



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**Jatkuvatoimisen sellunkeiton hallinta  
KnowPulp-simulaattorilla**

Alexi Kanste

Prosessitekniikka

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Jatkuvatoimisen sellunkeiton hallinta KnowPulp-simulaattorilla

Tekijä: Aleksi Kanste

Oulun yliopisto, prosessitekniikka

Kandidaatintyö

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Aki Sorsa, Ari Isokangas

Tässä työssä perehdytään sellun valmistukseen ja tarkemmin keittovaiheeseen. Tavoitteena on tutkia, mitkä tekijät keittovaiheessa vaikuttavat kappatason muutokseen ja lajin vaihtoon sellunkeitossa. Aihetta käsitellään kirjallisuuden ja KnowPulp-simulaattorin avulla. Tärkeimpinä tuloksina yritetään saada selville, minkälaisilla ajoarvoilla saadaan hyvät tulokset kummastakin yllä mainitusta ajotilanteesta simulaattoriympäristössä. Simuloinneista saadaan käsitys siitä, kuinka keittoa voidaan hallita ja kuinka paljon ja nopeasti eri keittoarvojen muutokset vaikuttavat keiton tuloksiin. Keittoa ohjattaessa tärkeimmät parametrit ovat lämpötila ja kemikaalien kulutus. Näitä parametreja voidaan säätää koko keiton ajan ja pelkästään niillä voidaan päästä melko lähelle hyviä keittotuloksia.

*Asiasanat: Ohjattavuus, sellunkeitin, jatkuvatoiminen, Kamyra, hallinta*

# SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto .....	1
2 Sellun valmistus .....	2
2.1 Puunkäsittely .....	3
2.2 Esihöyrytys ja pasutus.....	4
2.3 Hakkeen annostelu ja syöttö.....	5
2.4 Imeytys.....	6
2.5 Keitto .....	8
2.6 Pesu .....	11
2.7 Pusku.....	12
3 Keittimen mallinnus ja simulointi .....	15
3.1 Tutkimuksen suorittaminen .....	15
3.2 Keittimen malli.....	16
3.3 Kappatason muutoksen simulointi ja hallinta.....	18
3.4 Lajinvaihdon simulointi ja hallinta.....	20
4 Johtopäätökset .....	23
5 Yhteenveto .....	24
6 Lähdeluettelo.....	25

# 1 JOHDANTO

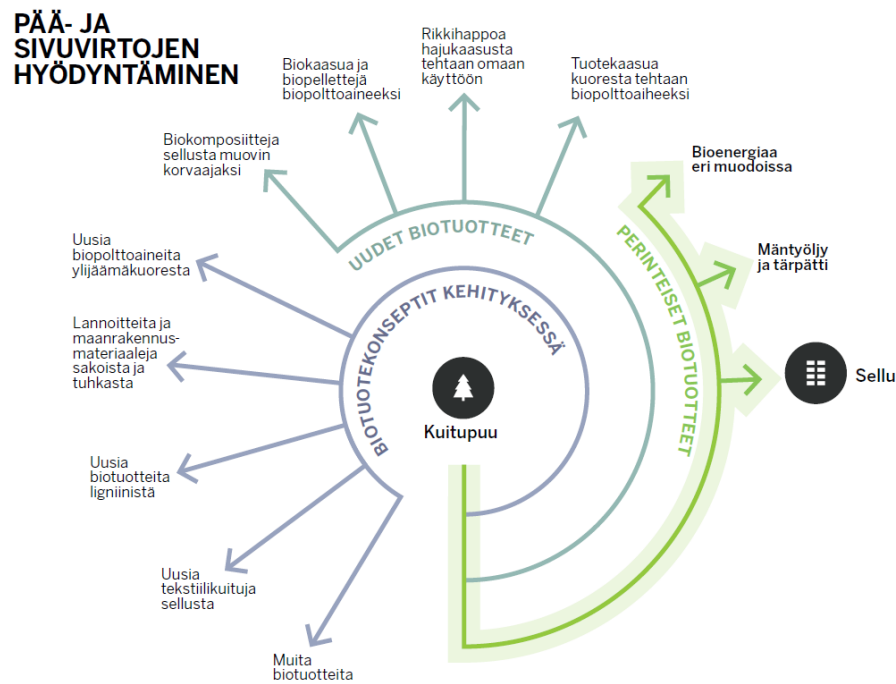
Tässä työssä käsitellään jatkuvatoimista sellunkeitintä ja sen hallintaa. Työn teoriaosassa käsitellään jatkuvatoimisen keittimen rakennetta sekä sen osia. Kokeellisessa osuudessa tutkitaan jatkuvatoimista keittoa KnowPulp-simulaattorilla tilanteissa, joissa tapahtuu lajin vaihto ja kappatason muutos. Työ rajataan jatkuvatoimisen keittimen tutkimiseen ja tavoitteena on saada hyvät tulokset simuloinneista ja sitä kautta oppia keiton käyttäytymistä. Tutkimusongelmaa, eli keiton käyttäytymistä lähdetään ratkaisemaan ensin tutkimalla keiton muuttujia ja kuinka ne vaikuttavat keiton mittausarvoihin. Muuttujista selvitetään mitä arvoja voidaan pitää vakiona tai lähes vakiona, jolloin saadaan minimoitua muutettavien suureiden määrä ja vähennettyä virheitä. Työn aihe on valikoitunut monen asian summana. Suurimpia tekijöitä ovat omat prosessitekniikan opinnot, aikaisempi kesätyökokemus sellu- ja paperitehtaalla, sekä oma kiinnostus aiheeseen. Aiheesta on tehty aikaisempiakin tutkimuksia erilaisissa tilanteissa, mutta ei KnowPulp-simulaattorin avulla. Tämäkin on yksi syy, miksi nyt perehdytään KnowPulpin simulaattoriin.

## 2 SELLUN VALMISTUS

Nykyään sellua voidaan tuottaa osana biotuotetehtaita. Biotuotetehtas on suuri kokonaisuus, joka käsittää erilaisia biotuotelaitoksia. Biotuotetehtas perustuu paljon siihen kuuluvan sellutehtaan toimintaan. Sellutehtas käyttää raaka-aineena puuta, jonka jalostamisessa syntyy pääasiassa sellua ja muita sivuvirtoja. Biotuotetehtaaseen liitetyt biotuotelaitokset voivat hyödyntää kyseisiä sivuvirtoja. Näin ollen biotuotelaitokset auttavat myös jätteiden vähentämisessä ja biomassasta saadaan arvokkaampaa. (Ranne, 2015, s 4)

Perinteiseen sellutehtaaseen verrattuna biotuotetehtas pyrkii hyödyntämään tehokkaammin sellunkeitosta syntyviä sivuvirtoja (Ranne, 2015, s 3). Biotuotetehtas ei eroa juurikaan sellutehtaasta, jos siihen lasketaan sellutehtaan ympärillä olevat muut laitokset, jotka hyödyntävät sellutehtaan sivuvirtoja (Ranne, 2015, s 3). Suurimpana erona biotuotetehtaalla verrattuna sellutehtaaseen sekä sen ympäristössä oleviin laitoksiin ovat uudet biotuotekonseptit, joista osa on vasta kehitteillä (Metsä Fibre, 2018).

Biotuotetehtaan tuotteita ovat erilaiset sellut, biokemikaalit sekä bioenergiatuotteet (Ranne, 2015, s 13). Sellulaadut vaihtelevat pääasiassa havusellun ja koivusellun välillä. Biokemikaaleista tuotteena ovat mäntyöljy ja tärpähti. Bioenergiaa tuotetaan muun muassa höyryn, sähkön, lämmön ja biopolttoaineiden muodossa. Kuvassa 1 näkyy edellä mainittuja biotuotetehtaan sivuvirtoja, tuotteita ja kehityksen alla olevia kohteita.



Kuva 1. Biotuotetehtaan sivutuotteet (Metsä Fibre)

## 2.1 Puunkäsittely

Biotuotetehtaan kuitulinja kattaa sellun valmistuksessa käytettävät osaprosessit. Sellun valmistus alkaa puunkäsittelyllä kuitulinjan alkupäässä. Tätä seuraa keittovaihe, jossa puun kuituja ja muita aineita erotellaan. Keitetty massa pestään ja lajitellaan. Lajittelusta saatu sellu voidaan valkaista, jolloin saadaan valkaistua sellua. Tämä kuivataan ja kuljetetaan varastoon odottamaan lähtöä asiakkaalle. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja)

Biotuotetehtaan kuitulinjan alkupäässä on kuorimo, jonka puukentälle saapuva puutavara tuodaan ja varastoidaan. Puutavara tuodaan pääsääntöisesti autolla tai junalla, mutta joissain tapauksissa myös laivalla. Junalla ja laivalla tuotaessa saapuvan puun määrä on hetkellisesti niin suuri, että sitä joudutaan varastoimaan. Puuta pyritään varastoimaan niin, että prosessiin saadaan syötettyä mahdollisimman tuoretta puuta, koska varastointi heikentää puun laatua. Puun käsittely alkaa kuorinnalla. Talvisaikaan kuori täytyy kuitenkin sulattaa ennen kuorintaa esimerkiksi vedellä. Kuorinnan tarkoituksena on poistaa puusta lähes kaikki kuori. Jos kuorta jää, se alentaa saatavan massa vaaleutta ja lujuuksia. Tämä jälkeen puu haketetaan. Hakettamisen tarkoituksena on tuottaa

tasalaatuista ja hyvää haketta. Lopuksi hake seulotaan tasalaatuisuuden parantamiseksi ja varastoidaan keittoa varten. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja)

## 2.2 Esihöyrytys ja pasutus

Kun haketta syötetään keittoprosessiin, täytyy parantaa ominaisuuksia, jotka helpottavat keittokemikaalien sekoittumista hakkeeseen. Toisin sanoen hake pasutetaan eli höyrykäsittelään. Pasutus tarkoittaa ilman poistoa hakkeesta. Yleensä pasutus suoritetaan hieman ilmanpainetta kovemmassa paineessa ja korkeassa lämpötilassa, sekä se kestää muutamasta minuutista lähes puoleen tuntiin. Nämä olosuhteet aiheuttavat hakkeessa olevan ilman lämpenemisen ja laajenemisen, jotka johtavat ilman poistumiseen hakkeesta. Pasutuksen onnistuminen on tärkeää, sillä se vaikuttaa suoraan hakkeen ominaispainoon, keittonesteiden imeytymiseen ja keittotuloksen tasaisuuteen. Jos pasutus epäonnistuu tai on muuten puutteellinen, voi imeytymisessä tai keittimessä tapahtua hakkeen kelluntaa. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > esihöyrytys)

Pasutus voidaan suorittaa muutamassa eri kohdassa prosessia. Kaikissa kohdissa voidaan päästä samoihin lopputuloksiin, mutta osassa voidaan joutua rakentamaan erillisiä prosessitiloja. Yleensä pasutus suoritetaan hakesiilossa tai sen jälkeisellä kuljettimella. Erityisesti joissain uusissa keittimissä pasutus on toteutettu hakesiilossa. Kyseinen hakesiilo on kuitenkin eri asia, kuin valtavat jopa 1000 m<sup>3</sup> hakkeen varastointisiilot. Tämän takia ei tarvita erillistä pasutusastiaa ja prosessin rakenne yksinkertaistuu. Hake kulkee siilon läpi tulppavirtauksena, jossa sitä lämmitetään. Hakkeen lämmittämisessä noin 90-100 °C käytetään matalapainehöyryä tai mustalipeän paisuntahöyryä. Hakkeen viiveaika on noin 15-25 minuuttia hakesiilossa. Hakkeesta haihtunutta kaasua poistetaan ja kuljetetaan käsiteltäväksi ilma- ja tärpättikaasujen poistamiseksi. Tästä hake kuljetetaan eteenpäin hakemittarille. Hakemittarilta hake kulkeutuu suoraan hakeputkeen. Hakeputkessa se sekoittuu valkolipeän kanssa, josta se pumpataan korkeapainekiikille. Korkeapainekiikin voi ajatella eräänlaisena pumppuna, joka pyöriessään ottaa sisään hake-lipeäseosta ja paineistaa sen samalla siirtämällä keittimen syöttöputkeen. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > esihöyrytys)

Pasutus voi myös tapahtua erillisessä astiassa. Erillisiä pasutusastioita voidaan huomata Kamyri-keittimien ja niiden nykyaikaisissa muunnoksissa. Tässä tapauksessa hake siirtyy siilosta matalapaineikiikille, jossa paine nostetaan normaalista ilmanpaineesta noin 1,5 bar:in. Tästä hake siirtyy suoraan pasutusastiaan, jossa hake kuljetetaan astian päästä päähän. Viipymäaika hakkeella astiassa on noin 2 minuuttia ja tässä ajassa haketta lämmitetään myös samaan noin 90-100 °C lämpötilaan. Tästä hake jatkaa matkaa korkeapaineikiikille ja se paineistetaan samaan paineeseen, kuin keitin. Tässäkin mallissa hakkeesta poistetaan höyryä, joka sisältää muun muassa tärpättikaasua, joka pitää puhdistaa. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > esihöyrytys)

### **2.3 Hakkeen annostelu ja syöttö**

Hakkeen syötöllä on tarkoituksena mitata hakevirtaa ja kuljettaa haketta pasutusastiasta eteenpäin keittimen huipulle tai imeytysastiaan. Hakkeen syöttö voidaan toteuttaa esimerkiksi Turbofeed- tai Lo-Level-hakkeensyötöllä. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Hakkeen annostelu ja syöttö)

Turbofeed-syöttöjärjestelmässä pasutettu hake valutetaan hakesiilosta hakemittarille. Hakemittarina toimii pyörivä kaksoisruuvi. Hakemittaria voidaan käyttää prosessin ohjaamiseen. Sen mukaan voidaan määrittää muun muassa tuotantonopeus. Lisäksi tuotantonopeus ja hakkeen määrä vaikuttavat myös kemikaalien käyttöön. Hakemittarin jälkeen systeemissä on hakeputki, jossa hakkeeseen sekoitetaan lipeä. Tämä on se osa prosessia, jossa imeytysreaktiot alkavat. Hakeputkesta hakkeen ja lipeän seos pumpataan hakepumpuilla imeytystornin tai keittimen huippuun. Hakepumpuja voidaan laittaa peräkkäin, jolloin taataan tarpeeksi kova paine, jossa hake voidaan pumpata suoraan imeytystornin tai keittimen huipulle. Hakkeeseen tulee sekoittaa runsaasti lipeää, jotta pumppaus onnistuu ja seos ei ole liian paksua. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Hakkeen annostelu ja syöttö)

Lo-Level-hakkeensyöttösystemillä, pasutettu hake kulkeutuu myös hakemittarin kautta. Tässä tapauksessa hakemittari on lokeromittari, joka kuljettaa haketta tietyn verran jokaisella kierroksella. Tällä tyyppillä ei varsinaisesti voida säädellä tuotantovauhtia mutta sitä voidaan mitata ja tästä päätellä muita keiton arvoja. Hakemittarilta hake kulkeutuu



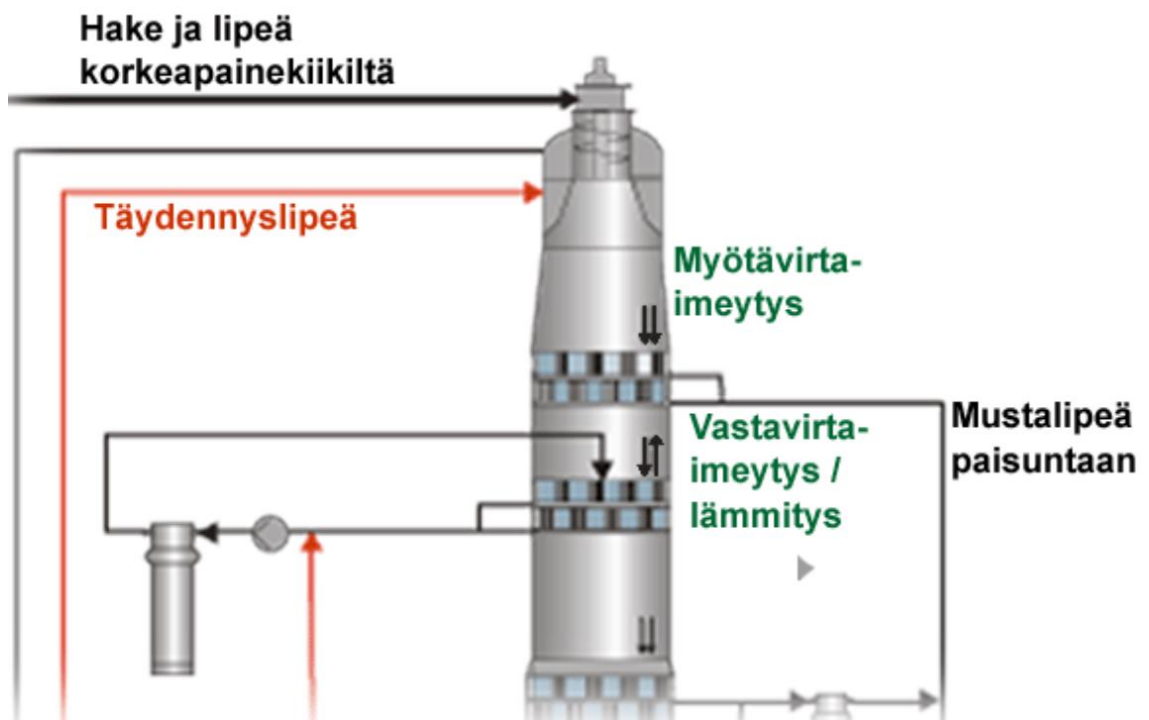
hakeputkeen ja siitä edelleen pumpun kautta korkeapaineikiikkiin. Korkeapaineikiikissä hakkeen ja lipeän seos korotetaan noin 10-15 bar paineeseen, joka on sopiva keittoon syötettävällä seokselle. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Hakkeen annostelu ja syöttö)

## 2.4 Imeytys

Imeytysvaiheessa on tarkoituksena saada kyllästettyä hake keittokemikaaleilla. Kyllästämisen on onnistuttava niin, että hake on läpikotaisin kyllästetty ennen kuin keittoreaktiot alkavat. Imeytykselle suotavat olosuhteet ovat noin 10-15 bar paineessa ja 100-135 °C lämpötilassa. Nämä olosuhteet ovat kutakuinkin samat kuin itse keittimessä. Paine vaikuttaa huomattavimmin solujen rakenteeseen venyttäen niitä. Näin ollen keittokemikaalit vaikuttavat paremmin ja mahdolliset ilmajäämät hakkeessa puristuvat kokoon. Lämpötila vaikuttaa imeytyksen nopeuteen, koska se pienentää keittolipeän viskositeettia. Toisaalta, jos lämpötila kasvaa liian suureksi, se voi nopeuttaa keittoreaktiota liikaa ja imeytyminen ei kerkeä tapahtua kunnolla. Imeytys kestää yleensä noin 30-60 minuuttia. Tähän viipymäaikaan vaikuttaa pääasiassa keitintyyppi ja hakkeen ominaisuudet. Esimerkiksi kaksiasiasteittimessä viipymäaika imeytyksessä on yleensä pitkä. Hakkeen ominaisuuksista imeytymisaikaan vaikuttavat puulaji ja hakkeen koko. Eli havupuu tarvitsee pitemmän imeytymisajan kuin lehtipuu, sekä paksumpi hake vaatii pitemmän imeytymisajan kuin ohuempi hake. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Imeytys)

Imeytys voidaan suorittaa joko erillisessä imeytystornissa eli kaksiasiasteittimessä tai keittimen yläosassa eli yksiasteittimessä. Imeytystorni toimii samassa paineessa kuin keitinkin ja noin 100-135 °C lämpötilassa. Imeytystorni toimii periaatteella, jossa hake-lipeäseos syötetään sen yläpäästä sisään ja seos kulkee tornissa myötävirtaan. Tornin alaosassa on pohjakaavari, jolla hake kerätään talteen tornista. Kerätty hake laimennetaan vielä lipeällä ja kuljetetaan keittimen huipulle. Tällaisessa systeemissä saadaan yleensä hyvä imeytys jopa 60 minuutin imeytysajalla. Tämä on eduksi varsinkin havupuun keitossa tai mustalipeäimetyksen tapauksessa. Yksiasteittimen tapauksessa imeytys suoritetaan keittimen yläosissa. Tässä tapauksessa systeemi yksinkertaistuu hieman, koska yksi paineastia voidaan jättää kokonaan pois. Tämä myös aiheuttaa imeytyksen viiveajan pienentymisen, mutta sitä voidaan kompensoida suurentamalla keittimen

halkaisijaa. Keittimen yläosassa lipeä ja hake virtaavat saman suuntaa eli alaspäin. Vyöhyke, jossa imeytys tapahtuu, päättyy tornin ylimmille sihdeille. Tässä kohdassa on esimerkiksi paisunta tai kierrätys. Tällöin imeytyslipeä, joka on poistunut sihtien läpi, voidaan lämmittää uudestaan ja palauttaa uudelleen samaan kohtaan tornia. Tätä voidaan kutsua Lo-Solids-systeemiksi. Yksiastiakeittimen imeytysaika on noin 30-40 minuuttia ja lämpötila 100-135 °C astetta. Joissain tapauksissa, kun kyse on uusimmista keittimistä ja varsinkin yksiastiakeittimistä, voidaan hyödyntää myös vastavirtaimeytystä heti myötävirtaimeytyksen jälkeen. Tässä lipeä virtaa ylöspäin hakkeen virtaussuuntaa vastaan samalla lämmittämällä sitä keittolämpötilaan. Tämä voidaan huomata kuvasta 2. Täytyy kuitenkin huomioida, että keittoreaktiot kiihtyvät nopeammin kuin imeytyminen lämpötilan noustessa. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Imeytys)



Kuva 2. Vasta- ja myötävirtaimeytys keittimessä.

Joissain tapauksissa on kehitetty systeemejä, joissa käytetään hyväksi mustalipeäimeytystä. Tässä hake imeytetään mustalipeällä. Tavoitteena on saada korkea sulfiditeetti imeytysvaiheessa, jotta saanto ja massan ominaisuudet paranisivat. Sulfiditeetti tarkoittaa natriumsulfidin määrää keitossa käytettävässä valkolipeässä. Tässä menetelmässä saadaan myös käytettyä paisuntalipeän korkea alkaliteetti hyväksi.

Toisaalta Mustalipeäimeytys vaatii mutkikkaamman lipeäkieron ja mahdollisesti voi aiheuttaa lämmitystarpeita pasutusvaiheessa. Tämä myös vaatii hieman enemmän aikaa kuin normaali valkolipeä imeytys. Imeytyksessä täytyy myös olla vaihe, jossa mustalipeä vaihdetaan valkolipeään. Tämä johtuu siitä, että ligniini, joka on saostunut mustalipeään alkaa saostua hakkeen pinnalle ja hakkeesta tulee vaikeasti valkaistavaa massaa, jos alkaliteetti laskee lähelle nollaa. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Imeytys)

## 2.5 Keitto

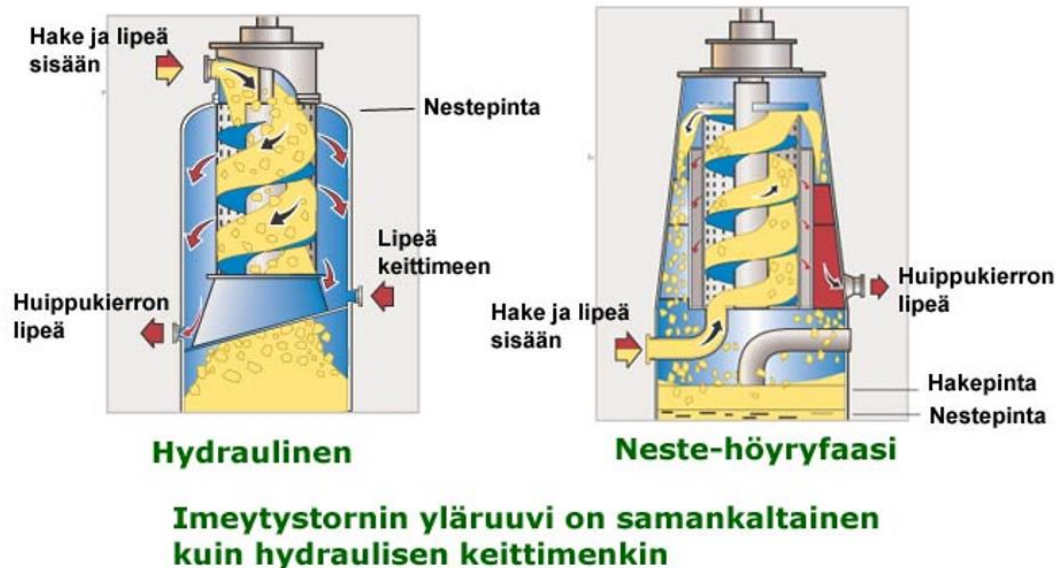
Keittovaiheen tehtävä on poistaa hakkeesta ligniiniä tarpeeksi, jotta hake kuituuntuu. Hakkeesta poistetaan myös puun uuteaineita, joista voi aiheuta muun muassa saostumia tai vaahtoutumista myöhemmissä prosessivaiheissa. Kuituun kuitenkin jää ligniiniä ja muita uuteaineita jonkin verran, vaikka keitto onnistuisikin hyvin. Ligniinin määrää kuidussa mitataan kappa-luvulla. Ligniinistä myös aiheutuu massan ruskea väri, joten niissä tapauksissa, joissa massa valkaistaan, tarvitaan enemmän valkaisukemikaaleja. Valkaisukemikaalit ovat kalliimpia ja haitallisempia kuin keitossa käytettävät. Näin ollen keitossa pyritään pääsemään matalaan kappa-lukuun ilman liiallista ligniinin poistoa, koska se aiheuttaa myös selluloosan liukenemistä ja samalla alentaa massan saantoa ja lujuuutta. Havu- ja lehtipuun kappaluvut eroavat hieman toisistaan, kun kyseessä on valkaistava massa. Jos massaa ei valkaista, kappaluku on paljon suurempi. Valkaisuun menevällä havumassalla kappaluku on noin 20-30 ja lehtimassalla noin 14-20. Valkaisemattoman massan kappaluku liikkuu alueella 40-100. (Opetushallitus, Eskeli, et al 2004)

Keittovaiheessa hakkeesta poistetaan ligniiniä. Ligniini sitoo puun kuituja, joten sen poisto helpottaa kuituuntumista. Keitossa käytetään apuna kemikaaleja, kuten natriumhydroksidia ja natriumsulfidia sekä lämpötilaa, noin 150-170 °C. Keiton jälkeen keitetty massa pestään ja sen tavoitteena on orgaanisten aineiden sekä kemikaalien erottelu massasta. Massa myös lajitellaan mahdollisten muiden epäpuhtauksien varalta. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja)

Keittovaihe tapahtuu yleisimmin jatkuvatoimisilla kamyri-keittimillä. Modernit keittimet ovat melko suuria, mutta niiden koko vaihtelee pääasiassa tuotantomäärän mukaan.

Keittimissä voi olla myös muita eroja, jotka johtuvat esimerkiksi eri valmistajista, keittimeen syötettävästä raaka-aineesta sekä keittimen rakennusajankohdasta. (Ikäheimonen, Juuso, leiviskä, Murtovaara, 2000, s 2)

Keittimien rakenteet vaihtelevat pääasiassa yksiastiakeittimestä kaksiastiakeittimeen. Näissä tilanteissa keittovaihe alkaa hieman eri kohdista. Yksiastiakeittimessä keittovyöhyke alkaa keittimen yläosissa sijaitsevien imeytyssihtien jälkeen. Kaksiastiakeittimessä hake on jo valmiiksi imeytetty sille ominaisessa imeytystornissa, joten keittovyöhyke alkaa keittimen huipulta. Yksiastiakeittimen yläosassa sijaitsee huippuruuvi, joka on periaatteeltaan samanlainen kuin imeytysastiassakin. Sen yläpäästä syötetään haketta ja lipeä sisään ja se kuljettaa seoksen alaspäin lipeävirran läpi. Höyrynestefaasikeitossa huippuruuvi toimii juokсутtaen hake-lipeäseosta sihtikorin yli. Sihtikorin yli kulkeutunut hake siirtyy keittimeen ja paluulipeä kerätään sihdin läpi talteen siirtokiertoon palauttamista varten. Kuvassa 3 on esitetty hakkeen ja lipeän kiertoa hydraulisessa ja neste-höyryfaasikeittimessä. Kuten siitä huomataan, molemmissa tapauksissa imeytystornin huippuruuvi on samanlainen. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Keitto)



Kuva 3. Hydraulinen ja neste-höyryfaasikeitin.

Keittovaiheessa hakeseosta täytyy myös lämmittää keiton tehostamiseksi. Tämä tapahtuu lipeäkierron lämmönsiirtimillä sekä hydraulisessa että höyrynestefaasikeittimessä.

Höyrynestefaasikeitossa voidaan myös käyttää suoraa höyryä lämmitykseen. Keittovyöhykkeiden lämpötilat voivat vaihdella riippuen keittimen muista ominaisuuksista ja hakkeesta. Tavallisesti lämpötilat ovat noin 150-170 °C paikkeilla. Joissain uudemmissa keittimissä, joissa keittovyöhykkeet ovat pidempiä kuin tavanomaisessa, voidaan käyttää 150-160 °C lämpötiloja. Keittimissä voi olla myös lukuisia kiertoja lipeälle. Näissä lipeä imetään sihdin läpi ja kuljetaan lämmönsiirtimen kautta takaisin keittimeen useimmiten samalle korkeudelle, kuin mistä se otettiin pois. Kiertojen pääasiallisena tarkoituksena on keittimen lämpötilan hallinta. Kiertoihin voidaan myös lisätä pesulipeää ja alkalia tai poistaa lipeää keittimestä. Tämä antaa lisää hallittavuutta kuiva-aine- ja alkaliprofiileille. Jatkuvatoimiselle keittimelle on myös annettu erilaisia kaupunimiä, jotka määräytyvät pääasiassa kiertojen erilaisista toteuttamisista, ja näin ollen erilaisista keitto-ominaisuuksista. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Keitto)

Keittimen keitto-olosuhteet vaihtelevat, kun siirrytään ylhäältä alaspäin. Keittimeen on rakennettu myötävirta- ja vastavirtakohtia. Tämä tarkoittaa sitä, että joissain kohdissa hake virtaa samaan suuntaan kuin neste. Toisaalta joissain kohdissa hake virtaa vastakkaiseen suuntaan nesteeseen nähden. Virtausten suunnat vaikuttavat hakkeen ja kemikaalien reagointiin. Tämä johtuu siitä, että hakkeen välissä on satunnaisesti tyhjiä tiloja, joissa lipeä virtaa eri tavalla. Tästä johtuu, että nesteen virtaussuuntia vaihdellaan ja lipeä pääsee paremmin reagoimaan hakkeen kanssa. Jotta lipeävirta saadaan virtaamaan haluttuun suuntaan, käytetään apuna painetta. Lipeä virtaa suuremmasta paineesta pienempään paineeseen. Näin lipeää voidaan pumpata korkeammalla paineella alemmalle vyöhykkeelle, ja se lähtee virtaamaan kohti ylempää vyöhykettä, jossa paine on pienempi. Tasoilla on sihdit, joiden venttiilien avulla voidaan säädellä läpivirtaavan lipeän määrää. Venttiilien avulla voidaan myös ohjailla lipeän virtausnopeutta ja -suuntaa. Kamyri-keittimissä keittovaihe tapahtuu yleensä myötävirtaan. Pesuvaihe tapahtuu vastavirtaan ja sitä voidaan nimittää hi-heat-keitinpesuksi. Myötävirtakeiton tärkeä ominaisuus on, että lipeän virtausnopeus on suurempi kuin hakkeen. Tällä saadaan parannettua sekoittumista ja samalla nopeutuu liunneen aineen poisto sekä uuden alkalin syöttö prosessiin. Myötävirtakeittoa on sovellettu eniten perinteikkäissä keittimissä, kun taas vastavirtakeittoa on suosittu modernimmissa keitinsovelluksissa. Vastavirtakeitossa keittimeen on rakennettu sekä myötävirta- että vastavirtavyöhykkeitä. Vastavirtavyöhykkeet toimivat samalla pesuvyöhykkeinä. Tämän ansiosta keittimeen ei

tarvita yhtä suurta pesuvyöhykettä niin kuin myötävirtakeitossa. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Keitto)

Keittovaihe on hyvin olennainen vaihe sellun valmistuksessa ja sitä on kehitetty aikojen saatossa. Pääperiaatteita keiton kehittämisessä on alkaliväkevyyden laskeminen keiton alussa ja tasaisuus keiton aikana. Vetysulfidiväkevyyden maksimointi keiton alussa, liunneen ligniinin pitoisuuden minimointi lipeässä erityisesti keiton lopussa ja lämpötilan lasku varsinkin keiton alussa. Nämä ominaisuudet ovat mahdollistaneet keittimen pesuvyöhykkeen lyhentämisen ja näin ollen kasvattaneet keittovyöhykkeen kokoa tai pienentäneet keitintä. Suuremman keittovyöhykkeen ansiosta on voitu laskea keiton lämpötiloja ja saamaan parempia massaominaisuuksia saavuttaen sama h-tekijä. H-tekijä ilmoittaa suhteellisen nopeuden ligniinin liukenemisesta ja se riippuu keittoajasta ja lämpötilasta. Keittimen tilavuuden ansiosta on myös saatu keittämiä, joissa on huomattavasti suurempi tuotanto kuin vanhoissa keittimissä. Liian korkeissa keittimissä on ollut myös ongelmia hakkeen pakkautumisessa keittimeen. Tämä johtuu hydraulisesta kuormasta, jota korkea keitin aiheuttaa. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Keitto)

Jatkuvatoimisella keitolla tarkoitetaan, keittomenetelmää, jossa keittoprosessi toimii koko ajan. Tavallisesti keittimeen syötetään haketta sen yläpäästä ja alapäästä saadaan ulos massaa. Keittimeen syötettävä hake voidaan sekoittaa valmiiksi keittokemikaaleihin ja hakemassan valuessa alaspäin keittimessä sitä pestään ja altistetaan lisää kemikaaleille. (Ikäheimonen et al 2000 s1, )

## 2.6 Pesu

Pesuvaiheessa on tarkoitus erotella massasta keiton aikana siitä liuenneita aineita, kuten liuennutta puuainesta ja kemikaaleja. Vuokeittimissä pesu tapahtuu yleensä keittimen pohjaosissa. Keittimessä tapahtuvaa pesua kutsutaan keitinpesuksi. Se on myös yleensä huomattavasti parempi vaihtoehto kuin erillinen pesulinja. Vuokeittimen pesuosassa sekä lämpötila, että paine ovat suhteellisen korkeita. Korkean lämpötilan ansiosta hakkeesta liunneet orgaaniset aineet säilyttävät matalan viskositeetin. Tämä edistää niiden liukenemistä massasta paremmin kuin se, että ne liuotettaisiin pois myöhemmin pesulinjalla. Keitinpesulla saadaan huomattavia eroja pesussa, sillä se voi vastata, jopa

kolmea pesusuodinta. Keitinpesussa myös pyritään minimoimaan korkeamman jäännösalkalin sisältämää lipeää pääsemästä pesemölle. Massaa täytyy myös jäähdyttää hieman ennen puskuvaihetta, noin 90 °C lämpötilaan, mikä onnistuu juuri tällä lipeällä. Jos massaa jäähdytetään liikaa ennen puskuvaihetta voi se menettää lujuusominaisuuksia. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Pesu)

Vanhemmissa keittimissä keittimen pohjalla sijaitsevaan pesuvyöhykkeeseen johdetaan jäähdytettyä noin 70-90 °C lämpöistä suodosta pesemöltä. Tämä pumpataan kovalla paineella pesuvyöhykkeen alaosaan, jolloin saadaan aikaiseksi vastavirtapesu. Kun ylöspäin virrannut pesulipeä saavuttaa keittimen alimmat sihdit, se syrjäytyy siinä kohdin syötettävän kuumemman lipeän ansiosta. Lipeä kerätään talteen, lämmitetään ja syötetään takaisin keittimeen sihtien kohdalle. Kuuma lipeä nousee ylöspäin, ja syntyy vastavirtakeittovyöhyke. Lipeän saavuttua ylemmälle sihtivyöhykkeelle, se siirtyy siitä joko keittokiertoon tai paisuntaan. Uudemmissa keittimissä keitin on jaettu vasta- ja myötävirtaosiin. Näiden välissä sijaitsee paisuntaosa. Vastavirtavyöhykkeen tarkoituksena on toimia myös pesuvyöhykkeenä. Tästä johtuu, ettei keitin tarvitse yhtä suurta pesuvyöhykettä. Pesukierrossa kiertävän lipeän avulla voidaan myös ohjailta prosessia, koska sitä voidaan lämmittää haluttuun lämpötilaan sekä lisätä valkolipeää. Näin saadaan yhdistettyä keitto-, ja pesuvyöhyke. Merkittävimmät höydyt tästä ovat keittimen koko tilavuuden parempi hyödyntäminen, keiton lämpötilan laskeminen ja massaominaisuuksien parantaminen. Moderneissa keittimissä varsinaisen pesuvyöhykkeen yksi pää tarkoitus onkin vain jäähdyttää massaa ennen puskuvaihetta. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Pesu)

## 2.7 Pusku

Pusku tapahtuu yleensä keittimen pohjavuohyikkeellä tai muussa paikassa, josta massa poistetaan keittimestä. Puskun periaatteena on saada massa ulos keittimestä niin, että siihen ei aiheutuisi kuituvaurioita. Tämä onnistuu, kun massa jäähdytetään noin 90 °C lämpötilaan ennen keittimestä ulos puskua. Kun lämpötila on tarpeeksi alhainen, massa ei kiehua tullessaan ulos ja näin ollen säilyttää ominaisuutensa paremmin. Myös puskuvaiheen aikana tapahtuu kuituuntumista, sillä puskuventtiilin kohdalla tapahtuu merkittävä paineen alenema. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Pusku)

Puskussa tapahtuvan jäädytyksen ohella massa myös laimennetaan, jotta se saadaan paremmin ulos keittimestä. Laimennuksessa käytetään pesulipeää. Sitä syötetään yleensä kolmeen kohtaan keitintä: pohjakaavarille, pesukierron sihtien alapuolisiin osiin ja keittimen alaosiin, lähelle massan purkauskohtaa. Puskun sakeutta voidaan tulkita tutkimalla puskulinjan ja keittimen pohjan välillä vallitsevaa paine-eroa ja näin olleen määrittää sopiva laimennussuhde. Jos massa on liian sakeaa, se ilmenee suurempana paine-erona sekä voi aiheuttaa liiallista rasitusta pohjakaavarille. Joissain tapauksissa pohjalaimennuksella voidaan myös kontrolloida keittimen painetta, sekä pitää keittimessä tarpeeksi nestettä. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Pusku)

Pohjakaavari on laite, joka sijaitsee keittimen pohjalla ja sen tehtävä on purkaa ja laimentaa keittimen sisällä olevaa hakepatsasta puskuventtiilin kautta puskuputkelle. Kaavarissa on yleensä kaksi siipeä, jotka pyöriivät purkaen hakepatsasta. Siivissä on reikiä ja näiden reikien kautta pumpataan pesulipeää laimennusta varten. Puskuventtiili on laite, joka säätelee massan poistoa keittimestä. Puskuventtiilillä voidaan myös säätää keittimen tuotantovauhti. Tässä tilanteessa hakemittarin tehtävänä on mitata hakkeen kulutusta ja sen perusteella voidaan pitää hakkeen pinta halutulla tasolla keittimessä. Tuotannon ohjaus puskuventtiilillä on yksi parhaista vaihtoehdoista. Tämä johtuu siitä, että kun pusku on lähellä vakiota, myös muut arvot vakioituvat sen ansiosta, sillä puskun muutos vaikuttaa esimerkiksi hakkeen viiveeseen keittimessä ja sitä kompensoidaan lipeäkiertojen lämpötiloja sekä alkaliteetteja muuttamalla. (KnowPulp 2020 Sulfaattisellun valmistus > Kuitulinja > Keitto > Jatkuva keitto > Pusku)

Puskun jälkeen tai sen yhteydessä massaa voidaan lajitella ennen sen valkaisuuta. Lajittelun jälkeen massaa aletaan valkaisemaan. Valkaisu on prosessivaihe, jossa massasta poistetaan väriyhdisteitä ja muita orgaanisia aineita alkalilla, esimerkiksi valkolipeän ja hapen avulla. Mitä paremmin tämä vaihe onnistuu, sitä vähemmän joudutaan käyttämään muita valkaisumenetelmiä, esimerkiksi kloorikemikaaleja. (Hangasjärvi 2014, s16)

Valkaisussa on tavoitteena lisätä massan vaaleutta sekä puhtautta poistamalla värillisiä aineita. Tärkein ominaisuus valkaisussa on, että jäännöslignini saadaan pois. Valkaisussa käytettävien kemikaalien tulee toimia niin, etteivät ne kuitenkaan heikennä massan lujuusominaisuuksia. (Hangasjärvi 2014, s16)



Valkaistu massa lajitellaan ja varastoidaan erillisiin säiliöihin mahdollista kuivausta tai muuta käyttöä varten. Useimmiten sellun kuivaamiseen käytetään tasoviirakonetta, joka jäljittelee paperikoneen toimintaperiaatetta. Kuivatus tapahtuu pumppaamalla massaa kuivauskoneen perälaatikon kautta viiralle, puristimille ja lopulta kuivauskaappiin. Sekä viiralla että puristimilla radasta imetään nestettä pois, ja sen kuiva-aine pitoisuus on lähellä 50 % viimeisen puristimen jälkeen. Loppu vesi haihdutetaan kuivauskaapissa, josta saadaan noin 90 % kuiva-ainepitoisuus. Kuivattu rata leikataan arkkileikkurilla ja paalataan kuljetusta varten. (Hangasjärvi 2014, s17)

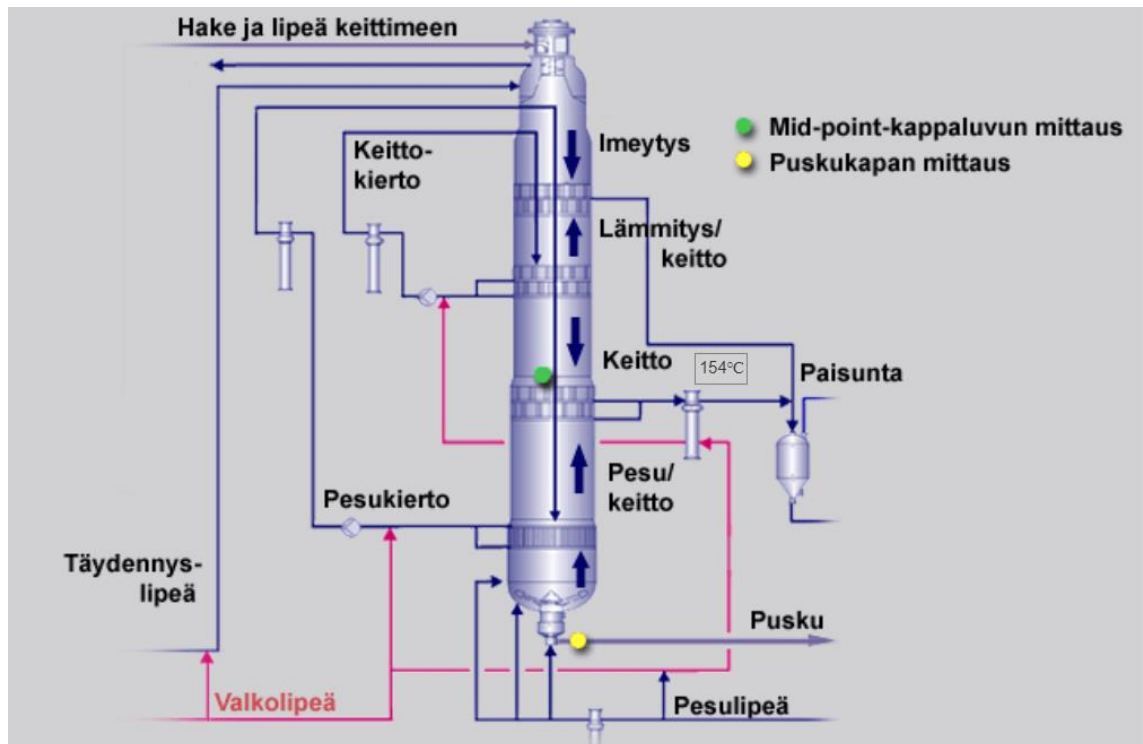
## **3 KEITTIMEN MALLINNUS JA SIMULOINTI**

### **3.1 Tutkimuksen suorittaminen**

Tutkimuksen pohjana käytetään KnowPulp-opetusmateriaalissa olevaa jatkuvatoimisen vuokeittimen simulaattoria. Tämä simulaattorimalli on yleismaailmallinen eikä perustu mihinkään tiettyyn keittimeen. Simuloinnin tavoitteena on tuottaa mahdollisimman nopeasti 1000 tn massaa. Massalle on myös asetettu tietyt laatuvaatimukset. Kun massan laatu pääsee näihin vaatimuksiin, se lasketaan tuotannoksi. Mäntymassan kappaluku täytyy pitää välillä 27-30 ja koivumassan välillä 18-20. Myös alkaliannoksen tulee pysyä mäntymassalla välillä 20-22 % ja koivumassalla 18-20 %. Jos massan kriteerit eivät täyty, sitä massaa ei lasketa tuotannoksi ja näin ollen 1000 tn tavoitteessa kestää kauemmin. Tarkoituksena on saada mahdollisimman hyvä tulos lajinvaihdolle sekä kappaluvun muutokselle.

### 3.2 Keittimen malli

Kuvassa 4 on esitetty työssä käytettävä keitin. Keitin on yksinkertaistettu esitys aikaisemmissa kappaleissa mainituista keittimen osista. Pääasiassa siinä on esitettyinä hakkeen kulkureitti keittimen huipulta puskun kautta ulos ja pääpiirteittäin lipeä-, lämmitys- ja pesukierrot. Kuvaan 4 on myös merkitty kappalukujen mittausspaikat keittimen keskiosaan ja pohjalle.



Kuva 4. Kuva simuloinnissa käytettävästä keittimestä.

Taulukossa 1 on esitetty keittimen hyvyyskriteereitä, jotka on tarkoitus saada pysymään halutulla vaihteluvälillä tehokkaan keiton ylläpitämiseksi. Tärkeimpiä näistä ovat tuotantovauhti, saanto, mid-point-kappaluku ja puskun kappaluku.

Taulukossa 2 on esitetty keiton ohjausparametreja. Näistä tärkeimpiä ovat tuotantovauhti ja lämpötilat eri keiton vaiheissa. Arvot voidaan myös jakaa karkeasti kahteen osaan, lämpötiloihin ja alkaliannoksiin, joista kummallakin on oma pääasiallinen vaikutusalue. Lämpötilojen muutoksella ohjataan kappalukua eri keiton vaiheissa tehokkaasti. Alkaliannoksilla taas pyritään pitämään massan muita arvoja kohdillaan, kuten saanto ja lipeän kulutus.

Taulukko 1. Keittimen hyvyyskriteerit.

<b>Mittaus</b>	<b>Yksikkö</b>
tuotantovauhti	(ADt/vrk)
hakkeen kulutus	(kuiv.tn/vrk)
saanto	(% kuiv.puusta)
Mid-point-kappaluku	
H-tekijä keittovaiheen jälkeen	
H-tekijä keittimen jälkeen	
valkolipeän kulutus	
kappaluku puskulinjassa	

Taulukko 2. Keiton ohjausparametrit.

<b>Parametri</b>	<b>Yksikkö</b>
tuotantovauhti	tn/vrk 90% kuivaa massaa
lämpötila imeytyksessä	°C
lämpötila keittokierrossa	°C
lämpötila pesukierrossa	°C
alkaliannos imeytykseen	EA% kuivasta puusta NaOH:na
alkaliannos keittokiertoon	EA% kuivasta puusta NaOH:na
alkaliannos pesukiertoon	EA% kuivasta puusta NaOH:na

Simuloinnissa käsitellään kahta tehtävätyyppiä. Ensimmäisessä tapahtuu kappatason muutos ja toisessa lajin vaihto. Taulukon 2 arvoja muokkaamalla lähdetään ohjaamaan keiton etenemistä. Arvoja voi muokata koko keiton ajan pois lukien tuotantovauhti, joka pitää pienentää arvoon 1100 tn/vrk maksimista 1250tn/vrk, kun laji alkaa vaihtua imeytysvyöhykkeessä. Tuotantovauhtia voidaan taas kasvattaa, kun uusi massa on kulkeutunut puskulinjan ohi.

### 3.3 Kappatason muutoksen simulointi ja hallinta

Ensimmäisenä tutkitaan kappatason muutosta. Tässä tehtävänä on tuottaa 1000 tn hyväksyttyä massaa. Erinomaisen tuloksen raja on 24 tuntia, johon pitäisi pystyä tuottamaan tarvittava 1000 tn massaa. Tavoitekappataso muuttuu 8 tunnin ajon jälkeen väliltä 27-30 välille 30-33. Puulajina käytetään havua ja tuotteena saadaan pitkäkuituista massaa. Kappaluvun kasvattaminen tarkoittaa sitä, että massaan jää enemmän ligniiniä.

Keittoa lähdettiin ohjaamaan määrittämällä sille sopivat alkuarvot. Kuvasta 5 voidaan huomata, että keiton vauhti on nostettu 1100 tn/vrk, jotta päästään tavoitteeseen, vaikka hylättyä massaa tulisikin vähän. Tätä kompensoitiin nostamalla lämpötilat keittokierrossa ja pesukierrossa 155 °C:en. Näillä arvoilla kappaluku tasoittui lähelle 30. Kuvasta 6 voidaan myös huomata kappatason olevan lähellä 30 ennen kappatasonmuutosta. Hieman ennen ja osittain kappatason muutoksen aikana pudotettiin lämpötila pesukierrossa 148 °C:en. Kuvasta 7 voidaan nähdä, että myös tuotantonopeutta nostettiin 1150 tn/vrk. Nämä jäivät myös lopullisiksi keiton arvoiksi, joilla saatiin tuotettua 1000 tn massaa alle 24 tunnin rajan. Kuvasta 6 nähdään loppuarvojen vaikutus mittausarvoihin ja huomataan, että keitto pysyy melko tasaisena ja sitä voisi jatkaa pitempäänkin näillä arvoilla.

Tuotantovauhti	1000
<input type="text" value="1100"/> ↑ ↓ (500 - 1300) tn/vrk 90% kuivaa massaa	
Lämpötila imeytyksessä	100
<input type="text" value="100"/> ↑ ↓ (90 - 130) °C	
Lämpötila keittokierrossa	154
<input type="text" value="155"/> ↑ ↓ (100 - 180) °C	
Lämpötila pesukierrossa	154
<input type="text" value="155"/> ↑ ↓ (100 - 180) °C	
Alkaliannos imeytykseen	9
<input type="text" value="9.0"/> ↑ ↓ (0.0 - 10.0) EA % kuivasta puusta NaOH:na	
Alkaliannos keittokiertoon	9
<input type="text" value="9.0"/> ↑ ↓ (0.0 - 10.0) EA % kuivasta puusta NaOH:na	
Alkaliannos pesukiertoon	3
<input type="text" value="3.0"/> ↑ ↓ (0.0 - 5.0) EA % kuivasta puusta NaOH:na	

Kuva 5. Kappatason muutoksen alkutilanteen arvot.



Kuva 6. Keittoarvoja 11 tunnin ajon ja kappatason muutoksen jälkeen.

Tuotantovauhti	1000
<input type="text" value="1150"/>	↑ ↓ (500 - 1300) tn/vrk 90% kuivaa massaa
Lämpötila imeytyksessä	100
<input type="text" value="100"/>	↑ ↓ (90 - 130) °C
Lämpötila keittokierrossa	154
<input type="text" value="155"/>	↑ ↓ (100 - 180) °C
Lämpötila pesukierrossa	154
<input type="text" value="148"/>	↑ ↓ (100 - 180) °C
Alkaliannos imeytykseen	9
<input type="text" value="9.0"/>	↑ ↓ (0.0 - 10.0) EA % kuivasta puusta NaOH:na
Alkaliannos keittokiertoon	9
<input type="text" value="9.0"/>	↑ ↓ (0.0 - 10.0) EA % kuivasta puusta NaOH:na
Alkaliannos pesukiertoon	3
<input type="text" value="3.0"/>	↑ ↓ (0.0 - 5.0) EA % kuivasta puusta NaOH:na

Kuva 7. Kappatason muutoksen lopputilanteen arvot.

### 3.4 Lajinvaihdon simulointi ja hallinta

Tehtävänä on saada tuotettua 1000 tn sellua 23 tunnissa. Simulointi aloitettiin arvoilla, joka näkyvät kuvassa 8. Koska keittimen kapasiteetti on melko pieni tuotettavaan määrään nähden, joudutaan tuotantonopeus pitämään korkeana alusta asti. Lajin vaihto alkaa noin 3 tunnin kohdalla, ja vajaa 4 tuntia siitä uusi massa on puskulinjassa. Tänä aikana säädetään keittoon sopivat arvot uudelle massalle ja pidetään se tasaisena, kunnes on tuotettu 1000 tn massaa. Aluksi puulajina käytetään havua ja saadaan pitkäkuituista massaa; 3 tunnin jälkeen aletaan käyttämään koivua, ja saadaan lyhytkuituista massaa.

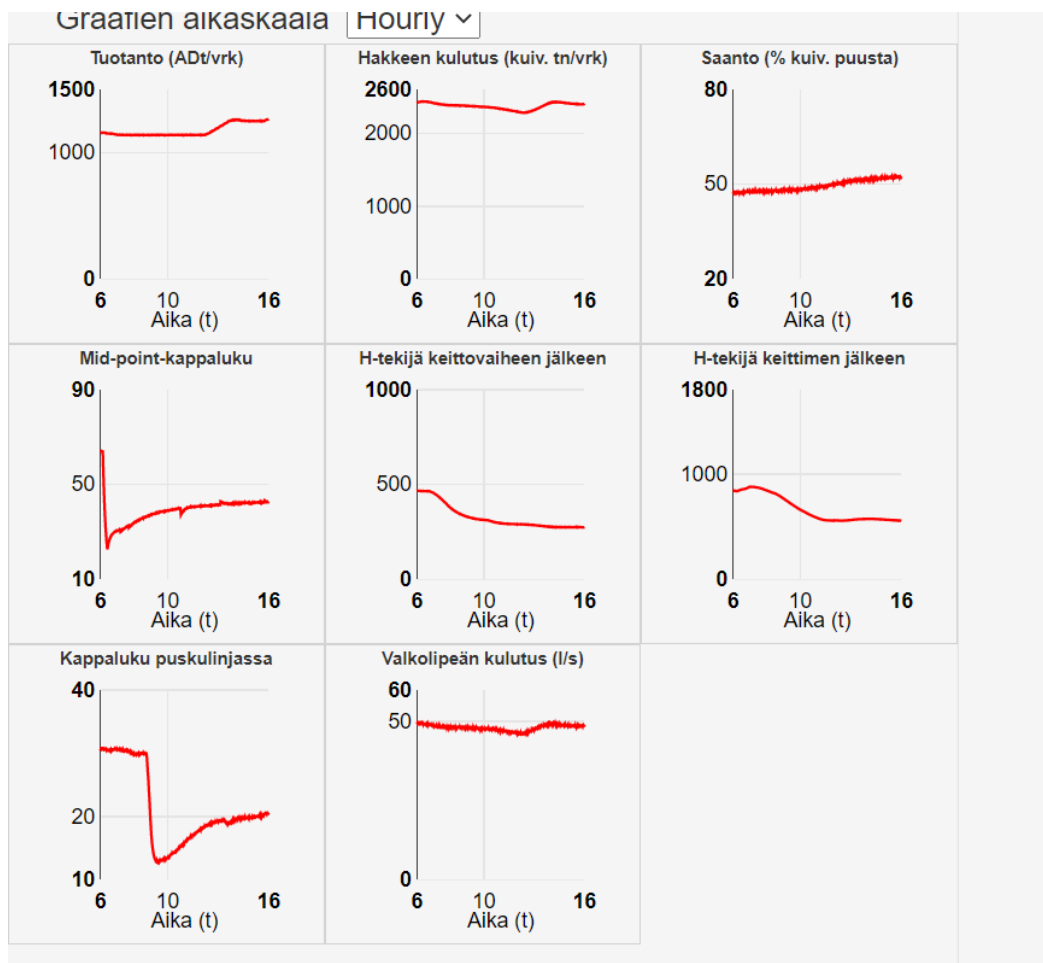
Keittoa lähdettiin ohjaamaan nostamalla kuvan 8 alkutilanteen lämpötilaa keittokierrossa 2 °C sekä laskemalla lämpötilaa pesukierrossa 2 °C verran. Tämä johti mittausarvojen pysymiseen hyvänä lajin vaihtoon asti. Kuten kuvasta 9 voidaan nähdä, kappatason muutos on melko suuri lajin vaihdossa ja sitä on vaikea kompensoida ennakoimalla. Tämä johtuu siitä, että massasta tulee laadultaan huonoa eikä sitä hyväksytä tuotannoksi, jos kappalukua kasvatetaan liian suureksi ennen lajin vaihtumista. Toisaalta, jos lajinvaihdossa ei ennakoida kappaluvun muutosta, kestää keittimellä kauemmin päästä uuden massan keittoarvoihin ja saada tuotettua hyväksyttyä massaa.

Kun lajin vaihto eteni imeytykseen asti, säädettiin lämpötilaa keittokierrossa 7 °C matalammalle eli 149 °C:een. Tämän jälkeen pudotettiin myös lämpötilaa pesukierrossa 2 °C, jotta kappaluku tasoittuu halutulle välillä 18-20. Kuvasta 9 voidaan nähdä, kuinka nopeasti lämpötilan lasku kasvattaa kappalukua. Tässä ajoitus on tärkeintä, jotta kappaluku ei karkaa. Lajinvaihdon loppuarvot näkyvät kuvassa 10.

Lopputuloksena näillä ajoarvoilla saatiin tuotettua hyväksyttyä massaa 1011 tn. Aikaa tähän kului 23 tuntia ja 30 minuuttia. Erinomainen tulos on tasan 23 tuntia.

Tuotantovauhti	1000	<input type="text" value="1000"/>	↑ ↓ (500 - 1300) tn/vrk 90% kuivaa massaa
Lämpötila imeytyksessä	100	<input type="text" value="100"/>	↑ ↓ (90 - 130) °C
Lämpötila keittokierrossa	154	<input type="text" value="154"/>	↑ ↓ (100 - 180) °C
Lämpötila pesukierrossa	154	<input type="text" value="154"/>	↑ ↓ (100 - 180) °C
Alkaliannos imeytykseen	9	<input type="text" value="9.0"/>	↑ ↓ (0.0 - 10.0) EA % kuivasta puusta NaOH:na
Alkaliannos keittokiertoon	9	<input type="text" value="9.0"/>	↑ ↓ (0.0 - 10.0) EA % kuivasta puusta NaOH:na
Alkaliannos pesukiertoon	3	<input type="text" value="3.0"/>	↑ ↓ (0.0 - 5.0) EA % kuivasta puusta NaOH:na

Kuva 8. Lajinvaihtosimuloinnin alkuarvot.



Kuva 9. Mittausarvot kun lajinvaihto on läpi ja tuotantovauhti on kasvatettu huippuunsa.



Tuotantovauhti	1260	<input type="text" value="1300"/>	↑ ↓ (500 - 1300) tn/vrk 90% kuivaa massaa
Lämpötila imeytyksessä	100	<input type="text" value="100"/>	↑ ↓ (90 - 130) °C
Lämpötila keittokierrossa	148	<input type="text" value="149"/>	↑ ↓ (100 - 180) °C
Lämpötila pesukierrossa	153	<input type="text" value="150"/>	↑ ↓ (100 - 180) °C
Alkaliannos imeytykseen	9	<input type="text" value="9.0"/>	↑ ↓ (0.0 - 10.0) EA % kuivasta puusta NaOH:na
Alkaliannos keittokiertoon	9	<input type="text" value="9.0"/>	↑ ↓ (0.0 - 10.0) EA % kuivasta puusta NaOH:na
Alkaliannos pesukiertoon	3	<input type="text" value="3.0"/>	↑ ↓ (0.0 - 5.0) EA % kuivasta puusta NaOH:na

Kuva 10. Lajinvaihtosimuloinnin loppuarvot.

## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä perehdyttiin jatkuvatoimiseen sellunkeittoon, sekä sen ohjaukseen KnowPulp-simulaattorilla. Simulointeja suoritettiin kahta tyyppiä, jotka olivat kappatason muutos, sekä lajin vaihto. Molemmissa tapauksissa tavoitteena oli tuottaa hyväksyttyä massaa 1000 tn tietyn aikarajan sisällä. Molemmissa simuloinneissa päästiin hyvään lopputulokseen. Simulointeja oli luontevin lähteä suorittamaan niin, että ensin selvitettiin mitkä ajoarvoista vaikuttavat mihinkin mittausarvoon ja onko niillä yhteisvaikutuksia. Huomattiin, että mittausarvot voidaan jakaa karkeasti kappaluvun ja H-tekijän ohjaamiseen. Näitä vastasivat lämpötilan sekä alkaliannoksen muuttaminen keiton eri vaiheissa. Tuotantovauhdilla ei ollut niin merkittävää osuutta näihin verrattuna, koska se pysyi melko maltillisena ja lähellä alkuarvoa koko keiton ajan.

Ensimmäisessä simuloinnissa eli kappatason muutoksessa massan laatu saatiin pidettyä haluttujen kriteerien sisällä lähes kokonaan, joka johti siihen, että haluttu 1000 tn saatiin tuotettua melkein 2 tuntia ennen määräaikaa. Tässä tärkeintä oli ajoittaa lämpötilan muutos oikeaan aikaan eli noin tunti ennen uuden massan saapumista kappaluvun mittauspisteille.

Toisessa simuloinnissa eli lajin vaihdossa massan pitäminen haluttujen kriteerien sisällä oli hieman hankalampaa kuin kappatason muutoksessa. Tämä johtui siitä, että juuri lajinvaihdon hetkellä kappataso muuttuu rajusti mutta kappatason raja ei. Tätä pystyi kompensoimaan hieman ennakoimalla kappaa oikeaan suuntaan ja näin ollen päästiin hyvään 1000 tn lopputulokseen.

Näitä tuloksia ei voi varsinaisesti yhdistää mihinkään tiettyyn tehtaaseen tai keittimeen, vaan ne ovat esimerkinomaisia tuloksia ja ominaisia vain tälle kyseiselle simulaattorille. Toisaalta tästä kuitenkin sai hyvän yleiskuvan keittimen hallinasta. Tätä taitoa taas soveltamalla haluttuun tilanteeseen saadaan varmasti saman tyyllisiä ratkaisuja muidenkin keittimien ajo-olosuhteiksi. Kokonaisuudessaan tulokset olivat hyviä. Tuloksia arvioitaessa suurin haaste, joka vaikutti simuloinnin onnistumiseen, oli säädön oikea ajoittaminen. Tosin tulokset olivat kuitenkin hyvin lähellä näitä simulaattorille asetettuja erinomaisia tuloksia ja joskus jopa parempia, kuten kappatason muutoksessa.

## 5 YHTEENVETO

Tässä työssä tutustuttiin sellunkeiton keittovaiheeseen ja jatkuvatoimiseen sellunkeiton hallintaan. Teoriaosuudessa käsiteltiin jatkuvatoimisen sellunkeittimen rakennetta sekä ominaisuuksia. Kokeellisessa osuudessa simuloitiin kahta tilannetta KnowPulp-simulaattorilla. Tapaukset olivat kappatason muutos kesken keiton ja lajin vaihto pitkäkuituisesta eli havumassasta lyhytkuituiseen koivumassaan. Kummassakin tilanteessa tarkoituksena oli tuottaa 1000 tn massaa, joka täytti hyvän massan kriteerit. Simuloitaessa keiton ohjauksen arvoista saatiin perusteellista tietoa niiden vaikutuksista hyvyyskriteereihin. Huomattiin myös, että oikea ajoitus on erittäin tärkeää, jotta keitto pysyy tasaisena. Työssä käytetyt mallit eivät perustu mihinkään todelliseen keittimeen tai tehtaaseen, mutta simuloinnista saa hyvän kuvan siitä, kuinka esimerkin omaista keitintä voisi ajaa. Työn haasteena oli saada hyvät tulokset simuloinneista, koska simulaattorien aikaskaala oli melko nopea. Eli muutama sekunti simulaattorissa vastasi 15 minuutin keittoa todellisuudessa. Simulointeja voitaisiin suorittaa vielä lisää samalla simulaattorilla mutta eri tilanteessa. Tällainen tilanne voisi olla esimerkiksi tuotantonopeuden muutos ja siihen liittyvä keiton säätäminen.

## 6 LÄHDELUETTELO

Ranne M, 2015. Biotuotetehdas: Innovaatio vai uusi nimi perinteiselle laitokselle. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kandidaatintyö. Saatavissa: [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/116167/Kandidaatinty%C3%B6\\_Malla\\_Ranne\\_2015.pdf?sequence=2](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/116167/Kandidaatinty%C3%B6_Malla_Ranne_2015.pdf?sequence=2) [viitattu 2.2.2021]

Hangasjärvi J, 2014. Valkaisukemikaalien optimointi. Satakunta: Satakunnan ammattikorkeakoulu, kemiantekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/88362/Hangasjarvi\\_Joonas.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/88362/Hangasjarvi_Joonas.pdf?sequence=1) [viitattu 3.1.2021]

Ikäheimonen, et al 2000. Sulfaattisellun vuokeitto menetelmät, keiton ohjaus ja massan pesu. Oulun yliopisto, säätötekniikan laboratorio, raportti B No 21. Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514275306.pdf> [viitattu 28.1.2021]

Maarjan, 2016. Sellukurssi, sulfaattikeitto ja keittomenetelmät. Saatavilla: <http://maarjansellukurssi.blogspot.com/2016/11/sulfaattikeitto-ja-keittomenetelmat.html> [viitattu 2.2.2021]

Eskelinen et, al 2004. Materiaalin testaaminen / sellu. Opetushallitus, laboratorioanalyysit. Saatavilla: [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/laboratorio/teollisuusnayteanalyysit\\_materiaalin\\_testaaminen.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/laboratorio/teollisuusnayteanalyysit_materiaalin_testaaminen.html) [viitattu 24.2.2021]

Metsä Fibre, 2018. Mikä on biotuotetehdas? Saatavilla: <https://www.metsafibre.com/fi/yhtio/Tuotantolaitokset/Biotuotetehdas/Pages/mika-biotuotetehdas.aspx> [viitattu 30.12.2020]

KnowPulp 2021. KnowPulp oppimismateriaali, sulfaattisellun valmistus ja vuokeittimen simulointi. Saatavilla: <http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/kps/ui/knowpulp.htm> [viitattu 3.4.2021]

Metsä Fibre, 2018. Biotuotteet. Saatavilla:  
<https://www.metsafibre.com/fi/yhtio/Tuotantolaitokset/Biotuotetehdas/Pages/Biotuotteet.aspx> [viitattu 30.12.2020]

KnowPulp 2021. KnowPulp oppimismateriaali, keittovaihe. Saatavilla:  
[http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/pulping/cooking/2\\_continuous/7\\_cooking/frame.htm](http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/pulping/cooking/2_continuous/7_cooking/frame.htm) [viitattu 3.4.2021]

KnowPulp 2021. KnowPulp oppimismateriaali, vuokeitin. Saatavilla:  
<http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/simulation/vuokeitto/frame.htm> [viitattu 3.4.2021]