamisen seurauksena ja palamistuotteet jäähtyvät 25 °C:een lämpötilaan. Polttoaineen sisältämä vesi sekä vedyn palamistuotteena syntyvä vesi oletetaan palamisen jälkeen nesteeksi. (Alakangas et al 2016, 28)

Suomessa yleisimmin ilmoitettava lämpöarvo on tehollinen lämpöarvo (alempi lämpöarvo), joka lasketaan kalorimetrin lämpöarvon perusteella yhtälöllä 1. Tehollisessa lämpöarvossa on huomioitu palamisessa höyrystyvän veden höyrystymisenergia. (Alakangas et al 2016, 28)

$$q_{p,net,d} = q_{V,gr,d} - 212,2 \cdot w(H)_d - 0,8 \cdot [w(O)_d + w(N)_d] \quad (1)$$

missä	$q_{p,net,d}$	kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo vakioaineessa [kJ/kg]
	$q_{v,gr,d}$	kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo vakioilavuudessa [kJ/kg]
	$w(H)_d$	vetypitoisuus kuivassa polttoaineessa [p-%]
	$w(O)_d$	happipitoisuus kuivassa polttoaineessa [p-%]
	$w(N)_d$	typpipitoisuus kuivassa polttoaineessa [p-%]

Kolmas tapa lämpöarvon ilmoittamiseen on tehollinen lämpöarvo saapumistilassa eli toimituskosteudessa. Tässä lämpöarvon määrittämisessä vähennetään polttoaineen sisältämän ja palamisessa syntyvän veden haihduttamiseen kuluva energiamäärä, joten se on kolmesta esitellyistä lämpöarvosta matalin. (Alakangas et al 2016, 28)

Taulukossa 2 on esitelty kuivan puun rungon ja rungon kuivan kuoren tehollisia lämpöarvoja.

Taulukko 2: Puun kuivan rungon ja kuivan kuoren tehollinen lämpöarvo [MJ/kg] (mukaien Kärkkäinen 2007, 246-247)

Puulaji	Runko	Sisäkuori	Ulkokuori
Mänty	19,31-19,53	18,76-18,98	20,31-20,56
Kuusi	19,05-19,16	17,84-18,62	20,54-20,72
Hieskoivu	18,57-18,62	18,87-18,96	31,43-31,86
Rauduskoivu	18,42-18,61	18,32-18,85	31,32-32,04

Taulukosta 2 huomataan, että kuivan kuoren tehollinen lämpöarvo on runkoa suurempi. Ero selittyy siten, että kuoren rasva- ja ligniinipitoisuudet ovat runkoa korkeammat. Rungon sisällä puun eri osien lämpöarvoissa on eroja: selluloosan lämpöarvo (17,38-18,21 MJ/kg) on pienempi kuin ligniinin (25,54 MJ/kg), hartsi- ja rasvojen lämpöarvo. (Kärkkäinen 2007, 245-246) Huomattavaa on, että koivun ulkokuoren tehollinen lämpöarvo on merkittävästi suurempi kuin havupuilla.

2.4 Tiheys

Tiheys, ilmoitettuna yksikössä $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, on hyvä mittari sellun valmistuksessa käytettävän kuitupuun laadun seurannassa, sillä se indikoi puun ja kuitujen ominaisuuksia kuten soluseinämän paksuutta ja vaikuttaa raaka-aineen käyttäytymiseen sellun valmistuksessa (Kellomäki 1998, 164). Tiheydestä puhuttaessa on olemassa useita käsitteitä kuten irtotiheys, (kiinto)tiheys, tuoretiheys, kuivatiheys ja kuiva-tuoretiheys.

Tiheyden määrittämisessä käytetään usein kuiva-tuoretiheyttä, sillä puun kosteuspitoisuus vaikuttaa puun tiheyteen. Kuiva-tuoretiheys kertoo kuiva-aineen määrän tuoretta kuutiota kohden. Kuusella keskimääräinen kuiva-tuoretiheys on 370-400 kg/m³, männyllä 380-440 kg/m³ ja koivulla 460-520 kg/m³. (Jääskeläinen & Sundqvist 2007, 123) Kuiva-tuoretiheys määritellään yhtälöllä 2 (Kärkkäinen 2007, 139).

$$R = \frac{m_0}{V_g} \quad (2)$$

missä R kuiva-tuoretiheys [kg/m³]

m_0 puun massa mitattu kuivana [kg]

V_g tilavuus puun syiden kyllästymispistettä korkeammassa kosteudessa [m³]

Sellun valmistuksessa kuiva-tuoretiheyden korkeasta tasosta hyödytään siten, että samasta kuutiomäärästä haketta saadaan enemmän varsinaista puuainetta kuin matalamman kuiva-tuoretiheyden tason hakkeesta. Eri puolajien vertailua tiheyksien perusteella ei ole relevanttia, sillä tiheyserojen syitä voivat olla mm. uuteainepitoisuudet ja solukkolaatujen muutokset. Yleisesti voidaan kuitenkin todeta, että tiheyden kasvaessa mekaaninen lujuus kasvaa. Koivulla tiheyden kasvu lisää kuitujen osuutta pääasiassa putkiloiden kustannuksella. (Kärkkäinen 2007, 175-176)

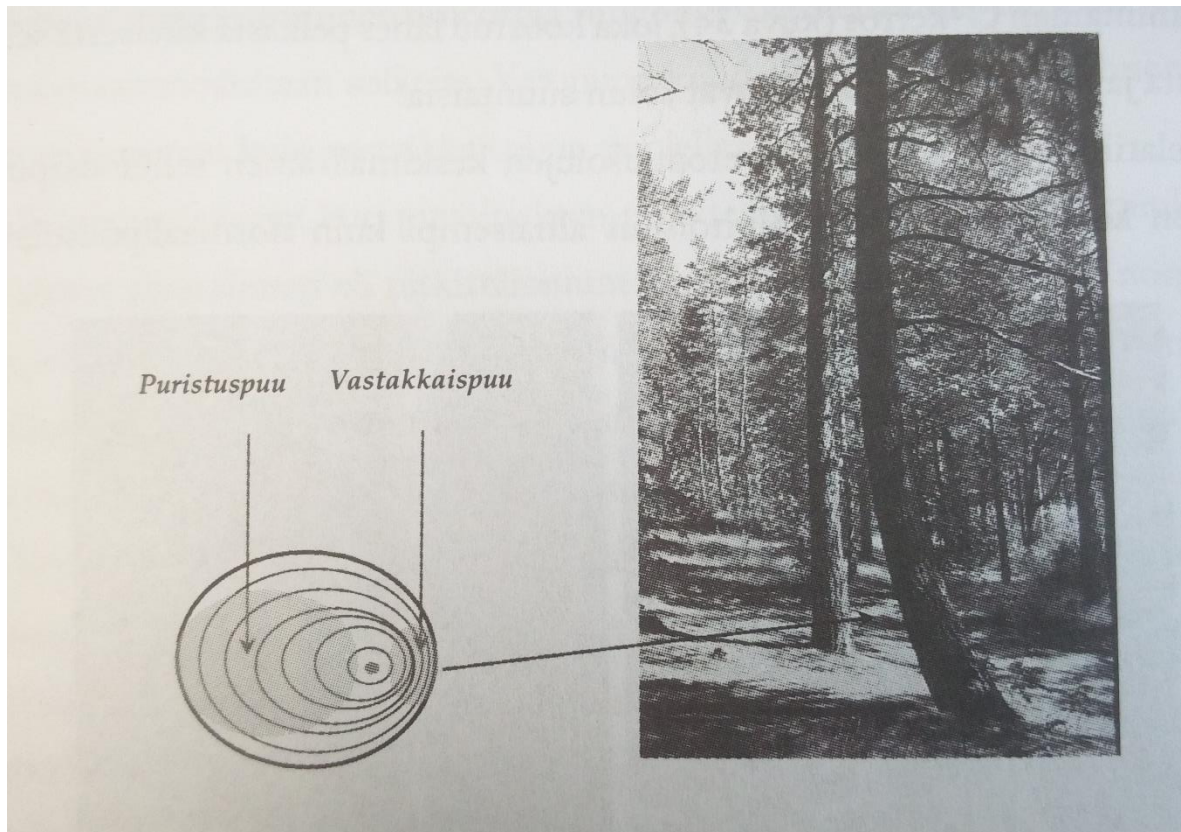
2.5 Lujuus

Puun lujuusominaisuuksiin vaikuttaa yleisesti eniten puun tiheys (Kärkkäinen 2007, 227). Lujuusominaisuuksien, kuten kimmomoduulin, taivutuslujuuden ja vetolujuuden merkitystä tarkastellaan enemmän mekaanisen metsäteollisuuden tutkimuksessa. Sulfaattisellun valmistuksessa puun lujuusominaisuudet vaikuttavat kuorinnassa puun rungon kestävyteen kuorimarummussa ja haketuksessa hakkeen laatuun. Luja puu säilyy parhaimmassa tapauksessa kokonaisena kuorimarummun käsittelyssä ja ei halkeile haketustapahtuman aikana, mikä johtaa vähäisempiin puuhäviöihin ja parempaan hakkeen laatuun.

2.6 Poikkeavuudet

Puussa olevat poikkeavuudet voidaan määritellä vioiksi, jotka haittaavat puun käytettävyyttä ja jalostusta. Puun viat voidaan jaotella runkovikoihin, joita ovat mm. mutkat ja epäpyöreys sekä puuaineen vikoihin, esimerkiksi oksat ja lahous. (Kärkkäinen 2007, 256-257) Sellutehtaan puunkäsittelyssä runkoviati hankaloittavat kuoriutumista kuorimarummussa, puuaineen viat hankaloittavat haketusprosessia vähentäen laadukkaan hakkeen määrää hakevirrassa.

Puun runkoviati syntyvät kasvuvaiheessa esimerkiksi kasvupaikan ja muuttuvien ympäristöolosuhteiden kuten lumen ja tuulen seurauksena (Kärkkäinen 2007, 258-259). Taipuneen puun rungossa solukon rakenne ja kemialliset sekä mekaaniset ominaisuudet poikkeavat normaalipuun rakenteesta. Esimerkiksi taipuneen koivun rungon yläpinnalle muodostuneella vetopuulla on normaalipuuta suurempi selluloosapitoisuus, hemiselluloosan ja ligniinin osuuden ollessa vähäisempi. Taipuneen havupuun rungon alapinnalle muodostuvassa puristuspuussa on taas normaalipuuta suurempi osuus ligniiniä, selluloosan ja hemiselluloosan osuuden laskiessa. Kuvassa 2 on esitelty rungostaan taipunut mänty ja sen poikkileikkaus. (Jääskeläinen & Sundqvist 2007, 58-61)



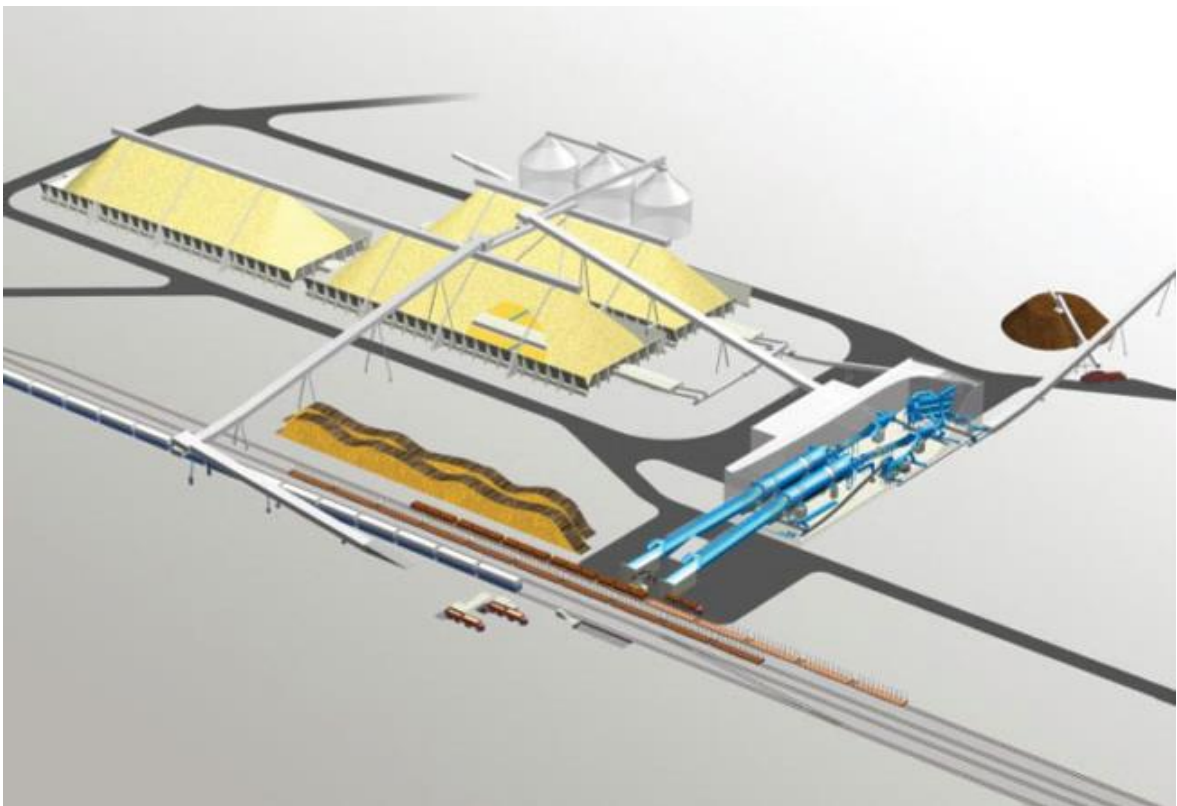
Kuva 2: Runkovikaisen männyn poikkileikkaus (Jääskeläinen & Sundqvist 2007, 60).

Puun sisäoksien haitallinen vaikutus sulfaattisellun valmistuksessa ilmenee puun haketuksessa syntyvänä suuren ylisuurien hakepalojen määränä, sillä sisäoksien tiheys ja uuteaineiden määrä on suuri ja kosteusprosentti on alhainen. Hakkeen mukana kuitulinjalle päätyvät oksat jäävät usein hajaantumatta keitossa ja lisäävät kemikaalien kulutusta keitossa ja valkaisuissa. Kuitupuussa oksan määrä on suurempaa verrattuna sahateollisuudessa käytettävään tukkipuuhun. (Kellomäki 1998, 160-162)

Puun lahoaminen johtuu lahottajasiienten aiheuttamista vaurioista. Ne erittävät entsyymejä, jotka alkavat tuhota eri komponentteja puun soluseinässä. Eri sienityypistä riippuen ne elävät joko elinvoimaisissa puissa, kaadetuissa ja kaatuneissa puissa tai puutavarassa ja kosteissa puurakenteissa. Lahosieniä esiintyy sekä pinta- että sydänpuussa. Karkeasti voidaan yleistää, että havupuut ovat vähemmän herkkiä lahoamiselle kuin lehtipuut. Kuitupuun haketuksessa laho vähentää akseptin määrää hakkeessa, lisäksi keittämöllä se heikentää massan laatua vähentäen kemiallisen massan lujuutta sekä vaaleutta. (Jääskeläinen & Sundqvist 2007, 112-115)

3 PUUNKÄSITTELYPROSESSI

Sellutehtaan puunkäsittelyprosessin tarkoituksena on tuottaa pyöreästä, yleisesti 2-6m pitkstä kuitupuusta laadukasta haketta keittämön tarpeisiin. Tässä kappaleessa käsitellään puunkäsittelyn eri osa-alueet puun vastaanotosta aina hakkeen seulontaan asti. Esimerkki sellutehtaan puunkäsittelyprosessista ja sen laitesijoittelusta on esitelty kuvassa 3. Kuvassa nähdään kuitupuun kenttävarasto, hakekasat, hakesiilot ja kuorikasa, sinisellä värillä on kuvattu kuorimon ja seulomon laitteistoa.



Kuva 3: Esimerkkikuva puunkäsittelyn alueesta. (Knowpulp)

3.1 Vastaanotto ja sulatus

Sellutehtaalte voidaan kuljettaa kuitupuuta uittamalla, laivoilla, junalla sekä rekkakuljetuksilla. Tehdasalueella puiden käsittely hoidetaan nykyisin pääasiassa

kurottajilla, pyöräkuormaajilla ja materiaalinkäsittelykoneilla siltanosturien ollessa nykyisin harvinaisempia (Koskinen 2000, 338).

Tehtaalle tuleva puu syötetään suoraan prosessiin tai kenttävarastoon. Tehdasalueen puukentällä on tyypillisesti varastoituna puita 5-7 päivän tarpeisiin, varaston koon minimointiin tulisi pyrkiä puun laadun turvaamiseksi. Eri puulajit lajitellaan eri pinoihin, myös puiden paksuuteen perustuva lajittelu olisi suotavaa. Hankalien kuljetuskelien aikaan kuten kelirikkoaikana tehdasvaraston koon kasvattaminen on perusteltua. (Koskinen 2000, 337-338)

Puun varastointi toteutetaan pääasiassa kenttävarastointina asfaltoidulle tai betonipäällysteiselle alueelle (Koskinen 2000, 338). Varastointi sora- tai maapohjaiselle alustalle on myös yleistä kenttävarastotason ollessa korkea ja varsinkin useissa terminaalivarastoissa, mikä lisää hiekan päätymistä kuorinta- ja haketusprosessiin lisäten prosessilaitteiden kulumista ja vaikuttaen alentavasti hakkeen laatuun. Eri varastointimenetelmistä aiheutuvia vaikutuksia ei kuitenkaan tässä työssä oteta huomioon.

Kenttävaraston puiden jatkuva kastelu tai kylmävarastointi ovat vaihtoehtoja puun hyvän laadun säilyttämiseksi; Mäkelän & Achrenin tutkimuksessa havaittiin, että männyllä ja koivulla runsas kastelu olivat kannattavia kylmävarastoinnin kustannusten ollessa etuja suuremmat, kuusella kylmävarastointi oli jopa kannattavaa sellunvalmistusta ajatellen. Uittopuuniput varastoidaan vesialueella kuorimon läheisyydessä. Vesivarastonnissa puun laatu säilyy hyvänä pitkiäkin aikoja, sillä sen kosteus pysyy suurena ja puun lahoaminen on merkittävästi hitaampaa kuin kenttävarastossa. (Mäkelä & Achren 2003, 28)

Puiden syöttäminen kuorintaan voidaan toteuttaa useilla eri tavoilla: suora syöttö luiskan kautta kuorimarumpuun, syöttönä kohteeseen sopivalle ketjukuljettimelle tai syöttönä katkaisulaitokselle. Tekninen ratkaisu puun syöttötavasta kuorimarumpuun riippuu ilmasto-olosuhteista, puun kuorintalaitteiston vaatimuksista, puulajin ominaisuuksista, puiden dimensioista ja puiden kuljetustavoista. (Koskinen 2000, 342-343) Suomen olosuhteissa on talvisaikaan tärkeää sulattaa kuitupuut erillisellä sulatuskuljettimella ennen kuorintaprosessia.

Kuitupuut voidaan ajaa katkaisulaitoksen kautta ennen sulatusta ja kuorintaa. Katkaisun tarkoituksena on sahata vastaanotetut puut haluttuun mittaan, mikäli jatkoprosessi näin

vaatii. Kuitupuunippu lasketaan vastaanottopöydälle, josta puut ohjataan ketjukuljettimella katkaisukuljettimelle. Katkaisukuljetin liikuttaa puut katkaisusahalle tai -sahoille, jonka jälkeen haluttuun mittaan sahatut puut ohjataan sulatukseen ja edelleen kuorintaprosessiin. (Koskinen 2000, 347)

Sulatuskuljetin on tyypillisesti ketjukuljetin. Sulatuksen tarkoituksena on sulattaa puun kuorikerros, sillä jäätyneen puun kuoren sidoslujuus on merkittävästi suurempi kuin sulatetun puun, mikä hankaloittaa puun kuorintaa. Sulatus tapahtuu tyypillisesti joko lämpimällä vedellä tai lämmitetyllä kiertovedellä. Veden etu puiden sulatuksessa on, että se jakaa lämpöenergian nopeasti ja tasaisesti kuljettimella olevalle puumateriaalille. Männyn ja kuusen kuori sulaa helpommin kuin koivun. (Koskinen 2000, 344-345) Kesäaikaan sulatuskuljettimella sulatuksen sijaan huuhdellaan ja pestään puista hiekkaa ja muita ylimääräisiä partikkeleja ennen kuorintaa ja haketusta, ettei hiekka päädy kuorinta- ja haketusprosessiin aiheuttamaan prosessilaitteiden kulumista (Koskinen 2000, 359). Kuivien puiden kastamisella ennen kuorintaa helpotetaan myös kuoren irtoamista kuorimarumussa (Niiranen 1985, 91).

3.2 Kuorinta ja kuoren käsittely

Puiden kuorinnan tarkoituksena on poistaa kuitupuusta riittävä määrä kuorta kuorimolle syötettävästä kuorellisesta kuitupuusta. Kuori laskee hakkeen ja sitä kautta sellun laatua. Valkaistun havusulfaattisellun valmistuksessa puiden kuorinta-aste tulisi olla yleensä vähintään 85-92 %, mikä tarkoittaa alle 1% massaosuutta puun kuorelle. Valkaistun koivusulfaattisellun valmistuksessa kuorinta-asteen merkitys on vielä suurempi, joten kuoritun puun kuoripitoisuus on oltava vähäisempi kuin havupuussa. (Koskinen 2000, 351) Kuoriaines näkyy lopputuotteessa tummana roskana, lisäksi koivun kuoren suuret uuteainepitoisuudet hankaloittavat jatkoprosessia.

Puiden kuorinta on tasapainoilua puuhäviön ja kuoripitoisuuden kanssa. Puiden kuorinnassa kuoren mukana poistuu myös puuainesta, mikä aiheuttaa kuorinnan puuhäviötä. Kuorinnan puuhäviö lisää sellutehtaan puunkulutusta tuotettua sellutonna kohden, minkä takia sen pitäminen mahdollisimman pienellä tasolla on tärkeää.

Kuorinnan puuhäviö on tyypillisesti 1-3% luokkaa, mutta arvot 3-6% välissä ovat mahdollisia kuorintaolosuhteista ja puun laadusta riippuen. Kuorinnan puuhäviöitä lisäävät yleensä kuorimarummun suuri täyttöaste, huonolaatuinen puu, rummun suuri pyörimisnopeus, epätasainen puiden paksuus ja ohut puu. (Koskinen 2000, 351)

Selluteollisuudessa puut kuoritaan tyypillisesti kuorimarummussa. Kuorimarummu on käytännössä metallinen lieriö, jossa on kuoriaukkoja sekä pitkittäissuunnassa rummun sisäosaan kiinnitettyjä puun nostorautoja. Rummun halkaisija vaihtelee 4-6m ja pituus 20-40m välillä rummun kapasiteetista ja puulajista riippuen (Koskinen 2000, 356).

Kuorimarummut tyypistä riippuen suorittavat joko märkäkuorintaa, kuivakuorintaa tai jotain siltä väliltä. Märkäkuorinnassa rumpuun syötetään vettä, mikä edesauttaa kuoren irtoamista. Rummun märkäkuorintaosuudella ei tyypillisesti ole kuoriaukkoja, vaan märkäkuorintalohko erotellaan kuoriaukollisesta osuudesta sisäpuolelle hitsatun korotusrenkaan avulla. Nykytrendinä on kuitenkin asentaa kuivakuorintarumpuja, joissa kuoriaukkoja on koko rummun matkalla; puiden sulatus ja kastelu hoidetaan sulatuskuljettimella. On myös olemassa rumpuratkaisu, jossa ei ole lainkaan kuoriaukkoja, vaan kuoret erotellaan rummun jälkeisellä rullastolla. Kuorimarummun tuennasta on olemassa erilaisia variaatioita: tuenta kumipyörillä, teräspyörillä, hydrostaattinen tuenta tai rullastokannatteinen ratkaisu. (Koskinen 2000, 357-361)

On myös muita teknisiä ratkaisuja suorittaa puiden kuorintaa kuin kuorimarummu. Erilaisia roottorikuorintalaitteita käytetään pääasiassa mekaanisessa metsäteollisuudessa mutta myös selluteollisuudessa. Joukkokuorintana kuten kuorimarummussa roottorikuorintalaitteiston toiminta perustuu pyöriviin roottoriakseleihin, mihin on asennettu kuorintahampaita. Puut pyörivät roottoriakselien päällä ja irronnut kuori putoaa roottorien välistä. Roottorilaitteistoa käytetään erityisesti vaikeasti kuoriutuvien puulajien kuorinnassa. Lisäksi on olemassa sahateollisuudelle tyypillisiä roottorikuorintaratkaisuja, joissa puut kuoritaan yksitellen roottoriin asennettujen kuorintaterien avulla. Ratkaisu soveltuu lähinnä tapauksiin, joissa saapuva raaka-aine on läpimitaltaan paksua ja suoraa. (Koskinen 2000, 363-367)

Kuorimarummun tai muun kuorintamenetelmän avulla puusta eroteltu kuori käytetään yleisesti polttoaineena sähkön ja/tai lämmön tuotannossa, joten se murskataan pienemmiksi partikkeleiksi kuoriaineen tasalaatuisuuden varmistamiseksi ja käsiteltävyyden

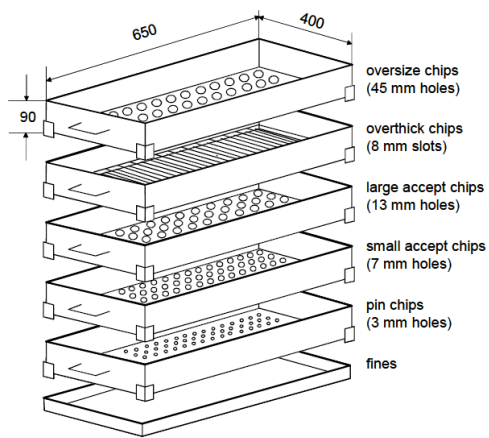
helpottamiseksi. Sen jälkeen siitä puristetaan ylimääräinen vesi kuoripuristimella. Kuoren murskaaminen hoidetaan joko pystyroottorisella repijällä tai vaakaroottorisella murskaimella. Pystyroottorimallissa kuori syötetään pyörivän repijäkiekon päälle ja kuori pilkkoutuu kiekossa olevien terien ja kehällä olevien vastaterien yhteisvaikutuksesta. Vaakaroottorimalleissa kuori syötetään murskaimeen, jonka akselille sijoitetut vasarat murskaavat kuoren läpi arinaraudan aukoista. (Koskinen 2000, 461-463) Kuorta on myös mahdollista kaasuttaa, jolloin sitä voidaan käyttää sellutehtaalla meesauunin polttoaineena maakaasun tai polttoöljyn sijaan.

Murskatun kuoriaineksen puristamiseen on mahdollista käyttää neljää erityyppistä kuoripuristinta: monipuristus, porraspuristus, annospuristus ja kertapuristus. Monipuristuksessa kuoriainesta puristetaan rei'itetyn rummun ja sen sisällä pyörivän telan välissä, kuori puristuu useaan otteeseen ennen kuin se poistuu rummusta. Porraspuristuksessa kuori pudotetaan kahden liikkuvan rei'itetyn levyn väliin, jotka puristavat kuorta painetta muuttamalla. Kertapuristus on monipuristuksen tapainen prosessi, mutta kuori puristetaan telojen välistä vain kerran. Annospuristuksessa kerätään tietty määrä kuoriainesta syöttöpäähän, josta puristetaan yhdellä kerralla vesi pois. Puristettu kuorikakku ohjataan haluttuun jatkokäsittelyyn. (Koskinen 2000, 465-468)

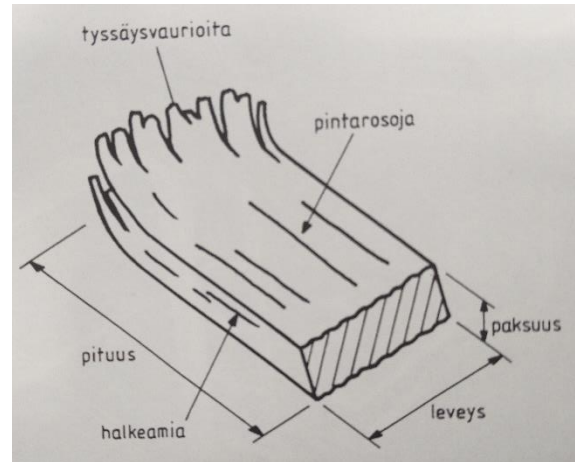
3.3 Haketus

Kuitupuiden kuorinnan jälkeen kuorituista puista erotellaan mahdolliset rummusta tulevat kivet ja metallit, jonka jälkeen puista tehdään haketta syöttämällä ne hakkuun. Hakun tehtävänä on tuottaa kuoritusta puusta mahdollisimman laadukasta haketta keittämön tarpeisiin. Hakkeen on oltava halutun kokoista, jotta vesi, keittokemikaalit ja lämpö imeytyvät hakepalaan optimaalisesti (Koskinen 2000, 369).

Hakepalat voidaan jaotella palakoon mukaan kuuteen eri kategoriaan standardin SCAN-CM 40:01 mukaisella seulonnalla, kuva 4. Hakkeessa tarkasteltavat dimensiot ovat pituus, leveys ja paksuus. Hakepalan dimensiot esitelty kuvassa 5, hakkeen pituus ilmoitetaan kuitujen pituussuunnassa.

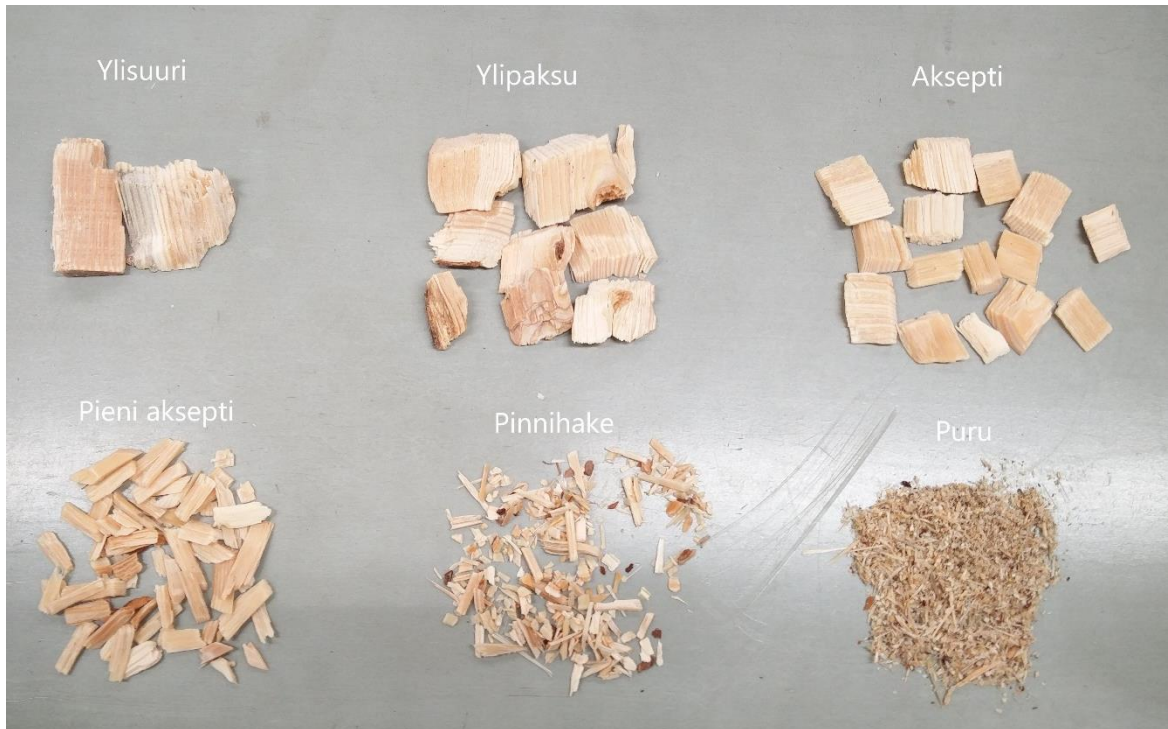


Kuva 4: Hakkeen jaottelu standardin SCAN-CM 40:01 mukaisesti.



Kuva 5: Hakepalan pituus, leveys ja paksuus (Sepsilva 1997, 46)

Kuvan 4 mukaisesti mikäli hake ei läpäise halkaisijaltaan 45 mm olevaa reikälevyä, on hake ylisuurta. Hake, joka ei läpäise 8 mm rakoseulaa, on ylipaksua. Hake, mikä jää 13 mm halkaisijaltaan olevalle reikälevylle lasketaan akseptiksi: tämä on kaikista tavoiteltavin palakoko kuitupuun haketuksessa. Pieneksi akseptiksi lasketaan hake, joka läpäisee 13 mm reiän ja jää 7 mm halkaisijalla varustetulle reikälevylle. 3 mm halkaisijalla olevalle reikälevylle jäävää haketta kutsutaan pinnihakkeeksi ja reikälevyn läpäissyttä jaetta puruksi tai hienoaineeksi. Standardin mukaan eroteltuja hakefraktioita on esitelty kuvassa 6.



Kuva 6: Standardin SCAN-CM 40:01 mukaisesti eroteltuja havuhakepaloja.

Seulottujen hakefraktioiden massaosuuksien perusteella määritetään hakkeen laatuarvo. Eri metsäteollisuusyhtiöillä on eri laskukaavoja määrittellä hakkeen laatuarvo. Tyypillisesti käytetään painotusarvoja eri hakefraktioiden massaosuudelle niin, että suuri akseptihakkeen osuus ja pieni ylisuurten ja hienoaineksen osuus johtaa korkeaan laatuarvoon. Laatuarvon tyypillinen vaihteluväli voi olla eri tekijöistä riippuen 80-110 %. Hyvänä laatuarvona voidaan pitää yli 100 % arvoja.

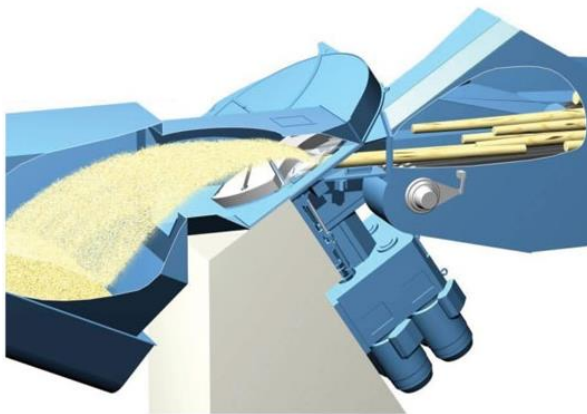
Puiden haketuksessa käytetään ensisijaisesti kolmen tyyppistä hakkua: kartiokiekkohakku, rumpuhakku ja kiekkohakku. Kartiokiekkohakkua käytetään sahateollisuudessa hakettaessa tukin sivutuotetta hakkeeksi. (Sepsilva 1997, 53) Rumpuhakkua käytetään joissain pohjoismaisilla sellutehtailla lyhyiden puupätkien haketukseseen (Koskinen 2000, 382). Kiekkohakku on kuitupuun haketuksessa selvästi yleisin hakkutyyppi, jonka haketusominaisuuksiin tässä kappaleessa keskitytään.

Kiekkohakku on pyörivä metallinen 80-220mm paksu kiekko, johon on kiinnitetty 6-16 terää riippuen hakun koosta, kapasiteetista ja halutusta hakekoosta (Koskinen 2000, 373).

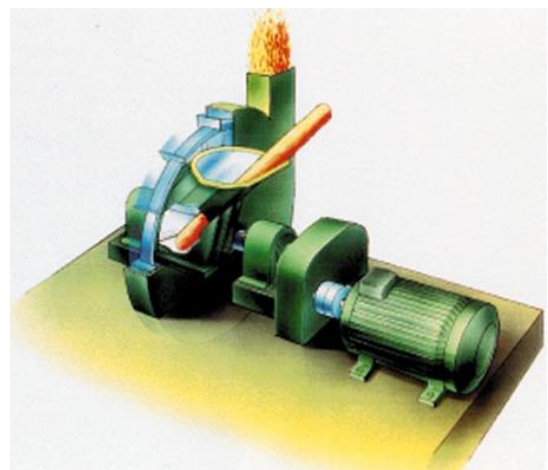
Uusimmissa hakuissa on jopa 18 terää. Kiekkohakun puunsyöttöön ja hakkeen purkamiseen on olemassa eri variaatioita.

Hakun puiden syöttö toteutetaan pääsääntöisesti kahdella tavalla: pystysyöttönä tai vaakasyöttönä. Pystysyöttöisessä ratkaisussa puut menevät hakkuun gravitaation avulla syöttöluiskaa pitkin ja vaakasyöttöisessä hakussa puut ohjataan hakkuun syöttökuljettimen avulla halutulla nopeudella. Molempia ratkaisuja toteutetaan moderneissa tuotantolaitoksissa. Pystysyöttöinen hakku soveltuu parhaiten enintään 6m pituisille puille ja vaakasyöttöinen jopa sitä pidemmille puille (Koskinen 2000, 375).

Hakun purkaustyypit voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan: puhaltavat, taaksepurkavat ja allepurkavat hakut. Puhaltavassa hakussa on hakun kiekon ulkoreunalla siivekkeitä, jotka puhaltavat hakkeen poistoputkeen suoraan ylöspäin. Puhaltavaa purkaustyyppiä käytetään etenkin, kun tuotantolaitoksen pohjaratkaisu ei salli taaksepurkavaa hakkutyyppiä. Kuvassa 7 on esitelty vaakasyöttöinen taaksepurkava hakku ja kuvassa 8 pystysyöttöinen puhaltava hakku. Syöttö- ja purkaustapa eivät ole toisistaan riippuvaisia, vaan on myös yleistä valmistaa esimerkiksi pystysyöttöisiä taaksepurkavia hakkuja. Nykyisin ei juuri valmisteta puhaltavia hakkuja, sillä tyypillisesti kyseisessä hakkutyypissä hienoaineksen osuus hakkeessa on suurempi.



Kuva 7: Vaakasyöttöinen taaksepurkava hakku. (Knowpulp)

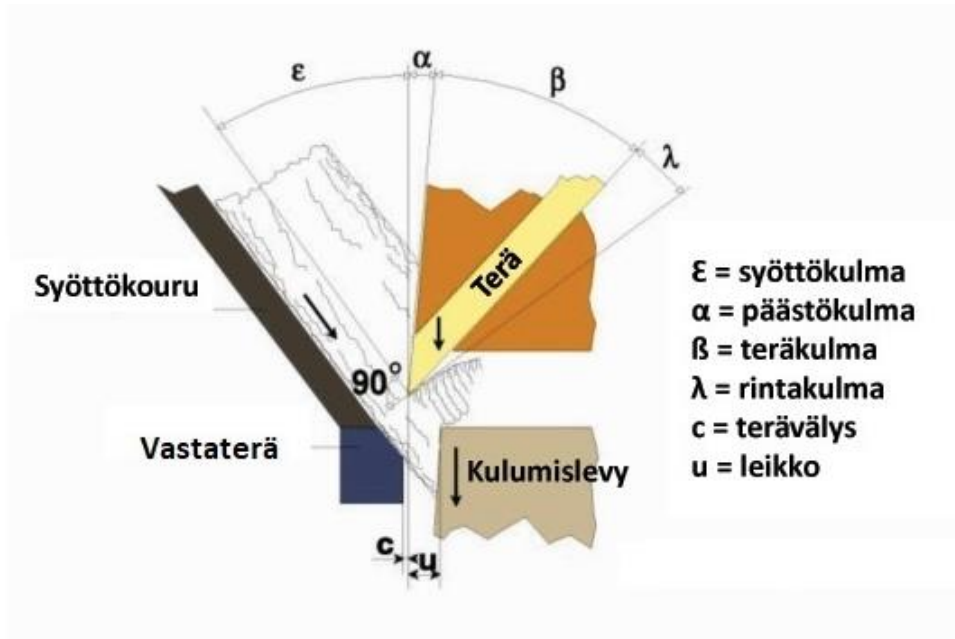


Kuva 8: Pystysyöttöinen puhaltava hakku. (Knowpulp)

Hakun terät ovat terätyypistä riippuen joko pulttikiinnitteisiä, asetettavia tai kääntöteriä. Pulttikiinnitteisessä ratkaisussa terä on ikään kuin osa hakun kulutuslevyä, mikä altistaa sen kovalle rasitukselle. Levyjen väliin asetettavat terät voivat olla ohuempia ja halvempia. Kääntöterät ovat symmetrisiä teriä, jotka pystytään kääntämään kun toinen leikkauspinta on kulunut käyttökelvottomaksi. (Koskinen 2000, 373, 376)

Tyypillisesti hakun terän leikkaava särmä hiotaan uudelleen käytön jälkeen, jotta samaa teräelementtiä voidaan käyttää useaan kertaan; tämä tekee terien käytöstä taloudellista. Haittapuolena uudelleenhionnassa on se, että terän mitat muuttuvat ja terät on erinäisin keinoin säädettävä hakkuun sopivaksi. Kääntöterien käytössä yhdellä teräsärmällä ajetaan järkeväksi katsottu määrä puita, jonka jälkeen terä käännetään suunnittelusta riippuen peilitai pistesymmetrisesti toisin päin ja toistetaan toisella teräsärmällä. Tämän jälkeen terä hävitetään. Teräjärjestelmän etu on siinä, että terän mitat eivät muutu kertakäyttöisen luonteen vuoksi ja hiontaan ei tarvita resursseja. Tosiaalta terien kertakäyttöisyyden vuoksi on terät valmistettava mahdollisimman pienin kustannuksin kannattavuuden takaamiseksi erityisesti minimoimalla kunkin terän massasisällön. (Adent & Engnell 2008, 1-2) Terien käyttöikä vaihtelee hakkulinjan kapasiteetista, hakettavasta puulajista, puun mukana tulevista epäpuhtauksista ja terän materiaalista riippuen alle kymmenestä tunnista useisiin kymmeneen tunteihin.

Hakepalan muodostuminen hakussa riippuu pitkälti hakun geometriasta, hakettavan puun laadusta ja hakun kierrosnopeudesta. Hakun geometriaa esitelty kuvassa 9. Kuvassa on esitelty pystysyöttöisen hakun geometriaa, mutta syöttökouru voidaan ajatella myös hakun syöttökuljettimiksi jolloin samat yhtälöt pätevät vaakasyöttöiselle hakulle.



Kuva 9: Hakun geometria (mukaillen Knowpulp)

Hakepalan pituus määräytyy yhtälön 3 mukaisesti.

$$L_{\text{hakepala}} = \frac{u}{\sin \varepsilon} \quad (3)$$

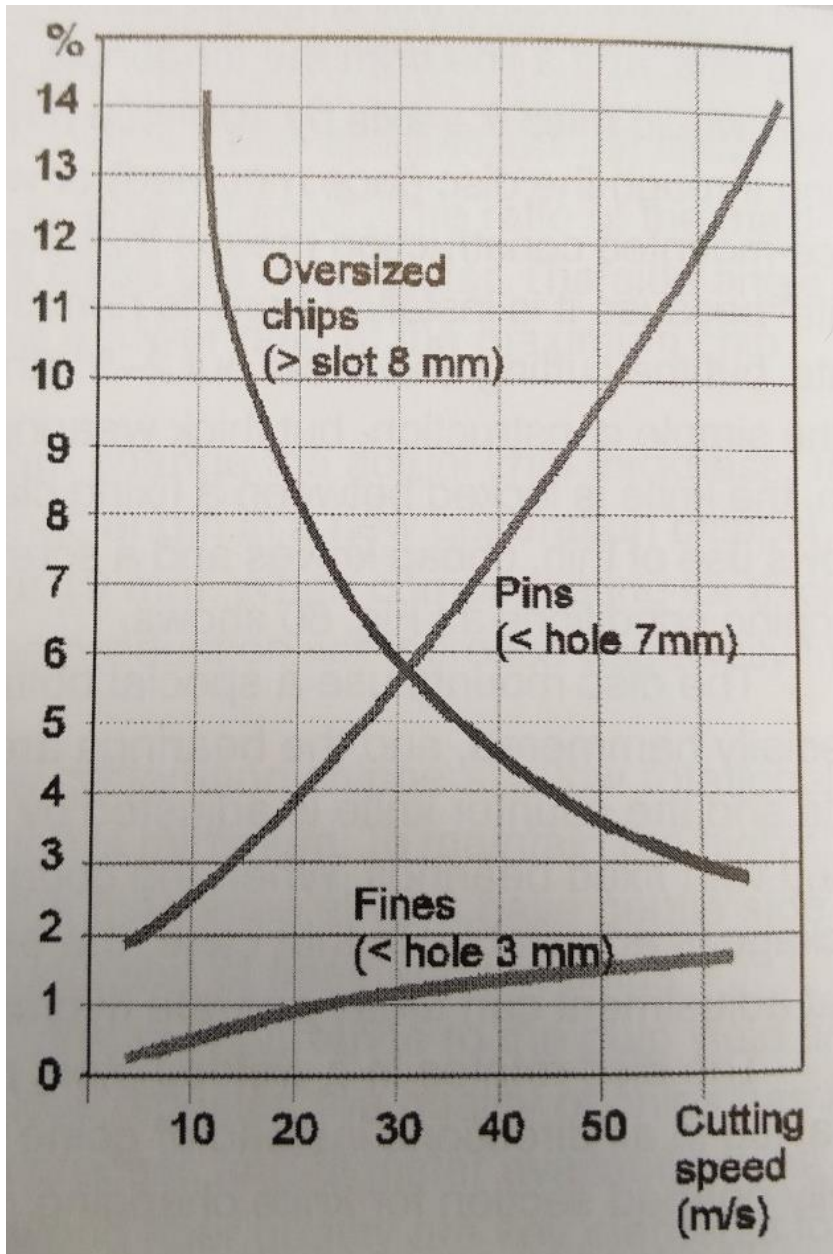
missä	L_{hakepala}	hakepalan pituus [mm]
	u	leikko [mm]
	ε	syöttökulma [°]

Hakepalan muodostuessa normaalisti käy niin, että pituus on noin 5-7 kertaa paksuus. Haketustapahtumassa haketettavan puun sisältämät kuidut katkeilevat. Hakepalojen kuitujen keskipituus laskee hakkeen pituuden laskiessa, mikä edelleen laskee valmistettavan sellun lujuusominaisuuksia. Hakepalojen tulisi olla mahdollisimman tasapaksuja keittokemikaalien imeytymisen kannalta. Mitä ohuempi hakelastu on, sen nopeammin imeytyminen tapahtuu. Toisaalta hakepaksuuden ohentamisella on negatiivinen vaikutus keittimen pakkaustiheyteen. Pakkaustiheyden laskun johdosta keittimeen mahtuu vähemmän haketta, mikä rajoittaa keittämön tuotantoa. (Sepsilva 1997, 46-47) Hakepalan keskipituus on

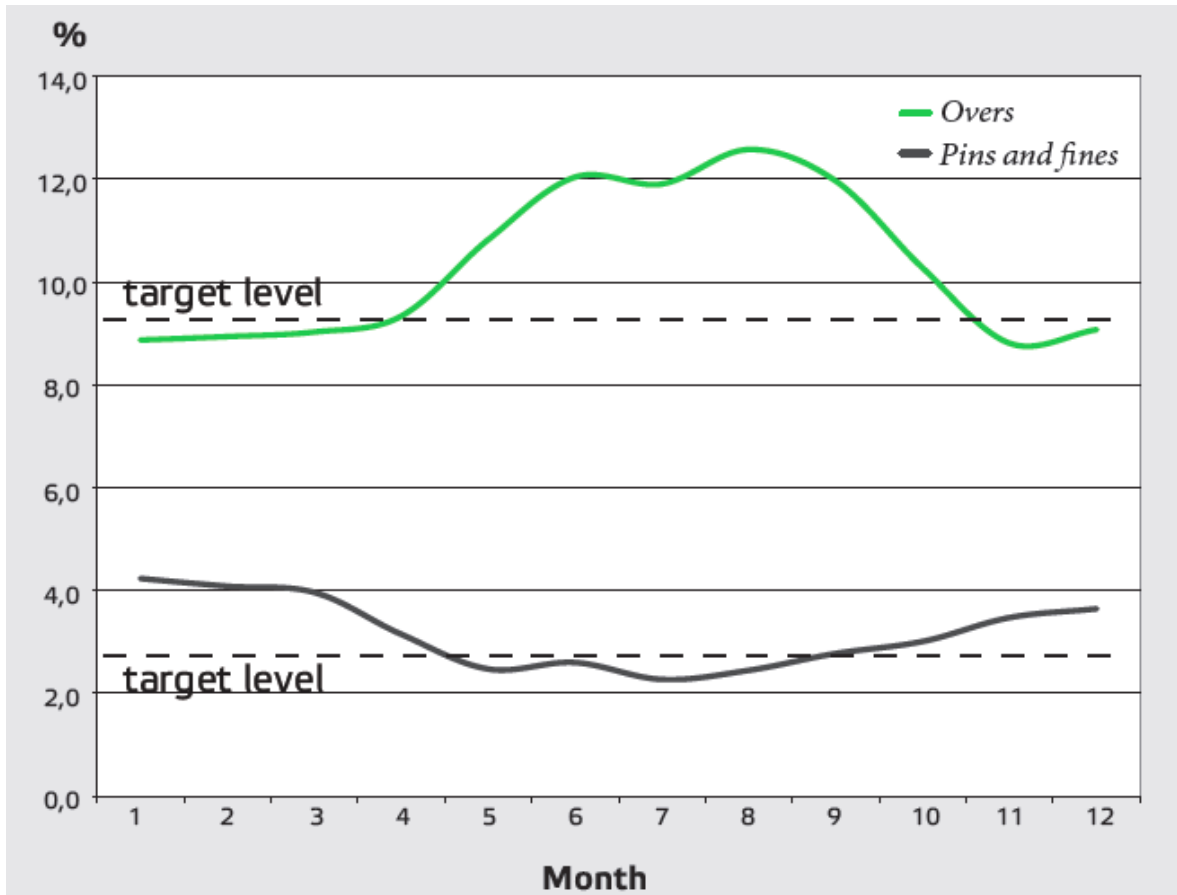
sulfaattisellun valmistuksessapuulajista riippuen tyypillisesti 18-28 mm, havupuilla lastunpituus on pidempi kuin lehtipuilla (Koskinen 2000, 377). Keittomenetelmien erot määrittävät myös haluttua hakepituutta; jatkuvatoiminen keitin vaatii eräkeittoa suuremman hakepituuden, sillä hakepatja on jatkuvassa liikkeessä. Moderneissa hakuissa rintakulma on perinteisiä hakkuja suurempi, minkä on havaittu suurentavan pituus-paksuussuhdetta (Koskinen 2000, 372). Hakepalan leveydelle ei ole olemassa nyrkkisääntöä, vaan se riippuu hakun kierrosluvusta ja purkaustavasta.

Vastaterä ohjaa ja tukee hakettavaa puuta ja toimii terän vastinkappaleena. Terävällys on 0,5-0,7 mm, suurempi vällys vaikuttaisi alentavasti hakkeen laatuun lisäten purun määrää. Vastaterän vaihtoväli on pitkä, mutta koska vastaterän kunto vaikuttaa hakkeen laatuun olisi sen kunto hyvä tarkastaa kahden viikon välein. (Sepsilva 1997, 61, 63) Terävällys säädetään vastaterää lähimpänä olevan terän mukaisesti. Suuri vastaterän vällys voi myös johtaa etenkin havupuun haketuksessa tilanteeseen, jossa luja pintapuu ei katkea vaan pintapuun liuska kulkeutuu terän ja vastaterän välistä teräkiekon ulkokehälle, josta se päätyy hakkeen sekaan (Honkanen 2013, 1).

Hakun pyörimisnopeudella on geometrian ohella suuri vaikutus hakkeen laatuun, sillä se määrittää terän leikkausnopeuden. Leikkausnopeus vaikuttaa hakkeen ylisuurten jakeiden, pinnihakkeen ja purun osuuteen, kuva 10. Vuodenajan vaihtelulla on myös suuri merkitys optimaalisen haketusnopeuden kannalta, sillä jäinen puu on hauraampaa ja vaatii alhaisemman haketusnopeuden kuin sula puu (Valmet 2018). Esimerkki vuodenajan vaihtelusta haketuksen palakokojakaumaan hakettaessa vakionopeudella esitelty kuvassa 11.



Kuva 10: Leikkausnopeuden vaikutus hakkeen laatuun (Koskinen 2000, 374).



Kuva 11: Vuodenajan vaikutus ei-optimaalisten hakepalojen määrään (Valmet 2018).

Uudemmissa hakuissa on yleensä 12-18 terää, jotta voidaan hakettaa suuremmalla kapasiteetilla ja alhaisella pyörimisnopeudella. Terien määrän lisääminen johtaa paksummilla puilla tilanteeseen, jossa enemmän kuin yksi terä leikkaa puuta samanaikaisesti. Liian suurella pyörimisnopeudella hakkeen laatu heikkenee, toisaalta tuotantokapasiteetti kasvaa. Kuvasta 10 huomataan, että liian alhaisella kierrosnopeudella operoitaessa kasvaa ylipaksujen osuus merkittävästi. (Koskinen 2000, 374) Nykytrendinä on pudottaa hakun kierrosnopeutta. Ylisuurten hakepalojen määrän vähentämiseksi voidaan käyttää kampalevyä muistuttavaa ratkaisua teräkiekossa hakeaukon jälkeen. (Smith 1999, 94, 106)

Puun laatu ja dimensiot vaikuttavat merkittävästi hakkeen laatuun. Havupuun halkaisijan kasvaessa parantuu hakkeen laatuarvo (UPM Internal 2015a). Puun laadun vaikutuksia haketukseen on tarkemmin esitelty kappaleessa 2.

3.4 Hakkeen varastointi ja ostohakkeen vastaanotto

Nykyaikaisissa sellutehtaissa hakevaraston koko vastaa 2-3 päivän tuotantotarvetta. Hakevaraston tarkoituksena on toimia häiriöreservinä kuorimon ja keittämön välillä. Tavoitteena hakevaraston toteutuksessa on, että hakkeet ohjataan tuotantoon saapumisjärjestyksessä, kauhakonetta ei tarvita ja hakepalojen vaurioitumiselta vältytään. Hakkeen varastointi toteutetaan joko varastointina katetuissa siiloissa tai erilaisissa hakekasoissa hakkeen purkauksen toteutuessa ruuvipurkaimien tai tankopurkaimien avulla. (Koskinen 2000, 418) Hakkeen varastointi suoritetaan joko ennen tai jälkeen hakkeen seulonnan; yleisempää on seuloa hake varastoinnin jälkeen, sillä varastoinnin aikana voi hakkeen joukkoon päätyä sinne kuulumattomia partikkeleja.

Sellutehtaan ulkopuolelta ostettava hake varastoidaan samoin varastointimenetelmin kuin tehtaalla tuotettu hake. Ostohaketta voidaan tuoda tehtaalle rekka-, laiva- ja junakuljetuksilla. Ostohakkeelle on joko oma hakevarasto tai vaihtoehtoisesti ostohake johdetaan tehtaalla tuotetun hakkeen kanssa samaan hakevarastoon. Havuostohake on pääasiassa sahoilta ostettua pintapuusta tehtyä haketta, jonka kuidunpituus on tehtaan omaan hakkeeseen verrattuna hieman pidempää, minkä vuoksi sen varastointi omassa hakevarastossa helpottaa sen tasaista syöttöä keittämölle lopputuotteen tasaisen laadun varmistamiseksi.

Ostohakkeen vastaanotto toteutetaan yleisesti purkamalla hake purkumonttuun, mistä se erinäisillä kuljettimilla johdetaan haluttuun varastointipaikkaan. Samat purkausmenetelmät käyvät kaikille kuljetusmuodoille. (Koskinen 2000, 452) Mikäli haketta on tarve siirtää suoraan pystysuunnassa, on yleistä käyttää kauhoilla varustettua elevaattoria (Bajpai 2010, 10).

3.5 Seulonta

Hakkeen seulonnan tavoitteena on muodostaa mahdollisimman tasalaatuinen hakevirta keittämölle. Seulomo ei pysty tekemään huonosta hakkeesta hyvää, mutta seulonnalla pystytään erottelemaan ja jatkokäsittelemään hakevirrasta sellunvalmistusprosessia

haittaavia jakeita kuten purua, ylisuuria ja ylipaksuja hakepaloja. (Koskinen 2000, 386) Hakepalojen luokittelu on esitelty kappaleessa 3.3. Seulottu pinnihake annostellaan tyypillisesti hakkeen mukana keittoon, puru poltetaan tai keitetään erillisessä purukeittimessä ja ylisuuria hakepaloja pyritään muokkaamaan keittoon sopiviksi.

Ylipaksu jae keittyy heikommin kuin ohut hake, minkä johdosta seulomolla on perusteltua olla paksuusseula (Gullichsen 2000, 30). Paksuusseula on tyypillisesti kiekko-seula, jonka kiekkojen välilyös määrittää läpäisevän hakkeen maksimipaksuuden ja akselien välilyös määrittää aukon pituuden. Paksuusseulonta voidaan myös toteuttaa uritetun rullaston avulla, jossa hyväksytty jae tippuu sylinterimäisen rullan urien välistä ja ylipaksu ohjataan rullaston päällä jatkokäsittelyyn. (Koskinen 2000, 399-401) Kolmantena vaihtoehtona on tankoseula, jossa halutuina välein olevat tangot tekevät eri tahtiin ylös-alas -liikettä. Hyväksytty jae tippuu tankojen välistä ja ylipaksut hakepalat ohjataan jatkokäsittelyyn. Ylipaksujen erottelukyky on noin 95 %, tosin ylitteen joukossa voi olla 5-10 % akseptia. (Koskinen 2000, 405)

Ylipaksusta hakevirrasta erotellaan metallit, kivet ja mahdollisesti oksakohtia sisältäviä painavia hakepaloja erilaisilla erotusmenetelmillä, mikäli katsotaan tarpeelliseksi suojella hakkeen käsittelylaitteistoa paksuusseulasta eteenpäin. Vesierottelussa partikkelit syötetään vesipatjan päälle, jossa hakepalat kelluvat poistoruuville ja kivet ja metallit vajoavat pohjalle. Akustisessa erottelussa kivien ja metallien erottelu perustuu niiden tuottamaan poikkeavaan ääneen niiden pudotessa määrätyle alustalle. Yleisin erottelutapa on kuitenkin ilmaerottelu, missä hakepalat kulkeutuvat ilmavirran mukana ja painavimmat kivet, oksat ja metallit putoavat ilmavirran vastaiseen suuntaan esimerkiksi keräilykuljettimelle. (Koskinen 2000, 416-418) Ylipaksujen hakepalojen käsittelyssä käytetään yleisesti joko hakeleikkuria tai tikkuhakua hakepalojen uudelleenhaketuksen tai hakepuristinta murtamaan hakepaloja keittokemikaalien imeytymisen parantamiseksi.

Ylisuuri jae, aksepti, pinnihake ja puru on mahdollista erotella myös tasoseulan avulla. Kuten kuvan 4 seulontalaitteessa, hakevirrasta erotellaan erilaisten reikälevyjen avulla ylisuuri hake, akseptihake, pinnihake ja puru. Ylipaksut hakepalat on eroteltava erillisen paksuusseulan kanssa. Tasoseulassa hakevirta ohjataan ylimmälle, tyypillisesti 45-55mm reikäkoolla olevalle levyille, josta hakevirta jakautuu edelleen dimensioiden mukaan eri tasoille. Ylisuuret hakepalat ohjataan tyypillisesti joko tikkuhakkuun tai ylipaksujen

hakepalojen tavoin hakepuristimelle. Tikkuhakku on pieni pystysyöttöinen puhaltava kiekkohakku, jossa syöttösuiste on V:n muotoinen tasaisen syötön varmistamiseksi. (Koskinen 2000, 398, 409) Uudelleen haketettu jae ohjataan yleensä takaisin tasoseulan ylimmälle tasolle (Brännvall 2009, 31).

Purun seulonta voidaan myös toteuttaa sylinterimäisen rullaston avulla. Rullan pinnan muoto voi valmistajasta riippuen olla esimerkiksi timantin muotoinen tai neliön muotoisilla kohoumillla varustettu. Rullaston toiminta perustuu siihen, että puru tippuu rullaston akselien välistä keräilykuljettimelle ja hyväksytyt jae siirtyy rullastoa pitkin jatkoprosessiin. (Koskinen 2000, 402-404)

Hakkeen seulonta on myös mahdollista toteuttaa mekaanisen erottelun sijaan impulssiseulonnalla. Se perustuu hakepalojen jaotteluun ilmavirran avulla: painavat partikkelit tippuvat ensimmäisenä romuloukkuun, ylisuuret lentävät omalle kuljettimelle jatkokäsittelyyn, akseptit lentävät hieman pidemmälle omalle kuljettimelleen ja puru jatkaa matkaansa ilmavirran mukana haluttuun jatkokäsittelyyn. (Brännvall 2009, 33)

4 KAUKAAN SELLUTEHTAAN PUUNKÄSITTELY

Kaukaan sellutehtaalla on kaksi haketuslinjastoa, toinen koivupuiden ja toinen havupuiden haketukseen. Tässä kappaleessa käsitellään Kaukaan puunkäsittelytoiminnot puun vastaanotosta hakkeen seulontaan.

4.1 Puun ja ostohakkeen vastaanotto

Kaukaan sellutehdas vastaanottaa pyöreää puuta rekkakuljetuksilla, junakuljetuksilla, laivoilla sekä uittamalla, valtaosa kuitupuusta tuodaan tehtaalle rekka- ja junakuljetuksilla. Nykytrendinä Suomessa on ollut kuitupuun uiton vähentäminen, mutta UPM jatkaa ainoana metsäteollisuusyhtiönä kuitupuiden uittamista (Häyrynen 2018).

Tehdasalueelle tulevasta ostohakkeesta valtaosa tuodaan rekkakuljetuksilla, loput junilla ja laivakuljetuksilla. Havuostohakkeesta merkittävä osa tulee tehdasalueella sijaitsevalta UPM:n sahalta, josta hake siirretään suoraan sahalta hakekasalle hihnakuljettimia pitkin. Hakkeen lisäksi tehdasalueelle tuodaan satunnaisesti vähäisiä määriä purua.

Tehtaalle tuotavat puut ja hakkeet käsitellään puukenttäurakoitsijan toimesta. Junilla ja autoilla tuotava kuitupuu puretaan kurottajilla ensisijaisesti suoraan sulatuskuljettimien läheisyyteen puskurivarastoon tai puukentälle, mikäli kuorimon linjat eivät ole ajossa. Autoilla tuotavaa puuta puretaan myös suoraan sulatuskuljettimille UPM:n työntekijän käsittelemällä materiaalikoneella. Poikkeustapauksissa autokuormat voidaan purattaa kenttävarastoon auton omaa nostinta hyödyntäen. Laivapuut puretaan urakoitsijan materiaalinkäsittelykoneilla laituralueelle, josta ne siirretään sulatuskuljettimien viereen puskurivarastoon kurottajilla.

Uittopuiden nostamiseen Saimaasta vaaditaan enemmän henkilöstöä kuin muilla kuljetusmuodoilla tuodun puun käsittelyyn. Järvessä uivat niput on tuotava rannalle nostopaikalle venekalustolla. Nostopaikalle tuotu nippu nostetaan järvestä kurottajalla, joka vie nipun erilliseen telineeseen, jossa lankamopo poistaa puunipun sidontaan käytetyt

metallilangat. Kun langat on poistettu, nostetaan nippu sulatuskuljettimien vieressä olevaan puskurivarastoon.

Kaukaan puukentän alue on asfaltoitu. Puukentälle mahtuu useita kymmeniä tuhansia kuutioita kuitupuuta ja haketta. Puukentällä puut lajitellaan puulajin, pituuden ja paksuuden mukaan erillisiin pinoihin, sillä puiden kuorinnassa on eduksi, että kuorittava puu on mahdollisimman tasapaksua ja kuusen osuus havukuorinnassa on tasainen. Kastelu- tai kylmävarastointijärjestelmää ei sellupuiden varastoinnissa ole käytössä.

Tehtaalle autokuljetuksilla tuleva ostohake puretaan hakekasoille hakkeenpurkaustaskujen avulla. Koivu- ja havuhakkeelle on erilliset purkaustaskut. Haketaskuun autosta purettava hake siirretään purkuruuvien avulla elevaattorille, mikä vie hakkeen hihnakuljettimelle. Hihnakuljettimia pitkin hake päätyy lopulta hakekasalle, koivuhake koivukasalle ja havuhake ostohakkeelle tarkoitettulle havukasalle. Mikäli hakekasoilla ei ole tilaa, puretaan ostohake puukentällä olevalle alueelle. Autoista puukentälle purettua haketta käsitellään kauhakuormaajalla ja puskutraktorilla, jotta hake saadaan varastoitua riittävän tiiviisti rajatulle alueelle.

4.2 Puun ja hakkeen laadunvalvonta

Laadunvalvonnan tarkoituksena on varmistaa tehdasalueelle tulevan puun ja hakkeen riittävän hyvä laatu. Jokaiselta puun toimittajalta otetaan satunnaisesti otantanippu, mistä mitataan ensimmäiseksi tilavuuspaino upottamalla nippu kurottajan avulla upotusaltaaseen. Sen jälkeen nippu levitetään asfaltoidulle laatukentälle, jossa jokainen puu tarkastellaan erikseen kuorintaa, haketusta ja jatkoprosessia heikentäviltä ominaisuuksilta. Laadutuksessa tarkastellaan erityisesti puun runkovikoja kuten oksaisuutta ja epäpyöreyttä sekä puuaineksen vikoja, erityisesti lahon osuutta. Myös puiden halkaisijat tarkistetaan alimittaisten kuitupuiden varalta. Yleisesti ottaen tarkasteltavissa koivupuissa on enemmän vikoja kuin havupuissa.

Kuorimon koivu- ja havulinjalta otetaan hakenäytteet kolme kertaa vuorokaudessa. Kuorimo-operaattori asettaa hakenäytteen määrättyyn lokeroon, josta automaattiseula seuloo hakenäytteen standardin SCAN-CM 40:01 mukaisesti. Kuorimon hakkeesta mitataan

kolmesti viikossa kuiva-ainepitoisuus molemmilta hakkulinjoilta. Seulonnan tulokset päivittyvät automaattisesti ohjausjärjestelmään. Ostohakkeen laadunvalvonta noudattaa samoja periaatteita kuin puun laadunvalvonta: jokaiselta hakkeen toimittajalta otetaan satunnaisesti hakenäytteitä autopurkupaikan purkaustaskuun sijoitetulla näytteenottoruvilla. Näytteet seulotaan automaattiseulalla kuorimon hakkeiden tapaan. Jokaisesta ostohakenäytteestä mitataan laatuarvon lisäksi kuiva-ainepitoisuus ja tarvittaessa kuoren osuus hakkeessa. Seulomolta lähtevältä hihnalta otetaan molemmilta linjoilta hakenäytteet kolme kertaa viikossa, joista mitataan laatuarvo, kuiva-ainepitoisuus ja kuoren osuus hakkeessa.

4.3 Puun syöttö kuorimolle

Puun syöttö kuorimolle tapahtuu materiaalinkäsittelykoneella, jota operoi tehtävään koulutettu kuorimo-operaattori. Puut nostetaan joko koneen välittömästä läheisyydestä puskurivarastosta tai suoraan koneen viereen ajetusta autosta. Havupuut ja 3-4 metriä pitkät koivut syötetään suoraan sulatuskuljettimelle. Pidemmät koivut syötetään katkaisulaitokselle, joka katkaisee kuitupuut kahteen osaan ennen sulatuskuljetinta. Katkaisulaitoksessa on vastaanottokuljetin, puita tasaava porraserotin ja puut sirkkelin läpi kuljettava katkaisukuljetin. Materiaalinkäsittelykoneella pystyy purkamaan yhden rekalla tuotavan kuitupuunipun kolmella nostokerralla.

4.4 Sulatus ja kuorinta

Sekä koivu- että havulinjalla käytetään sulatuskuljetinta puun sulatukseen ja kasteluun. Havulinjan sulatuskuljetin on noin 76 metriä pitkä, koivu noin 63 metriä pitkä. Molemmilla linjoilla sulatukseen käytetään kiertovettä. Koivulla sulatuskuljettimen nopeus on sulatuskuljettimen täyttöasteesta riippuen tyypillisesti 2,5-3 metriä minuutissa ja havulla 3-3,5 metriä minuutissa.

Kuorimon koivu- ja havukuorimarummut ovat mitoiltaan samanlaiset, pituus 35 metriä ja sisähalkaisija 5,4 metriä. Molempiin rumpuihin on hitsattu rummun sisäpinnalle aiemmissa

vuosihuoltoseisokeissa vuorauslevyjä, sillä rummun metallinen vaippa on ohentunut vuosien saatossa rasituksen myötä. Havurummun pyörimisnopeus pidetään koivurumpua alhaisempana havupuun helpomman kuoriutumisen vuoksi.

4.5 Hakkeen varastointi

Kuorimolla tuotettu havuhake varastoidaan kahdessa siilossa, joihin ajetaan normaalitilanteessa vuorotellen siten, että täytettävä siilo vaihtuu kuuden minuutin välein. Siilossa on ruuvipurkain, joka pyörii pituusakselinsa ympäri ja kiertää ympyrärataa siilon pohjalla.

Kuorimon koivuhake varastoidaan ostokoivuhakkeen kanssa samassa hakekasassa, jonka varastointikapasiteetti on noin 30 000 m³. Koivuhakkeen purkaus tapahtuu kasan alla kahdella purkuruuvilla kahdelle hihnakuuljettimelle, joista hake johdetaan seulomolle menevälle hihnakuuljettimelle.

Ostohavuhakkeen varastointi tapahtuu noin 30 000 m³ hakekasassa. Kasalle ajetaan haketta autohakkeen purkupaikalta, junahakkeen purkupaikalta sekä erillisillä hihnakuuljettimilla suoraan Kaukaan sahalta. Myös kuorimon haketta voidaan ajaa kasalle tarvittaessa. Hakkeen purkaus tapahtuu neljällä purkuruuvilla kahdelle hihnakuuljettimelle, jotka purkavat hakkeen seulomolle menevälle hihnakuuljettimelle.

4.6 Haketus

Rummusta tulevat kuoritut puut putoavat vastaanottokuljettimelle, joka syöttää puut pesurullastolle. Pesurullastolla puut huuhdellaan hiekasta ja epäpuhtauksista ennen haketustapahtumaa. Koivulinjalla on yksi kiviloukku ja havulinjalla kaksi kiviloukku kiviä ja muiden painavien partikkelien poistamiseksi. Hakun syöttökuljettimella on kuljettimen tarvittaessa pysäyttävä metallinpaljastin, mikä estää puiden mukana kulkeutuvan metallin päätyksen hakkuun.

Kuorimon koivuhakku, kuva 12, on pystysyöttöinen puhaltava hakku, jossa on 12 terää. Teräkiekon halkaisija on 3300 mm ja hakun pyörimisnopeus on 260 rpm. Terät ovat käännettäviä kertakäyttöteriä, joita on kolme vierekkäin yhdessä teräaukossa. Terillä ajetaan tyypillisesti noin 60-80 tuntia mikäli haketustapahtumassa ei havaita poikkeavuuksia, jonka jälkeen ne puhdistetaan, käännetään ja ajetaan toiset noin 60-80 tuntia. Kun molemmat puolet teräpalasta ovat kuluneet, laitetaan teräpalat kierrätykseen. Koivuhakun tuottaman hakepalan pituus on 22 mm. Hake siirtyy poistoputkea pitkin virtausta tasaavan syklonan kautta ruuvikuljettimelle, mikä vie hakkeet hakekasalle menevälle hihnakuljettimelle.



Kuva 12: Kuorimon koivuhakku. Oikealla nähdään hakkeen puhallusputki, vasemmalla hakun syöttösuiste.

Havuhakku (kuva 13) on pystysyöttöinen taaksepurkava hakku, jossa on 15 terää. Koivuhakun tapaan teräkiekon halkaisija on 3300 mm ja terinä käytetään käännettäviä kertakäyttöteriä, joita on kolme vierekkäin teräaukossa. Molemmilla puolilla terää ajetaan koivuhakun tapaan noin 60-80 tuntia. Hakun pyörimisnopeus on 280 rpm ja hakun tuottama hakepituus on 26 mm.



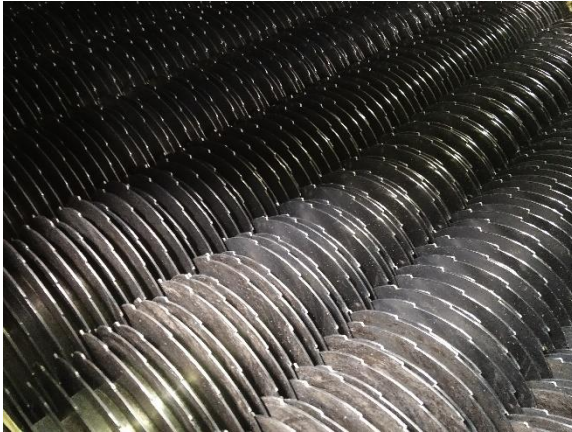
Kuva 13: Kuorimon havuhakku.

4.7 Havuhakkeen seulonta

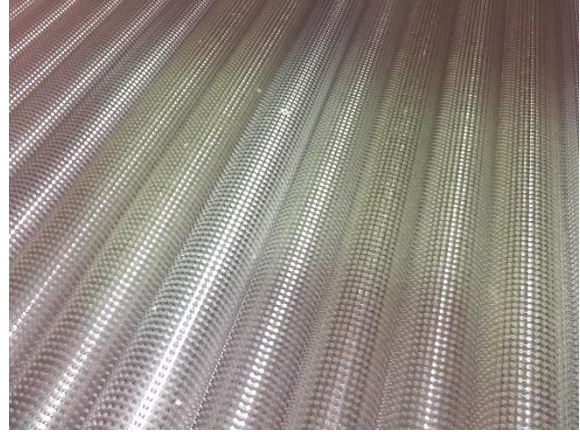
Havuhake siiloista ja hakekasasta ohjataan yhdelle hihnakuuljettimelle, joka kuljettaa havuhaketta seulontaan. Seulonnassa ensimmäisenä hakkeen joukosta poistetaan metallit hihnakuuljettimen yläpuolelle sijoitetulla raudanerotusmagneetilla. Magneetin jälkeen hakkeet johdetaan kamiseulalle, mikä on melko harvoilla väleillä varustettu kiekkoaseula. Seulan tarkoituksena on poistaa kamit eli suuret jäätyneet hakepaakut sekä muut isommat epäpuhtaudet hakevirrasta. Lähes kaikki hake läpäisee seulan, mutta mikäli joukossa on todella pitkiä suikaleita tai isompia jääkameja, menevät partikkelit pudotusputkea pitkin kamimurskalle joka murskaa ylitteen pienempiin paloihin. Murskattu ylite kuljetetaan kolakuuljettimella rejektilinjalle ja edelleen polttoon.

Kamiseulan jälkeen hake seulotaan paksuusseulalla (kuva 14), jossa on 36 kiekkoakselia. Kiekkojen väli on ensimmäisessä 18 kiekkoakselissa harvempi kuin loppupään kiekkoakseleissa. Akselien välisen aukon pituus on 130 mm. Ylisuuri ja ylipaksu jae menee ADS-ilmaerotuksen kautta hakepuristimelle, josta puristetut hakepalat johdetaan keittämölle menevälle hihnakuuljettimelle. ADS-erottelussa poistetut tiheet partikkelit johdetaan rejektilinjalle. Paksuusseulan läpäisseet hakepalat tippuvat suoraan kiekkoakselien alapuolella sijaitsevalle puruseulalle, kuva 15. Puruseulassa on yhteensä 80 akselia. Puruseulan rullaston akselien välistä tippuva puru kuljetetaan kola- ja ruuvikuuljettimilla

purusiilon tai vaihtoehtoisesti rejektilinjalle. Pururullaston yli menevä jae johdetaan keittämölle. Havuseulomoa on mahdollista ajaa paksusseula ohitettuna, jolloin hakkeet kulkevat ainoastaan kamiseulan ja pururullaston kautta. Poikkeustapauksessa havuhakkeet voidaan ajaa koivulinjan seulontalaitteiston läpi.



Kuva 14: Havulinjan paksusseula.



Kuva 15: Havulinjan puruseula.

Vuosihuoltoseisokissa keväällä 2018 kasvatettiin havulinjan paksusseulan kiekkojen väliä ensimmäisen 18 akselin osalta noin 50 %:lla. Muutoksella tavoiteltiin seulontakapasiteetin nostoa.

4.8 Koivuhakkeen seulonta

Koivuhake ohjataan hakekasalta seulomolle menevälle hihnakuljettimelle. Ensimmäinen seulonnan vaihe on havulinjan tapaan metallien poisto hihnakuljettimen yläpuolelle sijoitetulla magneetilla. Hihnakuljetin pudottaa koivuhakkeet syöttöruuville, joka syöttää haketta tasoseulalle, kuva 16.

Tasoseulassa on neljä reikälevyillä varustettua tasoa. Ylimmän tason reikien halkaisija on 55 mm, josta valtaosa hakkeesta menee läpi. Ylisuuret jakeet menevät reikälevyn yli pudotusluiskalle ja edelleen tikkuhakkuun. Tikkuhakkuna on pystysyöttöinen puhaltava hakku, jossa on kahdeksan terää. Se hakettaa ylisuuret hakepalat pienemmiksi ja hake siirtyy

putkea pitkin tasoseulan yläpuolella sijaitsevalle syklonalle, josta hake syöttöruuvin kautta siirtyy takaisin tasoseulan ylimmälle tasolle.



Kuva 16: Koivulinjan tasoseula, kuvassa näkyy noin puolet tasoseulan pinta-alasta. Ylimmälle reikälevylle on kerääntynyt ylisuuria hakepaloja pääosin oksakohdista.

Ylimmän tason läpäissyt hake putoaa seuraavalle tasolle, jonka reikien halkaisija on 19 mm. Tätä tasoa pitkin kulkeutuvat hakepalat ovat akseptia, jotka putoavat keittämölle menevälle hihnakuljettimelle. Läpäisevät hakepalat putoavat seuraavalle seulatasolle, jonka reikien halkaisija on 10 mm. Myös tämän tason mukana kulkeutuvat hakepalat ovat akseptia, jotka putoavat keittämölle vievälle hihnakuljettimelle. Akseptille on kaksi tasoa, sillä se parantaa yhden reikälevytason läpäisykykyä. 10 mm reikälevytason läpäisevät hakepalat putoavat seulatasolle, jonka reikien halkaisija on 5 mm. Tason mukana kulkeutuvat hakepalat ovat tikkujaetta, jotka voidaan ajomallin mukaisesti ohjata joko keittämölle tai purusiilon. Tason läpäissyt jae on purua, mikä ohjataan joko purusiilon tai rejektijalalle polttoon.

5 KUOREN JA PURUN KÄYTTÖ TEHDASINTEGRAATISSA

Kaukaan tehdasalueella sijaitsee Kaukaan Voiman biovoimalaitos, joka tuottaa sähköä ja prosessihöyryä tehdasintegraatin tarpeisiin sekä sähköä ja kaukolämpöä Lappeenrannan Energialle. Voimalaitoksen höyryverkko on yhteydessä UPM:n höyryverkkoon. Laitoksen sähköteho on 125 MW, prosessihöyrykapasiteetti 152 MW ja kaukolämpökapasiteetti 110 MW. Voimalaitos tuottaa noin 85 % Lappeenrannan kaupungin kaukolämmön tarpeesta. (Pohjolan Voima 2009)

Voimalaitoksen kattilatyypinä on kiertopetikattila, jonka polttoaineteho on 410 MW. Polttoaineena käytetään tehdasalueelta sahan, paperitehtaan ja sellutehtaan kuorimoilta saatavaa kuorta ja hakkeen seulonnasta saatavaa purua ja rejektiä. Lisäksi polttoaineena käytetään tehdasalueen ulkopuolelta tuotavaa turvetta ja erilaista puuperäistä polttoainetta, kuten kantoja ja metsätähdettä. Vara- ja käynnistyspolttoaineena käytetään kevyttä polttoöljyä ja maakaasua. (Pohjolan Voima 2009)

Tehdasalueelta tuleva murskattu ja puristettu kuoriaines johdetaan kuorimoilta yhteiselle kokoojakuljettimelle, josta se normaalitilanteessa ajetaan katettuun aumavarastoon. Samalle kuljettimelle johdetaan myös normaalitilanteessa koivuseulonnan purut, havuseulonnan ilmaerotuksessa erotellut oksanappulat ja havulinjan kamiseulalla poistetut ja murskatut partikkelit. Sellu- ja paperitehtaan kuorimoiden murskatun ja puristetun kuoren kuiva-ainepitoisuus vaihtelee tyypillisesti välillä 40-55 m-%. Kuoren ja seulonnan rejektin määrälle ei ole biovoimalaitoksen puolesta erillisiä vaatimuksia, vaan tehdasalueella tuotettavan polttoaineen määrä on riippuvainen sahan sekä sellu- ja paperitehtaan tuotannosta.

Havuhakkeen seulonnassa eroteltu puru keitetään ostopurun ja koivukeittämön rejektin kanssa omassa purukeittimessä. Tuotettu massa johdetaan koivumassan sekaan pesua ja valkaisua varten. Koivupurut voidaan myös johtaa havupurujen tapaan purusiilon. Siilon ollessa täynnä voidaan myös havupurut ohjata polttoon.

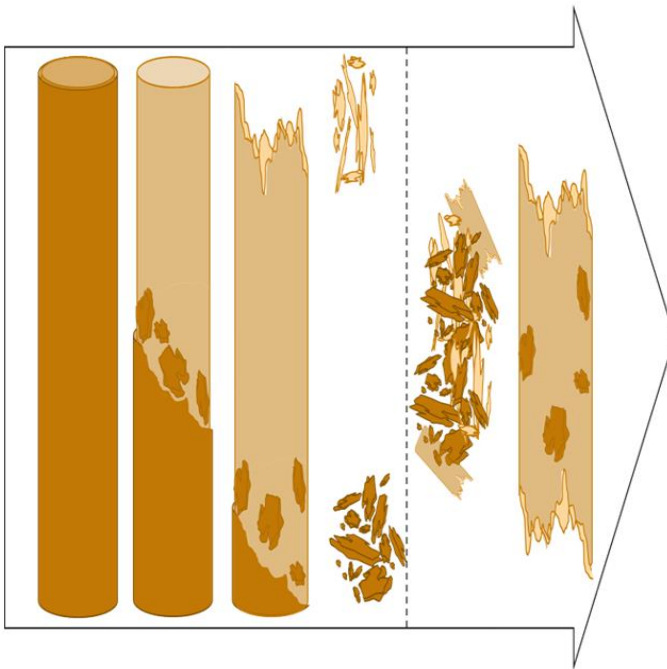
6 PUUNKULUTUKSEN VÄHENTÄMINEN KAUKAAN SELLUTEHTAALLA

Sellunvalmistuksen puunkulutusluvun vähentämiseksi on tunnistettava kohteet, joissa puuainesta ei saada hyödynnettyä sellun valmistukseen, vaan se häviää polttotarkoitukseen eri muodoissa. Tässä kappaleessa kartoitetaan häviölähteet Kaukaan sellutehtaan puunkäsittelyssä, tarkastellen sekä kuorimon että seulomon toiminnan merkitystä sellutehtaan puunkulutuksen vähentämiseksi. Tarkastelussa hyödynnetään kerättyjen hakenäytteiden tuloksia, visuaalista tarkastelua sekä tarpeelliseksi nähtyjä koeajoja. Tässä työssä keskitytään haketuksen ja seulonnan aiheuttamiin puuhäviöihin ja pyritään kehittämään ajotapa- ja prosessimuutoksia puuhäviöiden vähentämiseksi.

6.1 Kuorimon tarkastelu

Kuorimon prosesseissa puuhäviöitä syntyy pitkien koivupuiden katkaisussa, kuorintaprosessissa ja haketusprosessissa. Pitkien koivupuiden katkaisussa syntyy häviötä sahauksen puruna arviolta 0,1-0,2 %, mutta kuorinnassa saavutettu hyöty on paljon suurempi kuin sahanpurun mukana menetetty puuainese (Partanen 2017, 60).

Ensimmäinen merkittävä puuhäviön lähde on kuorimarumpu, jonka kuoriaukoista poistuu kuorintaprosessissa puusta irronneita puun paloja. Runkopuun hajoamista kuorimarummussa on esitelty kuvassa 17. Koivusta irtoaa merkittävästi enemmän pieniä jakeita pitkän puun katketessa, mikä johtaa tyypillisesti havulinjaa suurempiin puuhäviöihin rumpukuorinnassa. Kuorinnassa poistunut puuainese päättyy polttoainekäyttöön sähkön ja lämmön tuotantoon. Kuorinnan onnistuminen määrittää myös suurelta osalta haketusprosessin onnistumista, sillä kokonaisesta runkopuusta tehty hake on parempilaatuista kuin lyhyistä katkenneista pätkistä hakettu lopputuote.



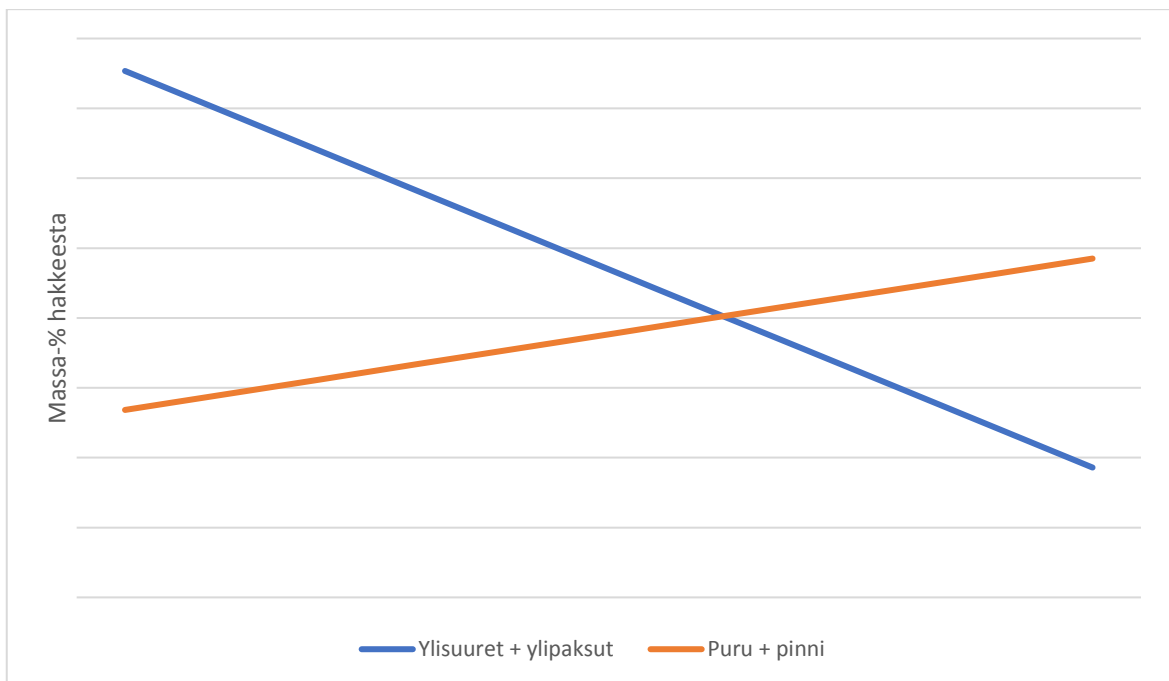
Kuva 17: Puun hajoaminen kuorimarumussa (UPM Internal 2015a).

Haketusprosessissa itsessään ei synny häviötä, vaan vaikutukset näkyvät hakkeen seulonnessa ja keitossa. Haketuksessa syntyy aina kuvan 6 mukaisia hakefraktioita. Haketuksen lopputuloksen tarkastelussa ja puuhäviöiden arvioimisessa analysoidaan säännöllisesti kerättyjen hakenäytteiden tuloksia ja lisäksi visuaalisesti suoritettavaa tarkastelua hakkeen laadusta. Myös kuitulinjan mahdolliset ongelmat voivat heijastaa puunkäsittelyn ongelmia.

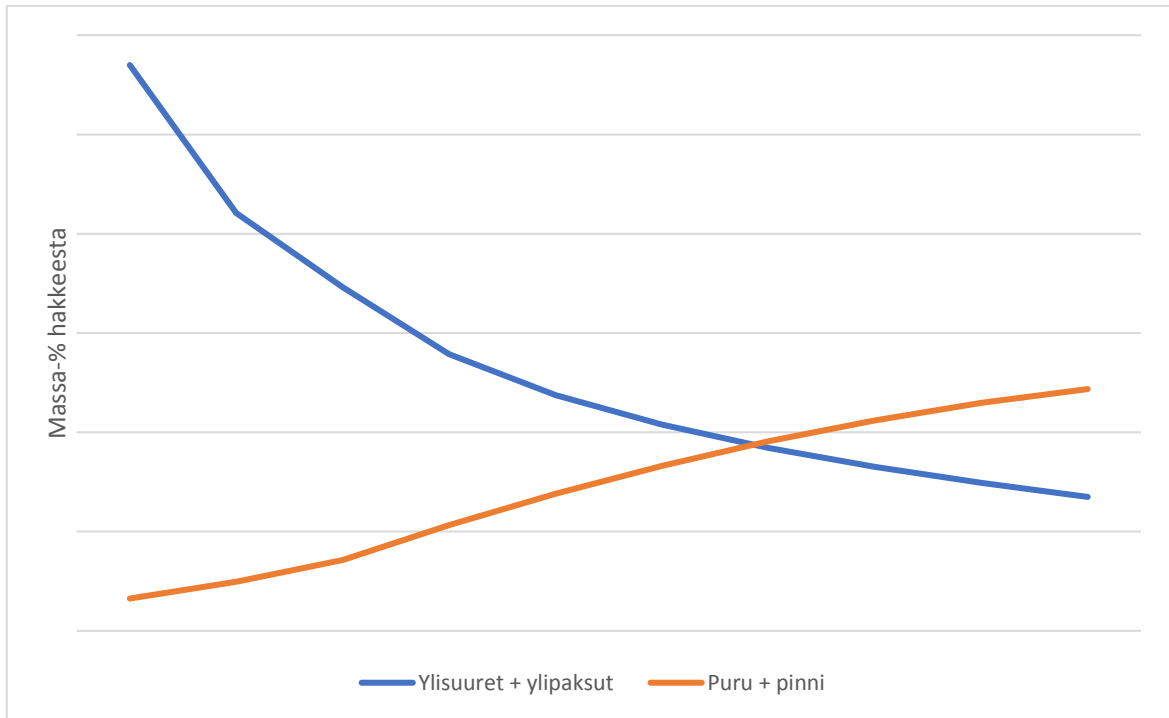
Ylisuuret ja ylipaksut hakepalat keittyvät akseptihaketta huonommin, mikä johtaa keittämön rejektimäärien kasvuun. Pinnihake ja puru kuluttavat keitossa suuren määrän keittokemikaaleja suuren suhteellisen pinta-alan takia ja ylikeittyvät akseptihakkeeseen verrattuna, joten näiden palakokojen saanto jää keitossa alhaisemmaksi kuin akseptihakkeen. Koivuhakkeen eri palakokojen keitettävyys on tasaisempaa verrattuna havuhakkeeseen. (UPM Internal 2015b)

Hakenäytteiden tarkastelussa on järkevää tarkastella akseptihakkeen osuuden sijaan ei-optimaalisten hakepalojen eli ylisuurten, ylipaksujen, pinnihakkeen ja purun määrää suhteessa koko otantaan. Kaukaan sellutehtaalla on seurattu nykymuodossaan säännöllisesti

kuorimon ja seulomon jälkeisten hakevirtojen palakokojakaumaa vuodesta 2015 lähtien. Hakenäytteiden tuloksista voidaan kuorimon koivu- ja havuhakkeelle esittää ei-optimaalisten jakeiden välinen riippuvuus eri tekijöistä, kuten vuodenajasta, puun laadusta ja hakun mekaanisesta kunnosta johtuen. Riippuvuudet on esitelty kuvissa 18 ja 19. Kuvaajissa on järjestetty hakenäytteiden tulokset suurimmasta ylisuurten jakeiden määrästä pienimpään ja esitetty keskimääräinen hienoaineksen määrä kyseisen hakeotannan kohdalla parhaiten edustavalla lineaarisella, logaritmisella tai polynomisella trendiviivalla. Yksittäisten näytteiden hienoaineksen määrä samalla ylisuurten jakeiden tasolla vaihtelee melko runsaasti, mutta kuvaajasta voidaan selkeästi huomata suurien ja pienten äärijakeiden välinen keskinäinen riippuvuus.



Kuva 18: Kuorimon koivuhakkeen ylisuurten ja hienoaineksen riippuvuus vuonna 2018.



Kuva 19: Kuorimon havuhakkeen ylisuurten jakeiden ja hienoaineksen riippuvuus vuonna 2018.

Haketuksen voidaan ajatella onnistuneen, kun hienoaineksen ja ylisuurten jakeiden määrä on mahdollisimman pieni. Haketustapahtumassa syntyy aina kumpiakin ei-toivottuja jakeita, mutta järkevää olisi pitää ylisuurten jakeiden määrä hienoaineksen määrään nähden suurena kuitenkin niin, ettei niiden jatkokäsittely seulomolla muodostu pullonkaulaksi tai aiheuta muita ongelmia, esimerkiksi keittämöllä rejektimäärien kasvua. Kuorimon hakuissa ei voida säätää muuta parametria kuin leikkaa, minkä avulla voidaan hieman vaikuttaa ylisuurten ja hienoaineksen määrän syntymiseen haketuksessa. Leikon muutos vaikuttaa kuitenkin myös keskimääräiseen kuidunpituuteen, mikä vaikuttaa lopputuotteen ominaisuuksiin.

6.1.1 Kuorimon hakkujen tarkastelu ja haketustapahtuman suurnopeuskuvaus

Lokakuun 4.-5. päivä 2018 tutkittiin kuorimon molempien hakkujen geometriaa ja kuvattiin haketustapahtumaa suurnopeuskameralla siten, että hakun syöttösuisteen tarkastusluukun tilalle asennettiin polykarbonaattilevy, jonka toiselle puolelle asetettiin kamera kuvaamaan haketusta. Puita ajettiin hakkuun yksitellen, jotta haketustapahtuman analysointi olisi optimaalista.

Haketustapahtuman suurnopeuskuvaa tarkastellessa huomattiin, että koivun haketuksessa puun käyttäytyminen haketuksen aikana oli melko levotonta, hakussa oli ikään kuin liikaa imua ja puu pyrki hakettumaan nopeammin. Tämän seurauksena hakettava puu ottaa liian aikaisin kiinni hakun kulutuslevyyn ja hakku sylkii puuta ulospäin haketustapahtumassa. Ongelma paikallistuu liian suureen päästökulmaan. Ongelmat hakun geometriassa heijastuvat puun käyttäytymisessä haketustapahtuman aikana myös siten, että puu ei ole haketuksen aikana optimaalisesti tuettuna syöttösuistetta vasten, vaan puun perä on jatkuvassa edestakaisessa vertikaalisessa liikkeessä. Myös hakun syöttösuisteen muotoilua tulisi tarkastella puun optimaaliseen tukemiseen haketuksen aikana.

Havuhakun suurnopeuskuvauksessa havaittiin, että puun haketus on koivuhakua paremmalla tasolla, sillä puu käyttäytyi rauhallisemmin haketuksessa ja ylimääräistä pomppivaa liikettä ei havaittu. Havuhakun ongelmina voidaan pitää teräväläyksen suuruutta, jonka takia syntyy paljon pitkiä ohuita suikaleita sekä suurta purun ja pinnihakkeen määrää.

Molempien hakkujen geometriaa tarkastellessa huomattiin, että mahdollisimman läheltä teräkiekon keskikohtaa mitattuna vastaterän vällys oli kummallakin hakulla 1,25 mm kun vällyksen pitäisi olla välillä 0,5-0,7 mm. Lisäksi havaittiin, että vastaterän vällys lähempänä teräkiekon ulkoreunaa oli koivuhakulla noin 2 mm ja havuhakulla peräti 3,2 mm. Liian suuri vastaterän vällys selittää havuhakun tuottamien ohuiden suikaleiden suurta määrää. Suuri terävällys lisäksi kasvattaa sekä ylisuurten että hienoaineksen määrää hakkeen joukossa. Esimerkit ylisuuresta hakepalasta ja ohuesta suikaleesta havuhakkeen joukossa on esitelty kuvassa 20. Myös eri terien etäisyydet vastaterästä vaihtelivat hyvin paljon, vaihteluväli oli jopa 1 mm luokkaa. Kuorimon hakkujen teräjärjestelmässä yksittäisten terien etäisyyden säätömahdollisuutta ei ole, vaan vastaterän väli on säädettävä lähimmän terän mukaan.



Kuva 20: Havuhakkeen joukossa esiintyneet ylisuuri hakepala ja ohut suikale pintapuuta.

Välittömästi kun todettiin vastaterän välyksen olevan liian suuri, säädettiin molempien hakkujen vastaterien välystä siten, että se oli lähellä teräkieron akselia halutulla välyksellä. Ulkokehän terävälystä ei erikseen voi säätää, vaan aloitettiin toimenpiteet uusien vastaterien koneistamiseksi ja selvitystyö, miksi vastaterän välys on päässyt kasvamaan niin suureksi.

6.1.2 Vastaterän vaihdon merkitys haketukseen

Ennen vastaterien uusimista suoritetaan koeajo molemmilla hakkulinjoilla, jotta saadaan selville vastaterän vaihdon ja oikean välyksen merkitys hakkeen laadussa. Selvitys suoritetaan havulinjalla siten, että hakun terien vaihdon jälkeen haketetaan uittopuuta riittävä määrä. Hakevirrasta otetaan yhteensä viisi kappaletta hakenäytteitä, vähintään 15 minuutin välein. Uittopuun haketuksessa raaka-aineen oletetaan olevan melko tasalaatuista verrattuna maapuun ajossa tapahtuvaan suurempaan raaka-aineen laadunvaihteluun. Hakenäytteistä selvitetään laatuarvo, kuiva-ainepitoisuus, keskimääräinen hakepituus ja -paksuus. Koeajo suoritetaan sekä ennen että jälkeen vastaterän vaihtoa samoilla ajoparametreilla.

Havulinjalla koeajo ennen vastaterän vaihtoa suoritettiin tiistaina 27.11. klo 07.00-09.30. Koeajohetkellä ulkoilman lämpötila oli -7 °C ja järiveden lämpötila 1,6 °C. Ajettaessa havulinjalla uittopuuta ei hakkeen joukossa ollut havaittavissa juuri ollenkaan pitkiä suikaleita. Muutamia silminnähten ylisuuria hakepaloja näytti olevan hakkeen seassa. Puun syöttö hakulle oli melko tasaista ja koeajohetkellä kuorimarummun sähkömoottorien kuormitus vaihteli 70-75 % välillä. Koeajohetkellä oli muutamia ajokatkoja puukentän ongelmien takia.

Havuhakulla uusi vastaterä asennettiin paikalleen 13.12.2018 ja välykseksi asetettiin 0,6 mm. Sisä- ja ulkokehän välyksen ulkonemaksi mitattiin 0,6 mm mikä on vieläkin hieman liian suuri, mutta merkittävästi parempi arvo kuin ennen vastaterien vaihtoa. Havulinjalla koeajo vastaterän vaihdon jälkeen suoritettiin 07.01.2019 klo 8.50-9.55. Koeajohetkellä ulkoilman lämpötila oli 0 °C ja veden lämpötila 1 °C. Rummun sähkömoottorien kuormitus oli noin 70-75 % koeajohetkellä.

Hakenäytteet analysoitiin Kaukaan hakelaboratoriossa, koeajon tulokset löytyvät liitteestä 2. Laatuarvolukemat sekä ennen että jälkeen vastaterän vaihtoa olivat pitkän ajan seurantaan nähden todella hyviä. Tuloksiin vaikutti todennäköisesti uittopuun alhaisempi kuiva-aineen osuus, ennen koeajoa vaihdetut terät ja uittopuiden mahdollisesti vähäisempi katkeilu kuorimarummussa johtuen vähäisemmästä kuorinta-ajasta. Viiden näytteen keskimääräinen laatuarvo parani hieman vastaterän vaihdon jälkeen, vaikka jälkimmäisessä koeajossa puun keskimääräinen kuiva-ainepitoisuus oli noin kaksi prosenttia korkeampi, lisäksi hakepalojen pituuden ja paksuuden hajonta oli vähäisempää. Myös keskimääräinen pituus-paksuussuhde nousi hieman.



Kuva 21: Puun syöttöä havuhakulle ennen vastaterän vaihtoa.



Kuva 22: Puun syöttöä havuhakulle vastaterän vaihdon jälkeen.

Koivulinjan koeajossa raaka-aineena oli halkaisijaltaan hieman paksumpaa puuta, joka ajettiin katkaisulaitoksen kautta. Hake oli havulinjaan verrattuna paljon hienojakoisempaa ja purun määrä oli melko suuri. Koeajohetkellä maanantaina 03.12. klo 13.00-14.20 ulkoilman lämpötila oli $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Optisilla mittalaitteilla saadaan selville koivurummusta tulevan puuvirran jokaisen kappaleen tilavuus, pituus ja halkaisija. Tietoja käytetään hyväksi kuorinnassa tapahtuvan puiden katkeilun arvioimisessa ja sitä kautta hakulle syötettävän puuvirran dimensioiden tarkastelussa. Rummusta tulleiden kuorittujen koivujen keskipituus koeajon aikana oli rumpukuorinnassa tapahtuvasta katkeilusta johtuen 1,8 m ja keskihalkaisija 15 cm. Hakkeen joukossa esiintyi silminnähdessä muutamia ylisuuria hakepaloja. Yhtä 20 minuutin ajokatkoa lukuun ottamatta puun kuorinta ja haketus oli melko jatkuvaa.



Kuva 23: Puuvirtaa koivuhakulle ennen vastaterän vaihtoa.



Kuva 24: Puuvirtaa koivuhakulle vastaterän vaihdon jälkeen.

Uudet vastaterät koneistettiin ja asennettiin paikalleen 13.12.2018. Koivuhakulle asennetun vastaterän välys asetettiin 0,7 millimetriin, ulkokehältä vastaterän välykseksi mitattiin 1 mm, mikä tarkoittaa 0,3 mm ulkonemaa. Ero aikaisempaan oli noin 0,5 mm.

Koivulinjan koeajo vastaterän vaihdon jälkeen suoritettiin 18.12.2018 klo 13.30-15. Ulkoilman lämpötila oli -4 °C. Hakulle syötettävän puuvirran keskipaksuus oli 2 cm alhaisempi kuin ennen vastaterän vaihtoa suoritettua koeajoa, myös keskitilavuus noin 30 % pienempi.

Puun keskimääräinen kuiva-ainepitoisuus oli 0,7 prosenttiyksikköä korkeampi vastaterän vaihdon jälkeisessä koeajossa. Hieman ohuemmasta hakulle syötettävästä puuvirrasta huolimatta oli laatuarvo parantunut 0,2 prosenttiyksikköä ja hakepituuden sekä paksuuden keskihajonnan arvo oli pienentynyt hieman. Yleisesti ottaen voidaan siis todeta otettujen hakenäytteiden perusteella, että koivulinjalla vastaterän vaihto ja sitä kautta vastaterän

välyksen korjaantuminen parempaan suuntaan paransi hakkeen laatua, mutta muutos ei ollut odotetun suuruinen. Koeajojen tulokset löytyvät liitteestä 2.

Sekä koivu- että havulinjalla uusien vastaterien asennuksen myötä ei päästy alun perin ajateltuun tilanteeseen, jossa vastaterän sisä- ja ulkokehän välyksen erotus olisi optimaalisella tasolla. Näin ollen ei päästy täydellisesti arvioimaan, mikä on todellinen vaikutus vastaterän välyksen hyvän tason merkityksellä hakkeen laatuun. Välyksen korjaantuminen kuitenkin paransi hieman hakkeen laatuarvoa kummallakin haketuslinjalla. Ongelman perussy ssaatiin kuitenkin selville; vastaterän asennuspinta hakun rungossa on syöpynyt, mikä aiheuttaa ongelmat vastaterän välyksessä.

6.2 Seulomon tarkastelu

Seulomon tärkeimpänä tehtävänä on erotella hakkeen joukosta hienoainesta ja lisäksi käsitellä ylisuuria ja ylipaksuja hakepaloja keitto-ominaisuuksien parantamiseksi. Seulomon toiminnan tarkastelussa suoritetaan eroteltujen jakeiden ominaisuuksien ja jatkokäsittelyn optimaalisuuden arviointia laboratoriokokeiden sekä visuaalisen tarkastelun avulla.

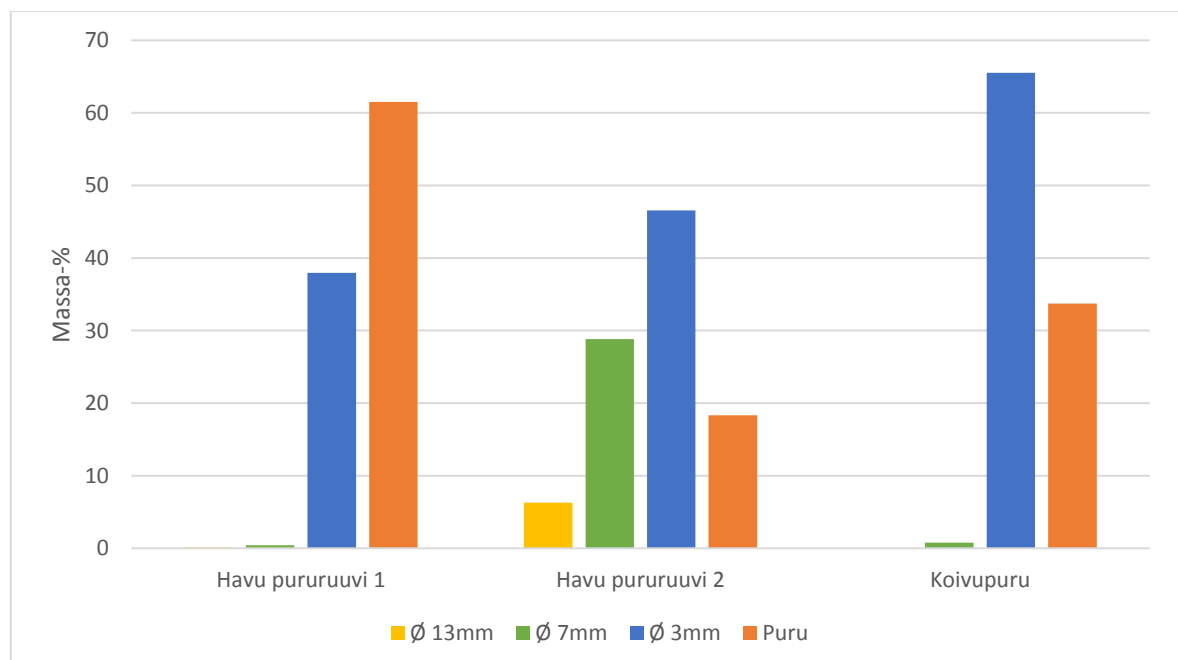
Kuorimon hakenäytteiden tuloksia voidaan verrata seulonnan jälkeisten hakenäytteiden tuloksiin ja ostetun hakkeen tuloksiin. Kerätystä hakenäytedatasta on pääteltävissä, että kuorimon havuhakku tuottaa enemmän purua ja pinnihaketta kuin koivuhakku. Seulonnan jälkeen purun ja pinnan määrä on vähentynyt merkittävästi kummallakin linjalla. Ero johtuu sekä seulonnan erottelukyvystä että vähäisemmästä purun määrästä ostohakkeen joukossa. Huomattavaa on myös, että seulonnan jälkeen ylisuuren ja ylipaksun osuus on suurempi molemmilla linjoilla, mikä johtuu ostohakkeen suuremmasta ylipaksujen osuudesta kuorimon hakkeeseen verrattuna. Havulinjan paksuusseulan kiekkojen väliä on alkupäässä harvennettu, joten iso osa yli 8 mm paksuista hakepaloista kulkeutuu keittämölle käsittelemättömänä. Koivulinjalla ei ole paksuusseulontaa, joten 55 mm reikälevystä mahtuvat ylipaksut hakepalat päätyvät käsittelemättöminä keittoon.

Havulinjan seulomolla erotellaan havuhakkeen joukosta purua pururullaston avulla. Rullaston alkupäässä eroteltu puru voidaan poistaa ruuvikuljettimella nro. 1 ja loppupäässä eroteltu puru ruuvikuljettimella nro. 2. Koivuhakkeen joukosta purun erottelu tapahtuu

tasoseulalla, josta eroteltu puru poistetaan erillisellä pururuuvilla. Kultakin ruuvikuljettimelta saadaan otettua purunäyte, millä voidaan arvioida kummankin linjan seulotun purujakeen laatua ja sitä kautta seulonnan optimaalisuutta.

Puruseulaa tarkastellessa huomataan, että purun joukossa kulkeutuu hakepaloja purusiilon. Asiaa selittää puruseulan akselien liian suuri välys joissain akseleissa, minkä takia isompia hakepaloja pääsee kulkeutumaan purun mukana purusiilon ja edelleen purukeittoon. Purun ruuvikuljetin 2:n ei-optimaalinen sijainti mahdollistaa myös sen, että viimeisten pururullien erottelema puru tippuu alla olevalle kolakuljettimelle, mutta päättyy kuitenkin keittämölle menevän hakevirran joukkoon.

Koska seulotun purun palakokojakaumalla ei ole jatkuvaa seurantaa, otettiin tammikuun aikana koeluontoisesti kaksi purunäytettä jokaiselta koivu- ja havulinjan ruuvikuljettimelta ja seulottiin näytteet hakenäytteiden tapaan standardin SCAN-CM 40:01 mukaisesti. Tuloksissa on esitelty kunkin ruuvikuljettimen kahden näytteen tuloksen keskiarvo, tulokset kuvassa 25. Näytteissä ei esiintynyt standardin mukaisia ylisuuria ja ylipaksuja hakepaloja.



Kuva 25: Seulotun purun palakokojakaumat eri näytteenottopisteissä.

Puruseulonnan tuloksista voidaan päätellä, että havulinjan puruseulan alkupään rullasto poistaa juuri niitä jakeita, joita pururullaston tuleekin poistaa eli purua ja pinnihaketta. Rullaston loppupäässä poistetuista jakeista yli kolmasosa on akseptihaketta tai pientä akseptihaketta, mikä johtaa purun seulonnassa menetettyyn akseptihakevirtaan. Menetetty akseptihake puruseulalla johtaa havulinjan puunkulutuksen kasvamiseen ja purukeiton epätasaisuuteen keittymättömien jakeiden määrän kasvamisena. Erotellun havupurun määrälle ei ole olemassa mittausta, mutta silmämääräisesti voidaan purukolakuljettimen tarkasteluluukusta arvioida määräksi noin puoli irtokuutiota minuutissa ajettaessa havukuitulinjaa normaalilla kapasiteetilla. Tämä tarkoittaa sitä, että purusiiloon päätyy akseptihaketta ja pientä akseptihaketta noin 9 irtokuutiota tunnissa.

Koivulinjan tasoseulalla erotellun purun joukossa ei ole akseptihaketta. Tasoseulan alimman tason reikien halkaisija on 5 mm, joten erotellun hienoaineksen joukossa on odotetusti sekä purua että pinnihaketta.

Ylisuuret ja ylipaksut hakepalat aiheuttavat Kaukaan havukuitulinjalla ajettavuusongelmia, mitkä ilmenevät keittymättömien jakeiden määrässä oksanerottimella ja painelajittimella. Keittymättömät pidemmät suikaleet jäävät oksanerottimen sihtilevyn reikiin ja keittymättömistä hakepaloista jääneet tikut tukkivat painelajittimen rakosihtejä. Oksanerottimelta tuleva suuri määrä keittymätöntä jaetta täyttää nopeasti oksamassasiilon. Havukeiton jälkeisen rejektin määrä on myös melko suuri. Raaka-aineen laadun vaihtelu on merkittävä tekijä, miksi keiton jälkeinen kappaa vaihtelee vakioiduista keitto-olosuhteista huolimatta. Liian kauan keitetyn hakkeen lujuusominaisuudet kärsivät, mikä näkyy negatiivisesti lopputuotteen laadussa. Suuren rejektimäärän takia on keittokappaa jouduttu pitämään alhaisella tasolla, että lajittamon toiminta ei muodostu pullonkaulaksi. Tämä aiheuttaa alhaisemman keitinsaannon ja sitä kautta suuremman puunkulutuksen sellutonnin kohden. Havulinjalla keittokappalukeman nostaminen yhdellä yksiköllä voi aiheuttaa noin 0,2-0,4 % korkeamman keitinsaannon (Hart & Connell, 2016).

Kuitulinjoilla purun ja pinnihakkeen määrän ei ole huomattu aiheuttavan ajettavuusongelmia. Suuri purun määrä ilmenee tosin keittokemikaalien kulutuksessa, sillä purun ja pinnihakkeen keitto kuluttaa kemikaalia suuren suhteellisen pinta-alan takia paljon, mutta saanto on alhaisempi. Osa keittämölle menevästä purusta voidaan käytännössä siis

ajatella puuhäviöksi, sillä liuetessaan mustalipeän joukkoon poltetaan se lopulta soodakattilassa.

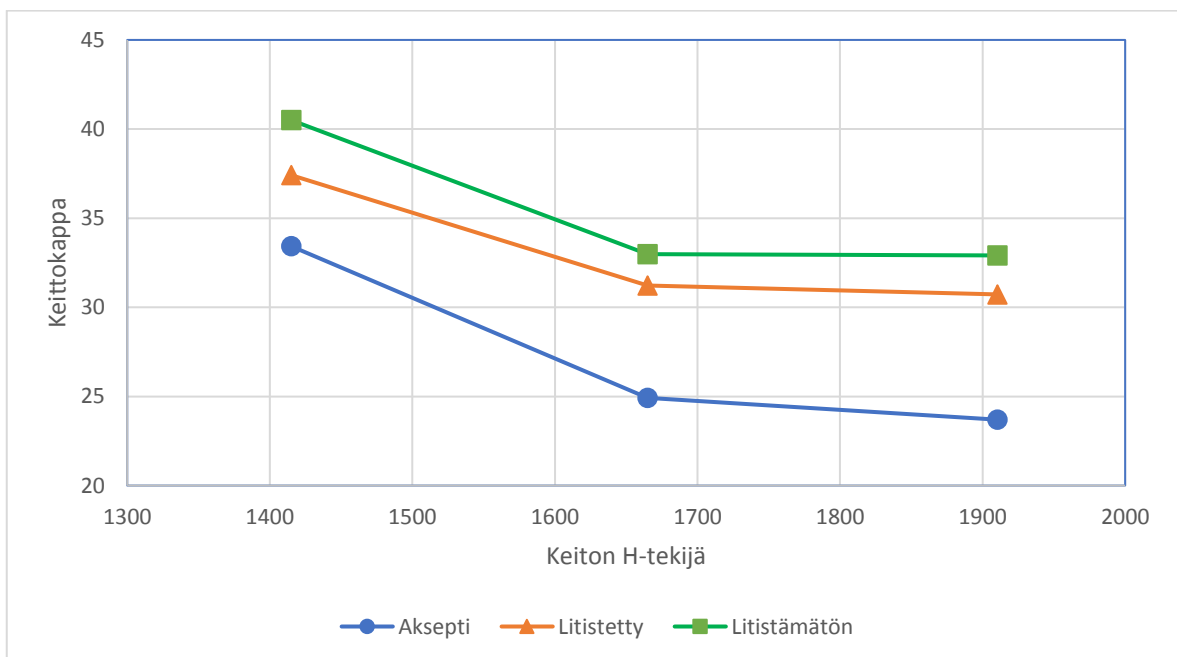
Havulinjan seulomolla huomataan, että paksuusseulan ylitteen määrä on huomattavan suuri ja hakelitistäjän läpi kulkee runsaasti ylisuurta ja ylipaksua haketta. Litistäjän jälkeiset hakepalat eivät läheskään kaikki ole keiton kannalta optimaalisia, vaan hakkeen joukossa on todella suuria paloja, jotka eivät ole muuttaneet litistäjässä muotoaan käytännössä ollenkaan, vaikka partikkelissa selvästi näkee litistäjän timanttimaisten piikkien jäljet molemmilla puolilla. 12.12.2018 havulinjan seisokin aikaan tarkastellessa huomattiin, että yksi kapeammalla kiekkovälillä varustetuista paksuusseulan kiekkoakseleista oli päässyt liikahtamaan akselin suunnassa tuntemattomasta syystä, mikä johti kiekkovälin kasvamiseen lähes 80 %:lla. Akselin liikahtaminen voi aiheuttaa pientä rejektimäärien kasvua keittämöllä. Satunnaisotannalla mitattu 50 hakepalan näyte paksuusseulan ylitteestä antoi keskipaksuudeksi 17mm vaihteluvälin ollessa 11-27 mm. Otannasta voi päätellä, että paksuusseulonnan ylitteen joukossa ei ole akseptihaketta hakesyötön maksimimäärästä huolimatta.

Koivulinjan seulomolla ylimmän reikälevytason ylitettä on huomattava määrä, mikä kuormittaa tikkuhakua todella paljon ja aiheuttaa tukoksia tikkuhakun syöttösuppilossa ja puhallusputkessa. Lisäksi runsas ylitteen määrä lyhentää tikkuhakun teränvaihtoväliä. Tasoseulan ylimmän tason reikälevyt ovat hieman taipuneet keskiosasta, mikä voi osaltaan vaikeuttaa ylisuurten hakepalojen seulontaa ja tukkia reikälevyjä.

6.2.1 Havuseulomon hakelitistäjän toiminnan tarkastelu

Kuten aikaisemmin mainittu, hakelitistäjän läpi kulkee huomattava määrä ylisuurta ja ylipaksua haketta, jotka eivät ole silmämääräisesti tarkasteltuna litistykseen jälkeen keiton kannalta optimaalisella tasolla. Litistetyn hakkeen keitto-ominaisuuksien selvittämiseksi päätettiin tehdä keittokoe Kaukaan tehdasalueella sijaitsevalla koelaitoksella pakkokiertokeittimessä tehtaan havukuitulinjaa vastaavissa olosuhteissa. Hakenäytteet kerättiin onkihaavin avulla paksuusseulan jälkeen sekä litistäjän jälkeen. Kokeitin jaettiin kahteen lohkoon, johon toiselle puolelle pakataan litistämätöntä havuhaketta ja toiselle puolelle litistettyä havuhaketta. Lisäksi kummallekin puolelle asetetaan erilliseen kehikkoon

noin litra akseptihaketta vertailukohtaksi. Kappahajonnan aikaansaamiseksi toistetaan keittokoe kolme kertaa. Keitetty akseptihake hajotetaan ja lajitellaan koelaitoksen laitteistolla, jonka jälkeen massasta selvitetään linkouksen ja homogenisoinnin jälkeen kuiva-ainepitoisuus ja kappaluku. Akseptihakkeen keittoarvoja käytetään keiton onnistumisen vertailuun. Litistetystä ja litistämättömästä hakkeesta keitetystä massasta otetaan kustakin kahden litran satunnainen otanta, josta hajotuksen, lajittelun, linkouksen ja homogenisoinnin jälkeen saadaan selville kappaluku. Massan hajotuksen jälkeen poistetaan hajoamattomat hakepalat ennen lajittelua, sillä kyseisiä kappaleita ei lajittelussa voi käsitellä. Kappaluvun avulla arvioidaan ylisuurten hakepalojen keitettävyyttä, sillä koko massaerän lajittelu koelaitteistoa rikkomatta ei ole mahdollista suurten keittymättömien hakepalojen vuoksi. Litistetyn hakkeen kappaluku tulisi olla mahdollisimman lähellä akseptihakkeen vastaavaa arvoa. Keittojen tulokset on esitelty kuvassa 26.



Kuva 26: Akseptihakkeen, litistetyn ylisuuren hakkeen ja litistämättömän hakkeen keittokappaa keiton H-tekijän mukaan.

Kaikissa kolmessa keitossa päädyttiin samaan lopputulokseen: litistetyn hakkeen keittokappaa oli merkittävästi korkeammalla tasolla kuin akseptihakkeen. Litistetty hake

keittyi kuitenkin hieman paremmin kuin litistämätön hake. Keittojen tulokset ovat liitteessä 1. Tuloksista voidaan päätellä, että hakelitistäjän tuottamat jakeet eivät keity toivotulla tavalla eli keittokappi ei ole lähellä akseptihakkeen tasoa; näin ollen hakelitistäjän toiminta ei ole optimaalista.

Keittotuloksiin voi aiheuttaa epävarmuutta kolmannessa keitossa käytetty eri valkolipeä. Myös hakkeen kuiva-ainemääritykset oletettiin samaksi kaikissa kolmessa keitossa, määritykset tehtiin ennen ensimmäistä keittokoetta akseptille, litistetylle ja litistämättömälle hakkeelle. Kuiva-ainemäärityksen toteutus vaikutti todennäköisesti akseptihakkeen erikoisen korkeaan saantoprosenttiin yhdessä keitossa. Hakenäytteiden otto suoraan ennen litistäjää ei ollut teknisesti mahdollista, joten näytteet litistämättömistä jakeista otettiin materiaalivirrasta ennen ADS-ilmaerotusta. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa litistämättömien jakeiden joukossa voi olla enemmän oksajaetta kuin ilmaerotuksen jälkeen. Keittokokeiden tulokset ovat muuttuvista tekijöistä huolimatta hyvin johdonmukaisia kaikissa kolmessa keitossa.

Keittokokeessa huomattiin, että sekä litistetystä että litistämättömässä keitetystä massassa oli suuria keittymättömiä paloja, pääosin oksakohtia. Myös kuvan 27 mukaisia vain osittain keittyneitä hakepaloja esiintyi keitetyn massan joukossa.



Kuva 27: Keittymättömiä, halkaistuja hakepaloja.

Kuvan vasemmanpuoleisen palan paksuus on 21 mm, leveys 29 mm ja pituus 52 mm. Oikeanpuoleisen palan paksuus on 16 mm, leveys 15mm ja pituus 55 mm. Silmiinpistävää

on, että keittokemikaalien imeytyminen kuidun suuntaisesti on oletettua vähäisempää. Tutkimuskeskuksella selvitettiin yhteensä kolmen keittymättömän hakepalan natriumpitoisuus hakepalan sisäosassa ja ulkoreunassa keittokemikaalien imeytymisen arvioimiseksi, tulokset liitteessä 1. Tuloksista voidaan jo silmämääräisesti päätellä, että huonommin keskiosista keittyneen hakepalan natriumpitoisuus keskiosassa on vähäisempi kuin silminnähdessä paremmin keittyneen hakepalan. Ulkoreunan natriumpitoisuudessa ei ollut hakepalojen välillä merkittävää eroa.

7 HAKETUSVERTAILU KAUKAAN JA VERROKKITEHTAAN VÄLILLÄ

Kuorinta-, haketus ja seulontalaitteiston toiminnan arvioimisessa Kaukaan sellutehtaalla on hyvä vertailla laitteistoa ja ajotapamalleja verrokkitehtaan vastaavaan prosessiin. Puunkäsittelyn avainlaitteisto verrokkitehtaalla on uudempaa, minkä oletetaan näkyvän selkeästi hakkeen palakokojakaumassa ja seulomolla eroteltujen ja käsiteltyjen jakeiden optimaalisempana käsittelynä.

7.1 Koeajojen kulku verrokkitehtaalla

Koeajo suoritettiin siten, että ensin haketettiin noin 300 m³ raakkitukkaa verrokkitehtaan kuorimon haketuslinjalla. Viiden minuutin välein hakevarastoon johtava hihnakuljetin pysäytettiin ja hihnalta otettiin hake talteen noin metrin matkalta kuljettimen pohjaa myöten. Hakenäytteitä otettiin yhteensä viisi kappaletta. Raakkitukkien ajon jälkeen otettiin myös vertailun vuoksi kaksi hakenäytettä ensiharvennuspuun haketuksesta. Myös seulomon toimintaa tarkasteltiin ottamalla kolme purunäytettä seulotusta havupurusta ja kaksi hakenäytettä seulotusta, keittimeen johdettavasta hakevirrasta. Hakenäytteet analysoitiin Kaukaan hakelaboratoriossa standardin SCAN CM 40:01 mukaisesti. Lisäksi hakenäytteistä selvitettiin kuiva-ainepitoisuus sekä hakepalojen keskipituus ja -paksuus.

Koeajohetkellä ulkoilman lämpötila oli -7 °C. Kaukaan sellutehtaan kuorimoon verrattuna sulatuskuljettimen ja kuorimarummun täyttöaste oli hieman alhaisempi ja rummun kierrosnopeus myös hieman alhaisempi. Havupuiden kuorinta-aste oli melko hyvällä tasolla ja puiden katkeilua rummussa ei tapahtunut. Visuaalisesti hihnakuljettimelta tarkasteltuna vaikutti hakkeen laatu erittäin hyvältä; ylisuuria jakeita näytti olevan erittäin vähän ja purua ei silmännähdessä juuri ollut hakkeen joukossa. Myöskin terän ja vastaterän välistä kulkeutuneita pintapuun suikaleita oli hakevirrassa erittäin vähän.

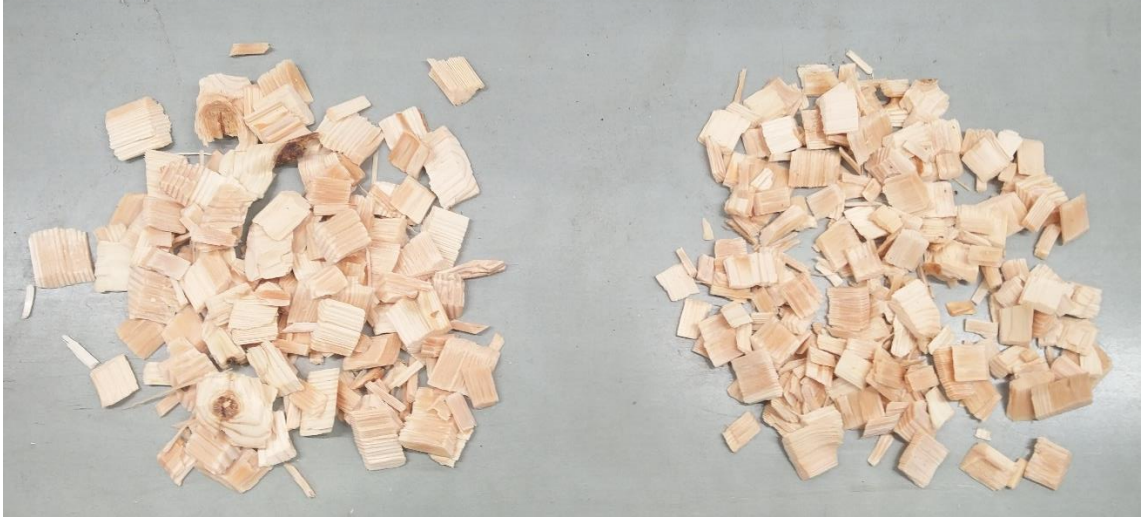
7.2 Koeajojen kulku Kaukaan sellutehtaalla

Koeajo suoritettiin siten, että hakettiin noin 250 m³ raakkitukkia Kaukaan havulinjalla. Viisi kappaletta hakenäytteitä otettiin pysäytetyltä hakevarastoon johtavalta hihnakuljettimelta. Hakenäytteiden palakokojakauma analysoitiin vastaavalla tavalla kuin verrokkitehtaan hakenäytteet, lisäksi mitattiin hakepalojen pituus ja paksuus yhteensä sadasta akseptihakepalasta per hakenäyte ja selvitettiin jokaisen hakenäytteen keskimääräinen kuiva-ainepitoisuus. Lisäksi eri päivänä hakettiin vertailun vuoksi noin 200 m³ ensiharvennuspuuta, josta otettiin neljä hakenäytettä pysäytetyltä hihnakuljettimelta, joista selvitettiin palakokojakauma ja kuiva-ainepitoisuus.

Raakkitukkien koeajohetkellä ulkoilman lämpötila oli tehdasmittauksen mukaan +1 °C. Puiden katkeilua kuorimarummussa ei tapahtunut ja kuorinta-aste vaikutti todella hyvältä. Hihnakuljettimelta tarkasteltuna hakkeen joukossa oli hieman ylisuuria hakepaloja, mutta hakevirta näytti silti melko tasalaatuiselta.

7.3 Tulokset

Hakenäytteiden tuloksista huomataan, että Kaukaalla raakkitukkien haketuksen lopputuloksena on hakevirran joukossa enemmän ylisuuria ja ylipaksuja hakepaloja kuin verrokkitehtaalla, purun ja pinnihakkeen määrä hakevirrassa oli verrokkitehtaalla suurempi. Kaukaan ja verrokkitehtaan havuhaketta on esitelty kuvassa 28. Myös ensiharvennuspuiden palakokojakauma noudatti samoja pääsääntöjä; Kaukaalla ylisuurten ja ylipaksujen hakepalojen osuus oli verrokkitehdasta suurempi, mutta purun ja pinnihakkeen määrä oli vähäisempi. Koeajojen tulokset löytyvät liitteestä 3.



Kuva 28: Vasemmalla Kaukaalla tuotettua havuhaketta, oikealla verrokkitehtaan havuhaketta.

7.4 Johtopäätökset

Hakenäytteiden tulokset eivät olleet odotetun kaltaisia; alkuperäinen oletus oli se, että Kaukaan hakenäytteen joukossa olisi enemmän hienoainesta kuin verrokkitehtaalla. Verrokkitehtaan hakun alhaisemman pyörimisnopeuden pitäisi johtaa suurempaan ylisuurten hakepalojen määrään ja alhaisempaan purun määrään, mutta tilanne oli täysin päinvastainen. Kaukaan havuhakun tuottama suurempi hakepituus ja koeajopäivän lämpimämpi keli selittävät osaltaan vähäisempää hienoaineksen määrää hakkeen joukossa.

Kuorintalinjan toiminta on silminnähden optimaalisemmalla tasolla verrokkitehtaalla, erilaisen kuorimarummun rakenteen ja mahdollisesti myös paremman sulatuksen ansiosta. Onnistunut kuorinta ja puiden vähäisempi katkeilu kuorintaprosessissa vaikuttaa positiivisesti haketustapahtuman onnistumiseen.

Verrokkitehtaan seulomoa tarkastellessa huomataan, että purun erottelussa hakevirrasta ei kulkeudu akseptihaketta hienoaineksen mukana, vaan eroteltu jae on pinnihaketta ja purua. Kaukaan sellutehtaaseen verrattuna eroteltu jae on siis hienojakoisempaa ja akseptihaketta ei menetä purun seulonnassa. Eroteltua purujatetta on esitelty kuvassa 29.



Kuva 29: Vasemmalla Kaukaan havulinjan puruseulalla eroteltua jaetta, oikealla verrokkitehtaan puruseulonnassa eroteltua jaetta.

Ylisuurten käsittelyn lopputulosta ei ollut verrokkitehtaalla mahdollista seurata näytteenottoaikan puuttuessa. Paksusseulan ylitteen määrä oli silmämääräisesti kuitenkin samalla tasolla, vaikka verrokkitehtaalla paksusseulan kiekkojen väli on merkittävästi kapeampi. Tästä voidaan päätellä, että kokonaishakevirrassa ylipaksuja jakeita on Kaukaan sellutehtaalla enemmän kuin verrokkitehtaalla. Tämä selittää verrokkitehtaan vähäisempiä rejektimääriä keitossa.

8 TULOKSET

Kaukaan sellutehtaalla puunkäsittelyosaston puuhäviön lähteinä ovat kuorimarummut, hakut ja seulomon purunerotuslaitteisto. Hakkeen laatu ja erityisesti hakevirran erilaiset ei-optimaaliset jakeet aiheuttavat myös puunkulutusta kasvattavia ilmiöitä kuitulinjan prosesseissa.

Sellutehtaan kuorimon hakenäytteiden seurannan perusteella on sekä havu- että koivulinjan hakkeen joukossa purun ja pinnihakkeen osuus merkittävän suuri. Havuhakun pyörimisnopeus on suuri, mikä johtaa suurempaan hienoaineksen muodostumiseen haketustapahtumassa. Koivuhakulla havaittiin suurnopeuskuvauksessa terägeometrian ongelmat haketustapahtumassa. Sekä havu- että koivuhakussa vastaterän vällys teräkiekon ulkokehällä on liian suuri, mikä laskee hakkeen laatua molemmilla linjoilla ja havuhakulla johtaa pitkien pintapuiden suikaleiden muodostumiseen. Koivuhakkuun hakeaukkoon on seulonnan ongelmien vuoksi asennettu kampalevyt, mitkä hieman murskaavat hakepaloja hakeaukossa. Kampalevyt ovat kuitenkin kasvattaneet purun ja pinnihakkeen määrää hakevirrassa.

Havulinjan seulomolla on tehty muutoksia hakepalojen paksuusseulontaan vuoden 2018 aikana kasvattamalla paksuusseulan kiekkoväliä hieman yli 50 %. Tämä on johtanut tilanteeseen, että keittämölle päätyy suuri määrä ylipaksuja hakepaloja käsittelemättömänä. Muutos on aiheuttanut rejektimäärien kasvua ja pakottanut keittämöä ajamaan alhaisemmalla keittokapalla lajittamon ongelmien takia. Keittokappatason lasku aiheuttaa arviolta lähes yhden prosenttiyksikön heikomman saannon keitossa ja vaikuttaa myös alentavasti lopputuotteen lujuusominaisuuksiin. Myös seulomon hakelitistäjän toiminta ei ole optimaalista; litistetyn hakkeen keitettävyyys ei ole koekeittojen perusteella akseptihakkeen tasolla vaan keittokappa jää huomattavasti korkeammalle tasolle. Paksuusseulan kiekkovälin kasvattamisen lisäksi myös hakelitistäjän toiminnalla on kasvattava vaikutus keiton rejektimääriin. Puruseulan akselit ovat loppupään osalta huonossa kunnossa; liian suuri vällys johtaa tilanteeseen, että erotellun purun joukossa on yli neljäsosa akseptihaketta ja pientä akseptihaketta.

Koeajossa Kaukaan sellutehtaan kuorimon ja verrokkitehtaan välillä havaittiin, että verrokkitehtaan kuitupuiden kuorinta on optimaalisemmalla tasolla. Kuorimarummussa puiden katkeilua tapahtuu vähemmän, mikä johtaa parempaan puuvirtaan hakulle ja edelleen parempaan hakkeen laatuun. Suoritetussa koeajossa haketettiin raakitukkia raaka-aineen parhaan mahdollisen vakioimisen takia, lisäksi pyrittiin poissulkemaan kuorintalinjaston vaikutus haketustapahtumaan, sillä raakitukit eivät katkeile kuorimarummussa puun suuresta halkaisijasta johtuen.

Koeajojen tulokset antavat ymmärtää, että Kaukaan havuhakku tuottaa melko optimaalista, laadukasta haketta. Purun ja pinnihakkeen alhaisempi määrä koeajopuiden haketuksessa verrokkitehtaaseen verrattuna on pitkän ajan hakenäytteseurantaan nähden ristiriitainen tilanne, jolle on vaikea kehittää yksiselitteistä syytä. Ensiharvennuspuun haketuksessa verrokkitehtaan hakkeen laatu oli parempi hienoaineksen määrän ollessa samalla tasolla, mutta ylisuurten ja ylipaksujen hakepalojen osuus oli vähäisempi. Sellunvalmistukseen käytetystä raaka-aineesta ensiharvennuspuun osuus on merkittävästi tukkia suurempi, joten verrokkitehtaan tuottama hake on suurimman osan ajasta parempilaatuista kuin Kaukaan sellutehtaalla.

Verrokkitehtaan seulomon toiminta on näytteiden perusteella huomattavasti optimaalisemmalla tasolla kuin Kaukaan sellutehtaalla. Havulinjan seulomolla erotellun purun joukossa ei ole haketta toisin kuin Kaukaan sellutehtaalla ja ylipaksujen hakepalojen seulonta ei mahdollista ylipaksujen hakepalojen päätymistä keittoon käsittelemättömänä.

8.1 Taloudellinen tarkastelu

Eri prosessivaiheiden puuhäviölle voidaan arvioida taloudellista merkitystä kuitupuun ja energijakeen hinnan, prosessin kustannusten ja mahdollisten tuotannonmenetysten avulla. Tässä osiossa arvioidaan puuhäviöisen taloudellista vaikutusta ainoastaan menetetyn puun hinnan, siitä maksettavan energijakeen hinnan sekä prosessin käyttökustannuksien pohjalta. Laskennassa ei arvioida mahdollisten tuotannonmenetysten, kuitulinjan kemikaalien kulutuksen tai lopputuotteen myyntikatteen vaikutuksia. Taloudellisia vaikutuksia on esitelty tarkemmin liitteessä 4. Liitteessä on tarkasteltu koivuhakkuinvestoinnin,

havuhakkuuinvestoinnin ja havuhakkuun asennettavan pyörimisnopeussäädön säästöä raaka-ainekustannuksissa sekä takaisinmaksuaikoja.

Laskennassa on arvioitu kuitupuun porttihinnaksi ja sellutehtaan puunkäsittelyn käyttökustannuksiksi yhteensä 45 €/k-m³, josta kuitupuun hinnaksi korjuukustannuksineen on arvioitu 30 €/k-m³ ja kuljetuksen ja sellutehtaan puunkäsittelyn käyttökustannuksiksi yhteensä 15 €/k-m³ (Strandström, 2018). Olettaen, että kuorinnassa ja hakkeen seulonnassa erotellun jakeen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa on noin 8 MJ/kg (Hilli & Putula, 2017), tiheys 850 kg/k-m³ ja polttojakeen hinta olisi noin 15 €/MWh, saadaan erotellulle jakeelle arvioitua hinnaksi noin 28 €/k-m³. Kuorinnan puuhäviön taloudellista vaikutusta voitaisiin arvioida melko suoraviivaisesti kuitupuun porttihinnan ja polttojakeen arvon perusteella, mutta tässä työssä arvioidaan haketuksen, seulonnan puuhäviöiden ja ei-optimaalisten jakeiden jatkokäsittelyn taloudellista merkitystä sellun tuotannossa.

Haketuksen taloudellista merkitystä voidaan arvioida hakun tuottaman purun ja pinnihakkeen määrän mukaan. Kehityspotentiaalia voidaan arvioida hienoaineen määrän laskulla niin, että ylisuurten ja ylipaksujen hakepalojen määrä pysyy samalla tasolla. Muutosehdotuksina tässä työssä arvioidaan uuden hakun investoinnin hyötynä sillä oletuksella, että purun ja pinnan määrä vähenisi merkittävästi. Vastaavasti kuorimon havuhakulle voidaan arvioida nykyiseen laitteistoon lisätyn pyörimisnopeussäädön vaikutusta eri vuodenaikojen haketuserojen tasoittamiseen.

Purun ja pinnihakkeen päätymiselle keittämölle voidaan arvioida puuhäviötä alhaisemman saantoprosentin avulla. Ylisuurten ja ylipaksujen hakepalojen päätymiselle keittämölle voidaan arvioida puuhäviötä sillä oletuksella, että se pakottaa ajamaan keittämöä alhaisemmalla keittokapalla, mikä johtaa alhaisempaan saantoon. Ylisuurten ja ylipaksujen hakepalojen päätyminen keittämölle aiheuttaa keittämölle kapasiteettirajoitusta suurempien rejektimäärien johdosta, minkä mahdollista taloudellista vaikutusta ei tässä työssä arvioida.

Erotellun purun käyttäminen purusellun valmistukseen on taloudellisesti järkevää, sillä purusellusta saatava hinta on parempi kuin polttojakeesta maksettava hinta. Kokonaistarkastelussa olisi huomioitava mahdollisen purun määrän vähentämisen vaikutus purun riittävyteen purusellun valmistuksessa. Mikäli ulkopuolelta ostettavan purun hinta noudattelee bioenergian markkinahintaa, on mahdollisessa purupulassa taloudellisesti

järkevää ostaa purua ulkopuolisilta toimittajilta. Tämän työn taloudellisessa tarkastelussa oletetaan kuitenkin kaiken seulonnessa eroteltavan purun päätyvän polttotarkoitukseen.

Pyörimisnopeussäädön arvioinnissa hakenäytteiden seurannan (kuvat 18 ja 19) perusteella voidaan määrittää tavoitetaso hienoaineksen määrälle hakkeen joukossa ja säätää hienoaineksen ja ylisuurten jakeiden suhdetta hakun pyörimisnopeuden avulla. Puunsäästöpotentiaali määräytyy vähenevän hienoaineksen määrän mukaan edellä mainittujen tekijöiden perusteella. Laskelmien perusteella nykyiseen havuhakkuun asennettavalla pyörimisnopeussäädöllä voitaisiin vähentää vuotuista puun kulutusta yli 2 %. Tämä tarkoittaisi noin 340 000 € säästöä jokaista haketettua miljoonaa kiintokuutiota kohden aiemmin mainituilla puun ja polttojakeen hinnoilla. Kuten aiemmin mainittu, laskennassa oletetaan, että seulonnessa eroteltu puru päätyy energiajakeeksi ja ylisuurten hakepalojen määrän vaihtelun ei oleteta aiheuttavan muutosta kuitulinjalla. Koivuhakulle ei arvioitu pyörimisnopeussäädön taloudellista vaikutusta, sillä hakun purkaustapa ei mahdollista alhaista pyörimisnopeutta.

Uuden hakun oletettaisiin sekä koivu- että havulinjalla vähentävän merkittävästi purun ja pinnihakkeen määrää hakkeen joukossa ylisuurten jakeiden määrän pysyessä samalla tasolla. Taloudellista merkitystä voidaan laskea samoin periaattein kuin pyörimisnopeussäädölle, mutta uuden tekniikan myötä kierrosnopeuden säädön sijaan tarkastellaan koko vuoden hakeotantaa ja oletetaan hienoaineksen määrän pysyvän jatkuvasti alhaisemmalla tasolla. Uudessa hakussa kunnossapitokustannukset ovat oletettavasti alhaisemmalla tasolla kuin käytetyssä hakussa, mutta tätä seikkaa ei huomioida laskennassa.

Havulinjan seulonnessa oletuksena on, että paksuusseulan kiekkovälin kasvattaminen ja hakelitistäjän ei-optimaalinen toiminta on pakottanut keittämöä ajamaan alhaisemmalla keittokapalla. Tämän taloudellinen vaikutus puunkulutusmielessä voidaan arvioida keiton saannon laskulla. Prosenttiyksikön lasku keiton saannossa alhaisemmasta kappaluvusta johtuen aiheuttaa vuotuisen puunkulutukseen yli kahden prosentin lisäyksen johtaen huomattavasti korkeampiin raaka-ainekustannuksiin.

Havulinjan puruseulan läpi päätyy purusiilon huomattava määrä pientä akseptia ja akseptihaketta. Määräksi voidaan arvioida noin 7600 kiintokuutiota jokaista keittämölle johdettavaa miljoonaa kiintokuutiota kohden. Puruseulan taloudellinen rasite raaka-

ainekustannuksissa on näin ollen noin 130 000 € miljoonaa kiintokuutiota kohti. Takaisinmaksuaika puruseulan kunnostukselle jää hyvin lyhyeksi.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kaukaan sellupuun kuorimon hakkujen ongelmaksi havaittiin vastaterän välyksen ero ulko- ja sisäkehällä. Koivuhakun terägeometrian ongelmat havaittiin haketustapahtuman suurnopeuskuvauksessa. Hakenäytteiden seurannan perusteella sekä koivu- että havuhakku tuottaa suuren määrän purua ja pinnihaketta, mikä osaltaan johtaa suurempaan puunkulutukseen sulfaattisellun valmistuksessa. Hakkujen suuri pyörimisnopeus johtaa vastaterä- ja terägeometrian ongelmien ohella suuren purun määrään.

Nykyiseen havuhakkuun asennettavalla pyörimisnopeussäädöllä päästäisiin hallitsemaan haketusnopeutta ja näin ollen säätelemään hienoaineksen ja ylisuurten hakepalojen suhdetta haketustapahtumassa vuodenajan ja erilaisen puun laadun mukaan. Takaisinmaksuaika pyörimisnopeussäädölle jäisi haketettavasta puumäärästä riippuen melko vähäiseksi. Koivuhakun osalta pyörimisnopeussäädön käyttöönottoa rajoittaa hakun purkaustyypin, mikä itsessään vaatii tietyn vähimmäisnopeuden tukosten välttämiseksi hakun purkauksessa.

Vaihtoehtoisesti uusien hakkujen hankinta vaatisi merkittävästi pidemmän seisokkiajan ja suuremman rahallisen panostuksen, mutta suurempi hyöty saavutetaan purun ja pinnihakkeen merkittävästi vähäisempänä määränä ylisuurten hakepalojen määrän säilyessä vähäisenä. Myös kunnossapitokustannukset uudessa hakussa ovat vähäisemmät. Hakkujen vastaterien kuntoon ja välykseen olisi kiinnitettävä säännöllistä tarkkailua hakkeen laadun säilyttämiseksi. Nykyisten hakkujen teräjärjestelmän muutosta tulisi harkita etenkin koivuhakun osalta hakun geometrian optimoimiseksi.

Havulinjan seulomolla paksusseulan kiekkovälin kasvattaminen on vaikuttanut keittämön rejektimäärien kasvuun ja pakottanut keittämön ajamaan alhaisemmalla keittokapalla lajittamon ongelmien takia. Paksusseulan kiekkovälin palauttaminen alkupeäiselle tasolle parantaisi seulontatulosta, toki seulontakapasiteetin lasku erityisesti paksusseulan jälkeisen sulkusyöttäjän ja hakepuristimen osalta on uhkakuvana. Hakun tuottaman hakkeen ja ostohakkeen laadun parantuminen vähentäisi ylisuurten käsittelyn kuormitusta, mikä mahdollistaisi kiekkovälin kaventamisen. Hakepuristimen toiminnan kannalta olisi tärkeä vaihtaa hakepuristimen pyramidikuvioituja segmenttejä riittävän tiheällä vaihtovälillä. Myös

puristimen korvaaminen tikkuhakulla tai hakemurskaimella tulisi ottaa harkintaan, mikäli hakepuristimen toiminta ei hyvästä mekaanisesta kunnosta huolimatta ole optimaalista.

Havulinjan pururullaston toiminnan kannalta tärkeintä on vaihtaa kuluneita pururullia uusiin riittävän tiheällä vaihtovälillä puuhäviöiden minimoimiseksi ja purun laadun turvaamiseksi. Purunerotuksen tehokkuutta parantaisi toisen pururuuvien siirto lähemmäksi purukolakuljettimen vetopäätä, jolloin rullastolla erotellusta purusta suurempi osuus päätyisi purusiilon eikä hakkeen joukossa keittämölle.

Koivuhakkeen tasoseulonnassa ongelmaksi muodostuu ylin taso, mikä tukkeutuu ylisuurista hakepaloista aiheuttaen suuren hakemäärän kulkeutumista tikkuhakulle. Tasoseulan ylitteen haketuksessa syntyy purua ja pinnihaketta, mikä johtaa koivulinjan puuhäviöiden kasvamiseen. Tasoseulan ylimmän, halkaisijaltaan 55 mm reikälevyn läpi päätyy ylipaksuja hakepaloja käsittelemättömänä keittoon, mikä osaltaan lisää keiton rejektimäärää. Tasoseulan erotteleman purun laatu pysyy tasaisena, mikäli seulalevyissä ei ole repeämiä. Koivuhakkeen seulontaan olisi syytä harkita paksuusseulontalaitteistoa, mikä tehostaisi ylipaksujen hakepalojen erottelukykyä eikä aiheuttaisi tukoksia tasoseulonnan reikälevyihin.

Molempien kuorintalinjastojen toiminnan optimointia olisi hyvä suorittaa, sillä verrokkitehtaan kuorimolla hakkuun syötettävien puiden keskipituus vaikutti visuaalisesti tarkasteltuna merkittävästi pidemmältä. Puiden vähäisempi katkeilu johtaa parempaan hakkeen laatuun, vähentää haketuksessa syntyviä äärijakeiden määrää ja johtaa vähäisempiin puuhäviöihin rumpukuorinnassa.

10 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä tarkasteltiin Kaukaan sellutehtaan kuorimon ja seulomon toimintaa ja pyrittiin selvittämään puunkulutusta vähentäviä ratkaisuja haketukseen ja seulontaan. Työn teoriaosuudessa selvitettiin puuraaka-aineen ominaisuuksia ja niiden mahdollisia vaikutuksia haketukseen ja edelleen sellunvalmistusprosessiin ja lopputuotteen laatuun. Tämän jälkeen tarkasteltiin puunkäsittelyn prosessia ja erilaisten puunkäsittelyn avainlaitteiden toimintaperiaatetta teoreettisella pohjalla ja Kaukaan sellutehtaalla. Työn kokeellisessa osuudessa tarkasteltiin sekä koivu- että havulinjan haketus- ja seulontaprosessia erilaisissa koeajotilanteissa. Ensisijainen tutkimusmuoto oli hakenäytteiden palakokojakauman selvittäminen koeajotilanteissa ja pitkän ajan seurantana, mutta myös keittokokeita ja laboratorioanalyysyjä käytettiin työn kokeellisen osuuden tukena. Lopuksi selvitettiin haketuksen ja seulonnan mahdollisten muutosten taloudellista merkitystä.

Mahdollisimman laadukkaan hakkeen muodostukseen on puuraaka-aineen oltava haketusprosessia varten mahdollisimman tuoretta ja puuraaka-aineen vikoja ei saisi esiintyä. Riittävän suuri latvaläpimitta takaa parhaan hakkeen laadun. Hakkeen joukossa tulisi olla mahdollisimman vähän sekä ylisuuria ja ylipaksuja hakepaloja että purua ja pinnihaketta. Ylisuuret ja ylipaksut hakepalat kuormittavat seulontaprosessia ja keittoon päätyessään ne aiheuttavat keiton rejektimäärien kasvua. Purun ja pinnihakkeen saanto on akseptihaketta heikompi, keittokemikaalien kulutus on suurempaa ja vaikutus lopputuotteen lujuusominaisuuksiin on negatiivinen. Haketusprosessissa pyritään mahdollisimman vähäiseen purun ja pinnihakkeen muodostumiseen, sillä ylisuurten ja ylipaksujen jatkokäsittelyllä on mahdollista tuottaa keittoon kelpaavaa raaka-ainetta. Seulomon toiminnassa on tärkeää erotella hakkeen joukosta mahdollisimman paljon purua ja pinnihaketta sekä seuloa ja käsitellä ylisuuret ja ylipaksut hakepalat niin, että niiden keitettävyyden olisi akseptihakkeen tasolla.

Kaukaan koivu- ja havulinjan haketusprosessissa ongelmana on purun ja pinnihakkeen suuri määrä, mikä johtaa seulonnassa ja keitossa suuren puuhäviöön. Havuhakun kierrosnopeus on suuri, mikä osaltaan johtaa suureen purun määrään erityisesti talvella. Koivuhakun

purkaustapa johtaa itsessään suurempaan hienoaineksen määrän muodostumiseen haketustapahtumassa, lisäksi ongelmat haketuksen geometriassa laskevat hakkeen laatua. Havulinjan seulonnassa suuri paksuusseulan kiekkoväli ja litistäjän toiminnan ongelmat aiheuttavat keiton rejektimäärien kasvua, mikä pakottaa keittämöä ajamaan alhaisella keittokappatasolla. Tämä johtaa alhaisempaan saantoon keitossa ja näin ollen suurempaan puunkulutukseen havusellutonna kohden. Havulinjan puruseulan akselien huono kunto johtaa hakepalojen päätymiseen purun joukkoon, mikä johtaa puuhäviöön seulonnassa. Hakkujen vastaterän, havulinjan hakelitistäjän ja puruseulan mekaanisen kunnan merkitykseen on jatkossa kiinnitettävä huomiota. Hakkujen uusiminen kokonaisuudessaan tai vaihtoehtoisesti pyörimisnopeussäädön asentaminen vähentäisi purun ja pinnihakkeen muodostumista haketustapahtumassa.

Tässä työssä ei tutkittu kuorinnan vaikutusta haketustapahtumaan ja puuhäviöihin. Koeajotilanteissa oli havaittavissa puuraaka-aineen katkeilua kuorimarummussa, mikä vaikuttaa oleellisesti hakkeen muodostumiseen. Jatkotutkimuksen aiheena voisi kuorinnan optimointia tarkastella katkeilemisen minimoimiseksi kuorimarummun täyttöasteen säädön ja pyörimisnopeussäädön avulla ja tutkia muutosten vaikutusta hakkeen laatuun ja kuorinnan puuhäviöihin. Mahdollisen haketuksen pyörimisnopeussäädön asennuksen myötä voisi selvittää hakun optimaalisen pyörimisnopeuden vuodenajan ja puun dimensioiden mukaan.

11 LÄHDELUETTELO

- Adent, A. & Engnell, M., 2008. *Hakkuriterä, kokoonpano ja sen asennusmenetelmä*. Suomi, Patenttinro FI 127006 B.
- Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. 2016. *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia*. [verkkojulkaisu] [viitattu 20.09.2018] Saatavilla: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>
- Bajpai, P. 2010. *Environmentally Friendly Production of Pulp and Paper*. Hoboken: Wiley.
- Brännvall, E. 2009. *Wood Handling*. Teoksessa: Ek, M; Gellerstedt, G; Henriksson, G (toim). *Pulping Chemistry and Technology*. Berliini: De Gruyter.
- Gullichsen, J. 2000. *Fiber line operations*. Teoksessa: Gullichsen, J & Fogelholm, C-J (toim). *Chemical Pulping*. Helsinki: Fapet.
- Hart, P. & Connell, D. 2016. *The effect of digester kappa number on the bleachability and yield of EMCC softwood pulp*. [verkkojulkaisu] [viitattu 06.02.2019] Saatavilla: <https://www.researchgate.net/publication/298984735>
- Hilli, A. & Putula, J. 2017. *Hakkeen laatuun vaikuttavat tekijät*. [verkkosivu] [viitattu 08.02.2019] Saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/134175/ePooki%2030_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Honkanen, T. 2013. *Kiekkohakkuri säädettävällä terällä*. Suomi, Patenttinro FI 124978 B.
- Häyrynen, M. 2018. Uittomäärät yllättäen kasvussa. *Metsälehti*, 25 Kesäkuu.
- Jahkonen, M., Laurén, A., Lindblad, J. & Sirkiä, S. 2012. *Energiapuun kosteuden ennustaminen*. [verkkojulkaisu] [viitattu 20.09.2018] Saatavilla: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp241.pdf>
- Jääskeläinen, A.-S. & Sundqvist, H. 2007. *Puun rakenne ja kemia*. Helsinki: Otatieto.
- Kellomäki, S. 1998. *Forest Resources and Sustainable Management*. Helsinki: Fapet.

Knowpulp. [verkkosivu] [viitattu 27.04.2019] Saatavilla: <http://www.knowpulp.com/>

Koskinen, K. 2000. *Wood handling applications. Teoksessa: Gullichsen, J & Fogelholm, C-J (toim). Chemical Pulping.* Helsinki: Fapet.

Kärkkäinen, M. 2007. *Puun rakenne ja ominaisuudet.* Hämeenlinna: Metsäkustannus.

Mäkelä, M. & Achren, S. 2003. *Sellupuun laadun säilyttäminen.* Helsinki: Metsäteho.

Niiranen, M., 1985. *Tutkimus kuorimarummun prosessiteknisestä mitoituksesta.* Espoo: Veitsiluoto.

Partanen, S. 2017. *Kuorinnan ja puuraaka-aineen muutosten vaikutus polttojakeen ominaisuuksiin.* [verkkajulkaisu] [viitattu 05.02.2019] Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201704186179>

Pohjolan Voima, 2009. *Kaukaan Voiman voimalaitos.* [verkkajulkaisu] [viitattu 12.10.2018] Saatavilla: https://www.pohjolanvoima.fi/filebank/251-22563-Kaukaan_biovoimalaitos.pdf

Sepsilva, 1997. *Puunkäsittely: Puusta paperiin M-210. 2.* Muunnettu painos toim. Hamina: s.n.

Smith, D. 1999. *Chipping. Teoksessa: Chip Preparation and Quality.* Atlanta: Tappi.

Strandström, M. 2018. *Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2017.* [verkkajulkaisu] [viitattu 12.02.2019] Saatavilla: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2018_08a_Puunkorjuu_ja_kaukokuljetus_vuonna_2017.pdf

UPM Internal, 2002. *UPM konsernin sisäinen tutkimusaineisto.* Ei julkisesti saatavilla.

UPM Internal, 2015a. *UPM konsernin sisäinen tutkimusaineisto.* Ei julkisesti saatavilla.

UPM Internal, 2015b. *UPM konsernin sisäinen tutkimusaineisto.* Ei julkisesti saatavilla.

Valmet, 2018. *Valmet Easy Drive.* [verkkajulkaisu] [viitattu 08.02.2019] Saatavilla: <https://valmetsites.secure.force.com/solutionfinderweb/FilePreview?id=06958000000bPdyAAE>