

Tiina Jääskeläinen

Kartongin pintakerroksen lujuuskemioiden vaikutus taivutusjäykkyyteen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Laboratorioanalyttikko (AMK)

Laboratorioanalytiikka

Opinnäytetyö

9.5.2018

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Tiina Jääskeläinen Kartongin pintakerroksen lujuuskemioiden vaikutus taivutusjäykkyyteen 45 sivua + 3 liitettä 9.5.2018
Tutkinto	Laboratorioanalytiikka (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Laboratorioanalytiikka
Ohjaajat	Vanhempi tutkija Anna-Maija Perander, Kemira Oyj Yliopettaja Jukka Niiranen, Metropolia AMK
<p>Opinnäytetyö tehtiin Kemira Oyj:n tutkimuskeskuksessa Espoon Suomenojalla, Fiber & Bioeconomy -osastolla. Työn tarkoituksena oli tutkia kartongin pintakerrokseen käytettävien lujuuskemikaalien vaikutusta taivutusjäykkyyteen. Kuluttajakkauskartongeilla tärkein mekaaninen ominaisuus on taivutusjäykkyys. Kartongista pyritään tekemään entistä kevyempää nostamalla keskikerroksen bulkkia (paperin tiheyden käänteisarvo, nk. ominaistilavuus) säilyttäen samalla sen lujuusominaisuudet.</p> <p>Työ jakaantui kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa tehtiin laaja arkkisarja useilla eri kemikaaleilla ja saatujen tulosten perusteella valittiin parhaat yhdistelmät toiseen arkkisarjaan. Ensimmäinen, yksikerrosarkkisarja tehtiin Rapid-Köhthen-tyyppisellä arkkimuottilaitteistolla. Kolmikerrosarkkisarja tehtiin dynaamisella arkkimuotilla, joka mallintaa paremmin arkinmuodostusta perinteisellä paperikoneella. Kolmikerrosarkeista mitattiin taivutusjäykkyydet, joista saatujen mittaustulosten avulla pyrittiin todentamaan pintakerrokseen käytettyjen kemioiden vaikutukset.</p> <p>Rapid-Köhthen-arkkien perusteella valikoitui dynaamiselle arkkimuotille kahdeksan erilaista kationinen ja anioninen/amfoteerinen polymeeri -yhdistelmää. Näistä voidaan taivutusjäykkyyksmittausten jälkeen todeta, että kaksi eri tärkkelyksen ja polymeerin yhdistelmää ovat toimivia, kun halutaan vaikuttaa taivutusjäykkyyteen. Tutkimusta voisi jatkaa ottamalla tarkasteluun kyseiset yhdistelmät ja vaihtamalla kemikaalien suhteita (anioninen/kationinen) sekä annosmääriä.</p>	
Avainsanat	taivekartonki, taivutusjäykkyys, puristuslujuus (SCT), kimmomoduuli, vetolujuus, bulkki

Author Title Number of Pages Date	Tiina Jääskeläinen The Effect of the Strengthening Chemicals of the Cardboard Surface Layer on Bending Stiffness 45 pages + 3 appendices 9 May 2018
Degree	Bachelor of Laboratory Services
Degree Programme	Laboratory Sciences
Instructors	Anna-Maija Perander, Sr Research Scientist, Kemira Oyj Jukka Niiranen, Principal Lecturer, Metropolia AMK
<p>This study was made at the Kemira Oyj Research Center at Espoo Suomenoja, in Fiber & Bioeconomy -team. The aim of the study was to find out the effect of the strength chemicals of the paperboard surface layer on bending stiffness. The most important mechanical characteristic of consumer packaging boards is bending stiffness. The target was to make the cardboard lighter by raising the bulk of the middle layer (the inverse value of the paper density, so-called specific volume) but at the same time not weaken the strength properties.</p> <p>The work was divided into two parts. In the first part, a large series of sheet was made with several different chemicals and the best results were selected in the second series. The first, single-sheet series was made with the Rapid-Köhthen sheet former. The three-layered sheet set was made with a dynamic sheet-former that better modeled sheet forming on a traditional paper machine. Bending stiffnesses were measured from the three-layered sheets. These results were used to verify the effects of the chemicals used in the surface layer.</p> <p>By the results of the Rapid-Köhthen sheets, eight different cationic and anionic/amphoteric-polymer combinations were selected for the dynamic sheet former. After these bending stiffness measurements, two different starch and polymer combinations can be used to influence bending stiffness. The study could be continued by examining these combinations and by changing the chemical relationships (anionic/cationic) and dosage amounts of chemicals.</p>	
Keywords	folding boxboard, bending stiffness, compression strength (SCT), elastic modulus, tensile strength, bulk

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Yleistä kuiduista sekä paperin ja kartongin rakenteesta	2
2.1	Kuitujen ominaisuuksia ja kuituverkon muodostuminen	3
2.2	Paperin ja kartongin raaka-aineet	7
2.2.1	Kemiallinen massa	7
2.2.2	Mekaaninen massa	7
2.2.3	Ulkomaiset kuituraaka-aineet ja uusiomassa	7
2.2.4	Muut raaka-aineet	8
3	Taivekartonki	9
3.1	Yleistä	9
3.2	Rakenne	9
4	Kuivalujalisäaineet paperin ja kartongin valmistuksessa	12
4.1	Tärkkelys	12
4.1.1	Kationinen tärkkelys	13
4.1.2	Anioniset ja amfoteeriset tärkkelykset	14
4.2	Polymeeriset ja synteettiset kuivalujalisäaineet	14
5	Paperitekniisten ominaisuuksien mittaaminen	15
5.1	Fysikaaliset ominaisuudet	16
5.2	Lujuusominaisuudet	16
6	Työn suoritus	19
6.1	Arkkisarja Rapid-Köthen-tyyppisellä arkkimuottilaitteistolla	19
6.1.1	Sellujen jauhaminen	20
6.1.2	Schopper-Riegler	23
6.1.3	Testimassan valmistus ja kemikaalilaimennokset	26
6.1.4	L&W-Haage Rapid-Köthen-tyyppinen arkkimuottilaitteisto	27
6.1.5	Arkkien valmistus	28
6.1.6	Paperimittaukset	29
6.1.7	Tulosten analysointi ja koepisteiden valinta dynaamiselle arkkimuotille	30
6.2	Arkkisarja dynaamisella arkkimuotilla (DSF, Dynamic Sheet Former)	32

6.2.1	Massan pulperointi	35
6.2.2	Testimassojen valmistus ja kemikaalilaimennukset	35
6.2.3	Arkkien valmistus	36
6.2.4	Paperimittaukset ja tulosten analysointi	37
7	Johtopäätökset	42
	Lähteet	44
	Liitteet	
	Liite 1. RK-arkkisarjan koepisteet ja kemikaaliannokset	
	Liite 2. Mittaustulokset Rapid-Köthen-arkeista	
	Liite 3. Rapid-Köthen-arkkisarjan mittaustulosten keskiarvot	

Lyhenteet

BCTMP	<i>bleached Chemi Thermomechanical Pulp</i> , valkaistu kemi(kuuma)hierre
BSD	<i>backscattered detector</i> , takaisinsirontadetektori
CD	<i>cross direction</i> , paperikoneen poikkisuunta
CMC	<i>carboxymethyl cellulose</i> , karboksimeetyyliselluloosa
CTMP	<i>chemithermomechanical pulp</i> , kemi(kuuma)mekaaninen massa
DSF	<i>dynamic sheet former</i> , dynaaminen arkkimuotti
FBB	<i>folding boxboard</i> , taivekartonki
GW	<i>ground wood</i> , mekaaninen massa
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> , kansainvälinen standardisoimisorganisaatio
MD	<i>machine direction</i> , paperikoneen konesuunta
PAM	<i>polyacrylamide</i> , polyakryyliamidi
RK	<i>Rapid-Köthen -tyyppinen arkkimuottilaitteisto</i>
SEM	<i>scanning electron microscopy</i> , pyyhkäisyelektronimikroskooppi
TMP	<i>thermomechanical pulp</i> , kuumahierre

1 Johdanto

Kemira on globaali kemianyhtiö, joka palvelee asiakkaita runsaasti vettä käyttävillä teollisuudenaloilla. Se tarjoaa asiantuntemusta, sovellusosaamista ja kemikaaleja, jotka parantavat asiakkaiden vesi-, energia- ja raaka-ainetehokkuutta. Kemira keskittyy massa- ja paperi-, öljyteollisuuteen sekä veden käsittelyyn. [1.]

Tämä opinnäytetyö tehtiin osana Kemira Oyj:n projektia, jonka tarkoituksena on kartongin keventäminen keskikerroksen bulkkia nostamalla. Samalla pyritään kuitenkin säilyttämään sen lujuusominaisuudet. Kartongin keventämiselle on kasvava tarve ihmisten kulutus- ja ostotottumusten muuttuessa ja siirryessä yhä enenevässä määrin verkkokauppaan ja sieltä tilattaviin tuotteisiin. Opinnäytetyössä keskityttiin pintakerrosten kemioiden lujuusominaisuuksiin, joiden avulla pyritään mahdollistamaan keskikerroksen bulkkaus. Tällä tavalla kartongin ohut pintakerros pitää taivekartongin hyvin käsiteltävänä, muotonsa pitävänä ja kestäväenä pitkienkin kuljetusketjujen aikana. Työ suoritettiin syys- ja lokakuun 2017 aikana Kemira Oyj:n tutkimuskeskuksessa, Fiber and Bioeconomy -osastolla Espoon Suomenojalla.

Alkuperäiseen suunnitelmaan kuului kaksi arkkisarjaa dynaamisella arkkimuotilla. Ensin tehtäisiin laaja sarja yksikerrosarkkeja, joiden perusteella valittaisiin sopivat kemikaalit kolmikerrosarkkeihin. Suunnitelmaa muutettiin siten, että valittiin nopeampi tapa tehdä alkukartoitus ja selvittää parhaat kemikaalit kolmikerrosarkkeihin. Ensimmäinen iso, useita eri kemikaaleja ja annosmääriä käsittävä arkkisarja tehtiin Rapid-Köthen -arkkimuotilla, ja näistä arkeista saatujen tulosten perusteella valittiin koepisteet kolmikerrosarkkeihin. Kolmikerrosarkkien avulla oli tarkoitus todentaa pintakerroksen kemian vaikutusta taivekartongin taivutusjäykkyyteen.

2 Yleistä kuiduista sekä paperin ja kartongin rakenteesta

Paperi valmistetaan puukuiduista, jotka irrotetaan puuaineesta joko kemiallisesti keittämällä tai mekaanisen rasituksen avulla [2, s. 24]. Kemiallisessa kuidutuksessa kemikaalien ja lämmön avulla liuotetaan kuituja toisiinsa sitova ligniini, jolloin kuidut vapautuvat [2, s. 31].

Mekaanisen massanvalmistuksen perusmenetelmät ovat hionta ja hierto. Nämä menetelmät perustuvat veteen, lämpöön ja toistuvaan rasitukseen, joiden avulla puun ligniini pehmenee ja kuidut saadaan erilleen toisistaan. [2, s. 32.] Kuitujen erottamisen jälkeen muodostetaan veden avulla yksittäisistä kuiduista yhtenäinen, pitkä ja ohut matto – eli paperi tai kartonki [3].

Puu koostuu muodoiltaan ja tehtäviltään erilaisista soluista, jotka kasvavat pitkänomaisina pääosin rungonsuuntaisesti. Näitä soluja kutsutaan kuiduiksi, joten kuitu on siis yhtä ainoaa solua. Puussa on lisäksi säteensuuntaisia soluja, jotka huolehtivat veden ja ravinnon kulusta puun poikkisuunnassa. Luonnontilassa olevan puukuidun tärkeimmät ainesosat ovat selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini. Puulajista riippuen kuiduissa on lisäksi vähäisiä määriä uuteaineita. Selluloosa ja hemiselluloosa ovat ketjupolymeerejä, joiden ominaisuuksiin kuuluu hydroksyyliyhmiensä säännöllinen esiintyminen ja taipumus muodostaa yhteenliittymiä eli fibrillejä. Soluseinän runko muodostuu selluloosasta ja runkoa ympäröivä väliaine hemiselluloosasta ja ligniinistä. [2, s. 24 – 25.]

Selluloosa ($C_6H_{10}O_5$)_n on puukuitujen soluseinämien varsinainen runkoaine ja siten kuitujen tärkein komponentti. Selluloosa antaa kuiduille niiden luonteen ja mahdollistaa niiden käytön paperinvalmistuksessa. Mitä suurempi on selluloosan polymeroitumisaste, sitä lujempaa on selluloosa. [2, s. 26.]

2.1 Kuitujen ominaisuuksia ja kuituverkon muodostuminen

Paras vetolujuus saavutetaan käyttämällä pitkiä ja suorita kuituja. Pitkään kuituun mahtuu enemmän kuitusidoksia, mikä lisää kuituverkon sitoutumista ja näin ollen lujuutta. Pintakarheuteen sekä bulkkiin vaikuttavat sekä huokoisuus että partikkeleiden koko. [4, s. 12]. Taulukkoon 1 on kerätty kuitujen keskeisiä ominaisuuksia ja merkityksiä sidosten muodostumisessa.

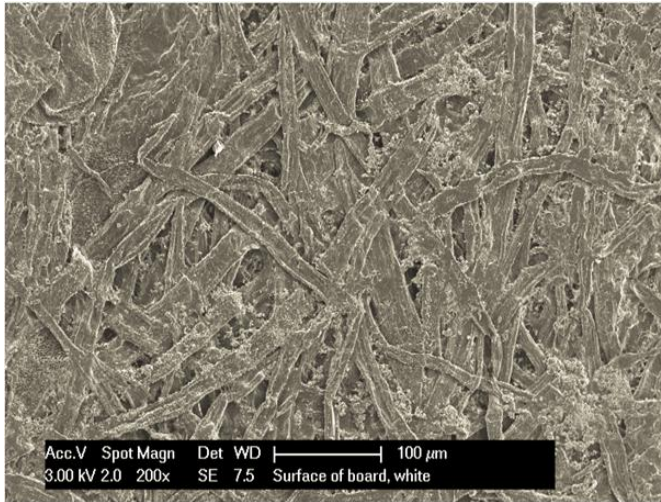
Taulukko 1. Kuitujen keskeisiä ominaisuuksia [3, muokattu]

Kuitujen keskeiset ominaisuudet

Kuituominaisuus	Merkitys sidosten muodostuksessa
Kuitulujuus	Määrää lujuuden maksimitason
Karkeus	Yhden kuidun lujuus, ominaispinta-ala ja mukautumiskyky
Kuitupituus	Yhteen kuituun mahtuvien sidosten lukumäärä
Kuidun ympärystymitta	Sidoksen maksimi pinta-ala ja ominaispinta-ala
RBA (relative bonded area)	Sitoutuneen kuidun pinnan suhteellinen osuus
Ominaissidoslujuus	Sidoksen lujuus sitoutunutta pinta-alayksikköä kohti

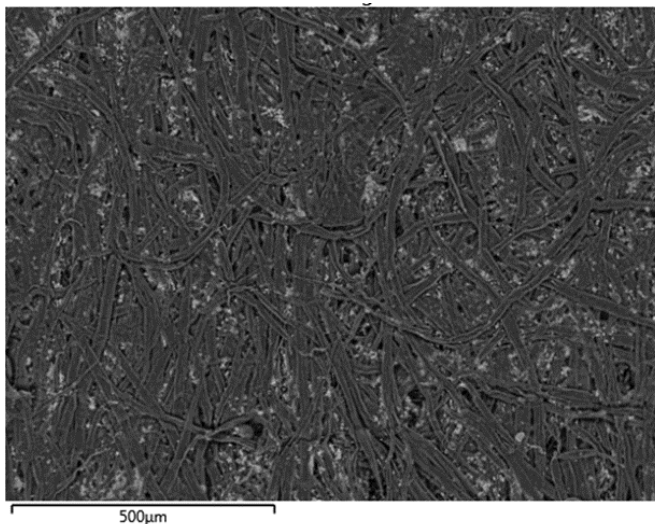
Valmiissa paperissa kuidut ovat kiinni toisissaan sekä kemiallisesti että fysikaalisesti ja näin aikaansaatu kuituverkosto on luja ja kestävä [3]. Kuituverkko on järjestäytynyt kuituista, kuitufragmenteista, hienoaineesta, täyteaineista sekä muista yhdisteistä, mitä massasulppuun (kuitujen ja muiden paperin raaka-aineiden vesiliete) on lisätty.

Kartongin pintaa (kuva 1) voidaan kuvata esimerkiksi SEM- eli pyyhkäisyelektronimikroskoopilla. Pyyhkäisyelektronimikroskooppia käytettäessä näytettä pyyhitään elektronivyöryllä tuotetulla elektronisuihkulla. [5.]



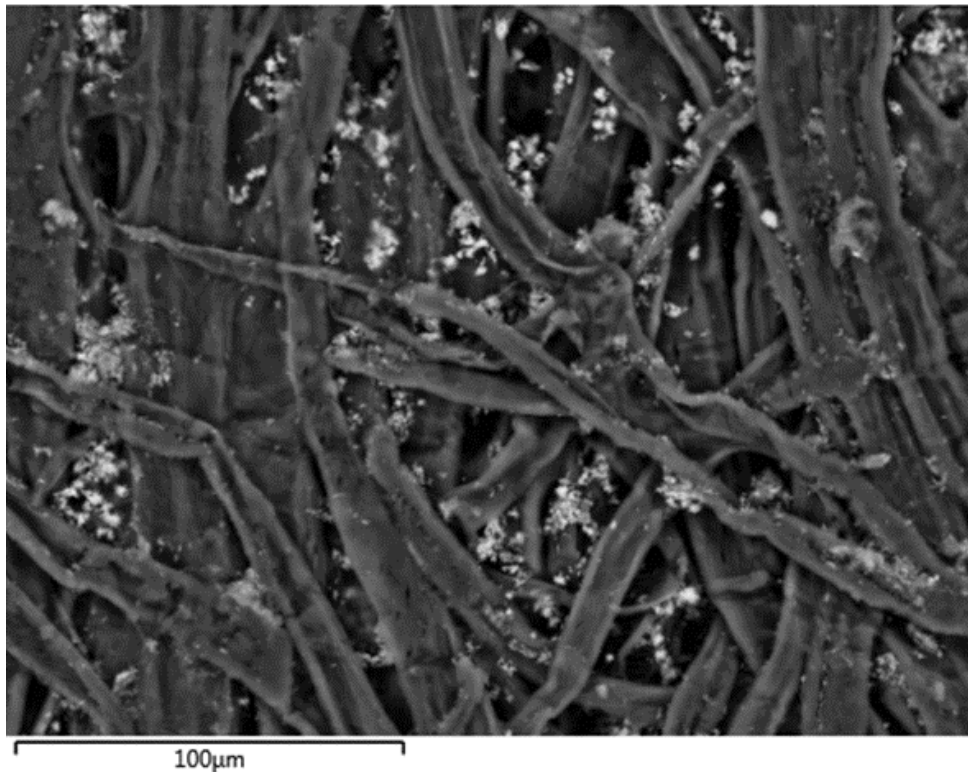
Kuva 1. Kartongin pintaa SEM-mikroskoopilla kuvattuna, kuvassa voidaan nähdä kuitujen orientaatio. Kuva Tytti Larinoja [6].

Kuvissa 2 ja 3 näkyy kartongin pintarakennetta BSD-kuvina kahdella erilaisella suurennoksella. BS-detektorin avulla aikaansaadaan mustavalkoinen kuva ja kuva muodostuu elektroneista, jotka emittoituvat syvemmillä näytteestä kuin SE-elektronit. BE-elektronien intensiteetti on voimakkaasti sidoksissa alkuaineiden atomipainoon. [5.] Painavemmat päällystepigmentit näkyvät näin ollen kirkkaampana mustavalkoisessa kuvassa.



Kuva 2. BSD-kuvaa kartongin pinnalta, 100 x suurennos. Kuva Tytti Larinoja [6].

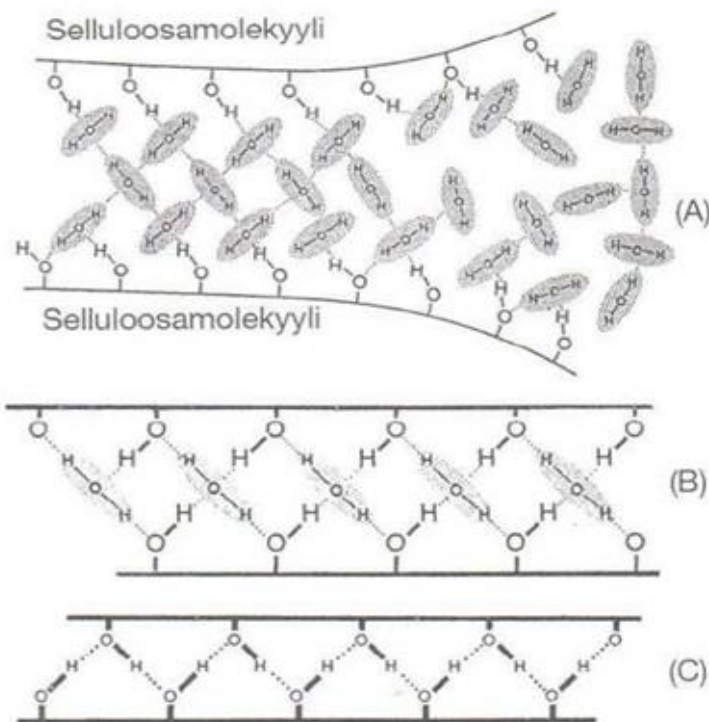
Kuituverkko muodostuu tasomaiseksi kuitujen ollessa paljon pidempiä (1 - 3 mm) verrattuna paperin paksuuteen (tyypillisesti n. 0,1 mm). [4, s. 12.] Paperikoneella kuidut suuntautuvat aina enemmän kone- kuin poikkisuuntaan [2, s. 57]. Kuituorientaatiolla on vaikutusta lähes kaikkiin paperin fysikaalisiin ominaisuuksiin, erityisesti kuitenkin lujuusominaisuuksiin [2, s. 58]. Konesuunta (KS) nähdään kuvassa 3 pystysuoraan, sillä valtaosa kuiduista on suuntautunut pystysuuntaan.



Kuva 3. BSD-kuvaa kartongin pinnalta, konesuunta voidaan nähdä kuitujen suuntautuneisuudesta, 500 x suurennos. Kuva Tytti Larinoja [6].

Paperirainan kuivatusvaiheen aikana kuidut liittyvät yhteen kuitujen välisten sidosten avulla muodostaen verkoston, jolla on mekaanista lujuutta. Kuituverkon rakenne on tärkeä, sillä se vaikuttaa suurimpaan osaan paperin fysikaalisista ominaisuuksista. Paperin koossa pitäviä voimia ovat kuitujen välinen kitka sekä niiden välille syntyvät sidokset. Kuitujen väliset sidokset ovat pääasiassa selluloosan tai hemiselluloosan hydroksyyli-ryhmien välisiä vetysidoksia. Kuidun koossapitäviä vetysidoksia on runsaasti myös kuidun sisällä. Eri kuituun kuuluvien ketjumolekyyliekin välille voidaan saada syntymään vetysidoksia, jos olosuhteet ovat sopivat. Tällöin syntyy kuitujen välinen lujuutta antava kemiallinen sidos kuitujen tarttuessa tiukasti toisiinsa. [2, s. 58.]

Joutuessaan kosketuksiin vapaan veden kanssa kahden ketjumolekyylin välinen vetysidos aukeaa (kuva 4). Samassa yhteydessä ketjumolekyylin hydroksyyliyhmiin sekä vesimolekyylien välille syntyy uusia vetysidoksia, jolloin selluloosan ja hemiselluloosan veden kanssa kosketuksissa olevat pinnat peittyvät niihin sitoutuneilla vesimolekyyleillä. Uusia vetysidoksia ei pääse syntymään ketjumolekyylien väliin, mikäli vapaata vettä on läsnä. Vapaa vesi poistuu viimeistään paperikoneen kuivatusosalla haihuttamalla, jolloin selluloosan ja vesimolekyylin väliset vetysidokset alkavat vähentyä ja tilalle syntyy selluloosamolekyylien välisiä sidoksia. [2, s. 58.]



Kuva 4. Kahden selluloosamolekyylin välisten sidosten aukeaminen (A) ja vetysidosten muodostuminen veden kanssa hydroksyyliyhmiin (B ja C). [2, s. 58.]

Paperin valmistuksessa on tarkoituksena saada aikaan sekä kuitujen sisäisten että kuitujen välisten vetysidosten muodostumista.

2.2 Paperin ja kartongin raaka-aineet

Valmiin paperi- tai kartonkituotteen raaka-ainekoostumus vaihtelee valmistettavan lajin mukaan. Kukin paperi- ja kartonkilaji vaatii oman kuitukoostumuksen, täyteaineen, liimauksen ja lisäaineet. Massa koostuu useista eri raaka-aineista, joilla kullakin on oma tehtävänsä haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. [2, s. 14.]

2.2.1 Kemiallinen massa

Kemiallinen massa on havu- ja lehtipuusulfaattisellua [2, s. 15]. Pitkäkuituista havupuusellua (mänty 3,0 mm ja kuusi 3,1 mm) käytetään monissa kohteissa ja siitä voidaan valmistaa lujempaa paperia kuin lyhytkuituisesta lehtipuumassasta. Tietyn kuitupituuden jälkeen (2-3 mm) ei lujuus yleensä enää kasva, vaan lujuuden määrää yksittäisten kuitujen lujuus. Suomalaisen lehtipuusellun raaka-aine on koivu. Lyhytkuituista koivusellua (0,9–1,2 mm) käytetään lähinnä sellupohjaisten painopapereiden valmistuksessa sekä taivekartongin pintakerroksissa. Koivusellu vaikuttaa paperin loppukäyttöominaisuuksiin, parantaa paino-ominaisuuksia ja käyttäytymistä paino- ja kopiokoneissa sekä tuloslaitteissa. Lisäksi pienemmät kuidut antavat lehtipuumassoille myös paremman opasiteetin eli läpinäkyvyyden. [2, s. 27 - 30.]

2.2.2 Mekaaninen massa

Mekaaniset massat ovat päätyypeiltään joko hioketta tai hierrettä. Niiden lujuusominaisuudet ovat parhaimmillaankin selvästi alhaisemmat kuin sellulla. Mekaaniset massat sisältävät kuitenkin paljon hienoainesta, minkä vuoksi niillä saadaan hyvät paperin pintaominaisuudet. Suuresta ligniinipitoisuudesta johtuen mekaanista massaa sisältävät tuotteet kellastuvat helposti. [2, s. 15.]

2.2.3 Ulkomaiset kuituraaka-aineet ja uusiomassa

Euroopassa ja Aasiassa käytetään samantapaisia havupuusukuja kuin Suomessakin, mutta lisäksi jonkin verran myös lehtikuusta. Se ei suuren uuteainepitoisuutensa vuoksi kuitenkaan sovellu yhtä hyvin massan raaka-aineeksi kuin kuusi ja mänty. Suomalaisen

koivun tärkeimpänä kilpailijana maailmanmarkkinoilla on eukalyptusmassa. Eukalyptuslajeja on paljon, mutta harvat niistä soveltuvat massan raaka-aineeksi. Eukalyptuksen etuna on sen nopea kasvuvauhti, ja sitä viljelläänkin laajalti ympäri maailman.

Lehtipuulajien välillä on suurempi ero kemiallisessa koostumuksessa kuin havupuilla. Eukalyptuksen selluloosapitoisuus on suurempi ja hemiselluloosapitoisuus pienempi kuin koivulla, josta syystä eukalyptusmassan saanto on suurempi kuin koivumassan. [2, s. 30.] Uutena nopeakasvuisena lehtipuulajina on maailmanmarkkinoille tulossa akasia. Sen lyhyiden ja ohutseinäisten kuitujen ansiosta kuitujen lukumäärä painoyksikköä kohden on erittäin suuri, ja sillä saavutetaan suuri valonsirontakerroin ja siten parempi opasiteetti. [2, s. 30 – 31.]

5–6 % maailman paperimassoista tuotetaan non wood -kuiduista (agrokuiduista), ja niiden tuotanto on keskittynyt alueille, joilla on pulaa puusta. Kemiallisen non-wood-markkinamassan tuotanto tapahtuu tyypillisesti pienissä yksiköissä, jotka on integroitu paperi- ja kartonkitehtaisiin, ja niistä valmistetaan lähinnä erikoistuotteita kuten seteli- ja savukepapereita. Esimerkiksi lyhytkuituinen ruokohelvi (*Phalaris Arundinacea L*) on monivuotinen, kestävä, noin 1,5 – 2 metrin korkuinen heinäkasvi, jonka korsista saadaan paperin raaka-ainetta. Muita paperinvalmistukseen soveltuvia non wood - raaka-aineita ovat esimerkiksi olki, bagassi eli sokeriruoko, bambukuitu, kaisla sekä yksivuotinen kenafkuitu. [2, s. 31.]

2.2.4 Muut raaka-aineet

Kuitujen lisäksi käytetään erilaisia täyte-, lisä- ja apuaineita useimpien paperi- ja kartonkilajien valmistukseen. Näillä lisäaineilla on keskeinen asema erityisesti painopapereiden valmistuksessa. Niiden avulla voidaan sekä säästää kustannuksissa että saavuttaa vaadittavat paino-ominaisuudet. [2, s. 15.]

3 Taivekartonki

3.1 Yleistä

Kaiken pakkaamisen päätarkoitus on tuotteen suojaaminen. Kartongin on tämän vuoksi oltava riittävän lujaa, läpäisemätöntä ja tiiviisti sulkeutuvaa. Sen lujuutta arvioidaan lähinnä puristuslujuuden avulla, joka korreloi pinoamiskestävyyden kanssa. [2, s. 72.]

Taivekartonki eli FBB-kartonki (folding boxboard) on monikerroksinen kartonkilaji, joka on yleisesti käytössä alkoholi-, kosmetiikka-, lääke- ja savukepakkauksissa. Myös erilaiset kotitaloustavara- sekä elintarvikepakkaukset valmistetaan taivekartongista. Taivekartongilta vaaditaan suojauskyvyn kannalta hyvää jäykkyyttä, sillä esimerkiksi kuljetuksessa ja kaupassa pakkaukset asetetaan usein päällekkäin, jolloin jäykkyys on ensiarvoisen tärkeää, jotta vältetään alimmaisten pakkausten litistyminen. Pakkauksen keskeisenä tehtävänä on olla myös vuorovaikutuksessa kuluttajan kanssa. Hyvä painettavuus ja korkea vaaleus ovat tärkeitä, sillä usein pakkauksen ulkonäkö on osa myyntitapahtumaa. Erityisesti elintarvike- ja savuketeollisuudessa pakkauksen läpäisemättömyys- sekä hygieni ominaisuudet ovat tärkeitä, sillä pakkaus on tehty suojaamaan sisällä olevaa tuotetta fyysisen rasituksen sekä voiman lisäksi myös kosteudelta, kaasuilta, aromeilta sekä mikrobeilta. Pakkauksesta ei saa myöskään siirtyä tuotteeseen tai pakkausta käsitteleviin ihmisiin mitään terveydelle tai tuotteen turvallisuudelle haitallista. [2, s. 73.]

Kaikenlaatuissa paino- ja kirjoituspapereissa, pakkauskartongeissa sekä pehmopapereissa ja paperipyhykkeissä tavoitellaan korkeampaa bulkkia, jotta voidaan säilyttää tietty paksuus vähemmällä kuitumäärällä. Lopullisista tavoitteista riippuen valmistajat keskittyvät bulkin parantamiseen neliömassan suhteen joko kasvattamalla paksuutta neliömassan pysyessä samana tai säilyttämällä saman paksuuden ja alentamalla neliömassaa. [1.]

3.2 Rakenne

Taivekartongin monikerroksinen rakenne mahdollistaa siltä vaadittavien ominaisuuksien optimoinnin mahdollisimman alhaisin raaka-ainekustannuksin. Sen hyvät lujuus- ja läpäisemättömyysominaisuudet perustuvat suurelta osin sen monikerroksiseen rakenteeseen.

seen. Rakenne koostuu normaalisti pinta-, keski- sekä taustakerroksesta. Taivekartongin neliömassa vaihtelee välillä 160–450 g/m², pintakerroksen neliömassan ollessa 45–60 g/m² ja taustan 25–30 g/m². Pinta- ja taustakerrokset valmistetaan yleensä valkaisu- tai havupuusellusta ja keskikerros mekaanisesta massasta (GW, TMP, CTMP sekä BCTMP). Nykyisin keskikerroksessa käytetään myös hylkymassaa (uudelleen tehtaalla kuidutettu paperi- tai kartonki, ei kuitenkaan kierrätys- eli uusiomassa), jolloin saadaan tuotua raaka-ainekustannuksia alaspäin. [2, s. 73–74; 7, s. 59.]

Ulkonäkö- ja painettavuusvaatimusten ollessa korkeat, taivekartonki voidaan päällystää usealla kerroksella. Pintakerros päällystetään yleensä 2-3 kertaa ja taustakerros tarvittaessa kerran. Kaksoispäällystyksen etuna on se, että esipäällyste muodostaa tasaisen pohjan varsinaiselle pintapäällystykselle jolloin vaativatkin painotyöt saadaan onnistumaan. Toisaalta käyttökohteina on myös lääkinnällisten laitteiden pakkauksia sekä esimerkiksi tulitikkurasioita, joissa päällysteen käyttöä voi rajoittaa pakkauksen sterilointi ja tulitikkurasian raapaisupinnat. Päällysteitä ovat erilaiset pigmentit, sideaineet, vahat ja muovit sekä näiden yhdistelmät. [2, s. 184.] Lisäksi kartonki voidaan pintaliimata, mikä parantaa pintalujuutta, jäykkyyttä ja absorptio-ominaisuuksia sekä vähentää pölyämistä [2, s. 180.] FBB-kartongin rakenne on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. FBB-kartongin rakenne [3].

Jokainen kerros ja siinä käytettävä massa vaikuttaa omalta osaltaan taivekartongille asetettuihin laatuvaatimuksiin [7, s. 59]. Valmistettaessa neliömassaltaan erilaisia karton-

keja pidetään taustan ja pinnan neliömassat lähes vakioina ja keskikerroksen neliömassaa muuttamalla muutetaan tuotteen kokonaisneliömassaa. Raaka-aineiden optimointi tehdään kolmikerrosrakenteessa, jotta laatuvaatimustavoitteet saavutetaan. [2, s. 74].

Kuluttajapakkauskartongeilla tärkein mekaaninen ominaisuus on taivutusjäykkyys. Taivutusjäykkyyden ollessa verrannollinen tuotteen paksuuteen sen kolmannessa potenssissa, jäykkyyden kannalta on edullisinta sijoittaa keskikerrokseen mahdollisimman bulkista massaa. Näin vaikutetaan koko kartongin paksuuteen ja siten toivottavalla tavalla jäykkyyteen. Vaikutus voidaan havaita taivutusjäykkyyden kaavasta (1):

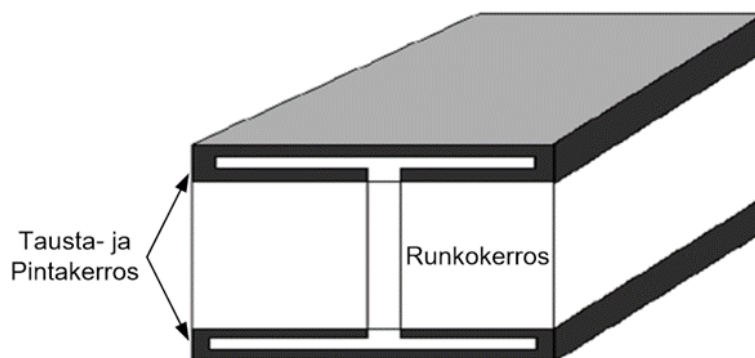
$$J = \frac{E \times h^3}{12} \quad (1)$$

jossa

J = taivutusjäykkyys

E = aineesta riippuvainen kimmomoduuli

h = tuotteen paksuus [2, s. 73 – 74.]



Kuva 6. Kolmikerroskartongin muodostama I-palkki [8.]

Pinta- ja taustakerroksiksi valitaan lujimmat massat, jolloin saadaan kasvatettua kimmomoduulia ja sitä kautta jäykkyyttä. Pintakerrokseen tarvitaan mahdollisimman lujaa massaa, sillä taivutettaessa kartonkia sen pintaosiin kohdistuu suurin rasitus kuten I-palkkirakenteessa (kuva 6). [2, s.74.]

4 Kuivalujalisäaineet paperin ja kartongin valmistuksessa

Kartongin lujuus on riippuvainen yksittäisten kuitujen ja kuitujen välisten sidosten lujuudesta, sidosten määrästä sekä sidosten ja kuitujen jakautumisesta. Kuivalujalisäaineilla voidaan parantaa yhtä tai useampaa näistä tekijöistä, mutta ei kuitenkaan yksittäisten kuitujen lujuutta. [9, s. 269.]

Kartongin lujuutta voidaan parantaa myös vaihtamalla kuitukoostumusta, esimerkiksi nostamalla pitkäkuituisen sellun osuutta, pienentämällä täyteainepitoisuutta tai lisäämällä kuivalujalisäaineita. Lujuutta voidaan lisätä myös prosessimuutoksilla, kuten nostamalla pH:ta tai lisäämällä märkäpuristusta. Yleisimmin lujuutta lisätään voimakkaammalla jauhatuksella, mikä lisää kartongin tiheyttä vähentäen huokoisuutta, repäisyjuutta ja opasiteettia. [9, s. 269.]

Jauhatuksen negatiivisia vaikutuksia voidaan välttää käyttämällä kuivalujalisäaineita, siideaineita, joilla parannetaan raaka-aineiden sitoutumista kuituverkossa. Kuidut tekevät luontaisesti sidoksia keskenään, mutta erityisesti täyteaineiden sitouttaminen rainaan (paperirataan) on tärkeää. Kuivalujaliimat ovat vesiliukoisia polymeerejä, joko luonnollisia tai synteettisesti valmistettuja. Tällaisia aineita ovat esimerkiksi tärkkelys, karboksimeetyyliselluloosa (CMC) ja synteettiset polymeerit. [2, s. 43; 9, s. 269.]

4.1 Tärkkelys

Tärkkelystä esiintyy kaikissa kasveissa, mutta tärkkelyksen tärkeimpiä raaka-aineita maailmanlaajuisesti ovat peruna, maissi ja vehnä. Tärkkelystä uutetaan myös ohrasta ja tapiokasta. Kaikkien näiden tärkkelysraaka-aineiden koostumukset eroavat joiltakin osin toisistaan. [9, s. 270.]

Kuitujen ja täyteaineiden jälkeen tärkkelys on kolmanneksi tärkein raaka-aine paperinvalmistuksessa. Kartongin valmistuksessa tärkkelystä käytetään kuivalujuuden lisäämiseen sekä massa- ja pintaliimojen yhtenä osana. [9, s. 274.]

Tärkkelys on hiilihydraatti, glukoosipolymeeri jota esiintyy luonnostaan kaikissa kasveissa. Se on varastoituneena pieninä (2–150 µm) granuleina eli jyväsina kasvien juu-

riissa ja siemenissä. Glukoosiketjut ovat joko suoria (amyloosi) tai haaroittuneita (amylopektiini) ketjuja. Ketjun kokoon vaikuttavat raaka-aine sekä amyloosin ja amylopektiinin suhteellinen osuus. Amyloosiketju on lyhyempi kuin amylopektiiniketju. [9, s. 271.]

Tärkkelyksen kuivaluajuominaisuudet riippuvat siitä, kuinka paljon vetysidoksia muodostavia hydroksyyliiryhmiä sillä on. Vesipitoisessa liuoksessa vetysidoksia muodostuu hydroksyyliiryhmien ja vesimolekyylein välille, jolloin tärkkelys sitoo vettä. Kuivausprosessissa vesi haihtuu ja vetysidoksia muodostuu tärkkelyksen ja kuitujen tai muiden massakomponenttien välille. Tällöin tärkkelyksen merkitys kuivaluujutta lisäävänä komponenttina tulee esille. [9, s, 271.]

4.1.1 Kationinen tärkkelys

Natiivitärkkelys on luonnostaan anioninen ja retentoituu huonosti anionisiin kuituihin nykypäivän nopeilla paperi- ja kartonkikoneilla. Tästä syystä on kehitetty kationinen tärkkelys, jota voidaan valmistaa mistä tahansa natiivista tärkkelyksestä lisäämällä molekyyleihin kemiallisella sidoksella kationisia ryhmiä. Pääasiassa ne valmistetaan kuitenkin perunatärkkelyksestä, sillä liukenevuus ja molekyylikoko huomioiden se on paras vaihtoehto. [2, s. 43; 9, s.274.]

Taulukkoon 2 on kerätty yhteenvetona kationisen tärkkelyksen käyttöön liittyviä etuja ja haittoja.

Taulukko 2. Kationisen tärkkelyksen edut ja haitat (+ = paranee hieman, ++ = paranee, +++ = paranee merkittävästi, - = heikkenee/pienene hiukan, -- = huononee) [2, s. 43, muokattu.]

Ominaisuus	Muutos	Selitys
Veto- ja puhkaisulujuus	++	Lisää sidoksia, parempi hienoaines retentio
Pintalujuus, pölyämättömyys	++	Lisää sidoksia, parempi hienoaines retentio
Palstautumislujuus	+++	Lisää sidoksia rainan keskelle
Jäykkyys	+	Lisää sidoksia; paksuus säilyy lähes entisenä
Retentio, tasapuolisuus	++	Kuidut, täyteaineet ja hydrofobiliimat yleensä anionisia
Formaatio	-	Vedenpoisto vaikeutuu, kuidut flokkaantuvat
Repäisylujuus	-	Sidokset eivät aukea, kuidut katkeavat
Mittapysyvyys	-	Suurempi kuivumiskutistuma
Viiraosan vedenpoisto	--	Veden viskositeetti ja rainan vedenpidätyskyky kasvavat
Puristimen jälkeinen kuiva-aine	--	Huovat tukkeutuvat, veden viskositeetti kasvaa
Koneen ajettavuus	--	Kap-lasku, likaantumisen, lima, reiät, määränpään kemia
Valmistuskustannukset	(+)	Tärkkelyksen hinta, kap-lasku, käyttöongelmat

4.1.2 Anioniset ja amfoteeriset tärkkelykset

Määränpään tärkkelyssovelluksiin on kehitetty myös anionisia ja amfoteerisia tärkkelyksiä. Amfoteerinen tärkkelys sisältää sekä kationisen että anionisen ryhmän. Anionisia tärkkelyksiä voidaan käyttää erittäin happamissa ja kationisissa massajärjestelmissä sekä retentiojärjestelmien anionisena komponenttina. Lisäksi anionista tärkkelystä voidaan käyttää neutraloimaan liian kationista järjestelmää sekä samalla parantamaan tärkkelys- ja kokonaisretentiota. [9, s. 279.]

Amfoteeristen tärkkelysten on todettu toimivan laajemmalla pH-alueella verrattuna kationisiin tärkkelyksiin. Niillä on vastakkaismerkkiset varaukset, joiden avulla ne voivat muodostaa kolmiulotteisen verkoston ja näin luoda paremmat mahdollisuudet kuitujen välisille sidoksille. [9, s. 279.]

Natiivi perunatärkkelys sisältää luonnostaan anionisia fosfaattiryhmiä, joten perunatärkkelyksestä jalostetut kationiset tärkkelykset ovat luonteeltaan amfoteerisia. Amfoteerisesta luonteesta johtuen perunatärkkelyspohjaiset tärkkelykset ovat suhteellisen luotettavia eri olosuhteissa. [9, s. 279.]

4.2 Polymeeriset ja synteettiset kuivalujalisäaineet

Harvemmin käytettyjä kuivalujaliimoja ovat erilaiset mannogalaktaanit sekä karboksimeyylliselluloosa, CMC. CMC on synteettisesti valmistettu vesiliukoinen lisäaine, joka valmistetaan monokloorietikkahaposta ja selluloosasta. [2, s. 43–44, 188.]

Synteettisistä polymeereistä käytetyin kuivalujalisäaine on polyakryyliamidi, PAM. Se on suora, varaukseton polymeeri. Siitä voidaan kuitenkin valmistaa sekä anioninen että kationinen polymeeri. Kationiset CPAMit kiinnittyvät suoraan kuituun, kun taas anioniset APAMit vaativat retention avuksi jonkin kationisen komponentin. [9, s. 284.] Myös polyvinyylialkoholia (PVA) sekä jopa lateksidispersioita käytetään jonkin verran, niiden ollessa kuitenkin enemmän käytettyjä pintaliima-aineina kuin kuivalujuutta lisäävinä apuaineina. [9, s. 285.]

5 Paperiteknisten ominaisuuksien mittaaminen

Taivekartongista valmistetun kartonkikotelon tulee säilyttää muoto sekä puristettaessa että taivutettaessa. Siksi siltä vaaditaan mekaanista lujuutta ja jäykkyyttä. Tärkeimmät taivekartongin mitattavat mekaaniset ominaisuudet ovat taivutusjäykkyys, puristuslujuus, z-suuntainen lujuus sekä paksuus. [2, s. 73; 7, s. 59]. Taulukkoon 3 on kerätty tässä työssä arkeista mitatut ominaisuudet ja standardin asettamat vaatimukset.

Taulukko 3. Arkeista mitattavat ominaisuudet, standardit ja standardin asettamat vaatimukset

Paperin tai kartongin mitattava ominaisuus	Standardi	Näytteen koko (mm)	Standardin mukainen toistojen määrä	Tehtyjen toistojen määrä
Neliömassa	ISO 536	Ø 3,14 x 100 mm 160 x 220	2	2 3
Paksuus	ISO 534	60 x 60 (minimi)	10	5/arkki (Ø 20 cm) 5/arkki (160 mm x 220 mm)
Vetolujuus	ISO 1924-3	15 x 100	10	9
Puristuslujuus (SCT)	ISO 9895	15 x 70 (minimipituus)	20	20
Taivutusvastus MD/CD, 15 ° Taivutusjäykkyys CD/MD Taber, 15 °	ISO 2493 ISO 5629	38 x 70	10	12
Z-lujuus	ISO 15754	63 x 150 (minimipituus)		6
Palstautumislujuus, Scott Bond	T569	25,4 x 140 (minimipituus)	10	10

Mitattavat näytteet ilmastoidaan vakio-olosuhteissa (standardi ISO 187), 23 °C ± 1 °C: en lämpötilassa ja 50 % ± 2 %:n suhteellisessa kosteudessa vähintään neljä tuntia ennen mittausten suorittamista [10]. Kartongista mitattavat ominaisuudet voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan, fysikaalisiin- ja lujuusominaisuuksiin.

5.1 Fysikaaliset ominaisuudet

Paperin ja kartongin fysikaalisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi neliömassa ja paksuus. Seuraavassa luettelossa on lyhyet määritelmät tärkeimmistä fysikaalisista ominaisuuksista:

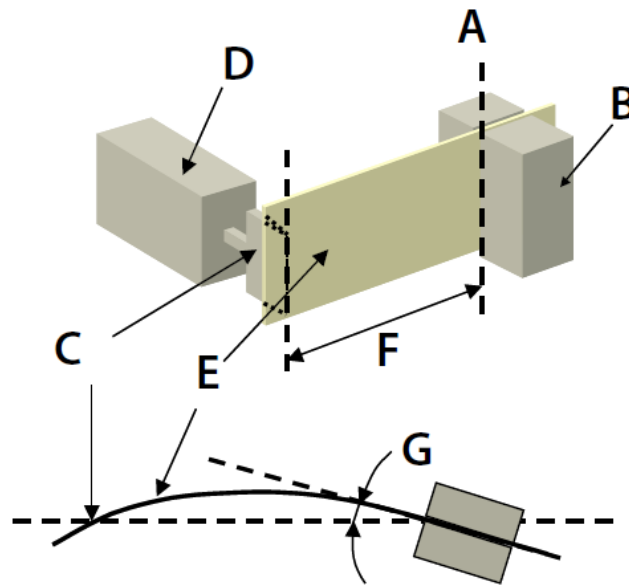
- Neliömassa, ISO 536, neliömassa kuvaa yhden neliömetrin kokoisen paperin tai kartongin painoa grammoina [g/m²]. Näytteen massa ja pinta-ala määritetään ja näytteen neliömassa lasketaan näiden suureiden perusteella. [11.]
- Paksuus, ISO 534, paksuus kuvaa paperin tai kartongin pintojen välistä etäisyyttä [µm] [12].
- Bulkki, bulkki on paperin tiheyden käänteisarvo, nk. ominaistilavuus, joka lasketaan paksuuden ja neliömassan suhteena [cm³/g]. Suuri luku merkitsee kevyttä, paksua paperia. [12.]

5.2 Lujuusominaisuudet

Paperin ja kartongin lujuusominaisuuksilla kuvataan kykyä kestää mekaanista rasitusta. Alla on luettelo ja määritelmät keskeisistä lujuusominaisuuksista:

- Vetolujuus, ISO 1924-3, vetolujuudella tarkoitetaan suurinta kuormitusta, jonka näytteestä leikattu liuska kestää murtumatta, kun sitä vedetään tasaisella nopeudella pinnan suuntaisesti. Sillä ilmaistaan kartongin yleinen lujuustaso, ja se on kuituorientaation vuoksi suurempi kartongin kone- kuin poikkisuunnassa. Näyteliuska asetetaan laitteessa olevien leukojen väliin (kiinnitysväli 100 mm) ja mittaus suoritetaan vetonopeudella 100,0 mm/min. Näytettä käsiteltäessä on vältettävä koskettamista kiinnityspisteiden väliin asetettavaan osaan. Laitte rekisteröi jännitysvoiman ja venymän, ja laskee niistä vetolujuuden, venymän, murtotyön, vetojäykkyyden ja -indeksin [kN/m ja kNm/kg], kimmomoduulin [MPa] sekä katkeamispituuden. Vetolujuuden yksikkönä käytetään [kN/m] ja vetoindeksin yksikkönä [kNm/kg], jolloin huomioidaan myös neliömassa. [13; 14.]
- Taivutusjäykkyys ja taivutusvastus (Bending stiffness; Taber 15°, Resistance to bending 15°) ISO 5629. Kartongin taivutusjäykkyys määritetään sen eri kerrosten taivutusjäykkyyksien summana. Kartongille taivutusjäykkyys on tärkeä ominaisuus, sillä se vaikuttaa suoraan pakkausten lujuuteen sekä ajettavuuteen kartonkikoneella. Taivutusjäykkyyteen vaikuttavat kartongin neliömassa, sen myötä paksuus sekä kimmokerroin. [15;16.]

Kuvassa 7 on esitetty mittauksen periaate. Testikappale (E) kiinnitetään toisesta päästä kiinni ja sen pinta on kosketuksissa tylppään terään (C), joka on asetettu voima-anturiin (D). Kiinnittintä (B) käännetään 15° akselin ympäri kiinnittimen reunoista. Testikappaleen taivuttamiseen käytetty voima joka vaikuttaa tällöin terään, mitataan. Taivutusjäykkyys katsotaan mitatuksi siltä puolelta (ylä- tai viirapuoli), joka on taivutuksen aikana kovera. Taivutusvastus katsotaan mitatuksi testikappaleen siinä suunnassa (kone- tai poikkisuunnassa), joka on kohtisuorassa kiinnittimen etureunaa vastaan. [17; 18.]



- A - pivoting axis
- B - clamp device
- C - measuring edge
- D - load cell
- E - test piece
- F - bending length
- G - bending angle

Kuva 7. Periaate taivutusjäykkyyden mittaamiseen [18.]

- Paperin ja kartongin puristuslujuus, SCT (Short Crush Test), ISO 9895. Paperin ja kartongin puristuslujuudella tarkoitetaan leveysyksikköä kohti kohdistuvaa tasosuuntaista maksimaalista puristusvoimaa, jonka paperi- tai kartonkinäyte kestää vahingoittumatta puristuskokeessa, [kN/m] [19.] Puristuslujuustestissä näyteliuskan toinen pää asetetaan laitteen kiinnittimen leukojen väliin ja toinen pää vetorullien ohi. Mittaus alkaa kun kiinnittävät leuat sulkeutuvat ja laitteen mekanismi työntää liikkuvaa leukaa kohti kiinnittää leukaa, kunnes näyte murtuu. Laitte rekisteröi voiman murtumahetkellä. [20.]

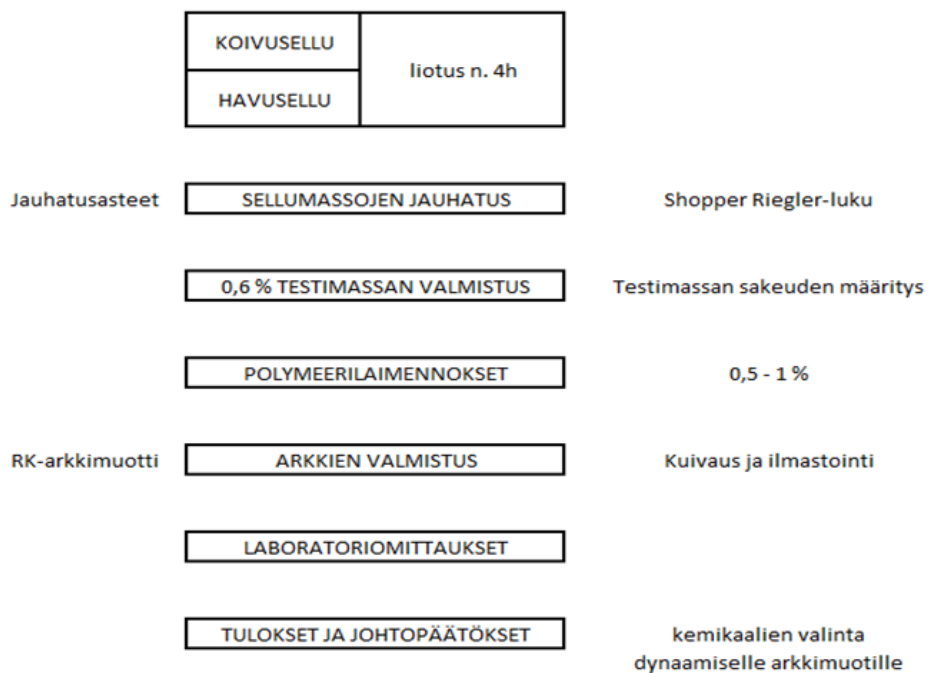
- Palstautumislujuus, Scott-Bond, TAPPI T569, kartongin palstautumislujuudella tarkoitetaan paperin Z-suuntaisen halkeamisen vastustavaa voimaa. Palstautumislajuuden tulokset ilmoitetaan yksikössä J/m² [21.] Laitte toimii Scott and American Sisalkraft näytetekniikalla, jossa kaksipuolinen teippi/näyte/kaksipuolinen teippi asetetaan alumiinisen näytekulman ja näytealasin väliin. Näytettä puristetaan 3 s x 100 psi:n paineella ja leikataan viiteen osaan. Näytekulmaan heilautetaan tietyllä voimalla heiluri ja heilurin osuessa näytekulmaan, se halkaisee näytteen. [22.]
- Z-lujuus, ISO 15754, Z-lujuus ilmoittaa suurimman voiman pinta-alayksikköä kohden jonka näyte kestää rikkoutumatta [23.] Mittauksessa näyteliuskan molemmille puolille levitetään kaksipuolinen teippi. Teräksiset mittaus- tasot puristetaan kohdakkain näytteen ylä- ja alapuolelta. Mittaus- tasoja vedetään irti toisistaan, kunnes näyte halkeaa ja mittari rekisteröi suurimman voiman jonka näyte kestää palstautumatta. [24.]

6 Työn suoritus

Työn tarkoituksena oli testata jo käytössä olevien, sekä uusien, kehitteillä olevien polymeerien toimivuutta kartongin ohuessa pinta- ja pohjakerroksessa. Referenssikemikaalina käytettiin hyvin toimivana lujuuskomponenttina tiedettyä kationista tärkkelystä. Koepisteissä testattiin kationisia, anionisia sekä muutamia amfoteerisia kemikaaleja. Kemikaaleista käytetään koepisteissä vain numeroita tunnisteena, ”työnimiä”, eikä edes kauppanimiä jo käytössä oleville tuotteille tuoda julki.

6.1 Arkkisarja Rapid-Köthen-tyyppisellä arkkimuottilaitteistolla

Työn ensimmäisessä osassa valmistettiin yksikerrosarkkeja sellumassasta. Arkkien tarkoituksena oli kuvata kartongin ohutta pintakerrosta. Kuvassa 8 on kuvattu pääpiirteittäin RK-arkkisarjan työn kulku.



Kuva 8. RK-arkkisarjan työn kulku

6.1.1 Sellujen jauhaminen

RK-arkkeja varten jauhettiin sekä koivu- että mäntysellua. Jauhaminen tehtiin Voith Sulzer -jauhimella (kuva 9). Kuidun jauhamisella pyritään muuttamaan kuidun ominaisuuksia fyysisesti niin, että niiden sitoutumiskyky saadaan aktivoitua ja niistä saadaan muodostettua luja ja sileä, hyvät painatusominaisuudet sisältävä tuote.



Kuva 9. Voith Sulzer -jauhin, keskellä sulppusäiliö ja jauhinterät

Jauhamisessa kuituja muokataan jauhinterien välissä vedessä, jolloin kuidun vetysidoksia katkeaa ja uusia sidoksia syntyy vesimolekyyleihin. Tässä yhteydessä kuitu turpoaa, kuidun pinta-ala kasvaa ja turvonneet kuidut sitoutuvat viiralla paremmin toisiinsa. Jauhatusen laatu vaikuttaa sekä valmiin paperin ominaisuuksiin että massan ajettavuuteen paperikoneella. Jauhatus lisää paperin kestävyyttä, mutta heikentää optisia ominaisuuksia kuten opasiteettia, kiiltoa ja vaaleutta. [2, s. 114.] Jauhatus onkin optimointia sopivan jauhatusasteen saavuttamiseksi.

Sellun jauhatusteorioista tunnetuin on ominaissärmäkuormateoria. Siinä erotetaan käsitteet jauhatuksen määrä, jota kuvataan ominaisenergian kulutuksella (SEC, kWh/t, kaava 2) ja jauhatustapa, jota kuvataan ominaissärmäkuormalla (SEL, J/m, kaava 3). Ne voidaan laskea seuraavasti:

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

$$SEL = \frac{P_t - P_w}{L \times n} \quad (3)$$

joissa

P_t = jauhimen kokonaisteho, kW

P_w = jauhimen häviöteho, kW

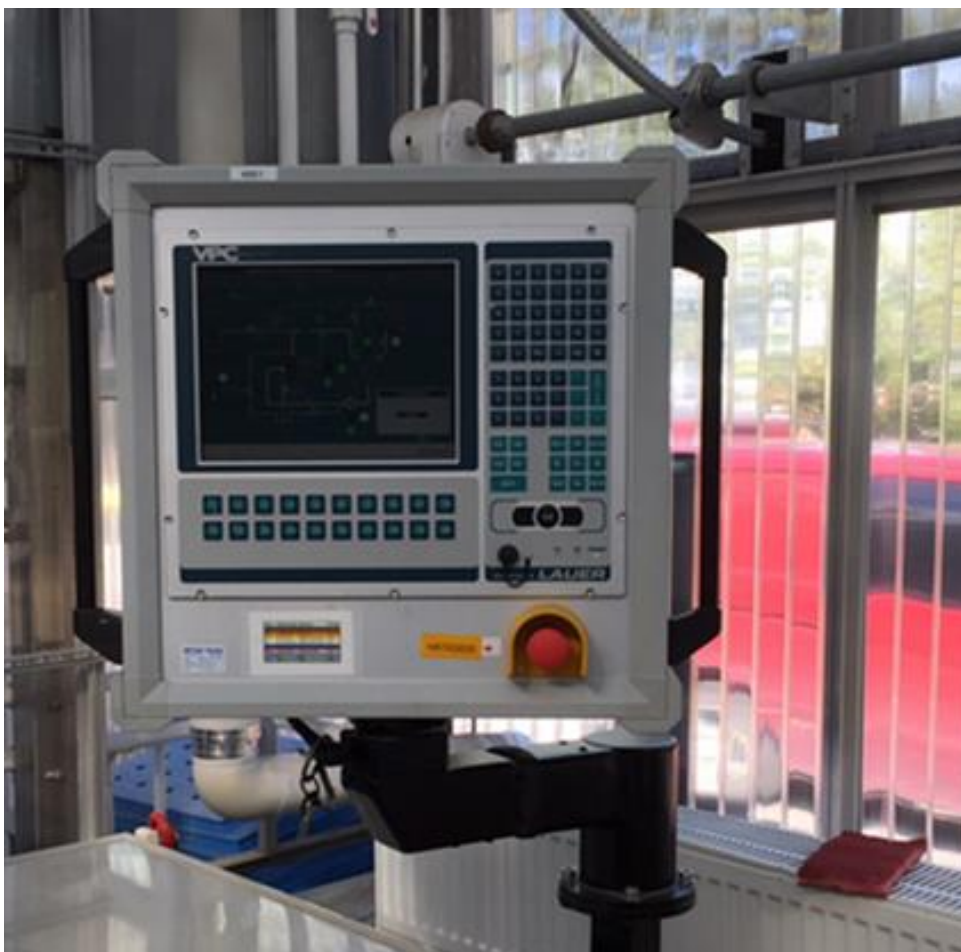
m = jauhimen läpi virtaava kuivan massan määrä, t/h

L = jauhimen teräsärmien kokonaispituus, km

n = jauhimen kierrosluku, r/s.

Jauhimen häviöteho saadaan mitatuksi ajamalla jauhinta terät auki. [2, s. 114.]

Kuvassa 10 jauhimen ohjausyksikkö, johon syötetään halutut parameterit ja jolla jauhinta ohjataan.



Kuva 10. Voith Sulzer -jauhimen ohjausyksikkö, kuva Tiina Jääskeläinen

Käsikirjoista löytyy ohjearvoja sekä jauhatuksen määrälle että ominaissärmäkuormalle. Periaate on yleensä se, että luja kuitu, kuten valkaistu pitkäkuitusulfaatti, vaatii enemmän jauhatusta (100–300 kWh/t) ja sitä voidaan jauhaa rajummin (1–3 J/m) kuin lyhytkuitusulfaattia (50–150 kWh/t ja 0,2–1,0 J/m). [2, s. 115.]

Jauhatus aloitettiin huuhtelemalla jauhin ja ajamalla erillinen vesikalibrointiohjelma. Tämän jälkeen suoritettiin varsinainen jauhatus. Kuvassa 11 näkyy ohjelmaan syötetyt koi-vusellun arvot mm. punnittu massamäärä (oletuksena että paalisellun kuiva-ainepitoisuus on 90 %), haluttu massan sakeus sekä näytetilavuus. Edellisen jauhinterien vaih-

don jälkeen oli tehty massakalibrointi, ja siitä saadun jauhatuskäyrän avulla voitiin arvioida ominaisenergian kulutus (ominaisjauhatusestearvo, kWh/t) sekä ominaissärmäkuorma (J/m).

Koeajo nro	1059	Massatyyppi				
Tyhjäkäyntiteho [kW]	1.62	Terätyyppi	3 - 0.5 - 30 Cone			
Massamäärä	Ilmak. [g] 1667					
	Uunik. [g] 1500	F4	Standard furnish			
Raaka-aineen kosteuspit. [%]	10.0	F5	NBKP			
Hajotusaika	10m0s0ms	F6	String-Eingabe fuer Maske 3			
Massan sakeus [%]	4.0	F7	Test_Versuch 21 03 00			
Pulperin tilav. [l]	34.5					
Huuhdelutilavuus [l]	3.0					
Näytelukumäärä	1					
Näytetilavuus [l]	2.0					
Näytemäärä [g]	82					
Ominaissärmäkuorma [J/m]	0.60	F13: Vesi	F14: Massa			
Näyte nro	1	2	3	4	5	6
Ominaisjauhatuksen. [kWh/t]	50	0	0	0	0	0

Kuva 11. Ohjelmointiparametrien syöttötaulukko

Jauhatuksen lopussa valmis massa laskettiin saaviin ja siitä määritettiin sakeus ja Schopper-Riegler-luku (°SR).

6.1.2 Schopper-Riegler

Jauhautumisastetta kuvataan kuidun suotautumisella, jonka yksiköitä ovat Schopper-Riegler-luku (°SR) ja Canadian standard freeness-luku (CSF). Tässä työssä suotautuvuutta mitataan Schopper-Riegler-menetelmällä (ISO 5267) [25.] °SR-luku kuvaa suotautuvuutta, eli kuinka paljon massa suodattaa vettä. °SR-luku on suhteellinen, ja määrittäminen tehdään kalibroidulla SR-laitteella (kuva 12). °SR-luku mitataan suotautamalla yksi litra laimennettua massasulppua (2 g/l) vapaasti laitteen viirakankaalle.



Kuva 12. Schopper-Riegler -testilaitte

Massasulppu kaadetaan laitteen yläosassa olevaan astiaan ja laukaistaan pidätinvipu, jolloin vesi suotautuu massasta viiran läpi poistoputken alle asetettuun SR-mittalasiin. (kuva 13). °SR-luku muodostuu sitä suuremmaksi, mitä nopeammin suotautuminen hidastuu viiralle kertyvän kuitukakun vaikutuksesta. Veden lakattua valumasta, katsotaan °SR-luku mittalasin asteikolta yhden yksikön tarkkuudella.

°SR-luvun määrittämistä varten tarvittava massamäärä laskettiin seuraavasti:

$m = 2 \text{ g}$ (haluttu massasulpun kuiva-aine)

$c = 40 \text{ g/l}$ (jauhetun massan oletettu kuiva-ainepitoisuus)

$$\rightarrow 2 \frac{\text{g}}{\text{l}} \div \frac{40\text{g}}{\text{l}} \times 100 = 5\text{g} \rightarrow 1000\text{ml}$$

Tässä työssä massasta tehtiin kuitenkin ensin 5 l laimennosta (3 g/l), josta massa laimennettiin edelleen määrittämistä varten yhdeksi litraksi. 5 g olisi ollut hankala mitata mittalasiin ja määrittystarkkuus olisi kärsinyt.

$$\rightarrow 3 \frac{g}{l} \div \frac{40g}{l} \times 5000ml = 375 ml \rightarrow 5000 ml$$

$$\rightarrow 2 \frac{g}{l} \div 3 \frac{g}{l} \times 1000ml = 667 ml \rightarrow 1000 ml$$

0,2-prosenttisesta massasta tehtiin kaksi rinnakkaismäärittystä, suppiloon jääneestä massakakusta määritettiin kuiva-aine ja sen avulla korjattiin °SR-luku oikeaksi työhöhen korjauskerrointaulukon mukaan [26.]

Mäntysellu jauhettiin samalla tavalla käyttäen sille sopivia jauhatuservoja (ominaissärmäkuorma 2,0 J/m, ominaisjauhatusero 135 kWh/t) ja mitattiin °SR-luku. Taulukossa 4 näkyy sekä mitatut että korjatut °SR-luvut.

Taulukko 4. Jauhattujen sellujen °SR ja sakeus -arvot

Sellu	°SR mitattu	Sakeus	Korjaus	°SR korjattu	°SR ka
Koivu 1	20,0	1,70	2,2	22,2	
Koivu 2	20,0	1,76	1,3	21,3	21,8
Mänty 1	19,0	1,80	1,2	20,2	
Mänty 2	20,0	1,76	1,3	21,3	20,8

Koivusellu °SR 22 (jauhetun massan todellinen, tarkastettu sakeus 36,50 g/l, 3,65 %)

Mäntysellu °SR 21 (jauhetun massan todellinen, tarkastettu sakeus 38,20 g/l, 3,82 %)

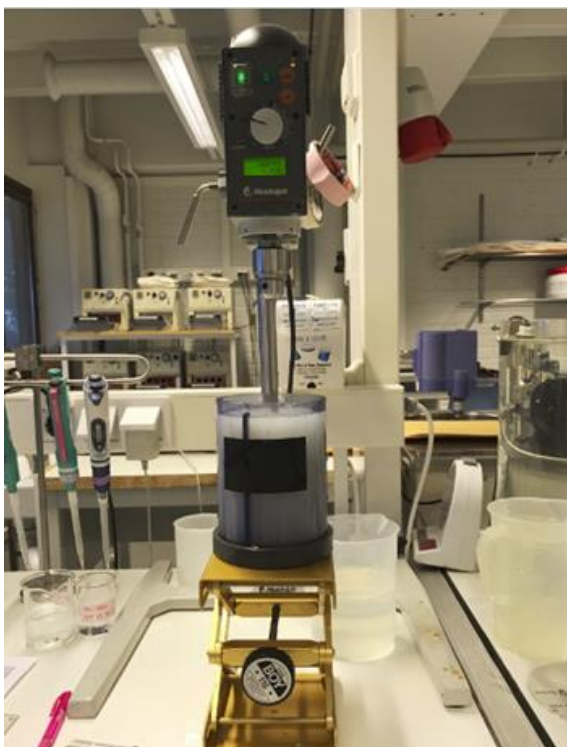
°SR tavoitteena oli 25, mutta todettiin jauhatuserojen olevan tarpeeksi lähellä tavoitetta, joten jauhatusta ei tarvinnut uusia.

6.1.3 Testimassan valmistus ja kemikaalilaimennokset

Suunnitelmana oli tehdä 71 arkkiä, jonka lisäksi nolla-arkki ilman mitään kemikaaleja. Taulukko koepisteistä on liitteenä 1. Taulukoon on merkitty kemikaaliannos (kg/t) ja aika annostelusta arkintekoon. Lisäksi jokaiseen arkkiin lisättiin retentioaineita X (0,150 kg/t) ja Y (2 kg/t).

Testimassan tavoiteltu sakeus oli 0,6 %. Massassa oli 80 % koivusellua ja 20 % mäntysellua. Massan laimennusvetenä käytettiin vesijohtovettä, jonka johtokyky säädettiin 1,5 mS/cm:iin. Johtokyvyn säätöön käytettiin valmiiksi sekoitettua suolaseosta (70 % kalsiumasettaattia, 20 % natriumsulfaattia ja 10 % natriumbikarbonaattia). pH säädettiin 10-prosenttisella H_2SO_4 :lla 6,8:aan, jolla varmistettiin suolojen liukeneminen. Massan pH:ta ja johtokykyä mitattiin säännöllisesti ja säädettiin tarvittaessa.

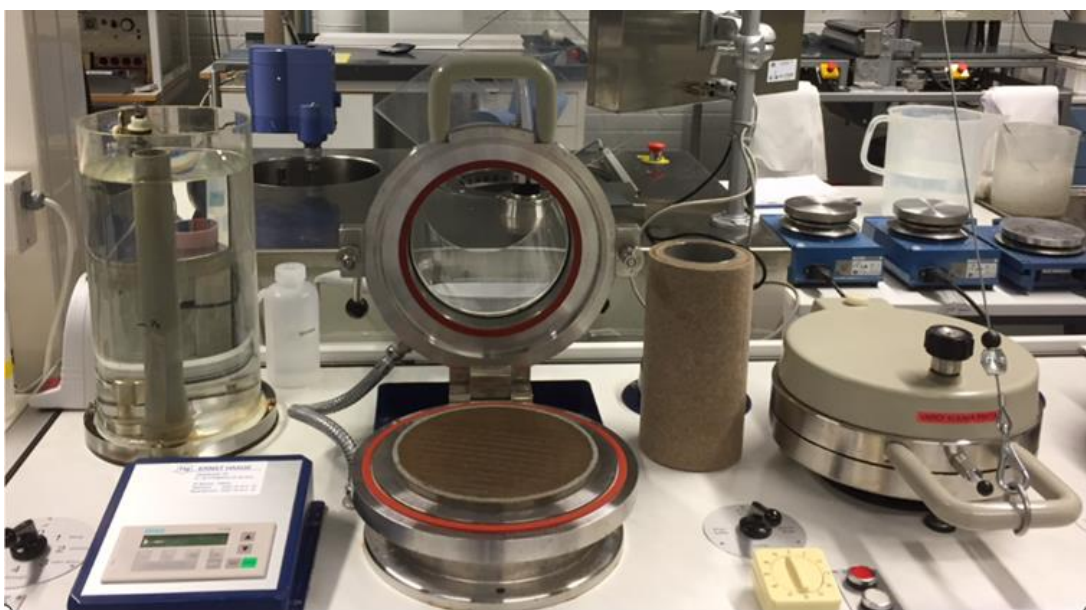
Työssä käytettävät kemikaalit laimennettiin 0,5–1 prosenttiin arkintekopäivänä. Tärkeystyöstä keitettiin + 95 °C:ssa 30 min ja jäähdytettiin ennen käyttöä. Kemikaalit annosteltiin automaattipipeteillä massan sekaan (kuva 13).



Kuva 13. Heidolph- sekoitin ja Lasentec-kippo, jossa massan sekoitus ja kemikaalien lisäys tehtiin

6.1.4 L&W-Haage Rapid-Köthen-tyyppinen arkkimuottilaitteisto

Rapid-Köthen-tyyppisellä arkkimuottilaitteistolla (kuva 14) voidaan valmistaa laboratorioolosuhteissa pyöreitä kartonkiarkkeja kemiallisesta ja/tai mekaanisesta massasta. Arkin muodostuessa viiralle ylimääräinen vesi poistetaan imun avulla ja arkit kuivataan laitteen omalla kuivaimella yksi kerrallaan. [27.]



Kuva 14. Rapid-Köthen-arkkimuotti ja alipaineuivain

Arkit valmistetaan halutun painoisiksi (g/m^2) ja tämä on valmiin arkin lopullinen painotavoite.

Arkkimuotin viiran halkaisija on 20 cm, jolloin valmiista arkista tulee samankokoinen. Arkkia varten tarvittava sulpun määrä laskettiin kaavan 4 mukaan:

$$A = \pi r^2 \quad (4)$$

$$A = 3,14 \times (10 \text{ cm})^2 = 314 \text{ cm}^2 = 0,0314 \text{ m}^2$$

Tässä työssä valmistettiin 110 g/m^2 arkkeja, jolloin arkin pinta-ala $0,0314 \text{ m}^2$ kerrotaan tavoiteltavalla neliöpainolla 110 g/m^2 , eli $0,0314 \text{ m}^2 \times 110 \text{ g/m}^2 = 3,45 \text{ g}$

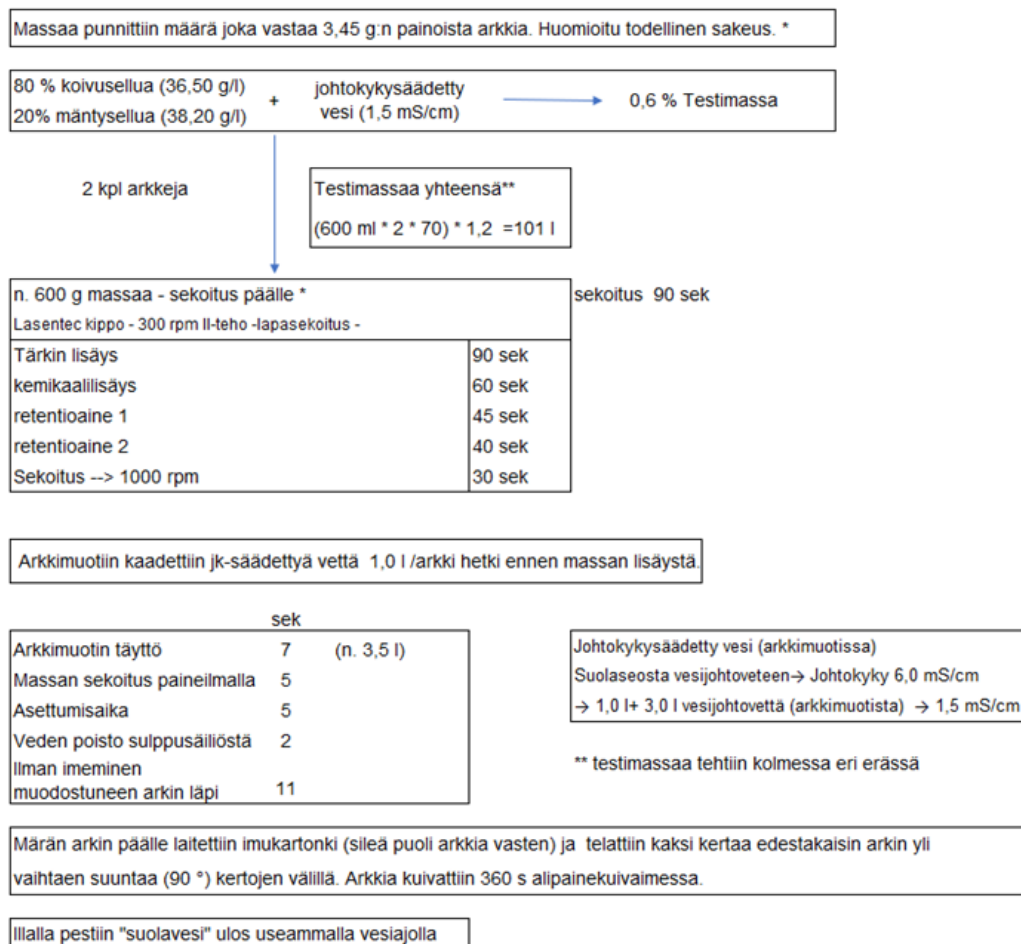
Massasulpun tarkistettu sakeus oli 0,564 %, jolloin

$$\frac{3,45 \text{ g}}{0,564 \%} \times 100 \% = 612 \text{ g} \frac{\text{sulppua}}{\text{arkki}}$$

Koearkki tekemällä varmistettiin että sulppumäärä/arkki on sopiva, jotta päästiin haluttuun neliöpainoon. Massamäärää lisäämällä tai vähentämällä voidaan vielä tarvittaessa neliöpainoa säätää toivottuun suuntaan.

6.1.5 Arkkien valmistus

Kuvassa 15 on esitetty pääpiirteittäin kemikaalien lisäysjärjestykset ja -ajat, sekoittimen nopeudet sekä arkin suotautumis- ja kuivausajat.



Kuva 15. Pyöreiden arkkien valmistus kuvattuna kemikaalien lisäysjärjestyksen ja -aikojen kanssa. Lisäksi kuvassa näkyy sekoittimien nopeus sekä arkin suotautumis- ja kuivausaika.

Valmiiseen arkintekopohjaan syötettiin massamäärä g/arkki sekä kemikaaliannos, jolloin ohjelma laski valmiiksi pipetoitavan kemikaalilavuuden/arkki. Kuvassa 16 on esimerkki annostelutaulukosta.

sulppu		annostus %	sulppu		laimennetun		Sulppu 16459,125 kg		Vesi 84540,875 kg		Kokonaislavuus 101000,0 kg		Haluttu sakeus 6,00 g/l		massan määrä arkkaukseen	
koivu	havu		KAP g/l	KAP %	KAP g/l	määrä litra / kg	määrä g						leopisteiden määrä:			
		80,00	36,50	3,65	4,8	13282,192	13282191,78						arkkoja / KP	2		
		20,00	38,15	3,82	1,2	3176,933	3176933,16						massaa / arkki [g]	600		
													massaa litraa / KP	1,2		
													massan määrä 0,5 %	84		
													massan määrä 1,5 %	28		
		100,00		7,47	6,00	16459,12	16459124,94									

Tuotteen KAP, %	86,89 %	37 %	13,31 %	10 %	12,5 %	100 %	100,00 %	%
haluttu pitoisuus:	1 %	1 %	1 %	1 %	1 %	0,5 %	1 %	%
haluttu määrä:	200 g	50 g	100 g	100 g	50 g	100 g	100 g	g
punnitus:	2,302 g	1,351 g	7,513 g	10,000 g	4,000 g	0,500 g	1,000 g	g
annostalo KAP, %	1	0,5	1	0,5	0,5	0,05	1	

tavoite neliömassa:		110 g/m ²	Kemikaali 1		Kemikaali 2		Kemikaali 3		Kemikaali 4		Kemikaali 5		Ret.sine 1		Ret.sine 2		annos	annos
g/m ²	KP	massa n g/l	massaa testiin ml	arkkoja, kpl	annos kg/t	annos g/	annos kg/t	annos g/	annos kg/t	annos g/	annos kg/t	annos g/	annos kg/t	annos g/	annos kg/t	annos g/	kg/t	g/
110	ref	5,64	612		4,8	1,657							0,15	1,04	2	0,690		
	12	5,64	612		9,5	3,279							0,15	1,04	2	0,690		
	13	5,64	612		9,5	3,279							0,15	1,04	2	0,690		
	14	5,64	612		9,5	3,279							0,15	1,04	2	0,690		
	15	5,64	612		4,8	1,657							0,15	1,04	2	0,690		
	16	5,64	612		4,8	1,657							0,15	1,04	2	0,690		
	17	5,64	612		7,1	2,451							0,15	1,04	2	0,690		
	28	5,64	612		2,4	0,828	0,4	0,28					0,15	1,04	2	0,690		
	29	5,64	612		4,8	1,644	0,4	0,28					0,15	1,04	2	0,690		
	30	5,64	612		7,1	2,451	0,4	0,28					0,15	1,04	2	0,690		
	31	5,64	612		9,5	3,287	0,4	0,28					0,15	1,04	2	0,690		
	32	5,64	612		9,5	3,287	0,4	0,28					0,15	1,04	2	0,690		
	33	5,64	612		9,5	3,287			4,3	1,484			0,15	1,04	2	0,690		
	34	5,64	612		9,5	3,287			4,3	1,484			0,15	1,04	2	0,690		
	35	5,64	612		9,5	3,287			4,3	1,484			0,15	1,04	2	0,690		
	36	5,64	612		4,8	1,644					1,7	1,174		0,15	1,04	2	0,690	
	37	5,64	612		4,8	1,644					1,7	1,174		0,15	1,04	2	0,690	
	38	5,64	612		7,1	2,465					1,7	1,174		0,15	1,04	2	0,690	
	39	5,64	612		9,5	3,279							1,1	0,759	0,15	1,04	2	0,690
	40	5,64	612		9,5	3,279							1,1	0,759	0,15	1,04	2	0,690
	41	5,64	612		9,5	3,279							1,1	0,759	0,15	1,04	2	0,690

Kuva 16. Esimerkki arkinteossa käytetystä taulukosta

Kemikaalien annosmäärää laskettaessa otettiin huomioon sekä testimassan sakeus että testimassan määrä/arkki.

6.1.6 Paperimittaukset

Arkit ilmastoitiin standardin mukaan ja niistä tehtiin seuraavat mittaukset:

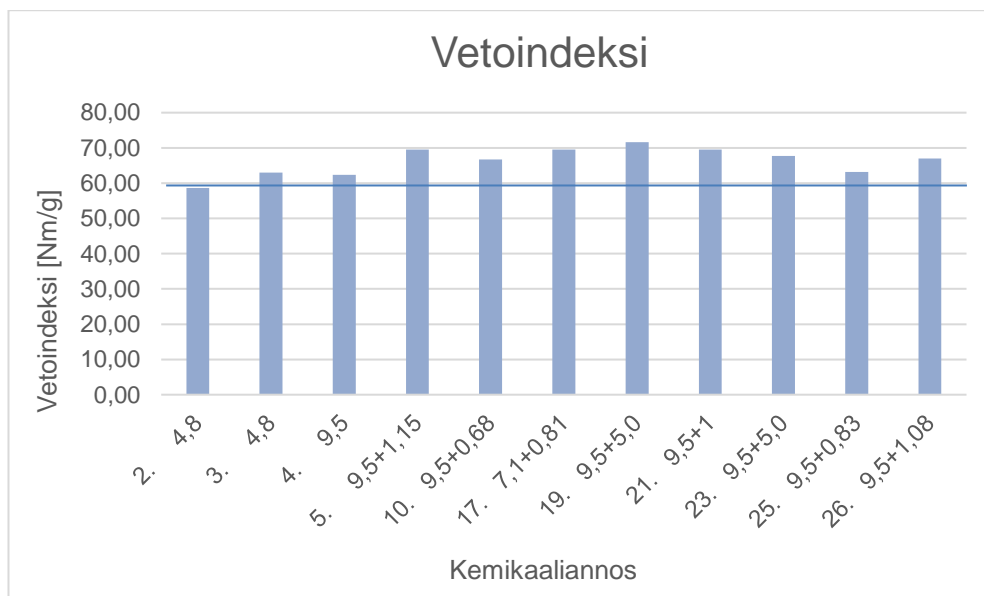
- neliöpaino, (vaaka Mettler Toledo XP2003S, DeltaRange, 4676)
- paksuus, (L&W micrometer, 4052, SN846)
- vetolujuus, (L&W tensile tester, 4054, SN064)
- puristuslujuus SCT, (L&W compressive strength tester, 4069, SN742).

6.1.7 Tulosten analysointi ja koepisteiden valinta dynaamiselle arkkimuotille

Saaduista mittaustuloksista laadittiin Excel-kaaviot (liite 2), joiden perusteella valittiin koepisteet dynaamiselle arkkimuotille. Kaaviot on laadittu analyseittäin, jaotellen samantyyppiset kemikaalit samaan kaavioon. Valintakriteereinä käytettiin vetoindeksiä, vetojäykkyysindeksiä, kimmomoduulia sekä puristuslujuus eli SCT-arvoa.

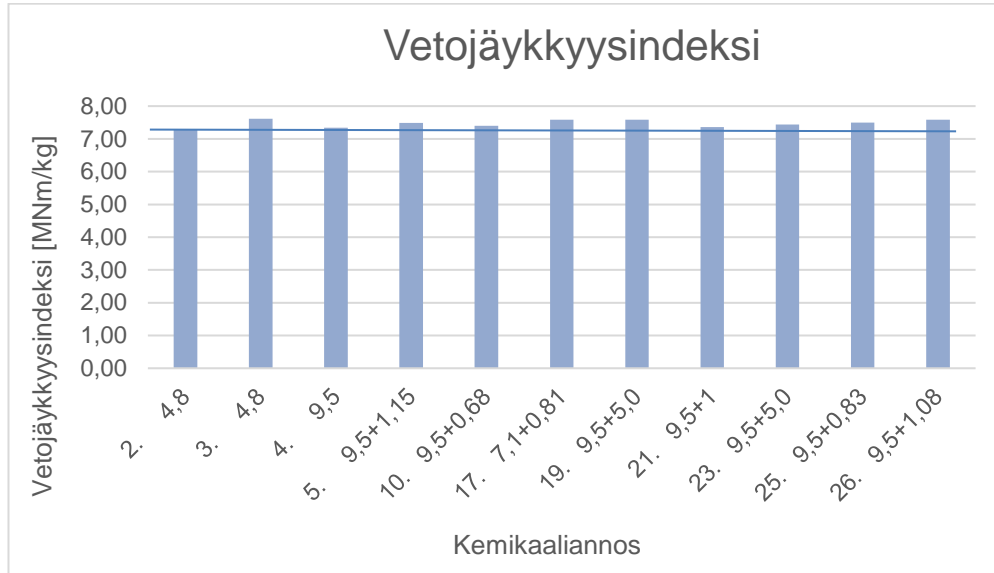
Lujuusarvon ylittäessä referenssipisteen arvon (koepisteet 2 – 4) valittiin kemikaali seuraavaan arkkisarjaan. Koepisteessä 2 käytettiin 4.8 kg/t tärkkelystä, koepisteessä 3 sama tärkkelysmäärä, mutta märkää arkkia puristettiin L&W arkkiprässillä (4 bar, 2 min), jonka jälkeen kuivaus 360 s alipainekuivaimessa. Koepisteessä 4 tärkkelysmäärä oli 9,5 kg/t. Koepisteen 3 tulokset olivat selkeästi muita referenssipisteitä parempia, mutta määrän arkin käsittelyn ollessa erilainen sitä ei käytetty ainoana ylitettävänä referenssiarvona. Koepiste 3 on kuitenkin mukana kaavioissa jotta voidaan havaita myös märkäpuristuksen vaikutus lujuusominaisuuksiin. Kuvissa 17 - 20 on kaaviot seuraavaan arkkisarjaan valituista kemikaaleista/koepisteistä. Liitteeseen 3 on taulukoitu keskiarvot kaikkien koepisteiden kaikista mittaustuloksista.

Tärkkimäärän ollessa 9,5 kg/t vetoindeksit (kuva 17) paranivat kaikilla koepisteillä polymerin lisäyksen myötä.



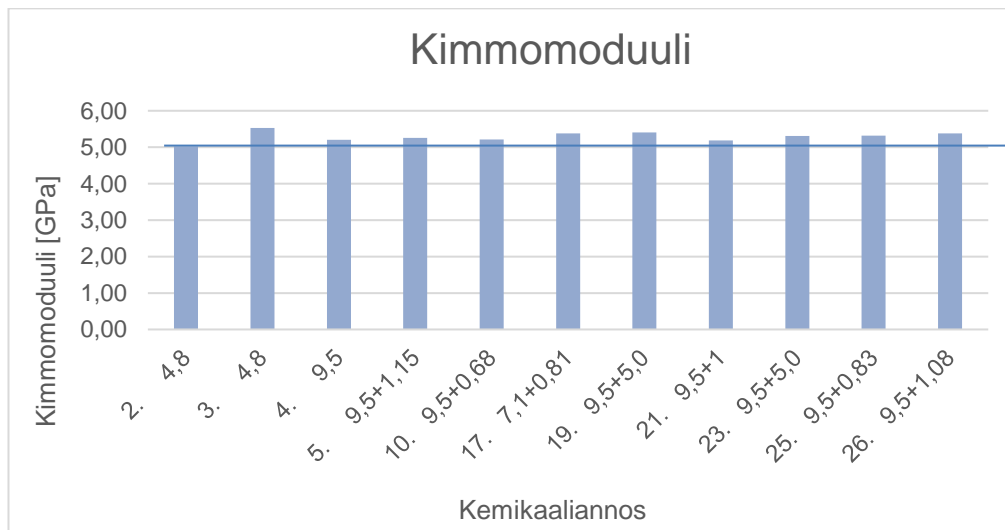
Kuva 17. Vetoindeksit jatkoon valituista kemikaaleista

Vetojäykkyyksindeksejä (kuva 18) vertaillen koepisteet 5, 17, 19, 25 sekä 26 erottuvat muista, vertailu suoritetaan kuitenkin vain koepisteeseen 4, jossa on ollut sama annosmäärä tärkkiä kuin koepisteissä. Vetojäykkyyksindeksissä huomioidaan neliömassa.



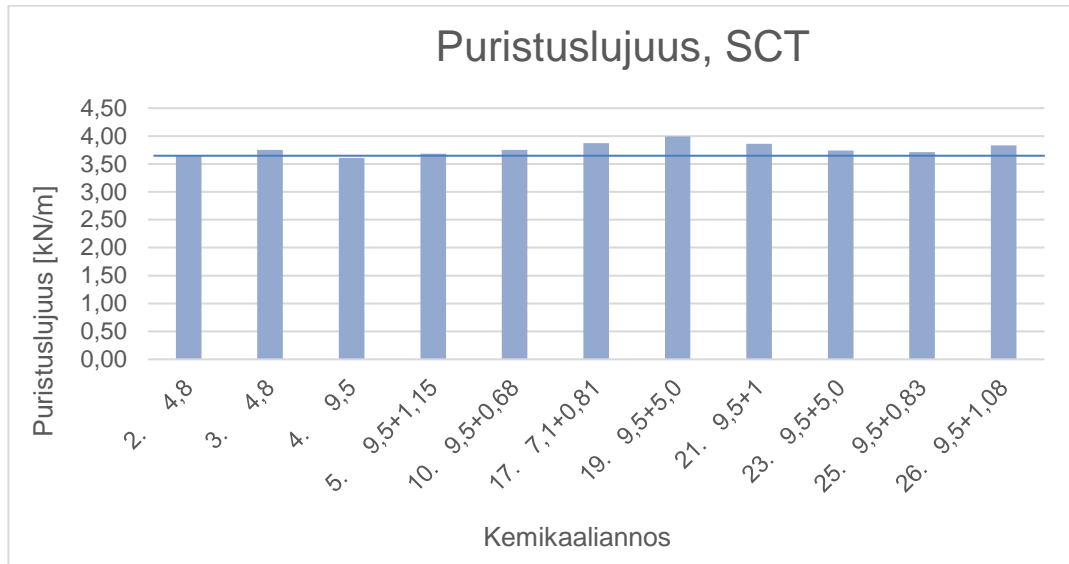
Kuva 18. Vetojäykkyyksindeksit jatkoon valituista kemikaaleista

Kimmomoduuleissa (kuva 19) nähdään samanlainen vaikutus kuin vetojäykkyydessä. Samat koepisteet (5, 17, 19, 25 ja 26) nousevat esiin suuremmalla tärkkimäärällä. Kimmomoduuli lasketaan jakamalla vetojäykkyys paksuudella.



Kuva 19. Kimmomoduulit jatkoon valituista kemikaaleista

Puristuslujuuksia (kuva 20) tarkasteltaessa voidaan havaita, että pienemmällä tärkkimäärällä olevan referenssipisteen puristuslujuus on parempi kuin suuremmalla tärkkimäärällä.

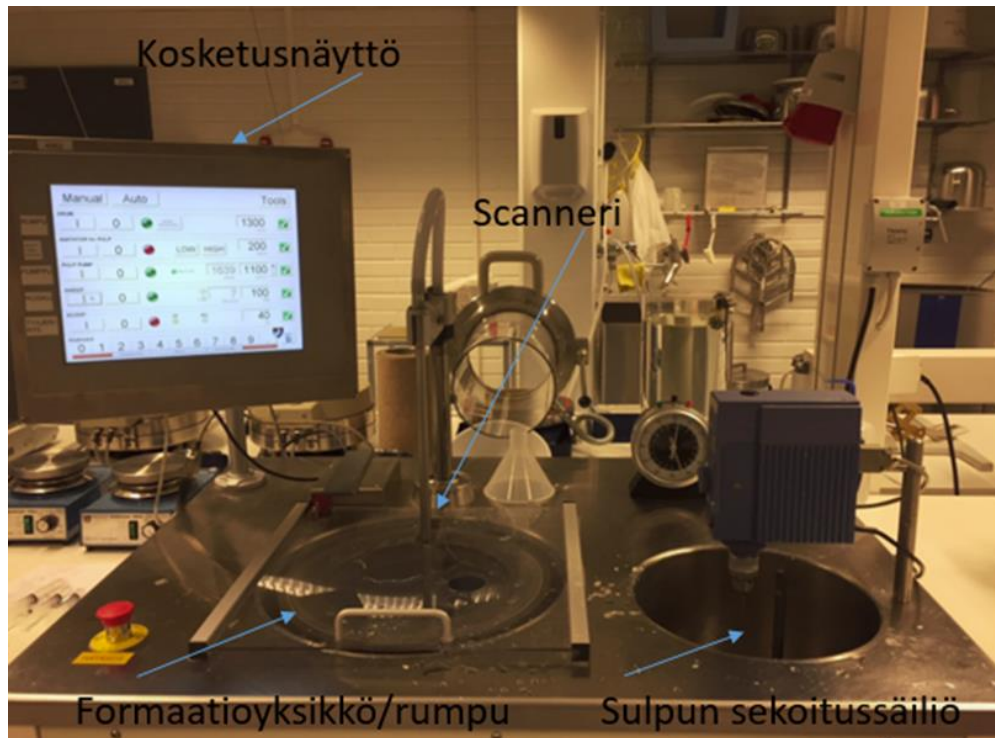


Kuva 20. Puristuslujuudet jatkoon valituista kemikaaleista

Koepisteet 17, 19, 21 sekä 26 ovat saaneet selvästi paremmat arvot kuin niiden referenssipiste. Koepisteen 21 arvoa voidaan pitää hyvänä.

6.2 Arkkisarja dynaamisella arkkimuotilla (DSF, Dynamic Sheet Former)

Dynaamisella arkkimuotilla (kuva 21) voidaan valmistaa laboratorio-olosuhteissa yksi- tai useampikerroksisia paperi- ja kartonkiarkkeja. Kuitujen orientaatio, viiranopeus, sulpun ruiskutusnopeus sekä vedenpoistoteho saadaan vastaamaan täyden mittakaavan paperikonetta. [27.]



Kuva 21. Dynaaminen arkkimuotti, Techpap, kuva Tiina Jääskeläinen

Koepisteitä dynaamiselle arkkimuotille suunniteltiin yhteensä 18 kappaletta + yksi arkki ilman kemikaalilisäystä. Referenssipisteinä käytettiin kahta eri annosta tärkkelystä, 9,5 kg/t sekä 7,1 kg/t. Koepisteet suunniteltiin siten, että suurimmassa osassa koepisteissä sekä tärkkelyksen että kemikaalin annosta vaihdettiin. Kolmea kemikaalia testattiin vain yhdellä annoksella ja yhtä amfoteerista kemikaalia testattiin sekä tärkkelyksen kanssa, että yksistään useammalla annoksella.

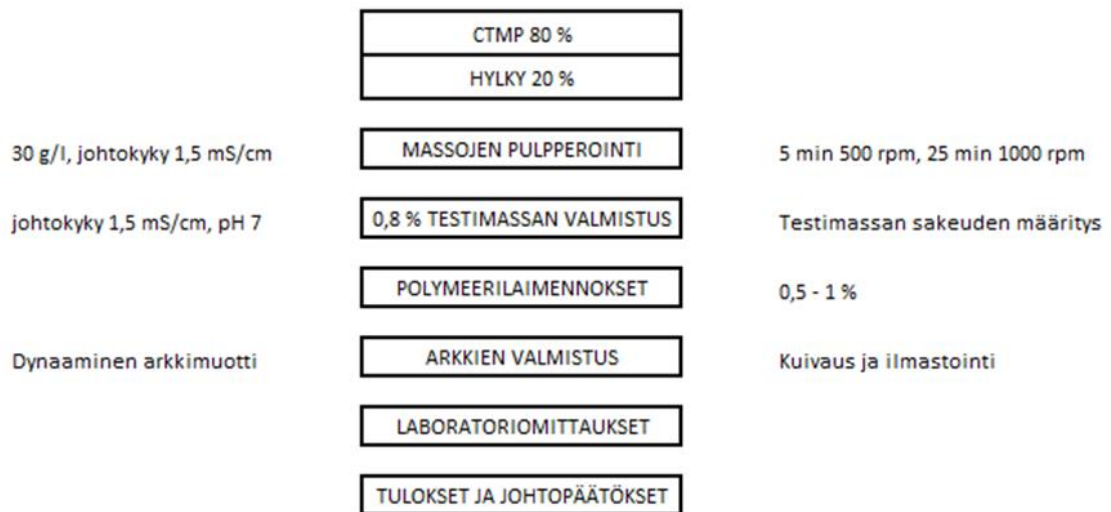
Taulukossa 5 on koepisteet ja kemikaaliannokset kolmiskerrosarkkeihin, lisäksi taulukoon on lisätty vastaava koepiste RK-arkeista.

Taulukko 5. Koesuunnitelma dynaamiselle arkkimuotille

Aika		-60 s	-30 s	-30 s	-30 s	-30 s	-30 s	-30 s	-30 s	-30 s
Koepiste	Vastaava koepiste RK	Täkkelys	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
		Annos kg/t								
1	4	9,5								
2	5	9,5	1,15							
3	-	9,5		0,81						
4	13	9,5		1,08						
5	17	7,1		0,81						
6	26	9,5			1,08					
7	-	9,5			0,81					
8	-	7,1			0,81					
9	-	9,5			0,54					
10	-					1,5				
11	-					2,5				
12	-					5,0				
13	22	9,5				2,5				
14	11	9,5					1,36			
15	-	7,1								
16	19	9,5						5,0		
17	25	9,5							0,83	
18	21	9,5								1

Kaikille dynaamisella arkkimuotilla tehtäville arkeille ei ole vastaavaa koepistettä RK-arkkisarjassa. Annosmääriä muutettiin ja kemikaalia testattiin kokonaan ilman täkkelystä sekä pienemmällä täkkelysmäärällä. Ylärivillä on kemikaalin vaikutusaika ennen arkin muodostusta.

Kuvaan 22 on havainnollistettu dynaamisella arkkimuotilla tehdyn arkkisarjan työnkulku pääpiirteissään.



Kuva 22. Työnkulku dynaamisella arkkimuotilla tehtävässä koesarjassa.

6.2.1 Massan pulpperointi

Kolmikerrosarkkeja varten hajotettiin laboratoriopulperilla CTMP:tä ja hylkyä (rulla-hylky) samassa hajotuksessa suhteella 80/20. Pulpperointi tehtiin 3 prosentin sakeudessa ja laimennosvetenä käytettiin 70-asteista vesijohtovettä. Massan sakeus määritettiin hajotuksen jälkeen, säädettiin pH 7:ään ja johtokyky 1,5 mS/cm:ssä.

6.2.2 Testimassojen valmistus ja kemikaalilaimennukset

Kolmikerrosarkeissa pinta- ja pohjakerroksessa käytettiin 0,40-prosenttista sellumassaa (80 % koivu ja 20 % havu) ja keskikerroksessa 0,80-prosenttista sekoitusmassaa, joka sisälsi 80 % bulkista CTMP:tä ja 20 % hylkyä. Keskikerrosmassan kemia pidettiin koko ajan samana, ainoastaan pinta- ja pohjakerroksen kemiaa vaihdettiin. Neliömassatavoitteet olivat pinta- ja pohjakerroksessa 40 g/m² ja keskikerroksessa 100 g/m². Kemikaalit laimennettiin samoin kuin RK-arkkeihin, aina samana päivänä, kun arkkeja tehtiin.

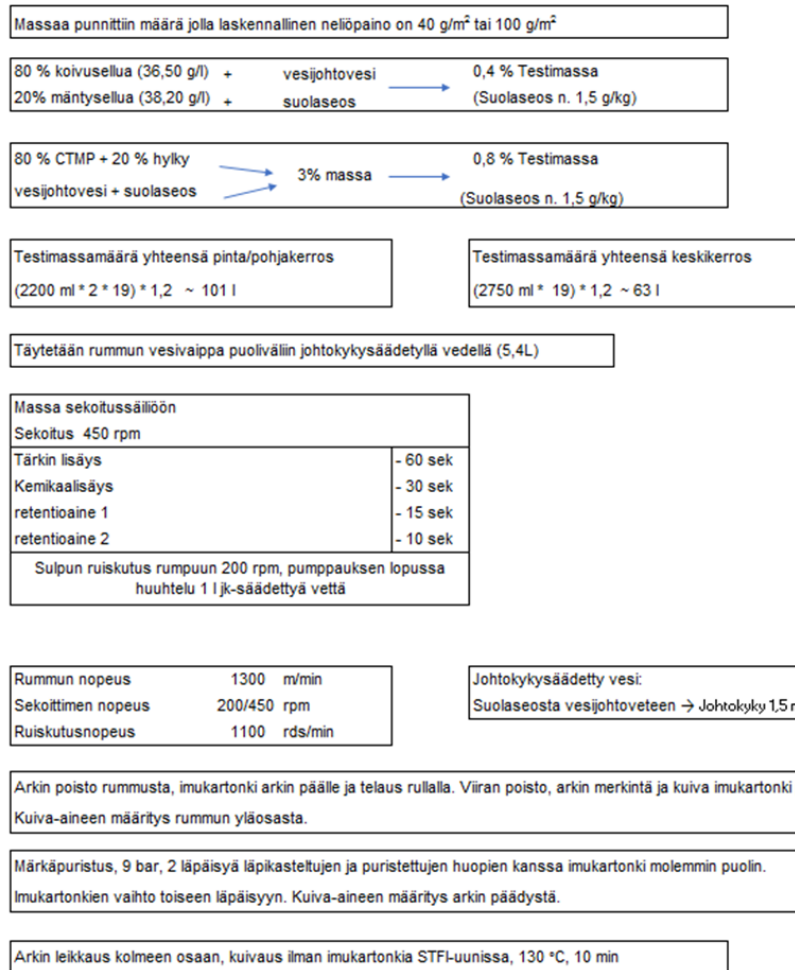
6.2.3 Arkkien valmistus

Arkit muodostettiin pyörivän rummun sisäpinnalla olevan viiran päälle ruiskuttamalla kuituspensiota vesipatjan läpi. Rummussa on kaksi sylinteriä sisäkkäin, joista sisempi on reil'itetty vedenpoistoa varten. Kuituspensioon sekoitettiin erillisessä sekoitussäiliössä käytettävät kemikaalit.

Viiran (rummun) nopeutta säädettiin kosketusnäytön DRUM–kohdasta. Viiranopeutena käytettiin edellisten töiden perusteella hyväksi havaittua nopeutta, jolla oli aiemminkin saatu hyvä formaatio (pohjanmuodostus). Skannausten lukumäärää, eli kuinka monta kertaa suutin liikkuu viiran yli ruiskutuksen aikana, voidaan ohjelmoida kosketusnäytön kohdasta SWEEP. Tässä työssä sekoitussäilö ajettiin kuitenkin tyhjäksi, eikä skannausten määrää ohjelmoitu erikseen. Viiravetenä (rummun vesiseinä) käytettiin johtokyksäädettyä vettä (1,5 mS/cm).

Kolmikerroksisia arkkeja valmistettaessa ruiskutettiin kuituspensio viiralle kolmeen kertaan ennen vedenpoistoa. Käytännössä tämä tapahtui niin, että pohjakerros kemikaaleineen ruiskutettiin ensin, sen jälkeen keskikerros ja viimeisenä vielä pintakerros, jonka jälkeen SCOOP-nappia painamalla vedenpoisto tapahtui.

Kuvassa 23 on esitetty pääpiirteittäin arkinteon kulku.



Kuva 23. Kolmikerrosarkkisarjan työn kulku

6.2.4 Paperimittaukset ja tulosten analysointi

Standardin mukaan ilmastoiduista arkeista tehtiin seuraavat mittaukset:

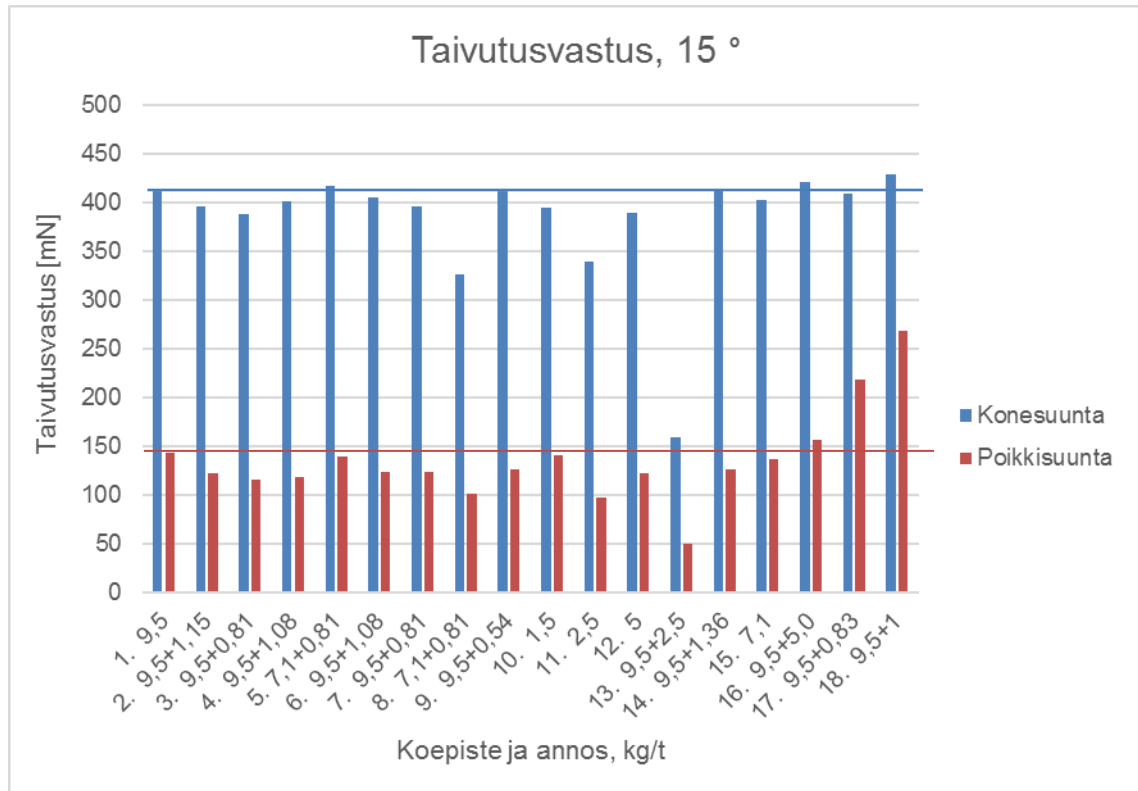
- neliömassa (vaaka Mettler Toledo XP2003S, DeltaRange, 4676)
- paksuus (L&W micrometer, 4052, SN846)
- Scott-Bond (Huygen internal bond tester, 4044)
- Z-lujuus (L&W xxx tester, 4067, SN439).

Mittaustulokset taulukoitiin (taulukko 6) ja tulosten perusteella laadittiin kaaviot (kuvat 24-27).

Taulukko 6. Mittaustulosten keskiarvot taulukoituna

Annos kg/t	Taivutusvastus ks (15°)	Taivutusvastus ps (15°)	Taber ks (15°)	Taber ps (15°)	Z-lujuus	Scott- Bond
1. 9,5	412	143	19,9	6,9	112,1	52,3
2. 9,5+1,15	397	122	19,2	5,9	147,4	57,1
3. 9,5+0,81	389	116	18,8	5,6	152,2	64,8
4. 9,5+1,08	401	118	19,4	5,7	159,3	62,7
5. 7,1+0,81	417	140	20,2	6,8	139,7	60,5
6. 9,5+1,08	406	124	19,6	6,0	140,1	57,0
7. 9,5+0,81	397	124	19,2	6,0	133,2	57,6
8. 7,1+0,81	326	102	15,8	5,0	145,8	81,2
9. 9,5+0,54	412	126	19,9	6,1	154,5	67,6
10. 1,5	395	141	19,1	6,8	116,7	60,1
11. 2,5	340	98	16,4	4,7	156,1	67,7
12. 5	390	123	18,8	6,0	95,5	63,8
13. 9,5+2,5	160	50	7,7	2,4	143,7	70,1
14. 9,5+1,36	414	126	20,0	6,1	139,8	58,4
15. 7,1	403	137	19,5	6,6	125,6	65,6
16. 9,5+5,0	421	157	20,3	7,6	143,0	70,8
17. 9,5+0,83	409	218	19,8	10,5	81,8	55,3
18. 9,5+1	429	268	20,7	13,0	65,2	55,4

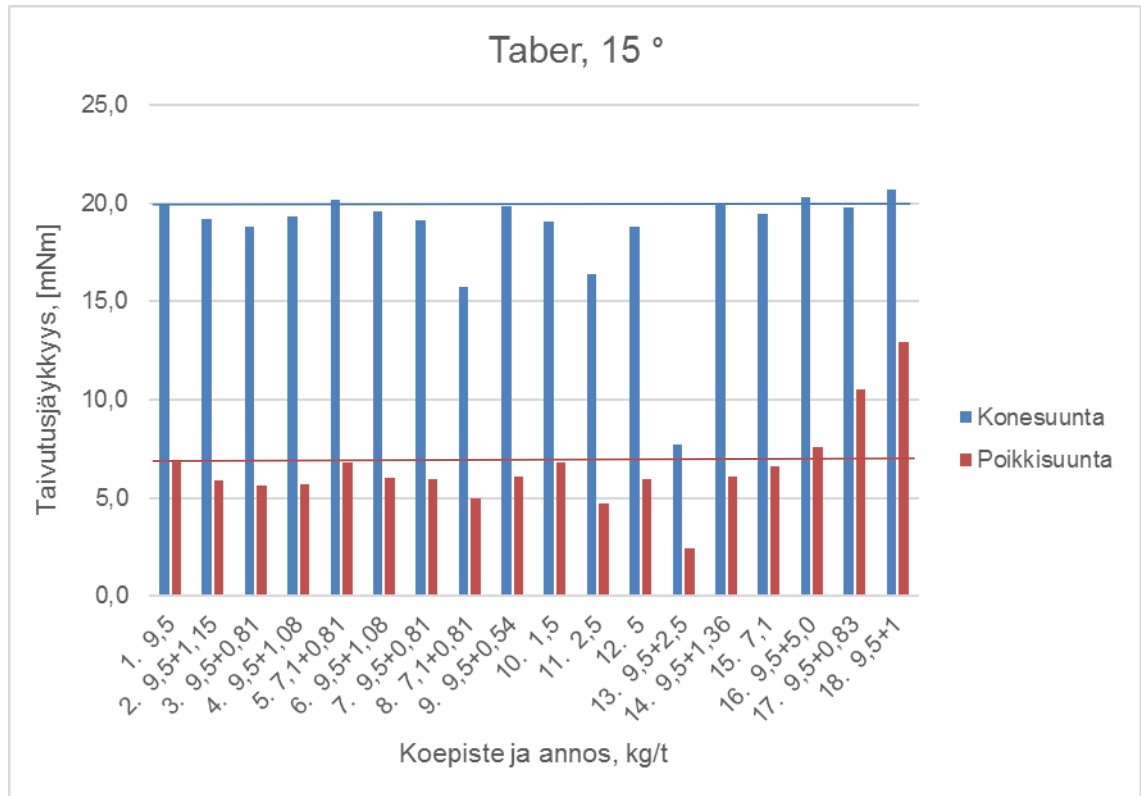
Kuvasta 24 nähdään, että tarkasteltaessa konesuunnan taivutusvastusta vain koepisteet 14, 16 ja 18 ylittivät referenssipisteen (9,5 kg/t). Viivat on piirretty havainnollistamaan referenssipisteiden (9,5 kg/t) arvoja. Poikkisuunnan taivutusvastuksen tarkastelussa nähdään koepisteiden 16, 17 ja 18 ylittävän referenssipisteen arvon, 17 ja 18 jopa erittäin reilusti.



Kuva 24. Taivutusvastus sekä kone- että poikkisuuntaan.

Arkien 17 ja 18 tuloksia ei voida pitää täysin vertailukelpoisina, sillä molemmat arkit olivat kevyempiä kuin tavoite, bulkin ollessa kuitenkin selvästi korkeampi (3,2) kuin muilla arkeilla (n. 2,5). Myös koepisteen 13 tulokset voidaan jättää huomiotta, sillä sen neliömassa on selvästi (n. 130 g/m² alle tavoitteen. Kun tarkastelu tehdään toiselle referenssille (7,1 kg/t), koepiste 5 ylittää referenssiarvon konesuuntaan.

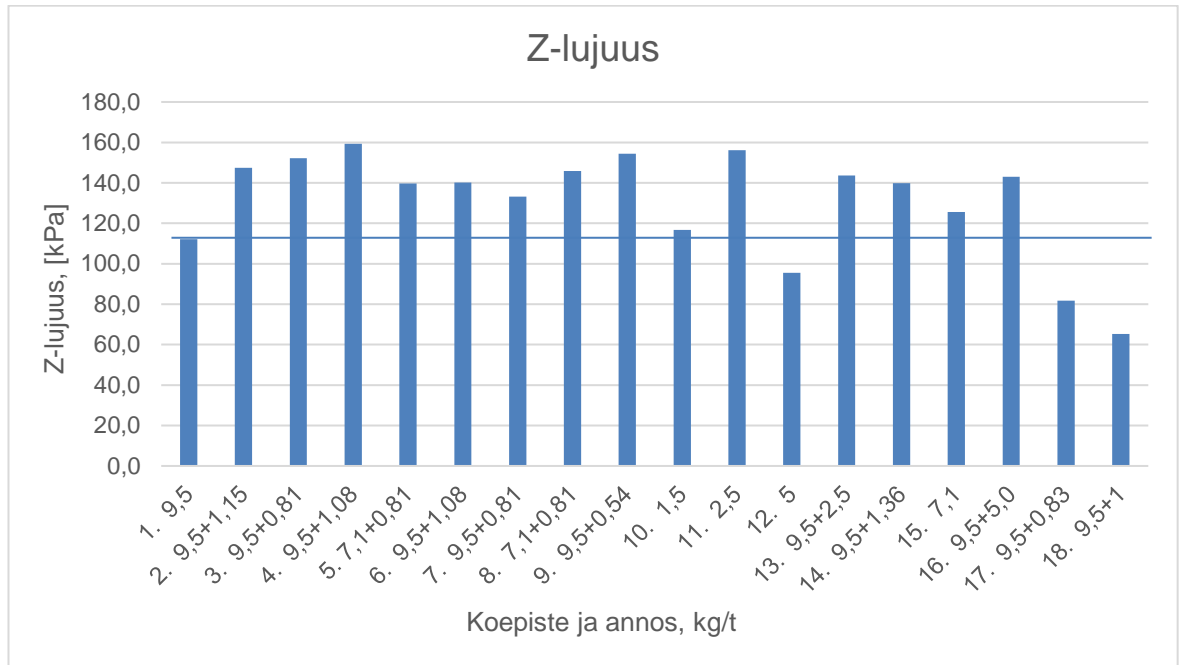
Kuvassa 25 on esitetty Taber-arvot koepisteille, ja voidaan nähdä, ettei kovinkaan suuria eroja ole havaittavissa verrattuna referenssipisteisiin. Ainoastaan koepisteet 16, 17 ja 18 erottuvat poikkisuunnassa referenssipisteestä (9,5 kg/t) samoin kuin taivutusjäykkyyden kohdalla.



Kuva 25. Taivutusjäykkyys (Taber 15°) sekä kone- että poikkisuuntaan.

Kuten aiemmin on todettu, tulokset eivät ole pisteiden 17 ja 18 kohdalla täysin vertailukelpoisia verrattuna referenssiin.

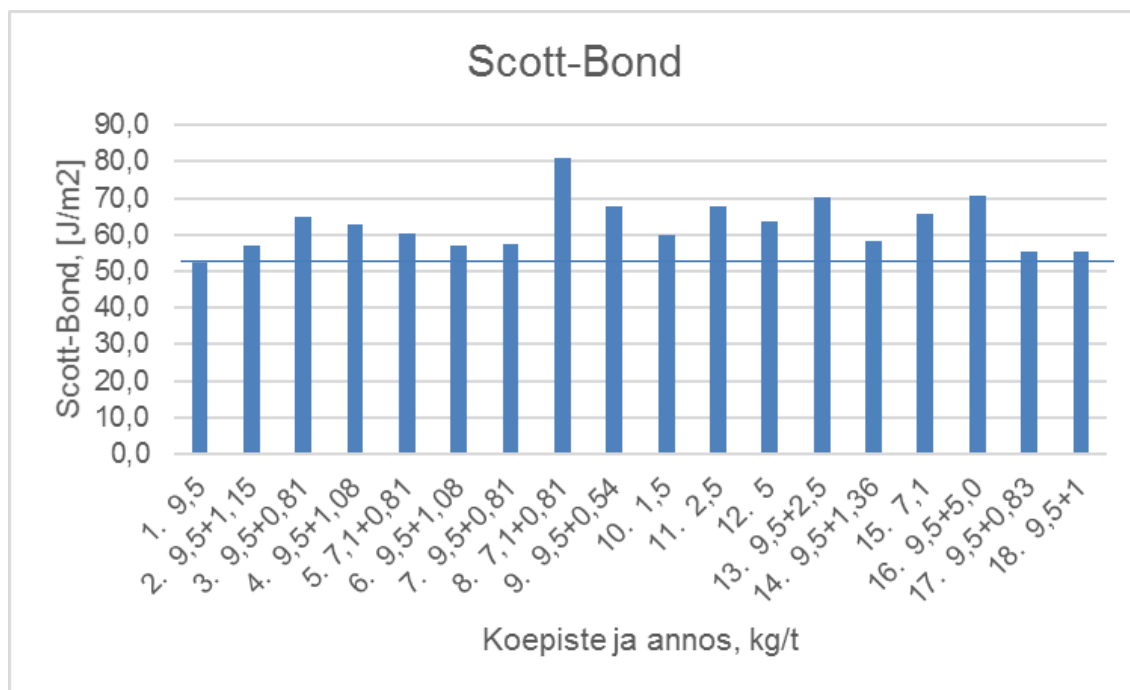
Z-lujuuden (kuva 26) havaitaan parantuneen lähes kaikissa koepisteissä. Koepisteissä 17 ja 18 voidaan havaita bulkkisuuden vaikutus Z-lujuuteen. Keskikerroksen bulkkisuuden kasvaessa näytteen Z-lujuus heikkenee.



Kuva 26. Z-lujuustulokset

Koepisteen 12 heikkoon Z-lujuuteen ei löydy selitystä.

Kuvassa 27 on tulokset Scott-Bond-mittauksista. Paras Scott-Bond tulos saatiin koepisteessä 8, tärkein ja anionisen polymeerin annostuksella. Muuten tulokset olivat tasaisia, yksikään koepiste ei jäänyt heikommaksi kuin referenssit.



Kuva 27. Scott-Bond tulokset

7 Johtopäätökset

Työn tarkoituksena oli selvittää, voidaanko kartongin pintakerrokseen lisätyillä kemikaaleilla vaikuttaa sen taivutusjäykkyyteen. Dynaamisella arkkimuotilla tehdyistä kolmikerrosarkeista testattiin taivutusvastus sekä taivutusjäykkyys, jotka ovat taivekartongille kriittisiä ominaisuuksia.

Koepisteiden 17 ja 18 (RK 25 ja 21) taivutusjäykkyydet erityisesti poikkisuuntaan olivat selvästi paremmat verrattuna sekä referenssipisteisiin että muihin koepisteisiin. Lisäksi koepisteen 18 annostus RK-arkissa (21) antoi hyvän puristuslujuusarvon. Tämän koepisteen kohdalla pitää muistaa kuitenkin, että arkin neliöpaino oli pienempi kuin oli tavoitteena.

RK-arkkimuotilla tehty koepiste 19 antoi parhaan tuloksen puristuslujuudelle. Vastavasti sama koepiste (16) dynaamisella arkkimuotilla, ylsi sekä taivutusvastus että -jäykkyysmittauksessa parhaiden joukkoon.

Näin ollen voidaan todeta molempien taivekartongille tavoiteltavien (puristuslujuus ja taivutusjäykkyys) ominaisuuksien paranevan oikeilla kemikaalivalinnoilla. Työn aikana havaittiin myös märkäpuristuksen vaikutus sekä bulkkiin että lujuustuloksiin. Työn tavoite saavutettiin, ja työtä voisi mahdollisesti jatkaa kationisen ja anionisen sekä amfoteerisen polymeerin suhteita ja annosmääriä vaihtamalla. Myös märkäpuristuksessa voisi kokeilla erilaisia aikoja ja puristuspaineita.

Lähteet

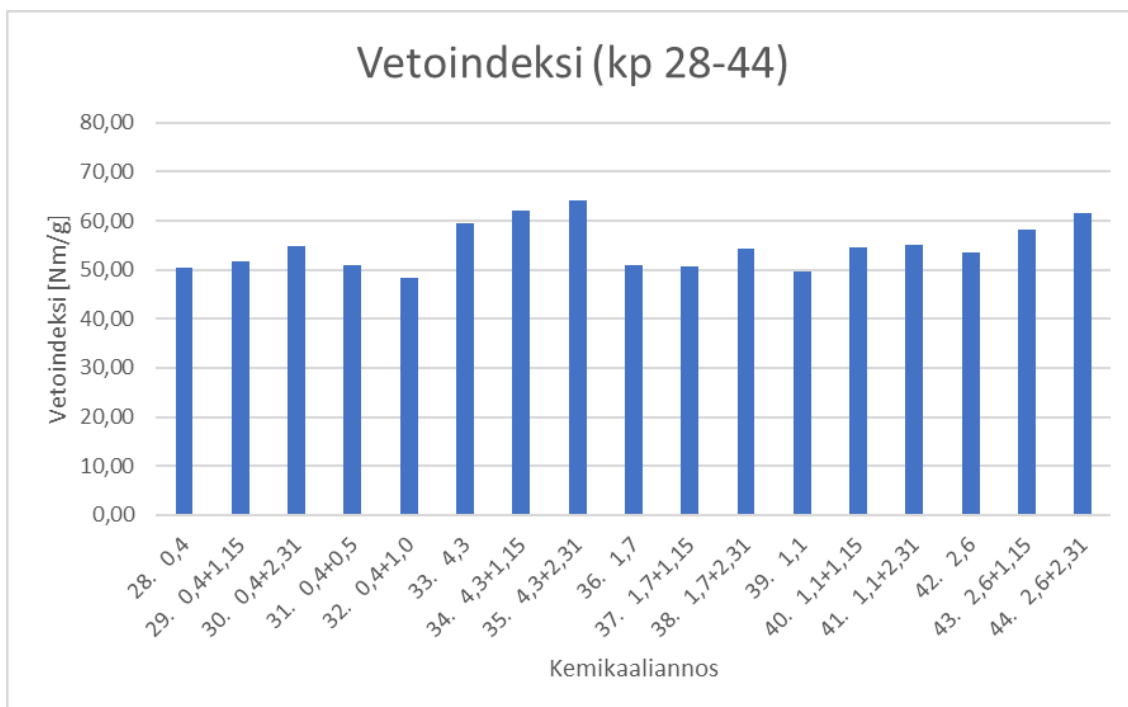
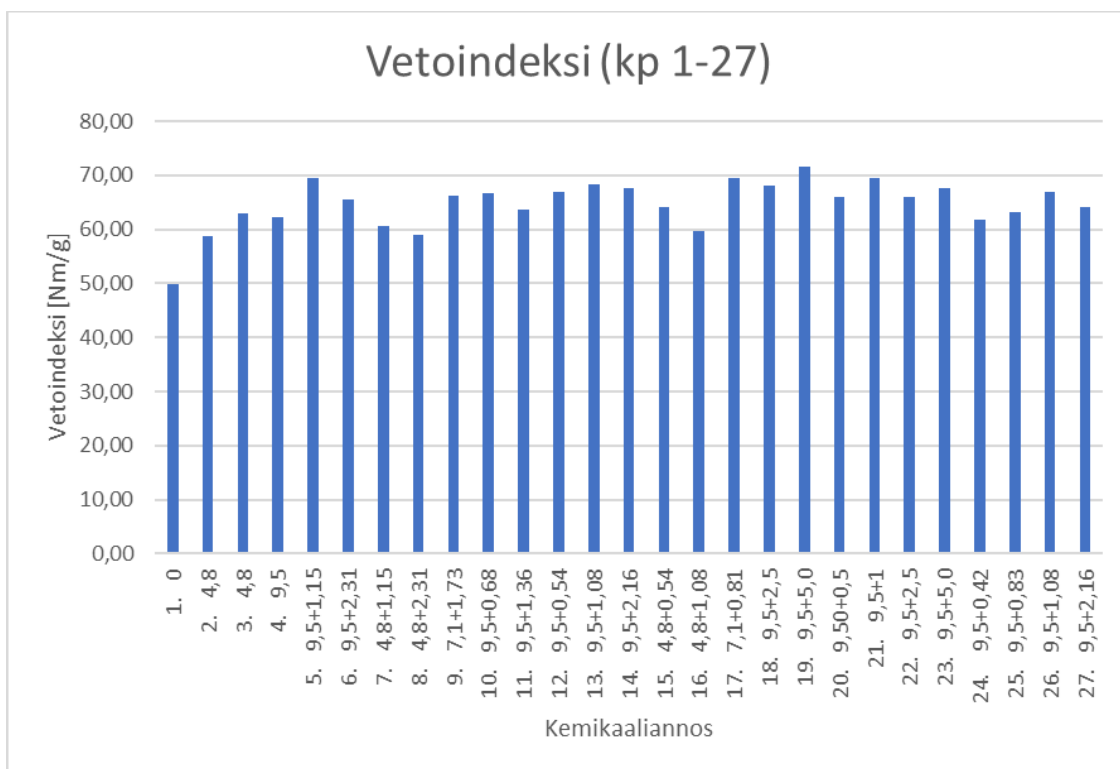
- 1 Kemiran vuosikertomus 2016. Verkkoaineisto. Kemira Oyj. <<https://www.Kemira.com/>>. Luettu 11.9.2017.
- 2 Häggblom-Ahnger, Ulla & Komulainen, Pekka. 2003. Kemiallinen metsäteollisuus II, Paperin ja kartongin valmistus. 3. tarkistettu painos. Jyväskylä 2003: Gummerus Kirjapaino Oy.
- 3 Prowledge Oy. KnowPulp -sellutekniikan ja automation oppimisympäristö. Versio 16.0. Saatavilla rajoitetusti. <<https://knowpulp.com>>. Luettu 15.9.2017.
- 4 Niskanen, Kaarlo & Pakarinen, Pekka. 2008. Paper Structure. Teoksessa Niskanen, Kaarlo. Paper Physics, second edition. Papermaking Science and Technology, Book 16. Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. Jyväskylä 2008: Gummerus Oy.
- 5 Uttamlal, M. 2015. Electron Microscopy. Luentomateriaali. Glasgow Caledonian University.
- 6 Larinoja, Tytti. 2017. Technician. Kemira Oyj, Espoo. Sähköposti 27.11.2017.
- 7 Kiviranta, Ari. 2000. Paperboard grades. Teoksessa Paulapuro, Hannu. Paper and Board Grades. Papermaking Science and Technology, Book 18. Fapet Oy. Jyväskylä 2000: Gummerus Printing.
- 8 Nevalainen, Tuomas. 2012. Kartongin taivutusjäykkyys ja sen määrittäminen. Kandidityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Doria-tietokanta.
- 9 Ketola, Hannu & Andersson, Tuija. 1999. Dry-strength additives. Teoksessa Neimo, Leo. Papermaking Science and Technology, Book 4. Fapet Oy. Jyväskylä 1999: Gummerus Printing.
- 10 ISO 187:1990. Standard atmosphere for conditioning and testing and procedure for monitoring the atmosphere and conditioning of samples. 1990. Paper, board, and pulps. International Organization for Standardization.
- 11 ISO 536:1995. Determination of grammage. 1995. Paper and board. International Organization for Standardization.
- 12 ISO 534:1988. Determination of thickness, density, and specific volume. 1988. Paper and board. International Organization for Standardization.
- 13 ISO 1924-3:2005. Determination of tensile properties. 2005. Paper and board. International Organization for Standardization.

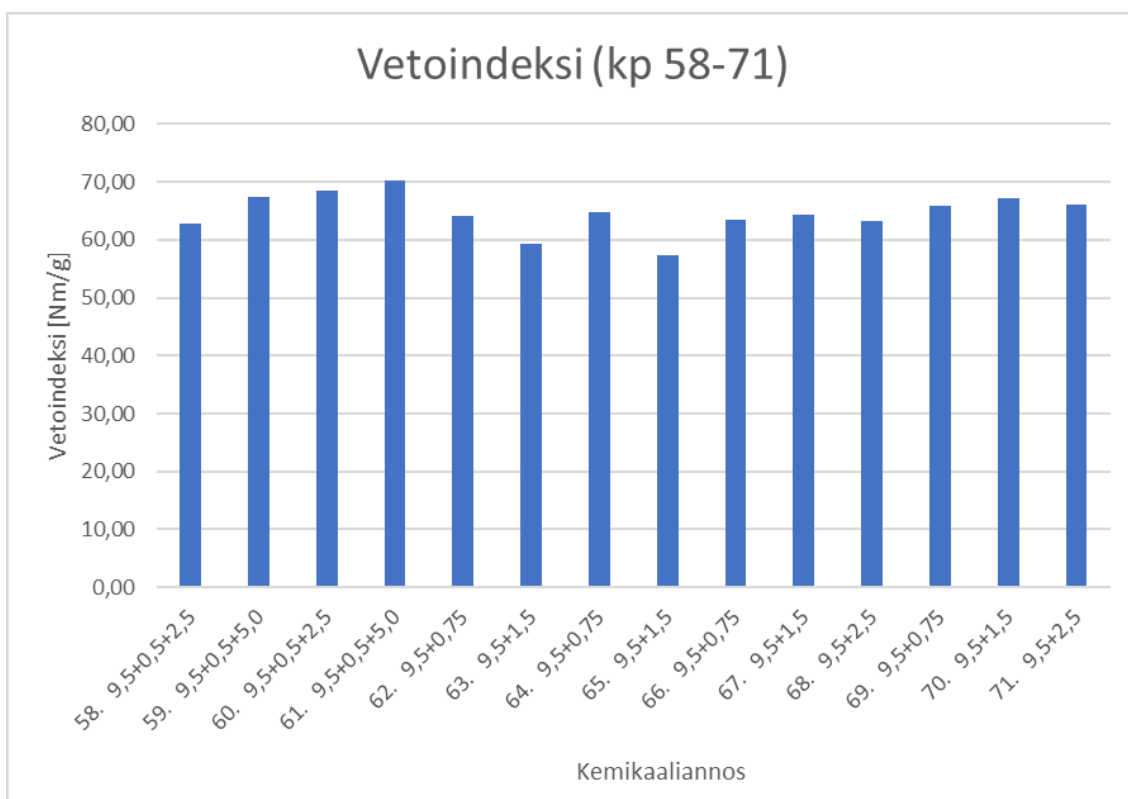
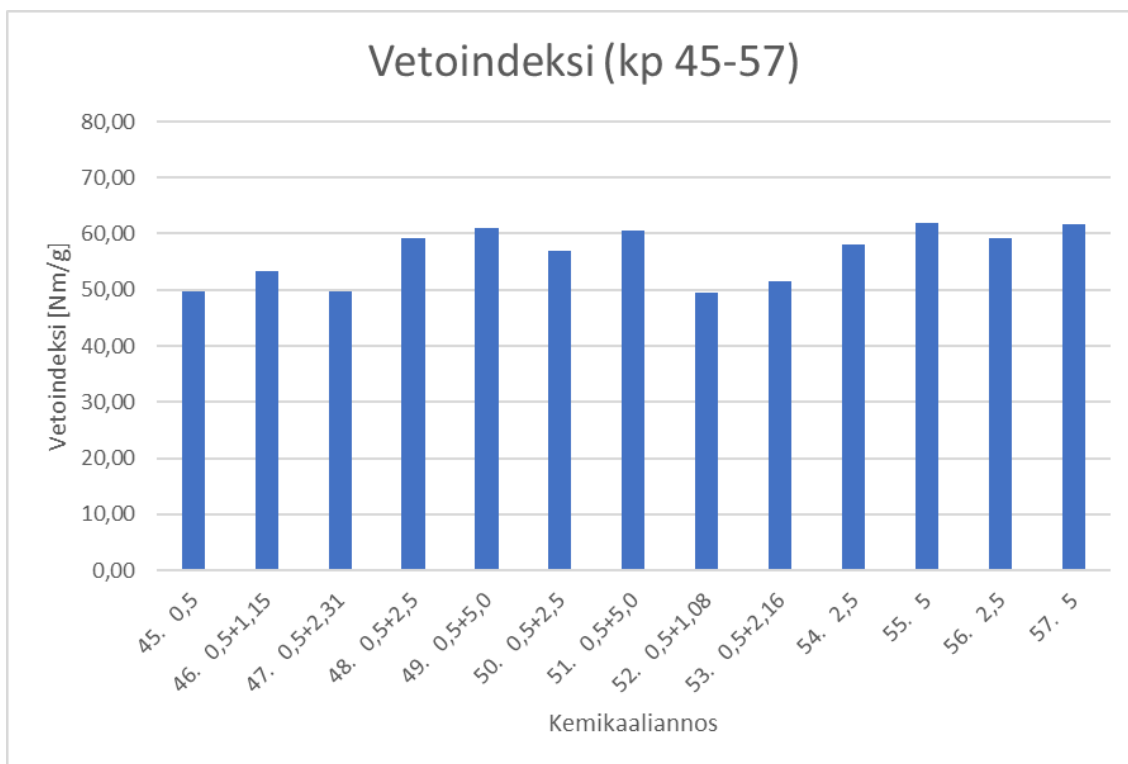
- 14 Paperin ja kartongin vetolujuuden määrittäminen. Yrityksen sisäinen dokumentti. 2016. Kemira Oyj.
- 15 ISO 5629:1983. Determination of bending stiffness. 1983. Paper and board. International Organization for Standardization.
- 16 ISO 2493:1992. Determination of bending resistance. 1992. Paper and board. International Organization for Standardization.
- 17 Paperin ja kartongin taivutusvastuksen määrittäminen. 2016. Yrityksen sisäinen dokumentti. 2016. Kemira Oyj.
- 18 L&W Bending Tester. Verkkoaineisto. <<http://new.abb.com/pulp-paper/abb-in-pulp-and-paper/products/lorentzen-wettre-products/laboratory-paper-testing/l-w-bending-tester>>. Luettu 18.2.2018
- 19 ISO 9895:1989. Compressive strength – Short span test. 1989. Paper and board. International Organization for Standardization.
- 20 SCT-puristuslujuustesti – Compressive strength test – short span compression test. 2017. Yrityksen sisäinen dokumentti. Kemira Oyj.
- 21 TAPPI T569 Internal bond strength (Scott type).
- 22 Paperin ja kartongin palstautumislujuuden määrittäminen. 2016. Yrityksen sisäinen dokumentti. Kemira Oyj.
- 23 ISO 15754:2009. Determination of z-directional tensile strength. 2009. Paper and board. International Organization for Standardization.
- 24 Z-lujuusmittaus paperista ja kartongista. 2016. Yrityksen sisäinen dokumentti. Kemira Oyj.
- 25 ISO 5267-1:1999. Determination of drainability. 1999. Pulps. Part 1: Schopper-Riegler method. International Organization for Standardization.
- 26 Massan suotautumisvastus Schopper-Riegler menetelmän mukaan (SR-luku). 2018. Yrityksen sisäinen dokumentti. Kemira Oyj.
- 27 L&W-Haage Rapid-Köthen-tyyppinen arkkimuottilaitteisto. DE138.FIN. 1997. Käyttöohje. Oy Lorenzen&Wettre AB.
- 28 Dynaamisen arkkimuotin käyttöohje. 2018. Yrityksen sisäinen dokumentti. Kemira Oyj.

Koepisteet	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	
Kg/t kuiva	1. Tärkki (kat.)	2 (kat.)	3 (kat.)	4 (kat.)	5 (kat.)	6 (kat.)	7 (kat.)	8 (an.)	9 (an.)	10 (an.)	11 (an/amf.)	12 (an.)	13 (amf.)	14 (an.)	15 (an.)	16 (amf.)	17 (amf.)	18 (an.)	19 (an.)
Annos	9,5	0,4	4,3	1,7	1,1	2,6	0,5	1,15	0,68	0,54	2,5	0,5	2,5	0,42	1,08				
Annos								2,31	1,36	1,08	5,0	1	5,0	0,83	2,16				
36				1,7															
37				1,7				1,15											
38				1,7				2,31											
39					1,1														
40					1,1			1,15											
41					1,1			2,31											
42						2,6													
43						2,6		1,15											
44						2,6		2,31											
45							0,5												
46							0,5	1,15											
47							0,5	2,31											
48							0,5				2,5								
49							0,5				5,0								
50							0,5						2,5						
51							0,5						5,0						
52							0,5							1,08					
53							0,5							2,16					
54											2,5								
55											5								
56													2,5						
57													5,0						
58	9,5						0,5						2,5						
59	9,5						0,5						5,0						
60	9,5						0,5						2,5						
61	9,5						0,5						5						
62	9,5													0,75					
63	9,5													1,5					
64	9,5														0,75				
65	9,5														1,5				
66	9,5															0,75			
67	9,5															1,5			
68	9,5																0,75		
69	9,5																1,5		
70	9,5																	0,75	
71	9,5																	1,5	
																			2,5

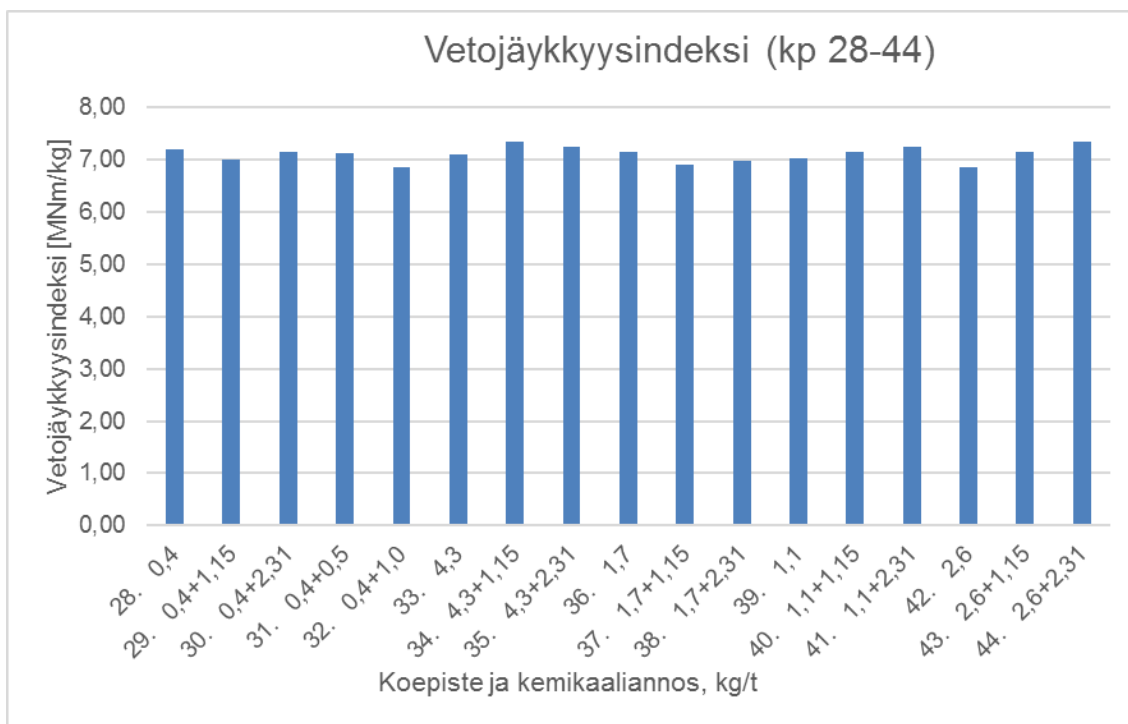
Mittaustulokset Rapid-Köthen-arkeista

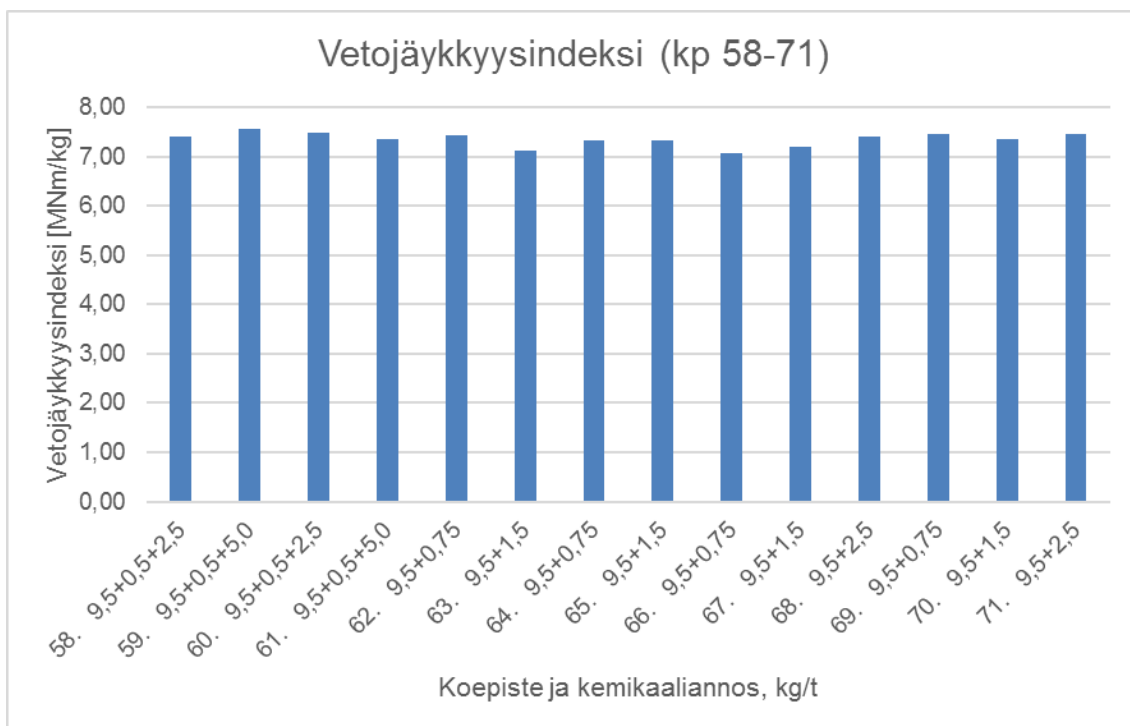
Vetoindeksi



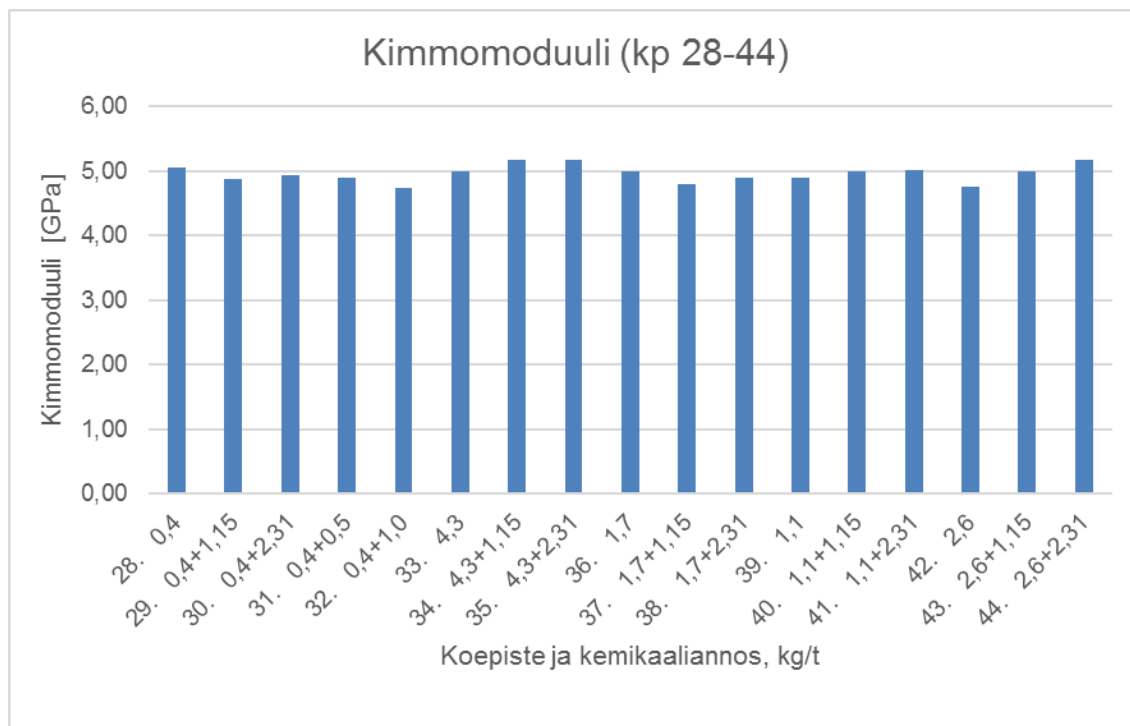
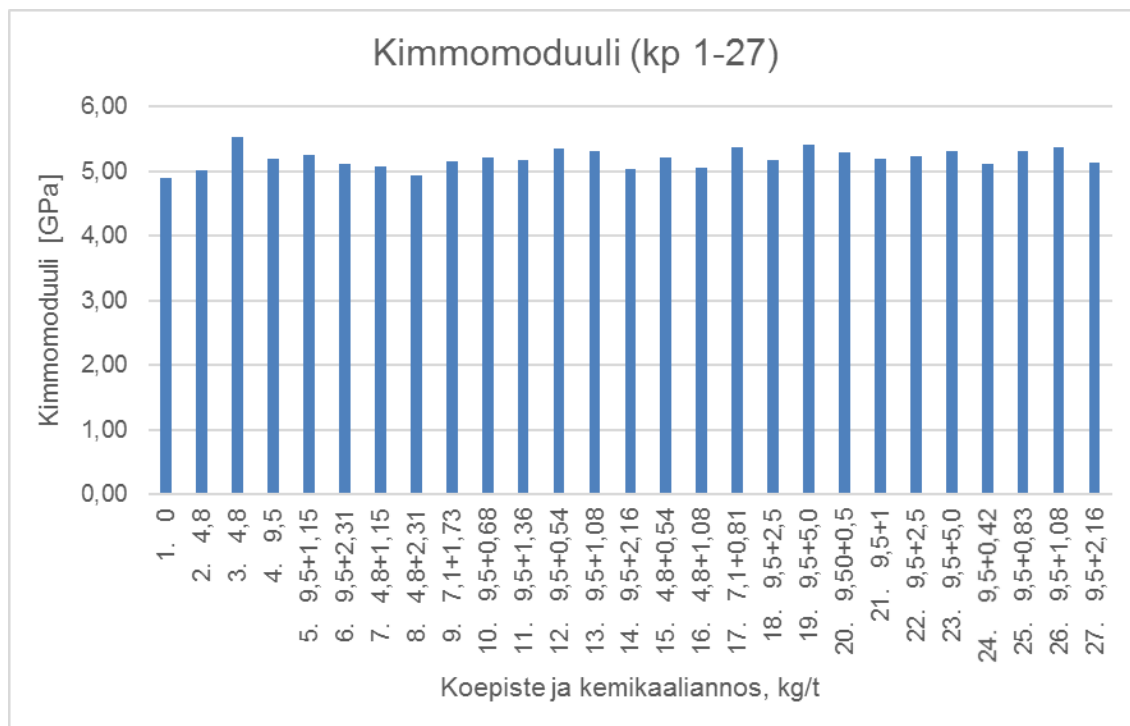


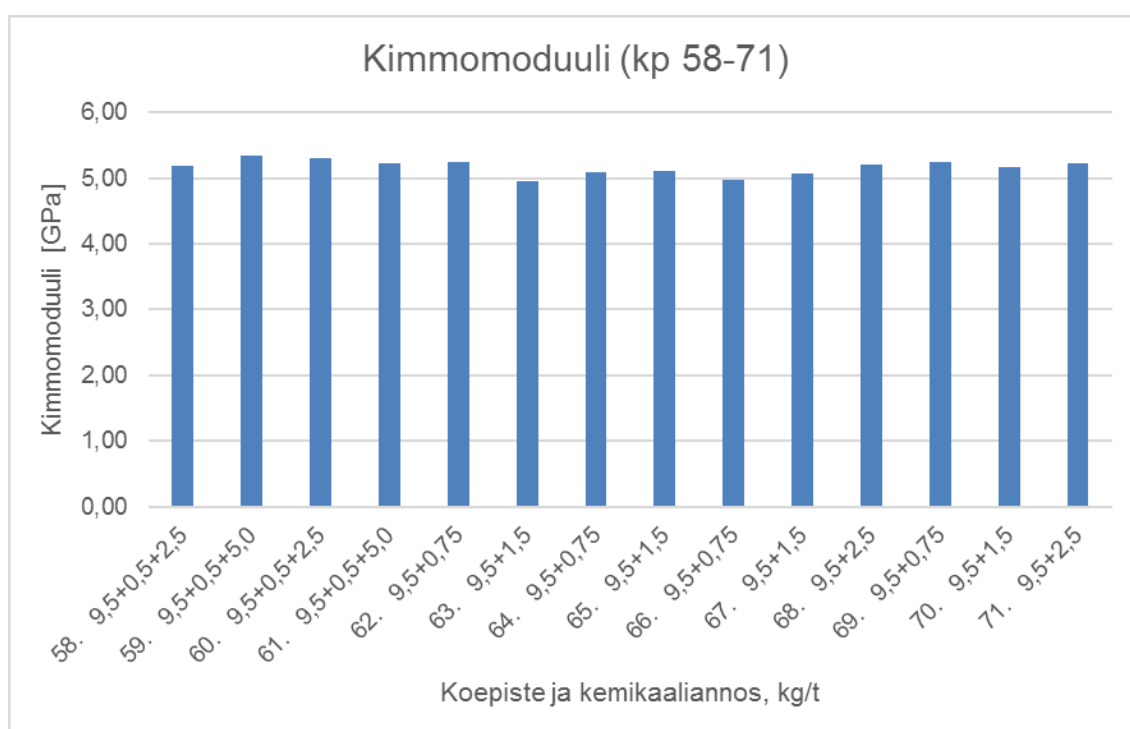
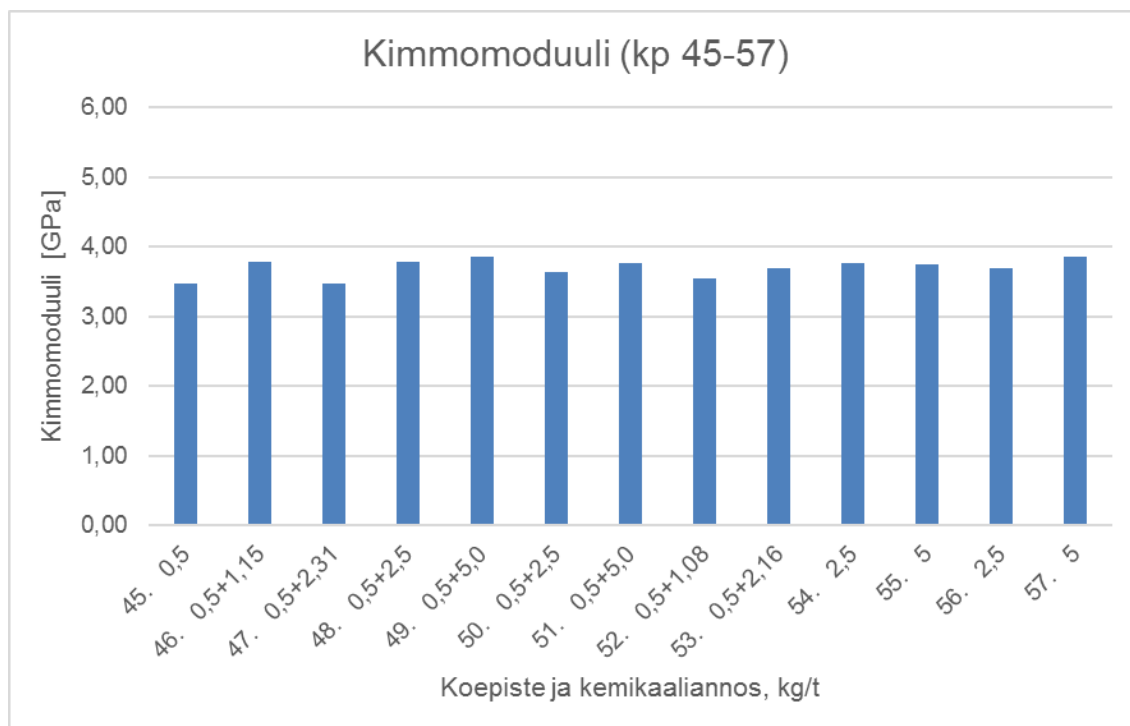
Vetojäykkyyksindeksi



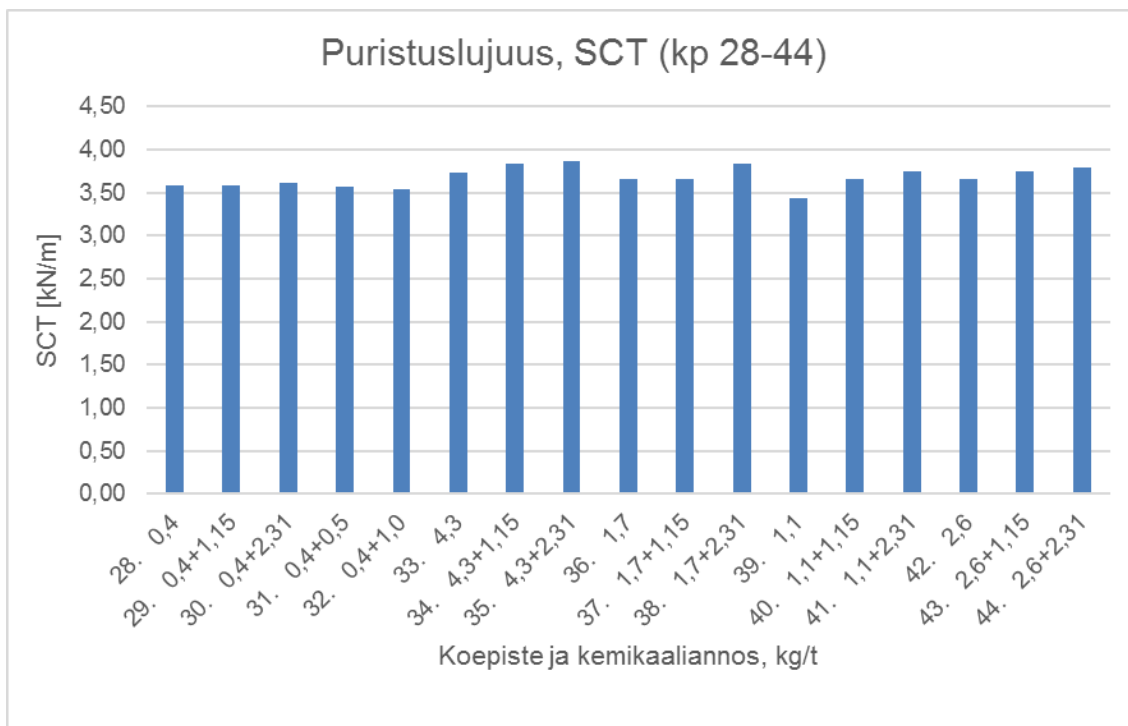
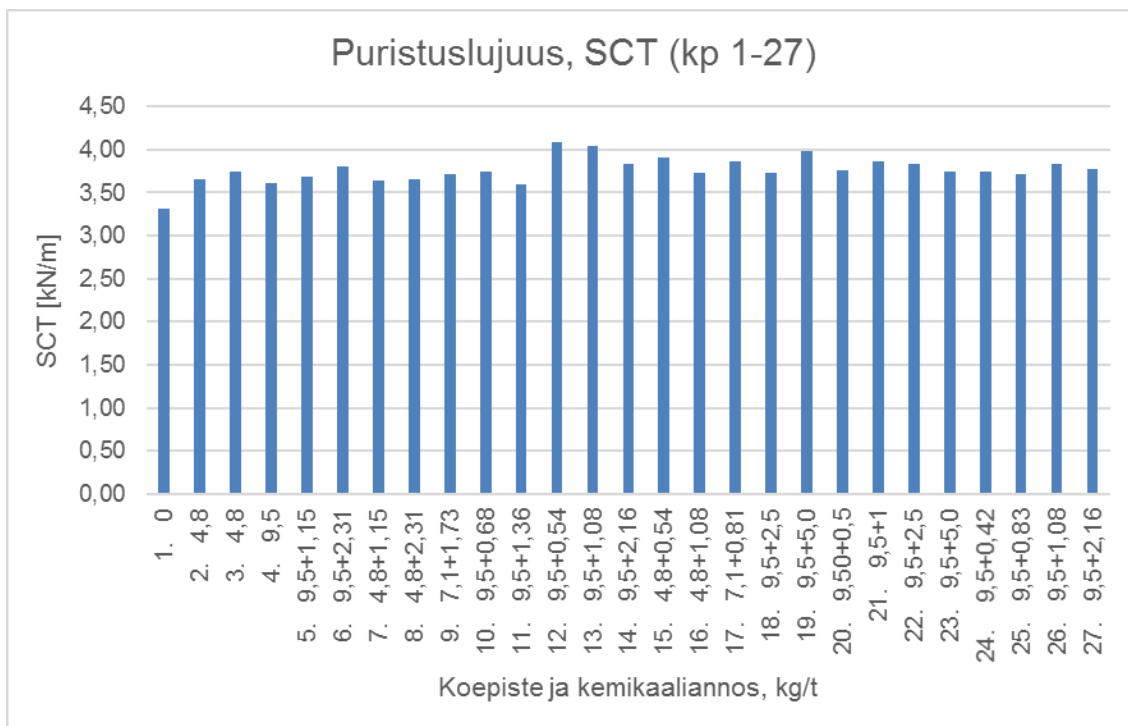


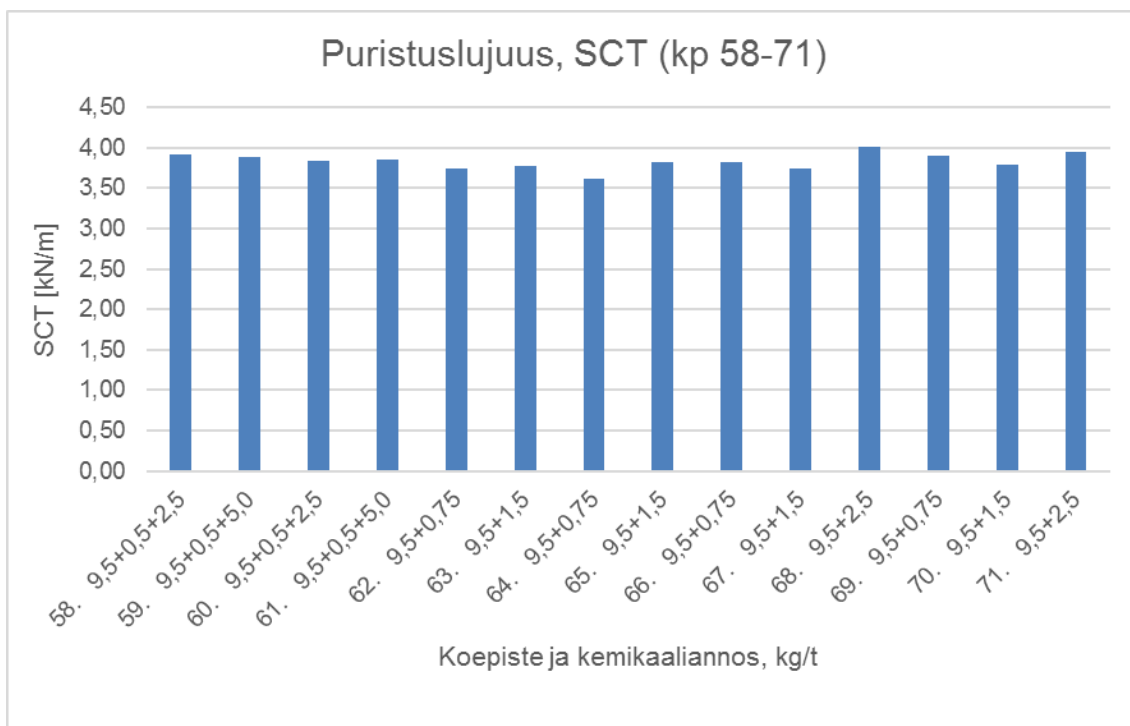
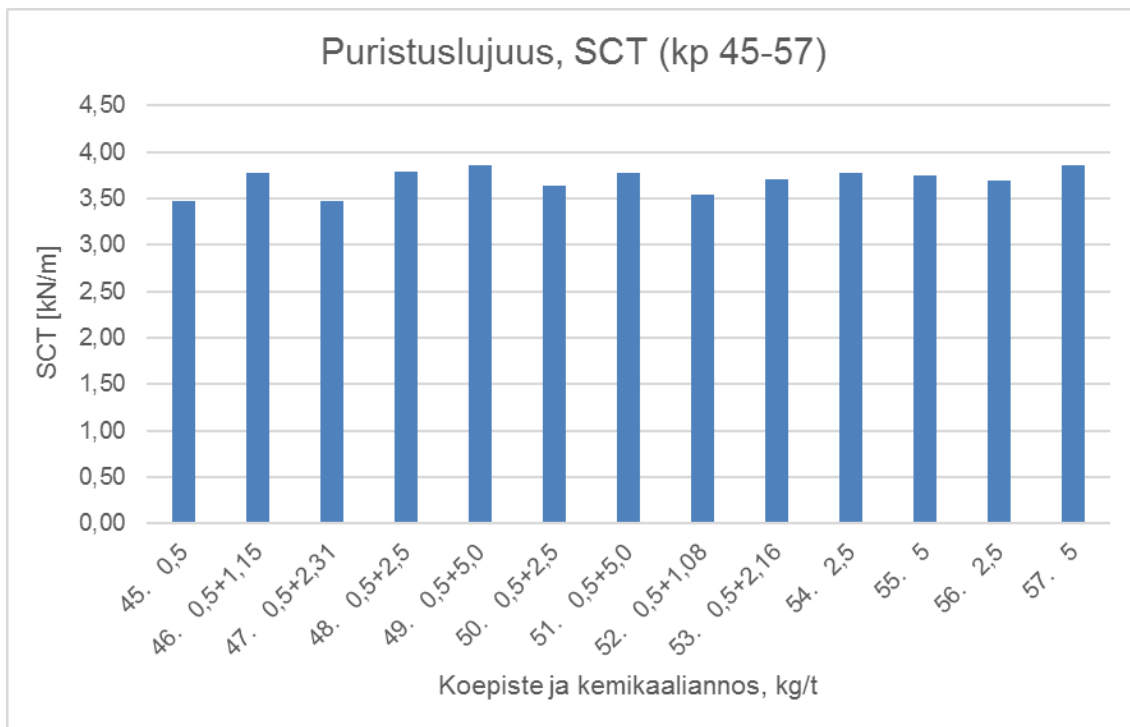
Kimmomoduuli





Puristuslujuus, SCT





Rapid-Köthen -arkkisarjan mittaustulosten keskiarvot

Kemikaaliannos kg/t	Vetolujuus- indeksi, Nm/g	Vetojäykkyyss- indeksi, MNn/kg	Kimmomoduli, GPa	Puristuslujuus, SCT, kN/M
1. 0	49,81	7,17	4,90	3,32
2. 4,8	58,67	7,28	5,02	3,65
3. 4,8	63,00	7,61	5,53	3,75
4. 9,5	62,33	7,34	5,20	3,61
5. 9,5+1,15	69,56	7,48	5,26	3,68
6. 9,5+2,31	65,44	7,23	5,10	3,80
7. 4,8+1,15	60,53	7,21	5,07	3,64
8. 4,8+2,31	58,94	7,08	4,94	3,65
9. 7,1+1,73	66,25	7,33	5,15	3,72
10. 9,5+0,68	66,70	7,40	5,21	3,75
11. 9,5+1,36	63,70	7,31	5,17	3,60
12. 9,5+0,54	66,95	7,53	5,35	4,09
13. 9,5+1,08	68,31	7,46	5,32	4,04
14. 9,5+2,16	67,52	7,19	5,04	3,83
15. 4,8+0,54	64,22	7,43	5,21	3,91
16. 4,8+1,08	59,59	7,13	5,05	3,73
17. 7,1+0,81	69,51	7,59	5,38	3,87
18. 9,5+2,5	68,02	7,31	5,18	3,73
19. 9,5+5,0	71,65	7,58	5,41	3,99
20. 9,50+0,5	65,98	7,45	5,29	3,76
21. 9,5+1	69,54	7,36	5,19	3,86
22. 9,5+2,5	65,91	7,47	5,24	3,83
23. 9,5+5,0	67,68	7,44	5,31	3,74
24. 9,5+0,42	61,81	7,29	5,11	3,74
25. 9,5+0,83	63,15	7,50	5,31	3,71
26. 9,5+1,08	67,01	7,59	5,38	3,83
27. 9,5+2,16	64,07	7,25	5,14	3,78
28. 0,4	50,43	7,19	5,05	3,58
29. 0,4+1,15	51,67	7,00	4,88	3,59
30. 0,4+2,31	54,74	7,14	4,94	3,61
31. 0,4+0,5	50,93	7,13	4,90	3,57
32. 0,4+1,0	48,43	6,86	4,74	3,54
33. 4,3	59,50	7,11	5,00	3,73
34. 4,3+1,15	62,14	7,35	5,17	3,83
35. 4,3+2,31	64,19	7,25	5,17	3,86
36. 1,7	51,04	7,14	5,00	3,65
37. 1,7+1,15	50,71	6,89	4,79	3,66
38. 1,7+2,31	54,38	6,98	4,90	3,83
39. 1,1	49,61	7,02	4,89	3,44
40. 1,1+1,15	54,60	7,14	4,99	3,65
41. 1,1+2,31	55,13	7,24	5,01	3,74
42. 2,6	53,62	6,85	4,77	3,65

43.	2,6+1,15	58,15	7,16	5,00	3,74
44.	2,6+2,31	61,65	7,35	5,17	3,79
45.	0,5	49,83	7,03	4,82	3,47
46.	0,5+1,15	53,43	7,11	4,97	3,78
47.	0,5+2,31	49,73	7,04	4,86	3,47
48.	0,5+2,5	59,30	7,40	5,18	3,79
49.	0,5+5,0	61,01	7,22	5,08	3,86
50.	0,5+2,5	57,02	7,53	5,19	3,64
51.	0,5+5,0	60,58	7,37	5,22	3,77
52.	0,5+1,08	49,53	6,86	4,85	3,54
53.	0,5+2,16	51,42	7,15	4,98	3,70
54.	2,5	58,00	7,35	5,18	3,77
55.	5	61,98	7,19	5,02	3,75
56.	2,5	59,11	7,69	5,24	3,69
57.	5	61,67	7,61	5,36	3,86
58.	9,5+0,5+2,5	62,89	7,41	5,19	3,91
59.	9,5+0,5+5,0	67,46	7,55	5,35	3,88
60.	9,5+0,5+2,5	68,45	7,48	5,31	3,84
61.	9,5+0,5+5,0	70,30	7,36	5,23	3,86
62.	9,5+0,75	64,11	7,44	5,25	3,74
63.	9,5+1,5	59,26	7,13	4,95	3,77
64.	9,5+0,75	64,78	7,33	5,09	3,62
65.	9,5+1,5	57,39	7,33	5,11	3,82
66.	9,5+0,75	63,41	7,08	4,97	3,83
67.	9,5+1,5	64,34	7,21	5,07	3,75
68.	9,5+2,5	63,19	7,40	5,20	4,02
69.	9,5+0,75	65,92	7,46	5,24	3,90
70.	9,5+1,5	67,12	7,35	5,16	3,79
71.	9,5+2,5	66,20	7,46	5,22	3,95

Referenssipisteet 2-4, niiden arvot ylittävät pisteet otettu mukaan, kuitenkin samasta kemikaalista vain paras arvo.