

Opinnäytetyö (AMK)

Prosessi- ja materiaalitekniikan insinööri

2021

Simo Penttilä

**SELLUN JAUHATUSASTEEN  
VAIKUTUKSET  
SELLUKOMPOSIITIN  
MEKAANISIIN OMINAISUUKSIIN**

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Prosessi- ja materiaalitekniikan insinööri

2021 | 43 sivua, 6 liitesivua

Ohjaaja: Liisa Lehtinen, Turku AMK

Simo Penttilä

# SELLUN JAUHATUSASTEEN VAIKUTUKSET SELLUKOMPOSIITIN MEKAANISIIN OMINAISUUKSIIN

Opinnäytetyö tehtiin, jotta saatiin selville, miten sellun jauhatuste vaikuttaa sen prosessoitavuuteen märkärainauksessa ja siitä valmistettavan luonnonkuitukomposiitin mekaanisiin ominaisuuksiin ja miten jauhatuste kasvattaminen vaikuttaa prosessin energiankulutukseen. Eri materiaalien, kuten luonnonkuitukomposiittienkin valmistuskustannuksiin vaikuttavat mm. valmistuksen kuluttama energia ja kuinka työlästä materiaalin valmistus on.

Työn aikana sellua jauhettiin eri jauhatusteisiin ja näiden prosessoitavuutta vertailtiin. Lisäksi eritasoisista jauhatuksista valmistettujen luonnonkuitukomposiittien mekaanisia ominaisuuksia vertailtiin toisiinsa, jotta voitiin päätellä, onko sellua tarpeen jauhaa kovin korkealle tasolle. Sellun jauhatuste vie energiaa ja jos materiaalin ominaisuudet ovat tyydyttäviä matalallakin jauhatustasolla, ei korkeajauhatuste ole tarpeen.

Työn tuloksena saatiin dataa eri jauhatusteiden käyttäytymisestä märkärainausprosessissa, vaikutuksista valmistettavan komposiitin mekaanisiin ominaisuuksiin ja vaikutuksista energian kulutukseen. Tuloksista voidaan päätellä, että matalatason jauhatuste on riittävää, sillä jauhatuste kasvattaessa energiankulutus kasvaa, prosessi on hyvin epätasaista ja saatu hyöty mekaanisiin ominaisuuksiin on vähäistä.

Tulevaisuutta ajatellen tulisi keskittyä komposiittien lisääineistuksen kehittämiseen, sillä se olisi kustannustehokkaampi tapa vahvistaa komposiittien mekaanisia ominaisuuksia. Matalammat valmistuskustannukset lisäävät materiaalin kilpailukykyä kasvavilla luonnonkuitukomposiittien markkinoilla.

ASIASANAT:

luonnonkuitu, sellu, komposiitti, jauhatuste

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Chemical and Materials Engineering

2021 | 43 pages, 6 pages in appendices

Supervisor: Liisa Lehtinen, TUAS

Simo Penttilä

# EFFECTS OF DEGREE OF COARSENESS OF CHEMICAL PULP ON MECHANICAL PROPERTIES OF PULP COMPOSITE

The thesis project was undertaken to find out how the degree of coarseness of chemical pulp affects the processability of the material in the wet web forming process, how the mechanical properties of the pulp composite are affected and how the energy consumption of the process changes. The manufacturing costs of different materials, such as natural fiber composites, are affected by, among other things, how much energy the manufacturing consumes and how labor intensive it is.

During the thesis, chemical pulp was ground to different degrees of coarseness and their processing in wet web forming was compared. In addition, the mechanical properties of composites that were manufactured from these different pulps were compared. From the results it was deduced whether it is worth it to grind the chemical pulp to a higher degree. The grinding of the pulp increases the energy consumption of the process and if the properties of the material are satisfactory at lower grinding degrees, the higher grinding degree is not needed.

As a result, data was obtained from the effects of different grinding degrees on the wet web forming process, on the mechanical properties of the composites, and on the energy consumption. From the results it was concluded that a lower degree of coarseness is satisfactory, since a high degree of coarseness also increases energy consumption, makes the wet web forming process very unstable, and has minimal effects on the mechanical properties of the composite.

For the future, the focus should be on additives and how they should be used in the composites. That would be the cost-effective way to enhance the mechanical properties of the composite. Lower manufacturing costs also make the material more competitive in the growing markets of natural fiber composites.

## KEYWORDS:

natural fibers, chemical pulp, composites, grinding

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO</b>	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>8</b>
<b>2 MATERIAALIT</b>	<b>9</b>
2.1 Sellu	9
2.1.1 Havusellu	11
2.1.2 Lehtisellu	11
2.2 Muovit	12
2.2.1 Polypropeeni (PP)	12
2.2.2 Polyeteeni (PE)	13
2.3 Luonnonkuitukomposiitit	14
<b>3 PROSESSIT</b>	<b>15</b>
3.1 Jauhatus	15
3.2 SR – luvun määrittäminen	16
3.3 Märkärainaus	16
3.4 Ekstruusio	17
3.5 Ruiskuvalu	18
3.6 Muovimateriaalin lujuuden määrittäminen	19
<b>4 KOEAJOT</b>	<b>21</b>
4.1 Matalatason jauhatuserien vertailu	28
4.2 Keskitason jauhatuserien vertailu	28
4.3 Korkeatason jauhatuserien vertailu	28
4.4 Energian kulutus	28
<b>5 TULOKSET</b>	<b>29</b>
5.1 Märkärainauksen vertailu	29
5.1.1 Matalatason jauhatuserien analysointi	30
5.1.2 Keskitason jauhatuserien analysointi	32
5.1.3 Korkeatason jauhatuserien analysointi	34
5.2 Jauhatuserien vetokokeiden tulosten vertailu	36
5.3 Havu- ja lehtisellun vertailu	39

<b>6 PÄÄTELMÄT</b>	<b>41</b>
<b>7 YHTEENVETO</b>	<b>42</b>
<b>8 LÄHTEET</b>	<b>43</b>

## **LIITTEET**

Liite 1. Matalantason jauhatus – Polypropeeni	
Liite 2. Matalantason jauhatus – Polyeteeni	
Liite 3. Korkeatason jauhatus – Polypropeeni	
Liite 4. Korkeatason jauhatus – Polyeteeni	
Liite 5. Havu- ja lehtisellun vertailu	
Liite 6. Märkärainauksen energiankulutus	

## **KUVAT**

Kuva 1. Selluarkeista koostuva sellupaali.	21
Kuva 2. Ahlström TF - 20 -jauhin.	22
Kuva 3. Jauhatuksen PI-kaavio, jauhatuksen piiri on merkitty punaisella.	23
Kuva 4. Neliprosenttista sellumassaa.	23
Kuva 5. SR-luvun mittauslaite.	24
Kuva 6. Rainarulla.	25
Kuva 7. Ekstruuderilla rainasta valmistettua esikompaundia.	26
Kuva 8. Luonnonkuitukomposiittigranulaatteja.	27
Kuva 9. Ruiskuvalulla valmistettuja koesauvoja.	27
Kuva 10. Matalatason jauhatuserän jauhatusprosessin trendiviivat esittävät jauhatuksen eri parametrejä.	30
Kuva 11. Matalatason jauhatuserän rainausprosessin trendiviivat esittävät linjan märkäosan eri parametrejä.	31
Kuva 12. Matalatason jauhatuserän kuivauksen trendiviivat esittävät linjan kuivaimen lämpötiloja kuivaimen eri vyöhykkeillä.	31
Kuva 13. Keskitason jauhatuserän jauhatusprosessin trendiviivat esittävät jauhatuksen eri parametrejä.	32
Kuva 14. Keskitason jauhatuserän rainausprosessin trendiviivat esittävät linjan märkäosan eri parametrejä.	33
Kuva 15. Keskitason jauhatuserän kuivauksen trendiviivat esittävät linjan kuivaimen lämpötiloja kuivaimen eri vyöhykkeillä.	33
Kuva 16. Korkeatason jauhatuserän jauhatusprosessin trendiviivat esittävät jauhatuksen eri parametrejä.	34
Kuva 17. Korkeatason jauhatuserän rainausprosessin trendiviivat esittävät linjan märkäosan eri parametrejä.	35
Kuva 18. Korkeatason jauhatuserän kuivauksen trendiviivat esittävät linjan kuivaimen lämpötiloja kuivaimen eri vyöhykkeillä.	35

## KUVIOT

Kuvio 1. PP-komposiittien murtovenymä pylväskaaviona.	36
Kuvio 2. PP-komposiittien vetolujuus pylväskaaviona.	37
Kuvio 3. PE-komposiittien murtovenymä pylväskaaviona	38
Kuvio 4. PE-komposiittien vetolujuus pylväskaaviona.	38
Kuvio 5. Havu- ja lehtisellun murtovenymä pylväskaaviona.	39
Kuvio 6. Havu- ja lehtisellun vetolujuus pylväskaaviona.	40

## KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

PP	Polypropeeni
PE	Polyeteeni
PE-LLD	Lineaarinen pientiheyspolyeteeni
PE-LD	Pientiheyspolyeteeni
PE-HD	Suurtiheyspolyeteeni

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Elastopoli Oy, joka on Sastamalassa toimiva muovi- ja kumialan tutkimus- ja kehittämiskeskus. Opinnäytetyön aihe valikoitui siten, että Elastopoli on alkanut optimoimaan tuotantokustannuksiaan ja yrityksessä haluttiin oppia tuntemaan paremmin jauhatuksen vaikutusta eri tyyppisten kuitujen tuottavuuteen ja ominaisuuksiin.

Sellun ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa sitä jauhamalla, ja eri jauhatusteet muuttavat sellun ominaisuuksia, kuten kuitujen pituutta ja haaroittuneisuutta. Nämä ominaisuuksien muutokset vaikuttavat sellun prosessoitavuuteen sekä lopputuotteen ominaisuuksiin.

Tämän työn aikana keskityttiin siihen, miten materiaali käyttäytyy märkärainauksen eri osissa, eikä niinkään ekstruusiossa, koska jauhatusteiden vaikutukset tulevat suuremmin esille märkärainauksen aikana.

Jauhatusteiden kasvattaminen lisää energian kulutusta ja tekee prosessoinnista haastavampaa kuin matalalle jätetty jauhatustaso, joka lisää valmistuskustannuksia. Tämän takia onkin selvitettävä, onko korkealle jauhaaminen tarpeellista, vai voidaanko valmistuskustannuksissa säästää vähemmällä jauhamisella.

Opinnäytetyön alussa kuvaillaan työn aikana käytetyt materiaalit sekä esitellään prosessit, joilla sellusta on päästy valmiiseen luonnonkuitukomposiittiin. Seuraavaksi esitellään, miten työ käytännössä suoritettiin ja miten eri tavalla selluja jauhettiin sekä miten eritavoin jauhettut sellut käyttäytyivät märkärainauksessa. Työn tuloksissa kerrotaan muutokset komposiitin mekaanisiin ominaisuuksiin sekä vertaillaan, paljonko energiaa eri tavoin jauhettut sellut kuluttavat prosessissa.

## 2 MATERIAALIT

Työn aikana käytetyt päämateriaalit ovat eri sellut sekä muovit. Tässä kappaleessa esitellään materiaalien teoriaa.

### 2.1 Sellu

Sellu on puupohjaista, pääosin selluloosasta ja vedestä koostuvaa paperimassaa. Selluteollisuus on Suomessa merkittävä työllistäjä ja sellu on myös merkittävä vientituote.

Sellun valmistus alkaa kuitupuun kuorinnalla, jossa puusta poistetaan kuori, kuorinta tehdään koska kuori sisältää vähän haluttuja kuituja ja kuori lisää prosessin kemikaalikuluusta ja tekee massasta roskaista. Erotellut kuoret poltetaan ja saatu lämpö käytetään muualla prosessissa. (Isotalo 2004.) (Seppälä ym. 2001.)

Kuoritut puut haketetaan eli puusta tehdään silppua, jonka partikkeli koko on 15 - 30 mm pitkä ja 4 - 5 mm paksu. Hakkeen tulee olla oikean kokoista, jotta keitto vaiheessa keittoliuos pääsee imeytymään hakepalasiin tasaisesti ja kauttaaltaan. Hake seulotaan ja liian isot hakepalaset palautetaan haketukseen ja liian pienet hakepalaset sekoitetaan oikea kokoisen hakkeen sekaan tasaisena määränä tai ohjataan polttoon. (Isotalo 2004.) (Seppälä ym. 2001.)

Seuraava vaihe on keittäminen, joka tehdään joko eräkeittona tai jatkuvana, mutta nykyään teollisuudessa käytetään jatkuvakeittotapaa. Eräkeitossa puuhake ohjataan 160 - 400 m<sup>3</sup> kokoiseen terässäiliöön, jossa valko- ja mustalipeästä koostuvaa sulfaattikeittoa on n. 3,5 - 4 kertaa puuhakkeen kuivapainoon verrattuna. Prosessin lämpötilaa nostetaan hitaasti, jotta keitto ehtii imeytyä hakkeeseen tasaisesti. Täytöstä tyhjennykseen yhden erän prosessointi kestää n. 4 tuntia. (Isotalo 2004.) (Seppälä ym. 2001.)

Jatkuvassa keitossa hake ohjataan esi-imeytyskolonnin läpi, jossa hakkeeseen imeytetään valkolipeää ja esi-imeytyksen jälkeen hake ohjataan varsinaiseen keittokolonniin. Keittokolonnissa hake ja valko- ja mustalipeä syötetään kolonnin yläosasta ja ne valuvat yhdessä alaspäin, kunnes kolonnin puolella välissä mustalipeäksi muuttunut keittoliuos erotetaan massasta. (Isotalo 2004.) (Seppälä ym. 2001.)

Keiton tarkoituksena molemmissa tavoissa on poistaa suurin osa puukuituja toisiinsa sitovasta ligniinistä. Kaikkea ligniiniä ei saada poistettua, koska muuten keiton olosuhteet olisivat liian rajut ja johtaisivat kuitujen vahingoittumiseen. Keiton aikana havupuumasasta saadaan 96 - 97 % ja lehtipuumasasta 97 - 97,5 % ligniinistä poistettua. Loppu ligniini poistetaan massan valkaisuissa. (Isotalo 2004.) (Seppälä ym. 2001.)

Keiton jälkeen massa pestään, pesussa massasta on tarkoituksena erottaa keitossa liennut puuaines ja keittokemikaalit. Pesu aloitetaan pesulipeällä, joka laimentaa ja poistaa massassa olevaa mustalipeää ja näin kemikaalit saadaan mahdollisimman laimentamattoman takaisin. Pesulipeän jälkeen massaa pestään kuumalla vedellä. (Isotalo 2004.) (Seppälä ym. 2001.)

Ennen valkaisuuta massa lajitellaan eli siitä poistetaan epäpuhtauksia kuten oksat, tikut, kuori- ja uteroskat, jotka tulevat raaka-aineesta. Muita epäpuhtauksia ovat kumi, hiekka, kivet, noki, metalli, ruoste ja muovi. Näitä epäpuhtauksia voi päätyä massan sekaan raaka-aineen keruun ja kuljetuksen aikana. Lajittelussa käytettävä laitteisto koostuu pääosin erilaisista sihteistä, joissa massa läpäisee sihdin, mutta epäpuhtaudet eivät, pyörrepuhdistimista, jotka perustuvat keskipakovoimaan ja virtausvastuksiin sekä laskeutumista, joissa painavimmat epäpuhtaudet laskeutuvat laskeutusaltaan pohjalle. (Isotalo 2004.) (Seppälä ym. 2001.)

Kun massasta on poistettu epäpuhtaudet, massa valkaistaan eli massasta poistetaan siinä oleva loppu ligniini. Käytännössä valkaisu prosessi on samankaltainen keittoprosessin kanssa mutta eri kemikaaleilla. Valkaisuissa käytettäviä kemikaaleja ovat kloori, natrium hypokloriitti, klooridioksidi, happi, otsoni, vetyperoksidi, natriumperoksidi. Edellämainitut ovat hapettavia kemikaaleja, jotka reagoivat ligniinin kanssa. Lisäksi käytetään natriumhydroksidia edellämainittujen kemikaalien poistamiseksi. Apukemikaaleina käytettävät kemikaalit ovat rikkidioksidi, rikkihappo ja natriumhydroksidi. Kloorin käytöstä ollaan nykyään luovuttu pohjoismaissa täysin ja klooridioksidia pyritään korvaamaan otsonilla ympäristönsuojelullista syistä. Valkaisu voidaan tehdä eri sekvensseillä, eli kemikaali yhdistelmillä, määrättyssä järjestyksessä, joita on nykyään Suomessa käytössä n. 20. Pääosin valkaisu prosessissa noudatetaan seuraavaa sekvenssiä: klooridioksidi – happi, natriumhydroksidi, vety- tai natriumperoksidi – klooridioksidi – happi, vety- tai natriumperoksidi. Eri vaiheiden välillä ja lopuksi massaa pestään vedellä. (Isotalo 2004.) (Seppälä ym. 2001.)

Valkaisun jälkeen massalle suoritetaan jälkilajittelu, joka tehdään samoilla prosesseilla kuin ensimmäinenkin lajittelu. Tämä tehdään, jotta loputkin epäpuhtaudet saadaan erotettua massasta. (Isotalo 2004.) (Seppälä ym. 2001.)

Kun massa on valkaistu ja siitä on poistettu epäpuhtaudet, massa kuivataan ja paalataan. Näin toimitaan niissä tehtaissa, joiden yhteydessä ei ole paperitehdasta. Kuivatun massan kosteusprosentti on n. 10 %. Kuivauksessa massa märkärainataan, kuten kappaleessa 3.3 on kuvattu, erotuksena se, että tässä vaiheessa ei suoriteta kalanterointia ja tämän vaiheen lopputuotteena on selluarkkeja, jotka kootaan paaleiksi. Paaleina olevat selluarkit ovat valmiita kuljetukseen. (Isotalo 2004.) (Seppälä ym. 2001.)

### 2.1.1 Havusellu

Havusellu on havupuiden kuten kuusen ja männyn selluloosasta valmistettua sellua. Havusellun kuidut eli trakeidit ovat pitkiä ja niiden tiheys on matala, mutta joillain havupuilla on myös lyhyitä kuituja. Suomessa kasvavien mäntyjen ja kuusten kuitujen pituus on keskimäärin 3 mm, kuitujen pituudet ja leveydet voivat vaihdella jopa puukohtaisesti. (Ilvessalo-Pfäffeli 2015.)

Kuitujen tehtävänä puussa on veden kuljettaminen sekä puun rungon tukeminen. Näiden kuitujen osuus puun rungon tilavuudesta on 90 - 95 %. (Ilvessalo-Pfäffeli 2015.)

### 2.1.2 Lehtisellu

Lehtisellu on vastaavasti lehtipuiden kuten koivun ja eukalyptuksen selluloosasta valmistettua sellua. Lehtipuut ovat kehittyneempiä kuin havupuut ja niillä on enemmän solulaajeja. Lehtipuiden kuidutkin voidaan jakaa kahteen osaan, puusyihin ja kuitutrakeideihin. Puusyiden ja trakeidien tehtävänä on pääosin vain puun rungon tukeminen, joskin kuitutrakeidit voivat myös kuljettaa vettä. Lehtipuiden kuidut ovat pääsääntöisesti lyhyempiä ja tiheämpiä kuin havupuiden. (Ilvessalo-Pfäffeli 2015.)

Useinmiten molempia kuitutyyppejä esiintyy samassa puussa, mutta puusyitä on enemmän. Kuitujen pituus keskimäärin on 0,7 - 2,0 mm, Suomessa kasvavalla rauduskoivulla 0,8 - 1,8 mm. Kuitujen osuus puun rungon tilavuudesta on 30 - 75 %. (Ilvessalo-Pfäffeli, 2015.)

## 2.2 Muovit

Muovit ovat suurimolekyylisiä aineita eli polymeerejä, joita valmistetaan yleisimmin synteettisesti öljynjalostuksen sivutuotteista. Erilaisia muoveja on hyvin paljon ja ne ovat hyvin räätälöitävissä, joten muovien käyttökohteita on myös hyvin paljon. Muoveja voidaan jaotella monin eritavoin, mutta yleisimmät jakotavat ovat: kesto- ja kertamuovit, homo- ja kopopolymeerit sekä osakiteiset ja amorfiset muovit. (Airasmaa ym. 1991.) (Järvinen 2017.) (Kurri ym. 2008.)

Kesto- ja kertamuovien erona on, että kestumuoveja voidaan lämmön ja paineen avulla muokata ilman, että niiden rakenne hajoaa. Tämä johtuu siitä, että kestumuovien polymeeriketjujen välillä ei ole primäärisidoksia, joten nämä sidokset eivät voi myöskään hajota. Kertamuoveilla polymeeriketjujen välillä on primäärisidoksia, jotka uudelleen lämmitettäessä hajoavat ja materiaalin rakenne muuttuu ja hajoaa. (Airasmaa ym. 1991.) (Järvinen 2017.) (Kurri ym. 2008.)

Homo- ja kopopolymeerien erona on, monestako eri monomeerityypistä polymeeriketjut koostuvat. Homopolymeerit koostuvat vain yhdenlaisesta monomeeristä ja kopopolymeerissa kahdesta tai useammasta. Yhdistämällä erilaisia monomeereja voidaan muovin ominaisuuksia räätälöidä. (Airasmaa ym. 1991.) (Järvinen 2017.) (Kurri ym. 2008.)

Osakiteisten ja amorfisten muovien erona on, miten polymeeriketjut ovat järjestäytyneet. Osakiteisissä muoveissa polymeeriketjut ovat muodostaneet järjestäytyneitä alueita eli kristallititeja, amorfisissa muoveissa polymeeriketjut eivät ole järjestäytyneet, vaan ovat täysin satunnaisesti. Materiaali on osakiteinen sen kiteisyysasteen ollessa yli 5 - 10 %, käytännössä 100 %:n kiteisyyttä ei voida saavuttaa ja yleisimpien muovien maksimi kiteisyysaste on n. 95 %. (Airasmaa ym. 1991.) (Järvinen 2017.) (Kurri ym. 2008.)

### 2.2.1 Polypropeeni (PP)

Polypropeeni on kestumuovi, joka on valmistettu propeenista, jota syntyy öljynvalmistuksen sivutuotteena. Propeenia polymeroidaan Ziegler–Natta-katalyytin avulla, jolloin syntyy polypropeenia. Syntyvän polypropeenin avaruusrakenne riippuu käytetystä

katalyytista, eri avaruusrakenteet ovat isotaktinen, ataktinen ja syndiotaktinen, joista isotaktinen on yleisin. (Seppälä 2008.)

Polypropeeni jaetaan kahteen eri tyyppiin, homo- ja kopolymeeriin. Homopolymeeri koostuu pelkästään propeeniketjusta ja on käytetyin polypropeenityyppi. Kopolymeerissä propeeniketjun lisäksi on polyeteeniketju, joka tekee polypropeenista pehmeämpää ja venyvämpää ja kasvattaa materiaalin iskunkestävyyttä. (Järvinen 2000.)

Polypropeeni on maailmalla hyvin paljon käytetty muovi sen edullisen hinnan, monien käyttömahdollisuuksien sekä hyvän työstettävyyden takia. Polypropeenista valmistetaan mm. kuitukankaita, naruja, köysiä, kalvoa, levyä ja ruiskuvalutuotteita. (Järvinen 2000.)

### 2.2.2 Polyeteeni (PE)

Polyeteenit ovat eteenistä valmistettuja kertamuoveja, eteeniä valmistetaan lämpökrakkamalla raakaöljyä. Polyeteenit ovat maailman käytetyimpiä muoveja, koska polyeteenistä on monta eri tyyppiä, joista voidaan valita oikea tyyppi haluttuun käyttötarkoitukseen. Eteeniä voidaan polymeroida eri tavoilla ja valittu tapa vaikuttaa, mitä polyeteeniä saadaan tuloksena. Pääsääntöisesti mitä korkeampi paine polymeroinnissa on, sitä matalatiheysisempää saatu polyeteeni on. Esimerkiksi pientiheysisen polyeteenin polymeroinnissa paine on 1000-3000 bar ja suuritiheysisen polyeteenin polymeroinnissa alle 100 bar. (Airasmaa ym. 1991)

Polyeteenit jaetaan yleensä tiheydensä mukaan kolmeen eri tyyppiin, lineaariseen pientiheyspolyeteeniin (PE-LLD), pientiheys polyeteeniin (PE-LD) ja suuritiheys polyeteeniin (PE-HD), joista pientiheys polyeteeni on käytetyin. (Seppälä 2008.) (Airasmaa ym. 1991.)

PE-LLD:ssä polymeeriketju on haaroittunut ja kaikki haarat ovat lyhyitä ja niitä on vähemmän kuin PE-LD:ssa, tasaisemman rakenteen ansiosta PE-LLD on sitkeämpää ja lujempaa kuin PE-LD. PE-LLD:n pääkäyttökohteina on erilaiset pakkauskalvot. (Seppälä 2008.) (Airasmaa ym. 1991.)

PE-LD:ssä polymeeriketju on haaroittunut ja sen haarojen pituus voi vaihdella. Tämä rakenne tekee PE-LD:sta venyvän ja taipuisan ja nämä ominaisuudet tekevät siitä hyvän materiaalin erilaisten kalvojen ja putkien raaka-aineeksi. (Seppälä 2008.) (Airasmaa ym. 1991.)

PE-HD:n rakenne on kiteisempi kuin PE-LD:n tai PE-LLD:n, jolloin se on jäykempää ja lujempaa. Rakenteensa takia PE-HD:tä käytetään enemmän ruiskuvalu- ja puhallusmuovaustuotteiden ja putkien ja levyjen valmistukseen. (Seppälä 2008.) (Airasmaa ym. 1991.)

### 2.3 Luonnonkuitukomposiitit

Komposiitissa kahta tai useampaa materiaalia on yhdistetty siten, että ne eivät ole sekoittuneet toisiinsa esimerkiksi hajoamalla tai liukenemalla, mutta ovat kemiallisessa ja fyysisessä vuorovaikutuksessa. Luonnonkuitukomposiiteissa on käytetty luonnosta saatavia kuituja, kuten sellu- tai hamppukuitua muovimateriaalin lujittamiseksi sekä korvaamaan muovia. Komposiiteissa käytetään myös lisäaineita, kuten esimerkiksi kyt-kentä-, väri- ja liukuaineita, aina haettujen ominaisuuksien mukaan. Pelkkä muovin ja luonnonkuidun sekoittaminen harvoin tuottaa haettua tulosta ja useimmiten luonnonkuidun lisääminen muoviin ilman lisäaineita vain heikentää muovia, kyt-kentäaineilla materiaalin mekaanisia ominaisuuksia saadaan kasvatettua monia kymmeniä prosentteja (Mohan ym. 2021). Myös kuidun omat ominaisuudet, kuten pituus ja leveys vaikuttavat komposiitin ominaisuuksiin. Pitkät ja kapeat kuidut tuovat komposiittiin lujuutta ja lyhyet ja leveät kuidut toimivat täyteaineen tavoin. (Koto ym. 2004.) (Airasmaa ym. 1991.)

Luonnonkuitukomposiitteja voidaan käyttää monissa sovelluksissa, missä nykyään käytetään puhtaasta muovista valmistettuja tuotteita ja komponentteja, kuten viemäriputket, erilaisten kodinlaitteiden kotelot ja autojen sisustojen muoviosat. (Koto ym. 2004.)

Luonnonkuitukomposiitteja voidaan prosessoida pitkälti samoilla prosessointimenetel-millä kuin muovejakin, joten prosessoinnin aikana muovien vaatimat korkeat lämpötilat ovat haasteena ja rajoittavat, mitä muoveja komposiiteissa voidaan käyttää. Rajana voidaan pitää 200 - 220 °C:een lämpötilaa, jossa lignoselluloosa hajoaa. (Koto ym. 2004.)

## 3 PROSESSIT

Luonnonkuitukomposiitin valmistus koostuu monesta yksikköprosessista, jotka suoritetaan tietyssä järjestyksessä. Prosessit esitellään tässä kappaleessa siinä järjestyksessä missä ne on työn aikanakin tehty.

### 3.1 Jauhatus

Sellumassaa jauhetaan ennen kuin se prosessoidaan paperiksi, koska ilman jauhatus sellumassan kuidut eivät tartu tarpeeksi hyvin toisiinsa, tehden paperista heikkoa. Jauhatus vaikuttaa kuudella erilaisella tavalla sellukuitujen ominaisuuksiin, näitä ovat: ulkoinen fibrillaatio, sisäinen fibrillaatio, kuidun seinämän nivelkohtien syntyminen, kuitujen katkeaminen, hienoaineen syntyminen ja kuidun aineosien muuttuminen liuenneiksi ja kolloidiseksi aineiksi. (Seppälä ym. 2001.)

Ulkoisessa fibrillaatiossa kuidun ulkopinnat irtoavat osittain ja haiventuvat. Nämä haivenet edistävät kuitujen tarttumista toisiinsa, koska ne eivät ole yhtä jäykkiä kuin itse kuidut ja tekevät kuidun sileästä pinnasta karheamman. (Seppälä ym. 2001.)

Sisäisessä fibrillaatiossa vesi tunkeutuu kuidunseinämien väliin, mikä tekee kuiduista notkeampia ja turvonneita. Notkeammat kuidut kietoutuvat helpommin toistensa ympärille. (Seppälä ym. 2001.)

Kuidun seinämän nivelkohtien syntyemisessä kuituseinämiä murtuu ja kuitu on tällaisesta nivelkohdasta liian notkea ja taipuva, tästä seuraava vaihe on kuidun katkeaminen. (Seppälä ym. 2001.)

Kuitujen katkeaminen ei ole toivottu tapahtuma, sillä se heikentää massaa tehden siitä valmistettavasta rainasta ja paperista helposti repeävää. Koska on saatavilla jo luonnostaan lyhyitä kuituja, ei pitkien kuitujen katkominen ole toivottavaa. (Seppälä ym. 2001.)

Hienoaineen syntyemisellä tarkoitetaan kuidun ja kuituseinämien jauhautumista hienoiksi partikkeleiksi. Nämä partikkelit tiivistävät kuituja toisiinsa. Kuitujen tiivistämisellä toisiinsa on valmistettavan rainan ja paperin vahvuuden kannalta positiivinen vaikutus. (Seppälä ym. 2001.)

Kuidun aineosien muuttuminen liuenneiksi ja kolloidiseksi aiheuttaa saantotappiota, eli osa kuidusta menee hävikkiin. Lisäksi nämä kuidusta irtoavat ainesosat häiritsevät paperin valmistusprosessia eikä niitä haluta myöskään jätevesiin. (Seppälä ym. 2001.)

### 3.2 SR – luvun määrittäminen

SR eli Schopper-Riegler-luku kertoo sellumassan jauhatuksesta. SR-luvun mittauksessa mitataan, miten vesi virtaa sellumassasta muodostuvan kerroksen läpi. Mitä pidemmälle sellumassaa jauhetaan, sitä tiiviimmän kerroksen sellumassa muodostaa ja sitä hitaammin vesi virtaa sen läpi, jolloin SR-luku on korkea. (EN ISO 52671:2000)

Lyhyemmällä jauhatuksella sellukuidut jäävät pidemmiksi, jolloin ne eivät muodosta niin tiivistä kerrosta. Tällöin vesi pääsee nopeammin virtaamaan kerroksen läpi, ja SR-luku on matala. (EN ISO 52671:2000)

### 3.3 Märkärainaus

Märkärainausprosessissa märästä sellumassasta tehdään paperia ja linja voidaan jakaa kahteen pääosaan: märkä- ja kuivapäähän. Märkäpää on prosessin aloituspää ja voidaan jakaa yleensä kolmeen osaprosessiin, eli perälaatikkoon, viiraan ja vedenpoistoon mekaanisesti tai alipaineella. Kuivapää on prosessin loppupää, jossa paperista poistetaan lisää vettä ja joka voidaan jakaa kahteen tai kolmeen osaan: kuivatussyylintereihin tai jenkki-kuivaimiin, kalanteriin ja rullaimeen. (Pihkala ym. 1982.)

Perälaatikolla märkä sellumassa, jonka kuitupitoisuus on 0,2 – 1,2 % levitetään viiralle tasaiseksi kerrokseksi, rainaksi. Viira on muovi- tai metallikankaasta kudottu kangas, joka kuljettaa sellumassaa imulaatikoiden yli ja märkäpuristimen läpi. Viiralla poistetaan suurin osa massan vedestä. Viiralla tulee olla oikea läpäisevyys, jotta vesi pääsee sen läpi pelkästään painovoiman avulla. Sellumassa ei saa läpäistä viiraa alipaineen tai mekaanisen voiman vaikutuksesta. (Pihkala ym. 1982.)

Kuivapäässä rainasta poistetaan lähes kaikki jäljellä oleva vesi ohjaamalla raina kuivatussyylinterien päältä. Kuivatussyylintereitä voi olla linjalla jopa kymmeniä, raina painetaan

kireäksi näitä sylintereitä vasten erillisellä kuivatusviiralla, jolloin kuivaus tehostuu. Kuivauksessa voidaan käyttää myös jenkkiuivainta. Tällöin käytössä on vain yksi iso sylinteri, jonka ympäri raina kulkee ja sitä kuivataan puhaltamalla kuumaa ilmaa sen läpi. (Pihkala ym. 1982.)

Kalanteroinnissa rainaa puristetaan erittäin sileiksi hiotuilla valurautateloilla, jolloin raina kiillottuu ja se painetaan haluttuun paksuuteen. (Pihkala ym. 1982.)

Lopuksi valmis raina rullataan rullaimella teräs- tai pahvisylinterin ympärille ja leikataan määrämittaansa. (Pihkala ym. 1982.)

### 3.4 Ekstruusio

Ekstruusio eli suulakepuristus on muovimateriaalin työstömenetelmä, jossa muovigranulaatti tai -jauhe sulatetaan ja puristetaan suuttimen läpi, jolloin tuotteena saadaan suuttimen muotoista muoviprofiilia. Ekstruusiolla valmistetaan pääosin kalvoja, putkia, levyjä, tankoja, köysiä sekä sitä käytetään erilaisten kaapelien, kankaiden, paperien ja kartonkien päällystykseseen. (Kurri ym. 2008.)

Ekstruuderin koostuu viidestä pääosasta: syötin, sylinteri, ruuvi, lämpövastukset sekä suutin. Edellä mainittujen lisäksi ekstruusiolinjaan yleensä kuuluu jäähdytysosa, kaasunpoisto, kelain- tai granulointilaitteisto. (Kurri ym. 2008.)

Syöttimen tehtävä on syöttää muovimateriaali mahdollisimman tasaisena virtana ekstruuderin sylinteriin, sillä epätasainen syöttö johtaa epätasaiseen prosessiin, jolloin valmistettava muoviprofiili- tai granulaatti on epätasaista. Syötin on yleensä suppilo, josta materiaali valuu suoraan ekstruuderin sylinteriin. Vaihtoehtoisesti materiaali voidaan ruuvikuljettimen avulla ohjata syöttimestä ekstruuderiin. (Kurri ym. 2008.)

Sylinteri on on ekstruuderin osa, joka sisältää ruuvin ja jonka ympärillä lämpövastukset ovat. Ruuvi kuljettaa sekä sekoittaa muovimateriaalia sulattamalla sen kitkan ja lämpövastusten luoman lämmön avulla sekä painaa sitä tasaisella paineella ekstruuderin suuttimen läpi. Pääosa prosessin lämmöstä tulee kitkasta ja lämpövastukset toimivat lähinnä hienosäätönä. (Kurri ym. 2008.)

Suutin määrittää minkälaisena valmistettava muoviprofiili tulee laitteesta ulos, minkä takia suuttimen pitää sallia materiaalin tasainen virtaus koko suuttimen läpi. Jos

materiaalin virtaus on epätasaista, syntyy epätasaista muoviprofiilia tai -granulaattia. (Kurri ym. 2008.)

### 3.5 Ruiskuvalu

Ruiskuvalu on prosessi, jolla muovista valmistetaan erilaisia muotokappaleita ja se on yleisin prosessi, jolla näitä tuotteita valmistetaan. Prosessin alkuvaihe on kuin ekstruusi-ossa, mutta suuttimesta sula materiaali ruiskutetaan korkealla paineella muottiin, joka määrää valmistettavan kappaleen muodon. (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

Ruiskuvalulla voidaan valmistaa suuria kappalesarjoja ja kappaleet voivat olla todella pieniä, massaltaan alle 0,001 g tai hyvinkin isoja, jolloin massa voi olla jopa 90 kg. Prosessi on myös täysin automaattinen prosessiparametrien hakemisen ja asettamisen jälkeen. (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

Prosessi voidaan jakaa kahdeksaan eri vaiheeseen: muotin sulkeminen, ruiskutus, jälkipaine, annostus, jäähdytys, muotin avaaminen, kappaleen ulostyöntö ja tauko aika. (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

Muotin sulkemisessa laitteen muotin kaksi puolikasta painautuvat kiinni ja niitä pidetään kiinni kovalla paineella, jotta ne eivät vuoda tai aukea, kun sula muovimateriaali ruiskutetaan muottiin. Muottia jäähdytetään prosessin aikana vesi- tai muulla jäähdytysainekierrolla, jotta muotti ei lämpene liikaa. Liian lämpimällä muotilla valmistettavat kappaleet ei kiinteydy ja saattavat jäädä muottiin kiinni. (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

Kun muotin puolikkaat ovat kiinni, sula muovimateriaali syötetään muottiin korkealla paineella. Näin se täyttää koko muotin tasaisesti ja valmistettavaan kappaleeseen ei jää heikkoja kohtia tai alitäyttöä, joka ilmenee valmistettavassa kappaleessa kuoppina. (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

Ruiskutuksen jälkeen laitteen ruuvi pitää muotissa vielä jälkipainetta, joka kompensoi muovin jäähtymisestä johtuvaa kappaleen kutistumista. Jälkipaineaika riippuu käytettävästä muovista, sillä eri muovit kutistuvat eri tavalla. (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

Kun laite on ruiskuttanut muovia muottiin, laite ottaa syöttösuppilosta uuden annoksen materiaalia eli täyttää sylinterin. Annoksen ottaminen pitää ruuvien täynnä, jotta kaikkiin sarjassa valmistettaviin kappaleisiin ruiskutetaan sama määrä materiaalia samalla paineella ja kappaleet pysyvät tasalaatuisina. (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001)

Samalla, kun laite ottaa uutta annosta, muottiin valettu kappale jäähtyy muotissa ja kiinteytyy. Jos kappaleen ei anneta jäähtyä tarpeeksi, kappale ei irtoa muotista. (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

Kun kappale on jäähtynyt tarpeeksi, muotin puolikkaat avautuvat ja muotin siinä puolikkaassa, joka ei ole suuttimen puolella, ovat ulostyöntötavat työntävät valmiin tuotteen ulos muotista. Tauko-aika on lyhyt aika, jolloin muotin puolikkaat ovat auki, jotta kappale ehtii pudota niiden välistä. Tämän jälkeen prosessi alkaa alusta. (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

Prosessin aikana käytetty paine, jota käytetään muotin avaamiseen, kappaleen ulostyöntämiseen sekä ruuvien ja sylinterin liikuttamiseen luodaan hydraulikkapumpulla. Pumppu paineistaa järjestelmässä olevan hydraulikkanesteen, joka ohjataan ruiskuvalukoneen eri osille. (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

### 3.6 Muovimateriaalin lujuuden määrittäminen

Vetolujuustestissä määritetään materiaalin vetokimmomoduuli, vetolujuus, myötöraja, murtolujuus sekä venymä. Nämä eri ominaisuudet kertovat materiaalin lujuus-, sitkeys- ja jäykkyysominaisuuksista. Testien tuloksia käytetään laadunhallinnassa, materiaalien vertailussa sekä materiaalien valinnassa. (Seppälä 2008.) (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

Vetotestissä koekappaletta venytetään, hitaasti tasaisella nopeudella pituussuunnassa ja mitataan venyttämiseen vaadittavaa voimaa. Vetolaite jolla testi tehdään, piirtää testin edetessä voima venymä -kuvaajaa, josta nähdään materiaalin käyttäytyminen. Vetokappaleen mitat on määritelty standardissa ISO 527-2:2012 "Determination of tensile properties. Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics" ja testausmenetelmä standardissa ISO 527-1:2019 "Determination of tensile properties. Part 1: General principles". (Seppälä 2008.) (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

Vetokimmomoduuli (MPa) kertoo materiaalin jäykkyydestä. Ominaisuus mitataan voima venymä -kuvaajan lineaariselta osalta, alueelta, jossa venymä on 0,05 - 0,25 %, ja moduuli on käyrän lineaarisen osan kulmakerroin. (Seppälä 2008.) (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

Maksimi vetolujuus on huippuvoima ( $\text{N/mm}^2$ ), jonka koekappale kestää, eli kun materiaalin maksimi vetolujuus saavutetaan, materiaalin ominaisuudet romahtavat. (Seppälä 2008.) (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

Myötöraja on piste, jonka jälkeen koekappaleessa alkaa tapahtua pysyviä muutoksia ja kappale ei palaudu enää alkuperäiseen muotoonsa. Materiaalin polymeeriketjut alkavat venyä ja avautua niin paljon että ne eivät enää palaudu muutoksesta. (Seppälä 2008.) (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

Murtolujuus (N) on voima siinä pisteessä, jossa koekappale katkeaa. Murtolujuus on yleensä pienempi kuin vetolujuus (Seppälä, 2008.) (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

Venymä (%) on prosentuaalinen muutos koekappaleen mittavälin pituudessa. Venymä kertoo kappaleen sitkeydestä. (Seppälä 2008.) (Kurri ym. 2008.) (Metalliteollisuuden keskusliitto 2001.)

## 4 KOEAJOT

Työn käytännönosuus eri koeajoissa eteni samalla kaavalla, muuttujina olivat käytetty muovi sekä jauhatustaste. Koeajot voidaan jakaa viiteen eri vaiheeseen: jauhatus, rai-  
naus, ekstruusio, ruiskuvalu ja vetotestit. Koeajoja suoritettiin kolme, joissa oli erimittai-  
set jauhatusajat: matala-, keski- ja pitkäjauhatus. Eri koeajoista ajettiin reseptit, joissa  
käytettiin polypropeenä ja polyeteeniä.

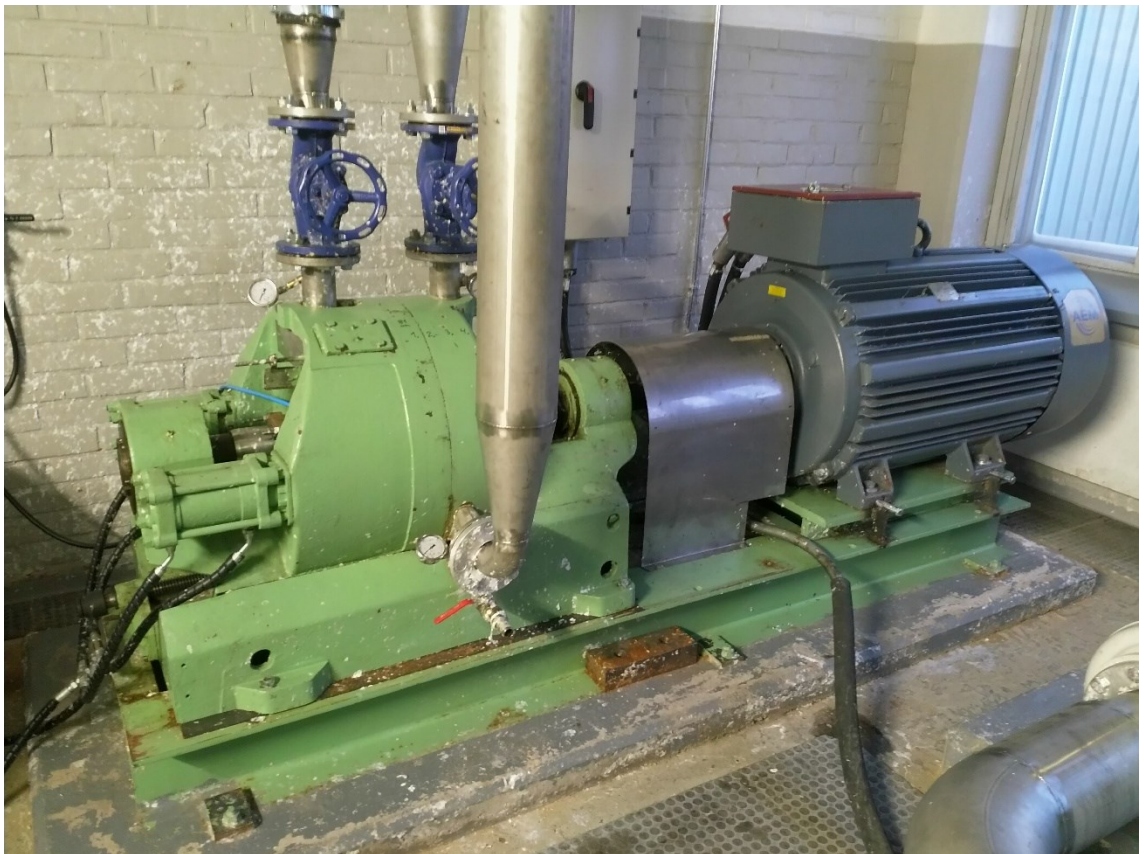
Koeajot aloitettiin pulpperoimalla kuivasellumateriaali pulpperissa märäksi sellumas-  
saksi. Sellulevyt syötettiin jauhatuspulperiin, jossa oli vettä sen mukaan, paljonko kui-  
vaa sellua oli määrä pulperoida. Valmistettavan märän sellumassan kuiva-ainepitoi-  
suus oli 4 %. Kuvassa 1 sellupaali, joka koostuu sellutehtaalla valmistetuista selluar-  
keista.



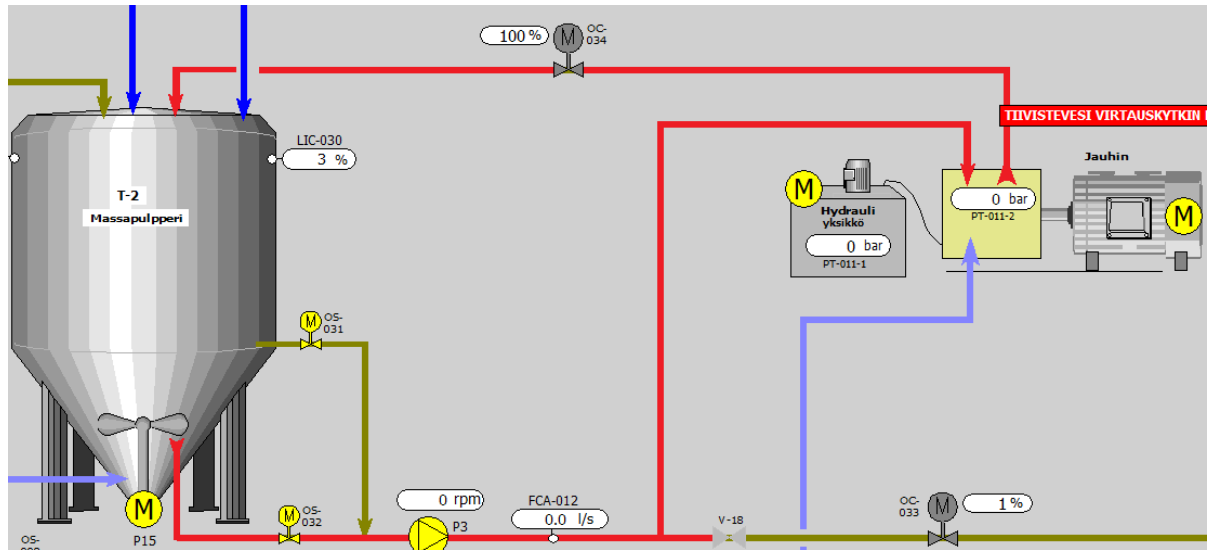
Kuva 1. Selluarkeista koostuva sellupaali.

Kun selluarkit oli syötetty pulperiin annettiin massan sekoittua n. 15 min, jotta massan laatu olisi mahdollisimman tasaista.

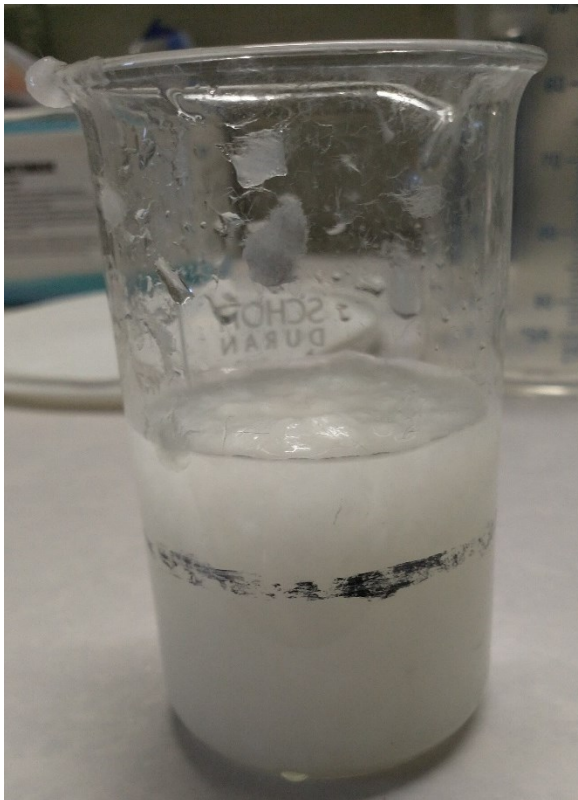
Kun massa oli seonnut, aloitettiin massan jauhatus. Jauhatuksen aikana seurattiin jauhimen käyttämää virtaa, joka pyrittiin pitämään 200:ssa A:ssa. Näin eri jauhatuksissa vain jauhatusaika oli muuttujana. Käytetty jauhin oli Ahlström TF-20. Kun massaa oli jauhettu tavoiteaika, massasta otettiin näyte, josta massan SR-luku mitattiin. Jauhin esillä kuvassa 2, jauhatuksen PI-kaavio kuvassa 3 ja jauhettua sellumassaa kuvassa 4, SR-luvun mittausta suoritettiin standardia ISO 5267 – 1:1999 ” Determination of drainability. Part 1: Schopper-Riegler method” soveltaen. Eli näytettä mitattiin 50 ml:aa ja laimennettiin 1000 ml:aan, näin testissä käytettävä laimennoksen kuiva-ainepitoisuus oli 0,2 %. SR-luvun mittausta esitetään kuvassa 5.



Kuva 2. Ahlström TF - 20 -jauhin.



Kuva 3. Jauhatuksen PI-kaavio, jauhatuksen piiri on merkitty punaisella.



Kuva 4. Neliprosenttista sellumassaa.



Kuva 5. SR-luvun mittauslaite.

SR-luvun mittauksen jälkeen massa laimennettiin niin, että sen kuiva-ainepitoisuus oli 1 %, laimennuksen jälkeen massa siirrettiin toiseen pulpperiin. Massa laimennetaan, jotta se virtaa putkistoissa ja perälaatikolla.

Siirron jälkeen massaan sekoitettiin muovia. Muoviraaka-aine oli karkeana rouheena. Liian karkea rouhe ei sekoitu massaan ja liian hieno saattaa tukkia viiraa rainauksen aikana. Märkärainauksessa muovintyyppillä ei ole suurta vaikutusta rainaukseen, sillä kuivaimen lämpötilaa pidetään kaikkien käytettävien muovin sulamispisteen alapuolella.

Muovin fyysisellä muodolla on prosessin kannalta suurempi vaikutus, kuin muovin tyy-  
pillä.

Rainauksessa massa ajettiin rainaksi, joka on kuin karkeaa paperia. Linjalta raina rullat-  
tiin rullille, jotta sitä on helpompi säilyttää ja purkaa jatkoprosessoinnissa. Kuvassa 6 on  
esimerkki valmiista rainarullasta.



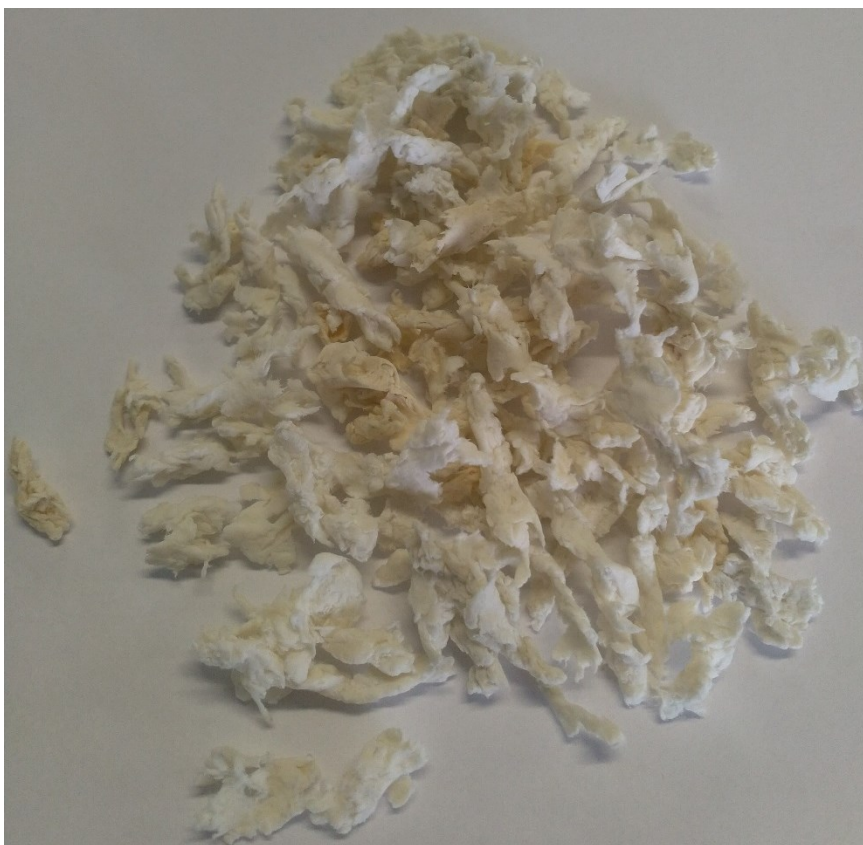
Kuva 6. Rainarulla.

Rullalta raina purettiin ekstruuderiin, jossa siitä poistettiin lisää kosteutta ja tuloksena saatiin esikompaudia, jossa muovi on sulanut kuidun ympärille. Esikompaundoinnissa ekstruuderissa ei ole suutinta kiinni, jolloin laitteesta tuleva materiaali on lastumaista, kuten kuvassa 7. Kun raina esikompaundoidaan, voidaan esikompaudia käyttää resepteissä, joista ajetaan granulaattia.

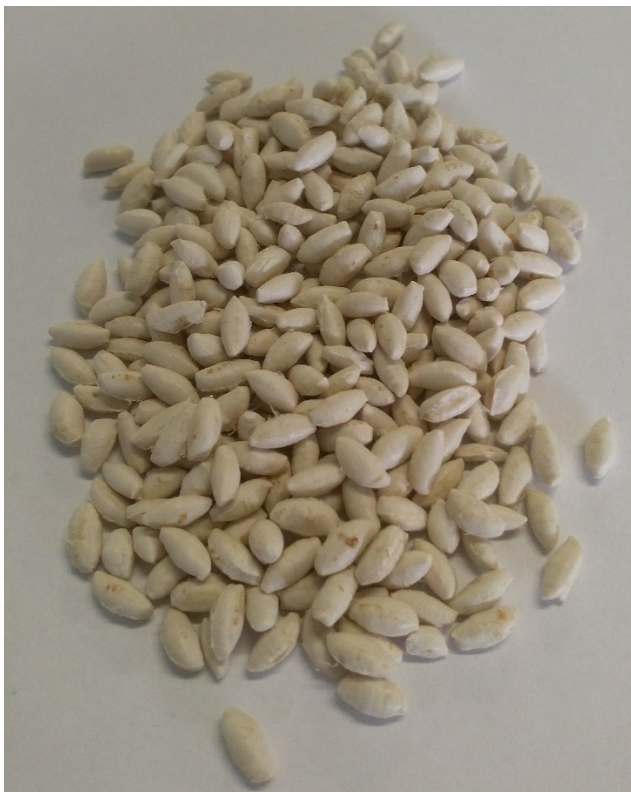
Esikompaundoinnin jälkeen sekoitettiin lopulliset reseptit, joista ajettiin granulaattia ruiskuvalua varten, kuvassa 8 on luonnonkuitukomposiittigranulaatteja. Tässä vaiheessa lisättiin vielä muovia sekä erilaisia lisäaineita, joilla valmiin komposiitin ominaisuuksia voidaan räätälöidä.

Koska käytetty kompaundointimenetelmä tehdään märkänä, eli ekstruuderista tuleva massa leikataan veden alla, granulaatteihin imeytyy kosteutta, joka kuivattiin kompaundoinnin jälkeen kuivureissa.

Kun granulaatit oli kuivattu, materiaalista ajettiin ruiskuvalulla koesauvoja, kuvassa 9, ja valmistetuista koesauvoista mitattiin materiaalin erilaisia mekaanisia ominaisuuksia kuten vetolujuutta.



Kuva 7. Ekstruuderilla rainasta valmistettua esikompaundia.



Kuva 8. Luonnonkuitukomposiittigranulaatteja.



Kuva 9. Ruiskuvalulla valmistettuja koesauvoja.

#### 4.1 Matalatason jauhatus

Matalatason jauhatuksessa sellumassaa jauhettiin lyhyt aika, koska tarkoituksena oli jauhaa massa matalaan sr-lukuun. Jauhatusaika oli 7 min ja jauhimen virta pidettiin 200 A:ssa. Massan sr-luku oli matala, joten massa oli suhteellisen karkeaa.

#### 4.2 Keskitason jauhatus

Keskitason jauhatuksessa massaa jauhettiin pidemmälle kuin matalatason jauhatuksessa. Tässäkin koeajossa jauhimen virta pidettiin 200 A:ssa, mutta jauhatusaika oli 11 min.

#### 4.3 Korkeatason jauhatus

Korkeatason jauhatuksessa massaa jauhettiin 45 min 200 A:n virralla. Massan SR-luku oli todella korkea, joten rainasta muodostui hyvin tiivistä.

#### 4.4 Energian kulutus

Rainausprosessi kuluttaa energiaa, vettä sekä kaasua. Näihin vaikuttaa pääosin kaksi päätekijää, ajoerän koko ja jauhatusaste. Ajoerän koko määrittää, paljonko vettä tarvitaan ja kauanko ajo linjalla kestää. Jauhatus kuluttaa paljon energiaa, joten jauhatusasteen kasvaessa jauhatuksen kuluttama energia kasvaa. Energian kulutus on taulukoitu liitteenä 6.

Lasketut tulokset, joissa on eri laitteiden maksimitehon käyttö laskettu yhteen, ovat vain suuntaa antavia, mutta niistä voidaan päätellä eri jauhatusten kuluttaman energian ja veden suurusluokkaa toisiinsa nähden. Tuloksista voidaan laskea, että kun jauhatusastetta kasvatetaan matalasta keskitasolle, energian kulutus kasvaa 1,5 % ja veden kulutus 0,8 %. Kun jauhatusastetta kasvatetaan keskitasolta korkealle tasolle, energian kulutus kasvaa 8,8 % ja veden kulutus 0,8 % verrattuna keskitasoon. Kaasun kulutukseen jauhatusasteella ei ollut vaikutusta.

## 5 TULOKSET

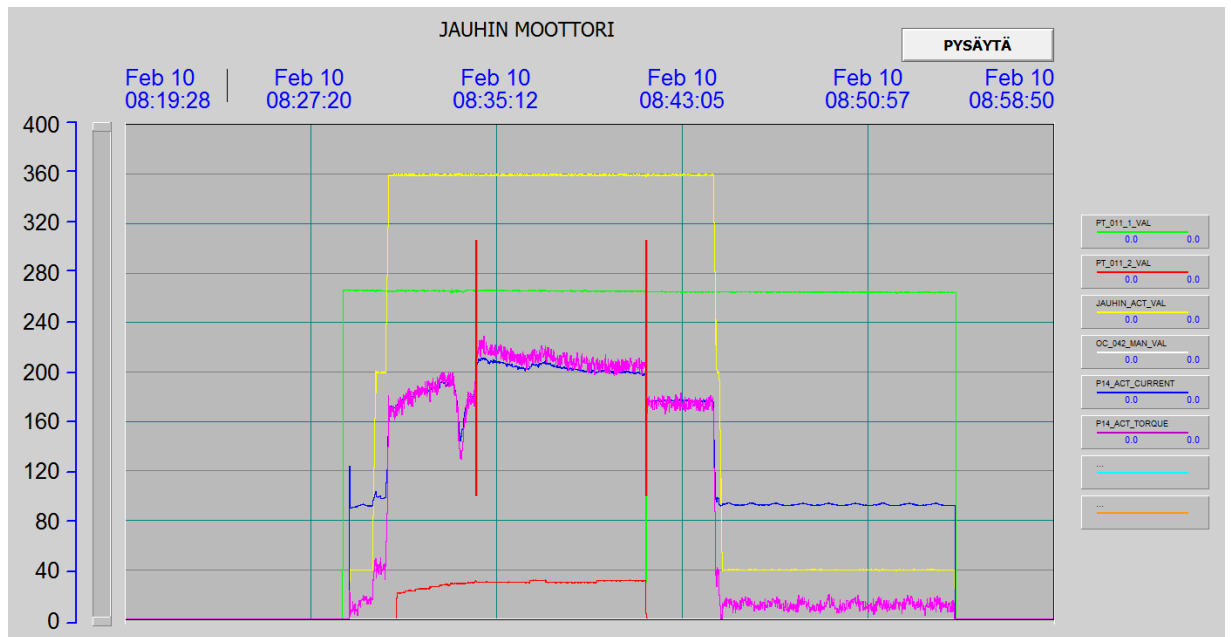
Tuloksissa vertailtiin eri jauhatuskoeajoja toisiinsa, joissa on eri jauhatusaste sekä eri muovi. Vertailua tehtiin myös havu- ja lehtipuusellujen välillä. Vetokokeissa testausnopeus oli 5 mm/min. Jauhatusasteiden vertailussa käytetään vain matala- ja korkeatason jauhatusten tuloksia, koska keskitason jauhatuksen tulokset eivät eronneet matalatason jauhatuksen tuloksista merkittävästi.

### 5.1 Märkärainauksen vertailu

Työn aikana eri jauhatusasteisten sellumassojen käyttäytymistä märkärainauslinjalla vertailtiin toisiinsa ja pääteltiin miten jauhatusasteen kohottaminen vaikuttaa prosessiin. Linjalla sellun jauhatusaste vaikuttaa huomattavasti siihen miten massasta saadaan poistettua kosteutta, tehokkaampi kosteudenpoisto tekee prosessoinnista tasaisempaa. Tietokone piirtää prosessin aikana kuvaajia jotka kuvaavat linjan eri osien eri parametrejä.

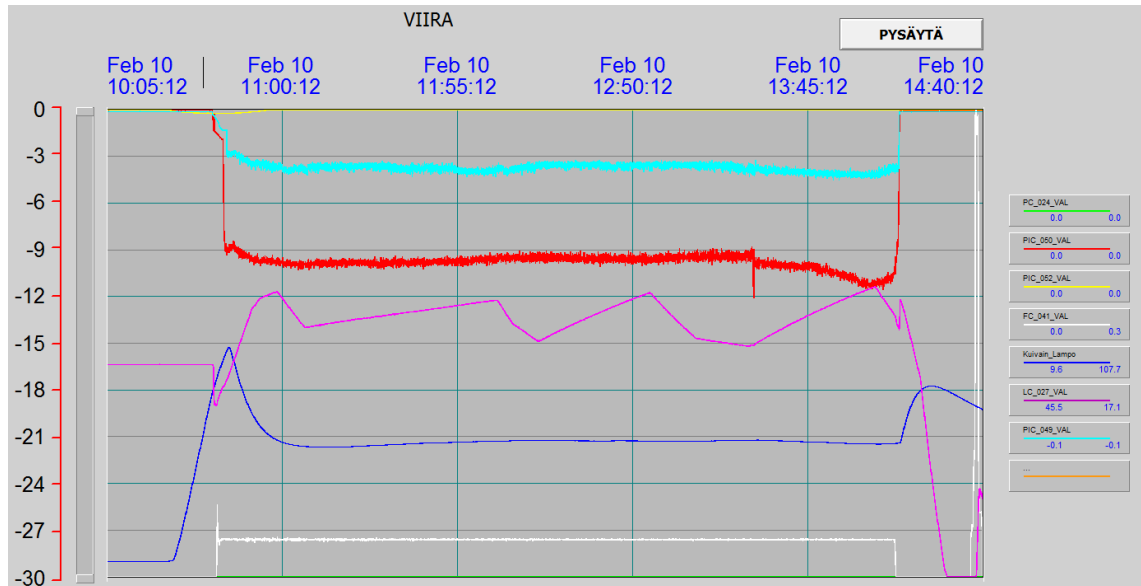
### 5.1.1 Matalatason jauhatuserän analysointi

Kuvassa 10 on tietokoneen piirtämä kuvaaja jauhatuksen etenemisestä. Kuvasta seurataan sinistä trendiviivaa, joka on jauhimen käyttämä virta. Kuvaan on merkitty punaisilla pystyviivoilla, missä kohdassa jauhatus on käynnissä.

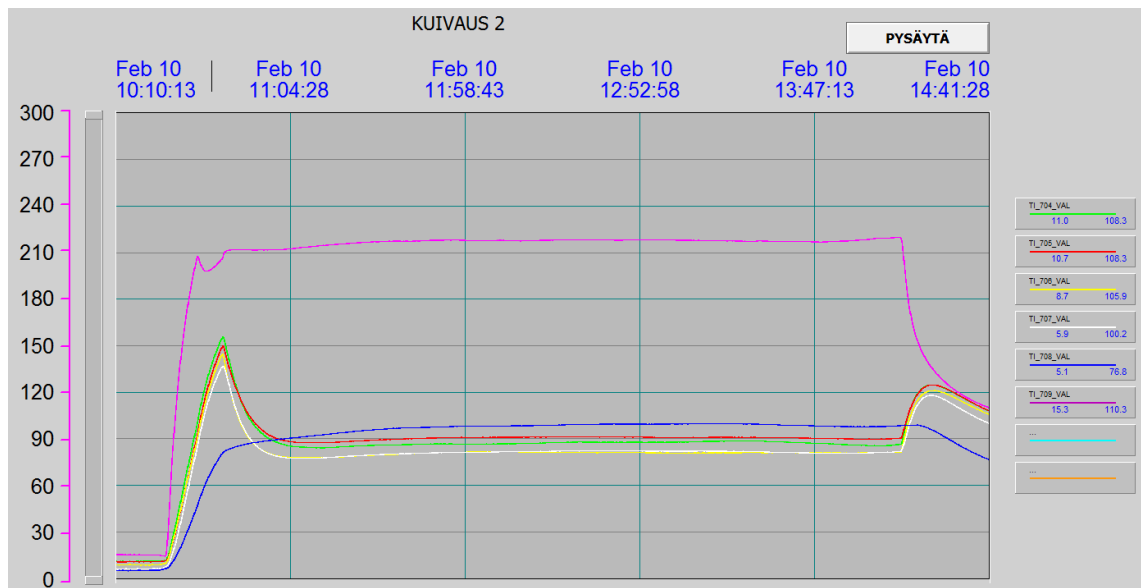


Kuva 10. Matalatason jauhatuserän jauhatusprosessin trendiviivat esittävät jauhatuksen eri parametrejä.

Rainauksessa vähän jauhettu massa käyttäytyi tasaisemmin kuin paljon jauhettu massa, sillä vähän jauhettu massa ei ole niin tiivistä, joten siinä oleva kosteus on helpompaa poistaa. Kuvassa 11 esitetään kuvaaja, josta näkyy punaisella rainauslinjan imulaatikoiden alipaine, sinisellä kuivaimen lämpötilojen keskiarvo ja violetilla viirakaivon pinnantas. Viirakaivon pintaa säädettiin käsiventtiillillä, joten kaivon pintaa oli haastava pitää tasaisena. Kuvassa 12 esitetään kuvaaja, josta ilmenee, miten linjan kuivain on käyttäytynyt. Violetti trendiviiva esittää kuivaimen puhallettavan ilman lämpötilaa, muut viivat ovat eri lämpötilavyöhykkeiden lämpötiloja. Molemmista kuvista 11 ja 12 huomataan, että vähän jauhettu massa käyttäytyi linjalla ja kuivaimessa hyvin tasaisesti koko prosessin ajan. Myös rainan rullaus oli tasaista eikä raina katkeillut rullauksen aikana.



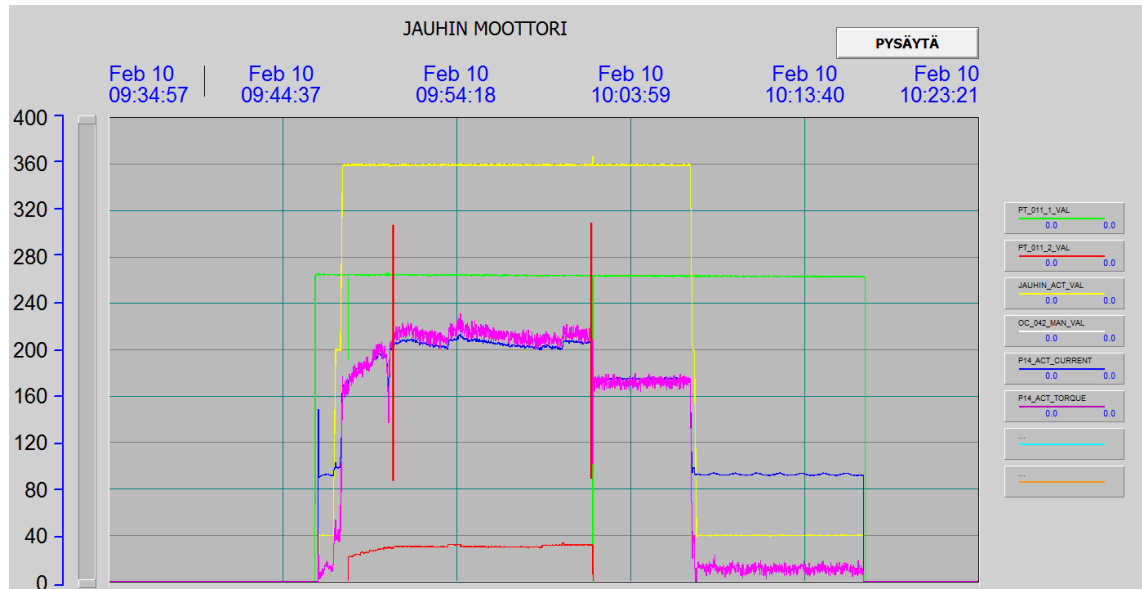
Kuva 11. Matalatason jauhatuserän rainausprosessin trendiviivat esittävät linjan märkäosan eri parametrejä.



Kuva 12. Matalatason jauhatuserän kuivauksen trendiviivat esittävät linjan kuivaimen lämpötiloja kuivaimen eri vyöhykkeillä.

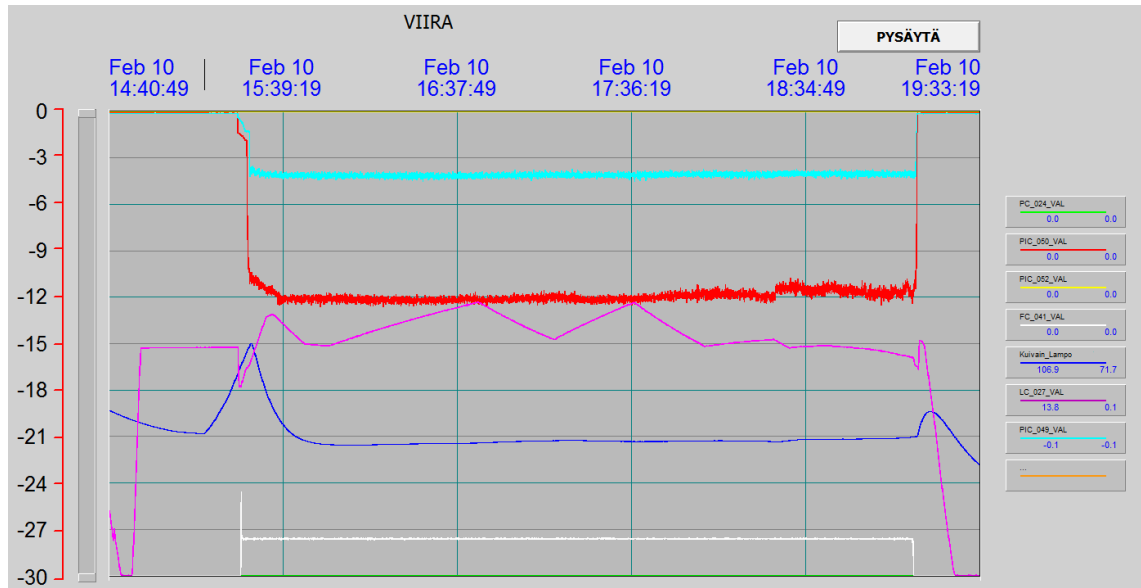
### 5.1.2 Keskitason jauhatuserän analysointi

Kuvassa 13 keskitason jauhatuksen eteneminen, kuvaajassa sininen trendiviiva on jauhimen käyttämä virta.

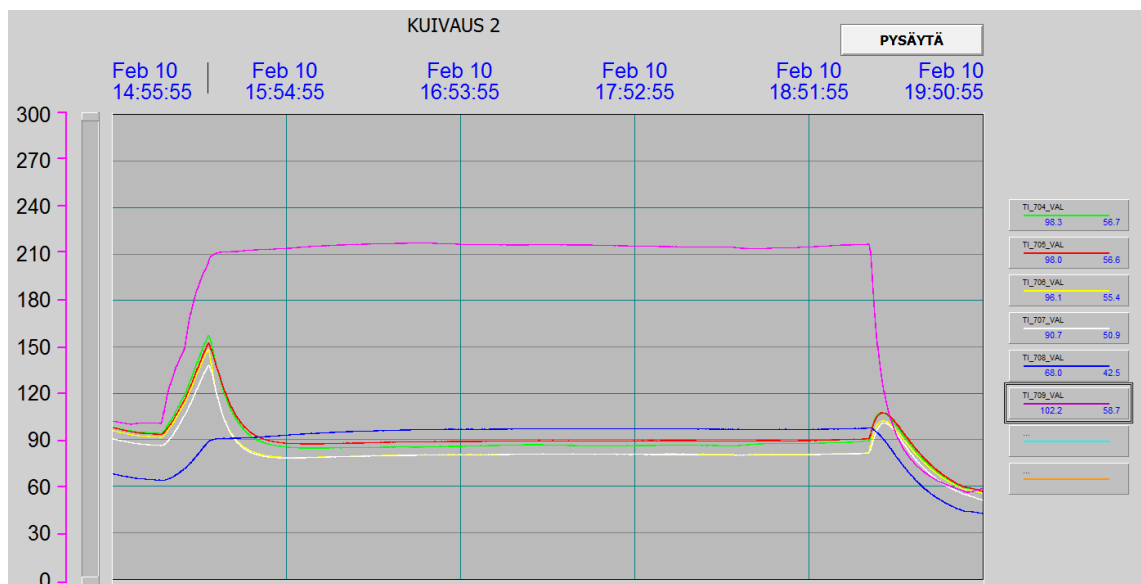


Kuva 13. Keskitason jauhatuserän jauhatusprosessin trendiviivat esittävät jauhatuksen eri parametrejä.

Keskitason jauhatuksellakin rainaus oli vielä tasaista, sillä rainasta ei muodustunut liian tiivistä, joten kosteus oli vieläkin mahdollista poistaa tehokkaasti. Kuvassa 14 esitetään kuvaaja, josta nähdään rainauksen trendiviivat, punaisella rainauslinjan imulaatikoiden alipaine, sinisellä kuivaimen lämpötilojen keskiarvo ja violetilla viirakaivon pinnantaso. Kuvassa 15 on kuivaimen trendiviivat, violetilla kuivaimen puhallettavan ilman lämpötila, muut eri lämpötilavyöhykkeiden lämpötiloja.



Kuva 14. Keskitason jauhatuserän rainausprosessin trendiviivat esittävät linjan märkäosan eri parametrejä.

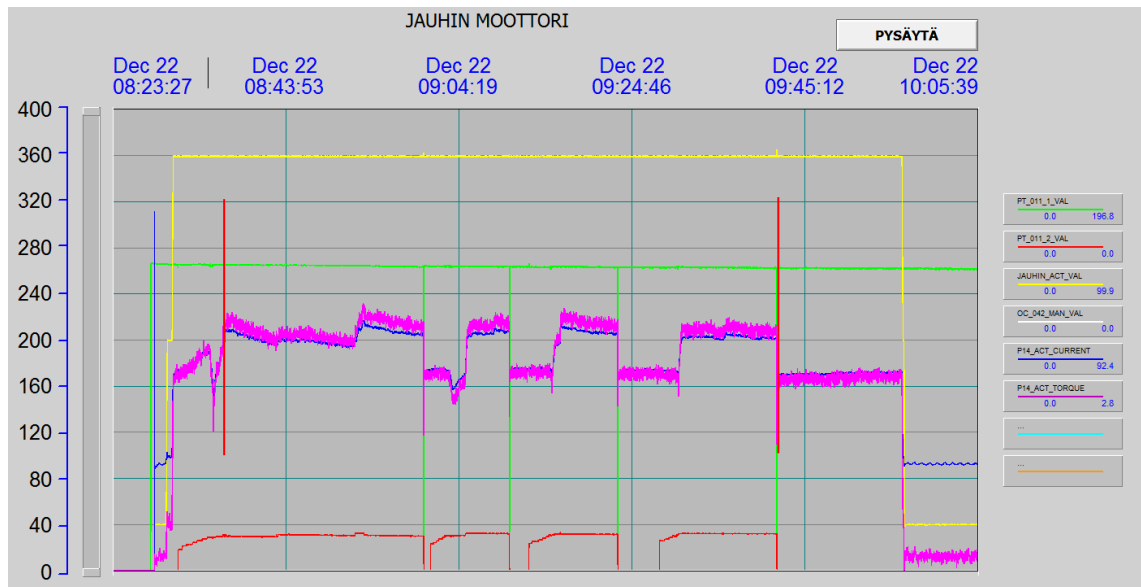


Kuva 15. Keskitason jauhatuserän kuivauksen trendiviivat esittävät linjan kuivaimen lämpötiloja kuivaimen eri vyöhykkeillä.

Kuvista 14 ja 15 nähdään, että keskitason jauhatuksellakin prosessi oli hyvin tasaista, eri parametrit pysyivät tasaisena koko koeajon ajan. Rullausta raina kesti katkeilematta ja rullista saadaan tasalaatuisia.

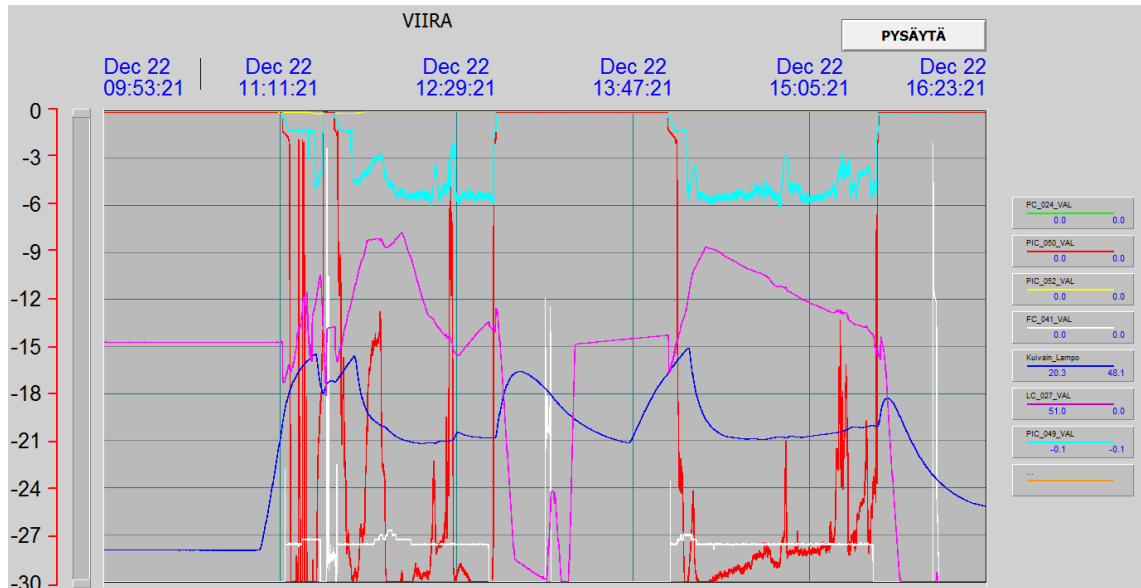
### 5.1.3 Korkeatason jauhatuserän analysointi

Kuivain ei pystynyt kuivaamaan liian märkää ja tiivistä rainaa tarpeeksi, joten rullauskin oli hyvin haasteellista. Kuvassa 16 esitetään korkeatason jauhatuksen eteneminen. Koska jauhatus kesti kauan ja jauhatuksen edetessä jauhimen virran kulutus laski, on terän painetta kasvatettu, jotta virran kulutus pysyi 200 A:ssa. Massasta myös otettiin näytteitä jauhatuksen aikana. Kuvaajassa olevat laskut ovat kohtia, joissa sr-luvun mitausta suoritetaan ja jauhatus ei ole käynnissä.

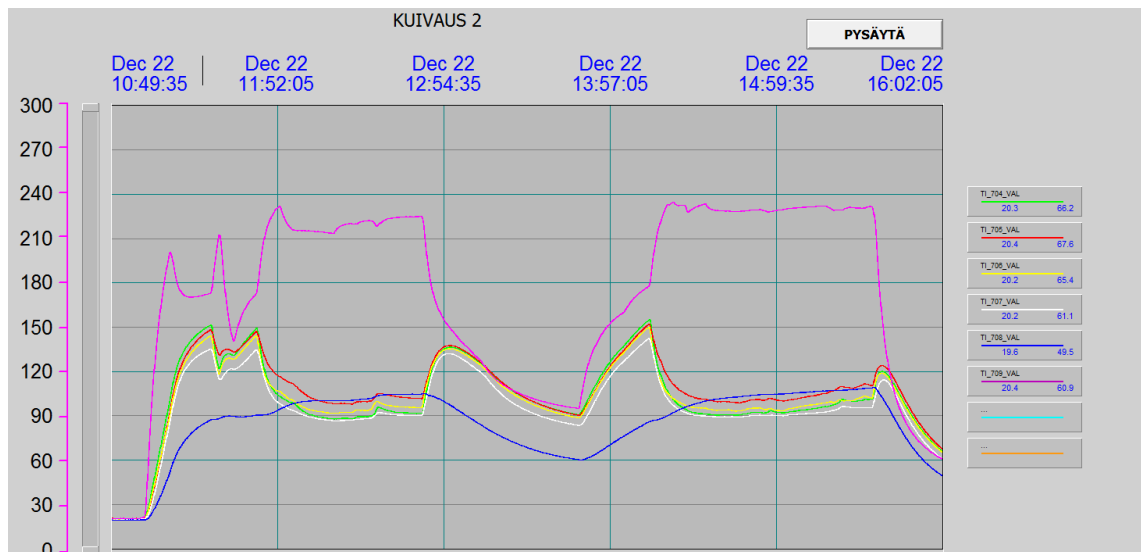


Kuva 16. Korkeatason jauhatuserän jauhatusprosessin trendiivivat esittävät jauhatuksen eri parametrejä.

Kuvasta 17 nähdään, että rainausprosessi ei ollut tasaista, vaan hyvin epätasaista ja ajo jouduttiin keskeyttämäänkin kerran. Kuvassa punaisella rainauslinjan imulaatikoiden alipaine, sinisellä kuivaimen lämpötilojen keskiarvo ja violetilla viirakaivon pinnantasoo. Massa oli hyvin tiivistä, joten alipainetta oli huomattavasti enemmän kuin edellisissä koeajoissa. Korkeasta alipaineesta huolimatta rainasta ei saatu tarpeeksi poistettua kosteutta, joten kuivurille menevä raina oli liian märkää. Kuvassa 18 esitetään kuivaimen trendiivivat.



Kuva 17. Korkeatason jauhatuserän rainausprosessin trendiviivat esittävät linjan märkäosan eri parametrejä.



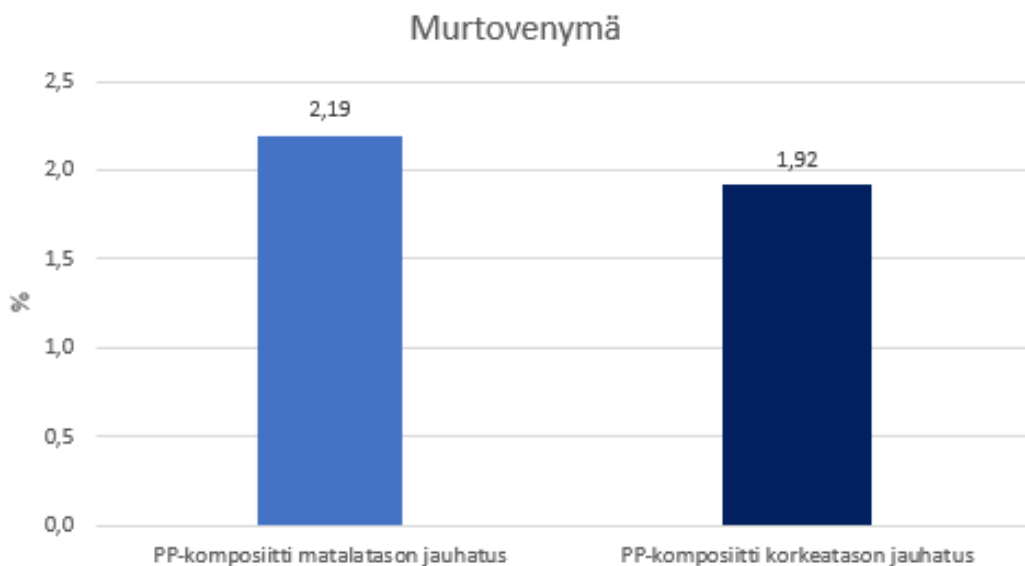
Kuva 18. Korkeatason jauhatuserän kuivauksen trendiviivat esittävät linjan kuivaimen lämpötiloja kuivaimen eri vyöhykkeillä.

Kuivaus oli myös epätasaista, sillä kuivainta koitettiin ajaa mahdollisimman kuumana, jolloin laitteen ylärajatunnistin alkoi hälyttää ja kuivaimen säätöjä piti jatkuvasti muuttaa. Rullat, jotka saatiin ajettua, olivat hyvin märkiä ja hankalia jatkoprosessoida.

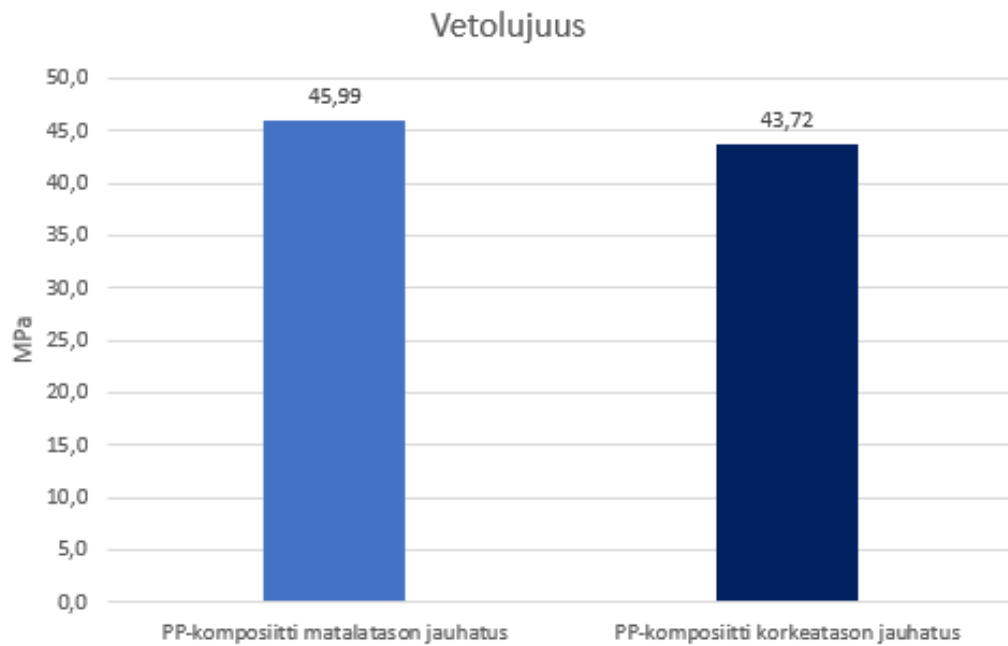
## 5.2 Jauhatuserien vetokokeiden tulosten vertailu

Mittaukset on suorittanut sama mittaaja samalla laitteella, ja tulosten hajontaan vaikuttaa mm. miten kuidut ovat koekappaleessa, jos kuidut ovat jääneet kimpuksi kappaleen venytettävälle osalle, vaikuttaa se tuloksiin negatiivisesti.

Eri jauhatustasojen välillä ei ole merkittävää eroa, mutta kaikki mitatut ominaisuudet ovat laskeneet jauhatustason kasvaessa, kun muovina on käytetty polypropeenä. Isoin muutos on tapahtunut materiaalin murtovenymässä, joka on laskenut matala- ja korkeatasojen jauhatuksen välillä 0,27 %, vetolujuus on laskenut 5 %, nämä on esitetty kuvioissa 1 ja 2. Matalatason jauhatuksen murtovenymän keskihajonta 0,1 % ja korkeatasojen jauhatuksen 0,42 %. Matalatason jauhatuksen vetolujuuden keskihajonta 0,47 % ja korkeatasojen jauhatuksen 0,14 %. Hajonnat on laskettu vetokokeiden tuloksista. Polypropeenin vetotestien tulokset ovat liitteinä 1 ja 3.

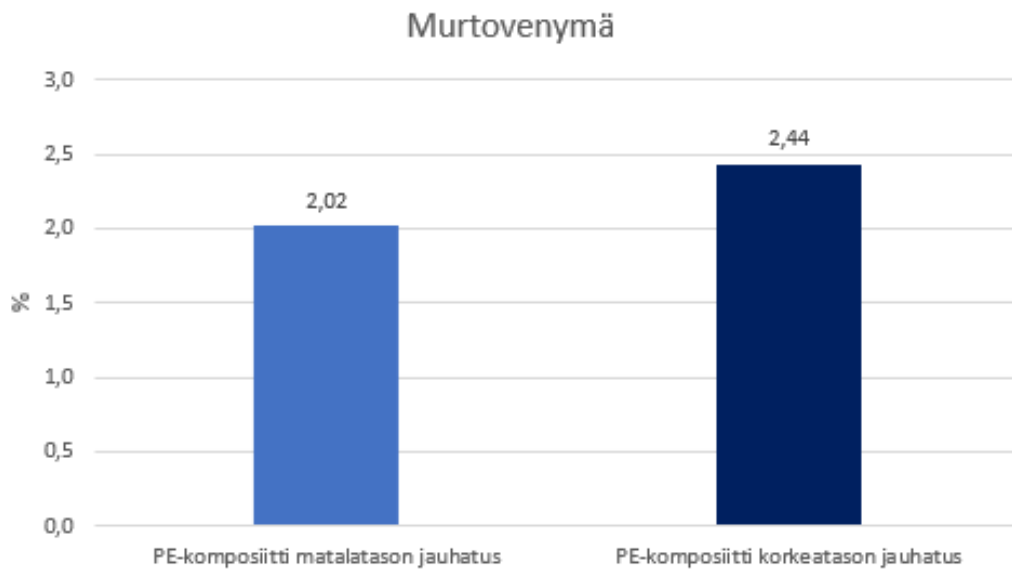


Kuvio 1. PP-komposiittien murtovenymä pylväskaaviona.

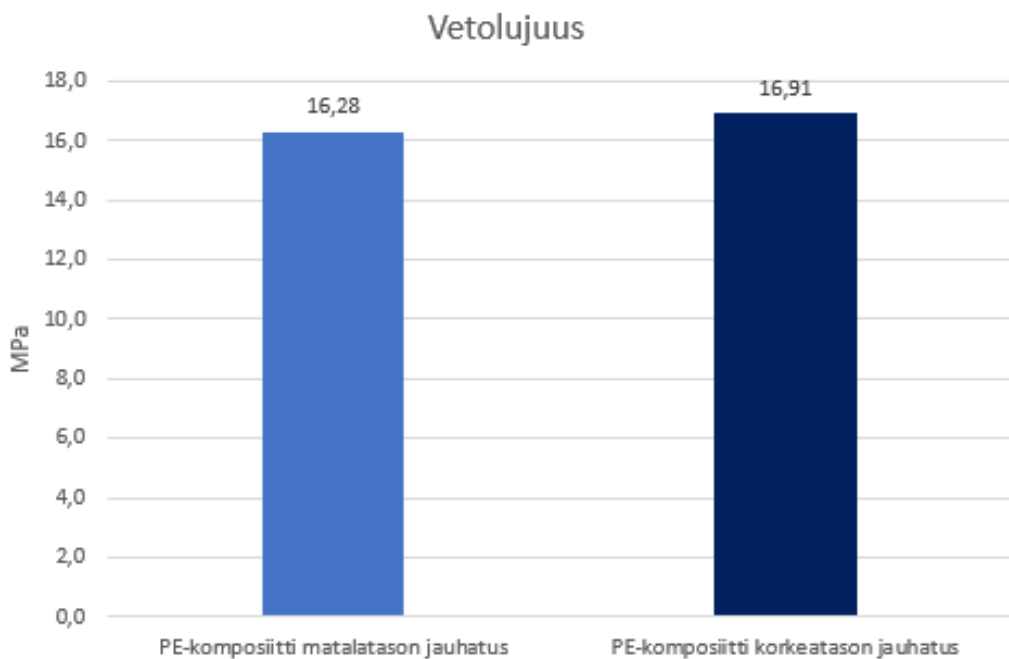


Kuvio 2. PP-komposiittien vetolujuus pylväskaaviona.

Kun muovina on käytetty PE:ä, ovat ominaisuuksien muutokset eri jauhatusasteiden välillä suuremmat kuin PP:a käytettäessä. Materiaalin kaikki vetokokeissa mitatut ominaisuudet, paitsi kimmomoduli, ovat kasvaneet matala- ja korkeajauhatuksen välillä, tuloksista on pylväskaavioilla kuvattu murtovenymä ja vetolujuus, nämä on esitetty kuvioissa 3 ja 4. Venymä on kasvanut 0,42 % ja vetolujuus 4 %. Matalatas on jauhatuksen murtovenymän keskihajonta 0,15 % ja korkeatas on jauhatuksen 0,18 %. Matalatas on jauhatuksen vetolujuuden keskihajonta 0,20 % ja korkeatas on jauhatuksen 0,08 %. Hajonnat on laskettu vetokokeiden tuloksista. Polyeteenin vetotestien tulokset ovat liitteinä 2 ja 4.



Kuvio 3. PE-komposiittien murtovenymä pylväskaaviona

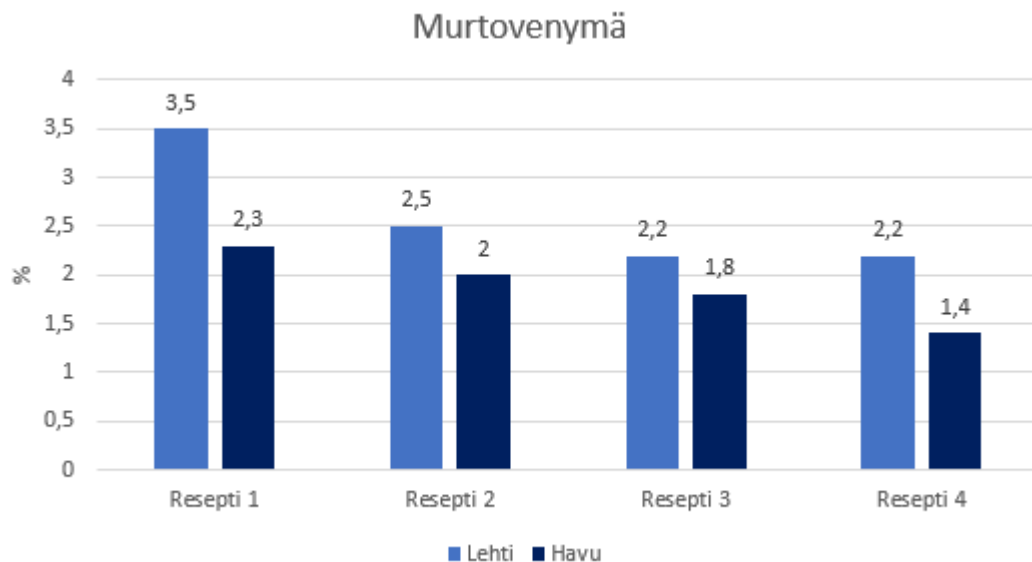


Kuvio 4. PE-komposiittien vetolujuus pylväskaaviona.

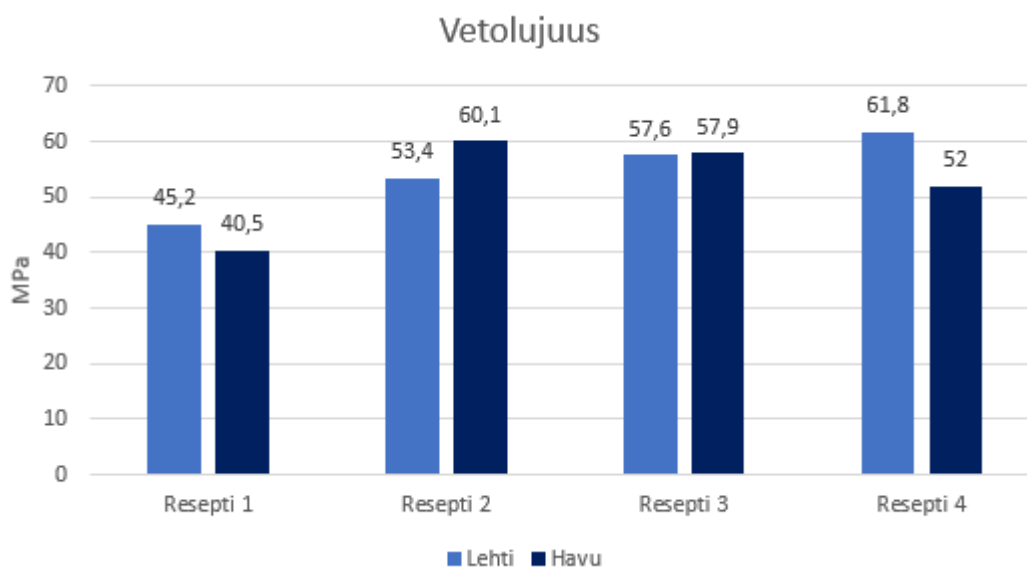
### 5.3 Havu- ja lehtisellun vertailu

Opinnäytetyön aikana vertailtiin myös havu- ja lehtisellusta valmistetun komposiittien eroja, tämän työn aikana lehtisellusta ei kuitenkaan valmistettu komposiittia, vaan vertaillaan jo olemassa olevia tuloksia.

Tuloksista voidaan päätellä, että lehtisellun käyttäminen ei tee materiaalista yhtä jäykkää kuin havusellun käyttö, joka johtaa suurempaan venymään ja sulaindeksiin. Tiheyteen selluvalinnalla ei ole tulosten perusteella vaikutusta. Suurimmalla testatulla kuitumäärällä lehtisellu parantaa materiaalin vetolujuutta, reseptissä 1 on vähiten ja reseptissä 4 on eniten kuitua. Tulokset ovat liitteenä 5 ja tuloksista piirretyt murtovenymän kuvaajat kuvioissa 5 ja vetolujuuden kuviossa 6.



Kuvio 5. Havu- ja lehtisellun murtovenymä pylväskaaviona.



Kuvio 6. Havu- ja lehtisellun vetolujuus pylväskaaviona.

## 6 PÄÄTELMÄT

Työn aikana ajetuista koeajoista märkärainauslinjalla ja vetotestien tuloksista voitiin päätellä, että työssä käytetyissä resepteissä sellun jauhaminen matalantason yli ei ollut tarpeellista. Sellun jauhatustason kasvattaminen teki märkärainausprosessista hyvin epävakaa, koska valmistettu raina oli niin tiivistä, että linjalla ei saatu tarpeeksi poistettua vettä. Runsas veden määrä teki valmistetusta rainasta hyvin haastavaa rullata, koska se jäi kuivurinkin jälkeen hyvin märäksi ja ei kestänyt rullauksen aiheuttamaa vetoa.

Komposiitin mekaanisiin ominaisuuksiin jauhatustason kasvattamisen vaikutus oli negatiivinen tai merkityksetön, riippuen käytetystä muovista. Jauhatustason kasvatuksen aiheuttamaa lisätyötä ja energian kulutusta ei voida siten perustella. Samat muutokset saataisiin aikaan huomattavasti pienemmällä vaivalla muuttamalla komposiitin lisäaineistusta, todennäköisimmin kasvattamalla kytkentäaineen määrää muutamalla prosentilla.

Jatkossa tulisi keskittyä komposiitin lisäaineistuksen tutkimiseen, kuten eri kytkentäaineisiin ja niiden määrään, sillä se on kustannustehokkaampi tapa tuoda komposiittiin kestävyttä sekä muokata muitakin sen ominaisuuksia. Lisäaineilla materiaalia on myös helppompaa räätälöidä haluttuun käyttötarkoitukseen. Myös tulisi selvittää, miten ekstruusion jälkeistä kuivausprosessia saataisiin tehostettua, jotta se ei veisi niin paljon aikaa ja energiaa kuin nyt, eli miten komposiitin veden imukykyä voitaisiin laskea ilman että kuituipitoisuutta tarvitsee laskea.

Havu- ja lehtisellun vetotestien tulosten perusteella oli reseptikohtaista, miten selluvallinta vaikuttaa komposiitin mekaanisiin ominaisuuksiin. Lehtisellu teki kuitenkin materiaalista venyvämpää. Lehtisellun käyttöä tulisi tutkia lisää, sillä lehtipuut kasvavat nopeammin kuin havupuut, joten lehtisellua olisi enemmän ja nopeammin saatavilla.

## 7 YHTEENVETO

Työn aikana sellumassaa jauhettiin eri jauhatusasteille, matala-, keski- ja korkeataso, joita prosessoitiin märkärainauslinjalla ja ekstruusiolla. Märkärainatusta massasta prosessoitiin ekstruuderilla komposiittigranulaatteja, joista valmistettiin koesauvoja ruiskuvalulla. Koesauvoista mitattiin materiaalin mekaanisia ominaisuuksia vetokoneella, ja näitä tuloksia käytettiin analysoinnissa. Työn aikana keskityttiin kuitenkin märkärainausprosessiin. Eri jauhusten prosessoitavuutta vertailtiin toisiinsa märkärainauslinjalla ja työssä olevat kuvaajat esittävät erot selkeästi.

Lisäksi työn aikana laskettiin vertailutaulukko eri jauhusten energian- ja veden kulutuksesta ja peilattiin onko jauhatusasteen lisääminen kaiken energian kulutuksen ja työn lisääntymisen arvoista. Sillä kasvanut energian kulutus lisää valmistuskustannuksia.

Tuloksista nähtiin, että jauhatusasteen kasvatus ei ole kannattavaa, sillä ero matalan- ja korkeantason jauhatuserien mekaanisilla ominaisuuksilla oli vähäistä ja joissain tapauksissa negatiivinen. Samoihin tuloksiin päästään todennäköisesti kustannustehokkaammin muuttamalla komposiitin lisäaineistusta.

Seuraava mielekäs tutkimuskohde olisi selvittää, miten eri lisäaineilla saadaan komposiitin ominaisuuksia parannettua siten, että materiaalin valmistuskustannukset eivät nouse liikaa. Lisäksi havu- ja lehtisellun eroja tulisi tutkia enemmän, sillä joihinkin resepteihin lehtisellu voi olla parempi vaihtoehto.

## 8 LÄHTEET

**Airasmaa, Ilkka ym. 1991.** *Muovikomposiitit.* Jyväskylä : Gummerus Kirjapaino Oy, 1991. ISBN 951-9271-25-2.

**EN ISO 5267 - 1:1999** *Pulps. Determination of drainability. Part 1: Schopper - Riegler method.* EN ISO 5267 - 1:2000.

**Ilvessalo-Pfäffeli, Marja- Sisko. 2015.** *Kuidut kuvina.* s.l. : Metsäkustannus Oy, 2015. ISBN 978-952-6612-48-5.

**Isotalo, Kaija. 2004.** *Puu - ja sellukemia.* s.l. : Edita Prima Oy, 2004. ISBN 952-13-2059-1.

**Järvinen, Pasi. 2000.** *Muovin suomalainen käsikirja.* Porvoo : WS Bookwell Oy, 2000. ISBN 952-91-1918-6.

**Järvinen, Pasi. 2017.** *Muovit ja muovituotteiden valmistus.* Porvoo : Bookwell Oy, 2017. ISBN 978-952-93-8690-1.

**Koto, Tuula ja Tiisala, Stella. 2004.** *Muovi + puu Puukuitulujitteiset muovikomposiitit.* Jyväskylä : Gummerus kirjapaino, 2004. ISBN 951-827-025-2.

**Kurri, Veijo;ym. 2008.** *Muovitekniikan perusteet.* s.l. : Edita Prima Oy, 2008. ISBN 978-952-13-1584-8.

**Metalliteollisuuden keskusliitto. 2001.** *Muovit ja kumit.* Helsinki : Metalliteollisuuden kustannus Oy, 2001. ISBN 951-817-745-7.

**Mohan, Harish T.;Jayanarayanan, Karingamanna ja Mini, K. M. 2021.** *Recent trends in utilization of plastics waste composites as construction materials.* Construction and building materials. Vol. 271.

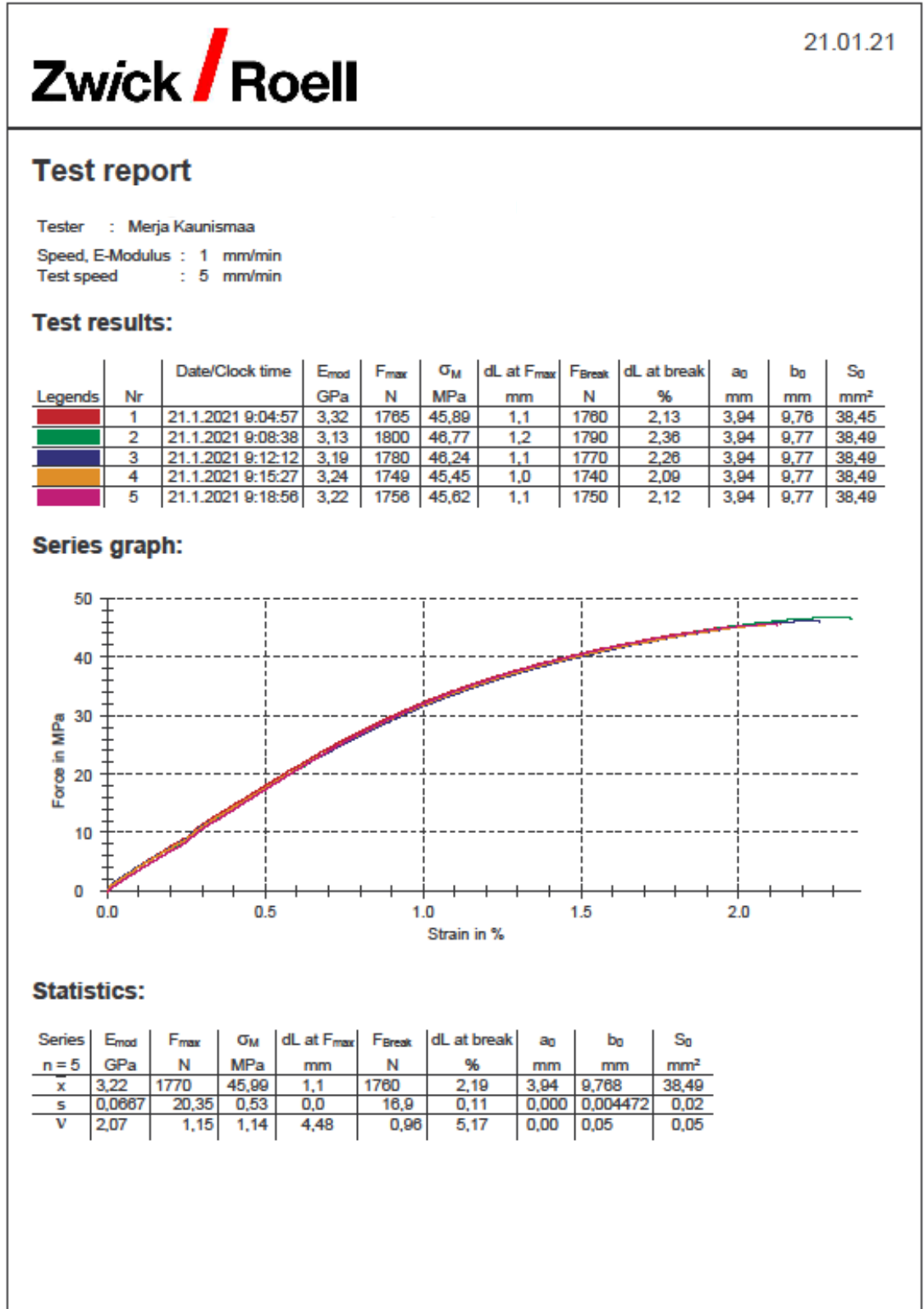
**Pihkala, Juhani ja Salminen, Raita. 1982.** *Prosessitekniikan kokonaisprosessit.* Keuruu : Kustannusosakeyhtiö Otava, 1982. ISBN 951-1-06891-1.

**Seppälä, Jukka. 2008.** *Polymeeri teknologian perusteet.* Helsinki : Hakapaino Oy, 2008. ISBN 978-951-672-348-1.

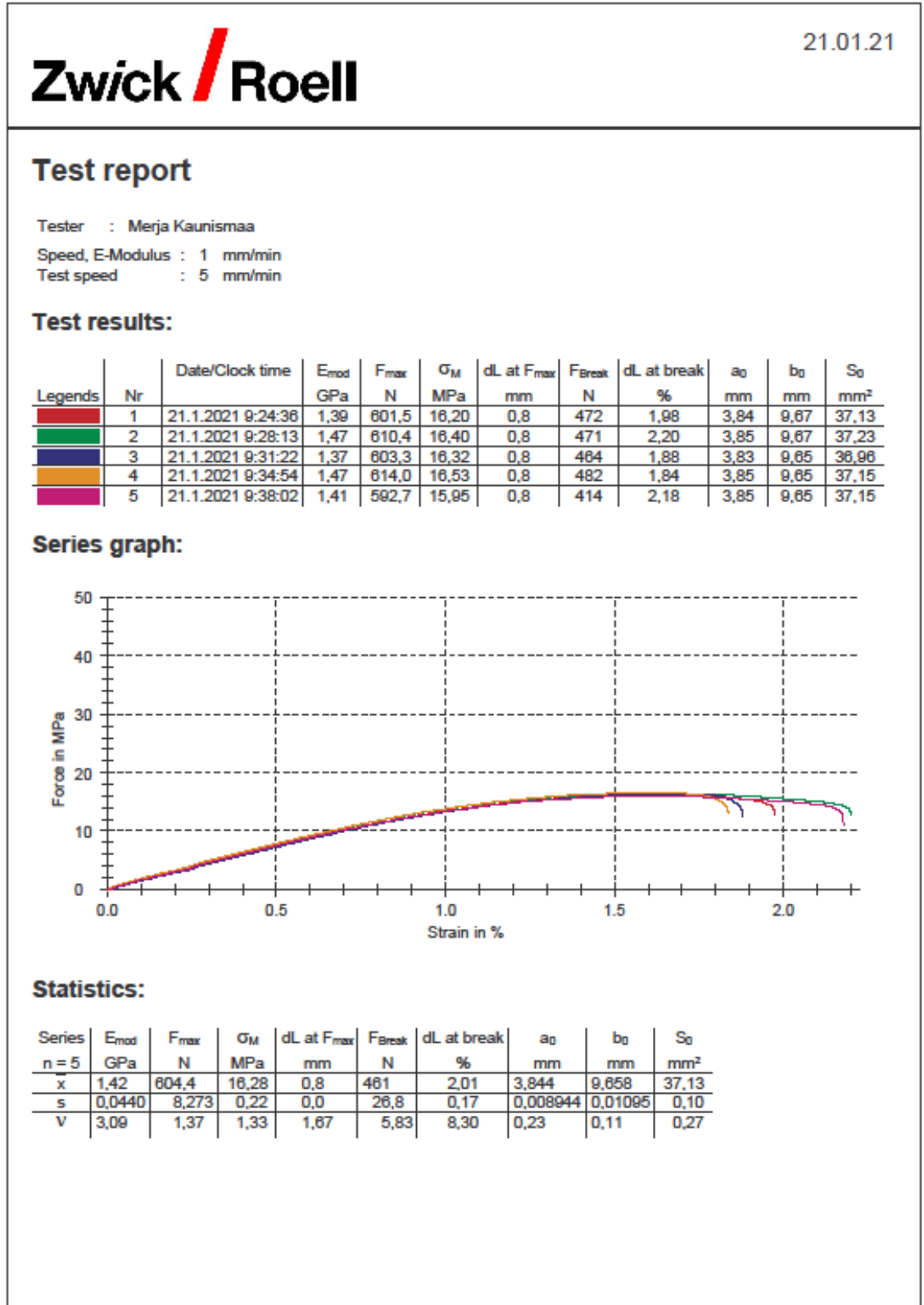
**Seppälä, Markku J. ym. 2001a.** *Paperin ja kartongin valmistus.* Jyväskylä : Gummerus kirjapaino Oy, 2001. ISBN 952-13-1280-7.

**Seppälä, Markku J. ym. 2001b.** *Paperimassan valmistus.* Jyväskylä : Gummerus kirjapaino Oy, 2001. ISBN 952-13-1142-8.

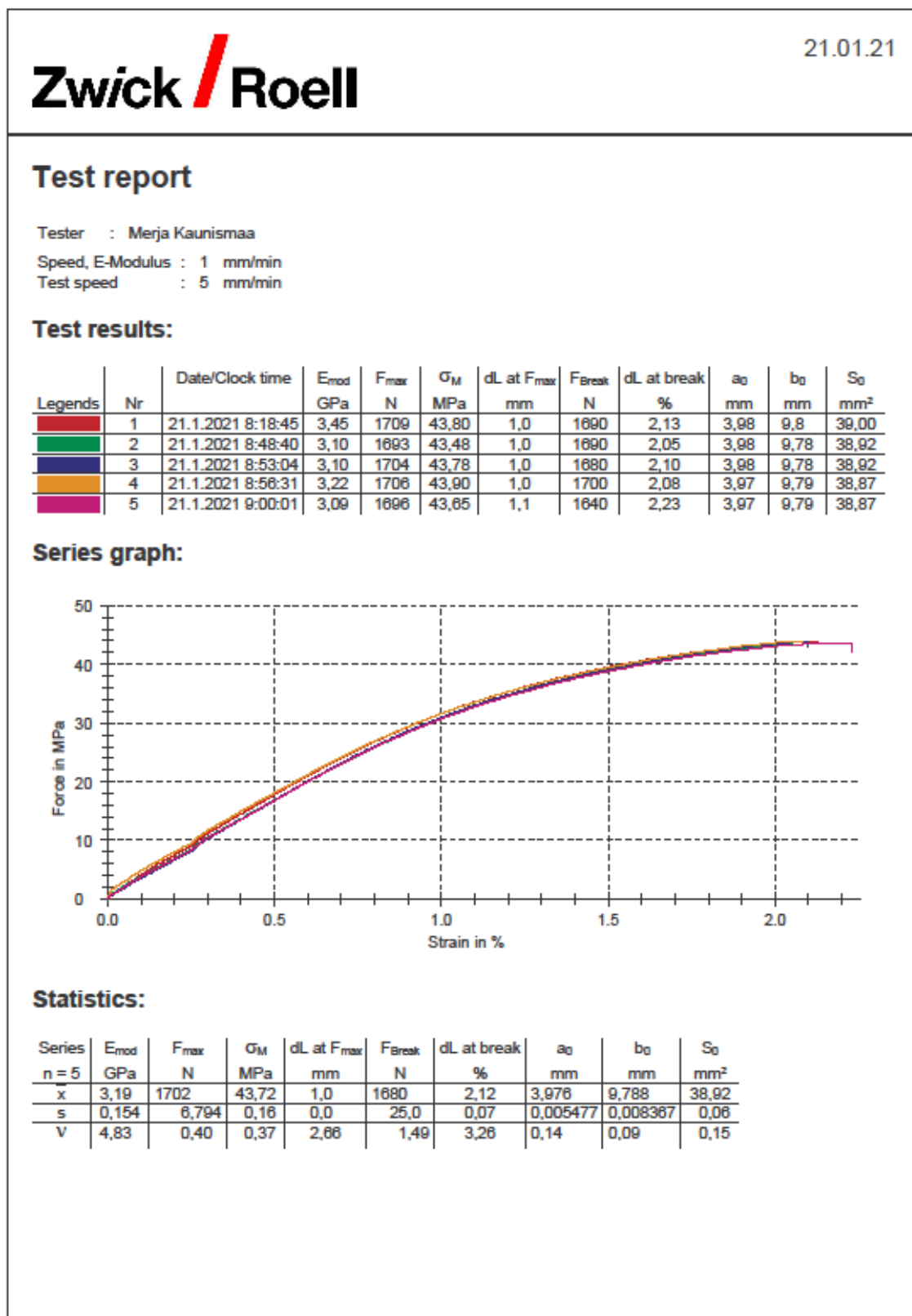
# Matalatason jauhatus - Polypropeeni



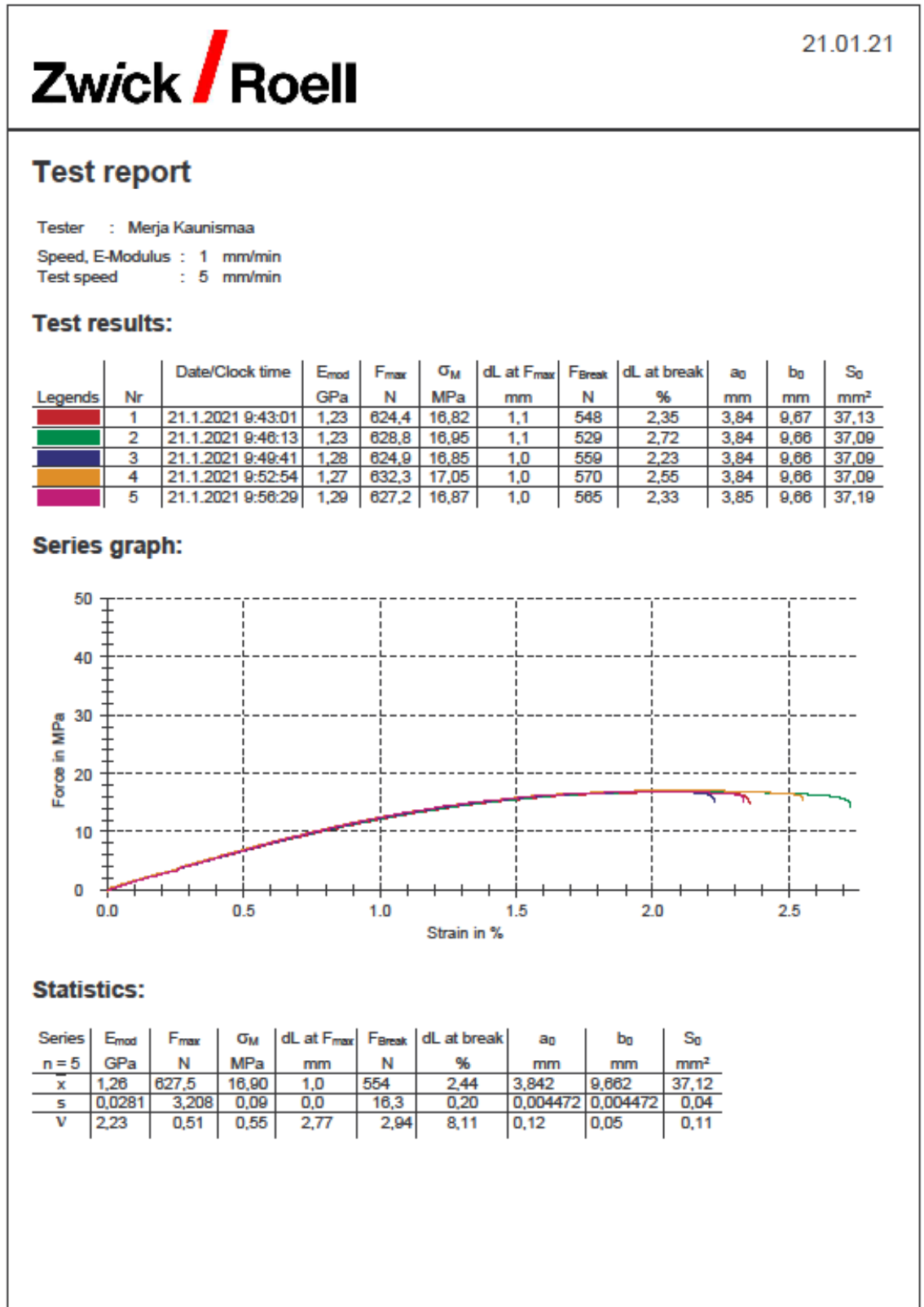
# Matalatason jauhatus – Polyeteeni



# Korkeatason jauhatus – Polypropeeni



# Korkeatason jauhatus – Polyeteeni



## Havu- ja lehtisellun vertailu

	Tiheys (g/cm <sup>3</sup> )	Sulaindeksi (g/10min)	Vetolujuus (MPa)	Kimmomoduuli (Mpa)	Murtovenymä (%)	Reseptissä 1 vähiten kuitua, reseptissä 4 eniten	
Resepti 1							
Havu	0,99	38,7	45,2	2400	3,5		
Lehti	0,99	17,1	40,5	2500	2,3		
Muutos (%)	0	56 %	10 %	4 %	1,2 %		
Resepti 2							
Havu	1,08	20,6	53,4	3530	2,5		
Lehti	1,08		60,1	4100	2		
Muutos (%)	0		11 %	14 %	0,5 %		
Resepti 3							
Havu	1,1	13	57,6	4060	2,2		
Lehti	1,09		57,9	4700	1,8		
Muutos (%)	1 %		1 %	14 %	0,4 %		
Resepti 4							
Havu	1,11	6,1	61,8	4600	2,2		
Lehti	1,11		52	4900	1,4		
Muutos (%)	0		16 %	6 %	0,8 %		

