

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
School of Engineering Science
Tuotantotalous

Saara Lampela

**KARTONGIN LAATUVAIHTELUN PIENENTÄMINEN JA SEN
VAIKUTUKSET VALMISTUSKUSTANNUKSIIN**

Työn tarkastajat: Professori Timo Kärri
TkT Antti Ylä-Kujala

TIIVISTELMÄ

<p>Tekijä: Saara Lampela</p> <p>Työn nimi: Kartongin laatuvaihtelun pienentäminen ja sen vaikutukset valmistuskustannuksiin</p>
<p>Vuosi: 2019</p> <p>Paikka: Heinola, Suomi</p>
<p>Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto. Tuotantotalous.</p> <p>78 sivua</p> <p>Tarkastajat: Professori Timo Kärri, tutkijatohtori Antti Ylä-Kujala</p>
<p>Hakusanat: Aallotuskartongi, jauhatus, laatuajonta, koesuunnittelu</p>
<p>Kohdeyritykseen tehdyn koneuusinnan myötä aallotuskartongin olennaisimpien laatuominaisuuksien hajonta kasvoi. Diplomityön ensimmäisenä tavoitteena oli tunnistaa aallotuskartongin valmistusprosessista sellaista vaihtelua, joka voi vaikuttaa lopputuotteen laatuun ja sitä kautta myös aiheutuvaan laatuvaihteluun.</p> <p>Aallotuskartongin ominaisuuksien kannalta tärkeimmäksi osaprosessiksi arvioitiin jauhatusvaihe. Työn kokeellisessa osassa suoritettiin kolme koeajoa, joiden keskeisenä tavoitteena oli ensin vahvistaa jauhatusvaiheen merkitys kartongin laadulle ja sitten tunnistaa ne suureet, jotka vastaavat parhaiten jauhatusmäärän vaihteluun.</p> <p>Kokeellisessa osassa saavutettujen tulosten pohjalta todettiin, että kartongin ilmanläpäisyvastus on selkein aallotuskartongin tärkeimpiä laatuominaisuuksia ja jauhatusmäärän vakautta ennustava tekijä. Tämän pohjalta suunniteltiin ajomalli, jonka pääperiaatteena on ilmanläpäisyvastusarvon vakioiminen sellaiselle tasolle, että halutut lujuusominaisuudet saavutetaan. Ajomallilla saavutettiin toivottua kehitystä niin lujuusominaisuuksien kehittämisessä kuin hajonnan pienenemissäkin.</p> <p>Ilmeinen jatkotoimenpide on diplomityössä luodun ajomallin täysipainoinen jalkauttaminen tehtaalla niin, että ilmanläpäisyvastusarvon vaihtelu saadaan pidettyä samoissa rajoissa kuin työssä esitellyn ajomallikokeilun aikana. Lisäksi työssä tunnistettiin huomattavaa vaihtelua myös jauhatusta edeltävien prosessivaiheiden aikaansaamassa tuotteessa. On mahdollista, että tämän raaka-ainevaihtelun vähentäminen helpottaisi myös jauhatuksen ohjaamista nykyistä tasaisemmin.</p>

ABSTRACT

Author: Saara Lampela Subject: Reduction of paperboard quality variation and its impact on manufacturing costs.
Year: 2019 Place: Heinola, Finland
Master's Thesis. Lappeenranta-Lahti University of Technology. Industrial Engineering and Management. 78 pages Examiners: Professor Timo Kärri, post-doctoral researcher Antti Ylä-Kujala
Keywords: Corrugated medium, refining, quality variation, design of experiment
<p>As a result of the quality investment, the variation of the most important quality properties of corrugated medium increased. The first goal of the thesis work was to analyze the process and to identify potential sources causing the quality variation.</p> <p>For the quality properties of corrugated medium, the refining was considered to the most important process step. In the experimental part of the work, three experimental runs were performed. The primary objective of the test runs was to verify the importance of refining to the quality of board and then to identify the quantities that correspond best to the changes at refining amount.</p> <p>Based on the results obtained in the experimental part, the air permeability resistance is the most important factor in predicting the main quality properties of the corrugated medium and also the stability of the refining amount. Based on these observations, a new operating model was designed. The main principle of the new control strategy is to stabilize the air permeability resistance value to such a level that desired strength properties are achieved. By utilizing the new operating strategy, the strength properties improved, and the quality variation decreased.</p> <p>The obvious follow-up is the full-scale implementation of the new operating model. In addition, considerable variation was also identified in the previous process steps. It's possible that the reducing of the variation of the raw material of the refining, would also facilitate the control of refining more evenly.</p>

Sisällys

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Tausta.....	8
1.2 Työn tavoite	8
1.3 Menetelmät ja aineisto	9
1.4 Työn rakenne.....	9
2 AALTOPAHVI	11
2.1 Aallotuskartonki.....	11
2.2 Lainerit ja liima.....	15
3 AALLOTUSKARTONGIN VALMISTUSPROSESSI	16
3.1 Puuraaka-aine.....	16
3.2 Massanvalmistus	19
3.3 Jauhatus.....	19
3.3.1 Jauhatuspahtuma	20
3.3.2 Jauhusteoriat ja jauhatuksen ohjaaminen	21
3.3.3 Jauhatuksen muuttujat.....	24
3.3.4 Jauhatuksen vaikutukset kuituihin	25
4 TILASTOLLISET MENETELMÄT JA KOESUUNNITTELU	27
4.1 Yleiset tunnusluvut ja kuvaajat	27
4.2 Jakaumat.....	30
4.3 Hypoteesien testaus.....	32
4.4 Koesuunnittelu	34
4.4.1 Koesuunnitelman toteuttaminen	35
4.4.2 Koesuunnittelun erityispiirteet paperinvalmistusprosessissa.....	36

5 VALMISTUSKUSTANNUKSET	38
5.1 Muuttuvat kustannukset	38
5.2 Kiinteät kustannukset	39
6 KOKEELLINEN OSUUS	41
6.1 Tausta ja tavoite	41
6.2 Tarkastelualueen rajaaminen	42
6.3 Jauhatusvaiheen sakeusvaihtelu	43
6.4 Koeajo 1	45
6.4.1 Tausta ja suunnittelu	45
6.4.2 Koeajon suoritus	47
6.4.3 Keskeisimmät tulokset	48
6.4.4 Johtopäätökset	50
6.5 Koeajo 2	50
6.5.1 Tausta ja suunnittelu	50
6.5.2 Koeajon suoritus	52
6.5.3 Keskeisimmät tulokset	52
6.5.4 Johtopäätökset	55
6.6 Koeajo 3	56
6.6.1 Tausta ja suunnittelu	56
6.6.2 Koeajon suorittaminen	56
6.6.3 Keskeisimmät tulokset	57
6.6.4 Johtopäätökset	58
6.7 Jauhatuksen ajomallikokeilu	58
6.7.1 Suunnittelu	59
6.7.2 Ajomallikokeilun suorittaminen	62
6.7.3 Keskeisimmät tulokset	62
6.7.4 Johtopäätökset	64
6.8 Kokeellisen osan yhteenveto	64

7	AJOMALLIMUUTOKSEN KUSTANNUSVAIKUTUSET	68
7.1	Höyrynkulutus.....	68
7.2	Jauhatusenergia	70
7.3	Yhteenveto ja pohdinta	71
8	YHTEENVETO	72
	LÄHTEET.....	74
	LIITTEET	78
	Liite 1: Jauhatuskoeajon 3 hypoteestitestauksen tulokset.....	78

LYHENTEET

CCT	Corrugated Crush Test, aallotuskartongin puristuslujuusmittaus
CMT	Concora Medium Test, aallotuskartongin puristuslujuusmittaus
CSF	Canadian Standard Freeness, massan suotautuvuusmittaus
EOK	Jauhatusmäärä, energianominaiskulutus (myös SRE = Specific Refining Energy)
G-H	Gurley(-Hill), kartongin ilmanläpäisyvastus
KA	Keskiarvo
KS	Konesuunta (myös MD = Machine Direction)
NSSC	Neutral Sulphite Semi Chemical, Neutraalisulfiittimenetelmä
OSK	Ominnaissärmäkuormateoria (myös SEL = Specific Edge Load)
PS	Poikkisuunta (myös CD = Cross Direction)
SCT	Short Span Compression Test, aallotuskartongin puristuslujuusmittaus
SR	Schopper-Riegler, massan suotautuvuusmittaus

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Kohdeyrityksen kartonkikonelinjalle tehtiin uusinta huhtikuussa 2018. Koneuusinnassa päivitettiin eräitä kartonkikonelinjan sekä massaosaston avainkomponentteja. Uusinnan tärkeimmäksi tavoitteeksi kartonkikonelinjan osalta asetettiin etukäteen laadun parantaminen. Koneuusinnan myötä aallotuskartongin tärkeimmät laatuominaisuudet keskimäärin paranivat, mutta arvojen hajonta oli selvästi suurempaa kuin ennen uusintaa.

Aallotuskartonkituotteen laatuhaajonta on ongelmallista, sillä aallotuskartonki käsitellään myöhemmässä vaiheessa aaltopahvikoneella, jonka ajettavuudelle ja tuotannolle tasainen raaka-aineen laatu on olennaista. Lisäksi poikkeamien ja ylimääräisen vaihtelun esiintymistä pyritään välttämään kartongin valmistusprosessissa, sillä usein epätoivottu vaihtelu aikaansaa esimerkiksi ajettavuusongelmia. Erityisen epätoivottua vaihtelu on silloin, kun sen syntyperää ei ymmärretä tai osata paikantaa.

1.2 Työn tavoite

Työn ensimmäiseksi tavoitteeksi asetettiin epätoivottavaa vaihtelua aiheuttavan prosessivaiheen paikantaminen. Tavoitetta määritettäessä arvioitiin, että vaihtelun todennäköinen aiheuttaja löytyy hyödyntämällä kohdeyrityksen käytössä olevia prosessianalyysityökaluja, itse valmistusprosessin tuottamaa historiadataa sekä kirjallisuutta. Vaihtelun lähteen löydyttyä luontevaksi jatkotavoitteeksi sovittiin vaihtelun pienentäminen mahdollisuuksien mukaan. Aallotuskartongin loppukäytön kannalta erityisesti puristuslujuusominaisuudet ovat tärkeitä, ja aihetta rajattaessa päätettiin keskittyä erityisesti lujuusmittauksien CMT30, CCT30 ja SCT ps tutkimiseen.

Lisäksi työn kokeellisen osan tavoitteeksi määritettiin kokeilla pystyisikö monimuuttujakoeajolla verifioimaan vaihtelun aiheuttajan kartonkikoneympäristössä. Kirjallisuuden perusteella koesuunnittelumenetelmiä käytetään kyllä teollisuudessa ja teollisissa prosesseissa, mutta niiden hyödyntämisestä kartonginvalmistuksen kaltaisessa jatkuvatoimisessa prosessissa ei juurikaan löydy viitteitä tai kirjallisuutta. Useampaa muuttujaa hyödyntävät tilastolliset koesuunnittelumenetelmät koetaan kuitenkin onnistuessaan erityisen hyödylliksi ja tehokkaiksi, joten työssä haluttiin tutkia sitä,

olisiko tällaisen koeajon suorittaminen ylipäätään mahdollista ja pystyisikö tuloksia hyödyntämään laadunkehitystyössä.

1.3 Menetelmät ja aineisto

Työn teoriaosuus koostuu kirjallisuuskatsauksesta, jossa on pyritty hyödyntämään mahdollisuuksien mukaan ajantasaisia artikkeleita, julkaisuja ja kirjoja. Eräänlaiseksi haasteeksi kirjallisuuskatsausta työstettäessä muodostui tiedon saatavuus ja ajankohtaisuus. NSSC-massasta valmistettu fluting on kartonkilajien joukossa harvinaisuus ja kierrätyskartonkien ollessa nykypäivänä yhä yleisempiä, suuri osa pakkauskartonkeja käsittelevistä julkaisuista on keskittynyt juuri niihin.

Työn selkeän selkärangan muodostivat vankasti tilastollisiin menetelmiin nojaavat koesuunnittelumenetelmät. Aiheen luonteesta johtuen työn eri vaiheissa hyödynnettiin runsaasti niin graafisia esityksiä vaihtelun määrästä kuin myös numeerista dataa hajontalukujen muodossa kulloisenkin tilanteen hahmottamiseksi.

Laatuhajontaongelman juurisyytä etsittäessä hyödynnettiin runsaasti myös erilaisia haastatteluja sekä keskusteluja kohdeyrityksen henkilöstön kanssa. Epäformaalit keskustelut erityisesti käyttöhenkilöstön, alueistaan vastaavien insinöörien sekä laitetoimittajan edustajien kanssa antoivat paljon kokemusperäisiä ajatuksia ongelman mahdollisesta aiheuttajasta. Keskustelujen antamaa tietoa hyödynnettiin erityisesti koesuunnitelmia tehtäessä.

1.4 Työn rakenne

Työn kirjallinen osuus koostuu teoriaosuudesta ja kokeellisesta osuudesta. Varsinainen teoriaosuus jakautuu johdannon lisäksi neljään erilliseen työn kannalta relevanttiin kokonaisuuteen.

Teoriaosuudessa perehdytään aluksi aallotuskartonkiin osana varsinaista lopputuotetta eli aaltopahvia, sillä laadunparannustyötä tehtäessä on tärkeää ymmärtää kulloinkin käsiteltävien laatuominaisuuksien merkitys varsinaisen lopputuotteen ja sen käytön kannalta.

Teoriaosuuden toisessa osassa, aallotuskartongin valmistusprosessi, käsitellään laajemmin tässä työssä esiteltyjen koeajojen kannalta merkittäviksi arvioituja prosessivaiheita. Käytännössä kaikki tässä työssä esitellyt koeajot ja toimenpiteet ovat keskittyneet jauhatusvaiheeseen, joten myös

valmistusprosessia on käsitelty tästä näkökulmasta. Varsinaisen jauhatusprosessin lisäksi toisessa luvussa tarkastellaan puuraaka-ainetta ja tehdään katsaus jauhatusta edeltävään keittovaiheeseen.

Kolmas teoriaosuuden kokonaisuus muodostuu tilastollisiin menetelmiin sekä koesuunnitteluun perehdyttävästä osuudesta. Osuus esittelee työssä hyödynnettävät tilastolliset tunnusluvut sekä menetelmät. Yleisimpien tunnuslukujen lisäksi osuudessa tutustutaan tulosten esittämiseen visuaalisessa muodossa sekä tilastollisten menetelmien yhteydessä usein hyödynnettyihin keinoihin visualisoida dataa, sillä tulosten esittäminen graafisessa muodossa on tehokas keino viestiä saavutetuista tuloksista sekä tehdyistä havainnoista.

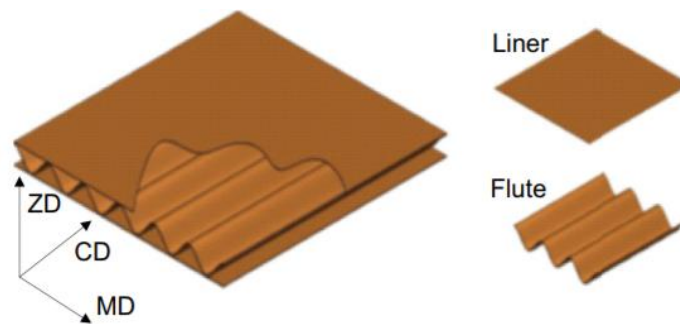
Tilastollisten menetelmien ohella kolmannessa aihekokonaisuudessa käsitellään koesuunnittelumenetelmiä. Tässä työssä on hyödynnetty erityisesti erottelevaa koesuunnittelua, jonka pääajatuksena on erottaa olennaiset muuttujat vähemmän tärkeistä, mutta osuudessa perehdytään myös yleisesti koesuunnittelun peruseräisiin ja menetelmiin. Kokeellisen osuuden sujuvuuden varmistamiseksi osuudessa tehdään katsaus myös sellaisiin kartongin valmistusprosessin erityispiirteisiin, jotka osaltaan voivat tuoda haastetta niin koesuunnitelman mukaisen koeajon toteutukselle kuin tulosten tulkinnalle ja luotettavuudellekin.

Yhdeksi työn tavoitteista määritettiin mahdollisen ajomallimuutoksen sekä laatuajonnan pienentämisen aiheuttamien kustannusten arvioiminen. Viimeinen teoriaosuuden kokonaisuus käsittelee erityisesti paperin- ja kartonginvalmistuksen muuttuvia kustannuksia. Työn edetessä kävi selväksi, että mahdolliset kustannusvaikutukset aiheutuvat todennäköisimmin muuttuneena energiankulutuksena joko itse jauhatusvaiheessa tai kuivatusosalla.

Kokeellisessa osassa esitellään kaikkiaan kolme keskenään erilaista koeajoa. Kustakin koeajosta esitellään taustatiedot, itse suoritusvaihe sekä lopuksi yhteenveto tuloksista. Koeajotulosten perusteella laadittiin jauhatukseen kokeiltavaksi uusi ajomalli.

2 AALTOPAHVI

Aaltopahvi koostuu tyypillisesti kahdesta pintakartongista, eli lainerista, ja niiden väliin liimatusta aallotetusta kartongista. Aallotuskartongin varsinaisena tehtävänä on lainereiden liittäminen toisiinsa ja niiden pitäminen aallonkorkeuden mittaisen etäisyyden päässä toisistaan. (Laakso, O. & Rintamäki, T., 2003) Tyypillinen aaltopahvin rakenne on esitetty kuvassa 1. MD (machine direction, konesuunta) ja CD (cross direction, poikkisuunta) kuvaavat kartongin suuntautumista kartonkikoneeseen nähden. ZD tarkoittaa vastaavasti aaltopahvin paksuussuuntaa. Kone- ja poikkisuuntaisuutta käytetään usein luonnehdittaessa kartongin ominaisuuksia. (Fadjiti, T. 2016)



KUVA 1. Aaltopahvi koostuu tyypillisesti kahdesta pintakartongista eli lainerista ja niiden väliin aallotetusta kartongista. (kuva: Fadjiti, T. 2016.)

2.1 Aallotuskartonki

Puolikemiallisesta massasta valmistettua aallotuskartonkia kutsutaan myös flutingiksi. Flutingin lisäksi aaltopahvin raaka-aineena voidaan käyttää kierrätyskuidusta valmistettua aallotuskartonkia. Aallotuskartonki on bulkkituote, joten raaka-aineen edullisuus on tärkeää. (Hartikainen, K. 2008)

Aallotuskartongin tärkeimpiä laatuominaisuuksia ovat hyvä jäykkyys, liimautuvuus ja ajettavuus aallotuskartonkikoneella. Hyvät jäykkyys- ja lujuusominaisuudet ovat flutingille ensiarvoisen tärkeitä, sillä valmiin aaltopahvilaatikon on kestettävä pinoamista niin kuljetuksen kuin varastoinninkin aikana. (Laakso, O. & Rintamäki, T., 2003)

Aallotuskartongin ajettavuudella tarkoitetaan ensisijaisesti kartongin kykyä sietää kuormitusta ja jännitystä aallotusvaiheen aikana niin, että aallot eivät pääse murtumaan. Korkeaa konesuuntaista venymää sekä pientä tikku- ja kuitukimppupitoisuutta pidetään hyvinä keinoina ennakoida aaltopahvikoneen hyvää ajettavuutta. Tikkupitoisuus sekä kuitukimput ovat käytettävän massan ominaisuuksia ja niitä pystytään ehkäisemään riittävällä jauhatusmäärällä. Venymäominaisuuksiin pystytään vaikuttamaan esimerkiksi pitämällä kuivatusosan vedot mahdollisimman pieninä. (Smook, G. 1992) Lisäksi hyvän ajettavuuden takaamiseksi aallotuskartongin kosteus-, neliömassa- ja paksuusprofiilien tulee olla mahdollisimman tasaiset. (Laakso, O. & Rintamäki, T., 2003)

Puristuslujuutta voidaan pitää yleisesti yhtenä paperi- ja kartonkituotteiden tärkeimmistä ominaisuuksista. Aallotuskartongin kannalta puristuslujuusominaisuudet ovat erityisen tärkeitä, sillä valmiin aaltopahvin puristuslujuus muodostuu raaka-aineena käytettävien flutingin ja lainereiden puristuslujuuksien perusteella. Puristuslujuudella tarkoitetaan käytännössä suurinta puristusvoimaa, jonka testattava materiaali kestää rikkoutumatta. Puristuslujuus on riippuvainen neliömassasta. Puristuslujuusmittauksia tehdään sekä konesuuntaan että poikkisuuntaan. Tyypillisesti pintakartonkien osalta seurataan lähinnä konesuuntaisia arvoja, mutta flutingille myös poikkisuuntaisten arvojen merkitys on tärkeä. (Kajanti, I. 1998)

Puristuslujuusmittauksia pidetään usein hieman epäluotettavina eikä niiden tarkkuutta koeta hyväksi. Yleinen ongelma puristuslujuusmittauksia suoritettaessa on näytteen lommahtaminen eli nurjahtaminen. Mittauksen aikaista lommahtamista voidaan ennaltaehkäistä kahdella tavalla: näytettä voidaan tukea niin, että se ei pääse nurjahtamaan tai se voidaan asettaa sopivaan geometriseen muotoon, joka osaltaan estää nurjahtamista. (Kajanti, I. 1998)

Kuiduilla ja kuituverkon rakenteella on elastisen kertoimen ja vetolujuuden (tensile strength) lisäksi suuri vaikutus kartongin puristuslujuuteen. Näiden ominaisuuksien merkitys on erilainen kuhunkin seurattavaan ominaisuuteen nähden, mutta pääsääntöisesti kuidun pituus, taipuisuus ja joustavuus sekä sidostenmuodostamiskyky ovat tärkeimmät ominaisuudet. Kuituverkon olennaisimmat ominaisuudet ovat kuituorientaatio, rainan tiheys ja sitoutumisaste. (Kajanti, I. 1998)

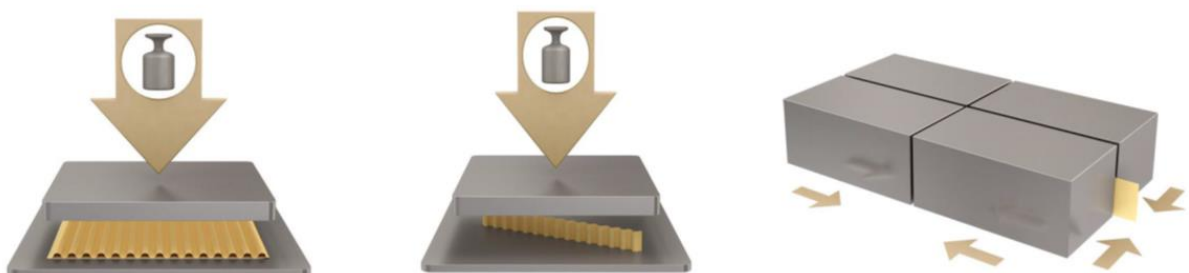
Yleisesti voidaan sanoa, että yksittäisen kuidun puristuslujuudella on selvä vaikutus valmiin kartongin puristuslujuuteen. Tutkimusten mukaan tärkein tekijä kuidun puristuslujuuden kannalta on

kuidun paksuus. Kuidun paksuuden kasvaessa puristuslujuusindeksi laskee. Kuidun pituuden ja kuitujen välisten kulmien merkitys on selvästi pienempi. Esimerkiksi kuidun paksuuden kasvaessa kolmesta mikrometrinä kuuteen mikrometriin, puristusindeksi laskee yli 20 %. Vastaavasti kuidun pituuden pieneneminen 2,1 millimetristä 1,25 millimetriin laskee puristusindeksiä vain noin 8 %. Kuidun pituuden pieneneminen vaikuttaa taas kuitenkin enemmän vetoindeksiin, joka laskee samassa tilanteessa noin 20 %. (Kajanti, I. 1998)

Vanhan nyrkkisäännön mukaan flutingin ominaisuudet tehdään jauhatuksella. Jauhatusta edeltävällä keittovaiheella on kuitenkin selvä yhteys lopputuotteeseen, sillä liian korkeaan saantotasoon keittovaiheessa ajettaessa jauhatus vaikeutuu ja haettujen lujuusominaisuuksien saavuttaminen on haastavaa. Korkea saanto alentaa venymä- ja katkeamisarvoja, ja voi näin saada aikaan aallon murtumisen aallotusvaiheessa. (Ek, K-E. & Mäkeläinen, M. 1983)

Pakkaamisessa käytettäviltä papereilta ja kartongeilta vaaditaan yleisesti ottaen kykyä suojata pakkausta sisältöineen niin mekaaniselta rasitukselta kuin esimerkiksi ilmankosteuden aiheuttamilta muutoksilta. Pakkauskartonkien laatutestit keskittyvätkin mittaamaan näitä suojausominaisuuksia ennustavia tekijöitä. Lisäksi testimenetelmien yhtenä tärkeänä tavoitteena on ennustaa kartongin sopivuus ja ajettavuus jatkojalostusprosessissa. (Kainulainen, M. & Söderhjelm, L. 1999)

Kolme käytetyintä aallotuskartongin puristuslujuusmittausta ovat CMT (Concora Medium Test), CCT (Corrugated Crush Test) ja SCT (Short Span Compression test). Mittausten suorittamista on havainnollistettu kuvassa 2.



KUVA 2. Havainnekuvat diplomityössä tarkasteltavista lujuusmittauksista vasemmalta oikealle: CMT eli Concora Medium Test, CCT eli Corrugated Crush Test ja SCT eli Short-Span Compression test. (Kuva: Stora Enso. 2018)

CMT-arvo mittaa laboratoriossa aallotetun kartonkinäytteen puristuslujuutta. Kooltaan 152 x 12,7 mm kartonkiliuskaa kuormitetaan kohtisuoraan ylhäältäpäin, kunnes aaltorakenne menettää muotonsa. CMT-arvo on se puristusvoiman maksimiarvo (N), jonka aallotettu kartonkinäyte kestää muodossaan. CMT-arvon tavoin CCT-arvo mitataan aallotetusta kartonkiliuskasta. CCT-näyte vastaa kooltaan CMT-näytettä ja myös sitä tutkitaan tyypillisesti konesuuntaisesti. CCT-näyte asetetaan lappeelleen erityiseen pidikkeeseen, jonka jälkeen sitä kuormitetaan kohtisuoraan ylhäältä käsin. CCT-arvo on tämän kuormituksen maksimiarvo jaettuna kartonkinäytteen pituudella (kN/m). (Kainulainen, M. & Söderhjelm, L. 1999)

SCT-arvo poikkeaa mittaustavaltaan kahdesta aiemmin esitellystä mittaamenetelmästä. Lisäksi CCT- ja CMT-arvoja seurataan perinteisesti konesuunnassa, mutta SCT-arvoja tarkastellaan usein poikkisuuntaisesti. Testimenetelmä mahdollistaa kuitenkin mittauksen suorittamisen kumpaankin suuntaan. SCT-arvo mitataan leikkaamalla kartongista noin 15 mm leveä näyte, joka asetetaan kapeaan vapaaseen väliin. Testilaitteisto tarraa kiinni näytteenottokohdan kummallekin puolelle, mikä estää näytteen lommahtamisen ja taipumisen mittauksen aikana. SCT-arvo lasketaan jakamalla maksimipuristusvoima näytteen leveydellä (kN/m). SCT-arvoa pidetään usein luotettavimpana tapana mitata kartongin puristuslujuutta. (Kainulainen, M. & Söderhjelm, L. 1999)

Varsinaisten lujuusmittausten lisäksi tässä työssä on hyödynnetty kartongin ilmanläpäisyvastus- ja puhkaisuindeksi-arvoja.

Kartongin ilmanläpäisyvastus mitataan käytännössä määrittämällä se aika, joka kuluu tietyn määrän ilmaa kulkiessa paperi- tai kartonkinäytteen läpi standardoiduissa näytteenotto-olosuhteissa. Ilmanläpäisyvastusta käytetään usein epäsuorana indikaattorina esimerkiksi jauhatusteelle tai absorptio-ominaisuuksille. Ilmanläpäisyvastukseen vaikuttavat esimerkiksi paperin rakenne, joka taas muodostuu pitkälti kuitujen pituuden ja orientaation perusteella. (Walkinshaw, J.W. 2006) Tehtaalla ilmanläpäisevyysominaisuuksia seurataan Gurley-testausmenetelmää noudattaen.

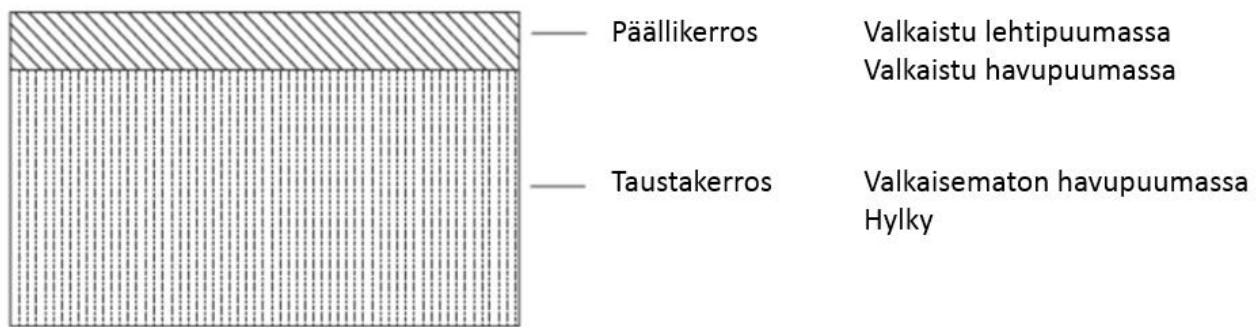
Puhkaisuindeksi-arvo ($\text{kPa}/\text{m}^2/\text{g}$) lasketaan jakamalla paperi- tai kartonkinäytteen puhkaisulujuusarvo näytteen neliömassalla. Puhkaisulujuudella tarkoitetaan vastaavasti sitä maksimikuormitusta, jonka kartonkinäyte kestää rikkoutumatta, kun sitä kuormitetaan kohtisuoraan. (Levlin, J-E. 1999)

2.2 Lainerit ja liima

Aallotuskartongin lisäksi aaltopahvin raaka-aineina käytetään pintakartonkia eli laineria sekä liimaa, jonka tehtävänä on liittää aaltopahvin kerrokset toisiinsa.

Aaltopahvin pintakerroksina käytettävät lainerit ovat rakenteeltaan tyypillisesti kaksikerroksisia. Neitsytkuiduista valmistettuja lainereita kutsutaan yleisesti kraftlainereiksi, ja niiden raaka-aineena käytetään useimmiten joko valkaistua tai valkaisuamatonta havupuumassaa. Kierrätyskuidusta valmistettua laineria kutsutaan vastaavasti testlaineriksi. (Hartikainen, K. 2008)

Loppukäyttökohteesta riippuen laineri voidaan valmistaa joko niin, että sen kummatkin kerrokset ovat valkaisuamattomasta massasta tai vaihtoehtoisesti vain päällimmäinen kerros valmistetaan valkaistusta massasta. Valkaistua päällipinta on toisinaan edullinen lopputuotteen painatuksen kannalta. (Hartikainen, K. 2008) Valkopintaisen lainerin rakennetta on havainnollistettu kuvassa 3.



KUVA 3. Valkopintaisen kraftlainerin rakenne. Paksumpi taustakerros koostuu valkaisuamattomasta massasta ja hyllystä. (Suomennettu. Kivaranta, A. 2008)

Aallotuskartongin tavoin lujuusominaisuudet ovat ensiarvoisen tärkeitä myös pintakartongeille. Puristuslujuuden lisäksi lainerin tulee olla kestävä myös puhkaisu- ja vetolujuusominaisuuksiltaan. (Hartikainen, K. 2008)

Yleisimmin liimana aaltopahvia valmistettaessa käytetään tärkkelyspohjaista liimaa. Useimmiten käytetty liima on maissitärkkelystä, mutta myös vehnä- ja perunatärkkelystä käytetään. Aaltopahvikoneessa aallotuskartonki lämmitetään ennen aallotusta ja aallotuksen jälkeen liima annostellaan aallotuskartongin aallon huipuille. Korkeamman lämpötilan ansiosta tärkkelys gelatinoituu ja muodostaa siten sitovan ja nopeasti kuivuvan liimasauman aallotuskartongin ja lainerin välille. (Laakso, O. & Rintamäki, T., 2003)

3 AALLOTUSKARTONGIN VALMISTUSPROSESSI

Tässä luvussa on kuvattu aallotuskartongin valmistusprosessi keskittyen diplomityön kannalta olennaisiin ja kiinnostaviin prosessivaiheisiin sekä lopputuloksen kannalta tärkeiksi arvioituihin muuttujiin.

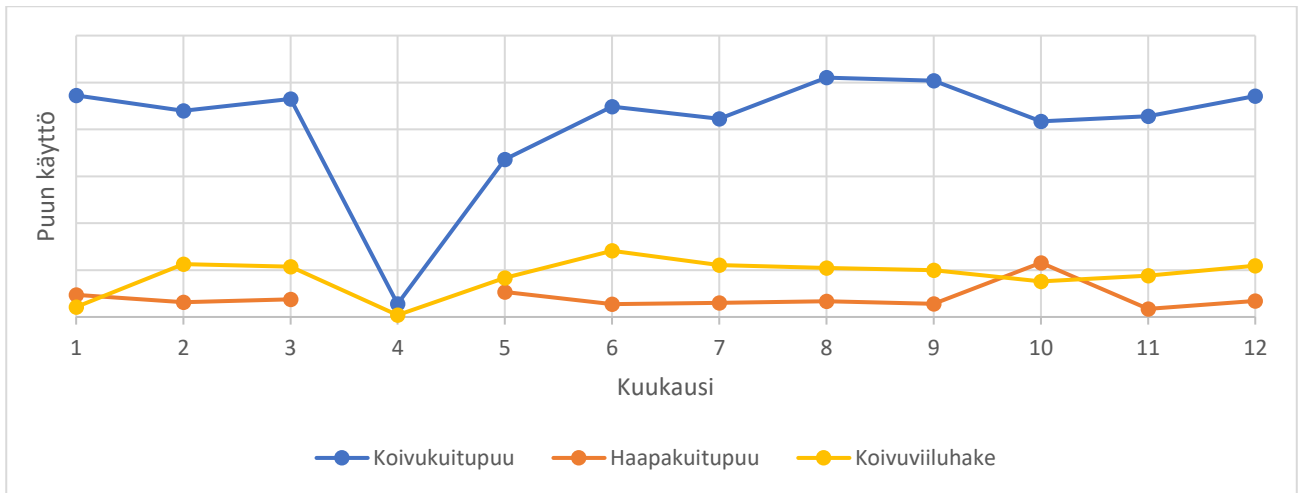
3.1 Puuraaka-aine

Puolikemiallista aallotuskartonkia valmistetaan pääosin lehtipuusta. Suomessa raaka-aineena käytetään pääosin koivua, mutta sen oheen voidaan annostella pieniä määriä haapaa tai leppää. Koivun katsotaan sopivan erinomaisesti aallotuskartongin raaka-aineeksi, sillä sen hemiselluloosapitoisuus on verrattain korkea. Lisäksi koivupuun kuidut ovat lyhyitä ja paksuseinäisiä. Nämä ominaisuudet ovat suotuisia korkeaa jäykkyyttä tavoiteltaessa. Eri puulajeja käytettäessä täytyy huomioida se, että satunnaiset, ei-hallitut ja huomattavat annostelupoikkeamat aiheuttavat yllättäviä heilahduksia niin tuotantoprosessissa kuin lopputuotteen laadussakin. Tasaisesti annosteltu maltillinen määrä, alle 10 %, muuta puuta kuin koivua ei kuitenkaan häiritse prosessia. (Ek, K-E. & Mäkeläinen, M. 1983)

Heinolan flutingtehtaalla käytetään pääraaka-aineena koivukuitupuuta. Koivupuun lisäksi merkittävimmät raaka-aineet ovat koivuviiluhake ja haapakuitupuu. Näiden kolmen merkittävimmän raaka-aine-erän lisäksi käytetään pieniä määriä valmista koivuhaketta, leppäkuitupuuta ja haapaviiluhaketta.

Tehtaan puuraaka-aineen käyttöä vuonna 2018 on esitetty kuukausitasolla kuvassa 4. Kuvasta nähdään, että koivukuitupuun osuus raaka-aineesta on ylivoimainen. Koivukuitupuuta käytetään kuukausittain noin neljä kertaa enemmän kuin koivuviiluhaketta, joka on raaka-aineista toiseksi käytetyin.

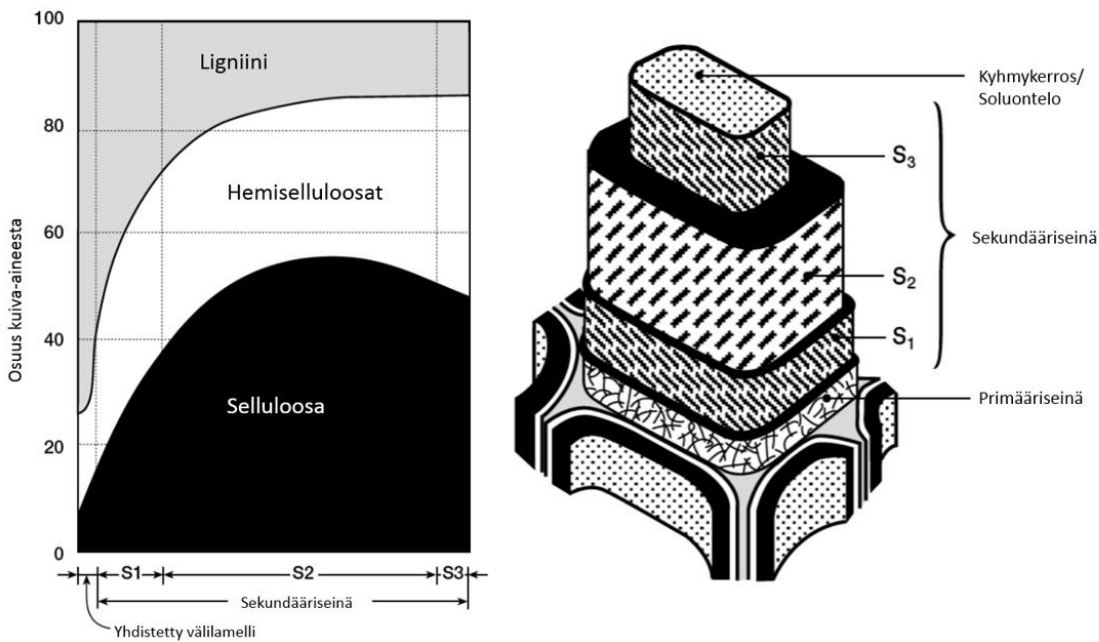
Pienestä vaihtelusta huolimatta puuraaka-aineiden välinen suhde on pysynyt suunnilleen samana eri kuukausien välillä. Poikkeuksena tähän on ainoastaan lokakuu, jolloin haapakuitupuuta oli käytössä koivuviiluhaketta enemmän. Tehtaalla pidettiin noin kuukauden mittainen asennusseisokki huhtikuussa, jolloin puuraaka-ainetta ei käytetty käytännössä lainkaan. Tämä näkyy kuvassa x-akselin arvon, eli kuukauden, ollessa 4.



KUVA 4. Flutingin pääraaka-aineena käytetään kuivukuitupuuta.

Puukuidun tärkeimmät rakenneaineet ovat selluloosa, hemiselluloosat sekä ligniini. Näiden lisäksi kuidussa on pieniä määriä uuteaineita, joiden pitoisuudet vaihtelevat puulajeittain. Puusolut koostuvat erilaisista kerroksista, joita on havainnollistettu kuvassa 3.

Rakenneainesosien pitoisuudet vaihtelevat paljon eri kerrosten välillä. Primääriseinä on muihin kerroksiin verrattuna kohtalaisen ohut ja se sijaitsee uloimpana. Paperinvalmistuksen kannalta olennaisin kerros on paksu sekundääriseinä, joka voidaan jakaa edelleen kolmeen erilliseen kerrokseen. Sekundääriseinämän kerroksista paksuin, ja siten ominaisuuksien muodostumisen kannalta olennaisin, on noin puolet selluloosaa sisältävä keskikerros s2. Lisäksi soluseinän sisäpinnalla on ohut kyhmykerros. (Hägglom-Ahnger, U. & Komulainen, P., 2003)



KUVA 3. Puun rakenne ja rakenneosien pitoisuudet eri kerroksissa. (Suomennettu: Hakkila, P. & Verkasalo, E. 2009)

Lehtipuiden solurakenne on havupuita monimutkaisempi ja niistä onkin erotettavissa enemmän erilaisia soluja. Tyypillisesti solut jaotellaan puusyihin, putkilosoluihin ja tylppysoluihin. Puun kemiallista koostumusta tärkeämpää valmistettavan paperin tai kartongin kannalta ovat kuitenkin kuitujen mitat. Kuidun pituudella on selkeä merkitys lopputuotteen lujuusominaisuuksille. Lisäksi kuidun leveys sekä seinämän paksuus vaikuttavat kuidun lommahtamisherkkyyteen sekä taipuisuuteen. (Hägglom-Ahnger, U. & Komulainen, P., 2003) Puulajien kemiallista koostumusta sekä kuitujen mittoja on vertailtu keskenään taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Suomessa yleisimmin käytettyjen puulajien kemiallinen koostumus ja vastaavien kuitulajien ominaisuuksia. (Hägglom-Ahnger, U. & Komulainen, P., 2003)

Puu-/kuitulaji	Selluloosa (%)	Hemiselluloosa (%)	Ligniini (%)	Uuteaineet (%)	Kuitupituus (µm)	Halkaisija (µm)	Seinämän paksuus (µm)
Koivu	40	30-35	20-25	<5	0,9-1,2	22	3
Mänty	42	26	27	<5	3,0	20-35	2,1-5,5
Kuusi	42	28	28	<5	3,1	19-33	2,3-4,5

3.2 Massanvalmistus

NSSC-massan valmistuksen kemiallisen vaiheen päätarkoituksena on heikentää kuitujen välisiä sidoksia kemikaalien ja lämpötilan avulla. Kuitujen välisten sidosten heikentymisen onnistumiseen vaikuttavat monet tekijät: olennaisia ovat esimerkiksi hakkeen koko ja laatu, keittonesteen koostumus ja imeytyminen sekä keittovaiheet aikaiset prosessiolosuhteet: lämpötila, keittoaika ja paine. (Ek, K-E. & Mäkeläinen, M. 1983)

Keittovaiheen aikana puusta pyritään liuottamaan ligniini, sillä aallotuskartongilta vaadittavat jäykkyysominaisuudet pystytään saavuttamaan jo korkean hemiselluloosapitoisuuden ansiosta. Delignifioituminen on hidas reaktio ja riittävän reaktionopeuden saavuttamiseksi keitto tapahtuu korkeammassa 160-190 asteen lämpötilassa. Keiton jälkeen massan ligniinipitoisuus on tyypillisesti 15-20 %. Keiton aikana liukenee väistämättä ligniinin lisäksi myös hemiselluloosaa, mutta sen sijaan selluloosan suhteen ei esiinny juuri lainkaan häviöitä. (Ek, K-E. & Mäkeläinen, M. 1983)

Integroidussa tehtaassa valmistettavan puolikemiallisen massan valmistuksessa varsinaista keittovaihetta täydennetään tyypillisesti mekaanisella kuidutuskäsittelyllä, jonka tehtävänä on erottaa haketta muistuttava keite kuitukimpuiksi. Kuidutus toteutetaan joko korkeassa tai keskikorkeassa sakeudessa eikä vaiheen yhteys valmiin kartongin laatuominaisuuksiin ei ole selkeä. (Annergren, G. & Hagen, N. 2009)

3.3 Jauhatus

Jauhatusvaiheen pääasiallisena tarkoituksena on parantaa mahdollisuuksia kuitujen välisten sidosten syntymiseen ja siten edistää lujuusominaisuuksien kehittymistä tuotteelle suotuisaan suuntaan. Jauhatukselle tyypillisesti puhkaisu- ja vetolujuusarvot sekä kartongin tärkeät jäykkyysarvot kasvavat tiettyyn jauhatusmäärään saakka, kunnes kääntyvät laskuun. (Ek, K-E. & Mäkeläinen, M. 1983)

Jauhatuksen tärkeimpänä tehtävänä voidaan pitää paperin laatuominaisuuksien kehittämistä. Jauhatus vaikuttaa erityisesti paperin ja kartongin lujuusominaisuuksiin, pinnan sileyteen, optisiin ominaisuuksiin ja formaatioon. (Koskenhely, 2009) Aallotuskartonkia valmistettaessa erityisesti lujuusominaisuuksien merkitys korostuu. (Smook, G. 1992)

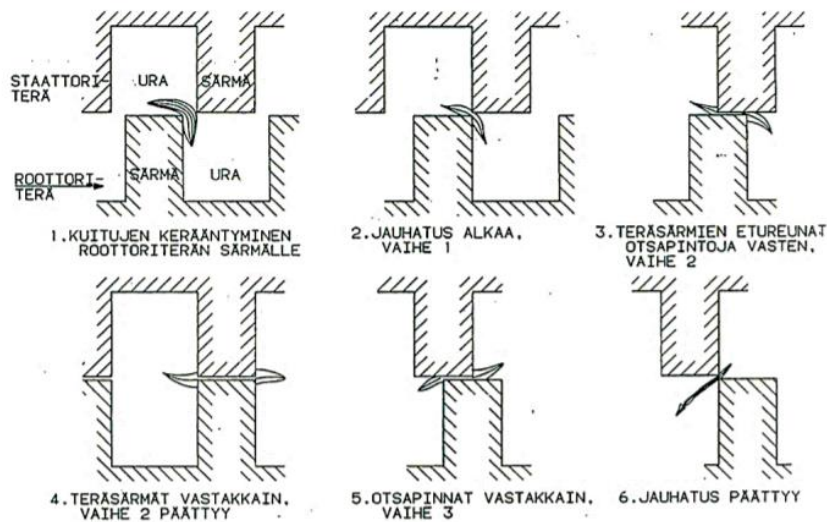
3.3.1 Jauhatustapahtuma

Tarvittava jauhinten ja jauhatusvaiheiden määrä riippuu valmistettavasta tuotteesta ja vaadittavasta kapasiteetista sekä tämän vaihtelusta. Useampia jauhatusvaiheita tarvitaan erityisesti silloin, kun lopputuotteen takia tähdätään korkeaan jauhatusmäärään tai tarvittavassa jauhatuskapasiteetissa on suurta vaihtelua. Esimerkiksi vähän jauhettaville pehmopapereille yksi jauhatusvaihe on riittävä, mutta rasvankestäviä papereita on jauhettava jopa 6 vaiheessa. (Koskenhely, K. 2007)

Aallotuskartongin valmistusprosessissa jauhatus on yleensä kaksivaiheinen, sillä havaintojen perusteella kahdella lievemmällä jauhatuskäsittelyllä saadaan parempi lopputulos kuin yhdellä rajummalla. (Ek, K-E. & Mäkeläinen, M. 1983) Myös Heinolan flutingtehtaalla on kaksi jauhatusvaihetta.

Jauhatustapahtuman etenemistä on havainnollistettu kuvassa 4. Ensimmäisessä vaiheessa kuitukimput kerääntyvät roottoriterän särmälle. Tässä vaiheessa sakeus vaihtelee tyypillisesti välillä 3-5 % ja kuituflokkit sisältävätkin lähinnä vettä. Kun roottorin särmä saavuttaa staattoriterän särmän, kuituflokki puristuu ja vastaanottaa voimakkaan iskun. Iskun ja puristuksen seurauksena suurin osa vedestä poistuu flokista. Roottorin ja staattorin särmien väliin jäävä kuitu vastaanottaa siis suuren määrän mekaanista rasitusta jauhatusprosessin aikana. (Lumiainen, J. 2000)

Jauhatustapahtuman lopputulokseen vaikuttaa paljon kuitujen asettuminen teräsärmien päälle jauhatusvaiheen aikana ja lisäksi kuitukimppujen yleinen käyttäytyminen jauhatusvaiheen aikana. Pitkät kuidut asettuvat helposti terien päälle ja ovat alttiita muodostamaan flokkeja. Vastaavasti lyhyet lehtipuukuidut asettuvat terille huonosti. Lisäksi lyhyistä kuiduista muodostuneet flokit hajoavat helposti jauhatuksen aikana. (Lumiainen, J. 2000)



KUVA 4. Jauhatuksen vaiheet. (Lumiainen, J. 1989)

Massan suotautuvuutta käytetään usein massan laadun ja jauhatuksen onnistumisen mittarina. Käytännössä suotautuvuudella tarkoitetaan massasulpun vedenpoistokykyä. Kyky poistaa vettä on vastaavasti usein kääntäen verrannollinen massan sitoutumiskykyyn sekä kykyyn muodostaa tasainen paperiraina. Suotautuvuudella on vaikutus lopputuotteen ominaisuuksiin, sillä se vaikuttaa olennaisesti rainanmuodostusominaisuuksiin. Suotautuvuudesta riippuvia kartongin ominaisuuksia ovat esimerkiksi vetolujuus, repeytymislujuus sekä kuituorientaatio. (AEL. 2019)

Yleisimmät tavat massan suotautuvuuden mittaamiseen ovat CSF eli Canadian Standard Freeness ja SR-luku Schopper-Riegler. Nämä mittaavat käytännössä täysin samaa asiaa, mutta mitta-asteikot ovat käänteiset: jauhatusmäärän kasvaessa CSF-arvo kasvaa ja SR-arvo pienenee. CSF- tai SR-lukua ei tulisi kuitenkaan käyttää yksinään ohjaussuureena, sillä nämä kummatkin suotautumisen testimenetelmät ovat erittäin herkkiä veden laadun vaihtelulle. Esimerkiksi pH-arvon sekä veden elektrolyyttipitoisuuden vaihtelut vaikuttavat helposti mittaustulokseen. (Hiltunen, E. 1999)

3.3.2 Jauhatusteoriat ja jauhatuksen ohjaaminen

Matalasakeusjauhatusta pystytään säätämään lähinnä muuttamalla staattorin ja roottorin välistä terävälystä. Välyksen muuttuessa roottorin ja staattorin välinen kitka muuttuu, mikä vaikuttaa jauhimen moottorin tehonottoon. Välysmuutosten yhteys jauhimen tehonottoon ei ole kuitenkaan lineaarista. Käytännössä jauhatuksen operaattorin keinot ohjata jauhatusta ja reagoida muutoksiin nopeasti ovat hyvin rajalliset. Tyypillinen ongelma jauhatuksen säädössä on lisäksi mittauksissa usein

esiintyvä viive. Suotautuvuusmittauksia SR ja CSF käytetään usein jauhatusta ohjaavina parametreina, mutta mittauksen valmistuessa operaattorin hyödynnettäväksi, varsinaisen reagoitintarpeen alkamisesta on voinut kulua jo tovi. (Koskenhely, K. 2009)

Erilaisten jauhatuksessa esiintyvien ohjaus- ja säätötapaasteiden ansiosta on kehitetty useita erilaisia jauhatusteorioita, joiden pääasiallisena tarkoituksena on auttaa selvittämään ja määrittämään kullekin tehtaalle sekä valmistettavalle tuotteelle sopiva jauhatuskuormituksen taso. Jauhatusteorioista tunnetuin ja hyödynnetyin on ominaissärmäkuormateoria (= OSK tai SEL = Specific edge load). Ominaissärmäkuormateorian lisäksi tunnettuja jauhatusteorioita ovat C-tekijäteoria ja ominaissärmäkuormateoriaan perustuva Jorma Lumiaisen (1990) esittämä ominaispintakuormateoria. (Koskenhely, K. 2009)

Ominaissärmäkuormateoria erottaa jauhatuksen määrän ja jauhatustavan eli intensiteetin. Jauhatuksen määrää kuvataan energian ominaiskulutuksella (=EOK tai SRE = Specific refining energy) ja jauhatuksen intensiteettiä ominaissärmäkuormalla eli jauhiniskujen intensiteetillä. (Lumiainen, J. 1999)

Ominaissärmäkuorma voidaan laskea kaavalla 1 (Hägglom-Ahnger, U. & Komulainen, P., 2003):

$$\text{OSK} = \frac{P_t - P_w}{L \times n},$$

(1)

jossa OSK = ominaissärmäkuorma, specific edge load (J/m tai Ws/m)

P_t = Jauhimen kokonaisteho (kW)

P_w = Jauhimen häviöteho (kW)

L = Jauhimen teräsärmien kokonaispituus (km)

n = Jauhimen kierrosluku (r/s)

Vastaavasti jauhatuksen määrä eli energian ominaiskulutus voidaan laskea kaavalla 2 (Hägglom-Ahnger, U. & Komulainen, P., 2003):

$$EOK = \frac{P_t - P_w}{m}, \quad (2)$$

jossa EOK = energian ominaiskulutus (kWh/t)

P_t = Jauhimen kokonaisteho (Kw)

P_w = Jauhimen häviöteho (kW)

m = Tuotannon määrä (t/h)

Useille jauhinteorioille on tyypillistä erottaa jauhimen teho kahdeksi komponentiksi. Jauhimen nettoteho on se tehomäärä, joka varsinaisesti kohdistuu jauhettaviin kuituihin. Nettoteho saadaan laskettua vähentämällä jauhimen kokonaistehosta jauhimen häviöteho. Jauhimen häviöteho määritetään ajamalla jauhimen läpi pelkkää vettä ja pitämällä teräväli samalla niin kapeana kuin mahdollista. (Lumiainen, J. 1999)

Nykyään tyypillinen tapa jauhatuksen ohjaamiseen on valmistettavan tuotteen kannalta sopivan lopputuloksen tuottavan jauhatusmäärän eli EOK-tason määrittäminen. Tavoiteltava EOK-taso riippuu aina prosessista ja lopputuotteesta. EOK-tavoitetasoa lisäksi yleisesti käytettyjä jauhatuksen ohjaustapoja ovat esimerkiksi tietyn CSF-arvon tai sopivan ilmanläpäisyvastustason tavoittelemine. Käytännössä ohjaustavan tarkkuus on aina riippuvainen kunkin ohjaussuureen mittauksen tarkkuudesta ja mittausten riittävästä taajuudesta. Jauhatuksen kannalta on kuitenkin tärkeää olla tekemättä äkkinäisiä ja suuria muutoksia. Tämä vältetään seuraamalla yksittäisen arvon sijaan esimerkiksi viiden edellisen mittauskerran liukuvaa keskiarvoa. Mittausmenetelmien epätarkkuuden vuoksi yksittäiselle mittaukselle ei tule antaa liian suurta painoarvoa. (Lumiainen, J. 2000)

Hyvän ohjaustavan löytäminen ja sen toteuttaminen käytännössä edellyttää jauhatusprosessista tehtäviltä mittauksilta hyvää tarkkuutta ja luotettavuutta. Jauhatusvaiheesta tehtävistä mittauksista kenties haasteellisin on sakeusmittaus. Sakeusmittauksen epäluotettavuus on ongelmallista, sillä

huono sakeusmittaustulos vaikuttaa myös EOK-laskennan onnistumiseen ja luotettavuuteen. (Annergren, G. & Hagen, N. 2009)

3.3.3 Jauhatuksen muuttujat

Jauhatuksen muuttujat voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin muuttujiin. Passiivisiksi muuttujiksi kutsutaan niitä laitteiden ja koneiden ominaisuuksia, joihin pystytään vaikuttamaan käytännössä lähinnä silloin kun valitaan käytettävää laitteistoa, mutta ei aktiivisesti normaalin toiminnan aikana. Tällaisia ovat esimerkiksi jauhinten tyyppi ja käytettävät terät. (Lumiainen, J. 2000)

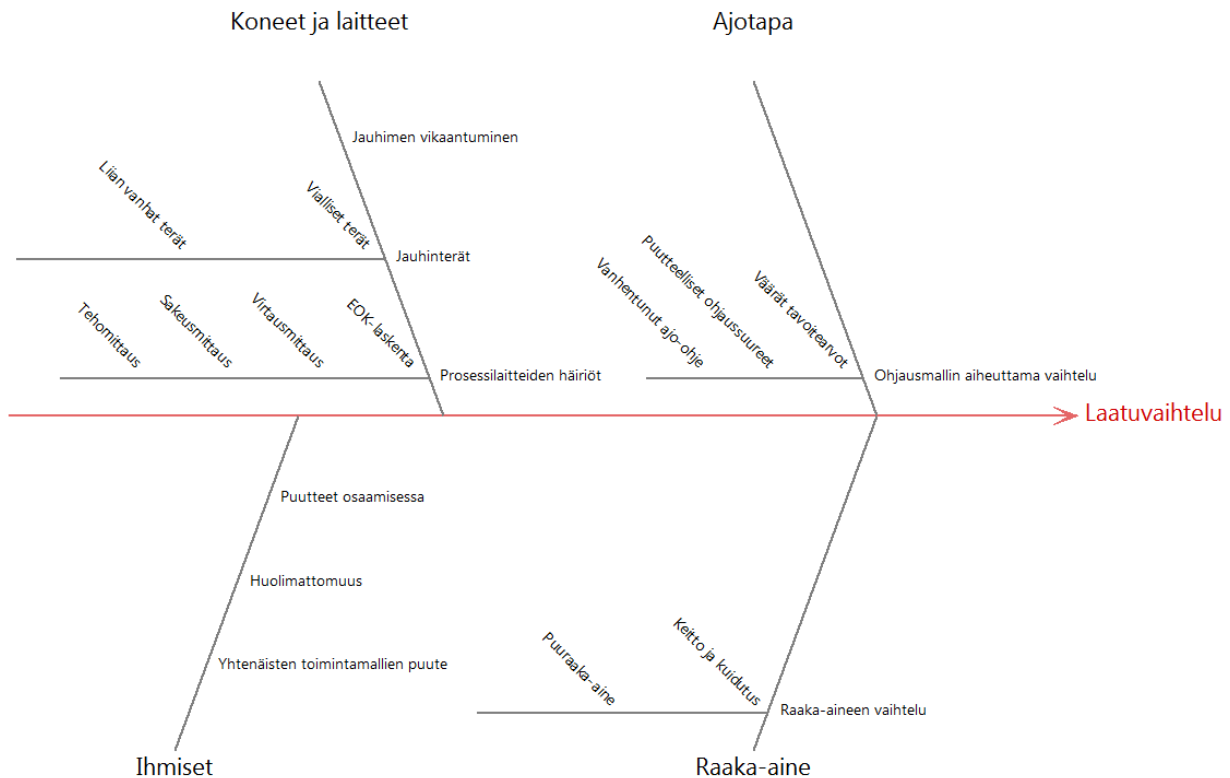
Laitteiston lisäksi tällaisia olennaisia muuttujia, joihin ei kuitenkaan jauhatuksessa voida aktiivisesti vaikuttaa, ovat esimerkiksi kuitujen ominaisuudet sekä massan jauhatusaste, eli CSF- tai SR-arvo, jauhimen sisääntulossa. Virtausnopeus vaikuttaa jauhatustuloksen syntymiseen, mutta siihen ei voida vaikuttaa vaan se syntyy paperikoneen nopeuden mukaan. (Lumiainen, J. 2000)

Prosessin muuttujiin, kuten sakeuteen ja pH-arvoon, voidaan vaikuttaa jossain määrin, mutta vaikutusmahdollisuudet ovat kuitenkin rajalliset. Vaikka käytetty sakeus vaikuttaa jauhatuksen lopputulokseen, sakeutta ei tulisi pääsääntöisesti käyttää varsinaisena säädettävänä muuttujana, sillä se valitaan kulloinkin käytettäville terille sopivaksi. Tyypillisesti matalasakeusjauhatuksessa käytettävä sakeus on lehtipuille välillä 4,5 – 5 %. Sakeutta voidaan kuitenkin joutua käyttämään säädettävänä muuttujana niissä tilanteissa, kun jauhatukseen tulevassa massassa on vaihtelua eikä näin ollen käytössä oleva teräkuvio ole optimaalinen kulloinkin ajossa olevalle massalle. (Lumiainen, J. 2000)

Jauhatusvaiheessa massan pH-arvolla on vaikutusta siihen, kuinka vesi pääsee tunkeutumaan kuituihin. Yleisesti suositellaan tavoiteltavaksi neutraalia pH-arvoa. Mikäli pH-arvo on alle 7 ja ympäristö näin ollen hapan, vesi ei pääse penetroitumaan kuituihin kunnolla. Kun kuidut eivät kastu riittävästi, kuitujen katkeilu ja hienoaineen muodostuminen lisääntyvät. Vastaavasti emäksinen ympäristö (pH>10) muuttaa kuidut liukkaiksi ja hankaloittaa kuitujen pysymistä jauhinten terillä. (Lumiainen, J. 2000)

Käytännössä ainoat jauhatuksen muuttujat, joita on mahdollista säätää aktiivisesti, ovat jauhinterien vällys sekä sakeus. Kuten kappaleessa 2.3.2 todettiin, staattorin ja roottorin välisen terävälän säätäminen vaikuttaa jauhimen tehonottoon ja siten kuituihin kohdistuvaan jauhatustapahtumaan. Lisää jauhatusvaiheen vaihtelua aiheuttavia tekijöitä on havainnollistettu kuvassa 5.

Jauhatusvaiheen vaihtelua aiheuttavat tekijät



KUVA 5. Jauhukseen vaihtelua aiheuttavat tekijät. (Lampela, S. & Saari, T. 2019)

3.3.4 Jauhituksen vaikutukset kuituihin

Jauhituksen vaikutukset itse kuituihin jaetaan tyypillisesti kuuteen erilaiseen vaikutusmekanismiin: ulkoiseen ja sisäiseen fibrillaatioon, kuidun suoruuden muutoksiin, kuitujen katkeiluun sekä keskipituuden lyhenemiseen, hienoaineen syntymiseen ja viimeisenä kuidun seinämän liukenemiseen joko osittain tai kokonaan. (Häggbloom-Ahnger, U. & Komulainen, P., 2003) Jotta paperin lujuusominaisuudet pääsisivät kehittymään, kuitujen tulee olla notkeita ja mukautumiskykyisiä rainan muodostuessa ja myöhemmin puristinosalla puristuessa. (Koskenhely, K. 2007)

Yksi jauhituksen olennaisimmista ja tärkeimmistä vaikutuksista on kuidun primäärikalvon poistaminen, sillä kuidun kalvokerrokset estävät vahvojen kuitusidosten syntymisen. Vaikka osa primäärikalvosta poistuu kuidusta jo massaa keitettäessä, on kalvon poistaminen kuitenkin tärkeä jauhituksen alkuvaiheen tehtävä. Primäärikalvo ei kykene turpoamaan, joten se estää kuitua

muodostamasta sidoksia muiden kuitujen kanssa. Primäärikalvon lisäksi kuidusta poistuu usein myös osa S1-kerroksesta. (AEL. 2019.)

Kun kuidun primäärikalvo ja osa S1-kerroksesta on poistunut jauhatuksen seurauksena, voi kuidun pintaan jäädä kuitenkin kiinni kuidun eri ulkokerrosten kappaleita. Nämä kiinnijääneet kappaleet saavat pintarakenteen osaltaan fibrilloituneeksi. Varsinainen ulkoinen fibrillaatio eli fibrillikimppujen osittainen irtoaminen kuidun pinnasta tapahtuu vasta kuitenkin kuidun s2-kerroksen paljastuttua. Ulkoinen fibrillaatio on tärkeää kuitujen välisten sidosten syntymiselle, sillä fibrillikimppujen osittainen irtoaminen saa kuidun ulkoisen pinta-alan kasvamaan (AEL. 2019.)

Sisäistä fibrillaatiota voidaan pitää primäärikalvon poistamisen ohella yhtenä jauhatuksen merkittävimmistä vaikutuksista kuituun. Käytännössä sisäisellä fibrillaatiolla tarkoitetaan tilannetta, jossa vesi pääsee penetroitumaan soluseinään, kun kuitu on ensin turvonnut jauhinterien siihen kohdistaman paineen ja rasituksen vaikutuksesta. Tämän johdosta kuidusta tulee aiempaa notkeampi ja paremmin muokkautuva. Jauhatusmäärää pidetään olennaisimpana sisäinen fibrillaation syntymistä edesauttavana tekijänä. (Koskenhely, K. 2007)

Etenkin matalasakeusjauhatuksen tiedetään katkovan kuituja, mikä osaltaan kehittää lujuusominaisuuksia epäsuotuisaan suuntaan. Kuitujen katkeilemiseen vaikuttavat eniten jauhimen kuituun kohdistama kuormitus sekä jauhimen terien kunto. Jauhatusmäärä pitäisi sovittaa sellaiseksi, että kuidut eivät katkeile liikaa, mutta toisaalta sen pitäisi kuitenkin olla riittävä halutun kuidun sisäisen fibrillaation saavuttamiseksi. Keskipituuden lisäksi jauhatus vaikuttaa myös kuidun kiharuuteen tai suoruuteen. Suorien kuitujen katsotaan antavan kiharia kuituja paremmat vetolujuusominaisuudet. Jauhatuksen muuttujien vaikutusta kuitujen suoristumiseen ei ole vielä täysin ymmärretty. (Koskenhely, K. 2007)

Viimeisin jauhatuksen kuituihin tuottama vaikutus on hienoaineen ja orgaanisten yhdisteiden vapautuminen. Jauhatuksen aikana kuidusta liukenee sitä ympäröivään nesteeseen LK-aineita. Liukenevien aineiden määrä on riippuvainen aikaisempien massanvalmistusvaiheiden saannosta ja korkeasaantomassoista liukeneekin enemmän erilaisia yhdisteitä kuin matalasaantomassoista. Aineiden liukeneminen on suurinta jauhatuksen alkuvaiheessa. (Koskenhely, K. 2007)

4 TILASTOLLISET MENETELMÄT JA KOESUUNNITTELU

Tilastolliset menetelmät voidaan katsoa jaettavan passiivisiin ja aktiivisiin menetelmiin. Passiivisilla tilastollisilla menetelmillä viitataan käytännössä prosessista kerätyn aineiston tilastolliseen tarkasteluun erilaisia tarkoituksia varten. Koesuunnittelumenetelmät taas luokitellaan aktiivisiksi menetelmiksi, sillä niiden perimmäisenä ajatuksena on luoda prosessiin systemaattista ja johdonmukaista vaihtelua, joka parhaimmillaan auttaa tunnistamaan ongelmakohtia ja löytämään niihin ratkaisuja. (Montgomery, D.C. 2009)

Tässä luvussa on kuvattu diplomityön kannalta olennaiset tilastolliset menetelmät sekä teoria niiden takana.

4.1 Yleiset tunnusluvut ja kuvaajat

Tilastollisten tunnuslukujen tarkoituksena on tarjota niiden tutkijalle tietoa kulloinkin käsiteltävän lukujoukon perusominaisuuksista. Yleisesti seurattuja ja paljon käytettyjä tunnuslukuja ovat esimerkiksi keskiarvo, keskihajonta ja varianssi. (Milton, J.S. & Arnold, J.C. 1990.)

Keskiarvon lisäksi lukujoukon keskilukua voidaan kuvata esimerkiksi moodilla tai mediaanilla. Keskilukua kuvaavia tunnuslukuja on vertailtu taulukossa 2.

TAULUKKO 2: Lukujoukon keskilukua kuvaavia tunnuslukuja. (Shardt, Y. 2015)

Tunnusluku	Kaava	Edut	Haasteet
Keskiarvo	$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$	Yksinkertainen laskea ja tulkita	Ääriarvojen painoarvo lopputulokseen suuri
Moodi	Lukujoukossa yleisimmin esiintyvä arvo	Yksinkertainen tulkita	Ei välttämättä anna selkeää kuvaa koko lukujoukosta
Mediaani	Suuruusjärjestykseen järjestetyn lukujoukon keskimäinen luku	Robusti ja helppo tulkita	Usein haastava arvioida tai laskea

Keskilukujen lisäksi lukujoukkojen kuvailemiseen tarvitaan hajontalukuja, sillä pelkkä keskiluku ei paljasta jakauman leveyttä tai sen muotoa. Hajontaluvuista yleisimmin käytetty on keskihajonta ja keskihajonnan neliö eli varianssi. Keskihajonta on yleisesti käytössä oleva aritmeettinen tunnusluku, joka kuvaa tulosten hajoamista keskiarvon kummallekin puolelle. Mitä suurempi keskihajontaluku on, sitä suuremmalle alueelle tulokset hajaantuvat. (Salomäki, R. 1999)

Keskihajonta lasketaan kaavalla 3 (Shardt, Y. 2015):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

jossa

σ = keskihajonta

\bar{x} = lukujoukon aritmeettinen keskiarvo

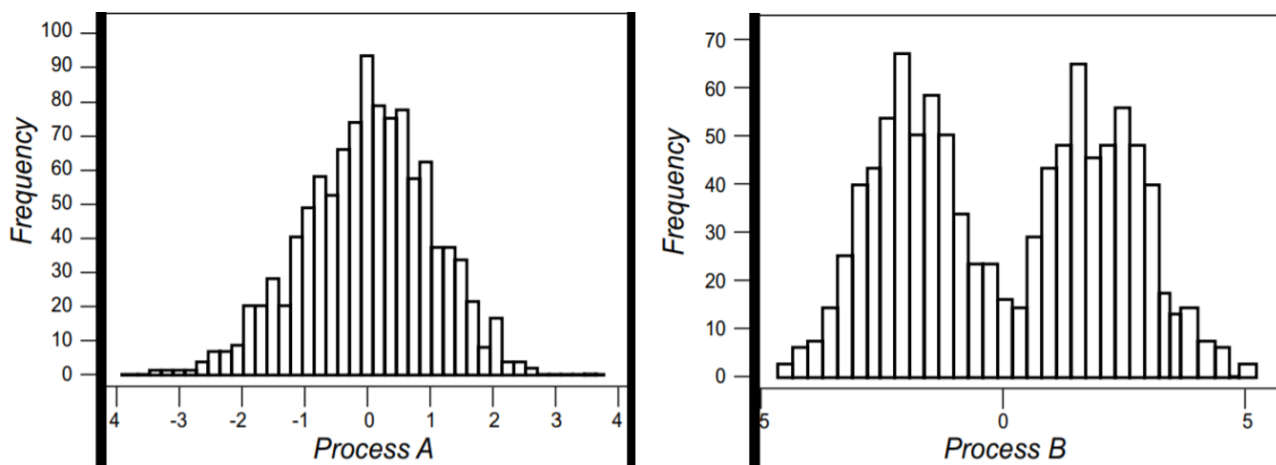
x_i = i:nneen havainnon arvo

n = havaintojen määrä.

Tulosten ja havaintojen esittäminen graafisessa muodossa on erinomainen apuväline prosessin tuottaman datan ja havaintolukujoukkojen tarkasteluun. Erityisesti hajonnan hahmottaminen on usein helpompaa visuaalisesti esitettynä. (Salomäki, R. 1999)

Usein käytettyjä keinoja tämänkaltaiseen visualisointiin ovat histogrammi- ja box plot-kuvaajat. Histogrammia työvälineenä kannattaa hyödyntää erityisesti silloin, kun havaintopisteistä on runsaasti. Pieniä datajoukkoja histogrammeiksi työstettäessä yksittäisen datapisteen painoarvo kohoaa verrattain suureksi, mikä voi aiheuttaa harhaanjohtavia tulkintoja. Liian pieni otoskoko voi johtaa myös kaksihuippuisen histogrammin muodostumiseen. Kellokäyrämuodosta poikkeava histogrammi voi aiheutua myös kehnosti rajatun datajoukon vuoksi. (John, A. 2009)

Histogrammien muotoja on vertailtu kuvassa 6. Vasemmalla ideaali symmetrinen ja kellokäyrän muotoinen histogrammi. Oikeanpuoleisen kaltainen kaksihuippuinen histogrammikuvaaja voi syntyä esimerkiksi väärin asetetun tarkastelujakson seurauksena: tarkasteluajanjakso tulee valita aina niin, että sen aikana ei ole tehty esimerkiksi suuria prosessimuutoksia. (John, A. 2009)

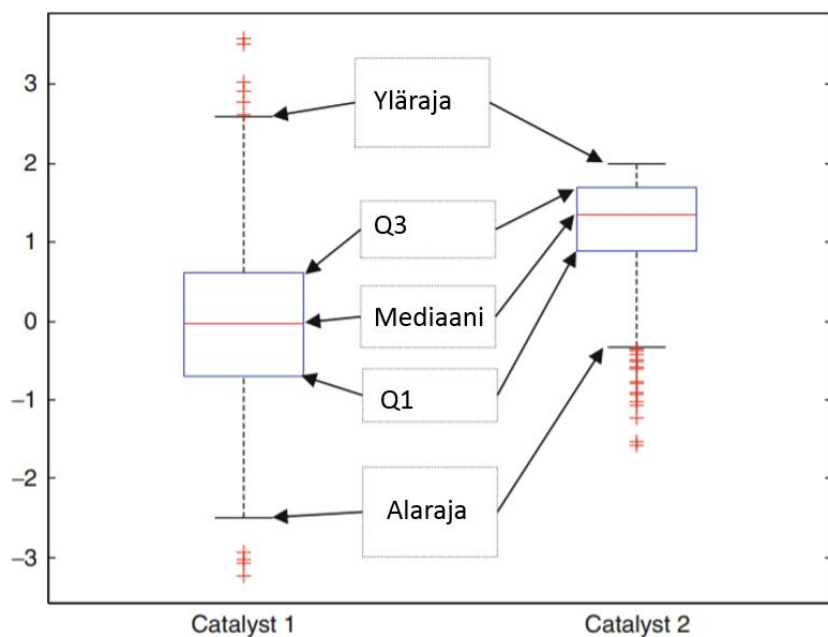


KUVA 6. Ideaali ja kaksihuippuinen histogrammi (John, A. 2009).

Käytännössä histogrammi rakennetaan jakamalla tutkittava datajoukko sopivan kokoisiin jaksoihin. Jokaisen näin muodostuvan blokin tulisi olla yhtä leveä, jotta histogrammin välittämä tieto olisi visuaalisesti mahdollisimman helposti tulkittavissa. Blokkien määrä riippuu tarkasteltavan datajoukon suuruudesta ja riskinä onkin histogrammin välittämän tiedon tuhoaminen käyttämällä joko liian vähän tai liian monia blokkeja. Nyrkkisääntönä voidaan pitää sitä, että sopiva blokkien määrä on sama kuin tarkasteltavan datajoukon havaintojen määrän neliöjuuri. (Montgomery, D.C. 2009)

Histogrammin lisäksi box plot -kuvaajat ovat erinomainen keino visualisoida dataa tai vertailla erillisiä joukkoja keskenään. Kuvion laatikko-osa pitää sisällään puolet havainnoista ja laatikon poikki kulkeva viiva osoittaa mediaanin paikan. Viivaosiot taas kuvaavat havaintojoukon pienimpiä ja suurimpia arvoja. Laatikon yläreunasta lähtevä viiva osoittaa joukon 25 % suurinta arvoa ja laatikon alareunan viiva vastaavasti pienimmät 25 %. Box plot -kaaviosta näkee siis yhdellä silmäyksellä sen mille välillä tarkasteltavat lukuarvot sijoittuvat, arvojen jakautumisen ja mediaanin. Kuvaan merkityt punaiset ristit ovat tilastollisesti muusta lukujoukosta poikkeavia ns. outlier-arvoja, jotka useimmat tilasto-ohjelmat osaavat tunnistavat itsenäisesti. (Montgomery, D.C. 2009)

Box plot-kuvaajan rakennetta on selvennetty kuvassa 7.



KUVA 7. Box plot-kuvaajan rakenne. (Kuva suomennettu: Shardt, Y. 2015.)

4.2 Jakaumat

Tilastotieteessä todennäköisyyden tiheysfunktiota kutsutaan jakaumaksi. Jakauma siis paljastaa kuinka tutkittavat muuttujat ovat jakautuneet kaikkien käytettävissä olevien arvojen välillä. Yleisesti käytettyjä erilaisia jakaumia ovat normaalijakauma, Studentin t-jakauma, χ^2 -jakauma ja F-jakauma. Normaalijakauma jakaumista eniten hyödynnetyin. (Shardt, Y. 2015)

Normaalijakauma on symmetrisesti keskiarvon kummallekin puolelle ryhmittynyt jakauma, joka pystytään määrittämään keskiarvon ja varianssin perusteella. Jakauman leveys riippuu täysin lukujoukon keskihajonnasta ja korkein kohta muodostuu keskiarvon kohdalle. Monet tilastolliset tarkastelu- ja vertailumenetelmät toimivat luotettavimmin kun käytössä oleva data on normaalijakauman mukaista. (Shardt, Y. 2015)

Normaalijakauman tiheysfunktio on nähtävillä kaavassa 4 (Milton, J.S. & Arnold, J.C. 1990.):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \begin{array}{l} -\infty < x < \infty \\ -\infty < \mu < \infty \\ \sigma > 0 \end{array} , \quad (4)$$

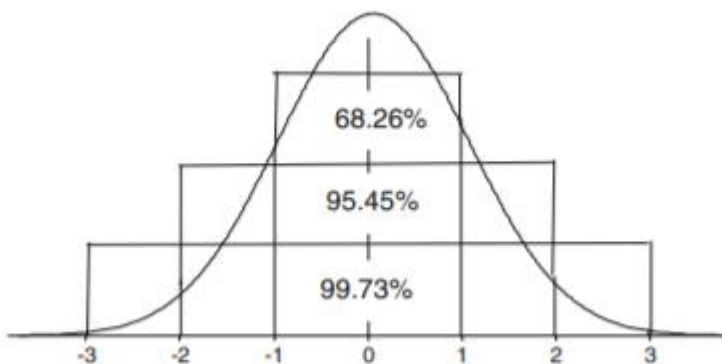
jossa

μ = keskiarvo

σ = keskihajonta.

Normaalijakaumille pätevät lisäksi seuraavat säännöt, jotka on esitetty lisäksi kuvassa 8.

1. 68 % muuttujien arvoista sijoittuu välille $\mu \pm \sigma$
2. 95 % muuttujien arvoista sijoittuu välille $\mu \pm 2\sigma$
3. 99 % muuttujien arvoista sijoittuu välille $\mu \pm 3\sigma$. (Shardt, Y. 2015)



KUVA 8. Esimerkkikuva normaalijakaumasta. (Muralidharan, K. 2015)

4.3 Hypoteesien testaus

Tilastolliseen tarkasteltuun pohjautuvat hypoteesitestit ovat menetelmiä, joilla pystytään tutkimaan eroaako toinen näyte- tai datajoukko tilastollisesti merkittävästi toisesta vastaavasta joukosta. Usein hypoteesin testaamista käytetään vahvistamaan tehtyjä päätelmiä ja havaintoja. On kuitenkin tärkeää muistaa, että hypoteesitestin tulos ei kerro onko tulos totta – hypoteesitesti kertoo vain, onko siinä käytetty aineisto yhdenmukainen tehdyn lähtöhypoteesin kanssa. (Muralidharan, K. 2015.)

Käytännössä hypoteesin testaus koostuu viidestä erillisestä vaiheesta (Muralidharan, K. 2015.):

1. Ensimmäisessä vaiheessa valitaan hypoteesit. Hypoteeseja testattaessa määritetään sekä nollahypoteesi, H_0 , että vastahypoteesi, H_a tai H_1 . Nollahypoteesi asetetaan niin, että se on päinvastainen alkuperäiseen lähtöoletukseen nähden. Vastahypoteesi taas voidaan hyväksyä niissä tilanteissa, kun nollahypoteesi on testausvaiheessa pystytty kumoamaan. Nollahypoteesi ja vastahypoteesi eivät siis pysty toteutumaan yhtäaikaisesti.

Esimerkiksi laboranttien välistä mittaustarkkuutta tarkasteltaessa lähtöoletuksena voi olla se, että laboranttien mittaustarkkuus vaihtelee. Tässä asetelmassa nollahypoteesi, H_0 , on se, että laboranttien välillä ei ole eroa. H_a -vastahypoteesi on tällöin se, että laboranttien välillä on eroja (kuva 9).

2. Kun hypoteesit on asetettu, valitaan sopiva merkitsevyystaso α . Merkitsevyystasoa voidaan kutsua myös riskitasoksi. Usein käytetty merkitsevyystaso on 0,05. Tämä merkitsevyystaso tarkoittaa sitä, että saatu tulos on 95 % varmuudella pätevä ja virheen todennäköisyydeksi jää 5 %.
3. Kolmannessa vaiheessa valitaan kulloinkin käytettävä tilastollinen testaustapa ja suunnitellaan testausprosessi.
4. Kun hypoteesitesti on suunniteltu ja testaustapa määritetty, on aika suorittaa varsinainen testi. Testin varsinaiseen suorittamiseen käytetään useimmiten kulloinkin tutkittavaan tarpeeseen sopivaa tilasto- tai taulukko-ohjelmaa.

5. Viimeisenä on syytä keskittyä analysoimaan ja tulkitsemaan tulokset huolellisesti. Jos nollahypoteesin toteutuminen on tehdyn testin perusteella epätodennäköistä, hylätään nollahypoteesi ja vahvistetaan vastaavasti vastahypoteesi.

Usein tilastollisessa tarkastelussa käytettävät ohjelmat hyödyntävät p-arvoa hypoteesien hylkäämisessä. Käytännössä p-arvo mittaa sitä, kuinka paljon todisteita on olemassa nollahypoteesia vastaan. Mitä pienempi p-arvo on, pienempi mahdollisuus nollahypoteesilla on toteutua. Nollahypoteesin kumoamiseen riittävänä p-arvon tasona käytetään usein arvoa 0,05 tai 0,10. (Muralidharan, K. 2015.)

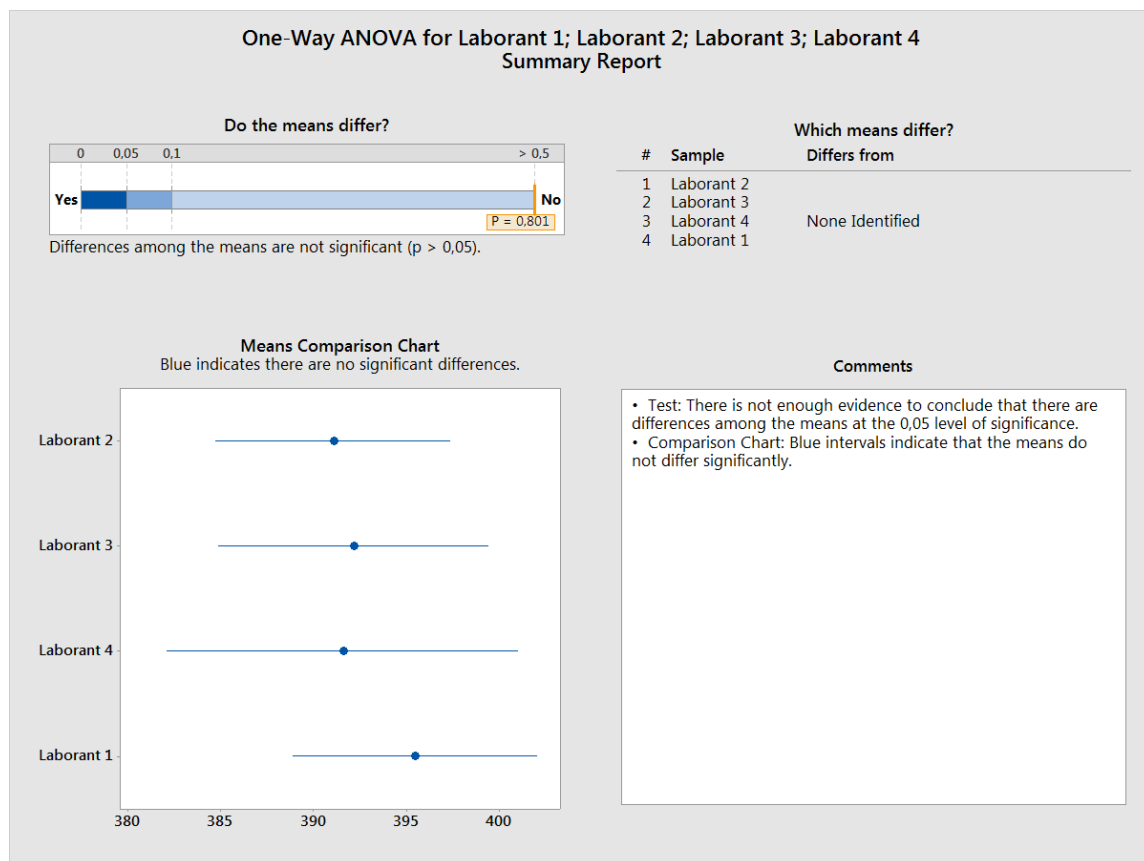
Kuvasta 9 on nähtävissä hypoteesin testauksen tuloskooste Minitab-ohjelmalla suoritettuna. Esimerkkikuvan tilanteessa on tutkittu mahdollisia laboranttien välisiä eroja erään laatumittauksen tulosten suhteen.

Voimassa ovat seuraavat hypoteesit:

H_0 = Laboranttien välillä ei ole eroa

H_1 = Laboranttien välillä on eroa.

Varianssianalyysiin pohjautuva hypoteesin testausmenetelmä antaa P-arvon suuruudeksi 0,801. Kun P-arvo on suuruudeltaan selvästi yli 0,05, voidaan todeta alkuoletettaman H_0 pitävän paikkaansa.



KUVA 9. Hypoteesin testaus Minitab-ohjelmalla. (Sääski, E. 2018)

4.4 Koesuunnittelu

Koesuunnittelumenetelmät rakentuvat pitkälti kolmen yksinkertaisen koeajon tarkkuutta ja luotettavuutta parantavan menetelmän pohjalle. Replikaatioiden (replication) ja suunnitellun jaksotuksen (blocking) perimmäisenä ajatuksena on tarkkuuden parantaminen. Lisäksi satunnaistaminen (randomizing) pyrkii minimoimaan prosessista mahdollisesti aiheutuvat virheet. (Dean, A. 2017)

Nimensä mukaisesti replikaatio on koeajo-olosuhteen toistamista. Koesuunnittelun yhteydessä mittauksen toistamisella tarkoitetaan toisen, mahdollisesti ensimmäisen kanssa yhtäaikaisesti, mittauksen ottamista. Mittausten toteuttaminen mahdollisimman yhtäaikaisesti ja samankaltaisissa vallitsevissa olosuhteissa mahdollistaa tulosten vertailemisen keskenään. Mikäli mittaus toistetaan täysin erillisen ajankohtana, samankaltainen vertailu tulosten välillä ei ole yhtä hyödyllistä. (Dean, A. 2017)

Jaksottamismenetelmää hyödynnettäessä koeajosuunnitelmaan muodostetaan erillisiä jaksoja, jotka muodostuvat jonkin kokeen aikana muuttuvan tekijän mukaan. Tällainen muuttuja voi olla

esimerkiksi prosessin tai ulkoilman lämpötila, kokeen suorittaja tai käytössä oleva materiaali. (Dean, A. 2017)

Satunnaistamisen tarkoituksena taas on estää systemaattisen virheen syntyminen tuloksiin. Tällainen virhe voi johtua joko prosessiolosuhteista tai itse kokeen toteuttajasta. Satunnaistaminen on erityisen tehokas keino kitkemään tuloksista pois tunnistamattomista syistä aiheutuvaa vaihtelua, joka pahimmillaan vääristää tuloksia pahasti. (Dean, A. 2017)

Koesuunnittelua hyödynnetään teollisuudessa esimerkiksi silloin, kun halutaan optimoida tuotteen laatua tai suorituskykyä, minimoida kustannuksia, kehittää uusia tuotteita tai prosesseja, erotella lopputuloksen kannalta olennaiset muuttujat epäolennaisista tai muokata prosessia vähemmän herkäksi erilaiselle vaihtelulle. (Eriksson, L. et al. 2000)

Yleisimmin käytettävät koesuunnittelumenetelmät jakautuvatkin kolmeen erilaiseen ryhmään päätavoitteensa mukaan. Erottelevien kokeiden perusajatus on määrittää olennaisimmat lähtötekijät ja tutkia sitä, millä alueella näiden tulisi toimia. Toinen koesuunnittelukokeiden yleinen päämäärä on optimointikokeet, joiden päätavoitteena on määrittää tärkeistä muuttujista sellainen yhdistelmä, joka tuottaa sopivimman lopputuloksen. Näiden lisäksi koesuunnittelumenetelmiä voidaan käyttää silloin, kun prosessin halutaan olevan mahdollisimman robusti. Prosessin käsitetään olevan robusti silloin, kun se ei ole herkkä pienille muutoksille tai heilahduksille lähtömuuttujissa. (Eriksson, L. et al. 2000)

4.4.1 Koesuunnitelman toteuttaminen

Montgomeryn (2009) mukaan koesuunnittelutoiminnassa eteneminen kannattaa suorittaa järjestelmällisesti seitsemässä vaiheessa. Vaiheet 1-3 ovat niin kutsuttuja esisuunnitteluvaiheita, ja niiden huolellinen suorittaminen on tärkeää kokonaisuuden onnistumisen kannalta.

Ensimmäisessä vaiheessa tunnistetaan ongelma, johon koesuunnitelmalla haetaan ratkaisua. Ongelman täsmällinen määrittely ja kaikkien asiaa tuntevien osapuolten kuuleminen on tärkeää parhaimman lopputuloksen saavuttamiseksi. Esimerkiksi tuotanto-operaattoreilla on usein arvokasta tietoa, joka saattaa helposti jäädä huomaamatta ja hyödyntämättä. Käytännön elämässä ihmisille on usein haastavaa tunnistaa tilanteita, joissa koesuunnittelu voisi tarjota tehokkaan ratkaisun. (Montgomery, D.C. 2009)

Vaiheissa 2 ja 3 määritetään koesuunnitelmassa tutkittavat lähtö- ja tulosmuuttujat. Sopivien lähtötekijöiden tunnistaminen vaatii riittävää ymmärrystä niin prosessista kuin tutkittavasta

ongelmastakin. Tässä vaiheessa on kuitenkin tärkeää olla takertumatta liikaa esimerkiksi vanhoihin ajomalleihin tai uskomuksiin. Lisäksi lähtömuuttujille valitaan vähintään kaksi tasoa, joiden välillä niitä tullaan muuttamaan koeajon aikana. Lähtömuuttujien lisäksi valitaan yksi tai useampia tulomuuttujia, joiden tulee olla tutkittavan prosessin ja ongelman kannalta hyödyllisiä ja olennaisia. Usein lähtömuuttujien muutosten vaikutusta tutkitaan vastemuuttujien mittausten keskiarvoon, mutta myös keskihajontaa voidaan seurata. Neljännessä vaiheessa valitaan käytettävä koesuunnitelmamenetelmä aiemmin tehtyjen suunnitelmien ja käytettävissä olevien resurssien perusteella. (Montgomery, D.C. 2009)

Viidennessä vaiheessa suoritetaan varsinainen koe. Koetta suoritettaessa on ensiarvoisen tärkeää tarkkailla prosessia ja suunnitelman toteutumista. Toteutusvaiheen virheet voivat turmella tulosten luotettavuuden ja hyödynnettävyyden. Ennen koeajoon ryhtymistä on hyvä miettiä sitä, millaisia ongelmia koeajon aikana tullaan mahdollisesti kohtaamaan ja miten niihin reagoidaan. (Montgomery, D.C. 2009)

Varsinaisen koeajon ajamisen jälkeen päästään analysoimaan koeajoissa tuotettua dataa (vaihe 6) ja tekemään sitten yhteenveto toimenpidesuosituksineen (vaihe 7). Koeajoissa tuotettu data on syytä tarkastella tilastollisia menetelmiä hyödyntäen, jotta tulokset olisivat mahdollisimman hyvin hyödynnettävissä ja myös luotettavia. Analysoitujen tulosten perusteella tehdään yhteenveto tuloksista ja koeajon perusteella suositeltavista toimenpiteistä. Tulosten esittämistä graafisesti voidaan pitää hyvänä tapana esittää tuloksia. Lisäksi hyvä käytäntö olisi varmistaa ensimmäisen koeajon tulos toisella kokeella. (Montgomery, D.C. 2009)

4.4.2 Koesuunnittelun erityispiirteet paperinvalmistusprosessissa

Koesuunnittelumenetelmiä jatkuvatoimisissa ja dynaamisissa prosesseissa, kuten paperinvalmistusprosessissa, sovellettaessa täytyy huomioida useita asioita, jotka tekevät osaltaan tämänkaltaisen monimuuttujakoeajon toteuttamisesta haastavaa. (Vanhatalo, E. & Berqquist, B. 2007)

Koeajoja dynaamisessa prosessissa suoritettaessa on ensiarvoisen tärkeää ymmärtää erilaiset prosessissa esiintyvät siirtymäajat ja viiveet. Koeajon koepisteiden kesto täytyy mitoittaa niin, että tehty muutos ehtii tapahtua kunnolla ja prosessi tavoittaa uuden tasapainotilansa. Mikäli koepisteiden kesto mitoitetaan ajallisesti liian niukaksi, saatu tulos on puutteellinen ja epäluotettava. Toisaalta koeajon kesto ei tulisi liioitella, sillä tarpeettoman pitkä koeajo lisää huomattavasti koeajon

kustannuksia. Koeajon tuloksia käsiteltäessä hyvä tapa on seuloa koeajodata niin, että siirtymävaiheiden tulokset jätetään huomiotta ja vain koepistettä varsinaisesti edustava data huomioidaan. (Vanhatalo, E. et al. 2011)

Selkeän haasteen monimuuttujakoeajojen hyödyntämiselle paperinvalmistusprosessissa muodostaa koeajon pituus. Koesuunnittelumenetelmin toteutetut koeajot koostuvat tyypillisesti yli 20 koepisteestä. Siirtymäajat ja viiveet huomioituna tämä tarkoittaa sitä, että koeajo voi kestää useita vuorokausia. Tällöin koeajon toteuttamiseen osallistuu lukuisia ihmisiä, minkä lisäksi prosessissa esiintyy miltei väistämättä jonkinlaista heiluntaa. Pitkäkestoisissa koeajoissa on ensiarvoisen tärkeää perehdyttää kaikki koeajoon osallistuvat tahot niin, että jokaisella on selkeä ymmärrys koeajon tarkoituksesta ja tavoitteista. Lisäksi koeajon aikana on tärkeää pyrkiä pitämään olosuhteet niin tasaisina kuin se on mahdollista. Erityisesti ne tekijät, joihin erilaisia ohjausmenetelmiä hyödyntäen voidaan vaikuttaa, tulee vakioida mahdollisimman tasaisiksi. Tyypillinen häiriötä ja turhaa vaihtelua aiheuttava tekijä, johon on kuitenkin vaikeaa vaikuttaa, on käytettävä raaka-aine. (Vanhatalo, E. & Berquist, B. 2007)

5 VALMISTUSKUSTANNUKSET

Jako kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin on tyypillisin tapa luokitella kustannuksia. Kiinteiden ja muuttuvien kustannusten aukoton määrittely on haastavaa, mutta usein nähdään, että kustannuksen riippuvuus toiminta-asteesta määrää kumpaanko ryhmään kulloinkin tarkasteltava kustannus kuuluu. (Neilimo, K. & Uusi-Rauva, E. 2017)

Tässä työssä esitelty ajotapamuutos vaikuttaa valmistuskustannusten osalta muuttuviin kustannuksiin jauhatusvaiheen energiankulutuksen sekä kuivatusosan höyrynkulutuksen muodossa.

5.1 Muuttuvat kustannukset

Kun kustannukset muuttuvat toiminta-asteen mukana, niiden katsotaan kuuluvan muuttuviin kustannuksiin eli määräkustannuksiin. Teollisen tuotantolaitoksen tyypillisiä muuttuvia kustannuksia ovat esimerkiksi raaka-ainekustannukset, valmistuksen palkkakustannukset sekä energiankulutuksen muodostamat kustannukset. (Neilimo, K. & Uusi-Rauva, E. 2017) Paperinvalmistusprosessissa energiakustannusten osuus valmistuskustannuksista voi olla jopa 25 % valmistettavasta lajista riippuen (Ahtila, P. 2010).

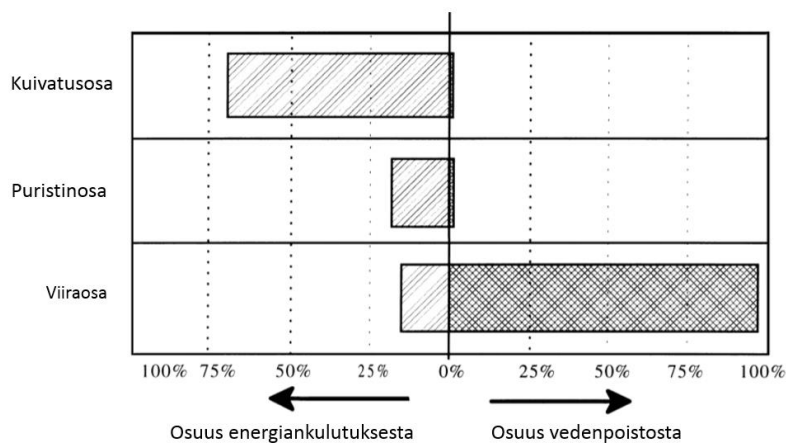
Paperinvalmistusprosessin energiankulutukseltaan suurin yksittäinen prosessivaihe on mären paperiradan kuivattaminen kuivatusosalla. (Karlsson, M. & Paltakari, J. 2010) Kuivatusosan energiankulutusta voidaan hillitä nostamalla paperiradan kuiva-ainepitoisuutta ennen sen saapumista kuivatusosalle. Kuiva-ainepitoisuutta voidaan nostaa tehokkaasti puristinosalla tapahtuvalla märkäpuristuksella. Yleisenä nyrkkisääntönä pidetään sitä, että 1 prosentin nousu radan kuiva-aineessa vähentää vastaavasti kuivatusosan höyrynkulutusta 4 prosentilla. (Paulapuro, H. 2010)

Paperin ja kartongin valmistuksessa käytettävä sähköenergian määrä vaihtelee verrattain paljon kulloinkin valmistettavan lajin mukaan, jopa välillä 500-1000 kWh/t. Lämmönkulutus vaihtelee välillä 5-8 GJ/t. (Hägglom-Ahnger, U. & Komulainen, P., 2003) Kartonkilajien välisiä eroja sähkön- ja höyrynkulutuksessa on vertailtu taulukossa 3. Taulukkoon merkityt luvut eivät huomioi massanvalmistuksen osuutta energiankulutukseen.

TAULUKKO 3. Pakkauskartonkilajien energiankulutus. (Lyhennetty alkuperäisestä. Häggblom-Ahnger, U. & Komulainen, P. 2003)

Kartonkilaji	Sähkönkulutus (kWh/t)	Lämmönkulutus (GJ/t)
Fluting	520	5,6
Laineri	535	5,9
Nestepakkauskartonki	850	7,0
Taivekartonki	800	6,9

Kuvasta 10 on nähtävissä energiankulutuksen ja vedenpoiston välinen suhde paperikoneen eri osatoiminnoissa. Energiankulutus on selvästi korkeinta kuivatusosalla, vaikka poistuva vesimäärä on pieni. Valtaosa vedestä poistuu viiraosalla, jonka energiankulutus on vastaavasti maltillista.



KUVA 10. Paperikoneen kuivatusosan energiankulutus on verrattain suurta poistuvaan vesimäärään nähden. (Suomennettu. De Beer, J. 1998)

5.2 Kiinteät kustannukset

Toiminnan kiinteät kustannukset eivät vastaavasti ole riippuvaisia toiminta-asteesta. Tällaisia kustannuksia ovat esimerkiksi laitteistoon sidotun pääoman korot ja poistot, mahdolliset tilavuokrakustannukset, siivous sekä johdon ja toimihenkilöiden palkkakustannukset. (Neilimo, K. & Uusi-Rauva, E. 2017)

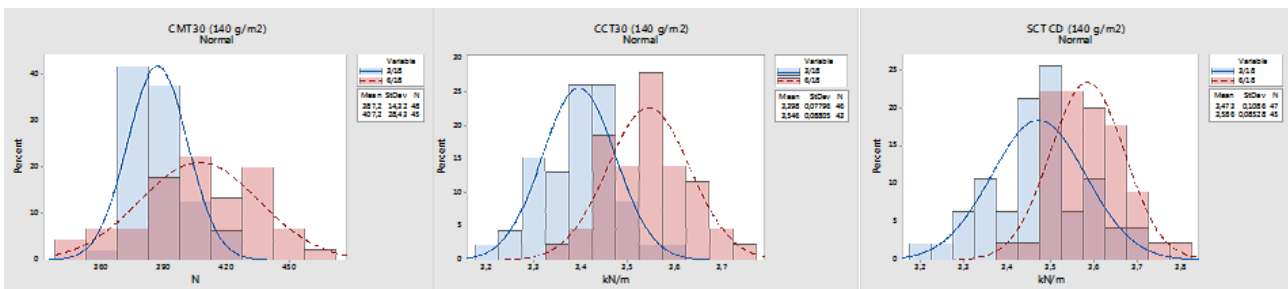
Haluttaessa kiinteät kustannukset voidaan jakaa edelleen kahteen osaan: seisontakustannuksiin ja valmiuskustannuksiin. Seisontakustannuksiksi kutsutaan niitä kiinteitä kustannuksia, joita syntyy, vaikka tuotantoyksikköä ei käytettäisi lainkaan. Esimerkiksi ajan kulumisen mukaan laskettavat luokitellaan seisontakustannuksiksi. Valmiuskustannuksia taas ovat sellaiset kustannukset, jotka aiheutuvat tuotantoyksikön käyntivalmiudesta. Tällaisia kustannuksia ovat esimerkiksi rakennuksen lämmittämisestä aiheutuvat kustannukset. (Neilimo, K. & Uusi-Rauva, E. 2017)

6 KOKEELLINEN OSUUS

6.1 Tausta ja tavoite

Tehtaalle tehdyn koneuusinnan myötä tuotteen myynnin kannalta olennaisimpien laatuarvojen keskiarvo parani, mutta hajonta huononi pahimmillaan kaksinkertaiseksi koneuusintaa edeltäneeseen verrokkaikaan nähden. Keski- ja hajontalukujen käyttäytyminen vaihteli kuitenkin melko paljon eri neliömassalajien välillä.

Alla on esitetty esimerkkikuvat grammapainolla 140. Lisäksi eri neliöpainolaatujen keskihajontojen käyttäytymistä on tarkastelu numeerisesti taulukossa 4. Esimerkkikuvasta ja taulukosta voidaan todeta, että laatuhaajonta on kasvanut joillakin grammapainoilla ja laatusuureilla huomattavasti.



KUVA 11. Olennaisimpien laatuarvojen käyttäytyminen ennen laatuinvestointia maaliskuussa 2018 (sinisellä) ja laatuinvestoinnin jälkeen kesäkuussa 2018 (punaisella). Seurattavat laatuarvot ovat vasemmalta oikealle CMT30, CCT30 ja poikkisuuntainen SCT.

TAULUKKO 4. Laatumittausten keskihajonnat ennen (3/18) ja jälkeen (6/18) investoinnin.

Laji	CMT30 3/18 (N)	CMT30 6/18 (N)	CCT30 3/18 (kN/m)	CCT30 6/18 (kN/m)	SCT ps 3/18 (kN/m)	SCT ps 6/18 (kN/m)
(g/m ²)	Keskihajonta					
120	4,212	13,42	0,123	0,1141	0,0801	0,0951
127	7,243	16,09	0,1147	0,1109	0,07854	0,1001
140	12,72	30,1	0,0844	0,1352	0,1029	0,1042
150	13,91	27,82	0,0985	0,1412	0,1191	0,09811
160	6,944	24,34	0,1157	0,1765	0,0981	0,1039

Ylläolevaan laatuarvojen keskihajontoja kuvaavaan taulukkoon on merkitty oranssilla niiden grammapainojen tulokset, joilla laatuajonta on kasvanut laatuinvestoinnin myötä. Käytännössä taulukosta nähdään suoraan, että esimerkiksi grammapainoilla 140 ja 160, kaikkien esitettyjen laatusuureiden hajonta on kasvanut.

Taulukossa olevien neliöpainolajien lisäksi tehtaalla ajetaan kartonkia grammapainoissa 175 ja 190, mutta näiden osuus tuotannosta on niin pieni, että mielekkäiden vertailuajanjaksojen löytäminen on haastavaa eikä samankaltainen vertailu kuin enemmän ajetuilla lajeilla ole mahdollista.

6.2 Tarkastelualueen rajaaminen

Tarkastelualueita valittaessa paperinvalmistukseen liittyvän teorian perusteella näytti selvältä, että suurin vaihtelu prosessiin aiheutuu joko raaka-aineesta tai jauhatuksesta. Tarkastelualueen valinnassa hyödynnettiin prosessintuntemuksen lisäksi Wedge-ohjelman analyysityökaluja. Wedgen valmiita työkaluja käytettäessä täytyy kuitenkin huomioida se, että niiden antama tieto on vain viitteellistä eikä siihen tule suhtautua totuutena.

Wedge-työkaluista erityisen käyttökelpoinen vaihtelunlähteiden tunnistamisessa on aaltomuodon tunnistus -työkalu. (Luukkainen, S. 2018) Tämä työkalu etsii valitun mittauksen ja aikajakson aaltomuotoa muista prosessikaavion mittaussignaaleista. Lisäksi työkalu pystyy tunnistamaan myös valittua signaalin peilikuvan eli käänteisen muodon. Työkalua käytettäessä on ensiarvoisen tärkeää tuntea prosessia niin hyvin, että osaa valita kulloinkin käyttökelpoisen tarkasteluajanjakson. (Savcor. 2017)

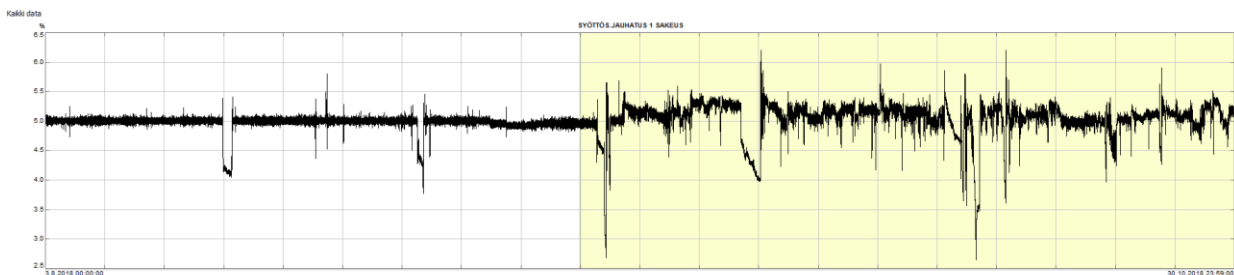
Aaltomuototyökalun antamat tulokset olivat samansuuntaisia kuin teorian perusteella tehdyt päätelmät. Työkalu ohjasi kiinnittämään huomiota kokonaisuudessaan kapasiteetiltaan suurimpaan

keittolinjaan. Lisäksi työkalun tuottamissa tuloksissa korostuivat selvästi jauhatuksen tehonkulutusluvut, sakeusmittaukset sekä suotautuvuusmittausten tulokset. Myös hyllynkäsittelyn prosessimuuttujat kohosivat tuloksissa kohtalaisen korkealle.

Työssä tehtävissä tutkimuksissa päätettiin lopulta keskittyä erityisesti jauhatukseen, sillä sen painoarvo arvioitiin keittovaihetta tärkeämmäksi laatuvariaation kannalta. Lisäksi yhdeksi työn tavoitteeksi määritettiin koesuunnittelumenetelmien kokeileminen ja näiden uskottiin onnistuvan paremmin jauhatusvaiheessa, prosessiviiveen merkityksen jäädessä pienemmäksi kuin keittovaihetta tutkittaessa.

6.3 Jauhatusvaiheen sakeusvaihtelu

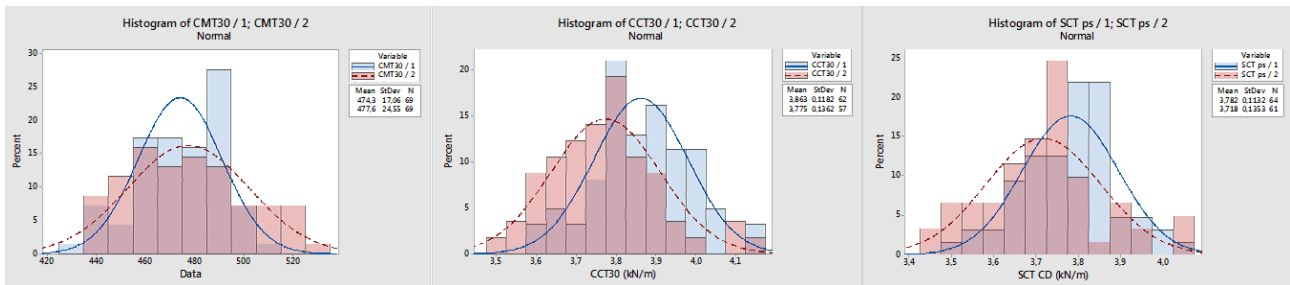
Niin operaattoreiden haastatteluissa kuin jauhatusvaiheen prosessidatan tarkasteluissa nousi esiin syöttösakeusmittauksen poikkeava käyttäytyminen. Historiadataa visuaalisesti tarkastelemalla mittauksesta on erotettavissa selvästi kahdenlaisia ajanjaksoja: toisinaan mittaus pysyy tasaisena ja hallittuna pitkiäkin aikoja, mutta näiden vastapainoksi esiintyy ajanjaksoja, jolloin mittauksessa on isoakin heittelyä ja runsasta vaihtelua. Syöttösakeusmittauksen käyttäytyminen noin kolmen kuukauden mittaisen tarkastelujakson aikana on esitetty kuvassa 12.



KUVA 12. Syöttösakeusmittauksen erilaiset toimintajaksot.

Jauhatuksen syöttösakeus vaikuttaa jauhatustulokseen. Lisäksi sakeusmittaus sisältyy jauhatusmäärää säättävään EOK-laskentaan, joten sakeusmittauksen heittelyt näkyvät myös jauhatusmäärässä ja siten mahdollisesti myös lopputuotteen laadussa. Sakeusmittausjaksojen välistä eroa lopputuotteen laadun ja laatuvariaation kannalta on tarkasteltu lähemmin kuvassa 13. Kuvassa

12 valkoisella pohjalla oleva jakso vastaa kuvan 13 sinisävyisiä osuuksia. Vastaavasti keltaisella korostettu ajanjakso on histogrammissa punainen.



KUVA 13. Laatuarvojen käyttäytyminen erilaisten syöttösakeusmittauksen ajanjaksojen aikana.

Laatuvaihtelun toteutumista tarkastelujaksojen välillä on esitetty lisäksi numeerisessa muodossa taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Laatuarvojen keskihajonta vertailujaksoilla.

	Keskihajonta, jakso 1	Keskihajonta, jakso 2
CMT30	17,06	24,55
CCT30	0,1182	0,1362
SCT ps	0,1132	0,1353

Kuvasta 13 ja taulukosta 5 nähdään, että erityisesti CMT30-arvojen (kuvassa vasemmassa laidassa) vaihtelu on merkittävästi suurempaa sinä ajanjaksona, kun myös syöttösakeusmittauksessa esiintyy runsasta vaihtelua. Myös CCT30-arvojen (keskellä) ja SCT ps (oikealla) hajonta kasvaa jauhatuksen sakeusvaihtelun lisääntyessä.

6.4 Koeajo 1

Ensimmäisen koeajon tavoitteena oli verifioida laatuvariaation aiheuttavia prosessimuuttujia. Koeajo toteutettiin erotteluvaa koesuunnittelumenetelmää hyödyntäen. Lisäksi olennaisena tavoitteena oli kerätä kokemusta ja havaintoja siitä, onko tämänkaltaisen koeajon suorittaminen kohdeyrityksen kaltaisissa prosessiolosuhteissa ylipäätään mahdollista.

6.4.1 Tausta ja suunnittelu

Koeajossa tutkittavat muuttujat valittiin hyödyntäen valintaprosessissa niin paperinvalmistuksen teoriaa, aiemmin tehtyä wedge-analyysiä kuin flutingtehtaan työntekijöiden kokemukseräistä tietoakin. Kaikki käytetyt tietolähteet viittasivat siihen, että jauhatusmäärä on huomattavan tärkeä aallotuskartongin laadulle, joten kummankin jauhatusvaiheen jauhatusmäärän valinta koeajomuuttujiksi oli ilmeinen.

Kappaleessa 5.3 esitelty havainto jauhatuksen syöttösakeuden mahdollisesta vaikutuksesta laatuun herätti mielenkiinnon myös sakeutta kohtaan, joten tutkittaviksi muuttujiksi valittiin myös kummankin jauhatusvaiheen sakeudet.

Koeajon ollessa ensimmäinen laatuaan, suunnitteluvaiheessa arvioitiin, että koeajo olisi helpointa hallita, jos kaikki koeajossa käytettävät muuttujat olisivat kytköksissä samaan prosessivaiheeseen ja siten yhden operaattorin hallittavissa. Massaosaston operaattori ohjaa myös hyllyn annostelua ja hyllyn mahdollinen vaikutus laatuvariaatioon oli noussut esiin wedge-analyysissä, joten viidenneksi muuttujaksi valittiin hyllyn jauhatusmäärä ja kuudenneksi hyllyn annosteluprosentti.

Koeajossa hyödynnettiin erotteluvaa koesuunnitelmaa, jonka varsinaisena tarkoituksena on erottaa olennaiset lähtömuuttujat epäolennaisista. Lisäksi koeajossa pyrittiin keräämään havaintoja siitä, millä ominaisuudella saavutettaisiin paras vaste jauhatusmäärän, hyllyn annostelun tai sakeuden muutoksiin.

Koeajosuunnitelma on esitetty taulukossa 6. Taulukossa lukuarvo 1 merkitsee muuttujan korkeampaa arvoa ja lukuarvo 0 matalampaa arvoa.

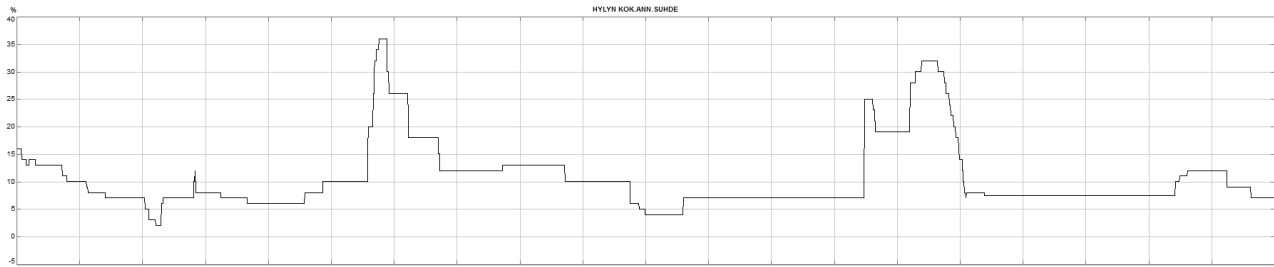
TAULUKKO 6. Ensimmäinen koeajosuunnitelma.

Koepiste	1V EOK (kWh/t)	1V Sakeus (%)	2V EOK (kWh/t)	2V Sakeus (%)	Hylky EOK (kWh/t)	Hylyn annostelu (%)
1	0	1	1	1	0	1
2	0	0	1	1	1	0
3	1	1	1	0	1	1
4	1	0	0	0	1	1
5	0	1	1	0	1	0
6	0	0	0	1	1	1
7	1	1	0	1	0	0
8	1	1	0	1	1	0
9	0	1	0	0	0	1
10	1	0	1	1	0	1
11	1	0	1	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0

Erottelevan koesuunnitelman peruseriaatteena on muuttaa kutakin tutkittavaa muuttujaa johdonmukaisesti ylemmän ja alemman tavoitearvon välillä. Koeajossa käytettävät jauhatusmäärämuuttujien arvot määritettiin käytettävissä olevan historiadatan perusteella. Valitut arvot pyrittiin valitsemaan niin, että ne olivat olleet käytössä aikaisemmin ns. tavanomaisen ajotilanteen aikana. Tällä haluttiin varmistaa massan ajettavuus kartonkikoneella koeajon aikana.

Sakeusarvoja määritettäessä täytyi huomioida laitteiston asettamat rajoitukset eikä sakeusmuutoksia saatu toteutettua niin isoina kuin koeajon kannalta olisi ollut toivottavaa. Toisaalta jo koeajosuunnitelman mukaisen pienehkön keinotekoisien sakeusvaihtelun aiheuttaminen herätti suurta huolta ja pienenkin sakeusmuutoksen arveltiin näkyvän laadussa välittömästi. Jauhin- ja terätoimittajan konsultaation mukaan on kuitenkin epätodennäköistä, että koesuunnitelman mukaisen sakeusvaihtelun kaltainen muutos näkyisi lopputuotteen laadussa (Virtanen, E. 2018).

Haastavimmaksi muuttujaksi koeajotavoitearvon määrittämisen kannalta osoittautui hylyn annostelumäärä. Valmistusprosessille ominaisesti käytettävissä olevan hylyn määrä vaihtelee huomattavasti kartonkikoneen ajotilanteen mukaan, jopa välillä 2-36 %. Hylyn annostelun tavanomaista vaihtelua valmistusprosessissa on havainnollistettu kuvassa 14.



KUVA 14. Hylyn annostelumäärä tavanomaisen ajotilanteen aikana.

Koeajossa hylyn annosteluosuutta päädyttiin muuttamaan varsin pienellä vaihteluvälillä. Annostelumäärä täytyi pitää maltillisena, sillä määrä tuli asettaa niin, että se pystytään annostelevaan tasaisesti läpi koeajon. Mikäli vaihteluväliä olisi kasvatettu, riskiksi tunnistettiin etukäteen hylkymassan loppuminen koeajon aikana. Hylyn matala annostelumäärä todennäköisesti heikensi hylkymuutosten aikaansaamaa vastetta tarkastelluissa lopputuotteen ominaisuuksissa.

6.4.2 Koeajon suoritus

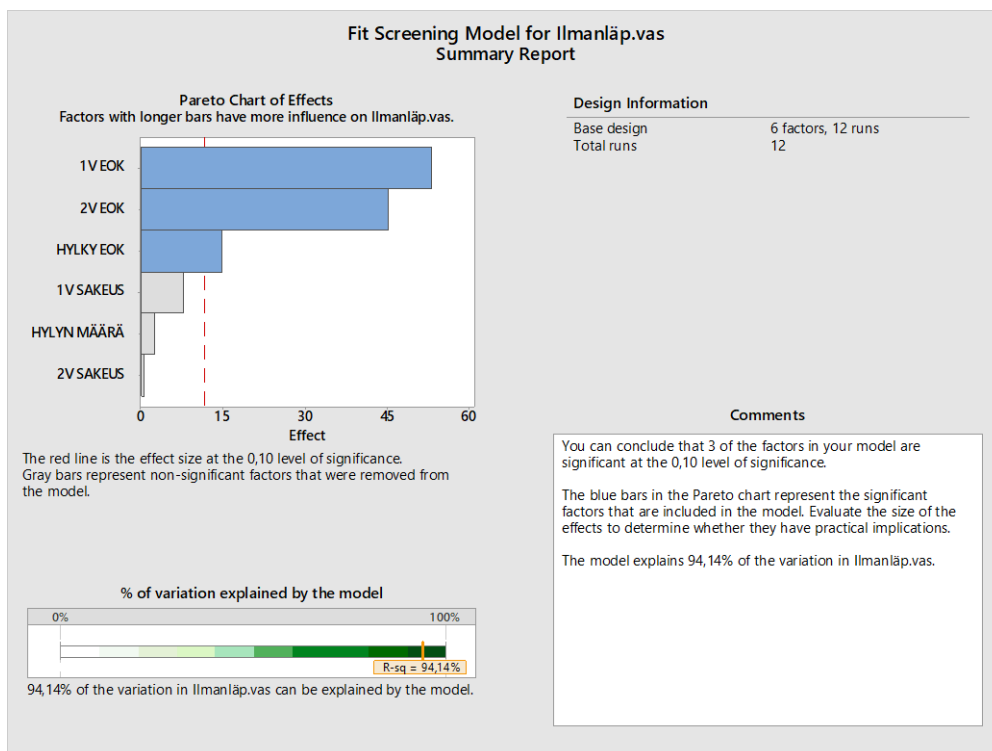
Koeajon aikainen tuotantotilanne oli poikkeuksellisen tasainen ja hyvä eikä erityisiä poikkeamia normaalista tuotannosta tapahtunut. Koeajo kesti noin kolme vuorokautta ja koeajon verrattain pitkän keston vuoksi koeajojaksolla ajettiin useita erilaisia neliöpainolajeja. Käytännössä koeajon aikana ajoon osuivat kaikki lajit väliltä 127-190 g/m². Laaja lajikirjo vaikeuttaa tulosten analysointia, sillä esimerkiksi raskaille lajeille ei voida toteuttaa samoja lujuusmittauksia kuin kevyemmille lajeille.

Kutakin koepistettä ajettiin kuitenkin verrattain runsaasti, 5-10 konerullaa, joten jokaisesta koepisteestä pystyttiin kuitenkin haarukoimaan vähintään kaksi lajeja 140, 150 tai 160 g/m² olevaa konerullaa. Vertailukelpoisuuden toteuttamiseksi tutkittavat suureet on indeksoitu neliöpainolla, mikäli tutkittava suure ei ole itsessään valmiiksi neliömassasta riippumaton. Prosessiviiveen poissulkemiseksi tarkastelusta ja laskennoista on lisäksi rajattu ulos kunkin koepisteen ensimmäinen ja viimeinen konerulla. Tällä haluttiin varmistaa se, että tarkasteltavat arvot ovat koepisteen mukaisia ja prosessi varmasti tasaantunut muutoksen jäljiltä.

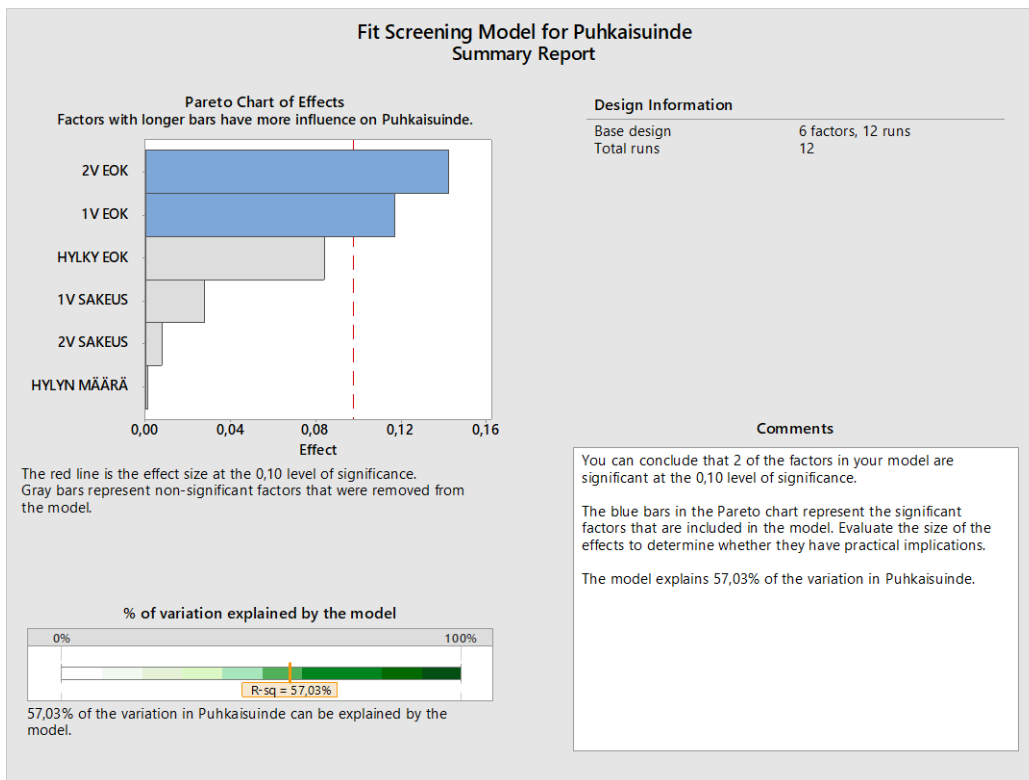
6.4.3 Keskeisimmät tulokset

Koeajon tuloksia on tarkasteltu lähinnä jokaisesta valmistuvasta konerullasta tehtävän Paperlab-näytteen avulla. Paperlabin analyysiohjelma tutkii esimerkiksi kartongin ilmanläpäisyvastusta, puhkaisulujuutta ja -indeksiä, vetolujuusarvoja, venymää sekä kuitujen orientoitumista. Koeajon tarkoituksena oli tutkia muuttujien aikaansaamaa vastetta myös varsinaisiin lujuusmittauksiin CMT30, CCT30 ja SCT Ps, mutta koeajon aikana ilmenneiden näytteenotto-ongelmien vuoksi tämä ei ollut mahdollista.

Paperlabin suorittamista mittauksista mielenkiintoisimmiksi koeajotulosten kannalta osoittautuivat puhkaisuindeksi ja ilmanläpäisyvastusarvo. Koosteet koeajon tuloksista näiden tekijöiden kannalta on esitetty kuvissa 15 ja 16. Koosteiden pareto-kuvaaja esittää sinisellä ne muuttujat, joilla on tilastollisesti merkitsevä vaikutus tutkittavaan tekijään. Tuloksia tulkittaessa täytyy kuitenkin muistaa, että tilastollinen merkitsevyys ei tarkoita sitä, että asioilla olisi välttämättä oikeasti yhteyttä. Lisäksi kuvissa on esitetty koesuunnitteluohjelman laskema selitysaste, jonka tarkoituksena on havainnollistaa sitä, kuinka monta prosenttia tarkasteltavan arvon vaihtelusta selittyy koeajon sisällytetyillä muuttujilla.



KUVA 15. Koesuunnitelman tulokset ilmanläpäisyvastusarvon osalta tarkasteltuna.



KUVA 16. Vastaava tulokooste puhkaisuindeksiärvosta.

Kuvista 15 ja 16 nähdään, että jauhatusmäärän muutokset saavat aikaan vasteen niin ilmanläpäisyvastusarvossa kuin puhkaisuindeksissä. Pareto-kuvaajasta kuitenkin selviää, että vaste on voimakkaampi jauhatusmäärän vaihteluissa. Lisäksi kuviin on merkitty selitysaste, joka on ilmanläpäisyvastusarvon osalta n. 94 % ja puhkaisuindeksiärvon osalta 57 %.

Tämänkaltaisia valmiita analysointitoimintoja käyttäessä tulee kuitenkin muistaa, että ohjelma ei tunne prosessia eikä siten ymmärrä todennäköisiä syy-seuraussuhteita. Koeajon suorittajan tulee aina arvioida tulosten luotettavuutta ja järkevyyttä, sillä tilastollinen merkitsevyys ei takaa asioiden välistä yhteyttä reaalielämässä.

Esimerkiksi kuvassa 15 nähtävä hyllyn jauhatusmäärän kohtalainen vaikutus ilmanläpäisyvastusarvoon tuskin pitää paikkaansa käytännössä, sillä koeajon aikana hylkyä annosteltiin huomattavan pieniä määriä. Lisäksi myös hyllyn jauhatusmäärän vaihtelu oli hyvin maltillista koeajon aikana.

6.4.4 Johtopäätökset

Koeajosta saatujen tulosten luotettavuus jäi todennäköisesti kohtalaisen heikoksi. Koeajon pitkä kesto, koepisteiden vähäinen määrä, osittain puutteellisesti asetetut koeajomuuttujat, lähinnä hylky, ja koeajon aikana ajettu laaja lajikirjo heikensivät kaikki koeajon luotettavuutta. Koeajokokemuksen perusteella on kuitenkin selvää, että monimuuttujakoeajon toteuttaminen on käytännössä mahdollista.

Koeajon tuloksista mielenkiintoisin on ilmanläpäisyvastusarvon voimakas vaste jauhatusmäärämuutoksiin. Koneuusinnan jälkeen jauhatusta siirryttiin ohjaamaan tiettyä puhkaisuindeksiä tavoitellen. Puhkaisuindeksiä vakauden koettiin tuolloin tarkoittavan myös sitä, että jauhatusmäärä pysyy tasaisena. Ennen laatuinvestointia ohjaussuurena toimi nimenomaan ilmanläpäisyvastusarvo, joka ei kuitenkaan vaikuttanut toimivalta ohjauskeinolta enää investoinnin toteuduttua. Tässä koeajossa saatu tulos on kuitenkin päinvastainen investoinnin jälkeen tehtyyn havaintoon nähden.

6.5 Koeajo 2

Toisen koeajon tavoitteena oli tutkia lisää jauhatusvaiheen vaikutusta tuotteen laatuominaisuuksiin. Lisäksi koeajon luotettavuutta parannettiin kehittämällä koesuunnitelmaa eteenpäin.

6.5.1 Tausta ja suunnittelu

Koeajo toteutettiin jälleen erotteluvaa koesuunnittelumenetelmää hyödyntäen ja siihen lisättiin neljä keskenään samanlaista välipistettä, joiden pääasiallisena tarkoituksena on helpottaa kokeen luotettavuuden arviointia. Lisäksi toisesta koeajosta tehtiin hieman ensimmäistä pidempi, millä haluttiin osaltaan parantaa tulosten luotettavuutta ja hyödynnettävyyttä.

Ensimmäisessä koeajossa todettiin, että erityisesti hyllyn annosteleminen johdonmukaisesti koesuunnitelmaa noudattaen on vaikeaa ja toisinaan jopa mahdotonta, joten se rajattiin pois koesuunnitelmasta. Lisäksi jauhatusmäärässä esiintyvää vaihtelua kasvatettiin ensimmäiseen koeajoon nähden, sillä lopputuotteessa näkyvää vastetta jauhatusmuutoksille haluttiin suuremmaksi ja selvemmäksi.

Koeajon aikana jokaista koepistettä ajettiin kolmen konerullan verran. Tuloksia on tarkasteltu pääasiassa niin, että vain keskimmäisestä konerullasta tehdyt mittaukset on huomioitu. Tällä tavoin on pystytty minimoimaan jauhatuksessa esiintyvien siirtymäaikojen aiheuttamaa vaikutusta tuotteen laatuun ja koeajon tulosten käsittelyyn.

Ensimmäisen koeajon tulosten vuoksi mielenkiinto toisen koeajon tulosten osalta oli kohdistunut erityisesti ilmanläpäisyvastus- ja puhkaisuindeksi-arvojen tutkimiseen. Lisäksi koeajossa haluttiin selvittää se, löytyisikö jostakin prosessin online-mittauksesta selvä vaste jauhatusmäärän vaihteluihin.

Koesuunnitelma on esitetty taulukossa 7. Välipisteet on muodostettu laskemalla kunkin muuttujan ylemmän ja alemman tavoitearvon keskiarvo.

TAULUKKO 7. Jauhatuksen koeajosuunnitelma.

Koepiste	1V EOK (kWh/t)	1V Sakeus (%)	2V EOK (kWh/t)	2V Sakeus (%)
1	-1	-1	1	1
2	0	0	0	0
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	1	-1
5	0	0	0	0
6	1	1	1	1
7	1	-1	-1	-1
8	-1	1	1	-1
9	1	1	-1	1
10	-1	-1	0	1
11	1	-1	1	1
12	0	0	0	0
13	-1	-1	1	-1
14	1	-1	-1	1
15	1	-1	1	-1
16	1	1	-1	-1
17	-1	1	-1	1
18	-1	-1	-1	-1
19	0	0	0	0
20	-1	1	1	1

6.5.2 Koeajon suoritus

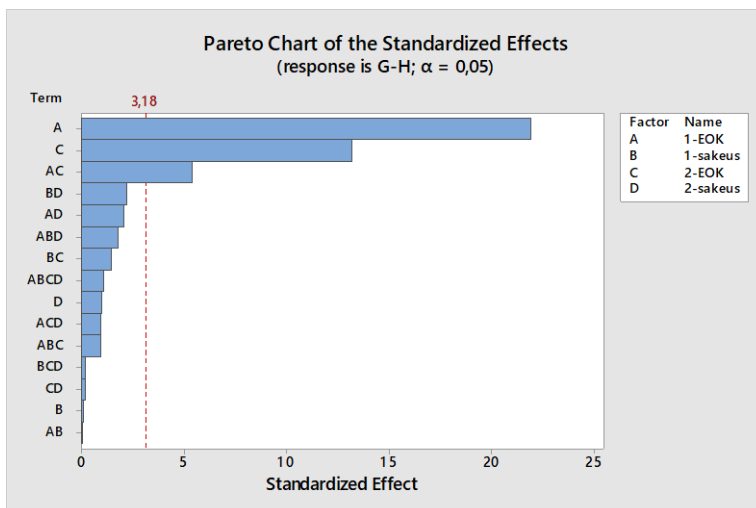
Koeajon aikana tuotantotilanne oli varsin tasainen eikä koeajoa häirinneitä poikkeamia tunnistettu. Kutakin koepistettä ajettiin kolme konerullaa. Pääsääntöisesti jokaisesta konerullasta toimitettiin laboratorioon näyte Paperlab-mittausta varten sekä lisäksi näytteet lujuusmittauksia CMT, CCT ja SCT ps varten.

Sakeusmittausten luotettavuutta arvioitiin kahdesti vuorokaudessa tehtävien laboratorion käsimitausten perusteella. Varsinaisten tuoteominaisuuksien lisäksi koeajon aikana seurattiin höyrynkulutusta, sillä kasvavan jauhatusmäärän arvioitiin vaikuttavan siihen merkittävästi.

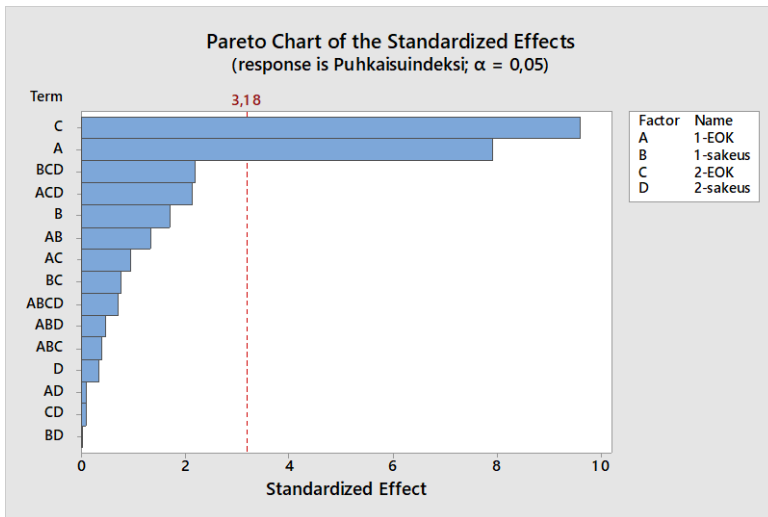
Koeajon aikana ajettiin tällä kertaa kartonkilajeja 150-190 g/m², eli lajikirjoa saatiin pienennettyä ensimmäiseen koeajoon verrattuna. Raskaat lajit 175 ja 190 g/m² ovat kuitenkin edelleen ongelmallisia tulosten tulkinnan kannalta.

6.5.3 Keskeisimmät tulokset

Aikaisemman koeajon havaintojen perusteella koeajotulokset olivat kiinnostavia erityisesti ilmanläpäisyvastuksen ja puhkaisuindeksi-arvon osalta. Kuvissa 17 ja 18 on esitetty koeajotulokset näiden vastemuuttujien suhteen.

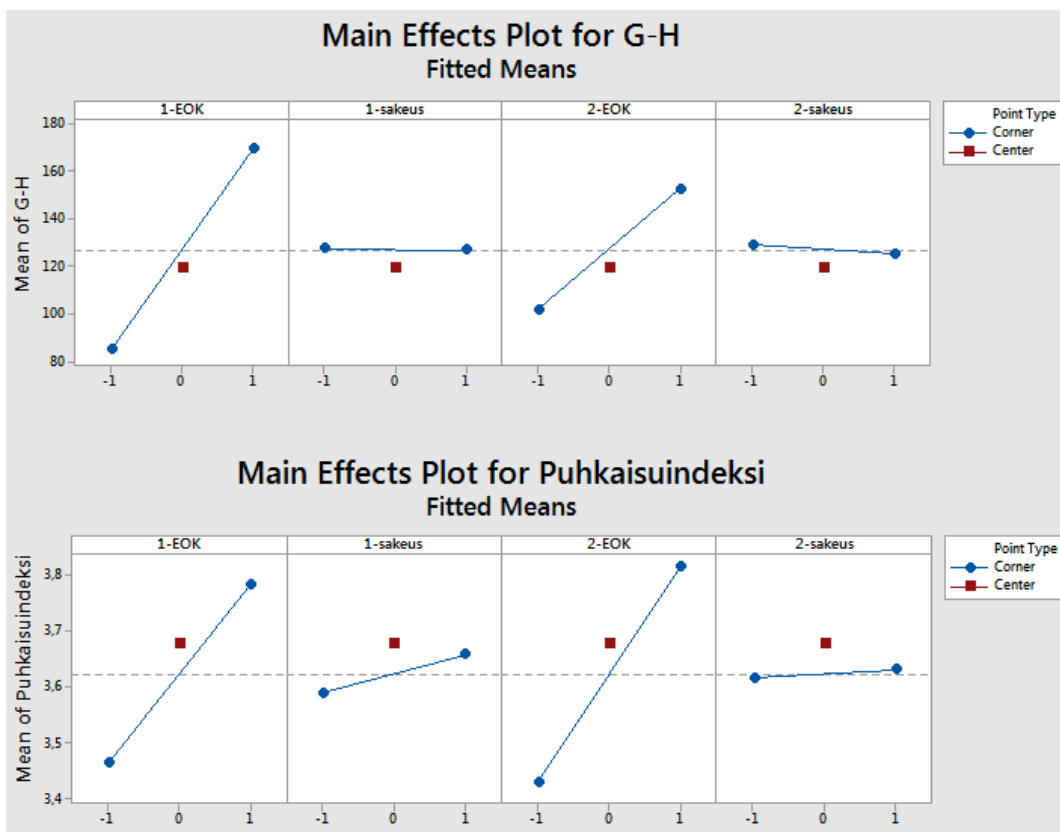


KUVA 17. Ensimmäisen ja toisen vaiheen jauhatusmäärän vaste ilmanläpäisyvastuksen arvoon.



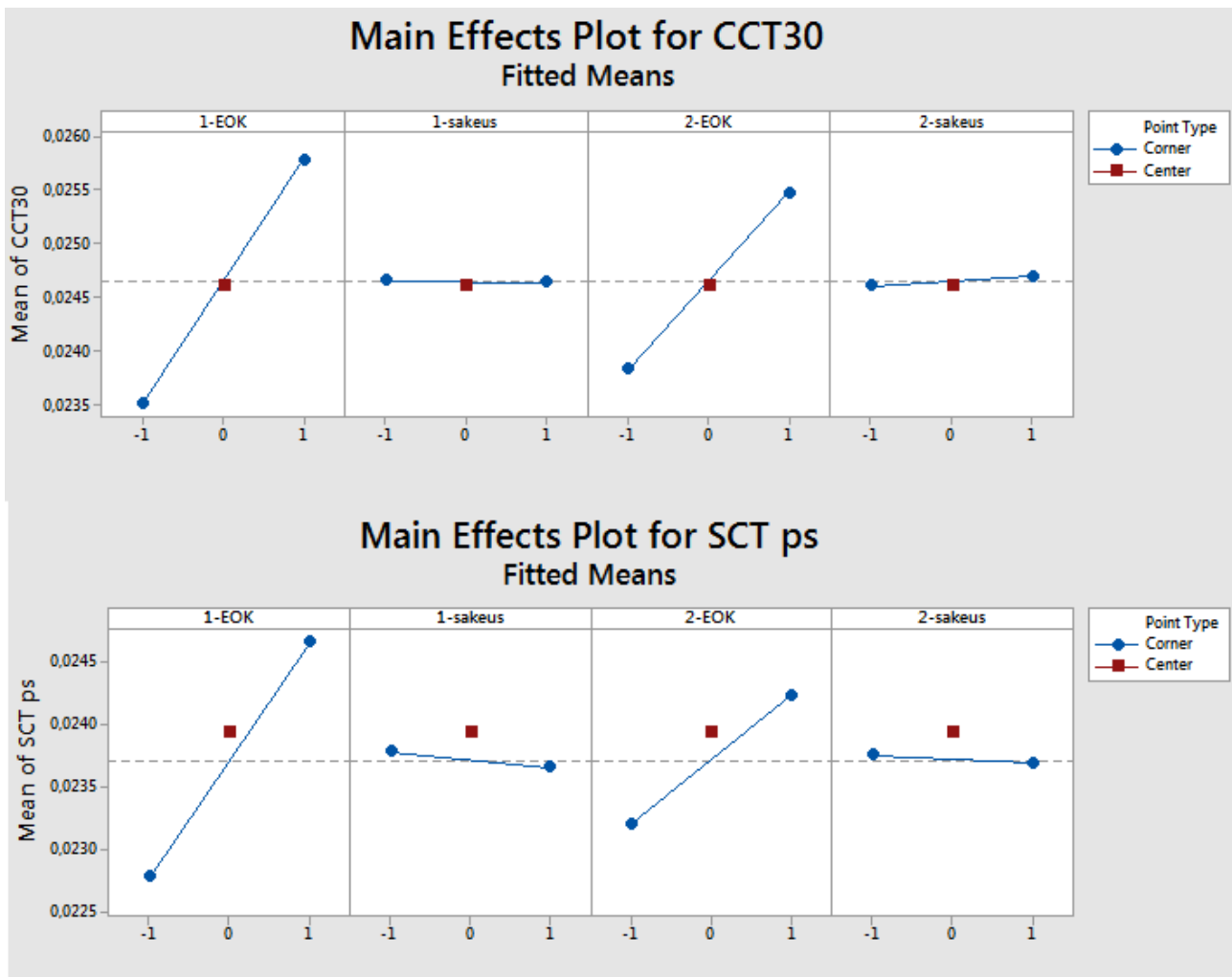
KUVA 18. Toisessa koeajossa jauhatusmäärämuutoksilla saavutettiin tilastollisesti merkitsevä vaste myös puhkaisuindeksiin.

Koesuunnitelmaan sisällytettyjen välipisteiden keskiarvot on merkitty kuvaan 19 punaisella neliöllä.



KUVA 19. Sakeuden ja jauhatusmäärän vaikutukset puhkaisuindeksiin ja G-H -arvoon.

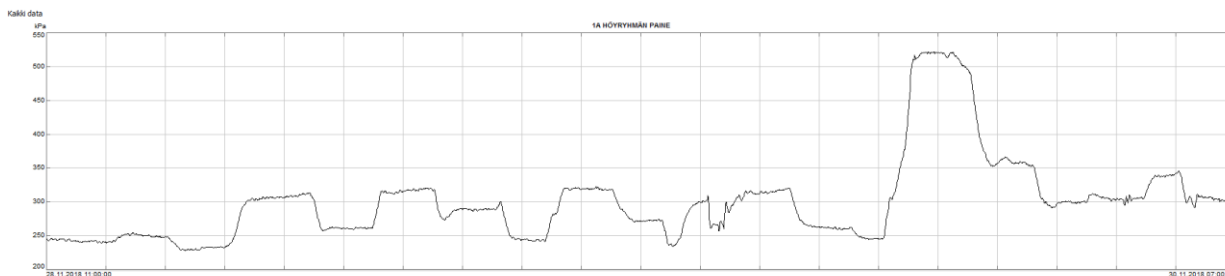
Paperlab-mittausten lisäksi toisen koeajon tuloksia oli mahdollista tarkastella lujuusmittausten CCT30 ja SCT ps suhteen. Koeajon aikana ajettujen raskaiden lajien vuoksi CMT30-tulosten vertailu ei ollut mahdollista, sillä mittausmenetelmä ei ole sopiva paksuille kartongeille. Lujuusominaisuudet ovat riippuvaisia neliömassasta, joten CCT- ja SCT-laaturvojen osalta tarkastelussa käytettiin neliömassalla indeksoitua muotoa. Tulokset näiden osalta on nähtävissä kuvasta 20. Ensimmäisen vaiheen jauhatusmäärä on odotetusti koeajon muuttujista olennaisin lujuusominaisuuksien kehittymisen kannalta.



KUVA 20. Koeajon tulokset puristuslujuusominaisuuksien kannalta tarkasteltuina.

Lisäksi koeajotuloksia tarkasteltiin MAP-kuituanalysaattorin tuottamiin tuloksiin, mutta tehdyt jauhatusmäärämuutokset eivät vaikuttaneet analysaattorin mittauksiin merkittäväällä tavalla.

Varsinaisten kartongin ominaisuuksien lisäksi jauhatusmäärän muutokset näkyvät selvästi ensimmäisen höyryryhmän painenvaihtelussa kuivatusosalla. Kuvasta 21 pystytään näkemään selvästi koepisteiden rajat.



KUVA 21. Ensimmäisen höyryryhmän paine koeajon aikana.

6.5.4 Johtopäätökset

Toisessa koeajossa puhkaisuindeksi-arvo sai jauhatusmäärämuutoksista selvästi paremman vasteen kuin ensimmäisessä koeajossa. Koeajotulosten perusteella ilmanläpäisyvastusarvo G-H reagoisi kuitenkin herkemmin jauhatuksen EOK-muutoksiin kuin puhkaisuindeksi-arvo. Ensimmäisessä koeajossa ilmanläpäisyvastusarvon vaihtelu jäi verrattain pieneksi, mutta kokonaisjauhatusmäärävaihtelun kasvattaminen lisäsi myös ilmanläpäisyvastusarvon vaihtelua.

Tuloksia tulkittaessa täytyy huomioida puhkaisuindeksi- ja ilmanläpäisyvastusarvojen normaali käyttäytyminen prosessiolosuhteissa. Kuvien 18 ja 19 perusteella puhkaisuindeksi-arvo reagoi kyllä selvästi jauhatusmäärän muutokseen, mutta toisaalta arvon vaihtelu toteutuu noin välillä 3,45 – 3,75 kPam²/g. Koeajossa käytetty suurin kokonaisjauhatusmäärä oli kuitenkin 150 % pienimmästä jauhatusmäärästä ja näin suureen jauhatusmäärän vaihteluun nähden puhkaisuindeksi-arvon vaihtelu on yllättävän pientä. Esimerkiksi normaalien ajotilanteiden aikana puhkaisuindeksi-arvoa on pidetty vakaana, kun sen vaihtelu on ollut etäisyydellä +/- 0,20 kPam²/g tavoitteesta. Vastaavasti ilmanläpäisyvastusarvo on vaihdellut koeajon aikana välillä n. 85 – 170 s/100 ml. Tämä vaihtelu on huomattavasti arvon normaalia käyttäytymistä suurempaa.

Sakeusvaihtelun merkitys jäi vähäiseksi kaikkien tutkittujen ominaisuuksien kannalta.

6.6 Koeajo 3

Kolmannen jauhinkoeajon tavoitteena oli tutkia tarkemmin jauhatussakeuden mahdollista vaikutusta laatuarvoihin ja siten myös laatuajontaan.

6.6.1 Tausta ja suunnittelu

Sakeus valittiin tarkasteltavaksi, sillä aikaisempien koeajojen tulosten perusteella sakeudella ei ole olennaista vaikutusta laatuun, sillä alueella kuin sitä koeajojen puitteissa pystyttiin muuttamaan. Tämä havainto oli ristiriitainen tehtaalla vallinneen käsityksen kanssa, jonka mukaan pienikin muutos jauhatussakeudessa näkyy laadussa.

Koeajosuunnitelma on esitetty taulukossa 8.

TAULUKKO 8. Jauhatussakeuden vaikutus laatuun -koeajosuunnitelma.

Koepiste	1V EOK (kWh/t)	1V Sakeus (%)	2V EOK (kWh/t)	2V Sakeus (%)
1	0	0	0	1
2	0	1	0	1
3	0	1	0	0

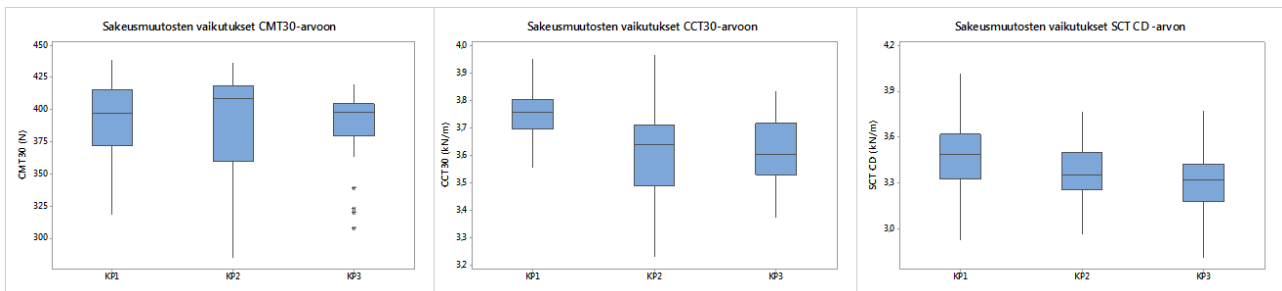
6.6.2 Koeajon suorittaminen

Jauhatuksen sakeuskoeajo ajettiin noin vuorokauden mittaisena ajanjaksona, lajilla 140 g/m². Jokaista koepistettä ajettiin seitsemän konerullaa. Jauhatuksen toiminta pyrittiin vakioimaan muuten tasaiseksi ajamalla koko koeajon ajan samoilla, laadun ja ajettavuuden kannalta riittävän hyväksi arvioituilla, EOK-arvoilla.

Jauhatussakeuskoeajo sujui ongelmitta eikä koeajon aikana tunnistettu sellaisia ongelmia tai poikkeustilanteita, joista voisi olla haittaa koeajon luotettavuudelle. Koeajon aikana jauhimita otettiin ylimääräiset sakeusmittaukset jokaisen koepisteen alussa sakeusmittauksen luotettavuuden arvioimiseksi. Mittausten perusteella jauhinten online-sakeusmittaus vastaa käsimittausta $\pm 0,2$ % tarkkuudella.

6.6.3 Keskeisimmät tulokset

Koeajon tulokset on esitetty kuvassa 22. Erot koepisteiden välillä jäivät kaikkien tarkasteltujen laatumittareiden osalta pieniksi, mutta koeajon tulosten perusteella koepisteen 1 sakeusarvot näyttävät antavan hieman paremmat laatumittarit tulokset kuin kaksi muuta koepistettä.



KUVA 22. Sakeuskoeajon tulokset CMT30-, CCT30- ja SCT ps -arvojen osalta.

Oheisten box plot -kuvaajien lisäksi koeajon tuloksia tarkasteltiin ANOVA-hypoteesitestimenetelmällä. Hypoteesitestillä pyrittiin selvittämään koepisteiden tuottamien tulosten mahdollisia eroja. CMT30-tulosten osalta testausmenetelmä ei löytänyt tilastollisesti merkittävää eroa koepisteiden väliltä. Poikkisuuntaisten SCT- ja CCT30-arvojen osalta koepisteiden väliltä löytyi tilastollisesti merkittävä ero: Koepiste 1 poikkeaa muista ja sen tuottamat laatuarvot ovat näiden ominaisuuksien osalta kahta muuta koepistettä parempia. Koosteet ANOVA-testien tuloksista on esitetty liitteessä 1.

6.6.4 Johtopäätökset

Tuloksia tulkittaessa täytyy huomioida se, että käytännössä kaikki koeajoissa saavutetut tulokset ovat kunkin laatuominaisuuden normaalin hajonnan sisällä. Vaikka tilastollinen ero koepisteiden välillä on tunnistettu, ero koepisteiden välillä on niin pieni, että sillä ei välttämättä ole käytännön kannalta merkitystä.

Jauhatuksen normaalitoiminnan aikainen sakeusvaihtelu on tässä koeajossa toteutettua sakeusvaihtelua pienempää, joten tämän koeajon tulosten perusteella vaikuttaa todennäköiseltä, että jauhatuksen tavanomainen sakeusvaihtelu ei aiheuta ongelmalliseksi koettavaa laatuvarjontaa. Koeajojen tulokset sakeuden pienestä vaikutuksesta laatuun eivät kuitenkaan tarkoita sitä, etteikö kappaleessa 5.3 kuvattu sakeusheittely voisi olla ongelmallista laadun ja jauhatuksen EOK-laskennan onnistumisen kannalta.

6.7 Jauhatuksen ajomallikokeilu

Ensimmäisenä ajatun erottelevan koeajon tulosten perusteella Gurley-Hill -ilmanläpäisyvastusarvolla saavutettiin parempi vaste jauhatusmäärän muutokseen kuin puhkaisuindeksiä arvolla. Myös toisessa koeajossa ilmanläpäisyvastusarvo reagoi jauhatusmäärän muutokseen puhkaisuindeksiä arvoa herkemmin.

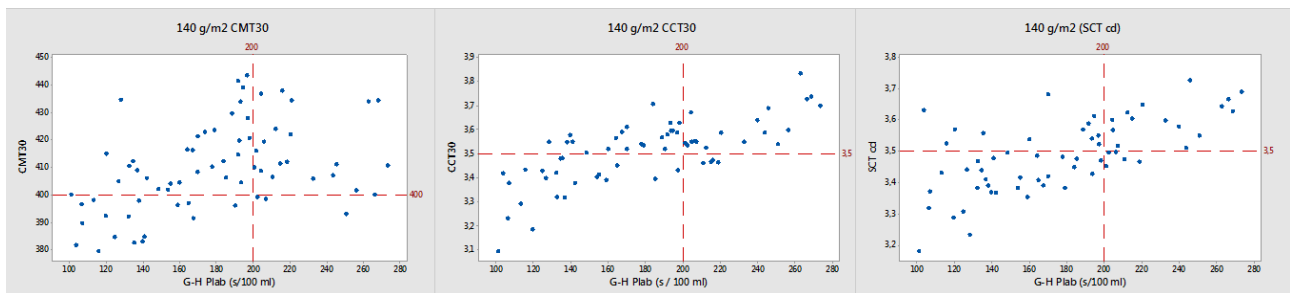
Koeajojen pohjalta tehtyjen havaintojen perusteella pääteltiin, että jauhatuksen ohjaaminen puhkaisuindeksiä arvotavoitteen perusteella voi olla osasyllinen tuotteen kasvaneeseen laatuvarjontaan. Asian selvittämiseksi päätettiin kokeilla jauhatuksen ohjaamista ilmanläpäisyvastusarvon perusteella.

6.7.1 Suunnittelu

Koeajotulosten lisäksi myös operaattoreiden kokemukset jauhatuksen ohjaamisesta tukivat havaintoa siitä, että puhkaisuindeksiä seuraaminen ei tuota tasaisinta mahdollista jauhatuslopputulosta.

Ensimmäisessä ja toisessa koeajoissa luodun datan perusteella tuli mahdolliseksi tarkastella erityisen hyvin sitä, kuinka lujuusominaisuudet kehittyvät ilmanläpäisyvastusarvon funktiona. Tavanomaisessa ajotilanteessa tämänkaltainen tarkastelu on vaikeaa, sillä ääriarvoja ei tyypillisesti saavuteta.

Ääriarvojen puuttuessa kuvassa 23 näkyvän kaltaisen trendin näkeminen on haastavaa. Kuvassa tarkastelulajina on neliöpaino 140. Kuviin on merkitty vaakasuuntainen punainen viiva kunkin lujuusominaisuuden tavoitearvon kohdalle ja pystysuuntainen viiva Gurley-Hill ilmanläpäisyvastusarvon 200 s/100 ml kohdalle.



KUVA 23. Lujuusominaisuudet ilmanläpäisyvastusarvon funktiona. Lujuusominaisuudet ovat vasemmalta oikealle CMT30, CCT30 ja SCT ps.

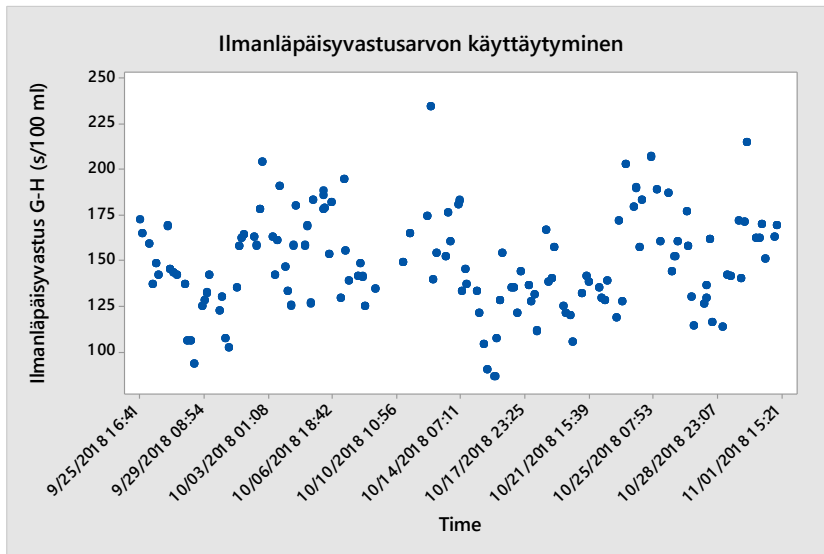
Kuvasta 23 nähdään, että valtaosa lujuusarvoista sijoittuu vaakasuuntaisen tavoiteviivan yläpuolelle, kun G-H -arvo on yli 200 s/100 ml. Trendi on erityisen selvä CCT30- ja SCT ps -arvojen kannalta. CMT30 -arvojen hajonta on silminnähtävää suurempaa.

Lisäksi CMT30 -arvojen käyttäytymisessä näkyy mahdollisesti ns. jauhatuskäyräilmiö, jonka mukaan lujuusominaisuudet kasvavat jauhatusmäärän kasvaessa tiettyyn määrään saakka ja kääntyvät sen jälkeen laskuun. CMT30-arvot näyttävät kääntyvän laskuun G-H -arvon ylittäessä n. 240 s/100 ml.

Historiadatan ja aiemmin esitettyjen havaintojen perusteella ajomallikokeilussa käytettäviksi ilmanläpäisyvastusarvon tavoitteiksi määritettiin lajeille 120-127 g/m² 180 s/100 ml ja muille lajeille 200 s/100 ml. Tavoitearvo asetettiin niin, että sillä ajaminen olisi varmasti mahdollista esimerkiksi

höyrynkulutuksen puolesta, mutta että myös mahdollinen ero lujuusominaisuuksien keskiarvojen kehittämisessä aikaisempaan verrattuna tulisi varmasti esiin.

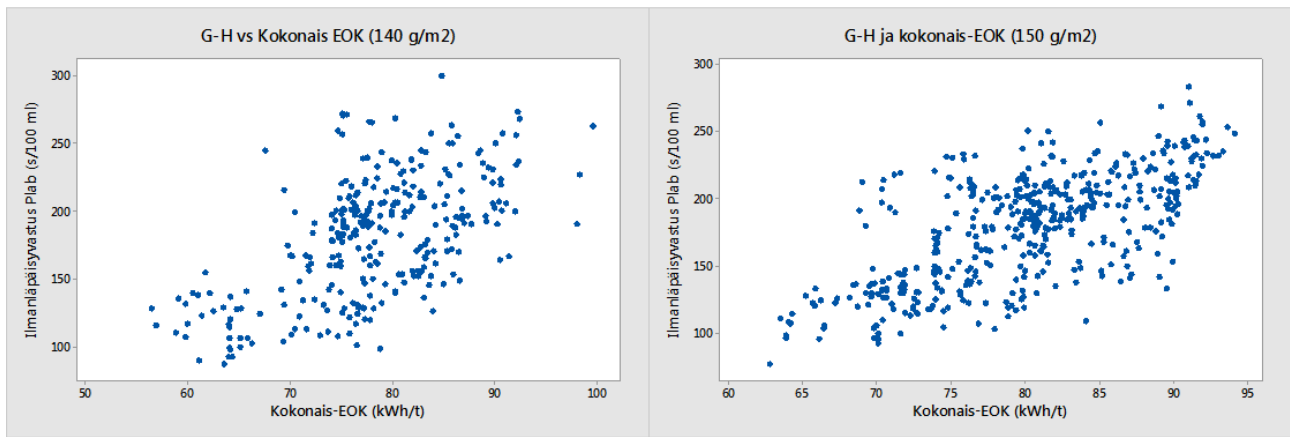
Jauhatusta puhkaisuindeksiin mukaan ohjattaessa ilmanläpäisyvastusarvo on vaihdellut huomattavan paljon normaalissa ajotilanteessa: jopa välillä 90 – 230 s/100 ml. Aikasarjakuva ilmanläpäisyvastusarvon käyttäytymisestä ennen diplomityön kokeellisen osan aloittamista on esitetty kuvassa 24.



KUVA 24. G-H arvon vaihtelua normaalin ajotilanteen aikana.

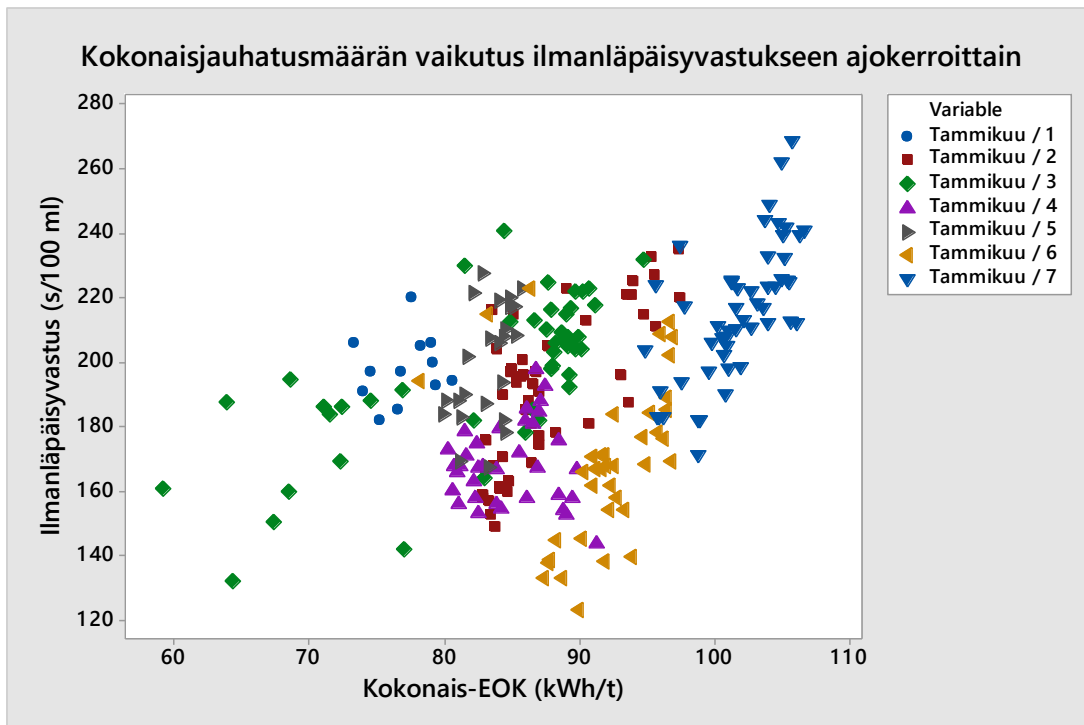
Tällä hetkellä käytettävissä olevan tiedon perusteella ilmanläpäisyvastusarvon muutokset johtuvat pääosin jauhatuksen kokonaisjauhatusmäärän vaihteluista. Jauhatuksen lisäksi myös puristinosan toiminta vaikuttaa G-H -arvoon, mutta puristimen erilaisesta ajomallista johtuen, sen vaikutusta arvon vaihteluun pidetään epätodennäköisenä, sillä puristinosaa ajetaan poikkeuksetta vakiokuormalla.

Kuvassa 25 on kuvattu ilmanläpäisyvastusarvoa kokonais-EOK-arvon funktiona lajeilla 140 g/m² ja 150 g/m². Kuvaajista nähdään selvästi, että kokonaisjauhatusmäärän noustessa myös ilmanläpäisyvastusarvo nousee. Vaihtelu saman jauhatusmäärän sisällä on kuitenkin edelleen verrattain suurta. Tämä johtuu todennäköisesti raaka-aineen vaihtelusta, sillä jauhatusta edeltävät prosessiolosuhteet ovat aina pääpiirteittäin samanlaiset. Raaka-aineen suuren vaihtelun vuoksi jauhatuksen ajaminen vakioidun EOK-tavoitteen perässä ei ole mahdollista.



KUVA 25. Jauhatusmäärän vaikutus G-H -arvoon neliöpainolajeilla 140 ja 150.

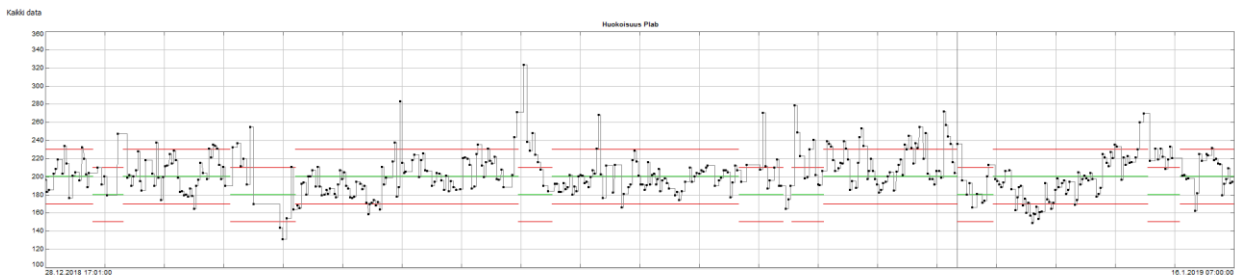
Mahdollisen raaka-aineen vaihtelun aiheuttamaa vaikutusta sopivan ilmanläpäisyvastusarvon tuottavaan kokonaisjauhatusmäärään on esitetty kuvassa 26. Kuvassa on tarkasteltu erään neliöpainolajin seitsemän erillistä ajokertaa. Kuvasta nähdään, että ajokertojen välillä on selvää eroa siinä, millaisen kokonaisjauhatusmäärän massa kulloinkin tarvitsee saavuttaakseen tavoitellun ilmanläpäisyvastusarvon.



KUVA 26. Ilmanläpäisyvastusarvo kokonaisjauhatusmäärän funktiona ajokerroittain.

6.7.2 Ajomallikokeilun suorittaminen

Jauhatuksen ohjaamista ilmanläpäisyvastusarvon perusteella kokeiltiin reilun kahden viikon mittaisella ajanjaksolla 28.12.2018 – 16.01.2019. Kahden viikon ajanjaksolle mahtuu paljon erilaisia ajotilanteita, mutta uuden ilmanläpäisyvastustason pitäminen onnistui pääosin hyvin. Ajomallikokeilun tavoitteena oli pitää ilmanläpäisyvastusarvo punaisten ala- ja ylärajaa merkitsevien viivojen sisäpuolella (kuva 27).

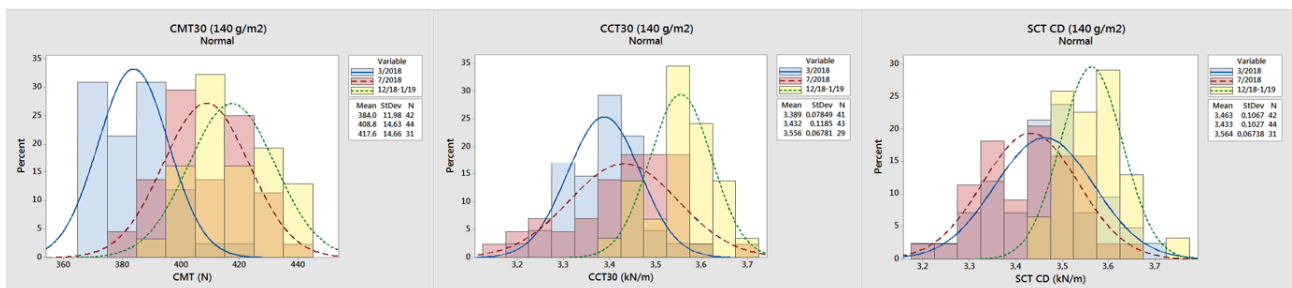


KUVA 27. Ilmanläpäisyvastusarvon vaihtelua ajomallikokeilun aikana

6.7.3 Keskeisimmät tulokset

Ajomallikokeilun ajalta saatiin vertailukelpoiset jaksot lajeille 140, 150 ja 160 g/m². Muiden lajien osalta mittapisteiden määrä jäi niin vähäiseksi, ettei mielekkään vertailun tekeminen ole mahdollista.

Kuvassa 28 on esitetty ajomallikokeilun aikaiset tulokset lajin 140 g/m² osalta.



Kuva 28. CMT30-, CCT30- ja SCT ps-arvojen vertailu ajanjaksoihin ennen tehtyä laatuinvestointia (punainen), investoinnin jälkeen (sininen) ja jauhatuksen ajomallikokeilun aikana (keltainen).

Lisäksi tulokset on esitetty numeerisesti taulukossa 9.

TAULUKKO 9. Lujuusominaisuuksien käyttäytyminen ajomallikokeilun aikana

Laji	CMT 30 KA		CMT30 Hajonta		CCT30 KA		CCT30 Hajonta		SCT ps KA		SCT ps Haj	
(g/m ²)	Ajomallikoe	7/18	Koe	Ajomallikoe	7/18	Koe	Ajomallikoe	7/18	Koe	Ajomallikoe	7/18	Koe
140	+ 2,1 %	14,63	14,66	+ 3,6 %	0,1185	0,0678	+ 3,8 %	0,1027	0,06738			
150	+ 0,2 %	19,46	15,98	+ 2,4 %	0,09892	0,0978	+ 2,2 %	0,096	0,06858			
160	+ 2,4 %	22,96	19,32	-0,2 %	0,1168	0,1268	+ 1,6 %	0,0825	0,1328			

Taulukossa 8 vertaillaan CMT-, CCT- ja SCT ps -arvojen keskiarvoja ja keskihajontoja heinäkuun 2018 verrokiaikaan nähden. Keskiarvojen osalta taulukossa on esitetty kunkin lujuusominaisuuden ja neliöpainon prosentuaalinen kehitys verrokiaikaan nähden. Taulukkoon on korostettu vihreällä ne kohdat, joissa ajomallikokeilu on tuottanut parempia tuloksia kuin heinäkuussa 2018 käytössä ollut ajomalli, eli puhkaisuindeksiä seuraaminen. Vastaavasti kehnompia tuloksia tuottaneet kohdat on merkitty oranssilla korostusvärillä.

Taulukosta nähdään, että kokeilulla on saavutettu paremmat arvot kaikkien vertailtavien lujuusominaisuuksien kannalta neliöpainolla 150. Myös neliöpainolla 140 ajomalli on tuottanut erinomaisia tuloksia, sillä kaikki lujuusominaisuudet ovat olleet kokeilun aikana keskiarvoltaan parempia kuin vertailujakson aikana.

Lajilla 140 g/m² hajonta on pienentynyt CCT30- ja SCT ps-arvojen osalta selvästi, mutta CMT30-arvojen osalta hajonnassa ei ole tapahtunut kehitystä. Raskaampi neliöpaino 160 g/m² on käyttäytynyt tarkastelujakson aikana hieman toisin kuin kevyemmät verrokkilajinsa. CMT30- ja SCT ps-arvot ovat keskiarvoltaan parempia edeltävään verrokkijaksoon nähden. CCT30-arvojen keskiarvo on kuitenkin jopa hieman heikompi kuin aiemmalla jaksolla. Lajilla 160 g/m² hajonta on parantunut ainoastaan CMT30-arvoilla.

Ajomalli perustuu ilmanläpäisyvastusarvon vaihtelun pienentämiseen. Eniten ajettujen lajien G-H -arvojen lajikohtaiset keskiarvot ja hajonnat ajomallikokeilun aikana on esitetty taulukossa 10.

TAULUKKO 9. G-H -arvojen toteutuminen ajomallikokeilun aikana.

Laji	Keskiarvo (s/100 ml)	Hajonta
140 g/m ²	205,2	21,53
150 g/m ²	207,5	20,7
160 g/m ²	193,6	19,4

6.7.4 Johtopäätökset

Ajomallikokeilun tulokset olivat alkuperäiseen laatuajon ongelmien nähden onnistuneita. Ainakin lyhyellä tarkastelujaksolla ilmanläpäisyvastusarvon käyttäminen ohjaussuurena tuottaa laatuajon kannalta hyvän lopputuloksen. Asian varmentamiseksi ilmanläpäisyvastusarvon seuraamiseen perustuvalla ohjausmenetelmällä olisi kuitenkin hyvä ajaa pitkäkestoisemmin, jotta tulokset saataisiin varmistettua kaikkien lajien osalta.

Ilmanläpäisyvastusarvoa oltiin käytetty tehtaalla ohjaussuurena aikaisemmin ja tuolloin sen tavoitearvona oltiin käytetty arvoa 100 s/100 ml. Ajomallikokeilun aikainen tavoitearvo oli kaksinkertainen historiassa käytettyyn arvoon nähden, mikä herätti etukäteen huolta koneen ajettavuudesta ja höyrynkulutuksen mahdollisesta kasvusta. Koeajon aikana ongelmia näiden asioiden kanssa ei kuitenkaan ollut.

Ajomallikokeilun lyhyen keston vuoksi ajomallin aiheuttamia kustannusvaikutuksia jauhinten sähkökäyttöön tai höyrynkulutukseen kuivatusosalla ei saatu määritettyä.

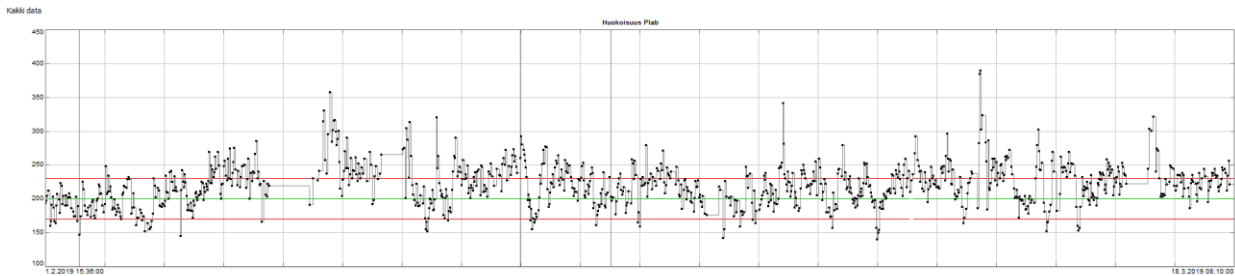
6.8 Kokeellisen osan yhteenveto

Aiemmin esiteltyjen koeajojen sekä ajomallikokeilun tuloksena jauhatusta päätettiin alkaa ohjata jatkossa ilmanläpäisyvastusarvon tavoittelemiseen perustuvalla ohjausmallilla. Gurley-Hill-ilmanläpäisyvastusarvon tavoitteeksi määritettiin lajista riippumatta 200 s/100 ml. Lisäksi päätettiin

määrittää myöhemmässä vaiheessa kullekin neliöpainolle oma lajikohtainen ilmanläpäisyvastustavoitteensa.

Aluksi halutun ilmanläpäisyvastustason saavuttamisessa oli haasteita, mutta helmi-maaliskuussa tilanne oli jo vakiintunut uudelle, aikaisempaan verrattuna korkeammalle tasolle.

G-H -arvojen käyttäytymistä tuona aikana on esitetty tarkemmin kuvassa 24.



KUVA 29. Paperlabin ilmanläpäisyvastusmittauksen käyttäytymistä helmi-maaliskuussa 2019.

Kuvassa 29 on ohut vaakasuuntainen vihreä viiva tavoitearvon 200 s/100 ml kohdalla. Punaiset viivat rajaavat ala- ja ylärajoja, jotka on merkattu kohdille 170 ja 230 s/100 ml. Kuvasta nähdään, että toisinaan mitatut arvot poikkeavat paljon ”tavoiteputkesta”.

Jotta ajomallin tuottamat hyödyt laatuvarjon pienemisen suhteen toteutuisivat täysipainoisesti, tulee kiinnittää jatkossa enemmän huomiota ilmanläpäisyvastusarvon pitämiseen mahdollisimman tasaisena. Ajomallikokeilun tuottamien tulosten perusteella arvon hallitseminen huomattavasti nykytilannetta pienemmällä vaihteluvälillä on mahdollista.

Ilmanläpäisyvastusarvon toteuma lajien 140, 150 ja 160 g/m² osalta helmi-maaliskuussa 2019 on esitetty taulukossa 10.

TAULUKKO 10. Ilmanläpäisyvastusarvon hajonta on suurempaa kuin ajomallikokeilun aikana.

Laji	Keskiarvo	Hajonta
140 g/m ²	230,2	26,36
150 g/m ²	218,7	28,43
160 g/m ²	214,3	25,8

Kokeellisessa osassa tutkittiin lisäksi monimuuttujakoeajojen toteutusmahdollisuutta kartonkikone- ja tehdas ympäristössä. Suurimmaksi haasteeksi koeajon toteuttamisessa muodostuu koeajon pitkä kesto. Kun koeajo kestää useampia päiviä, esimerkiksi raaka-aineen vaihtelu voi muodostua ongelmaksi tulosten luotettavuuden ja tulkittavuuden kannalta. Jos raaka-aineen tasalaatuisuuteen pystyisi takaamaan, koeajon luotettavuus paranisi. Lisäksi ongelman voivat muodostaa mahdolliset poikkeustilanteet tuotannossa. Esimerkiksi katko ja sen vuoksi hetkellisesti kasvava hylkymassan syöttö voi vähentää koeajotulosten luotettavuutta.

Toisen selkeän ongelman koeajojen kannalta muodostavat lajinvaihdot. Kummankin pitkän monimuuttujakoeajon aikana kartonkikoneella ajettiin useita kartonkilajeja. Monet kartongin ominaisuuksista ovat riippuvaisia neliömassasta ja siten niiden vertaileminen on haastavaa, mikäli koepisteet ovat keskenään erilaisista lajeista. Käytännössä ajo-ohjelmassa ei ole ikinä niin pitkiä yhtäjaksoisia ajoja tiettyä neliömassaa, että useamman vuorokauden mittainen koeajo olisi mahdollista toteuttaa ilman lajinvaihtoa.

Kolmas haaste muodostuu tarvittavasta näytemäärästä ja näytteiden tekoon käytettävissä olevista henkilöresursseista. Monet standardoidut aallotuskartongin mittaamenetelmät, kuten puristuslujuusmittaukset, ovat laboratoriossa tehtäviä käsimittaamenetelmiä. Monimuuttujakoeajoista kertyy näytteitä huomattavia määriä ja näytteiden tutkimiseen menee väistämättä aikaa. Tehokas tapa toteuttaa koeajoja onkin valita tarkasteltaviksi riittävän luotettaviksi arvioituja automaattisella analysaattorilla mitattavia suureita. Tässä työssä hyödynnettiin paljon Paper Lab -analysaattorin tekemiä analyyseja, jolloin näytteiden eteen tehtävä työmäärä ei lisääntynyt, sillä tehtaalla normaalin toimintatavan mukaan analysaattorinäyte tehdään jokaisesta konerullasta.

Erottelevilla monimuuttujakoeajolla tunnistettiin kuitenkin olevan valtava hyötypotentiaali erilaisten syy-seuraussuhteiden selvittämisessä. Prosessin kehittämisen ja tietotaidon parantamisen kannalta on arvokasta tietää, minkälainen painoarvo tietyllä toimenpiteellä on mihinkin ja millä toimenpiteellä saavutetaan kulloinkin paras lopputulos.

Lisäksi koesuunnittelumenetelmät tulisi nähdä tapana luoda prosessiin järjestelmällistä ja johdonmukaista muutosta, jonka avulla on mahdollista päästä käsiksi itse ongelmaan. Paperinvalmistusprosessissa on valtava määrä mittauksia, joiden luomaa dataa voi analysoida loputtomasti. Datan hyötyarvo kasvaa huomattavasti, kun muuttujien välisiä yhteyksiä päästään tutkimaan suunnitelmallisen vaihtelun aiheuttamisen kautta.

Tässä työssä esitellyissä koeajoissa monimuuttujakoeajot toteutettiin yksinkertaisuuden vuoksi niin, että koeajon kaikki muuttujat olivat jauhatusosastolta. Vaikutussuhteiden ymmärtämisen vuoksi olisi mielenkiintoista ajaa vastaavia koeajoja esimerkiksi niin, että jauhatuksen lisäksi koeajoon otettaisiin vaikkapa puristinosa, jolloin päästäisiin selvittämään paremmin eri prosessivaiheiden vaikutusta esimerkiksi ilmanläpäisyvastusarvon muodostumiseen.

7 AJOMALLIMUUTOKSEN KUSTANNUSVAIKUTUSET

Jauhatuksen ajotapamuutos vaikuttaa jauhinten sähkönkulutukseen ja kuivatusosan höyrynkulutukseen. Tammi-maaliskuun 2019 aikana ilmanläpäisyvastusarvojen vaihtelua ei ole onnistuttu pitämään ajomallikokeessa saavutetulla tasolla. G-H-arvo on kuitenkin keskiarvon osalta tavoitetasolla tai sen yläpuolella, joten ajomallin aiheuttamien kustannusten arvioiminen on osittain mahdollista.

Mahdollisia kustannuksia arvioitaessa täytyy muista, että esimerkiksi puristinosan jälkeinen kuiva-ainepitoisuus vaikuttaa olennaisesti höyrynkulutukseen kuivatusosalla. Tehdyn koneuusinnan myötä kuiva-ainepitoisuus on suurempi kuin aikaisemmin, joten pelkän jauhatusmuutoksen vaikutusta höyrynkulutukseen on käytännössä mahdotonta arvioida. Ajotapamuutos vaikuttaa tuotannon muuttuviin kustannuksiin lähinnä mahdollisen höyrynkulutuksen sekä jauhatusenergian muutoksen kautta.

7.1 Höyrynkulutus

Kartonkikoneen ominaishöyrynkulutusta on tarkasteltu kuukausitasolla taulukossa 11. Esitetyt luvut ovat kuukauden keskiarvoja, joista on kuitenkin suodatettu häiriötilanteiden tai poikkeamien takia ilmenneet poikkeuksellisen matalat (<0,5 MWh/t) ja korkeat (>1,5 MWh/t) kulutusluvut. Lisäksi taulukkoon on merkitty kunkin kuukauden bruttotuotanto sekä viimeiseksi laskennallinen höyryn aiheuttama kustannus bruttotonnia kohti. Höyryn muuttuvana valmistuskustannuksena käytetään arvoa 30 €/MWh, joka on laskennallinen kustannuslaskelmassa käytettävä hinta-arvio, jonka tarkoituksena on vain havainnollistaa muutoksen prosentuaalista vaikutusta.

TAULUKKO 11. Höyryn kustannukset kartonkitonnia kohti.

Kuukausi	Höyryn ominaiskulutuksen keskiarvo (MWh/t)	Höyryn kustannus tonnia kohti (€/t)
Helmikuu 2018	1,36	40,8
Heinäkuu 2018	1,11	33,3
Helmikuu 2019	1,13	33,9

Tarkastelussa käytettävä bruttotuotantomäärä on muodostettu päiväkohtaisen tavoitetuotantomäärän perusteella. Höyrynkulutuksen aiheuttamat kuukausittaiset kustannukset saadaan laskettua kertomalla bruttotuotannon keskiarvo kunkin kuukauden ominaishöyrynkulutuksen määrään perustuvalla höyryn tonnikohtaisella kustannuksella. Laskelman etenemistä ja tulosta on avattu taulukossa 12. Vuosikustannus on muodostettu olettaen, että kuukausittainen tuotanto on yhtä suuri kuin taulukossa esitetty arvio kuukauden bruttotuotannosta.

TAULUKKO 12. Höyrynkulutuksen mahdollinen kustannusvaikutus

Kuukausi	kuukauden bruttotuotanto	Höyrynkulutuksen kuukausikustannukset (€)	Laskennallinen vuosikustannus (€)
Helmikuu 2018	24 000 t	24kt x 40,8 €/t = 979 200	11 760 400
Heinäkuu 2018		24kt x 33,3 €/t = 799 200	9 590 400
Helmikuu 2019		24kt x 33,9 €/t = 813 600	9 763 200
Ero helmikuuhun 2018		-180 000	- 17 %
Ero heinäkuuhun 2018		+ 14 400	+ 2 %

Taulukkoon 12 kirjatuista tuloksista nähdään, että korkeampaan jauhatusmäärään tähtäävän ajomallin aikana (eli helmikuu 2019) toteutuneet höyrynkulutuskustannukset ovat kuukausitasolla vain 2 % suuremmat kuin heinäkuussa 2018 käytössä olleen ajomallin aikana toteutuneet kustannukset.

Helmikuuhun 2018 nähden höyrynkulutuksesta aiheutuvat kustannukset ovat selvästi pienemmät. Helmikuuhun vertailtaessa täytyy huomioida puristinosan jälkeisen kuiva-ainepitoisuuden selkeä nousu, joka laskee höyrynkulutusta merkittävästi.

Toisaalta kuiva-ainepitoisuus on korkeammalla tasolla myös helmikuussa 2019 kuin heinäkuussa 2018. Heinäkuun 2018 ja helmikuun 2019 välisen höyrynkustannusten välisen pienen eron vuoksi voidaan päätellä, että jauhatusmuutos ei aiheuta merkittävää eroa valmistuskustannuksiin kokonaisuutena. Pelkän jauhatusmuutoksen vaikutusta höyrynkulutukseen on kuitenkin mahdotonta arvioida vertailukelpoisten ajanjaksojen puutteen vuoksi.

7.2 Jauhatusenergia

Jauhatuksen energiankulutusta tarkasteltaessa täytyy muistaa, että varsinaisen jauhatusvaiheen lisäksi kullakin keittolinjalla on oma kuiduttimensa, jolla hake esikäsitellään keiton jälkeen. Jauhatusta voidaan periaatteessa laskea tällöin kolmivaiheiseksi. Kustannustarkastelussa on huomioitu jauhatusta tällaisena kolmivaiheisenä kokonaisuutena, vaikka itse diplomityössä onkin paneuduttu vain kahteen varsinaiseen jauhatusvaiheeseen.

Jauhatuksen energian ominaiskulutusta on tarkasteltu taulukossa 12. Tarkastelukuukausiksi valittiin helmikuu 2018 ja helmikuu 2019, sillä tehtyjen havaintojen perusteella vuodenajat vaikuttavat hieman jauhatuksen energiankulutukseen – talvikuukausina energiaa kuluu enemmän. Taulukossa esitetyt luvut ovat kuukausikeskiarvoja. Tarkastelusta on suodatettu pois poikkeus- ja häiriötilanteissa ilmenneet poikkeuksellisen matalat ominaiskulutukset (<180 kWh/mt). Sähkön hintana on käytetty tehtaan laskennallista hinta-arvioita 50 €/MWh, jonka tarkoituksena on vain havainnollistaa suhteellista muutosta.

TAULUKKO 12. Jauhatusenergiankulutus helmikuussa 2018 ja 2019.

Kuukausi	Jauhatusenergian (MWh/t)	EOK keskiarvo	Sähkön kustannus tonnia kohti (€/t)
Helmikuu 2018		0,208	10,4
Helmikuu 2019		0,212	10,6

Tarkastelussa käytettävä massan tuotantomäärä on muodostettu laskemalla keskiarvo tarkasteltavien kuukausien massantuotantomäärästä. Kuten höyrynkulutuksen kustannusvaikutusta laskettaessa, jauhatussähkön kuukausikustannukset on muodostettu kertomalla tarkastelukuukausien massantuotannon keskiarvo jauhatussähkön tonnikohtaisella kustannuksella.

Kustannuslaskelma on esitetty taulukossa 13.

TAULUKKO 13. Jauhatusmäärän kasvattamisen vaikutus sähkönkulutukseen

Kuukausi	Arvio massatuotannon kuukausikeskiarvosta	Jauhatussähkön kuukausikustannukset (€)	Laskennallinen vuosikustannus (€)
Helmikuu 2018	21 200 t	21,2kt x 10,4 €/t = 220 480	2 645 760
Helmikuu 2019		21,2kt x 11,45 €/t = 224 720	2 696 640
Ero helmikuuhun 2018		+ 4240	+ 2 %

Laskelman perusteella jauhatusmuutoksen kustannusvaikutus jää kohtalaisen pieneksi. Korkeampaan jauhatusmäärään tähdättäessä sähkön kustannukset ovat noin 2 % suuremmat kuin pienemmällä jauhatusmäärällä.

7.3 Yhteenveto ja pohdinta

Kustannusvaikutusten arvioinnin kannalta selkeäksi ongelmaksi muodostuu keskenään vertailukelpoisten ajanjaksojen puute. Jauhatusmuutos ei ole ainoa konelinjalla tehty kehitystoimenpide, joten pelkästään sen vaikutusta edellä mainittuihin kustannuksiin on vaikea arvioida.

Karkeiden laskelmien perusteella arvioitu kasvu sähkön- ja höyrynkulutuksesta aiheutuvista kustannuksista on kuitenkin varsin maltillinen. Vuoden 2018 helmikuuhun verrattaessa jauhatusmuutos on nostanut kustannuksia noin 2 %. Höyrynkulutuksen osalta vertailuajanjaksojen hakeminen on haastavaa, sillä kartonkikoneella toteutettu puristinosan muutos on nostanut myös höyrynkulutukseen vaikuttavaa puristinosan jälkeistä kuiva-ainepitoisuutta. Koeajon aikaisia kustannuksia heinäkuuhun 2018 verrattaessa kustannukset olisivat höyryn osalta nousseet myös 2 %.

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää aallotuskartonkiin laatuvaihtelua aiheuttavia tekijöitä ja muokata sitten tuotannon ohjaustapaa tai ajomallia niin, että laatuvaihtelua saadaan pienennettyä. Kirjallisuusviitteiden sekä Wedge-prosessianalyysiohjelmalla tehdyn arvion avulla vaihtelun todennäköisimmiksi lähteiksi tunnistettiin eräs tehtaan keittolinjoista, jauhatusvaihe kokonaisuudessaan sekä hylkymassan annostelu. Kokeellista osuutta aloittaessa diplomityössä esitettävät toimenpiteet päätettiin rajata koskemaan vain jauhatusvaihetta, sillä keittovaiheen tutkimisen halutuim metodein arvioitiin olevan haastavaa pitkän siirtymäajan vuoksi. Lisäksi jauhatusvaiheen merkitys NSSC-flutingin laadulle tunnistettiin painoarvoltaan erittäin suureksi.

Kokeellisen osan tavoitteena oli vahvistaa teoriaosassa ja Wedge-analyysissä tehdyt päätelmät monimuuttujakoeajomenetelmän avulla. Erottelevan koeajomenetelmän päätarkoituksena on luoda prosessiin järjestelmällistä ja johdonmukaista vaihtelua, jonka avulla pystytään päättelemään kunkin koeajossa käytetyn muuttujan merkitys kulloinkin tarkasteltavaan vasteeseen nähden.

Kokeellisen osan ensimmäisenä päätuloksena voidaan pitää havaintoa siitä, että muutokset jauhatusmäärässä tuottavat paremman vasteen Gurley-Hill -ilmanläpäisyvastusarvoon kuin puhkaisuindeksiin. Tehtaalla käytössä ollut jauhatuksen ohjausmenetelmä pohjautui erään puhkaisuindeksiin tavoittelemiseen ja sen vakauden arvioitiin ohjaavan laatua oikealle tasolle. Diplomityön puitteissa tehdyissä koeajoissa kuitenkin paljastui, että tietyn puhkaisuindeksiin ylityttyä se ei enää kykene ohjaamaan laatua halutulla tavalla vaan aiheuttaa itsessään vaihtelua.

Koeajotulosten perusteella tehtyjen päätelmien pohjalta rakennettiin ilmanläpäisyvastusarvon seuraamiseen perustuva jauhatuksen ajomalli, jota kokeiltiin noin kahden viikon pituisen kokeilujakson ajan. Kokeilujakson aikana saavutettiin toivottua kehitystä niin lujuusominaisuuksien paranemisen kuin myös laatuvaihtelun pienemisen muodossa. Ajomallikokeilun tuottamien tulosten perusteella jauhatuksen ohjausmenetelmä päätettiin muuttaa ilmanläpäisyvastusperusteiseksi.

Jauhatusmuutoksen aiheuttaman kustannusvaikutuksen arviointi osoittautui erittäin vaikeaksi, sillä konelinjalla toteutettiin jauhatuksen optimoinnin lisäksi muita kehitystoimia, jotka vaikuttavat osaltaan muuttuviin kustannuksiin. Aiemmin työssä esitetyissä laskelmissa arvioitiin karkeasti, että jauhatusmuutoksella aikaansaatu laadunparannus olisi kasvattanut noin 2 % niin höyrynkulutuksesta kuin sähkönkulutuksesta aiheutuneita kustannuksia. Tämän tuloksen arvioitiin kuitenkin olevan verrattain epäluotettava ja tarkemman sekä luotettavamman kustannusarvion esittäminen onnistuu

vasta kun ajomalli on ollut käytössä pidempään ja vertailukelpoisia ajanjaksoja on löydettävissä paremmin. Kohdeyrityksessä kuitenkin koettiin, että kustannusvaikutuksen jäädessä näin epäselväksi, se on mitä todennäköisimmin niin pieni, että sillä ei ole merkitystä jauhatusmuutoksella saavutettuun hyötyyn ja kilpailuetuun nähden.

Diplomityön kokeellisessa osassa saavutettujen tulosten perusteella jauhatuksesta lähtöisin oleva laatuvaihtelu saadaan minimoitua pitämällä ilmanläpäisyvastusarvo mahdollisimman tasaisena. Keväällä 2019 ilmanläpäisyvastustaso saatiin nostettua uudelle tavoitetasolle, mutta arvojen hajonta on ollut toistaiseksi verrattain suurta. Ilmeinen jatkokehityskohde tehtaalle onkin toiminnan parantaminen ja tuotannon valvominen niin, että ilmanläpäisyvastusarvon vaihtelu pysyisi ajomallikokeessa saavutetulla hyvällä tasolla.

Lisäksi työn aikana havaittiin, että tiettyyn ilmanläpäisyvastusarvoon tähdättäessä kulloinkin tarvittava kokonaisjauhatusmäärä vaihtelee melko runsaasti. Tällaiset erot tarvittavassa jauhatusmäärässä viittaavat siihen, että myös jauhatusta edeltävien prosessivaiheiden toimintaa tulisi tarkastella lähemmin ja pyrkiä niidenkin osalta tasaisempaan lopputulokseen.

LÄHTEET

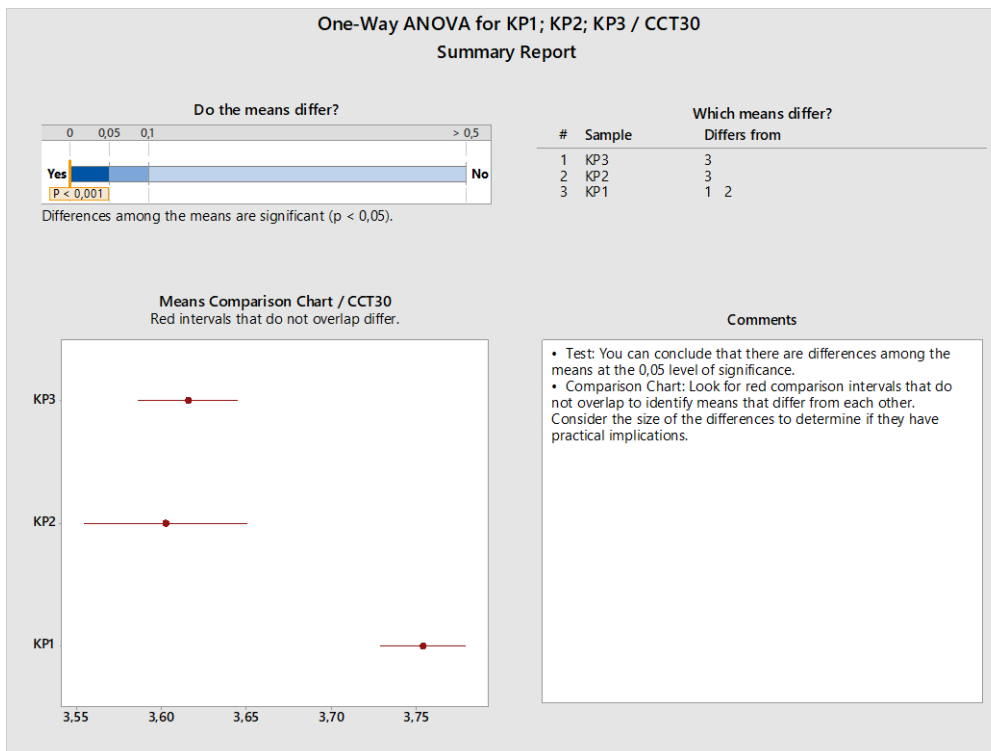
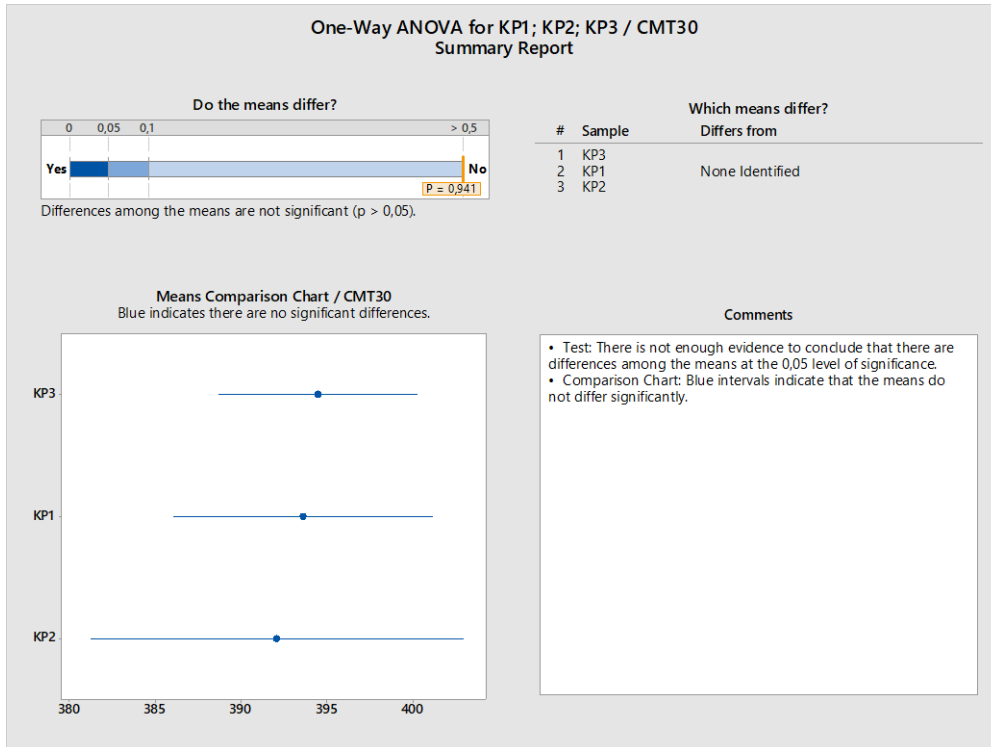
- Ahtila, P. et al. 2010. Energy Management. Karlsson, M. (toim.) Papermaking Part 2, Drying. 2. painos. Paper Engineers' Association / Paperi ja Pyy Oy. Helsinki. WS Bookwell: Porvoo.
- Annergren, G. & Hagen, N. Industrial Beating/Refining. Ek, M., Gellerstedt, G. & Henriksson, G (toim.). 2009. Pulp and paper chemistry and technology: Vol. 1, Wood chemistry and wood biotechnology. Berlin: Walter de Gruyter. s.128, 132-133
- Bajpai, Pratima. (2018). Biermann's Handbook of Pulp and Paper - Raw Material and Pulp Making, Volume 2. s.30
- Dean, A. et al. 2017. Design and Analysis of Experiments. 2nd Edition. Cham: Springer International Publishing.
- De Beer, J. 1998. Long-term energy-efficiency improvements in the paper and board industry. Energy, 23(1), pp. 21-42.
- Ek, K-E. & Mäkeläinen, M. 1983. Kemimekaanisen massan valmistus. Virkola, N-E (toim.). Puumassan valmistus. Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja II osa 1. Toinen painos. Suomen Paperi-insinöörien yhdistys ry. Turun Sanomat. Turku. s. 504-505, 523-524, 529
- Emblem, A. & Emblem, H. 2012. Packaging Technology – Fundamentals, Materials and Processes. Woodhead Publishing Limited. 2012.
- Eriksson, L. et al. 2000. Design of Experiments: Principles and Applications. Learnways AB. s. 7-16.
- Fadiji, T. 2016. Compression strength of ventilated corrugated paperboard packages: Numerical modelling, experimental validation and effects of vent geometric design. Biosystems Engineering, 151, s. 231-247.
- Hartikainen, K. Fibre-based packaging materials. Laamanen, M. & Lahti, J./ Kuusipalo, J. (toim.). Paper and Paperboard Converting. Toinen painos. Helsinki. Finnish Paper Engineers' Association / Paperi ja Puu. Gummerus: Jyväskylä. s. 219-220
- Hakkila, P. & Verkasalo, E. 2009. Structure and properties of wood and woody biomass. Kellomäki, S. (toim.). Forest Resources and Sustainable Management. 2nd Totally Updated Edition. Helsinki. Finnish Paper Engineers' Association / Paperi ja Puu. s. 155-157

- Heikkilä, P. & Paltakari, J. 2010. Fundamentals of Paper Drying. Karlsson, M. (toim.) Papermaking Part 2, Drying. 2nd Totally Updated Edition. Helsinki. Finnish Paper Engineers' Association / Paperi ja Puu Oy. s.40
- Hiltunen, E. 1999. Papermaking properties of pulp. Levlin, J-E. (toim.). Pulp and Paper Testing. Helsinki. Finnish Paper Engineers' Association. Gummerus Printing: Jyväskylä. s. 51
- Hunter, J.S. 1998. Design and Analysis of Experiments. Juran, M.J. & Godfrey, A.B. (toim.). Juran's Quality Handbook. Viides painos. McGraw-Hill.
- Hägglom-Ahnger, U. & Komulainen, P.2003. Paperin ja kartongin valmistus. 3. painos. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä 2003. s. 24- 29, 113-114, 155
- John, A., Meran, R., Roenpage, O., Staudter, C. & Lunau, S. 2009. Six Sigma+Lean Toolset. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. s. 84-88
- Järvi-Kääriäinen, T. & Ollila, M. 2007. Toimiva pakkaus. Pakkausteknologia – PTR ry. Hakapaino Oy. Helsinki 2007. s. 151-153
- Kainulainen, M. & Söderhjelm, L. 1999. End-use properties of packaging paper and boards. Pulp and Paper Testing. Fapet. Gummerus Kirjapaino. Jyväskylä. s. 217-222
- Kajanto, I. 1998. Structural Mechanics of Paper and Board. Niskanen, K. (toim.), Paper Physics. Fapet. Gummerus Kirjapaino. Jyväskylä. 1998. s. 202-209.
- Karjalainen, T. & Karjalainen, E.E. 2002. Six Sigma: Uuden sukupolven johtamis- ja laatumenetelmä. Quality Knowhow Karjalainen Oy. Salpausselän kirjapaino. Hollola. s. 153
- Karlsson, M. & Paltakari, J. 2010. Introduction to paper drying and its principles. Karlsson, M. (toim.). Papermaking Part 2, Drying. 2. painos. Paper Engineers' Association / Paperi ja Pyy Oy. Helsinki. WS Bookwell Oy: Porvoo. s. 14-15
- Kiviranta, A. 2000. Paperboard grades. Paulapuro, H. (toim.) Paper and Board Grades. Fapet. Helsinki. Gummerus printing: Jyväskylä. s. 67
- Koskenhely, K. 2007. Refining of chemical pulp fibres. Paulapuro, H. (toim.), Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. 2nd Totally Updated Edition. Helsinki. Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. s. 94 – 139, 122-124
- KnowPap. Paperinvalmistuksen oppimisympäristö. Puristuslujuus. versio 20. AEL. Luettu 12.2.2019.

- KnowPap. Paperinvalmistuksen oppimisympäristö. Freeness. versio 20. AEL. Luettu 12.2.2019.
- Laakso, O. & Rintamäki, T. 2013. Aaltopahvin valmistus ja jalostus. Suomen aaltopahviyhdistys ry. 2. painos. Gummerus Kirjapaino. Jyväskylä, 2003. s. 14-15, 30-31, 129-130.
- Lampela, S. & Saari, T. 2019. Jauhituksen optimointi Heinolan flutingtehtaalla. Stora Enso. Sisäinen materiaali.
- Levlin, J-E. 1999. General physical properties of paper and board. Papermaking Science and Technology: Pulp and Paper Testing. Fapet, Helsinki. Gummerus Kirjapaino: Jyväskylä. s. 144
- Lumiainen, J. 2000. Refining of Chemical Pulp. Paulapuro, H. (toim.), Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. Fapet. Gummerus, Jyväskylä. s.105-106, 115-116
- Lumiainen J. 1989. Jauhatus paperin valmistuksessa. Valkeakoski. METSKO metsäteollisuuden koulutuskeskus. Suns defibrator Jylhä Oy. 21 s (toisen käden lähde)
- Markström, H. Testing Methods and Instruments for Corrugated Board. Lorentzen & Wettre. Stockholm. s. 31-33
- Milton, J.S. & Arnold, J.C. 1990. Introduction to Probability and Statistics: Principles and Applications for Engineering and the Computing Sciences. 2. painos. McGraw-Hill Publishing Company. Singapore 1990. s.103
- Montgomery, D.C. 2009. Statistical Quality Control – a Modern Introduction. International Student Version. Arizona State University. John Wiley & Sons, Inc. s. 15, 66-68, 71-72, 541-555
- Muralidharan, K. 2015. Six Sigma for Organizational Excellence: A Statistical Approach. New Delhi: Springer India. s. 60, 258-259
- Neilimo, K. & Uusi-Rauva, E. 2017. Johdon laskentatoimi. Edita Publishing. Otavan kirjapaino: Keuruu. s. 52-58
- Paulapuro, H. 2008. Wet pressing. Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. 2. painos. Finnish Paper Engineers' Association / Paperi ja Pyy Oy. Helsinki. Gummerus: Jyväskylä. s. 343-345
- Salomäki, R. 1999. Suorituskykyiset prosessit – hyödynnä SPC. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. Gummerus Kirjapaino. Jyväskylä. s. 160, 166-169
- Shardt, Y. 2015. Statistics for Chemical and Process Engineers: A Modern Approach. 1. painos. Cham: Springer International Publishing. s. 13, 43-48

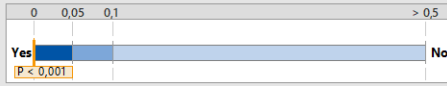
- Smook, G. 1992. Handbook for Pulp & Paper Technologists. Angus Wilde Publications. 2. painos. Vancouver. 1997. s. 237-238, 316.
- Sääski, E. 2018. Lean Six Sigma Projekti. Tasoviiran aktiviteetti ja vedenpoisto. Stora Enso. Sisäinen materiaali.
- Vanhatalo, E. & Berqquist, B. 2007. Special Considerations when Planning Experiments in a Continuous Process. Quality Engineering. Vol. 19(3), s. 155-169
- Vanhatalo, E. et all. 2011. A Method to Determine Transition Time for Experiments in Dynamic Process. Quality Engineering 23(1). s. 30-45
- Virtanen, E. 2018. Suullinen tiedonanto.
- Walkinshaw, J.W. 2006. Air resistance of paper (Gurley method). Revision of T460 om-02. TAPPI.

Liite 1: Jauhatuskoeajon 3 hypoteestitestauksen tulokset



One-Way ANOVA for KP1; KP2; KP3 / SCT CD
Summary Report

Do the means differ?

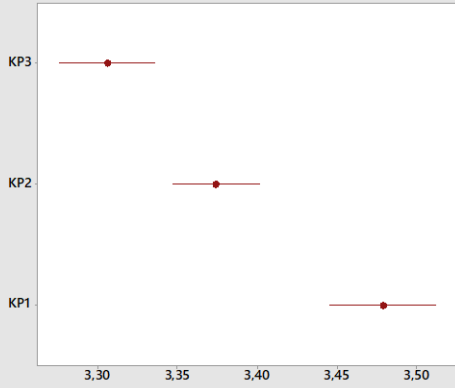


Differences among the means are significant ($p < 0,05$).

Which means differ?

#	Sample	Differs from
1	KP3	2 3
2	KP2	1 3
3	KP1	1 2

Means Comparison Chart / SCT CD
Red intervals that do not overlap differ.



Comments

- Test: You can conclude that there are differences among the means at the 0,05 level of significance.
- Comparison Chart: Look for red comparison intervals that do not overlap to identify means that differ from each other. Consider the size of the differences to determine if they have practical implications.