

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikan yksikkö Lappeenranta
Prosessitekniikan koulutusohjelma
Kemianteollisuuden prosessit

Tiina Hakkarainen

Käyristymisen hallinta kartongin valmistuksessa ja jatkojalostuksessa

Opinnäytetyö 2016

Alkusanat

Tämä työ tehtiin Stora Enson Kaukopään tehtaille kartonkikone 4:lle marras-kuun 2015 ja helmikuun 2016 välisellä ajalla. Haluan kiittää Stora Ensoa mielenkiintoisesta tutkimusaiheesta ja toivon tutkimuksesta ja sen tuloksista olevan apua heille jatkossa. Kiitokset Aki Laukkaselle tuesta ja työn ohjauksesta, joita sain häneltä kaikissa työni vaiheissa.

Kiitos myös ohjaavalle opettajalleni Pasi Rajalalle työn ohjauksesta ja kiitokset Stora Enson Imatran tutkimuskeskuksen henkilöstölle, etenkin Riitta Riikoselle, avusta mittausten suorittamisten kanssa.

Lisäksi haluan kiittää perhettäni tuesta ja kärsivällisyydestä tutkimustyöni aikana.

Imatralla 1.3.2016

Tiina Hakkarainen

Tiivistelmä

Tiina Hakkarainen

Käyrityksen hallinta kartongin valmistuksessa ja jatkojalostuksessa, 84 sivua, 5 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikan yksikkö Lappeenranta

Prosessitekniikan koulutusohjelma

Kemianteollisuuden prosessit

Opinnäytetyö 2016

Ohjaajat: yliopettaja Pasi Rajala, Saimaan ammattikorkeakoulu, insinööri Aki Laukkanen, Stora Enso Oyj

Opinnäytetyö tehtiin Stora Enson Kaukopään tehtaassa kartonkikone 4:lle.

Työn tarkoituksena oli selvittää, kuinka kartonkikone 4:n kalanterikostuttajan vesimäärän vaihtelu vaikuttaa ekstruusiopäällystetyn kartongin käyritykseen jatkojalostuksessa ilman eri suhteellisissa kosteuksissa.

Teoriaosassa käsiteltiin puukuidun rakennetta ja koostumusta, veden käyttäytymistä puukuidussa ja kartongissa, käyritystä itsessään sekä eri tekijöiden vaikutusta käyrityksen syntyyn kartongin valmistuksessa sekä jatkojalostuksessa.

Kokeellisessa osassa suunniteltiin ja toteutettiin kalanterikostuttajan vesimäärän koeajo. Koeajon tulosten tavoitteena oli löytää sellainen kalanterikostuttajan vesimäärä, jolla aiheutuu vähiten käyritystä kaksipuoleisesti polyeteenipäällystettyyn kartonkiin olosuhteiden muutoksista huolimatta ja jota kannattaisi käyttää tulevaisuudessa kartongin valmistusprosessissa. Tulosten perusteella referenssi vesimäärällä aiheutuu vähiten käyritystä kaikissa ilman suhteellisissa kosteuksissa.

Asiasanat: nestepakkauskartonki, kartongin valmistus, jatkojalostus, käyrityminen, ekstruusiopäällystys, suhteellinen kosteus

Abstract

Tiina Hakkarainen

Curling Management in Board Making and Converting, 84 pages, 5 appendices

Saimaa University of Applied Sciences

Technology, Lappeenranta

Process Engineering

Bachelor's Thesis 2016

Supervisor: Dr. Pasi Rajala, Principle Lecturer, Saimaa UAS

Instructors: Mr Aki Laukkanen, Engineer, Stora Enso Plc

The thesis was made for Stora Enso Kaukopää Mill's Board Machine 4.

The purpose of the work was to find out how the calender moisturizer's water amount affects the curling of the board in converting when the relative humidity changes.

The literature part handles the structure of wood fibers and composition and how the water behaves in fibers and board. Curling itself and factors affecting curling in board making and converting are also discussed.

The experimental part planned and implemented the water amount trial with calender moisturizer. The purpose of the trial's results was to find out the water amount affecting the least curling in any relative humidity. According to the trial results the best water amount is the reference amount in any relative humidity.

Keywords: liquid packaging board, board making, converting, curling, extrusion coating, relative humidity

Sisällys

Käsitteet

1	Johdanto.....	8
1.1	Stora Enso Oyj Imatran tehtaat.....	8
1.2	Työn tausta ja tavoitteet.....	11
1.3	Työn rakenne.....	12
2	Puukuidun rakenne ja koostumus.....	13
2.1	Solutyypit.....	14
2.2	Soluseinän kerrokset.....	16
2.3	Kosteus puukuidussa.....	18
3	Nestepakkauskartonki.....	19
3.1	Raaka-aineet.....	20
3.2	Vaatimukset ja lopputuotteet.....	21
4	Kartongin valmistusprosessi.....	22
4.1	Rainanmuodostus.....	22
4.2	Märkäpuristus.....	24
4.3	Kuivatusosa.....	25
4.4	Kalanterointi.....	26
4.5	Rullain.....	27
4.6	Pituusleikkaus.....	28
5	Ekstruusiopäällystys.....	28
5.1	Matalatiheyksinen polyeteeni LDPE.....	29
5.2	Ekstruusiopäällystykseen edut.....	30
5.3	Ekstruusiopäällystykseen tavoitteet ja laatutekijät.....	31
5.4	Ekstruusiopäällystykseen jaottelu.....	31
6	Ekstruusiopäällystysprosessi.....	32
6.1	Aukirullaus.....	33
6.2	Esikäsittely.....	33
6.2.1	Adheesio.....	34
6.2.2	Pintaenergia.....	34
6.2.3	Pintakäsittely.....	34
6.3	Ekstruuderit.....	35
6.4	Jälkikäsittely.....	35
6.5	Kiinnirullaus.....	36
6.6	Pituusleikkaus.....	36
7	Käyrityksen luonnehdinta.....	37
7.1	Konesuuntainen käyryys K_x	38
7.2	Poikkisuuntainen käyryys K_y	38
7.3	Diagonaalinen käyryys K_{xy}	39
8	Kartongin rakenteen vaikutus käyritykseen.....	39
8.1	Kuituorientaatio.....	39
8.1.1	Kuituorientaatiokulma.....	41
8.1.2	Kuituorientaatiosuhteet.....	42
8.2	Kuituorientaation hallinta.....	43
8.2.1	Suihkusulpun ja viiran nopeuserot.....	43
8.2.2	Vedenpoisto viiraosalla.....	44
8.3	Kuitujen poikkeavuus toisistaan.....	45
8.4	Kerroksellinen rakenne.....	45
8.5	Paksuussuuntainen tiheysjakauma.....	46

8.6	Paksuussuuntainen materiaalijakauma.....	46
9	Kosteus kartongissa	47
9.1	Kosteuspitoisuus.....	47
9.2	Kyllästymispiste	48
9.3	Tasapainokosteus.....	49
10	Kosteuden vaikutus käyristymiseen	49
10.1	Toispuolinen kostutus	49
10.2	Käyristymissuunta.....	50
10.3	Mittapysyvyys	50
10.4	Ilmastoitusviat	50
10.5	Kuivumisviat.....	51
10.6	Epäsymmetrinen kuivatus.....	51
11	Ekstruusiopäällistyksen vaikutus käyristymiseen.....	52
12	Rullien pakkaamisen vaikutus käyristymiseen	54
13	Varastoinnin vaikutus käyristymiseen	55

KOKEELLINEN OSA

14	Koeajosuunnitelma	57
15	Koeajon suoritus	59
15.1	Kostutinkoeajo	59
15.2	Rullien päällistys	60
16	Käyristymisen mittaus- ja analyysimenetelmä	60
17	Tulokset	63
17.1	Ilmastoinnin tulokset	63
17.2	Ilmastoinnin tulosten arviointi.....	71
17.3	Tulokset koepisteittäin	72
17.4	Koepistetulosten arviointi.....	76
18	Yhteenveto ja pohdinta	78
	Kuviot.....	79
	Taulukot.....	80
	Lähteet.....	81

Liitteet

- Liite 1 Vesimäärän muutokset pinnalle ja taustalle koeajon aikana rullittain
- Liite 2 Kalanlerin telojen käyttäytyminen koeajon aikana
- Liite 3 Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyristymät suuntineen millimetreissä eri ilmasto-olosuhteissa
- Liite 4 Koepisteitä vastaavien päällistämättömien ja päällistettyjen rullien muutosten käyristymien keskiarvot eri ilmasto-olosuhteissa
- Liite 5 Kuvat näytteistä eri koepisteillä kaikissa mitatuissa ilmasto-olosuhteissa

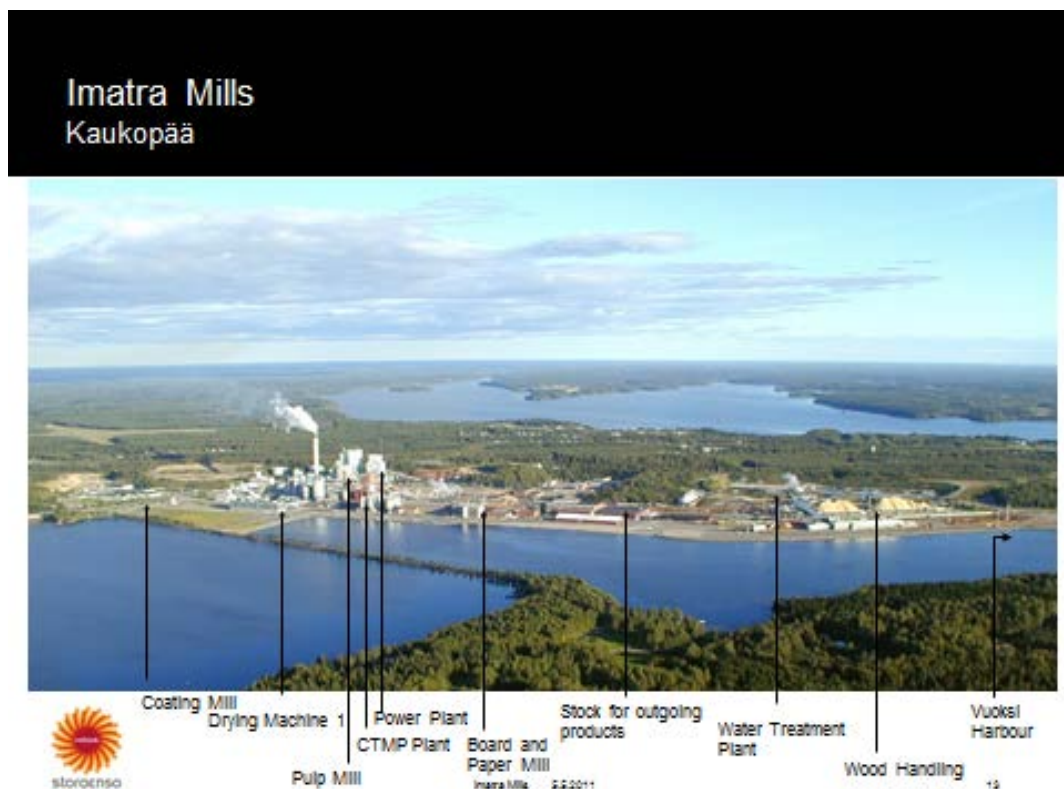
Käsitteet

CTMP	Kemitermomekaaninen massa (Chemi thermo mechanical pulp)
LDPE	Matalatiheyksinen polyeteeni
HDPE	Korkeatiheyksinen polyeteeni
PE	Polyeteeni
KA4	Kartonkikone 4
PE3	Päälystyskone 3
ADSORPTIO	Pintaan tarttuminen
ABSORPTIO	Pintaan imeytyminen
DESORPTIO	Pinnasta irtoaminen
RH	Suhteellinen ilman kosteus
Ekstruusiopäälystys	Polyeteenipäälystys

1 Johdanto

1.1 Stora Enso Oyj Imatran tehtaat

Stora Enson Imatran tehtaisiin kuuluu kaksi tehdasyksikköä, Kaukopään tehdas sekä Tainionkosken tehdas (Stora Enso Oyj 2015). Kuvasta 1 nähdään Kaukopään tehdasalue. Kuvassa näkyvät mm. kartonkitehtaat, jossa myös tässä työssä käsiteltävä kartonkikone 4 sijaitsee sekä työssä käsiteltävänä oleva päällystystehdas, jossa päällystyskone 3 ja 5 sijaitsevat.

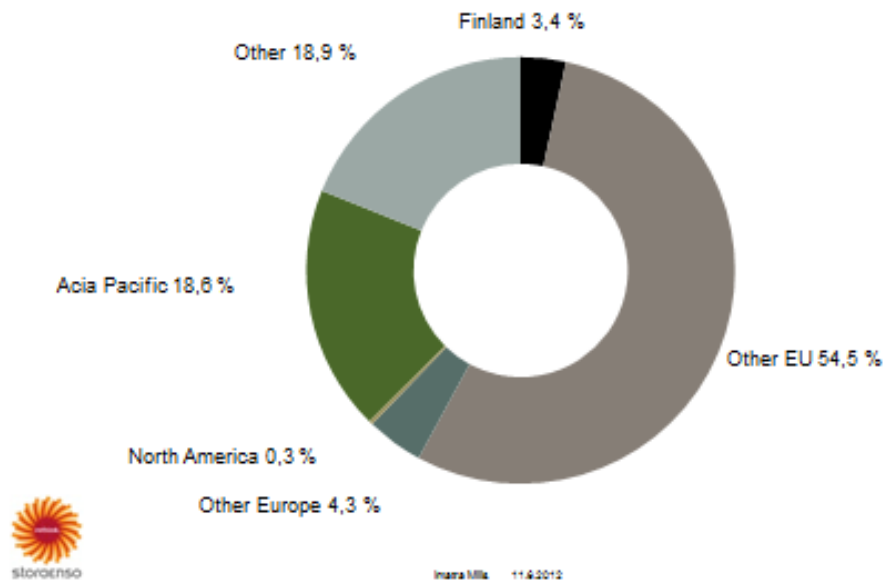


Kuva 1. Stora Enso Kaukopään tehtaat yläilmoista kuvattuna (Stora Enso Kaukopää 2015)

Imatran tehtaat työllistävät noin 1000 henkeä. Tehdasyksiköiden kapasiteetti on yhteensä yli miljoona tonnia paperia ja kartonkia vuodessa ja Imatran tehtaat onkin maailman suurin nestepakkauskartongin valmistaja. Päämarkkinat ovat Euroopassa, mutta myös Kaakkois-Aasiaan menee iso osa viennistä. Kuvio 1 kuvastaa markkinoiden jakautumista Eurooppaan ja muualle maailmaan, josta

myös nähdään, että vuonna 2012 vientiin lähtevä osuus oli 97 %. (Stora Enso Oyj 2015.)

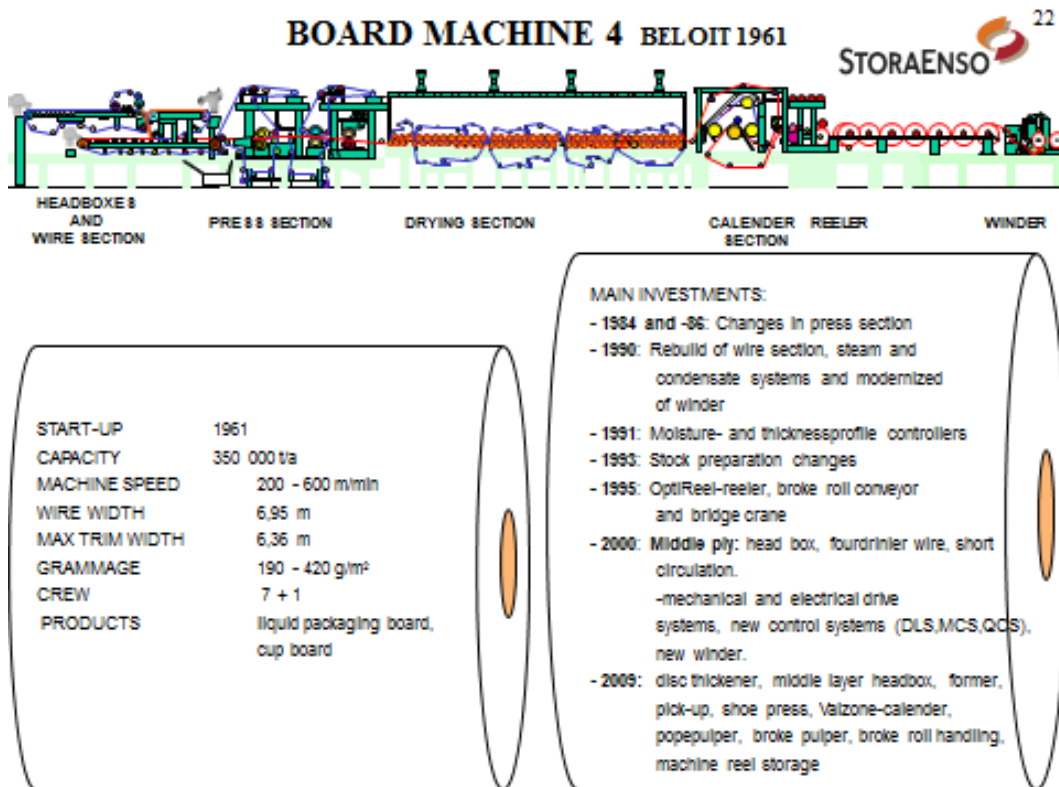
The main markets are in Europe
97 % is exported



Kuvio 1. Stora Enso Oyj Imatran tehtaiden markkinoiden jakautuminen Euroopassa (Stora Enso Kaukopää 2015)

Kartonkikone 4

Kartonkikone 4 sijaitsee Imatran Kaukopään tehdasalueella ja on aloittanut toimintansa siellä vuonna 1961. Kartonkikone 4:lla valmistettaviin tuotteisiin lukeutuvat nestepakkauskartonki ja kuppikartonki. Kartonkikone 4:n kapasiteetti on 35 000 tonnia kartonkia vuodessa. Konetta voidaan ajaa 200 – 600 m/min nopeudella. Kuvasta 2 nähdään kartonkikone 4:n rakenne. (Stora Enso Kaukopää 2015: Kuva 2.)



Kuva 2. Kartonkikone 4:n rakenne ja tietoa koneesta (Stora Enso Kaukopää 2015)

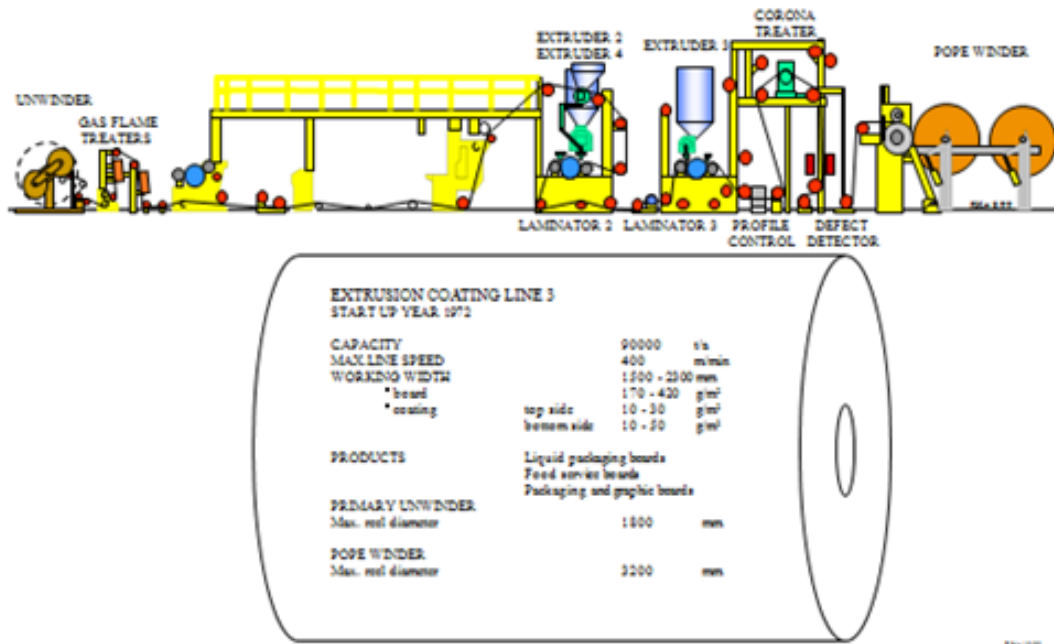
Kalanterikostuttaja

Kartonkikone 4:lla on käytössä kalanterikostuttaja, jossa vesimäärä ja lämpötila ovat muutettavia suureita. Vesimäärää voidaan säätää sekä kartongin pinta- ja taustapuolelle erikseen. Ne ovat olleet säädettyinä siten, että pintapuolen vesimäärä on 30 % taustapuolen vesimäärää suurempi seuraavasti: pintapuolen vesimäärä on 3,0 g/m² ja taustapuolen vesimääränä on 4,1 g/m². Tasaisuuden takaamiseksi vesi tulee vesihöyrynä kartongin pintaan. Kalanterikostuttajan tarkoituksena on ehkäistä kartongin käyristymistä jatkojalostuksessa.

Päällystyskone 3

Ekstruusiopäällystyskoneen 3 tuotteisiin lukeutuvat päällystetty nestepakkauuskartonki, ruokapakkauuskartonki sekä pakkaus- ja graafinen kartonki. Päällystyskone 3:n kapasiteetti on 90 000. Päällystyskone 3:n maksimijonopeus on 400 m/min. Kuvasta 3 nähdään päällystyskone 3:n rakenne. (Stora Enso Kaukopää 2015: Kuva 3.)

EXTRUSION COATING LINE 3 (PE3)



Kuva 3. Päälystyskone 3:n rakenne ja tietoa koneesta (Stora Enso Kaukopää 2015)

1.2 Työn tausta ja tavoitteet

KA4:lla käytettävällä Prime-laadulla on havaittu käyritysongelmaa kartongin jalostusprosessissa. Käyritysongelmat ovat vähentyneet, kun kalanterikostuttajalla on vähennetty vesimääriä.

Työn tarkoituksena on selvittää, kuinka eri kalanterikostuttajan vesimäärät vaikuttavat PE-päälystettyjen näytteiden käyritymiseen eri ilman suhteellisissa kosteuspitoisuuksissa. Työssä selvennetään myös sitä, kuinka päälystetyn nestepakkauskartongin käyrityminen palautuu vakiossa ilman suhteellisessa kosteudessa ilman kosteuden käydessä välissä matalammalla tai korkeammalla. Vertailun vuoksi työssä selvitetään myös, kuinka eri vesimäärillä ajettu päälystämätön kartonki käyttäytyy ja käyrityy eri kosteuspitoisuuksissa.

Työn teoriaosuudessa käy ilmi, että kartongin sisäisellä kosteudella sekä ulkoisilla tekijöillä, kuten ympäristön kosteudella on vaikutusta käyrityksen aiheutumiseen.

seen kartongissa. Myös PE-päälylyksellä on omat vaikutuksensa käyrityksen aiheutumiselle.

Työn tavoitteena on löytää sellainen nestepakkauskartongin valmistusprosessin kalanterikostuttajan vesimäärä, jolla aiheutuu vähiten käyritystä jatkojalostuksessa kaksipuoleisesti PE-päälylytettävään nestepakkauskartonkiin eri ilmasto-olosuhteissa ja jota olisi järkevää käyttää jatkossa kartongin valmistusprosessissa.

1.3 Työn rakenne

Työn teoriaosassa lähdetään liikkeelle kuitutasolta: käydään läpi puukuidun rakennetta ja koostumusta sekä kerrotaan kosteuden vaikutuksesta puukuituun helpottamaan käyrityksen ymmärtämistä myöhemmin kappaleessa, jossa käsitellään kosteuden vaikutusta käyritykseen. Lisäksi kosteuden vaikutusta kartonkiin käsitellään alustamaan ja selventämään kosteuden vaikutusta käyritykseen. Seuraavaksi käydään läpi nestepakkauskartonkia ominaisuuksineen ja vaatimuksineen sekä sen valmistusprosessia alustukseksi kappaleelle, jossa kerrotaan kartongin rakenteen vaikutuksesta käyritykseen. Työssä käydään läpi myös ekstruusiopäälylytystä prosesseineen ja sen vaikutusta käyritykseen. Työssä selvennetään lisäksi käyritystä yleisesti ja muita edellä mainitsemattomia syitä käyrityksen aiheutumiselle, joita ovat kartonkirullien pakkaaminen ja varastointi.

Opinnäytetyön kokeellinen osa suoritetaan Stora Enson Imatran tehtaiden Kaukopään kartonkikone 4:lle. Kokeellisessa osassa käydään läpi koeajosuunnitelma ja kerrotaan koeajon suoritus yksityiskohtaisesti. Lisäksi selvennetään mittaus- ja analyysimenetelmää, jota käytetään käyrityksen tutkimiseen. Mittausten jälkeen tulokset käsitellään: ilmastoinnin tulokset omine arviointineen sekä koepisteiden tulokset omine arviointineen.

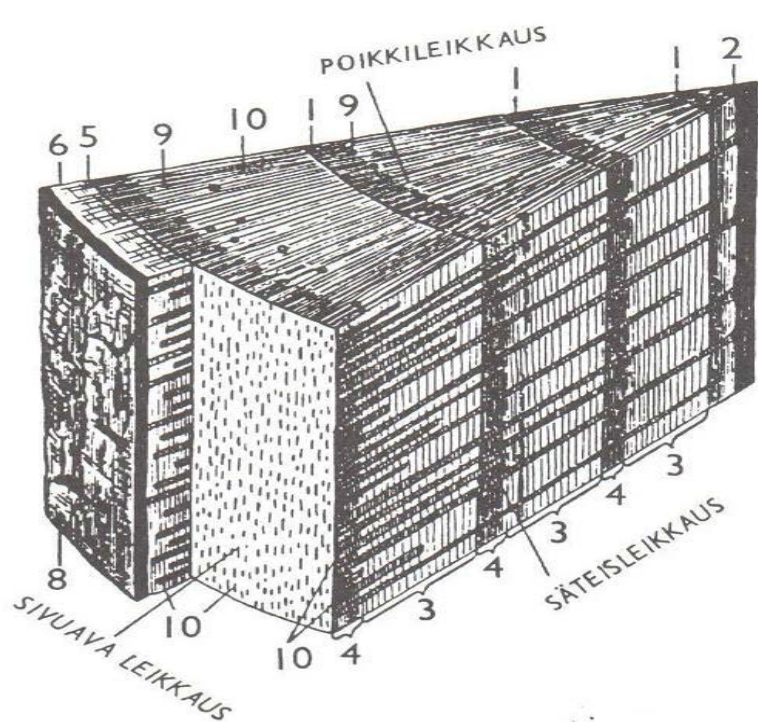
2 Puukuidun rakenne ja koostumus

Puu muodostuu tummasta ytimestä ja sen ympärillä olevasta varsinaisesta puuaineksesta, joka taas koostuu monista eri osista. Puun ulkopinnan kerros jälsi kasvattaa puuainesta sekä sisään- että ulospäin. Sisäänpäin se kasvattaa jokavuotisen vuosiluston, johon kasvaa vuorotellen kevät- ja kesäpuukerros. Ulospäin jälsi kasvattaa nilakerroksen, jonka soluista muodostuu puun ulkokuori eli kaarna. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 24.)

Puu muodostuu pääosin rungon suuntaisista pitkulaisista soluista, jotka yhdistyvät toisiinsa huokosten avulla. Tätä soluyhdistelmää kutsutaan kuiduksi. Rungon suuntaiset solut toimivat puun tukirakenteena ja lisäksi ne kuljettavat vettä pituussuunnassa. Puussa on lisäksi säteensuuntaisia soluja, jotka huolehtivat veden ja ravinnon kulusta puun poikkisuunnassa. (Sjöström 1989, 9 – 20; Alén 2000; Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001.)

Puun solujen rakenne on kaikilla puilla samantyyppinen. Havu- ja lehtipuiden solut eroavat toisistaan mm. muodoltaan ja rakenteeltaan. Puiden solut jaetaan neljään ryhmään tehtäviensä mukaisesti: kasvusta huolehtivat solut, veden kuljetuksesta huolehtivat solut, ravintoaineista huolehtivat solut sekä lujuutta ylläpitävät solut. Puun lujuusominaisuuksiin vaikuttavat puusolukon että soluseinän rakenne. (Pro Puu Ry 2004 – 2015.)

Kuvassa 4 näkyy männyn sektorileikkaus. Kuvassa vasemmassa laidassa on puun kaarna (numero 8), jonka jälkeen on nilakerros (numero 6). Nilakerroksesta seuraavana on jälsi (numero 5). Numero 10 kuvastaa puun ydinsäteitä ja numero 9 puolestaan puun pihkatiehyitä. Numero 1 osoittaa vuosirenkaiden rajoja. Numero 3 kuvaa kevätpuuta ja numero 4 puolestaan kesäpuuta. Numero 2 kuvaa puun ydintä.

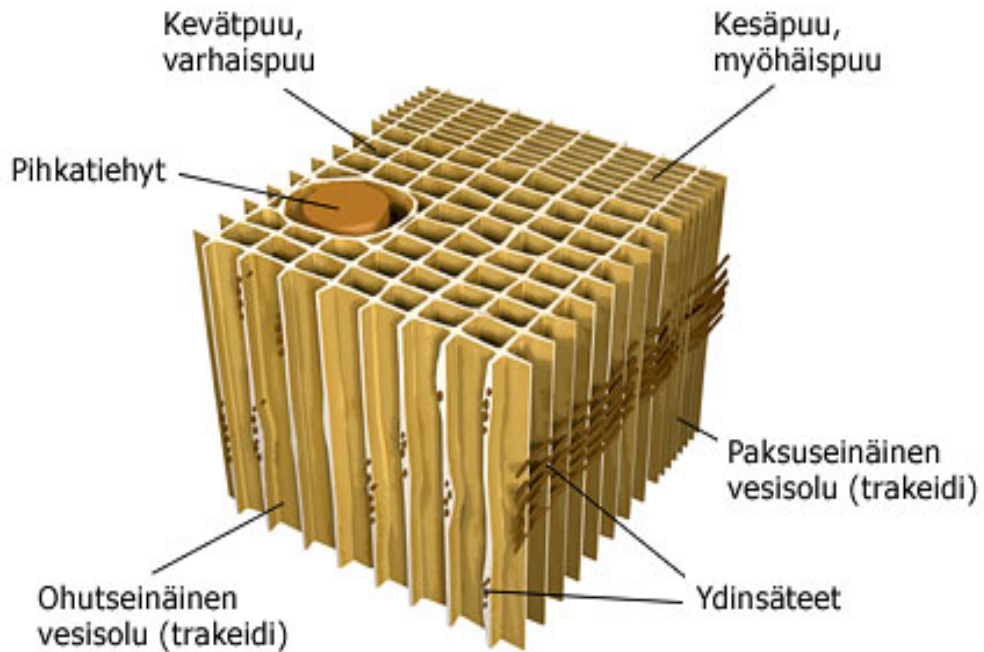


Kuva 4. Poikkileikkaus männyn rakenteesta (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 24)

2.1 Solutyypit

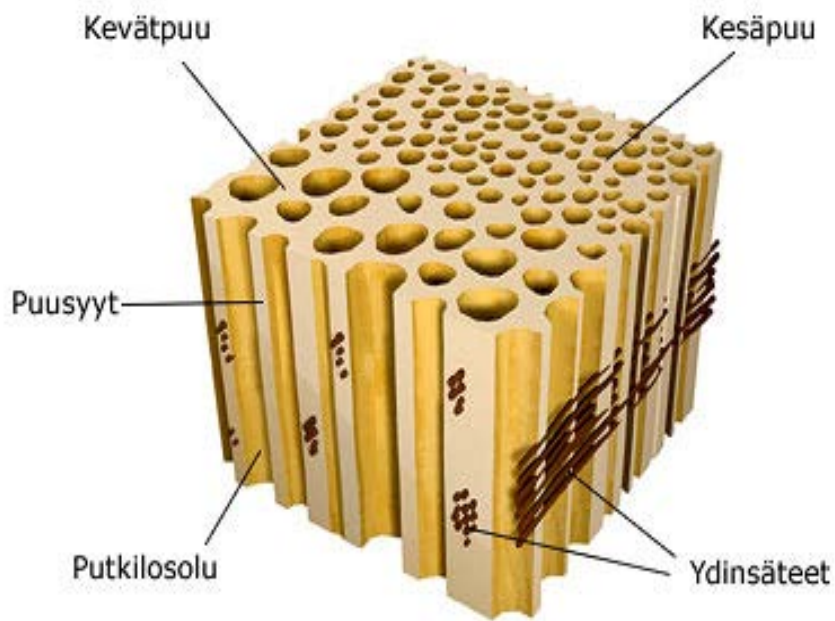
Puussa on kahdenlaisia soluja, trakeideja sekä tylppysoluja. Trakeidit ovat pitkiä ja kapeita soluja, jotka ovat täysikasvuisena kuolleita. Niiden pituus on 2 – 6 mm. Trakeidejen tehtävänä on huolehtia veden kuljetuksesta ja olla tukirakenteena solussa. Tylppysolut sijaitsevat puun pinnassa ja ne ovat ohutseinäisiä ja pyöreitä soluja. Niiden pituus on 0,8 – 1,5 mm ja niiden tehtävänä on varastoida ravintoaineita. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 26 – 27; Pro Puu Ry 2004 – 2015.)

Havupuut koostuvat trakeideista eli vesisoluista sekä tylppysoluista. Trakeideja on yli 90 % havupuun aineesta. Yleensä havupuiden soluista puhuttaessa tarkoitetaan juuri trakeideja. Kuvassa 5 on esitetty havupuun solukkorakenne, josta nähdään myös kevät- ja kesäpuun solukkorakenteen ero. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 26.)



Kuva 5. Havupuun solukkorakenne (Pro Puu Ry 2004 – 2015)

Lehtipuut koostuvat useammista erilaisista soluista verrattuna havupuihin, pääasiassa kuitenkin puusyistä, putkisoluista ja tylppysoluista ja näiden yhdistelmästä. Yleensä näistä tukisolun tyyppisistä lehtipuiden soluista puhuttaessa käytetään yleisnimitystä kuidut. Eri solutyypin osuudet vaihtelevat suuresti lehtipuissa, mutta koivupuun aineesta n. 65 % on kuituja. Kuvasta 6 nähdään lehtipuun solukkorakenne ja siitä nähdään hyvin myös kevät- ja kesäpuun solujen kokoero. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 26 – 27.)



Kuva 6. Lehtipuun solukkorakenne (Pro Puu Ry 2004 – 2015)

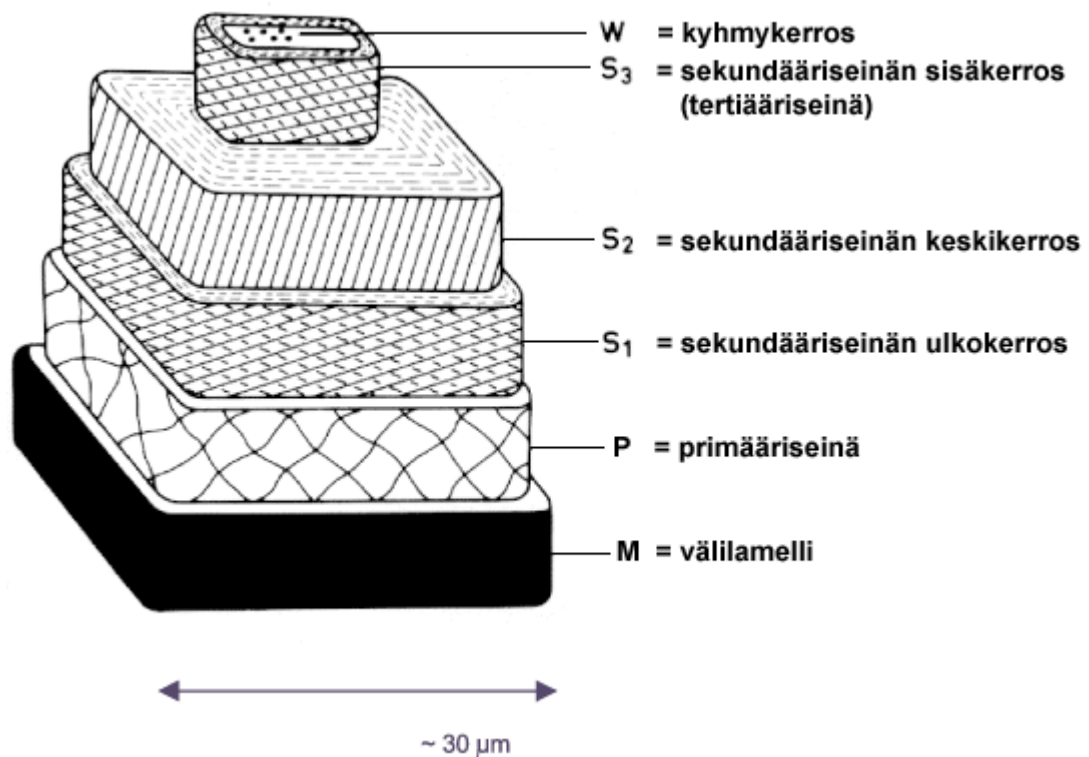
2.2 Soluseinän kerrokset

Solun seinämät koostuvat eri kerroksista (Kuva 7). Kerroksilla on oma rakenteensa ja kemiallinen koostumuksensa. Solun seinämien rakennusaineita ovat polysakkaridit ligniini, joka toimii liima-aineena sekä selluloosa ja hemiselluloosa, jotka toimivat lujustekijöinä. Soluseinän runko muodostuu selluloosasta ja ligniini ja hemiselluloosa muodostavat selluloosarungon ympärillä olevan väliaineen. Selluloosaa on 40 – 50 % soluseinästä, hemiselluloosaa 20 – 25 % ja ligniiniä 20 – 30 %. (Hägglom-Ahnger 2001, 24 – 25; Pro Puu Ry 2004 – 2015.)

Puukuidussa uloimpana osana on välilamelli (M) (Kuva 7). Sitä ei varsinaisesti lasketa kuuluvaksi soluseinään, vaan sen tehtävänä on yhdistää kuidut toisiinsa. Välilamelli koostuu pääasiassa ligniinistä ja sen paksuus on 0,5 – 1,5 µm. (Sjöström 1989, 21 – 26; Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 25.)

Uloimpana kerroksena puukuidussa on primääriseinä (P) (Kuva 7). Primääriseinä koostuu pääasiassa ligniinistä, mutta sisältää myös selluloosaa. Primääriseinän paksuus on 0,06 – 0,34 μm . (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 25.)

Primääriseinän sisällä sijaitsee kolmikerroksinen sekundääriseinä, joka jaetaan ulko- keski- ja sisäkerrokseen (Kuva 7). Keskikerros S_2 on näistä paksuin ja soluseinä koostuu suurimmaksi osaksi siitä. Onkin selvää, että keskikerroksen kemiallinen koostumus, paksuus ja mm. fibrillikulma vaikuttavat eniten koko soluseinän ominaisuuksiin. Sekundääriseinä sisältää pääasiassa selluloosaa ja hemiselluloosaa, mutta myös jonkin verran ligniiniä. Sekundääriseinän ulkokerros S_1 on 0,12 – 0,35 μm paksu, keskikerros S_2 on 1,17 – 3,68 μm paksu ja sisäkerros S_3 on 0,1 – 0,17 μm paksu. Kyhmykerros (W) sijaitsee heti S_3 -kerroksen jälkeen (Kuva 7). Kyhmykerros on amorfinen kalvo, johon on muodostunut pieniä kyhmyjä ja se on yleensä hyvin ohut, vain 0,1 – 1 μm . (Sjöström 1989, 21 – 26; Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 25.)

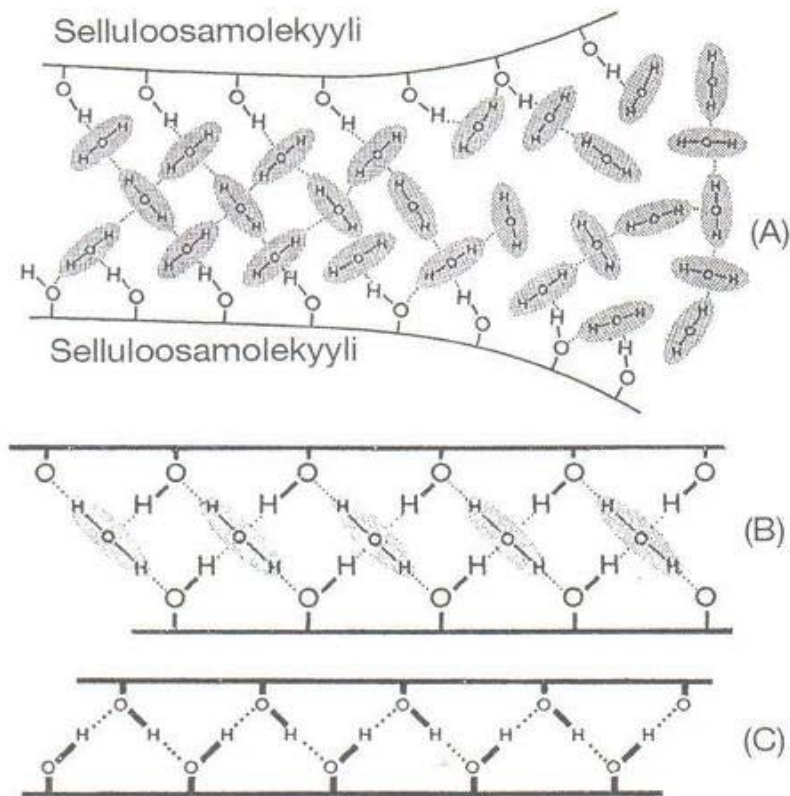


Kuva 7. Soluseinän kerrokset (VTT/Know Pulp 15.0)

2.3 Kosteus puukuidussa

Selluloosa ja hemiselluloosa, joista sekundääriseinäkin pääasiassa koostuu, ovat ketjupolymeerejä, joiden ominaisuuksiin kuuluu hydroksyyliyhmiä esiintyminen ja taipumus muodostaa yhteenliittyviä, toisinsanottuna fibrillejä (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 24).

Soluseinämän eri kerrosten fibrillit ovat sekä yhdensuuntaisina kimppuina että hajallaan. Puukuidut ovat hygroskooppista, eli vettä itseensä sitovaa ainesta ja kuidun joutuessa tekemisiin veden kanssa, vesi pääsee tunkeutumaan mikrofibrillien väliseen amorfiseen aineeseen, jossa on vapaita hydroksyyliyhmiä: selluloosalla ja hemiselluloosalla kolme hydroksyyliyhmiä kuutta hiiliatomia kohden. Selluloosa- tai hemiselluloosamolekyylien väliset sidokset aukeavat ja muodostavat vetysidoksia veden kanssa molekyylien hydroksyyliyhmiin (Kuva 8). Tämän seurauksena kuitu turpoaa paksuussuunnassa pituussuuntaisen rakenteen samalla pysyessä lähes muuttumattomana. Mittapysyvyyssvaihteluista kerrotaan enemmän luvussa 10.3, Mittapysyvyys. (Weise 1997; Kajanto & Niskanen 1998; Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 25.)



Kuva 8. Kahden selluloosamolekyylin välisten sidosten aukeaminen (A) ja vetysidosten muodostuminen veden kanssa hydroksyyliiryhmiin (B ja C) (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 58)

3 Nestepakkaukset

Nestepakkaukset käytetään päivittäisten nestepakkausten raaka-aineena. Tärkeimpiä näistä nestepakkauksista ovat meijeri- ja mehutuotteiden pakkaukset. Nestepakkaukset ovat materiaaliltaan lujaa ja se suojaa pakkausta ja sen sisältämää tuotetta ulkoisilta tekijöiltä, kuten hajuilta, mauilta ja kosteudelta. Näiden läpäisemättömyys- eli barriäriominaisuuksiensa ansiosta päällystetty nestepakkaukset sopii erinomaisesti elintarviketeollisuuden tuotteiden pakkaamiseen. Nestepakkaukset päällystetään polyeteenillä, kun valmiina tuotteena ovat lyhyen hyllyvälin tuotteet. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 76.)

Tässä työssä on perehdytty edellä mainittuun polyeteenipäälystykseen ja sen tuotteeseen polyeteenipäälystettyyn nestepakkauskartonkiin, joista kerrotaan enemmän luvuissa 5, Ekstruusiopäälystys ja 6, Ekstruusiopäälystysprosessi sekä myös työn kokeellisessa osassa.

3.1 Raaka-aineet

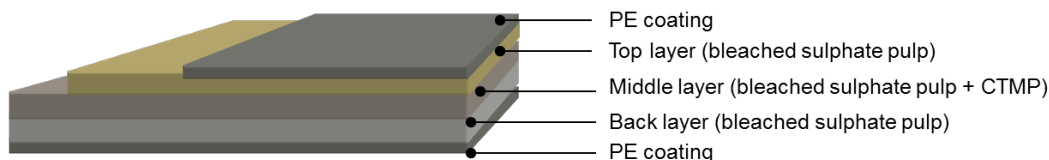
Yksi- ja monikerrosrakenteisen nestepakkauskartongin raaka-aineena voidaan käyttää sekä valkaistua että valkaisematonta havupuu- ja lehtisellua. Pinta- ja pohjakerroksen kuituraaka-aineena käytetään vain neitseellistä kuitua maksimaalisen puhtauden saavuttamiseksi. Lisäksi monikerroksisen kartongin keski-kerroksessa käytetään usein CTMP-massaa, jonka käytön ansiosta neliömassa on saatu pienemmäksi. (Grönstrand, Karhuketo, Seppälä, & Törn 2000, 71.)

Kolmikerroksisen nestepakkauskartongin käyttö on yleistynyt voimakkaasti, sillä sen käytöllä on saavutettu samat tekniset ominaisuudet pienemmällä neliömassalla verrattuna yksikerroksisen nestepakkauskartongin käyttöön. Pienemmällä neliömassalla saadaan maksimaalinen säästö niin rahallisesti kuin materiaalisestikin. Kuvassa 9 näkyy kaksipuoleisesti polyeteenipäälystetyn nestepakkauskartongin rakenne. (Grönstrand ym. 2000, 71.)

Muita nestepakkauskartongeissa käytettäviä raaka-aineita kuituraaka-aineiden ohella ovat täyteaineet, liima-aineet, kemialliset lisäaineet, valo- ja väriaineet sekä erilaiset päälystysaineet (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 37 – 54).

Natura 2PE Board

Bleached Liquid Packaging Board



Kuva 9. Polyeteenipäällystetyn nestepakkauskartongin rakenne (Stora Enso Kaukopää 2015)

3.2 Vaatimukset ja lopputuotteet

Elintarvikekäyttöön menevän nestepakkauskartongin täytyy suojata elintarvike täysin ympäristöltään, jotta se ei pääse vaarantamaan ihmisten terveyttä esimerkiksi pilaantumalla. Myöskään pakkausmateriaalista ei saa siirtyä elintarvikkeeseen makua, hajua tai väriä. Pakkausmateriaalin tulee olla myös mikrobiologisesti puhdas, jonka takia pakkauksen raaka-aineena pinta- ja pohjakerroksessa käytetään vain neitseellistä kuituraaka-ainetta, kuten edelläkin on mainittu. Kierrätyskuitu sisältää neitseelliseen kuituun verrattuna jopa satojatuhansia kertoja enemmän mikrobeja. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 76.)

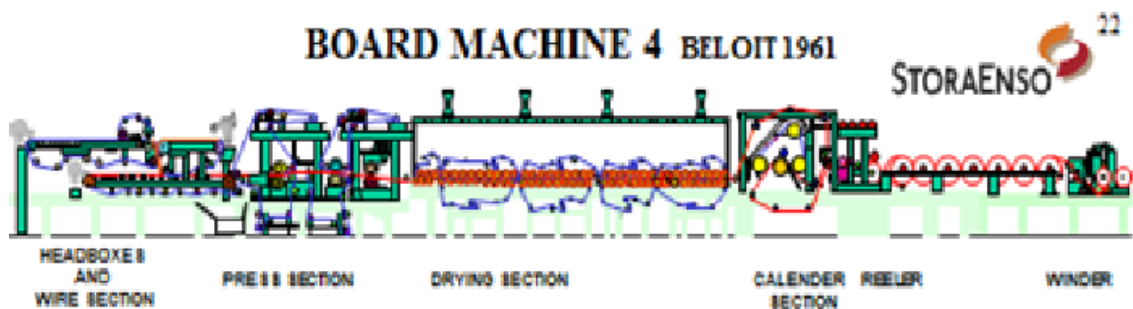
Nestepakkauskartongeista valmistettuja nestepakkauksia ovat esimerkiksi maitotölkit, aseptiset tuoremehupakkaukset sekä teknokemian tuotteisiin lukeutuvat pesu- ja huuhteluaineet. Nestepakkaukset jaotellaan kahteen luokkaan vaatimustasonsa mukaisesti: pastöroitujen maitotuotteiden tölkit sekä pitkän hyllyiän vaativat tuotteet. (Grönstrand ym. 2000, 71.)

Meijerituotteet tarvitsevat riittävän kosteudensuojan ulkopinnalle, sillä kylmässä säilytettävien pastöroitujen maitotuotteiden tölkit hikoilevat helposti huoneenlämmössä, jonka seurauksena ulkopinta kostuu helposti. Lisäksi riittävä nestebarriääri vaaditaan tuotteen sisäpinnalle pakkauksen sisällön vuoksi. Näiden vaadittujen ominaisuuksien takia nestepakkauskartonki päällystetään molemmin puolin LDPE:llä. Lisäksi LDPE saa aikaan kiillon meijeripakkauksen ulkopinnalle ja näin ollen parantaa tuotteen ulkonäköä. Meijerituotteiden hyllyikä on tavallisesti viikosta kahteen viikkoon. (Grönstrand ym. 2000, 71.)

Pitkän hyllyiän vaativat tuotteet, kuten aseptiset tuoremehupakkaukset sekä pesu- ja huuhteluaineet, eroavat meijerituotteista sillä, että niiden aromaattisuus, ravintosisältö ja esimerkiksi vitamiinien täytyy säilyä mahdollisimman pitkään muuttumattomina. Tämä saadaan aikaan nestepakkauskartongin sisäpinnalle riittävillä barriäriominaisuuksilla laminoimalla alumiinifolio kartonkiin LDPE:n avulla ja edelleen koekstruusiopäällystämällä esimerkiksi Surlyn/LDPE:llä tai vaihtoehtoisesti, jos ei haluta käyttää alumiinifoliota alumiinin huonon kierrätettävyyden takia, ekstruoida LDPE/liimamuovi/EVOH/liimamuovi/LDPE -yhdistelmä kartongin sisäpinnalle. (Grönstrand ym. 2000, 71.)

4 Kartongin valmistusprosessi

Kartongin valmistus koneen perälaatikon jälkeen on käytännössä vain vedenpoistoa rainasta, joten vedenpoistolla on suuri merkitys kartongin valmistusvaiheessa syntyviin kartongin ominaisuuksiin, kuten kosteuden tasaisuuteen ja käyristymiseen, sekä niiden hallintaan. Kartonkikone sisältää rainanmuodostusosan, johon kuuluvat perälaatikko ja viiraosa, puristinosan, kuivatusosan, kalanterin, rullaimen sekä pituusleikkurin (Kuva 10). (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001.)



Kuva 10. Kartonkikoneen rakenne (Stora Enso Kaukopää 2015)

4.1 Rainanmuodostus

Rainanmuodostusvaiheeseen kuuluvat kartonkikoneen perälaatikko ja viiraosa, jotka nähdään myös kuvassa 11. Perälaatikolta laimea kuituseos eli sulppu syötetään tasaisesti viiraosalle. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001.)

Perälaatikko

Perälaatikon tehtävänä rainanmuodostuksessa on massan jakaminen tasaisesti koneen koko leveydelle, tasaisen ja oikeasuuntaisen virtauksen muodostaminen huuliaukosta viiralle, sakeusvaihteluiden tasaamisen, virtojen tasaaminen koneen poikki- ja konesuunnassa sekä hallittujen turbulenssin aikaansaanti kuituflokkien syntyminen ehkäisemiseksi. (Mäkelä 2003.)

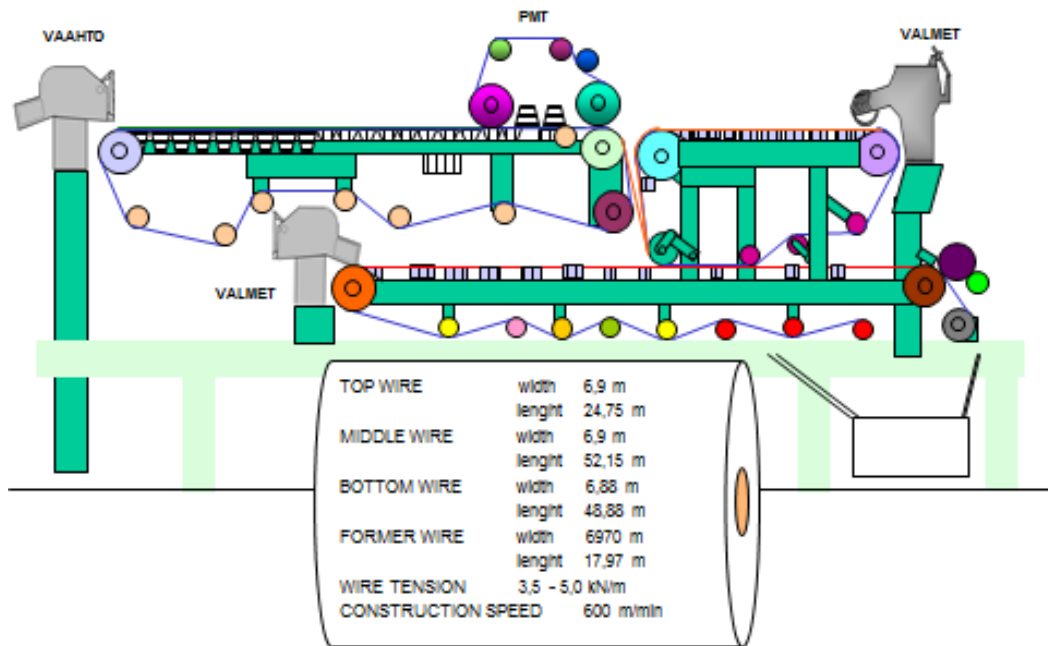
Perälaatikot jaetaan kahteen luokkaan: perinteiset perälaatikot ja nykyaikaiset perälaatikot. Perinteinen perälaatikko eroaa nykyaikaisesta mallista siinä, että siinä on erillinen vaimennussäiliö sekä pinnan yläpuolella säädettävä ilmapatja. Perinteisiä perälaatikoita käytetään tasoviirakoneilla ja nykyaikaisia kita- ja hybridiformereiden kanssa. Molemmilla perälaatikkoratkaisuilla on useita erilaisia sovelluskohteita. (Mäkelä 2003.)

Viiraosa

Viiraosan tehtävänä on rainan muodostus. Viirakangas on muovilangoista kudottu matto, jonka läpi suurin osa, 96 – 98 %, sulpun sisältämästä vedestä poistuu lyhyeen kiertoon ja sen kautta uudelleen käytettäväksi. Tasoviirakoneella vesi poistuu alapuolelta ja kaksoisviirakoneella vedenpoisto tapahtuu kahteen suuntaan. Viiran loppuosassa kartonkirainan kuiva-ainepitoisuus on tavallisesti 20 – 25 %. (Sepsilva Ltd Oy 1997, 43; Häggblom-Ahnger & Komulainen 2001, 15.)

Kartongin valmistuksessa käytetään monesti eri viiraosien yhdistelmää monikerrosrakenteen aikaansaamiseksi. Kaksoisviiraformereihin lukeutuvat hybridiformerit, joissa tasoviiraosuus sijoittuu sen alkuosaan sekä kitaformerit, joissa rainanmuodostus tapahtuu heti alussa kahden viiran välissä. Kaksoisviirakoneilla ajonopeudet ovat tasoviirakoneita suuremmat johtuen niiden paremmasta vedenpoistokapasiteetista. (Häggblom-Ahnger & Komulainen 2001, 15 – 16.)

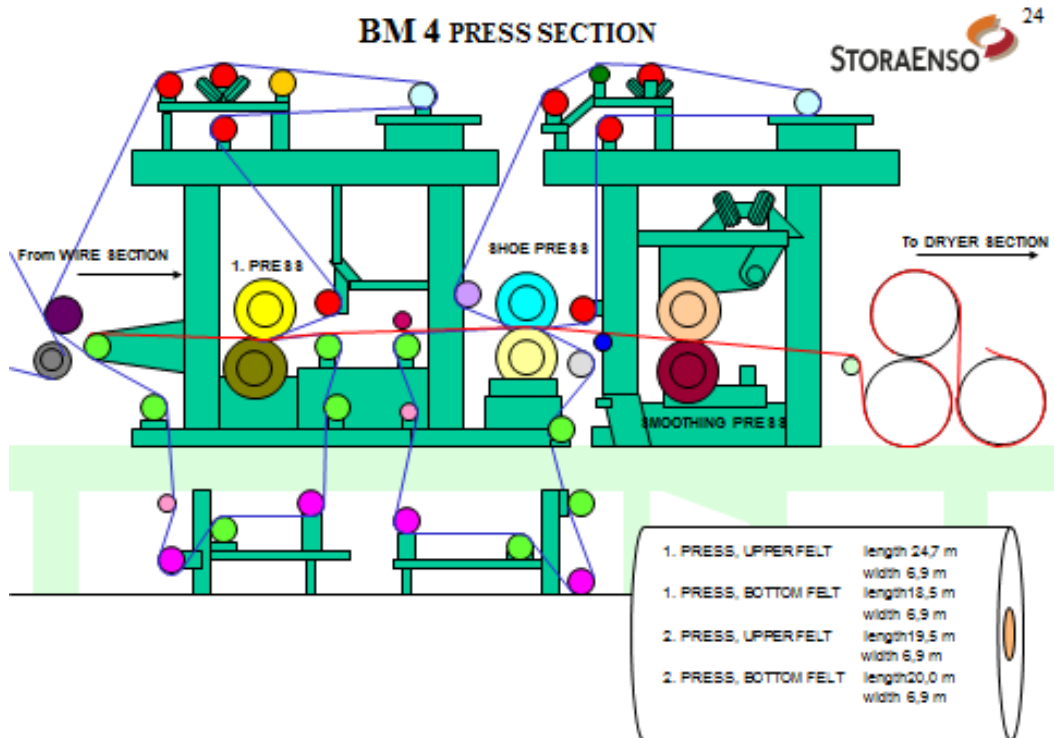
WIRE SECTION AND HEADBOXES



Kuva 11. Viiraosa ja perälaatikot (Stora Enso Kaukopää 2015)

4.2 Märkäpuristus

Viiraosalta kartonkiraina siirtyy puristinosalle, jossa rainan kuiva-ainepitoisuus kasvaa 20 – 25 %:sta 40 – 55 %:iin. Tavallisesti puristinosa sisältää 2 – 4 telaparin omaavaa puristinnippiä huopineen. Nippi muodostuu kahdesta puristintelasta tai telasta ja puristuskengästä. Kuvasta 12 nähdään kartonkikoneen puristinosan rakenne ja mitä puristinnippejä se voi sisältää ja kuinka sijoiteltuina. Märkäpuristus vaikuttaa rainan rakenteeseen, sillä puristuspaineen takia kuidut sitoutuvat yhä tiukemmin toisiinsa. Puristuksella voidaan vaikuttaa myös kartongin symmetrisyyteen huopien ja puristintelojen rakenteella, määrällä sekä sijoittamisella. (Hägglom-Ahnger 2001, 16; Sepsilva Ltd Oy 1997, 83.)

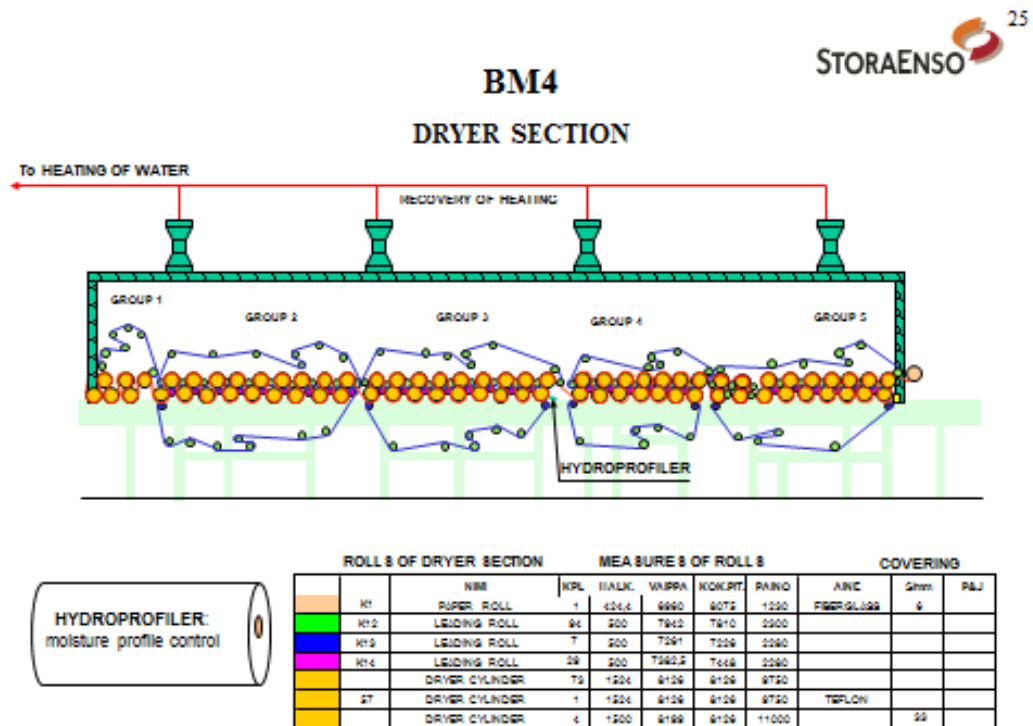


Kuva 12. Kartonkikoneen puristinosa (Stora Enso Kaukopää 2015)

4.3 Kuivatusosa

Kuivatusosan tarkoituksena on haihduttaa lämmön avulla jäljellä olevaa vettä pois kartonkirainasta haluttuun loppukosteuteen, joka on kartonkilajin tai seuraavan prosessin perusteella 3 – 10 %. Kuivatusosa ja sen sylinterit ovat suuren kaavun eli huuvan sisällä lämmöntalteenoton takia. Kuivatusosalla raina kulkee lämmitettävien sylinterien päällä, jossa sylintereiden lämpö siirtyy kartonkiin haihduttaen siitä vettä. Sylintereiden lisäksi kuivatusosalla voi sijaita liimapuristin, pigmenttipäällystysasemia tai esimerkiksi jenkkisylinteri pintakäsittelyä varten. Monilla kartonkikoneilla kartonki pigmenttipäällystetään ennen kalanterointia paremman painojäljen saavuttamiseksi. Kuvassa 13 nähdään kuivatusosan rakenne höyryryhmineen. Kuivatusosan höyrynsyöttö on jaettu höyryryhmiin kuivatussylintereiden edullisen lämpötilahallinnan takia. Alku- ja väliryhmillä ns. esilämmitetään kartonkia ennen päähöyryryhmää, jossa on suurin paine ja jota säädetään kuiva-ainemittausten mukaisesti. Viimeinen ryhmä on ns. säätöryhmä, jossa on päähöyryryhmää alhaisempi paine ja jossa voidaan mm. poistaa

käyristymistaipumusta kartongista. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 16; Sepsilva Ltd Oy 1997, 108.)

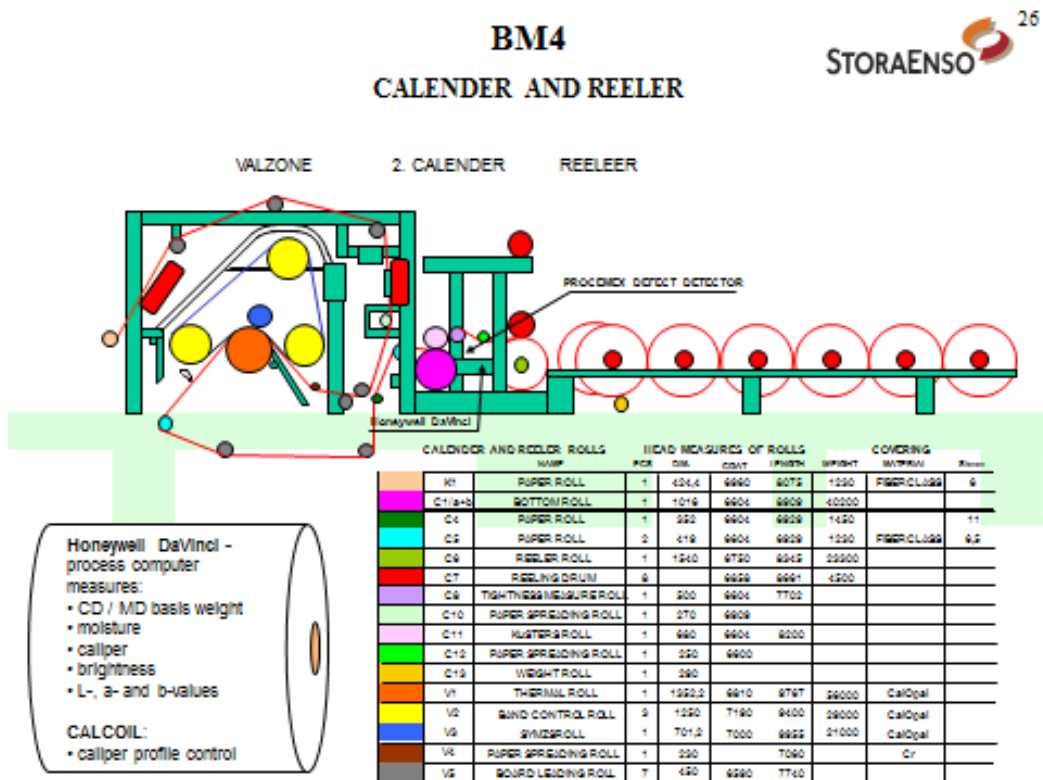


Kuva 13. Kartonkikoneen kuivatusosa höyryryhmineen (Stora Enso Kaukopää 2015)

4.4 Kalanterointi

Kalanteri sijaitsee kartonkikoneella kuivatusosan jälkeen. Joissain vanhoissa kartonkikoneissa se voi sijaita myös omana osaprosessinaan kartonkikoneen ulkopuolella. Kalanteroinnin tehtävänä on saada aikaan kartonkiin haluttu pinnan kiilto ja sileys sekä säätää kartongin tiheys ja paksuus tietyn suuruisiksi säilyttämällä kuitenkin kartongin bulkki. Kalanteri muodostuu kahdesta tai useammasta telasta, joiden nipin välistä kartonki kulkee ja sen toiminta perustuu puristusvoimaan sekä pyörimisliikkeeseen. Kartonkiin kohdistuu nipissä tietynlaisia voimia riippuen käytetystä kalanterointimenetelmästä. Kiiltävin pinta saadaan aikaiseksi käyttämällä monitelakalanterointia, jossa on 8 – 12 telaa päällekkäin. Teloista joka toinen on pehmeä paperi- tai polymeeripinnoitettu tela ja joka toinen kova kova kokillitela. Kuvassa 14 nähdään kartonkikoneen kalanteri

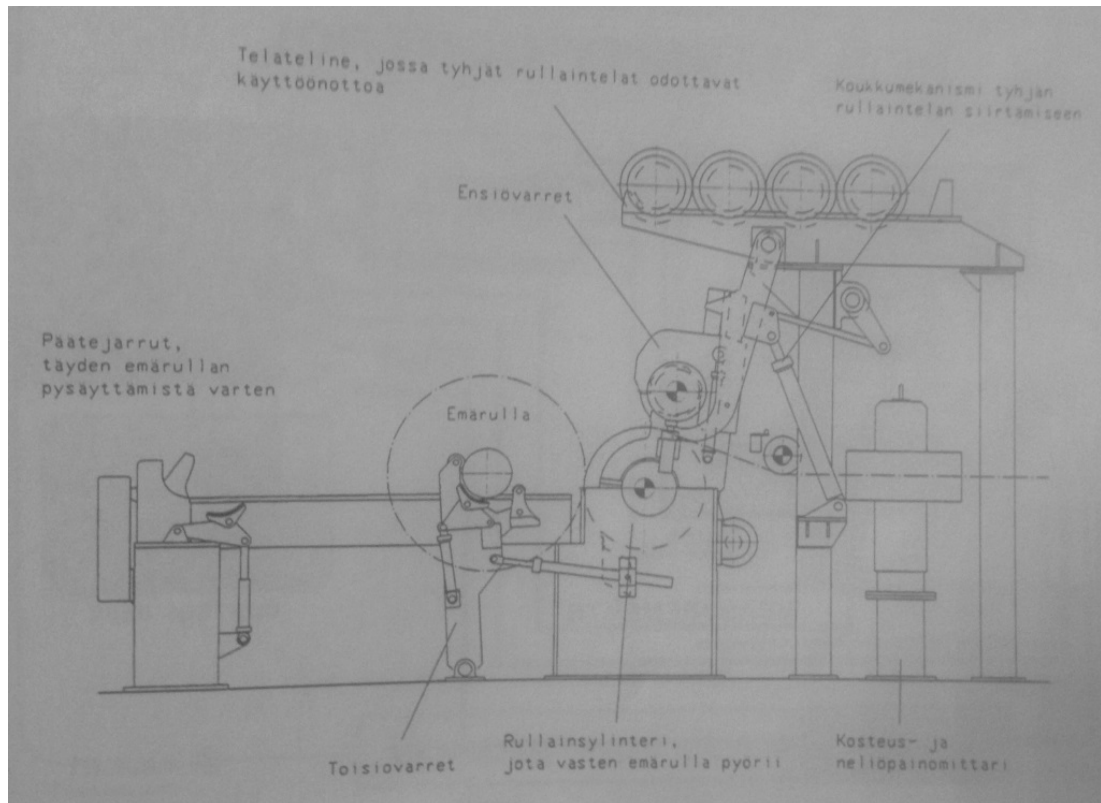
sekä rullain. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001,16; Sepsilva Ltd Oy 1997, 124.)



Kuva 14. Kartonkikoneen kalanteri ja rullain (Stora Enso Kaukopää 2015)

4.5 Rullain

Kartonki rullataan pope-rullaimella, missä kasvavaa rullaa kuormitetaan rullaussylinteriä vasten toisiovarsien avustuksella (Kuva 15). Rullan vaihtoa varten rullaustela kiihdytetään koneen ajonopeuteen ja vaihdon jälkeen tela lasketaan rullainkiskolle. Syntyvän kartonkirullan kovuuteen ja kireyteen pystytään vaikuttamaan rullaimen ja edeltävän käyttöryhmän välisen vetoeron ja toisiovarsien kuormituspaineen avulla. Jotta rullaus onnistuu, kartongin pintapainon ja kosteusprofiilin on oltava tasaisia. Kartongin rullaamisesta liian pienelle hylsulle voi seurata rullapohjakäyritymistä, josta kerrotaan edellä luvussa 7.2.1, Konesuuntainen käyryys K_x . (Sepsilva Ltd Oy 1997, 133.)



Kuva 15. Pope-rullain (Sepsilva Ltd Oy 1997)

4.6 Pituusleikkaus

Ennen konerullan toimittamista jatkojalostukseen tai asiakkaalle, täysleveä konerulla leikataan jatkojalostuksen tai asiakkaan vaatimusten mukaisesti arkeiksi tai yksittäisiksi halutun leveiksi rulliksi pituusleikkurilla. Lisäksi pituusleikkurilla tarkistetaan rullan ajettavuus sekä kunto silmämääräisesti. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 16 – 17.)

5 Ekstruusiopäällystys

Päällystykseen tavoitteena on parantaa tuotteen laatua sekä painettavuutta. Päällystykseen avulla parannetaan tuotteen barriääri-ominaisuuksia, kuten veden ja höyryn läpäisemättömyyttä, aromien estokerrosta sekä kaasujen läpäisyn estokerrosta. Kaasutiivyyden parantamisen lisäksi ekstruusiopäällystykseen avulla voidaan parantaa mm. tuotteen paino-ominaisuuksia, kuten pintalujuutta ja sileyttä sekä optisia ominaisuuksia, kuten kiiltoa ja vaaleutta. Esimerkiksi näiden edellä mainittujen tekijöiden ansiosta paperista ja kartongista saadaan vaativia

materiaaleja erilaisiin käyttökohteisiin, kuten polyeteenipäällystettyä nestepakauskartonkia elintarvikkeille sekä nesteille. (Grönstrand ym. 2000.)

Ekstruusiopäällystyksessä käytettyjä ekstruusiomuoveja ovat matalatiheksinen polyeteeni (LDPE), korkeatiheksinen polyeteeni (HDPE), polypropeeni (PP), erilaiset kopolymeerit, kuten EVA ja EMA, ionomeerit, polyesteri (PET), nailonit, barriäärimuovit (EVOH), liimapolymeerit sekä ekstrudoitavat hotmeltit. Tässä työssä on kuitenkin keskitytty vain matalatiheksisen polyeteenin käyttöön, joka onkin kaikista käytetyin ekstruusiopäällyste, sillä sitä käytetään yli 80 % kaikista päällystysmuoveista. Ekstruusiopäällystysprosessi vaikuttaa omalta osaltaan kartongin käyristymiseen aiheuttamalla kartonkiin toispuolisuutta. (Grönstrand ym. 2000, 64 – 68; Karhuketo, Seppälä, Törn & Viluksela 2004.)

5.1 Matalatiheksinen polyeteeni LDPE

Kuten edelläkin on mainittu, matalatiheksinen polyeteeni LDPE on ylivoimaisesti käytetyin ekstruusiopäällystyslaatu. Yleensä PE-päällystyksestä puhuttaessa tarkoitetaan juuri kyseisellä muovilla päällystämistä. LDPE:tä on helppo prosessoida ja se on hinnaltaan todella kilpailukykyinen muovilaatu. LDPE kuuluu polyolefiinien muoviryhmään ja se valmistetaan eteenikaasusta. (Savolainen, Kuusipalo, Laiho & Penttinen 1998; Grönstrand ym. 2000, 64.)

Ominaisuudet

Polyeteenin ominaisuuksiin lukeutuvat kaasujen, vesihöyryn ja veden tiiveys. Polyeteenin useat ominaisuudet ovat riippuvaisia sen tiheydestä. Taulukosta 1 nähdään LDPE:n eri päällystyslaatuja sekä vertailuna PEHD:n eli suuritiheksisen polyeteenin tiheydet ja sulamispisteet. (Savolainen ym. 1998; Grönstrand ym. 2000, 65 – 66.)

Polyeteeni- laji	Tiheys [g/cm ³]	Sulamispiste [°C]
PE-LD	0,910–0,930	~110
kova	0,920–0,925	108–112
pehmeä	0,917–0,919	106–108
erittäin pehmeä	0,915–0,918	104–106
PE-HD	0,941–0,965	~135

Taulukko 1. Eri polyeteenilajien tiheydet ja sulamispisteet (Savolainen ym. 1998)

PELD säröilee ja haurastuu ulkoilmassa ja Suomen olosuhteissa muoveihin eniten vaikuttavia ulkotilassa olevia tekijöitä ovat UV-säteily ja pakkanen. Näitä ulkoisia tekijöitä parannetaan tiettyjen lisäainelisäysten avulla. (Håkan 1982; MET 2001.)

On tärkeää ettei vesihöyry pääse tunkeutumaan valmistettuun kartonkiin, jotta kosteus ei pääsisi vaikuttamaan kartongin ominaisuuksiin aiheuttamalla mm. käyritystä. Polyeteenin vesihöyryn läpäisykykyyn vaikuttavat päällystemäärä ja päällysteen paksuus sekä polyeteenin lämpötila ja tiheys. Mitä tiheämpää muovilaatu on, sitä parempi on sen vesihöyrytiivisyys. Polyeteenillä on tiheydensä vuoksi jo itsessään erinomainen barriääri vesihöyryä vastaan. (Grönstrand ym. 2000, 65; MET 2001.)

5.2 Ekstruusiopäällystyksen edut

Ekstruusiopäällystyksellä on monia etuja, kuten se, että ekstruusiomuovit ovat edullisia verrattuna liuksena tai dispersiona käytettäviin päällysteisiin sekä ne ovat jo valmiiksi sellaisessa muodossa, ettei niiden kanssa tarvitse käyttää vettä tai liuottimia. Ekstruusiomuovit ovat myös itsessään todella puhtaita aineita, joten niistä ei synny liuotinpäästöjä sekä ekstruusiomenetelmällä on helpompi

saada aikaan reiätön barriäarifilmi verrattuna muihin päällystysmenetelmiin. (Grönstrand ym. 2000, 46.)

5.3 Ekstruusiopäällystyksen tavoitteet ja laatutekijät

Ekstruusiopäällystyksen tavoitteena on saada aikaan mahdollisimman tasalaa-
tuista sulaa filmiä mahdollisimman suurella nopeudella kuitenkin hallitusti. Muo-
dostuvan filmin pituus- ja poikkiprofiilin täytyy pysyä mahdollisimman muuttu-
mattomana ajon aikana, joten filmiin ei saisi tulla paksuuden muutoksia eikä
leveyden vaihteluita. Myös syntyvän filmin lämpötilan tulee pysyä vakaana, sillä
lämpötilalla on suuri vaikutus filmin adheesioon. (Grönstrand ym. 2000, 47.)

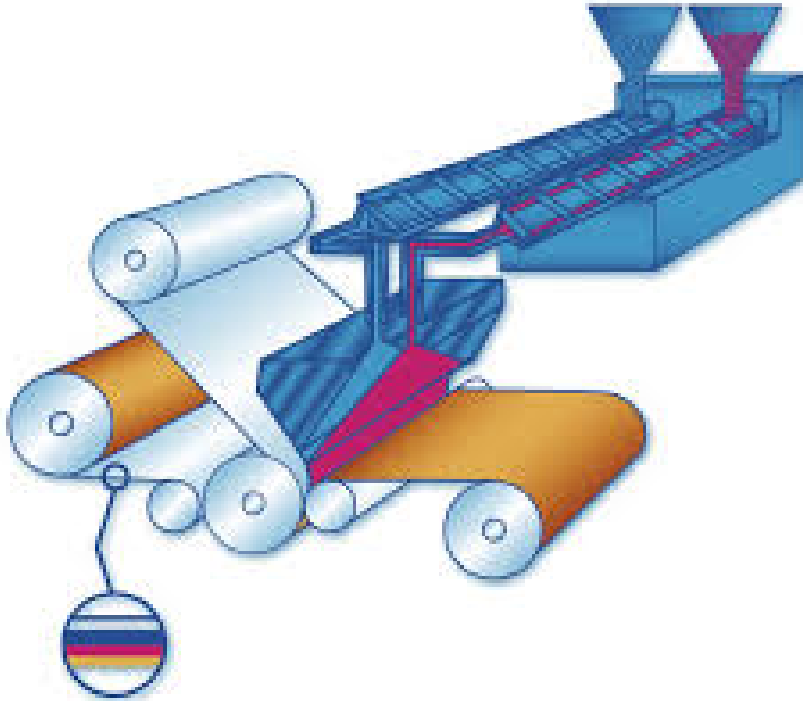
Ekstruusiopäällystyksessä adheesio kuvaa muovin ja alusradan välistä tarttu-
vuutta, josta kerrotaan enemmän luvussa 6.2.1, Adheesio. Adheesioon vaikut-
tavia laatutekijöitä polyeteenipäällystyksessä ovat käytetty alusratamateriaali,
linjanopeus sekä käytettävä päällystelaatu: adheesio on sitä parempi, mitä ha-
petteempaa ja lämpimämpää polyeteeni on tullessaan nippiin. (Kurri, Malén,
Sandel & Virtanen 2002.)

Polyeteenipäällystetyn kartongin tärkein haluttava ominaisuus barriääri, joka
kuvaa vesi-, kaasu-, vesihöyry-, aromi- ja rasvatiiviyttä sekä valonläpäisemät-
tömyyttä. Barriääriominaisuudet riippuvat lähinnä ekstruusiomuovin filmipak-
suudesta. Muita tärkeitä vaadittuja ominaisuuksia ovat pintaominaisuudet, joihin
lukeutuvat painettavuus, kiilto, kitka, kuumasaumautuvuus, irtoavuus, liimatta-
vuus, adheesio ja mikroreikäisyys. Pintaominaisuudet riippuvat mm. käytetystä
raaka-aineesta, millä menetelmällä pinta tehdään sekä koronakäsittelystä.
(Grönstrand ym. 2000, 69.)

5.4 Ekstruusiopäällystyksen jaottelu

Ekstruusiopäällystys jaetaan ekstruusio- ja koekstruusiopäällystykseen. Ko-
ekstruusiopäällystys eroaa ekstruusiopäällystyksestä sillä, että siinä yhdistetään
kahdesta tai useammasta ekstruuderista syötettävät sulat muovit siten, että ne
liittyvät toisiinsa paperin tai kartongin pinnalla, mutta eivät kuitenkaan sekoitu
toisiinsa. Ekstruusiopäällystyksessä taas paperin tai kartongin pinta päällyste-
tään muovilla vain yhdestä ekstruuderista. Koekstruusiopäällystyksestä käy-

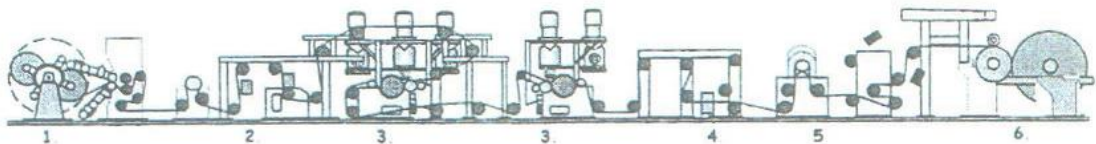
tään myös termiä koekstruusiolaminointi. Kuvasta 16 nähdään kahden eri sulan muovin syöttäminen kartongin pintaan ekstruudereista. (Järvinen 2008, 176; Seppälä 2008, 250.)



Kuva 16. Koekstruusiopäällystys (Laiho 2006)

6 Ekstruusiopäällystysprosessi

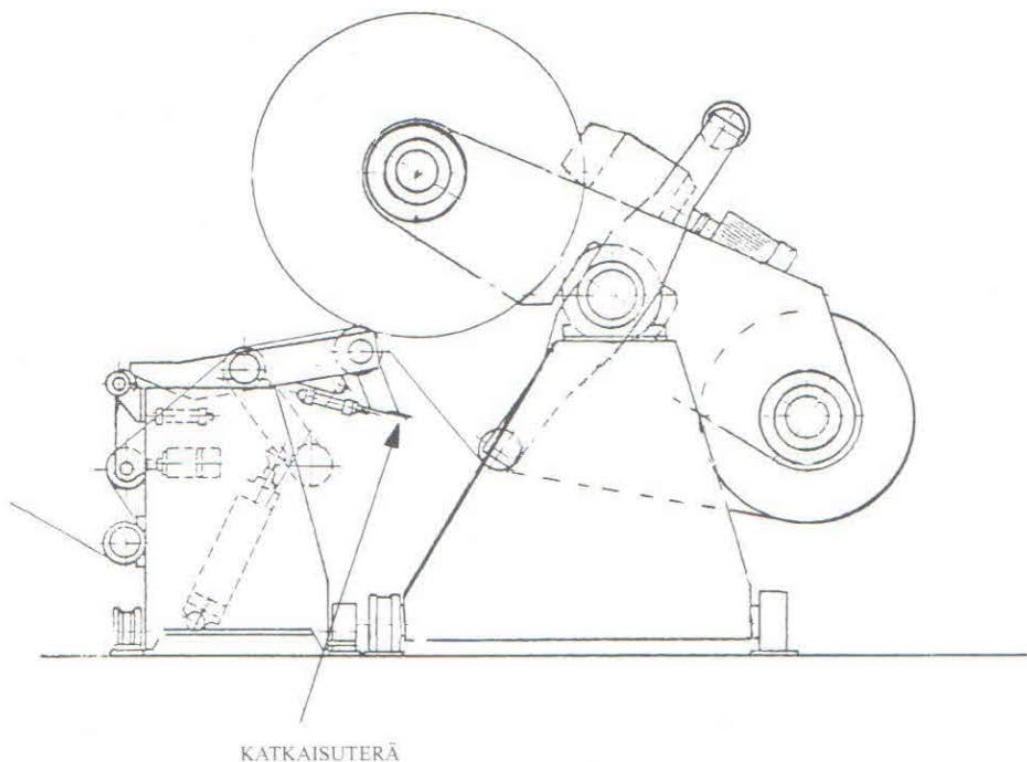
Ekstruusiopäällystyslinja koostuu aukirullainyksiköstä (numero 1), esikäsitteilylaitteistosta (numero 2), päällystysyksiköstä tai -yksiköistä (numerot 3), profiili-mittaus ja -säätölaitteistosta (numero 4), jälkikäsitteilylaitteistosta (numero 5) sekä kiinnirullaimesta (numero 6) ja pituusleikkurista (kuva 17).



Kuva 17. Ekstruusiopäällystyslinja (Suikkanen 2008)

6.1 Aukirullaus

Pakattu rullattu kartonki syötetään päällystyskonelinjalle aukirullauspukin kautta. Aukirullauspukin tehtävänä on purkaa kartonkirulla hallitusti ja tasaisesti kone-
linjalle, keskittää kartonkirata oikeaan kohtaan, pitää kokoajan yllä tasainen ra-
tajännitys riippumatta rullan halkaisijasta tai koneen nopeudenmuutoksista sekä
mahdollistaa rullanvaihto koneen ja prosessin keskeytymättä riippumatta rullien
halkaisijamuutoksista. Kuvassa 18 nähdään aukirullauspukki. (Grönstrand ym.
2000, 29.)



Kuva 18. Aukirullauspukki (Grönstrand ym. 2000)

6.2 Esikäsitteily

Esikäsitteilyn tehtävänä on parantaa päällystemuovin tarttuvuutta kartonkiin luomalla kartongin pintaan riittävä pintaenergia ja näin ollen riittävä adheesio. Esikäsitteily toteutetaan korona- ja liekkikäsitteilymenetelmillä. (Smått 1982; Karhuketo ym. 2004.)

6.2.1 Adheesio

Polyeteenipäällistyksen onnistumiseksi päällysteen täytyy kiinnittyä riittävän hyvin kartongin pintaan. Adheesio kuvaa eri pintojen, tässä tapauksessa kartongin ja muovin, välistä tarrautumista ja toisissaan kiinnipysymistä. Adheesio muodostuminen edellyttää eri pintojen tarrautumista niin lähekkäin, että ne pääsevät reagoimaan molekyyllitasolla toistensa kanssa. Polyeteenipäällistyksen edellytys onkin, että sula polyeteenipäällyste kastelee kartongin pinnan niin hyvin, että olosuhteet ja edellytykset adheesio syntymiselle muodostuvat. Adheesio muodostumisen jälkeen pintojen kiinnittymisen vahvuuden määräävät eri pintojen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet. (Smått 1982; Karhuketo ym. 2004.)

6.2.2 Pintaenergia

Pintaenergia kuvastaa jonkin pinnan, tässä tapauksessa kartonkipinnan, kovuutta. Pintaenergia jaetaan poolisuuskomponenttiin, jonka muodostaa pooliset molekyylit sekä dispersiokomponenttiin, jonka puolestaan muodostavat poolittomat molekyylit. Kartonki sopii sellaisenaan ominaisuuksiltaan painettavaksi tai esim. pigmenttipäällystettäväksi, mutta muovipäällistyksen yhteydessä sen pintaenergia ei ole riittävän hyvä muovin pintaan kiinnittymiselle. Kartongin muovipäällistyksestä riittävän adheesio muodostumisen edellytyksenä on kartongin riittävä pintaenergia, jotta polyeteeni pystyy kastamaan kartongin pinnan. Riittävä pintaenergia saadaan aikaiseksi kartongin pintakäsittelyllä. (Karhuketo ym. 2004.)

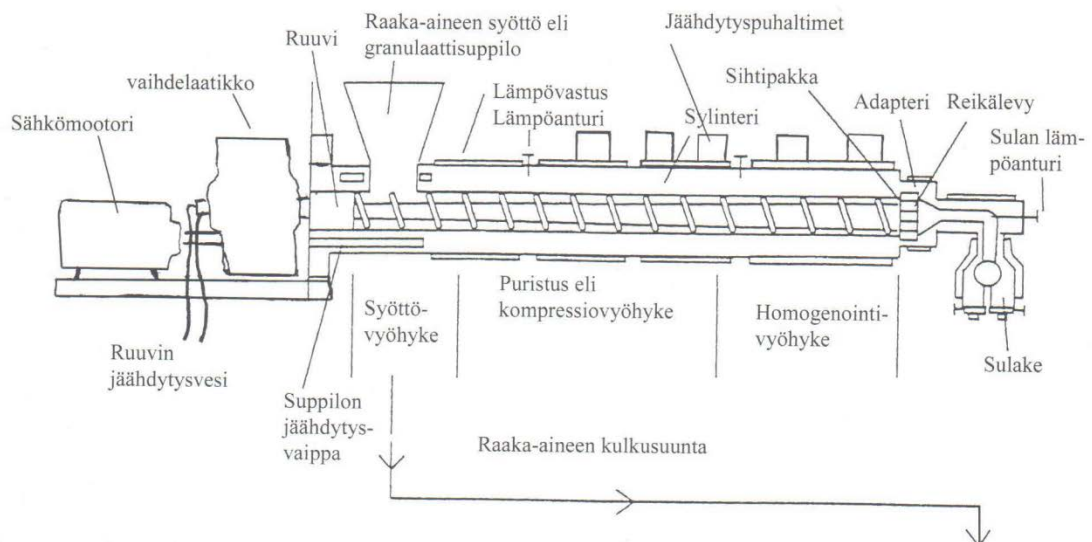
6.2.3 Pintakäsittely

Kartongin pintakäsittelyä polyeteenipäällistysprosessissa tarvitaan kartongin pintaenergian kasvattamiseen tarpeeksi suurelle tasolle adheesio aikaansäämiseksi. Pintakäsittely parantaa myös muovipäällistetyt kartongin painettavuusominaisuuksia. Pintakäsittelyprosessi tapahtuu keinotekoisesti korona- tai liekkikäsittelyn avulla. Esikäsittelyn taso pystytään määrittämään päällystyskoneelta tulevan valmiin päällystetyt kartongin adheesio avulla. Korona- ja liekkikäsittelyllä kartongin pinnasta höyrystetään pois epäpuhtaudet ja vesi, poltetaan pinnasta roskat, pöly ja pystyyn jääneet kuidut pois, hapetetaan pintaa

samalla muodostaen vahvan sidoksen omaavia karboksyyli-, hydroksyyli- ja karbonyyliryhmiä, nostetaan radan pintaa, rikotaan polymeeriketjuja samalla muodostaen vapaita radikaaleja sekä luodaan pintaenergian kasvamista edesauttava pysyvä sähkökenttä. (Smått 1982; Karhuketo ym. 2004.)

6.3 Ekstruuderit

Ekstruusiopäällystyksessä päällystemuovigranulaatit sulatetaan ja sekoitetaan ekstruuderissa ruuvin avulla 250 – 330 celsiusasteen lämpötilassa. Sula massa homogenoidaan, suodatetaan ja kuljetetaan ekstruuderiputkea pitkin rakosuuttimelle, jonka läpi sula muovi puristetaan paksuksi filmiksi. Filmi venytetään 10 – 50 kertaa ohkaisemmaksi, jonka jälkeen se on valmis puristettavaksi paperi- tai kartonkiradan pintaan tai kahden paperin tai kartongin väliin nipissä, joka muodostuu jäähdytystelasta ja puristustelasta. Samanaikaisesti sula muovi jähmettyy paperin tai kartongin pintaan kiinteäksi muovipäällysteeksi. Kuvasta 19 voidaan nähdä ekstruuderin rakenne. (Grönstrand ym. 2000, 46.)



Kuva 19. Päällystys ekstruuderin rakenne (Grönstrand ym. 2000)

6.4 Jälkikäsittely

Jälkikäsittelyn tehtävänä on parantaa polyeteenipäällystetyn kartongin painettavuusominaisuuksia. Ekstruusiopäällystysprosessissa muovipäällystetty kartonki jälkikäsitellään sähkökoronointimentelemällä, jota voidaan käyttää myös pro-

sessin esikäsittelyvaiheessa. Sähkökoronalaitteistoon kuuluu käsittelyasema, korkeajännitemuuntaja, suurtaajuusgeneraattori sekä otsoni-imuri. Sähkökoronalla muodostetaan korkeajännitteinen sähkövirta, jonka seurauksena syntyy otsonia, jolla hapetetaan käsiteltävän radan pintaa. Pinnan hapettumisen ansiosta muovin tai painomusteen tarttuvuusominaisuudet paranevat. (Smått 1982; Karhuketo ym. 2004.)

6.5 Kiinnirullaus

Kiinnirullausyksikkö on päällystyskoneen loppuosassa. Valmistuvaa rullaa nimitetään konerullaksi eli tampouriksi. Kiinnirullauspukin tärkein tehtävä on rullata päällystyskoneella syntynyt päällystetty kartonkirata oikealla kireydellä rullalle siten, ettei rullaan pääsisi syntymään virheitä. Lisäksi kiinnirullauksessa syntyvien konerullien välissä tapahtuvan rullanvaihdon tulisi tapahtua häiritsemättä päällystyskoneen ajonopeutta. (Karhuketo ym. 2004.)

Eniten käytetty kiinnirullausmenetelmä on pope-rullaaja, josta kerrotaan myös luvussa 4.5, Rullain. Pope-rullaimen avulla rullanvaihto pystytään tekemään konetta pysäyttämättä ja koneen nopeutta muuttamatta. Pope-rullaajan etuina on, että se on varmatoiminen sekä yksinkertainen. Se sopii vahvojen ratojen käsittelyyn, mutta myös ohkaisempien ratojen käsittelyyn siinä tapauksessa, että ne eivät ole herkkiä puristukselle. Huonona puolena voidaan pitää sitä, ettei pope-rullaajalla pystytä tekemään kovinkaan löysää rullaa, sillä näin tehdessä rulla pääsisi kaatumaan, eli päällimmäiset kerrokset alkaisivat kelautua sivulle päin ja näin tuote menisi pilalle. (Grönstrand ym. 2000.)

6.6 Pituusleikkaus

Päällystyskoneilla on yleensä omat pituusleikkausyksikkönsä koneen loppupäässä. Päällystyskoneella varsinkin ajojen loppu- ja alkuvaiheissa syntyy väkisin myös huonolaatuista tuotetta, joka täytyy poistaa konerullasta ennen sen pakkaamista ja varastoimista. Päällystyskoneella radassa havaittavat viat voidaan merkata valmistuvaan konerullaan lappujen avulla, jolloin pituusleikkurilla työntekijät näkevät vikakohdat ja voivat täten poistaa ne tuotannon ja laadun maksimoimiseksi. Pituusleikkurin tehtäviin kuuluu myös

rullien leikkaaminen oikeaan leveyteen asiakkaiden asettamien mittaus- ja laatuvaatimuksien mukaisesti. (Karhuketo ym. 2004.)

7 Käyrityksen luonnehdinta

Käyrityminen tarkoittaa kartongin poikkeamista tasaisesta muodostaan ja siihen vaikuttaa useat eri tekijät, jonka takia käyrityminen onkin yksi hankalimmista laatuksista hallita. Käyrityminen on yleisimmin kosteuden aiheuttamia mittamuutoksia paperissa tai kartongissa, josta kerrotaan kattavammin luvussa 10.3, Mittapysyvyys. (Bortolin 2002, 18.)

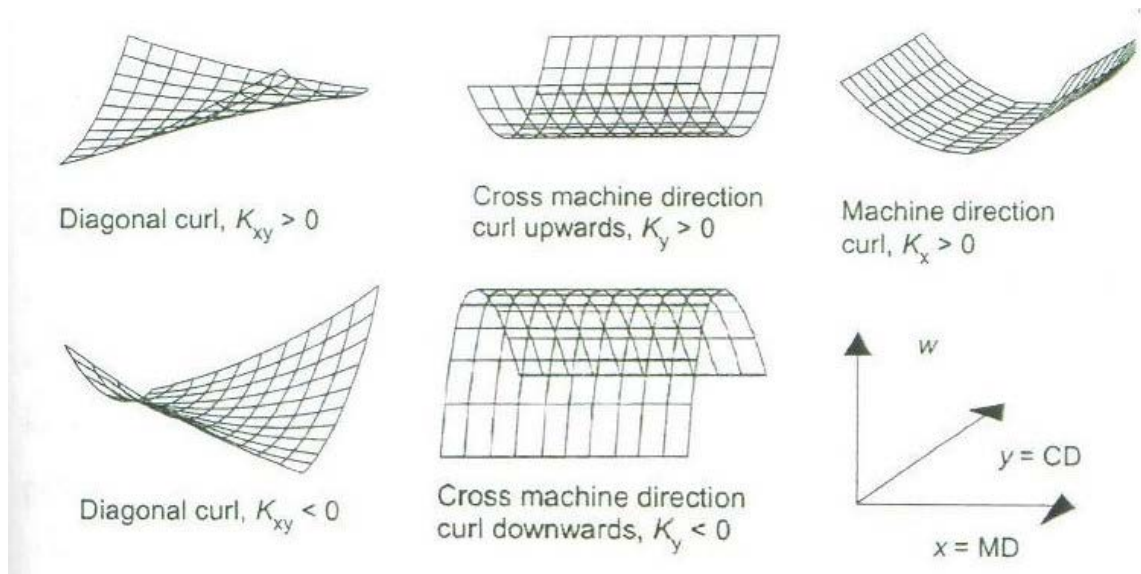
Kartongin käyritystä kuvataan kolmella suureella, jotka ovat kaarevuuden arvot K_x eli konesuuntainen käyryys, K_y eli poikkisuuntainen käyryys sekä K_{xy} eli diagonaalinen käyryys (Kajanto & Niskanen 1998).

Käyrityksen suuret

Vaakatasossa olevan näytearkin pinnan korkeus w pisteessä (x, y) esitetään yhtälön 1 avulla:

$$w(x, y) = (K_x x^2 + K_y y^2 + K_{xy} xy) / 2 \quad (1)$$

Kaavassa (1) K_x , K_y ja K_{xy} ovat konesuuntainen, poikkisuuntainen sekä diagonaalinen käyryys vallitsevissa olosuhteissa. Kartongin käyryys K kuvastaa pinnan kaarevuussäteen käänteisarvoa, jonka yksikkö on $[K] = 1/m$. Mitä suurempi käyryys $[K]$ on, sitä voimakkaampaa on näytteen käyrityminen ja edelleen sitä suurempia ovat näytteen reunojen nousemat. Positiiviset K :n arvot saavat näytteen käyritymään ylöspäin ja sitä vastoin K :n negatiiviset arvot saavat näytteen käyritymään alaspäin viirapuolelle (Kuva 20). Konesuuntaisen sekä poikkisuuntaisen käyrityksen komponentit K_x ja K_y havainnollistavat sitä, kuinka paljon kartonkiarkin pinta käyrityy kone- ja poikkisuuntaan päin edetessä kun taas diagonaalisen käyrityksen komponentti K_{xy} havainnollistaa sitä, kuinka paljon kone- ja poikkisuunnan väliset lävistäjien käyryysarvot poikkeavat toisistaan (Kuva 20). (Kajanto & Niskanen 1998; Uesaka, Kodaka, Okushima & Fukuchi 1985.)



Kuva 20. Käyrityksen suuret: K_x konesuuntainen käyryys, K_y poikkisuuntainen käyryys ja K_{xy} diagonaalinen käyryys (Kajanto & Niskanen 1998)

7.1 Konesuuntainen käyryys K_x

Konesuuntainen eli mekaaninen käyrityminen ei johdu olosuhdemuutoksista, vaan yleensä kartongin toispuolisesta venymästä eli yhden kartonkikerroksen venymisestä suhteessa sen muihin kerroksiin. Yleensä tämä kartongin toispuolinen mekaaninen venymä taas aiheutuu niin kutsutusta mekaanisesta muistijäljestä, eli kun kartonki on rullattu liian pienelle hylsulle, jonka seurauksena se pääsee menemään liian pienelle rullalle. Tätä ilmiötä kutsutaan rullapohjakäyritymiseksi. Rullapohjakäyritymistä saadaan korjattua taivuttamalla kartonkia tarpeeksi lujasti käyritymistä vastaiseen suuntaan. (Ryti 1989; Kajanto & Niskanen 1998.) Näin ollen konesuuntaisen käyrityksen tärkein aiheuttaja on rullapohjakäyrityminen.

7.2 Poikkisuuntainen käyryys K_y

Järvinen (2013) on todennut, että poikkisuuntainen käyrityminen aiheutuu usean eri osatekijän yhteisvaikutuksesta (Pajunen 2015, 8). Näitä osatekijöitä ovat kosteuden aiheuttama käyrityminen, tuotantotilan olosuhteet sekä kartongin rakenteen sisäinen kosteus. Kun kartonki kostuu sisältä päin, kuidut pääsevät turpoamaan, jonka seurauksena poikkisuuntaan nähden kartongin reunat nousevat ylöspäin (Kuva 20). (Järvinen 2013, Pajunen 2015, 8 mukaan.)

7.3 Diagonaalinen käyryys K_{xy}

Diagonaalinen käyristyminen kuvastaa kartonkiarkin viereisten nurkkien käyryseroa, kuten Niskanen ja Viitaharju (1993) ovat todenneet (Vainikka 2002, 45). Diagonaalinen käyristymisen johtuu osittain raaka-aineena käytetyn puukuidun S_2 -seinämästä, eli sekundääriseinän keskikerroksen mikrofibrillirakenteesta, joka on kaikilla puukuiduilla kiertynyt samaan suuntaan. Diagonaalisen käyristymisen on huomattu suurenevan kartongin paksuuden pientymisen ja kuituorientaatio-suhteen kasvamisen myötä. (Niskanen & Viitaharju 1993, Vainikka 2002, 45 mukaan.)

8 Kartongin rakenteen vaikutus käyristymiseen

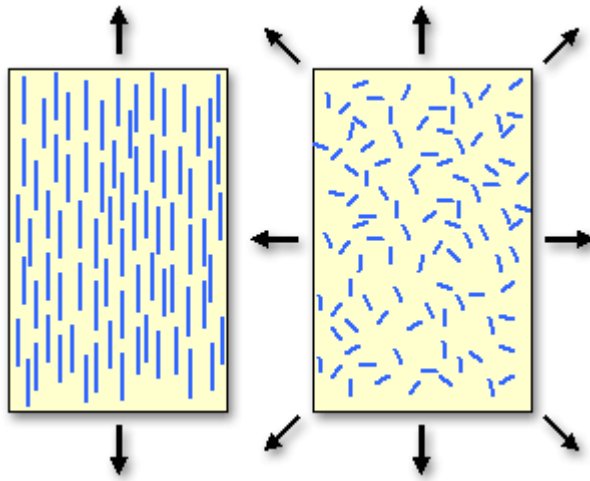
Odell ja Pakarinen (2001) ovat todenneet, että kartongin käyristymiseen vaikuttaa kartongin rakenteen toispuolisuus, kuituorientaation intensiteetti sekä kuituorientaatiokulmavirhe (Kunnaksen 2005, 33 mukaan).

Myös myöhemmin kappaleessa käsiteltävät kuitujen poikkeavuus toisistaan, kartongin kerroksellinen rakenne ja paksuussuuntainen tiheys- ja materiaalijakauma sekä rullapohjakäyristyminen, jota on käsitelty luvussa 7.2.1, Konesuuntainen käyryys K_x , ovat rakenteellisia ominaisuuksia, joilla on vaikutusta kartongin käyristymiseen.

Kartongin anisotropia kuvastaa kartongin ominaisuuksien eroja kartongin kone- ja poikkisuunnassa tai kartongin ylä- ja alapuolelta mitattuna (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001).

8.1 Kuituorientaatio

Kartongin raaka-aineet jakautuvat epätasaisesti arkissa niin tason suunnassa kuin poikkisuunnassakin. Kartongissa kuidut ovat suuntautuneet enemmän konesuuntaan kuin poikkisuuntaan nähden ja kartongin tason suuntaisten kuitujen suuntajakauman epäsymmetrisyys kuvastaa kuituorientaatiota. Kuvan 21 oikea puoli kuvastaa epätasaista jakautumista arkissa, kun taas vasemmalla puolella kuidut ovat suuntautuneet samaan suuntaan konesuuntaisesti. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001; Paperin valmistus 1983.)



Kuva 21. Kuituorientaatio (UNSW Australia 2013)

Kartonki käyristyy kuituorientaation aiheuttamasta kartongin toispuolisuudesta, joka aiheutuu kosteuden päästessä vaikuttamaan eri tavalla kartongin eri puolilla. Kartongin kuitujen ollessa suuntautuneina enemmän konesuuntaan kohti kartongin alapuolella verrattuna sen yläpuoleen, aiheuttaa kosteus enemmän kuitujen turpoamista kartongin alaosassa ja edelleen suuremman kutistuman poikkisuuntaan nähden kartonkirainan alaosassa vedenpoiston yhteydessä rainanmuodostusosalla. (Viitaharju & Niskanen 1994.)

Kuituorientaatio vaikuttaa yhtenä tekijänä kartongin anisotropiaan aiheuttaen toispuolisuutta kartonkiin. Kuituorientaation avulla voidaan myös tarvittaessa hallita anistrooppisuutta yhdessä muiden keinojen kanssa kartonginvalmistuksessa. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001.)

Kuituorientaatiota voidaan mitata joko optisella, sähköisellä tai mekaanisella menetelmällä, joiden mittaustuloksena saadaan orientaationsuhde, josta kerrotaan luvussa 8.1.2, Kuituorientaationsuhde sekä orientaatiokulma, josta kerrotaan luvussa 8.1.1, Kuituorientaatiokulma. (Schröder & Svensson 1965; Niskanen & Sadowski 1989.)

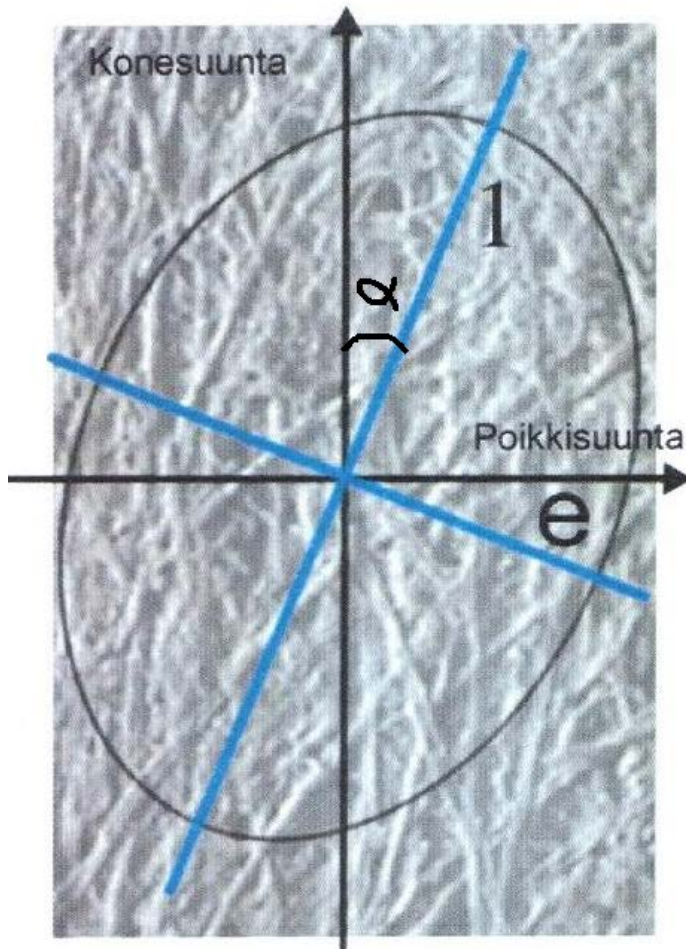
Kuituorientaatioon vaikuttavat lähinnä rainanmuodostusosalla perälaatikon suihkun ja viiran välinen nopeusero, sulppuvirtauksen turbulenssi sekä sulppusuihkuun muodostunut kuituorientaatiojakauma. Näistä suurin vaikutus kuituorientaation voimakkuuteen on suihkun ja viiran välisellä nopeuserolla, josta

kerrotaan luvussa 8.2.1, Suihkusulpun ja viiran nopeuserot. (Schröder & Svensson 1965.)

Odell & Pakarinen (2001) ovat todenneet, että kuituorientaatiota voidaan kuvata kuitukulman ja kuitusuhteen avulla (Kunnas 2005, 29). Pienetkin virheet kuitukulmassa tai orientaation intensiteetissä voivat aiheuttaa käyristymistä kartongissa. (Odell & Pakarinen 2001, Kunnaksen 2005, 29 mukaan.)

8.1.1 Kuituorientaatiokulma

Kuituorientaatiokulma kuvastaa, kuinka paljon kuitujen keskimääräinen suunta poikkeaa konesuunnasta, eli sen suunnan, johon on orientoitunut eniten kuituja (Kuvio 2). Orientaatiokulman itseisarvo kuvastaa poikkeaman määrän konesuunnasta asteina ja etumerkkisuunnan. Konesuuntaan kääntynyt orientaatiokulma antaa arvon nolla, ja mitä enemmän poikkisuuntaan kohti orientaatiokulma kääntyy, sitä enemmän arvo poikkeaa nolasta. Orientaatiokulma saa negatiivisen tai positiivisen etumerkin kääntyessään poikkisuuntaan kohti vasemmalle tai oikealle riippuen päätetystä etumerkkisäännöstä. Mitä suuremman arvon orientaatiokulma saa, sitä suuremmalla riskillä se aiheuttaa kartonkiin vinoa muodonmuutosta tai diagonaalista käyristymistä (Schröder & Svensson 1965; Kaukas Oy).



Kuvio 2. Kuituorientaatiokulma α (VTT/Know Pap 17.0, kuvaa muokattu alkuperäisestä)

8.1.2 Kuituorientaationsuhde

Siren (1998) on todennut, että kuituorientaationsuhde kuvastaa kuituorientaation voimakkuutta eli intensiteettiä (Kunnas 2005, 29). Orientoitumisen intensiteetti riippuu suihkun ja viiran välisestä nopeuserosta viiraosalla sekä siitä, kuinka vapaasti kuidut pääsevät kääntymään orientoivan voiman vaikutuksesta (Häggblom-Ahnger & Komulainen 2001, 57). Siren (1998) on todennut, että kuituorientaationsuhde ilmoitetaan mitatun suuntajakauman maksimi- ja minimiarvojen suhteena, jolloin se vertaa kuitujen määrän suhdetta suuntaan nähden, jossa kuituja on eniten sitä vastaiseen suuntaan nähden (Kunnas 2005, 29). Yleensä orientaationsuhde kuitenkin ilmoitetaan kone- ja poikkisuunnassa olevien kuitujen lukumäärän suhteena, sillä käytännössä näissä suunnissa ilmoitettua tiedosta on enemmän hyötyä kartongin ominaisuuksien hallintaa ajatellen.

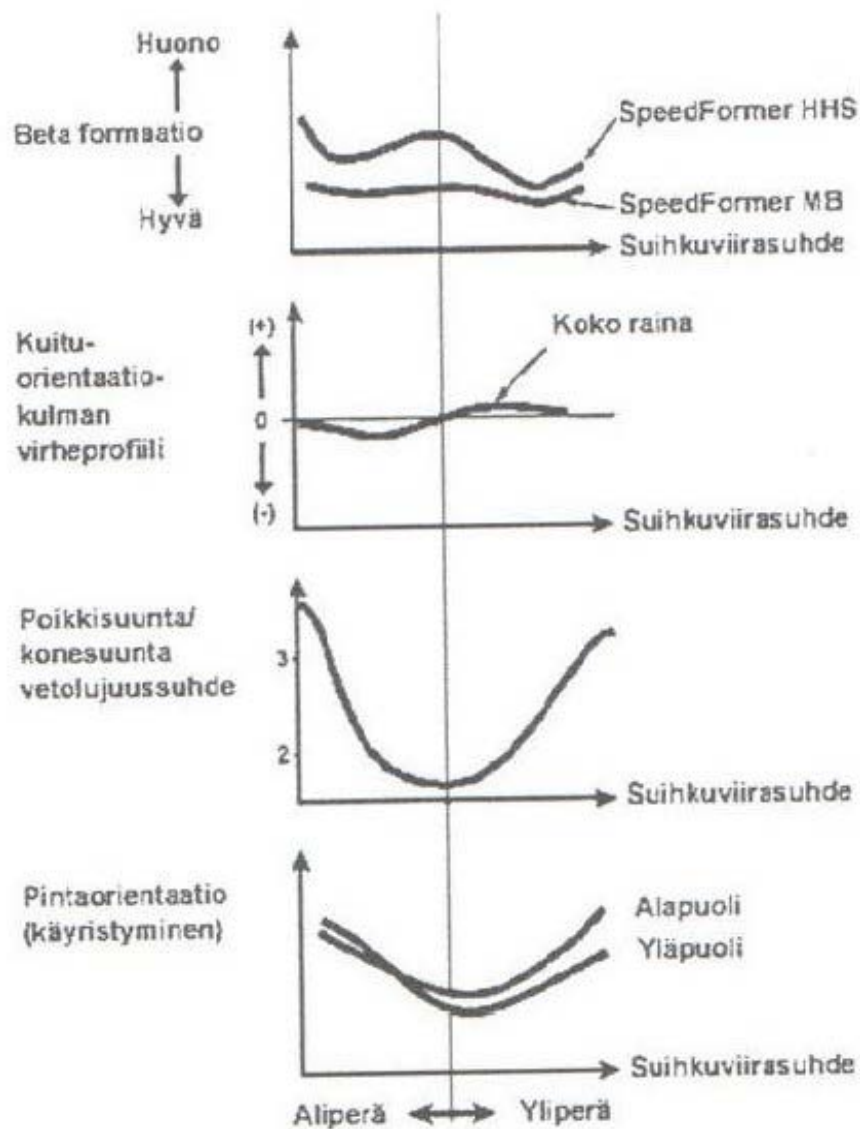
Kone- ja poikkisuunnan mukaan kuvattu orientaatio suhde on sitä isompi, mitä enemmän kuituja on konesuunnassa nähden verrattuna poikkisuunnassa oleviin kuituihin nähden. (Siren 1998, Kunnaksen 2005, 29 mukaan.)

8.2 Kuituorientaation hallinta

Paras keino hallita kuituorientaatiota on viiraosalla suihkusulpun ja viiran nopeuseron avulla. Lisäksi kuituorientaatiota voidaan hallita viiraosan vedenpoistossa ja mm. perälaatikon avulla.

8.2.1 Suihkusulpun ja viiran nopeuserot

Kaikista tekijöistä perälaatikon suihkun ja viiran välisellä nopeuserolla on suurin vaikutus kuituorientaation intensiteettiin. Suihkusulpun ja viiran välinen nopeusero synnyttää sulppuun leikkausvoimakentän, joka kääntää kuituja konesuuntaan päin. Mitä suurempi nopeusero on, sitä suuremmalla voimalla kuidut kääntyvät konesuuntaan kohti. Kuituorientaatio suhde ei kasva enää nopeuseron mukana nopeuseron ylittäessä arvon 20 – 30 m/min tasoviirakoneella johtuen todennäköisimmin suuresta turbulenssista. Suihkun ja viiran nopeuseron avulla voidaan kasvattaa kuituorientaatiota huomattavasti enemmän kitaformerikonstruktiolla kuin tasoviira- tai hybridiformerilla. Tasoviirakoneella aikaansaatu kuituorientaatio riippuu enemmän perälaatikon rakenteesta kuin suihkun ja viiran nopeuserosta. Perälaatikon suppenevalla huulikartiolla saadaan aikaan sulpun virtauksen kiihtyvyys ja kuitujen kääntyminen konesuuntaan kohti. Sulppusuihkun kuituorientaatio on sitä suurempi, mitä enemmän huulikartio suppenee. Kuvio 3 havainnollistaa suihkun ja viiran nopeuserojen vaikutusta kuituorientaatioon sekä formaatioon. (Schröder & Svensson 1965; Wahren & Lövsstad 1977; Niskanen & Sadowski 1989.)



Kuvio 3. Suihkusulpun ja viiran nopeuseron vaikutus orientaatioon ja formaatioon (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001)

8.2.2 Vedenpoisto viiraosalla

Kaksoisviirakoneella kartongista saadaan ylä- ja alapuolen suhteensa symmetrisempää kaksisuuntaisen vedenpoiston ansoista, joten se on tasoviirakonetta parempi vaihtoehto kartongin tasaisuutta ja toispuolisuutta ja näin ollen myös käyristymisen ehkäisyä ajatellen (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 85, 139). Niskanen (1987 – 1990) on todennut, että viiralla esiintyessä poikittaisia virtauksia vedenpoistossa, kuidut suuntautuvat vinoon, toisin sanottuna kuituorientaatio vinoutuu, jolloin kuituorientaatiokulma poikkeaa konesuunnasta

(Vainikka 2002, 30). Mitä enemmän kuituorientaatiokulma poikkeaa konesuunnasta, sitä suuremmalla riskillä se aiheuttaa kartonkiin vinoa muodonmuutosta tai diagonaalista käyristymistä kuten luvussa 8.1.1, Kuituorientaatiokulma, on kerrottu. Niskanen (1987 – 1990) on todennut, että suuret kartonkikoneen nopeudet ja ajo lähellä tasaperää suurentavat poikittaisten virtauksien ilmenemistä, joten niiden välttämällä vedenpoistossa voidaan pienentää käyristymisen ilmenemistä kartongissa (Vainikka 2002, 30). (Niskanen 1987 – 1990, Vainikan 2002, 30 mukaan).

Poikittaisten virtausten syntyymiseen vaikuttavat esimerkiksi vinossa oleva perälaatikko, painehäviöt perälaatikon reunoilla, epätasainen vedenpoisto viiralla tai voimakkaat reuna-aallot sekä epätasainen huuliaukko poikkisuuntaan nähden tai epätasainen virtausvastus perälaatikolla. Edellä mainittuja tekijöitä välttämällä voidaan siis välttää kuituorientaation vinoutumista, joka taas aiheuttaa käyristymistä kartongilla. Näiden lisäksi vinoutumista voidaan säätää ja ehkäistä perälaatikkoon asennettavilla lisävirtausputkilla sekä laimennusvesisäätöisellä perälaatikolla. (Metsäteollisuuden Työnantajaliitto 1997, 82 – 99.)

8.3 Kuitujen poikkeavuus toisistaan

Kuituorientaation lisäksi anistrooppisuutta aiheuttaa kuitujen poikkeavuus toisiinsa nähden. Erisuuntaiset kuidut voivat poiketa toisistaan mm. käyryydeltään ja pituudeltaan. Poikkisuuntaan asettuneet kuidut ovat yleensä konesuuntaan asettuneita kuituja käyrempiä. Tämä johtuu siitä, että paperi- tai kartonkikoneella rainaan kohdistuu konesuunnassa venytystä ja poikkisuuntaan kutistumista. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 28.)

8.4 Kerroksellinen rakenne

Monikerroksisen kartongin voidaan olettaa koostuvan kerroksista, joissa elastiset ominaisuudet ovat vakioita. Keskimmäisen kerroksen koostuessa mekaanisesta massasta, käyristyminen riippuu pääasiassa pinta- ja pohjakerroksen ominaisuuksista. (Carlsson, Fellers & Htun 1980.)

Niskanen (1991) on todennut, että kolmikerroksisen kartongin käyristyminen aiheutuukin kosteuslaajentuman erosta pinta- ja pohjakerroksen välillä (Pyrrö

2004, 17). Käyristymisen suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat kartongin pinta- ja pohjakerroksen välimatka toisistaan sekä keskikerroksen paksuus. (Niskanen 1991, Pyrrön 2004, 17 mukaan.)

8.5 Paksuussuuntainen tiheysjakauma

Märkäpuristuksella on suuri vaikutuskartongin paksuussuuntaiseen tiheysjakaumaan. Rainaan vaikuttavat paineet rainaa kokoon puristettaessa ovat strukturaalinen paine ja hydraulinen paine. Strukturaalinen paine koostuu kuiduissa olevasta nesteen virtausvastuksesta sekä mekaanisesta jännityksestä kun taas hydraulinen paine syntyy nesteen virratessa kuitujen välissä olevissa tiloissa. (Ehrola, Hernesniemi, Kuosa, Kyytsönen, Linnonmaa, Mäenpää, Pietikäinen, Stapels, Tani & Vuorikari 2000.)

Suuren tiheysjakauman omaavalla kartongilla on toispuolinen rakenne, jolloin sillä on taipumusta käyristymiseen ilman suhteellisen kosteuden muuttuessa. Tiheysjakauma syntyy kartongin sille puolelle, jolta vettä poistetaan enemmän puristimen nipissä. Vedenpoiston tapahtuessa vain toiseen suuntaan, hydraulinen paine on suurimmillaan sillä pinnalla, joka ei poista vettä ja samalla strukturaalinen paine on taas suurimmillaan sillä pinnalla, jonka kautta vesi poistuu. Vedenpoiston suunnasta riippuvainen strukturaalisen paineen tiheys aiheuttaa siis märkäpuristuksessa syntyvän tiheysjakauman. (Ehrola ym. 2000.)

Märkäpuristuksen lisäksi paksuussuuntaiseen tiheysjakaumaan voidaan vaikuttaa esimerkiksi lämpötila- ja kosteusgradienttikalanteroinnilla. Tavallisella kalanteroinnilla ja superkalanteroinnilla taas ei ole vaikutusta lähes ollenkaan kartongin paksuussuuntaiseen tiheysjakaumaan. (Ehrola ym. 2000.)

8.6 Paksuussuuntainen materiaali-jakauma

Kartonginvalmistuksessa paksuussuuntainen materiaali-jakauma määräytyy lähes kokonaan rainanmuodostuksessa. Hienoaine ja mineraalipitoinen täyteaine jakautuvat epätasaisesti kartonkiin suotautumisoloista riippuen. Hienoaine- ja täyteaineosaset ovat niin pieniä, että ne kulkevat suotautuvan veden mukana syntyneessä kuitumatossa ja retentoituvat rainaan lähinnä retentiokemikaalien avulla. Retentiokemikaalilisäys kasvattaa viiraretentiota ja sillä on tasoittava

vaikutus hienoaine ja täyteaineen paksuussuuntaiseen jakaumaan. Tasoviira-koneella yksipuolisessa vedenpoistossa yläpuoli on enemmän täyteaine- ja hienoainerikkaampaa kuin alapuoli johtuen veden huuhtovasta vaikutuksesta. (Aaltonen 1983; Häggblom-Ahnger & Komulainen 2001, 85 – 86.)

Tasoviirakoneella hienoaine sekoittuu ja järjestäytyy uudelleen paksuussuunnassaan ja konsentroituu rainan yläpuolelle egutöörin vaikutuksesta. Kaksoisviirarainaimella vedenpoisto tapahtuu rainan molemmilta puolilta, jonka ansiosta hienoaine- ja täyteainejakauma ovat huomattavasti symmetrisempiä paksuussuunnassaan kuin yksipuolisessa vedenpoistossa tasoviirarainaimella. Tasoviirakoneella paksuussuuntaista hienoainejakaumaa voidaan parantaa rauhallisella intiaalivedenpoistolla sekä yhtäjaksoisella vedenpoistolla. (Parker 1972; Ebeling 1986.)

9 Kosteus kartongissa

Puhuttaessa kosteudesta tarkoitetaan vesihöyryn määrää ilmassa (RitwalaWX 2015). Ilman suhteellinen kosteus taas kertoo, miten paljon ilmassa on vesihöyryä verraten siihen, kuinka paljon sillä hetkellä olevassa lämpötilassa voi maksimissaan olla vesihöyryä. Ilman suhteellinen kosteus ilmoitetaan prosentteina. Paperin ja kartongin kosteudella kuvataan neliömassan painohäviötä näytteestä, joka kuivataan vakio-olosuhteissa ($105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$) vakiopainoiseksi. (Kajanto & Niskanen 1998; Ilmatieteenlaitos 2014.)

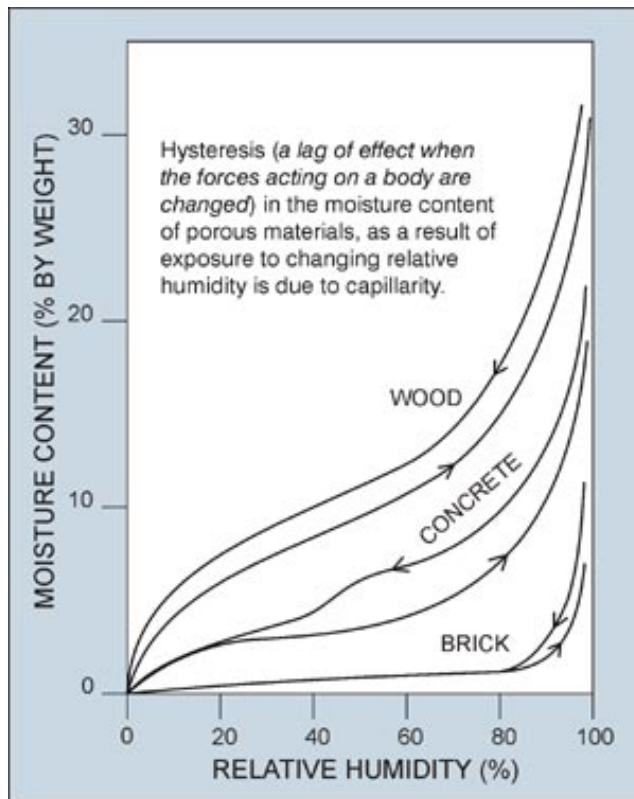
9.1 Kosteuspitoisuus

Kartongin kosteuspitoisuus riippuu ilman suhteellisesta kosteudesta sekä sen kuivatushistoriasta. Kosteuspitoisuus saadaan laskettua jakamalla absorboituneen veden määrä vakiopainoon kuivatetun kartongin neliömassalla. Paperin ja kartongin kosteus ja kosteuspitoisuus ilmoitetaan prosentteina. (Ebeling 1983; Kajanto & Niskanen 1998.)

Hystereesi

Kartongin kosteuspitoisuus on suurempi mentäessä kosteammista olosuhteista pienempään ilman suhteelliseen kosteuteen kuin mentäessä kuivista olosuh-

teista suurempaan ilman suhteelliseen kosteuteen (Kuvio 4). Tätä ilmiötä kutsutaan hystereesiksi. (Kajanto & Niskanen 1998.)



Kuvio 4. Hystereesi-ilmiö (Canadian Architect 2016)

Kuivatushistoria

Kun kartongissa olevat kuidut pääsevät kuivumaan, ketjumolekyylit lähenevät toisiinsa nähden synnyttäen ketjumolekyylien hydroksyyliyhmiin välisiä vetysidoksia, joista osa jää pysyviksi. Syntyneet vetysidokset estävät sen, ettei vesi enää pääse sitoutumaan näihin käytettyihin hydroksyyliyhmiin, jonka seurauksena kuitu ei pääse enää turpoamaan veden vaikutuksesta yhtä kuin aiemmin. Täten siis kartongin aiempi kuivatus vaikuttaa sen kosteuspitoisuuteen alentamalla sitä. (Ryti 1989.)

9.2 Kyllästymispiste

Kartongin kuivatushistoria vaikuttaa kartongin kyllästymispisteeseen samalla tavalla kuin sen kosteuspitoisuuteensa. Kyllästymispisteellä kuvataan sitä vesipitoisuutta, jossa kartonkia kuivattaessa kuitujen kaikki vapaa vesi on poistunut

samalla kuidun seinämiin adsorboituneen veden ja kapillaariveden ollessa jäljellä. (Ryti 1989.)

9.3 Tasapainokosteus

Puun tasapainokosteus on kutakin ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta vastaava tila, jossa puun kosteus pysyy vakiona (Puuinfo Oy 2016). Kartongin tasapainokosteus riippuu vallitsevista ilmasto-olosuhteista, käytetystä kuitulajista sekä kartongin kuituosuudesta. Mitä enemmän hygroskooppista kuitua on, sitä suurempi määrä vettä pääsee sitoutumaan kuituihin. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001.)

Tsoumis (1991) on todennut, että tasapainokosteutta määrittäessä hygroskooppiselle kiinteälle aineelle, kuten kartongille, materiaali tulee sijoittaa suljettuun tilaan, jossa vallitsee vakioidut ilmasto-olosuhteet (Suikkasen 2008, 10 mukaan).

10 Kosteuden vaikutus käyritykseen

Kosteus vaikuttaa lähes kaikkiin kartongin ominaisuuksiin. Vettä poistettaessa rainasta kartongin halutut lujuusominaisuudet, kuten vetojäykkyys, vetolujuus ja taivutusjäykkyys kasvavat samalla venymän pienentyessä. Kartonki käyristyy tai aaltoilee kuitujen muuttaessa mittojaan kosteuden takia sekä kartongin tasonsuuntaisen epätasaisuuden ja toispuolisen rakenteensa vaikutuksesta. Koska kosteus vaikuttaa suurella määrällä kartongin ominaisuuksiin, on suositeltavaa pitää vakioidut ilmasto-olosuhteet (50 % suhteellinen kosteus ja 23 °C lämpötila) niin kartongin valmistustiloissa kuin jatkojalostamoilla ja loppukäyttökohteisissä. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 80 – 81.)

10.1 Toispuolinen kostutus

Kartonki saattaa käyristyä myös toispuolisen kostutuksen vuoksi. Kostutettaessa kartonkia toispuoleisesti, kosteampi puoli turpoaa vastapuolta enemmän. Kuvuessaan kartongin kosteampi puoli lyhenee enemmän verrattuna vähemmän kostutettuun puoleen, jonka seurauksena enemmän kostutetusta puolesta tulee kupera aiheutuneen mittamuutoksen myötä. Kostutuslaitteita tulisikin säätää

siten, että kartongin molempien puolien kosteusarvo olisi sama kostuttajan jälkeen. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 87.)

10.2 Käyristymissuunta

Tasoviirakoneella valmistettu kartonki käyristyy kosteuden kasvaessa ylöspäin, sillä viirapuoli on enemmän orientoitunut ja täten laajenee poikkisuuntaansa nähden enemmän. Tämän lisäksi kartonki käyristyy aina viimeksi kostutetulle puolelleen, sillä kartongin eri puolille jää kosteuseroa. Kosteuden siirtyessä kartongin kosteammalta puolelta sen kuivemmalle puolelleen, kosteampi puoli kutistuu kuivuessaan ja kuivempi puoli laajenee. Tästä voi aiheutua ongelmia mm. päällystettäessä kartonkia yksipuoleisesti, jossa käyristymistä tapahtuu aina viimeiseksi päällystetylle puolelle. Tätä voidaan kylläkin ehkäistä kostuttamalla kartonkia päällystämättömältä puolelta päällystysten jälkeen. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 87.)

10.3 Mittapysyvyys

Kartongin kuitujen muuttaessa mittojaan kartonki käyristyy tai aaltoilee. Hyvä mittapysyvyys vähentää käyristymistä. Mittapysyvyys huononee mm. kuivumiskutistuman, kuituorientaation tai kuitusidosten määrän kasvaessa sekä anisotropian tai ominaisuuksien, kuten neliömassan ja kuituorientaation, epätasaisuuksien lisääntyessä. Kosteuden muuttuessa konesuuntaan orientoituneet kuidut pääsevät muuttamaan mittoja, eli kuidut turpoavat tai kutistuvat kosteuden vaikutuksesta, lähinnä paksuussuunnassaan. Kuitujen risteyskohdissa konesuuntaisten kuitujen mittamuutos pääsee vaikuttamaan poikkisuuntaisiin kuituihin, jonka seurauksena mittamuutokset pääsevät aiheutumaan eniten poikkisuuntaan nähden. Rainan sisäiset jännitykset muuttuvat rainan poikkisuunnassa, sillä rainan reunoilla syntyy kutistumaa. Lisäksi muualle rainaan syntyy ns. jähmettynyt venymä, kun raina on kiinnipainautuneena kuivatusviiraa vasten. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 80 – 81.)

10.4 Ilmastoitumisviat

Ilmastoitumisvikoja aiheuttaa ilmastointiolosuhteiden funktiona muuttuva vesipitoisuuden hystereesi-ilmiö, josta on kerrottu aiemmin luvussa 9.1, Kosteuspitoi-

suus. Kartongin vesipitoisuuden historia voi olla arkin eri kohdissa erilainen, jonka seurauksena arkin eri osissa vallitsee erilainen tasapainokosteus ja erilaiset sisäiset jännitykset. Joutuessaan tekemisiin kostean ilman kanssa kuivien arkkipinojen reunoille pääsee syntymään laajenemista ja suurempia mittamuutoksia verrattuna keskiosaan, jolloin reunat käyristyvät. (Ryti 1989.)

Lisäksi huonolla varastoinnilla on vaikutusta ilmastointivikojen syntymiseen. Kun kartonki tuodaan kylmästä varastosta lämpimään jalostuslaitokseen, ilma jäähtyy heti pakatun rullan pinnassa, jolloin sen suhteellinen kosteus kasvaa. Tämä voi aiheuttaa pahimmillaan kosteuden tiivistymistä kääreen sisälle kartonkirullan pintaan. Myös poistettaessa kääre rullan pintaosa pääsee kostumaan ja kartongin lämmitessä kostunut pinta kuivuu uudelleen, mutta jää kuitenkin kartongin muita osia kosteammaksi hystereesi-ilmiön takia. Varastoinnin vaikutuksesta kartongin käyristymiseen kerrotaan lisää luvussa 13, Varastoinnin vaikutus käyristymiseen. (Ryti 1989.)

10.5 Kuivumisviat

Kartongin kuivumisviat johtuvat kartongin osien kuivumisesta eri aikaan, jolloin kartongin eri osat saavuttavat myös kyllästymispistettä pienemmän vesipitoisuuden eri aikaan, jonka seurauksena kartonki myös kutistuu eri aikaan. Kuivumiskutistuman eriaikaisuus aiheuttaa kartongin poikkisuuntaan käyristymistä. Kuivumisviat aiheuttavat kartonkiin jähmettyneitä venymiä, jotka muodostavat valmiiseen kartonkiin kireitä tai löysiä kohtia, varsinkin rainan reunat ovat monesti löysempiä kuin rainan muut osat. Löysät reunat voidaan korjata tasaisen kosteusprofiilin avulla sekä pitämällä raina loppukuivatuksessa tarpeeksi kireällä ettei konesuuntaista kutistumaa pääse muodostumaan. (Ryti 1989.)

10.6 Epäsymmetrinen kuivatus

Käyristymistä voi tapahtua kartonkiin kuivatusosan johdosta esimerkiksi kun kartongin eri puolilla on eri kuiva-ainepitoisuus, mutta se kuivataan samoilla lämmöillä molemmilta puolin tai kun kartongin molemmilla puolilla on sama kuiva-ainepitoisuus, mutta kuivatusosan lopulla yläsylintereillä kuivataan eri lämmöillä kuin aläsyntereillä. Molemmissa tapauksissa kartongin toinen puoli jää yläsylinterin jälkeen kuivemmaksi kuin toinen puoli, jonka seurauksena kutistu-

mista pääsee tapahtumaan ja jonka takia toinen puoli jää myös lyhyemmäksi. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2001, 87.)

Matilainen (1992) on todennut, että alasynterin jälkeen kosteus kartonkien eri puolilla tasaantuu, mutta hystereesi-ilmiön seurauksena toinen puoli jää pysyvästi lyhyemmäksi, jonka seurauksena kartonki käyristyy lyhyemmälle puolelleen (Vainikka 2002, 48). Kuivatusryhmän lopussa voidaan tietenkin myös hallita käyristymistä kartongin ollessa kosteudeltaan toispuolista säätämällä ylä- ja alasyntereiden höyrypaineet ja lämmöt oikeanlaisiksi. (Matilainen 1992, Vainikan 2002, 48 mukaan.)

11 Ekstruusiopäällistyksen vaikutus käyristymiseen

Ekstruusiopäällistyslinja valkaistulle nestepakkauskartongille on tyypillisesti tandemkone, jossa on kaksi ekstruuderia, yksi molemmille puolille (Savolainen ym. 1998). Kartonkiin vaikuttavat prosessissa useat eri tekijät, jotka kasvattavat käyristymistäipumusta PE-päällistyksessä. Prosessissa esiintyy suuria lämpötilavaihteluita ja mekaanisia rasitteita lyhyessä ajassa. Myös käytetyn muovilaa-dun lämpölaajenemisella on vaikutusta käyristymisen aiheutumiselle ja taulukosta 2 nähdään polyeteenin lämpölaajenemisominaisuudet. Taulukosta nähdään myös veden absorptoitumisarvot sekä vesihöyryn läpäisevyysarvo polyteenille. (Bates & Marsella 1964; Jerdee 1999; Karhuketo ym. 2004.)

Ominaisuus	Yksikkö	Polymeerilaji	
		PE-LD	PE-HD
Ominaistilavuus	[ml/kg]	1091–1069	1061–1037
Läpäisevyys:	[cm ³ (NTP)/cm ² /s /mil/cm HC 10 ⁻⁸ 25°C]	-	-
– H ₂ O		420	60
– O ₂		15	3
– CO ₂		55	13
Veden imeytyminen	1/8" paksu, + 23 °C, % 24 h	<0,015	<0,01
Pakkaskestävyys	-	hyvä	hyvä
Lämmönjohtokyky	[W/m °C] 10 ⁻³	3,37	4,63–5,22
Lämpölaajeneminen	[°C] 10 ⁻⁵	16–18	1113

Taulukko 2. PELD:n ja PEHD:n ominaisuuksia (Håkan 1982)

Kuten luvussa 6.2, Esikäsitteily, on kerrottu, ekstruusioprosessia edeltää liekki-käsittely esikäsitteilyvaiheessa, jolla parannetaan polyeteenin adheesiokykyä kartonkiin. Lämpö tuodaan kartonkiin ja samalla kartongista haihtuu osa sen kosteudesta. Tämän seurauksena kutistumista tapahtuu kartonkiin. Liekkikäsitteilyn jälkeen desorptiokyky on vielä tallella kartongin molemmilla puolilla, mutta ensimmäisen ekstruuderin jälkeen kosteuden haihtumista pääsee tapahtumaan nopeasti PE-vapaalle puolelle, kun toista puolta suojaa samalla jo päällyste. Tämä aiheuttaa luonnollisesti toispuolisuutta kartonkiin ja näin myös käyristymistäipumus kasvaa. Toisen ekstruuderin jälkeen myös päällystämättömänä ollut puoli saa päällysteen, joka estää täten myös kyseisen puolen desorption. Tämän lisäksi polyeteenipäällysteen määrä vaihtelee pinnan ja taustan välillä, joka aiheuttaa eri vesihöyrynläpäisyarvot kartongin eri puolille, kuten luvussa 5.1, Matalatiheyksinen polyeteeni LDPE, on kerrottu. (Bezigan 1999.)

Niskanen 1987 on todennut, että kartongin paksuussuuntaiset kosteuspitouuserot tasoittuvat nopeasti, mutta koska kartongin molempia puolia ei ole käsitelty samanaikaisesti liekkikäsitelyssä ja ekstruusiopäälylystyksessä, desorptio- ja absorptioarvot eivät ole samanarvoiset kartongin eri puolilla (Pyrrön 2004, 36 mukaan).

Ekstruusiopäälylystysprosessissa kartongin eri puolille syntyvät eri absorptio- ja desorptioarvot aiheuttavat eriarvoista kutistumista ja lämpölaajenemista kartongin eri puolille. Tämä taas aiheuttaa toispuolisuutta kartongin eri puolille ja näin myös käyritymistä kartonkiin polyeteenipäälylytyksen jälkeen. Näiden lisäksi toispuolisuutta ja käyritymistä ekstruusiopäälylystyksessä aiheutuu kartongin päälylyttämisestä tiheydeltään erilaisella materiaalilla verrattuna kartonkiin, jonka seurauksena pintojen välinen tiheys saattaa muuttua. (Sahlstén 1996; Karhuketo ym. 2004.)

12 Rullien pakkaamisen vaikutus käyritymiseen

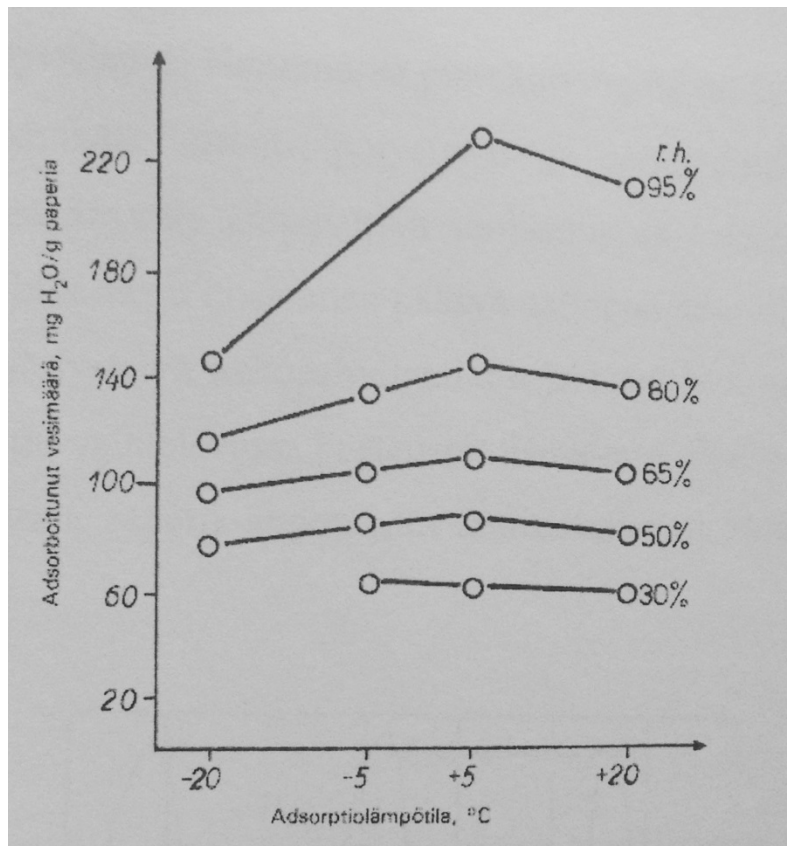
Kosteus vaikuttaa kartongin ominaisuuksiin aiheuttamalla mm. käyritymistä, kuten luvussa 10, Kosteuden vaikutus kartongin käyritymiseen, on kerrottu. Kosteuden muutokset aiheuttavat jännityksiä kartonkiin ja jännitysten lauetessa myöhemmin kosteuden vaikutuksesta, mittamuutoksia pääsee syntymään kartonkiin, joka aiheuttaa käyritymistä. (Kajanto & Niskanen 1998.)

Kartonkirullien oikeanlaisella pakkaamisella on tärkeä merkitys, jotta kosteus ei pääse vaikuttamaan kartonkiin valmistuksen jälkeen ja aiheuttamaan laatumuutoksia, kuten käyritymistä. Pakkauksen tehtävänä on suojata kartonkia kuljetuksen ja varastoinnin aikana kosteudelta, liialta, mekaanisilta vahingoilta ja pölyltä aina asiakkaalle saakka. Rullan pakkaukseen kuuluu vaippakääre, sisäpäätylaput sekä ulkopäätylaput. (Grönstrand ym. 2000; Häggblom-Ahnger & Komulainen 2001.)

Rullien pakkausten vaippakääreet ovat tavallisesti havupuusta valmistettua ruskeaa voimapaperia, joka on päälylytetty tai laminoitu kosteussulun aikaansaamiseksi. Päätylaput ovat yleensä monikerroksista aaltopahvia, joissa vähintään

pintakerros on valmistettu sulfaattisellusta. (Grönstrand ym. 2000; Häggblom-Ahnger & Komulainen 2001.)

Kuviosta 5 nähdään voimapaperin käyttäytyminen ympäröivän ilman olosuhteiden muuttuessa. Voimapaperin adsorptio kasvaa kun ilman suhteellinen kosteuskin kasvaa. (Ebeling 1983.)



Kuvio 5. Voimapaperin vesiadsorptio lämpötilan funktiona (Ebeling 1983)

13 Varastoinnin vaikutus käyritymiseen

Kartonkirullien varastoinnin aikana ilman suhteellinen kosteus muuttuu ulkoilman olosuhteiden myötä. Kartongin mekaaniset ominaisuudet ovat huomattavasti herkempiä muutoksille muuttuvassa ilman suhteellisessa kosteudessa verrattuna vakioituun ilman suhteelliseen kosteuteen. Ilman kosteus aiheuttaa jännityksiä kartonkiin, joka taas aiheuttaa käyritymistä, kuten luvussa 12, Rullien pakkaamisen vaikutus käyritymiseen, on kerrottu. (Haslach 1994.)

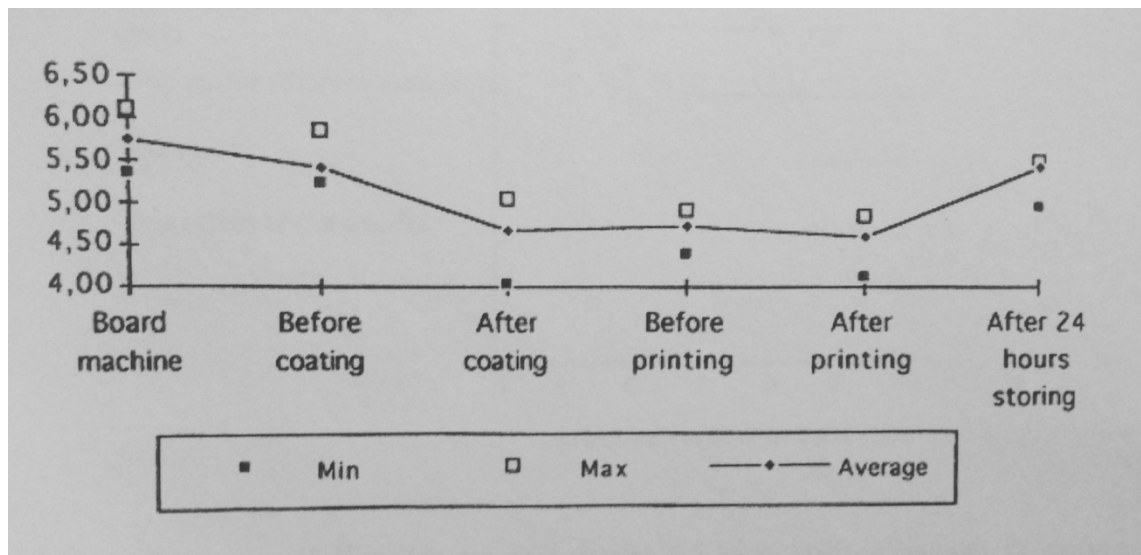
Varastot, joissa kartonkirullia säilytetään, ovat yleensä kylmiä ja niiden olosuhteet vastaavat ulkoilman olosuhteita. Talvella olosuhteet ovat kylmät ja ilman suhteellinen kosteus on matala. Tämä aiheuttaa sitkeyttä kartonkiin ja näin mahdollisia ongelmia kartongin käsittelyyn jatkojalostuksessa. (Waterhouse 1992; Haslach 1994.)

Rullien valmistuessa tuotannosta, ne pakataan heti lämpiminä vedenpitäviin pakkauksiinsa, jonka jälkeen rullat siirretään kylmiin varastoihin. Kartonkirullat alkavat luovuttaa kosteutta ja vesihöyry tiivistyy rullapakkauksen kaasutilan kylmiin osiin. Rullien jäähtyttyä varastossa useamman päivän, rulla sitoo yhä enemmän kosteutta itseensä. (Martikainen 2006.)

McCabe, Smith ja Harriot (2005) ovat todenneet, että kun rulla avataan kääreistään jatkojalostuslaitoksella tai asiakkaalla lämpimissä tehdasolosuhteissa, rullan pintaan tiivistyy kosteutta rullan pinnan läheisyydessä olevan ilman jäähtyessä (Suikkasen 2008, 36 mukaan).

Pidemmällä raakakartonkirullan varastoinnilla ennen ekstruusiopäällystystä voidaan vähentää kartongin käyristymistä jatkojalostuksen jälkeen. Kartongin kosteus muuttuu kartongin jalostuksen eri vaiheiden aikana. (Sahlstén 1996.)

Kuviossa 6 esitetään nestepakkauskartongin kosteuden vaihteluita kartongin jalostuksessa. Kuten kuvasta nähdään, kartongin kosteus pienenee ekstruusiopäällystyksen aikana, sillä päällystysprosessissa kosteutta haihtuu kartongista. Rullien käsittely varastoinnissa ja jalostuksessa olisi hyvä tehdä samoissa olosuhteissa laatuhaittojen ehkäisemiseksi. Käyristymistä voidaan lisäksi ehkäistä, jos annetaan rullien mukautta varastoinnin jälkeen jalostuslaitoksella ympäröivän ilman olosuhteisiin riittävän kauan. Tämä voi viedä jopa pari viikkoa talvella rullan ottamisesta jääkylmästä varastosta. (Sahlstén 1996; Cold reels 2003.)



Kuvio 6. Nestepakkauskartongin kosteuden muutokset kartongin jalostuksessa (Sahlstén 1996)

KOKEELLINEN OSA

14 Koeajosuunnitelma

Koeajo suoritettiin kartonkikone 4:lla Prime-laadulla, jonka jälkeen se päällystettiin kaksipuoleisesti polyeteenillä ekstruusiopäällystyksessä päällystyskone 3:lla. Kartongista otettiin poikkiratanäytteet sekä ennen päällystystä että päällystymisen jälkeen. Poikkiratanäytteet leikattiin molemmilla koneilla useiksi samankokoisiksi arkeiksi. Ennen ilmastointia näytearkit leikattiin laboratoriossa stanssilla samankokoisiksi pyöreiksi näytteiksi, jotka olivat halkaisijaltaan 113 mm. Stanssatut näytteet ilmastoitiin eri ilmasto-olosuhteissa ja niistä mitattiin käyritymiset. Lisäksi näytteet kuvattiin käyritymisen visuaalista havainnointia varten. Tämän jälkeen mittaustuloksia analysoitiin.

Erillinen ajo-ohjelma trimmitettiin koeajoa varten KA4:lla, joka otettiin käyttöön koeajon alussa. Koepisteisiin säädettiin pintakostuttajien vesimäärä ohjeen mukaisesti ja tausta2 kostuttajan vesimäärä säädettiin samassa suhteessa pinnan kanssa käyritymän pitämiseksi haluttuna. Tausta2 kostuttajan vesimäärä säädettiin 30 % suuremmaksi aina mitä pintakostuttajan vesimäärä oli. Koepisteet ajettiin tampoerien pintaan.

Koepisteet:

- KP1 (referenssi) normaali kostuttajien vesimäärä (pinta / tausta2): 3,0 / 4,1 g/m²
- KP 2: 1,5 / 2,2 g/m²
- KP 3: 4,5 / 5,85 g/m²
- KP 4: 6,5 / 8,45 g/m².

Raakakartonkirullien leveys oli 1800 mm ja niiden tilauskoodi oli K4W1-500088-001.

Raakakartonkirullat, joihin eri vesimäärät ajettiin, olivat:

- 14506495, josta on käytetty lyhennettä edellä työssä 6495
- 14506496 (6496)
- 14506497 (6497)
- 14506498 (6498).

Koepisteet ajettiin seuraavasti raakakartonkirulliin:

- KP1: 6495
- KP2: 6496
- KP3: 6497
- KP4: 6498.

Raakakartonkirullat (4 kpl), joihin ajettiin eri koepisteiden vesimäärät, leikattiin KA4:n pituusleikkurilla tietyn levyisiksi rulliksi ennen pe-päällystystä. Raakakartonkirullat leikattiin kolmeksi pienemmäksi rullaksi, joten päällystykseen meni tilaukselta K4W1-500088-001 yhteensä kaksitoista PE-päällystettävää rullaa, joiden tilauskoodi oli K4WW-500027-001. Työssä tutkittiin neljää eri PE-päällystetyn rullan muuttoa (mto), joista jokaiseen ajettiin eri koepisteiden vesi-

määrä kartonkikoneella. PE-päällystetyt rullat muuttoineen vastaavine koepisteineen olivat:

- KP1: 510504 (käytetty lyhennettä 504 edellä työssä), mto 1
- KP2: 503, mto 2
- KP3: 503, mto 1
- KP4: 505, mto 2.

15 Koeajon suoritus

Koeajo ja poikkiratanäytteidenotto KA4:lla suoritettiin aamupäivällä perjantaina 27.11.2015. Raakakartonkirullista, joita oli yhteensä neljä kappaletta, otettiin jokaisesta kolme sarjaa poikkiratanäytteitä, jotka leikattiin samankokoisiksi arkeiksi. Raakakartonkirullat, joihin on ajettu eri vesimäärät, päällystettiin päällystyskone 3:lla maanantaina aamupäivällä 7.12.2015. Päällystyskoneella PE-päällystetyistä rullista otettiin kaksi sarjaa poikkiratanäytteitä, jotka leikattiin samankokoisiksi arkeiksi.

15.1 Kostutinkoeajo

Kostutinkoeajo suoritettiin raakakartonkitilauksen K4W1-500088-001 rullille 6495, 6496, 6497 ja 6498. Rullien leveys oli 1800 mm. Erillinen ajo-ohjelma tehtiin koeajoa varten ja koneenhoitajat ottivat sen käyttöön koeajon alussa. Koeajossa käytettäviin rulliin ajettiin jokaiseen eri vesimäärä, jotka on selvitetty luvussa 14, Koeajosuunnitelma. Koepisteet ajettiin tampuurien pintaan. Koepisteisiin säädettiin pintakostuttajien vesimäärä ohjeen mukaisesti ja tausta2 kostuttajan vesimäärä säädettiin samassa suhteessa pinnan kanssa käyrityksen pitämiseksi haluttuna. Tausta2 kostuttajan vesimäärä säädettiin aina 30 % suuremmaksi kuin pintakostuttajan vesimäärä. Koneenhoitajat ottivat jokaisesta rullasta viisi rinnakkaista poikkiratanäytettä, jotka he leikkasivat samankokoisiksi näytearkeiksi. Liitteestä 1 nähdään vesimäärän muutokset pinnalle ja taustalle. Liitteestä 2 taas nähdään kalanterin käyttäytyminen koeajon aikana. Koeajon jälkeen koneenhoitajat laittoivat normaalin ajo-ohjelman päälle seuraavia rullia varten. Koeajossa kesti noin kolme tuntia. Koeajon jälkeen näytearkit siirrettiin pahvilaatikoihin ja säilytykseen varastoon odottamaan mittauksen tekemistä.

Koeajorullat leikattiin pituusleikkurilla kolmeksi pienemmäksi rullaksi kapeampaa päällystyskonetta varten. Rullien leveydeksi tuli 586 mm. Rullat pakattiin ja varastoitettiin, josta ne siirtyivät päällystyskone 3:lle päällystettäväksi.

15.2 Rullien päällystys

Kartonkikone 4:lta tulevat pakatut ja varastoidut rullat käsiteltiin päällystyskone 3:lla tilauskoodilla K4WW-500027-001. Raakakartonkirullia vastaavat päällystettävät rullat on lueteltu luvussa 14, Koeajosuunnitelma. Kartonki päällystettiin polyeteenillä molemmilta puoliltaan: pintapuolelle tuli 14 g/m² polyeteeniä ja taustapuolelle 25 g/m². Työntekijät ottivat jokaisesta raakakartonkirullaa vastaavasta PE-rullan muutosta kaksi rinnakkaista poikkiratanäytettä, jotka he leikkasivat samankokoisiksi näytearkeiksi. Päällystyksessä kesti noin neljä tuntia. Näytearkit siirrettiin pahvilaatikoihin ja toimitettiin tutkimuskeskukselle KA4:lla otettujen näytteiden kanssa odottamaan mittauksia.

16 Käyristymisen mittaus- ja analyysimenetelmä

Näytteiden ilmastoinnit ja mittaukset suoritettiin Stora Enson Tutkimuskeskuksella Imatralla 29.1. – 10.2.2016. Näytteitä ilmastoitiin vakiolämpötilassa, joka oli 23 °C. Ilman suhteellista kosteutta (RH, %) kuitenkin muuteltiin seuraavasti seuraavassa järjestyksessä: 50, 20, 35, 50, 70, 82 (max.), 70 ja 50. Näytteiden annettiin ilmastoitua aina vähintään vuorokausi ennen mittauksia ja kuvauksia seuraavaan kosteuteensa. Ilmastoinnilla haettiin sitä, miten näytteet reagoivat ja mahdollisesti käyristyvät eri ilman suhteellisissa kosteuksissa sekä sitä, kuinka ne palautuvat käyristymisiltään suhteellisen kosteuden palautuessa 50 %:iin suhteellisen kosteuden käydessä välissä matalampana sekä korkeampana.

Mittauksiin kuului käyryyksien mittauksen lisäksi näytteiden kuvaaminen visuaalisen havainnoinnin mahdollistamiseksi. Mittaustulokset koottiin taulukoihin (Liite 3).

Näytearkeista valittiin mitattavaksi ja analysoitavaksi poikkiradan keskimmäiset näytearkit. Raakakartonkiarkeista otettiin tutkittavaksi kolme rinnakkaista näytettä viidestä ja päällystetyistä arkeista otettiin tutkittavaksi kaikki, eli kaksi rinnak-

kaista näytettä. Koeajojen kartonkiarkkinäytteet stanssattiin pyöreiksi näytteiksi, joihin merkattiin konesuunta, rullan numero ja mahdollinen muuttonumero sekä nurkat numeroitiin.

Ilmastointi

Stanssatut näytteet aseteltiin ilmastointikaapin hyllyille riviin siten, että ne eivät olleet kiinni toisissaan. Ensin kaappi säädettiin suhteelliseen ilmankosteuteen (RH) 50 % ja näytteet jätettiin ilmastoitumaan kyseiseen olosuhteeseen viikonlopun yli. Ilmastoitumisen jälkeen näytteet tutkittiin, mitattiin ja kuvattiin, jonka jälkeen näytteet taas aseteltiin ilmastointikaapin hyllyille. Kaappi säädettiin seuraavaan olosuhteeseensa sovitun järjestyksen mukaisesti ja näytteet jätettiin ilmastoitumaan seuraavaan päivään asti, jonka jälkeen mittaukset ja kuvaukset taas suoritettiin. Sama toistettiin, kunnes näytteet olivat ilmastoitu kaikissa halutuissa ilmasto-olosuhteissa, jonka jälkeen kaapista suljettiin virrat ja näytteet vietiin pois säilytettäväksi mahdollisia lisätutkimuksia varten. Kuvassa 22 nähdään ilmastointikaappi sisältäpäin. Vasemmalla kuvassa on hyllyt, joissa näytteet olivat ilmastointien aikana ja oikealla on pöytä, jossa käyristymät mitattiin ja näytteet kuvattiin.



Kuva 22. Ilmastointikaappi

Mittausmenetelmä

Käyryyden mittaukseen ei käytetty mitään standardoitua menetelmää, vaan käytettiin samaa menetelmää, mitä työntekijät käyttävät stanssattujen näytteiden käyryyden mittaukseen. Käyryyden mittaukset suoritettiin katkaistulla viivaimella, joka alkaa suoraan arvosta nolla. Pyöreistä näytteistä mitattiin vastakkaiset nurkat siitä kohtaa, mistä kohtaa näyte oli eniten käyristynyt. Käyryydet mitattiin pöydällä olevista näytteistä laittamalla viivain pystysuunnassa pöytää vasten näytteen käyristyneen nurkan viereen. Tulokset kirjattiin taulukoihin (Liite 3 ja 4).

Näytteiden kuvaaminen

Kun näytteet oli mitattu, näytteet kuvattiin siten, että näytteen kameraan päin olevan käyristyneen nurkan varjo näkyi kuvissa hyvin ilmentäen käyristymän

suuruutta. Käyritymien vastakkaiset nurkat eivät myöskään varjot luonnollisesti näy kuvissa. Näytteet on asetettu kuviin konesuunta oikeaan suuntaansa, joten kuvat havainnollistavat myös käyritymän suuntaa, oli se sitten konesuuntaista, poikkisuuntaista tai diagonaalista käyritymistä. Yhteen kuvaan otettiin vertailun vuoksi kaksi rinnakkaista näytettä. Kuvat ovat liitteessä 5.

17 Tulokset

Käyritymien tulokset taulukoitiin jokaisen ilmastoinnin jälkeen (Liite 3). Taulukoihin tulivat näytteiden käyritymät suuntineen ja jokaisessa taulukossa on mukana ympyräkuviot havainnollistamassa käyritymien suuntia numeroiden avulla ja siihen on merkattu konesuunta samalla tavalla, kuinka se merkattiin stanssattuihin näytteisiin. Jos käyritymä oli konesuuntaista, taulukkoon merkattiin vastakkaisen nurkkien käyritymät kohtiin 1 ja 2. Käyritymän ollessa poikkisuuntaista, vastakkaisen nurkkien käyritymät merkattiin taulukkoon kohtiin 3 ja 4. Käyritymän ollessa diagonaalista käyritymistä, vastakkaisen nurkkien käyritymät merkattiin kohtiin 2 – 3 ja 1 – 4 tai 1 – 3 ja 2 – 4. Näytteissä ilmeni kaikkia muita edellä mainittuja käyritymiä, paitsi 1 – 3 ja 2 – 4 suuntaista käyritymää. Kaikissa tapauksissa käyritymien arvot olivat > 0 , eli näytteiden nurkat kääntyivät ylöspäin.

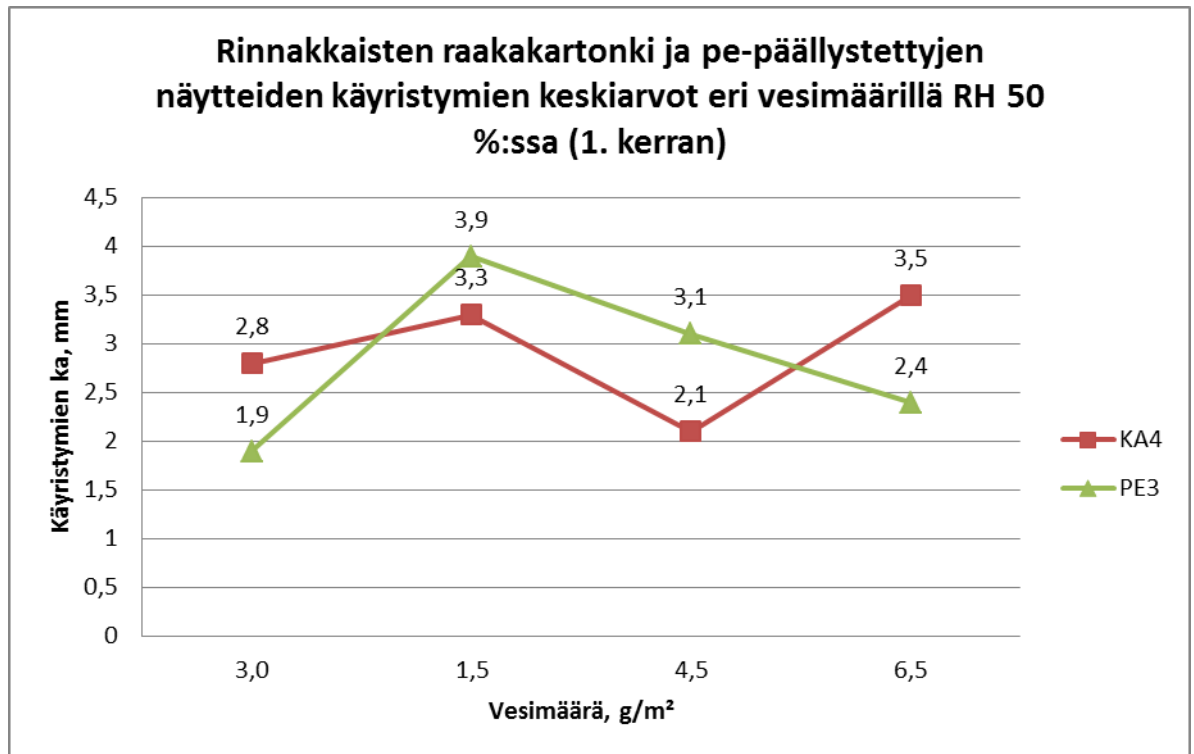
Taulukkoon merkattiin lisäksi näytteiden koepisteet pinnan ja taustan vesimäärineen sekä käyritymien keskiarvot. Käyritymän keskiarvolla tarkoitetaan yhden rullan tai rullan muuton rinnakkaisten näytteiden vastakkaisen nurkkien yhteenlaskettujen käyritymien keskiarvoa.

17.1 Ilmastoinnin tulokset

RH 50 % (1. kerran)

Liitteen 3 taulukosta 3 nähdään ensimmäisen kerran suhteellisessa kosteudessa RH 50 %:ssa ilmastoitujen näytteiden käyritymät suuntineen sekä käyritymien keskiarvot. Kuviossa 7 on vertailtu raakakartonkinäytteiden käyritymistä päällystetyn kartongin käyritymiseen eri vesimäärissä ensimmäisen kerran RH 50 %:ssa. Referenssillä eli vesimäärällä $3,0 \text{ g/m}^2$ päällystetyssä näytteessä il-

meni vähemmän käyristymää kuin päällystämättömällä näytteellä, mutta koepisteillä 2, 3 ja 4 käyristymää ilmeni vähemmän raakakartonkinäytteissä kuin päällystetyissä näytteissä. Päällystetyistä näytteistä käyristymä oli pienintä referenssillä eli koepisteessä 1 ja raakakartonkinäytteillä käyristymä oli vähäisintä koepisteessä 3, eli vesimäärällä 4,5 g/m². Sekä päällystämättömällä että päällystetyillä näytteillä käyristymien vaihtelut olivat suhteellisen pieniä eri vesimäärillä.

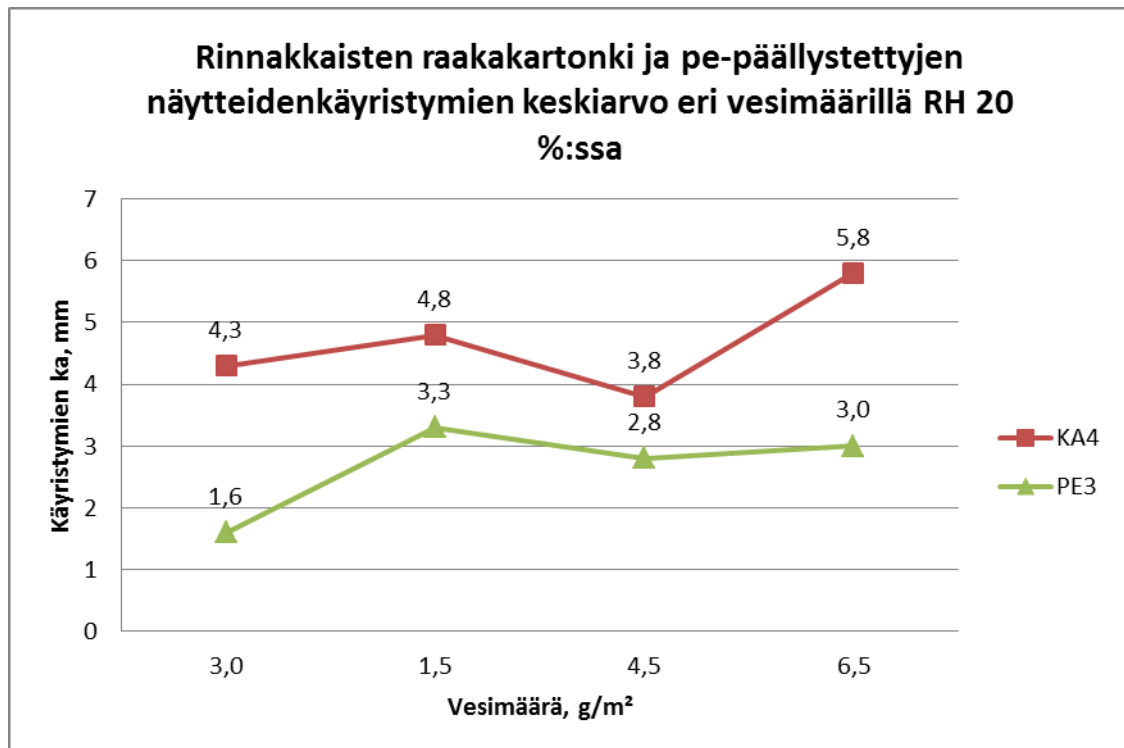


Kuvio 7. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päällystettyjen näytteiden käyristymien keskiarvot eri vesimäärillä 1. kerran RH 50 %:ssa

RH 20 %

Liitteen 3 taulukosta 4 nähdään suhteellisessa kosteudessa RH 20 %:ssa ilmastoitujen näytteiden käyristymät suuntineen sekä käyristymien keskiarvot. Kuviossa 8 on vertailtu raakakartonkinäytteiden käyristymistä päällystetyn kartongin käyristymiseen eri vesimäärissä RH 20 %:ssa. Jokaisessa koepisteessä päällystetyillä näytteillä on ilmennyt vähemmän käyristymää verrattuna päällystämättömiin näytteisiin. Päällystetyillä näytteillä käyristymä oli pienintä referenssillä eli koepisteessä 1 ja raakakartonkinäytteillä käyristymä oli vähäisintä koepis-

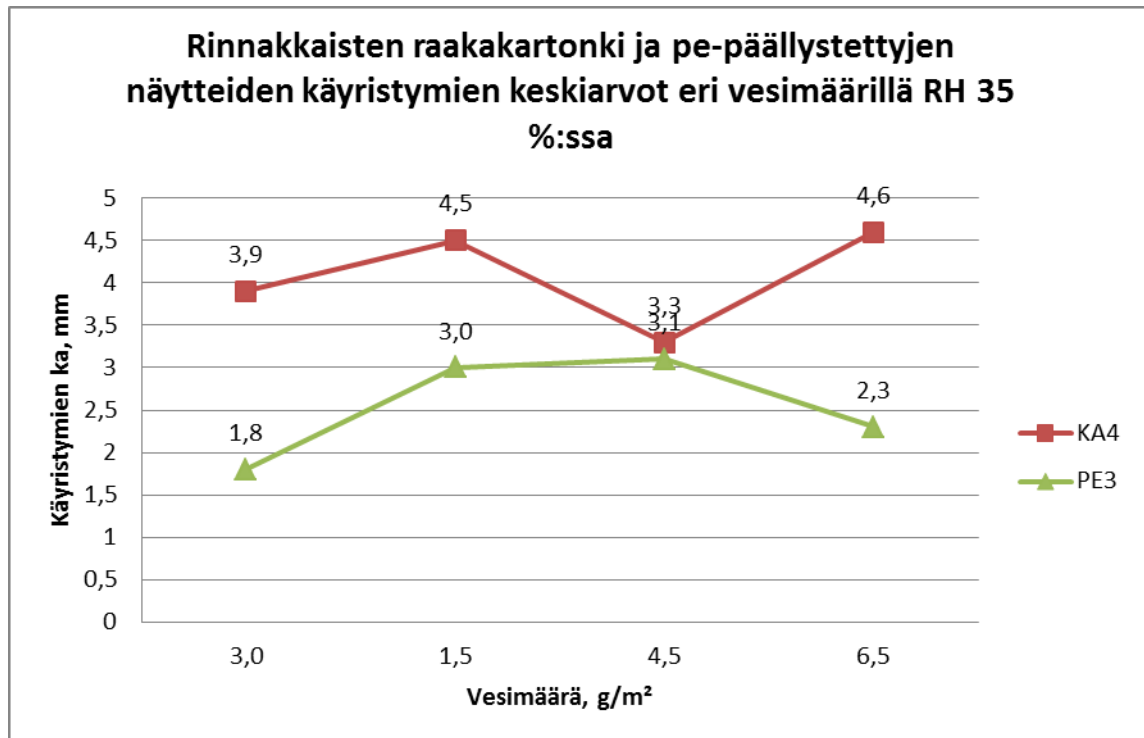
teessä 3, eli vesimäärällä 4,5 g/m². Sekä päällystämättömillä että päällystetyillä näytteillä käyristymien vaihtelut olivat suhteellisen pieniä eri vesimäärillä.



Kuvio 8. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päällystettyjen näytteiden käyristymien keskiarvot eri vesimäärillä RH 20 %:ssa

RH 35 %

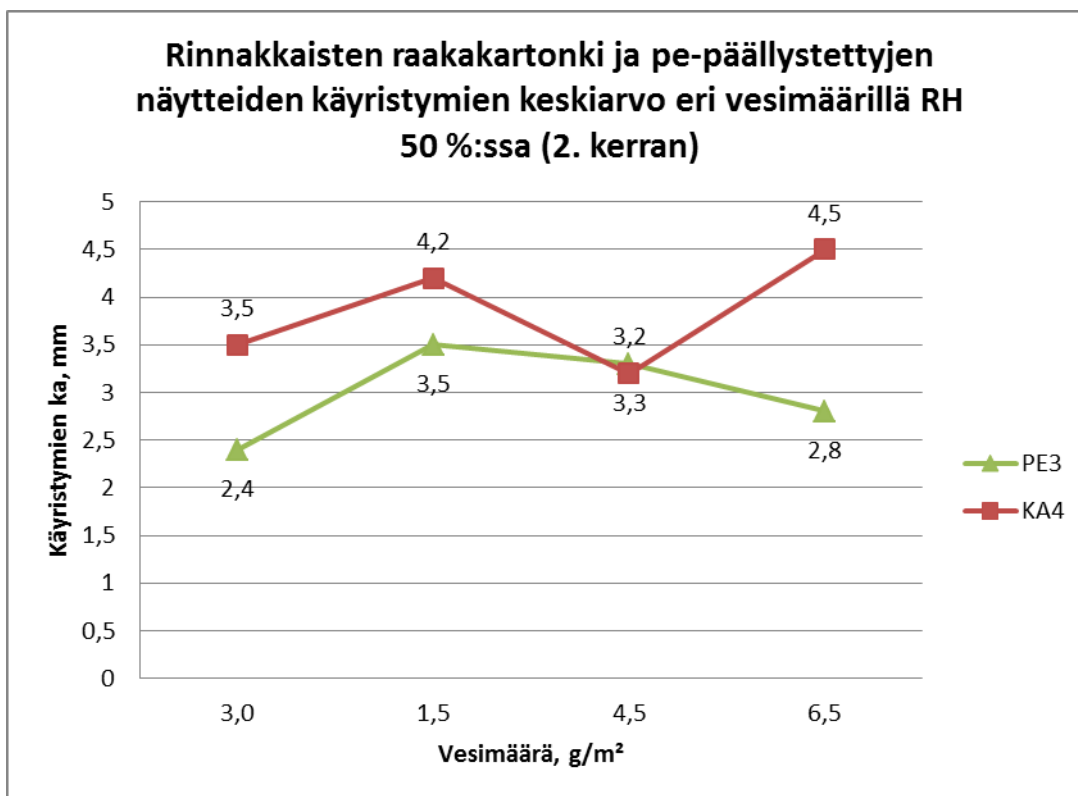
Liitteen 3 taulukosta 5 nähdään suhteellisessa kosteudessa RH 35 %:ssa ilmasoitujen näytteiden käyristymät suuntineen sekä käyristymien keskiarvot. Kuviossa 9 on vertailtu raakakartonkinäytteiden käyristymistä päällystetyn kartongin käyristymiseen eri vesimäärissä RH 35 %:ssa. Jokaisessa koepisteessä päällystetyillä näytteillä oli vähemmän käyristymää verrattuna päällystämättömiin näytteisiin. Päällystetyillä näytteillä käyristymä oli pienintä referenssillä eli koepisteessä 1 ja raakakartonkinäytteillä käyristymä oli alhaisinta koepisteessä 3, eli vesimäärällä 4,5 g/m². Sekä päällystämättömillä että päällystetyillä näytteillä käyristymien vaihtelut olivat melko pieniä eri vesimäärillä.



Kuvio 9. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päällystettyjen näytteiden käyritymien keskiarvot eri vesimäärillä RH 35 %:ssa

RH 50 % (2. kerran)

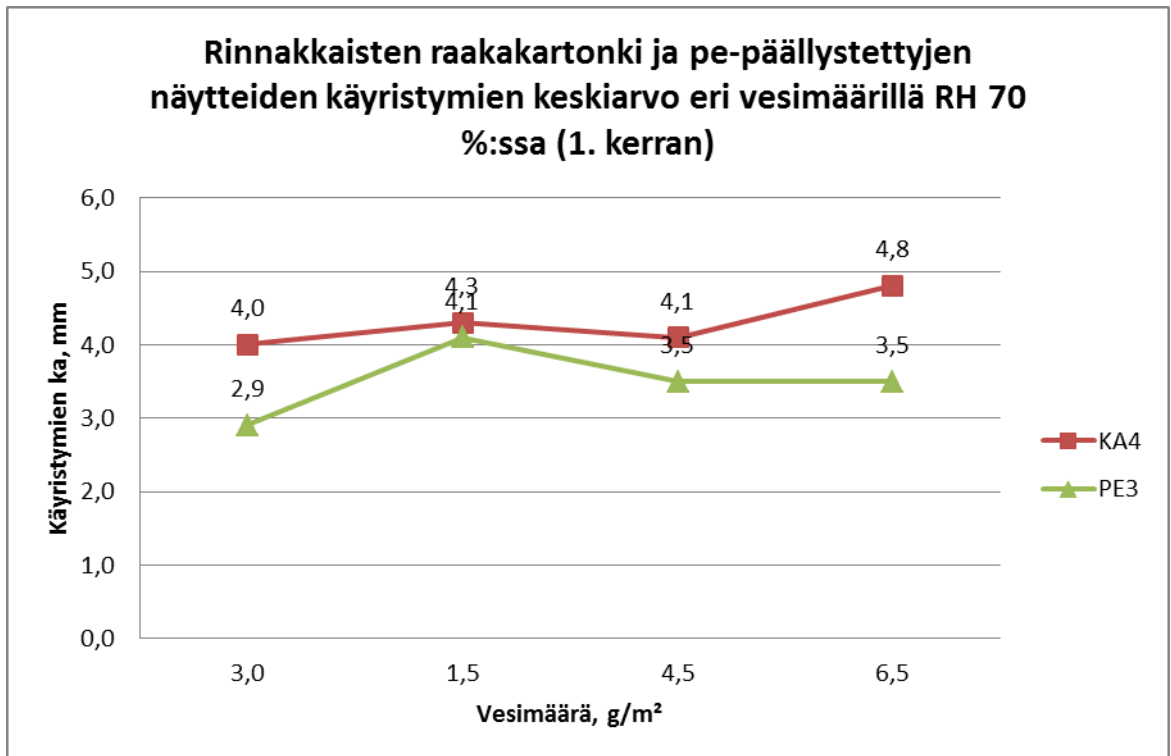
Liitteen 3 taulukosta 6 nähdään toisen kerran suhteellisessa kosteudessa RH 50 %:ssa ilmastoitujen näytteiden käyritymät suuntineen sekä käyritymien keskiarvot. Kuviossa 10 on vertailtu raakakartonkinäytteiden käyritymistä päällystetyn kartongin käyritymiseen eri vesimäärissä toisen kerran RH 50 %:ssa. Koepisteissä 1, 2 ja 4 päällystetyillä näytteillä ilmeni vähemmän käyritymää kuin päällystämättömällä näytteellä ja koepisteessä 3 päällystämättömällä näytteellä oli vähiten käyritymää, kuitenkin käyritymä oli lähes sama kuin päällystetyillä näytteillä. Päällystetyillä näytteillä käyritymä oli pienintä referenssillä eli koepisteessä 1 ja raakakartonkinäytteillä käyritymä oli vähäisintä koepisteessä 3, eli vesimäärällä 4,5 g/m². Sekä päällystämättömällä että päällystetyillä näytteillä käyritymien vaihtelut olivat melko pieniä eri vesimäärillä.



Kuvio 10. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päällystettyjen näytteiden käyritysten keskiarvot eri vesimäärillä 2. kerran RH 50 %:ssa

RH 70 % (1. kerran)

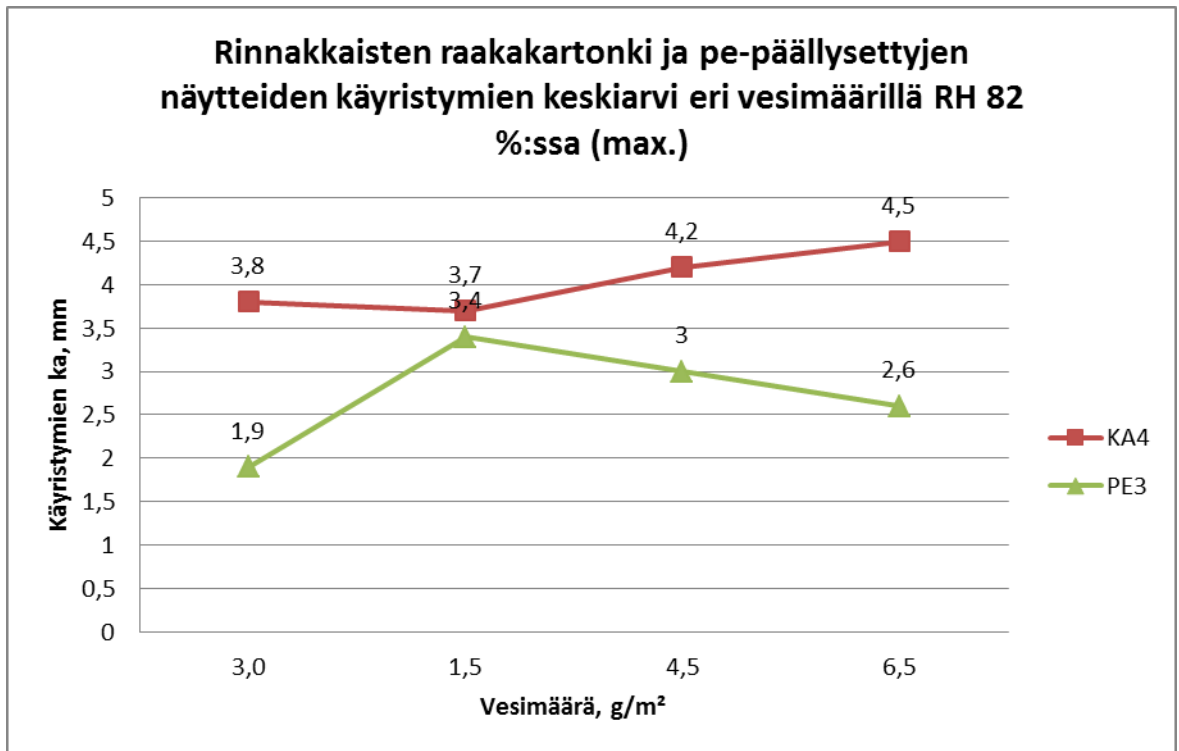
Liitteen 3 taulukosta 7 nähdään ensimmäisen kerran suhteellisessa kosteudessa RH 70 %:ssa ilmastoitujen näytteiden käyritykset suuntineen sekä käyritysten keskiarvot. Kuviossa 11 on vertailtu raakakartonkinäytteiden käyritystä päällystetyn kartongin käyritykseen eri vesimäärissä ensimmäisen kerran RH 70 %:ssa. Jokaisessa koepisteessä päällystetyillä näytteillä ilmeni vähemmän käyritystä verrattuna päällystämättömiin näytteisiin. Päällystetyillä näytteillä käyritymä oli pienintä referenssillä eli koepisteessä 1 ja raakakartonkinäytteillä käyritymä oli alhaisinta koepisteessä 3, eli vesimäärällä 4,5 g/m². Sekä päällystämättömillä että päällystetyillä näytteillä käyritysten vaihtelut olivat todella pieniä eri vesimäärillä.



Kuvio 11. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päällystettyjen näytteiden käyritysten keskiarvot eri vesimäärillä 1. kerran RH 70 %:ssa

RH 82 % (max.)

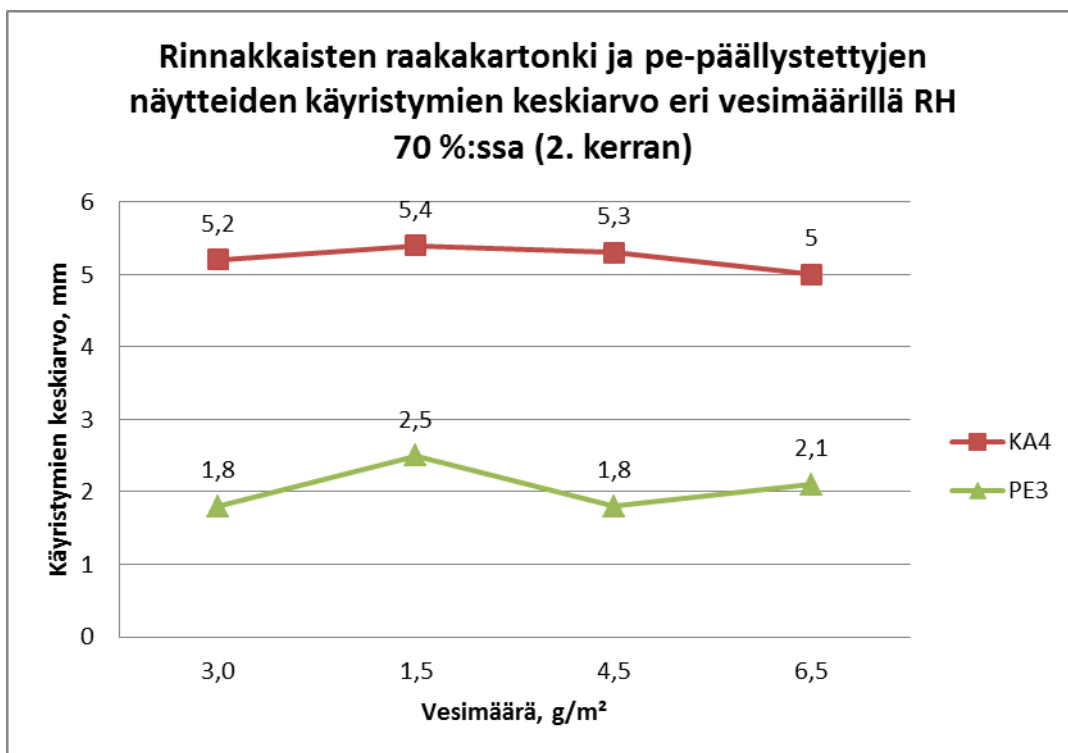
Liitteen 3 taulukosta 8 nähdään maksimi suhteellisessa kosteudessa, eli RH 82 %:ssa ilmastoitujen näytteiden käyritysmät suuntineen sekä käyritysten keskiarvot. Kuviossa 12 on vertailtu raakakartonkinäytteiden käyritysmistä päällystetyn kartongin käyritymiseen eri vesimäärissä RH 82 %:ssa. Jokaisessa koepisteessä päällystetyillä näytteillä oli vähemmän käyritysmää verrattuna päällystämättömiin näytteisiin. Päällystetyillä näytteillä käyritysmä oli pienintä referenssillä eli koepisteessä 1 ja raakakartonkinäytteillä käyritysmä oli alhaisinta koepisteessä 2, eli vesimäärällä 1,5 g/m². Sekä päällystämättömillä että päällystetyillä näytteillä käyritysmien vaihtelut olivat melko pieniä eri vesimäärillä.



Kuvio 12. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päällystettyjen näytteiden käyritysmien keskiarvot eri vesimäärillä RH 82 %:ssa (max.)

RH 70 % (2. kerran)

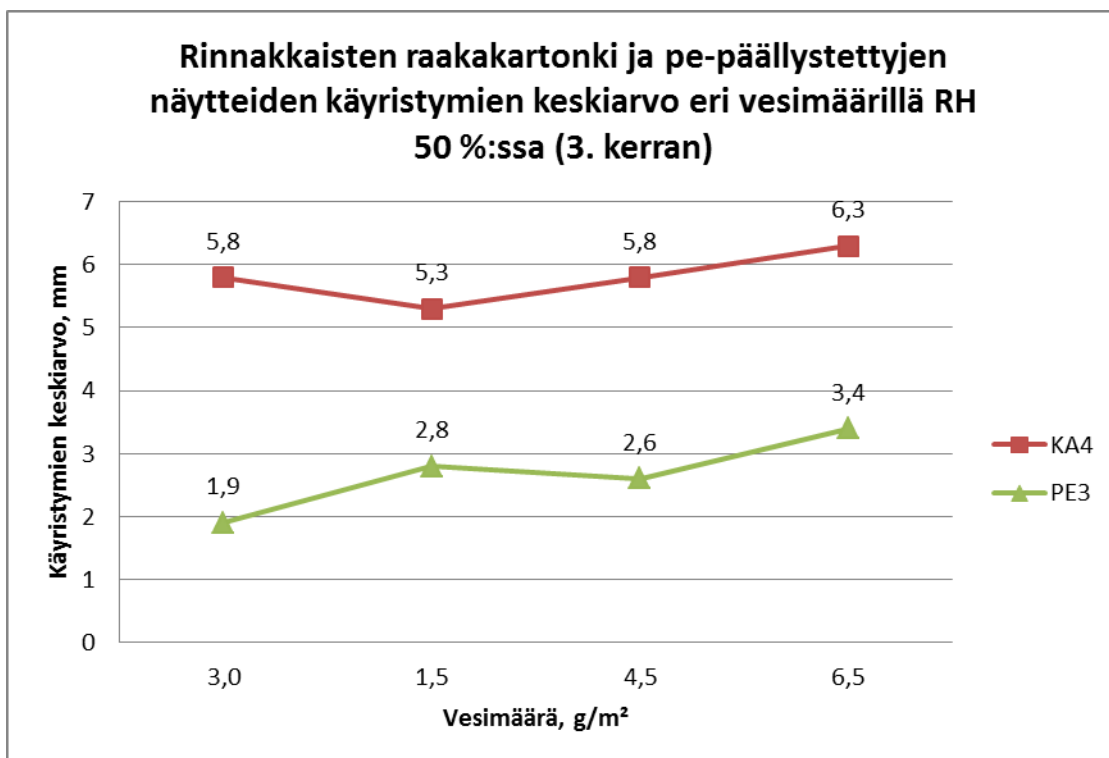
Liitteen 3 taulukosta 9 nähdään toisen kerran suhteellisessa kosteudessa 70 % ilmastoitujen näytteiden käyritysmät suuntineen sekä käyritysmien keskiarvot. Kuviossa 13 on vertailtu raakakartonkinäytteiden käyritysmistä päällystetyn kartongin käyritymiseen eri vesimäärissä toisen kerran RH 70 %:ssa. Jokaisessa koepisteessä päällystetyillä näytteillä oli vähemmän käyritysmää verrattuna päällystämättömiin näytteisiin. Päällystetyillä näytteillä käyritysmä oli pienintä sekä referenssillä että koepisteessä 3 ja raakakartonkinäytteillä käyritysmä oli alhaisinta koepisteessä 4. Päällystämättömillä näytteillä käyritysmien vaihtelut olivat kuitenkin lähes olemattomia eri vesimäärillä, eikä päällystetyillä näytteilläkään käyritysmän vaihtelut olleet kovin suuria.



Kuvio 13. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päällystettyjen näytteiden käyritysten keskiarvot eri vesimäärillä 2. kerran RH 70 %:ssa

RH 50 % (3. kerran)

Liitteen 3 taulukosta 10 nähdään kolmannen kerran suhteellisessa kosteudessa 50 % ilmastoitujen näytteiden käyritykset suuntineen sekä käyritysten keskiarvot. Kuviossa 14 on vertailtu raakakartonkinäytteiden käyritystä päällystetyn kartongin käyritykseen eri vesimäärissä kolmannen kerran RH 50 %:ssa. Jokaisessa koepisteessä päällystetyillä näytteillä oli vähemmän käyritystä verrattuna päällystämättömiin näytteisiin. Päällystetyillä näytteillä käyrityksessä oli pienintä referenssillä, kun taas raakakartonkinäytteillä käyrityksessä oli alhaisinta koepisteessä 2. Päällystämättömillä näytteillä käyritysten vaihtelut olivat lähes olemattomia eri vesimäärillä, eikä päällystetyillä näytteilläkään käyrityksen vaihtelut olleet kovin suuria.



Kuvio 14. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päällystettyjen näytteiden käyristymien keskiarvot eri vesimäärillä 3. kerran 50 %:ssa

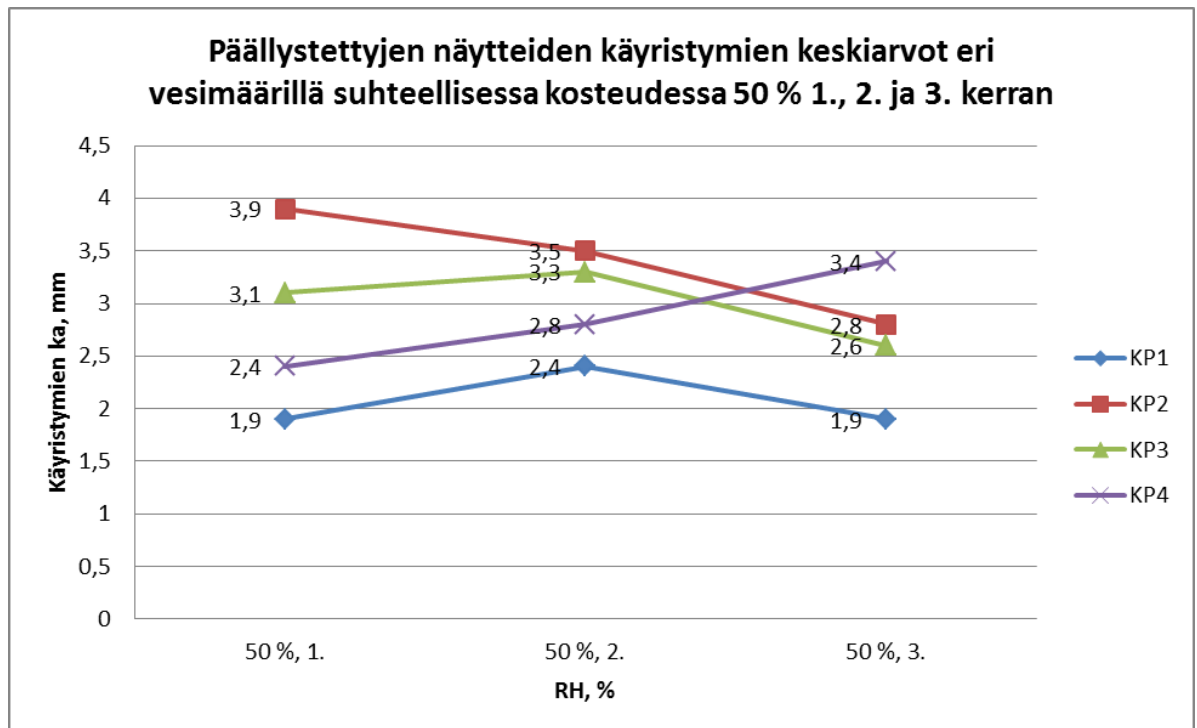
17.2 Ilmastoinnin tulosten arviointi

Raakakartonkinäytteitä ja päällystettyjä näytteitä vertailemalla huomataan päällysteellä olevan pienentävä vaikutus käyristymiseen lähes poikkeuksetta kaikilla eri kostuttajan vesimäärillä. Pääasiassa päällystetyillä näytteillä käyristymä oli pienintä referenssillä: seitsemässä olosuhteesta kahdeksasta käyristymä oli pienintä referenssillä ja yhdessä olosuhteessa käyristymä oli referenssillä samansuuruisista koepisteistä 3 kanssa. Raakakartongilla käyristymä oli pienintä neljässä ilmasto-olosuhteesta koepisteellä 3 ja neljässä olosuhteesta käyristymän vaihtelu oli todella pientä.

Päällystetyillä kartongilla kuudessa ilmasto-olosuhteesta kahdeksasta käyristymä oli suurinta pienimmällä vesimäärällä, eli koepisteellä 2 ja päällystämättömällä kartongilla seitsemässä ilmasto-olosuhteesta kahdeksasta käyristymä oli suurinta vesimäärällä 6,5 g/m², eli koepisteellä 4.

Ilmastoinnin tarkoituksena oli myös seurata, kuinka päällystetyt näytteet palautuvat vakio ilman suhteelliseen kosteuteen, eli 50 %:iin kosteuden käydessä

välissä korkeammalla sekä matalammalla. Kuviosta 15 nähdään päällystettyjen näytteiden käyritymien keskiarvot eri vesimäärillä vakio ilman suhteellisessa kosteudessa, kun ilmastoitiin kyseisessä olosuhteessa 1., 2. ja 3. kerran. Referenssillä palautuminen tapahtui hyvin: käyritymän vaihtelu oli vain 0,5 mm:ä yhteensä. Koepisteellä 2 käyritymä pieneni jokaisen ilmastoinnin jälkeen, vaihtelu oli yhteensä kuitenkin vain 1,1 mm:ä. Koepisteellä 3 palautuminen tapahtui onnistuneesti ja vaihtelu oli vain 0,5 mm:ä yhteensä. Koepisteellä 4 Käyritymä kasvoi ilmastointien myötä, mutta vaihtelu oli kuitenkin yhteensä vain 1,0 mm:ä.



Kuvio 15. Päällystettyjen näytteiden käyritymien keskiarvot eri vesimäärillä RH 50 % 1., 2. ja 3. kerran

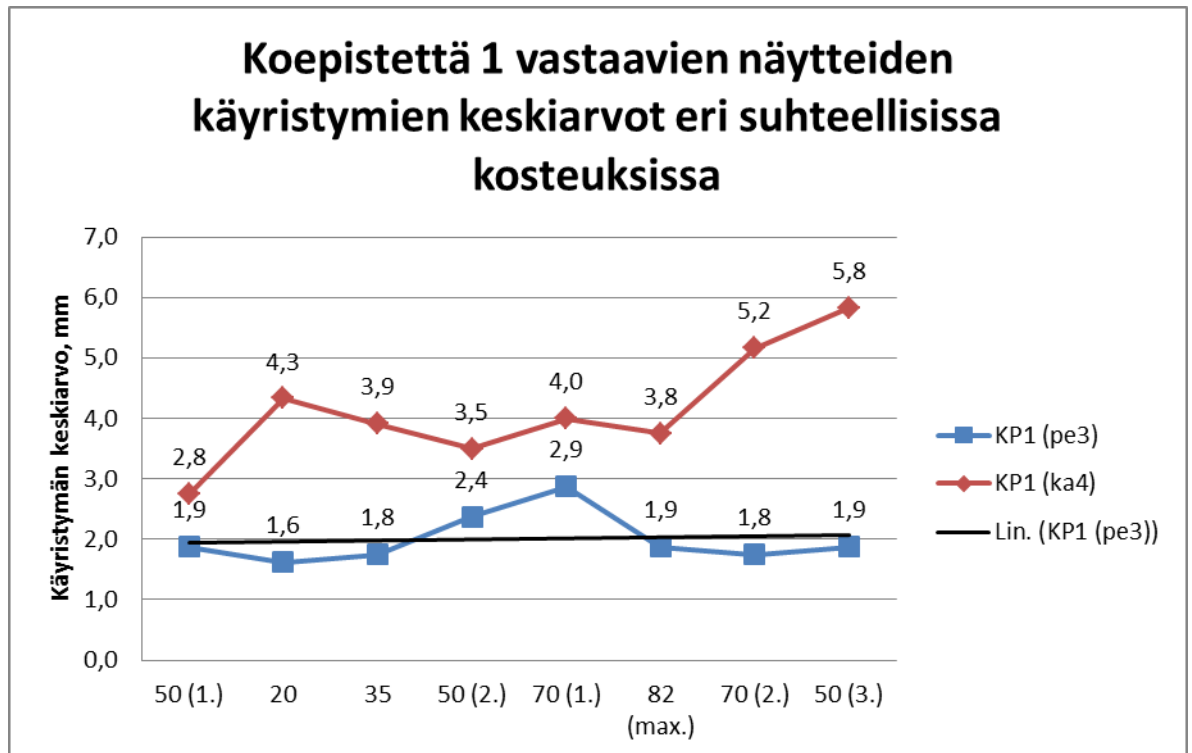
17.3 Tulokset koepisteittäin

Liitteessä 4 on kaikkia koepisteitä vastaavien päällystämättömien ja päällystettyjen rullien muuttojen käyritymien keskiarvot kaikissa eri ilmasto-olosuhteissa, joissa näytteitä työssä ilmastoitiin.

KP1

Kuviossa 16 on vertailtu koepistettä 1 vastaavien näytteiden käyritymiä toisiinsa eri ilman suhteellisissa kosteuksissa. Käyritymä on alhaisempaa kaikissa

kosteuksissa päällystetyllä kartongilla verrattuna päällystämättömään kartonkiin. Päällystämättömällä kartongilla kartongin käyristymä oli suurinta kosteuden ollessa kolmannen kerran 50 % ja pienintä sen ollessa ensimmäisen kerran 50 % kun taas päällystetyn kartongin käyristymän vaihtelu oli hyvin pientä koko ilmastoinnin ajan.

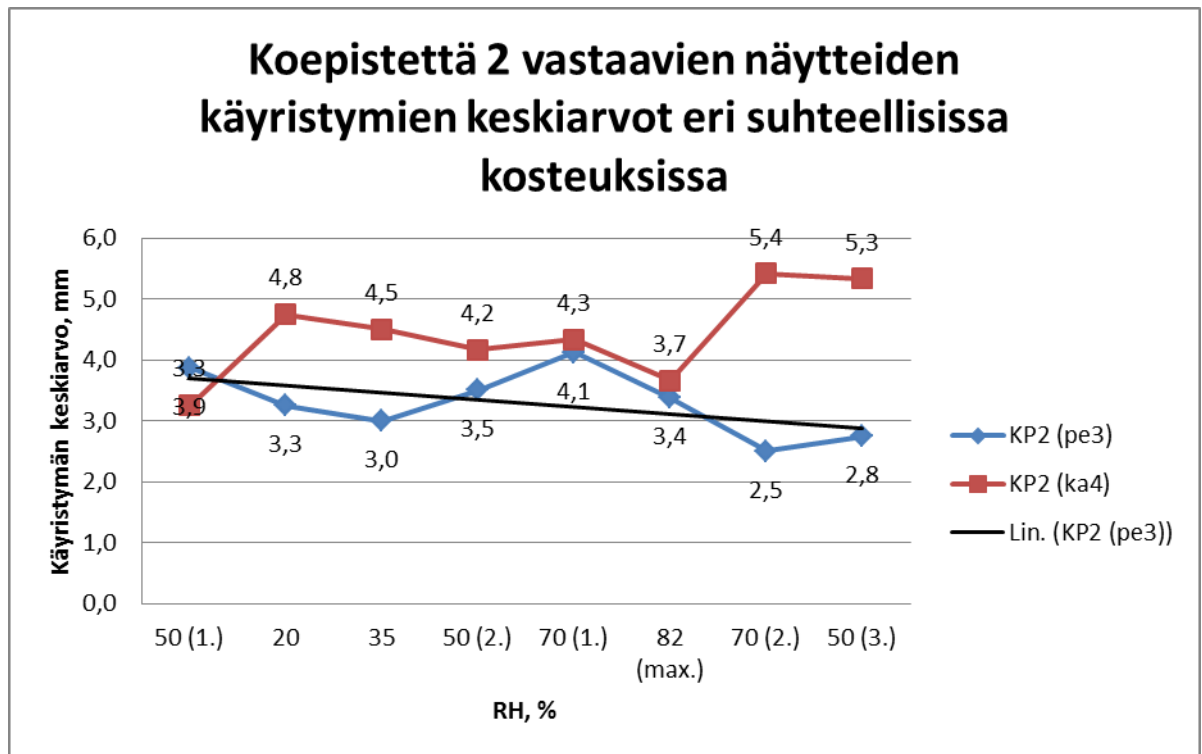


Kuvio 16. Koepistettä 1 vastaavien näytteiden käyristymien keskiarvot eri suhteellisissa kosteuksissa

KP2

Kuviossa 17 on vertailtu koepistettä 2 vastaavien näytteiden käyristymiä toisiinsa eri ilman suhteellisissa kosteuksissa. Käyristymä on pääasiassa alhaisempaa eri kosteuksissa päällystetyllä kartongilla verrattuna päällystämättömään kartonkiin. Suhteellisessa kosteudessa 50 % (1. kerran) käyristymä oli hieman suurempaa päällystetyllä kartongilla kuin päällystämättömällä kartongilla. Päällystämättömällä kartongilla kartongin käyristymä oli suurinta kosteuden ollessa kolmannen kerran 50 % ja pienintä sen ollessa ensimmäisen kerran 50 % kun taas päällystetyn kartongin käyristymän vaihtelu oli pientä koko ilmastoinnin

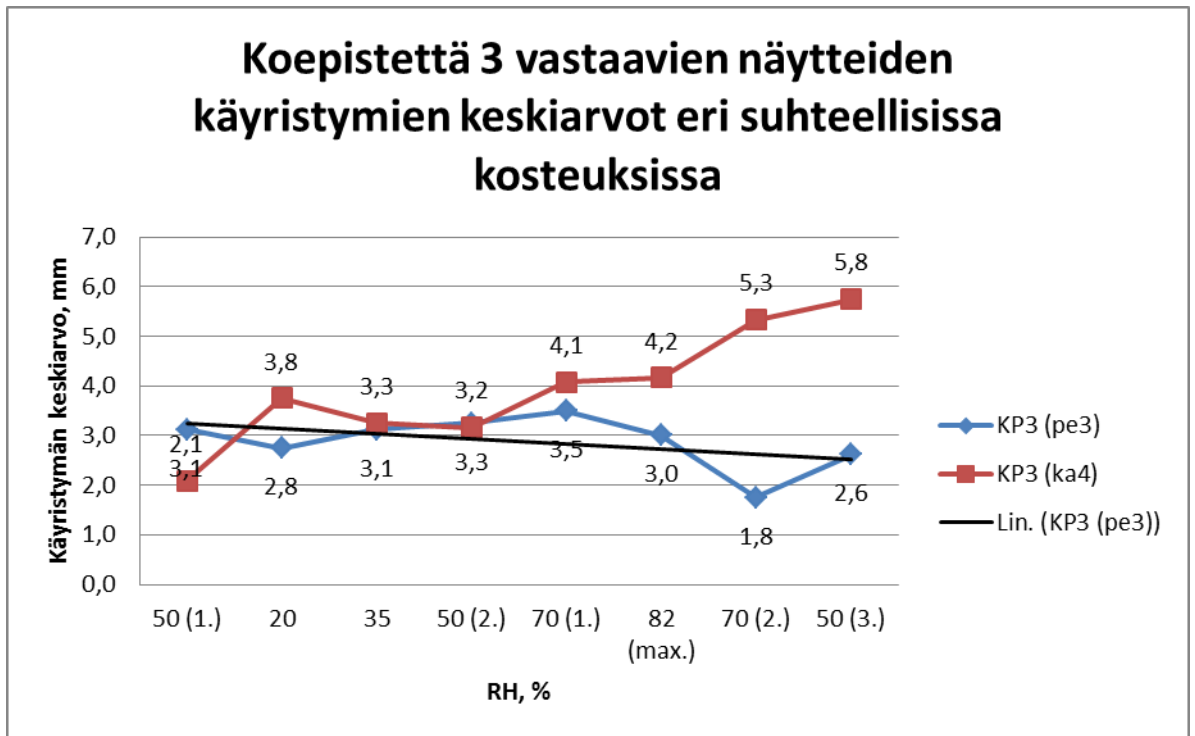
ajan, kahden viimeisen ilmastoinnin jälkeen käyristymä pieneni jonkun verran kuten kuvaajasta näkee.



Kuvio 17. Koepistettä 2 vastaavien näytteiden käyristymien keskiarvot eri suhteellisissa kosteuksissa

KP3

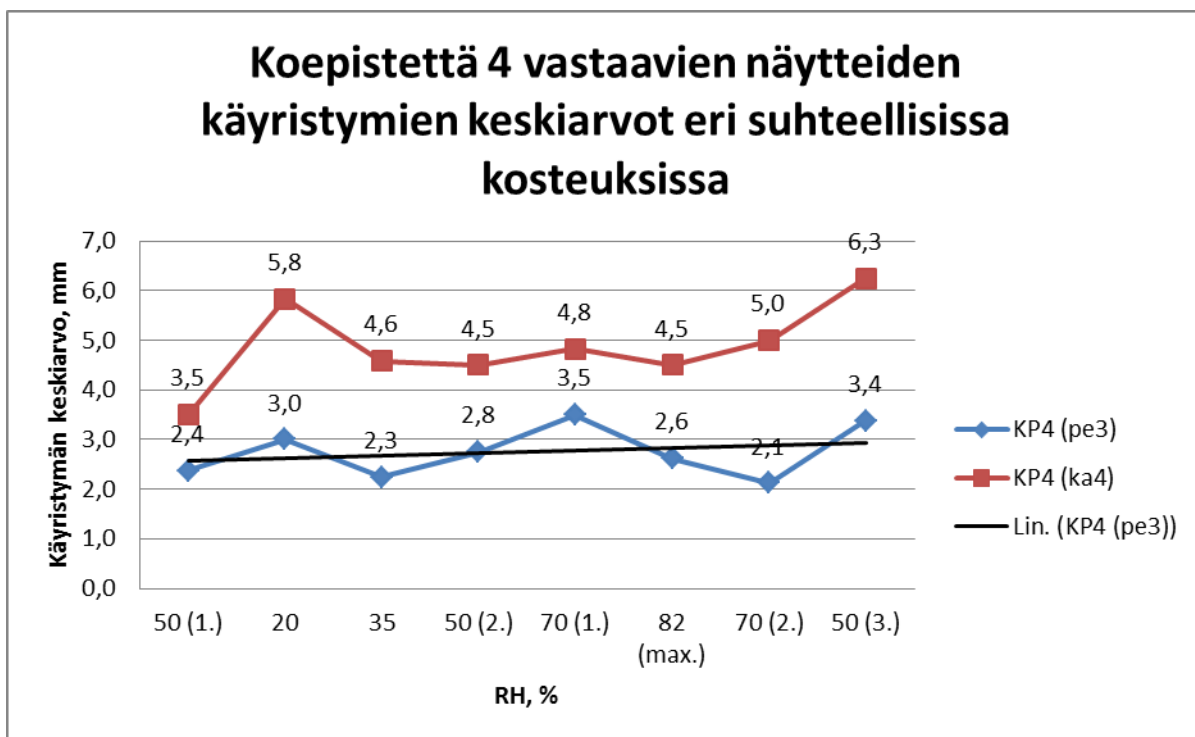
Kuviossa 18 on vertailtu koepistettä 3 vastaavien näytteiden käyristymiä toisiinsa eri ilman suhteellisissa kosteuksissa. Käyristymä on pääasiassa alhaisempaa eri kosteuksissa päällystetyllä kartongilla verrattuna päällystämättömään kartonkiin. Suhteellisessa kosteudessa 50 % (1. kerran) käyristymä oli hieman suurempaa päällystetyllä kartongilla kuin päällystämättömällä kartongilla ja kosteuksissa 35 % ja 50 % (2. kerran) käyristymä oli samoissa lukemissa näytteillä. Päällystämättömällä kartongilla kartongin käyristymä oli suurinta kosteuden ollessa kolmannen kerran 50 % ja pienintä sen ollessa ensimmäisen kerran 50 %, kun taas päällystetyn kartongin käyristymän vaihtelu oli pientä koko ilmastoinnin ajan lukuun ottamatta kahta viimeistä ilmastointia, joiden jälkeen käyristymä pieneni jonkun verran kuten kuvaajasta näkee.



Kuvio 18. Koepistettä 3 vastaavien näytteiden käyritysmien keskiarvot eri suhteellisissa kosteuksissa

KP4

Kuviossa 19 on vertailtu koepistettä 4 vastaavien näytteiden käyrityksiä toisiinsa eri ilman suhteellisissa kosteuksissa. Käyritymä on alhaisempaa eri kosteuksissa päällystetyllä kartongilla verrattuna päällystämättömään kartonkiin. Päällystämättömällä kartongilla kartongin käyritymä oli suurinta kosteuden ollessa kolmannen kerran 50 % ja pienintä sen ollessa ensimmäisen kerran 50 %, kun taas päällystetyn kartongin käyritymän vaihtelu oli pientä koko ilmastoinnin ajan.



Kuvio 19. Koepistettä 4 vastaavien näytteiden käyritysmien keskiarvot eri suhteellisissa kosteuksissa

17.4 Koepistetulosten arviointi

Koepisteellä 1 kartongin käyritysmä vaihteli välillä 1,6 mm – 2,9 mm tasaisesti ja se myös palautui hyvin lähtöarvoonsa suhteellisen kosteuden ollessa vakio (50 %) aina uudemman kerran: ensimmäisen kerran se oli 1,9 mm, toisen kerran 2,4 mm ja kolmannella kerralla 1,9 mm. Käyritysmä oli kesimäärin 2,0 mm:n luokkaa.

Koepisteessä 2 kartongin käyritysmä pysyi koko ajan lähellä 3 mm:ä vaihdellen välillä 2,5 mm – 4,1 mm ja pieneni hieman loppua kohden. Käyritysmä palautui hyvin lähtöarvoonsa suhteellisen kosteuden ollessa vakio (50 %) aina uudemman kerran: ensimmäisen kerran se oli 3,3 mm, toisen kerran 3,5 mm ja kolmannen kerran 2,8 mm.

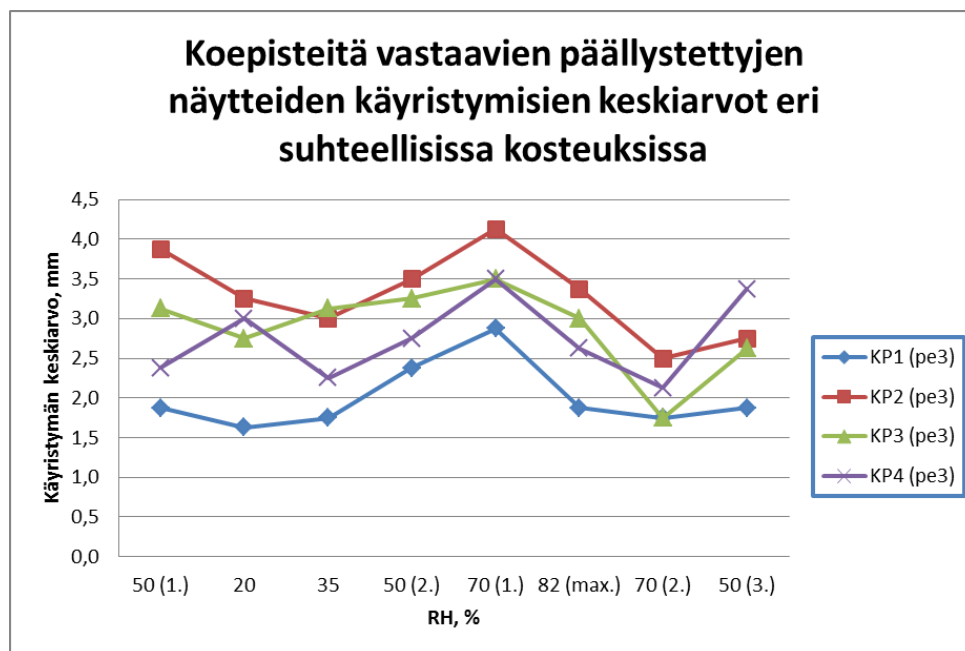
Koepisteessä 3 kartongin käyritysmä pysyi koko ajan lähellä 3 mm:ä vaihdellen välillä 1,8 mm – 3,5 mm ja pieneni hieman loppua kohden. Käyritysmä palautui hyvin lähtöarvoonsa suhteellisen kosteuden ollessa vakio (50 %) aina uudem-

man kerran: ensimmäisen kerran se oli 3,1 mm, toisen kerran 3,3 mm ja kolmannen kerran 2,6 mm.

Koepisteessä 4 kartongin käyristyminen oli hyvin tasaista ja vaihteli välillä 2,1 – 3,4 mm. Käyristymä palautui melko hyvin lähtöarvoonsa suhteellisen kosteuden ollessa vakio (50 %) aina uudelleen: ensimmäisen kerran se oli 2,4 mm, toisen kerran 2,8 mm ja kolmannen kerran 3,4 mm. Käyristymä oli keskimäärin vajaa 3,0 mm.

Kaiken kaikkiaan käyristymän vaihtelu oli pientä eri suhteellisissa kosteuksissa päällystetyllä kartongilla, mutta käyristymää kuitenkin ilmeni. Kuvioiden 16 – 19 käyristymän trendiviivoista päällystetyllä kartongilla huomataan käyristymän olevan pääsääntöisesti 3,0 mm:n luokkaa.

Kuvio 20 havainnollistaa vielä päällystettyjen näytteiden käyristymiä toisiinsa verrattuna kaikissa eri suhteellisissa kosteuksissa ja voidaan huomata käyristymän olevan alhaisinta referenssillä, eli vesimäärällä 3,0 g/m² (pinta). Lähes kaikissa olosuhteissa käyristymä oli suurinta koepisteellä 2, eli vesimäärällä 1,5 g/m² (pinta). Vain kahdessa kosteudessa käyristymä oli koepisteen 3 kanssa samoissa lukemissa.



Kuvio 20. Koepistettä vastaavien päällystettyjen näytteiden käyristymien keskiarvot eri suhteellisissa kosteuksissa

18 Yhteenveto ja pohdinta

Työn tarkoituksena oli selvittää koeajon avulla, kuinka eri kalanterikostuttajan vesimäärät vaikuttavat PE-päällystettyjen näytteiden käyritymiseen eri ilman suhteellisissa kosteuspitoisuuksissa. Työssä kävi ilmi, että kostuttajan vesimäärällä on vaikutusta päällystetyn nestepakkauskartongin käyritymiseen.

Käyrityminen on vähäisintä päällystetyllä kartongilla referenssillä eli vesimäärällä 3,0 g/m² (pinta) kaikissa suhteellisissa kosteuksissa, joissa näytteitä tutkittiin lukuun ottamatta yhtä kosteutta, jossa käyrityminen oli samansuuruinen toisen koepisteen kanssa. Keskimääräinen käyritymä vaihteli vajaan 2,0 mm:n ja 3,0 mm:n välissä referenssillä, kun eniten käyritymää aiheuttaneella vesimäärällä keskimääräinen käyritymä nousi hieman yli 4,0 mm:n. Kostuttajan vesimäärää (pinta) 3,0 g/m² on tähänkin asti käytetty kartongin valmistusprosessissa, joten tulosten perusteella samaa vesimäärää kannattaa jatkossakin käyttää.

Työssä selvennettiin lisäksi sitä, kuinka päällystetyn nestepakkauskartongin käyrityminen palautuu vakio ilman suhteelliseen kosteuteen (50 %) ilman kosteuden muuttuessa välissä matalammaksi tai korkeammaksi. Palautuminen onnistui jokaisella koepisteellä hyvin, heitto oli korkeimmillaankin vain noin 1,0 mm:n luokkaa. Referenssillä, joka jo todettiin käyritymistaipumuksen kannalta parhaaksi vaihtoehdoksi käyttää kartongin valmistusprosessissa, palautuminen vakio suhteelliseen kosteuteen oli erinomaista: käyritymän vaihtelu oli vain 0,5 mm:ä korkeimmillaankin.

Työn tuloksista ilmeni lisäksi, että PE-päällystyksellä on käyritymistä alentava vaikutus, kun verrattiin päällystämättömiä ja päällystettyjä näytteitä toisiinsa.

Kaikki päällystämättömät näytteet käyrityivät poikkisuuntaisesti. Päällystetyt kartonkinäytteet käyrityivät kuitenkin pääasiassa diagonaalisesti. PE-päällystyksestä johtuvasta käyritymän aiheutumisesta voisi tehdä halutessaan jatkotutkimusta, jossa olisi hyvä tutkia, mistä diagonaalinen käyrityminen johtuu ja millä keinoilla sitä voitaisiin estää.

Kuvat

- Kuva 1. Stora Enso Kaukopään tehtaat ylälmoista kuvattuna, s. 8
Kuva 2. Kartonkikone 4:n rakenne ja tietoa koneesta, s. 10
Kuva 3. Päälystyskone 3:n rakenne ja tietoa koneesta, s. 11
Kuva 4. Poikkileikkaus männyn rakenteesta, s. 14
Kuva 5. Havupuun solukkorakenne, s. 15
Kuva 6. Lehtipuun solukkorakenne, s. 16
Kuva 7. Soluseinän kerrokset, s. 17
Kuva 8. Kahden selluloosamolekyylin välisten sidosten aukeaminen (A) ja vetysidosten muodostuminen veden kanssa hydroksyyliiryhmiin (B ja C), s. 19
Kuva 9. Polyeteenipäälystetyn nestepakkauskartongin rakenne, s. 21
Kuva 10. Kartonkikoneen rakenne, s. 22
Kuva 11. Viiraosa ja perälaatikot, s. 24
Kuva 12. Kartonkikoneen puristinosa, s. 25
Kuva 13. Kartonkikoneen kuivatusosa höyryryhmineen, s. 26
Kuva 14. Kartonkikoneen kalanteri ja rullain, s. 27
Kuva 15. Pope-rullain, s. 28
Kuva 16. Koekstruusiopäälystys, s. 32
Kuva 17. Ekstruusiopäälystyslinja, s. 32
Kuva 18. Aukirullauspukki, s. 33
Kuva 19. Päälystyssekstruderin rakenne, s. 35
Kuva 20. Käyristymisen suureet: K_x konesuuntainen käyryys, K_y poikkisuuntainen käyryys ja K_{xy} diagonaalinen käyryys, s. 38
Kuva 21. Kuituorientaatio, s. 40
Kuva 22. Ilmastointikaappi, s. 62

Kuviot

- Kuvio 1. Stora Enso Oyj Imatran tehtaiden markkinoiden jakautuminen Euroopassa, s. 9
Kuvio 2. Kuituorientaatiokulma α , s. 42
Kuvio 3. Suihkusulpun ja viiran nopeuseron vaikutus orientaatioon ja formaatioon, s. 44
Kuvio 4. Hystereesi-ilmiö, s. 48
Kuvio 5. Voimapaperin vesiadsorptio lämpötilan funktiona, s. 55
Kuvio 6. Nestepakkauskartongin kosteuden muutokset kartongin jalostuksessa, s. 57
Kuvio 7. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päälystettyjen näytteiden käyristymien keskiarvot eri vesimäärillä 1. kerran RH 50 %:ssa, s. 64
Kuvio 8. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päälystettyjen näytteiden käyristymien keskiarvot eri vesimäärillä RH 20 %:ssa, s. 65
Kuvio 9. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päälystettyjen näytteiden käyristymien keskiarvot eri vesimäärillä RH 35 %:ssa, s. 66
Kuvio 10. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päälystettyjen näytteiden käyristymien keskiarvot eri vesimäärillä 2. kerran RH 50 %:ssa, s. 67
Kuvio 11. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päälystettyjen näytteiden käyristymien keskiarvot eri vesimäärillä 1. kerran RH 70 %:ssa, s. 68

- Kuvio 12. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päällystettyjen näytteiden käyristymien keskiarvot eri vesimäärillä RH 82 %:ssa (max.), s. 69
- Kuvio 13. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päällystettyjen näytteiden käyristymien keskiarvot eri vesimäärillä 2. kerran RH 70 %:ssa, s. 70
- Kuvio 14. Rinnakkaisten raakakartonki ja PE-päällystettyjen näytteiden käyristymien keskiarvot eri vesimäärillä 3. kerran 50 %:ssa, s. 71
- Kuvio 15. Päällystettyjen näytteiden käyristymien keskiarvot eri vesimäärillä RH 50 % 1., 2. ja 3. kerran, s. 72
- Kuvio 16. Koepistettä 1 vastaavien näytteiden käyristymien keskiarvot eri suhteellisissa kosteuksissa, s. 73
- Kuvio 17. Koepistettä 2 vastaavien näytteiden käyristymien keskiarvot eri suhteellisissa kosteuksissa, s. 74
- Kuvio 18. Koepistettä 3 vastaavien näytteiden käyristymien keskiarvot eri suhteellisissa kosteuksissa, s. 75
- Kuvio 19. Koepistettä 4 vastaavien näytteiden käyristymien keskiarvot eri suhteellisissa kosteuksissa, s. 76
- Kuvio 20. Koepistettä vastaavien päällystettyjen näytteiden käyristymien keskiarvot eri suhteellisissa kosteuksissa, s. 77

Taulukot

Taulukko 1. Eri polyeteenilajien tiheydet ja sulamispisteet, s. 30

Taulukko 2. PELD:n ja PEHD:n ominaisuuksia, s. 53

Lähteet

Aaltonen, P. 1983. Sulpun suotautuminen. Teoksessa Arjas, A. (toim.) Suomen Paperi-insinööriyhdistyksen oppi- ja käsikirja 3, Osa 1: Paperin Valmistus. Turku: Teknillisten Tieteiden Akatemia, 121 – 149.

Alén, R. 2000. Structure and chemical composition of wood. Teoksessa Stenius, P.(toim.) Papermaking Science and Technology, Book 3: Forest Product Chemistry. Jyväskylä: Fapet Oy, 12 – 58.

Bates, R. & Marsella, L. 1964. A Study of Curl in Coated Constructions. Japan Tappi Journal 47(7), 133A – 135A.

Bezigian, T. 1999. Chemical, Physical and Mechanical Properties of Common Polymers. Teoksessa Bezigan, T. (toim.) Extrusion Coating Manual. Atlanta: TAPPI Press, 185 – 200.

Bortolin, G. 2002. On modelling and estimation of curl and twist in multi-ply paperboard. Lisensiaatin tutkielma. KTH Stockholm. Matematiikan laitos.

Canadian Architect 2016. Moisture Rules. <https://www.canadianarchitect.com/>. Luettu 13.1.2016.

Carlsson, L., Fellers, C. & Htun, M. 1980. Curl and two-sidedness of paper. Svensk papperstidning 83(7), 194 – 197.

Cold reels. 2003. The Griffin (1), 5 – 9.

Ebeling, K. 1983. Puukuidun vesisorptio ja turpoaminen. Teoksessa Arjas, A. (toim.) Suomen Paperi-insinööriyhdistyksen oppi- ja käsikirja 3, Osa 1: Paperin Valmistus. Turku: Teknillisten Tieteiden Akatemia, 47 – 65.

Ehrola, J., Hernesniemi, A., Kuosa, H., Kyytsönen, M., Linnonmaa, P., Mäenpää, T., Pietikäinen, R., Stapels, R., Tani, M. & Vuorikari, H. 2000. Papermaking Science and Technology Vol 10: Calendering. Teoksessa Jokio, M. (toim.) Papermaking, Part 3: Finishing. Jyväskylä: Fapet Oy, 14 – 135.

Grönstrand, J., Karhuketo, H. & Törn, T. 2000. Kemiallinen metsäteollisuus 3: Paperin ja kartongin jalostus. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Haslach, H. 1994. The Mechanics of moisture accelerated tensile creep in paper. Japan Tappi Journal 77(10), 179 – 186.

Håkan, L. 1982. Muovien ominaisuudet ja käyttö: 1. jakso, Raaka-aineet ja muovituotteiden valmistus. Helsinki: Insinööri-tieto.

Hägglom-Ahnger, U. & Komulainen, P. 2005. Kemiallinen metsäteollisuus 2: Paperin ja kartongin valmistus. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Ilmatieteenlaitos 2014. Ilman kosteus. <http://ilmatieteenlaitos.fi/>. Luettu 13.1.2016.

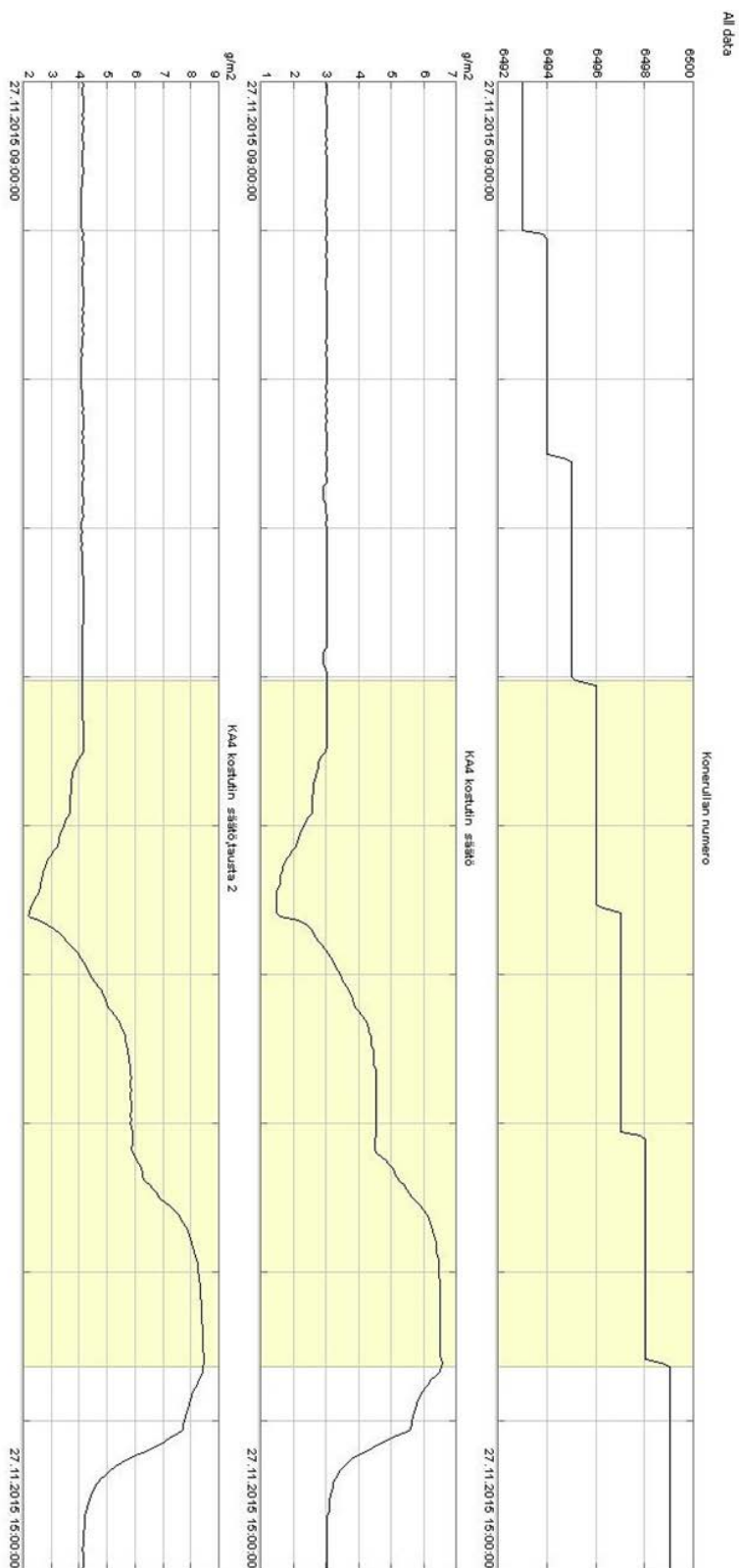
- Jerdee, G. 1999. Polyethylene for Extrusion Coating. Teoksessa Bezigian, T. (toim.) Extrusion Coating Manual. Atlanta: Publ. TAPPI Press, 201 – 207.
- Järvinen, P. 2008. Uusi muovitieto. Porvoo: WS Bookwell Oy.
- Kajanto, I. & Niskanen, K. 1998. Dimensional stability. Teoksessa Niskanen, K. (toim.) Papermaking Science and Technology, Book 16: Paper Physics. Helsinki: Fapet Oy & TAPPI Press, 223–259.
- Karhuketo, H., Seppälä, M., Törn, T. & Viluksela, P. 2004. Kemiallinen metsäteollisuus 3: Paperin ja Kartongin jalostus. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- Kuituorientaatio : perusteoria ja vaikuttavat suureet. Tutkimuskeskus. Kaukas Oy.
- Kunnas, E. 2005. Online-kuituorientaatiomittarin hyödyntäminen tarrapaperin taustan käyrityksen hallinnassa. Tampereen ammattikorkeakoulu. Prosessiteknikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.
- Kurri, V., Malén, T., Sandel, R. & Virtanen, M. 2002. Muovitekniikan perusteet. Helsinki: Hakapaino Oy.
- Laiho, E. 2006. Packaging Polymers – their manufacturing and properties. Porvoo: Borealis Polymers Oy.
- Martikainen, P. 2006. Paperirullien kastuminen varastossa. VTT.
- MET. 2001. Raaka-ainekäsikirja: Muovit ja kumit. Tampere: Tammerpaino Oy.
- Metsäteollisuuden Työnantajaliitto. 1997. Puusta paperiin: M-504 Hienopaperin valmistus. Vantaa: Gummerus Kirjapaino Oy.
- Mäkelä, M. 2003. Paperin laatusuureiden mittaaminen ja säätö. Suomen Automaatioseura ry.
- Niskanen, K. & Sadowski, J. 1989. Evaluation of some fibre orientation measurements. Journal of Pulp and Paper Science 15(6), 220 – 224.
- Pajunen, S. 2015. Kartongin käyrityminen jatkojalostuksessa. Tampereen ammattikorkeakoulu. Paperi-, tekstiili- ja kemiantekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.
- Parker, J. 1972. The Sheet Forming Process. Japan Tappi Journal 9, 104.
- Pro Puu Ry 2004 – 2015. Solukko. <http://www.puuproffa.fi/>. Luettu 18.1.2016.
- Puuinfo Oy 2004 – 2015. Kosteusteknisiä ominaisuuksia. <http://puuinfo.fi/>. Luettu 15.12.2015.
- RitwalaWX 2015. Säätötermien selityksiä ja laskentakaavoja. <http://www.ritvalawx.com/>. Luettu 3.2.2016.
- Ryti, N. 1989. Paperitekniikan perusteet. Espoo: Otapaino.

- Sahlstén, J. 1996. Predicting curl and twist on polyethylene coated liquid packaging board, when raw material values are known. Diplomityö. Helsinki University of Technology. Department of Forest Products Industry.
- Savolainen, A. Kuusipalo, J., Laiho, E. & Penttinen, T. 1998. Extrusion coating and product applications. Teoksessa Savolainen, A. (toim) Papermaking Science and Technology, Book 12: paper and Paperboard Converting. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy, 125 – 189.
- Schröder, S. & Svensson, O. 1965. Utloppkvotens papperstekniska betydelse. Svensk Papperstidning 68(11), 403 – 148.
- Seppälä, J. 2008. Polymeeriteknologian perusteet. Helsinki: Hakapaino Oy.
- Sepsilva Ltd Oy. 1997. Puusta paperiin: M-506 Kartonkikoneet. Saarijärvi: Gummerus Kirjapaino Oy.
- Sjöström, E. 1989. Puukemia: Teoreettiset perusteet ja sovellutukset. Helsinki: Kyriiri Oy.
- Smått, R. 1982. Ekstruusio ja kalvonpuhallus: Kalvojen koronakäsittely. Muoviyhdistys Ry:n kurssiluentomateriaali. Toijala: Tuomo Halonen Oy.
- Stora Enso Kaukopää. 2015. Some facts. Powerpoint -esittelymateriaali. Imatra.
- Stora Enso Oyj 2015. Imatran tehtaat. <http://renewablepackaging.storaenso.com/>. Luettu 5.12.2015.
- Suikkanen, T. 2008. Nestepakkauskartongin kosteuden hallinta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kemiantekniikan osasto. Diplomityö.
- Suomen paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja, Osa 3: Paperin valmistus. 1983. Turku: Turun Sanomat Oy.
- Uesaka, T., Kodaka, I., Okushima, S. & Fukuchi, R. 1985. Curl in Paper (1): A new Approach to the Evaluation of Curl Shape. Japan Tappi Journal 39(10), 953 – 958.
- UNSW Australia 2013. Fibre Orientation. <http://unsw.edu.au/>. Luettu 18.1.2016.
- Wahren, D. & Löfstad, C. 1977. Hydromechanische Analyse von Blattbildungsvorgängen bei Doppelsiebmaschinen. Das Papier 31(10A), 132 – 137.
- Waterhouse, J. 1992. Mechanical Properties of Paper. Teoksessa Kouris, M. (toim.) Mill Control & Control Systems: Quality & Testing, Environmental, Corrosion, Electrical, Pulp and Paper Manufacture, Vol 9. Atlanta: TAPPI Press, 99 – 131.
- Weise, U. 1997. Acta Polytechnica Scandinavica: Chemical Technology Series No. 249: Characterization and Mechanisms of Changes in Wood Pulp Fibres Caused by Water Removal. Espoo: Finnish Academy of Sciences.
- Vainikka, M. 2002. Erikoispaperin käyristymisen pienentäminen mittapysyvyyttä parantamalla. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Kemiantekniikan osasto. Diplomityö.

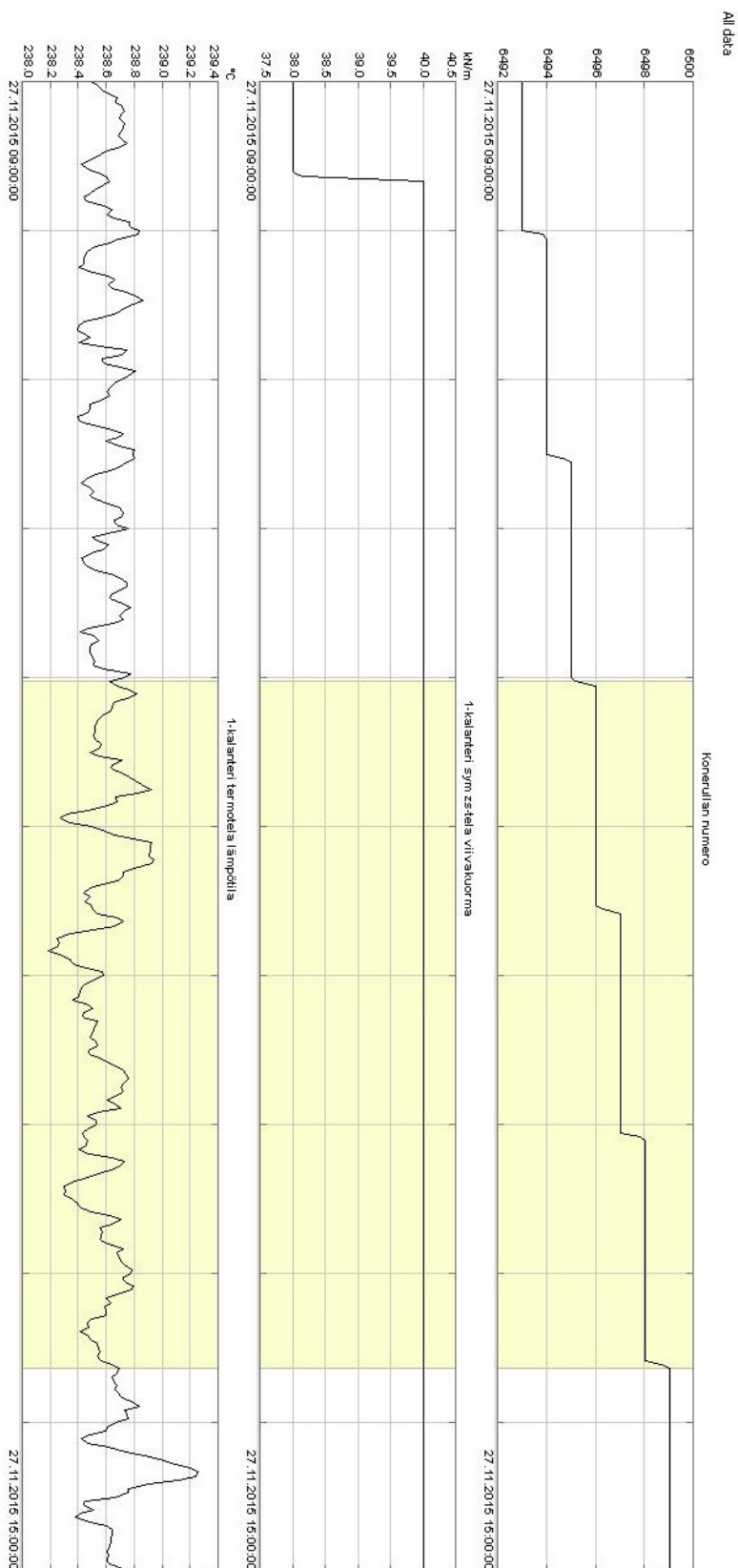
Viitaharju, P. & Niskanen, K. 1994. Painopaperin käyristyminen osa 3: Kuituorientaatio, kuivatus ja rullapohjakäyristyminen. KCL -raportti.

VTT Tuotteet ja tuotanto. Prowledge Oy. Know Pap 17.0. Paperitekniikan ja automaation oppimisympäristö. Käytössä Stora Enson Intranetissä: <http://insite.storaenso.com/>. 27.11.2015.

VTT Tuotteet ja tuotanto. Prowledge Oy. Know Pulp 15.0. Sellutekniikan ja automaation oppimisympäristö. Stora Enso Intranet: <http://insite.storaenso.com/>. Luettu 27.11.2015.

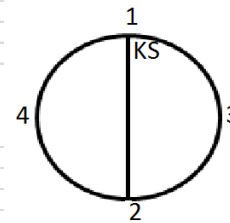


Kuvio 21. Vesimäärän muutokset pinnalle ja taustalle koeajon aikana rullittain



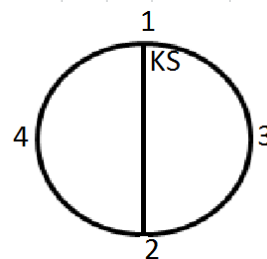
Kuvio 22. Kalanterin telojen käyttäytyminen koeajan aikana

Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritysmät suuntineen millimetreissä (mm) ilmankosteudessa RH 50 % (1. kerran)												
Koepisteet vastaavine raakakartonkirullineen:												
	KP1: 6495			KP2: 6496			KP3: 6497			KP4: 6498		
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0			1,5			4,5			6,5		
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1			2,2			5,9			8,5		
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. havainn. ympyrä)												
1												
2												
3	2,5	3,5	3,0	3,0	3,5	4,0	1,0	1,0	2,5	3,0	3,5	3,0
4	2,0	2,0	3,5	3,0	4,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,5	4,0	4,0
1-3												
2-3												
1-4												
2-4												
Käyritysmien keskiarvot, mm (Kaikkien rinnakkaisten näytteiden molempien nurkkien yhteinen ka:t)	2,8			3,3			2,1			3,5		
Koepisteet vastaavine pe-rullien muut												
	KP1: 504, mto 1		KP2: 503, mto 2		KP3: 503, mto 1		KP4: 505, mto 2					
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0		1,5		4,5		6,5					
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1		2,2		5,9		8,5					
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.				
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. Havainn. Ympyrä)												
1							3,5					
2							2,0					
3									3,0			
4									2,5			
1-3												
2-3	1,0	2,0	5,0	3,0	3,5					2,0		
1-4	1,5	3,0	4,0	3,5	3,5					2,0		
2-4												
Käyritysmien keskiarvot (mm) (Kaikkien rinnakkaisten näytteiden molempien nurkkien yhteinen ka:t)	1,9		3,9		3,1		2,4					



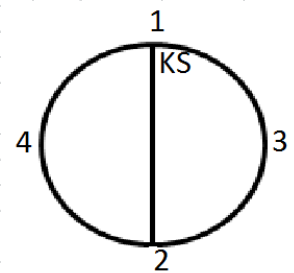
Taulukko 3. Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritysmät suuntineen millimetreissä (mm) 1. kerran ilmankosteudessa RH 50 %

Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritymät suuntineen millimetreissä (mm) ilmankosteudessa RH 20 %												
Koepisteet vastaavine raakakartonkirullineen:												
	KP1: 6495			KP2: 6496			KP3: 6497			KP4: 6498		
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0			1,5			4,5			6,5		
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1			2,2			5,9			8,5		
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. havainn. ympyrä)												
1												
2												
3	4,0	4,5	5,5	4,0	6,0	5,0	2,5	3,0	4,0	4,5	5,5	6,5
4	3,5	3,0	5,5	3,5	4,5	5,5	4,0	4,5	4,5	6,0	5,5	7,0
1-3												
2-3												
1-4												
2-4												
Käyritymien keskiarvot, mm	4,3			4,8			3,8			5,8		
(Kaikkien rinnakaisten näytteiden molempien nurkkien yhteinen ka:t)												
Koepisteet vastaavine pe-rullien muuttoineen:												
	KP1: 504, mto 1		KP2: 503, mto 2		KP3: 503, mto 1		KP4: 505, mto 2					
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0		1,5		4,5		6,5					
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1		2,2		5,9		8,5					
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.				
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. Havainn. Ympyrä)												
1						2,5						
2						3,0						
3								4,5				
4								3,0				
1-3												
2-3	1,5	2,0	3,5	3,0	2,5					2,5		
1-4	1,5	1,5	3,5	3,0	3,0					2,0		
2-4												
Käyritymien keskiarvot (mm)	1,6		3,3		2,8		3,0					



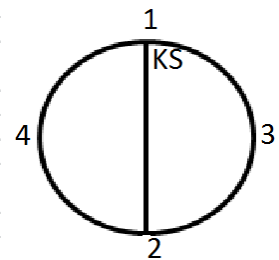
Taulukko 4. Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritymät suuntineen millimetreissä (mm) ilmankosteudessa RH 20 %

Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritymät suuntineen millimetreissä (mm) ilmankosteudessa RH 35 %												
Koepisteet vastaavine raakakartonkirullineen:												
	KP1: 6495			KP2: 6496			KP3: 6497			KP4: 6498		
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0			1,5			4,5			6,5		
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1			2,2			5,9			8,5		
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. havainn. ympyrä)												
1												
2												
3	3,0	5,0	4,0	3,0	6,0	5,0	2,0	3,0	3,0	4,0	5,0	4,5
4	3,0	3,0	5,5	3,5	4,0	5,5	3,5	4,0	4,0	5,0	4,0	5,0
1-3												
2-3												
1-4												
2-4												
Käyritymien keskiarvot, mm	3,9			4,5			3,3			4,6		
(Kaikkien rinnakkaisten näytteiden molempien nurkkien yhteinen ka:t)												
Koepisteet vastaavine pe-rullien muut												
	KP1: 504, mto 1		KP2: 503,		KP3: 503,		KP4: 505, mto 2					
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0		1,5		4,5		6,5					
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1		2,2		5,9		8,5					
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.				
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. Havainn. Ympyrä)												
1							3,0					
2							3,0					
3								3,0				
4								2,5				
1-3												
2-3	1,5	1,5	3,0	2,5	3,5				2,0			
1-4	2,0	2,0	3,5	3,0	3,0				1,5			
2-4												
Käyritymien keskiarvot (mm)	1,8		3,0		3,1		2,3					
(Kaikkien rinnakkaisten näytteiden molempien nurkkien yhteinen ka:t)												



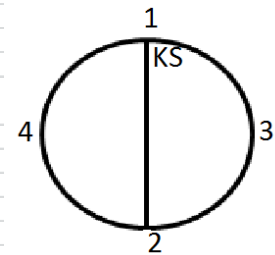
Taulukko 5. Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritymät suuntineen millimetreissä (mm) ilmankosteudessa RH 35 %

Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritymät suuntineen millimetreissä (mm) ilmankosteudessa RH 50 % (2. kerran)												
Koepisteet vastaavine raakakartonkirullineen:												
	KP1: 6495			KP2: 6496			KP3: 6497			KP4: 6498		
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0			1,5			4,5			6,5		
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1			2,2			5,9			8,5		
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. havainn. ympyrä)												
1												
2												
3	3,5	4,0	3,0	3,0	5,0	4,0	1,5	3,0	3,5	3,0	4,5	4,5
4	3,0	2,5	5,0	3,0	5,0	5,0	3,0	3,5	4,5	4,5	4,5	6,0
1-3												
2-3												
1-4												
2-4												
Käyritymien keskiarvot, mm	3,5			4,2			3,2			4,5		
(Kaikkien rinnakkaisten näytteiden molempien nurkkien yhteinen ka:t)												
Koepisteet vastaavine pe-rullien muut												
	KP1: 504, mto 1		KP2: 503,		KP3: 503,		KP4: 505, mto 2					
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0		1,5		4,5		6,5					
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1		2,2		5,9		8,5					
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.				
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. Havainn. Ympyrä)												
1							3,5					
2							2,5					
3								3,5				
4								3,0				
1-3												
2-3	1,0	3,0	4,0	3,0	3,5					2,0		
1-4	2,5	3,0	4,0	3,0	3,5					2,5		
2-4												
Käyritymien keskiarvot (mm)	2,4		3,5		3,3		2,8					
(Kaikkien rinnakkaisten näytteiden molempien nurkkien yhteinen ka:t)												



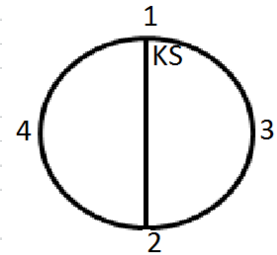
Taulukko 6. Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritymät suuntineen millimetreissä (mm) 2. kerran ilmankosteudessa RH 50 %

Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritymät suuntineen millimetreissä (mm) ilmankosteudessa RH 70 % , 1. kerran												
Koepisteet vastaavine raakakartonkirullineen:												
	KP1: 6495			KP2: 6496			KP3: 6497			KP4: 6498		
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0			1,5			4,5			6,5		
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1			2,2			5,9			8,5		
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. havainn. ympyrä)												
1												
2												
3	4,0	5,0	3,5	3,5	6,5	4,5	2,0	4,0	5,5	4,0	5,0	5,0
4	4,0	3,0	4,5	2,5	4,0	5,0	3,5	4,5	5,0	4,5	4,5	6,0
1-3												
2-3												
1-4												
2-4												
Käyritymien keskiarvot, mm	4,0			4,3			4,1			4,8		
(Kaikkien rinnakaisten näytteiden molempien nurkkien yhteinen ka:t)												
Koepisteet vastaavine pe-rullien muut												
	KP1: 504, mto 1		KP2: 503,		KP3: 503,		KP4: 505, mto 2					
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0		1,5		4,5		6,5					
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1		2,2		5,9		8,5					
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.				
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. Havainn. Ympyrä)												
1						4,0						
2						2,5						
3							4,5					
4							4					
1-3												
2-3	1,5	3,0	4,5	3,5	3,5				2,5			
1-4	3,0	4,0	5,0	3,5	4,0				3,0			
2-4												
Käyritymien keskiarvot (mm)	2,9		4,1		3,5		3,5					
(Kaikkien rinnakaisten näytteiden molempien nurkkien yhteinen ka:t)												



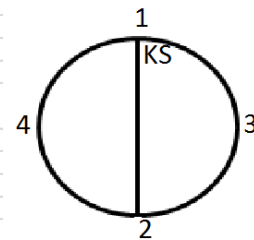
Taulukko 7. Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritymät suuntineen millimetreissä (mm) 1. kerran ilmankosteudessa RH 70 %

Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritymät suuntineen millimetreissä (mm) ilmankosteudessa RH max. 82 %												
Koepisteet vastaavine raakakartonkirullineen:												
	KP1: 6495			KP2: 6496			KP3: 6497			KP4: 6498		
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0			1,5			4,5			6,5		
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1			2,2			5,9			8,5		
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. havainn. ympyrä)												
1												
2												
3	3,5	5,0	3,0	2,5	5,0	4,0	3,0	5,0	5,5	4,5	5,0	4,0
4	3,0	3,0	5,0	2,5	3,5	4,5	3,0	4,0	4,5	4,5	4,0	5,0
1-3												
2-3												
1-4												
2-4												
Käyritymien keskiarvot, mm	3,8			3,7			4,2			4,5		
(Kaikkien rinnakkaisten näytteiden molempien nurkkien yhteinen ka:t)												
Koepisteet vastaavine pe-rullien muut												
	KP1: 504, mto 1		KP2: 503,		KP3: 503,		KP4: 505, mto 2					
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0		1,5		4,5		6,5					
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1		2,2		5,9		8,5					
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.				
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. Havainn. Ympyrä)												
1												
2												
3												
4												
1-3												
2-3	1,5	1,5	3,5	3,0	4,5					1,0		
1-4	2,0	2,5	4,5	2,5	3,0					2,5		
2-4												
Käyritymien keskiarvot (mm)	1,9		3,4		3,0		2,6					
(Kaikkien rinnakkaisten näytteiden molempien nurkkien yhteinen ka:t)												



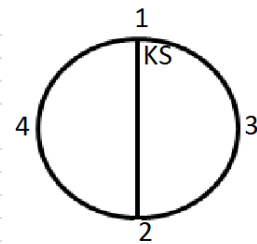
Taulukko 8. Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritymät suuntineen millimetreissä (mm) ilmankosteudessa RH 82 % (max.)

Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritymät suuntineen millimetreissä (mm) ilmankosteudessa RH max. 70 % , 2. kerran												
Koepisteet vastaavine raakakartonkirullineen:												
	KP1: 6495			KP2: 6496			KP3: 6497			KP4: 6498		
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0			1,5			4,5			6,5		
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1			2,2			5,9			8,5		
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. havainn. ympyrä)												
1												
2												
3	4,0	8,0	4,0	5,0	7,0	5,0	3,5	6,5	6,0	4,5	5,5	4,5
4	5,0	4,0	6,0	4,5	4,5	6,5	5,0	5,0	6,0	5,5	4,0	6,0
1-3												
2-3												
1-4												
2-4												
Käyritymien keskiarvot, mm	5,2			5,4			5,3			5,0		
(Kaikkien rinnakkaisten näytteiden molempien nurkkien yhteinen ka:t)												
Koepisteet vastaavine pe-rullien muut												
	KP1: 504, mto 1		KP2: 503,		KP3: 503,		KP4: 505, mto 2					
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0		1,5		4,5		6,5					
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1		2,2		5,9		8,5					
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.				
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. Havainn. Ympyrä)												
1												
2												
3												
4												
1-3												
2-3	3,0	1,5	3,0	1,5	2,0			1,5				
1-4	1,5	1,0	3,5	2,0	2,0			1,0				
2-4												
Käyritymien keskiarvot (mm)	1,8		2,5		1,8		2,1					
(Kaikkien rinnakkaisten näytteiden molempien nurkkien yhteinen ka:t)												



Taulukko 9. Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritymät suuntineen millimetreissä (mm) 2. kerran ilmankosteudessa RH 70 %

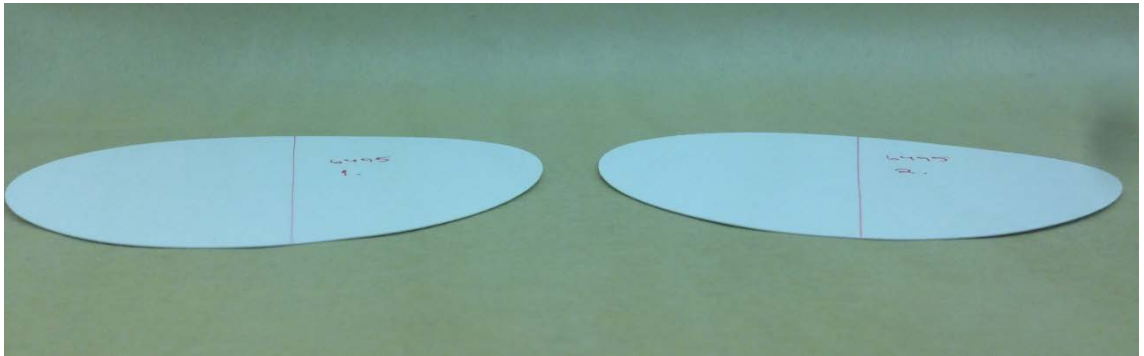
Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritymät suuntineen millimetreissä (mm) ilmankosteudessa RH max. 50 % , 3. kerran												
Koepisteet vastaavine raakakartonkirullineen:												
	KP1: 6495			KP2: 6496			KP3: 6497			KP4: 6498		
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0			1,5			4,5			6,5		
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1			2,2			5,9			8,5		
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. havainn. ympyrä)												
1												
2												
3	5,5	7,5	4,0	5,0	7,0	5,0	3,5	5,5	7,0	6,0	6,0	6,0
4	6,5	5,0	6,5	4,5	4,5	6,0	6,5	5,5	6,5	7,0	6,0	6,5
1-3												
2-3												
1-4												
2-4												
Käyritymien keskiarvot, mm	KP1 (6495)			KP2 (6496)			KP3 (6497)			KP4 (6498)		
(Saman KP:een rinnakkaisien näytteiden vastakkaisien nurkkien yhteinen ka)	5,8			5,3			5,8			6,3		
Koepisteet vastaavine pe-rullien muut												
	KP1: 504, mto 1		KP2: 503,		KP3: 503,		KP4: 505, mto 2					
Vesimäärä (pinta), g/m ²	3,0		1,5		4,5		6,5					
Vesimäärä (tausta), g/m ²	4,1		2,2		5,9		8,5					
Rinnakkaiset näytteet, →	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.				
Käyritymä-kohta, ↓ (kts. Havainn. Ympyrä)												
1												
2												
3												
4												
1-3												
2-3	2,5	2,0	2,5	2,5	3,0			3,0				
1-4	1,5	1,5	3,5	2,5	3,5			3,0				
2-4												
Käyritymien keskiarvot (mm)	1,9		2,8		2,6		3,4					
(Kaikkien rinnakkaisien näytteiden molempien nurkkien yhteinen ka:t)												



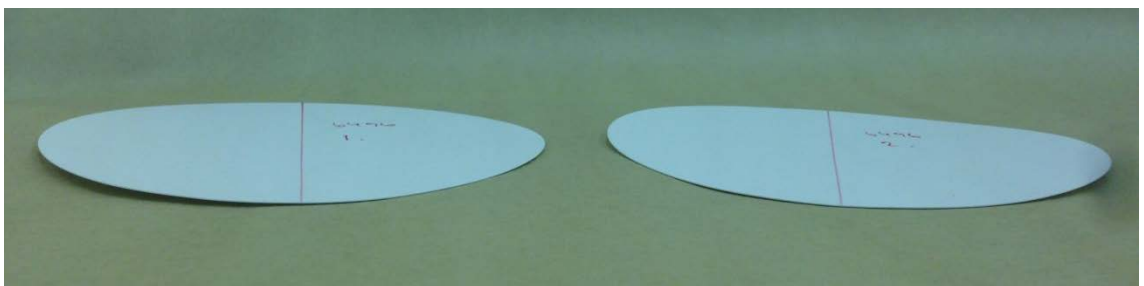
Taulukko 10. Koepisteitä vastaavat rullat ja niiden käyritymät suuntineen millimetreissä (mm) 3. kerran ilmankosteudessa RH 50 %

Koepisteitä vastaavien päällystämättömien ja päällystettyjen rullien muuttojen käyritysmien keskiarvot kaikissa mitatuissa suhteellisissa kosteuksissa									
Rullan koodi, →	504,mto1	503,mto2	503,mto1	503,mto2	6495	6496	6497	6498	Rullat, ←
Kosteudet RH, %, ↓	KP1 (pe3)	KP2 (pe3)	KP3 (pe3)	KP4 (pe3)	KP1 (ka4)	KP2 (ka4)	KP3 (ka4)	KP4 (ka4)	Koepisteet, ←
50 (1.)	1,9	3,9	3,1	2,4	2,8	3,3	2,1	3,5	
20	1,6	3,3	2,8	3,0	4,3	4,8	3,8	5,8	
35	1,8	3,0	3,1	2,3	3,9	4,5	3,3	4,6	
50 (2.)	2,4	3,5	3,3	2,8	3,5	4,2	3,2	4,5	
70 (1.)	2,9	4,1	3,5	3,5	4,0	4,3	4,1	4,8	
82 (max.)	1,9	3,4	3,0	2,6	3,8	3,7	4,2	4,5	
70 (2.)	1,8	2,5	1,8	2,1	5,2	5,4	5,3	5,0	
50 (3.)	1,9	2,8	2,6	3,4	5,8	5,3	5,8	6,3	
	KP1: 3,0 g/m ²								
	KP2: 1,5 g/m ²								
	KP3: 4,5 g/m ²								
	KP4: 6,5 g/m ²								

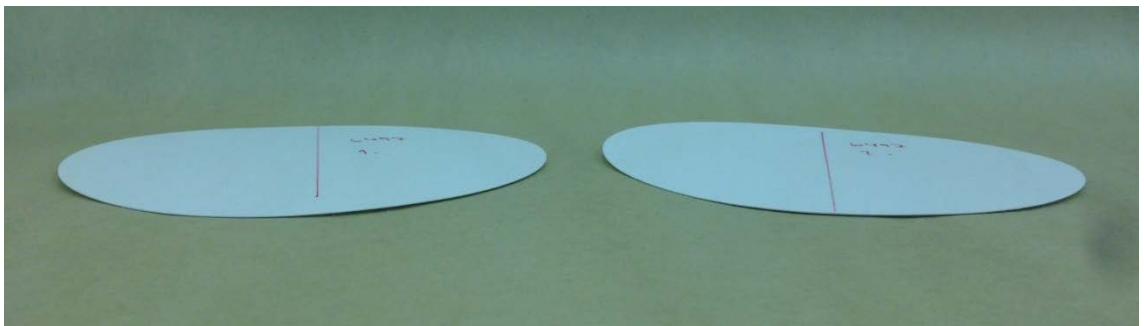
Taulukko 11. Koepisteitä vastaavien päällystämättömien ja päällystettyjen rullien muuttojen käyritysmien keskiarvot kaikissa mitatuissa suhteellisissa kosteuksissa



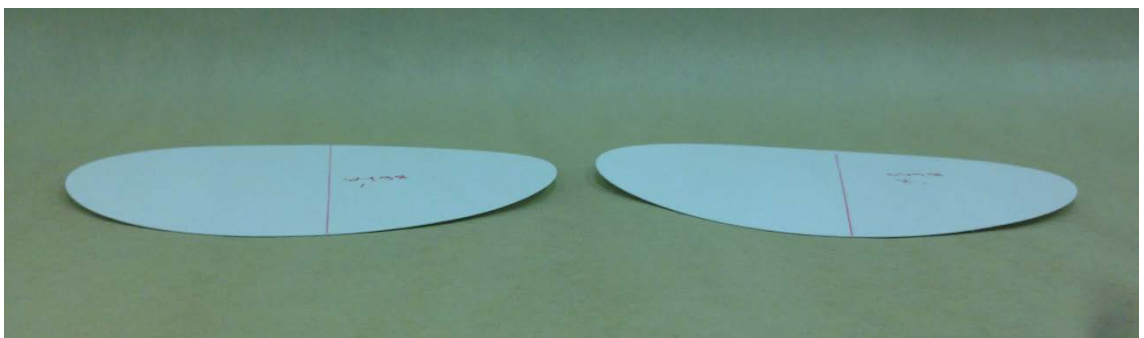
Kuva 21. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 50 % (1.)



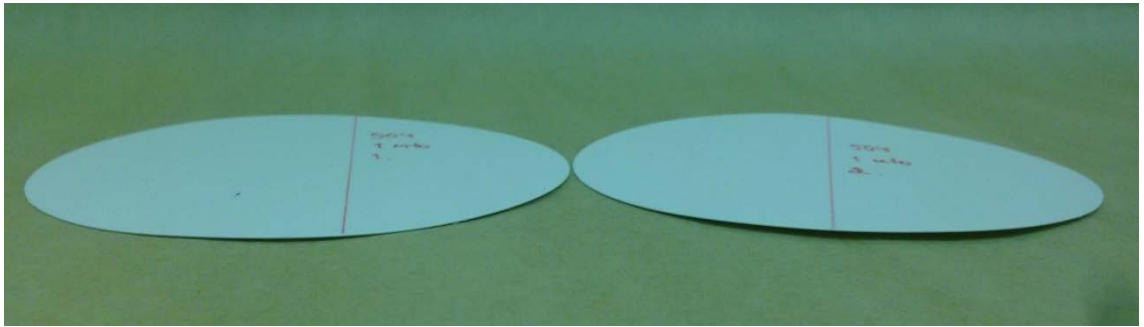
Kuva 22. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 50 % (1.)



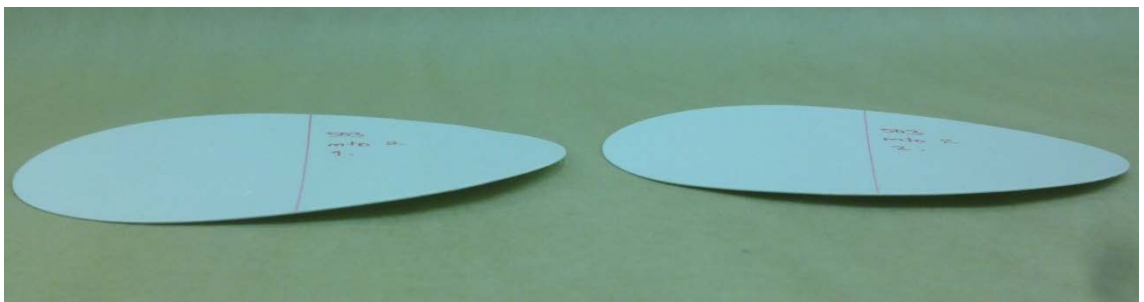
Kuva 23. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 50 % (1.)



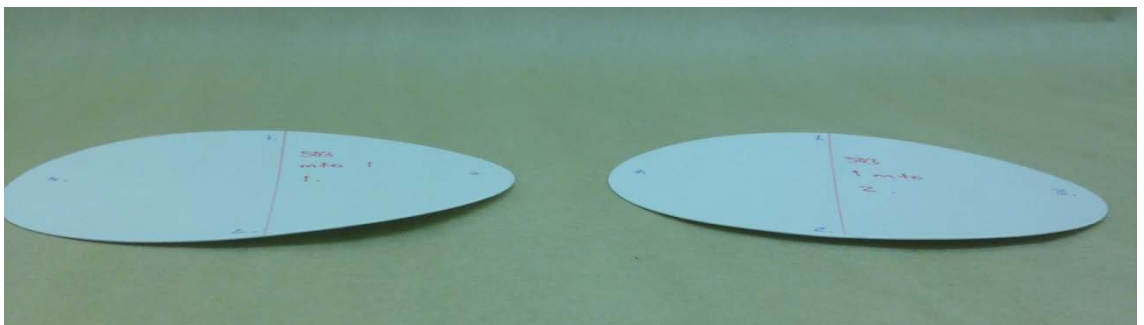
Kuva 24. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 50 % (1.)



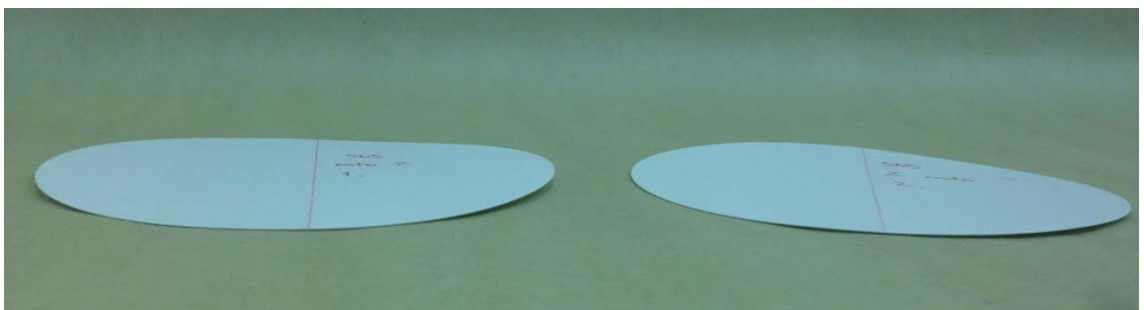
Kuva 25. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 50 % (1.)



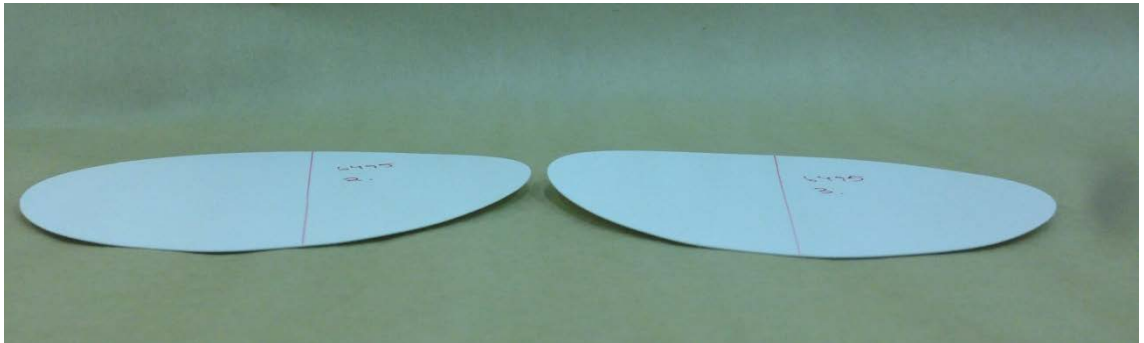
Kuva 26. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 50 % (1.)



Kuva 27. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 50 % (1.)



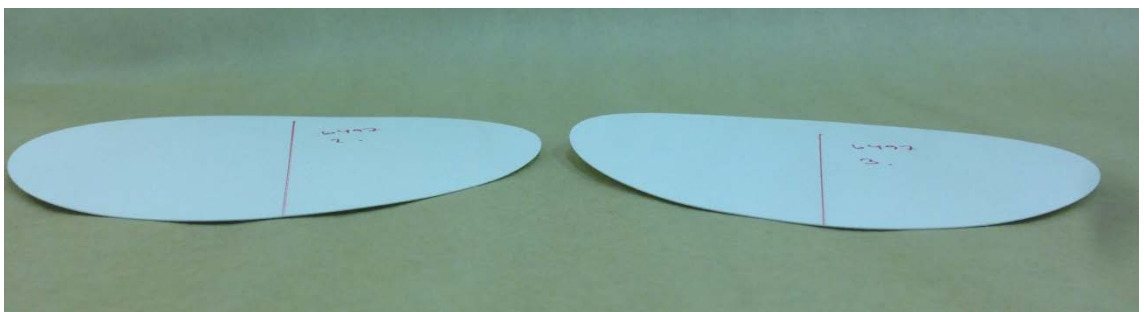
Kuva 28. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 50 % (1.)



Kuva 29. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 20 %



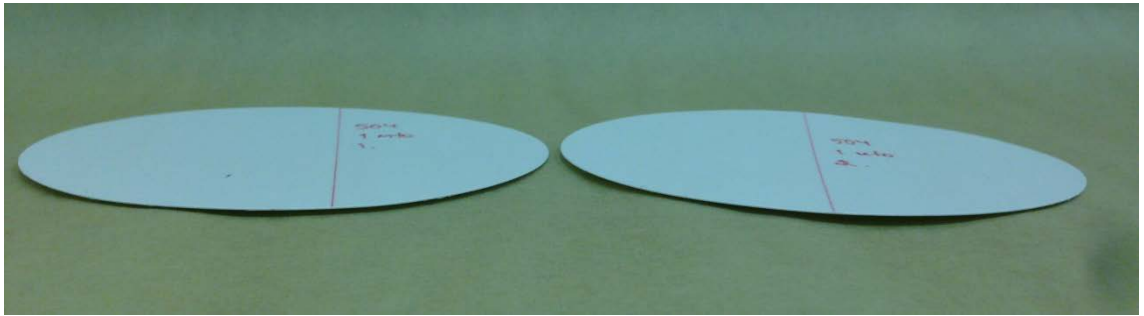
Kuva 30. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 20 %



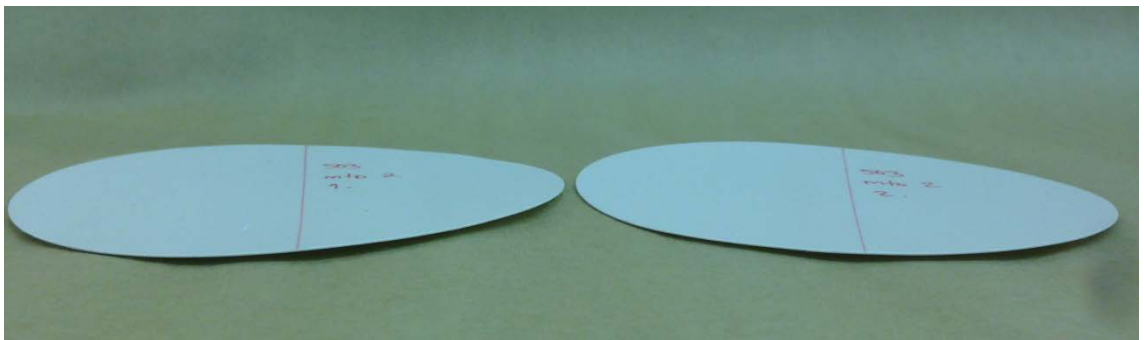
Kuva 31. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 20 %



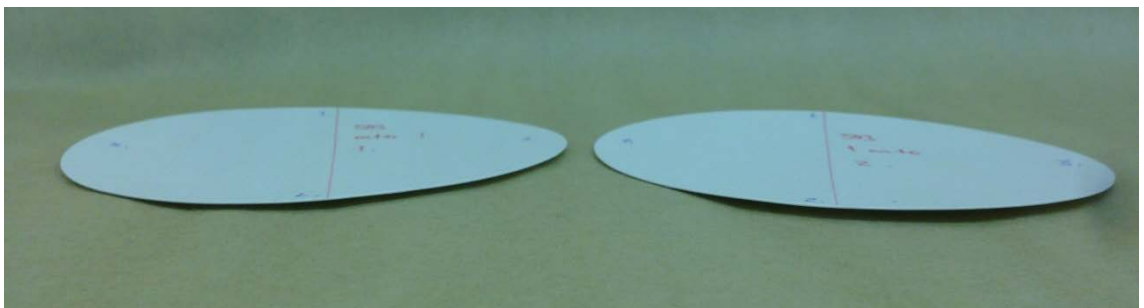
Kuva 32. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 20 %



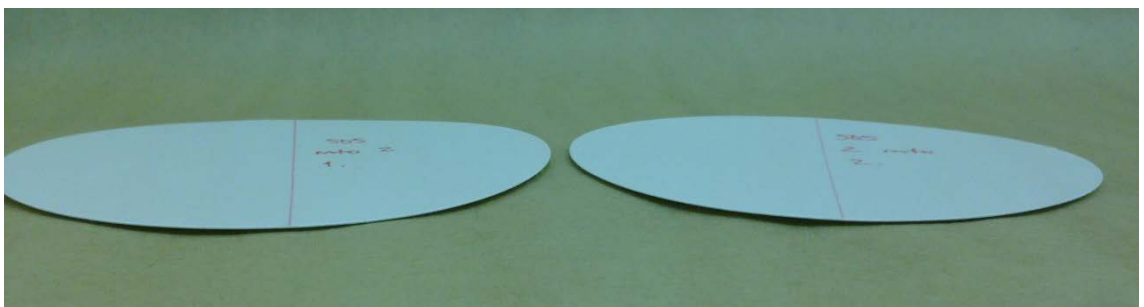
Kuva 33. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 20 %



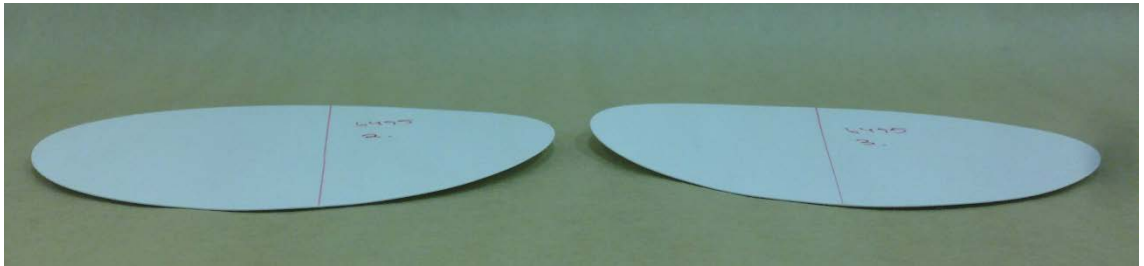
Kuva 34. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 20 %



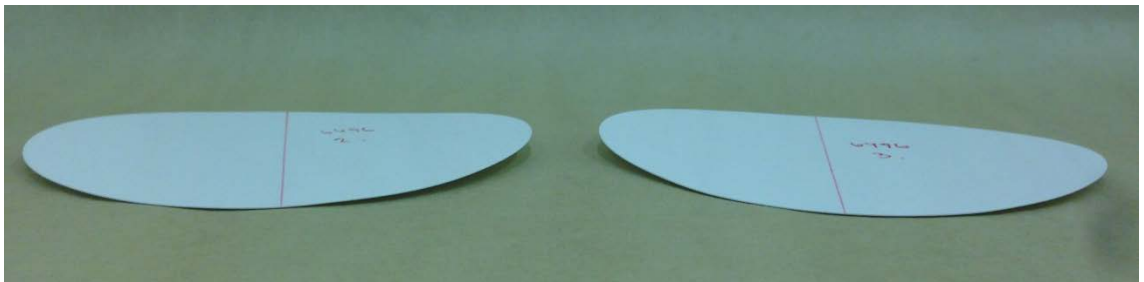
Kuva 35. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 20 %



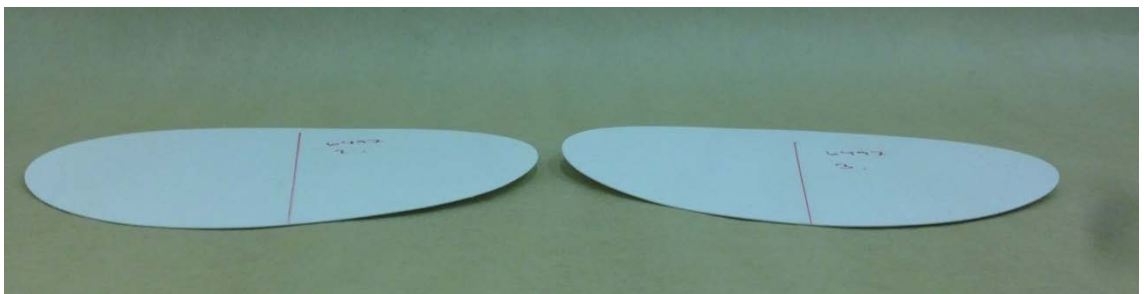
Kuva 36. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 20 %



Kuva 37. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 35 %



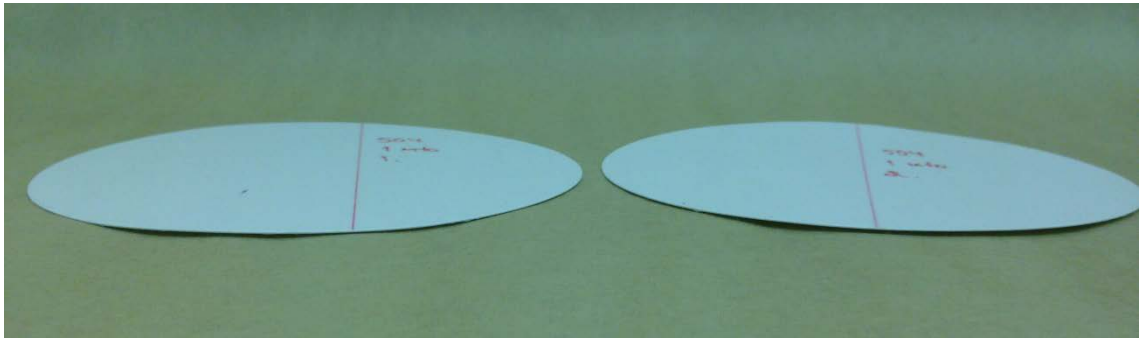
Kuva 38. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 35 %



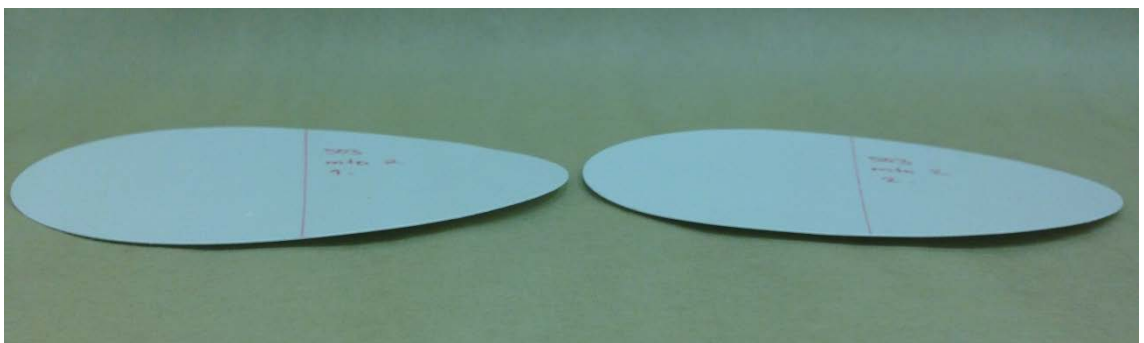
Kuva 39. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 35 %



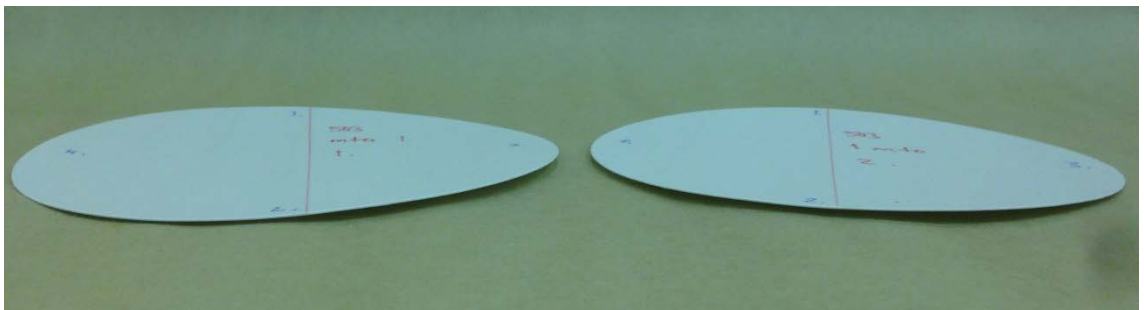
Kuva 40. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 35 %



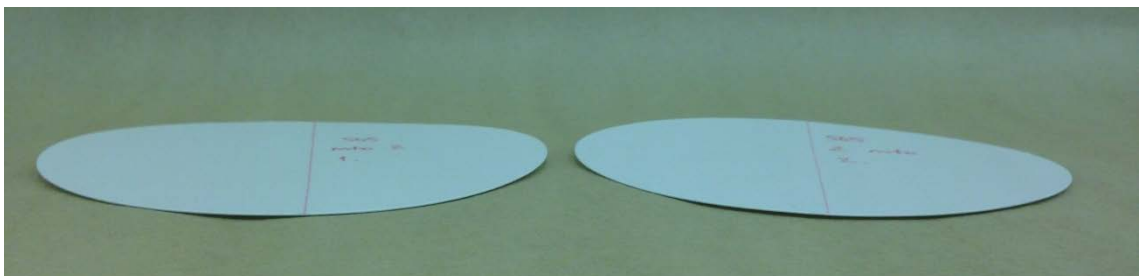
Kuva 41. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 35 %



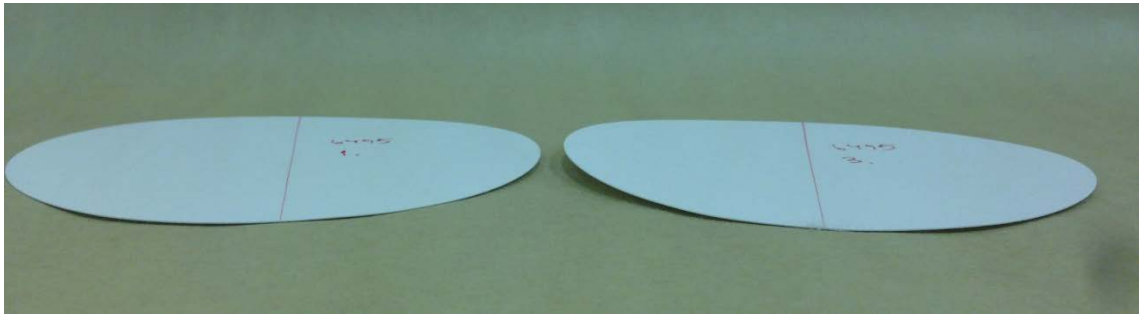
Kuva 42. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 35 %



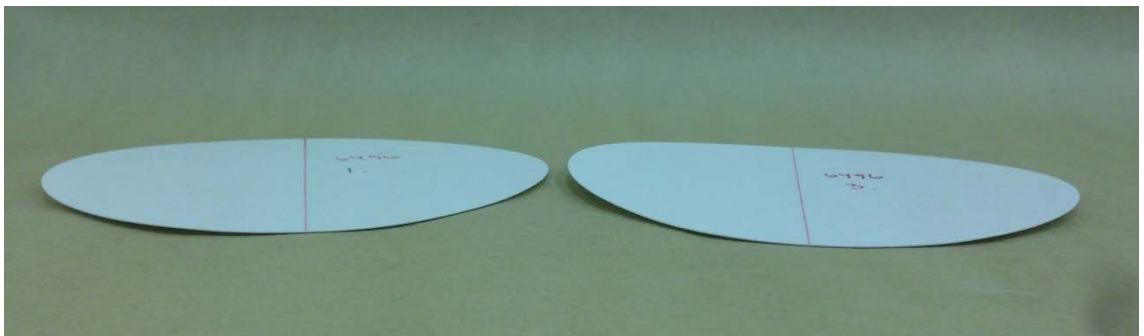
Kuva 43. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 35 %



Kuva 44. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 35 %



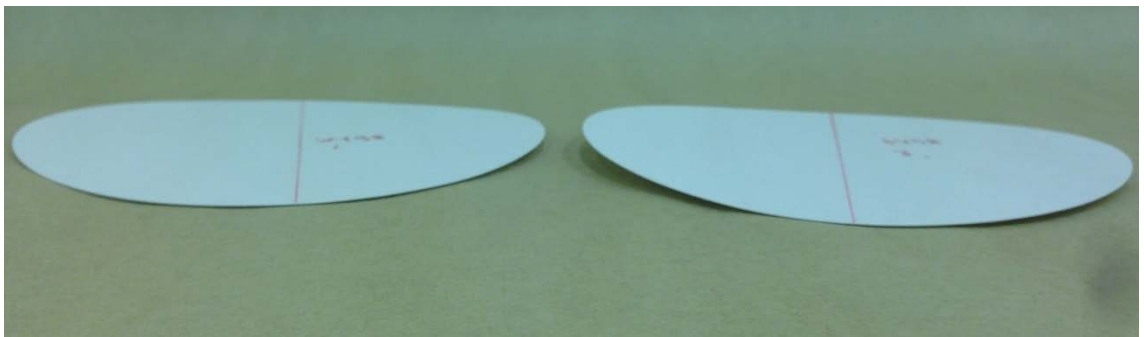
Kuva 45. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 50 % (2.)



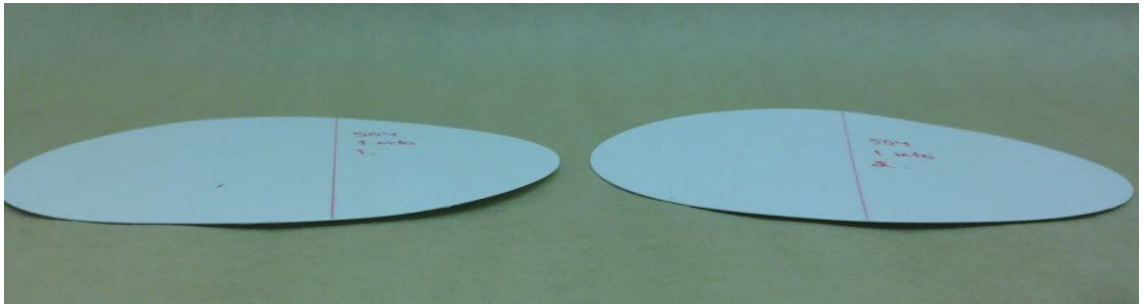
Kuva 46. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 50 % (2.)



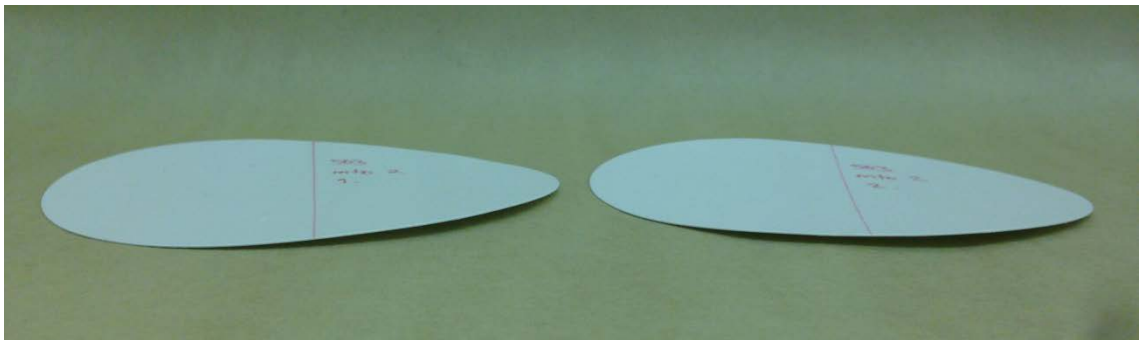
Kuva 47. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 50 % (2.)



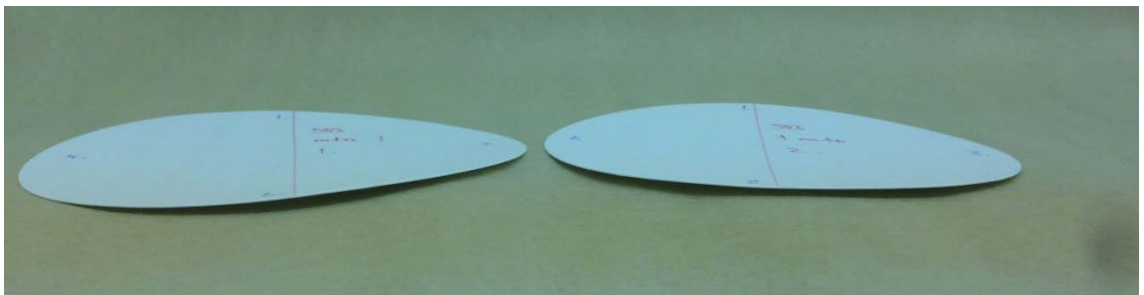
Kuva 48. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 50 % (2.)



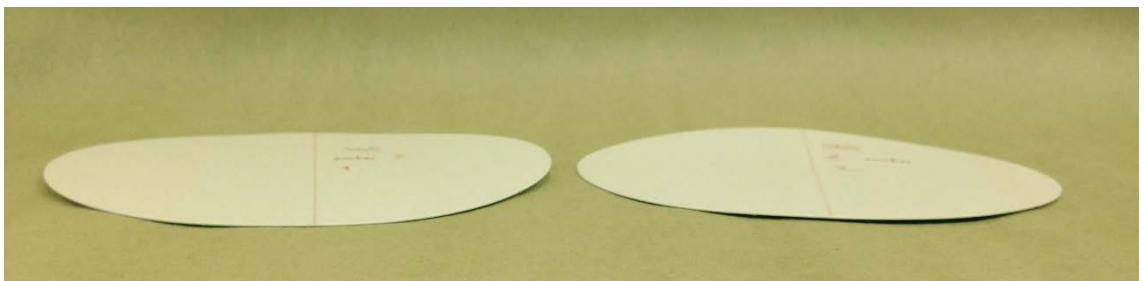
Kuva 49. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 50 % (2.)



Kuva 50. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 50 % (2.)



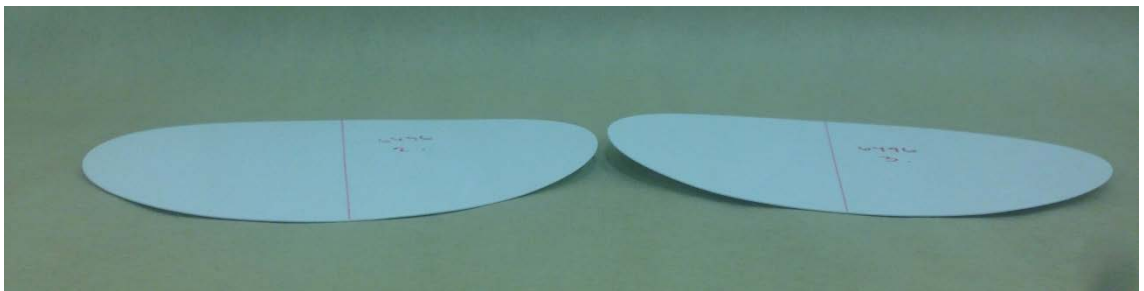
Kuva 51. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 50 % (2.)



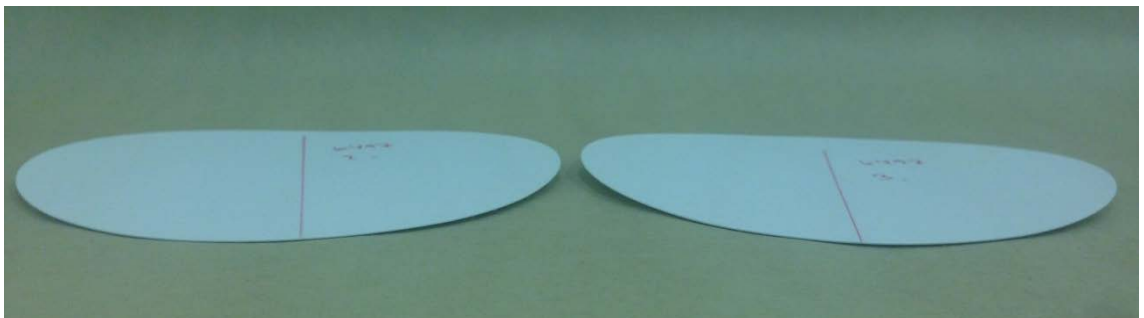
Kuva 52. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 50 % (2.)



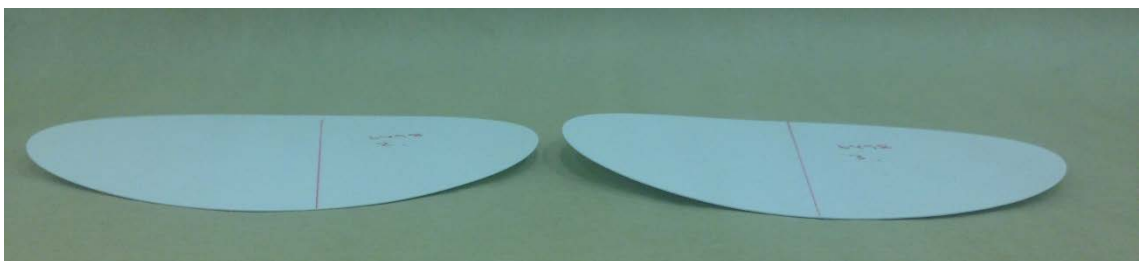
Kuva 53. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 70 % (1.)



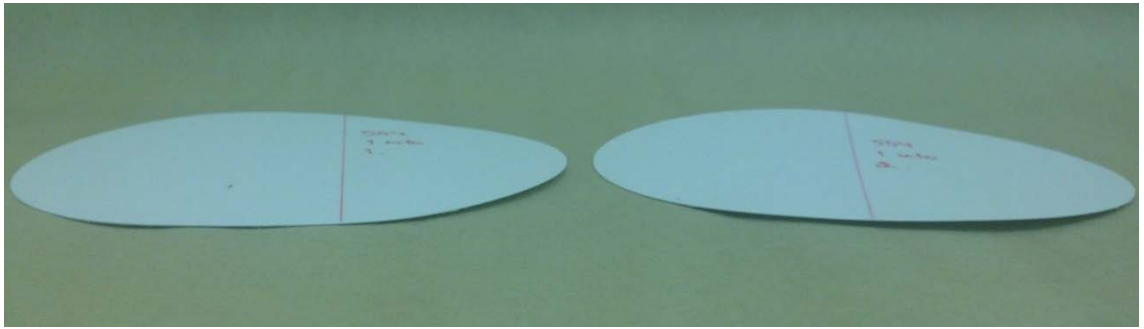
Kuva 54. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 70 % (1.)



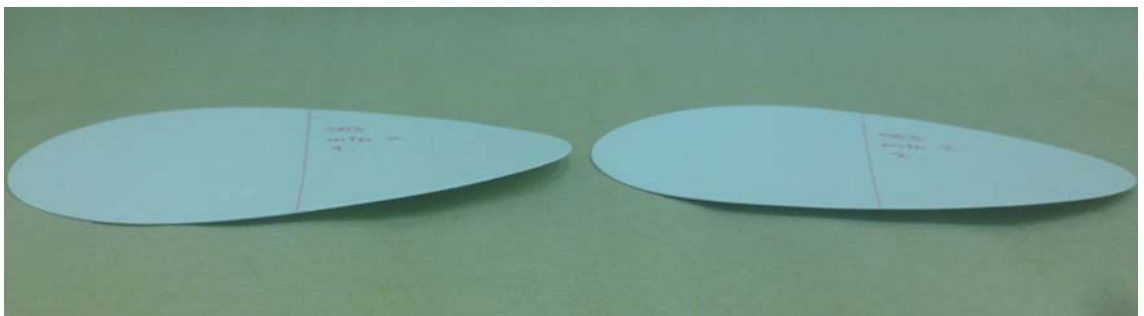
Kuva 55. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 70 % (1.)



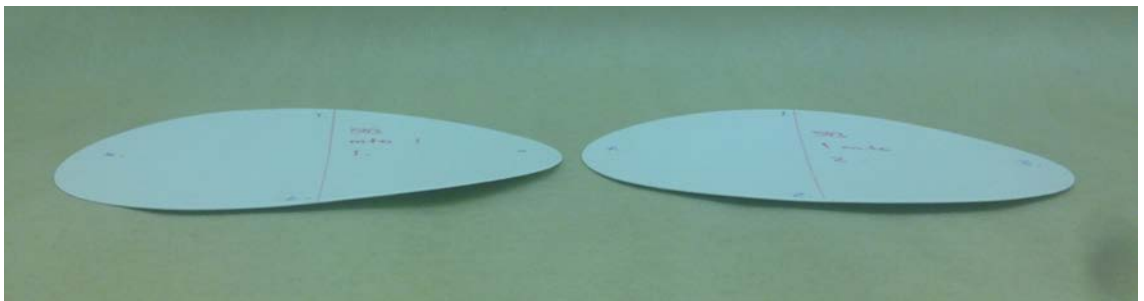
Kuva 56. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 70 % (1.)



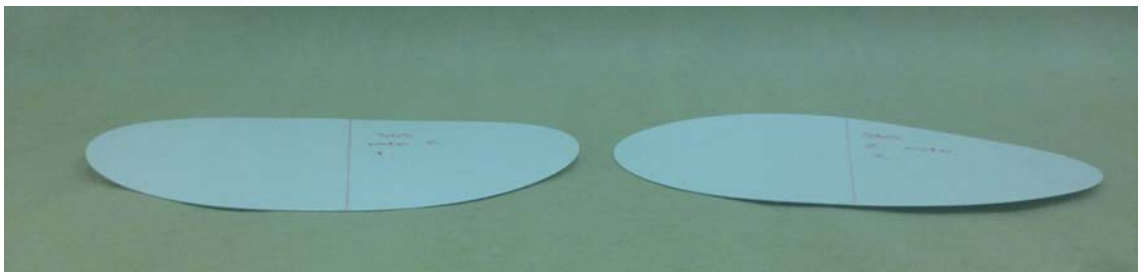
Kuva 57. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 70 % (1.)



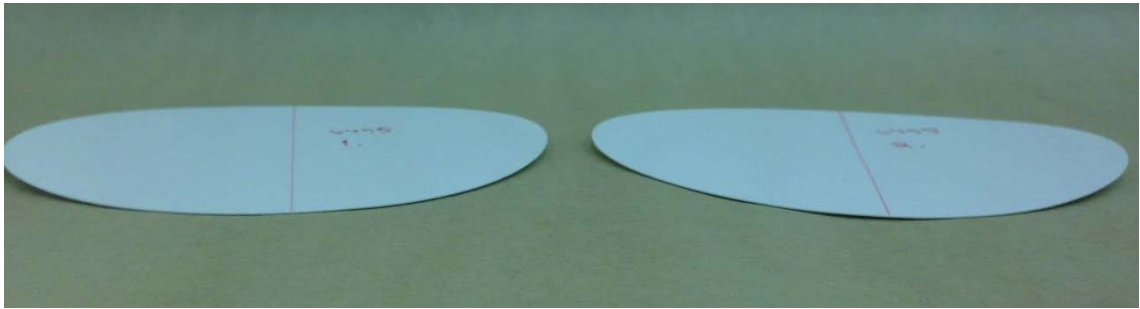
Kuva 58. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 70 % (1.)



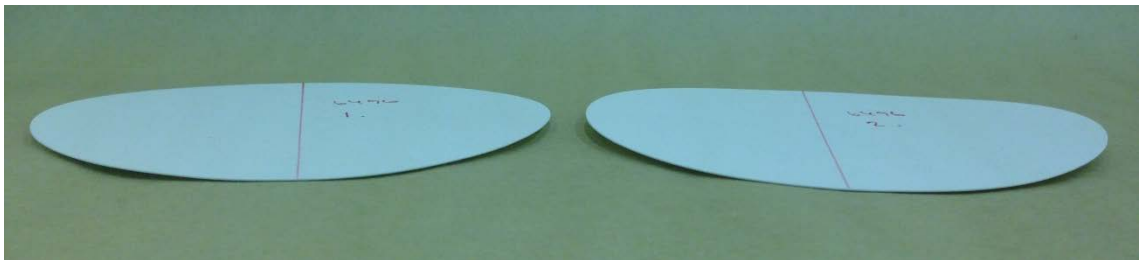
Kuva 59. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 70 % (1.)



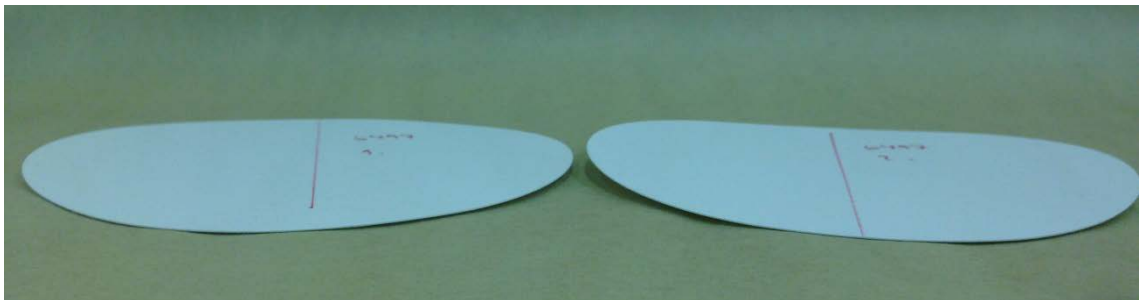
Kuva 60. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 70 % (1.)



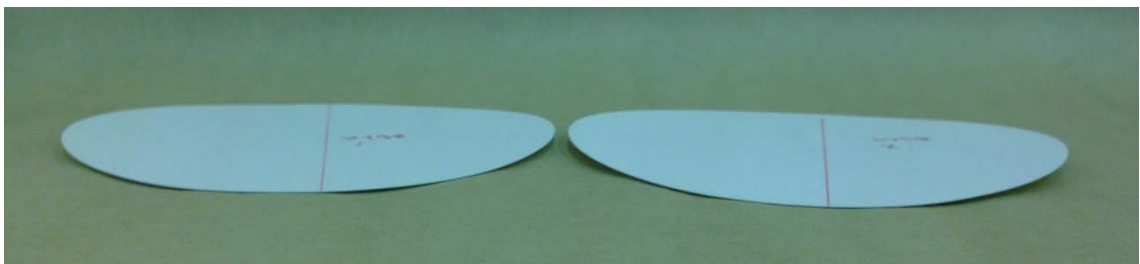
Kuva 61. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 82 % (max.)



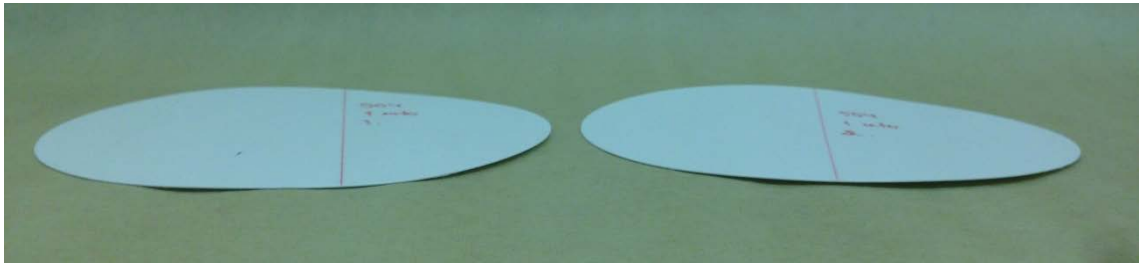
Kuva 62. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 82 % (max.)



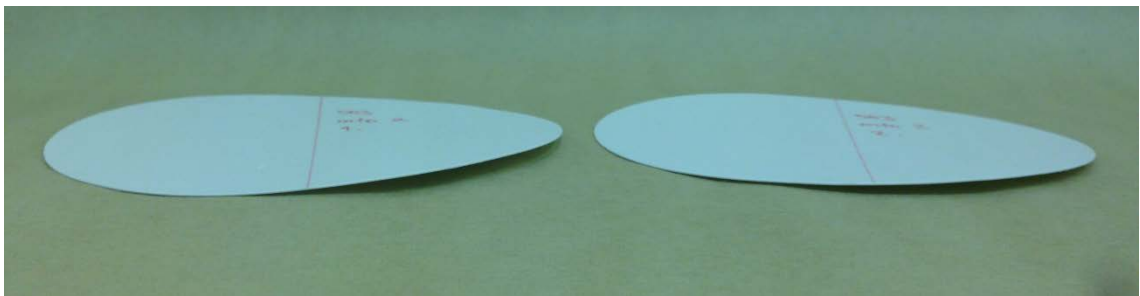
Kuva 63. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 82 % (max.)



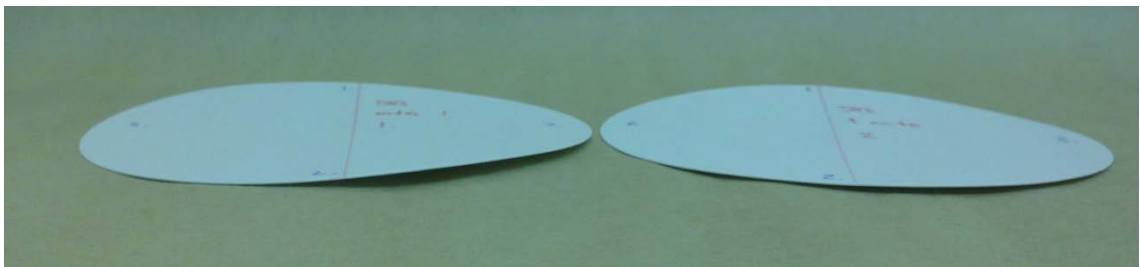
Kuva 64. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 82 % (max.)



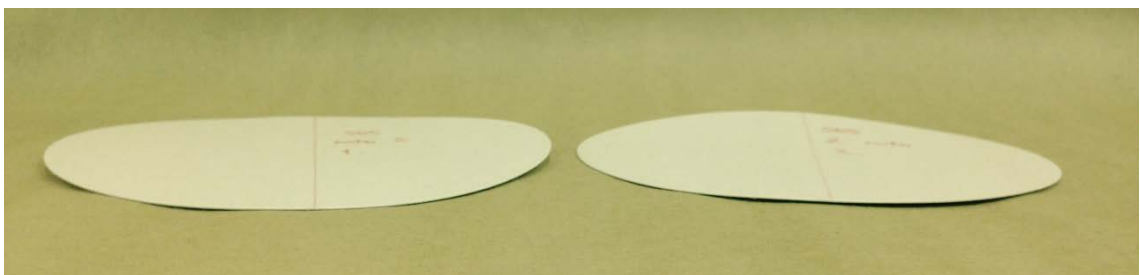
Kuva 65. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 82 % (max.)



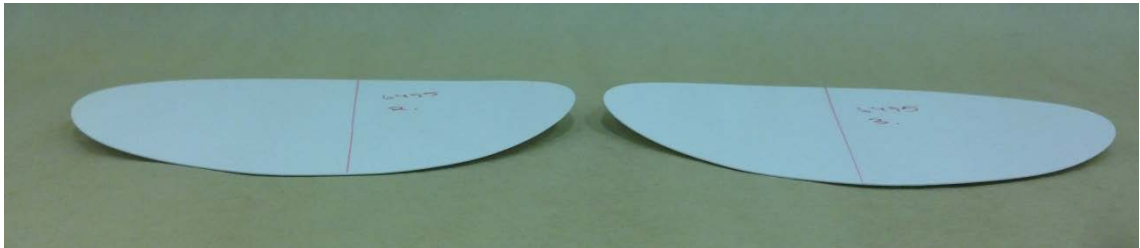
Kuva 66. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 82 % (max.)



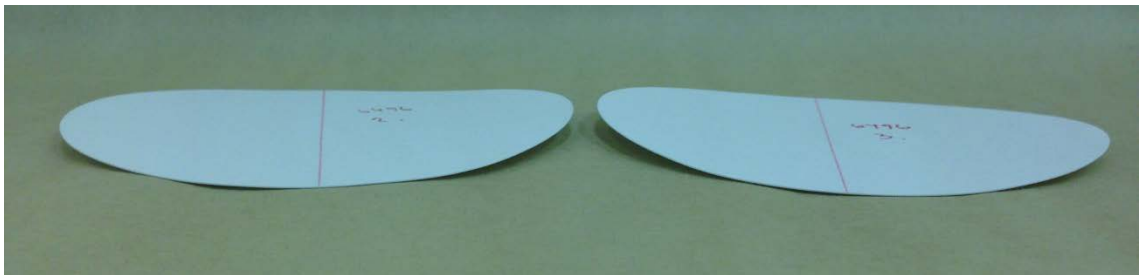
Kuva 67. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 82 % (max.)



Kuva 68. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 82 % (max.)



Kuva 69. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 70 % (2.)



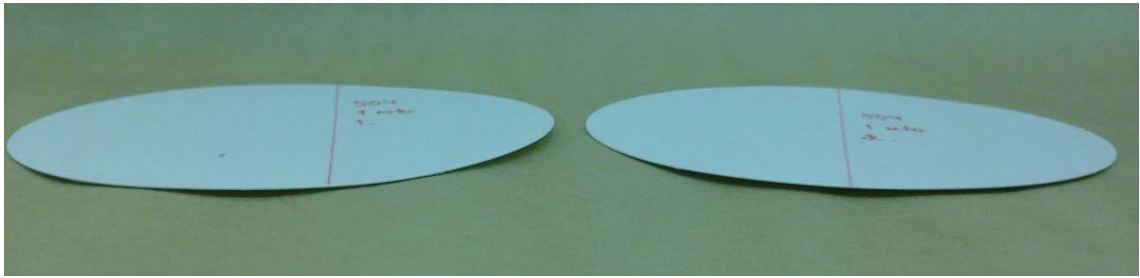
Kuva 70. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 70 % (2.)



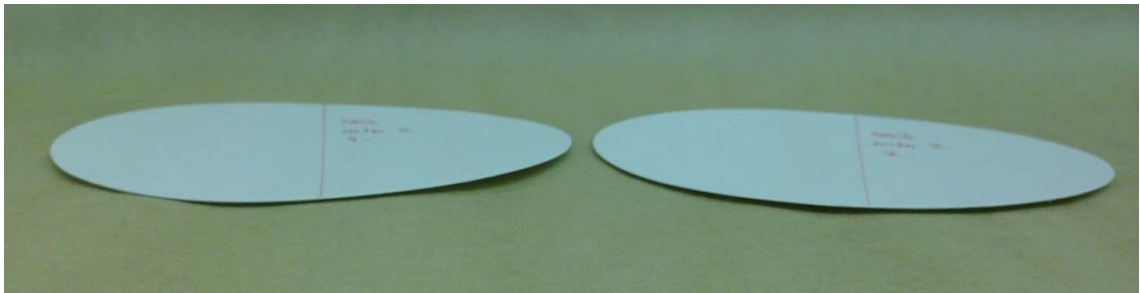
Kuva 71. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 70 % (2.)



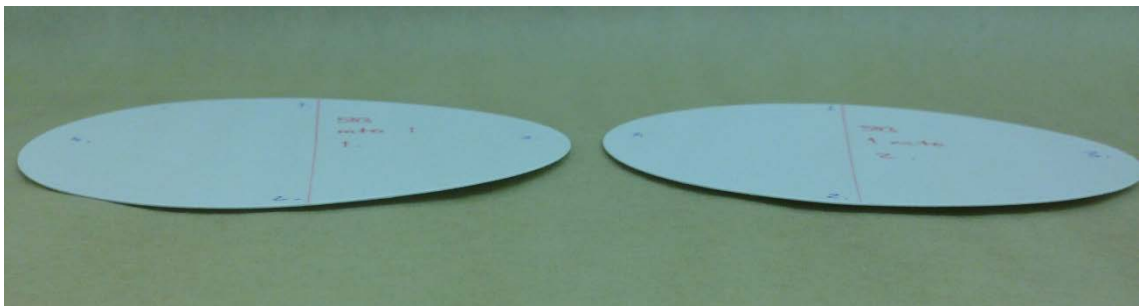
Kuva 72. Päälystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 70 % (2.)



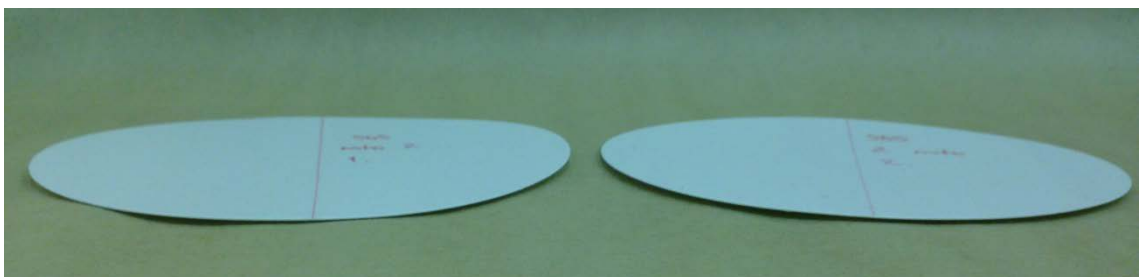
Kuva 73. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 70 % (2.)



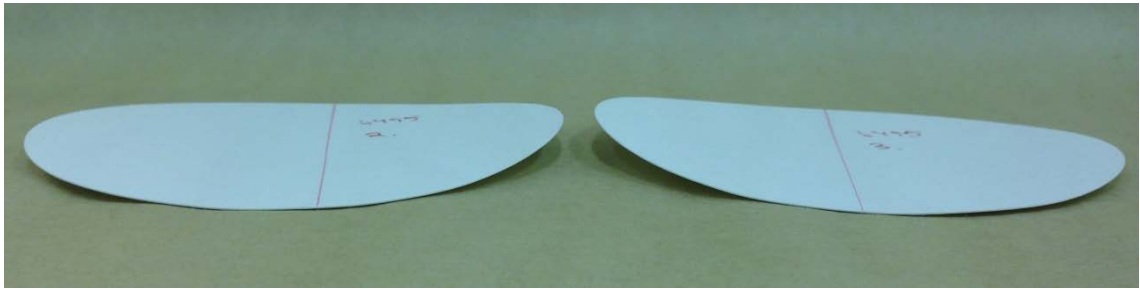
Kuva 74. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 70 % (2.)



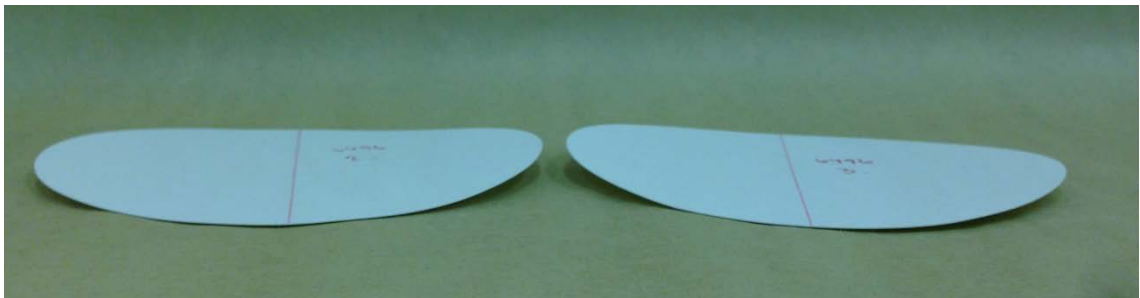
Kuva 75. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 70 % (2.)



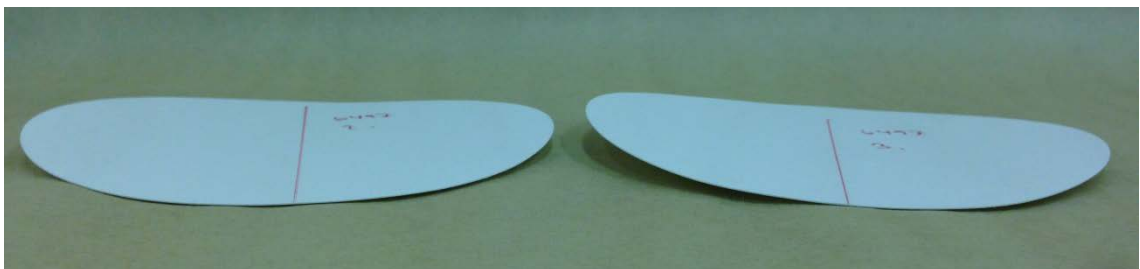
Kuva 76. Päälystetyt rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 70 % (2.)



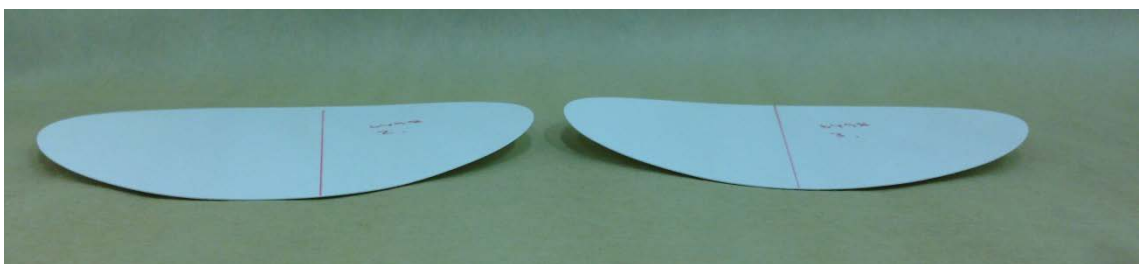
Kuva 77. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 50 % (3.)



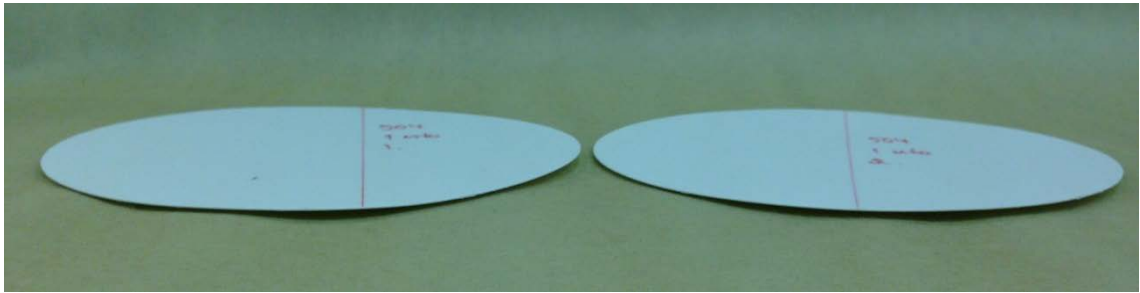
Kuva 78. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 50 % (3.)



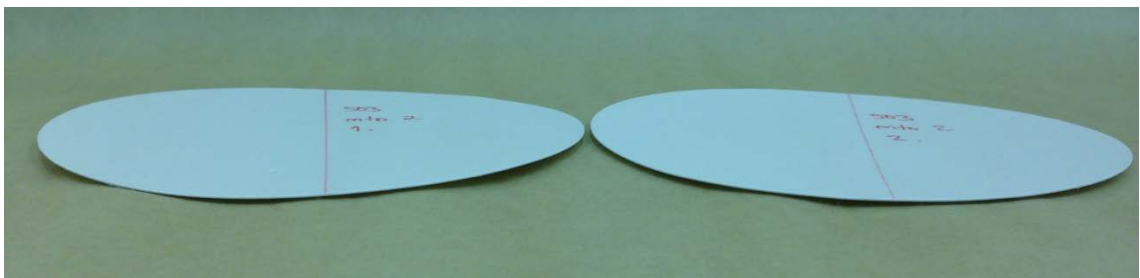
Kuva 79. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 50 % (3.)



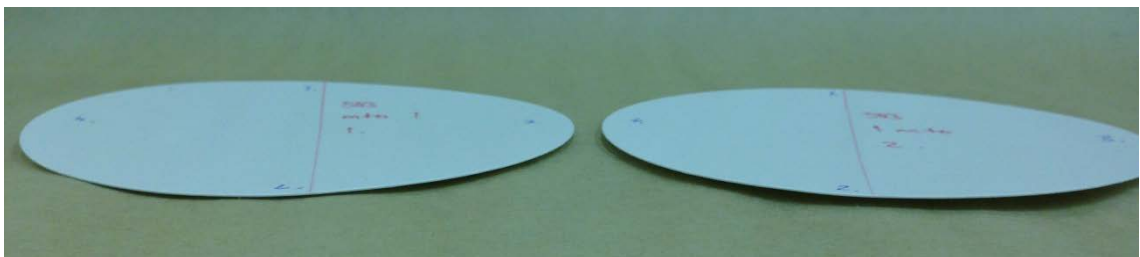
Kuva 80. Päällystämättömät rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 50 % (3.)



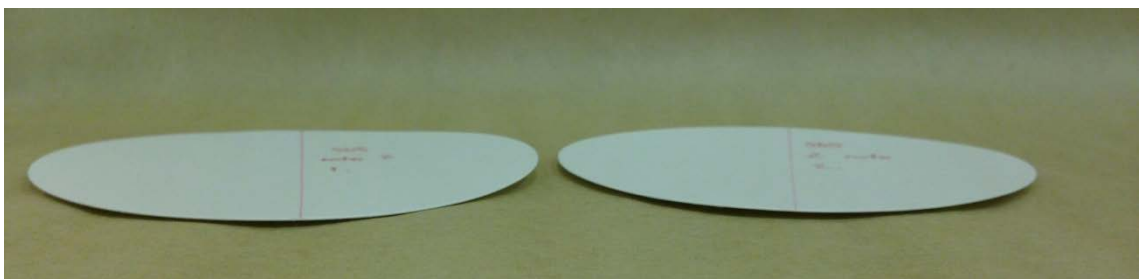
Kuva 81. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP1, RH 50 % (3.)



Kuva 82. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP2, RH 50 % (3.)



Kuva 83. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP3, RH 50 % (3.)



Kuva 84. Päällystetyt rinnakkaiset näytteet, KP4, RH 50 % (3.)