

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan osasto

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

PUUN LÄMPÖKÄSITTELYN ERI KÄSITTELYTASOJEN JA PUUN
ALKUKOSTEUDEN VAIKUTUKSET VÄRIN TASAISUUTEEN PUUAINEKSESSA

EFFECTS OF DIFFERENT HEAT-TREATMENT STAGES AND INITIAL MOISTURE
CONTENT ON HOMOGENEITY OF WOOD COLOR

Lappeenrannassa 17.11.2010

Ville Sallinen

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	4
2 PUUN LÄMPÖKÄSITTELYPROSESSI JA KUUMAKUIVAUS	
(KIRJALLISUUSOSA)	5
2.1 Puu materiaalina	5
2.1.1 Puun rakenteelliset ominaisuudet	6
2.2 Puun lämpökäsittelyprosessi ja kuumakuivaus.....	7
2.2.1 Lämpökäsittelyn peruskäsitteet ja tarkoitus.....	7
2.2.2 Lämpökäsittelyn eri prosessivaiheet	8
2.2.3 Lämpökäsittelyn vaikutukset puun ominaisuuksiin.....	9
2.3 Puun väri	11
2.3.1 Puun värin muodostuminen	11
2.3.2 Havu- ja lehtipuiden erot värin muodostumisessa.....	12
3 AINEISTO JA MENETELMÄT	13
3.1 Lämpökäsittely.....	14
3.1.1 Lämpökäsittelylaitteisto.....	14
3.1.2 Lämpökäsittelykaavat	16
3.2 Puun värin mittaaminen	17
3.2.1 Värimittausten tarkoitus.....	18
3.2.2 Värimittausmenetelmät	19
3.3 Muut mittaukset ja analyysit	21
3.3.1 PCA- ja PLS-menetelmät	21
3.3.2 Spektroskopia	22
4 TULOKSET	22
4.1 Lämpökäsittelyn vaikutukset puun värin muodostumiseen.....	23
4.1.1 Vaikutukset värin tasaisuuteen eri käsittelytasoilla.....	23
4.1.2 Lähtökosteuden vaikutukset puun väriin	24
4.2 Lähtökosteuden vaikutukset käsittelyn jälkeiseen loppukosteuteen.....	25

4.3 Muut tulokset	26
5 TULOSTEN TARKASTELO	28
5.1 Mittaustulosten analysointi I.....	28
5.2 Mittaustulosten analysointi II (kirjallisuusosa).....	30
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	34
LÄHDELUETTELO	35

1 JOHDANTO

Tämä työ on tehty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa syksyllä 2010. Työ sisältää tekniikan kandidaatin tutkintoon sisältyvän lopputyön kirjallisuusosuuden. Työn aineisto on koottu aiheeseen liittyvästä jo olemassa olevasta kirjallisuudesta ja saaduista tutkimustuloksista, sekä Lappeenrannan teknillisen yliopiston puutekniikan laboratorion tekemästä tutkimuksesta.

Kirjallisuusosuuden alussa tarkastellaan puun rakenteellisia ominaisuuksia, puulle ominaisia piirteitä, sekä puun kosteuteen liittyviä käsitteitä. Kirjallisuusosuus sisältää myös kuvauksen lämpökäsittelyprosessista ja siihen liittyvästä laitteistosta, lämpökäsittelyn vaikutuksista puun ominaisuuksiin, sekä tärkeimpänä, lämpökäsittelytasojen vaikutuksista puun värimuutoksiin eri lämpötilatasoilla. Työssä tutkitaan myös puun alkukosteuden vaikutusta lämpökäsittelyn puun väriin ja loppukosteuteen, sekä vertaillaan puun luonnollisten värierojen syntymistä esimerkiksi havu- ja lehtipuiden välillä. Lisäksi kappaleissa 3.2 ja 3.3 esitellään puun värimittauksen periaatteet ja menetelmät, sekä lyhyesti muita menetelmiä, joita voidaan hyödyntää puun ominaisuuksien (esimerkiksi lujuusominaisuuksien) tutkimisessa.

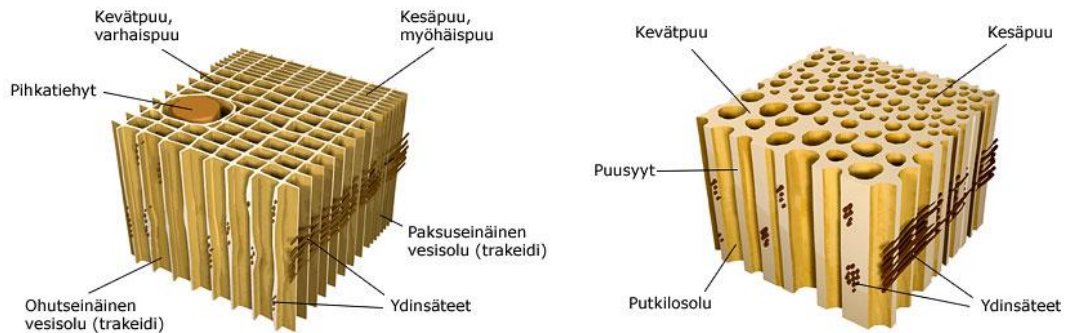
Työhön liittyvä tutkimusosuus on suoritettu Lappeenrannan teknillisen yliopiston Ruokolahden yksikössä. Tutkimuksissa on tutkittu erityisesti puussa lämpökäsittelyn aikana tapahtuvia värimuutoksia, ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Työn lopussa esitetään mittauksissa saadut tulokset ja analysoidaan niitä. Saatuja tuloksia verrataan aiemmin samasta aihepiiristä saatuihin tutkimustuloksiin kappaleessa 5.2. Kappaleeseen 6 on koottu johtopäätökset omien ja aiheesta aiemmin tehtyjen tutkimusten pohjalta.

2 PUUN LÄMPÖKÄSITTELYPROSESSI JA KUUMAKUIVAUS (KIRJALLISUUSOSA)

2.1 Puu materiaalina

Puu on heterogeeninen materiaali, jolle on tyypillistä suuret kosteus- ja tiheysvaihtelut. Vaikka puu on rakenteeltaan heterogeeninen, ovat sen solut rakenteeltaan melko samanlaisia. Solut huolehtivat puun kasvusta, veden kuljetuksesta, ravintoaineista, sekä ylläpitävät puun lujuutta. Puun solurakenne on esitetty kuvassa 1. Puun tärkeimmät rakenneaineet ovat selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini, joista puun soluseinämät koostuvat. Näiden lisäksi puuhun on varastoitunut erilaisia uuteaineita ja kemikaaleja. Puussa olevia uuteaineita ovat esimerkiksi terpeenit, rasvat ja fenolit. (ThermoWood-käsikirja 2003; Möller & Otranen 1999)

Havupuissa vesi liikkuu trakeideja eli vesisoluja pitkin. Lehtipuissa vesi kulkee rungon suuntaisesti putkilosolujen muodostamissa putkiloissa. Havupuilla on rungon sisällä suuria kosteusvaihteluja, mikä johtuu sydän- ja pintapuun välisistä eroista. Sydänpuun muodostumiseen liittyy voimakas kosteuden aleneminen pintapuuhun verrattuna. (Kärkkäinen 2007)



Kuva 1. Puun solurakenne. Havupuun (vas.) ja lehtipuun solukko (oik.). (Pro Puu ry)

2.1.1 Puun rakenteelliset ominaisuudet

Selluloosa on puun pääasiallinen rakennusaine, ja sitä on puun kuivapainosta 40 – 50 % puulajista riippuen. Hemiselluloosan osuus kuivapainosta on normaalisti 25 – 35 %. Ligniiniä on puussa noin 20 – 30 % ja uuteaineita alle 5 %. (Möller & Otranen 1999)

Puun heterogeenisyyden vuoksi puun poikkileikkauksesta voidaan erottaa erilaisia rakenteita kuten vuosirenkaat, sekä sydän- ja pintapuu. Vuosirenkaat muodostuvat kevät- ja kesäpuusta, jotka ovat saaneet nimensä puun kasvukausien mukaan. Pintapuu ja sydänpuu eroavat toisistaan siten, että pintapuu on elävää puuainesta ja sydänpuu kuollutta solukkoa. Pinta- ja sydänpuun välillä on eroja myös värinmuodostumisen suhteen. Näitä eroja esitellään tässä työssä kuitenkin melko vähän. (Kärkkäinen 2007)

Puun selluloosa- ja hemiselluloosapitoisuudet, sekä niiden hajoamistuotteet vaikuttavat puun lujuusominaisuuksien lisäksi myös värin muodostumiseen. Selluloosa ja hemiselluloosa hydrolysoituvat sokereiksi kuten glukoosiksi ja ksyloosiksi. Puun rakenneaineiden välisten kemiallisten reaktioiden merkitystä puun värin muodostumisessa käsitellään kappaleessa '2.3 Puun Väri'. (ThermoWood-käsikirja 2003; Möller & Otranen 1999)

Puun kosteus

Puu on materiaalina hygroskooppista, jolloin se imee itseensä vettä. Solut tarvitsevat vettä elintoimintojensa ylläpitämiseksi. Vesi sitoutuu aluksi soluseinämiin, jonka jälkeen myös soluonteloihin. Soluonteloissa oleva vesi on ns. vapaata vettä. Puussa voi olla myös soluonteloihin ja seinämiin varastoitunutta vesihöyryä. (Kärkkäinen 2007)

Puun kosteudesta puhuttaessa tarkoitetaan usein puun kosteussuhdetta eli puussa olevan veden massan suhdetta puun absoluuttiseen kuivamassaan. Tuoreen puun kosteussuhde on normaalisti yli 30 %. Maksimaalisella kosteussuhteella tarkoitetaan puun syiden kyllästymispistettä (PSK), jonka puu voi saavuttaa vesihöyrystä jossakin lämpötilassa, kun suhteellinen höyrynpaine on 1. Puun tasapainokosteuden käsite on myös hyvä tuntee. Sillä tarkoitetaan tilannetta, jolloin puuhun tulevan ja siitä poistuvan vesihöyryn määrä on yhtä suuri. Tällöin puun kosteus asettuu ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan määräämään kosteuteen eli tasapainokosteuteen. (Kärkkäinen 2007)

2.2 Puun lämpökäsittelyprosessi ja kuumakuivaus

2.2.1 Lämpökäsittelyn peruskäsitteet ja tarkoitus

Puun lämpökäsittelyprosessin tarkoituksena on pidentää puun kestoikää eri käyttökohteissa. Käsittelyllä pyritään vähentämään puun kosteuselämistä ja parantamaan etenkin sen lahonkesto-ominaisuuksia. Lämpökäsittelyn alkuvaiheessa puuta on myös mahdollista kuivata, mikäli se on tarpeen. (Viitaniemi & Jämsä 1996)

Suomessa lämpökäsittelään lähinnä mäntyä, kuusta, koivua ja haapaa. Myös esimerkiksi lehtikuusen, saarnin, pyökin, tervalepän ja eukalyptuksen lämpökäsittelyä on tutkittu jonkin verran. Lämpökäsittelyllä pyritään usein saamaan havupuuhun jalopuumainen väri, joka koetaan puun arvoa lisäävänä tekijänä jatkojalostusta ja puun loppukäyttöä ajatellen. Lämpökäsittelyn hyödyntämistä rajoittaa muun muassa se, että käsittelyprosessissa tarvitaan hyvin korkeita lämpötiloja. Tällöin esimerkiksi tulipalon vaara kasvaa. Vesihöyryn käytöllä pyritään estämään puun palamista, sekä vähentämään halkeilua. (ThermoWood-käsikirja 2003; Viitaniemi & Jämsä 1996)

Kuumakuivaus mielletään usein osaksi lämpökäsittelyprosessia. Kuumakuivauksessa käytettävä lämpötila-alue on 100 - 135 °C:n välillä. Kuivausprosessi kestää noin yhden vuorokauden. Kuten muillakin puun kuivausmenetelmillä, prosessin kestoon vaikuttavat kuivattava puulaji, sahatavaran paksuus, sekä puun alkukosteus. Prosessissa ei ole erillistä ilmanvaihtoa vaan höyrystynyt vesi poistetaan ylipaineen avulla poistoläpän kautta. Kuumakuivauksen jälkeen lämmityskamarin lämpötila nostetaan lämpökäsittelyyn soveltuvalle tasolle, jolloin varsinainen lämpökäsittely tapahtuu. Kuumakuivauksen etuja muihin kuivausmenetelmiin nähden ovat muun muassa lyhentynyt kuivausaika ja pintahalkeilun väheneminen. Myös puun muodonmuutosten sietokyky paranee korkeiden lämpötilojen aiheuttaman puun plastisoitumisen myötä. (Möller & Otranen 1999)

2.2.2 Lämpökäsittelyn eri prosessivaiheet

Lämpökäsittely koostuu kolmesta eri vaiheesta:

- 1) lämmitysvaihe
- 2) varsinainen lämpökäsittely
- 3) jäähdytys- ja tasaannutusvaihe (Möller & Otranen 1999)

Ensimmäisessä vaiheessa lämmityskamari lämmitetään noin 100 °C:een kuuman ilman ja höyryn avulla. Kamarin lämpötila nostetaan n. 130 °C:een, jolloin puu kuumakuivataan ja sen kosteussuhde laskee lähelle nollaa. Lämmitys- ja kuivausvaiheet kestävät yhteensä 4-15 tuntia. Kuivausaikaan vaikuttavat etenkin puun alkukosteus, puulaji, sekä sahatavaran paksuus. Seuraavassa vaiheessa suoritetaan varsinainen lämpökäsittely käsittelylämpötilan ollessa n. 190 - 240 °C:n välillä. Varsinainen lämpökäsittelyprosessi kestää 2-3 tuntia, jonka aikana kamarin lämpötila pyritään pitämään vakiona. Lämpökäsittelyn jälkeen puu jäähdytetään ja tarpeen mukaan myös kostutetaan halutun loppukosteuden aikaansaamiseksi. Oikeaoppisella jäähdytyksellä pyritään välttämään myös puun pintahalkeilua. Jäähdytysvaiheessa käsittelylämpötila on noin 80 – 90 °C. Haluttu loppukosteus lämpökäsittelyllä puulla on noin 4-7 %. (ThermoWood-käsikirja 2003; Möller & Otranen 1999)

Puusta alkaa haihtua sekä vapaata että sitoutunutta vettä lämmitysvaiheessa, lämpötilan ollessa 0 - 100 °C. Puun ensimmäiset hajoamistuotteet alkavat muodostua kuumakuivauksen lämpötila-alueella. Kun lämpötila on noussut 150 – 200 °C:een, alkavat puun hiilihydraatit hajota. Myös kaasujen muodostuminen alkaa edellä mainitulla lämpötila-alueella. (Pecina & Paprzycki 1988)

2.2.3 Lämpökäsittelyn vaikutukset puun ominaisuuksiin

Puun kuivauksen ja lämpökäsittelyn aikana puussa tapahtuu niin fysikaalisia kuin kemiallisiakin muutoksia. Kemialliset reaktiot lisääntyvät käsittelylämpötilan noustessa ja ne vaikuttavat puun ominaisuuksiin. Korkeissa lämpötiloissa (+150 °C) käsitellyn puun väri tummuu ja kosteuseläminen vähenee. Puun ominaisuuksien muuttuminen korostuu, kun lämpötila nostetaan selvästi yli 200 °C:een. Lämpökäsittely alentaa puun tasapainokosteutta suhteessa käsittelemättömään puuhun, sekä parantaa puun lämmöneristyskykyä. Lämpökäsitellylle puulle on ominaista myös lujuusominaisuuksien heikkeneminen, mikä osaltaan rajoittaa sen käyttöä lujuutta ja kantavuutta vaativissa käyttökohteissa. Puun lujuus riippuu suuresti puun kosteuspitoisuudesta, kun kosteus on alle puun syiden kyllästymispisteen. (ThermoWood-käsikirja 2003; Möller & Otranen 1999)

Rakenteelliset muutokset lämpökäsittelyn aikana

Lämpökäsitellyn puun ominaisuudet muuttuvat lähinnä hemiselluloosien termisen hajoamisen takia. Lämpökäsittely vähentää hemiselluloosien määrää, jolloin puu on paremmin suojattu esimerkiksi lahottajasieniä vastaan. (ThermoWood-käsikirja 2003)

Puuaineksen hajoaminen vaihtelee eri puulajien välillä. Esimerkiksi lehtipuissa on havupuita enemmän hemiselluloosaa ja vähemmän ligniiniä, joten ne hajoavat voimakkaammin lämpökäsittelyn aikana (Kollman & Schneider 1964). Selluloosa ja ligniini hajoavat hemiselluloosaa hitaammin ja korkeammissa lämpötiloissa (Viitaniemi & Jämsä 1996). Höyryn käyttö lämpökäsittelyprosessissa nopeuttaa puuaineksen hajoamista (Stamm 1956).

Fysikaalisista muutoksista tärkeimpiä ovat puun tiheyden pieneneminen ja lujuusominaisuuksien heikkeneminen. Puun soluseinämät kutistuvat korkeissa lämpötiloissa, koska puusta haihtuu erinäisiä hajoamistuotteita. Puun tiheys- ja lujuusominaisuudet korreloivat yleensä keskenään. VTT:n tutkimuksessa todettiin männyn ja kuusen taivutuslujuuden heikenneen enimmillään 27 % suhteessa tuoreeseen puuhun. Tutkimuksessa kävi myös ilmi, että taivutuslujuus heikkenee nimenomaan selluloosan hajoamisen seurauksena. Taivutuslujuuden lisäksi lämpökäsittely heikentää puun halkaisulujuutta, sillä prosessissa syntyy puuhun lähes poikkeuksetta joko pinta- tai sisähalkeilua. Sisähalkeamat

muodostuvat, kun puun sisälämpötila nousee tarpeeksi korkeaksi eli yli 190 °C:een (Giebeler 1983). (ThermoWood-käsikirja 2003; Viitaniemi & Jämsä 1996)

Lämpökäsittely laskee puun tasapainokosteutta, jolloin puun lahonkesto paranee. Lahonkeston paraneminen johtuu puuhun sitoutuneen veden vähenemisestä, sekä puun rakenneosien muuttumisesta vähemmän alttiiksi laholle (Stamm & Baechler 1960). Tasapainokosteus laskee noin puoleen suhteessa käsittelemättömään puuhun, kun puuta käsitellään 220 °C:ssa. Tasapainokosteuden alentuessa puuaines on myös stabiilimpaa eli se pitää mittansa paremmin, kun ilman suhteellisen kosteus muuttuu. Lämpökäsittelyprosessi vähentää etenkin tangentin- ja säteensuuntaista turpoamista, ja puun veden läpäisykykyä eli permeabiliteettia, sekä lämmönjohtavuutta - molempia noin 20 – 30 % käsittelemättömään puuhun verrattuna. (ThermoWood-käsikirja 2003)

Puusta muodostuvat metaani- ja etikkahappo-pitoisuudet lisääntyvät lämpökäsittelyn pitkittyessä ja käsittelylämpötilaa nostettaessa. Etikkahappoa muodostuu hemiselluloosien hajotessa. Happo katalysoi hemiselluloosia edelleen sokereiksi. Etikkahappo myös nopeuttaa selluloosan hajoamista. Terziev (1995) on todennut, että sokereita ja tyypeä muodostuu puun pinnan läheisyydessä jo kuivausvaiheessa, riippumatta käytettävistä kuivauslämpötiloista. (ThermoWood-käsikirja 2003)

Lisääntyneet happopitoisuudet heikentävät puun (etenkin koivun) lujuusominaisuuksia. Useita tutkimuksia, joissa puun on todettu luovuttavan orgaanisia happoja, on hyödynnetty muun muassa sellu- ja paperiteollisuudessa, sekä biopolttoaineiden yhteydessä. Metaani- ja etikkahapon tapauksissa ongelmana on kuitenkin niiden talteenotto ja analysointi, sekä räjähdysherkkyys. Muita puusta lämpökäsittelyprosessin aikana haihtuvia tuotteita ovat muun muassa vesihöyry, hiilimonoksidi ja –dioksidi, sekä erilaiset fenoliyhdisteet. (Sundqvist et al. 2006; Möller & Otranen 1999)

2.3 Puun väri

2.3.1 Puun värin muodostuminen

Puun luonnollisten värierojen muodostuminen

Puun luonnollisiin väriominaisuuksiin vaikuttavat havupuilla puulajikohtaiset tiheysvaihtelut, sekä kevät- ja kesäpuun välinen suhde (ThermoWood-käsikirja 2003). Tiheyden lisääntyessä puu muuttuu väriltään tummemmaksi (Boonstra et al. 2006). On tutkittu, että Pohjois-Suomessa kasvanut mänty on vaaleampaa kuin Etelä-Suomessa kasvanut mänty. Värieron on arveltu johtuvan eteläsuomalaisen männyn suuremmasta kesäpuosuudesta (Grekin 2007). Puun väriin vaikuttavat myös puun varastointiaika, sekä varastointiolosuhteet ennen lämpökäsittelyä. Myös lämpökäsittelyä edeltävä kuivausprosessi vaikuttaa puun lopulliseen väriin. Jos sahatavaraerä on esimerkiksi kuumakuivattu ennen varsinaista lämpökäsittelyä, on sen väri tummempaa kuin lämminilmakuivauksen tapauksessa. Myös puussa olevat bakteerit aiheuttavat muutoksia värissä. Bakteerit voivat elää joko elävässä puussa tai ne voivat syntyä sahatun puun kosteuden laskiessa alle 20 %:n. (Corbo et al. 2001; Möller & Otranen 1999; Verkasalo 1993; Ward & Zeikus 1980)

Kromoforit ovat eräänlaisia väriä muodostavia aineita. Ligniinin ja joidenkin uuteaineiden kromoforit tuottavat puun luonnollisen, vaalean keltaisen värin (Burtin et al. 1998). Ruskean, punaoranssin, lilan ja mustan värisävyn saavat sen sijaan aikaan sydänpuussa olevat erinäiset fenolihdisteet. Uuteaineista esimerkiksi stilbeenit, tanniinit ja flavonoidit sisältävät väriä muodostavia kromoforeja. (Sundqvist 2004; Hon & Minemura 2001)

Värierojen muodostuminen lämpökäsittelyn aikana

Puun väri muodostuu sen rakenneaineiden välillä tapahtuvien kemiallisten reaktioiden johdosta. Puun tummuminen alkaa jo kuivausprosessin aikana, jolloin puun pinnan väri tummuu, sisäosien säilyessä vaaleina. Värimuodostusprosessi johtuu hydrolyysistä, jolloin puun rakenneaineiden väliset sidokset hajoavat energian vapautumisen myötä. Ligniini-, selluloosa- ja hemiselluloosapitoisuudet puussa vaikuttavat eri tavoin värisävyn syntymiseen. Hemiselluloosa hajoaa alhaisemmassa lämpötilassa (200 °C – 260 °C) kuin

selluloosa ja ligniini. Hemiselluloosan hajoamistuotteet voivat myös lisätä uuteaineiden määrää. Kuumentumisen aikana muodostuvat sokerit ja aminohapot muokkaavat niin ikään puun väriä, etenkin sen pinnan läheisyydessä. (McCurdy et al. 2005; Sundqvist 2004; Sundqvist & Moren 2002; Möller & Otranen 1999)

2.3.2 Havu- ja lehtipuiden erot värin muodostumisessa

Koska lehtipuissa on enemmän hemiselluloosaa ja vähemmän ligniiniä kuin havupuissa, hajoavat ne havupuista voimakkaammin lämpötilaa nostettaessa. Tämä johtaa osaltaan siihen, että lehtipuilla värinmuodostus alkaa usein alhaisemmissa lämpötiloissa kuin havupuilla. (Viitaniemi & Jämsä 1996)

Etenkin koivun värin muodostumista on tutkittu viime vuosina. Tutkimuksista käy ilmi, että useat ympäristöolosuhteisiin liittyvät seikat, kuten kasvupaikka ja tukkien varastointi vaikuttavat koivun värin muodostumiseen (Luostarinen & Verkasalo 2000). Värivikoja koivussa voidaan vähentää käyttämällä alipainekuivausta, jolloin vesi höyrystyy puun pinnalta tavallista pienemmässä happipitoisuudessa ja muita menetelmiä lyhyemmässä kuivausajassa (n. 3-5 päivää). (Chen 1997; Charrier et al. 1992)

Koivun solukkorakenteen on niin ikään todettu vaikuttavan värin muodostumiseen. Kun koivua kuivataan lämminilmamenetelmällä, sen kesäpuukerroksen paksuudella on väriä tummentava vaikutus. Näin ollen koivun värimuutoksia olisi mahdollista vähentää esimerkiksi valitsemalla koivun kasvupaikka siten, että se ei suosi kesäpuun muodostumista (Luostarinen 2006). Koivua voidaan kuivata myös kuumakuivaamalla, jolloin sen väri muuttuu punertavaksi. Voimakas punertuminen johtuu siitä, että kuumaa höyryä ohjataan puun pinnalle. Punertavan ja ruskean värisävyn syntyyn vaikuttavat myös puun pinnan läheisyydessä syntynyt ruskeat hajoamistuotteet. Höyryn ohjaus puun pinnalle sopii kuitenkin paremmin havupuille, sillä niillä värimuutoksia ei koeta yhtä haitallisiksi kuin koivulla. (Luostarinen 2006; Burtin et al. 1998)

Sydän- ja pintapuun värieroa tutkittaessa on todettu, että etenkin ligniinin ja puun uuteaineiden pitoisuudet näillä alueilla vaikuttavat eri värisävyn syntymiseen (Sundqvist

2004). On myös tutkittu, että koivun pintapuun värimuutoksissa käsittelyajalla on suurempi rooli kuin käsittelylämpötilalla. Männyllä ja kuusella käsittelyaika ja käsittelylämpötila vaikuttavat tasaisemmin siihen, millaiseksi väri muodostuu. Koivun pintapuu muuttuu selvästi punertavammaksi ja tummemmaksi jo alhaisemmissa lämpötiloissa, kuin männyn ja kuusen pintapuu. Suurimmat värimuutokset tapahtuvat koivulla jo lämpökäsittelyprosessin ensimmäisen tunnin aikana. On myös tutkittu, että koivun väri alkaa haalistua lämpökäsittelyprosessissa, kun puun kosteuspitoisuus laskee alle 30 %:n ja saavuttaa tummimman värisävynsä 18 - 20 %:n kosteudessa (Luostarinen et al. 2002). Koivussa lämpökäsittelyn aikana tapahtuvia värimuutoksia tarkastellaan enemmän kappaleessa 5.2. (Sundqvist et al. 2006)

3 AINEISTO JA MENETELMÄT

Tämän työn tutkimusosuus on suoritettu Lappeenrannan teknillisen yliopiston Ruokolahden yksikössä. Ruokolahden yksikkö on osa Lappeenrannan teknillisen yliopiston puuteknikan laboratoriota. Työtä varten on tehty koesarja, jossa sahatavaraerä on kuivattu ja lämpökäsitelty.

Koekappaleet on käsitelty eri lämpötiloissa, jotta niissä esiintyviä värieroja on mahdollista tutkia. Lämpökäsittelyn jälkeen puusta on tehty värimittauksia, joiden tarkoituksena on ollut tutkia värin muodostumista eri lämpötila-alueilla. Tutkimuksessa on tutkittu myös puun lähtökosteuden vaikutusta puun väriin, sekä käsittelyn jälkeiseen loppukosteuteen. Sahatavaraerä koostuu kappaleista, joilla oli eri alkukosteus. Kappaleista on mitattu lähtökosteudet, jonka jälkeen suoritettiin lämpökäsittely. Materiaalina on käytetty mäntyä (pääosin 32x100mm), jonka lähtökosteuspitoisuudet vaihtelivat välillä noin 12, 17 %, 22 %, ja tuore. Kuivin erä, jossa puun lähtökosteus oli noin 12 %, on kuivattu lämminilmakuivauksella kanavakuivaamossa. Kuivaamon lämpötila oli noin 85 °C ja kuivausaika 5 – 6 vuorokautta. Seuraava erä on ilmakeivattu Ruokolahdella rimoja hyväksikäyttäen. Ilmakeivausprosessi kesti noin vuoden. 22 % - kosteuserä on kuumakuivattu seuraavalla kuivauskaavalla:

2h	80°C
4h	100°C
6h	120°C
8h	125°C
12h	125°C
14h	40°C

Koekappaleet on jaettu siten, että kussakin lämpötilassa käsitellyistä kappaleista on valittu värimittauksiin noin 90 kappaletta. Kyseiset kappaleet on eroteltu niiden lähtökosteuksien perusteella. 12 % - lähtökosteuden omaavat kappaleet ovat lisäksi kooltaan selvästi muita pienempiä.

3.1 Lämpökäsittely

3.1.1 Lämpökäsittelylaitteisto

Tässä kappaleessa lämpökäsittelylaitteisto esitellään yleisellä tasolla. Laitteistoissa voi olla pieniä eroja, mutta rakenteellisesti ne ovat kuitenkin melko samanlaisia. Ruokolahdella käytössä oleva lämpökäsittelylaitteisto on esitetty kuvassa 2.

Lämmityskamari, jossa lämpökäsittely suoritetaan, koostuu useista eri komponenteista. Rungon ja seinien sisällä on lämmityspatterit, joiden antama lämpö yhdessä asianmukaisesti toteutetun ilmankierron ja kostutuksen kanssa johtavat haluttuun lopputulokseen. Sähköpattereiden ohella lämmöntuotto voidaan toteuttaa myös kuumaöljyteknikalla, jolloin kuumaöljykattilan lämmönlähteenä käytetään joko biopolttoainetta, polttoöljyä tai kaasua. (ThermoWood-käsikirja 2003; Möller & Otranen 1999)

Kiertoilmapuhaltimet, kostutusjärjestelmät, sekä ilmanvaihto- ja ylipaineventtiilit ovat erittäin tärkeitä komponentteja lämpökäsittelyprosessissa. Laitteistoon kuuluu myös ohjausjärjestelmä

ja mittausantureita (usein lämpötila-antureita), joiden avulla prosessia seurataan ja säädetään halutunlaiseksi. Joissain tapauksissa prosessin tarvitsema höyry tuodaan lämpökäsittelykammioon myös erillisellä höyrymuodostuslaitteella. Laitteistoon on myös mahdollista liittää kuljetinvaunuja ja ratoja käsiteltävän sahatavaraerän liikuttamista varten. (Möller & Otranen 1999)



Kuva 2. Lämpökäsittelykammio Ruokolahdella (ulkoa ja sisältä).

Pienten lämmityskamareiden runko- ja sisäosissa käytetään tavallisesti ruostumatonta terästä, jotta välttyttäisiin esimerkiksi teräslevyjen syöpymiseltä. Mikäli lämpökäsittelykamari on suurempi, on seinissä ja lattiassa mahdollista käyttää myös betonia, joka kestää hyvin prosessin aiheuttaman rasituksen. Betonia käytettäessä ongelmaksi voi muodostua sen varaama lämpö, jolloin laitteiston jäähtyminen kestää tavallista kauemmin. Kamarin ulkosivuissa on mahdollista käyttää esimerkiksi alumiinia tai profiloitua peltiä. Laitteiston eristäminen tulee ottaa huomioon jo aikaisessa vaiheessa kammion suunnittelutyötä. Eristämateriaaliksi sopii esimerkiksi palonkestävä mineraalivilla. Lämpökäsittelylaitteistoissa käytetään yleensä sähkövastuspattereita. Ne ovat edullisia ja lämpötilan säätäminen on helppoa. Pattereiden materiaalina on syytä käyttää ruostumatonta terästä, jolloin niiden kestoikä pitenee huomattavasti suhteessa mustaan rautaan. Puutavaran kuivauksessa ja lämpökäsittelyssä oikeanlaisen ja tasaisen ilmankierron merkitys on erittäin suuri. Tehokas ilmankierto toteutetaan kiertoilmapuhaltimilla. Lämpökäsittelyssä käytetään selvästi suurempaa ilmannopeutta esimerkiksi lämminilmakuivaukseen verrattuna. Puhallinmoottorit sijoitetaan lämpökäsittelykamarin ulkopuolelle. Ruokolahden lämpökäsittelykammiossa ilmankierto on toteutettu yhdellä puhaltimella, joka sijaitsee kammion päädyssä. Laitteistossa käytettävät kostutusjärjestelmät koostuvat yleensä veden sumutus- ja höyrykostutusjärjestelmistä. Höyryn avulla pyritään saavuttamaan paras mahdollinen laatu, ja

sitä käytetään niin lämmitysvaiheessa, varsinaisen lämpökäsittelyn aikana sekä tasaannuksessa. Höyryä käytetään myös suojakaasuna ehkäisemään puun syttymistä ja kytymistä. Kostutukseen käytetään myös kylmää vettä, jotta jäähditys onnistuu tavoiteajassa. Ruokolahdella suoritetun lämpökäsittelyn yhteydessä höyryä ei käytetty vielä lämmönnosto- ja kuivausvaiheissa, vaan vasta varsinaisessa lämpökäsittelyssä. Puusta poistuu luonnollisesti kosteutta prosessin aikana. Kosteudenpoisto on järjestetty ilmanvaihto- ja ylipaineventtiilien kautta. Kamarin sisäpintoihin tiivistyy myös vettä, josta se siirtyy lattian kautta imeytyskaivoon. Ilmanvaihtventtiilit näin ollen säätävät kamarin ilmankosteutta. Ylipaineventtiilit sen sijaan estävät ylipaineen muodostumista kamarin sisälle. (Möller & Otranen 1999)

3.1.2 Lämpökäsittelykaavat

Lämpökäsittely tehdään tietyillä parametriarvoilla. Kulloinkin käytettävät parametriarvot riippuvat käytössä olevasta laitteistosta, ja siitä mihin käyttötarkoitukseen lämpökäsiteltyä puuta halutaan käyttää. Lämpökäsittelykaavoissa muuttujia ovat muun muassa käsittelylämpötila, käsittelyaika ja ilman puhallusnopeus. Yksittäinen kaava koostuu prosessin mukaisesti lämmitys-, kuivaus- ja jäähditys/tasaannutusvaiheista.

Ruokolahdella lämpökäsittely on suoritettu lämpötila-alueilla 170 °C, 190 °C ja 212 °C. Käytetyt lämpökäsittelykaavat on esitetty alla olevassa taulukossa 1. Taulukossa esiintyvä merkintä ”Lämpötila 1” kuvaa uunin kuivalämpötilaa. ”Lämpötila 2” on kuivausvaiheessa märkälämpötila ja lämpökäsittelyprosessissa puun lämpötila. Kyseisessä prosessissa höyryn käyttö aloitettiin lämpötilan noustessa 170 °C:een ja lopetettiin lämpötilan laskiessa alle 160 °C:n.

Taulukko 1. Lämpökäsittelykaavat koekappaleille.

Kuivausvaihe		
Aika (h)	Lämpötila 1 (°C)	Lämpötila 2 (°C)
0	20	18
3	60	55
6	120	100
9	125	100
12	130	125
15	130	125
Lämpökäsittely 170°C		
Aika (h)	Lämpötila 1 (°C)	Lämpötila 2 (°C)
17	170	160
18	170	170
20	170	170
Lämpökäsittely 190°C		
19	190	180
20	190	190
22	190	190
Lämpökäsittely 212°C		
21	212	190
22	212	212
25	212	212

3.2 Puun värin mittaaminen

Ruokolahdella suoritettavat värimittaukset on tehty siten, että suurista kappaleista on valittu viisi mittauskohtaa ja pienemmistä kappaleista kolme mittauskohtaa. Mittauskohdat on valittu silmämääräisesti, eikä tarkkoja mittauskohtia näin ollen ole määritelty. Mittauskohdat on

pyrityä valitsemaan siten, että ne kuvaavat mahdollisimman totuudenmukaisesti koko koekappaleen väriä, jolloin esimerkiksi oksien ja sinistymien kohdalta mittaamista on pyritty välttämään. Värimittauksia varten kappaleiden pinnat on höylätty, jotta tulokset olisivat mahdollisimman luotettavia. Värimittauksissa on käytetty spektrofotometriä (ks. kuva 3). Havaintokuva mittauskohtien valinnasta ja mittausjärjestelystä on esitetty kuvassa 4.



Kuva 3. Konica Minoltan spektrofotometri.



Kuva 4. Periaatekuva värin mittauskohtien valinnasta (vas.) ja spektrofotometri, joka asetettiin puukappaleiden päälle kuvan mukaisella tavalla (oik.).

3.2.1 Värimittausten tarkoitus

Puun värimittausten tarkoituksena on muodostaa kokonaiskuva puun väristä, esimerkiksi puun tummuusasteesta, sekä punaisuudesta ja keltaisuudesta. Myös puun värin kokonaisuutosta, puun saturaatiota, sekä värisävyä ja värin heijastumista mitataan. Värin

mittaaminen ja värianalyysin teko liitetään puun yhteydessä usein puun laadunvalvontaan. Tällöin värianalyysin avulla voidaan paikantaa esimerkiksi oksat ja muut puun virheet. Näitä mittaustuloksia voidaan hyödyntää myös puun kuormituskokeissa ja lujuusmittauksissa. Laadunvalvontaan liitettäviä värimittauksia ei juurikaan käytetä teollisessa mittakaavassa vaan lähinnä eri instituutioiden tieteellisissä tutkimuksissa. Tietyissä käyttökohteissa puun vääränlainen väri alentaa sen arvoa, kun joissain tapauksissa värillä on merkittävä esteettinen arvo. Lehtipuilla (kuten koivulla) värimuutokset koetaan usein negatiivisena seikkana. (Johansson 2008; Keey 2004)

3.2.2 Värimittausmenetelmät

Väriin mittaamisessa hyödynnetään usein spektrofotometriä. Mittauksessa käytetään spektrofotometriä, jolla kappaletta valaistaan eri aallonpituuksilla. Havaittavat värit muodostavat värispektrin, joka on eräänlainen värijakauma. Spektrofotometri mittaa erilaisia suureita aallonpituusväliltä 360 - 740 nm. Ihmissilmä pystyy havaitsemaan värin näkyvän valon aallonpituuksilla, n. 380 - 780 nm (Hunt 1998). Ruokolahdella suorittujen värimittausten tulokset on analysoitu spektrialueelta 400 - 700 nm. (Janin et al. 2001; Konica Minolta 1997)

$L^* a^* b^*$ - väriavaruusmalli (CIELab) on yleisesti käytetty tapa mitata kappaleen, eli tässä tapauksessa puun väriä. Menetelmä muodostaa kolmiulotteisen XYZ-mallin, jossa X kuvaa punaisuuden osuutta väriavaruudessa, Y keltaisen ja vihreän välistä osuutta ja Z sinisen osuutta. Näiden avulla saadaan laskettua halutut värikoordinaatit L^* , a^* ja b^* .

$$L^* = 116 (Y/Y_0)^{1/3} - 16 \quad (1)$$

$$a^* = 500 [(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}] \quad (2)$$

$$b^* = 200 [(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z^0)^{1/3}] \quad (3)$$

(Janin et al. 2001; Konica Minolta 1997)

L^* -komponentilla tarkoitetaan puun valoisuusastetta, jolloin ääriarvot ovat täysin vaalea (valkoinen) ja musta. Väliarvot kuvaavat harmaan eri sävyjä. a^* -komponentti kuvaa kappaleen punaisuuden ja vihreyden suhdetta. b^* -komponentilla esitetään keltaisuuden ja sinisyyden värisuhdetta mitattavassa kappaleessa. Yleisesti mitattavien värikomponenttien nimikkeet ja ääriarvot on esitetty kuvassa 5, ja väriavaruutta kuvaava CIElab - malli kuvassa 6.

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

kaavan avulla saadaan laskettua $L^* a^* b^*$ - mallin kokonaisvärimuutoksen ΔE^* numeeriset arvot. (Konica Minolta 1997)

L^*	a^*	b^*
100 = valkoinen	100 = punainen	100 = keltainen
0 = musta	0 = vihreä	0 = sininen

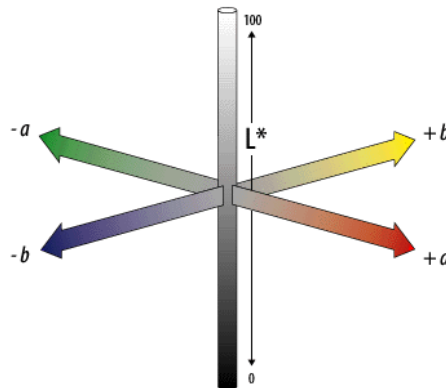
Kuva 5. Puusta yleisesti mitattavat värikomponentit.

Vaihtoehtoisesti voidaan puusta mitata myös värin kylläisyyttä, eli saturaatiota C , sekä värin varjostumista/värisävyä h . Tällöin muodostuu $L^*C^* h^*$ -värimalli. Saturaation C arvo keskellä ympyrää on nolla. Saturaation arvo kasvaa, kun siirrytään pois ympyrän keskipisteestä. Värisävy h (*hue*) on $0^\circ C$ (määritelty nollaksi) punaisuuden $+a^*$ -akselilla ja $90^\circ C$ keltaisuuden $-a^*$ -akselilla. C^* - ja h^* -komponentit lasketaan seuraavilla kaavoilla:

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (5)$$

$$h = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (6)$$

(Konica Minolta 1997)



Kuva 6. CIELab-väriavaruus ja mitattavat värikomponentit. (Adobe Systems)

Puun ainesosista ligniini absorboi värejä melko tehokkaasti. Selluloosa ja hemiselluloosa absorboivat korkeintaan hieman harmaan eri sävyjä, mutta eivät näkyvän valon aallonpituuksilla. (Hon & Minemura 2001; Hunt 1998)

3.3 Muut mittaukset ja analyysit

3.3.1 PCA- ja PLS-menetelmät

Puun ominaisuuksien selvittämissä ja mittaamisessa voidaan hyödyntää myös NIPALS-algoritmiä hyödyntäviä matemaattisia malleja. Näillä malleilla voidaan tutkia esimerkiksi mittaustulosten korrelaatiota. Käytettäviä menetelmiä ovat muun muassa pääkomponenttianalyysi PCA (Principal Component Analysis), sekä PLS-analyysi (Partial Least Squares). Molemmat menetelmät perustuvat useamman muuttujan analyysiin. Muuttujia kyseisillä menetelmillä voivat olla esimerkiksi mittaukset puun eri sivuilta. PCA-malli laskee,

kuinka hyvin mittauksissa saatu data korreloi keskenään, ja kuinka suurta hajontaa mittaustulosten välillä on havaittavissa. PCA-mallin yhteydessä voidaan hyödyntää tilastotieteeseen perustuvia ohjelmistoja. PLS-regressiomalli on pitkälti samanlainen kuin PCA-malli, mutta se tekee lisäksi lineaarisen pienimmän neliösumman sovituksen muuttujien välille. PLS- ja PCA-mallien antamia tuloksia hyödynnetään muun muassa puun lujuusmittauksissa, kuten esimerkiksi taivutuskokeiden yhteydessä. Kyseisten mallien antamien tulosten pohjalta saadaan laskettua myös jo aiemmin esitellyt värikomponentit L^* , C^* ja h^* . (Johansson & Moren 2006; Sundqvist 2002)

3.3.2 Spektroskopia

Puun ominaisuuksien mittaamisessa voidaan hyödyntää spektroskopiamenetelmiä. Näiden tarkoituksena on usein tutkia puun kemiallista koostumusta, ja etenkin kappaleen pinnan läheisyydessä tapahtuvia kemiallisia muutoksia. Menetelmät analysoivat puun pinnan heijastuskykyä infrapunaa hyväksikäyttäen. Tavallisesti käytetään lähi-infrapuna-alueella aallonpituusalueella 700 - 2500 nm. (Kärkkäinen 2007; Mitsui et al. 2004)

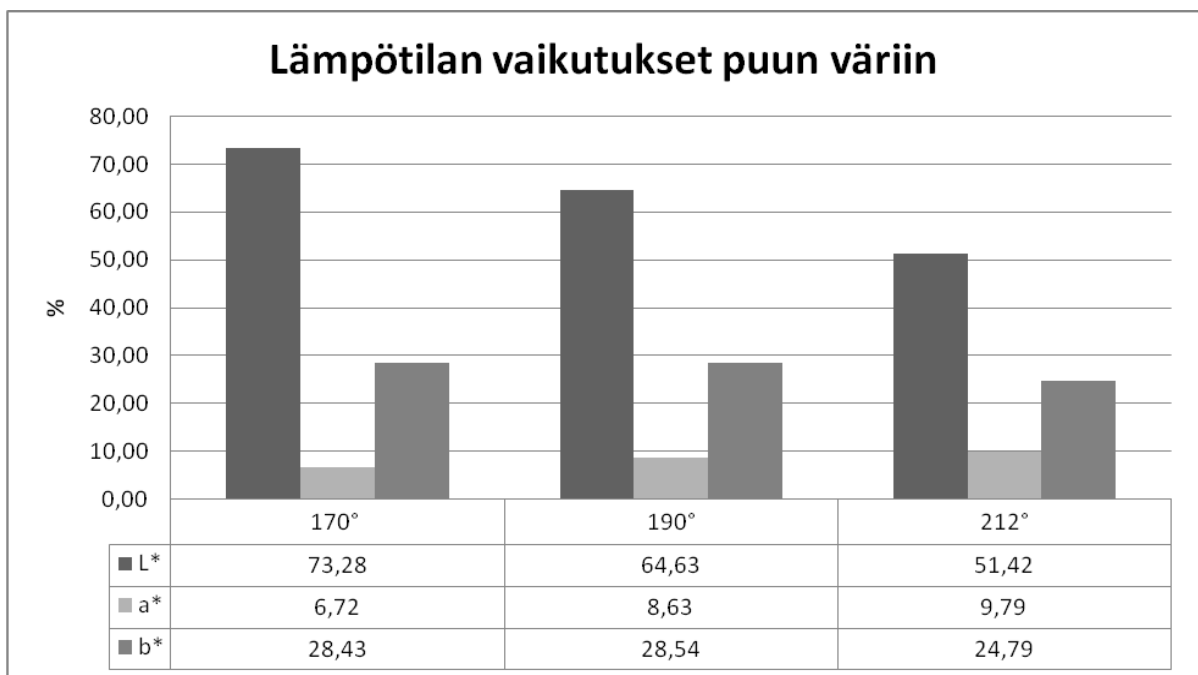
4 TULOKSET

Tässä kappaleessa esitetään Lappeenrannan teknillisen yliopiston Ruokolahden yksikössä tehtyjen kosteus- ja värimittausten tulokset. Saatuja tuloksia verrataan kappaleessa 5 muihin tutkimustuloksiin, jotka niin ikään käsittelevät lämpökäsittelyn aikana puussa tapahtuvaa värin muodostumista.

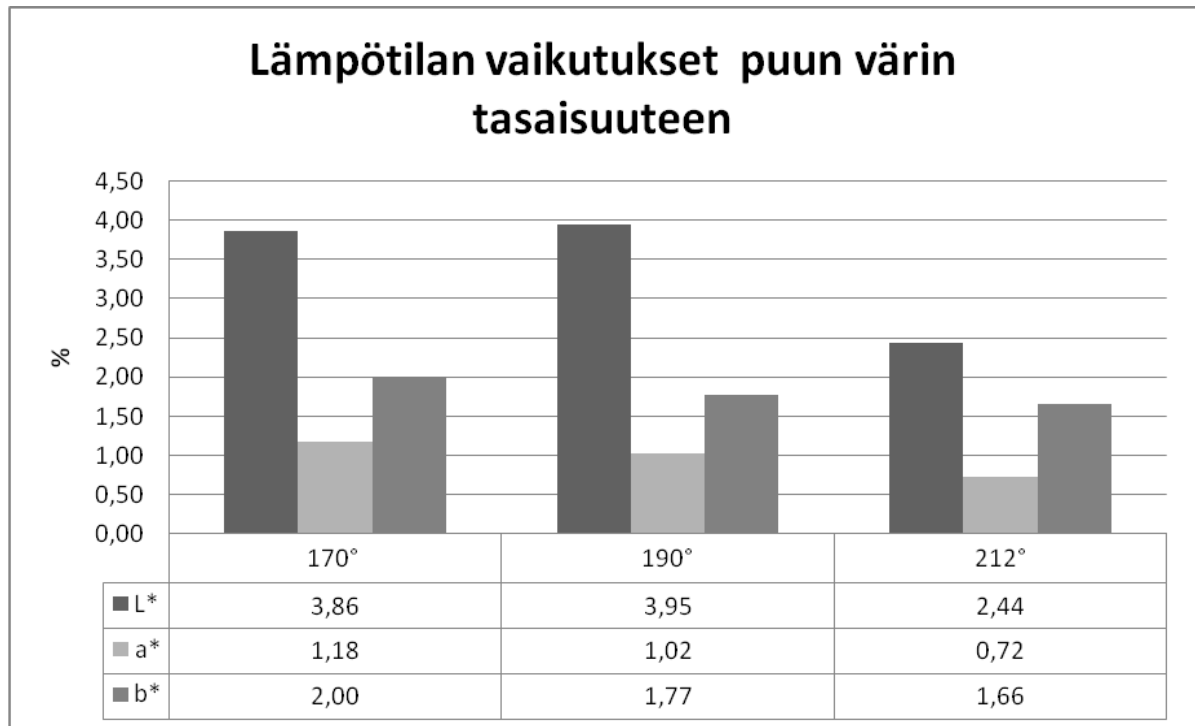
4.1 Lämpökäsittelyn vaikutukset puun värin muodostumiseen

4.1.1 Vaikutukset värin tasaisuuteen eri käsittelytasolla

Kuvissa 7 ja 8 esitetään koekappaleiden värimittauksista saadut värien keskiarvot ja keskihajonnat eri lämpötiloissa. Tuloksista nähdään, kuinka CIELab – värimallin komponentit reagoivat suhteessa toisiinsa eri käsittelylämpötiloissa. Saatuja tuloksia käsitellään kappaleessa 5.1 Mittaustulosten analysointi. Värikomponenttien keskiarvot ja –hajonnat on laskettu kaikista koekappaleista.



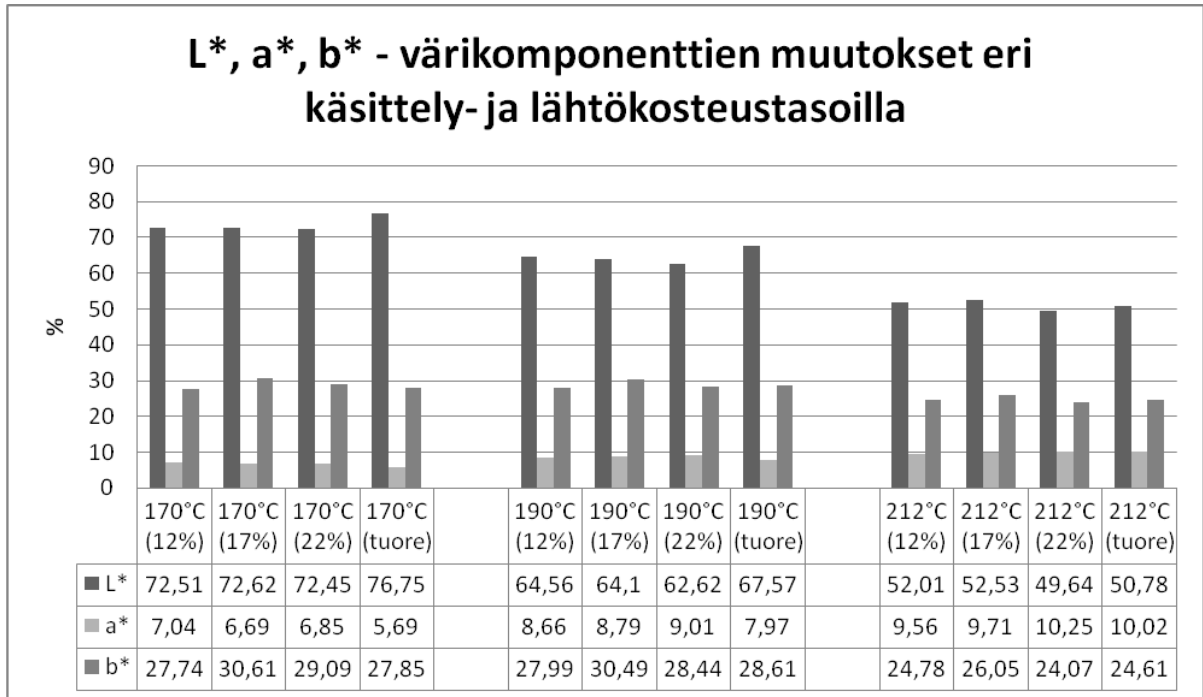
Kuva 7. Eri lämpökäsittelytasojen vaikutukset puun väriin.



Kuva 8. Puukappaleiden värien hajonnat eri lämpökäsittelytasoilla.

4.1.2 Lähtökosteuden vaikutukset puun väriin

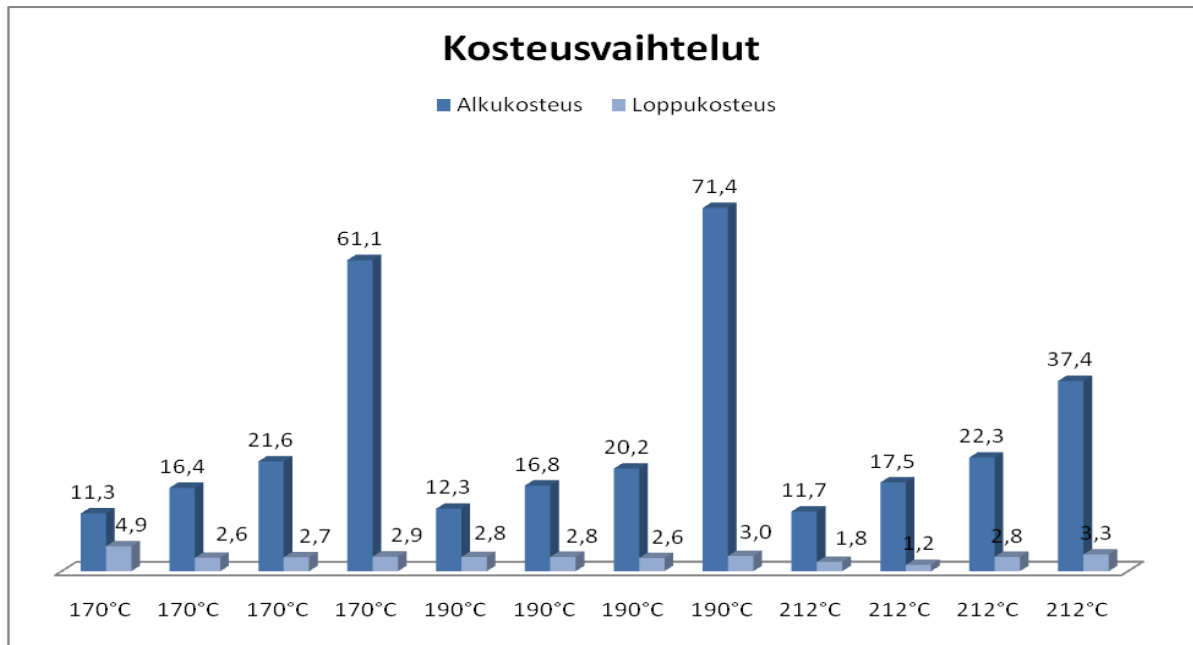
Ruokolahden värimittauksissa käytetyt puukappaleet oli jaettuun neljään eri lähtökosteusluokkaan. Kuvassa 9 on esitetty, kuinka lähtökosteus vaikuttaa väriin ja sen tasaisuuteen. Tulokset on ilmoitettu keskiarvoina.



Kuva 9. Eri lähtökosteuksien ja käsittelylämpötilojen vaikutukset puun väriin.

4.2 Lähtökosteuden vaikutukset käsittelyn jälkeiseen loppukosteuteen

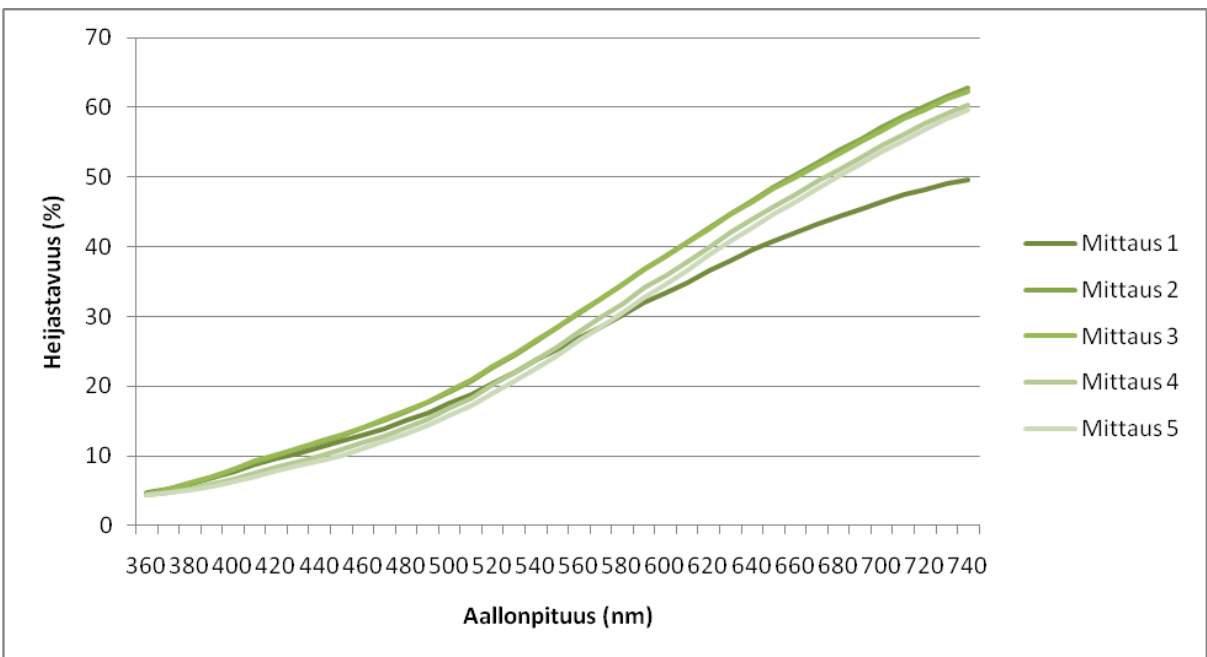
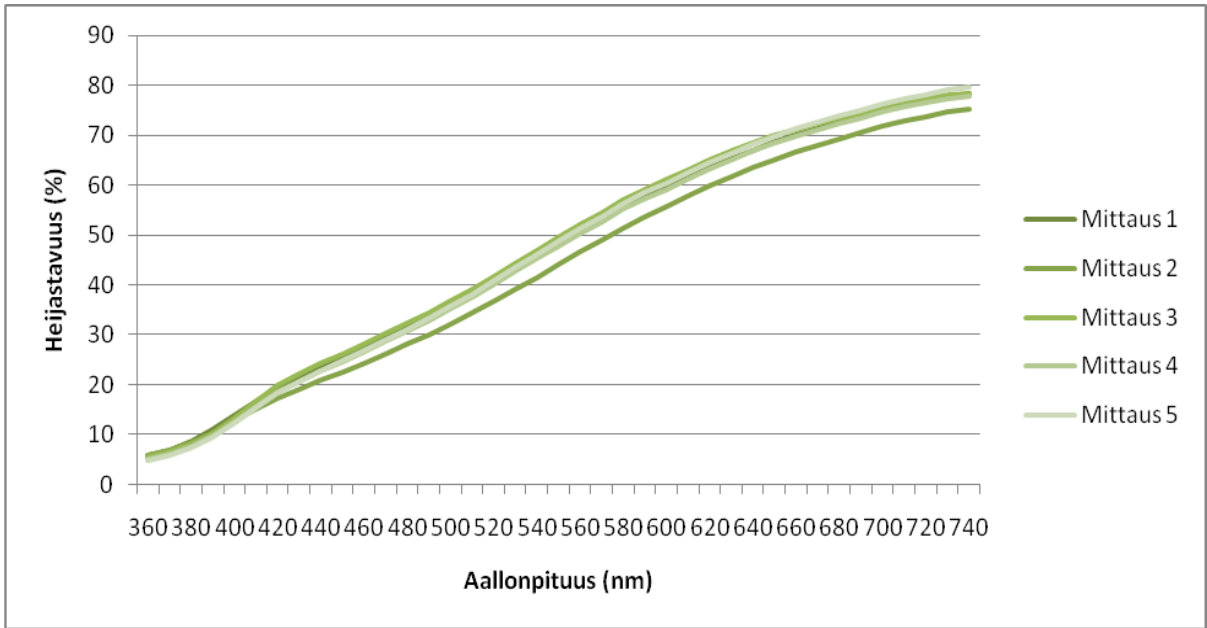
Kuvassa 10 on esitetty puukappaleiden alku- ja loppukosteudet eri lämpötiloissa suoritettua käsittelyä ennen ja sen jälkeen.

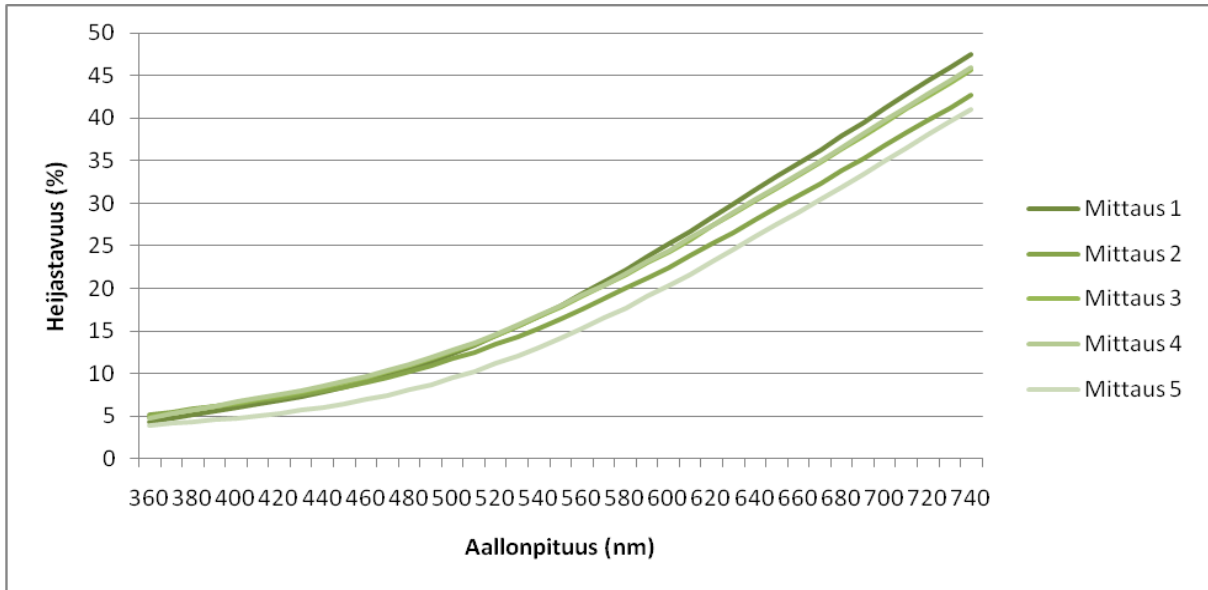


Kuva 10. Koekappaleiden kosteudet ennen ja jälkeen eri käsittelytasoilla suoritettua lämpökäsittelyä.

4.3 Muut tulokset

Ruokolahdella suoritetuissa värimittauksissa tehtiin spektrofotometrillä kolme tai viisi mittausta kustakin koekappaleesta, riippuen siitä oliko kyseessä pieni vai suuri koekappale. Alla olevissa kuvissa (ks. kuva 11) on esitetty miten spektrofotometrillä otettujen viiden eri mittauksen värispektri muuttuu yhden kappaleen sisällä kullakin lämpötilatasolla, 170 °C, 190 °C ja 212 °C. Värispektri on määritelty näkyvän valon aallonpituuksilla 360 - 740 nm. Kuvissa esitetyt värispektrit antavat myös hyvän kuvan siitä, millä aallonpituuden alueella lämpökäsittely muuttaa puun väriä käsittelylämpötilaa muutettaessa.





Kuva 11. Yhden koekappaleen värispektrin hajonta kullakin lämpökäsittelytasolla (ylimpänä 170 °C, keskellä 190 °C ja alimpana 212 °C).

5 TULOSTEN TARKASTELO

5.1 Mittaustulosten analysointi I

212 °C:n lämpötilassa käsitellyt kappaleet ovat väriltään selvästi tummempia kuin alhaisemmissa lämpötiloissa käsitellyt kappaleet. Niiden väri on myös jakautunut tasaisemmin kuin alemmissa lämpötiloissa käsitellyjen kappaleiden. Suurimmat värimuutokset havaitaan, kun vertaillaan eri lämpötiloissa käsitellyjen kappaleiden vaaleutta ja tummuutta (L^* -komponentti). Kappaleiden välisiä värieroja on kuvattu kuvassa 12, josta on selvästi nähtävissä puun tummuminen käsittelylämpötilaa nostettaessa.

170 °C:ssa käsitellyjen kappaleiden väri ei huomattavasti poikkea tuoreen puun väristä. Kuvasta 9 käy ilmi, että kappaleiden punaisuuden (a^*) arvot kasvavat lämpötilan noustessa. Kasvu on kuitenkin melko vähäistä, keskimäärin noin 1-3 prosenttiyksikköä. Tuloksista on myös havaittavaa, että tuoreelle puulle tyypillisen keltaisen värisävyn (b^*) osuus laskee selvimmin, kun käsittelylämpötila ylittää 200 °C. 212 °C:ssa käsitellyjen puokappaleiden

keltaisuuden arvot ovat keskimäärin noin kolme prosenttiyksikköä pienemmät kuin 190 °C:ssa käsiteltyjen kappaleiden vastaavat arvot.

Tarkasteltaessa lähtökosteuden vaikutusta värin muodostumiseen käy ilmi seuraavaa. Koekappaleet, joiden lähtökosteus on yli 35 % (= tuore) säilyvät vaaleampina 170 °C:n ja 190 °C:n käsittelylämpötiloissa kuin alhaisemman lähtökosteuden kappaleet. Toisin sanoen, mitä pienempi lähtökosteus puulla on, sitä tummemmaksi se muuttuu jo alhaisemmillä käsittelytasolla. Punaisuuden a^* arvot alenevat hieman kahdella ensimmäisellä lämpötilatasolla tuoreen puun tapauksessa. 17 % ja 22 % - lähtökosteuden omaavilla kappaleilla selkeitä muutoksia ei havaita. Puun keltaisuus b^* on suurempi kappaleilla, joiden lähtökosteus on alhainen. Keltaisuus puussa vähenee puun kosteuspuutisuuden ollessa korkea. Erot ovat selvimmin havaittavissa 170 °C:n lämpökäsittelyn tapauksessa.

Vertailtaessa eri lämpötilassa käsiteltyjen puukappaleiden värien keskimääräistä hajontaa huomataan, että punaisuuden arvoissa hajonta on vähäisin. Toisin sanoen punaisuuden arvot ovat jakautuneet tasaisimmin mitattujen kappaleiden välillä. Keltaisuuden hajonta on hieman punaisuuden keskimääräistä hajontaa suurempi. Suurimmat muutokset keskihajonnassa on havaittavissa kappaleiden tummuusasteessa L^* . Käsittelylämpötilan noustessa kaikkien värikomponenttien hajonta kuitenkin pieneni. Yksittäisen kappaleen mittatarkkuuden hajonta on esitetty kuvassa 11 kullakin eri käsittelytasolla.

Puun pinnankarheus ja oksaisuus ovat mahdollisesti vaikuttaneet mittaustulosten tarkkuuteen. Joissain kappaleissa oli myös havaittavissa halkeilua oksien kohdalla, sekä kuivien oksien irtoilua. Koska koekappaleissa oli useita mittauspisteitä, voi tuloksia kuitenkin pitää suhteellisen luotettavina.



Kuva 12. Eri lämpötiloissa käsiteltyjen mäntykappaleiden tummuusaste poikkeaa selvästi toisistaan.

Kuvaan 10 on koottu Ruokolahdella eri lämpötiloissa käsiteltyjen kappaleiden alku- ja loppukosteuksien keskiarvot. Taulukosta on havaittavissa, että lämpökäsittelyn jälkeinen loppukosteus on kappaleilla keskimäärin noin 2-3 %. Mittaustuloksista käy ilmi myös, että kappaleiden alkukosteuden eroilla ei ole suurta merkitystä kappaleiden lämpökäsittelyn jälkeiseen loppukosteuteen. Loppukosteus on kuitenkin keskimäärin hieman suurempi tuorepuukappaleilla kuin kuivausprosessin läpikäyneillä kappaleilla. Tämä johtunee siitä, että lämpökäsittelyssä on käytetty erilaisia kaavoja, jotta värimuutokset saadaan selvästi esille.

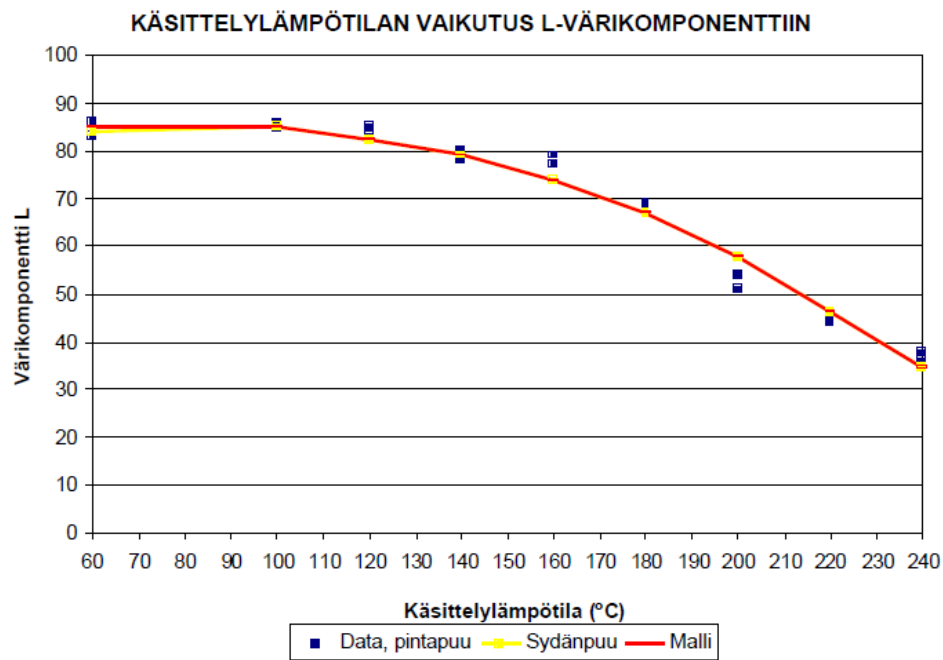
5.2 Mittaustulosten analysointi II (kirjallisuusosa)

Lämpökäsittelyn vaikutukset puun värin tasaisuuteen

Mittaustuloksista käy ilmi, että puun väri tummenee sitä enemmän mitä korkeammassa lämpötilassa sitä käsitellään. Suurimmat muutokset on havaittavissa puun kirkkausasteessa L^* . Käsittelylämpötilan noustessa ja käsittelyajan pidentyessä puun L^* -komponentin arvojen hajonnan on todettu lisääntyneen (Sundqvist 2004). Lämpökäsittelyssä havupuiden väri tummuu varsin tasaisesti koko kappaleen alueella, ei ainoastaan sen pinnalla. Puun värin muutokset alkavat lisääntyä kuumakuivauksen lämpötila-alueella eli yli 100 °C:n lämpötiloissa. (Gonzalez-Pena & Hale 2009; McCurdy et al. 2005)

Kuten aiemmin on todettu, puussa muodostuu korkeissa lämpötiloissa hajoamistuotteina esimerkiksi metaani- ja etikkahappoa (ThermoWood-käsikirja 2003). Korkeiden happopitoisuuksien muodostuessa puun on todettu tummuneen ja puun värisävyarvojen h alentuneen. Koivulla värisävyn h (*hue*) arvot alenevat kuten myös puun kirkkausaste L^* , kun lämpökäsittelyprosessia pitkitetään ja lämpötilaa nostetaan. Sitä vastoin värin saturaation C (*chroma*) arvot eivät riipu niin yksiselitteisesti käsittelyajasta ja -lämpötilasta. Värin saturaatioarvojen on todettu tutkimuksessa vaihtelevan varsin epä johdonmukaisesti. (Sundqvist et al. 2006)

Kuvasta 13 havaitaan, että värikomponentin L^* arvo laskee selvästi käsittelylämpötilan noustessa. Samaan lopputulokseen päädyttiin myös Ruokolahdella tehdyissä värimittauksissa. Kun tarkastellaan mittauksissa saatuja L^* -komponentin arvoja kullakin käsittelytasolla (170 °C, 190 °C, 212 °C) havaitaan, että arvot (ks. kuva 7) ovat samassa suuruusluokassa VTT:n tutkimuksen antamien arvojen kanssa.



Kuva 13. Lämpötilan vaikutukset mäntylautojen L^* -värikomponenttiin kolmen (3) tunnin käsittelyn aikana. (VTT)

Lähtökosteuden vaikutukset puun väriin

Puun liiallinen kosteus lämpökäsittelyn alkaessa aiheuttaa halkeilun ja värivirheiden myötä sahatavaran laadun heikkenemistä (Möller & Otranen 1999). Korkea lähtökosteus lisää puun tummumista, kun puuta käsitellään korkeissa lämpötiloissa ja kuivausaika pitkittyy. Suurimmat värimuutokset on havaittavissa kappaleen pinnalla ja sen läheisyydessä. (McCurdy et al. 2005)

Koivulla värin tasaisuus lämpökäsittelyn jälkeen ei aina toteudu. Värimuutoksia tapahtuu etenkin puun sisäosissa, pinnan pysyessä vaaleana (Luostarinen 2001). On myös todettu (Johansson 2008), että puun pinnalla on lämpökäsittelyn aikana korkeampi lämpötila kuin puun sisäosissa. Puu on tuoreena värirakenteeltaan melko homogeeninen, eikä väriarvoissa ole suurta hajontaa. Johansson on tutkinut koivun värimuutoksia 175 °C ja 200 °C lämpökäsittelyssä verrattuna käsittelemättömään puuhun. Koivun väriominaisuudet ovat suurelta osin riippuvaisia myös lämpökäsittelyä edeltävistä toimenpiteistä, kuten varastoinnista ja varastointiajasta. Koivua käytetään usein huonekalujen ja sisustustuotteiden raaka-aineena, jolloin väriasiat vähentävät tuotteiden arvoa (Luostarinen & Verkasalo 2000). Väriavien syntyä voidaan vähentää käyttämällä mahdollisimman luonnonmukaisia kuivausmenetelmiä (esimerkiksi ilmakeuhusta), jolloin kuivausprosessi kestää muutamasta kuukaudesta kahteen vuoteen. Tällöin puu värjäytyy tasaisesti ja muodonmuutokset vähenevät. Pitkä kuivausaika haittaa kuitenkin puun taloudellista hyödyntämistä, kun puumateriaalia ei saada käyttöön (Esping 1996). Koivun ja haavan kuivauksessa syntyviä väriavioita voidaan poistaa lämpökäsittelyssä ja sitä kautta vaikuttaa myös tuotteiden arvonnousuun. Esimerkiksi koivun punertumista ja sinistymää on mahdollista peittää lämpökäsittelyn avulla. Myös männyn sinistymää on myös mahdollista peittää lämpökäsittelyllä. Ulkokäytössä lämpökäsitelty puu lisäksi harmaantuu melko helposti. (Johansson 2008; Möller & Otranen 1999; Suomen Lämpöpuu Oy)

On myös tutkittu miten lähtökosteus vaikuttaa koivun väriin, kun koivutukkeja on varastoitu niin kesä- kuin talviolosuhteissa. Tutkimuksessa havaittiin, että puun keltaisuuden vähenemisellä on yhteys puun lähtökosteuteen. Kesällä varastoitu puu tummeni selvästi enemmän ja tasaisemmin sisäosista, sekä puun pinnalta, kuin talviolosuhteissa varastoitu puu (Möttönen 2005). Lähtökosteus vaikuttaa myös koivun lämpökäsittelyn jälkeiseen väriin. Käsiteltäessä suuren lähtökosteuden omaavia koivukappaleita korkeissa lämpötiloissa, puu

tummuu voimakkaammin kuin alhaisemman lähtökosteuden omaavat kappaleet. Myös puun keltaisuuden ja punaisuudet väriarvojen on huomattu kasvavan (Möttönen & Kärki 2008). (Möller & Otranen 1999)

Puun lähtökosteus ja lämpökäsittelyprosessissa vallitsevat olosuhteet aiheuttavat värieroja sydän- ja pintapuun välillä. Tuloksista käy ilmi, että havupuilla sydänpuun värissä on enemmän keltaisuutta kuin pintapuussa silloin, kun puuta kuivataan alhaisissa lämpötiloissa. Väriero ei kuitenkaan ole hyvin suuri, eikä näin ollen helposti tunnistettavissa. (Sundqvist 2004)

Istanbulin yliopistossa Turkissa, on tutkittu Eukalyptuspuun soveltuvuutta lämpökäsittelyyn ja käsittelyssä tapahtuvia puun värimuutoksia. Viime vuosina Eukalyptuspuun käyttö on lisääntynyt etenkin paperi- ja selluteollisuudessa, sekä pakkausmateriaalina. Eukalyptus on nopeasti kasvava puulaji, jonka lämpökäsittely on kuitenkin varsin rajallista johtuen muun muassa puun turpoamisesta ja alhaisesta mittastabiliteetista. Tutkimuksessa puukappaleet on käsitelty 120 °C, 150 °C ja 180 °C lämpötiloissa. Vertailtaessa tuloksia Ruokolahdella suoritettuihin männyn värimittauksiin huomataan heti, että eukalyptus on luonnolliselta väriltään huomattavasti mäntyä tummempi puulaji. Värimuutokset tapahtuvat silti suurilta osien samalla tavalla kuin männyn tapauksessa, jolloin lämpötilan noustessa puu tummenee. Suurimmat muutokset tummuusarvojen muutoksissa on nähtävissä ensimmäisten kuuden käsittelytunnin aikana, kun lämpötila on 180 °C. Männyllä punaisuuden arvot kasvavat lämpötilan noustessa, eukalyptuksen tapauksessa käy päinvastoin eli punaisuus puussa vähenee. Keltaisuus sen sijaan alenee eukalyptuksella samoin kuin männyllä lämpötilan noustessa. Käsittelyaika tehostaa keltaisuuden alenemista. Yhteenvetona voidaan todeta, että myös eukalyptuksella lämpötilan kohoaminen ja käsittelyajan lisääntyminen korreloivat suurempiin värimuutoksiin. (Unsal et al. 2003)

Puun loppukosteuteen vaikuttaa käytössä oleva kuivauskaava eli prosessissa vallitsevat olosuhteet ja kuivausaika. Esimerkiksi puun tasapainokosteuden on todettu puolittuvan puun lämpökäsittelyn aikana. Puuaineksen sisäiset vaihtelut (etenkin radiatamännyllä) aiheuttavat kuivauksen ja lämpökäsittelyn aikana eroja kappaleen loppukosteuteen. Mikäli keskimääräinen loppukosteus kuumakuivauksessa on esimerkiksi 10 %, voi yksittäisten saheidon loppukosteus vaihdella esimerkiksi 4 – 22 %:n välillä. (Kärkkäinen 2007; Viitaniemi & Jämsä 1996)

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Puun väri tummuu käsittelylämpötilaa nostettaessa ja käsittelyprosessin pitkittyessä. Lehtipuiden väri tummuu yleisesti ottaen alhaisemmissa lämpötiloissa kuin havupuiden väri. Vaikka puun väri tummuu tasaisesti, suurimmat värimuutokset on havaittavissa puun pinnalla.

Suurimmat värimuutokset havaitaan käsittelylämpötilan ylittäessä 200 °C, jolloin puun rakenneaineiden väliset kemialliset reaktiot korostuvat. Puun värin muodostumiseen vaikuttavat useat eri tekijät alkaen kasvupaikan valinnasta aina kuivaus- ja lämpökäsittelyprosesseissa tapahtuviin puun rakenteellisiin muutoksiin. Lämpökäsittelyn aikana puun tummuminen johtuu suurelta osin puun hemiselluloosien hajoamisesta sokereiksi.

Puun lopulliseen väriin vaikuttaa suurelta osin käytetty kuivausmenetelmä, sekä puun lähtökosteus. Suuri lähtökosteus edellyttää usein pidempiä kuivaus- ja lämpökäsittelyaikoja, sekä korkeampia käsittelyaikoja.

Useat tutkimukset ovat osoittaneet, että lämpökäsiteltyjen puukappaleiden värijakauma ei ole homogeeninen. Suurimmat värierot on havaittavissa kappaleiden valoisuusasteessa L^* , joka alenee lämpötilan ja ajan kasvaessa. Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että puun väri tasoittuu (punaisuuden ja keltaisuuden osalta) nostettaessa käsittelylämpötilaa 170 °C:sta 212 °C:een. 170 °C:n käsittelytasolla käsiteltyjen kappaleiden väri on selvästi lähimpänä tuoreen puun väriä. Tutkittaessa eri värikomponenttien tasaisuutta puukappaleiden välillä huomataan, että tasaisimmin on jakautunut punaisuus a^* .

LÄHDELUETTELO

- Adobe Systems. 2000. Technical Guides, Color Models. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.11.2010]. Saatavissa: <http://dba.med.sc.edu/price/irf/Adobe_tg/models/cielab.html>
- Boonstra, M.J., Rijdsdijk, J.F., Sander, C., Kegel, E., Tjeerdsma, B., Militz, H., Van Acker, J., Stevens, M. 2006. Microstructural and Physical Aspects of Heat Treated Wood. Part 1. Softwoods. *Maderas, Ciencia y tecnologia*. 8(3): pp. 193-208.
- Burtin, P., Jay-Allemand, C., Charpentier J.-P. & Janin G. 1998. Natural wood colouring process in *Junglans* sp. (*J. nigra*, *J. regia* and hybrid *J. nigra* 23 × *J. regia*) depends on native phenolic compounds accumulated in the transition zone between sapwood and heartwood. *Trees* 12: pp. 258-264.
- Charrier, B., Haluk, J.P. & Janin, G. 1992. Prevention of brown discolouration in European oakwood occurring during kiln drying by a vacuum process: Colorimetric comparative study with a traditional process. *Holz als Roh- und Werkstoff* 50: pp. 433-437.
- Chen, Z. 1997. Primary driving force in wood vacuum drying. Ph.D. dissertation, Virginia Tech., Blacksburg, VA.
- Corbo, M., Pape, R. & Tegemark, D. 2001. Lagring av björktimmer - en förstudie. Summary: Storing timber of birch - a preliminary study. Swedish University of Agricultural Sciences. Research Note No. 13.
- Esping, B. 1996. Trätorkning 1 b - praktisk torkning. Stockholm: Träteknik.
- Gonzalez-Pena, M.M. & Hale, M. 2009. Color Change in Thermally-modified Wood and its Relationship with Property Changes. School of the Environment and Natural Resources, Bangor University. European Conference on Wood Modification.
- Giebeler, E. 1983. Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck-Behandlung. *Holz Roh Werkst.* 41, pp. 87-94.
- Grekin, M. 2007. Color and color uniformity variation of Scots pine wood in the air-dry condition. *Wood Fiber Sci.* 39(2): pp. 279-290.

- Hon, D.N.-S. & Minemura, N. 2001. Color and discoloration: Hon, D.N.-S. & Shiraishi, N. (eds.). Wood and cellulosic chemistry. 2. painos. Marcel Dekker, New York. pp. 385-442.
- Hunt, R.W.G. 1998. Measuring Colour. Third edition. Fountain Press, Kingston-upon-Thames, England. pp. 53-72.
- Janin, G., Gonzalez, J., Ananias, R., Charrier, B., Fernandes da Silva, G., Dilem, A. 2001. Aesthetics Appreciation of Wood Colour and Patterns by Colorimetry. Part 1. Colorimetry Theory for The Cielab System. Maderas, Ciencia y Tecnologia. 3(1-2): pp. 3-13.
- Johansson, D. 2008. Heat Treatment of Solid Wood: Effects on Absorption, Strength and Colour. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology.
- Johansson, D. & Moren, T. 2006. The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. Holz als Roh – und Werkstoff. 64(2): pp. 104-110.
- Keey, R. B. 2005. Colour Development on Drying. Maderas, Ciencia y Tecnologia.
- Kollman, F. & Schneider, A. 1964. Untersuchungen über den Einfluss von Wärmebehandlungen im Temperaturbereich bis 200 °C und von Wasserlagerung bis 100 °C auf wichtige physikalische und physikalisch-chemische Eigenschaften des Holzes. Köln und Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Konica Minolta. Precise Color Communication. 2007. Color Control from Perception to Instrumentation. Konica Minolta Sensing, Inc.
- Kärkkäinen, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Kustannus Metsälehti.
- Luostarinen, K. 2006. Effects of environmental and internal factors of trees and timber treatment on colour of dried birch (*Betula pendula*) wood. University of Joensuu.
- Luostarinen, K, Möttönen, V., Asikainen, A. & Luostarinen, J. 2002. Birch (*Betula pendula*) wood discolouration during drying. Effect of environmental factors and wood location in the trunk. Holzforschung 56: pp. 348-354.

- Luostarinen, K. & Verkasalo, E. 2000. Birch as sawn timber and in mechanical further processing in Finland. A literature study. *Silva Fennica Monographs* 1.
- McCurdy, M., Pang, S., Keey, R. 2005. Experimental Determination of The Effect of Temperature and Humidity on The Development of Colour in *Pinus Radiata*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Vol.22, No. 2.
- Mitsui, K., Murata, A., Tolvaj, L. Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment: Part 3. Monitoring by DRIFT spectroscopy. *European Journal of Wood and Wood Products*. Vol. 62, No. 3, pp. 164-168.
- Möller, K. & Otranen, L. *Puun Lämpökäsittely*. 1999. Ympäristötekniikan instituutti. Mikkeli.
- Möttönen, V. & Kärki, T. 2008. Colour Changes of Birch Wood During High-Temperature Drying. Lappeenranta University of Technology. *Drying Technology*, Vol. 26, Issue 9. pp. 1125–1128.
- Möttönen, V. 2005. Variation of colour and selected physical and mechanical properties related to artificial drying of sawn silver birch (*Betula pendula* Roth) timber from plantations. *Dissertationes Forestales* 13.
- Pecina, H. & Paprzycki, O. 1988. Wechselbeziehungen zwischen der Temperaturbehandlung des Holzes und seiner Benetzbarkeit. *Holzforsch. Holzverwert.* 40(1): pp. 5-8.
- Pro Puu ry:n Puuproffa-verkkopalvelu [verkkodokumentti]. [viitattu 27.9.2010]. Saatavissa: <<http://www.puuproffa.fi/arkisto/soluoppi.php>>
- Stamm, A.J. 1956. Thermal degradation of wood and cellulose. *Ind. Eng. Chem.* 48, pp. 413-417.
- Stamm, A. & Baechler, R. 1960. Decay resistance and dimensional stability of five modified woods. *For. Prod. J.* 10(1): pp. 22-26.
- Sundqvist, B. 2004. Colour changes and Acid Formation in Wood during Heating. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology.

- Sundqvist, B., Karlsson, O., Westermark, U. 2006. Determination of formic-acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to colour, strength and hardness. *Wood Sci. Technology*. 40: pp. 549-561.
- Sundqvist, B. 2002. Colour response of Scots pine (*Pinus sylvestris*), Norway spruce (*Picea abies*) and birch (*Betula pubescens*) subjected to heat treatment in capillary phase. *Holz als Roh – und Werkstoff*. 60(2): pp. 106-114.
- Sundqvist, B. 2002. Wood color control during kiln-drying. *Forest Products Journal*. 52(2): pp. 30-37.
- Sundqvist, B. & Moren, T. 2002. The influence of wood polymers and extractives on wood colour induced by hydrothermal treatment. *Holz als Roh- und Werkstoff* 60 (2002) pp. 375-376.

Suomen Lämpöpuu Oy [verkkodokumentti]. [viitattu 22.10.2010]. Saatavissa: <http://www.suomenlampopuu.fi/suomeksi/tietoa_lampopuusta>

Terziev, N. 1995. Migration of low-molecular sugars and nitrogenous compounds in *Pinus sylvestris* L. during kiln and air drying. *Holzforschung* 49: pp. 565-574.

ThermoWood-käsikirja. 2003. Lämpöpuuyhdistys ry. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.11.2010]. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.jartek.fi/web/files/914711200401161255_twkasikirja.pdf>

Unsal, O., Korkut, S., Atik, C. 2003. The effect of heat treatment on some properties and colour in eucalyptus. *Maderas, Ciencia y tecnologia*. 5(2): pp. 145-152.

Verkasalo, E. 1993. Koivupuutavaran vikaantuminen pitkittyneessä metsävarastoinnissa ja sen vaikutus viulun saantoon, laatuun ja arvoon. Summary: Deterioration of birch timber during prolonged storage in the forest and its effect on the yield, quality and value of rotary-cut veneer. *Folia Forestalia* 806: pp. 1-31.

Viitaniemi, P. & Jämsä, S. 1996. Puun modifiointi lämpökäsittelyllä. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT. Espoo.

Ward, J.C. & Zeikus, J.G. 1980. Bacteriological, chemical and physical properties of wetwood in living trees: Bauch, J. (ed.). Natural variations of wood properties. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Holz- und Holzwirtschaft No. 131. Max Wiedehusen Verlag, Hamburg-Reinbek. pp. 133-166.