

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU
Metsä- ja puutalouden markkinoinnin koulutusohjelma/
paperi- ja kartonkituotteiden kauppa

Ville Lehtonen

ERI PUULAJEISTA VALMISTETTUJEN SELLUMASSOJEN VAIKUTUKSET
PAPERITEKNISIIN OMINAISUUKSIIN

Opinnäytetyö 2010

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Metsä- ja puutalouden markkinointi

LEHTONEN, VILLE

Eri puulajeista valmistettujen sellumassojen vaikutukset paperitekniisiin ominaisuuksiin

Opinnäytetyö

40 sivua + 31 liitesivua

Työn ohjaaja

Tekniikan lisensiaatti Kauko Mononen

Toimeksiantaja

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu

Maaliskuu 2010

Avainsanat

massa- ja paperiteollisuus, sellu, jauhatus, mittaus, puulajit, ominaisuudet

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan eri puulajeista valmistettujen sellumassojen vaikutusta paperitekniisiin ominaisuuksiin. Tutkitut sellunäytteet lähetettiin UPM:n Fray Bentosin, Metsä-Botnian Kaskisten ja Stora Enson Sunilan tehtaalta. Työn tavoitteena on selvittää kyseisistä sellumassoista niiden jauhatus-, mekaaniset kestävyys- ja optiset ominaisuudet sekä vertailla puulajeja ja niiden ominaisuuksia toisiinsa.

Opinnäytetyön kokeellinen osuus suoritettiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun massa- ja paperilaboratoriossa keväällä 2009. Mittaukset suoritettiin SCAN-standardien mukaisilla mittalaitteilla. Tulosten analysoinnissa käytettiin tilastollisia menetelmiä.

Tuloksista voidaan havaita suuria eroja puulajien välillä. Etenkin havu- ja lehtipuuselujen välillä ominaisuuksien erot olivat huomattavia. Havupuusellulla saadaan hyvät lujuusominaisuudet, ja sitä kautta ajettavuus paperikoneella paranee. Lehtipuusta valmistetut sellumassat antavat hyvät pinnan ominaisuudet, jotka takaavat hyvän painettavuuden.

Tulevaisuudessa kilpailu paperimarkkinoilla kiristyy entisestään kysynnän, ja sitä kautta myös tuotannon painottuessa uusille kasvaville markkinoille, lähinnä Aasiaan. Laatu ja hinta muodostuvat vieläkin merkittävimiksi kilpailutekijöiksi kuin nykyään.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Forest Products Marketing

LEHTONEN, VILLE

The Influence of Chemical Pulp Made from Different Tree Species on Paper Technical Properties

Bachelor's Thesis

40 pages + 31 pages of appendices

Supervisor

Kauko Mononen, LicSc(Tech.)

Commissioned by

Kymenlaakso University of Applied Sciences

March 2010

Keywords

pulp and paper industry, chemical pulp, grinding, measuring, tree species, properties

The influence of chemical pulp made from different tree species is being researched in this bachelor's thesis. Researched chemical pulp samples were transmitted from UPM's Fray Bentos, Metsä-Botnia's Kaskinen and Stora Enso's Sunila mill. The aim of this bachelor's thesis is to find the grinding, mechanical strength and optical properties from these chemical pulps and also compare tree species and their properties to each other.

The experimental part was made at the pulp and paper laboratories of Kymenlaakso University of Applied Sciences in spring 2009. The measurements were accomplished by using SCAN-Standard based measuring devices. Statistical decision-making was used in the analysis of the results.

Big differences between tree species can be seen from the results. Especially differences of properties were notable between softwood and hardwood chemical pulp. Chemical pulp made of softwood gives good strength properties, runnability at paper machines improves. Chemical pulp made of hardwood gives good surface properties, which guarantee good printability.

In the future the competition in paper markets will tighten further because demand and production are going to focus on new growing markets, mainly to Asia. Quality and price will form an even more significant factor of competition than nowadays.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	7
1.1	Työn tausta	7
1.2	Työn tavoitteet	8
2	TYÖN VIITEKEHYS	9
2.1	Tutkimuksen rajaus	9
2.2	Sulfaattikeitto	10
2.3	Massan jauhatus ja massan Schopper-Riegler-luku (SR-luku)	10
2.4	Arkkien valmistus	11
2.5	Laboratoriotestaus	12
2.5.1	Neliömassa	12
2.5.2	Paksuus ja tiheys	13
2.5.3	Bulkki	14
2.5.4	Vaaleus	14
2.5.5	Opasiteetti	14
2.5.6	Kiilto	14
2.5.7	Karheus	15
2.5.8	Ilmanläpäisevyys	15
2.5.9	Vetolujuus ja venymä	15
2.5.10	Repäisylujuus	16
2.5.11	Tuhka	16
2.5.12	Kosteus	16
3	TYÖN SIDOSRYHMÄT	17
3.1	Stora Enson Sunilan tehdas	17
3.2	UPM:n Fray Bentosin tehdas	18
3.3	Metsä-Botnian Kaskisten tehdas	18

4	TUTKIMUSMENETELMÄT	19
4.1	Tiedonkeruu	19
4.2	Laboratoriotutkimukset	19
4.3	Taulukointi	19
5	TULOKSET	20
5.1	Yleiset ominaisuudet	20
5.1.1	Jauhatusaste	20
5.1.2	Neliömassa ja paksuus	21
5.1.3	Tiheys ja bulkki	22
5.1.4	Tuhka	24
5.1.5	Kosteus	24
5.2	Optiset ominaisuudet	24
5.2.1	Vaaleus	24
5.2.2	Opasiteetti	25
5.2.3	Kiilto	26
5.3	Pinnan ominaisuudet	27
5.3.1	Sileys	27
5.3.2	Karheus	29
5.3.3	Ilmanläpäisevyys	30
5.4	Lujuusominaisuudet	31
5.4.1	Vetolujuus ja vetoindeksi	31
5.4.2	Venymä ja murtotyö	33
5.4.3	Repäisylujuus ja repäisyindeksi	34
6	LOPPUPÄÄTÖKSET	36
6.1	Pohdinta	36
6.2	Soveltuvuudet eri lopputuotteiden raaka-aineeksi	37
6.3	Tulevaisuuden näkymät	38
	LÄHTEET	40

LIITTEET

Liite 1. Schopper-Riegler-luvut

Liite 2. Laboratoriotulokset

Liite 3. Minolta-spektrofotometrillä mitatut tulokset

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Paperi- ja selluteollisuus kuten koko metsäteollisuussektori elävät historiansa suurinta muutosta haastavassa markkinatilanteessa. Vallitseva maailman talouden taantuma on asettanut paperiteollisuudelle uudenlaiset toimintapuitteet ja vaatimukset. Euroopassa oleva tuotannon ylikapasiteetti sekä markkinoiden painottuminen uusille alueille ovat pakottaneet yrityksiä sulkemaan tehtaitaan ja panostamaan kasvaville markkinoille.

(1.)

Massa- ja paperiteollisuus on Suomessa tärkeä teollisuuden ala. Sen merkittävyyttä kuvaa hyvin massa- ja paperiteollisuuden osuus Suomen kokonaisviennistä sekä sen työllistävä vaikutus, aina metsästä valmiiseen lopputuotteeseen asti. Tosin nämä kyseiset mittarit ovat viime vuosina laskeneet selvästi paperiteollisuuden kansainvälistymisen ja sitä kautta kilpailun kiristymisen myötä. Globalisaatio on pakottanut kotimaisia yrityksiä laajentamaan toimintaansa ja siirtämään sitä lähemmäs markkinoita eli asiakkaita. (1.) Erityisesti Suomen paperiteollisuudelle lisähaasteita ovat tuoneet myös kallistuneet energia- ja raaka-ainekustannukset sekä Suomen ikuisuusongelma logistisesti eli sijainti. Kustannusten kasvu heikentää oleellisesti kilpailukykyä, jos lisääntyviä kuluja ei voida siirtää lopputuotteen hintaan. Hinnasta on siis näin ollen muodostunut entistä tärkeämpi kilpailutekijä. Raaka-aineiden optimaalinen hyödyntäminen sekä uusien entistä laadukkaampien, teknisesti parempien ja kustannustehokkaampien massaseosten kehittäminen on paperiteollisuuden perusedellytys. Tässä kehitystyössä Suomi on maailman kärkimaita. Raaka-ainekustannukset ja niiden hallinta ovat elinehto kiristyneessä kilpailutilanteessa. Jatkuva kehitystyö ja uusien raaka-aineratkaisujen löytäminen on tärkeää.

Tässä tutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan yhtä paperin raaka-aine kokonaisuutta, kemiallisia massoja eli selluja. Sellunvalmistuksessa on kaksi päätapaa, sulfaatti- ja sulfiittimenetelmä. Tämän tutkimuksen sellumassat on valmistettu sulfaattimenetelmällä. Sama valmistustapa helpottaa vertailun tekemistä tämän tyyppisissä tutkimuksissa. Sellun valmistuksessa massa voidaan keittää joko eräkeittona tai jatkuvatoimisenä keittona Kamyr-keittimessä. Keiton tarkoituksena on poistaa ainakin osittain puukuituja toisiinsa sitova ligniini. (2.)

Sellua voidaan valmistaa niin havu- kuin lehtipuistakin. Pitkäkuituisesta havupuusta valmistettua massaa käytetään lujuuva vaatavien tuotteiden raaka-aineena. Koska lehtipuukuidut antavat hyvät optiset ominaisuudet, sitä käytetään hienopaperin valmistuksessa. Tähän tutkimukseen valittiin melko erilaiset puulajit, jotta saataisiin hajontaa puulajien kesken. Tutkimuksessa tarkastellaan kahta lehtipuusta valmistettua sellumassaa sekä yhtä havupuumassaa. Tutkittavat puulajit ovat koivu, eukalyptus ja mänty. Koivumassa lähetettiin Metsä-Botnian Kaskisten tehtaalta, eukalyptus UPM:n Fray Bentosin tehtaalta ja mäntymassanäyte Stora Enson Sunilan tehtaalta.

Näytteiden laboratoriotestauksella voidaan selvittää eri puulajien erityisominaisuuksia massan raaka-aineena ja tutkia tekijöitä, jotka vaikuttavat massan laatuun. Laboratoriotestaus toimii tukena kehitystyölle. Tulosten analysointi on tärkeää, jotta päädytään oikeisiin ratkaisuihin.

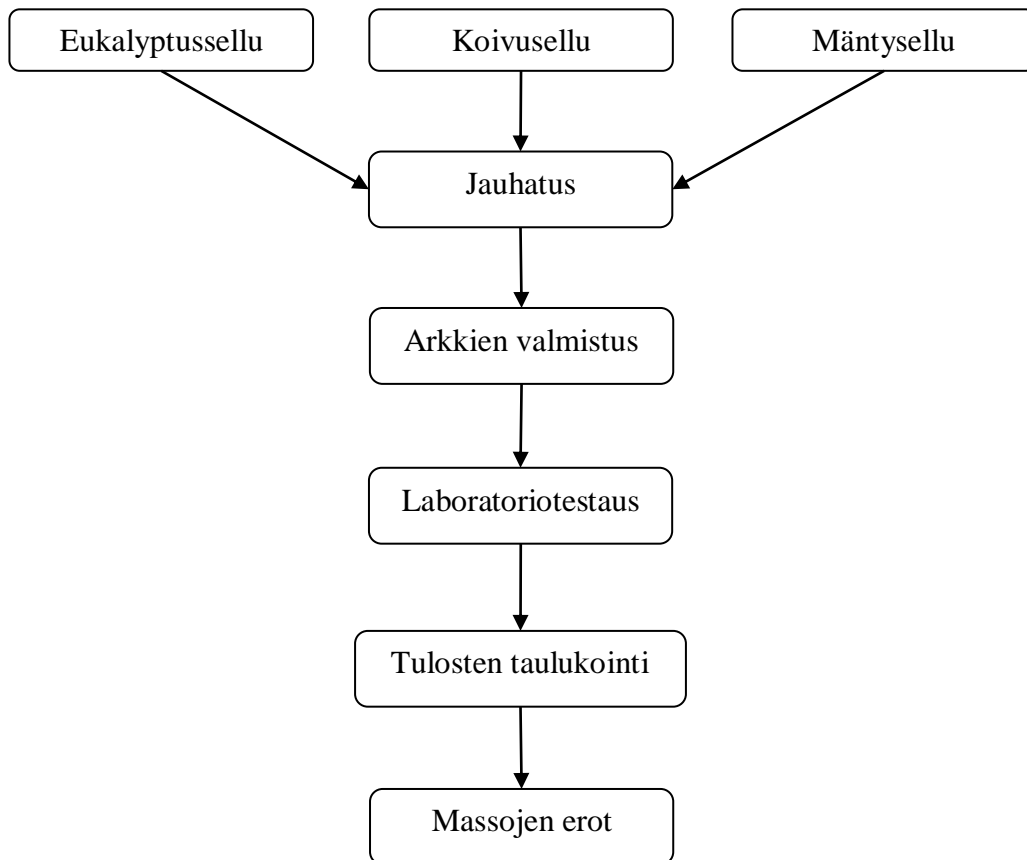
1.2 Työn tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on vertailla Metsä-Botnian Kaskisten tehtaiden, UPM:n Fray Bentosin tehtaiden sekä Stora Enson Sunilan sellutehtaan eri puulajeista valmistettuja sulfaattimassoja keskenään. Työn avulla pyritään selvittämään kolmesta eri puulajista valmistettujen sellumassojen jauhatus-, mekaaniset kestävyys-, pinnan laatu – ja optiset ominaisuuserot sekä vertailla niitä keskenään. Olennaista on myös vertailla havu- ja lehtipuumassoja toisiinsa ja tutkia niiden eroavaisuuksia. Tämän tyyppisten tutkimusten tuloksia voidaan hyödyntää uusien innovaatioiden ja tuotteiden kehittämisessä yleisellä tasolla sekä parantaa kyseisten tuotantolaitosten, joissa tässä tutkimuksessa tarkasteltavat massat on valmistettu, raaka-aineiden käyttöä ja hyödyntämistä. Tulosten analysoinnissa käytetään tilastollisia menetelmiä.

2 TYÖN VIIITEKEHYS

2.1 Tutkimuksen rajaus

Tässä tutkimuksessa on keskitytty vertailemaan kolmesta eri puulajista valmistettuja sellumassoja keskenään jauhatusajanfunktiona. Näin voidaan tarkastella jauhatusajan vaikutusta tutkittaviin paperiteknisiin ominaisuuksiin. Kuvassa 1 nähdään työn viitekehys kaaviona.



Kuva 1. Opinnäytetyön viitekehys

2.2 Sulfaattikeitto

Kaikki tässä työssä tarkasteltavat massat on valmistettu sulfaattimenetelmällä. Sulfaattikeiton tarkoituksena on poistaa ainakin osittain puukuituja toisiinsa sitova ligniini. Se on keskittynyt välilamelliin ja sekundääriseinään. Sellu keitetään voimakkaasti alkalisella liuoksella. Puuraaka-aineena käytetään pääosin mäntyä, kuusta ja koivua, havu- ja lehtipuut keitetään erikseen. Keittoon tuleva puuaines on kuorittu ja haketettu. Kuoriaines kuluttaa paljon valkolipeää ja vaatii lisäksi tehokkaan lajittamon sekä talteenottolinjan. Sellu voidaan keittää joko eräkeittona tai jatkuvatoimisena vuokeittona. Tämän tutkimuksen massat ovat valmistettu jatkuvatoimisessa eli Kamyr-keittimessä. Kamyr-keittimessä hake syötetään tasaisena virtana keittimeen sopivan valkolipeä- ja mustalipeämäärän kanssa. Tällöin pusketaan ulos yhtä suuri määrä sellua ja mustalipeää. Valkolipeäannostus ja keittolämpötila ovat tärkeimmät keittoa säättävät tekijät.

(2.)

2.3 Massan jauhatus ja massan Schopper-Riegler-luku (SR-luku)

Massan jauhatus on hyvin oleellinen osa paperin valmistuksessa. Sellun jauhatuksessa kuituja muokataan jauhinterien välissä niin, että niiden sitoutumiskyky saadaan aktivoitua. Jauhamattomaan paperiin ei synny riittävästi sidoksia, eli paperi ei ole märkinä eikä kuivana riittävän luja. Jauhamaton arkki on myös liian huokoinen ja karhea keltavaksi vaativiin painomenetelmiin tai päällystyksen pohjapaperiksi. (3.)

Tässä tutkimuksessa massat jauhettiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun paperilaboratoriossa standardimenetelmän SCAN-C 25:76 mukaan varustetulla ja kalibroidulla Valley-hollanterilla. Massamäärä jauhatuksessa on 360 g (uunikuivaksi laskettuna) ja massan sakeus hollanterissa 15,7 g/l. Massa jauhetaan 8,3 l/s pyörivän terätukin ja vipuvarrella kuormitettavan alaterän välissä. Terätukin pyöräminen saa aikaan massan jatkuvan kiertoliikkeen hollanterin altaassa. Vipuvarren kuormituksen määrä vaihtelee puulajin mukaan. (4.) Lehtipuilla eli koivulla ja eukalyptuksella käytettiin 6 kg:n kuormitusta. Vastaavasti männyn punnus painoi 7 kg. Havupuun raskaampi kuormitus johtuu yksinkertaisesti kuidun rakenteesta, joka on lehtipuita pidempi ja vahvempi.

Jauhatus käsittää seuraavat vaiheet: massan liotus, hollanterin täyttäminen, massan hajoitus hollanterissa ilman kuormitusta, varsinainen jauhatus, massanäytteiden ottaminen hollanterialtaasta jauhatuksen aikana määräväleihin (SR-luvun määrittämistä varten), jauhatuksen lopettaminen ja hollanterin tyhjentäminen.

Selluarkkien annettiin liota vuorokauden vedessä. Liotuksen jälkeen arkit revittiin pienempiin paloihin hollanteriin, minkä jälkeen alkoi itse jauhatusprosessi.

SR-luku on suhteellinen, mittauslaitteen rakenteen kautta määritelty mitta massan suotautumisnopeudelle. SR-luku mitataan suotauttamalla 1 litra sulppua, jonka sakeus on 2 g/l, vapaasti laitteen viirakankaalle. Massan SR-luku muodostuu sitä suuremmaksi, mitä nopeammin suotautuminen hidastuu viiralle kertyvän kuitukakun vaikutuksesta, ts. mitä hitaammin massa suotautuu. (4.)

Määrittys suoritetaan standardimenetelmän SCAN-C 19:65 mukaan varustetulla ja kalibroidulla Schopper-Riegler-laitteella. SR-luku määritettiin viidestä eri jauhatusajasta, jotka olivat 5 min, 15 min, 30 min, 45 min ja 60 min.

2.4 Arkkien valmistus

Massaa luonnehditaan sekä massan valmistusprosessia tarkkailtaessa että arvosteltaessa massan soveltuvuutta tietyn tuotteen valmistamiseen tapahtuu suurimmaksi osaksi massasta valmistetuista laboratorioarkeista mitattavien ominaisuuksien perusteella.

Näitä paperitekniisiä ominaisuuksia ovat mm. jo aikaisemmin mainitut mekaaniset kestävyys- ja optiset ominaisuudet. Paperin kuituraaka-aineen testauksessa laboratorioarkin valmistus siis simuloi paperikoneprosessia. Laboratorioarkin ominaisuudet eivät tietenkään ole samat kuin samasta massasta paperikoneella valmistetun paperin ominaisuudet. Laboratoriomenetelmän käyttö kuituraaka-aineen testauksessa perustuukin aina saatujen tulosten vertailuun jonkin tunnetun referenssiaineiston tai samanaikaisesti testattavan referenssimassan kanssa. (4.)

Massanäytettä kohti tarvittavien laboratorioarkkien lukumäärä riippuu siitä, mitä eri määrittämiä arkeista on tarkoitus suorittaa ja miten suurta tarkkuutta määrittämiseltä vaaditaan. Tarvittavien arkki-lukumäärä lasketaan eri määrittämissä vaadittavien rinnakkaismäärittäysten lukumäärän mukaan ottaen huomioon, että osa määrittämisistä on

arkkia tuhoamattomia. Aina on syytä tehdä vähintään yksi ylimääräinen arkki varakopiksi. Tutkimuksessani valmistin 6 arkkiä jokaista jauhatusaikaa kohden per puulaji, eli arkkeja puulajia kohden oli 30 kappaletta, yhteensä siis 90 näytearkkia.

SR-luvun määrittämisen jälkeen valmistetaan laboratorioarkit. Laboratorioarkin valmistus alkaa suotauttamalla arkkimuotissa laimea massasulppu viirakankaalle. Tämän jälkeen arkki huopautetaan irti viirasta kuivausarkkien avulla. Kuivausarkit, tavallisesti 2–3 kappaletta, asetetaan varsinaisen arkin päälle, painellaan kevyesti, nostetaan kaikki arkkit varovasti pois viirakankaalta ja laitetaan ne pinoon pinoamiskehikkoon. Pinoamiskehikossa eri jauhatusajat erotettiin muovilevyillä. Kun kaikki koearkit yhdestä puulajista oli saatu valmistettua, arkkit märkätuoretettiin, jotta ylimääräinen vesi saatiin pois. Tuoretuksen jälkeen arkkit asetettiin kuivauslevyille, kiristettiin viirakankaalla ja ripustettiin laboratorioon kuivaamaan. Valmistuksessa on hyvä ottaa huomioon, että arkkimuottiin on yleensä lisättävä arkinteossa jonkin verran teoreettista määrää suurempi massamäärä, koska osa kuiduista menee arkinvalmistuksessa viiran läpi.

2.5 Laboratoriotestaus

Massan ominaisuuksien määrittämiseen laboratorioarkeista käytetään periaatteessa samoja menetelmiä kuin paperin vastaavien ominaisuuksien määrittämisessä. Määrittäykset eivät kuitenkaan ole täysin samanlaisia, koska laboratorioarkeja testattaessa käytettävissä oleva näytepinta-ala on pienempi. Laboratorioarkeissa ei myöskään ole kone- tai poikkisuuntaisia eroavaisuuksia, niin kuin paperikoneessa valmistetuissa arkeissa. Laboratoriotestaus suoritettiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun paperilaboratoriossa. Kaikki työssä suoritettut testit on tehty Scan-standardien mukaan. Luvuissa 2.5.1 – 2.5.12 tarkastellaan lähemmin opinnäytetyössäni tutkittavia suureita.

2.5.1 Neliömassa

Paperin neliömassalla tarkoitetaan paperin massaa grammoina laskettuna neliometriä kohti (g/m^2). Se mitataan paperikoneella β -säteilyn absorptioon perustuvalla on-line-mittauksella. Samalla periaatteella se voidaan mitata myös laboratorioissa. (3.) Tosin tässä tutkimuksessa neliömassa saatiin selville punnitsemalla näytearkki ja laskemalla kunkin testikappaleen neliömassa kaavasta:

$$w = 10000 m / A,$$

jossa

w = testikappaleen neliömassa, g/m²

m = testikappaleen massa, g

A = testikappaleen pinta-ala, cm². (4.) (1)

2.5.2 Paksuus ja tiheys

Paperin ja kartongin paksuus ja tiheys ovat hyvin tärkeitä suureita. Paperiarkin paksuus on kahden 200 mm²:n suuruisen levyn välinen etäisyys, kun ilmastoitu arkki on niiden välissä ja niiden välinen paine on 100 kPa. Paksuusmääritys suoritetaan standardimenetelmän SCAN-P 7:75 mukaan varustetulla ja kalibroidulla tarkkuusmikrometrillä. Mikrometrin nollaus on tarkistettava ennen mittausten aloittamista sekä silloin tällöin mittausten kuluessa.

Paperin tiheys on massa tilavuusyksikköä kohti laskettuna yksittäisen arkin neliömassan ja paksuuden perusteella.

Paperin tiheys lasketaan kaavasta:

$$X = 1000 w / t,$$

jossa

X = tiheys, kg / m³

w = neliömassa, g / m²

t = paksuus, µm. (4.) (2)

2.5.3 Bulkki

Bulkki on paperin tiheyden käänteisarvo, nk. ominaistilavuus. Bulkki on erityisen tärkeä ominaisuus kartonkiteollisuudessa. Hyvään bulkkiin pyritään käyttämällä mekaanista massaa esim. kartongin keskikerroksessa.

Paperin ja kartongin bulkki lasketaan kaavasta:

$$1 / X$$

jossa

X = näytteen tiheys

Bulkin laaduksi tulee cm^3 / g . (4.) (3)

2.5.4 Vaaleus

Paperi on yleisesti ottaen vaaleaa, jos se pystyy heijastamaan takaisin mahdollisimman suuren osan sille langenneesta valosta. Jotta vaaleus voidaan erottaa läpinäkymättömyydestä eli opasiteetista, vaaleuden mittauksessa täytyy käyttää niin paksua arkkipinoa, että pinon läpi menevän valon osuus voidaan katsoa nolllaksi. (3.) ISO-vaaleus on paperin ominaisheijastusluku määritettynä 457 nm:n vaikuttavalla aallonpituudella. Paperin ISO-vaaleutta mitataan Minolta-mittarilla.

2.5.5 Opasiteetti

Opasiteetti kuvaa paperin kykyä estää sen alla olevalla samantyyppisellä paperilla olevan painatuksen läpinäkymistä. Opasiteetti on siis mustaa taustaa vasten määritetyn yksittäisen paperiarkin valonheijastusluvun suhde saman paperin Y -arvoon. (4.) Mittaus suoritettiin Minolta-mittarilla.

2.5.6 Kiilto

Paperin kiillolla pyritään hyvään painojälkeen erityisesti monivärikuvissa. Paperin kiilto on merkki siitä, että pinta on sileä, jolloin on mahdollista saada tasainen, kor-

keakiiltoinen värikerros. (3.) Kiiltoa mitattiin Zehntner-mittarilla. Mittarin mittapäässä mitataan näytteen heijastus yhdensuuntaisella valolla, kun valon tulokulma ja havaitsemiskulma ovat 75° .

2.5.7 Karheus

Paperin karheus määritetään ilman virtaamana paperin ja sen päälle asetetun metallirenkaan välistä 150 mm wp:n paine-eron vallitessa. (4.) Karheus mitataan standardimenetelmän SCAN-P 21:67 mukaan varustetulla ja kalibroidulla Bendtsenin mittarilla.

2.5.8 Ilmanläpäisevyys

Paperin ilmanläpäisevyydellä tarkoitetaan sitä ilman tilavuusvirtaa, jonka 150 mm wp:n paine-ero saa aikaan 10 cm^2 pinta-alan läpi. (4.) Ilmanläpäisevyys mitataan standardimenetelmän SCAN-P 21:67 mukaan kalibroidulla Bendtsenin laitteella. Mittari on sama kuin karheuden määrittämisessäkin käytetty, mutta on varustettu ilmanläpäisevyyden mittauselimellä.

2.5.9 Vetolujuus ja venymä

Vetolujuus ja venymä ovat paperin yleisimmät mitattavat ominaisuudet. Vetolujuudella tarkoitetaan suurinta kuormitusta, jonka liuska kykenee kestävänsä murtumatta sitä pinnan suuntaisesti vedettäessä. (4.)

Venymällä tarkoitetaan liuskan vetokokeessa maksimivoiman hetkellä saavuttaman pituuden lisäyksen suhdetta liuskan alkuperäiseen pituuteen. (4.)

Vetolujuuden testausta varten näytearkeista valmistettiin testiliuskat, joiden mitat olivat: leveys 15 mm ja pituus vähintään 150 mm. Testaus tapahtui Lorenz-Wetretvetolujuusmittarilla. Mittari ilmoittaa vetolujuuden, venymän ja murtotyön. Vetolujuusindeksi lasketaan jakamalla vetolujuus neliömassalla.

2.5.10 Repäisylujuus

Repäisylujuus mittaa sen työn, joka tarvitaan neljän päällekkäisen arkin repäisemiseen alkuvuorosta lähtien. Repäisylujuus ilmoitetaan voimana, joka vaaditaan repäisyn jatkamiseen, eli yksikkö on mN. (4.) Samoin kuin muistakin ljuuksista, voidaan repäisylujuudestakin laskea repäisyindeksi jakamalla repäisylujuus neliömassalla.

Repäisylujuuden määritykset tehdään standardin SCAN-P II:73 mukaan Elmendorf-tyyppisellä repäisylujuusmittarilla. Näytteiden koko oli 62 x 50 mm.

2.5.11 Tuhka

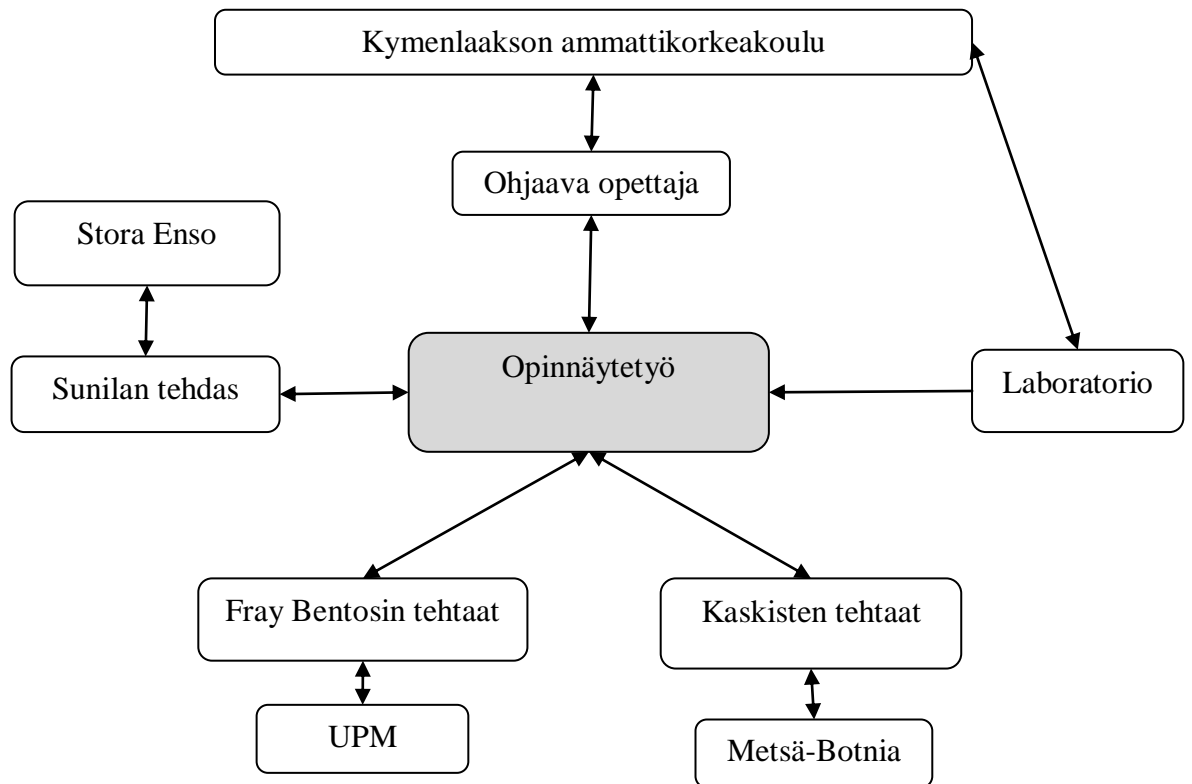
Tuhka kuvaa näytteessä olevaa epäorgaanisen aineen määrää. Tuhka määritetään polttamalla näyte noin 925 °C:n lämpötilassa. Näytearkit leikataan näytepaloiksi tuhkausta varten. Palat punnitaan tarkasti vaakalla ja tulokset kirjataan. Tuhkauksen jälkeen alustan ja tuhkan paino punnitaan. Tuloksesta vähennetään alustan paino ja jäljelle jääneen tuhkan paino jaetaan näytteen alkuperäisellä painolla. Näin saadaan näytteen tuhkapitoisuus prosentteina. (5.)

2.5.12 Kosteus

Paperin kosteus määritetään näytteen painohäviönä, kun näyte on kuivatettu vakiopainoon 105°C:n lämpötilassa, ja se ilmoitetaan näytteen painosta. Kosteuden määritykset tehdään kosteusanalysointorilla, joka ilmoittaa kosteusprosentin, kun näytteen vakioaino on saavutettu. (5.)

3 TYÖN SIDOSRYHMÄT

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu on tutkimuksen toimeksiantaja. Opinnäytetyön kokeellinen osuus suoritettiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun massa- ja paperilaboratoriossa. Osa massanäytteistä oli työtä aloitettaessa valmiina koululla, osa tilattiin. Sunilan sellutehtaan mäntyselluarkit olivat entuudestaan työnohjaajalla tekniikan liseniaatti Kauko Monosella. Eukalyptus- ja koivusellunäytteet tilattiin UPM:n Fray Bentosin ja Metsä-Botnian Kaskisten sellutehtailta. Kuvassa 2 esitetään opinnäytetyön sidosryhmät kaaviona.



Kuva 2. Opinnäytetyön sidosryhmät

3.1 Stora Enson Sunilan tehdas

Stora Enso on Euroopan suurin ja maailman kolmanneksi suurin metsäteollisuusyhtiö sekä maailman suurin paperin- ja kartonginvalmistaja. Sen vuotuinen liikevaihto oli 11 029 miljoonaa euroa vuonna 2008. Stora Enson palveluksessa on noin 30 000 henkilöä. Yhtiön suurimmat tehtaat ovat Suomessa, Ruotsissa, Saksassa ja Ranskassa. (6.)

Sunila Oy on Stora Enso-konserniin kuuluva sulfaattisellutehdas Kotkassa Sunilan kaupunginosassa. Sunilan sellutehdas käynnistettiin vuonna 1938. Stora Enso omisti 51 % sellutehtaasta 23.4.2009 asti, jonka jälkeen se osti loput osakkeet Myllykoski Paperilta ja on näin ollen tehtaan ainut omistaja. Sunilan sellutehdas tuottaa kuudesta ja männystä valmistettua armeeraussellua, jota käytetään puupitoisiin painopapereihin. Tehtaan kapasiteetti on 370 000 tonnia vuodessa. Henkilöstöä tehtaalla on noin 300. (6.)

3.2 UPM:n Fray Bentosin tehdas

UPM on yksi maailman suurimmista metsäteollisuusyrityksistä. UPM:llä on tuotantolaitoksia 15 maassa, ja yhtiön palveluksessa on noin 23 000 henkilöä. Vuonna 2009 yrityksen liikevaihto oli 7,7 miljardia euroa. UPM:n päätuotteita ovat aikakauslehti- ja sanomalehtipaperit, hieno- ja erikoispaperit, tarramateriaalit sekä puutuotteet. (7.)

Fray Bentosin sellutehtaan rakennustyöt alkoivat vuonna 2005. Tehtaan tuotanto käynnistyi marraskuussa 2007. Tehdas on yksi maailman uudenaikaisemmista sellutehtaista. Fray Bentosin tehdas valmistaa eukalyptussellua. Vuotuinen kapasiteetti on 1,1 miljoonaa tonnia, jonka tuotantoon käytetään noin 3,5 miljoonaa kuutiometriä eukalyptuspuuta. Tehdas työllistää noin 200 henkeä. (7.)

3.3 Metsä-Botnian Kaskisten tehdas

Metsä-Botnia on vuonna 1973 perustettu metsäteollisuusyritys, joka valmistaa valkaistua sellua. Sen tuotantolaitokset sijaitsevat Joutsenossa, Kemissä, Raumalla ja Äänekoskella. Metsä-Botnia on Euroopan toiseksi suurin sellunvalmistaja. Tuotantokapasiteetti on Euroopassa 2,7 miljoonaa tonnia selluloosaa vuodessa. (8.)

Kaskisten sellutehdas oli Metsä-Botnian ensimmäinen sellutehdas. Se valmistui vuonna 1977. Tehdas suljettiin 13.3.2009. Kaskisten tehdas valmisti 450 000 tonnia ECF- ja TCF-valkaistua lehtipuu- ja havupuusellua vuodessa. Tehdas käytti vuodessa puuta noin kaksi miljoonaa kuutiometriä. Sulkemishetkellä Kaskisten sellutehdas työllisti noin 200 henkilöä. (8.)

4 TUTKIMUSMENETELMÄT

4.1 Tiedonkeruu

Ennen työn kokeellisen osuuden aloittamista tutustuin laboratoriolaitteiden käyttöohjeisiin ja laitteiden käyttöön työn ohjaajan avustuksella. Työn kuluessa tarkastelin samasta aiheesta aikaisemmin tehtyjä raportteja oman työni pohjaksi. Tutustuin myös alan kirjallisuuteen ja internetjulkaisuihin. Kyseiset teokset ja julkaisut olivat pääasiassa suomenkielisiä, jotka käsittelivät mm. sellun- ja paperin valmistusta, paperin laboriotestausta sekä tilastollisia menetelmiä.

4.2 Laboratoriotutkimukset

Kymenlaakson ammattikorkeakoulun paperilaboratoriossa suoritettiin erilaisia tutkimuksia, joilla kerättiin tietoa massojen paperiteknisistä ominaisuuksista. Kaikki testit suoritettiin standardien mukaan.

4.3 Taulukointi

Tulosten taulukoinnissa ja analysoinnissa käytettiin Excel 2007-ohjelmaa. Excelin avulla vertailtiin massojen paperitekniisiä ominaisuuksia eri puulajien kesken. Ensin Excelillä tehtiin taulukot, joihin tulokset tallennettiin. Tämän jälkeen tulokset saatettiin kuvaajamuotoon vertailun helpottamiseksi. Kuvaajat tehtiin jokaisesta tutkittavasta paperin suuresta erikseen.

Tuloksia tarkasteltiin korrelaation näkökulmasta, tarkemmin sanottuna Pearsonin korrelaatiokertoimen avulla. Korrelaatiokerroin on tilastollinen tunnusluku, jota käytetään hyväksi muiden tunnuslukujen tavoin tilastoanalyysiä tehtäessä. Korrelaatiokertoimella mitataan muuttujien välisen yhteyden voimakkuutta, eli tässä tapauksessa jauhatusajan ja kulloinkin tutkittavan suureen välistä yhteyttä ja sen voimakkuutta. Pearsonin korrelaatiokerroin r mittaa vain lineaarista yhteyttä. Korrelaatiokerroin r on aina $-1:n$ ja $+1:n$ välillä oleva reaaliluku. Korrelaatiokertoimen arvo $+1$ saavutetaan silloin, kun kaikki hajontakuvion pisteet, tässä tutkimuksessa yksittäiset mittaustulokset, sijaitsevat samalla nousevalla suoralla. Arvo -1 saavutetaan vastaavasti silloin, kun kaikki pisteet sijaitsevat samalla laskevalla suoralla. (11.)

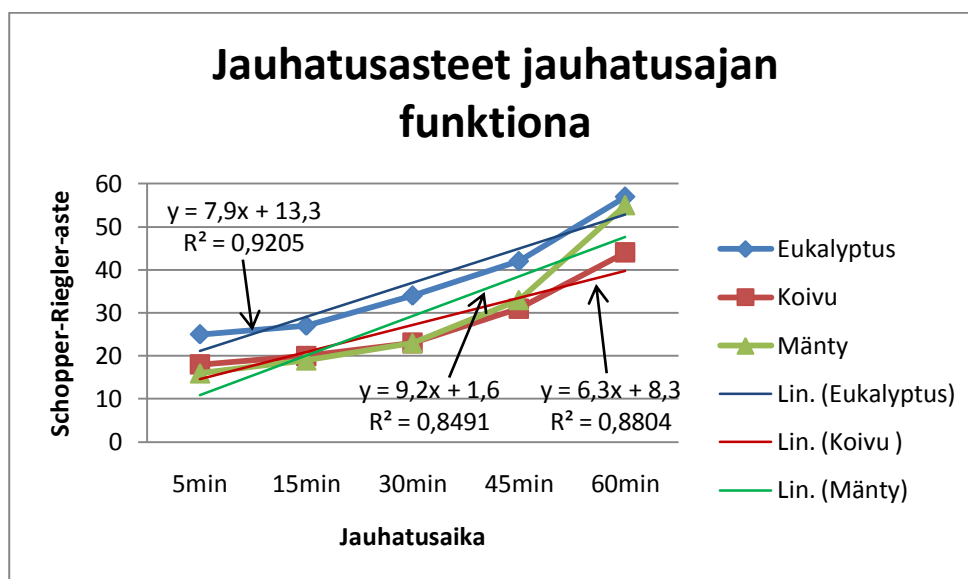
5 TULOKSET

Työntuloksissa tarkastellaan jokainen tutkittava paperin laatusuure erikseen. Samalla vertaillaan eri puulajeja ja niiden ominaisuuksia keskenään toisiinsa kyseisen suureen osalta. Tuloksissa pohditaan myös havu- ja lehtipuista valmistettujen massojen mahdollisia eroja ja syitä niihin.

5.1 Yleiset ominaisuudet

5.1.1 Jauhatusaste

Jauhatus on yksi tärkeimmistä paperin valmistuksen osaprosesseista. Käyttäjä voi vaikuttaa kuitujen ominaisuuksiin ja siten myös lähes kaikkiin valmiin paperin ominaisuuksiin. Tämänkin työn perustana oli jauhatusta, etenkin sen tasalaatuisuus, jotta saadut tulokset olisivat vertailukelpoisia.



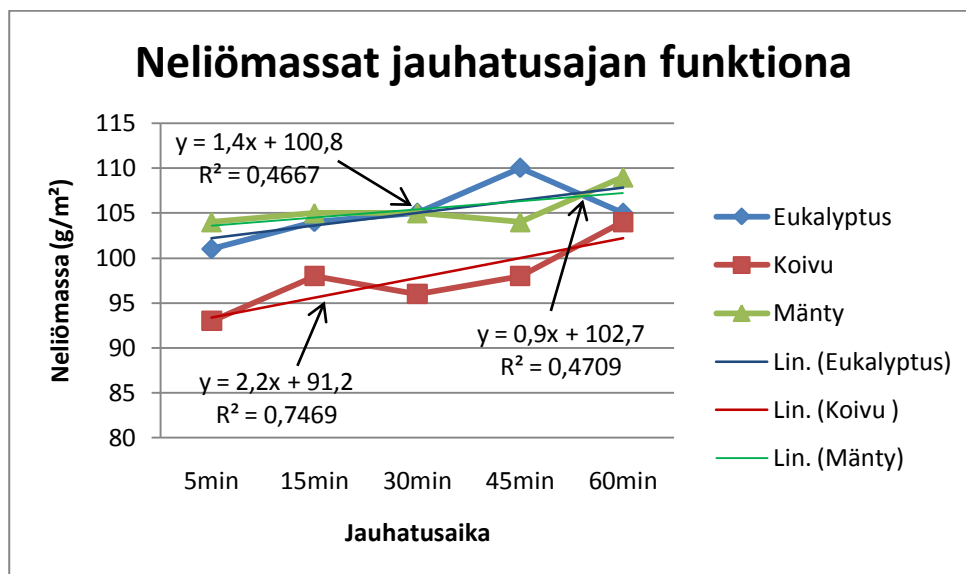
Kuva 3. Jauhatusasteet jauhatusaajan funktiona

Kuvasta 3 voidaan huomata, että kaikilla tutkittavilla massanäytteillä Schopper Riegler-aste nousi tasaisesti jauhatusaajan kasvaessa, eli jauhatusaste korreloi jauhatusaajan kanssa. Jauhatusaste korreloi 85 – 95 %:n todennäköisyydellä jauhatusaajan kanssa, joka on hyvin korkea aste. Huomattavaa oli männyn suhteellisen voimakas SR-luvun kasvu verrattuna koivun ja eukalyptuksen vastaaviin. Tämä johtuu havupuiden voi-

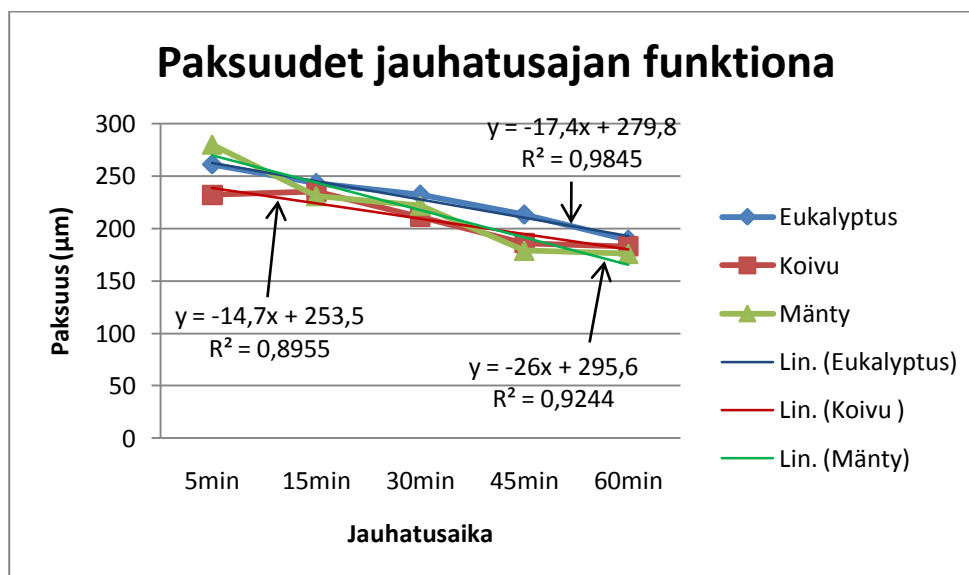
makkaammasta ja suuremmasta kuiturakenteesta verrattuna lehtipuihin. Eukalyptuksen lyhyemmät ja muutenkin huokoisemmat kuidut jauhautuvat helpommin, näin ollen SR-luvun kasvu on tasaisempaa.

5.1.2 Neliömassa ja paksuus

Neliömassoilla ei ole suoranaista yhteyttä jauhatusajan kanssa. Pientä nousua neliömassoissa oli havaittavissa, varsinkin koivunäytteissä, jonka korrelaatio oli n. 75 %. Männyn ja eukalyptuksen korrelaatiot jäivät vajaaseen 50 %:iin. Kaiken kaikkiaan neliömassat vaihtelivat ilman säännönmukaisuutta eri jauhatusajoilla. Neliömassat vaihtelivat puulajeittain 93 – 110 g/m². (Kuva 4.)



Kuva 4. Neliömassat jauhatusajan funktiona

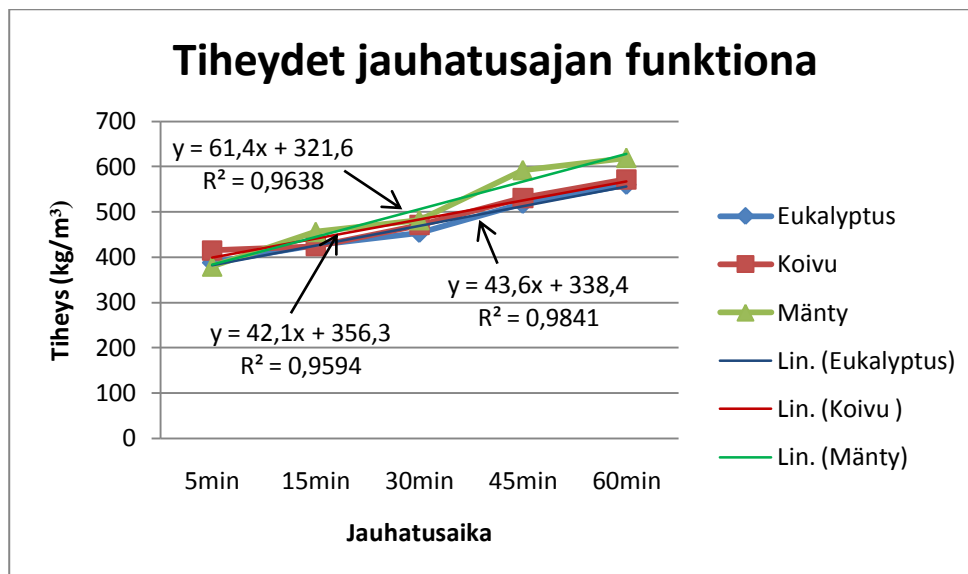


Kuva 5. Paksuudet jauhatusajan funktiona

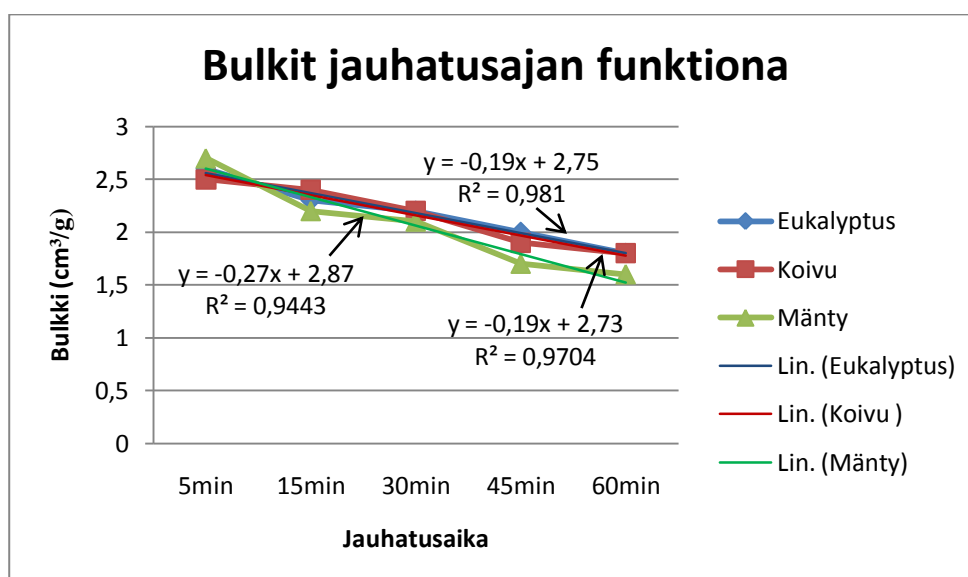
Kuvasta 5 näkee, että paksuudet laskivat selvästi jauhatusajan pidentyessä. Tämä selittyy suureksi osaksi sillä, että jauhatuksen alussa kuidut ovat vielä melko suuria ja orientaation puute aiheuttaa kuitujen epäjärjestystä. Myös kuitukimppujen määrä on vielä suuri. Jauhatusajan kasvaessa kuidut luonnollisesti hajoavat pienemmiksi ja irtautuvat toisistaan, näin ollen paksuus pienenee. Viiden minuutin kohdalla koearkkien paksuudet olivat 230 – 280 µm:n välillä. Lopussa kaikkien puulajien paksuudet olivat laskeneet alle 200 µm:iin.

5.1.3 Tiheys ja bulkki

Kuvassa 6 nähdään, kuinka tiheydet kasvavat suhteessa jauhatusaikaan. Tiheydet kasvavat yli 95 %:n todennäköisyydellä, kun jauhatusaika pitenee. Tiheydet vaihtelivat 380 – 619 kg/m³. Männyllä vaihtelu oli suurinta. Mänty oli tutkittavista näytteistä ainoa havupuu. Havupuilla on tunnetusti pidemmät kuidut kuin lehtipuilla, mistä syystä ne ovat huokoisempia kuin lehtipuut. Jauhatusajan kasvaessa kuidut hajoavat pienemmiksi, ja tiheys kasvaa.



Kuva 6. Tiheydet jauhatusajan funktiona



Kuva 7. Bulkit jauhatusajan funktiona

Bulkki laski selvästi jauhatusajan pidentyessä. Männyllä bulkin lasku oli suurinta. Bulkki korreloi jauhatusajan kanssa 94 – 98 %:n todennäköisyydellä. Bulkki vaihteli 2,7 – 1,6 cm³/g jauhatusajan kasvaessa puulajista riippuen.

5.1.4 Tuhka

Tuhkaa tutkittavissa näytteissä ei esiintynyt. Eukalyptuksella tosin oli 5 minuutin jauhatuksen kohdalla havaittavissa hyvin pieni määrä tuhkaa yhdessä näytteessä, mutta kyseinen pitoisuus johtuu todennäköisesti mittausvirheestä, koska muilla jauhasajoilla tuhkaa ei havaittu.

5.1.5 Kosteus

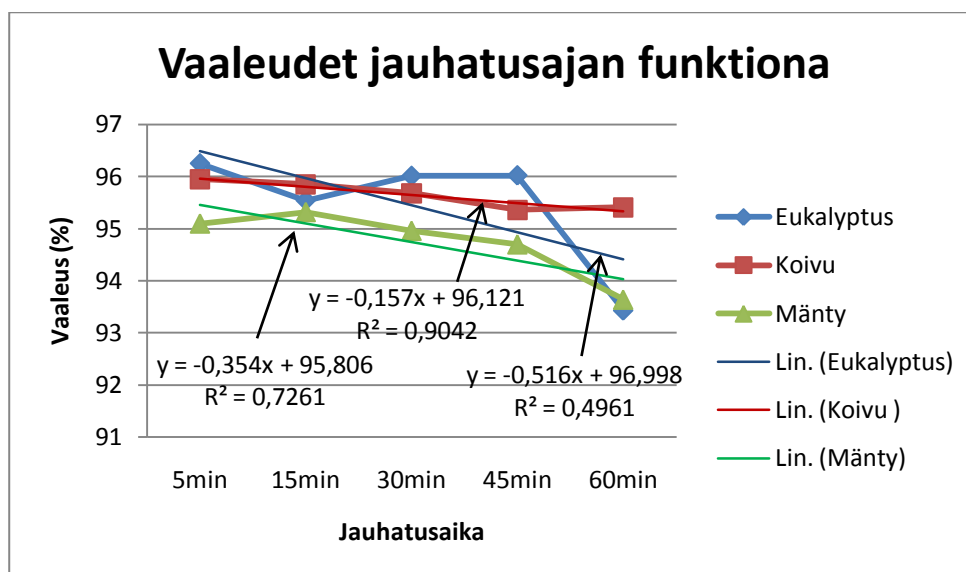
Kosteuspitoisuuteen vaikuttavat hyvin suuresti tutkimusympäristö, eli tässä tapauksessa laboratorio-olosuhteet. Periaatteessa paperin pitäisi olla kosteustasapainossa vallitsevien ilmasto-olosuhteiden kanssa. Tutkittujen näytearkkien kosteuspitoisuudet vaihtelivat 6,6 – 7,3 %.

5.2 Optiset ominaisuudet

Mekaanisten ominaisuuksien lisäksi paperin optiset ominaisuudet vaikuttavat suuresti lopputuotteen käyttökohteisiin ja -tarkoituksiin. Paperin optiset ominaisuudet määräävät paperin ulkonäön. Optisten ominaisuuksien avulla saadaan käsitys paperin ja siihen kohdistetun valon vuorovaikutuksesta. (3.) Optisten ominaisuuksien ja lujuuden yhtäaikaista saavuttaminen on yksi paperinvalmistuksen suurimpia haasteita.

5.2.1 Vaaleus

Vaaleus on hyvin tärkeä paperin ominaisuus, johon asiakkaat kiinnittävät suurta huomiota. Vaaleus vaikuttaa painopinnan kontrastiin. Vaaleutta säädetään valkaisemalla massaa sekä itse paperinvalmistuksessa lisäaineilla, lähinnä kalsiumkarbonaatilla.

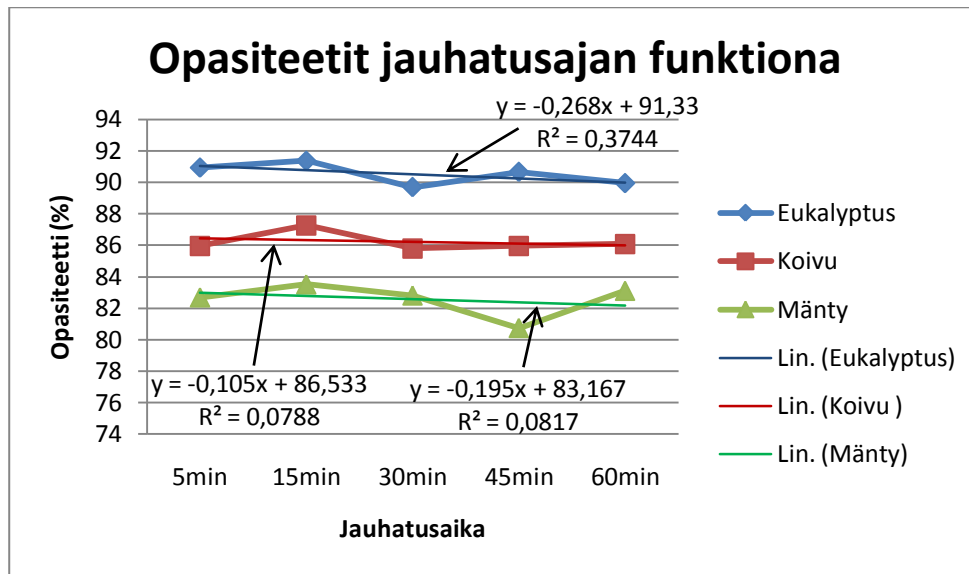


Kuva 8. Vaaleudet jauhatusaajan funktiona

Tutkittujen massojen vaaleudet vaihtelivat 93 – 97 %. Kuvasta 8 voidaan havaita, kuinka kaikkien kolmen puulajin vaaleudet laskivat jauhatusaajan pidentyessä. Suurinta vaaleuden lasku oli 45 – 60 minuutin välillä. Männyllä vaaleus laski kyseisenä aika välinä n. 2,5%. Vaaleusmittauksien tarkemmat tulokset voidaan nähdä liitteessä 3.

5.2.2 Opasiteetti

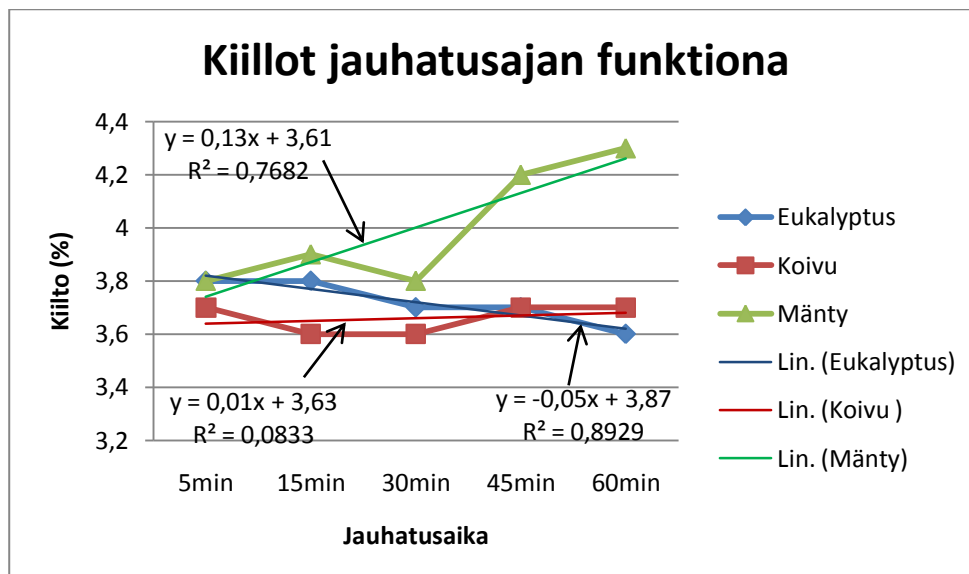
Opasiteetin suhteen eri puulajien massoilla oli selkeitä eroja. Eukalyptuksen opasiteettiarvot olivat selvästi mäntyä ja koivua korkeammat. Eukalyptuksen opasiteetit vaihtelivat 89 – 92 %. Koivulla opasiteettiarvot liikkuvat vastaavasti 85 – 88 %. Männyllä opasiteetti oli selvästi heikoin. Liitteessä 3 voidaan nähdä opasiteetin tarkemmat mitaustulokset.



Kuva 9. Opasiteetit jauhatusajan funktiona

5.2.3 Kiilto

Paperin kiilto itsessään ei ole useimmissa tapauksissa tavoite. Tavoitteena on sen sijaan painojäljen ja erityisesti monivärikuvan kiilto. Paperin kiilto on merkki siitä, että pinta on sileä, jolloin sille on mahdollista saada tasainen, korkeakiiltoinen värikerros. (3.)



Kuva 10. Kiillot jauhatusajan funktiona

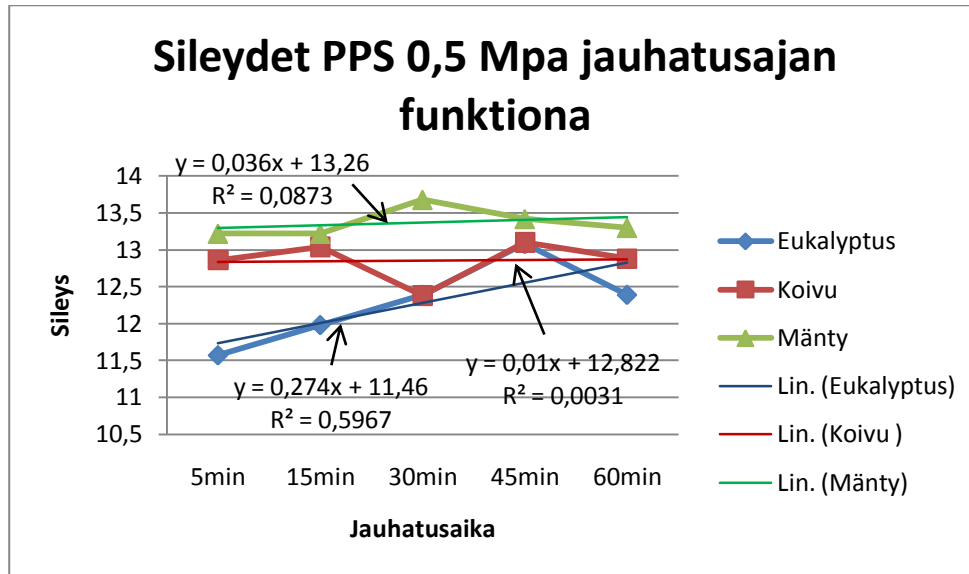
Tutkittujen massanäytteiden kiilloissa ei ollut suuria eroavaisuuksia. Kiillot vaihtelivat 3,6 – 4,3 %. Kiilto korreloi jauhatusajan kanssa yli 75 %:n todennäköisyydellä. Eukalyptuksen kohdalla korrelaatiokerroin oli melkein 90 %. Kuvasta 10 voidaan huomata, kuinka eukalyptuksen ja koivun kiillot menevät melko tasaisesti, kun taas vastaavasti männyn kiillossa tulee huomattava lisääntyminen 30 ja 45 minuutin välillä.

5.3 Pinnan ominaisuudet

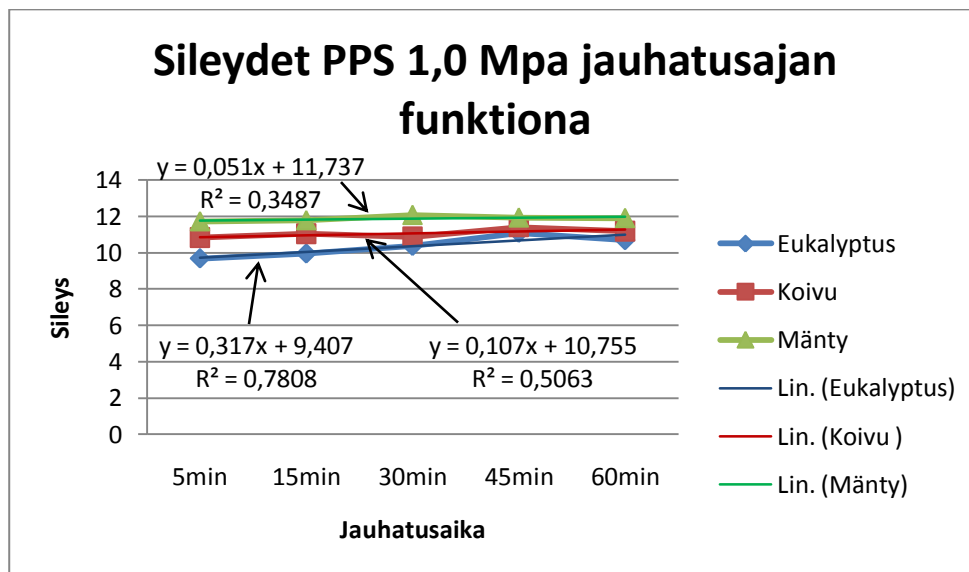
Paperin ja kartongin pinnan ominaisuuksilla tarkoitetaan lähinnä pinnan karheutta. Karheutta kutsutaan joissain tapauksissa myös sileydeksi. Karheutta voidaan mitata menetelmillä, jotka kuvaavat mikro- tai makrokarheutta erilaisissa paineissa. Makrokarheutta mitataan Bendtsen-laitteella, joka perustuu joko ilmanvirtausnopeuden mittaamiseen tietyllä puristusaineella ja ilman paine-erolla tai tietyn ilmamäärän virtaamiseen kuluvan ajan mittaukseen. Mikrokarheutta eli sileyttä mitataan PPS-mittarilla. Tällöin tietyllä paineella saatu mittalukema muutetaan pinnan karheuslukemaksi (μm). Pinnan ominaisuudet ovat erittäin tärkeitä hyvän painotuloksen saamiseksi. Eri painomenetelmät vaativat painopinnalta eri sileyksiä.

5.3.1 Sileys

Sileyden arvot vaihtelivat 0,5 Mpa:n paineella mitattuna 11,5 – 13,7. Kuvasta 11 huomataan, ettei sileys korreloi jauhatusajan kanssa. Korrelaatiokertoimet jäävät pieniksi. Sileyden arvoja tarkasteltaessa pitää huomioida, että mitä pienempi arvo on, sitä sileämpi arkki on kyseessä. Tutkituista puulajeista eukalyptus oli silein, suurelta osin kuiturakenteensa ansiosta. Mänty oli vastaavasti karhein.

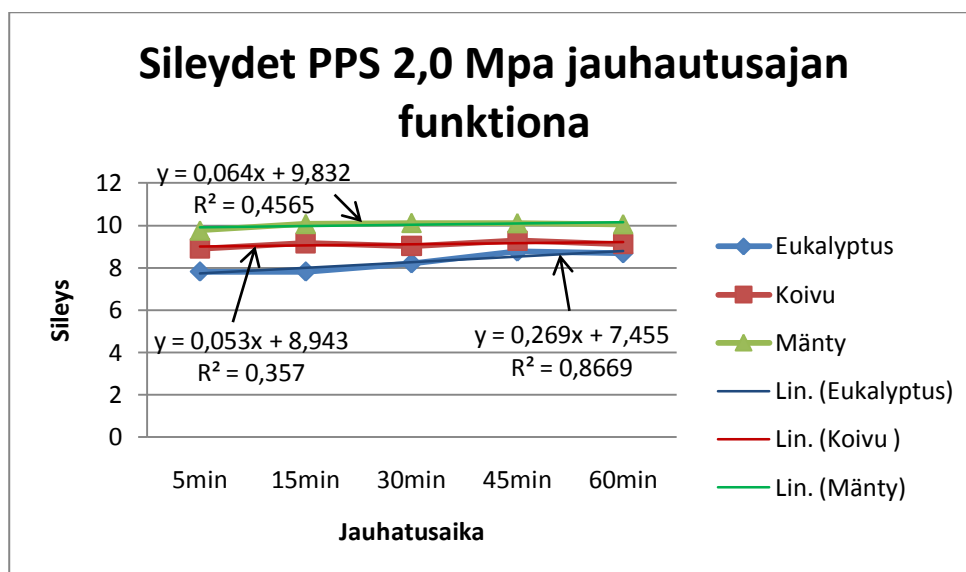


Kuva 11. Sileydet PPS 0,5 Mpa jauhatusaajan funktiona



Kuva 12. Sileydet PPS 1,0 Mpa jauhatusaajan funktiona

1,0 Mpa:n paineella mitattuna PPS-sileydet olivat 9,6 – 11,9. Arvot laskivat hieman vertailtaessa 0,5 Mpa:n vastaaviin, mikä on luonnollista, kun painetta kasvatetaan. Puulajien kesken järjestys pysyi edelleen samana.

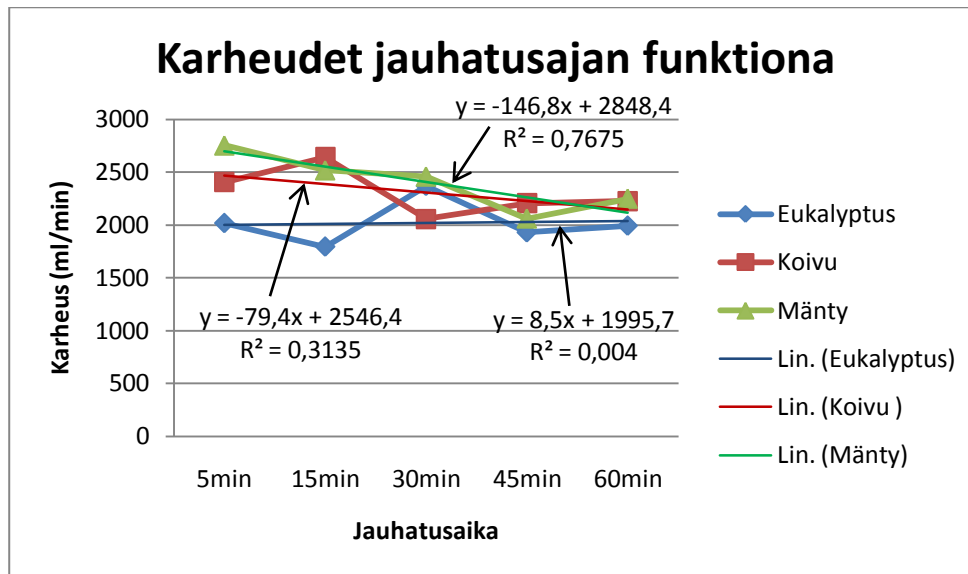


Kuva 13. Sileydet PPS 2,0 Mpa jauhausajan funktiona

PPS-sileyden arvot laskivat sitä enemmän, mitä suuremmalla paineella arkkeja testattiin. 2,0 Mpa:n paineella arvot olivat 7,8 – 10,1 puulajeittain. Puulajikohtaisesti sileyden vaihtelut tasaantuivat. Eukalyptuksella oli havaittavissa 30 minuutista eteenpäin pientä kasvua sileyden arvoissa eli karheus kasvoi.

5.3.2 Karheus

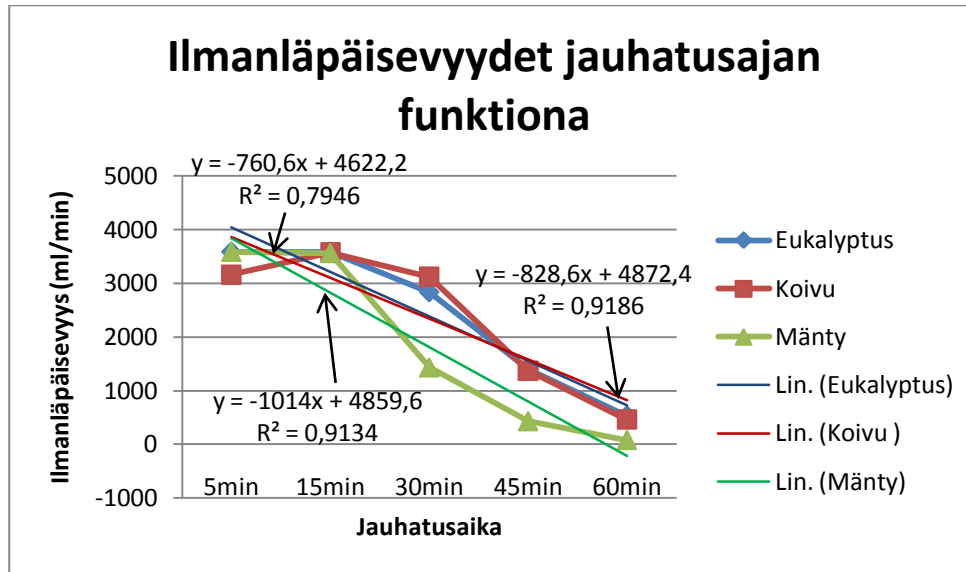
Karheudet mitattiin Bendtsen-mittarilla kuten ilmanläpäisevyydetkin. Karheuden kohdalla suurempi arvo tarkoittaa karheampaa arkkia. Eukalyptus oli jälleen silein, eli sen arvo oli pienin. Tosin 15 minuutista 30 minuuttiin eukalyptuksen karheuden arvo kasvaa huomattavasti, kunnes se alkaa taas tasaantua sen jälkeen. 15 minuuttiin saakka karheudet vaihtelivat voimakkaasti puulajien kesken, mutta 30 minuutin jälkeen vaihtelussa oli havaittavissa selvää tasaantumista.



Kuva 14. Karheudet jauhatusaajan funktiona

5.3.3 Ilmanläpäisevyys

Ilmanläpäisevyydellä oli havaittavissa selvää yhteyttä jauhatusaikaan. Kuvasta 15 huomataan, että jauhatuksen alkuvaiheessa ilmanläpäisevyys oli hyvin korkea. Arkit ovat 5 minuutin ja 15 minuutin kohdalla vielä hyvin huokoisia ja näin ollen ilma menee vielä helposti läpi. 15 minuutista eteenpäin on havaittavissa selvää laskua. Koivun ja eukalyptuksen käyrät ovat hyvin samankaltaiset. Männyllä lasku on vieläkin voimakkaampaa. Alussa ilmanläpäisevydet olivat n. 3 500 ml/min. 60 minuutin kohdalla koivulla ja eukalyptuksella ilmanläpäisevyysarvo oli n. 500 ml/min. Männyllä ilmanläpäisevyys oli tippunut alle 100 ml/min. Korrelaatio ilmanläpäisevyyden ja jauhatusaajan välillä oli eukalyptuksella ja männyllä yli 90 %. Koivulla ilmanläpäisevyys korreloi jauhatusaajan kanssa n. 80 %:n todennäköisyydellä.



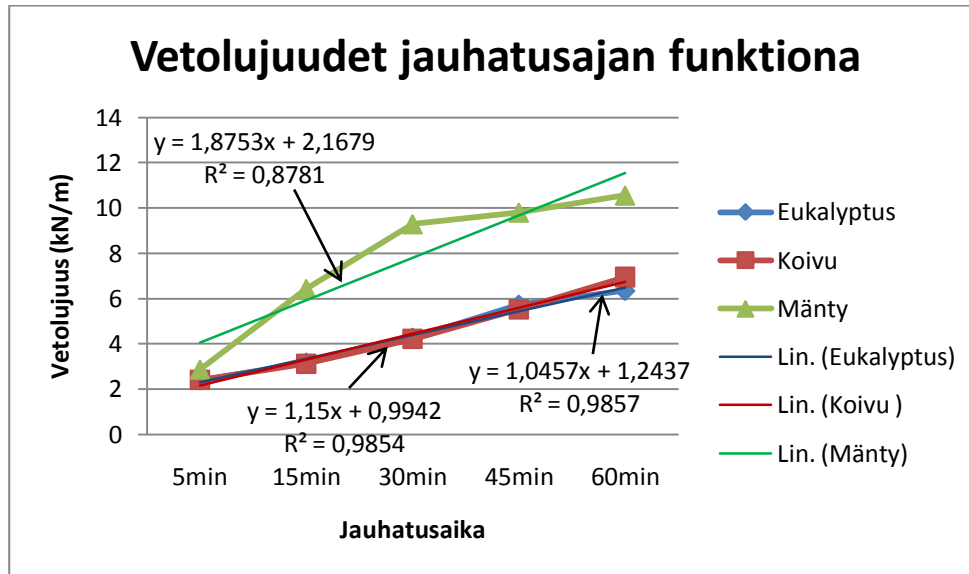
Kuva 15. Ilmanläpäisevyydet jauhatusajan funktiona

5.4 Lujuusominaisuudet

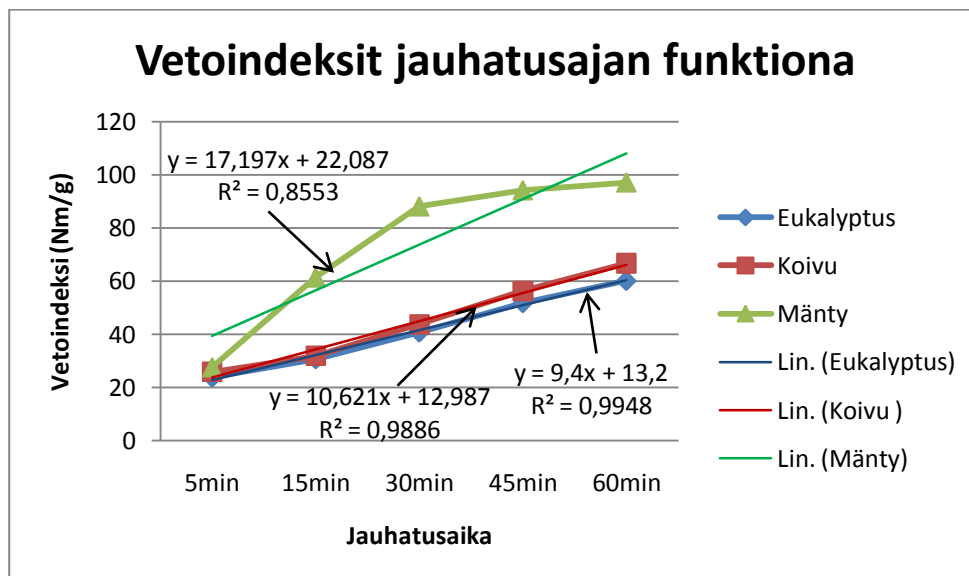
Lujuusominaisuudet ovat hyvin tärkeitä paperin ajettavuuden kannalta paperikoneilla. Myös tietyt lopputuotteet vaativat käyttökohteessaan suurta lujuutta. Lujuudet ovat yleensä suorassa yhteydessä neliömassaan. Suurempi neliömassa takaa suuremmat lujuusarvot. Puulajeilla on myös suuri merkitys lujuuksia tarkasteltaessa. Perinteisesti pitkäkuituisempia havupuita on käytetty lisäämään lujuutta paperinvalmistuksessa.

5.4.1 Vetolujuus ja vetoindeksi

Vetolujuudet kasvoivat selvästi jauhatusajan pidentyessä. Mänty oli vetolujuuksia vertailtaessa omassa luokassaan. Ainoana havupuuna männyn pitkät kuidut takaavat huomattavasti suuremmat vetolujuusarvot kuin koivulla ja eukalyptuksella. 5 minuutin kohdalla puulajien kesken ei ollut vielä suuria eroja. Siitä eteenpäin männyn vetolujuus kasvoi voimakkaasti. Koivulla ja eukalyptuksellakin kasvua oli havaittavissa, mutta se oli huomattavasti heikompi ja tasaisempaa kuin männyllä. Vetolujuuden arvot olivat kaikilla puulajeilla 5 minuutin kohdalla n. 2,5 kN/m. 60 minuutin kohdalla männyn vetolujuus oli 10,5 kN/m. Koivun ja eukalyptuksen vetolujuudet olivat n. 6,5 kN/m. Vetolujuus korreloi jauhatusajan kanssa keskimäärin n. 95 %:n todennäköisyydellä.



Kuva 16. Vetolujuudet jauhatusaajan funktiona

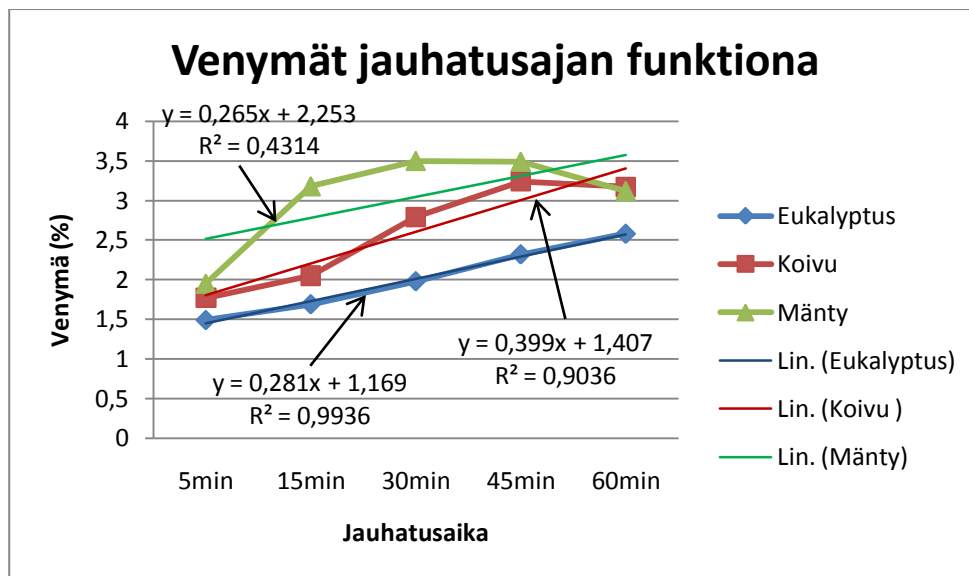


Kuva 17. Vetoindeksit jauhatusaajan funktiona

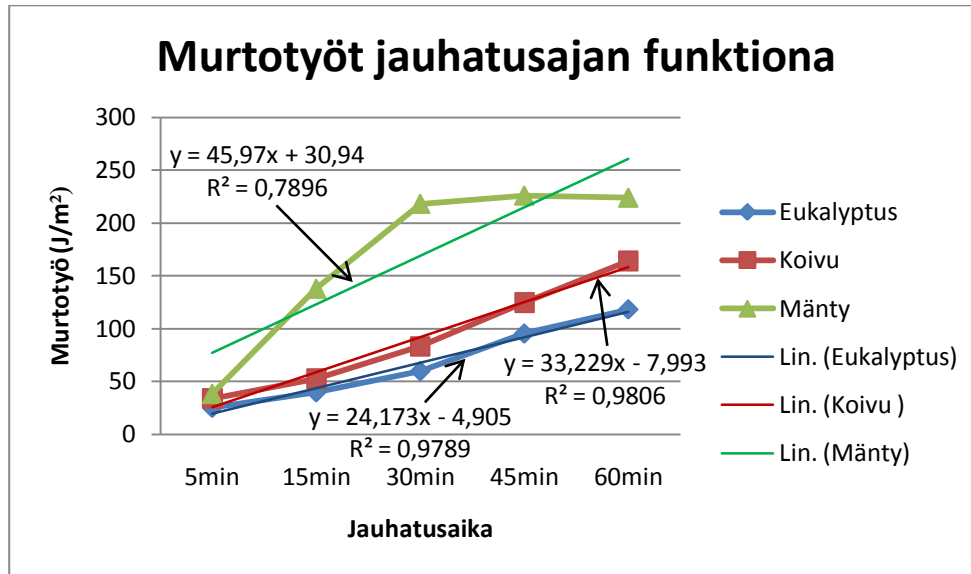
Vetoindeksit käyttäytyivät hyvin samalla tavoin kuin vetolujuudet. Vetoindeksiarvot vaihtelivat puulajeittain 25 – 97 Nm/g.

5.4.2 Venymä ja murtotyö

Venymää tarkasteltaessa havaitaan kuvasta 18, että puulajien kesken on eroja. Eukalyptuksella venymä on selvästi heikoin. Se tosin kasvaa jauhatusaajan pidentyessä niin kuin kahdella muullakin puulajilla. Männyn venymä kasvaa voimakkaasti 5 minuutista 15 minuuttiin, jonka jälkeen kasvu tasoittuu. Koivun ja männyn venymät ovat yhtä suuria 60 minuutin kohdalla. Koivulla ja eukalyptuksella venymä korreloi lineaarisesti jauhatusaajan kanssa hyvin voimakkaasti. Venymä vaihtelee 1,5 – 3,2 % puulajeittain.



Kuva 18. Venymät jauhatusaajan funktiona

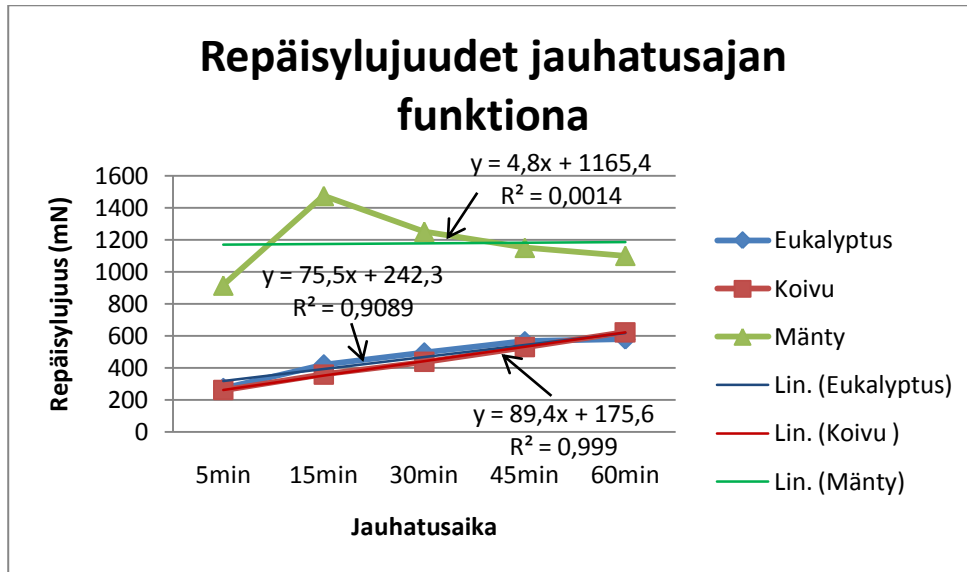


Kuva 19. Murtotyöt jauhatusajan funktiona

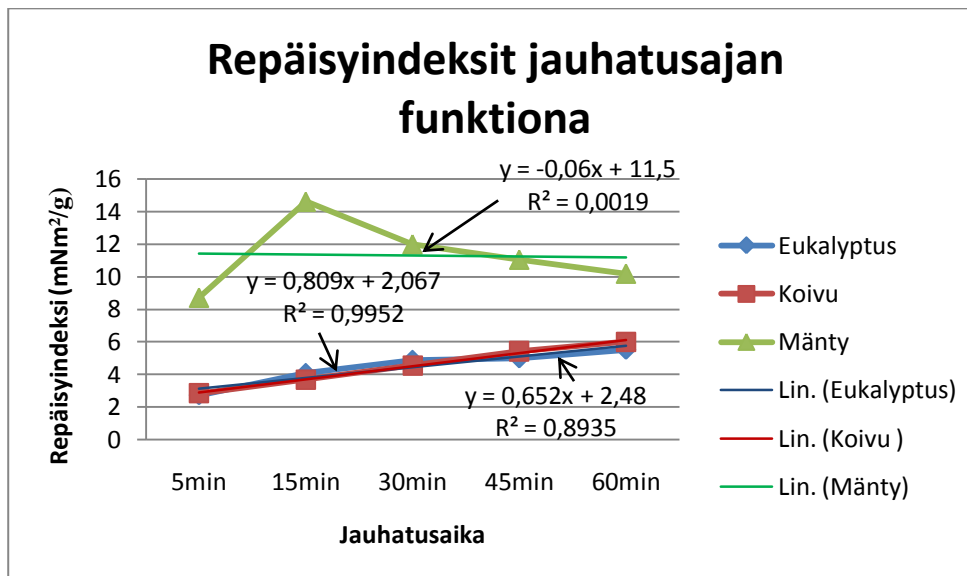
Murtotyössä puulajit jakautuivat taas havu- ja lehtipuissa kahteen ryhmään. Lineaarinen korrelaatio murtotyön ja jauhatusajan välillä oli voimakasta. Männyn murtotyö kasvoi 30 minuuttiin asti, jonka jälkeen kasvu tasaantui. Koivun ja eukalyptuksen murtotyön kasvu jatkui tasaisena koko 60 minuutin ajan.

5.4.3 Repäisylujuus ja repäisyindeksi

Kuvassa 20 näkyy puulajien repäisylujuudet. Männyn repäisylujuus on erittäin suuri verrattuna kahteen muuhun puulajiin. Mielenkiintoista männyn kohdalla on voimakas repäisylujuuden kasvu 5:n ja 15 minuutin välillä; sen jälkeen repäisylujuus männyllä alkaa laskea tasaisesti. Koivun ja eukalyptuksen repäisylujuudet kasvavat hyvin tasaisesti jauhatusajan pidentyessä. Männyn kaltaista voimakasta repäisylujuuden kasvua koivulla ja eukalyptuksella ei ole havaittavissa. 5 minuutin kohdalla männyn repäisylujuus on 916 mN, se kasvaa ja 15 minuutin kohdalla repäisylujuus onkin 1 476 mN. Tämän jälkeen männyn repäisylujuus laskee tasaisesti ollen 60 min kohdalla 1 102 mN. Koivulla ja eukalyptuksella repäisylujuus on 5 minuutin kohdalla n. 270 mN. 60 minuutin kohdalla koivun ja eukalyptuksen repäisylujuudet ovat n. 600 mN. Lineaarinen korrelaatio on koivulla ja eukalyptuksella hyvin voimakasta, yli 90 %. Männyn korrelaatio on hyvin heikko.



Kuva 20. Repäisylujuudet jauhatusaajan funktiona



Kuva 21. Repäisyindeksit jauhatusaajan funktiona

Repäisyindeksin kohdallakin oli selvästi havaittavissa havu- ja lehtipuiden ero. Repäisyindeksit kulkivat hyvin samalla tavalla kuin repäisylujuudetkin. Repäisyindeksit vaihtelivat 2,7 – 11,1 mNm²/g puulajeittain. Männyllä repäisylujuudet olivat selvästi korkeimmat. Eukalyptuksen ja koivun repäisylujuudet menivät hyvin samaan tapaan.

6 LOPPUPÄÄTÖKSET

6.1 Pohdinta

Tämän tyyppisillä vertailevilla tutkimuksilla saadaan hyvin eri puulajien paperitekni-
ten ominaisuuksien erot selville. Sellumassoista valmistetuista näytearkeista on helppo
mitata tutkittavia ominaisuuksia. Kuten tuloksista voidaan havaita eri puulajit antavat
hyvin erityyppisiä ominaisuuksia lopputuotteelle. Havu- ja lehtipuiden välillä on suu-
ria eroja ominaisuuksien kannalta. Perinteisesti havupuilla on ollut hyvin suuri osuus
sellumassan massan raaka-aineena. Viime vuosina myös lehtipuut ovat kasvattaneet
voimakkaasti suosiotaan sellun raaka-aineena. Lehtipuiden, varsinkin koivun etuna on
suuri hemiselluloosapitoisuus, joka antaa runsaan saannon ja vaikuttaa massojen omi-
naisuuksiin. (3.) Lopputuotteet ja niiden ominaisuudet määräävät hyvin pitkälti käytet-
tävän puuraaka-aineen. Pitkäkuituisesta havupuusta valmistettua sulfaattimassaa käy-
tetään pääasiassa antamaan lujutta paperille. Lyhytkuituisen lehtipuusta valmistetun
sellumassan tehtävänä on vastaavasti taata mm. hyvät painettavuusominaisuudet.

Paperin valmistuksessa on kuitenkin tärkeää muistaa, että harvoin lopputuotteessa
käytetään vain yhtä raaka-ainekomponenttia. Hyvin yleistä nykyaikaisessa paperin-
valmistuksessa on erilaisten massaseosten käyttö. Massaseokset antavat monipuoliset
ja laadukkaat ominaisuudet lopputuotteelle. Esimerkiksi sisäpakkaukskartongin valmis-
tuksessa kartongin keskiosaan ajetaan havupuusellua antamaan kartongille lujutta ja
pinnoille eukalyptus- ja koivumassaa takaamaan hyvät painettavuusominaisuudet ja
vaaleuden. Oleellista on kuitenkin tiedostaa tiettyjen ominaisuuksien tavoittelemisen
saattavan heikentää joitakin muita ominaisuuksia. Tällainen esimerkki on mm. suurien
lujuuksien tavoittelu havupuukuidulla, mikä parantaa ajettavuutta koneella ja antaa
lopputuotteelle kestävyyttä, mutta heikentää vastaavasti sileyttä ja siten painettavuutta.

Sellumassan ominaisuuksilla itsessään on vaikutusta lopputuotteen ominaisuuksiin,
mutta lähes aina ominaisuuksia pyritään parantamaan erilaisilla lisäaineilla. Esimer-
kiksi sellu on hyvin vaaleaa jo itsessään, mutta lisäämällä päällystyspigmentejä siitä
saadaan entistäkin vaaleampaa. Kuituraaka-aineiden lisäksi useimpien paperi- ja kar-
tonkilajien valmistukseen käytetään lukuisia täyte-, lisä- ja apuaineita. Täyteaineilla ja
päällystyspigmenteillä on keskeinen asema erityisesti painopapereiden valmistuksessa
sekä raaka-ainetaloudellisesti että vaadittavien paino-ominaisuuksien saavuttamiseksi.

Tässäkin työssä tutkittujen optisten ominaisuuksien ja kiillon optimoimisessa päällystysaineilla on merkittävä rooli. Myös kalanteroinnilla pyritään parantamaan kiiltoa.

Tämän tyyppiset tutkimukset toimivat pohjana kehitystyölle ja oikeille ratkaisuille tavoiteltaessa kulloinkin sopivimpia ominaisuuksia lopputuotteelle. Kuituraaka-aineiden kehittäminen edesauttaa paperin laatusuureiden paranemista sekä toimii keinona säästää ominaisuuksiltaan korkeampi ja tasaisempi laatuista lopputuotteita. Oikeat ratkaisut parantavat laatua ja lisäävät kustannustehokkuutta sekä takaavat kilpailukykyisen hinnan.

6.2 Soveltuvuudet eri lopputuotteiden raaka-aineeksi

Tutkitut puulajit antavat hyvin erityyppisiä ominaisuuksia. Niinpä niiden soveltuvuudetkin eri lopputuotteisiin vaihtelevat. Pitkäkuituisesta männystä valmistettu sulfaattimassa on lujaa massaa, ja sitä käytetään tuotteissa, joissa lujuus on tärkeää. Valkaisemattoman mäntysulfaattimassan lujuusominaisuudet ovat paremmat kuin valkaisuun. Tämän vuoksi valkaisuamatonta mäntysulfaattimassaa käytetään lähinnä voimapaperin valmistukseen sekä aaltopahvin pintakerroksen eli lainerin valmistukseen. (3.)

Valkaistua mäntysulfaattimassaa käytetään etupäässä erilaisten kirjoitus- ja painopaperien lujuutta ja ajettavuutta antavana ns. armeerausmassana sekä puuvapaiden paperien valmistukseen. Tutkimuksessa tarkasteltu Stora Enson Sunilan mäntysulfaattimassa on juuri kyseistä armeeraussellua. Sitä käytetään puupitoisiin painopapereihin, etenkin SC-papereiden ja sanomalehtipaperin raaka-aineena. Valkaistua mäntysulfaattisellua käytetään myös yleisesti parempilaatuisten kartonkilajien pinta- tai taustakerroksessa sekä pehmopapereissa. (3.)

Lehtipuista valmistettujen sulfaattimassojen käyttökohteet poikkeavat hieman havupuiden vastaavista. Lehtipuiden kuidut ovat havupuukuituja ohuempia, minkä vuoksi lehtipuutonissa on moninkertainen määrä kuituja havupuutonniin verrattuna. Tällä on merkitystä etenkin optisten ominaisuuksien kannalta. Tärkein lehtipuusellujen käyttökohde onkin hienopaperit ja valkoiset kartonkilajit. (3.)

Työssä tutkittu koivusellu on päämassa puuvapaissa papereissa sen hyvien pintaominaisuuksien ja optisten ominaisuuksien vuoksi, kuten tutkimustuloksetkin osoittivat. Koivusellua käytetään yleisesti taivekartongin pintakerroksissa ja nestepakkauuskartongeissa.

Koivun tärkeimpänä kilpakumppanina maailmanmarkkinoilla on eukalyptusmassa. Eukalyptuksella, toisin kuin koivulla, on suuri selluloosapitoisuus ja pieni hemiselloosapitoisuus. Tästä syystä eukalyptusmassan saanto on suurempi kuin koivumassalla. Eukalyptuskuidut ovat myös pienempiä kuin koivukuidut, jolloin niiden määrä paperin painoyksikköä kohden on suurempi. Tämä antaa eukalyptusmassalle tiettyjä etuja koivumassaan nähden, esimerkiksi paremman formaation ja korkeamman opasiteetin, mikä tutkimuksen tuloksista voitiin huomata. Eukalyptussulfaattimassaa käytetään hienopapereiden valmistuksessa sekä taivekartongin pintakerroksissa. (3.)

6.3 Tulevaisuuden näkymät

Vallitseva maailmantalouden lama on iskenyt voimakkaasti myös paperi- ja selluteollisuuteen. Jo ennestäänkin rakennemuutoksen kourissa oleva teollisuuden ala on joutunut entistä ahtaammalle. Paperi- ja selluteollisuuden kuten koko metsäteollisuussektorin ongelmana on ollut jo pitkään tuotteiden heikko hintakehitys ja tuotantokustannusten nousu. Raaka-aine- ja erityisesti energiakustannusten nousu on ollut voimakasta koko 2000-luvun. (12.)

Metsäteollisuus toimii nykyisin globaalissa toimintaympäristössä, jossa olosuhteet muuttuvat ja vaikutukset välittyvät maasta toiseen yhä nopeammin. Tämä tekee tulevaisuuden ennustamisesta entistä vaikeampaa. Lopputuotteiden hintavaihtelut ovat entistä herkempiä maailmanmarkkinakysynnän ja –tarjonnan vaihteluille. Tämän hetkisen alenevan hintakehityksen on ennustettu jatkuvan, mutta laskun voimakkuus riippuu kysynnän ja tarjonnan suhteesta. (13.) Joillakin lopputuotteilla tosin on havaittu jo kysynnän lievää piristymistä ja sitä kautta hintojen nousua.

Sellun – ja paperin tuotannossa on ollut varsinkin Euroopassa tuotannon ylikapasiteettia, jota on purettu viime vuosina tehtaiden lopettamisen ja tuotannon rajoittamisen kautta. Tulevaisuudessakaan ei todennäköisesti välttyä uusilta tehtaiden sulkemisilta. Tuotanto ja markkinat painottuvat tulevaisuudessa entistä enemmän Euroopan ja Poh-

jois-Amerikan ulkopuolelle. Aasian ja Etelä-Amerikan markkinat ja tuotanto kasvavat entisestään. Etelä-Amerikassa massantuotanto lisääntyy. Kiinaan ja Intiaan tullaan panostamaan paperintuotantoa lisää tulevaisuudessa, koska siellä kulutus kasvaa kovaa vauhtia. (12.)

Tutkituista sulfaattimassoista eukalyptusmassalla on selvästi parhaat näkymät verrattuna koivu- ja mäntymassaan. Yritykset ovat jo siirtäneet tuotantoaan lähemmäs eukalyptusplantaaseja, minkä avulla ne pystyvät helpommin hyödyntämään tämän nopeakasvuisen puulajin edut ominaisuuksien ja kustannusten osalta. Koivun ja männyn kannalta lohduttavaa on niiden hyvät soveltuvuudet tiettyjen paperilajien valmistukseen, mikä takaa jatkossakin niiden tarpeet paperin valmistuksessa.

Niiden tehtaiden tilanteet, joissa tutkitut massanäytteet on valmistettu, ovat hyvin erilaiset. Metsä-Botnian Kaskisten sellutehdas suljettiin 13.3.2009.

Stora Enson Sunilan sellutehtaan tulevaisuus vaikuttaa epävarmalta. Tehtaalla on jo pitkään ollut tuotannonrajoituksia ja seisokkeja, koska kysyntä on ollut heikkoa. Stora Enso oli jo päättänyt tehtaan alasajosta, kunnes se päätti käynnistää tuotannon uudelleen alkuvuodesta 2010. Mahdollinen kysynnän elpyminen ja sellun hinnannousu näyttävät Sunilan tehtaan kohtalon.

UPM:n Fray Bentosin tehdas on yksi nykyaikaisemmista sellutehtaista. Se sijaitsee lähellä raaka-aineita ja markkinoita. Sen tulevaisuus näyttää valoisalta. Tosin maailman laajuinen lama vaikuttaa Fray Bentosinkin toimintaan, mutta perusedellytykset ovat hyvät.

Tulevaisuudessa yritykset panostavat entistä enemmän tuotekehittelyyn ja kustannusten minimoimiseen, jotta asiakkaille voidaan tarjota korkealaatuisia tuotteita kilpailukykyiseen hintaan.

LÄHTEET

1. Metsäteollisuus RY, Paperiliitto RY. Paperiteollisuuden tulevaisuusryhmän raportti. http://www.metsateollisuus.fi/infokortit/Paperiteollisuuden_tulevaisuustyoryhman_raportti/Documents/Paperiteollisuus_loppuraportti_31-05-2006.pdf 15.1.2010
2. Seppälä, M. (toim.) 2005. Paperimassan valmistus. Kemiallinen metsäteollisuus 1. Opetushallitus. Helsinki.
3. Häggblom-Ahnger, U. & Komulainen, P. 2003. Paperin ja kartongin valmistus. Kemiallinen metsäteollisuus II. Opetushallitus. Helsinki.
4. Aaltonen, P. 1986. Kuituraaka-aineen ja paperin testausmenetelmiä. Otatieto Oy. Helsinki.
5. Mononen, K. 2006. Työkirja: Märkä- ja kuivalaboratorioharjoituksia varten. Monistenippu.
6. Stora-Enso Oyj. <http://www.storaenso.com/> 1.2.2010
7. UPM-Kymmene Oyj. <http://www.upm.com/fi/> 1.2.2010
8. Oy Metsä-Botnia AB. <http://www.metsabotnia.com/> 2.2.2010
9. Holopainen, M. & Pulkkinen, P. 2004. Tilastolliset menetelmät. WSOY. Helsinki.
10. Reini, K. & Törmä, H. & Mäkinen, J. Massa- ja paperiteollisuuden supistumisen ja tulevaisuuden kuvien aluetaloudelliset vaikutukset. Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti. <http://www.helsinki.fi/ruralia/julkaisut/pdf/Raportteja50.pdf> 9.2.2010
11. Hänninen, R. & Viitanen, J. & Toivonen, R. & Järvinen, E. 2007. Metsäsektorin suhdanneennusteet ja niiden hyödyntäminen. Metsätieteen aikakauskirja 3/2007.

Schopper-Riegler-luvut

<u>Jauhatusaika</u> (min)	Eukalyptus	Koivu	Mänty
5	25	18	16
15	27	20	19
30	34	23	23
45	42	31	33
60	57	44	55

Laboratoriotulokset

Näyte: Eukalyptus 5min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	98	98	98	109	105	98	101	5,2
Paksuus	um	261	269	251	268	260	254	261	7,2
Tiheys	kg/m ³	387	375	402	377	388	397	388	10,8
Bulkki	cm ³ /g	2,6	2,7	2,5	2,7	2,6	2,5	2,6	0,1
Vaaleus	%							96,25	0,48
Opasiteetti	%							90,94	0,80
Kiilto	%	3,6	3,9	3,8	3,8	3,8	3,7	3,8	0,1
Sileys. PPS	0,5 Mpa	12	11,59	11,19	11,7	11,23	11,71	11,57	0,31
	1,0 Mpa	10,05	9,22	10,04	9,52	9,78	9,48	9,68	0,33
	2,0 Mpa	7,6	7,88	8,1	8	7,56	7,78	7,82	0,22
Sileys, Bendtsen	ml/min	1390	2000	2864	1602	2437	1814	2018	548
Ilmanläpäisevyys	ml/min	3584	3584	3584	3584	3584	3584	3584	0
Vetolujuus	kN/m	2,287	1,913	2,678	2,662	2,418	2,409	2,395	281,4 N
Vetoindeksi	Nm/g	22,66	18,96	26,54	26,38	23,96	23,87	23,73	2,79
Venymä	%	1,33	1,02	1,62	1,92	1,57	1,47	1,49	0,30
Murtotyö	J/m ²	20,36	12,97	30,44	36,13	26,33	24,23	25,08	8,03
Repäisylujuus	mN	327	267	288	286	261	222	275	35
Repäisyindeksi	mNm ² /g	3,24	2,64	2,85	2,83	2,58	2,20	2,72	0,35
Tuhka	%	1,3	0	0	0	0	0	0,2	0,5
Kosteus	%	6,44	7,31	6,32				6,69	0,54

Näyte: Eukalyptus 15min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	105	102	105	102	102	105	104	2,1
Paksuus	um	253	242	236	235	238	254	243	8,5
Tiheys	kg/m ³	409	428	439	440	435	408	426	14,7
Bulkki	cm ³ /g	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3	2,5	2,3	0,1
Vaaleus	%							95,54	0,88
Opasiteetti	%							91,37	0,82
Kiilto	%	3,7	3,8	3,8	3,7	3,8	3,7	3,8	0,05
Sileys. PPS	0,5 Mpa	12,06	11,57	12,12	12,22	11,55	12,37	11,98	0,34
	1,0 Mpa	10,49	9,83	10,35	9,72	9,63	9,7	9,95	0,37
	2,0 Mpa	7,87	7,6	7,59	8,28	7,62	7,96	7,82	0,27
Sileys, Bendtsen	ml/min	1868	1862	2084	1801	1840	1317	1795	254,3
Ilmanläpäisevyys	ml/min	3584	3584	3584	3584	3584	3583	3584	0,6
Vetolujuus	kN/m	3,451	3,842	3,606	1,49	3,126	3,5	3,169	855,1 N
Vetoindeksi	Nm/g	33,34	37,12	34,84	14,39	30,20	33,81	30,62	8,26
Venymä	%	2,05	2,47	1,68	0,6	1,42	1,9	1,69	0,64
Murtotyö	J/m ²	47,89	67,02	41,46	62,42	29,7	46,3	39,77	20,39
Repäisylujuus	mN	448	444	397	405	444	401	423	24
Repäisyindeksi	mNm ² /g	4,3	4,27	3,82	3,89	4,27	3,86	4,07	0,23
Tuhka	%	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosteus	%	6,86	6,69	7,06				6,87	0,19

Näyte: Eukalyptus 30min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	102	102	105	109	109	102	105	3,8
Paksuus	um	218	216	240	245	236	234	232	11,9
Tiheys	kg/m ³	481	485	437	428	444	448	454	23,7
Bulkki	cm ³ /g	2,1	2,1	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	0,1
Vaaleus	%							96,01	0,55
Opasiteetti	%							89,7	0,65
Kiilto	%	3,6	3,6	3,7	3,7	3,8	3,6	3,7	0,08
Sileys. PPS	0,5 Mpa	11,25	12,14	13,05	12,55	12,58	12,77	12,39	0,63
	1,0 Mpa	10,52	10,78	10,64	10,02	9,61	10,65	10,37	0,46
	2,0 Mpa	8,38	8,34	7,97	7,68	8,3	8,61	8,21	0,33
Sileys, Bendtsen	ml/min	2014	2922	2053	2117	2689	2423	2370	374
Ilmanläpäisevyys	ml/min	2637	2863	2832	2865	2832	2954	2831	104,8
Vetolujuus	kN/m	4,811	4,168	2,808	4,624	4,9	4,298	4,268	769,7 N
Vetoindeksi	Nm/g	45,90	39,76	26,79	44,11	46,75	41,00	40,72	7,34
Venymä	%	2,3	2,09	1,55	2,21	2,29	1,47	1,98	0,38
Murtotyö	J/m ²	77,34	60	29,02	71,2	78,77	42,22	59,76	20,27
Repäisylujuus	mN	458	469	509	586	493	473	498	47
Repäisyindeksi	mNm ² /g	4,49	4,6	4,99	5,75	4,83	4,64	4,88	0,46
Tuhka	%	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosteus	%	6,56	6,64	6,83				6,68	0,14

Näyte: Eukalyptus 45min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	109	109	121	102	109	109	110	6,3
Paksuus	um	202	227	205	233	208	203	213	13,5
Tiheys	kg/m ³	545	485	537	472	529	542	518	31,5
Bulkki	cm ³ /g	1,8	2,1	1,9	2,1	1,9	1,8	2	0,1
Vaaleus	%							96,02	0,71
Opasiteetti	%							90,67	3,39
Kiilto	%	3,7	3,6	3,7	3,4	3,9	3,6	3,7	0,16
Sileys. PPS	0,5 Mpa	12,32	12,67	12,76	14,67	13,22	12,83	13,08	0,83
	1,0 Mpa	11,29	10,96	12,79	10,9	10,64	10,02	11,1	0,93
	2,0 Mpa	8,23	8,58	8,61	9,76	8,61	8,84	8,77	0,52
Sileys, Bendtsen	ml/min	2137	2048	1934	2000	1785	1678	1930	171,0
Ilmanläpäisevyys	ml/min	1433	1426	1476	1330	1381	1368	1402	52,5
Vetolujuus	kN/m	4,469	4,4648	6,846	5,999	5,674	6,732	5,728	1,009
Vetoindeksi	Nm/g	40,62	40,58	62,22	54,52	51,57	61,19	51,78	9,54
Venymä	%	1,39	1,29	3,13	2,97	2,09	3,02	2,32	0,84
Murtotyö	J/m ²	40,44	38,81	150,7	120,3	82,19	139,1	95,26	48,96
Repäisylujuus	mN	550	590	568	592	556	554	568	19
Repäisyindeksi	mNm ² /g	4,82	5,18	4,98	5,19	4,88	4,86	4,99	0,16
Tuhka	%	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosteus	%	6,85	6,48	7,36				6,90	0,44

Näyte: Eukalyptus 60min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	121	98	102	102	102	109	105	8,6
Paksuus	um	183	199	183	201	195	173	189	11,0
Tiheys	kg/m ³	576	530	576	525	541	610	560	33,2
Bulkki	cm ³ /g	1,7	1,9	1,7	1,9	1,8	1,6	1,8	0,1
Vaaleus	%							93,43	3,84
Opasiteetti	%							89,95	7,38
Kiilto	%	4	3,5	3,6	3,5	3,4	3,8	3,6	0,23
Sileys. PPS	0,5 Mpa	11,29	12,86	12,93	12	13,12	12,11	12,39	0,7
	1,0 Mpa	10,02	11,04	10,53	11,5	11,27	9,8	10,69	0,69
	2,0 Mpa	7,36	9,53	9,42	8,16	8,88	8,82	8,69	0,82
Sileys, Bendtsen	ml/min	2258	2257	1694	2433	1785	1528	1993	369
Ilmanläpäisevyys	ml/min	463	655	540	504	555	472	532	70,6
Vetolujuus	kN/m	5,521	5,372	7,855	6,276	6,178	6,862	6,344	0,917
Vetoindeksi	Nm/g	52,35	50,93	74,48	59,51	58,58	65,06	60,15	8,70
Venymä	%	2,34	1,97	3,42	2,04	2,59	3,09	2,58	0,58
Murtotyö	J/m ²	93,49	72,96	187,8	90,66	111,5	152,8	118,20	43,59
Repäisylujuus	mN	560	574	584	590	568	604	580	16
Repäisyindeksi	mNm ² /g	5,33	5,47	5,56	5,62	5,41	5,75	5,52	0,15
Tuhka	%	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosteus	%	6,81	6,54	7,26				6,87	0,36

Näyte: Koivu 5min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	102	78	94	94	90	102	93	8,7
Paksuus	um	297	272	234	200	209	178	232	45,4
Tiheys	kg/m ³	313	342	398	465	445	523	415	78,8
Bulkki	cm ³ /g	3,2	2,9	2,5	2,1	2,2	1,9	2,5	0,5
Vaaleus	%							95,95	0,18
Opasiteetti	%							85,97	3,26
Kiilto	%	3,4	3,6	3,5	3,8	3,8	3,8	3,7	0,18
Sileys. PPS	0,5 Mpa	11,86	12,37	11,65	14,06	13,36	13,83	12,86	1,04
	1,0 Mpa	11,86	11,99	11,89	9,71	9,8	9,8	10,84	1,17
	2,0 Mpa	7,93	8,12	7,9	10,03	9,88	9,59	8,91	1,03
Sileys, Bendtsen	ml/min	2522	2553	1972	2520	2366	2502	2406	222,2
Ilmanläpäisevyys	ml/min	3059	2582	2596	3584	3584	3584	3165	490
Vetolujuus	kN/m	3,573	1,538	1,547	4,485	1,693	1,579	2,403	1,294kN
Vetoindeksi	Nm/g	38,38	16,52	16,62	48,17	18,18	16,96	25,81	13,90
Venymä	%	2,35	1,13	1,17	3,21	1,43	1,33	1,77	0,83
TEA	J/m ²	53,85	11,51	11,88	96,17	16,23	14,23	33,98	34,53
Repäisyjujuus	mN	247	255	274	276	255	272	263	12
Repäisyindeksi	mNm ² /g	2,65	2,74	2,94	2,96	2,74	2,92	2,83	0,13
Tuhka	%	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosteus	%	6,68	6,28	7,01				6,66	0,37

Näyte: Koivu 15min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	94	102	98	98	98	102	98	2,9
Paksuus	um	232	240	223	245	194	273	235	26,1
Tiheys	kg/m ³	424	410	441	401	507	360	424	48,9
Bulkki	cm ³ /g	2,4	2,4	2,3	2,5	2,0	2,8	2,4	0,3
Vaaleus	%							95,85	0,08
Opasiteetti	%							87,26	1,6
Kiilto	%	3,1	3,3	3,8	3,8	3,7	3,8	3,6	0,31
Sileys. PPS	0,5 Mpa	12,81	12,31	12,29	13,74	14,64	12,43	13,04	0,96
	1,0 Mpa	10,35	11,81	12,35	10,21	10,54	11,02	11,05	0,86
	2,0 Mpa	8,94	8,67	8,73	11,21	9,26	8,21	9,17	1,06
Sileys, Bendtsen	ml/min	2252	2343	2487	3254	3578	1947	2643	632
Ilmanläpäisevyys	ml/min	3583	3584	3538	3584	3579	3584	3575	18
Vetolujuus	kN/m	2,011	2,768	2,475	6,178	2,727	2,589	3,124	1,521kN
Vetoindeksi	Nm/g	20,46	28,16	25,18	62,84	27,74	26,34	31,78	15,47
Venymä	%	0,86	1,61	1,87	3,81	2,05	2,08	2,05	0,97
TEA	J/m ²	11,06	30,97	31,81	163,3	39,74	38,31	52,53	55,22
Repäisylujuus	mN	379	323	397	364	375	329	361	29
Repäisyindeksi	mNm ² /g	3,86	3,29	4,04	3,70	3,81	3,35	3,67	0,30
Tuhka	%	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosteus	%	6,77	7,13	6,54				6,81	0,30

Näyte: Koivu 30min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	93,75	101,5625	101,5625	85,9375	101,5625	93,75	96	6,4
Paksuus	um	202	281	153	206	208	217	211	41,0
Tiheys	kg/m ³	477	343	630	468	463	444	471	92,1
Bulkki	cm ³ /g	2,1	2,9	1,6	2,1	2,2	2,3	2,2	0,4
Vaaleus	%							95,68	0,1
Opasiteetti	%							85,8	2,49
Kiilto	%	3,4	3,5	3,7	3,5	3,7	3,8	3,6	0,15
Sileys. PPS	0,5 Mpa	12,15	12,04	12,71	13,02	11,76	12,58	12,38	0,47
	1,0 Mpa	11,02	11,2	10,25	11,44	11,08	10,29	10,88	0,49
	2,0 Mpa	8,4	8,49	10,3	8,77	9,39	8,84	9,03	0,71
Sileys, Bendtsen	ml/min	2281	2139	1856	1752	2186	2134	2058	206,3
Ilmanläpäisevyys	ml/min	2947	3095	3243	3465	2594	3404	3125	323
Vetolujuus	kN/m	4,094	3,956	5,95	3,932	3,728	3,622	4,214	876,4
Vetoindeksi	Nm/g	42,49	41,06	61,75	40,81	38,69	37,59	43,73	9,00
Venymä	%	2,58	2,34	4,11	2,7	2,26	2,78	2,79	0,67
TEA	J/m ²	73,32	64,48	160,9	73,46	57,96	69,48	83,27	38,49
Repäisylujuus	mN	424	456	460	454	511	327	439	61
Repäisyindeksi	mNm ² /g	4,40	4,73	4,77	4,71	5,30	3,39	4,55	0,64
Tuhka	%	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosteus	%	6,88	6,96	7,30				7,05	0,22

Näyte: Koivu 45min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	94	94	102	94	105	102	98	5,2
Paksuus	um	200	205	170	187	189	167	186	15,4
Tiheys	kg/m ³	492	480	578	526	520	589	531	44,5
Bulkki	cm ³ /g	2,0	2,1	1,7	1,9	1,9	1,7	1,9	0,2
Vaaleus	%							95,36	0,22
Opasiteetti	%							85,97	1,16
Kiilto	%	3,8	3,5	3,8	3,7	3,6	3,8	3,7	0,13
Sileys. PPS	0,5 Mpa	13,24	13,6	12,68	12,95	13,74	12,37	13,1	0,53
	1,0 Mpa	10,96	12,26	10,8	11,57	11,99	10,95	11,42	0,61
	2,0 Mpa	8,82	9,9	8,87	8,99	10,14	8,94	9,28	0,58
Sileys, Bendtsen	ml/min	2106	2246	1917	2267	2599	2107	2207	229,4
Ilmanläpäisevyys	ml/min	1372	1492	1414	1293	1374	1304	1375	73
Vetolujuus	kN/m	5,478	5,234	6,496	4,648	5,592	5,731	5,53	607,5N
Vetoindeksi	Nm/g	55,72	53,24	66,08	47,28	56,88	58,30	56,25	6,18
Venymä	%	2,98	2,77	3,53	2,44	3,38	4,32	3,24	0,66
TEA	J/m ²	114,5	101,2	159,3	76,52	129	167,3	124,6	34,67
Repäisyjujuus	mN	560	578	540	584	556	462	531	44
Repäisyindeksi	mNm ² /g	5,71	5,9	5,51	5,96	5,67	4,71	5,42	0,45
Tuhka	%	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosteus	%	6,78	6,58	7,20				6,85	0,32

Näyte: Koivu 60min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	102	109	102	109	105	98	104	4,7
Paksuus	um	188	203	197	174	171	166	183	15,1
Tiheys	kg/m ³	554	513	529	599	609	628	572	46,5
Bulkki	cm ³ /g	1,8	1,9	1,9	1,7	1,6	1,6	1,8	0,1
Vaaleus	%							95,41	0,3
Opasiteetti	%							86,09	1,6
Kiilto	%	3,8	3,6	3,7	3,7	3,8	3,6	3,7	0,09
Sileys. PPS	0,5 Mpa	12,85	12,2	13,52	13,97	12,68	12,07	12,88	0,74
	1,0 Mpa	10,82	10,82	11,96	11,91	10,54	11,1	11,19	0,6
	2,0 Mpa	9,22	8,75	9,72	9,23	9,05	8,72	9,12	0,37
Sileys, Bendtsen	ml/min	1774	1802	1921	2679	3217	1971	2227	588
Ilmanläpäisevyys	ml/min	452	584	401	409	503	424	462	70
Vetolujuus	kN/m	7,88	6,004	6,406	7,513	7,155	6,716	6,95	0,70
Vetoindeksi	Nm/g	75,65	57,64	61,50	72,12	68,69	64,47	66,68	6,75
Venymä	%	3,81	2,02	2,76	3,12	3,62	3,69	3,17	0,69
TEA	J/m ²	212	140,93	125,8	163,2	174,7	167,9	164,09	29,75
Repäisylujuus	mN	546	568	614	672	744	604	625	73
Repäisyindeksi	mNm ² /g	5,24	5,45	5,89	6,45	7,14	5,80	6,00	0,70
Tuhka	%	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosteus	%	6,95	6,42	7,24				6,87	0,42

Näyte: Mänty 5min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	117	98	109	90	113	98	104	10,7
Paksuus	um	325	224	311	231	321	270	280	45,4
Tiheys	kg/m ³	321	465	335	451	325	386	380	64,7
Bulkki	cm ³ /g	3,1	2,2	3,0	2,2	3,1	2,6	2,7	0,4
Vaaleus	%							95,1	0,43
Opasiteetti	%							82,7	8,38
Kiilto	%	3,9	3,8	3,8	3,9	3,8	3,8	3,8	0,05
Sileys. PPS	0,5 Mpa	13,21	13,45	12,85	13,45	13,61	12,75	13,22	0,35
	1,0 Mpa	11,19	12,26	12,26	11,55	11,94	11,17	11,73	0,49
	2,0 Mpa	9,75	9,64	9,88	10,17	10,07	9,07	9,76	0,39
Sileys, Bendtsen	ml/min	2057	2051	2964	2333	3180	2920	2754	454
Ilmanläpäisevyys	ml/min	3584	3584	3584	3584	3584	3584	3584	0
Vetolujuus	kN/m	3,158	1,498	3,223	3,126	3,354	2,873	2,872	691,4N
Vetoindeksi	Nm/g	30,32	14,38	30,94	30,01	32,20	27,58	27,57	6,64
Venymä	%	2,1	2,1	1,43	2,34	1,94	1,79	1,95	0,31
TEA	J/m ²	45,57	21,18	31,22	51,86	44,66	35,04	38,25	11,23
Repäisylujuus	mN	829	620	926	1110	903	1106	916	184
Repäisyindeksi	mNm ² /g	7,9	5,9	8,82	10,57	8,6	10,53	8,72	1,75
Tuhka	%	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosteus	%	7,36	6,97	7,4	6,88			7,15	0,27

Näyte: Mänty 15min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	102	102	98	102	105	121	105	8,3
Paksuus	um	229	218	218	234	268	220	231	19,2
Tiheys	kg/m ³	458	481	481	448	391	476	456	34,4
Bulkki	cm ³ /g	2,2	2,1	2,1	2,2	2,6	2,1	2,2	0,2
Vaaleus	%							95,32	0,37
Opasiteetti	%							83,53	2,28
Kiilto	%	4,1	3,8	4,1	4	3,7	3,8	3,9	0,17
Sileys. PPS	0,5 Mpa	13,66	13,1	13,17	13,36	12,96	13,06	13,22	0,25
	1,0 Mpa	11,93	12,09	11,55	11,53	11,91	11,74	11,79	0,22
	2,0 Mpa	10,11	10,39	10,25	9,76	9,6	10,3	10,07	0,32
Sileys, Bendtsen	ml/min	2632	2592	2657	2176	2898	2151	2518	294,5
Ilmanläpäisevyys	ml/min	3584	3582	3584	3460	3582	3583	3562	50,2
Vetolujuus	kN/m	6,113	6,504	5,372	7,977	5,812	6,813	6,432	910,7N
Vetoindeksi	Nm/g	58,32	62,05	51,25	76,10	55,45	65,00	61,36	8,69
Venymä	%	3,28	2,93	3,16	3,39	3,3	3,01	3,18	0,18
TEA	J/m ²	135,4	128,6	112	180,5	129,9	140,4	137,8	23,00
Repäisyjuuus	mN	1354	1510	1417	1723	1530	1323	1476	146
Repäisyindeksi	mNm ² /g	13,41	14,95	14,03	17,06	15,15	13,1	14,62	1,45
Tuhka	%	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosteus	%	7,24	6,52	7,46				7,07	0,49

Näyte: Mänty 30min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	113	102	105	109	94	109	105	7,0
Paksuus	um	260	193	212	231	193	240	222	26,9
Tiheys	kg/m ³	406	546	497	457	546	439	482	58,0
Bulkki	cm ³ /g	2,5	1,8	2,0	2,2	1,8	2,3	2,1	0,3
Vaaleus	%							94,96	0,61
Opasiteetti	%							82,82	1,8
Kiilto	%	3,9	3,8	4,9	3,9	3,8	2,6	3,8	0,73
Sileys. PPS	0,5 Mpa	12,99	13,74	13,97	13,25	13,1	15	13,68	0,75
	1,0 Mpa	12,44	12,23	11,86	12,37	11,91	11,65	12,08	0,32
	2,0 Mpa	9,71	10,12	10,22	10,16	10,16	10,35	10,12	0,22
Sileys, Bendtsen	ml/min	3584	1998	2340	2378	2434	2018	2459	582
Ilmanläpäisevyys	ml/min	1602	1428	1494	1298	1384	1388	1432	105,1
Vetolujuus	kN/m	9,068	8,653	9,646	9,719	8,661	10,03	9,296	584,6
Vetoindeksi	Nm/g	85,98	82,04	91,46	92,15	82,12	95,10	88,14	5,54
Venymä	%	2,48	3,66	3,68	3,8	3,87	3,5	3,5	0,51
TEA	J/m ²	218,2	205,7	225,4	231,5	205,2	223,2	218,2	10,76
Repäisylujuus	mN	1229	1280	1229	1278	1229	1274	1253	27
Repäisyindeksi	mNm ² /g	11,65	12,14	11,65	12,12	11,65	12,08	12	0,25
Tuhka	%	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosteus	%	6,74	7,17	6,86				6,92	0,22

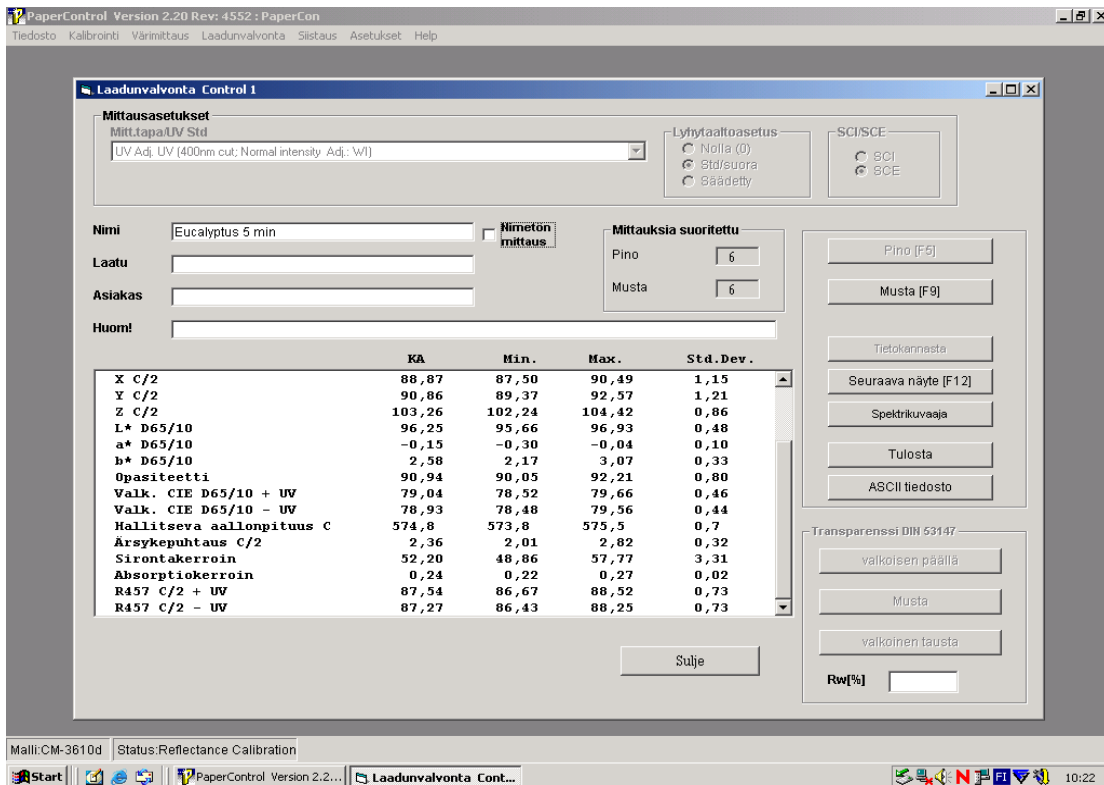
Näyte: Mänty 45min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	98	82	121	86	129	109	104	18,9
Paksuus	um	191	218	149	195	155	167	179	26,6
Tiheys	kg/m ³	545	478	699	534	672	624	592	86,5
Bulkki	cm ³ /g	1,8	2,1	1,4	1,9	1,5	1,6	1,7	0,3
Vaaleus	%							94,7	0,3
Opasiteetti	%							80,74	3,46
Kiilto	%	4,3	4,1	3,8	4,6	3,8	4,5	4,2	0,34
Sileys. PPS	0,5 Mpa	12,96	13,49	13,45	13,61	14,32	12,69	13,42	0,57
	1,0 Mpa	11,32	12,88	12,78	11,51	11,81	11,34	11,94	0,71
	2,0 Mpa	9,68	10,2	9,74	10,81	10,59	9,67	10,11	0,5
Sileys, Bendtsen	ml/min	1830	2751	1999	2199	1704	1875	2060	378
Ilmanläpäisevyys	ml/min	655	363	470	328	389	376	430	119,8
Vetolujuus	kN/m	12,61	7,603	9,141	10,36	10,61	8,531	9,809	1,774kN
Vetoindeksi	Nm/g	121,06	72,99	87,75	99,46	101,86	81,90	94,17	17,03
Venymä	%	3,86	3,29	4,11	3,66	2,86	3,18	3,49	0,47
TEA	J/m ²	310,2	166	247,6	247,8	205,4	179,2	226	53,4
Repäisylujuus	mN	1125	1121	1174	1153	1180	1157	1152	24
Repäisyindeksi	mNm ² /g	10,80	10,76	11,27	11,07	11,33	11,11	11,06	0,23
Tuhka	%	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosteus	%	6,97	7,02	7,69				7,23	0,40

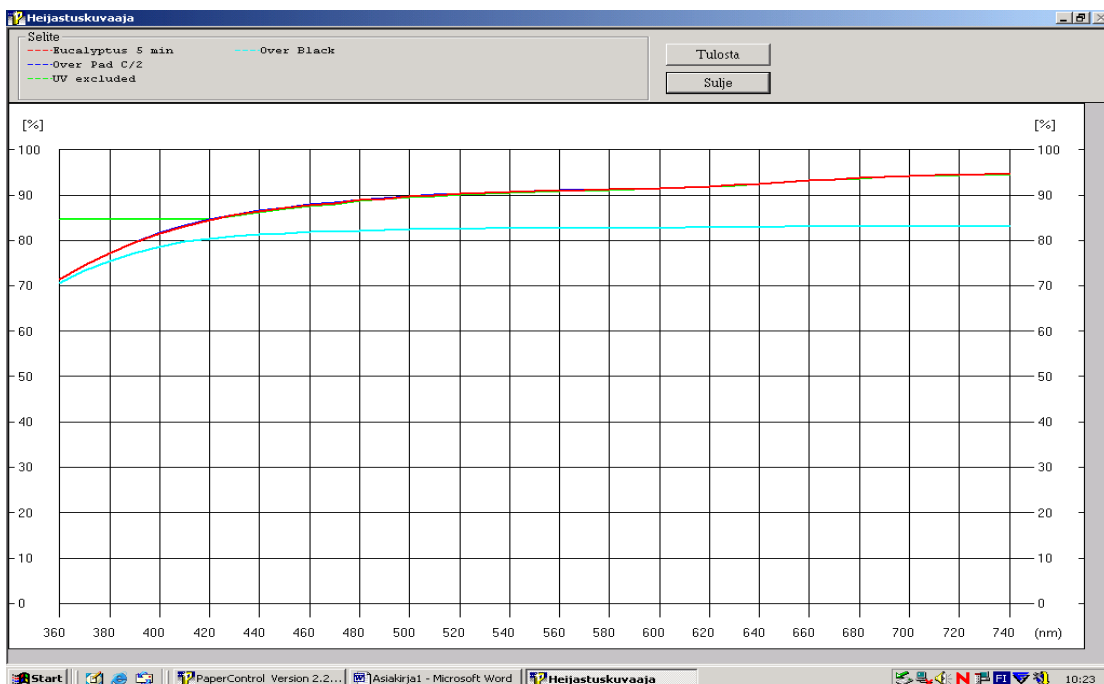
Näyte: Mänty 60min

Suure	Mittaus	1	2	3	4	5	6	x	s
Neliömassa	g/m ²	105	105	117	102	109	113	109	5,7
Paksuus	um	183	190	166	163	188	168	176	12,0
Tiheys	kg/m ³	594	572	655	667	578	647	619	42,1
Bulkki	cm ³ /g	1,7	1,7	1,5	1,5	1,7	1,5	1,6	0,1
Vaaleus	%							93,64	0,51
Opasiteetti	%							83,12	1,02
Kiilto	%	4,9	3,9	4,8	4,4	3,8	3,7	4,3	0,52
Sileys. PPS	0,5 Mpa	13,17	13,65	13,41	12,89	13,37	13,29	13,3	0,26
	1,0 Mpa	12,07	11,62	11,67	11,96	12,29	11,86	11,91	0,25
	2,0 Mpa	9,92	10,3	10,42	9,37	9,88	10,47	10,06	0,42
Sileys, Bendtsen	ml/min	2333	2058	2451	1986	2322	2345	2249	183,3
Ilmanläpäisevyys	ml/min	97	73	85	94	74	58	80	14,8
Vetolujuus	kN/m	11,18	10,92	7,326	11,21	11,93	10,81	10,56	1,632 kN
Vetoindeksi	Nm/g	102,83	100,44	67,38	103,11	109,73	99,43	97,15	15,02
Venymä	%	3,41	3,46	1,62	3,19	3,27	3,74	3,12	0,76
TEA	J/m ²	254	252,1	80,97	234,9	260,4	261,5	224	70,71
Repäisylujuus	mN	1064	1117	1104	1083	1127	1115	1102	24
Repäisyindeksi	mNm ² /g	9,85	10,34	10,22	10,03	10,44	10,32	10,2	0,22
Tuhka	%	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosteus	%	6,97	6,87	6,24				6,69	0,40

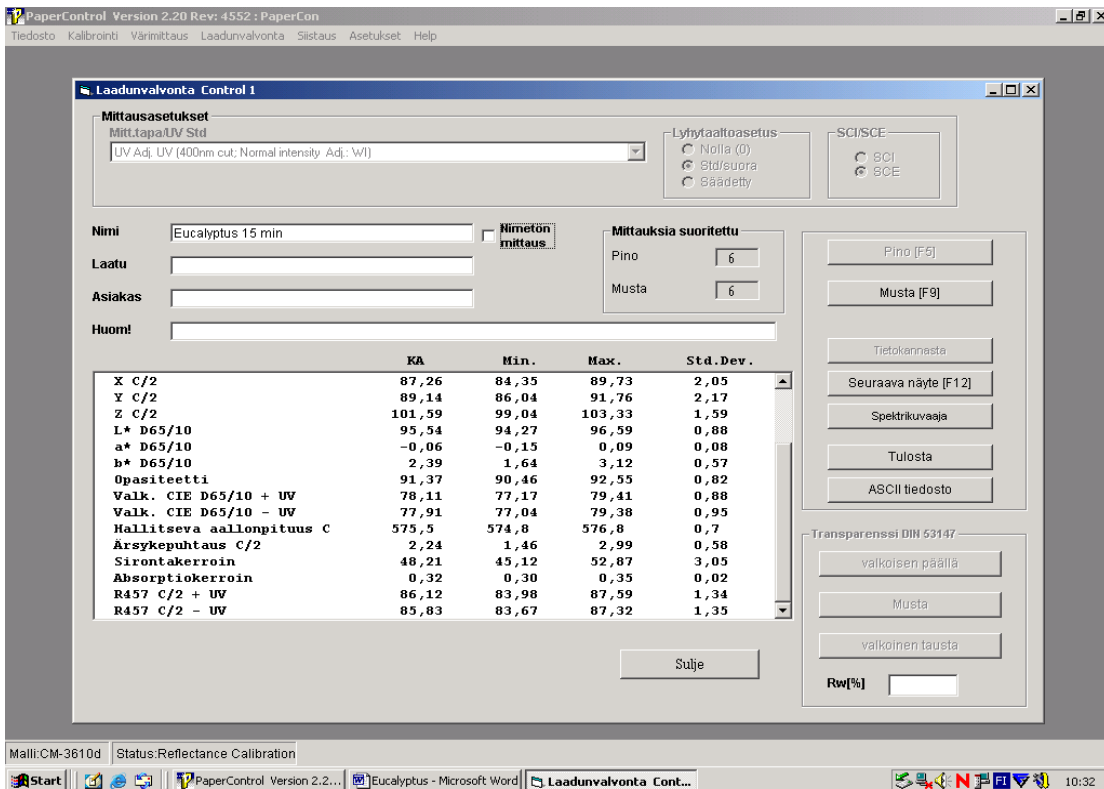
Minolta-spektrofotometrillä mitatut tulokset



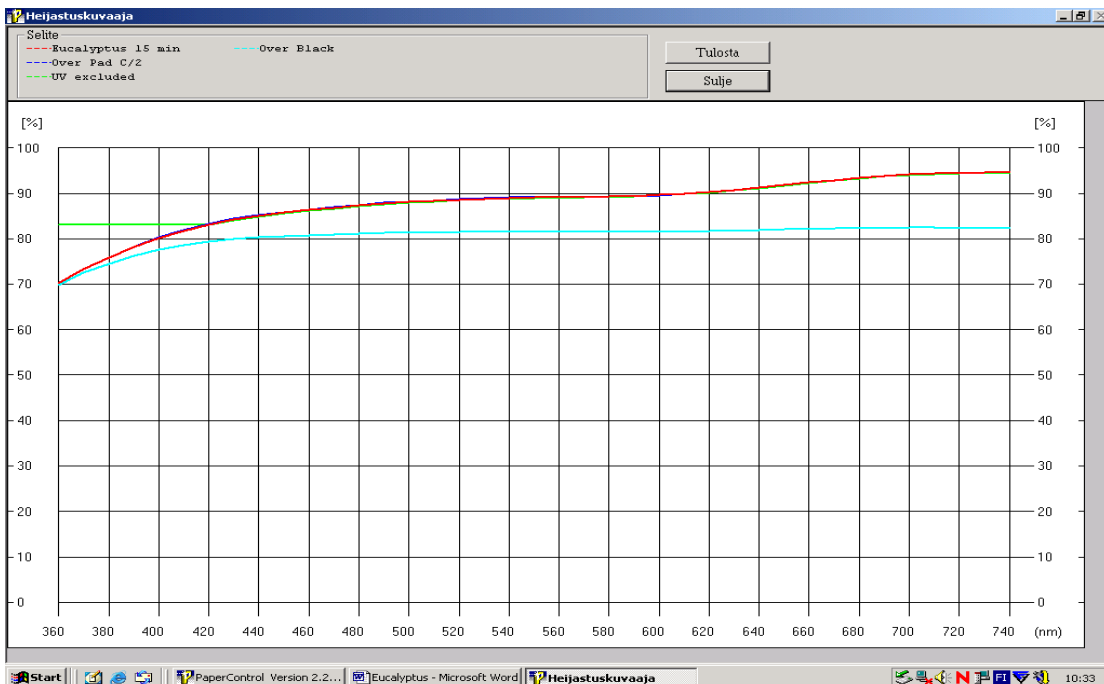
Kuva 1. 5 min Eukalyptussellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 11.2.2009



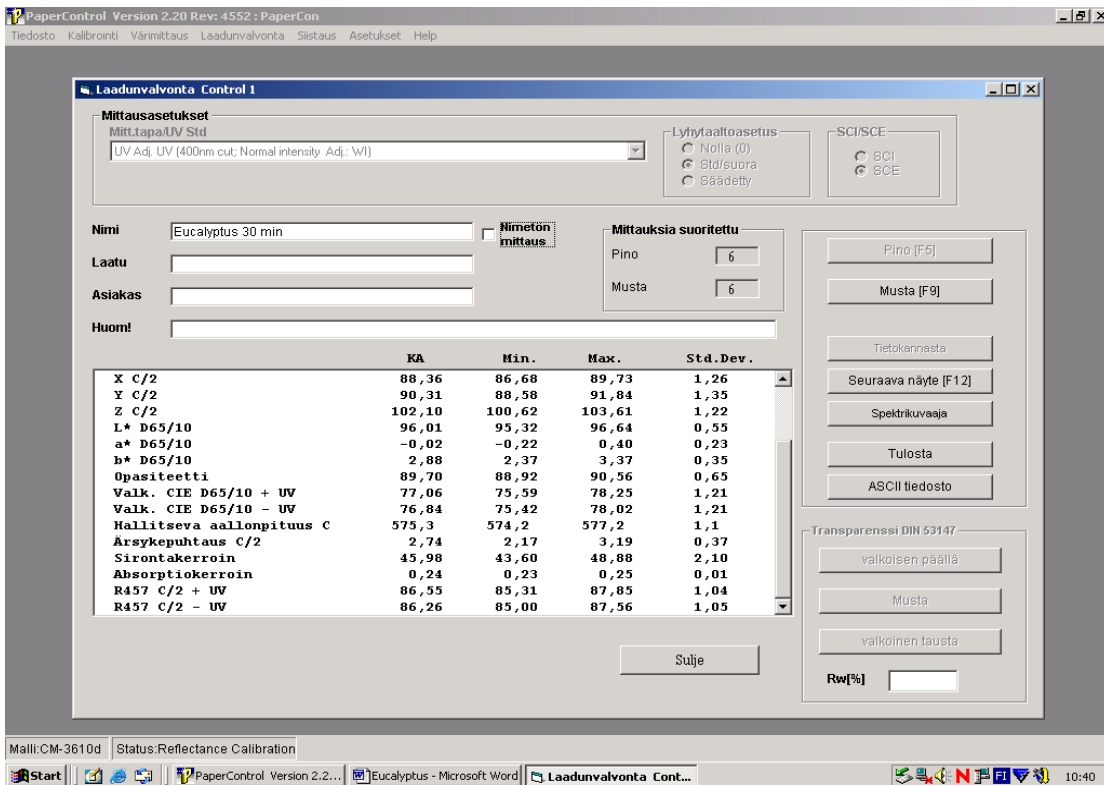
Kuva 2. 5 min Eukalyptussellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 11.2.2009



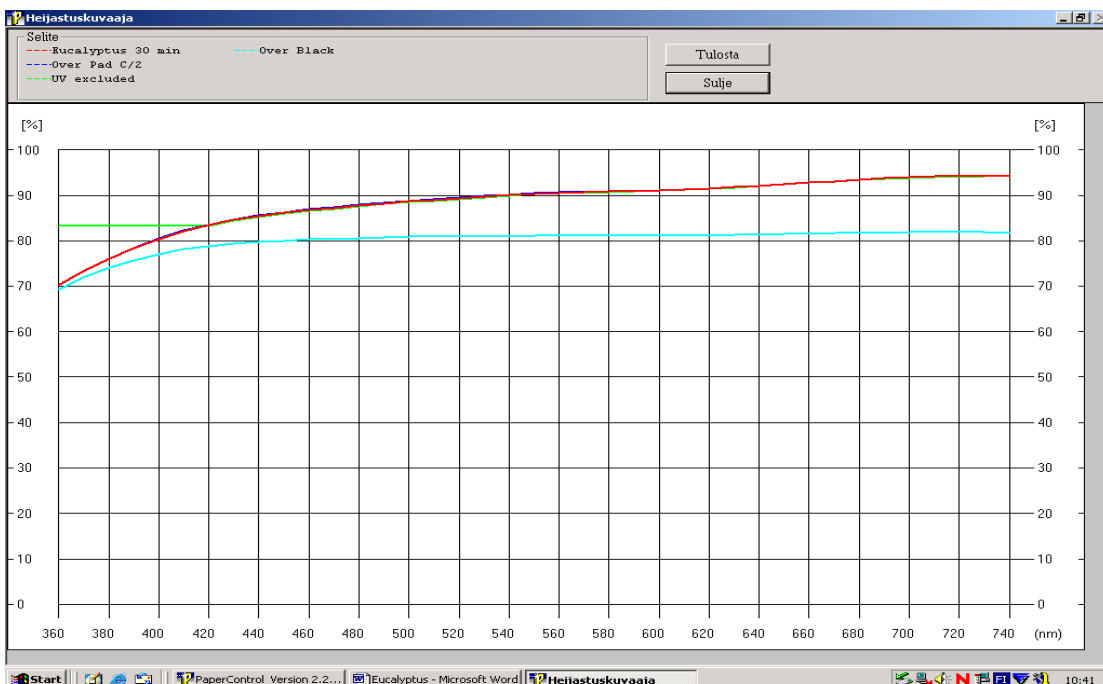
Kuva 3. 15 min Eukalyptussellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 11.2.2009



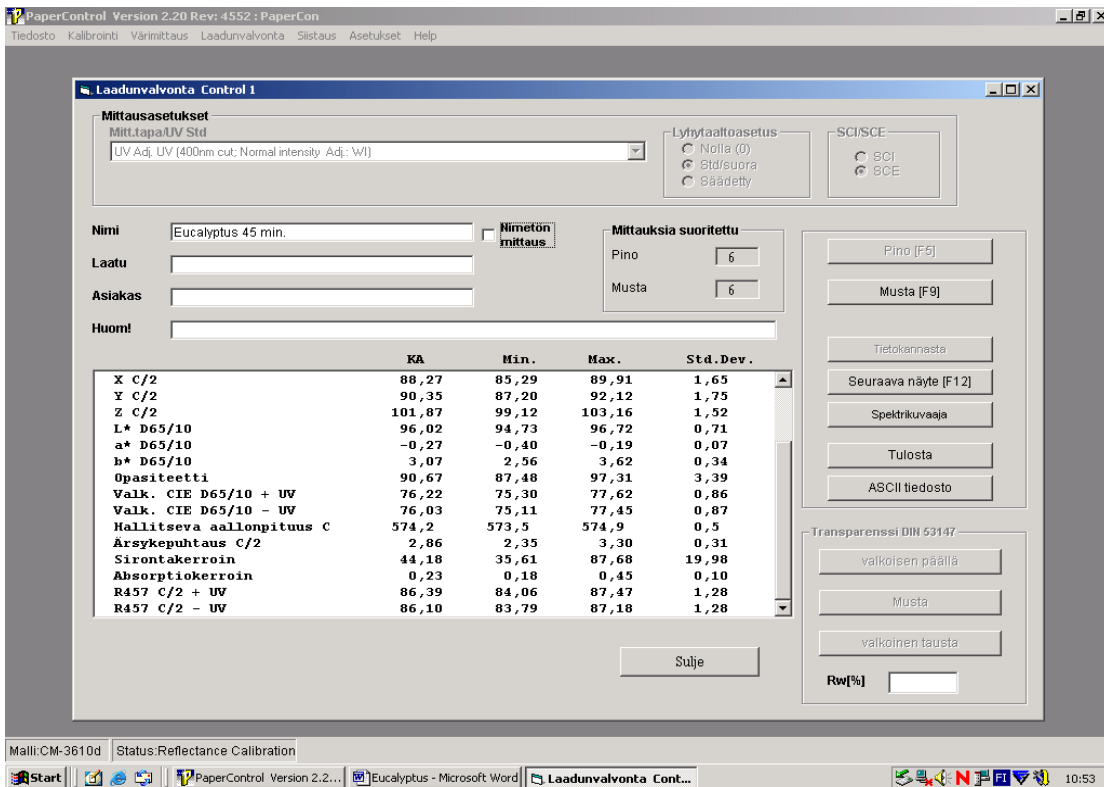
Kuva 4. 15 min Eukalyptussellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 11.2.2009



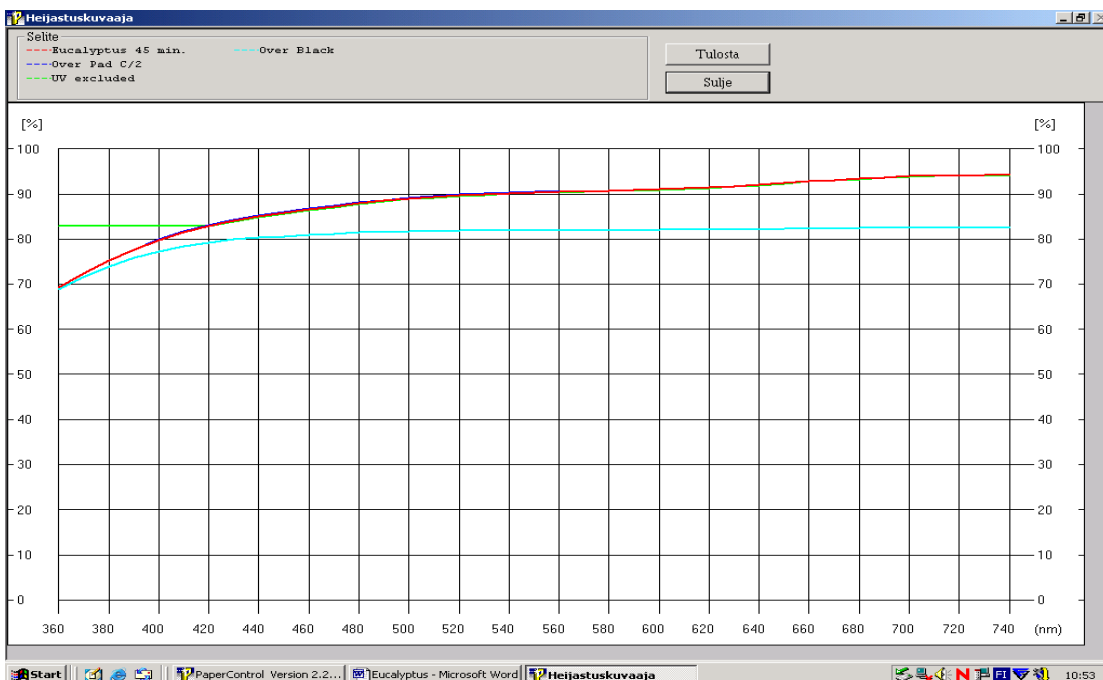
Kuva 5. 30 min Eukalyptussellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 11.2.2009



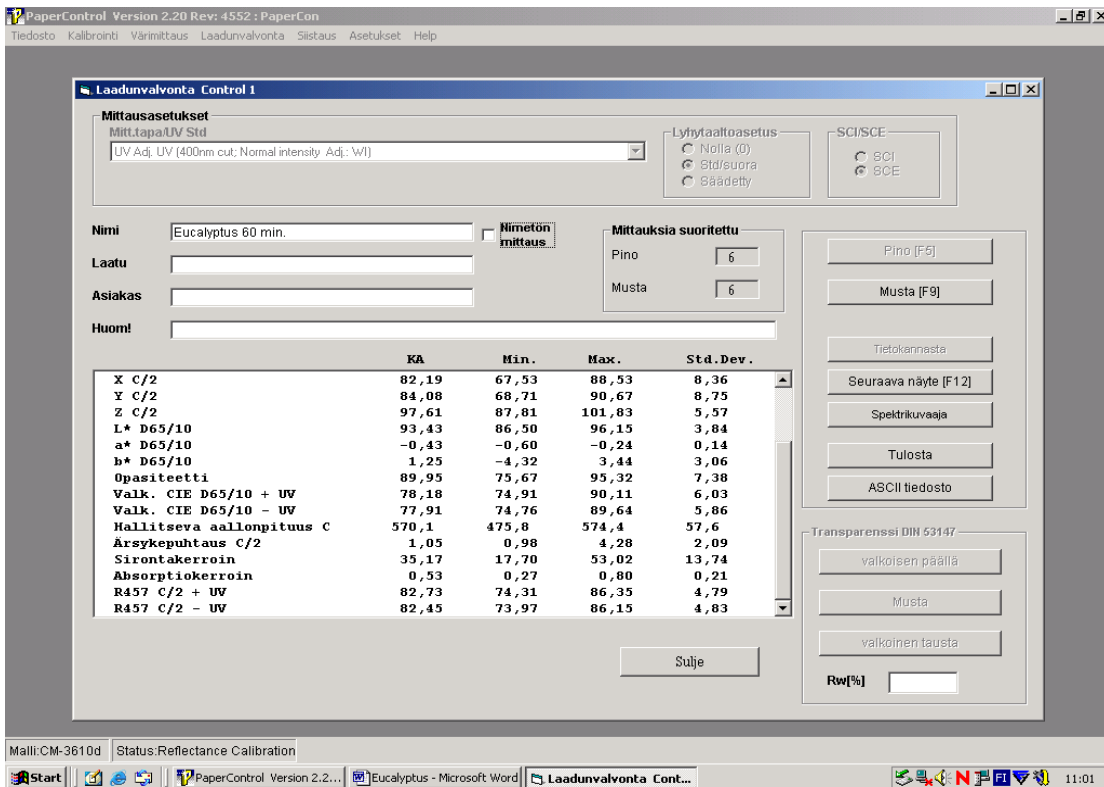
Kuva 6. 30 min Eukalyptussellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 11.2.2009



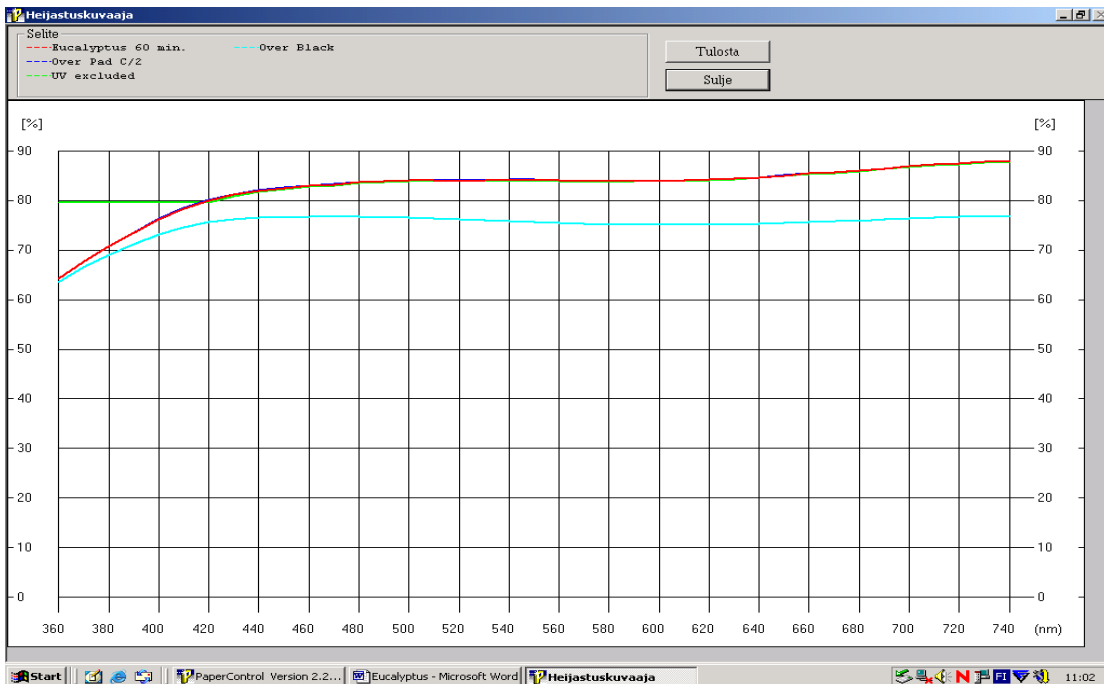
Kuva 7. 45 min Eukalyptussellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 29.1.2009



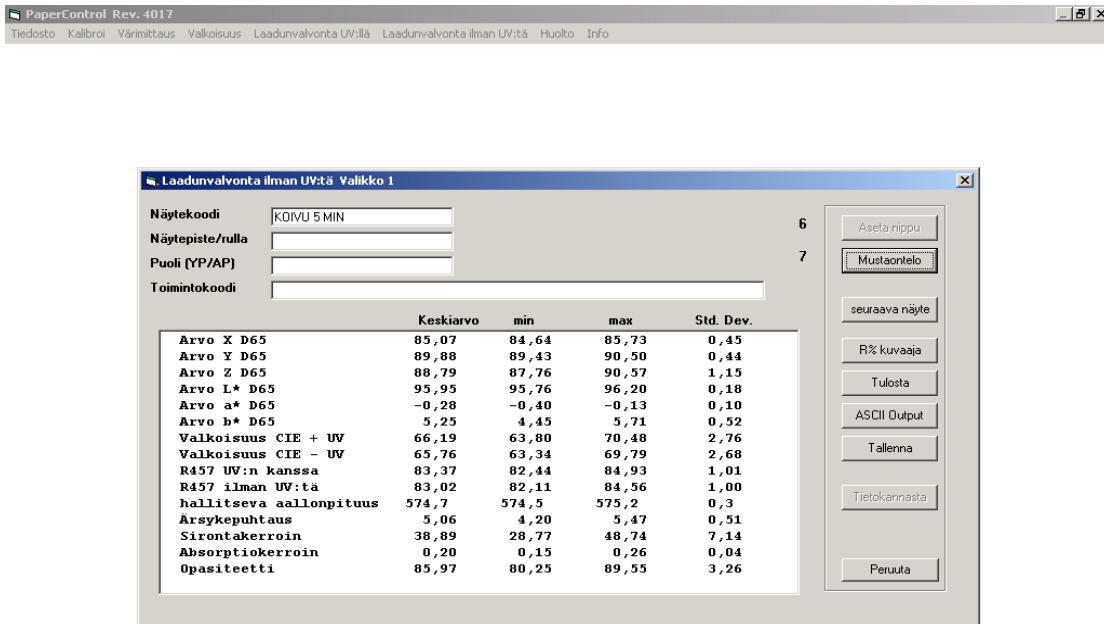
Kuva 8. 45 min Eukalyptussellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 11.2.2009



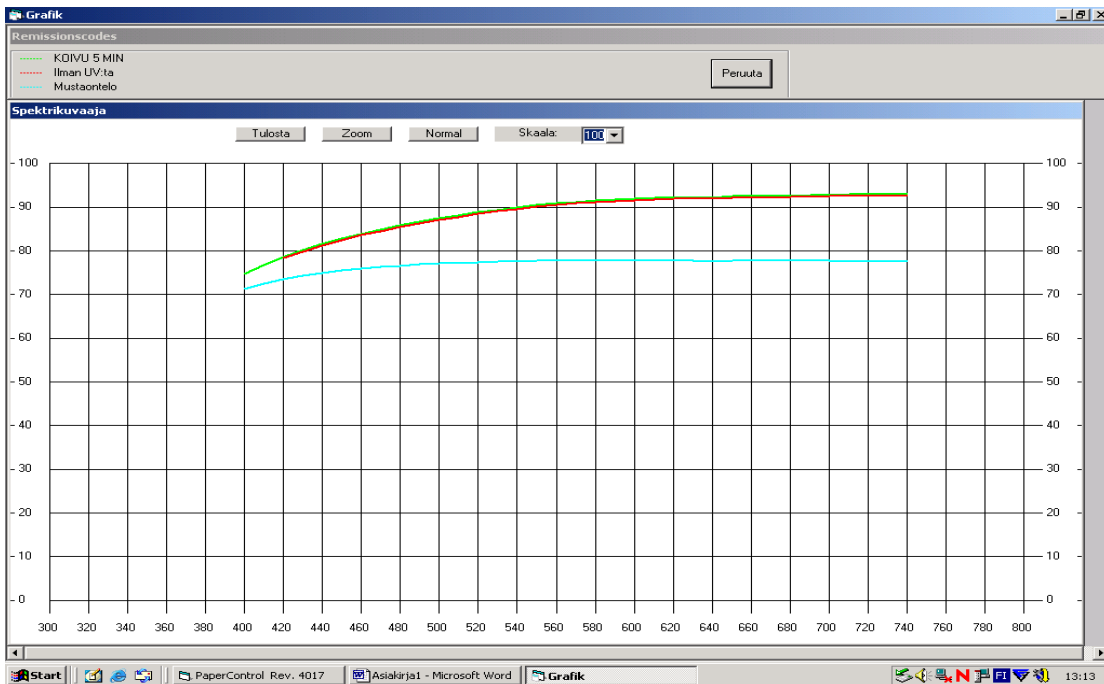
Kuva 9. 60 min Eukalyptussellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 29.1.2009



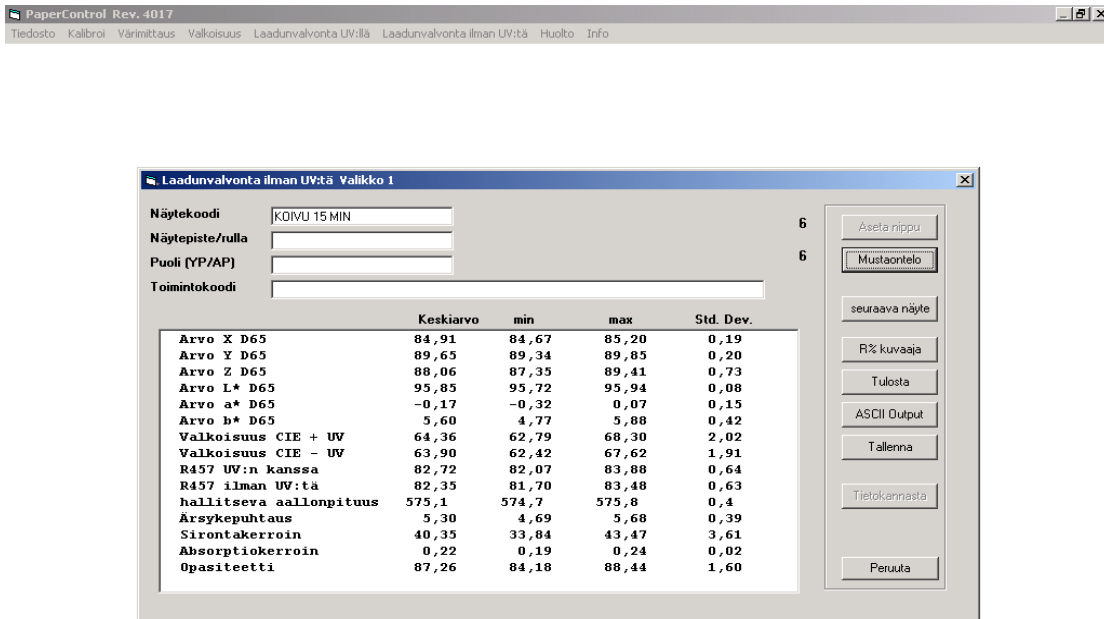
Kuva 10. 60 min Eukalyptussellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 11.2.2009



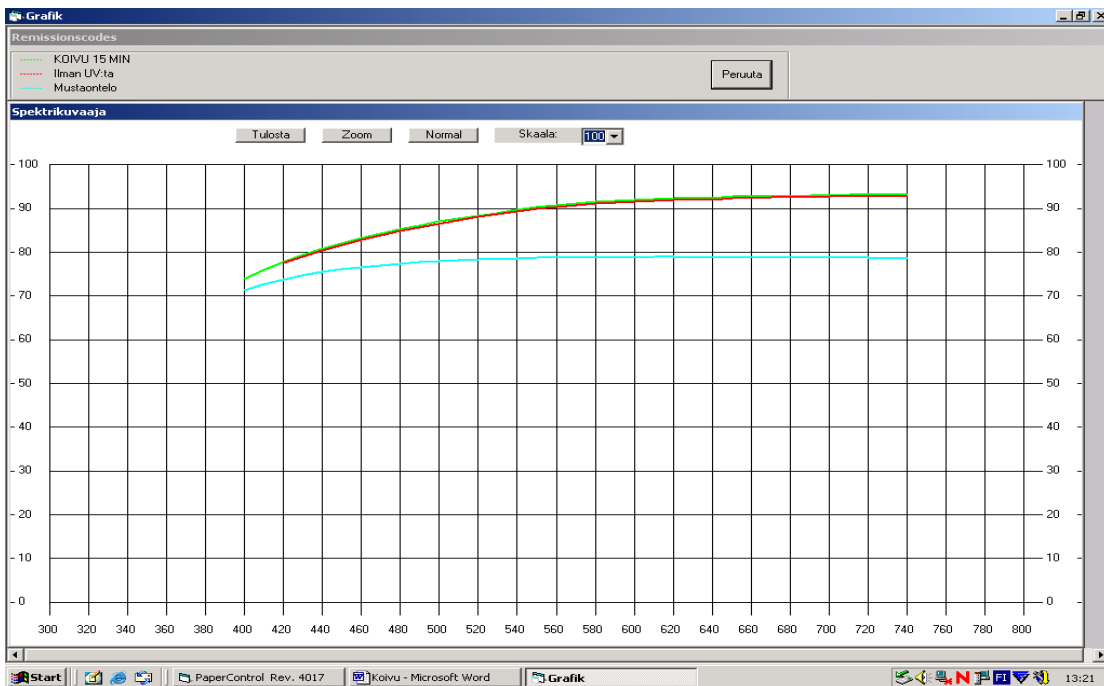
Kuva 11. 5 min Koivusellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 4.3.2009



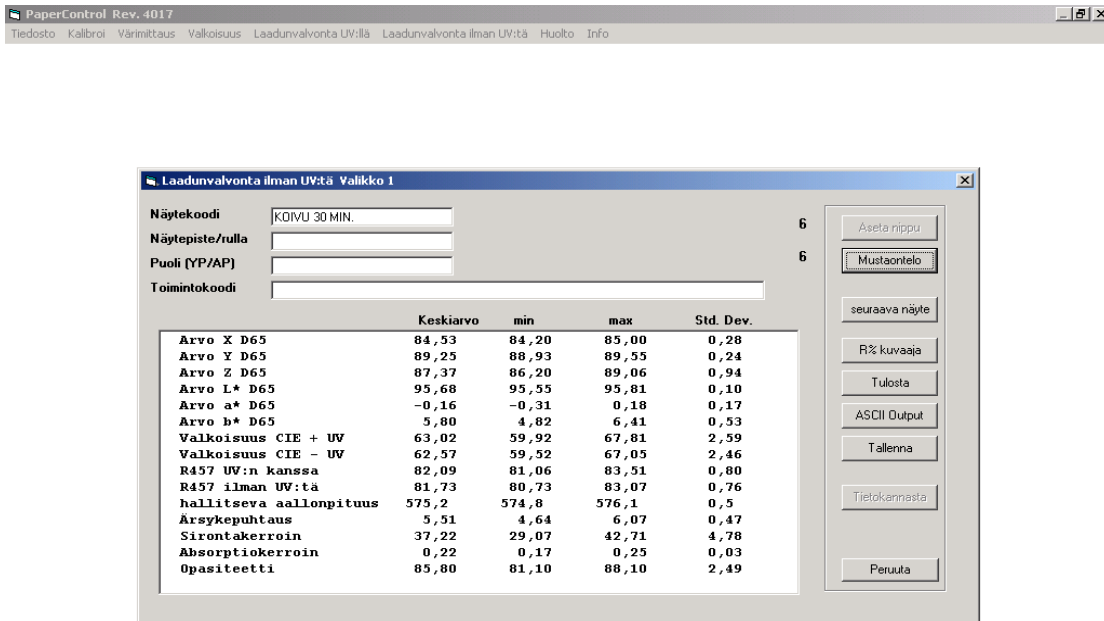
Kuva 12. 5 min Koivusellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 4.3.2009



Kuva 13. 15 min Koivusellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spectrofotometrillä 4.3.2009



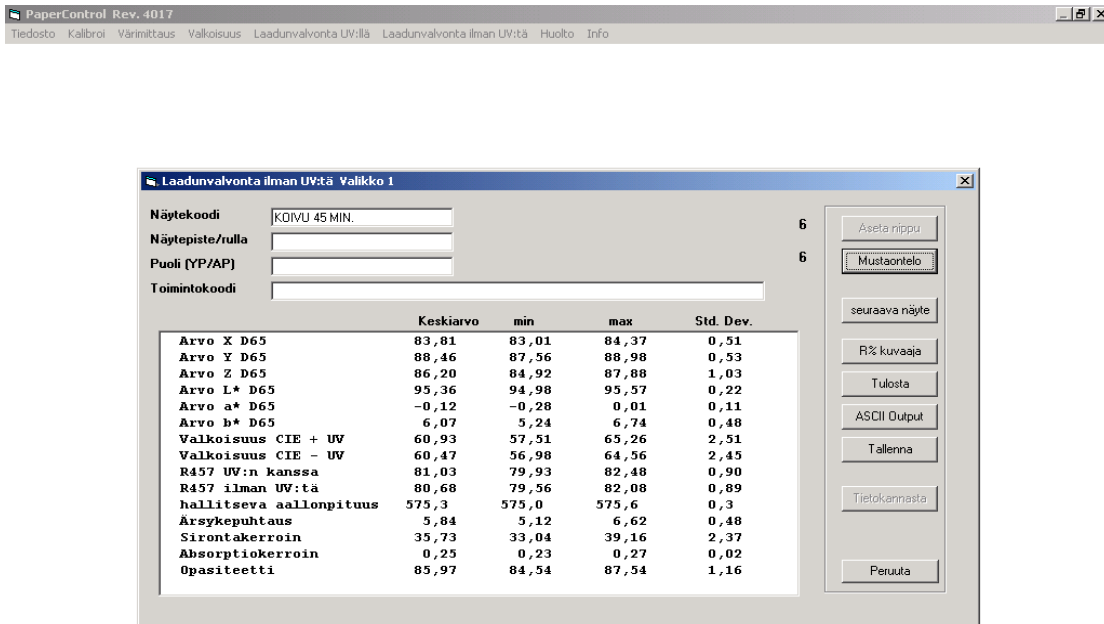
Kuva 14. 15 min Koivusellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spectrofotometrillä 4.3.2009



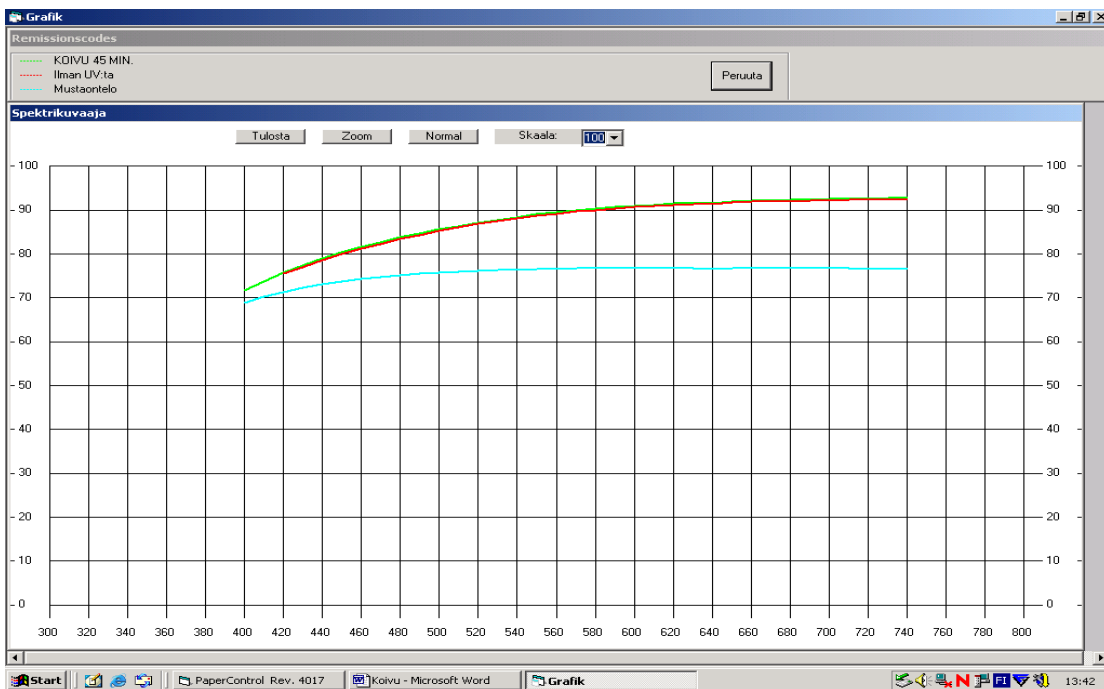
Kuva 15. 30 min Koivusellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 4.3.2009



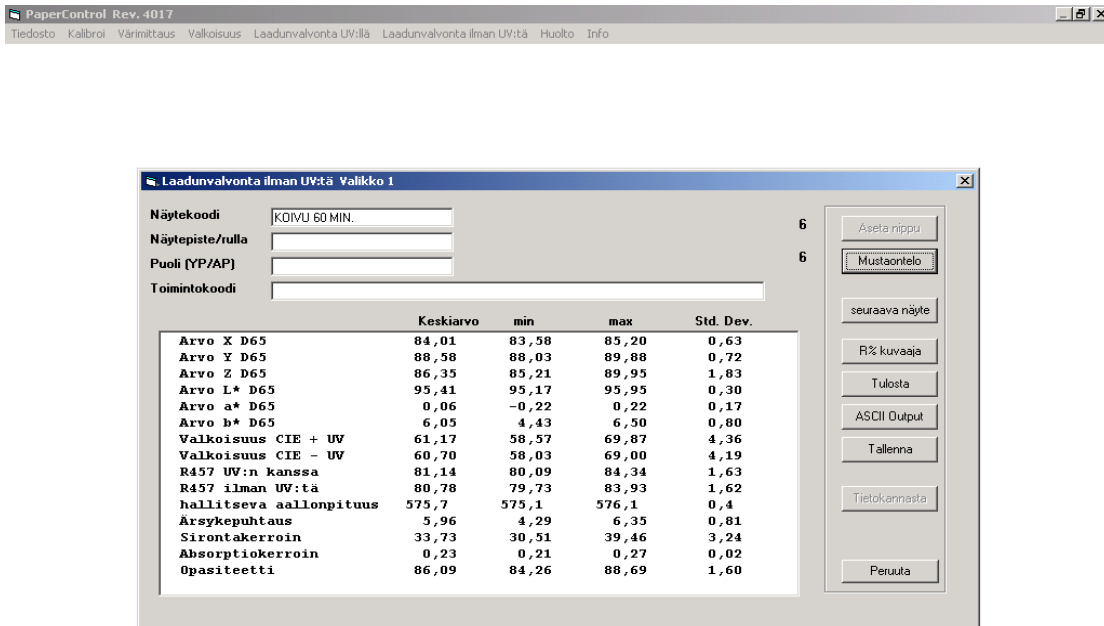
Kuva 16. 30 min Koivusellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 4.3.2009



Kuva 17. 45 min Koivusellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 4.3.2009



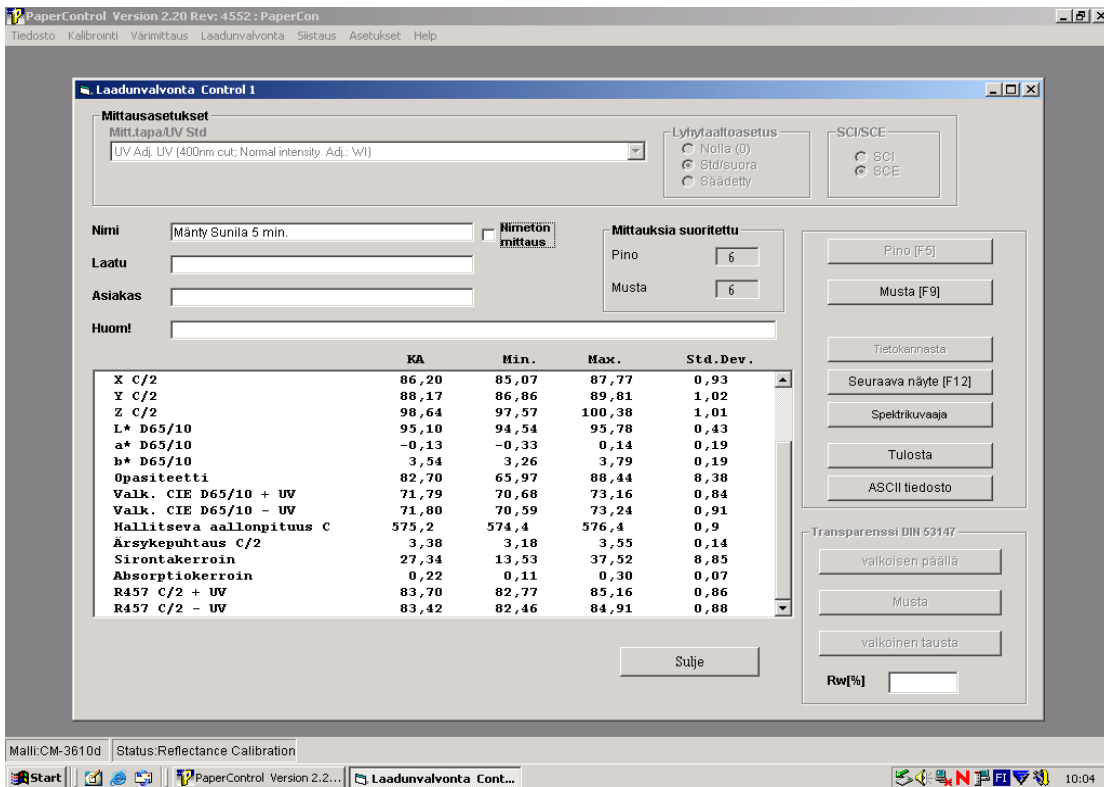
Kuva 18. 45 min Koivusellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 4.3.2009



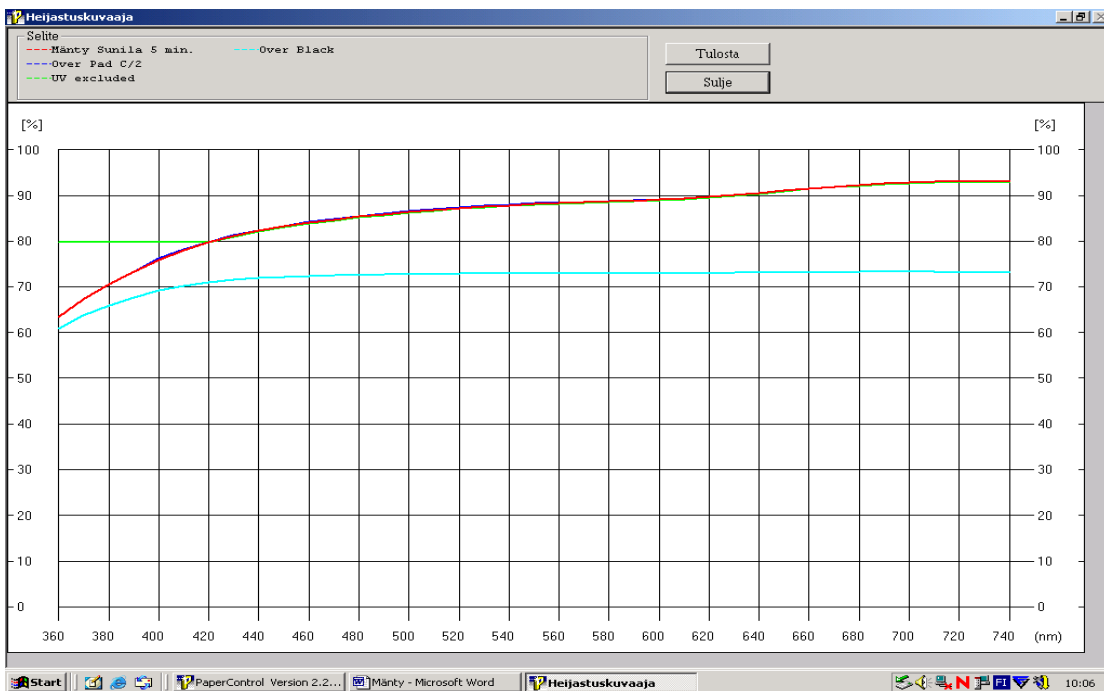
Kuva 19. 60 min Koivusellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 4.3.2009



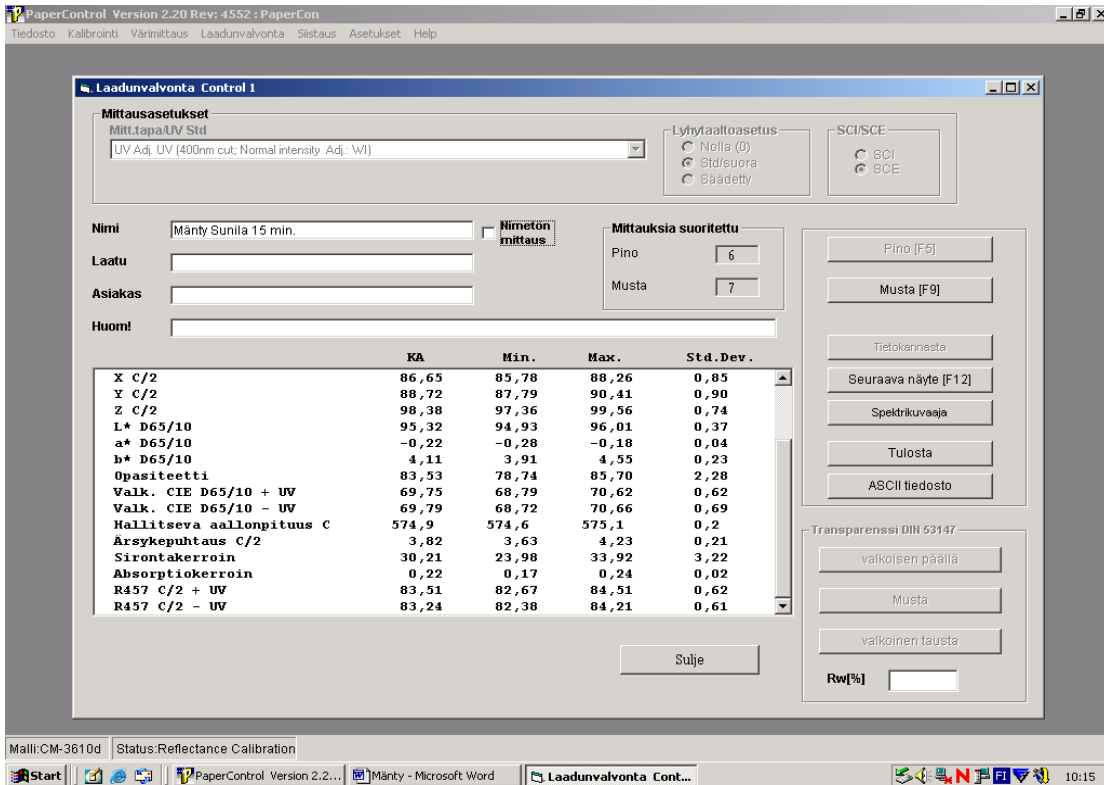
Kuva 20. 60 min Koivusellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 4.3.2009



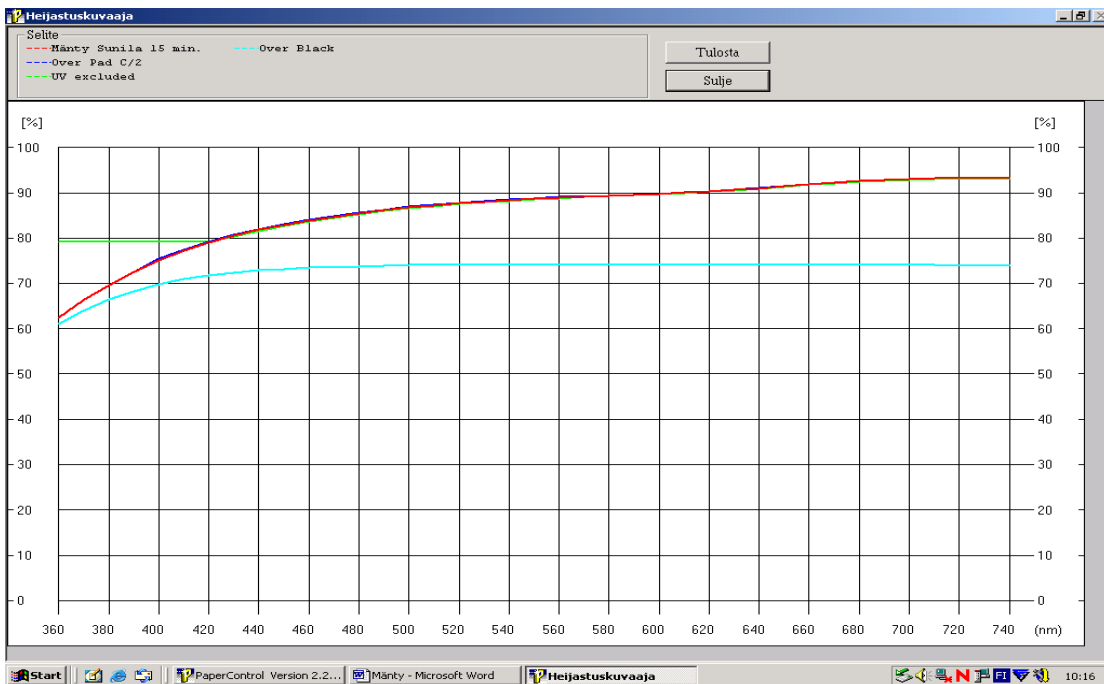
Kuva 21. 5 min Mäntysellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spectrofotometrillä 12.2.2009



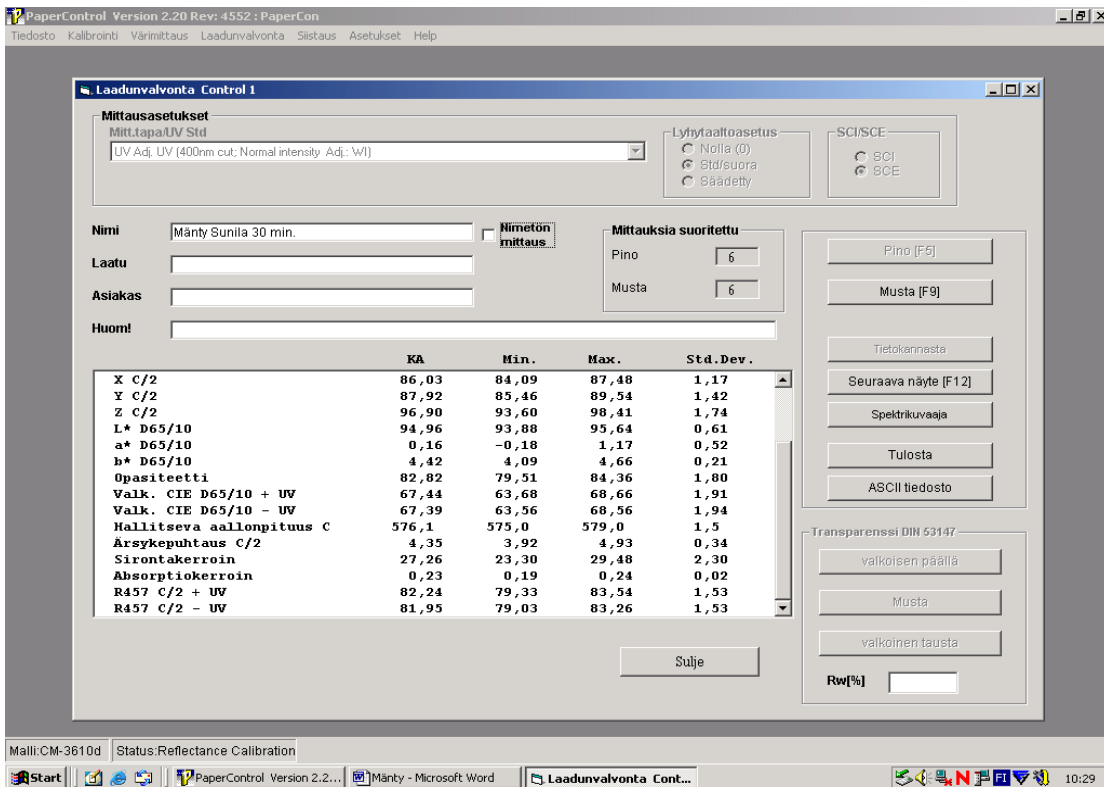
Kuva 22. 5 min Mäntysellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spectrofotometrillä 12.2.2009



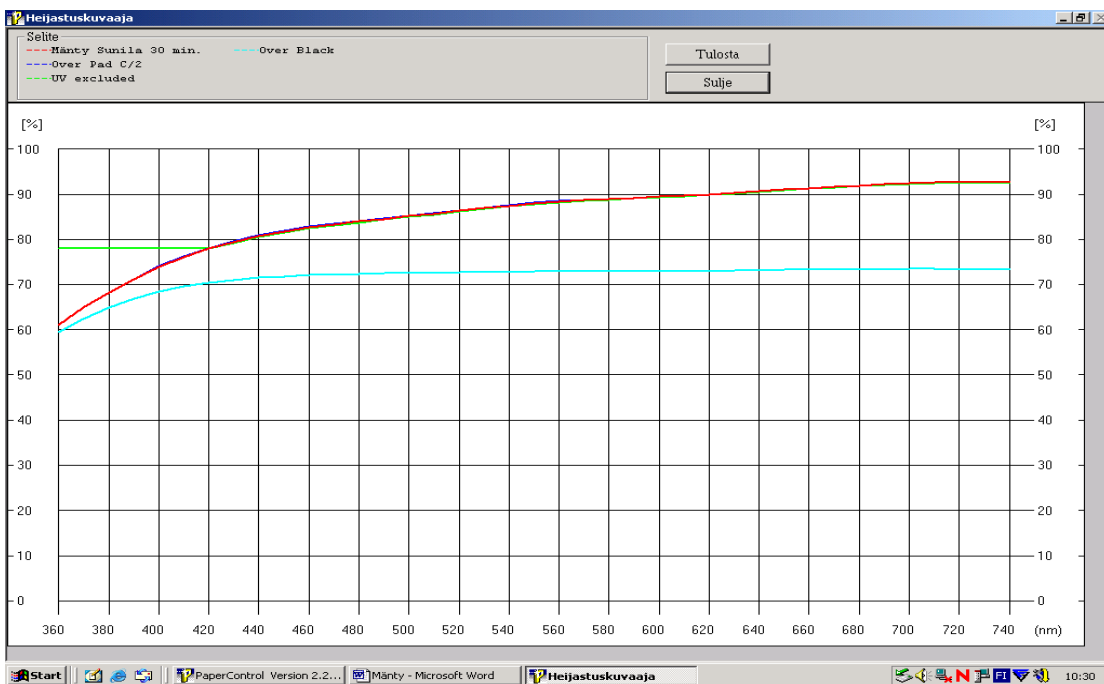
Kuva 23. 15 min Mäntysellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spectrofotometrillä 12.2.2009



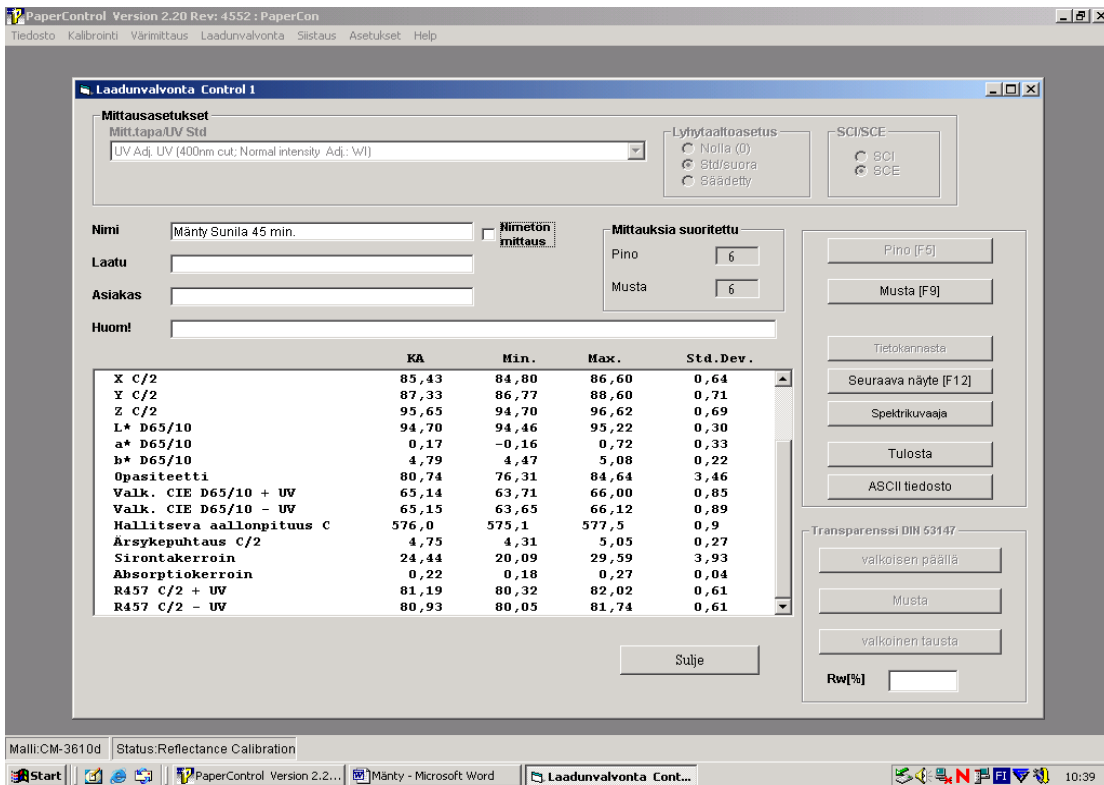
Kuva 24. 15 min Mäntysellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 12.2.2009



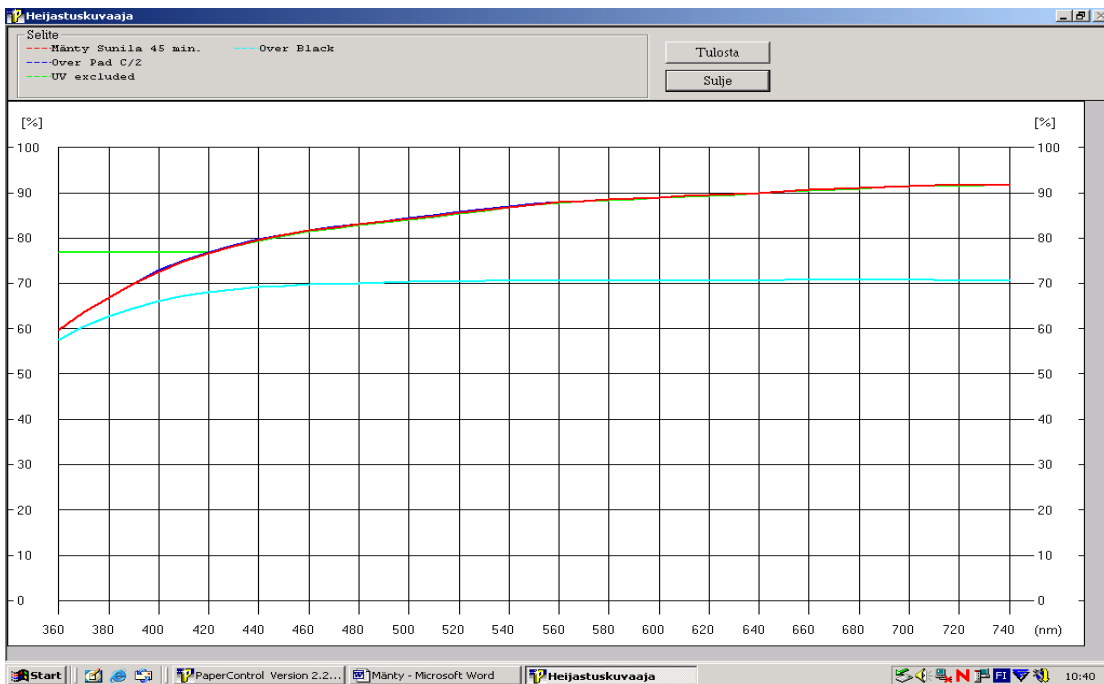
Kuva 25. 30 min Mäntysellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spectrofotometrillä 12.2.2009



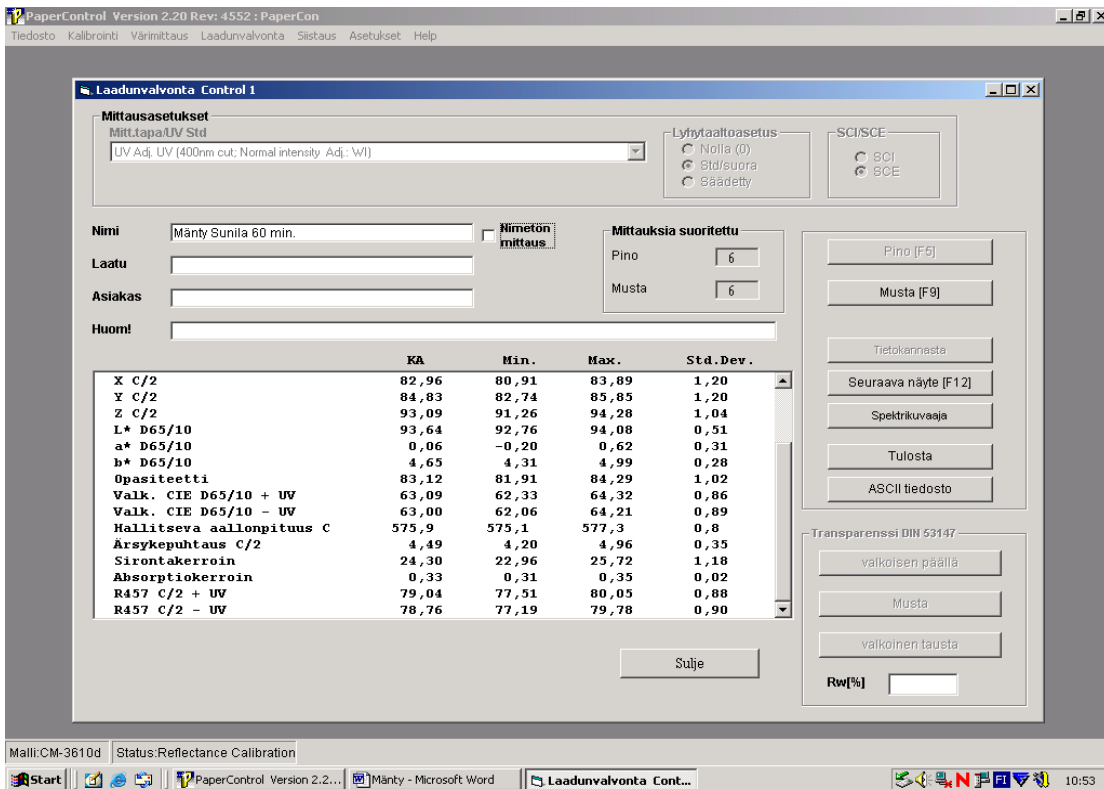
Kuva 26. 30 min Mäntysellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 12.2.2009



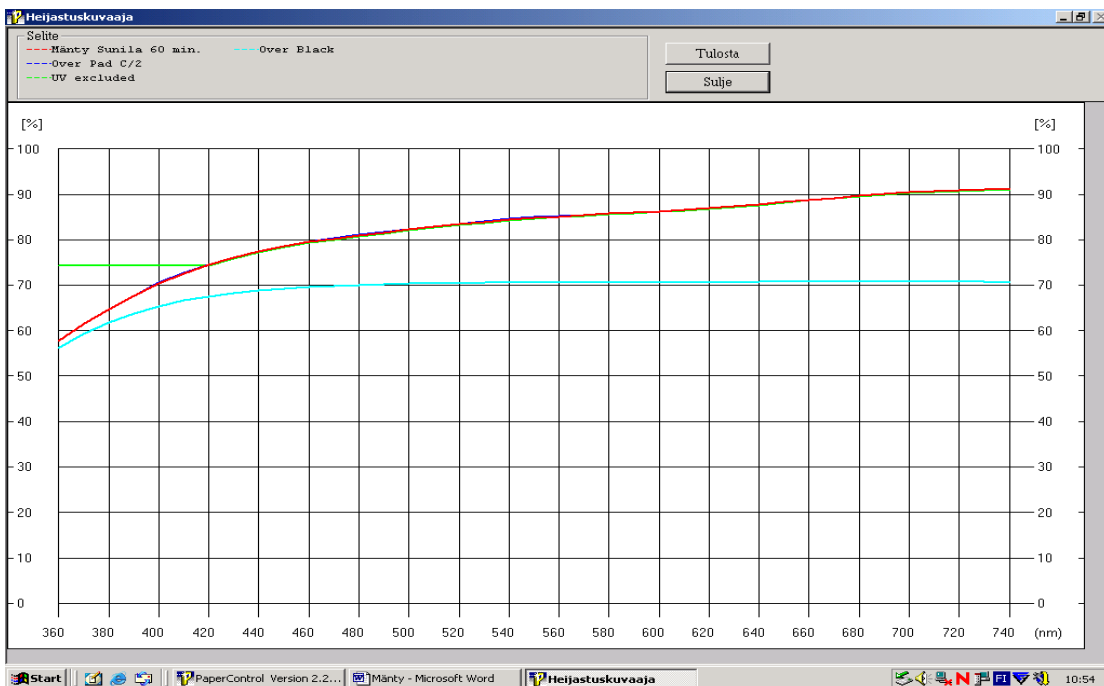
Kuva 27. 45 min Mäntysellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 12.2.2009



Kuva 28. 45 min Mäntysellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spektrofotometrillä 12.2.2009



Kuva 29. 60 min Mäntysellun optiset ominaisuudet mitattuna Minolta-spectrofotometrillä 12.2.2009



Kuva 30. 60 min Mäntysellun värin intensiteettijakauma aallonpituusalueella 360-740 (nm) mitattuna Minolta-spectrofotometrillä 12.2.2009