METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 809, 2001

15.07.01

Lehtikuusi puusepänteollisuuden raaka-aineena

Yhteistutkimushankkeen loppujulkaisu

Erkki Verkasalo ja Hannu Viitanen (toim.)



JOENSUUN TUTKIMUSKESKUS

METLA

16.07.01

METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 809

LEHTIKUUSI PUUSEPÄNTEOLLISUUDEN RAAKA-AINEENA

Yhteistutkimushankkeen loppujulkaisu

Erkki Verkasalo
Hannu Viitanen
(toim.)

JOENSUUN TUTKIMUSKESKUS

2001

Verkasalo, E. & Viitanen, H. (toim.) 2001. Lehtikuusi puusepänteollisuuden raaka-aineena. Yhteistutkimushankkeen loppujulkaisu. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 809. 152 s. ISBN 951-40-1782-X, ISSN 0358-4283.

Tässä yhteistutkimushankkeessa tutkittiin siperianlehtikuusen (*Larix sibirica* Ledeb.) materiaaliteknisiä ominaisuuksia, teknis-taloudellista soveltuvuutta ja käytettävyyttä sekä valmistusmenetelmiä vaativan puusepänteollisuuden käytön kannalta (huonekalut, käyttöesineet, ulkorakenteet, kosteudelle alttiit kohteet). Erityisesti kiinnitettiin huomiota lehtikuusen kuivaukseen, liimaukseen, pintakäsittelyyn, säänkestävyyteen ja erikoistuotteiden vaatimiin toimenpiteisiin. Tavoitteena oli myös laatia perusteita lehtikuusen normittamiseen ja tuotteiden käyttö- ja ympäristöturvallisuuteen. Hankkeen tarkoituksena oli laajentaa ja vahvistaa rakennuspuusepän- ja huonekaluteollisuuden materiaalipohjaa ja tässä hengessä tuettiin hankkeessa mukana olleiden yritysten tuotekehitystä.

Hankkeen koordinoinnista vastasi Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus. Hanke koostui seuraavista osatutkimuksista:

1) Lehtikuusitukkien hankinta, esivarastointi ja sahaus, toteutusvastuu: Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus
2) Lehtikuusisahatavaran kuivaus, toteutusvastuiden jako:
   a) Lehtikuusen lämminilma- ja alipainekuivaus, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta (alihankkijana alipainekuivauksen osalta Ympäristötekniikan instituutti YTI, Mikkeli)
   b) Lehtikuusen kuivaussimulointimallin ja kuivauskaavojen kehittäminen, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakennusmateriaalit ja –tuotteet sekä puutekniikka.
3) Lehtikuusen liimaus, ml. rajattu kirjallisuustutkimus, toteutusvastuu: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakennusmateriaalit ja –tuotteet sekä puutekniikka
4) Lehtikuusen pintakäsittely, toteutusvastuu: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakennusmateriaalit ja –tuotteet sekä puutekniikka
5) Erikoistuotteiden vaatimat toimenpiteet, toteutusvastuu: Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus; kokeelliset työt teetettiin alihankintana:
   a) Lehtikuusesta haihtuvat orgaaniset yhdisteet ja niiden merkitys käytölle, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakennusmateriaalit ja –tuotteet sekä puutekniikka (alihankkijana VTT Kemiantekniikka)
   b) Lehtikuusen käyttäjien kokemukset, hankkeessa mukana olleet yritykset

Avainsanat: *Larix*, puuaineen ominaisuudet, puutavaralajit, sahatavara, kuivaus, työstö, liimaus, pintakäsittely, emissio, orgaaniset yhdisteet, puusepänteollisuus.
Toimittajien yhteystiedot: Erkki Verkasalo, Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus, PL 68, 80101 Joensuu, puhelin (013) 251 4143, faksi (013) 251 4111, sähköposti erkki.verkasalo@metla.fi; Hannu Viitanen, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Puumiehenkuja 2 A, Espoo, PL 1806, 02044 VTT, puhelin (09) 456 5528, faksi (09) 456 7027, sähköposti hannu.viitanen@vtt.fi.
Julkaisija ja tilaukset: Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus / Metsäntutkimuslaitos / Kirjasto.
Hyväksynyt: Tutkimusjohtaja Kari Mielikäinen 11.04.2001.

SISÄLLYS

Lukijalle 4

Erkki Verkasalo; Metla, Joensuun tutkimuskeskus:
Johdanto 5

Erkki Verkasalo ja Markku Tiainen; Metla, Joensuun tutkimuskeskus:
Lehtikuusitukkien hankinta, esivarastointi ja sahaus 15

Antti Asikainen; Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta:
Lehtikuusen lämminilma- ja alipainekuivaus 23

Veikko Tarvainen, Juha Kurkela ja Hannu Viitanen; VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka:
Lehtikuusen kuivaussimulointimallin ja kuivauskaavojen kehittäminen 39

Leena Suomi-Lindberg ja Hannu Viitanen;
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka:
Lehtikuusen liimaus 67

Pirjo Ahola, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka:
Lehtikuusen pintakäsittely 87

Hannu Viitanen, Kirsi Villberg ja Kristina Saarela;
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka ja Kemiantekniikka
Lehtikuuseen haihtuvat orgaaniset yhdisteet ja niiden merkitys käytölle....99

Juhani Saimovaara; Puuseppämestarit ry:
Puuseppäyrittäjien kokemuksia lehtikuusen käytöstä 115

Ilkka Kuva, Erkki Palm ja Alpo Turunen; Vankeinhoitolaitos:
Kokemuksia lehtikuusen käytöstä Sukevan keskusvankilan ja Juuan avovankilaosaston työosastoilla 121

Hankkeen yhteenveto 129

Kirjallisuus 143

Liite: Lehtikuusi puusepänteollisuuden raaka-aineena - yhteistutkimushankkeen johto- ja projektiryhmät 151

LUKIJALLE

Käsillä oleva julkaisu sisältää tulokset Lehtikuusi puuseppänteollisuuden raaka-aineena –yhteistutkimushankkeesta, jonka toteuttivat Metsäntutkimuslaitoksen (jäljempänä Metla) Joensuun tutkimuskeskus (koordinaattori), VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan yksikkö Rakennusmateriaalit ja –tuotteet sekä puutekniikka (jäljempänä VTT) ja Joensuun yliopiston metsätieteellinen tiedekunta (jäljempänä JoY). Hankkeeseen osallistuivat lisäksi: Ympäristötekniikan Instituutti YTI, Mikkeli; Lehtikuusela Ky, Kontiolahti; Lappeenrannan PeTePu Oy; Puukeskus Oy, Lappeenranta; Oikeusministeriön vankeinhoito-osasto, Sukevan keskusvankila ja Juuan avovankilaosasto; Puuseppämestarit ry; Metlan Punkaharjun tutkimusalue; alkuvaiheessa myös Urapaanu-puukate/Matti Rantonen, Joensuu.

Hanke sai alkunsa VTT:n erikoistutkija Hannu Viitasen ideoinnista lehtikuusiyrittäjien kanssa keväällä 1997 toimiessaan Metlan puutieteen vt. professorina Joensuun silloisella tutkimusasemalla. Keskustelujen pohjalta valmisteltiin em. tutkimusyksiköiden sekä lehtikuusta käyttävien ja lehtikuusituotteita markkinoivien yritysten yhteistyönä hankesuunnitelma, joka esitettiin Tekes:in rahoitettavaksi elokuussa 1997. Tekes myönsi hankkeelle rahoitusta soveltavan teknisen tutkimuksen tutkimuslaitoshankevaroista. Hanke toteutettiin 1.1.1998-29.2.2000.

Hankkeen koordinaattorina oli Metlan Joensuun tutkimuskeskuksessa vt. professori Hannu Viitanen 1.1-30.4.1998 ja professori Erkki Verkasalo 1.5.1998-29.2.2000. Muiden tutkimusyksiköiden toteuttamien osatutkimusten vastuullisina johtajina olivat VTT:ssä ryhmäpäällikkö Pirjo Ahola (1.1.-30.4.1998) ja erikoistutkija Hannu Viitanen (1.5.1998-29.2.2000) ja JoY:ssa professori Antti Asikainen. Hankkeen toteutukseen osallistuivat lisäksi Metlassa metsätalousteknikko Markku Tiainen ja toimistosihteeri Aila Suokas Joensuun tutkimuskeskuksesta ja esimies Antero Mikkola Punkaharjun tutkimusalueesta sekä asiantuntijoina varttuneet tutkijat Teijo Nikkanen ja Martti Venäläinen Punkaharjun tutkimusasemalta ja Aili Tuimala Vantaan tutkimuskeskuksesta. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta hankkeeseen osallistuivat lisäksi tutkijat Antti Hanhijärvi, Juha Kurkela, Leena Suomi-Lindberg ja Veikko Tarvainen sekä tutkimusavustajat Juhani Piipponen, Pentti Ek ja Soili Takala ja VTT Kemiantekniikasta vastaavasti ryhmäpäällikkö Kristina Saarela, tutkija Kirsi Villberg ja tutkimusavustaja Marja-Leena Wilke. JoY:sta hankkeen toteutukseen osallistuivat lisäksi tutkija Jukka Eronen ja maa- ja metsätaloustieteiden maisterit Harri Liiri ja Timo Sakki ja yliopiston alihankkijana toimineesta YTI:sta tutkimusjohtaja Yrjö Tolonen. Loppuraportin käsikirjoituksen tarkasti Metlan tutkimusjohtaja Kari Mielikäinen.

Haluamme kiittää erikseen kaikkia tämän hankkeen loppujulkaisun kirjoittajia ja hankkeessa mukana olleita yrityksiä sekä johtoryhmän jäseniä, jotka osallistuivat aktiivisesti tutkimusten suunnitteluun, toteutukseen ja seurantaan.

Joensuu ja Espoo, helmikuu 2001

Erkki Verkasalo *Hannu Viitanen*

JOHDANTO

Erkki Verkasalo

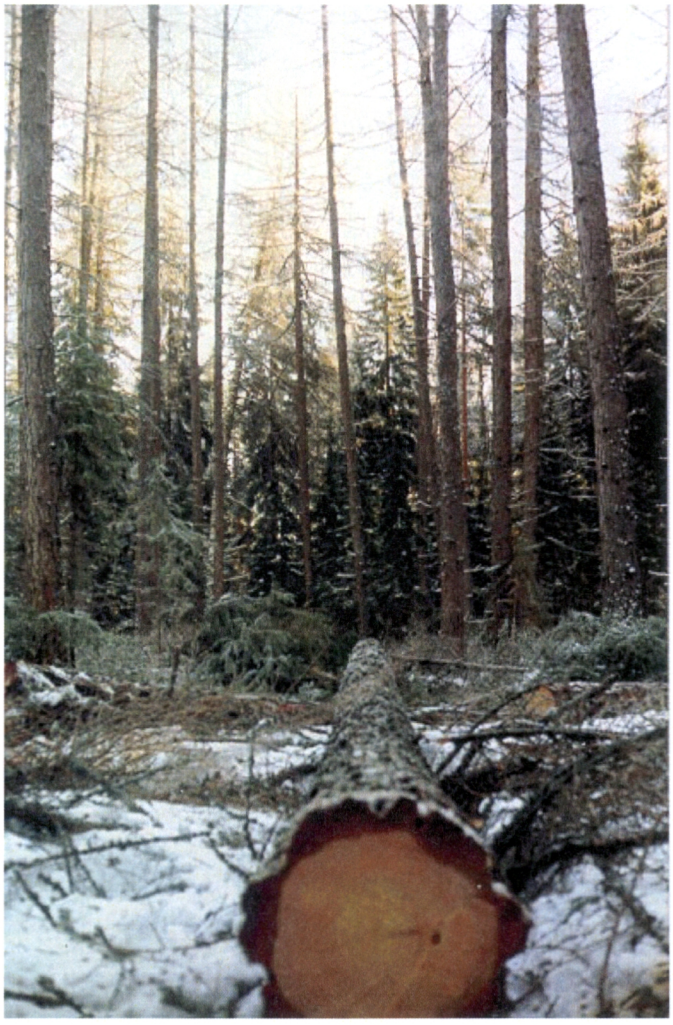
1 LEHTIKUUSIVARAT JA SAATAVUUS

Lehtikuusi on Suomessa edelleenkin viljelymetsätalouden erikois- ja maisemapuu, vaikka sen kasvatusta on pyritty edistämään moneen otteeseen. Lehtikuusen viljely alkoi jo 1700-luvulla. Lehtikuusimetsiä arvioitiin 1950-luvun lopussa olevan 1500 hehtaaria (Vuokila 1960b). Viljely lisääntyi 1980-luvulla erityisesti Metsähallituksen mailla, mutta pääpaino on ollut 1990-luvulla Etelä-Suomen peltomaiden metsittämisessä ja rehevien metsämaiden uudistamisessa. Yhteensä lehtikuusikoita on Suomessa nykyisin arviolta vajaa 20 000 hehtaaria (Silander ym. 2000). Viljelmistä on vähintään 80 % siperianlehtikuusta (*Larix sibirica* Ledeb.) (Lähde ym. 1984, Hokajärvi 1993). Lopuista viljelmistä on suurin osa euroopanlehtikuusta (*Larix decidua* Mill.) ja pieniä aloja mm. dahurianlehtikuusta (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.), kurilienlehtikuusta (*Larix gmelini* var. *japonica* (Maxim. ex Regel) Pilg.), japaninlehtikuusta (*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.) ja erilaisia lehtikuusihybridejä (Lähde ym. 1984, Silander ym. 1991).

Koska valtaosa lehtikuusikoista on nuoria, lehtikuusen puukaupallinen merkitys on vähäinen. Kokonaishakkuut ovat olleet arviolta 1000-2000 m^3/a (Verkasalo 1993). Tästäkin määrästä on vain osa ollut puukaupan piirissä, sillä varsinkin Metsähallituksen ja otaksuttavasti myös yksityismetsien lehtikuusi on käytetty valtaosin omiin rakennustarkoituksiin. - Lehtikuusitukin vuotuinen hakkuumäärä vastaa vain yhtä nykyistä suurehkoa eteläsuomalaista avohakkuuleimikkoa.

Metsiköiden ikäluokkarakenteen vuoksi lehtikuusipuutavaran tarjonta kuitenkin kasvaa tulevaisuudessa. Metsähallituksen metsissä odotetaan lehtikuusen hakkuumahdollisuuksien kasvavan 2000-luvulla 10 000 - 15 000 kuutiometriin vuodessa, kun 1960-70-luvuilla perustetut taimikot varttuvat ensiharvennusvaiheeseen (Hokajärvi 1993). Kuitupuun osuus hakkuukertymästä on tuolloin nykyistä suurempi. Suuntaus on yksityismetsissä ja yhtiöiden metsissä samanlainen.

Lisääntyvätkään lehtikuusivarat eivät pysty tyydyttämään kuin muutaman erikoistuneen lehtikuusen käyttäjän raaka-aineen tarpeen. Täten lehtikuusen teollisen käytön merkittävä laajeneminen Suomessa on mahdollista vain tuontipuun turvin, jota onkin saatavissa runsaasti Venäjältä. Tämä lienee myös perusteltua lehtikuusen laadun kannalta tarkastellen: vertailut eri lähteiden välillä viittaavat venäläisen lehtikuusiraaka-aineen selvään paremmuuteen Suomesta nykyisin saatavilla olevaan verrattuna (Verkasalo 1993).



Kuva 1. Tavanomainen lehtikuusileimikko: rungot järeitä ja solakoita, mutta usein kuivaoksaisia, mutkaisia ja lenkoja. Padasjoki, Vesijako. Kuva: Tauno Oittinen.

2 LEHTIKUUSEN TEKNISET OMINAISUUDET

Järeä puutavara on keskeisessä asemassa lehtikuusen teollisessa käytössä ja kaupassa. Lehtikuusirungot pyritään katkomaan mahdollisimman tarkoin saha- ja vaneritukeiksi ja pylväiksi, koska näistä puutavaralajeista on ajoittain paikallista pulaa; kuitupuulla taas ei ole ollut kysyntää (Verkasalo 1993). Tukkien mittavaatimukset (vähimmäispituus ja -paksuus) ovat useimmiten lievemmät kuin männyllä ja kuusella. Tukkien laatuvaatimukset eivät myöskään ole erityisen ankarat. Eräät viat, joita ei sallita mänty- ja kuusitukeissa, kuten pienet kuivat ja lahot oksat, lenkous ja lievähköt mutkat, eivät ole aina ratkaisevia lehtikuusen loppukäytössä.



Kuva 2. Lehtikuusitukeille on tyypillistä paksu kuori, jolloin kuoreton, jalostuskelpoinen osa rungosta on pienempi kuin männyllä tai kuusella, ja voimakas tyvilaajentuma, joka kuvastaa tyven kasvujännityksiä. Kuva: Tauno Oittinen.

Ainoastaan viilun leikkaukseen on vaadittu yleensä oksatonta tukkia. Tyypillistä lehtikuusen mitta- ja laatuvaatimuksille on myös suuri vaihtelu käyttäjien välillä.

Lehtikuusitukin laatukriteerit vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan. Niitä voivat olla mm. tukin asema rungossa, läpimitta, kapeneminen, lenkous, mutkaisuus, soikeus, oksien koko, laatu ja ryhmittyneisyys, muut viat, kuoren osuus, sydänpuun osuus, luston paksuus ja puuaineen tiheys (esim. Tuimala 1993, Verkasalo 1993).

Lehtikuusen oleelliset laatutekijät mekaanisessa metsäteollisuudessa liittyvät yleiseen jalostettavuuteen, lahonkestävyyteen ja puuaineen ulkonäköön (Verkasalo 1993). Yleinen jalostettavuus tarkoittaa lehtikuusella lähinnä sahattavuutta ja sorvattavuutta. Jalostettavan pölkyn järeys on molemmissa käyttömuodoissa tärkeä raaka-aineen käyttösuhteeseen vaikuttava tekijä. Myös pölkyn muodolla (suoruus ts. lenkous ja mutkaisuus, soikeus, pinnan koloisuus, kapeneminen ja sen tasaisuus) ja kuoren tilavuusosuudella on suuri vaikutus käyttösuhteeseen. Muototekijät vaikuttavat usein myös tuotteen laatuun, sillä ne ovat yhteydessä esim. vinosyisyyden, reaktiopuun ja pystyoksien esiintymiseen (Verkasalo 1993).

Lehtikuusirunkojen ja -tukkien järeyttä ja muotoa on tutkittu kaikissa niiden tilavuuden määritykseen tähdänneissä tutkimuksissa. Koska siperianlehtikuusi on luontaisesti levinnyt etupäässä Venäjälle, on näitä tekijöitä tutkittu siellä erityisen runsaasti: Tkachenko (1944), Kalinin (1961), Zaharov (1965), Anuchin (1967), Hutorschikov ym. (1967), Polyakov (1974), Mineev (1976), Bokschanin (1982) ja

Vetsheva ym. (1982), ja lisäksi pohjoismaissa: Carbonnier (1959) ja Wiksten (1962) Ruotsissa, Ilvessalo (1916, 1923), Vuokila (1960a,b), Lähde ym. (1984), Sipi (1988) ja Verkasalo (1993) Suomessa sekä Strand (1963) Norjassa. Kuoren osuutta on em. tutkimusten lisäksi selvitelty Mattsonin (1917), Lappi-Seppälän (1927) ja Hakkilan ja Winterin (1973) töissä.

Bokschanin (1982) on selvitellyt siperianlehtikuusitukin vikojen vaikutusta yksittäisen sahatavarakappaleen laatuun Siperiassa. Oksat, lähes aina kuivat oksat, määräsivät laatuluokan kahdessa kolmasosassa tapauksista. Seuraavaksi merkittävimpiä vikoja olivat halkeamat (35 %), laho (11 %) sekä lenkous ja mutkat (14 %). Verkasalon (1993) suomalaisilla lehtikuusitukeilla tekemä tutkimus osoitti samalla tavalla tukkien huonohkon muodon ja kuivaoksaisuuden yleisyyden ja haitallisuuden ja sisäoksaisuuden vaikean ennustettavuuden ulkoisen oksikkuuden perusteella sekä tukkien heikohkon laatuluokkajakauman.

Lehtikuusen tyypillisimpänä ominaisuutena mainitaan yleensä lahonkestävyys, mutta lahonkestävyys vaihtelee ja keskittyy sydänpuuhun (Paajanen ym. 1997, Viitanen ym. 1993, Viitanen ym. 1997). Keskimäärin lehtikuusen sydänpuun lahonkestvyys vastaa männyn sydänpuun lahonkestävyyttä, mutta kestävyys vaihtelee sekä eri lehtikuusilajien että myös eri puuyksilöiden välillä. Lehtikuusen pintapuun kestävyyttä ei useinkaan ole erikseen analysoitu, mutta se vaihtelee ja saattaa olla keskimäärin parempi kuin männyn pintapuun kestävyys. Lehtikuusen lahonkestävyys perustuu ilmeisesti vesiliukoisiin uuteaineisiin (Viitanen ym. 1997) - toisin kuin männyllä, jossa fenolisten haihtuvien uuteaineiden määrä on korkeampi (Viitanen ym. 2000). Lehtikuusen ja männyn pintapuut ovat molemmat alttiita saamaan sinistäjäsienitartunnan, mutta sydänpuuhun sinistymää ei yleensä tule (Tuimala 1993). Keskimäärin lehtikuusen pintapuu ei ole yhtä herkkä sinistymään kuin männyn pintapuu. Sydänpuun osuus ja läpimitta ja toisaalta pintapuuvaipan paksuus ovat olennaisimpia lehtikuusen laatuun vaikuttavia tekijöitä.

Sydänpuuta alkaa muodostua lehtikuuseen jo 10-15 vuoden iässä (Tuimala 1993). Sydänpuun osuus lisääntyy erityisesti puun ikääntyessä ja siirryttäessä rungossa alaspäin sekä kasvunopeuden hidastuessa (lustojen ohentuessa), latvuksen pienentyessä ja puun ollessa alempaa latvuskerrosta (Lappi-Seppälä 1927, Edlund 1966, Hakkila & Winter 1973). Eräässä tutkimuksessa lehtikuusirungon sydänpuun tilavuusosuus kasvoi 15 prosentista 80 prosenttiin, kun puun ikä kasvoi 16 vuodesta noin 200 vuoteen (Lappi-Seppälä 1927). Kärkkäisen (1978) mukaan pintapuulustoja oli satavuotiaissa lehtikuusissa 5-24 kpl. Sipin (1988) aineistossa 60-vuotiaiden lehtikuusten tukeissa latvaleikkauksesta mitattu sydänpuuosuus oli keskimäärin 67 % (vaihteluväli 39-89 %). – Eteläsuomalaisella männyllä sydänpuun osuus tyvitukin latvapoikkileikkauksen pinta-alasta oli Kellomäen (1981) mukaan korkeimmillaan 40-45 %.

EN-standardin 350-2 (1994) mukaan lehtikuusen sydänpuu luokitellaan samaan kestävyysryhmään kuin männyn sydänpuu, mutta siperianlehtikuusta ei ole standardissa mainittu erikseen. Standardi on vain suuntaa-antava, ja tulisi aina muistaa, että puun luontainen kestävyys vaihtelee useilla puulajeilla laajoissa rajoissa. Puun lahonkestävyys perustuu ensi sijassa puun solurakenteeseen ja kemialliseen koostumukseen, etenkin uuteainepitoisuuteen.

Käsitykset puun tiheyden vaikutuksesta puun kestävyyteen perustuvat ajatukseen, että vanhemmissa puissa tiheys on yleensä suurempi (Löyttyniemi 1988, Tuimala 1993). Toisaalta on voitu havaita, että lahonkestävyys riippuu olennaisesti puun iästä: esim nuorella lehtikuusella kestävyys on huomattavasti heikompi kuin vanhemmalla puulla (Paajanen ym. 1997, Viitanen ym. 1997). Tiheys vaikuttaa siis epäsuorasti kestävyyteen mutta ei ole vaikuttava tekijä. Kestävyyttä tarkastelleissa tutkimuksissa lahovaurioita on alkanut syntyä lehtikuusipuisissa aidantolpissa ja pylväissä, samoin puulaatoissa lyhimmillään kahden vuoden kuluessa, pisimmillään pyöreän puun kestoaika on ollut 30 vuotta (Tuimala 1993). Lehtikuusen sydänpuun arvioidaan kestävän terveenä säälle alttiina mutta maakosketuksen ulkopuolella keskimäärin 15 vuotta (mm. Alriksson 1992, Björkman 1994, Home grown ... 1967). VTT:n laboratorio- ja maakenttäkokeet (Viitanen 1999, Viitanen ym. 1998) sekä myös suomalaiset käytännön havainnot tukevat käsitystä lehtikuusen lahonkeston suuresta vaihtelevuudesta, mutta keskimäärin se vastaa männyn sydänpuun kestävyyttä.

Lehtikuusen sydänpuu vaikuttaa myös jalostettavuuteen, koska sen sisältämät runsaat uuteaineet pihkoittavat ja kuluttavat työstäviä teriä, huonontavat sahauspinnan laatua ja aiheuttavat tuotteisiin muotovikoja (Sairanen 1982). Pihkataskujen juokseva pihka aiheuttaa lehtikuusen sahauksessa enemmän ongelmia kuin männyn puuaineen runsaampi mutta puusolukkoon tasaisemmin jakautunut pihka (Tuimala 1993). Pihkaongelmia on torjuttu perinteisesti mm. sahaamalla yksi mänty- tai kuusitukki joka 5.-8. lehtikuusitukin jälkeen ja myös välttämällä sahausta kesäaikana. Lehtikuusi sisältää huomattavasti enemmän vesiliukoisia uuteaineita kuin mänty, jolloin vesiliukoisten uuteaineiden vaikutusta voidaan vähentää käyttämällä esim. vesihuuhtelua.

Lehtikuusen sydänpuuta, luston paksuutta ja puuaineen tiheyttä on tutkittu muutenkin paljon. Siperianlehtikuusta on tutkittu lähinnä Venäjällä (Vihrov 1949, Hutorschikov 1959, Hutorschikov ym. 1967, Nekhaichuk & Moskaleva 1979, Bokschanin 1982, Nekhaichuk & Bryantseva 1984, Schultze-Dewitz & Götze 1988, ks. myös Sairanen 1982) mutta myös pohjoismaissa (Lappi-Seppälä 1927, Vuokila 1960b, Halvorsen 1965, Edlund 1966, Nevalainen & Hosia 1969a,b, Hakkila & Winter 1973, Kärkkäinen 1978, Sipi 1988, Tuimala 1993).

Lehtikuusen puuaineen tiheys- ja lujuusominaisuudet eivät yleensä ole lehtikuusipuutavaran käyttöä rajoittava tekijä (Hakkila & Winter 1973, Kärkkäinen 1978, Tuimala 1993). Eräiden havaintojen mukaan lehtikuusen tiheys voi olla lähes 800-900 kg/m^3 (Paajanen ym. 1997, Viitanen ym. 1997). Lujuusarvot ovat korkeahkosta puuaineen tiheydestä johtuen yleensä korkeammat kuin männyllä tai kuusella, mutta ne ovat kuitenkin samalla tai alemmalla tasolla kuin koivulla (Sairanen 1982, taulukko 1); halkaisulujuus on kuitenkin suhteellisen heikko, mikä hankaloittaa naulauksen ja ruuviliitosten käyttöä. Lehtikuusen puuaine on erittäin kovaa mäntyyn ja kuuseen nähden, mikä voi aiheuttaa vaikeuksia puun sahauksessa, jatkotyöstössä ja myös käytössä (Tuimala 1993). Käytännön kokemusten mukaan lehtikuusi tikkuilee ja sälöilee runsaasti höylättäessä, mikä johtunee sekä puuaineen kovuudesta että alhaisesta halkaisulujuudesta johtuvasta lohkeilusta.

Taulukko 1. Siperianlehtikuusen ja männyn, kuusen ja koivun puuaineen mekaanisia ominaisuuksia (Tuimala 1993, Sairasen 1982 mukaan).

Puulaji	Kuiva-tuoretiheys, kg/m^3	Taivutuskimmo-moduuli, GPa	Taivutus-Lujuus, MPa	Puristuslu-juus, MPa	Kovuus, GPa
Siperian-lehtikuusi	490-560	12,0–14,8	96-101	47-61	3,73-4,71
Mänty	427	12,5	84	47	2,70
Kuusi	390	13,4	84	44	2,70
Koivu	495	14,8	105	53	4,31

Lehtikuusipuun hyödyllisiä esteettisiä erityispiirteitä voivat olla useissa käyttökohteissa pintapuun oksattomuus ja sydänpuun terveoksaisuus, pinta- ja sydänpuun koristeellinen värivaihtelu sekä kevät- ja kesäpuun selvä väriero. Siperianlehtikuusen oksaisuutta ovat tutkineet mm. Timofeev (1944), Hakkila ja Winter (1973), Mineev (1976), Tuimala (1984, 1991) ja Verkasalo (1993). Pintapuu on vaaleanruskehtavanvalkoista ja sydänpuu vaihtelee punaruskeasta oliivinvihreään (Tuimala 1993). Puuaineen värivaihtelua ovat tutkineet mm. Chernenko ja Tolpygin (1964). Bokschaninin (1982) mukaan värivaihtelua on kuitenkin vaikea hyödyntää, koska pintapuuta ei sen ohuuden vuoksi useinkaan jää sahatavaraan särmäyksen jälkeen.

Lehtikuusitukit sahataan aina latva edellä ja ne voidaan sahata normaalista nelisahauksesta poiketen läpisahauksella tai segmenttisahauksella tai näiden yhdistelmällä, kuten Venäjällä (Sairanen 1982). Pinnanmyötäinen sahaus on mahdollista erityisesti silloin, kun halutaan oksatonta pintapuuta mahdollisimman paljon ja halutaan käyttää hyväksi syyrakenteen koristeellisuus (Tuimala 1993).

Vuosilustojen rakenteen sisäinen ja niiden välinen vaihtelu lienee merkittävin lehtikuusisaheisiin muotovikoja aiheuttava tekijä. Rakenteen vaihtelua ilmentävät kevät- ja kesäpuun jyrkkä rajakohta ja suuri tiheysero sekä kesäpuun osuuden voimakas kasvu puun vanhetessa (Tuimala 1993). Muotovikoja aiheutuu myös rungon tyviosan voimakkaista kasvujännityksistä, jotka niinikään vaikeuttavat sahausta (Sipi 1988). Osa lehtikuusitukeista vääntyy jo sahattaessa jännitysten purkautuessa. Lehtikuusen sahatukit, erityisesti tyvitukit on syytä katkoa mäntyä ja kuusta lyhyemmiksi sekä runkomuotovikojen että sisäisten jännitysten vuoksi.

Muutokset sahatavaran mitoissa ja muodossa ovat lehtikuusta kuivattaessa suurempia ja yleisempiä kuin männyllä ja kuusella ja lehtikuusi on melko arka kosteuselämiselle (Tuimala 1993). Kirjallisuustietojen mukaan siperianlehtikuusen kuivauskutistuma ja kosteusturpoama ovat seuraavat (Sairanen 1982):

	Kutistuma	Turpoama
	%	
Säteen suunnassa	5,4	6,0
Tangentin suunnassa	12,0	11,7
Tilavuudessa	19,8	18,3

Lehtikuusella kutistuminen ja turpoaminen ovat suurempia kuin männyllä, kuusella tai koivulla, lukuunottamatta säteensuuntaisia muutoksia koivuun nähden (Juvonen ym. 1986).

Suomessa ja Venäjällä tehtyjen tutkimusten mukaan lehtikuusen kuivaus kuitenkin onnistuu, kun puun erityispiirteet otetaan huomioon (Viitanen 1997, Verkasalo 2000). Käytännössä kuivaus ei ole aina onnistunut, vaan kuivuminen on tapahtunut vasta käytön yhteydessä. Lehtikuusella kuivaus on joka tapauksessa ongelmallisempaa kuin männyllä tai kuusella: saheisiin syntyy kuivauksessa melko paljon vääntymiä ja kieroutumia, ongelmana ovat myös saheista irtoavat kuivat oksat (Tuimala 1993). Sahatavaralla on myös taipumus jossain määrin halkeilla (Chudinov 1965, Kislyi 1967, Bokschanin 1982, Sairanen 1982, Juvonen ym. 1986, Sipi 1988). Kuorittua puuta, esim. mastopuita kuivattaessa syntyy runsaasti pituussuuntaisia halkeamia (Tuimala 1993).

Lehtikuusen tähänastisissa kotimaisissa sahaus-kuivauskokeissa (Juvonen ym. 1987, Sipi 1988) on lehtikuusilautojen kuivauksessa jouduttu käyttämään korkeampia lämpötiloja kuin männyllä tai kuusella:

	Lämpötila, °C	
	Märkä	Kuiva
Lehtikuusi	48 ja 55	50-74 ja 56-65
Mänty	39	50-62

Lehtikuusella kuivausaika on joka tapauksessa pidempi kuin männyllä tai kuusella. Lehtikuusisoiroille (63*200, 75*150, 75*200) on kokeissa löydetty sopiva kuivauskaava, kun taas laudoille ei ole voitu antaa selkeää suositusta (Sipi 1988). Koekuivauksissa on syntynyt eniten muodonmuutoksia silloin, kun tukista on sahattu kolme sydänkappaletta siten, että ydin on ollut keskimmäisen kappaleen sisällä. Muodonmuutokset ovat olleet männyn ja kuusen tavoin yleisimpiä ytimen läheltä sahatuissa kappaleissa ja ne ovat vähentyneet siirryttäessä ytimestä ulospäin (Juvonen ym. 1987, Sipi 1988). Oksaisuus ja siitä aiheutuvat syysuunnan poikkeamat ovat lisänneet muodonmuutoksia.

Alustavien selvitysten mukaan höylätyn lehtikuusen pinta on väriltään vaihteleva, mutta pinta saattaa olla jopa tasaisempi kuin esim. kuusella (Viitanen 1997). Pinta on kuitenkin rasvaisen tuntuinen ja sen erityispiirteitä liimauksen kannalta ei tunneta. Aiempien kokeiden mukaan liimaus onnistuu hyvin edellyttä-

en, että kosteustila on liimattaessa oikea. Liimasauman kestävyyttä ei kuitenkaan tunneta riittävästi etenkään vaihtelevissa kosteusoloissa tai ulkokäytössä. Toisaalta lehtikuusen omia vesiliukoisia uuteaineita on voitu hyödyntää liima-aineina esim. lastulevyn valmistuksessa.

3 LEHTIKUUSEN KÄYTTÖ

Järeää lehtikuusta on käytetty ja käytetään ennen kaikkea vesi-, maa- ja kaivosrakentamisessa, mm. laituri- ja patorakenteissa, vesijohdoissa, kaivoissa, säiliöissä, pitkospuina, junttapaaluina, rata- ja kaivospölkkyinä, pylväinä, laivanrakennuksessa mastoissa ja tuki- ja kansirakenteissa ja maatilarakentamisessa (Tuimala 1993, Verkasalo 1993). Märissä käyttökohteissa lehtikuusen sydänpuun suhteellisen hyvä luontainen kosteuden-, homeen- ja lahonkestävyys ovat selviä etuja (Hakkila 1961, Sairanen 1982, Juvonen ym. 1986). Luontaisen lahonkestävyyden mahdollisuudet ovat kuitenkin rajalliset ja tässä suhteessa käyttökohteen rakenteen ominaisuudet sekä käytön rasittavuus ovat avainasemassa arvioitaessa tuotteiden kestoikää. Lehtikuusen käyttökohteet olisivat tällä perusteella lähinnä säärasitukselle tai lievälle lahoaltistukselle tarkoitetut tuotteet, jossa se voisi omalta osaltaan täydentää puutavaran tarjontaa ympäristöystävällisenä materiaalina (Viitanen 1997).

Talonrakennuksessa lehtikuusella on käyttöä jonkin verran sisustuspuuna, lähinnä seinä- ja kattopaneeleina, lattialautoina ja parkettina, ulkoverhouslautoina ja huonekaluteollisuuden raaka-aineena sekä massiivipuuna että leikattuna viiluna, ja ulkokalusteisiin (Tuimala 1993, Verkasalo 1993, Paajanen ym. 1997). Luontaisilla levinneisyysalueillaan, erityisesti Venäjällä, lehtikuusta käytetään paitsi rakennuspuuna myös lastulevyjen ja sellulloosan valmistukseen (Tuimala 1993).

Bokschanin (1971) teki Uralin, Itä-Siperian ja Venäjän kaukoidän lehtikuusta käyttävien teollisuuslaitosten piirissä kyselyn lehtikuusen käyttöä estävistä ja rajoittavista tekijöistä suhteessa mäntyyn ja kuuseen. Tärkeimmät tekijät olivat tuotteen painon kohoaminen, naula- ja ruuviliitosten teon hankaloituminen ja liitosten heikkeneminen käytössä. Muita lehtikuusipuun haittapuolia olivat kappaleiden käyristyminen kuivauksessa ja käytössä, sahauksen ja leikkauksen hankaluus, pihkavuodot ja vuosilustojen irtoaminen toisistaan.

Pelz ym. (1999) tekivät pilot-tutkimuksen nykytiedon koostamiseksi saksalaisten, itävaltalaisten ja sveitsiläisten lehtikuusipuun käyttäjien ja lehtikuusipuuta jalostavien yritysten kokemuksista ja ongelmista. Kyselytutkimuksen, johon vastasi 188 loppukäyttäjää, perusteella voitiin muodostaa selvä profiili lehtikuusipuun eduista sekä haitoista ja ongelmista. Useimmin mainittu ongelma oli levyjen ja palkkien kieroutuminen, joka oli myös pääasiallinen syy sahatavaran laatuluokan alenemiseen. Seuraavassa on yhdistelmä loppukäyttäjien vastauksista lehtikuusipuun käyttöä rajoittavista tekijöistä.

Käyttöä rajoittava tekijä	Osuus vastanneista yrityksistä, %
Saatavuus (dimensiot, määrä, laatu, satunnaisuus)	82
Pihkakuplat ja halkeamat/murtumat	72
Työkalujen, koneenosien ja terien pihkaantuminen ja juuttuminen	70
Muotoviat (erityisesti kieroontuminen)	63
Mutkaiset tukit	60
Kuivauskäyttäytyminen	56
Hinta	53
Lylypuu	48
Ytimen epäkeskisyys tukeissa	45
Puunsyiden kierteisyys (kierresyisyys)	37
Muut syyt	36

Lehtikuusta tulisi/voisi käyttää Suomessa pitkälle jalostettuihin erikoistuotteisiin, koska raaka-ainetta on vähän (Tuimala 1993). Lehtikuusi on varteenotettava raaka-aine ennen kaikkea vaativiin puusepänteollisuuden tuotteisiin, näistä erityisesti ulkokalusteisiin, ulko- ja leikkipuistorakenteisiin (myös taivutetut rakenteet), kosteiden tilojen pintamateriaaliksi, ikkunoihin ja oviin ja erilaisiin keittiötarvikkeisiin (Viitanen 1997, Verkasalo 2000). Tällaiset tuotteet sopivat erityisen hyvin pieneen ja keskisuureen tuotantoon.

Lehtikuusipuun merkitys on voimakkaassa kasvussa puurakentamisessa Keski-, Itä- ja Pohjois-Euroopassa. Pääsyyt ovat tärkeysjärjestyksessä lehtikuusen sydänpuun lahonkestävyys, mikä mahdollistaa puunsuojauskemikaalien käytön vähentämisen, erinomainen laatu tiheyden, lujuuden ja jäykkyyden suhteen sekä monet esteettiset edut (Pelz ym. 1999). Käyttökohteet ovat sekä rakennepuutavarana että rakennuspuusepänpuuna.

Lehtikuusen teollisessa jalostuksessa on kuitenkin huomattavasti epävarmuustekijöitä, koska yksityiskohtaista tietoa on vähän pyöreän puutavaran ja sahatavaran ominaisuuksien vaihtelusta. Tiedetään, että lehtikuusen uuteainekoostumus on erilainen kuin männyllä, mutta uuteaineiden merkitystä teknisiin ominaisuuksiin ei tarkemmin tunneta (Viitanen ym. 1997). Lehtikuusen työstön, kuivauksen, liimauksen ja pintakäsittelyn vaatimukset ja mahdollisuudet tunnetaan myös puutteellisesti. Lehtikuusta pidetään näissä suhteissa mäntyä ja kuusta vaikeampana materiaalina.

4 HANKKEEN TAVOITTEET

Tämän hankkeen tutkimukset olivat luonteeltaan perustutkimusta ja osin soveltavaa tutkimusta, joiden kysymyksenasettelut tehtiin pääosin mukana olleiden yritysten tarpeiden mukaan. Tarkoituksena oli laajentaa ja vahvistaa rakennuspuusepän- ja huonekaluteollisuuden materiaalipohjaa selvittämällä lehtikuusimate-

riaalin soveltuvuutta ja käytettävyyttä vaativiin puusepänteollisuuden kohteisiin (huonekalut, käyttöesineet, ulkorakenteet, kosteudelle alttiit kohteet). Erityisesti kiinnitettiin huomiota lehtikuusen kuivaukseen, liimaukseen, pintakäsittelyyn, säänkestävyyteen ja erikoistuotteiden vaatimiin toimenpiteisiin. Tavoitteena oli myös laatia perusteita lehtikuusen normittamiseen ja tuotteiden käyttö- ja ympäristöturvallisuuden arvioimiseen. Lisäksi tuettiin tutkimuksessa mukana olleiden yritysten tuotekehitystä. Hanke koostui seuraavista osatutkimuksista:

1) Lehtikuusitukkien hankinta, esivarastointi ja sahaus
   * toteutusvastuu: Metla
2) Lehtikuusisahatavaran kuivaus
   * toteutusvastuiden jako:
     a) lehtikuusen lämminilma- ja alipainekuivaus, JoY (alihankkijana alipainekuivauksen osalta YTI)
     b) lehtikuusen kuivaussimulointimallin ja kuivauskaavojen kehittäminen, VTT
3) Lehtikuusen liimaus, ml. rajattu kirjallisuustutkimus
   * toteutusvastuu: VTT
4) Lehtikuusen pintakäsittely
   * toteutusvastuu: VTT
5) Erikoistuotteiden vaatimat toimenpiteet
   * toteutusvastuu: Metla; kokeelliset työt teetettiin alihankintana
     a) lehtikuusesta haihtuvat orgaaniset yhdisteet ja niiden merkitys käytölle, VTT
     b) lehtikuusen käyttäjien kokemukset, hankkeessa mukana olleet yritykset

LEHTIKUUSITUKKIEN HANKINTA, ESIVARASTOINTI JA SAHAUS

Erkki Verkasalo ja Markku Tiainen

1 TAVOITTEET JA NIIDEN TOTEUTUMINEN

Osatutkimuksen tavoitteena oli kerätä tarvittavat empiiriset metsikkö-, runko-, tukki-, sahatavara- ja puunäyteaineistot ja samalla osaltaan selvittää tukkien esivarastoinnin ja sahaustavan merkitystä sahatavaran kuivaukseen ja työstettyjen aihioiden liimaukseen.

Pääaineisto käsitti 23 runkoa 101-vuoden ikäistä siperianlehtikuusta Metlan Punkaharjun tutkimusalueesta, joista huhti-toukokuussa 1998 sahattiin tuoreena 13 rungon tukit ja kevään 1999 sahauksia varten varastoitiin 10 rungon tukit; tuoreina sahatuista toimitettiin hankkeessa mukana olleiden yritysten omiin kokeisiin viiden rungon tukeista sahatut kappaleet.

Rungoista otettiin 2 kpl 3 m:n tyvitukkeja sekä lisäksi 3 m:n välitukki, joiden minimilatvaläpimitta oli 30 cm. Tutkimukseen otettiin myös 3 kpl 1996-97 Kiteen Puhokselta kaadetuista rungoista tehtyjä yli 40 cm:n ja 6 m:n tyvitukkeja, joita Lehtikuusela Ky oli varastoinut 2-3 vuotta. Lisäksi hankittiin materiaalia Metsähallitukselta siperianlehtikuusen harvennusmetsikkövaiheessa olevasta kloonikokeesta Keski-Suomesta, kaikkiaan 15 runkoa, joiden tukkien latvaläpimitta oli 15-30 cm. Näistä sahattiin vain 3 m:n tyvitukit 50 mm:n sahatavarapaksuuksille. Saheita ei kuitenkaan tutkittu tarkemmin, koska pikkutukista saatavien tulosten käyttösovellukset arvioitiin pieniksi järeisiin tukkeisiin verrattuna, joista tehtiin vastaavasti suunniteltua enemmän erilaisia määrityksiä. Aineiston keruun tavoitteet toteutuivat muutoin suunnitellusti sekä määrän että laadun suhteen.

2 TUKKIAINEISTOT JA NIIDEN MITTAUKSET

Tukeista mitattiin tavanomaiset ulkoiset koko- ja laatutunnukset ja ne esivarastoitiin kuoripäällisenä ulkona Pieviläisen sahalla Enossa. Taulukossa 1 on esitetty mitattujen tunnusten keskiarvot ja –hajonnat ryhmitellen koko 95 tukin aineisto keväällä 1998 sahattuihin tuoreisiin tukkeihin (51 kpl), keväällä 1998 sahattuihin ylijäreisiin, ylivuotisiin tyvitukkeihin (6 kpl) ja keväällä 1999 sahattuihin, yhden vuoden varastoituihin tukkeihin (38 kpl).

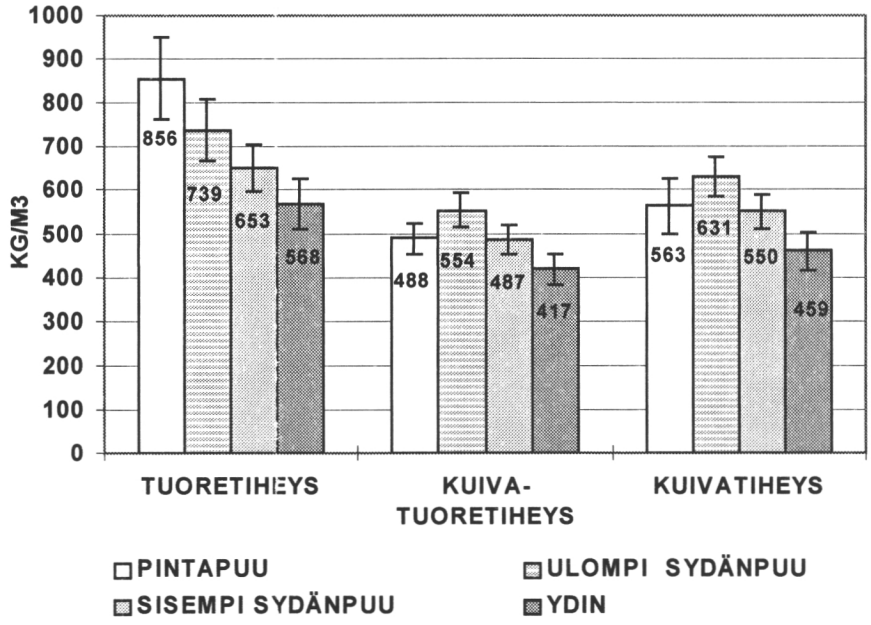
Aineiston lehtikuusitukit olivat huomattavan järeitä Suomesta normaalisti saatavilla oleviin tukkeihin verrattuna mutta ilmeisesti kuitenkin vähemmän järeitä verrattuna Venäjältä hakattaviin tukkeihin. Verkasalon (1993) laajassa puukaupan piirissä olleiden lehtikuusitukkien tutkimuksessa suomalaisten siperianlehtikuusitukkien kuorellinen latvaläpimitta oli keskimäärin 23,5 cm eli 2,5 cm pienempi kuin tähän tutkimukseen metsästä hankituilla tukeilla ja 4 cm pienempi kuin tämän

Taulukko 1. Aineiston lehtikuusitukkien koko- ja laatutunnuksia ryhmiteltynä keväällä 1998 sahattuihin tuoreisiin tukkeihin (tuoreet tukit), keväällä 1998 sahattuihin ylijäreisiin, ylivuotisiin tyvitukkeihin (ylijäreät tukit) ja keväällä 1999 sahattuihin, yhden vuoden varastoituihin tukkeihin (varastoidut tukit).

Tunnus		Tuoreet tukit	Ylijäreät tutkit	Varastoidut tukit	Kaikki tukit
Havainnot (N), kpl		51	6	38	95
Tyviläpimitta (kuorellinen), mm	$\bar{x}$	336	663	335	356
	s	98	127	104	129
Latvaläpimitta (kuorellinen), mm	$\bar{x}$	256	515	270	277
	s	55	59	51	97
Latvaläpimitta (kuoreton), mm	$\bar{x}$	244	491	250	262
	s	51	41	57	80
Latvakuoren paksuus (2x), mm	$\bar{x}$	12	15	20	15
	s	6	6	9	8
Sydänpuun läpimitta latvassa, mm	$\bar{x}$	199	431	208	217
	s	50	42	58	77
Sydänpuun pinta-alaosuus latvassa, %	$\bar{x}$	64,3	76,9	68,1	66,6
	s	15,4	2,9	9,5	13,7
Suurin elävä oksa, mm	$\bar{x}$	7	0	6	6
	s	15	0	16	15
	0-arvot, %	80	100	89	85
Suurin kuollut oksa, mm	$\bar{x}$	24	28	27	25
	s	24	24	22	23
	0-arvot, %	31	33	32	32

tutkimuksen kaikilla tukeilla keskimäärin. Bokschaninin (1982) mukaan venäläisten lehtikuusitukkien keskiläpimitta vaihtelee 28-33 cm kasvualueesta riippuen (keskipituus 5,5-6,1 m). Siperiassa lehtikuusitukit ovat vanhojen lehtikuusikoiden suuren osuuden vuoksi hyvinkin järeitä (Mineev 1976, Sairanen 1982).

Oksikkuudeltaan lehtikuusitukit olivat verraten hyvälaatuisia. Verkasalon (1993) tutkimuksessa suomalaisten siperianlehtikuusitukkien paksuin elävä oksa oli keskimäärin 17 mm ja tyvitukeissa 7 mm ja kokonaan vailla eläviä oksia oli 52 % kaikista tukeista ja 80 % tyvitukeista; tämän tutkimuksen tukit olivat terveoksaisuudeltaan kummallakin em. tunnuksen perusteella arvioituna laadukkaampia. Verkasalon (1993) tutkimuksessa vastaavasti tukkien paksuin kuollut oksa oli keskimäärin 22 mm ja tyvitukeissa 15 mm mutta kokonaan vailla kuolleita oksia oli vain 13 % kaikista tukeista ja 12 % tyvitukeista; tämän tutkimuksen tukit olivat kuivaoksaisuudeltaan oksan paksuuden perusteella arvioiden hieman huonolaatuisempia mutta kuivaoksattomuuden esiintymisen perusteella arvioiden laadukkaam-

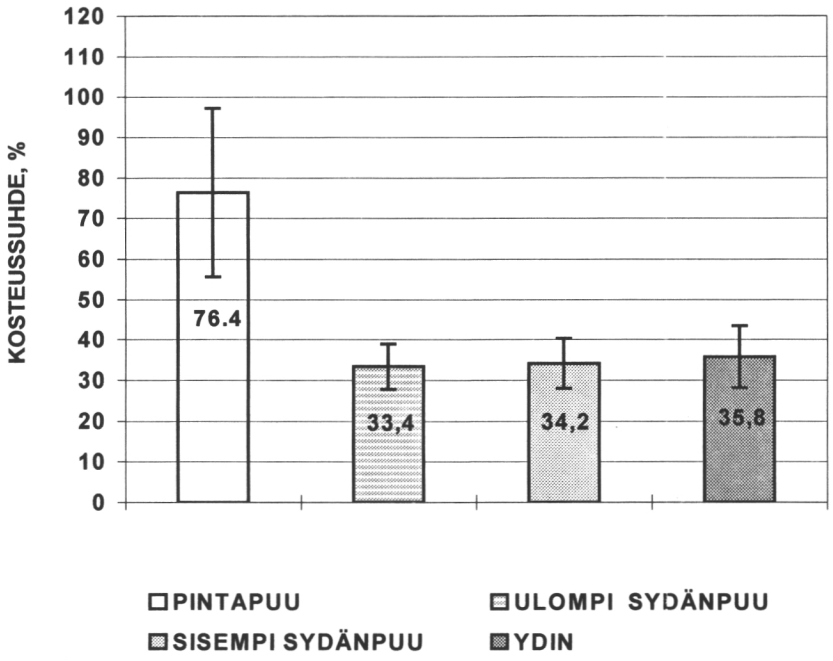


Kuva 1. Lehtikuusirunkojen puuaineen tuore-, kuiva-tuore- ja kuivatiheyden keskiarvot ja –hajonnat säteensuunnassa. Havainnot kuuden metrin korkeudelta.

pia. Vuokilan (1960b) ja Kiellanderin (1966) tutkimuksissa siperianlehtikuusi kuvataan hento-oksaiseksi muihin lehtikuusilajeihin verrattuna. Lähteen ym. (1984) aineistossa tyvitukin paksuin oksa oli siperianlehtikuusella yleensä n. 2 cm.

Runkovikojen esiintymisen suhteen lehtikuusitukit olivat hyvälaatuisia: 86 % niistä oli virheettömiä, vioista esiintyi lähinnä mutkia ja lenkoutta, pienessä määrin myös lievää tyvilahoa, koroja ja sydänhalkeamia. Verkasalon (1993) tutkimuksen siperianlehtikuusitukeista oli suoria 45 % (leimikoiden välinen vaihtelu 0-90 %), Sipin (1988) pienessä aineistossa 32 %. Vuokilan (1960b) siperianlehtikuusen aineistossa täysin suoria runkoja oli 38 % ja teknisen laadun suhteen tyydyttäviä 74 %; tukkipuuikäisissä lehtikuusikoissa hyvämuotoisten runkojen osuus oli näitä keskiarvolukuja suurempi. Bokschaninin (1982) mukaan niiden lehtikuusitukkien osuus, joilla on lenkoutta tai mutkia korkeintaan 1 cm/m, on Siperiassakin vain 14 %.

Punkaharjun lehtikuusirungoista otettiin kiekkonäytteet puuaineen ominaisuuksien mittaamiseksi 6 metrin korkeudelta eli tyviosan toisen tukin päästä. Joka kiekosta otettiin näytepalat (30 mm * 30 mm * 30 mm) neljältä säteeltä sisemmästä ja ulommasta sydänpuusta ja pintapuusta ja lisäksi yksi pala ydinpuusta. Pinta- ja sydänpuun keskimääräiset säteet olivat tällä korkeudella 2,1 ja 11,8 cm



Kuva 2. Lehtikuusirunkojen puuaineen kosteussuhteen keskiarvot ja –hajonnat säteensuunnassa. Havainnot kuuden metrin korkeudelta.

eli sydänpuuta oli poikkileikkauksessa keskimäärin 71,7 %. Tulos oli suomalaiseksi päätehakkuuikäiseksi lehtikuuseksi tavanomaisella tasolla (Tuimala 1993).

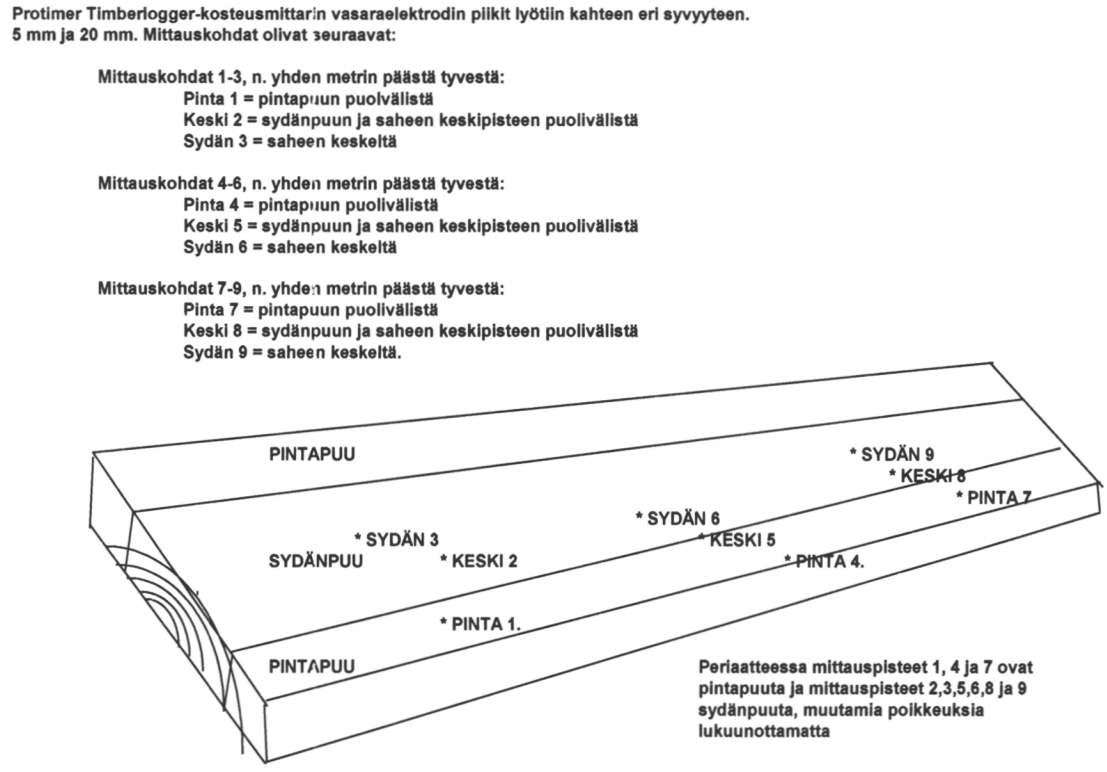
Lehtikuusimateriaali oli suomalaiseksi huomattavan tiheälustoista, vuosiluston levys oli pintapuussa keskimäärin 1,08 mm (s = 0,26) ja sydänpuussa 2,07 mm (s = 0,29). Puuaineen tiheysarvot olivat kuitenkin varsin tavanomaisella tasolla (Hakkila & Winter 1973, Kärkkäinen 1978, Tuimala 1993). Keskimäärin tuore-, kuiva- ja kuiva-tuoretiheys olivat pintapuussa 856, 563 ja 488 kg/m^3 (s = 94, 65 ja 36) ja sydänpuussa 716, 608 ja 535 kg/m^3 (s = 61, 42, 36), puuaineen keskimääräinen kosteussuhde oli vastaavasti 76 ja 33 % (s = 21 ja 6 %). Venäläiseen siperianlehtikuuseen verrattuna aineiston tukkien vuosilustot olivat kuitenkin vielä verraten paksuja ja tiheys matalalla tasolla (Bokschanin 1982, Sairanen 1982).

Puuaineen tiheys- ja kosteustulokset on esitetty poikkileikkauksen mukaisen aseman mukaan jaotellen kuvissa 1 ja 2. Tiheyden vaihtelu säteen suunnassa oli varsin vähäistä. Pintapuun alhaisempi tiheys uloimpaan sydänpuuhun verrattuna oli oletusten vastaista.

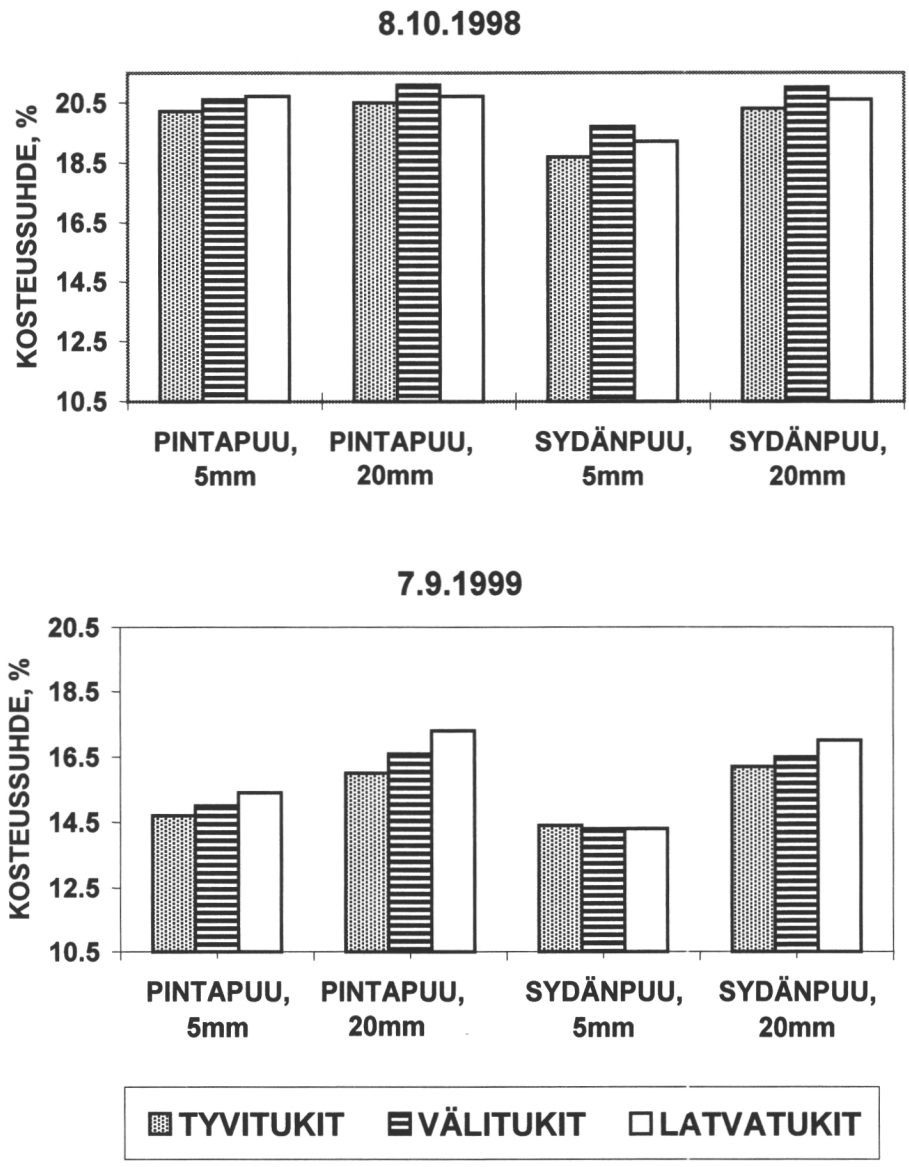
3 SAHEAINEISTOT JA KOSTEUDEN SEURANTA

Punkaharjun ja Kiteen tukit läpisahattiin pääasiassa 50 mm:n sahatavarapaksuuksille, pinnoista otettiin kuitenkin myös 32 mm:n saheita sahaussaannon pitämiseksi kohtuullisella tasolla. Tyvitukeilla kokeiltiin pinnansuuntaista sahausta, joka kuitenkin johti sydäntavaran muoto-ongelmiin (kartiomaisia saheita). Muutenkin erikoissahausasetteiden soveltaminen oli ongelmallista käytetyllä pyörösahauskalustolla (mittatarkkuus, sahatavaran saanto ja laatu). Sahaukset jälkeen saheet laatuluokiteltiin ja niistä määritettiin viat (oksaisuus, vinosyisyys, muoto- ja kasvuviat, pihkataskut), minkä jälkeen ne toimitettiin kuivaustutkimuksiin VTT:lle, JoY:lle ja hankkeessa mukana olleille yrityksille.

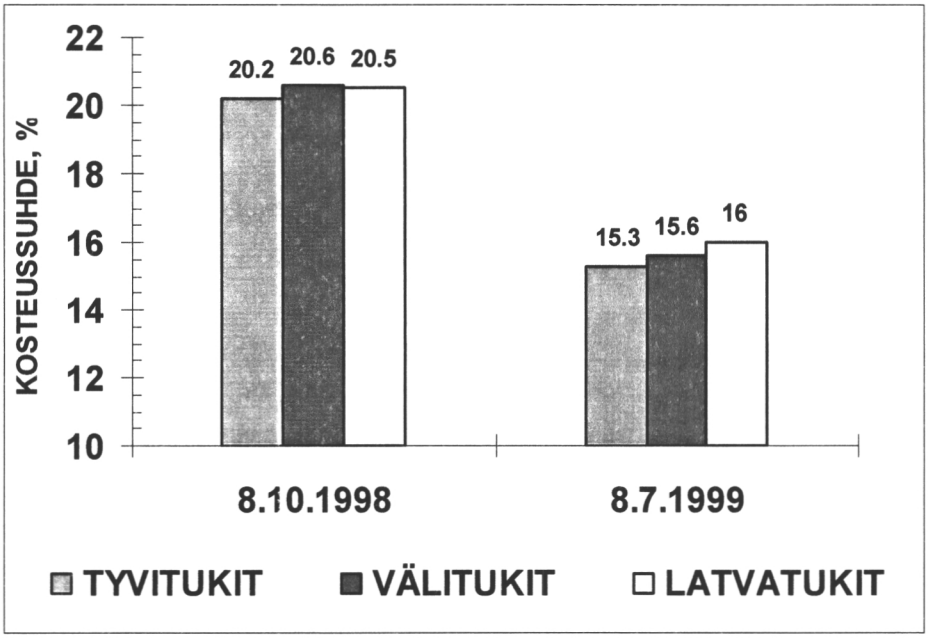
Tutkimuksia varten hankittiin myös Puukeskus Oy:n toimittamaa, Venäjältä tuotua lehtikuusisahatavaraa (50*125 mm) kuivaus- ja liimaustutkimuksia varten sekä Lehtikuusela Ky:n Venäjältä Krasnojarskin alueelta hankkimaa lehtikuusisahatavaraa (50*150 mm) kuivaustutkimuksia varten. Näiden materiaalien alkuperä vaihteli ja puutavara tuli Suomeen sahattuna ja laivauskuivana. Vertailumateriaaleiksi hankittiin aiemmin kaadettua ja kuivattua mäntyä ja haapaa.



Kuva 3. Ulkokuivatun lehtikuusisahatavaran kosteuden mittauksen toteutustapa.



Kuva 4. Ulkokuivatun lehtikuusisahatavaran pinta- ja sydänpuun kosteussuhde tukkilajeittain mittauksissa 8.10.1998 (ylh.) ja 8.7.1999 (alh.).



Kuva 5. Ulkokuivatun lehtikuusisahatavaran keskimääräinen kosteussuhde tukkilajeittain mittauksissa 8.10.1998 ja 8.7.1999.

Ulkokuivauksessa olleen sahatavaran kosteuden kehittymistä eri osissa saheita seurattiin tavanomaisin mittauksin Metlan resistanssityyppisellä Protimer Timberlogger-piikkikosteusmittarilla (kuva 3). Kosteusmittari kalibroitiin antamaan samat tulokset kuin JoY:n toinen, tyypiltään vastaava kosteusmittari. Lisäksi tehtiin kalibrointimittauksia näytepalojen uunikuivatusmenetelmällä; mittarin antamat tulokset kosteussuhteessa poikkesivat keskimäärin $\pm$ 0,6 %-yksikköä uunikuivatusmenetelmän antamista tuloksista.

Kosteusseurantaa varten sahe-erä taapeloitiin rimoille sydänpuoli alaspäin ja peitettiin irtokatteella Enon Pieviläisen sahan alueelle huhtikuussa 1998. Seurannan lähtökosteuksia ei kuitenkaan mitattu saheista. Kosteusmittaukset tehtiin 8.-9.10.1998 ja 8.7.1999. Saheissa ei havaittu mittausten yhteydessä poikkeuksellisen suurta halkeilua tai kieroutumista. Pintapuolella havaittiin kuitenkin jo ensimmäisen mittauksen aikana jonkin verran käyttöä haittaavia ohuita pintahalkeamia, jotka pahenivat mittauskertojen välillä. Sinistymää ja hometta oli muutamissa saheissa, pääosin pintapuun osuudella ja aivan pintakerroksessa.

Sahatavaran kosteuden seurantatulokset ovat kuvissa 4 ja 5. Kuivuminen ulkokuivauksessa samoin kuin kuivauksen lopputulos noudattivat lehtikuusella samoja malleja kuin normaalisti männyllä ja kuusella. Lokakuussa 1998 kosteussuhde oli 19-21 %, mikä vastasi laivauskuivaa puutavaraa; heinäkuussa 1999 kosteussuhde oli kuivan kesän ansiosta enää 15-16 %. Tyvitukkien saheiden kosteus oli molemmilla mittauskerroilla alhaisempi kuin väli- tai latvatukkien saheiden

kosteus, erityisesti pintapuussa. Sydänpuun pintaosan kosteus oli jonkin verran alhaisempi kuin pintapuun sisäosan ja sydänpuun kosteus. Kosteuden aleneminen oli pintapuussa hieman nopeampaa kuin sydänpuussa.

Voidaan olettaa, että saheiden kosteus oli sekä pinta- että sydänpuussa jonkin verran alemmalla tasolla kuin runkojen kiekkonäytteistä luvussa 2 kuvatulla tavalla määritetty kosteus. Tällä perusteella kuivuminen olisi ollut ensimmäiseen mittauskertaan mennessä huomattavasti nopeampaa kuin ensimmäisen ja toisen mittauskerran välillä. Kosteuden alenemisen hidastuminen kuivumisen edistyessä on luonnollista kaikessa puutavaran kuivauksessa.

LEHTIKUUSEN LÄMMINILMA- JA ALIPAINEKUIVAUS

Antti Asikainen

1 JOHDANTO

1. 2 Tutkimuksen tausta

Lehtikuusen kuivaaminen on ongelmallista, koska kuivattaessa se yleensä halkeilee voimakkaasti. Syynä tähän on säteen ja tangentin suuntaisen kutistumisen suuri ero (esim. Fagerstedt ym. 1996). Juvonen ym. (1986) toteavat, että lehtikuusen kuivausaika on pidempi kuin kotimaisilla havupuilla. Pihkan kiehuminen ja kieroutuminen ovat merkittävämmät kuivausviat. Vaikka halkeilu ei yleensä olekaan kuivauksessa ongelma, siihen on kiinnitettävä huomiota paksun sahatavaran kuivauksessa. Koska kuivuminen on hidasta, vaarana on pinnan liian nopea kuivuminen. Myös kuivausjännitykset ovat tällöin ongelmana. Lämminilma- ja kuumakuivauksen välillä ei ole havaittavaa eroa (Juvonen ym. 1983).

Edelleen verrattaessa kuusesta ja lehtikuusesta sahattuja koekappaleita kieroutuvat lehtikuusikappaleet kuivauksessa enemmän kuin kuusikappaleet (Juvonen ym. 1987). Erityisesti kieroutuvat oksaisesta lehtikuusitukista sahatut kappaleet, kun taas vähäoksaisen ja oksaisen kuusitukin kieroutumisessa ei ole kovin suurta eroa. Lehtikuusella häiriöt syyrakenteessa tuntuvat siten lisäävän kieroutumista. Eniten kieroutuvat kappaleet sijaitsevat yleensä lähinnä tukin ydintä (Juvonen ym. 1987).

Sipi (1988) ei saanut tutkimuksessaan selviä tuloksia dimension vaikutuksesta sydäntavaran muodonmuutoksiin. Dimension paksuuden kasvaessa muodonmuutosviat ja halkeamat yleensä lisääntyivät. Leveydellä ei näyttänyt olevan selvää vaikutusta kuten ei myöskään leveyden ja paksuuden suhteella.

Sipin (1988) tutkimuksessa sahaustavalla oli merkittävä vaikutus sydäntavaran kieroutumiseen ja syrjävääryyteen. Sydäntavarakappaleet, jotka sisälsivät tukin ytimen, kieroutuivat yli kolminkertaisesti sydän halki sahattuihin tai ydinkappaleen ympäriltä otettuihin kappaleisiin verrattuna. Myös syrjävääryys oli ydinkappaleissa selvästi suurempaa kuin muissa kappaleissa. Kieroutuminen ja syrjävääryys vähenivät kappaleen etäisyyden ytimestä kasvaessa.

1.2 Tutkimuksen tavoite

Tämän tutkimuksen ensisijaisena tarkoituksena oli selvittää lehtikuusen kuivumista lämminilma- ja alipainekuivauksessa. Lisäksi selvitettiin, miten lehtikuusen varastointi ulkona tukkeina sekä läpisaheina vaikuttaa kuivaustulokseen. Kokeissa

tuotettua empiiristä lehtikuusen kuivausaineistoa käytettiin vertailuaineistona VTT:n Laatukamari –kuivaussimulaattoriohjelman kalibroinnissa lehtikuuselle sopivaksi.

Tutkimuksessa verrattiin saheiden kosteuspitoisuutta, halkeamia ja muodon- ja värinmuutoksia kaikkiaan kahdeksan kuivauserän välillä. Normaaleja lämminilma- ja alipainekuivauseriä oli kumpiakin kolme. Mukana oli myös kaksi lämminilmakuivauserää, joista toisen saheita oli varastoitu tuoreena vuosi ennen kuivausta ja toisessa raaka-ainetta oli varastoitu vuosi tukkeina ennen sahausta ja kuivausta.

2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Aineiston alkuperä, valmistus ja varastointi

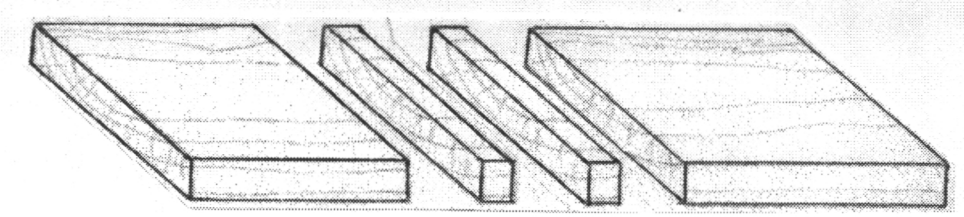
Tutkimusmateriaali koostui Metsäntutkimuslaitoksen Puhoksen tutkimusalueesta talvella 1997-1998 kaadetuista siperianlehtikuusista. Puiden ikä oli 101 vuotta. Rungot katkottiin tukeiksi, jonka jälkeen tukit merkittiin tunnistamista varten. Lisäksi mitattiin tukkien latvaläpimitat ja pituudet.

Osaa tukeista varastoitiin sahalla kuoripäällisenä ulkona ja osa sahattiin heti kaadon jälkeen. Tukit sahattin pyörösahalla Enossa. Saheet numeroitiin puun ja tukkien mukaan. Jokaisesta tukista läpisahattiin kuoripäällisenä neljä 50 mm paksua sahetta. Sahauksen jälkeen saheet niputettiin ja käärittiin muoviin kuivumisen estämiseksi. Ennen kuivausta nippuja säilytettiin kylmähuoneessa, jonka lämpötila oli 5-7 °C ja suhteellinen kosteus 70-80 %. Vuoden varastoitujen tukkien ja saheiden varastointi tapahtui ulkona.

2.2 Kuivauskokeet

Saheista katkottiin 120 cm pitkiä koekappaleita kuivauskokeita varten. Koekappaleita otettiin tyvi-, väli- ja latvatukkien saheista. Lähtökosteuden ja kuivatuoretiheyden mittaamiseksi leikattiin kaksi sentin paksuista viipaletta n. 25 cm:n etäisyydeltä saheen päästä (kuva 1). Kuivauserät käsittivät 23 – 28 sahetta. Kuivauskuormat rimoitettiin 25 mm paksuilla rimoilla siten, että sahekerrosten väliin tuli 3 rimaa, yksi keskelle ja yhdet kuorman molempiin päihin noin 5 cm:n etäisyydelle kuorman päädystä.

Lämminilmakuivaukset tehtiin Joensuun yliopiston metsätieteellisen tiedekunnan laboratoriokuivaamossa. Alipainekuivaukset tehtiin Mikkelin koulutusyhtymän alipainekuivaamossa Mikkelissä. Kuivaamot olivat saksalaisen Brunner Trockentechnik GmbH:n valmistamia, automatiikalla varustettuja, jaksoittain toimivia kuivaamoja. Kuivaamoissa oli yläpuhaltimet, joiden puhallussuuntaa ja -aikaa voitiin säädellä.



Kuva 1. Tiheys- ja kuivauskoepalojen sijainti saheissa, palojen paksuus n. 1 cm.

Kuivausprosessia ohjattiin esisäädetyn kuivauslämpötilan ja kuivausvoiman lisäksi kuivattaviin kappaleisiin asennettujen, puun kosteutta mittaavien anturiparien avulla. Anturipareja oli 6 kpl sekä pintapuun että puun keskiosan kosteuden mittaamiseen. Anturit sijoitettiin kuivauskuorman keskelle, jossa kuivuminen on hitainta. Anturipareja varten porattiin reiät vähintään 30 cm:n päähän sahatavaran päistä. Toinen pari asennettiin 25 mm:n ja toinen 15 mm:n syvyyteen samaan kappaleeseen. Yhteensä antureita tuli kuuteen sahatavarakappaleeseen. Näin saatiin tietoa pintapuun ja puukappaleen keskiosan kuivumisesta. Prosessin ohjauksessa käytetty tieto saatiin kappaleen keskellä olleiden antureiden kautta.

Kuivauksen etenemistä ohjasi mikrotietokone ja siinä oleva kuivaamon valmistajan toimittama tietokoneohjelmisto. Ennen kuivausta laadittiin kuivauskaava, jonka perusteella kone valvoi ja ohjasi kuivausta. Kone rekisteröi myös kuivauksen etenemisen. Tietokoneelle syötettiin haluttu loppukosteus, lämmitysaika, kuivauslämpötila ja kuivausvoima kussakin kuivausvaiheessa sekä tasaannutus- ja jäähdytysajat lämpötiloineen ja puhallustehoineen. Lisäksi voitiin säätää puhallusnopeutta ja puhallusaikaa.

Ohjelma sääti ennakkoon syötettyjen parametrien mukaan kuivaamoon sellaiset olosuhteet kuin ko. kuivauskaava vaati. Ennakkoon valitun ajanjakson välein ohjelma tallensi kuivaukseen käytetyn ajan, puun kosteuden, pintapuun ja puun keskiosan kuivuusasteen erotuksen, puun tasapainokosteuden, kuivausvoiman, psykrometrieron ja lämpötilan puun sisällä.

2.3 Mittaukset

Ennen kuivausta sahatavarakappaleiden kosteus määritettiin punnitsemalla saheista leikatut 1 cm paksut kappaleet tuoreina, jonka jälkeen ne kuivattiin uunikuiviksi pitämällä niitä yhden vuorokauden ajan 103 °C (± 2 °C) lämpötilassa. Tämän jälkeen kappaleet punnittiin uudestaan. Lähtökosteus laskettiin kaavalla:

$$\text{Puun kosteus (\%)} = 100 * \frac{\text{alkumassa - loppumassa}}{\text{loppumassa}}$$

Samaa kaavaa käytettiin myös laskettaessa kuivatun sahatavaran kosteus ja määritettäessä kosteusgradientteja.

Kuiva-tuoretiheyden määritystä varten tuoreesta sahatavarasta leikattiin jo aiemmin poikittaissuunnassa n. 1 cm paksut kappaleet vähintään 25 cm etäisyydeltä sahatavaran päästä, jonka jälkeen niistä leikattiin suorakulmaiset särmiöt, joiden tilavuudet mitattiin. Särmiöiden dimensiot mitattiin työntömitalla 1/100 mm:n tarkkuudella. Särmiöitä kuivattiin 103 °C lämpötilassa 24 tuntia. Tämän jälkeen särmiöt punnittiin tarkkuusvaa'alla. Kuiva-tuoretiheys määritettiin jakamalla kuivamassa tuoretilavuudella.

Värinmuutosten mittaukseen käytettiin Minoltan ja Canonin spektrofotometrejä. Laitteilla voidaan mitata valon eri aallonpitoisuuksia vastaavat säteilyn intensiteetit. Heijastusspektreistä määritettiin L*a*b*- värikoordinaatit: L*:n suuret positiiviset luvut osoittavat värin kirkkautta, a*:n positiiviset luvut osoittavat punaista ja negatiiviset arvot vihreää sekä b*:n positiiviset arvot keltaista ja negatiiviset sinistä. Spektrofotometrit kalibroitiin siten, että 100 prosentin heijastus vastasi valkoista ja 0 prosentin heijastus mustaa näkyvän valon alueella.

Värinmuutokset mitattiin kuivaamokuorman toisilla sivuilla olleilla testikappaleilla (6 kpl) ennen kuivauksen alkua ja sen jälkeen. Mittaukset tehtiin saheiden sydänpuolelta aina samoista kohdista siten, että sydänpuusta ja pintapuusta väri mitattiin kolmesta kohdasta. Ennen kuivauksen alkua puhdistettiin mitattavat pinnat höyläämällä ne kevyesti. Kuivausten lopussa pinnat puhdistettiin pyyhkimällä. Jotta saatiin selville värinmuutokset syvemmällä puuaineessa, tehtiin toisilla koekappaleilla mittaukset siten, että ensin mitattiin säteilyn intensiteetti kuivatulta ja puhdistetulta pinnalta, tämän jälkeen höylättiin mitatuista kohdista n. 1 mm:n kerros ja tehtiin mittaukset uudestaan.

Saheiden loppukosteus määritettiin punnitus-kuivaus -menetelmällä leikkaamalla n. 1 cm paksu kappale 30 cm:n etäisyydeltä saheen päästä. Koekappale kuivattiin uunikuivaksi samalla tavalla kuten alkukosteutta määritettäessä.

Kosteusgradienttien määrittämiseksi loppukosteuden määritystä varten leikatun viipaleen vierestä leikattiin toinen, n. 1 cm paksu viipale, joka leikattiin n. 10 cm leveäksi suorakulmaiseksi särmiöksi. Seuraavaksi särmiö leikattiin viiteen samankokoiseen palaan samansuuntaisin leikkauksin pinnan ja sydänpuolen kanssa (kuva 2). Syntyneiden kappaleiden kosteus määritettiin punnitus-kuivaus -menetelmällä, jolloin saatiin tieto kosteuden jakautumisesta puun sisällä.

Kuivauksessa syntyneet halkeamat jaettiin kolmeen ryhmään. Jako perustuu European Drying Group´in (EDG) kuivauslaatusuosituksiin sahatavaralle vuodelta 1994. Suomalaisen termistö on peräisin VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikalta (Tarvainen & Forsén 1996).

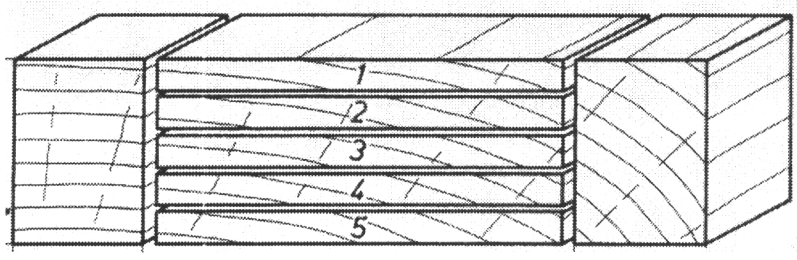
Pintahalkeamat (kuva 3) syntyvät yleensä kuivauksen alkuvaiheessa, kun sahatavaran pinta kuivuu keskiosaa nopeammin. Tällöin pintaosaa märempi keskiosa estää sahatavaran pintakerrosten kutistumista, jolloin suuret pinnalla vallitse-

vat vetojännitykset voivat johtaa halkeiluun (Tarvainen & Forsén 1996). Pintahalkeamiksi luokiteltiin halkeamat, jotka sijaitsivat saheiden pintapuolella, pois lukien päädystä alkaneet alle 50 mm pitkät halkeamat. Jos halkeamat sijaitsivat välittömästi rinnakkain mitattiin ne siltä osin yhtenä halkeamana.

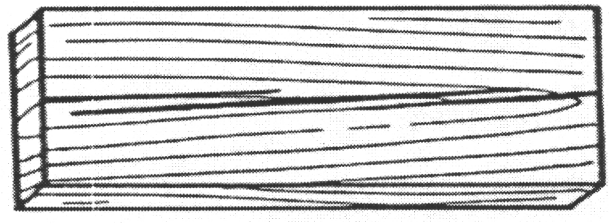
Sisä- ja päähalkeamat (kuva 4) ovat nähtävissä sahatavaran päiden poikkileikkauksessa ja niiden pituus voi olla muutamasta millimetristä useisiin satoihin millimetreihin. Päähalkeamiksi luokiteltiin päiden poikkileikkauksessa pintaan ulottuvat halkeamat, joiden pituus pinnassa oli < 50 mm.

Ydinhalkeamat (kuva 5) ovat säteen suuntaisia halkeamia, jotka näkyvät puun poikkileikkauksessa ja ovat yleensä huomattavan pitkiä puun pituussuunnassa. Nämä halkeamat alkavat yleensä ytimestä tai ovat suuntautuneet ytimen suuntaan. Ydinhalkeamia esiintyy sahatavarassa, joka sisältää ytimen tai jos se on sahattu aivan ytimen läheltä. Ydinhalkeamien erottaminen sydänpuolella esiintyvistä muista halkeamista voi olla vaikeaa.

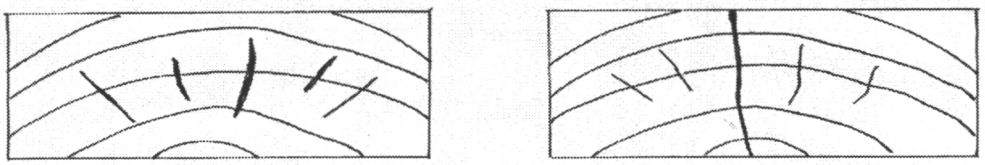
Kieroudella tarkoitetaan saheen kierremäistä poikkeamaa tasosta (kuva 6). Kierous mitattiin siten, että sahatavarakappale asetettiin tasaiselle alustalle pintapuoli alaspäin ja mitattiin kappaleen ylhäällä olevan kulman poikkeama tasosta. Myöhemmin kyseiset arvot muunnettiin vastaamaan poikkeamaa 100 mm:n päästä kappaleen tasossa kiinni olevasta reunasta. Muunnos tehtiin tulosten yhteismitallistamiseksi, sillä kappaleiden leveydet vaihtelivat suuresti.



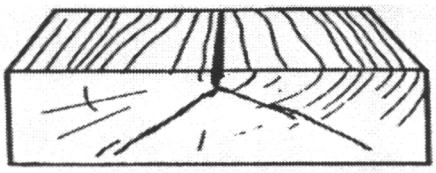
Kuva 2. Näytteet kosteusgradientin määrittämiseksi ja niiden sijainti. 1 = pintapala, 2 = välipala, 3 = keskipala, 4 = välipala, 5 = sydänpala.



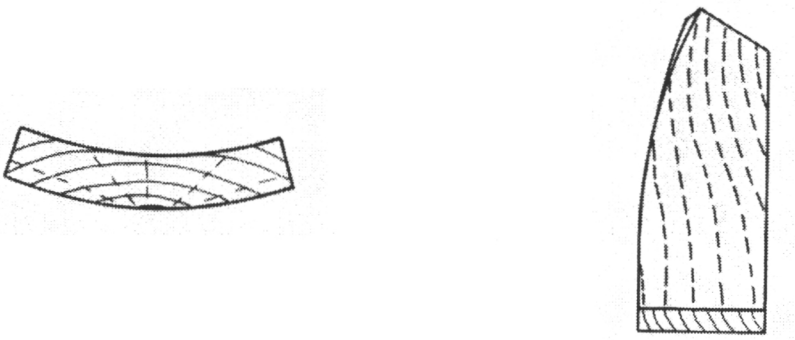
Kuva 3. Pintahalkeamia.



Kuva 4. Sisä- ja päähalkeamia.



Kuva 5. Ydinhalkeamia.



Kuva 6. Kuperuus ja kierous.

Kuperuudella tarkoitetaan kappaleen poikittaista poikkeamaa tasosta (kuva 6). Kuperuuden suuruus mitattiin tarkoitusta varten valmistetulla työntömitalla kappaleen koveralta puolelta. Työntömitan muodostaman 100 mm:n jänteen ja sahatavaran koveran pinnan etäisyys mitattiin työntömitan kielen avulla. Kuperuudesta etsittiin suurin arvo.

2.4 Kuivauskuormat

Kuivauskuormat rakennettiin kuivaamovaunun päälle n. yhden metrin levyisiksi. Kuudessa alimmassa kerroksessa oli vierekkäin kolme ja kahdessa ylimmässä kaksi kappaletta. Kahteen ylimpään kerrokseen valittiin leveitä kappaleita. Kerrosten välissä käytettiin 25 mm paksuja välirimoja. Yhdessä välissä oli kolme rimaa, yksi kummassakin päässä ja yksi keskellä.

Kuivaamokuorman kappaleet olivat tarpeeksi pitkiä täyttämään tilan pituussuunnassa tarkasti, joten ilmankierto estyi kuorman päiden kautta. Tällä pyrittiin ehkäisemään päiden liiallista kuivumista. Kuivaamokuorman kiskorakennelma esti ilmankierron alakautta. Yläpuolinen ilmankierto estettiin kuivaamon katosta alas laskettavalla ilmanohjaimella.

2.5 Kuivauskaavat

Kuivauserien kuivauskaavat on esitetty taulukossa 1. Erällä Lämminilmakuivaus 1 käytettiin kuivaamon valmistajan laatimaa kaavaa. Erällä Lämminilmakuivaus 2 em. kaavaa muutettiin siten, että kuivausvoimia laskettiin hieman ja vastaavasti nostettiin lämpötiloja. Erällä Lämminilmakuivaus 3 lämpötilat olivat samat kuin 2. kuivauksessa, mutta kuivausvoimat olivat suuremmat kuin 1. kuivauksessa.

Alipainekuivauksissa lämpötilat ja kuivausvoimat pidettiin samoina kuivauksen etenemisen eri vaiheissa. Samoin meneteltiin ylivuoden varastoitujen erien kohdalla. Saheina varastoitu erä vaati huomattavan lyhyen kuivausajan alhaisen lähtökosteuden vuoksi.

3 TULOKSET

3.1 Kosteus- ja tiheysmittaukset

Ennen kuivausta ja kuivauksen jälkeen koepaloista mitatut keskimääräiset kosteusprosentit ja niiden keskihajonnat on esitetty taulukossa 2. Lämminilmakuivauksissa saavutettiin 8 prosentin tavoitekosteus hyvin ensimmäistä kuivausta lukuun ottamatta. Alipainekuivauksessa sahatavara jäi kaikissa kuivauksissa liki 4 %-yksikköä tavoitekosteutta märemmäksi. Saheina varastoidun puutavaran alkukosteus oli huomattavan alhainen. Tukkeina varastoidun erän kohdalla haluttuun loppukosteuteen päästiin tarkasti. Kuivatuoretiheydeltään alipaine- ja lämminilmakuivausten aineistot erosivat huomattavasti toisistaan (taulukko 3). Keskikappaleet jäivät kaikissa kuivauksissa kosteammiksi kuin pinta- ja sydänpalat; huomattavin ero oli erässä Alipainekuivaus 2. Tällöin kuivauskappaleiden keskiosat jäivät liian kosteiksi tavoitekosteutta ajatellen. Lämminilmakuivauksista suurin kosteuden vaihtelu oli erässä 1. Koekappaleiden kosteus jakautui huomattavan tasaisesti yli vuoden varastoiduilla erillä (taulukko 4, kuva 7).

Taulukko 1. Koe-erien kuivauskaavat.

Kuivauksen eteneminen (kosteus)	Lämminilma 1		Lämminilma 2		Lämminilma 3		Alipaine 1, 2 ja 3			Saheina (1) ja tukkeina (2) varastoidut	
	T	EMC	T	EMC	T	EMC	T		EMC	T	EMC
Lämmitys	55	17	65	15	65	15	68		17	65	15
>70	55	1,8	65	1,6	65	2,2	68		2,8	65	2,5
70 – 60	56	1,9	67	1,6	67	2,2	69		2,9	67	2,6
60 – 50	57	2,0	69	1,6	68	2,5	71		3,0	69	2,8
50 – 40	58	2,1	71	1,6	70	2,7	72		3,1	70	2,9
40 – 30	59	2,2	75	1,7	73	2,8	73		3,1	73	3,0
30 – 25	60	2,3	78	1,8	75	2,9	75		3,2	75	3,1
25 – 20	62	2,6	80	2,0	78	3,1	76		3,3	78	3,1
20 – 15	66	2,7	83	2,1	80	3,2	78		3,4	80	3,2
15 – 10	68	2,9	85	2,1	83	3,3	80		1,8	83	3,2
10>	69	2,8	85	2,0	85	3,5	82		1,4	85	3,0
Tasaannutus	60	10	40	6,5	40	6,5	73		5,6	70	6,0
Jäähdytys	40	8,0	40	5,9	40	5,9	50		5,0	40	8,0
Kuivausaika * (h)	503		411		406		1: 280	2: 180	3: 280	1: 105	2: 317
Lähtökosteus (%)	51,2		53,3		50,5		47,5	53,9	42,0	15,0	45,2
Loppukosteus (%)	10,9		8,6		8,6		11,7	11,7	11,7	9,3	7,6

T = Lämpötila, °C
EMC = Kuivausvoima

* = Esitetyt kuivausajat sisältävät lämmityksen ja varsinaisen kuivauksen, mutta eivät tasaannutus- ja jäähdytysvaiheita.

Taulukko 2. Kuivauskappaleiden keskimääräiset kosteusprosentit ennen kuivausta ja kuivauksen jälkeen ja niiden keskihajonnat kuivauserittäin.

Kuivauserä	Ennen kuivausta, %		Kuivauksen jälkeen, %	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Lämminilma 1	51,2	7,5	10,9	1,7
Lämminilma 2	53,3	5,0	8,6	1,5
Lämminilma 3	50,5	5,9	8,6	1,3
Alipaine 1	47,5	7,0	11,7	1,8
Alipaine 2	53,9	11,8	11,7	3,4
Alipaine 3	42,0	7,9	11,7	2,5
Saheina varastoitu	15,0	0,6	9,3	0,4
Tukkeina varastoitu	45,2	6,0	7,6	1,8

Taulukko 3. Kuivauskappaleiden keskimääräiset kuivatuoretiheydet ja keskihajonnat kuivauserittäin.

Kuivauserä	Kuiva-tuoretiheys, kg/m^3	
	$\bar{x}$	s
Lämminilma 1	530	58
Lämminilma 2	551	66
Lämminilma 3	560	57
Alipaine 1	463	55
Alipaine 2	478	81
Alipaine 3	487	74
Saheina varastoitu	625	35
Tukkeina varastoitu	564	52

3.2 Halkeamat

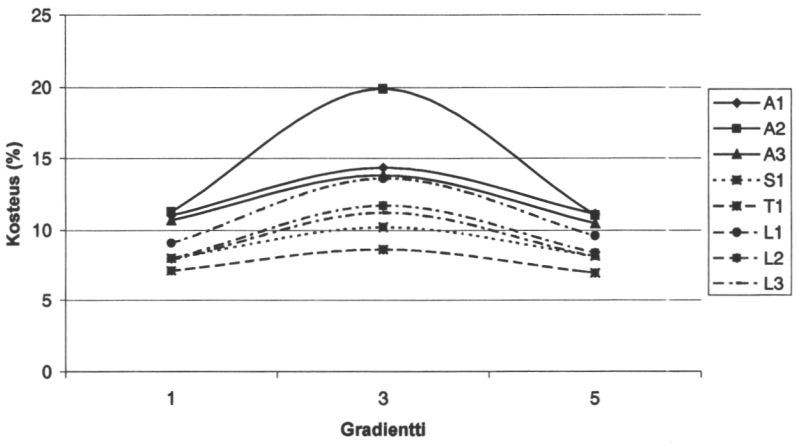
Halkeilussa oli huomattavia eroja kuivausten välillä. Vähiten pintahalkeilua oli vuoden tukkeina varastoidussa erässä. Vastaavasti eniten halkeamia oli vuoden saheina varastoidussa erässä. Kyseisessä erässä halkeamat kulkivat jokaisen saheen päästä päähän. Lämminilmakuivauksista paras pintahalkeilun suhteen oli kuivaus 2 ja alipainekuivauksista kuivaus 1 (taulukko 5).

Taulukko 4. Kosteusgradienttien keskiarvot ja keskihajonnat kuivauserittäin eri osissa sahatavarakappaletta (1 = pinta-, 3 = keski- ja 5 = sydänkoepala).

Kuivauserä	N	1 $\bar{x}$	3 $\bar{x}$	5 $\bar{x}$	1 s	3 s	5 s
Lämminilma 1	7	9,1	13,6	9,6	2,3	3,5	1,8
Lämminilma 2	7	8,0	11,7	8,4	1,4	2,4	1,4
Lämminilma 3	7	7,9	11,2	8,1	1,5	3,1	2,0
Alipaine 1	5	11,0	14,3	11,1	1,2	1,9	1,6
Alipaine 2	5	11,3	19,9	11,0	2,5	5,8	2,0
Alipaine 3	5	10,7	13,8	10,5	1,6	3,1	1,0
Saheina varastoitu	7	8,0	10,2	8,2	0,5	0,5	0,5
Tukkeina varastoitu	8	7,1	8,6	7,0	2,1	1,7	1,4

Taulukko 5. Kuivauskappaleiden pintalappeen pintahalkeamien pituussummien keskiarvot ja –hajonnat kuivauserittäin.

Kuivauserä	N	Pituussumma, mm $\bar{x}$	s
Lämminilma 1	28	219	299
Lämminilma 2	28	70	132
Lämminilma 3	28	187	246
Alipaine 1	24	54	245
Alipaine 2	23	69	259
Alipaine 3	24	220	347
Saheina varastoitu	30	1200	0
Tukkeina varastoitu	30	17	6,0

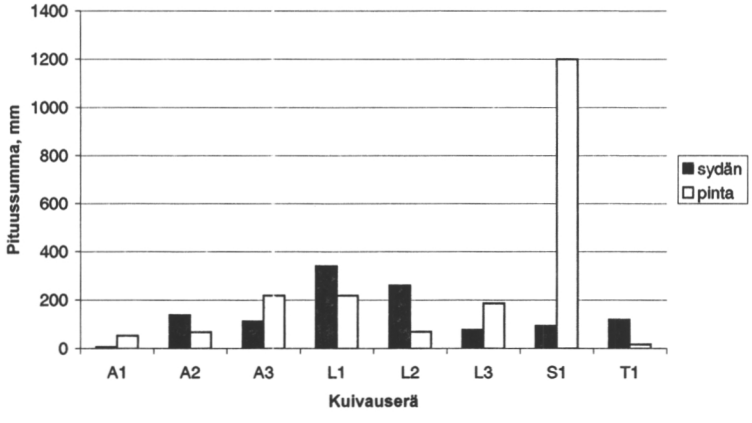


Kuva 7. Kosteusgradienttijakaumat kuivauserittäin.

Taulukko 6. Kuivauskappaleiden sydänlappeen halkeamien pituussummien keskiarvot ja –hajonnat. Sisältävät sekä ydin- että pintahalkeamat.

Kuivauserä	N	Pituussumma, mm	
		$\bar{x}$	s
Lämminilma 1	28	341	461
Lämminilma 2	28	261	444
Lämminilma 3	28	78	281
Alipaine 1	24	7	44
Alipaine 2	23	139	249
Alipaine 3	24	113	199
Saheina varastoitu	30	95	28
Tukkeina varastoitu	30	120	33

Sydänpuolen halkeilua esiintyi vähiten erässä Alipainekuivaus 1 (taulukko 6). Lämminilmakuivauksissa vähiten sydänpuolen halkeilua oli erässä 3. Tukkeina varastoidun erän vähäiset pintahalkeamat eivät näyttäisi korreloivan ko. erän sydänpuolen halkeamien kanssa. Kuvassa 8 on esitetty sekä sydän- että pintapuolen halkeamat kuivauksittain. Halkeilun suhteen parhaaksi kuivaukseksi voitaneen luonnehtia erää Alipainekuivaus 1.



Kuva 8. Pinta- ja sydänhalkeamien pituussummien keskiarvot kuivauserittäin.

3.3 Muodonmuutokset

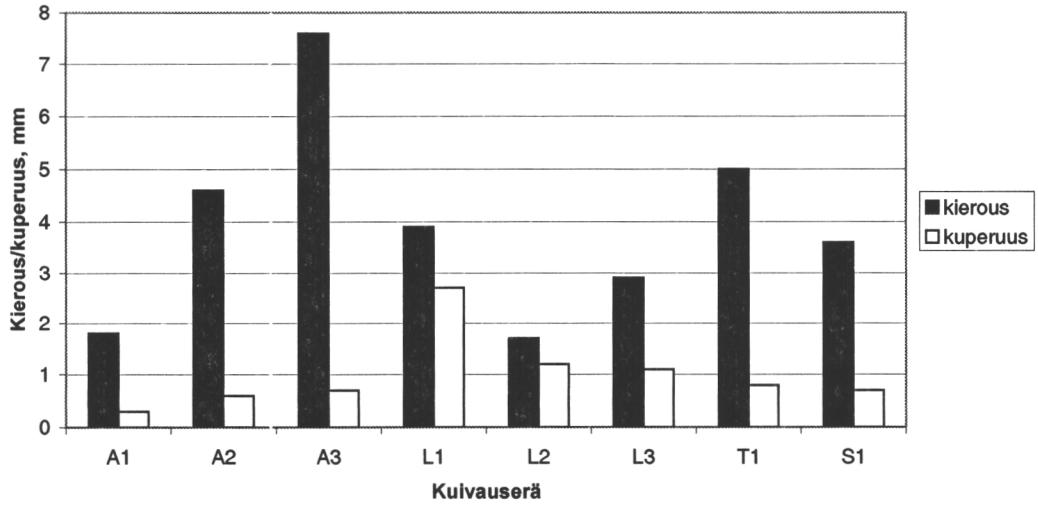
Myöskin kieroutumisen ja kupertumisen suhteen kuivauksissa oli huomattavia eroja. Vähiten sahatavara kieroutui ja kupertui erässä Alipainekuivaus 1 (taulukot 7 ja 8, kuva 9). Tässä erässä myös hajonta oli pienin. Lämminilmakuivauksista oli paras kieroutumisen suhteen erä 2 ja kupertumisen suhteen erä 3. Kokonaisuutena erää Alipainekuivaus 1 voitiin muodonmuutosten suhteen pitää parhaimpana. Kaikissa kuivauserissä kuperuudet olivat varsin pieniä, eikä niiden poishöyläämineen aiheuta kovinkaan suurta materiaalihukkaa. Sen sijaan esimerkiksi tukkeina varastoidun erän kieroutuminen aiheuttaa varsin suuren materiaalihävikin.

Taulukko 7. Kieroutuman keskiarvot ja keskihajonnat kuivauserittäin.

Kuivauserä	Kieroutuma, mm	
	$\bar{x}$	s
Lämminilma 1	3,9	3,9
Lämminilma 2	1,7	1,8
Lämminilma 3	2,9	2,8
Alipaine 1	1,8	2,0
Alipaine 2	4,6	5,2
Alipaine 3	7,6	5,5
Saheina varastoitu	3,6	1,4
Tukkeina varastoitu	5,0	1,8

Taulukko 8. Kuperuuden keskiarvot ja keskihajonnat kuivauserittäin.

Kuivauserä	Kuperuus, mm	
	$\bar{x}$	s
Lämminilma 1	2,7	0,6
Lämminilma 2	1,2	0,6
Lämminilma 3	1,1	0,6
Alipaine 1	0,3	0,3
Alipaine 2	0,6	0,6
Alipaine 3	0,7	0,4
Saheina varastoitu	0,7	0,6
Tukkeina varastoitu	0,8	0,6



Kuva 9. Saheiden keskimääräinen kieroutuminen ja kupertuminen kuivauserittäin.

3.4 Värimittaukset

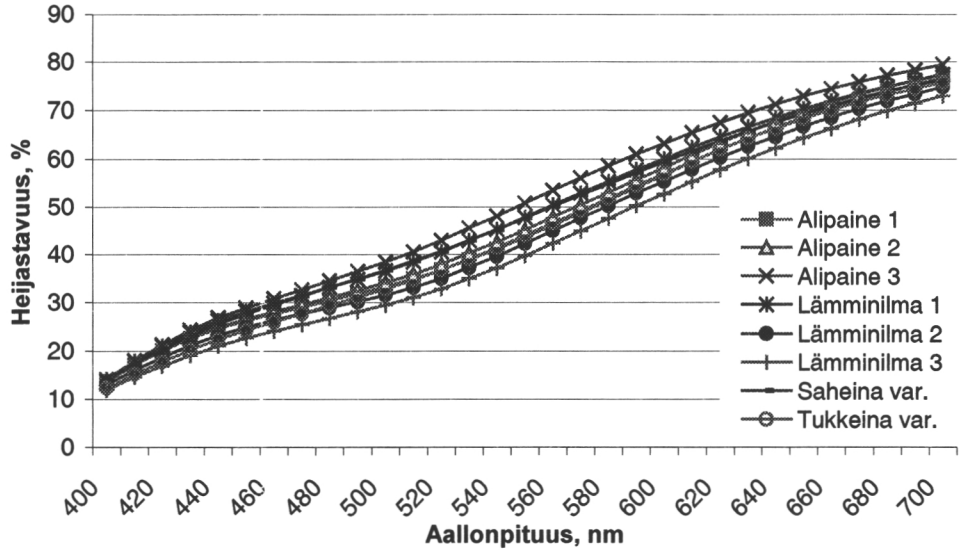
Erän lämminilmakuivaus 2 saheet tummuivat kuivauksessa eniten (taulukko 9). Vähiten tummumista tapahtui erässä Alipainekuivaus 3. Erässä Alipainekuivaus 1 värimittaustulokset saattoivat olla jostain syystä epäluotettavia, sillä tulosten mukaan saheet olisivat vaalentuneet kuivauksessa.

Punaisen (a*) ja keltaisen (b*) lukuarvot kasvoivat kaikissa kuivauksissa (taulukko 9). Höyläyksen jälkeen mitatuista heijastusspektreistä näkyy, että erässä Alipainekuivaus 2 heijastavuus oli korkein koko aallonpituusskaalan alueella ja vastaavasti matalimpia lukuarvoja saatiin erässä Lämminilmakuivaus 3 (kuva 10).

Höyläyksen jälkeen väriltään kirkkaimpia olivat erän Alipainekuivaus 3 saheet (taulukko 10). Lisäksi kyseisen erän saheet asettuivat väriavaruudessa kaikkein vähiten punaisen ja vastaavasti kaikkein eniten keltaisen suuntaan. Tummimpia höyläyksen jälkeen olivat erän Lämminilmakuivaus 3 saheet. Tässä erässä höylätyt saheet olivat myös kaikkein punaisimpia. Värinmuutos ei lisääntynyt kuivauksen maksimilämpötilan noustessa. Lämminilma- ja alipainekuivattujen erien välillä ei ollut systemaattista eroa. Vuoden varastointi saheina tai tukkeina ei vaikuttanut saheiden sisäväriin kuivauksen jälkeen.

Taulukko 9. Heijastusspektreistä määritellyt L*a*b*- värikoordinaattien arvot saheiden pinnoille kuivauserittäin ennen kuivausta ja kuivauksen jälkeen. Suurimmat ja pienimmät muutosta kuvaavat lukuarvot on vahvennettu.

Kuivauserä	L*			a*			b*		
	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos
Lämminilma 1	72,52	69,92	-2,6	5,56	7,91	+2,35	24,84	26,10	+1,26
Lämminilma 2	68,24	58,11	**-10,13**	9,51	9,52	**+0,01**	27,44	28,43	+0,99
Lämminilma 3	67,60	65,69	-1,91	6,73	9,29	+2,56	27,29	29,67	+2,38
Alipaine 1	65,49	66,33	**+0,84**	8,82	11,32	+2,5	28,41	32,01	+3,6
Alipaine 2	73,16	63,41	-9,75	7,30	11,44	**+4,14**	24,46	32,83	**+8,37**
Alipaine 3	66,20	64,99	**-1,21**	6,81	10,82	+4,01	28,01	32,08	+4,07
Saheina varastoitu	65,44	63,82	-1,62	7,96	10,13	+2,17	29,41	33,48	+4,07
Tukkeina varastoitu	64,81	63,42	-1,39	9,52	11,43	+1,91	30,91	31,23	**+0,32**



Kuva 10. Saheiden pintojen heijastusspektrit kuivauserittäin höyläyksen jälkeen.

Taulukko 10. Heijastusspektreistä määritellyt L*a*b*- värikoordinaattien arvot höyläyksen jälkeen.

Kuivauserä	L*	a*	b*
Lämminilma 1	75,854	7,551	26,266
Lämminilma 2	72,583	9,882	26,108
Lämminilma 3	70,905	10,173	26,953
Alipaine 1	73,52	9,62	25,45
Alipaine 2	74,42	9,12	26,40
Alipaine 3	77,54	6,84	27,80
Saheina varastoitu	75,68	6,90	26,53
Tukkeina varastoitu	73,61	8,75	28,41

4 TULOSTEN TARKASTELU

Loppukosteudet vaihtelivat eri kuivausten välillä varsin paljon. Kaikissa alipainekuivauksissa jäätiin aivan liian kauas tavoitellusta loppukosteudesta. Myös aineistojen kuiva-tuoretiheydet poikkesivat toisistaan huomattavasti ja niiden erot olivat joissakin tapauksissa tilastollisesti merkitseviä.

Kosteusgradienttien perusteella kaikkein tasaisimmin olivat kuivuneet erät, joiden raaka-ainetta oli varastoitu yli vuosi. Erän Alipainekuivaus 2 sisäkosteudet jäivät huomattavan korkealle tasolle. Sisä- ja pintaosista otettujen koepalojen kosteuserot olivat kaikkien kuivausten sisällä tilastollisesti merkitseviä. Kuivauserien välillä eroja ei kaikissa tapauksissa löytynyt.

Pintahalkeilua ilmeni vähiten yhden vuoden tukkeina varastoidussa erässä. Halkeilun suhteen parhaana voitaneen kuitenkin pitää erää Alipainekuivaus 1, jossa sekä pinta- että sydänlappeen halkeilu olivat varsin vähäisiä. Tämä erä osoittautui myös muodonmuutosten suhteen parhaaksi. On kuitenkin huomattava, että etenkin sydänlappeen halkeilu johtuu lähinnä puun anisotrooppisuudesta eikä niinkään kuivausolosuhteista. Ulkona yhden vuoden varastoidut saheet olivat haljenneet jo ennen kuivausta. Ulkokuivauksessa kuivausolosuhteet ovat hallitsemattomia, ja sateisesta kesästä huolimatta halkeamia syntyi paljon. Koneellisesti kuivattujen erien välillä halkeiluerot olivat vähäisiä. Tietyistä puuyksilöistä sahatut saheet halkesivat kaikissa kuivauksissa.

Höyläyksen jälkeen väriltään kirkkaimpana säilyivät erän Alipainekuivaus 3 saheet. Värierot höyläyksen jälkeen olivat kuitenkin todella pieniä, eivätkä ne muodostuneet läheskään kaikissa tapauksissa tilastollisesti merkitseviksi.

LEHTIKUUSEN KUIVAUSSIMULOINTIMALLIN JA KUIVAUSKAAVOJEN KEHITTÄMINEN

Veikko Tarvainen, Juha Kurkela ja Hannu Viitanen

1 LÄHTÖKOHTA

Lehtikuusella on suomalaiseen kuuseen ja mäntyyn verrattuna selvästi suuremmat vaatimukset kuivaukselle. Puuaineen korkea tiheys, suuri kosteuseläminen ja pieni vesihöyryn läpäisevyys edellyttävät verraten varovaista kuivausta.

VTT:llä kehitetty kuivauksen simulointimalli Laatukamari on osoittautunut hyväksi kuivaamonhoitajan työkaluksi suunnitteltaessa männyn ja kuusen kuivauskaavoja. Laatukamari -ohjelmalla voidaan optimoida kuivauksen laatua ja kuivauskapasiteettia. Lähtöarvoina tarvitaan perustiedot sahatavarasta ja kuivaamosta.

Lehtikuusen kamarikuivausta ja kuivauskaavojen suunnittelua helpottamaan päätettiin Laatukamari-ohjelmaan etsiä kokeellisesti sellaiset parametrien arvot, jotka mahdollistavat myös tämän puulajin kuivauskaavojen optimoinnin. Tästä on hyötyä etenkin lehtikuusen kuivausta aloitteleville yrityksille mutta myös kokeneille lehtikuusen jalostajille halutun loppukosteuden ja kuivauslaadun varmistamisessa.

Oleellinen tekijä kuivauksen laadullisen onnistumisen lisäksi ovat kuivauskustannukset. Kuivauskokeiden ja Laatukamari-laskelmien pohjalta voidaan arvioida keskimääräiset kuivausajat, mitkä vaikuttavat oleellisesti kuivaamon ja sahatavaran pääoma- ja energiakustannuksiin.

2 TOTEUTUS

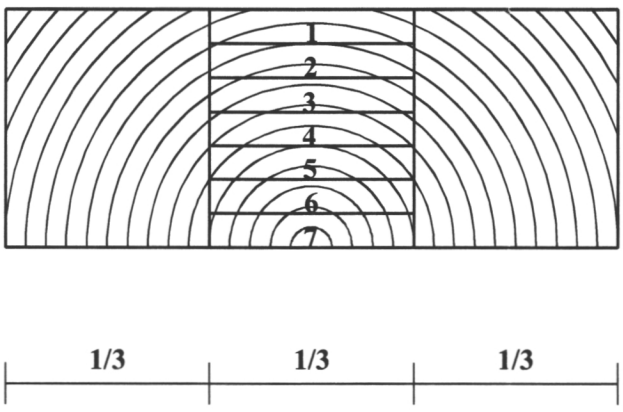
Sopivien parametrien löytämiseksi Laatukamari-simulointiohjelmalle tehtiin kaksi varsinaista koekuivausta, joiden kuluessa määritettiin sahatavaran keskikosteus ja kosteusgradientti neljänä eri ajankohtana. Lisäksi kuivattiin kolmas erä mallin toimivuuden arvioimiseksi. Tämä koostui kolmenlaisesta sahatavarasta, joka oli tuotu Venäjältä: 1) vaalea sahatavara, 2) säteittäin sahattu tavara, 3) kahden ensimmäisen koekuivauksen sahatavaran rinnakkaisnäytteet.

Koekuivauksiin valittu, läpisahattu 50 mm paksu sahatavara särmättiin 150 mm leveiksi lankuiksi, joista otettiin alkukosteus- ja tiheysnäytteet. Lankut katkottiin 1,2 m pitkiksi aihioiksi, joiden päät suojattiin kuivumisen estämiseksi Sikaflex-polyuretaanimassalla. Kahden ensimmäisen kuivauksen puut jaettiin kahteen kuivauskuormaan ja kumpikin kuorma neljään ryhmään tavoitteena saada kaikki ryhmät ominaisuuksiltaan mahdollisimman vertailukelpoisiksi keskenään. Kummassakin kuivauskuormassa oli 32 lankkua.

Ensimmäinen ryhmä kuivattiin lämpötilassa 50 °C ja toinen lämpötilassa 75 °C. Kuivauskaavat valittiin sellaisiksi, että halkeilua syntyisi mahdollisimman vähän. Apuna kaavan teossa käytettiin kirjallisuutta ja Laatukamari-simulointiohjelmaa, jonka lähtöarvoina käytettiin männyn parametreja sekä mitattuja lehtikuusen alkukosteuksia ja tiheyksiä.

Kummassakin kuivauksessa kuivaamosta otettiin kuivauksen aikana kerrallaan ulos kahdeksan puun ryhmä. Ulosottoajankohdat valittiin sellaisiksi, että ryhmien arvioidut kosteudet olivat 40, 30, 20 ja 10 %. Puista määritettiin keskikosteus yhdestä poikkileikkausviipaleesta sekä kosteuden jakauma puun paksuussuunnassa halkaisemalla toisesta poikkileikkausviipaleesta otettu näyte 9 osaan. Näytteen pilkkominen on esitetty kuvassa 1. Siinä näyte on jaettu 7 osaan, mikä normaalisti antaa paksuussuuntaisen kosteusgradientin riittävällä tarkkuudella. Toisessa kuivauksessa laitettiin näytteenoton jälkeen jäljelle jääneet pidemmät kappaleet päiden sulkemisen jälkeen takaisin kuivaamoon. Nämä puut otettiin seuraavan ryhmän kanssa ulos. Näin ollen koepuita oli kosteustasoilla 30, 20 ja 10 % yhteensä 16 kappaletta. Menettelystä on etuna määrän lisäksi myös mahdollisuus tarkastella saman puun kosteutta ja kosteusgradienttia kahdessa kosteudessa. Tällöin puiden väliset ominaisuuksien erot etenkään tiheyden osalta eivät vaikuta gradientin muutokseen.

Saatujen mittaustulosten perusteella etsittiin uudet parametrit Laatukamari-simulointimallille, joita käytettäessä malli simuloi mahdollisimman hyvin toteutuneita kuivauksia. Mallissa on yhteensä kuusi puun sisäistä kosteuden liikkumista ja veden haihtumista puun pinnalta kuvaavaa optimoitavaa parametria. Optimiarvojen määrittämistä varten tehtiin erillinen laskentaohjelma, joka etsii sellaisen parametriarvojen yhdistelmän, jolla simulointimallin laskema kosteuden



Kuva 1. Kosteusgradienttinäytteen ottotapa; näytteet jaettiin yhdeksään viipaleeseen.

kehitys kuivauksen aikana poikkeaa mahdollisimman vähän toteutuneista kuivauksista.

Kolmannen kokeen saheet kuivattiin simulointimallilla optimoidulla kaavalla lämpötilaan 70°C. Kuivauksen aikana otettiin kosteusgradientti- ja keskikosteusnäytteitä kuudesta saheesta. Loppuun asti kuivattiin 24 sahetta, joista määritettiin loppukosteus, muodonmuutokset ja visuaalinen laatu. Tulosten perusteella arvioitiin simulaattorin toimivuus.

Lopuksi verrattiin tämän yhteistutkimushankkeen Joensuun yliopiston tutkimuksissa kuivattujen puiden kuivauksen aikana sähköisesti mitattuja kosteuksia Laatukamari-ohjelmalla laskettuihin tuloksiin. Simuloinnin lähtöarvoina olivat toteutuneet kuivauskaavat ja saheiden keskimääräiset alkukosteudet ja tiheydet. Kuivauskustannuksia tarkasteltiin suhteessa männyn ja kuusen kuivaukseen.

3 TULOKSET

3.1 Sahatavaran alkukosteus ja tiheys

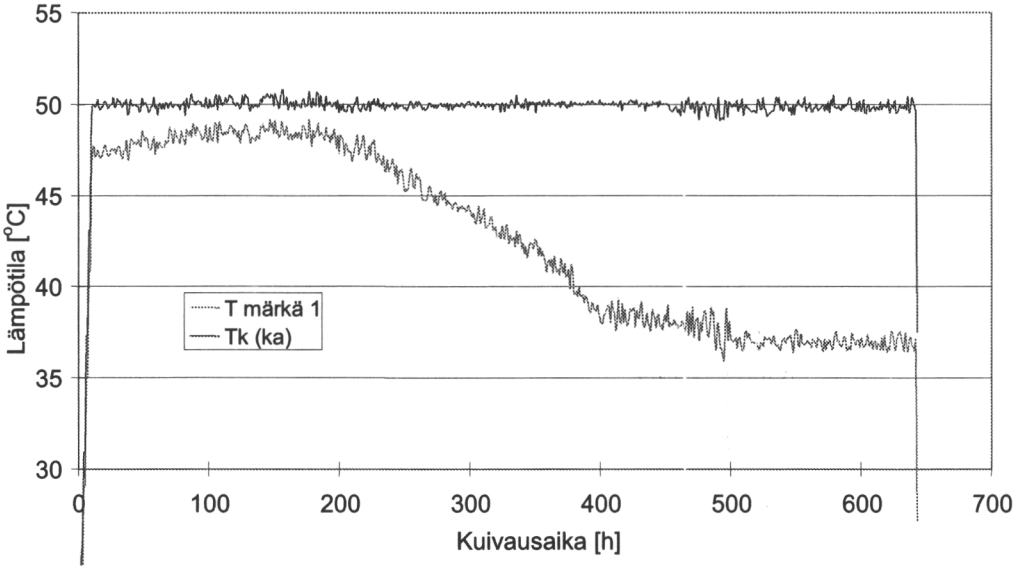
Taulukkoon 1 on koottu kuivauserien alkukosteudet ja kuiva-tuoretiheydet. Suurin osa koekuivausten VTT1 ja VTT2 saheista oli samoista lankuista otettuja rinnakkaisnäytteitä. Muutama poikkeus aiheutti sen, että näiden ryhmien välillä oli vähäisiä eroja. Kolmas kuivauserä poikkesi kahdesta edellisestä selvästi. Verrattuna männyn keskimääräiseen tiheyteen, joka tyvitukissa on n. 450 kg/m^3 ja latvatukissa 410 kg/m^3, tutkitun lehtikuusen tiheys oli huomattavan korkea. Kuusella tiheys on mäntyäkin alhaisempi, keskimäärin noin 380 kg/m^3.

Taulukko 1. Kuivauskokeiden saheiden alkukosteudet ja kuiva-tuoretiheydet kuivauserittäin ja -ryhmittäin.

Ryhmä	Koe VTT1		Koe VTT2		Koe VTT3		
	Kosteus %	Tiheys kg/m^3	Kosteus %	Tiheys kg/m^3	Tukin / saheen merkintä	Kosteus %	Tiheys kg/m^3
1	46,3	555	46,6	553	...	...	...
2	46,6	537	45,1	536	Säteittäinen	39,7	466
3	49,6	564	49,7	563	Venäläinen	44,1	530
4	47,6	566	47,4	567	12 ja 13	47,0	537
$\bar{x}$	47,5	555	47,2	555	$\bar{x}$	44,0	515
s	4,9	46	4,8	48	s	5,1	38

3.2 Toteutuneet kuivauskaavat

Kuvissa 2-4 on esitetty kolmessa kuivauskokeessa toteutuneet kuivauskaavat. Tavoitteena oli kuivata puut erittäin miedolla kaavalla selvästi alle puun syiden kyllästymispisteen halkeilun minimoimiseksi. Tämän jälkeen kuivausvoimaa lisättiin tavoitteena välttää halkeilun lisääntyminen. Toisen kokeen kuivauskaava oli periaatteeltaan samanlainen kuin ensimmäisessä kuivauksessa. Lämpötilataso oli kuitenkin oleellisesti korkeampi (75°C).

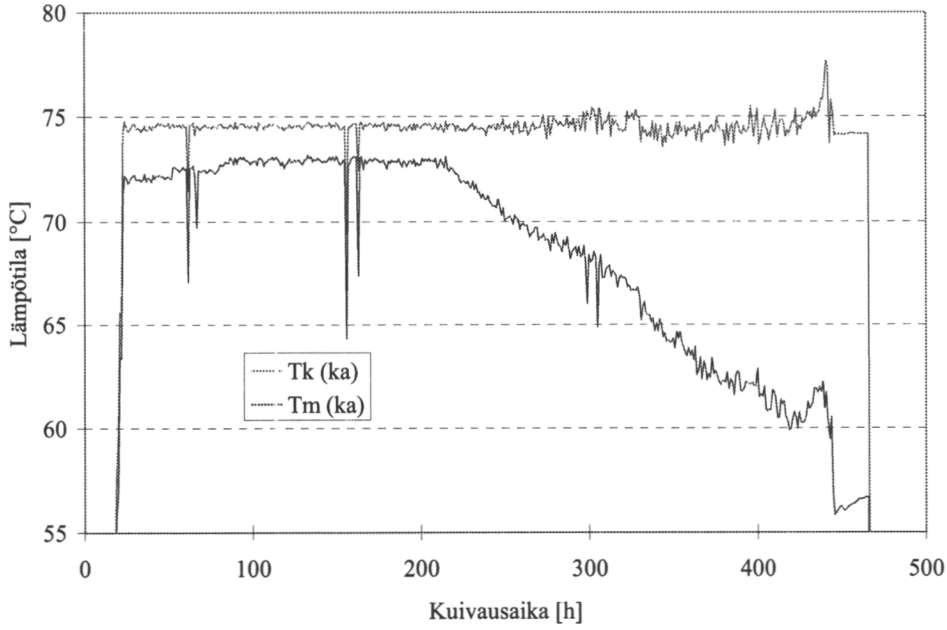


Kuva 2. Koekuivauksen VTT1 toteutunut kuivauskaava.

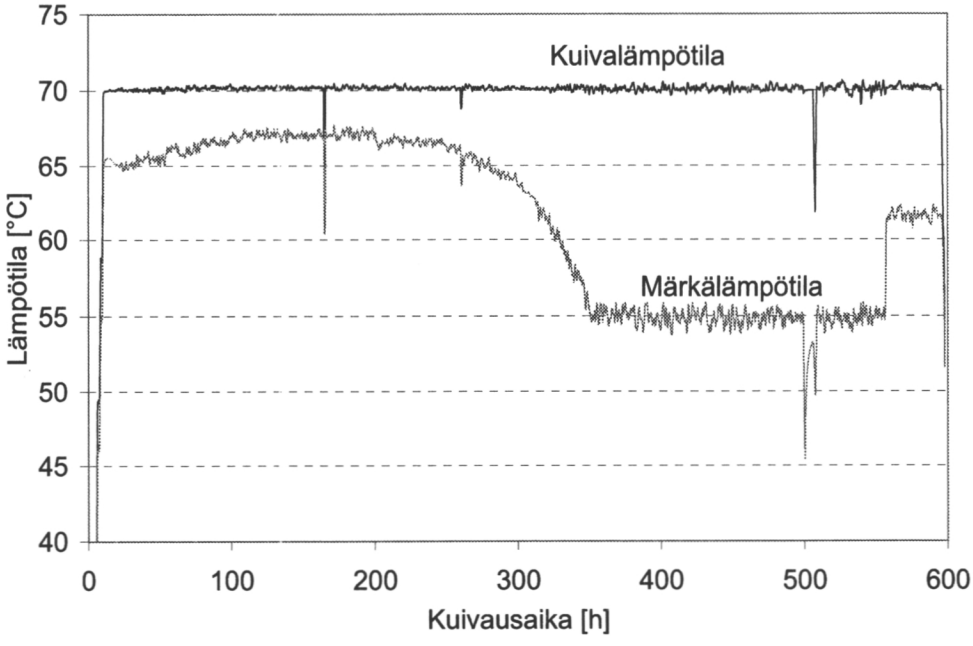
3.3 Sahatavaran kosteus ja kosteusgradientit

Kokeen VTT1 saheiden loppukosteudet ulosottohetkellä ja vastaavat kuivausajat on esitetty kuvassa 5. Kahdeksan loppuun asti kuivatun saheen keskikosteus oli 12,3 % ja hajonta 1,4 %-yksikköä.

Lehtikuusisahatavaraan on aiempien tutkimusten mukaan taipumus jäädä kosteuspesäkkeitä, etenkin nopeassa kuivauksessa. Tämän asian tutkimiseksi kaksi sahetta pilkottiin ottamalla niistä 10 cm:n välein 5 cm pitkiä koekappaleita. Ensimmäisessä saheessa suurin kosteusero näiden näytteiden välillä oli 0,6 %-yksikköä mutta toisessa saheessa vain 0,1 %-yksikköä. Tulos osoittaa, että saheisiin ei ollut jäänyt sellaisia kosteuspesäkkeitä, joista olisi haittaa normaalissa jatkojalostuksessa. Tämä viittaa siihen, että käytetty kuivauskaava oli tässä suhteessa riittävän varovainen.



Kuva 3. Koekuivauksen VTT2 toteutunut kuivauskaava.



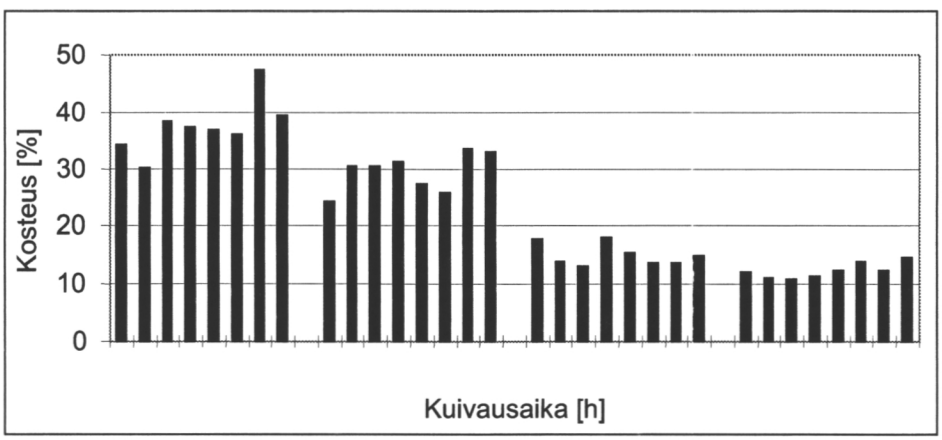
Kuva 4. Koekuivauksen VTT3 toteutunut kuivauskaava.

Kuvassa 6 on esitetty kokeen VTT1 kaikkien yhtä pitkällä kuivausajalla kuivattujen saheiden keskimääräiset kosteusgradientit. Kukin pylväs on keskiarvo eri puiden samasta kohtaa otettujen gradienttiviipaleiden kosteuksista.

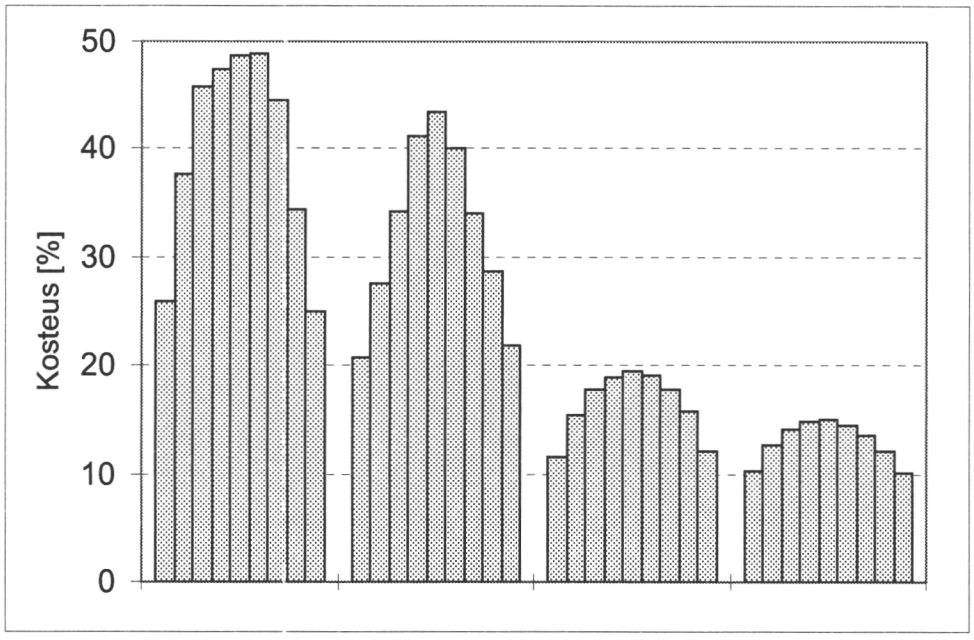
Kokeen VTT2 saheiden loppukosteudet ulosottohetkellä ja vastaavat kuivausajat on esitetty kuvassa 7. Loppuun asti kuivattujen saheiden, joita oli 16 kpl, keskikosteus oli 10,0 % ja kosteuden hajonta 1,8 %-yksikköä. Kosteuden hajontaa voidaan pitää varsin suurena. Saheiden tasaannuttaminen olisi välttämätöntä käytetyn kuivauskaavan jatkona joihinkin puusepänkäyttökohteisiin.

Saheiden päissä havaittiin noin kuukauden varastoinnin jälkeen sisähalkeilua. Ilmiö on samanlainen kuin kuumakuivatulla männyllä. Välittömästi kuivauksen jälkeen sahe on sisältä ehjä, mutta pinnan ja keskiosan välisten kosteuserojen tasaantuessa ja keskiosan kutistuessa ylittyy puun poikittainen vetolujuus ja puu halkeaa. Kyseessä on niin sanottu pintakovuusilmiö: saheen pintakerros viruu kuivauksessa ja estää myöhemmässä vaiheessa keskiosaa kutistumasta vapaasti. Tämä osoittaa, että etenkin nopeita kuivauskaavoja käytettäessä on välttämätöntä tasaannuttaa saheet varsinaisen kuivausjakson jälkeen. Tasaannutus voi olla kaksivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa nostetaan kuivausilman kosteutta niin paljon, että kuivan ja märän lämpötilan erotus on 2 °C pienempi kuin tavoitekosteutta vastaavassa olosuhteessa. Tällöin saheiden väliset kosteuserot tasaantuvat. Seuraavassa vaiheessa nostetaan kosteutta huomattavasti, jolloin saheen pinnan ja keskiosan välinen kosteusero pienenee.

Kuvassa 8 on esitetty kokeen VTT2 kaikkien yhtä pitkällä kuivausajalla kuivattujen saheiden keskimääräiset kosteusgradientit. Kukin pylväs on keskiarvo samasta kohtaa otettujen gradienttiviipaleiden kosteuksista.



Kuva 5. Koekuivauksen VTT1 saheiden loppukosteudet ulosottohetkellä. Kuivauskaava oli kuvan 1 mukainen.

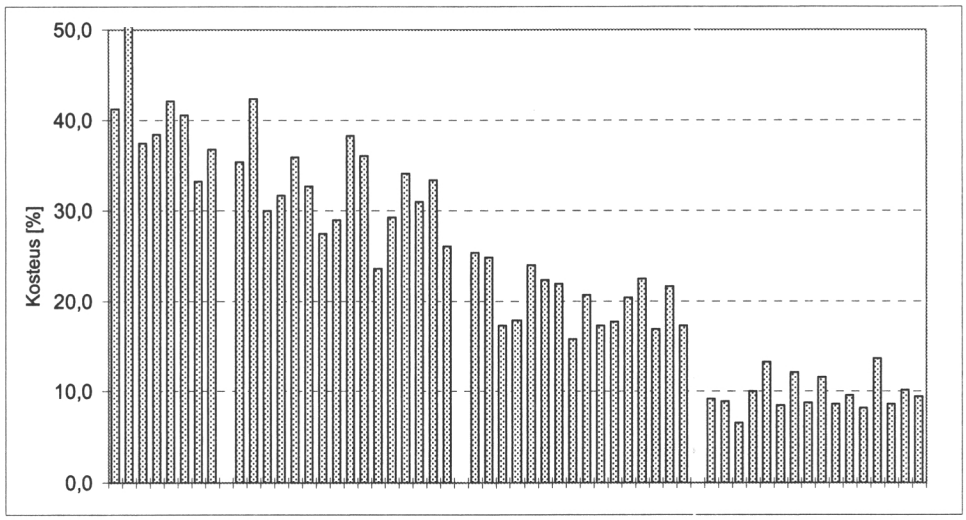


Kuva 6. Koekuivauksen VTT1 kahdeksan saheen keskimääräiset kosteusgradientit ulosottohetkellä. Kuivausajat olivat vasemmalta oikealle lukien 73, 236, 477 ja 645 h.

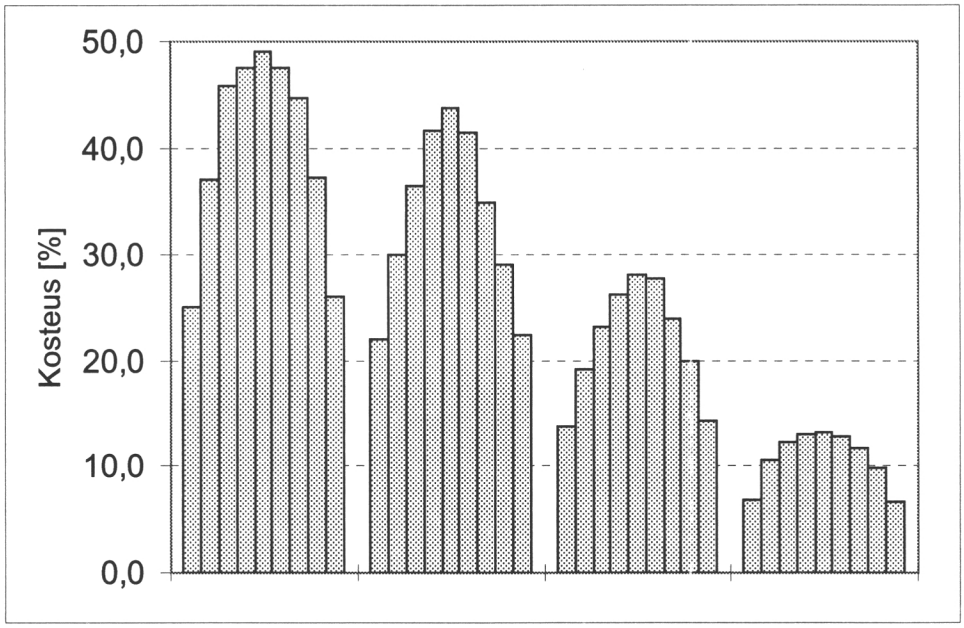
3.4 Sahatavaran kuivauslaatu

Kuivauskokeissa VTT1 ja VTT2 ilmeni loppuun asti kuivatuissa saheissa halkeilua. Männyn normaaliin halkeilukäyttäytymiseen verrattuna lehtikuusi näyttää halkeileva hieman enemmän. Tässä tutkimuksessa koesaheiden lukumäärät olivat kuitenkin niin pienet ja saheet niin lyhyitä, että tulokset ovat lähinnä suuntaa antavia.

Osalla saheista kuivausmuodonmuutokset, etenkin kieroutuminen ja kupertuminen, olivat niin voimakkaita, että ne vaikuttavat selvästi jatkojalostuksen saantoon. Kuivauksessa kuivat oksat kohosivat lappeista ja syrjistä muuta puuainesta pienemmän kutistumisensa vuoksi. Terveet oksat halkeilivat; halkeilun määrä oli verrattavissa kuuseen. Oksien halkeilua siis esiintyy, vaikka muun puuaineksen halkeilu vältetäänkin varovaisella kuivauksella. Liitteessä 1 on kuvia kuivatusta ja höylätystä sahatavarasta sekä lähikuvia erilaisista oksista.



Kuva 7. Koekuivauksen VTT2 saheiden loppukosteudet ulosottohetkellä. Kuivauskaava oli kuvan 2 mukainen.



Kuva 8. Koekuivauksen VTT2 24 saheen (ryhmä 1: 8 kpl, ryhmät 2-4: 16 kpl) keskimääräiset kosteusgradientit ulosottohetkellä. Kuivausajat olivat vasemmalta oikealle lukien 52, 147, 288 ja 458 h.

3.5 Lehtikuusen kuivauksen simulointi Laatukamari-ohjelmalla

Tehtyjen kuivauskokeiden kosteus- ja kosteusgradienttimittausten perusteella optimoitiin Laatukamari-simulointiohjelmalle sellaiset parametrit, joita käytettäessä lehtikuusen mitatut ja lasketut kosteusjakaumat poikkeavat toisistaan mahdollisimman vähän.

Kuvissa 9 ja 10 on esitetty Koekuivauksissa VTT1 ja VTT2 mitatut kosteusarvot sekä Laatukamari-ohjelmalla lasketut kosteusgradientit kuivauksen eri vaiheissa käytettäessä lehtikuuselle optimoituja parametrien arvoja. Tuloksista nähdään, että malli laskee kosteusjakaumat ja keskikosteudet varsin hyvällä tarkkuudella. Seurantatutkimuksissa on selvitettävä, kuinka hyvin malli ennustaa muiden lehtikuusierien kuivumista. Poikkeamat voivat olla suuriakin, mikäli sahatavaran ominaisuudet tai kuivausolosuhteet poikkeavat oleellisesti nyt kuivattujen saheiden arvoista.

Mallilla lasketut gradienttikuvaajat vastaavat korkeilla kosteustasoilla varsin hyvin mitattuja kosteusarvoja. Kuivauksen loppuvaiheessa malli antaa suuremman pinnan ja keskiosan välisen kosteuseron kuin mitä mittauksissa saatiin tulokseksi.

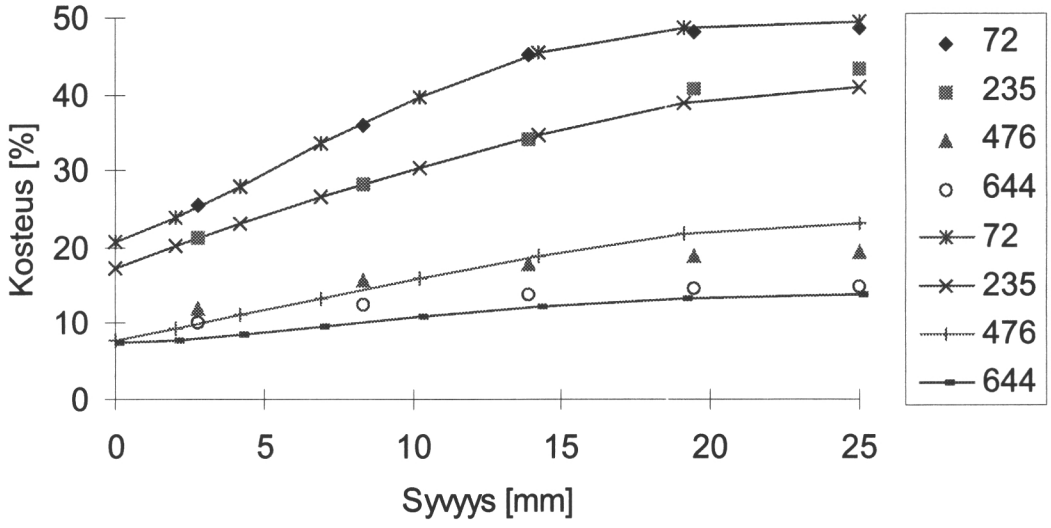
Koekuivauksessa VTT2 simuloidut arvot vastasivat erittäin hyvin mitattuja kosteusgradientteja. Kuivausten 1 ja 2 pääasiallisena erona oli lämpötilataso, joka oli ensimmäisessä kuivauksessa 50 °C ja toisessa kuivauksessa 75 °C. Tämä ei kuitenkaan välttämättä tarkoita sitä, että malli simuloisi lehtikuusen kuivumista korkeassa lämpötilassa aina paremmin kuin matalassa lämpötilassa.

3.6 Simulointimallin testaus

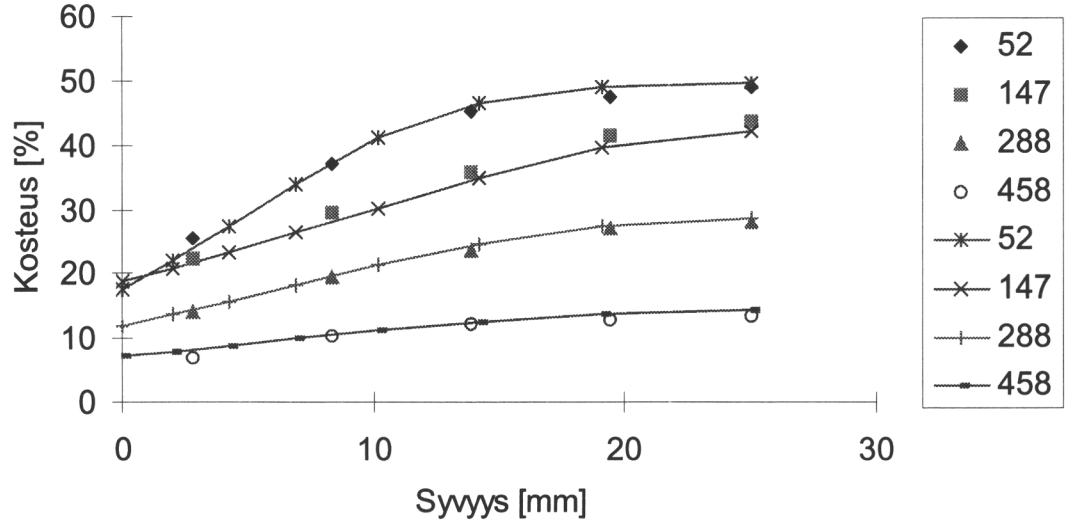
Luvussa 3.5 esitetyn tarkastelun lisäksi Laatukamari-ohjelman soveltuvuutta lehtikuusen kuivauksen simulointiin arvioitiin koekuivauksen VTT3 sekä Joensuussa tehtyjen rinnakkaisten koekuivausten tulosten perusteella. Kokeen VTT3 kuivauskaava (kuva 4) oli muuten samantyyppinen kuin kokeissa VTT1 ja VTT2, mutta siinä oli lisäksi lopussa vajaan kahden vuorokauden tasaannutusvaihe.

Kokeen VTT3 loppuun asti kuivattujen saheiden kosteusjakaumat kappaleen paksuussuunnassa on esitetty kuvassa 11. Tasaannutuksesta huolimatta saheisiin oli jäänyt selvä kosteusgradientti. Se oli tasaannutuksen ansiosta kuitenkin selvästi pienempi kuin kokeissa VTT1 ja VTT2. Tasaannutuksen tulisi kestää joko kauemmin tai ilman tulisi olla tasaannutuksessa vieläkin kosteampaa kuin tässä kokeessa käytetty.

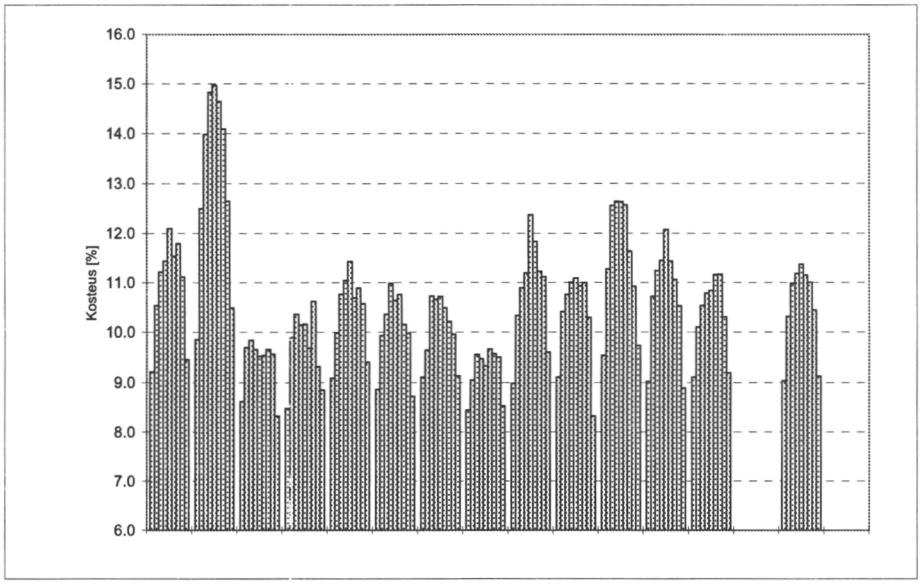
Taulukossa 2 on esitetty mitatut ja simuloidut loppukosteudet, kosteuden hajonnat sekä kosteusgradientit kokeessa VTT3. Liitteessä 2 on esitetty Laatukamari-simulointiohjelman tulostus kokeesta VTT3. Malli näytti ennustavan lehtikuusisahatavaran keskimääräisen loppukosteuden kohtuullisella tarkkuudella. Malli kuitenkin liioittelee huomattavasti tasaannutuksen kosteutta tasaavaa vaikutusta. Lehtikuusi kostuu ympäröivän ilman kosteuden vaikutuksesta selvästi hitaammin kuin esimerkiksi mänty.



Kuva 9. Koekuivauksessa VTT1 mitatut (merkityt pisteet) ja Laatukamari-simulointimallin uusilla lehtikuusen parametreilla lasketut (käyrät) kosteusgradientit kuivauksen eri vaiheissa (72 h, 235 h, 476 h ja 644 h).



Kuva 10. Koekuivauksessa VTT2 mitatut (merkityt pisteet) ja Laatukamari-simulointimallin uusilla lehtikuusen parametreilla lasketut (käyrät) kosteusgradientit kuivauksen eri vaiheissa (52 h, 147 h, 288 h ja 458 h).



Kuva 11. Kokeessa VTT3 kuivattujen yksittäisten saheiden kosteusgradientit sekä keskiarvogradientti (oikeanpuoleisin pylväsryhmä).

Taulukko 2. Mitatut ja simuloidut kosteudet koekuivauksessa VTT3.

Mitatut arvot		Simuloidut arvot	
Keskikosteus, % Hajonta, %	Kosteusgradientti, %	Keskikosteus, % Hajonta, %	Kosteusgradientti, %
9,9 0,8	2,4 ...	9,1 1,1	-0,3 ...

3.7 Vertailu Joensuussa tehtyihin sahatavaran koekuivauksiin

Liitteissä 3-5 on esitetty Joensuussa tehtyjen lehtikuusisahatavaran rinnakkaisten koekuivausten tulokset ja Laatukamari-simulointiohjelmalla lasketut kosteudet. Kaksi sahalaitaista käyrää ovat Joensuun yliopiston kuivaamon omien sähköisten vastuskosteusmittausten tuloksia. Ylemmässä käyrässä anturit olivat saheen keskellä ja alemmassa käyrässä 15 mm:n syvyydessä. Sähköinen kosteuden mittaus on varsin epätarkkaa puuaineen kosteuden ollessa yli 25 %, joten vertailuja ei voida tehdä korkeilla kosteustasoilla.

Katkoviiva, joka näkyy kuvassa hyvin tiheäportaisena mustana viivana, edustaa Laatukamari-ohjelman ennustetta saheen keskikosteudesta. Muut käyrät

kuvaavat laskettua kosteutta syvyyksillä 10, 14, 19 ja 25 mm. Toisessa kuivauksessa simuloitu keskikosteus vastasi erittäin hyvin 15 mm:n syvyydeltä sähköisesti mitattua kosteutta. Muissa kuivauksissa käyrät poikkesivat toisistaan selvästi. Kosteus mitattiin kulloinkin vain yhdestä saheesta, jonka ominaisuudet saattoivat poiketa kuivauserän keskimääräisistä arvoista. Näin ollen pitkälle meneviä johtopäätöksiä ei tämän vertailun osalta voida tehdä.

3.8 Kuivauskustannukset

Kuivauskustannukset muodostuvat pääosin kuivaamon ja sahatavaran kuivauksen aikaisista pääomakustannuksista, energiasta, työstä sekä kuivausvirheiden aiheuttamasta arvon alenemisesta. Nyt tehtyjen kokeiden perusteella arvon alenemista ei voida arvioida riittävällä tarkkuudella. Työkustannusten oletettiin olevan samaa luokkaa kuin männyllä. Näin ollen seuraavassa on tarkasteltu vain pääoma- ja energiakustannuksia. Tarkastelu kohdistuu esimerkinomaisesti 50 mm paksun lehtikuusi- ja mäntysahatavaran puusepänkuivauskustannusten vertailuun. Vertailun lähtöarvot ja tulokset on esitetty liitteessä 6. Lehtikuusen kuivausaika on laskelmassa 2,5-kertainen mäntyyn verrattuna. Tästä seuraavat suuremmat pääomakustannukset ja energiakustannukset, koska lämpövuodot ja puhaltimien sähkönkulutus kasvavat kuivausajan mukaan.

Esitetyillä lähtöarvoilla lehtikuusen kuivauskustannukset ovat yli kaksinkertaiset mäntyyn verrattuna eli vajaa 200 mk/m^3. Halkeilusta ja muodonmuutoksista, etenkin kieroutumisesta johtuvat arvon alenemiskustannukset voivat lisäksi olla jopa suuremmat kuin varsinaiset kuivauskustannukset. Tällöin puusepänkuivauksen kustannukset olisivat suuruusluokaltaan yhteensä 300-400 mk/m^3.

JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

Lehtikuusi kuivuu oleellisesti hitaammin kuin esimerkiksi mänty. Tarvittava kuivausaika on vähintään 2-3-kertainen mäntyyn verrattuna. Saheiden välisten loppukosteuserojen sekä saheen pinnan ja keskiosan kosteuseron pienentämiseksi tulee sahatavara tasaannuttaa kuivaamossa myöskin vähintään 2-3 kertaa männyn vaatima aika. Kuivatuissa saheissa esiintyi jonkin verran halkeilua varovaisesta kuivauskaavasta huolimatta. Tämäkin osoittaa, että lehtikuusen kuivauskaavan tulee olla hyvin hellävarainen ja siten varsin pitkä.

Tutkittu lehtikuusimateriaali kieroutui ja kupertui siinä määrin, että se vaikuttaa jatkojalostuksen saantoa alentavasti. Vaikka kuivatut saheet olivat lyhyitä (1,2 m), voidaan jo niiden tarkastelun perusteella todeta, että lehtikuusen jatkojalostaja joutuu varautumaan paljon suurempaan raaka-aineen menekkiin kuin männyn jatkojalostaja.

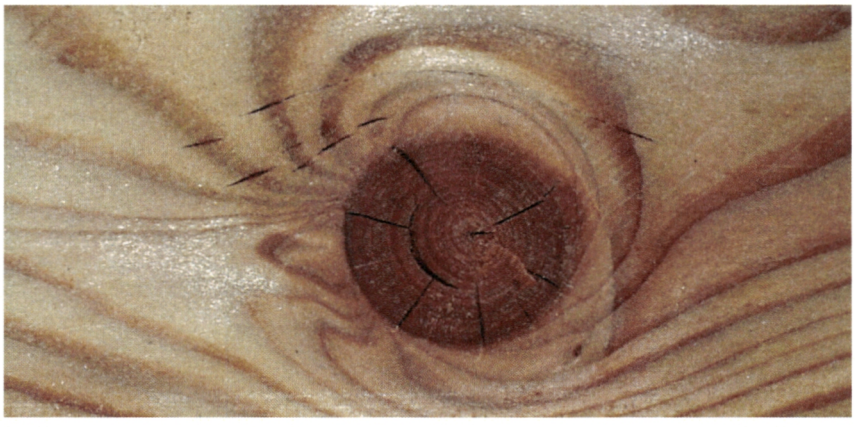
Lehtikuusen kuivauskustannukset ovat yli kaksinkertaiset mäntyyn verrattuna, kun tarkastellaan pelkästään pääoma- ja energiakustannuksia. Saantoa alentavien kuivausvirheiden aiheuttamat lisäkustannukset ovat helposti samaa suuruusluokkaa kuin varsinaiset kuivauskustannukset.

Laatukamari-tutkimusten tulosten perusteella voidaan todeta, että simulointimallilla on mahdollista ennustaa lehtikuusen kuivuminen kohtuullisen tarkasti, kun puun alkukosteus ja tiheys tunnetaan. Kosteusgradientin pieneneminen tasaannutuksessa on sensijaan todellisuudessa mallin ennustetta huomattavasti vähäisempää. Simulointiohjelman saattaminen lehtikuusen osalta yhtä tarkaksi kuin männyllä ja kuusella edellyttäisi lisää kuivauskokeita. Erityisen käyttökelpoinen kehitetty Laatukamari-versio on lehtikuusen kuivauskaavojen kehittämisessä, kun halutaan minimoida halkeilua.

Liite 1/1. Kuvia kuivatusta lehtikuusisahatavarasta.



Kuva 1. Tyypillinen tuoreen oksan halkeama.



Kuva 2. Tuore oksa on halkeillut. Halkeilua on myös ympärillä olevassa puuaineksessa.

Liite 1/2. Kuvia kuivatusta lehtikuusisahatavarasta.

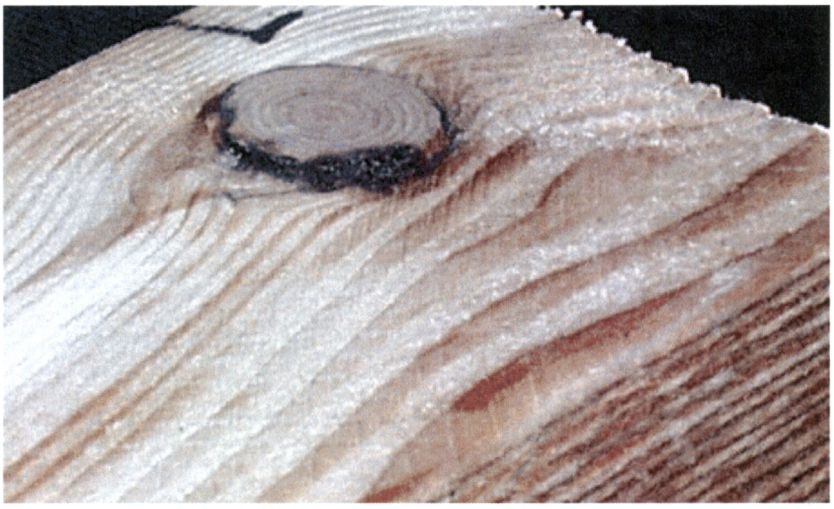


Kuva 3. Syrjälle ulottuva tuore sarvioksa on osittain irti.



Kuva 4. Kuiva oksa on vähän koholla ja halkeillut.

Liite 1/3. Kuvia kuivatusta lehtikuusisahatavarasta.



Kuva 5. Kuiva oksa on koholla.



Kuva 6. Kuiva oksa on koholla.

Liite 1/4. Kuvia kuivatusta lehtikuusisahatavarasta.



Kuva 7. Osittain kuiva oksa on halkeillut.



Kuva 8. Oksa on vähän halki ja oksan ulkopuolisessa puuaineksessa on kuivaushalkeama.

Liite 1/5. Kuvia kuivatusta lehtikuusisahatavarasta.



Kuva 9. Kuivauksen jälkeisessä varastoinnissa syntynyt pää-/ sisähalkeilu.



Kuva 10. Höylättyä lehtikuusisahatavaraa.

Liite 1/6. Kuvia kuivatusta lehtikuusisahatavarasta.



Kuva 11. Höylätyn lehtikuusisahatavaran sydän- ja pintalappeet.

Liite 2. Esimerkki Laatukamari-ohjelman tulostuksesta: lehtikuusen kuivauskoe VTT3.

Laatukamari 1.30 Tutkijan versio Windows
C:\kamwin-32bit\lekuVTT3 käytetty kaava 596 h.KAM 10.12.1999 17:26:02

Laskennan lähtötiedot:

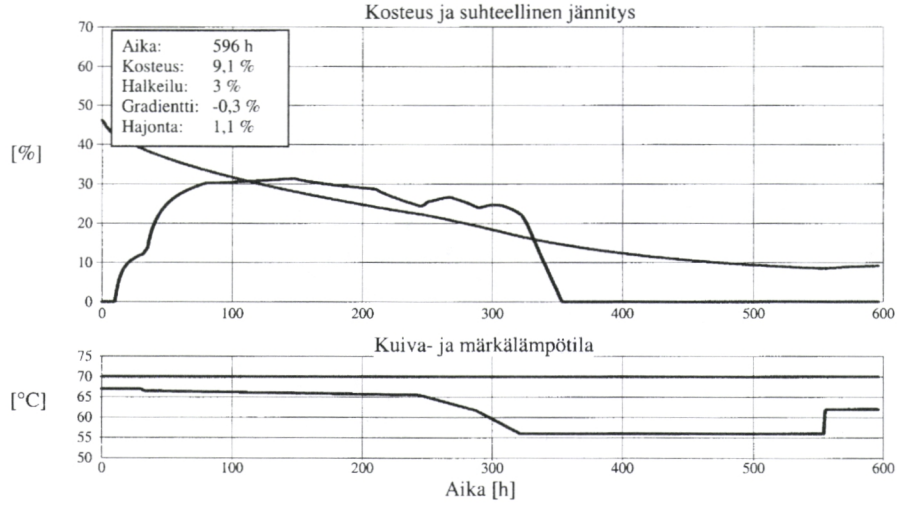
Puulaji- ja laatu	LEHTIKUUSI	Lopetuskriteeri	Aika
Nimellispaksuus	50 mm	Tavoiteaika	596 h
Nimellisleveys	150 mm	Ohjausanturit	Painepuoli
Tukin latvaläpimitta	262 mm	Anturityyppi	Märkä-anturi
Sahausasete	4-exlog	Puhallussyvyys	0,6 m
Valittu poikkileikkaus	Kokonaan	Rimaväli	25 mm
Sydänpuun säde	114 mm	Ulkolämpötila	20 °C
Tilavuuspaino	537 kg/m³	Esikuivumisaika	1 vrk
Sydänpuun alkukosteus	47 %		
Pintapuun alkukosteus	120 %		
Sydänpuuosuus	97 %		
Alkukosteus	49 %		

Ilman virtausnopeus rimavälissä ja puhallussuunnan vaihtoväli

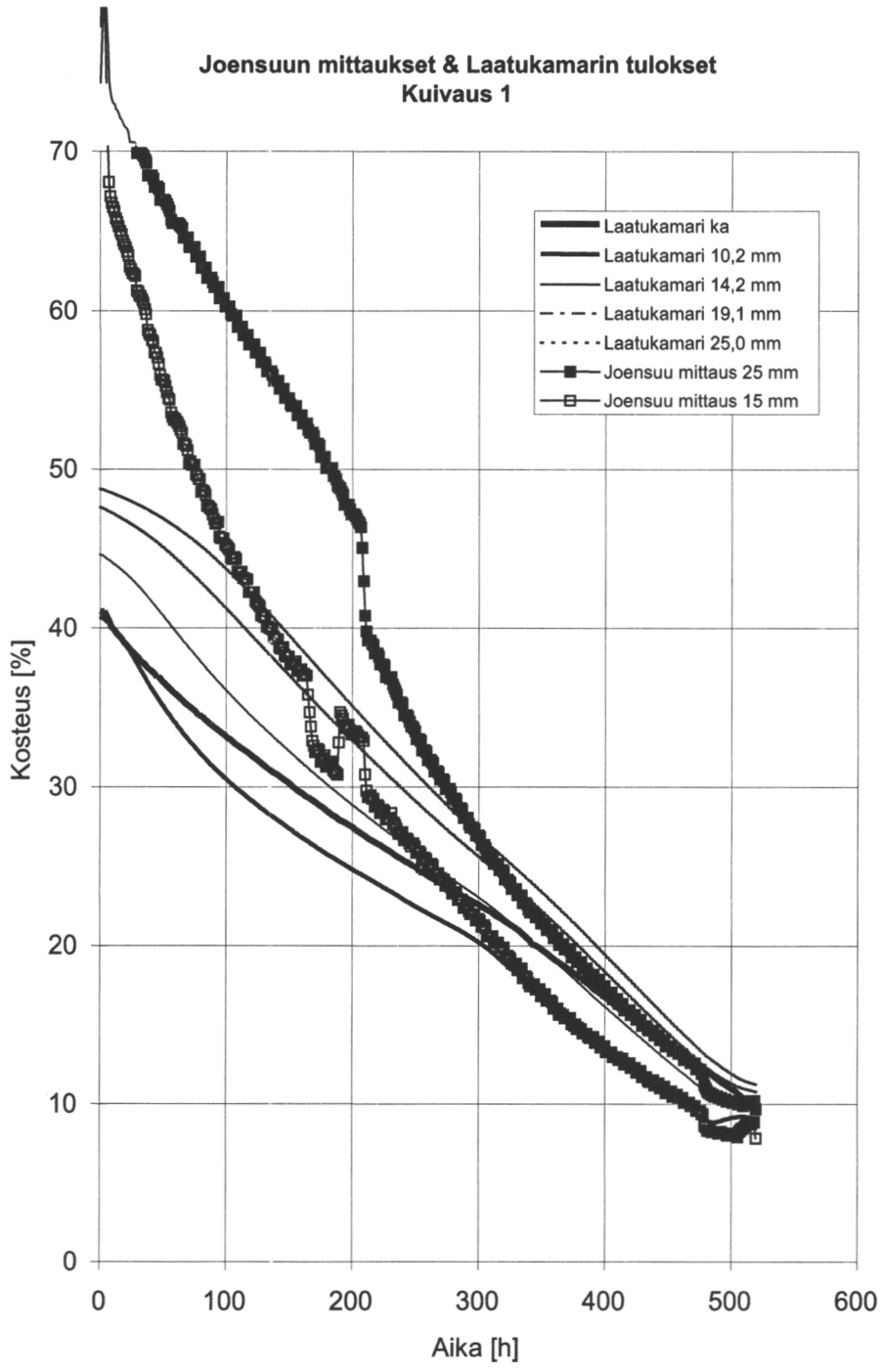
Aika [h]	Ilman nopeus [m/s]	Suunnan vaihto [h]
0	3,3	700,0

Kuivauskaava

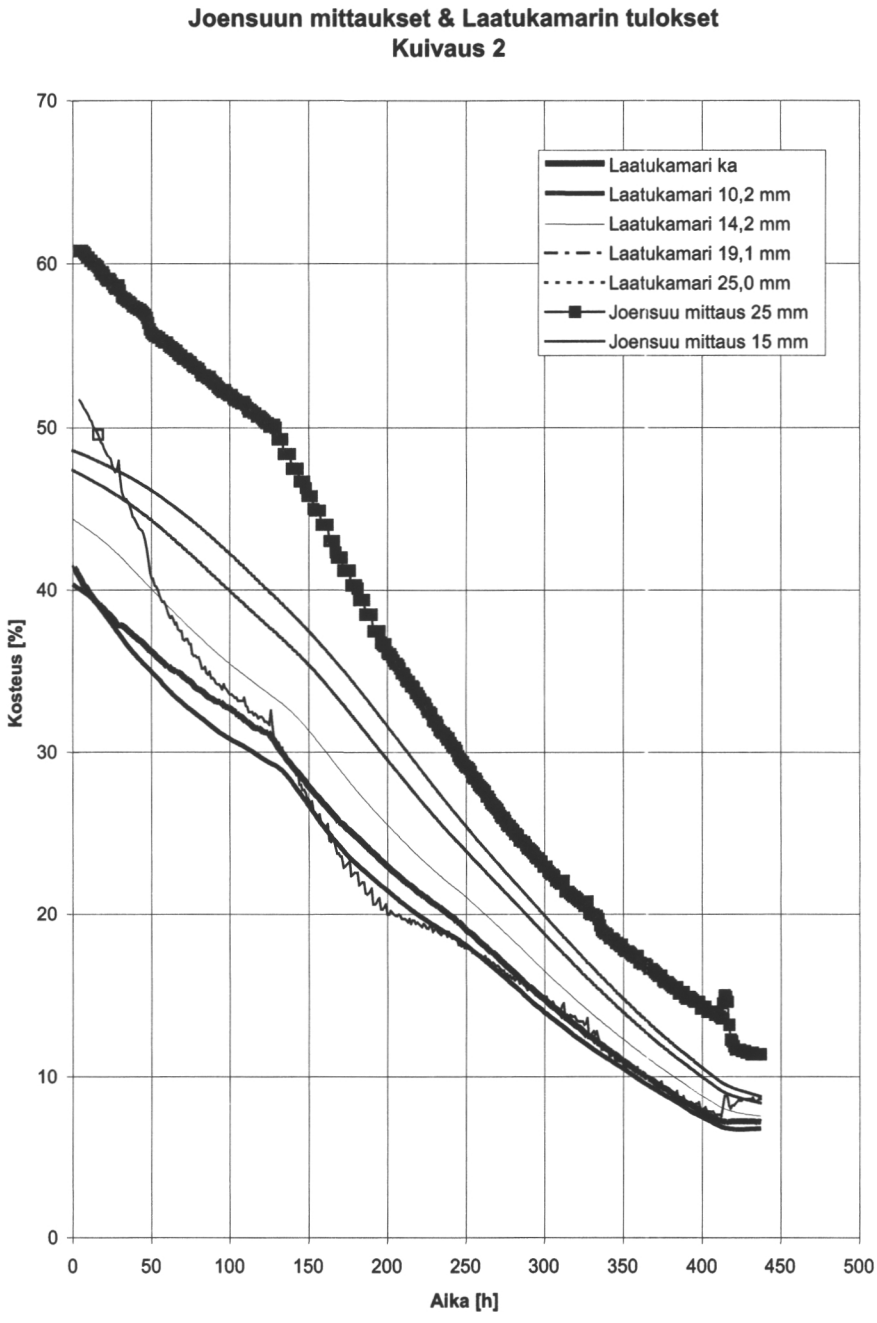
Aika [h]	Kuiva [°C]	Märkä [°C]	RH [%]	Tasapainokosteus [%]
0	70,0	67,0	87,2	15,6
30	70,0	67,0	87,2	15,6
32	70,0	66,5	85,1	14,7
243	70,0	65,5	81,2	13,3
287	70,0	61,7	67,6	9,6
321	70,0	56,0	50,2	6,6
472	70,0	56,0	50,2	6,6
554	70,0	56,0	50,2	6,6
555	70,0	62,0	68,5	9,8
596	70,0	62,0	68,5	9,8



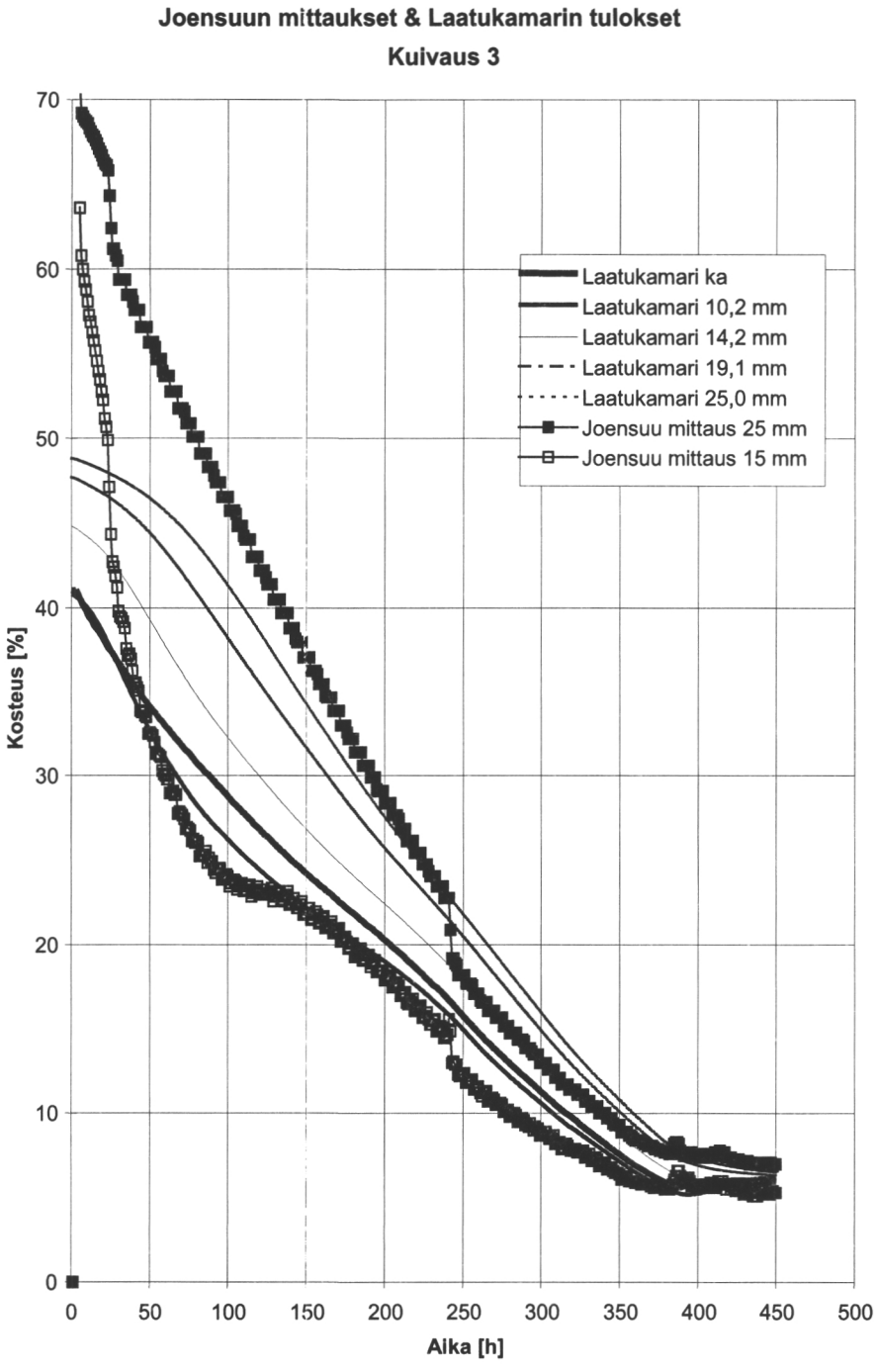
Liite 3. Joensuun yliopistossa tehtyjen lehtikuusisahatavaran rinnakkaisten koekuivausten ja Laatukamari-ohjelmalla lasketut kosteudet, kuivaus 1.



Liite 4. Joensuun yliopistossa tehtyjen lehtikuusisahatavaran rinnakkaisten koekuivausten ja Laatukamari-ohjelmalla lasketut kosteudet, kuivaus 2.

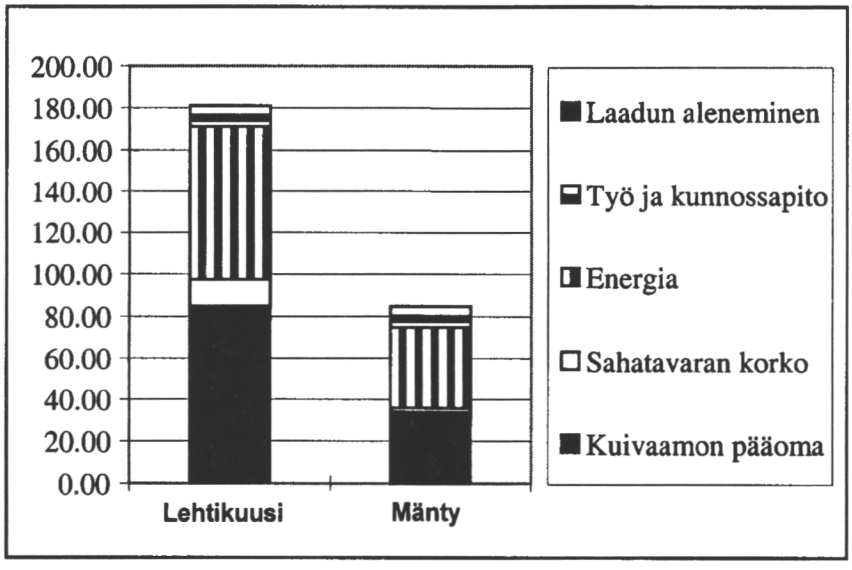


Liite 5. Joensuun yliopistossa tehtyjen lehtikuusisahatavaran rinnakkaisten koekuivausten ja Laatukamari-ohjelmalla lasketut kosteudet, kuivaus 3.



Liite 6/1. Lehtikuusen ja männyn puusepänkuivauksen kustannusvertailu, paksuus 50 mm, loppukosteus 10 %.

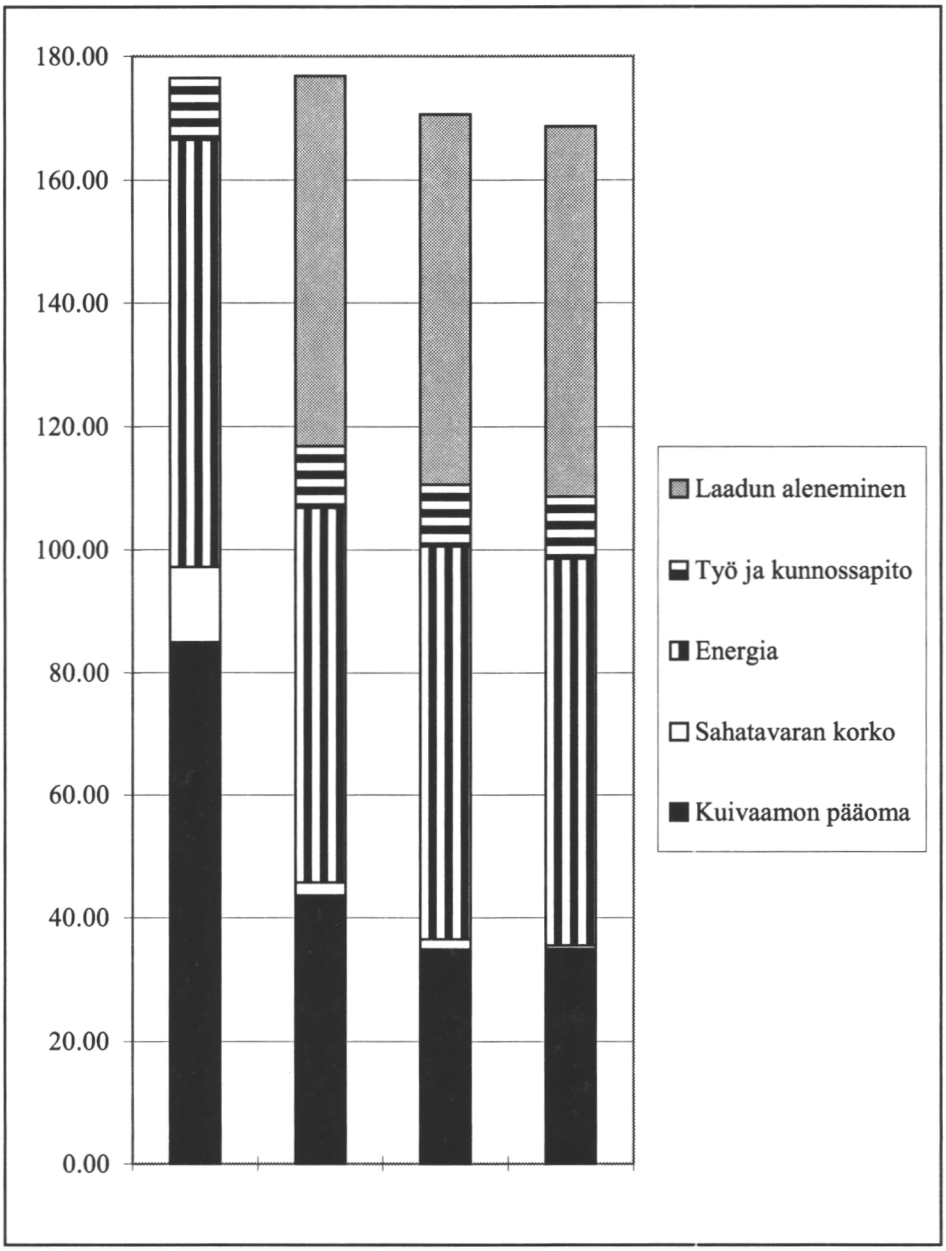
Lähtöarvot	**Lehtikuusi**	**Mänty**
Vuosikapasiteetti, m^3	2880	7200
Hankintahinta, milj. mk	1.8	1.8
Takaisinmaksuaika, a	10	10
Korkokanta, %	6	6
Lämmön hinta, mk/kWh	0.1	0.1
Sähkön hinta, mk/kWh	0.2	0.2
Kuivausaika, h	600	220
Lämmön kulutus, kWh/m^3	507	304
Sähkön kulutus, kWh/m^3	115	43
Tuotot, mk/m^3		
Sahatavaran arvo, mk/m^3	3000	1200
Halkeilun aih. arvon aleneminen, %	0	0
Kustannukset, mk/m^3		
Kuivaamon pääoma	84.92	33.97
Sahatavaran korko	12.33	1.81
Energia	73.70	39.00
Työ ja kunnossapito	10.00	10.00
Laadun aleneminen	0.00	0.00
Yhteensä	180.95	84.78



Liite 6/2. Lehtikuusen puusepänkuivauksen kustannusvertailu, kuivausmenetelmittäin, paksuus 50 mm, loppukosteus 10 %.

	Kamari, ei tasaannutusta	Kamari, vesitasaannutus	Kamari, höyrytasaannutus	Alipainekuivaus
Lähtöarvot				
Vuosikapasiteetti, m^3	2880	5600	7200	7000
Hankintahinta, milj. mk	1.8	1.8	1.85	1.8
Takaisinmaksuaika, a	10	10	10	10
Korkokanta, %	6	6	6	6
Lämmön hinta, mk/kWh	0.1	0.1	0.1	0.1
Sähkön hinta, mk/kWh	0.2	0.2	0.3	0.3
Kuivausaika, h	600	257	200	75
Lämmön kulutus, kWh/m^3	450	520	520	120
Sähkön kulutus, kWh/m^3	121	45	40	170
Tuotot, mk/m^3				
Sahatavaran arvo, mk/m^3	3000	1200	1200	1200
Halkeilun aih. arvon aleneminen, %	0	5	5	5
Kustannukset, mk/m^3				
Kuivaamon pääoma	84.92	43.67	34.91	34.94
Sahatavaran korko	12.33	2.11	1.64	0.62
Energia	69.20	61.00	64.00	63.00
Työ ja kunnossapito	10.00	10.00	10.00	10.00
Laadun aleneminen	0.00	60.00	60.00	60.00
Yhteensä	176.45	176.78	170.55	168.55

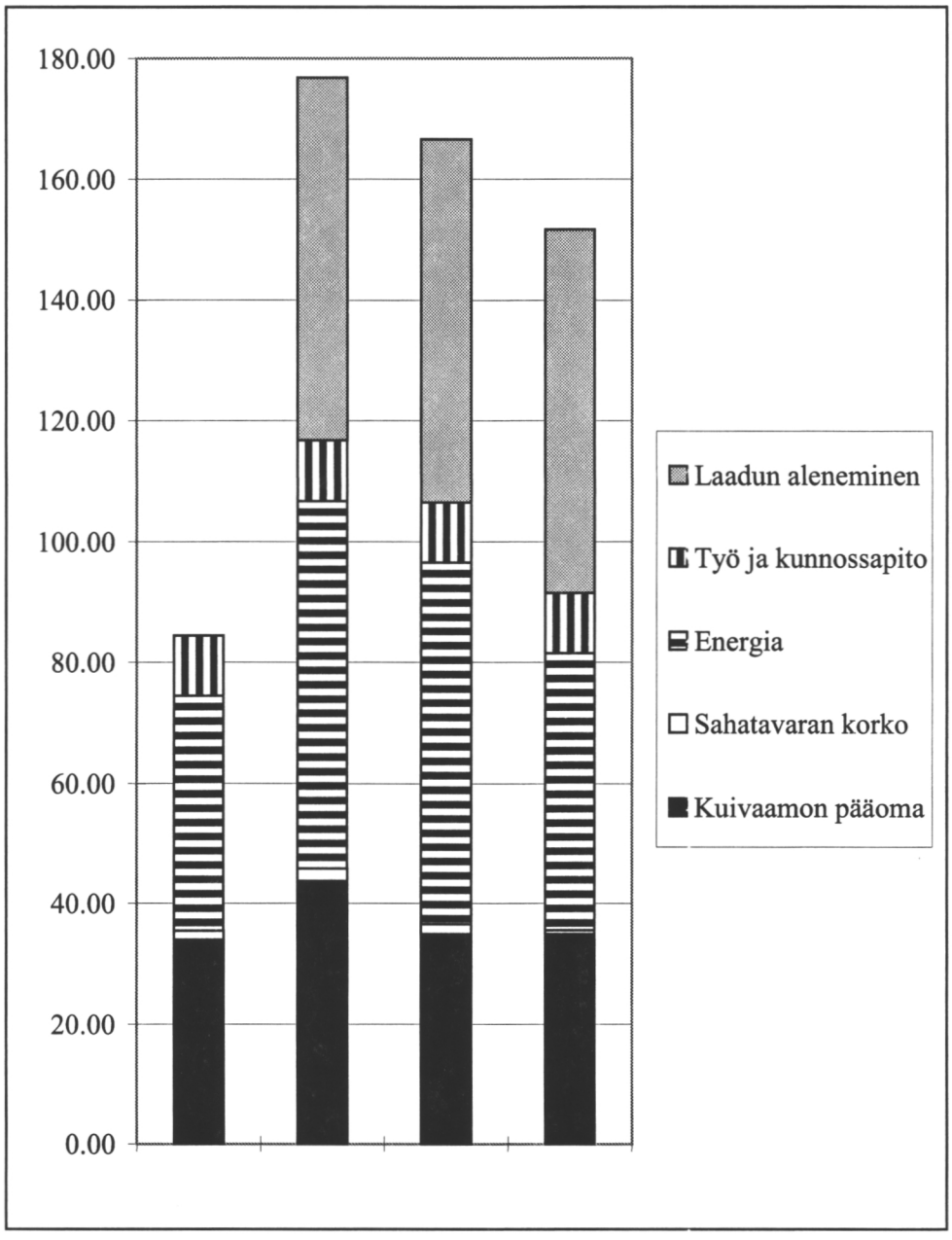
Liite 6/2 (jatkuu)



Kuva 2. Lehtikuusen puusepänkuivauksen kustannusvertailu, eri kuivausmenetelmät, paksuus 50 mm, loppukosteus 10 %.

Liite 6/3. Männyn puusepänkuivauksen kustannusvertailu, kuivausmenetelmittäin, paksuus 50 mm, loppukosteus 10 %.

	Kamari, ei tasaannutusta	Kamari, vesitasaannutus	Kamari, höyrytasaannutus	Alipainekuivaus
Lähtöarvot				
Vuosikapasiteetti, m^3	7200	5600	7200	7000
Hankintahinta, milj. mk	1.8	1.8	1.85	1.8
Takaisinmaksuaika, a	10	10	10	10
Korkokanta, %	6	6	6	6
Lämmön hinta, mk/kWh	0.1	0.1	0.1	0.1
Sähkön hinta, mk/kWh	0.2	0.2	0.2	0.2
Kuivausaika, h	180	257	200	75
Lämmön kulutus, kWh/m^3	316	520	520	120
Sähkön kulutus, kWh/m^3	37	45	40	170
Tuotot, mk/m^3				
Sahatavaran arvo, mk/m^3	1200	1200	1200	1200
Halkeilun aih. arvon aleneminen, %	0	5	5	5
Kustannukset, mk/m^3				
Kuivaamon pääoma	33.97	43.67	34.91	34.94
Sahatavaran korko	1.48	2.11	1.64	0.62
Energia	39.00	61.00	60.00	46.00
Työ ja kunnossapito	10.00	10.00	10.00	10.00
Laadun aleneminen	0.00	60.00	60.00	60.00
Yhteensä	84.45	176.78	166.55	151.55



Kuva 3. Männyn puusepänkuivauksen kustannusvertailu, eri kuivausmenetelmät, paksuus 50 mm, loppukosteus 10 %.

LEHTIKUUSEN LIIMAUS

Leena Suomi-Lindberg ja Hannu Viitanen

1 JOHDANTO

Tutkimuksessa selvitettiin lehtikuusen liimausta. Onnistunut ja kestävä liimaus on eräs keskeinen edellytys puumateriaalin laajamittaiselle käytölle. Tavanomaisten suomalaisten puulajien, kuten männyn, kuusen tai koivun, liimaus onnistuu yleensä hyvin ja liimasaumat ovat kestäviä, kun valitaan oikea liima oikeaan paikkaan ja liimaus on tehty hallitusti oikein.

Lehtikuusi poikkeaa liimausmateriaalina huomattavasti tavanomaisista suomalaisista puulajeista. Lehtikuusi sisältää esimerkiksi huomattavat määrät uuteaineita, joilla voi olla vaikutusta puumateriaalin liimausominaisuuksiin. Lehtikuusi elää voimakkaasti ympäröivän ilman kosteusvaihteluiden mukaan, mikä voi lisätä valmiissa liimatussa tuotteessa jännityksiä liimasaumaan ja edelleen heikentää liimasauman lujuutta.

Tässä tutkimuksessa tehtiin liimauskokeita eri tavoin kuivatuilla lehtikuusikappaleilla käyttäen kolmea eri liimatyyppiä. Pääosa kokeista oli lehtikuusilehtikuusiliimauksia, mutta tutkimuksessa tehtiin myös muutama liimauskoe liimaamalla yhteen lehtikuusta ja haapaa. Kosteusvaihteluiden vaikutusta lehtikuusesta valmistetun liimalevyn lujuusominaisuuksiin ja muodonmuutoksiin selvitettiin tutkimalla D3-liimattua lehtikuusilevyä.

Raportin alkuosassa käsitellään lyhyesti lehtikuusen liimaukseen liittyvää kirjallisuutta. Tämän jälkeen käsitellään tutkimuksessa tehtyjä liimauskokeita ja saatuja tuloksia.

2 KIRJALLISUUSTARKASTELU

Deppe ym. (1995) ovat tutkineet erittäin hartsipitoisen puun liimattavuusominaisuuksia. Tutkimuksessa oli mukana myös lehtikuusi. Hartsipitoisella puulla saatuja liimaustuloksia verrattiin normaalilla, vähemmän hartsia sisältävällä puulla saatuihin liimaustuloksiin.

Tutkimuksessa selvitettiin puun hartsipitoisuuden vaikutus liimasauman laatuun. Liimattava materiaalit olivat seuraavat:

- normaali mänty, pintapuu
- normaali mänty, sydänpuu
- hartsipitoinen mänty, pintapuu
- hartsipitoinen mänty, sydänpuu
- lehtikuusi

Taulukko 1. Deppen ym. (1995) tutkimuksessa liimattujen puukappaleiden tiheydet ja kosteuspitoisuudet.

Puuaineen tyyppi	Puuaineen tiheys, kg/m^3		Puuaineen kosteuspitoisuus, %	
	$\bar{x}$	s_x	$\bar{x}$	s_x
Normaali mänty				
Pintapuu	571	10	7,6	0,2
Sydänpuu	598	32	8,0	0,1
Hartsipitoinen mänty				
Pintapuu	579	13	7,8	0,3
Sydänpuu	871	38	13,4	2,2
Lehtikuusi	709	14	8,1	0,2

Kokeissa olivat mukana seuraavat liimat:

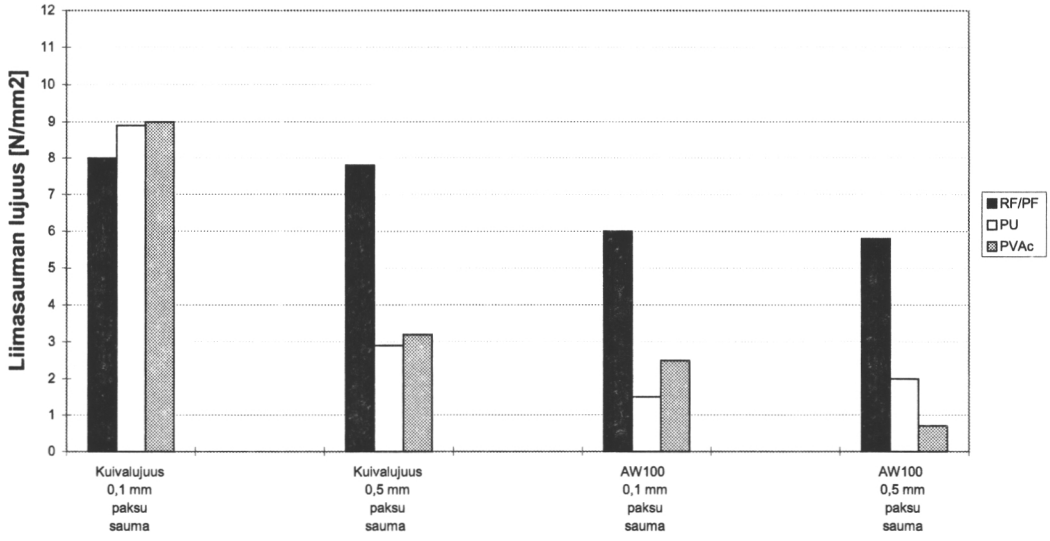
- fenoli-resorsinoliformaldehydihartsi (PRF)
- polyuretaaniliima (PU), 1-komponenttinen
- polyvinyyliasetaattiliima (PVAc)

Taulukossa 1 on esitetty liimattavien puumateriaalien tiheydet ja kosteudet. Liimattavan puumateriaalin alkuperää tai kuivausolosuhteita ei tutkimuksessa ilmoitettu. Liimasauman paksuus vaihteli välillä 0,1 - 0,5 mm Liimatuista kappaleista määritettiin sekä kuiva- että märkälujuudet (AW100-testi = keittokoe).

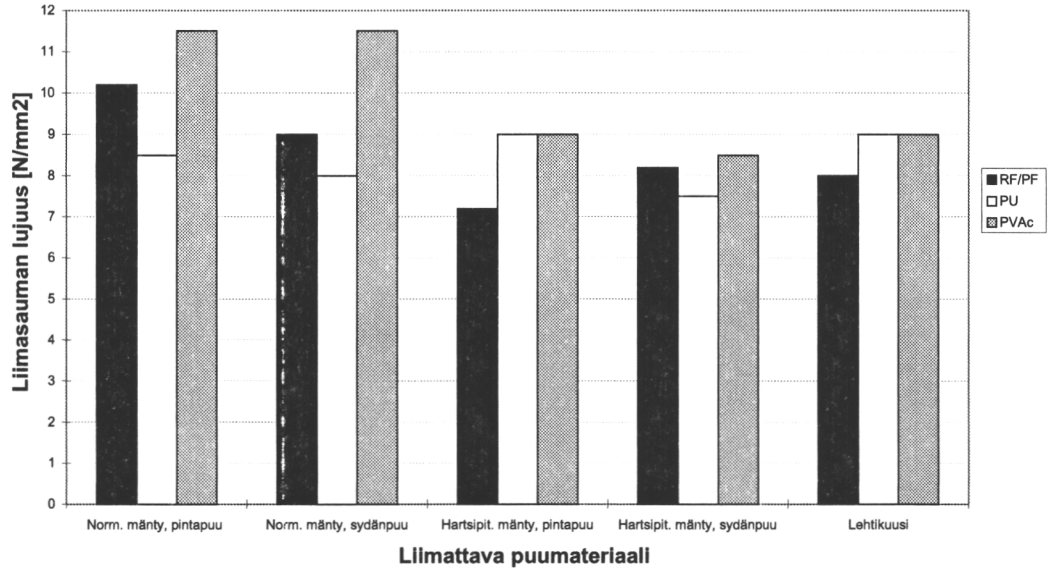
Lehtikuusiliimauksissa saadut lujuudet on esitetty kuvassa 1. Liimasauman paksuus vaikutti liimaustuloksiin. Kun liimasauman paksuus oli 0,1 mm, PVAc-liimalla saatiin parhaimmat tulokset. Kun liimasauman paksuus oli 0,5 mm, PRF-liima antoi parhaimmat tulokset. Liimasauman paksuudella ei ollut vastaavaa vaikutusta märkälujuuksiin. PU- ja PVAc-liimat ovat vähemmän kosteudenkestäviä kuin RF-liima, joten parhaimmat AW100-lujuustulokset saatiin PRF-liimatuilla tuotteilla.

Puun hartsipitoisuuden todettiin vaikuttavan vain vähän liimasauman laatuun (kuva 2). PRF-liimalla liimattaessa liimattavan puun hartsipitoisuus vaikutti jonkin verran heikentävästi liimasauman lujuuteen, vaikutus oli suurempi lehtikuusen sydän- kuin pintapuun liimauksessa. Lehtikuusen liimaustulokset PRF-liimalla olivat vähän heikommat kuin vertailuna käytetyn tavallisen mäntypuun liimaustulokset (kuva 3).

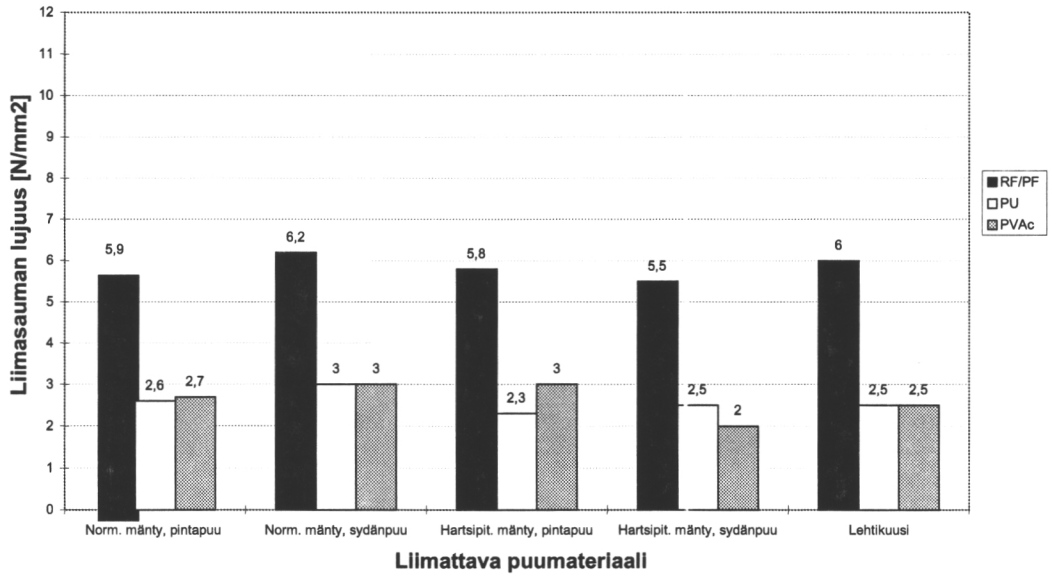
Puun hartsipitoisuuden vaikutusta liimaustulokseen tarkasteltiin paitsi lujuustulosten perusteella myös liimasauman murtumapintoja tarkastelemalla. Tämän perusteella puun hartsipitoisuudella ei voitu todeta selvää vaikutusta puun liimausominaisuuksiin.



Kuva 1. Lehtikuusen liimauksessa eri liimoilla saadut kuiva- ja AW100-lujuustulokset, liimasauman paksuus 0,1 mm. Kuvassa on esitetty myös liimasauman paksuuden vaikutus lujuuteen (Deppe ym. 1995).



Kuva 2. Liimasauman kuivalujuudet eri liimoilla liimattaessa, liimasauman paksuus 0,1 mm (Deppe ym. 1995).



Kuva 3. Liimasauman lujuudet AW100-testissä eri liimoilla liimattaessa (Deppe ym. 1995).

Juvonen ym. (1986) ovat tutkineet lehtikuusen liimattavuutta muihin puulajeihin verrattuna sekä mm. liiman levitysmäärän ja puristuspaineen vaikutusta lehtikuusen liimauksessa. Tutkimuksessa käytetyt liimat olivat fenoli-resorsinoliformaldehydiliima (RF-30) ja polyvinyyliasetaattiliima (PVAc). Liimauksissa käytettiin kuumapuristusta. Yhtäältä lehtikuusta liimattiin koivun ja kuusen kanssa, toisaalta liimattiin yhteen lehtikuusikappaleita. Tulokset lehtikuusen liimattavuudesta muiden puulajien kanssa ovat taulukossa 2.

Koekappaleet murtuivat pääsääntöisesti tiheydeltään alhaisemmasta puuaineesta. Joissakin tapauksissa murtuminen tapahtui liimasaumasta; puustamurtuma-arvot olivat tällöin alhaiset. Lehtikuuset hajosivat yleensä kevät- ja kesäpuun rajakohdasta, vaikka. ko. rajalta oli useita millimetrejä itse liimasaumaan. Kuusella ja koivulla ei havaittu vastaavaa ilmiötä. Lehtikuusen ja koivun välinen liitos osoittautui lujuudeltaan parhaimmaksi; tämä oli jopa vahvempi kuin puhdas lehtikuusiliitos.

Lehtikuusen ja kuusen välinen liimaliitos oli RF-liimalla keskimäärin 8 % ja PVAc-liimalla 3 % huonompi kuin puhdas lehtikuusiliitos mutta parempi kuin pelkkä kuusiliitos. Liimaliitosten lujuus oli lähes suoraan verrannollinen liimattavien puuaineiden tiheyteen (koivu 650 kg/m^3, lehtikuusi 530 kg/m^3, kuusi 390 kg/m^3). Kahta eri puulajia liimattaessa lujuuteen vaikutti ratkaisevasti puulajien tiheyksien keskiarvo, ei puulajeista kevyemmän tiheys.

Taulukko 2. Leikkauslujuus- ja puustamurtumatulokset liimauskokeissa, joissa tehtiin lehtikuusi-lehtikuusi-liimauksia ja liimattiin lehtikuusta kuusen ja koivun kanssa (Juvonen ym. 1986).

Puulaji	Liima	Puuaineen kosteus, %	Murtolujuus [MPa]		Puustamurtuma-%	
			$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	min-max
Lehtikuusi-lehtikuusi	RF	8,1	9,79	0,73	91	70-100
	PVAc	7,9	4,83	0,42	61	40- 70
	RF	12,1	9,78	1,16	90	50-100
	PVAc	11,9	6,46	1,20	73	40- 90
Lehtikuusi-koivu	RF	11,8	10,70	0,70	80	60- 90
	PVAc	12,0	7,24	0,40	64	40- 90
Lehtikuusi-kuusi	RF	8,2	8,29	1,56	71	30-100
	PVAc	8,3	5,44	0,49	59	40- 80
	RF	12,0	8,97	1,08	92	60-100
	PVAc	11,9	6,22	0,46	87	80-100
Kuusi-kuusi	RF	10,8	7,95	0,66	99	90-100
	PVAc	10,9	5,92	1,01	67	40-100

Liimaustulosten perusteella eri liimoille piirrettiin regressiosuorat, joiden perusteella voitiin arvioida puuaineen tiheyden ja kahta eri puulajia liimattaessa tiheyden keskiarvon vaikutusta liimasaumojen leikkauslujuuteen. Molemmille tutkituille liimoille saatiin tilastollisesti merkitsevät korrelaatiokertoimet (RF-liima 0,95, PVAc-liima 0,74). Kuivalujuustulosten perusteella ei näyttänyt olevan merkitystä sillä, liimataanko puulajeja keskenään vai toisiin puulajeihin. Liitosten lujuuden kannalta on ratkaisevaa puuaineen tiheys ja kahden eri puulajin liitoksessa tiheyksien keskiarvo.

Puun kosteuden aleneminen heikensi lievästi lehtikuusen ja kuusen välistä liimaliitosta käytettäessä sekä RF- että PVAc-liimaa; vaikutus oli PVAc-liimalla hieman voimakkaampi. Puhtaassa lehtikuusiliitoksessa puun kosteuden vaihtelut eivät vaikuttaneet liimaustulokseen lainkaan käytettäessä RF-liimaa. Kosteuden aleneminen heikensi kuitenkin tuloksia PVAc-liimaa käytettäessä.

Liiman levitysmäärän ja puristuspaineen vaikutuksia lehtikuusi-lehtikuusiliimasauman laatuun tutkittiin RF-liimauskokeissa. Vertailuna käytettiin kuusikuusi-liimauksia. Tulokset ovat taulukossa 3.

Puristuspaineen nosto paransi lehtikuusella hieman keskimääräistä murtolujuutta, mutta paineen kasvaessa lujuuden hajonta suureni huomattavasti. Kuusella ilmiö oli muuten samanlainen, mutta suurimmalla paineella saatiin pienin hajonta. Erilaisilla liiman levitysmäärillä saatiin lehtikuusella ja kuusella samankaltaiset

Taulukko 3. Leikkauslujuus- ja puustamurtumatulokset liimauskokeista, joissa liimattiin lehtikuusikappaleita tai kuusikappaleita keskenään vaihdellen liimamäärää ja puristuspainetta (Juvonen ym. 1996).

Puulaji	Liiman levitys-määrä [g/m^2]	Puristus-paine [MPa]	Murtolujuus [MPa]		Puusta-murtuma-%	
			$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	min-max
Lehtikuusi-lehtikuusi	300	1,0	9,25	1,04	93	80-100
	400	0,8	9,38	0,54	98	90-100
	400	1,0	9,87	1,42	100	100-100
	400	1,2	10,37	2,05	100	100-100
	500	1,0	4,74	0,85	60	50-70
Kuusi-kuusi	300	1,0	6,30	1,34	100	100-100
	400	0,8	7,54	1,28	100	100-100
	400	1,0	7,84	1,97	100	100-100
	400	1,2	8,01	0,93	100	100-100
	500	1,0	6,01	0,39	80	50-100

tulokset. Levitysmäärän lisäys tasolta 300 g/m^2 tasolle 400 g/m^2 paransi lujuutta, kuusella jopa huomattavan paljon. Levitysmäärän lisäys tasolle 500 g/m^2 heikensi lujuusarvoja merkittävästi molemmilla puulajeilla ja liimaukset epäonnistuivat tällöin lähes täysin. Lehtikuusella riittää ilmeisesti jonkin verran pienempi liiman levitysmäärä kuin kuusella. Esim. RF-liimalla levitysmäärien 300 ja 400 g/m^2 ero limasauman lujuudessa on lehtikuusella erittäin pieni.

Dix ym. (1995) ovat tutkineet euroopanlehtikuusen (*Larix decidua*) pinta- ja sydänpuusta eri liimoilla valmistetun lastulevyn kosteuskäyttäytymistä. Kokeissa käytettiin puuraaka-aineita, joiden valmistukseen käytetyn puun ikä oli 20, 40 tai 102 vuotta. Käytetyt liimat olivat: 1) melamiini-urea-formaldehydihartsi (MUF), 2) fenoliformaldehydihartsi (FF), 3) polymeerinen difenyylimetaanidi-isosyanaatti (PMDI), 4) tanniini-formaldehydihartsi (TF). Puun sisältämät uuteaineet voivat vaikuttaa puun liimattavuuteen, esimerkiksi puun sisältämät uuteaineet voivat reagoida liiman sisältämän formaldehydin kanssa. Tämän takia tutkimuksessa oletettiin, että formaldehydiliimoilla valmistetuilla lehtikuusilastulevyillä on erittäin hyvät lujuusominaisuudet.

Eri ikäiset lehtikuuset kaadettiin, kuorittiin, pinta-ja sydänpuut erotettiin ja lastuttiin lehtikuusilastulevyn valmistusta varten. Lastuista määritettiin ligniini-, pentosaani-, uuteaine- ja hiilihydraattipitoisuudet. Lisäksi määritettiin eräitä liimauksen kannalta oleellisia tekijöitä, kuten puun pH, puskurikapasiteetti ja puusta haihtuvien happojen määrä. Lehtikuusen sisältämien uuteaineiden vaikutusta lastulevyn lujuusominaisuuksiin tutkittiin valmistamalla lastulevyjä tai lisäämällä eri määriä uuteaineita liimaseokseen. Tässä määritettiin liimaseoksen geeliytymisaika, mikä kuvaa liimaseoksen kovettumiseen kuluvaa aikaa. Geeliytymisaika pi-

teni MUF- ja TF-liimaseoksilla ja lyheni jonkin verran PF-liimaseoksella uuteaineiden lisäyksen vaikutuksesta normaaleihin liimaseosten geeliytymisaikoihin verrattuna. Tämä osoittaa, että uuteaineilla oli vaikutusta liimaseoksen reaktiivisuuteen.

Lehtikuusen sydän- ja pintapuusta valmistettujen lastulevyjen taivutus- ja lujuusominaisuuksia arvioitiin seuraavasti:

- Sekä 20- että 40-vuotiaasta lehtikuusesta valmistetun lastulevyn lujuusominaisuudet olivat liimatyypistä riippumatta paremmat sydänpuusta kuin pintapuusta valmistettuna.
- Sekä pinta- että sydänpuusta valmistetun lastulevyn lujuusominaisuudet heikkenivät liimatyypistä riippumatta puun iän kasvaessa. Erityisesti 102-vuotiaan lehtikuusen sydänpuulastuista valmistetun lastulevyn lujuusominaisuudet olivat selvästi heikommat kuin pintapuulastuista valmistetun. Tämä johtunee sydänpuulastujen runsaasta vesiliuokoisten uuteaineiden määrästä, mikä heikentää liimausta. Tämä taas johtuu sydänpuun uuteaineiden alhaisemmasta pH-arvosta ja korkeammasta puskurikapasiteetista pintapuuhun verrattuna.
- Sydänpuulastuista valmistetuista lastulevyistä vapautui huomattavasti enemmän etikkahappoa mutta vastaavasti vähemmän formaldehydiä kuin pintapuulastuista valmistetuista.
- PMDI-, MUF- ja TF-liimaseoksilla liimattujen lastulevyjen lujuusominaisuudet olivat selvästi paremmat kuin FF-hartsilla liimattujen.
- Sekä 20- että 40-vuotiaan lehtikuusen sydänpuulastuista PMDI-, MUF- ja TF-hartseilla liimatut ja 20-vuotiaan lehtikuusen sydänpuulastuista FF-hartsilla liimatut lastulevyt täyttivät lastulevyille asetetut V100 laatuvaatimukset.

Tulosten perusteella lehtikuusen pinta- ja sydänpuulastuista valmistettujen lastulevyjen lujuusominaisuudet riippuvat ainakin lehtikuusen iästä sekä uuteaineista.

Khrulev ym. (1982) ovat tutkineet eri kosteuspitoisuudessa olevan lehtikuusen liimausta. Liimattavat kappaleet olivat siperianlehtikuusta (*Larix sibirica*) ja niiden keskimääräinen kosteuspitoisuus oli 25 %, tiheys 680 kg/m^3, vuosiluston leveys 1 mm ja kesäpuun osuus 32 %. Liimattavat kappaleet käsiteltiin ennen liimausta 5-prosenttisella alkaliliuoksella lämpötilassa 60 °C. Liimana oli fenoliformaldehydihartsi (FF-hartsi). Liimatuille kappaleille tehtiin nopeutetut termiset vanhennustestit vedessä ja kuivissa olosuhteissa. Tuloksia verrattiin normaalimännyn liimauksesta saatuihin tuloksiin.

Lehtikuusen liimasauman lujuuden aleneminen tapahtui hitaammin kosteissa kuin kuivissa olosuhteissa. Liimattaessa lehtikuusta kosteuspitoisuudessa 20-25 % saatiin 1,2-1,4-kertainen liimausauman lujuus verrattuna liimaukseen tavanomaisessa kosteuspitoisuudessa, joka on 10 %. Lehtikuusikappaleet, jotka on liimattu 20-25 %:n kosteuspitoisuudessa soveltuvat käytettäviksi kosteissa olosuhteissa, kuten esimerkiksi karjarakennuksissa.

3 LEHTIKUUSEN LIIMAUSKOKEET

3.1. Puumateriaali

Liimauskokeisiin valittu puumateriaali on esitetty taulukossa 4. Liimattavat puumateriaalit yhdistettiin seuraavasti eri kokeissa:

- lehtikuusi - lehtikuusi - liimaus
- lehtikuusi - haapa - liimaus
- mänty - mänty -liimaus (vertailuliimaukset)

3.2 Liimauskokeet

Liimauskokeissa lehtikuusikappaleet olivat sydänpuuta. Kappaleet liimattiin tangentin suuntaan sahatut pinnat vastakkain ja lisäksi liimattiin muutama koekappale, joissa tangentin- ja säteensuuntaiset pinnat olivat vastakkain. Lehtikuusi-lehtikuusi -liimausten lisäksi tehtiin lehtikuusi-haapa –liimauksia. Vertailuliimaukset tehtiin mäntykappaleilla. Liimattavien kappaleiden koko oli 45 mm * 45 mm * 400 mm. Kappaleet tasaannutettiin ilman suhteellisessa kosteudessa 65 % (RH) ennen liimauskokeita.

Liimanlevitys tehtiin kaksipuolisena siveltimen avulla ja mahdollisuuksien mukaan noudatettiin liimanvalmistajan antamia liimanlevitysmääriä. Kokeissa käytettiin seuraavia liimoja:

- resorsinoli-fenoli-formaldehydiliima (RF, RF-30; Neste Oy Chemicals)
- polyvinyyliasetaattiliima (PVAc, KESTOKOL B4, ei kovettajaa; KIILTO Oy)
- polyuretaaniliima (PU, Kestopur 100 / 90 / Patruuna; KIILTO Oy)

Taulukko 4. Liimauskokeissa käytetty puumateriaali

Puulaji	Alkuperämaa	Kuivaustapa
Siperianlehtikuusi	Suomi	Ulkokuivaus
Siperianlehtikuusi	Suomi	Alipainekuivaus
Siperianlehtikuusi	Suomi	Lämminilmakuivaus
Siperianlehtikuusi	Suomi	Kuumakuivaus
Siperianlehtikuusi	Venäjä	Lämminilmakuivaus
Mänty	Suomi	Lämminilmakuivaus
Haapa	Suomi	Lämminilmakuivaus

Liimauskokeet tehtiin käyttäen kylmäpuristusta (n. 1 MPa) ja noudattaen liimanvalmistajan suosittelemia puristusaikoja:

Liima	Puristusaika, h / 20 °C
RF	8
PVAc	4
PU	8

Liimasauman kuivalujuus- ja puustamurtuma-arvot määritettiin standardin EN 392 (ns. block shear -testi) ja kosteudenkestävyys standardin EN 302-2: 1992 mukaisesti (delaminoitumiskoe). Koekappaleet kyllästettiin ensivaiheessa vedellä ja kuivattiin sen jälkeen lähes alkumassansa mukaiseen kosteuteen, jonka perusteella määritettiin liimasaumojen aukeaminen kyllästys-kuivaus-käsittelyn seurauksena.

Liiman tunkeutumaa liimattaviin puupintoihin tarkasteltiin mikroskooppisesti. Liimasaumasta valmistettiin mikrotomilla ohuita leikkeitä, joita tarkasteltiin mikroskoopin avulla läpivalaisutekniikkaa hyväksi käyttäen. Mikroskoopin avulla voitiin nähdä, miten liima oli tunkeutunut liimattavien pintojen solukerroksiin.

Lisäksi tehtiin yksi koeliimalevy käyttäen PVAc-liimaa KIILTO D3. Levy kooltaan 1200 mm * 800 mm liimattiin noin 33 mm:n * 45 mm:n rimoista. Levystä sahattiin delaminoitumiskokeisiin kolme palkkia kooltaan 33 mm * 75 mm * 800 mm.; yhdessä palkissa oli 17 liimasaumaa. Liimasauman kosteudenkestävyys määritettiin standardin EN 302-2: 1992 mukaisesti (delaminoitumiskoe).

3.3 Liimauskokeiden tulokset

3.3.1 Liimauskokeet RF-liimalla

RF-liimalla saatiin kaikilla lehtikuusikappaleilla hyvät liimasauman leikkauslujuudet ja puustamurtuma-arvot kuivana testattaessa (taulukko 5). Se miten lehtikuusikappaleet oli kuivattu ennen liimausta ei vaikuttanut liimasauman laatuun.

Liimattavat kappaleet liimattiin vastakkain siten, että liimattavien kappaleiden syysuunnat liimasaumassa olivat noin 45°. Kokeissa tehtiin yksi liimaussarja, jossa liimattiin yhteen tangentin- ja säteensuuntaiset pinnat. Syysuunnalla ei ollut vaikutusta liimaustuloksiin. Murtuminen liimasaumassa tapahtui kaikissa liimauksissa puusta (korkeat puustamurtuma-arvot), joten liimasauma oli lujempi kuin puu.

Delaminoitumiskokeen avulla määritettiin liimattavien kappaleiden kosteuselämisestä johtuvan puun turpoamisen ja kutistumisen vaikutukset liimasauman laatuun. Säteen ja tangentin suuntaisia pintoja liimattaessa puun kosteuseläminen oli tangentin suuntaan runsaampaa kuin säteen suuntaan. Kosteusvaihteluiden aiheuttama vaikutus liimasauman lujuuteen oli vähäinen.

Taulukko 5. RF-liimalla tehtyjen liimauskokeiden tulokset.

Liimatut puulajit [1]	Alkuperämaa	Kuivaustapa	Liimattujen kappaleiden syysuunnat [2]	Leikkauslujuus N/mm^2	Puustamurtuma %	Delaminoitumis- %
1-1	Suomi	Lämminilma	t-t	9,7	96	0
1-1	Suomi	Lämminilma	t-s	8,9	88	0
1-1	Suomi	Ulko	t-t	10,4	93	8
1-1	Suomi	Alipaine	t-t	7,6	93	0
1-1	Venäjä	Lämminilma	t-t	8,1	100	3
1-1	Suomi	Kuuma	t-t	9,3	98	39
1-2	Suomi	Lämminilma	t-t	10,4	94	0
3-3	Suomi	Lämminilma	t-t	7,4	96	15

[1] 1 = lehtikuusi, 2 = haapa, 3 = mänty
[2] t = noin 45 asteen kulma, s = säteen suunta

Taulukko 6. PVAc-liimalla tehtyjen liimauskokeiden tulokset.

Liimatut puulajit [1]	Alkuperämaa	Kuivaustapa	Liimattujen kappaleiden syysuunnat [2]	Leikkauslujuus N/mm^2	Puustamurtuma %
1-1	Suomi	Lämminilma	t-t	9,5	100
1-1	Suomi	Ulko	t-t	10,2	100
3-3	Suomi	Lämminilma	t-t	6,5	97

[1] 1 = lehtikuusi, 3 = mänty
[2] t = noin 45 asteen kulma

Taulukko 7. PU-liimalla tehtyjen liimauskokeiden tulokset.

Liimatut puulajit [1]	Alkuperämaa	Kuivaustapa	Liimattujen kappaleiden syysuunnat [2]	Leikkauslujuus N/mm^2	Puustamurtuma %
1-1	Suomi	Lämminilma	t-t	4,9	0
1-1	Suomi	Ulko	t-t	4,1	0
1-1	Suomi	Alipaine	t-t	4,9	12
1-2	Suomi	Lämminilma	t-t	6,1	5
3-3	Suomi	Lämminilma	t-t	5,2	6

[1] 1 = lehtikuusi, 2 = haapa, 3 = mänty
[2] t = noin 45 asteen kulma

Delaminoitumiskokeessa määritetään delaminoitumisprosentti (D-%), joka ilmaisee, miten paljon liimatun kappaleen (75 mm * 45 mm * 45 mm) reunasaumat ovat auki vesikyllästys-kuivaus -käsittelyn (65-75 °C) jälkeen. Erityyppisille liimoille on määritelty sallitut delaminoitumisprosentin raja-arvot. RF-liima on täysin vedenkestävä, joten onnistuneessa liimauksessa delaminoitumisprosentti on 0 % ja sallittu raja-arvo on 5 %. PVAc-liima voi kovettimen lisäyksen avulla saavuttaa parhaimmillaan delaminoitumisprosentin n. 10 %.

Lehtikuusen RF-liimauksessa delaminoitumisprosentti oli pääsääntöisesti alhainen, alle 5 %. Kuumakuivatulla lehtikuusella delaminoitumisprosentti oli kuitenkin huomattavan korkea, 39 %. Kuumakuivaus poikkeaa muista kuivaustavoista siten, että kuivaus tapahtuu nopeammin ja korkeammissa lämpötiloissa kuin normaali lämminilmakuivaus. Puuhun voi tällöin jäädä normaalia enemmän jännityksiä, mikä voi ilmetä liimasauman aukeamisena delaminoitumiskokeessa. Myös kuumakuivatun puun uuteainemäärät ja niiden laatu lähellä pintaa voivat olla erilaiset kuin lämminilmakuivatussa puussa, mikä voi vaikuttaa omalta osaltaan sauman lujuuteen kosteuden vaihdellessa.

Lehtikuusi-haapa -liimauskokeissa saatiin hyvät liimasauman lujuus- ja puustamurtuma-arvot. Liimasaumojen delaminoitumista ei myöskään tapahtunut.

3.3.2 Liimauskokeet PVAc-liimalla

PVAc-liimalla tehtyjen liimauskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 6. PVAc-liimalla liimattiin vain lämminilma- ja ulkokuivattua lehtikuusta, vertailumateriaalina oli mänty.

PVAc-liimalla saatiin hyvät liimasauman lujuudet. Vertailumateriaalina käytetyn männyn liimaustulokset olivat RF-liimauksen tavoin heikommat kuin lehtikuusen liimaustulokset. Tämä tukee edelleen olettamusta tässä tutkimuksessa mukana olleen mäntymateriaalin huonosta laadusta. Kuivaustapa ei vaikuttanut lehtikuusen liimattavuusominaisuuksiin.

PVAc-liimattuja kappaleita ei testattu delaminoitumiskokeella, koska tutkimuksessa käytettyyn PVAc-liimaan ei lisätty silloitusainetta.

3.3.3 Liimauskokeet PU-liimalla

PU-liimalla tehtyjen liimauskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 7. PU-liimalla liimattiin lämminilma-, ulko- ja alipainekuivattua lehtikuusta sekä lisäksi haapaa lehtikuusen kanssa. Vertailuliimaukset tehtiin mäntykappaleilla.

PU-liima, Kestopur 100/90, on 1-komponenttinen polyuretaaniliima, joka kovettuu kosteuden vaikutuksesta. PU-liimalla saatiin jonkin verran alhaisemmat liimasauman lujuudet kuin muilla liimatyypeillä sekä vertailumateriaalina käytettyä mäntyä että eri tavoin kuivattua lehtikuusta liimattaessa.

PU-liima käyttäytyy kovettuneena liimasaumana eri tavoin kuin esimerkiksi RF-liima. PU-liima on kovettuneena joustavampi ja lujuudeltaan jonkin verran heikompi kuin RF-liima. Näin PU-liimasauma myötää kuormitettaessa pidempään kuin RF-liimasauma. PU-liima on pienimolekyylinen aine, joka tunkeutuu hyvin liimattavaan puumateriaaliin.

3.4 Liimasauman mikroskooppitarkastus

Liimasaumasta valmistettiin ohuita leikkeitä mikrotomilla, joita katsottiin ja kuvattiin läpivalaisun avulla valomikroskoopilla. Liitteessä 1 on esitetty mikroskooppikuvia resorsinoliliimatuista lehtikuusi- ja mäntykappaleista. Kuvissa puusolukko näkyy verkkomaisena rakenteena ja liima tummana, solukkoja täyttävänä aineena. RF-liima oli levinnyt tasaisesti molempiin liimattaviin pintoihin.

Lujan ja kestävän liimaustuloksen edellytyksenä on, että liima tunkeutuu tasaisesti molempiin liimattaviin pintoihin, ankkuroituu puun solurakenteeseen ja kovettuu hyvin. RF- ja PVAc-liimat tunkeutuivat hyvin liimattaviin puupintoihin, jolloin tuloksena olivat korkeat leikkauslujuus- ja puustamurtuma-arvot, kun koekappaleita testattiin kuivana. Vaikka liima saadaan puristusvaiheessa tunkeutumaan hyvin molempiin liimattaviin pintoihin, liimasauman kestävyys kosteissa olosuhteissa ei ole varmaa. Tämä määräytyy liiman kosteudenkestävyysominaisuuksien perusteella.

Mikroskooppisen tarkastelun perusteella näytti siltä, että liiman tunkeutuminen liimattaviin lehtikuusipintoihin ei ole ongelma. Lehtikuusi sisältää huomattavasti enemmän uuteaineita kuin perinteiset kotimaiset puulajit, jolloin hyvä liimaustulos voi liimatyypistä riippuen edellyttää tavallista pidempää puristusaikaa. Uuteaineiden määrä ei kuitenkaan ole niin suuri, että liiman tunkeutuminen voisi estyä.

3.5 PVAc-D3 -liimatun lehtikuusiliimalevyn kosteudenkestävyys

Taulukossa 8 on esitetty liimasaumojen aukeneminen lehtikuusiliimalevyn delaminoitumiskokeessa ja delaminoitumisprosentit. PVAc-D3-liima joutuu erittäin kovaan rasitukseen delaminoitumiskokeessa. Liimasaumat kestivät kuitenkin hyvin vesikyllästys-kuivaus- käsittelyn. Liimattujen pintojen syysuunta vaikutti jonkin verran tuloksiin. Parhaiten kosteuden aiheuttamaa rasitusta kestivät liimasaumat, joissa liimattavat pinnat olivat noin 45 asteen kulmassa toisiinsa nähden.

Palkkien keskipituus oli ennen käsittelyä 787 mm. Delaminoitumiskokeen jälkeen pituus oli 816-818 mm eli turpoama oli keskimäärin 31 mm. Palkkien pituus oli osittain palautunut 2,5 kk:n kuluttua delaminoitumiskokeen jälkeen, keskimäärin noin 795 millimetriin, jolloin turpoamajäännös oli 8 mm.

Taulukko 8. Lehtikuusiliimalevyn saumojen aukeaminen ja delaminoitumisprosentti. Liimattujen pintojen syysuunta: t = 45 astetta (* = poikkeaa), s = säteen suunta.

Liimasauma nro	Syysuunta	Palkki nro 1	2	3	Yhteensä
		Saumojen aukeaminen, mm			
1	Tt	0	0	14	14
2	Tt	0	22	0	22
3	Tt	0	8	0	8
4	Tt*	5	0	16	21
5	T*t	41	9	3	53
6	Ts	0	12	3	15
7	St*	33	0	16	49
8	Tt	0	0	26	26
9	Tt	8	0	0	8
10	Ts	0	11	22	33
11	St	0	0	24	24
12	Tt	0	0	0	0
13	Tt	0	0	0	0
14	Tt	4	3	4	11
15	Tt	0	0	0	0
16	Tt	0	0	0	0
17	Tt	0	0	0	0
Delaminoitumisprosentti		3	5	11	...

Mäntykappaleista valmistettiin RF-liimalla liimalevy, josta sahatut, lehtikuusesta tehtyjen kokoiset palkit testattiin myös delaminoitumiskokeella. Tässä kokeessa liimasaumojen delaminoitumista ei tapahtunut lainkaan.

Liitteissä 2 ja 3 on kuvat lehtikuusi- ja mäntyliimalevyistä sahatuista palkeista delaminoitumiskokeiden jälkeen. Lehtikuusipalkit vääntyilivät enemmän kuin mäntypalkit. Liitteessä 4 on tarkennettu kuva lehtikuusesta valmistetusta liimalevystä ja liimattavien pintojen suunnista eri liimasaumoissa. Liimasaumojen numerointi on sama kuin taulukossa 8.

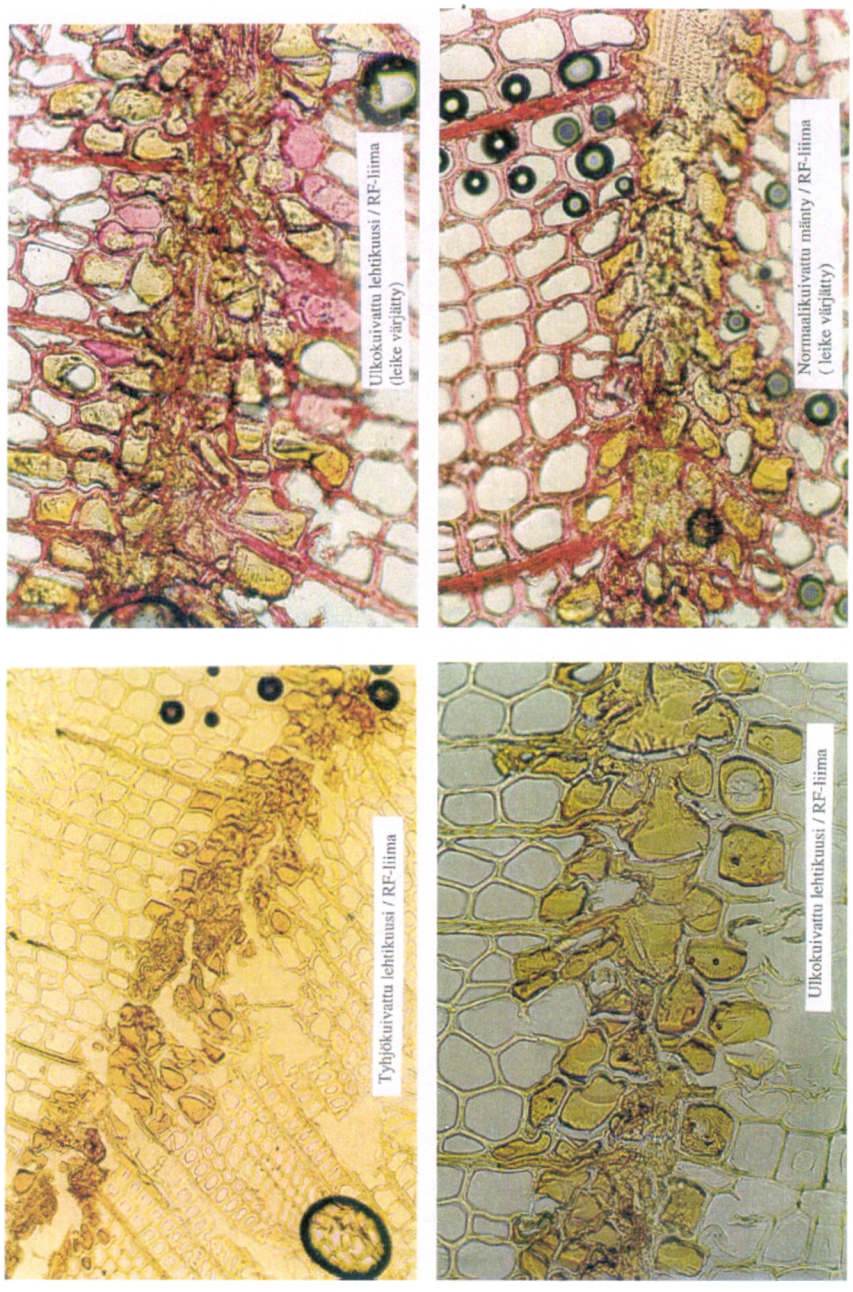
Puu elää kosteuden vaikutuksesta eri suuntiin eri tavalla. Ilman suhteellisen kosteuden muuttuessa hyvin kuivasta kosteaksi, esim. välillä 10-100 %RH, puukappaleen mitat muuttuvat huomattavasti. Käsittelemättömien kotimaisten havupuiden keskimääräinen kosteuseläminen on edellämainitulla kosteuden vaihtelualueella tangentin suunnassa noin 8 %, säteen suunnassa noin 4 % ja pituuden suunnassa noin 0,1 %. Lehtikuusi elää eri suuntiin voimakkaammin kuin kotimaiset havupuulajit, tangentin suunnassa jopa 10 %. Näin ollen lehtikuusikappaleiden

liimauksessa tulee kiinnittää erityistä huomiota liimattavien kappaleiden syysuuntiin.

Liimattuja puutuotteita käytetään erilaisissa kosteusolosuhteissa, joten kosteusvaihteluiden aiheuttamaa turpoamista ja kutistumista ei voida välttää. Elämistä voidaan vähentää pyrkimällä tekemään liimaus siten, että liimasaumaan syntyy mahdollisimman vähän jännityksiä valmiissa tuotteessa. Tärkeimpiä huomioon otettavia seikkoja ovat vuosirenkaiden suuntautuminen puun poikkipinnassa ja ytimen sijainti.

Liitteessä 5 on annettuja eräitä ohjeita massiivipuukappaleiden liimauksesta ja nimenomaan siitä, minkä suuntaisia pintoja tulisi liimata vastakkain.

Liite 1. Mikroskooppikuvia lehtikuusen liimasaumasta.

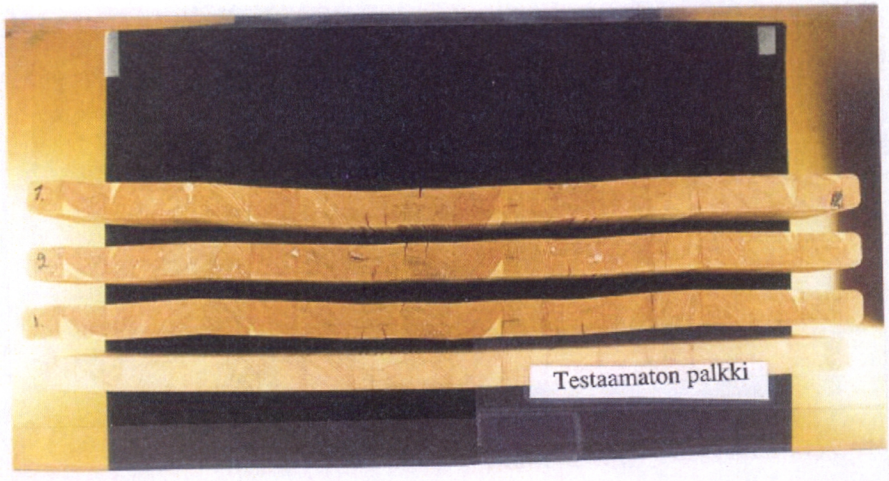


Liite 2. PVAc-D3 -liimatusta lehtikuusiliimalevystä sahattujen palkkien vääntyily delaminoitumiskokeen jälkeen.

Testatut lehtikuusipalkit delaminointikokeen jälkeen.



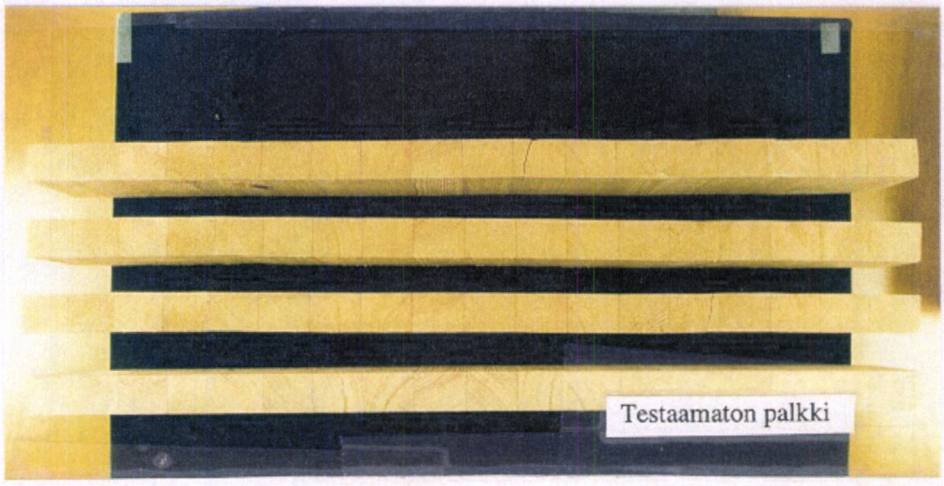
Lehtikuusi / D 3 - liima



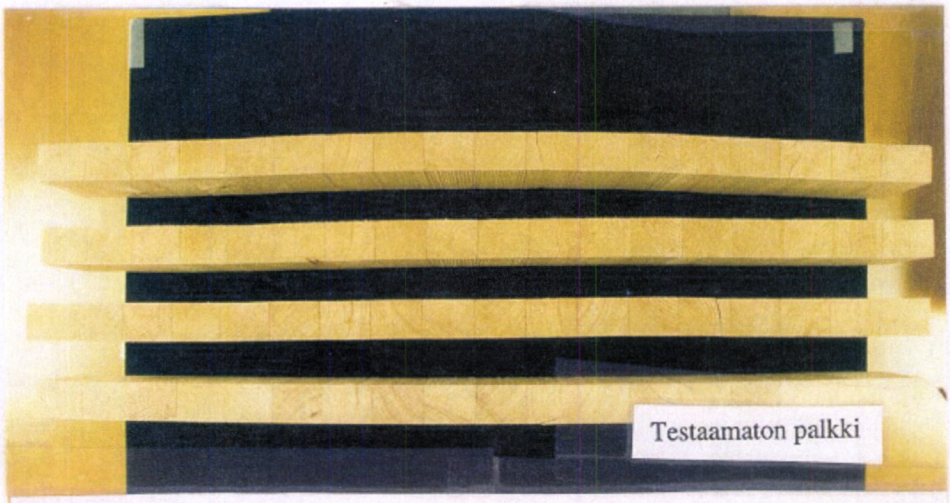
Lehtikuusi / D 3 - liima

Liite 3. RF-liimatun mäntypöytälevyn palkit delaminoitumiskokeen jälkeen.

Testatut mäntypalkit delaminointikokeen jälkeen.



Mänty / RF -liima



Mänty / RF -liima

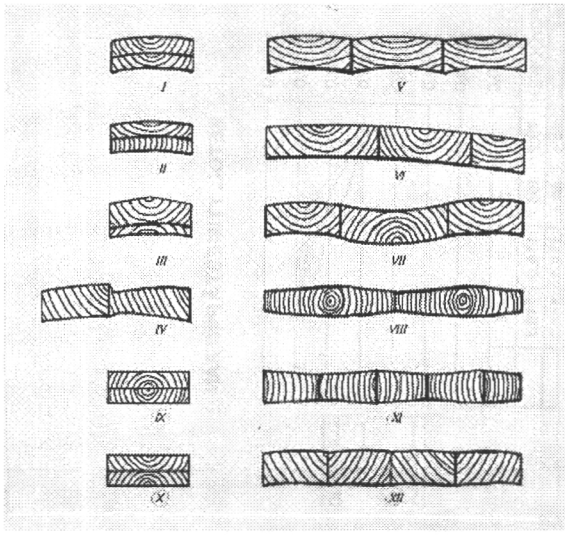
Liite 4. Lehtikuusesta valmistetun liimalevyn liimasaumat delaminoitumiskokeen jälkeen.



Liite 5. Ohjeita lehtikuusen massiivipuukappaleiden liimauksesta.

Massiipuukappaleiden liimaus

I – IX	<u>Lamellien virheellinen liimaus</u>
I	Liimatut kappaleet kupertuvat samaan suuntaan kosteuden vaihdellessa
II	Säteen ja tangentin suuntaiset pinnat liimattu vastakkain —▶ kosteuseläminen erilaista
III	Ei symmetriaa, liimattavien kappaleiden paksuudet vaihtelevat
IV	Pinta- ja sydänpuut liimattu keskenään
V	Kupertuminen tapahtuu samaan suntaan
VI	Kupertuminen tapahtuu samaan suuntaan ja lamellien leveydet vaihtelevat
VII	Kupertuminen tapahtuu eri suuntiin
VIII	Ydinosa halkeilee ja jää muuta osaa korkeammaksi kuivuessaan
IX – XII	<u>Lamellien oikein suoritettu liimaus</u>
IX, X	Pinnat vastakkain ja sydänpuut vastakkain, jolloin kupertuminen estyy
XI, XII	Ydinosa poistetaan; lamellit käännetään oikein liimauksessa. Huom. Syysuunta liimaussaumassa.



LEHTIKUUSEN PINTAKÄSITTELY

Pirjo Ahola

1 JOHDANTO

Pintakäsitellyn puun säänkesto riippuu pintakäsittelyaineiden ja puualustan ominaisuuksista. Pintakäsittelyaineen peittokyky, tiiveys ja joustavuus samoin kuin puualustan kosteusominaisuudet vaikuttavat ulkoisten tekijöiden kuten auringonvalon, lämpötilan ja kosteusvaihteluiden aiheuttamiin muutoksiin.

Kuultavat tai kirkkaat pintakäsittelyaineet eivät suojaa yhtä tehokkaasti kuin peittomaalit, ja seurauksena on lyhyempi käsittelyväli. Öljyt tai pigmentoidut kuullotteet eli puunsuojat eivät muodosta kalvoa puun pinnalle tai muodostunut kalvo on ohut. Eräät sideainetta runsaasti sisältävät kuullotteet muodostavat kuitenkin paksun kalvon puun pintaan. Yleisesti kalvoamuodostamattomilla pinnoitteilla käsitelty puu kostuu ja kuivuu suhteellisen nopeasti sääolojen vaihdellessa, mikä johtaa puun halkeiluun. Puu myös vaurioituu kirkkaan tai kuultavan käsittelyn alla auringonvalon vaikutuksesta. Pinnan huolto on kuitenkin helppoa, jos ei ole irtoavaa ja kaapimista vaativaa maalikalvoa.

Puun tiiveys ja kemialliset ominaisuudet vaikuttavat kosteuselämiseen ja varsinkin kosteutta nopeasti läpäiseville pintakäsittelyaineille on edullista käyttää vettähylkivää maalausalustaa. Männyllä sydänpuu halkeilee pintakäsiteltynä säärasituksessa vähemmän kuin pintapuu.

Tämän pintakäsittelytutkimuksen tavoitteena oli määrittää lehtikuusen säänkesto- ja kosteusläpäisevyysominaisuuksia. Pintakäsittelyaineiksi valittiin sellaisia tuotteita, joita käytetään mm. puutarhakalusteissa tai aitarakenteissa.

2 KOEJÄRJESTELYT

2.1 Koekappaleet

Koekappaleet olivat höyläpintaisia. Säätestin koekappaleiden koko oli 375 mm * 100 mm * 20 mm ja kosteudenläpäisykappaleiden koko oli 170 mm * 70 mm * 20 mm. Sääkokeeseen valmistettiin neljä ja kosteudenläpäisykokeeseen kuusi rinnakkaista kappaletta.

Säätestissä oli kuusi erityyppistä puualustaa: 1-2) suomalainen ja venäläinen VTT:n Otaniemessä lämminilmakuivaama lehtikuusi, 3) Joensuun yliopiston lämminilmakuivaama lehtikuusi, 4-5) Joensuun yliopiston (alihankinta: YTI Mikkeli) alipaine- ja kuumakuivaama lehtikuusi, 6) vertailukappaleena männyn pintapuu. Kappaleet vesihöyryn- ja vedenläpäisevyystesteihin valmistettiin Otaniemessä keinokuivatusta venäläisestä lehtikuusesta ja männystä.

2.2 Pintakäsittelyaineet

Koekappaleet tasaannutettiin ilman suhteellisessa kosteudessa 65 %. Ne maalattiin valmistajan ohjeiden mukaan seuraavilla pintakäsittelyaineilla:

Pintakäsittely-yhdistelmä 1:	Liuotinohenteinen pohjustusaine (LO) + 2 x vesiohenteinen (VO) kuullote (puunsuoja)
Pintakäsittely-yhdistelmä 2:	Liuotinohenteinen pohjustusaine (LO) + 2 x vesiohenteinen (VO) peittävä puunsuoja
Pintakäsittelyaine 3:	Liuotinohenteinen puuöljy

Vertailuna olivat pintakäsittelemättömät alustat sekä standardiehdotuksessa prEN 927-3 määritelty vertailumaali ICP, jota siveltiin kolme kertaa mäntyalustalle. ICP on liuotinohenteinen alkydikuullote.

Pintakäsittelyaineet siveltiin valmistajan suositusten mukaan. Puuöljyn sivelyä koskeva suositus oli, että öljyä levitetään niin monta kertaa kuin alusta imee sitä itseensä ja ylimääräinen öljy pyyhitään sen jälkeen pois. Mäntyalustalle puuöljyä imeytyi 4-5 sivelykertaa mutta lehtikuuseen vain 2 tai 3 sivelykertaa. Lehtikuuseen imeytynyt öljymäärä oli siis vähäisempi kuin mäntyyn imeytynyt. Muita pintakäsittelyaineita imeytyi lehtikuuseen jonkin verran vähemmän kuin mäntyyn. Taulukossa 1 on esitetty levitysmäärät neliömetriä kohti laskettuna.

2.3 Testit

2.3.1 Koemateriaalin käsittely

Pintakäsiteltyjen lehtikuusikappaleiden säänkesto testattiin prEN 927-3 mukaisella ulkotestillä ja veden- ja vesihöyrynläpäisevyydet prEN 927-4 ja 5 mukaisilla koestuksilla. Sääkokeen kappaleiden päiden pinnat maalattiin alkydiöljymaalilla vedentunkeutumisen estämiseksi. Vanhennettava pinta ja reunat maalattiin testipinnoitteilla. Laudan takaosa jätettiin pintakäsittelemättä.

Taulukko 1. Kokeissa käytetyt pintakäsittelyaineiden levitysmäärät.

Pintakäsittelytapa			Levitysmäärä, g/m^2			
Pintakäsittely-yhdistelmä 1:			Pohjuste	1. pinta	2 pinta	Yhteensä
Mänty			67	57	47	171
Lehtikuusi	Kuumakuivattu	Otaniemi	40	48	53	142
Lehtikuusi	Alipainekuivattu	Joensuu	44	57	57	159
Lehtikuusi	Lämminilmakuivattu, Suomi	Otaniemi	47	56	54	157
Lehtikuusi	Lämminilmakuivattu, Venäjä	Otaniemi	49	55	51	155
Lehtikuusi	Lämminilmakuivattu, Suomi	Otaniemi	44	56	54	154
Lehtikuusi	Lämminilmakuivattu	Joensuu	42	48	48	138
Pintakäsittely-yhdistelmä 2:			Pohjuste	1. pinta	2 pinta	Yhteensä
Mänty			72	99	72	243
Lehtikuusi	Kuumakuivattu	Otaniemi	41	92	74	206
Lehtikuusi	Alipainekuivattu	Joensuu	43	106	76	224
Lehtikuusi	Lämminilmakuivattu, Suomi	Otaniemi	44	102	79	225
Lehtikuusi	Lämminilmakuivattu, Venäjä	Otaniemi	43	98	88	228
Lehtikuusi	Lämminilmakuivattu, Suomi	Otaniemi	45	103	81	229
Lehtikuusi	Lämminilmakuivattu	Joensuu	39	92	81	212
Puuöljy, levitetty kaikki imeytyvä ja pyyhitty pinta sen jälkeen:						Yhteensä
Mänty						241
Lehtikuusi	Kuumakuivattu	Otaniemi				63
Lehtikuusi	Alipainekuivattu	Joensuu				63
Lehtikuusi	Lämminilmakuivattu, Suomi	Otaniemi				41
Lehtikuusi	Lämminilmakuivattu, Venäjä	Otaniemi				54
Lehtikuusi	Lämminilmakuivattu, Suomi	Otaniemi				83
Lehtikuusi	Lämminilmakuivattu	Joensuu				57
3 * ICP:						Yhteensä
Mänty						143

Kappaleet asetettiin VTT:n Otaniemen koekentälle vaakasuoraan 45 asteen kulmassa etelään 21.4.1999. Ennen sääkokeen alkua lautojen väri ja kiilto mitattiin. Kappaleiden kunto arvioitiin 6 kk:n kuluttua säätestin aloittamisesta. Tällöin arvioitiin kappaleiden halkeilu, hilseily, kupliminen ja homehtuminen ja mitattiin kiilto ja väri.

2.3.2 Kosteudenläpäisevyys

Vesihöyryn- ja vedenläpäisevyystestit suoritettiin prEN 927 osien 4 ja 5 mukaan. Kappaleen toinen lapepinta ja reunat maalattiin testipinnoitteilla. Maalaamattomat pinnat käsiteltiin 2-3 kertaa uretaanialkydilakalla, joka on tiivis lakka ja estää tehokkaasti kosteuden kulun lävitseen. Kappaleet tasaannutettiin ilman suhteellisessa kosteudessa 65 %. Sen jälkeen ne huuhdottiin standardiehdotusten mukaan:

1) 24 h kellutus vedessä
2) 3 h kuivuminen 65 %
3) 3 h kuivatus 50 °C
4) 18 h kuivuminen 65 %

Vedenläpäisevyystesti: Punnittuja, tasaannutettuja koekappaleita kellutettiin vedessä 72 tuntia, jonka jälkeen kappaleista pyyhittiin pois vesipisarat, kappaleet punnittiin ja siirrettiin takaisin ilman suhteelliseen kosteuteen 65 % ja laskettiin massanmuutos.

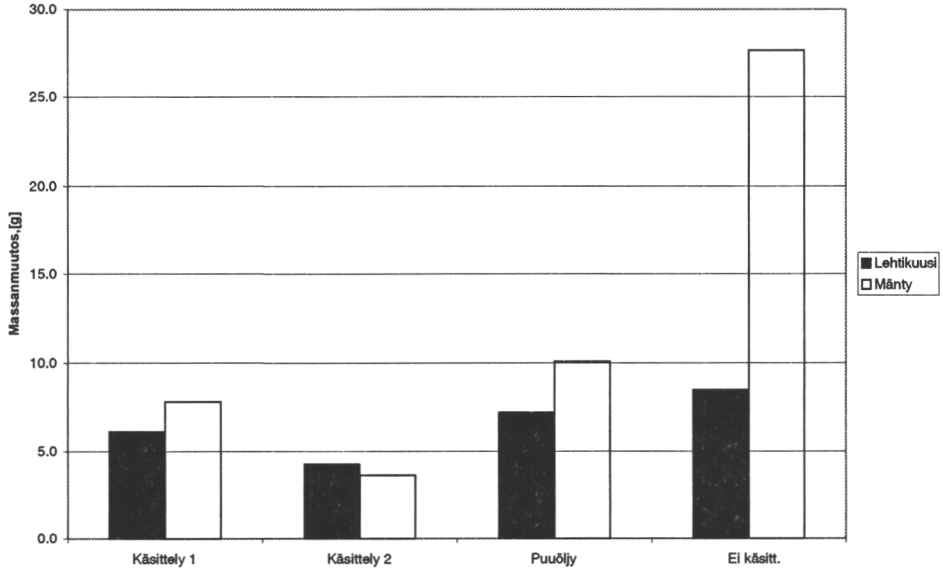
Vesihöyrynläpäisevyystesti: Punnitut, tasaannutetut koekappaleet asetettiin astiaan, joka oli vuorattu suodatinpaperilla ja jonka pohjalla oli 10 mm paksu vesikerros. Kappaleet asetettiin vähintään 10 mm:n etäisyydelle toisistaan telineelle, joka oli vähintään 3 cm vedenpinnan yläpuolella. Astia suljettiin kannella ja sinne muodostui noin 98 prosentin suhteellinen kosteus. Kappaleet punnittiin 1, 2, 3, 7, 10 ja 14 vrk:n jälkeen. Punnitsemisen yhteydessä mitattiin leveys kappaleen molemmista päistä ja keskeltä. Kappaleet vietiin ilman suhteelliseen kosteuteen 65 % ja punnittiin 2, 3, 7, 10 ja 14 vrk:n jälkeen.

3 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

3.1 Kosteudenläpäisevyys

3.1.1 Vedenläpäisevyys

Kuvassa 1 on esitetty pintakäsiteltyjen ja pintakäsittelemättömien kappaleiden vedenläpäisevyys 72 tunnin kellutuksen jälkeen. Tiiveimmällä pinnoitteella peittävällä puunsuojalla käsiteltyihin (yhdistelmä 2) mäntykappaleisiin imeytyi vähemmän vettä kuin vastaaviin lehtikuusikappaleisiin. Kahdella muulla pintakäsittelyaineella käsiteltyihin ja käsittelemättömiin lehtikuusikappaleisiin imeytyi vähemmän vettä kuin vastaaviin mäntykappaleisiin. Tulokset viittaavat siihen, että mitä läpäisevämpi pintakäsittelyaine on, sitä enemmän puualustan ominaisuudet vaikuttavat vedenläpäisevyyteen. Pintakäsittelemättömän männyn vedenläpäisevyys oli poikkeuksellisen suuri, mikä voi johtua halkaisupintaan tulleista halkeamista joko huuhdontavaiheen tai varsinaisen testin aikana. Massan kohoaminen pintakäsittelemättömissä mäntykappaleissa vaihteli välillä 19-40 g. Massanmuutoksen vaihtelu myös vahvistaa olettamusta päiden sulkemisen pettämisestä.

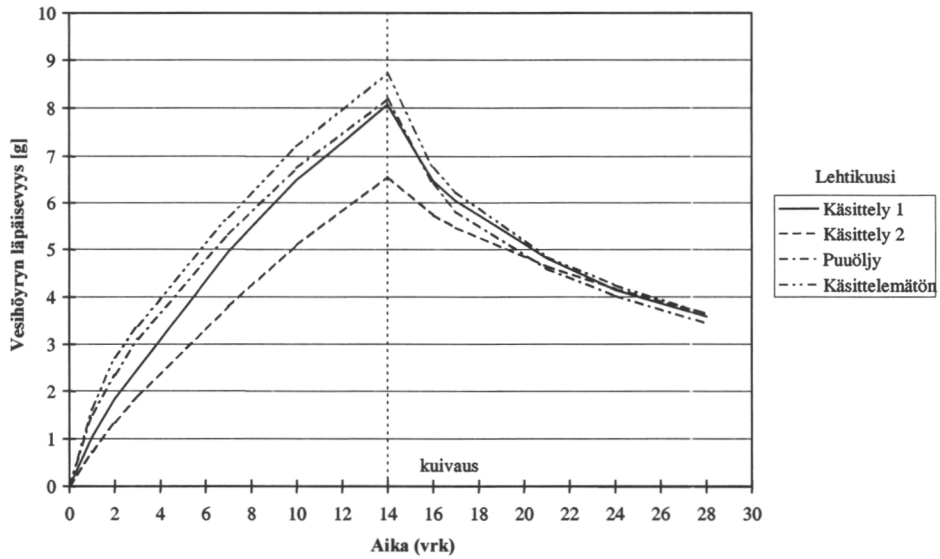


Kuva 1. Lehtikuusi- ja mäntykappaleiden vedenläpäisevyys eri pintakäsittelyyhdistelmissä, kellutusaika 72 h.

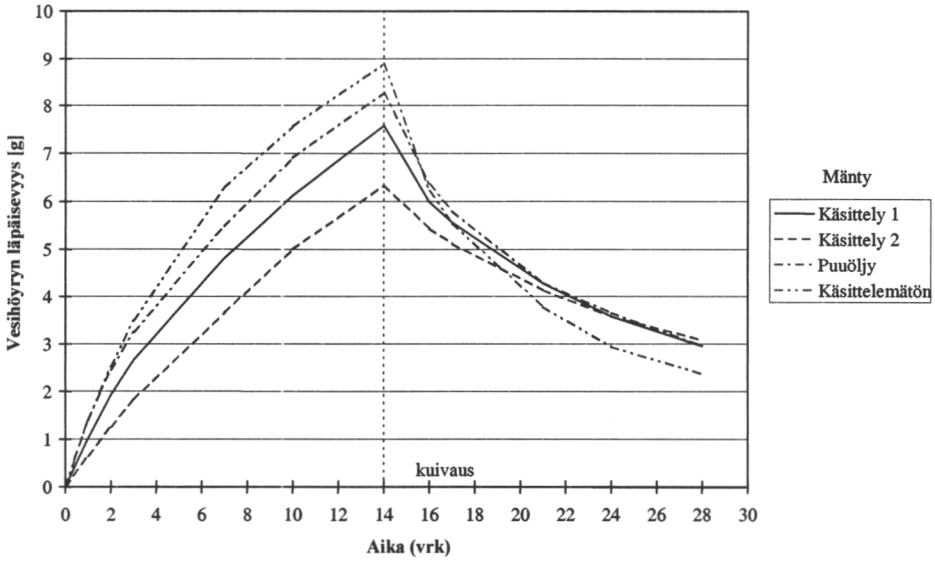
3.1.2 Vesihöyrynläpäisevyys ja dimensiomuutokset

Vesihöyrynläpäisevyystestin tulokset on esitetty kuvissa 2-5. Peittävä puunsuoja (käsittely-yhdistelmä 2) oli tiivein testattu pinnoite myös vesihöyrynläpäisevyystestissä. Kuultavalla puunsuojalla (käsittely-yhdistelmä 1) maalattu lehtikuusi oli jonkin verran läpäisevämpi kuin vastaava mänty, mikä ilmenee varsinkin muodonmuutoskuvista 4 ja 5. Yhdistelmällä 1 pintakäsiteltyjen mäntykappaleiden leveyden muutos oli samaa luokkaa kuin peittävällä puunsuojalla maalattujen (käsittely-yhdistelmä 2). Puuöljy esti vain vähän vesihöyryn imeytymistä lehtikuuselle. Näin oli kuitenkin myös männyllä, vaikka siihen imeytyi öljyä huomattavasti enemmän kuin lehtikuuseen.

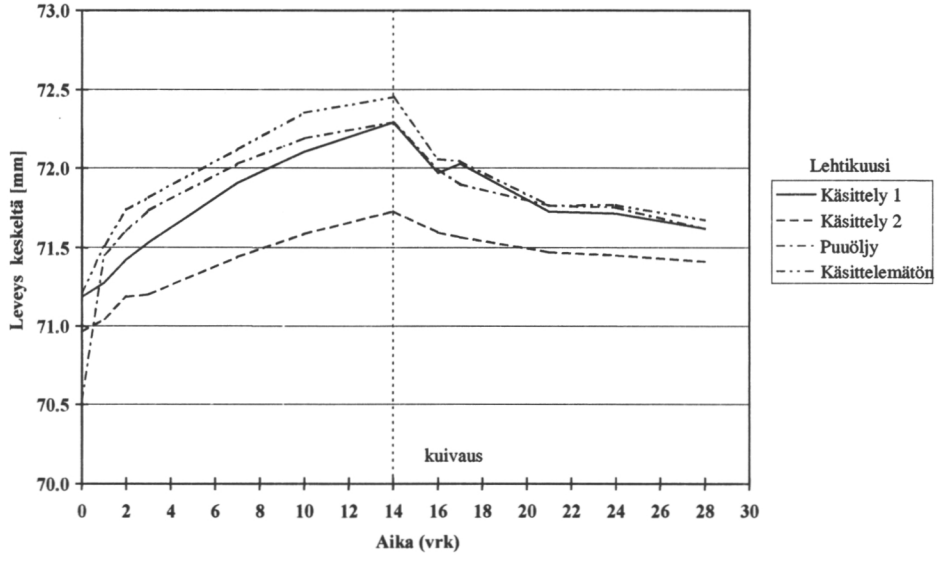
Mielenkiintoinen ero lehtikuusen ja männyn välillä ilmeni kuivumisvaiheessa. Lehtikuusikappaleiden kosteustaso oli 14 vrk:n kuivumissyklin jälkeen jonkin verran korkeampi kuin mäntykappaleiden. Tämä ero oli pintakäsittelemättömillä kappaleilla yli yksi prosenttiyksikkö. Tulokset dimensiomuutoksista tukevat myös tätä johtopäätöstä lehtikuusen ja männyn välisestä erosta. Lehtikuusi ei männystä poiketen myöskään palautunut lähelle alkuperäistä leveyttään testin aikana.



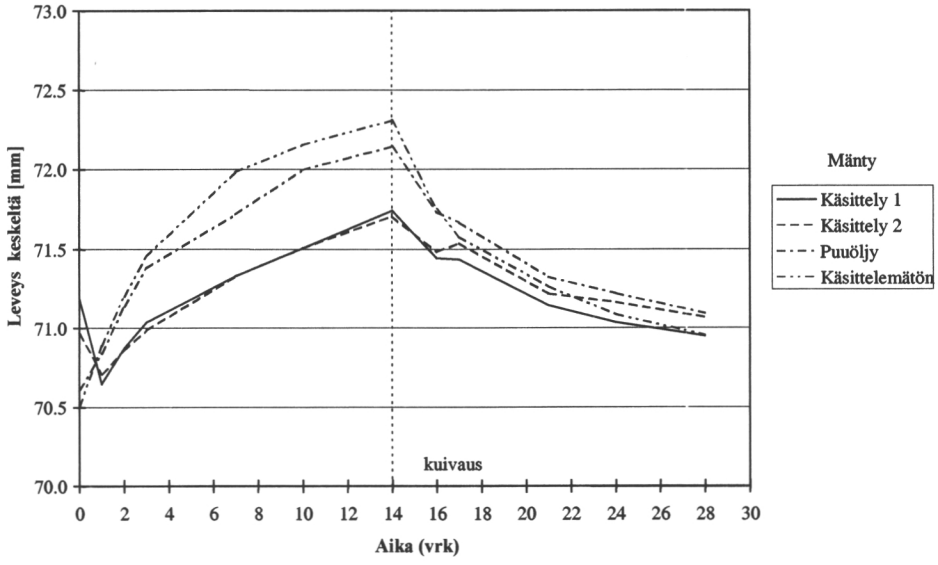
Kuva 2. Lehtikuusen kostuminen ja kuivuminen eri pintakäsittely-yhdistelmissä.



Kuva 3. Männyn kostuminen ja kuivuminen eri pintakäsittely-yhdistelmissä.



Kuva 4. Lehtikuusen leveyden muuttuminen kuivumisen ja kostumisen aikana eri pintakäsittely-yhdistelmissä. Muodonmuutos mitattu koekappaleen keskeltä.



Kuva 5. Männyn leveyden muuttuminen kuivumisen ja kostumisen aikana eri pintakäsittely-yhdistelmissä. Muodonmuutos mitattu koekappaleen keskeltä.

3.2 Koekenttävanhennus

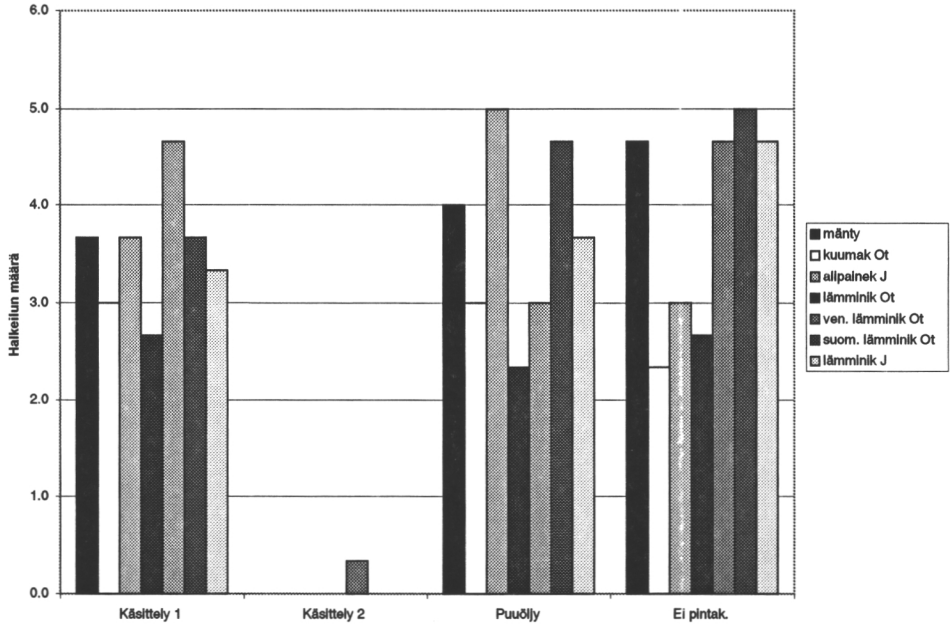
Maalatut laudat arvosteltiin puolen vuoden vanhennuksen jälkeen lokakuussa 1999 (taulukko 2, kuvat 6 ja 7). Testikauden kesä oli ollut hyvin lämmin ja kuiva. Syyskuussa oli vain yksi sateinen jakso, jolloin sademäärä ylitti 100 mm. Vanhennetuissa paneeleissa havaittiin halkeilua ja pinnalla homesieniä. Pintakäsittelyaine vaikutti eniten halkeiluun. Vesiohenteisella peittävällä puunsuojalla maalatut paneelit (käsittely-yhdistelmä 2) eivät halkeilleet. Sen sijaan kuultavalla puunsuojalla (käsittely-yhdistelmä 1) ja puuöljyllä käsitellyissä kuten myös käsittelemättömissä paneeleissa oli runsaasti halkeamia, mutta erot näiden paneelien välillä olivat pienet. Peittävän puunsuojan (käsittely-yhdistelmä 2) pinnalla ei ollut sieniä, mutta muissa paneeleissa oli suhteellisen runsaasti sinistäjä- ja homesieniä. Mäntypaneelit halkeilivat hieman enemmän kuin lehtikuusipaneelit, mutta ero ei ollut suuri. Joukossa oli kuitenkin kaksi kuivauserää, Joensuun alipainekuivaus ja Otaniemen lämminilmakuivaus, jotka halkeilivat vähemmän kuin muut paneelit. Sahaussuunta selitti nämä halkeiluerot: enemmän halkeilleet paneelit oli sahattu tangentiaalisesti ja vähemmän halkeilleet radiaalisesti.

Taulukko 2. Maalattujen lautojen arvostelutulokset puolen vuoden koekenttävanhennuksen jälkeen. Asteikko 0-5: mitä vakavammat viat, sitä suurempi arvo.

Puualusta	Kuivaus	Kuivaus-paikka	Halkeilu määrä 0-5	Halkeilu koko 0-5	Hilseily määrä 0-5	Hilseily koko 0-5	Sienet 0-5	Väriero	Kiiltoero
Käsittely 1									
mänty			3.7	3	0	0	2.3	2.6	5.9
lehtikuusi	kuumakuivattu	Otaniemi	3	3	0	0	2.7	3.5	8.7
lehtikuusi	alipainekuivattu	Joensuu	3.7	3	0	0	4	4.4	11.1
lehtikuusi	lämminilmakuivattu	Otaniemi	2.7	2.7	0	0	3.7	4.5	5.4
lehtikuusi	ven. lämminilmakuivattu	Otaniemi	4.7	3	0	0	2.7	4.8	10.7
lehtikuusi	suom. lämminilmakuivattu	Otaniemi	3.7	3	0	0	2.3	3.7	7.7
lehtikuusi	lämminilmakuivattu	Joensuu	3.3	3	0	0	4	4.6	9.8
Käsittely 2									
mänty			0	0	0	0	0	3.2	3.8
lehtikuusi	kuumakuivattu	Otaniemi	0	0	0	0	0	2.4	4.7
lehtikuusi	alipainekuivattu	Joensuu	0	0	0	0	0	2.9	5.7
lehtikuusi	lämminilmakuivattu	Otaniemi	0	0	0.3	0.7	0	2.8	4.9
lehtikuusi	ven. lämminilmakuivattu	Otaniemi	0.3	0.3	0	0	0	3.6	5.8
lehtikuusi	suom. lämminilmakuivattu	Otaniemi	0	0	0.3	0.3	0	3.2	5.2
lehtikuusi	lämminilmakuivattu	Joensuu	0	0	0	0	0	3.0	6.5
Puuöljy (imeytynyt)									
mänty			4	3	-	-	3.3	29.1	1.5
lehtikuusi	kuumakuivattu	Otaniemi	3	3	-	-	4	28.0	1.0
lehtikuusi	alipainekuivattu	Joensuu	5	3	-	-	4	28.1	2.3
lehtikuusi	lämminilmakuivattu	Otaniemi	2.3	2.7	-	-	3.3	26.5	0.7
lehtikuusi	ven. lämminilmakuivattu	Otaniemi	3	3	-	-	3.3	24.9	1.7
lehtikuusi	suom. lämminilmakuivattu	Otaniemi	4.7	3	-	-	2.3	20.7	1.5
lehtikuusi	lämminilmakuivattu	Joensuu	3.7	3	-	-	3.7	29.0	1.8
Ei pintakäsittelyä									
mänty			4.7	3	-	-	4	31.7	1.5
lehtikuusi	kuumakuivattu	Otaniemi	2.3	3	-	-	4	27.2	0.9
lehtikuusi	alipainekuivattu	Joensuu	3	3	-	-	4	26.5	1.0
lehtikuusi	lämminilmakuivattu	Otaniemi	2.7	2.7	-	-	3	26.6	1.5
lehtikuusi	ven. lämminilmakuivattu	Otaniemi	4.7	3	-	-	3.3	28.1	2.3
lehtikuusi	suom. lämminilmakuivattu	Otaniemi	5	3	-	-	4	28.0	2.6
lehtikuusi	lämminilmakuivattu	Joensuu	4.7	3	-	-	4	29.2	1.9
ICP									
mänty			0	0	-	-	0	4.2	3.7

Kappaleiden säänkestoon vaikutti pintakäsittelyaine, jonka kosteudenläpäisevyys selitti osittain koelautojen halkeilun säärasituksessa, ts. tiivein pinnoite (käsittelyyhdistelmä 2) suojasi tehokkaimmin halkeilulta. Puulajilla ei ollut vaikutusta halkeiluun, vaikka läpäisevyystesteissä lehtikuuseen ei imeytynyt vettä yhtä paljon kuin mäntyyn. Sahaussuunnalla oli merkittävä vaikutus kappaleiden halkeiluun, kun pinnoite oli läpäisevä: tangentiaalisesti sahatut kappaleet halkeilivat huomattavasti enemmän kuin radiaalisesti sahatut. Ulkotestiin pyrittiin valitsemaan radiaalisesti sahatut laudat, mutta näitä oli koeaineistossa niin vähän, että koekappaleiksi jouduttiin valitsemaan myös tangentiaalisesti sahattuja lautoja.

Pintakäsittelyainetta valittaessa on mietittävä käyttökohteen vaatimukset samoin kuin huoltotoimenpiteiden helppous. Jos puumateriaali tulee esimerkiksi puutarhahuonekaluihin, kalvoa muodostavaa pintakäsittelyainetta ei voida suositella, elleivät huonekalut ole suojassa esim. katoksen alla. Suositus perustuu Lahontorjuntayhdistys ry:n laajoihin puutarhatuolitesteihin, joissa kalvoamuodostavat maalit hilseilivät varsinkin istuinosista. Tällaisten tuolien huoltomaalaus on hankalaa, koska kaikki irtoava maalipinta pitää poistaa. Käsittelyistä paras on tunkeutuva vettähylkivä käsittely, joka uusitaan vuosittain. Kalvoamuodostavat käsittelyt voivat sopia aitoihin, jos vesi ei pääse tunkeutumaan niiden rakenteisiin puun sisään esim. avonaisista pääpinnoista. Vesi voi aiheuttaa maalipinnan kuplimista, hilseilyä tai puun halkeilua haihtuessaan maalikalvon läpi.



Kuva 6. Maalattujen lautojen halkeilun määrä koekenttävanhenuksessa. Asteikko 0-5: mitä enemmän halkeilua, sitä suurempi arvo.



Kuva 7. Puuöljyllä käsitellyt lehtikuuset (ylh.) ja männyt (alh.). Kummankin kuvan vasemmanpuoleinen lauta on vanhentamaton ja kolmea oikeanpuoleista on vanhennettu puoli vuotta koekentällä vaakasuorassa 45 asteen kulmassa etelään.

LEHTIKUUSEN HAIHTUVAT ORGAANISET YHDISTEET JA NIIDEN MERKITYS KÄYTÖLLE

Hannu Viitanen, Kirsi Villberg ja Kristina Saarela

1 TAUSTA

Puumateriaalin käyttöön sisätiloissa vaikuttaa olennaisesti siitä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) määrä ja koostumus. Tällä hetkellä sisäilmastoluokituksessa (SIY 1995) sisäilmaan rajoittuvat pintamateriaalit (ML 95) on luokiteltu kolmeen luokkaan: M1, M2 ja M3. Parhaaseen luokkaan (M1) kuuluvat emissiotestatut materiaalit sekä sellaiset materiaalit kuten tiili, luonnonkivi, lasi, metallit sekä lauta ja hirsi (kotimaiset puulajit). Sisäilmastoluokituksen mukaan runsaspäästöisten materiaalien käyttöä on rajoitettava pyrittäessä mahdollisimman hyvään lopputulokseen. Puun osalta keittiövälineissä on entuudestaan käytetty ensisijassa vähän emittoivia puulajeja (haapa, koivu). Lehtikuusesta on tässä suhteessa hyvin vähän tietoa. Tämän vuoksi katsottiin tarpeelliseksi selvittää lehtikuusesta mahdollisesti haihtuvien aineiden määrä ja laatu sekä eri kuivausprosessien vaikutus emissioon. Tarkoituksena ei ollut hyväksyttää lehtikuusta sisäilmaluokitukseen vaan selvittää puusta haihtuvat aineet sekä niiden merkitys mahdollisia eri käyttökohteita ajatellen.

2 TAVOITTEET

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää tuoreen (kuivaamattoman) ja eri tavoin kuivatun lehtikuusen haihtuvien orgaanisten yhdisteiden määrää ja koostumusta käyttäen uutta, eri lämpötiloissa tehtävää analyysimenetelmää ja verrata tuoreen lehtikuusen uuteainekoostumusta mäntyyn ja kuuseen. Tarkoituksena oli myös selvittää, voidaanko lehtikuusta käyttää keittiövälineissä, jotka altistuvat korkeille lämpötiloille (esim. uuniastia) ja miten kuivaustapa vaikuttaa yhdisteiden määrään ja koostumukseen.

3 AINEISTO JA MENETELMÄT

3.1 Tutkitut materiaalit

Tutkitut materiaalit on esitetty taulukossa 1. Tuore mänty- ja kuusimateriaali otettiin talvella 1997-1998 kaadetusta, sahatusta ja VTT:ssä pakkasessa säilytetystä lankkumateriaalista. Lehtikuusierä 2 otettiin lehtikuusitukkien sahauksen yhteydessä huhtikuussa 1998 otetuista näytteistä, jotka nekin oli säilytetty pakkasessa.

Taulukko 1. Tutkitut materiaalit sekä näytekoodit

Nro	Näytemateriaali
1	Tuore lehtikuusi, erä 1: ulompi sydänpuu
2	Tuore lehtikuusi, erä 1: sisempi sydänpuu
3	Tuore lehtikuusi, sydänpuu, 2. erä: 12/152, 5/251, 12/251)
4	Ulkokuivattu lehtikuusi (19/1S3, 13/1S32, 13/1S31)
5	Lämminilmakuivattu lehtikuusi (13/15212 L3, 4/2421 L1, 12/3321 L2)
6	Alipainekuivattu lehtikuusi (10/252 A3, 9/1242, A3, 13/2322, A3)
7	Kuumakuivattu lehtikuusi (5/1S1)
8	Tuore mänty, pintapuu (PM111)
9	Tuore mänty, sydänpuu (SM211)
10	Tuore kuusi, pintapuu (PK111)
11	Tuore kuusi, sydänpuu (SK111)
12	Lehtikuusi, käytetty uuniastia
13	Lehtikuusiuute työstöterästä

Lehtikuusten näyte-erä 1 otettiin lankkuerästä, joka saapui kuivattavaksi VTT:lle kesäkuussa 1998. Eri kuivauseristä otettiin näytteet samaan aikaan, joten kuivauksen ja näytteenoton välinen aika vaihteli. Puumateriaalit jauhettiin VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa, minkä jälkeen ne toimitettiin VTT Kemiantekniikkaan edelleen analysoitaviksi.

Tuoreen lehtikuusen näyte-erästä 1 otettiin erikseen näytteet sydänpuun sisemmästä ja ulommasta osasta. Muut näytteet otettiin kustakin lankusta ulommasta sydänpuusta. Lankuista sahattiin kaksi paksuudeltaan 5 mm:n leikettä noin 100 mm:n etäisyydeltä lankkujen päistä. Lankkuleikkeistä leikattiin pintaa pois joka puolelta vähintään 10 mm siten, että vain leikkeen sisäosa otettiin varsinaiseen analyysiin. Leikkeissä ei saanut olla oksia, pihkataskuja tai puuaineen luontaisia muita vikoja. Kustakin erästä otetut leikenäytteet jauhettiin yhdessä, jolloin analyyseihin tuli vain yksi jauhatuserä kustakin tutkimuserästä.

3.2 Menetelmät

Jauhettu näytemateriaali asetettiin lasiputkiin puun haihtuvien uuteaineiden määritystä varten. Näytteet analysoitiin kaasukromatografisesti käyttäen näytteensyöttöön termodesorptiotekniikkaa (Lukkarinen & Saarela 1999). Analysointiin käytetty kaasukromatografi oli varustettu liekki-ionisaatio-detektorilla (FID) ja massaselektiivisellä detektorilla (MSD). Menetelmän määritysherkkyys yksittäisten VOC-yhdisteiden suhteen on 1 $\mu g/m^3$.

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaismäärä, TVOC, laskettiin FID-kromatogrammin kokonaispinta-alasta tolueenin vastetekijän avulla. Yksittäisten VOC-yhdisteiden tunnistuksia ei varmennettu malliaineilla.

4 TULOKSET

4.1 Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) kokonaismäärät

Yhteenveto VOC-pitoisuuksien mittaustuloksista eri lämpötiloissa on esitetty taulukossa 2 sekä kuvissa 1 ja 2. Tuoreesta männystä haihtui enemmän ja useampia yhdisteitä kuin vastaavasta tuoreesta lehtikuusesta (kuva 1). Emissioarvot mitattiin männyn ja kuusen osalta vain tuoreesta puusta, joten puulajien välistä vertailua ei voitu tehdä kuivatelle puulle. Lehtikuusierien välillä oli kuitenkin kuivuusasteesta aiheutuneita eroja. Kuivatusta lehtikuusesta emittoitui vähemmän haihtuvia aineita kuin tuoreesta lehtikuusesta (tuore-erä 2). Vastaavasti lehtikuusen tuore-erästä 1 (ulompi ja sisempi sydänpuu) emittoitui vähemmän yhdisteitä kuin kuivatusta lehtikuusesta. Syynä eroihin erien välillä olivat ilmeisesti sekä puusta itsestään että näytteiden varastoinnista johtuneet tekijät. Tuore-erä 2 tehtiin näytteistä, jotka oli otettu heti sahauksen jälkeen ja säilytetty pakkasessa, kun taas tuore-erä 1 otettiin VTT:lle kuivattavaksi toimitetusta tuoreesta lankkumateriaalista. Aikaero näytteenottojen välillä oli useita viikkoja ja erä 1 oli jo ehtinyt olla sen aikana ulkona. Tosin tämän tekijän vaikutusta pienensi näytteenotto lankkujen sisäosista. Mänty- ja kuusimateriaali otettiin VTT:llä pakkasessa säilytetystä tuoreesta materiaalista.

Verrattaessa lehtikuusen näyte-erää 2 eri tavoin kuivattuun lehtikuuseen ilmeni, että kuivatusta puusta haihtui vähemmän orgaanisia yhdisteitä kuin tuoreesta puusta, lukuunottamatta kuumakuivattua lehtikuusta, jossa emissio oli tavallista korkeampi (kuva 2). Emissioarvot olivat kuitenkin suhteellisen pienet ja lehtikuusen kokonaisemissioarvot olivat lähellä tuoreen kuusen arvoja. Yksittäiset haihtuvat orgaaniset aineet olivat kuitenkin erityyppisiä ja niiden määrät vaihtelivat.

4.2 Analyysilämpötilan merkitys

50 °C

Alimmassa tutkimuslämpötilassa haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (TVOC) pitoisuudet olivat kaikissa lehtikuusierissä pieniä, kuumakuivattua lehtikuusta lukuunottamatta, jolla pitoisuudet olivat tässä lämpötilassa suurimmat. Tuoreella lehtikuusella emissioarvot olivat huomattavasti pienemmät kuin männyssä. Etenkin tuoreen männyn sydänpuussa emissioarvot olivat tässä lämpötilassa korkeammat kuin muissa tutkituissa materiaaleissa, mutta pitoisuudet olivat tässä lämpötilassa kuitenkin alemmat kuin muissa lämpötiloissa.

Taulukko 2. Tutkittujen näytteiden VOC-yhdisteiden kokonaismäärä (TVOC) eri analyysilämpötiloissa tolueeniksi laskettuna. Katso myös kuvat 1 ja 2.

Materiaali	Lämpötila			
	200 °C	150 °C	100 °C	50 °C
	TVOC, µg / g näytettä			
Lehtikuusi, ulompi sydänpuu, tuore	86	61	32	12
Lehtikuusi, sisempi sydänpuu, tuore	113	41	50	14
Lehtikuusi, tuore (2. erä)	83	214	139	19
Lehtikuusi, ulkokuivaus	159	140	62	23
Lehtikuusi, lämminilmakuivaus	150	70	70	19
Lehtikuusi, alipainekuivaus	68	161	35	7
Lehtikuusi, kuumakuivaus	292	210	108	78
Mänty, pintapuu, tuore	307	144	78	119
Mänty, sydänpuu, tuore	1991	1577	1335	782
Kuusi, pintapuu, tuore	152	92	32	7
Kuusi, sydänpuu, tuore	280	161	70	13
Lehtikuusi, uuniastia (kuiva)	141	93	60	19
Lehtikuusi, uute työstöterästä (kuiva)	1430	131	-	-

100 °C

Korkeimmat TVOC-pitoisuudet olivat tässäkin lämpötilassa männyn sydänpuulla. Lehtikuusista tuoreen (erä 2) ja kuumakuivatun TVOC-pitoisuudet olivat korkeimmat. Alhaisin TVOC-pitoisuus oli alipainekuivatulla sekä erän 1 tuoreella lehtikuusella, mitkä arvot olivat suurin piirtein samalla tasolla kuin tuoreella kuusella.

150 °C

Tuoreen männyn sydänpuussa havaittiin korkeimmat TVOC-pitoisuudet. Kuumakuivatun ja tuoreen lehtikuusen (erä 2) TVOC-pitoisuudet olivat tässä lämpötilassa samalla tasolla. Lämminilmakuivatulla lehtikuusella TVOC-pitoisuus oli muita kuivauseränäytteitä alempi. Alipainekuivatun ja tuoreen (erä 2) lehtikuusen TVOC -pitoisuudet olivat tässä lämpötilassa korkeimmat muihin tutkimuslämpötiloihin verrattuna (kuva 2).

200 °C

Korkean analyysilämpötilan tarkoituksena oli saada mahdollisimman suuri uuteainesaanto eri puulajeista sekä selvittää, mitä yhdisteitä lehtikuusesta emittoituu, jos siitä tehtyjä esineitä käytetään esim. uuniastioissa korkeissa lämpötiloissa.

Tuoreessa männyn sydänpuussa havaittiin korkeimmat haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (TVOC) pitoisuudet (kuva 1). Tuoreen lehtikuusen TVOC-pitoisuudet vaihtelivat tutkimuserittäin, mutta pitoisuudet olivat alemmat tai samalla tasolla kuin vastaavalla männyn pintapuulla ja kuusella. Korkeita pitoisuuksia havaittiin myös lehtikuusen työstössä syntyneessä kuumentuneessa teräpölyssä (sintraantunut massa). Lehtikuusen osalta selvästi korkein TVOC-pitoisuus oli kuumakuivatulla puulla (kuva 2). Tämä pitoisuus oli kuitenkin suunnilleen samalla tasolla kuin tuoreessa männyn pintapuussa tai kuusen sydänpuussa. TVOC-pitoisuus oli samaa luokkaa lämminilmakuivatulla lehtikuusella, ulkokuivatulla lehtikuusella ja käytetyssä uuniastiassa. Alhaisin TVOC-pitoisuus oli alipainekuivatulla lehtikuusella.

4.3 Tärkeimmät ja eniten päästöjä aiheuttaneet VOC-komponentit eri materiaaleissa

Tutkituista lehtikuusipuunäytteistä emittoitui selvästi vähemmän haihtuvia uuteaineita kuin tuoreesta männyn sydänpuusta. Lehtikuusesta vapautui sen sijaan etikkahappoa, mitä ei männystä ja kuusesta löydetty lainkaan. Käytetystä uuniastiasta vapautui hyvin vähän yhdisteitä. Työstökoneen terästä kerätty lehtikuusimateriaali oli täysin poikkeavaa muihin materiaaleihin verrattuna.

Lehtikuusen ulompi sydänpuu: Etikkahappoa vapautui runsaasti, eniten lämpötilassa 200 °C. Terpeenien (alfa-pineeni, beta-pineeni, d-3 kareeni) pitoisuudet olivat korkeimmat lämpötilassa 150 °C ja alhaisimmat lämpötilassa 50 °C. Muiden yhdisteiden pitoisuudet olivat korkeimmat lämpötilassa 200 °C (kuva 3).

Lehtikuusen sisempi sydänpuu: Etikkahappoa vapautui runsaasti, etenkin lämpötilassa 200 °C. Terpeenien (alfa-pineeni, beta-pineeni, d-3 kareeni) pitoisuudet olivat korkeimmat lämpötilassa 100 °C. Muiden yhdisteiden pitoisuudet olivat korkeimmat lämpötilassa 200 °C (kuva 4).

Tuore lehtikuusi, erä 2: Merkittävimmät yksittäiset vapautuneet yhdisteet olivat tässä näyte-erässä terpeenejä, joiden pitoisuudet olivat huomattavasti korkeammat lämpötilassa 150 °C kuin muissa lämpötiloissa (kuva 5). Etikkahappoa ja heksanaalia vapautui etenkin korkeimmissa lämpötiloissa. Etikkahappoa oli tässä näyte-erässä vähemmän kuin tuoreen lehtikuusen erässä 1, mutta terpeenejä oli vastaavasti selvästi enemmän. Syinä olivat ilmeisesti vaihtelut runkojen välillä ja niiden sisällä sekä varastointitavan ja -ajan vaihtelu.

Ulkokuivattu lehtikuusi: Yhdisteet olivat tässä näyte-erässä pääasiassa terpeenejä ja etikkahappoa (kuva 6). Emissiospektri muistutti jossain määrin tuoreen lehti kuusen 2 erän emissiota. Etikkahappoa oli ulkokuivatussa lehtikuusessa kuitenkin runsaammin kuin em. tuoreen lehtikuusen erässä lämpötilassa 200 °C.

Lämminilmakuivattu lehtikuusi: Haihtuvat pääkomponentit olivat terpeenejä. Korkeimmat yksittäiset pitoisuusarvot olivat kuitenkin etikkahapolla, etenkin lämpötiloissa 200 ja 150 °C (kuva 7). Terpeeneistä alfa-pineenin ja delta-kareenin pitoisuudet olivat korkeimmat lämpötilassa 100 °C. Lisäksi lämminilmakuivatussa lehtikuusessa tunnistettiin aldehydejä, furfuraalia ja heksanaalia, joiden pitoisuudet riippuivat lämpötilasta, korkeimmat pitoisuudet olivat lämpötilassa 200 °C.

Alipainekuivattu lehtikuusi: TVOC oli alhainen ja etikkahapon määrä ja osuus olivat pienemmät kuin lämminilmakuivatussa erässä (kuva 8). Terpeenien (alfa-pineeni, gamma-terpineeni ja syklofenkeeni) pitoisuudet olivat korkeimmat lämpötilassa 150 °C, etikkahapon pitoisuus oli korkein lämpötilassa 200 °C. Terpeenien osuus oli suurempi kuin lämminilmakuivatussa erässä.

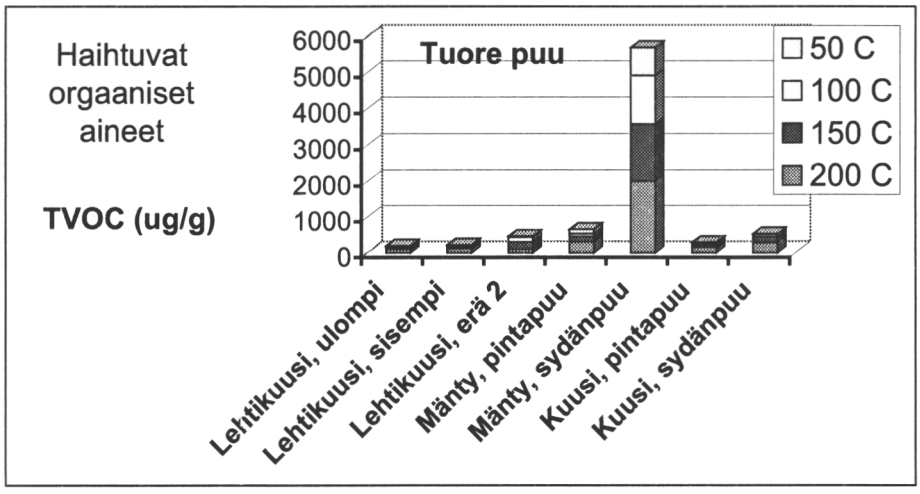
Kuumakuivattu lehtikuusi: Kuumakuivatusta lehtikuusesta vapautui enemmän haihtuvia aineita kuin muilla tavoilla kuivatusta lehtikuusesta. Eniten vapautui etikkahappoa (kuva 9). Terpeenien (alfa-pineeni, beta-pineeni, delta-kareeni ja alfa-terpinoleeni) pitoisuudet olivat korkeimmat lämpötilassa 150 °C. Terpeenien määrä oli selvästi pienempi kuin alipainekuivatussa erässä, mutta se oli samalla tasolla kuin lämminilmakuivatussa erässä. Kuumakuivatussa lehtikuusessa havaittiin selvästi normaalia suurempi furfuraalien määrä.

Käytetty lehtikuusinen uuniastia: Tuotteesta vapautui pieniä pitoisuuksia tunnistettuja yhdisteitä. Useimmin tavattu yksittäinen yhdiste oli alfa-pineeni. Sen pitoisuus oli korkeimmillaankin kuitenkin vain alle 50 µg/g näytettä (kuva 10). Pineenien määrä oli selvästi pienempi kuin kuumakuivatussa lehtikuusessa.

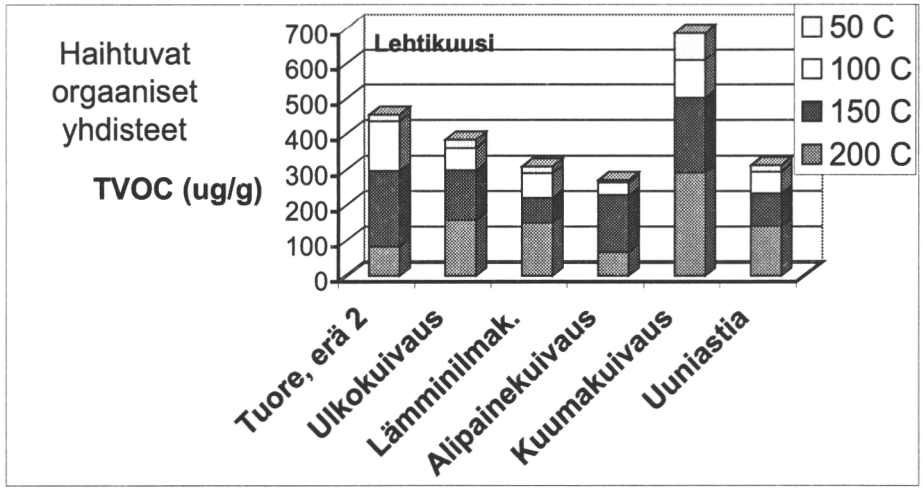
Lehtikuusiuute työstöterästä: Vapautuvat yhdisteet poikkesivat muista näytteistä. Suurin osa tunnistetuista yhdisteistä oli alkoholeja ja alifaattisia hiilivetyjä (kuva 11). Runsaimmin havaittu yksittäinen yhdiste oli 2-etyyliheksanoli, jota ei tunnistettu muista näytteistä.

Männyn sydänpuu: Tämä sisälsi eniten haihtuvia uuteaineita tutkituista näytelajeista. Tunnistetut yhdisteet olivat pääasiassa terpeenejä, joista runsaimmin havaittu yksittäinen yhdiste oli alfa-pineeni. Sen pitoisuus oli korkein lämpötilassa 50°C. Muiden yhdisteiden pitoisuudet olivat korkeimmat lämpötilassa 200 °C (kuva 12). Männyn pintapuussa runsaimmin havaitut yksittäiset yhdisteet olivat heksanaali sekä alfa-pineeni, jonka pitoisuus oli erityisesti lämpötilassa 50 °C korkeampi kuin muissa lämpötiloissa. Etikkahappoa ei vapautunut lainkaan.

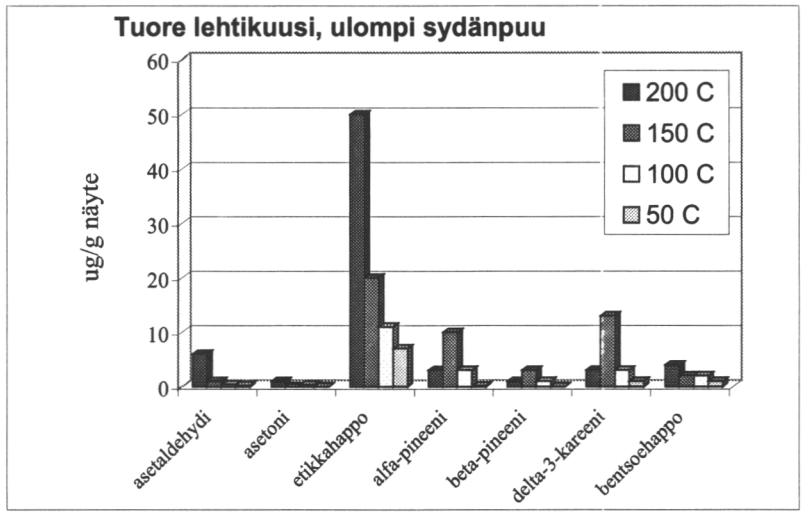
Kuusen sydänpuu: Tunnistetut yhdisteet olivat yleisiä puuperäisiä yhdisteitä, terpeenejä (kuva 13). Korkein pitoisuus oli alfa-pineenillä. Kuusen pintapuun VOC -pitoisuudet olivat alhaiset (<30 µg / g näytettä), jopa lämpötilassa 200 °C. Pitoisuudet olivat erityisen alhaiset lämpötilassa 50 °C. Etikkahappoa ei esiintynyt lainkaan.



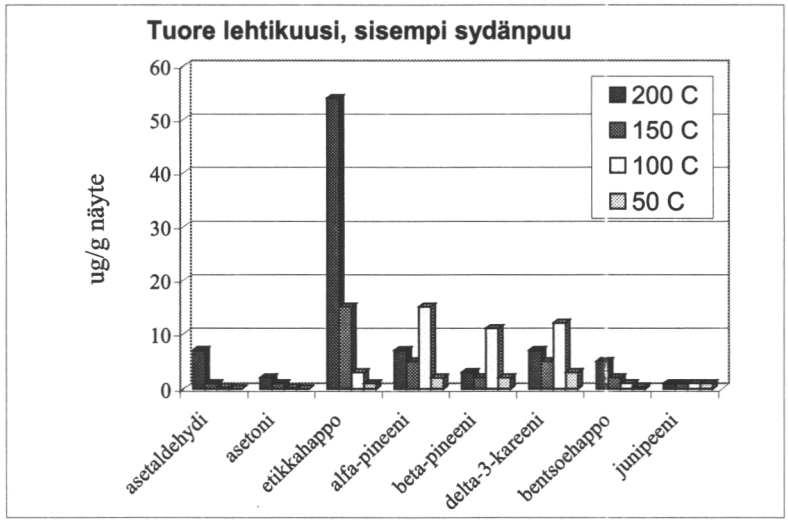
Kuva 1. Tuoreesta lehtikuusesta, männystä ja kuusesta haihtuvat orgaaniset yhdisteet, kokonaispitoisuus (TVOC) eri tutkimuslämpötiloissa



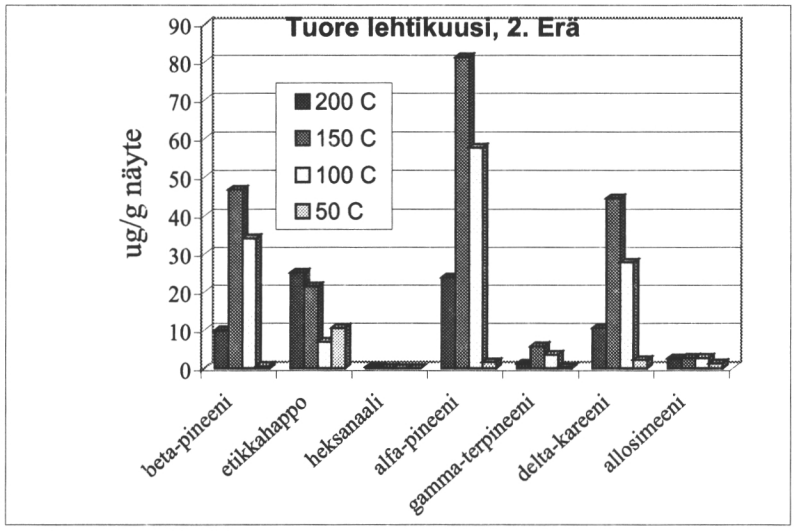
Kuva 2. Eri tavoin kuivatusta lehtikuusesta ja käytetystä uuniastiasta haihtuvat orgaaniset yhdisteet, kokonaispitoisuus (TVOC) eri tutkimuslämpötiloissa.



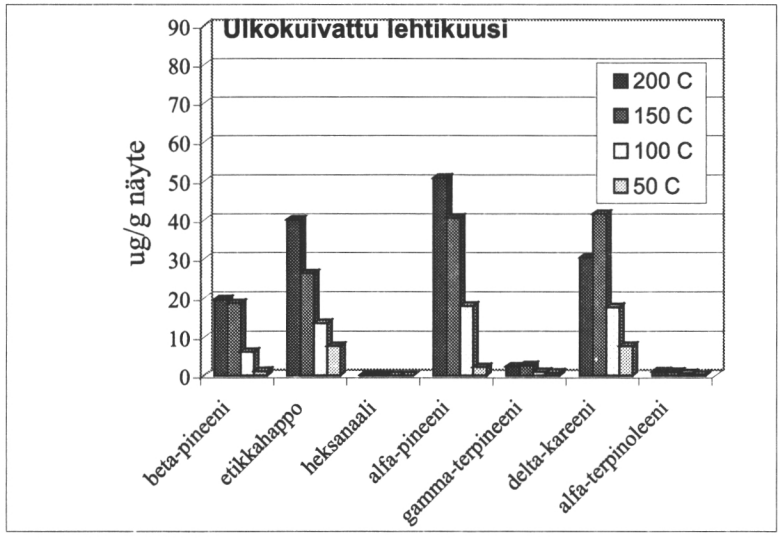
Kuva 3. Tärkeimmät ja eniten päästöjä aiheuttaneet haihtuvien orgaanisten yhdisteiden komponentit (VOC) tuoreessa lehtikuusessa (ulompi sydänpuu, näyte-erä 1) eri tutkimuslämpötiloissa.



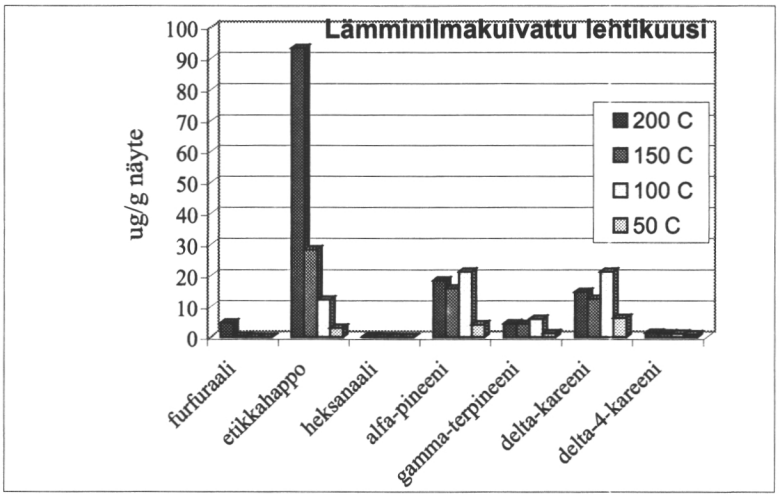
Kuva 4. Tärkeimmät ja eniten päästöä aiheuttaneet haihtuvien orgaanisten yhdisteiden komponentit (VOC) tuoreessa lehtikuusessa (sisempi sydänpuu, näyte-erä 1) eri tutkimuslämpötiloissa.



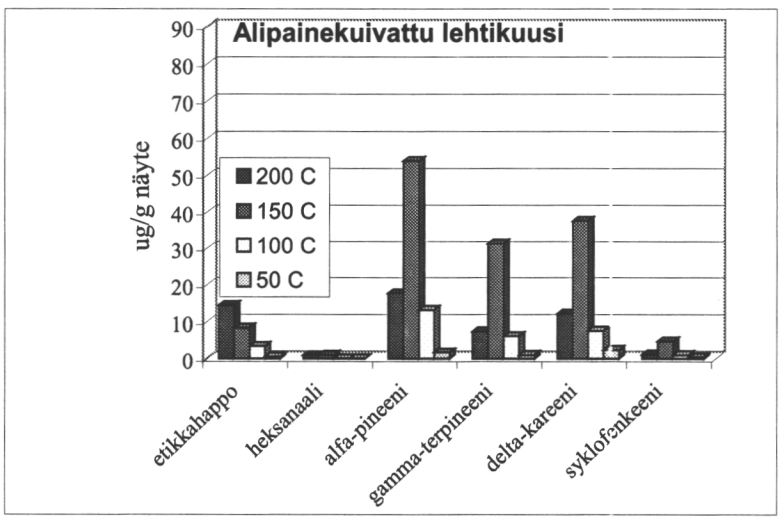
Kuva 5. Tärkeimmät ja eniten päästöjä aiheuttaneet haihtuvien orgaanisten yhdisteiden komponentit (VOC) tuoreessa lehtikuusessa (ulompi ja sisempi sydänpuu yhdistetty, näyte-erä 2) eri tutkimuslämpötiloissa.



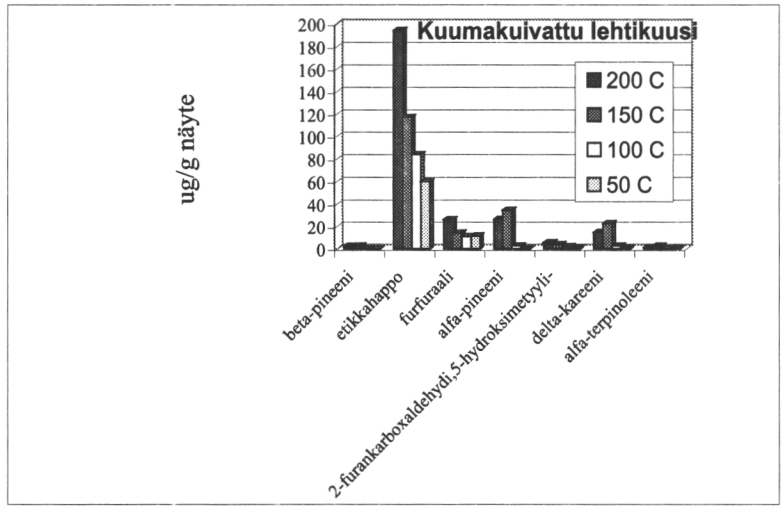
Kuva 6. Tärkeimmät ja eniten päästöjä aiheuttaneet haihtuvien orgaanisten yhdisteiden komponentit (VOC) ulkokuivatussa lehtikuusessa eri tutkimuslämpötiloissa.



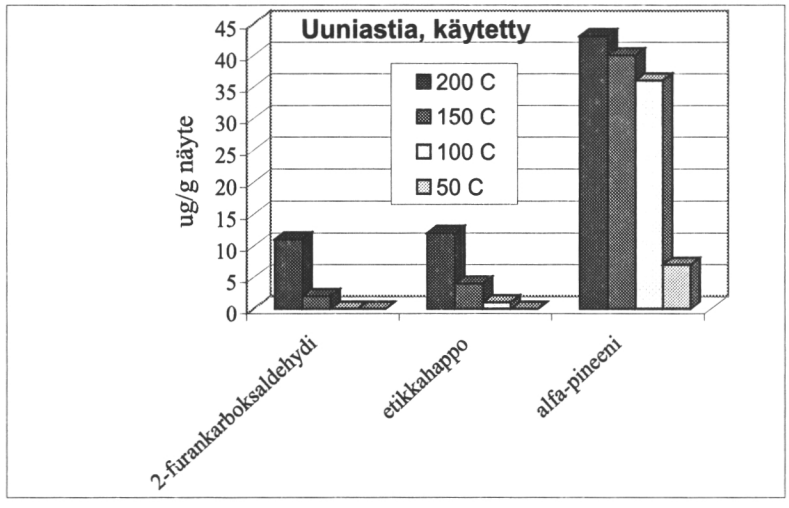
Kuva 7. Tärkeimmät ja eniten päästöjä aiheuttaneet haihtuvien orgaanisten yhdisteiden komponentit (VOC) lämminilmakuivatussa lehtikuusessa eri tutkimuslämpötiloissa.



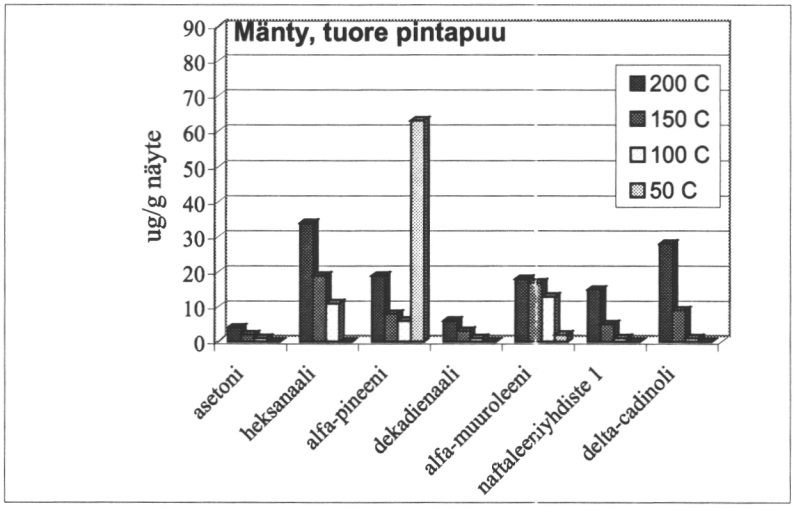
Kuva 8. Tärkeimmät ja eniten päästöjä aiheuttaneet haihtuvien orgaanisten yhdisteiden komponentit (VOC) alipainekuivatussa lehtikuusessa eri tutkimuslämpötiloissa.



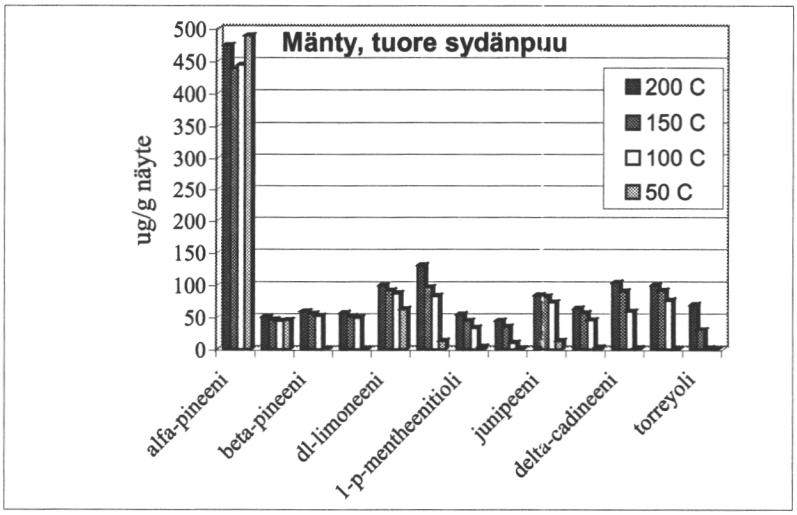
Kuva 9. Tärkeimmät ja eniten päästöjä aiheuttaneet haihtuvien orgaanisten yhdisteiden komponentit (VOC) kuumakuivatussa lehtikuusessa eri tutkimuslämpötiloissa.



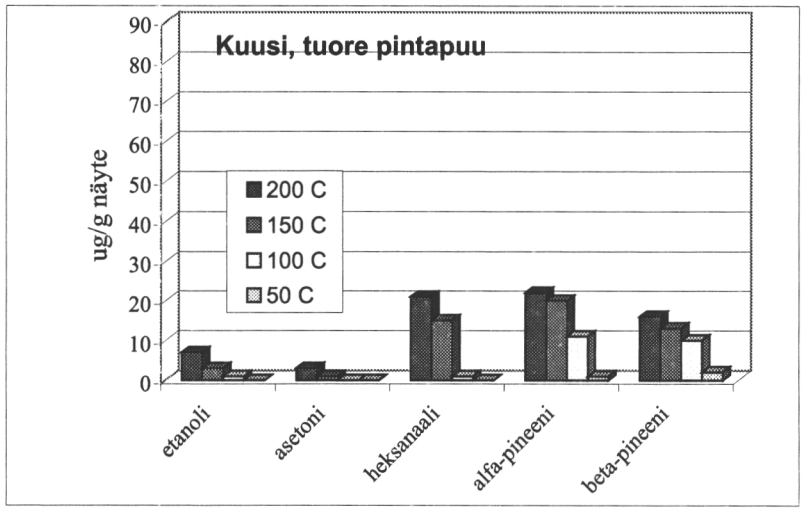
Kuva 10. Tärkeimmät ja eniten päästöjä aiheuttaneet haihtuvien orgaanisten yhdisteiden komponentit (VOC) käytetyssä lehtikuusesta tehdyssä uuniastiassa eri tutkimuslämpötiloissa.



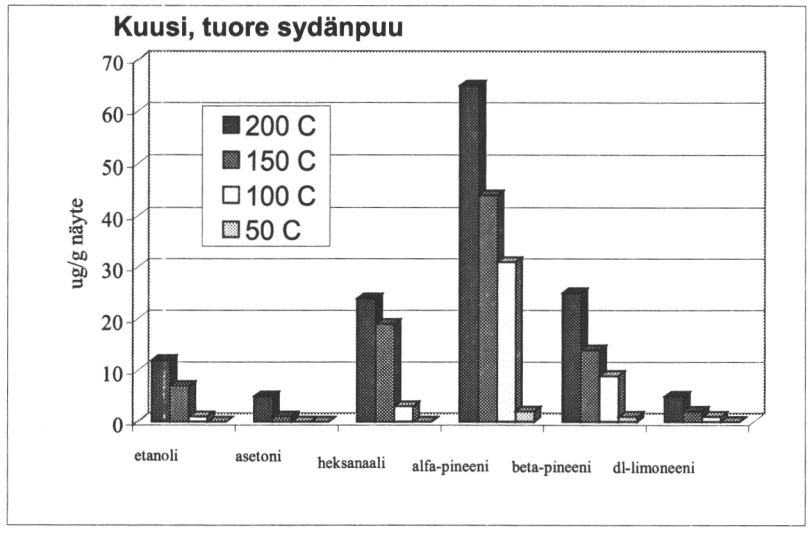
Kuva 11. Tärkeimmät ja eniten päästöjä aiheuttaneet haihtuvien orgaanisten yhdisteiden komponentit (VOC) tuoreessa männyn pintapuussa eri tutkimuslämpötiloissa.



Kuva 12. Tärkeimmät ja eniten päästöjä aiheuttaneet haihtuvien orgaanisten yhdisteiden komponentit (VOC) tuoreessa männyn sydänpuussa eri tutkimuslämpötiloissa.



Kuva 13. Tärkeimmät ja eniten päästöjä aiheuttaneet haihtuvien orgaanisten yhdisteiden komponentit (VOC) tuoreessa kuusen pintapuussa eri tutkimuslämpötiloissa.



Kuva 14. Tärkeimmät ja eniten päästöjä aiheuttaneet haihtuvien orgaanisten yhdisteiden komponentit (VOC) tuoreessa kuusen sydänpuussa eri tutkimuslämpötiloissa.

5 Tulosten tarkastelu

Tuoreesta lehtikuusesta haihtuvien yhdisteiden määrä ja koostumus poikkesivat olennaisesti vastaavista männyn ja kuusen arvoista. Lehtikuusen puumateriaalissa on mäntyyn verrattuna suhteellisen vähän haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC), etenkien terpeenejä. Toisaalta lehtikuusesta emittoitui enemmän etikkahappoa kuin männystä. Lehtikuusimateriaalien välillä saattaa olla eroja mm. alkuperästä, rungosta, sijainnista rungosta, puun iästä, mittausajankohdasta sekä tuotantoprosessista riippuen. Vaihtelua ei kuitenkaan analysoitu tarkemmin.

Lehtikuusesta haihtui hyvin vähän aineita alimmassa testauslämpötilassa, 50 °C, joka sekin on korkeampi kuin normaali sisätilan lämpötila. Vain sahatavaran kuivaamossa tai auringon paisteelle altistuvilla pinnoilla voi esiintyä vastaavia arvoja, joten tutkimuslämpötilassa saatuja tuloksia ei voida suoraan verrata käyttötilanteisiin. Myöskään ei voida tehdä vertailuja sisäilmaluokituksen perusteena olevien TVOC-mittausten tuloksiin, koska mittausmenetelmät ovat erilaiset. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet tutkitaan sisäilmaluokitusta varten neljä viikkoa vanhasta tuotteesta, jota on säilytetty ilman suhteellisessa kosteudessa 45 % ja lämpötilassa 23 °C; tutkittavia näytteitä ei myöskään jauheta. Tällä hetkellä suurin sallittu TVOC-arvo on vähäpäästöisillä eli M1-luokan materiaaleilla 200 $\mu g/m^2/h$.

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää lehtikuusen uuteainekoostumus mäntyyn ja kuuseen verrattuna. Tuloksista voidaan päätellä, että lehtikuusen suhteellisen alhaista haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuutta voitaisiin ehkä hyödyntää sisäverhousmateriaaleissa. Tämä lisää puumateriaalin kilpailukykyä silloin, kun vaaditaan mahdollisimman pieniä emissioita aiheuttavia materiaaleja. Pintamateriaalina käytettävän puun pinta yleensä pintakäsitellään, jolloin itse materiaalista tapahtuvan emission merkitys pienenee. Toisaalta myös itse kantavista rakenteista tapahtuva emissio voi lisätä sisäilmaan kohdistuvaa emissiorasitusta rakenteiden ilmavuototilanteissa (Lukkarinen & Saarela 1999). Myös materiaalien ikä ja vanheneminen vaikuttavat vapautuvien yhdisteiden määrään ja laatuun.

Lehtikuusessa oli männystä poiketen etikkahappoa, millä voi olla vaikutusta lehtikuusen käyttöominaisuuksiin; tosin etikkahapon määrä oli hyvin pieni. Etikkahappo on pistävän hajuista. Se saattaa myös lisätä metallisten liittimien korroosiota kosteissa oloissa. Toisaalta etikkahappo voi parantaa puun sään- ja lahonkestävyyttä.

Kuivaustavoilla oli jonkin verran vaikutusta siihen, miten paljon ja minkälaisia aineita lehtikuusesta haihtuu kuivauksen jälkeen, mutta eri kuivaustavoilla ei kuitenkaan ollut kovin merkittävää vaikutusta puun uuteainekoostumukseen. Keskimäärin kuivatusta lehtikuusesta haihtui vähemmän orgaanisia aineita kuin tuoreesta puusta, kun vertailukohtana oli tuore-erä 2. Alhaisimmat TVOC-arvot havaittiin alipainekuivatussa ja korkeimmat kuumakuivatussa lehtikuusessa.

Ulkokuivatun lehtikuusen uuteaineiden koostumus muistutti tuoretta lehtikuusta, joten ulkokuivaus ei muuttanut olennaisesti haihtuvien orgaanisten aineiden koostumusta. Alipainekuivauksen jälkeen terpeenien osuus oli suurempi kuin etikkahapon osuus verrattuna normaaliin lämminilmakuivaukseen. Tämä viittasi siihen, että alipainekuivauksen aikana puusta haihtuu vähemmän terpeenejä kuin

etikkahappoa. Toisaalta uuteaineiden suhteelliset määrät voivat muuttua kuivausprosessin seurauksena puussa tapahtuneiden kemiallisten muutosten seurauksena.

Tässä tutkimuksessa ei mitattu kuivauksen aikana haihtuvia aineita. Tosin tuoreesta puusta eri lämpötiloissa haihtuvat aineet kuvaavat jossain määrin lämpötilan vaikutusta haihtuvien aineiden määrään eri kuivauslämpötiloissa (ulkokuivaus, lämminilmakuivaus, kuumakuivaus tai lämpökäsittely). Kuumakuivatussa lehtikuusessa uuteaineiden määrä ja koostumus poikkesivat selvästi muilla menetelmillä kuivatusta lehtikuusesta. Haihtuvien aineiden kokonaispitoisuus (TVOC) oli korkein kuumakuivauksessa, ja tässä kuivausmenetelmässä havaittiin myös muita kuivausmenetelmiä enemmän aineita, joita voi syntyä käsittelyn seurauksena, mm etikkahappoa ja furfuraalia. Sen sijaan terpeenien määrä oli kuumakuivatussa lehtikuusessa pienempi kuin alipainekuivatussa.

Käytössä olleesta uuniastiasta emittoitui suhteellisen vähän erilaisia haihtuvia orgaanisia aineita ja niiden määrä oli pieni; eniten vapautui terpeenejä. Lehtikuusimateriaalin käyttöä ajatellen haihtuvista orgaanisista yhdisteistä tuskin syntyy olennaisia ongelmia. Merkittävintä on etikkahapon vapautuminen. Keittiövälineitä ajatellen lehtikuusesta vapautuvan etikkahapon määrä on vähäinen; lisäksi etikkahappoa vapautuu ruoanlaiton yhteydessä muistakin lähteistä. Venäjällä lehtikuusta on pitkään käytetty mm. elintarvikkeiden säilytysastioissa. Tässä tutkimuksessa havaittu lehtikuusen alhainen TVOC-pitoisuus ja toisaalta etikkahapon erittyminen puusta antoivat osaltaan lisävalaistusta tähän käyttöperinteeseen.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli myös selvittää, kuinka hyvin käytetty analyysimenetelmä kuvaa puumateriaalin käyttö- tai kuivausoloissa haihtuvien aineiden lisäksi itse puuaineen uuteaineiden koostumusta. Tulokset osoittivat, että lämpötilan nosto vaikuttaa olennaisesti vapautuvien yhdisteiden määrään ja laatuun. Korkeissa lämpötiloissa yhdisteiden saanto on korkeampi kuin matalissa. Korkea lämpötila voi myös aiheuttaa uusien yhdisteiden muodostumista, etenkin kun analyysit tehdään jauhetusta puusta. Tähän viittasi se, että korkeissa lämpötiloissa haihtui selvästi enemmän aineita kuin matalissa. Korkeimmassa lämpötilassa (200 °C) lehtikuusesta haihtui mäntyyn verrattuna suhteellisesti vähemmän terpeenejä, mutta etikkahapon osuus oli vastaavasti merkittävämpi.

Helposti syttyvien orgaanisten aineiden suuri määrä lehtikuusipuussa lisää syttymisherkkyyttä, koska palo alkaa yleensä uuteaineiden syttymisestä. Täten olisi mielenkiintoista tutkia jatkossa lehtikuusen paloherkkyyttä. Etikkahapon kohonnut määrä korkeissa lämpötiloissa voi osittain johtua myös puussa tapahtuneista muutoksista. Hemiselluloosan asetyyliryhmät hajoavat, jolloin syntyy etikkahappoa. Tiedetään, että lehtikuusessa lipofiilisten eli rasvaliukoisten uuteaineiden, kuten terpeenien määrä on pieni (mm. Viitanen ym. 1997, 1998) mutta vesiliukoisten uuteaineiden, etenkin hemiselluloosan (mm. arabinogalaktaani) määrä korkeampi kuin männyssä.

PUUSEPPÄYRITTÄJIEN KOKEMUKSIA LEHTIKUUSEN KÄYTÖSTÄ

Juhani Saimovaara

1 YLEISTÄ

Tässä raportissa esitettävät käyttäjäkokemukset on koottu Lehtikuusi puusepänteollisuuden raaka-aineena -hankkeeseen osallistuneiden Puuseppämestarit ry:n jäsenten kirjallisista palautteista sekä niistä kokemuksista ja havainnoista, joita on saatu Lahden ammattikorkeakoulun opiskelijoiden ja kurssilaisten harjoitustöiden yhteydessä. Puuseppämestarit ry:ssä oli vuoden 1998 alussa jäseninä 43 mestaria, jotka toimivat itsenäisinä yrittäjinä tai ammattilaisina puualan yrityksissä. Yhdistyksen toimialana on koristeveisto ja puusepän ja teräalan erikoistyöstöt ja tarkoituksena mm. jäsentensä ammattitaidon kehittäminen ja tunnetuksi tekeminen sekä yhteydet koti- ja ulkomaisiin puualan järjestöihin.

Käyttäjäkokemusten seurantaa ja raportointia varten valmisteltiin lomakkeet keväällä 1999. Niiden käyttäminen osoittautui kuitenkin hankalaksi, joten käyttäjille lähetettiin uusi raportointiohje 9.9.1999. Näillä kyselyillä saatu palaute oli hyvin kirjavaa, joten sen käsitteleminen tieteellisen tutkimuksen edellyttämällä tavalla ja tarkkuudella oli jokseenkin mahdotonta. Tämän vuoksi tämä raportti laadittiin esittämällä palautteen perusteella muodostettavissa olleita yhdensuuntaisia kokemuksia ikään kuin tutkimustuloksina. Palautetta pyrittiin tarkastelemaan mahdollisimman objektiivisesti korostaen kuitenkin sitä, että tiedot perustuvat hyvin subjektiivisiin kokemuksiin.

2 LEHTIKUUSIMATERIAALI

Käyttäjät saivat lehtikuusimateriaalinsa pyytämässään muodossa, saheina tai tukkeina ja joko kuivattuna tai kuivaamattomana. Sahatavara oli pääosin läpisahattua 50 mm paksua lankkua, jonkin verran oli myös paksuuksia 26, 30 ja 34 mm. Kukin käyttäjä kuivasi itse kuivaamattoman eli tässä tapauksessa ilmakuivan tavaran. Kuivaamistavoista ei palautteessa saatu tarkempia tietoja. Tarkoituksena oli, että eri kuivaustavoilla (alipaine A, lämminilma L) ja kuivausohjelmilla (A1, A2, L1, L2) kuivatettuja saheita olisi havainnoitu työstössä erikseen. Tämä ei kuitenkaan onnistunut kahdesta mahdollisesta syystä: 1) materiaali sekoittui työstössä, 2) kuivauserien välillä ei havaittu merkittäviä eroja.

Läpisahattujen lankkujen lisäksi saatiin koekäyttöön muutamia säteittäin sahattuja kappaleita ja paksuja pintalohkoja. Lankut olivat pääsääntöisesti leveitä, runsaasti sydänpuuta sisältäviä kappaleita. A- ja L-kuivattu tavara oli katkottu laboratoriokuivausta varten 80-90 cm:n pätkiksi. Tätä pitempi tavara oli ilmakuivaa tai tavanomaisesti lämminilmakuivattua, kosteus oli tasolla 12-14 %.

3 LEHTIKUUSEN TYÖSTETTÄVYYTEEN JA KÄYTTÖÖN LIITTYVIÄ TAUSTATEKIJÖITÄ

3.1 Kuivausvirheet

Kuivumisen aiheuttama halkeilu oli pahin lehtikuusisahatavaran käyttöä rajoittava ja materiaalihukkaa aiheuttava tekijä. Etenkin aluksi ilmakuivatussa 50 mm:n ja sitä paksummassa tavarassa esiintyi ytimen ympärillä, lankkujen päissä ja pinnanpuoleisella lapepinnalla niin paljon halkeamia, että puutavara oli puusepänkäyttöä ajatellen lähes käyttökelvotonta. Tilanne ei ollut läheskään yhtä huono sahatavaran ollessa ohutta eli 26-34 mm.

Kuivaustavalla (alipaine- tai lämminilmakuivaus) ei näyttänyt olevan suurta vaikutusta halkeiluun ja muihin kuivausvirheisiin. Sen sijaan lankun leikkuupinnan suunnalla oli ratkaisevan suuri vaikutus syntyneiden halkeamien määrään. Halkeilua esiintyi runsaasti tangentiaalisessa leikkauspinnassa, josta syystä puunhukka oli jatkovalmistuksessa jopa 60-70 %. Säteen suuntaiset pinnat olivat sen sijaan lähes virheettömiä, halkeilun aiheuttama hukka oli tällöin 5 %.

Epätasainen loppukosteus osoittautui kiusallisen hankalaksi ongelmaksi. Vaikka niin punnitusmenetelmällä kuin sähköisellä kosteusmittarillakin mitattuna sahatavaran piti olla riittävän kuivaa puusepänkäyttöä ajatellen, aihioiksi työstettyihin kappaleisiin syntyi kieroutumista ja vääntymistä niin paljon, että aihioiden oli ensimmäisen vaiheen työstämisen jälkeen annettava tasaantua pitkähkön ajan ja ne oli työstettävä tämän jälkeen uudelleen. Tämän arveltiin johtuvan puutavaraan jääneiden kosteiden alueiden kuivumisesta alkutyöstön jälkeen. Tietenkin puutavaran kuivauksessa syntyneillä jännityksillä oli kieroutumiseen ja mutkaisuuteen oma merkityksensä.

Kuivauksen aiheuttama lankkujen kupertuminen (kovertuminen) oli huomattavan suurta. Tämän arveltiin johtuvan lehtikuusen säteen- ja tangentinsuuntaisen kutistumisen poikkeuksellisen suuresta erosta. Tätä muodonmuutosta eivät käyttäjät kuitenkaan pitäneet kovin suurena ongelmana, sillä halkaisemalla kupertunut lankku keskeltä saatiin siitä kaksi lähes suoraa puolikasta.

3.2 Oksaisuus

Osa lehtikuusimateriaalista oli varsin vähäoksaista, ja siitä saatiin helposti oksattomia osia pienikokoisiin puutuotteisiin. Tavarassa oli toisaalta suuria rungon sisään kylestyneitä pystyoksia, jotka vaikeuttivat pitkien kappaleiden valmistamista. Oksakohdat olivat usein niin laajoja, että niitä ei voinut jättää valmistettavaan tuotteeseen vaan oksat piti poistaa katkaisemalla sahe oksien kohdalta.

Kuivatussa sahatavarassa ei ollut juuri lainkaan ehjiä terveitä oksia, sillä terveetkin oksat olivat halkeilleet kuivuessaan. Oksaryhmien kohdalla puussa oli tavallisesti myös mutka pituuden suunnassa.

3.3 Uuteainepitoisuus

Lehtikuusessa on niin runsaasti pihkaa ja vesiliukoisia uuteaineita, että ne on otettava huomioon puuta työstettäessä. Pahimmillaan pihkaa tihkuu kaikista puun leikkauspinnoista pieninä rakkuloina ja sitä esiintyy myös suurina pihkataskuina. Rungoilla ja rungon eri osilla näyttäisi olevan tässä suhteessa suuriakin eroja.

3.4 Sahepinnan tikkuisuus

Etenkin keinokuivatun lehtikuusen sahepinnassa olevat tikut ovat niin pistävän teräviä, että puutavaraa on lähes mahdoton käsitellä saamatta tikkuja sormiinsa. Tämä ominaisuus on niin kiusallinen, että se vaatii käsineiden käyttämistä työstäjältä. Käsineet voivat toisaalta hankaloittaa työskentelyä, koska paljain käsin työskennellessä syntyvä tuntuma puuhun heikkenee. Sama tikkuongelma tulee esiin myös höylätyssä ja hiotussa pinnassa, kun puun syyt irtaantuvat ja nousevat pystyyn etenkin muotojen kulmakohdissa.

3.5 Lustojen irtautuminen

Tikkuuntuminen on vain esiaste sitä voimakkaammalle ilmiölle, jossa lustopintojen voi joskus huomata irtautuvan toisistaan. Joissakin työstötilanteissa saattoivat etenkin ydintä lähellä olevat sydänpuun lustot irrota niin, että - kuten eräs käyttäjä kertoi - puun pystyisi vaikka purkamaan lustorajoja pitkin.

3.6 Kaarnan kiinnittyminen puupintaan

Lehtikuusen paksu kilpikaarna on sitkeää ja hyvin koossa pysyvää. Se on lisäksi kiinnittynyt erittäin lujasti puun pintaan, eikä irtoa siitä kuivauksenkaan aikana. Kaarnaa voidaan työstää joko sellaisenaan tai siten, että kaarnapintaa jää puutuotteeseen puumateriaalin lisäksi. Ominaisuutta voitaisiin hyödyntää esim. pienesineiden suunnittelussa ja valmistuksessa.

3.7 Syyrakenne

Lehtikuusen kevät- ja kesäpuu eroavat erittäin paljon kovuudessa. Sen lisäksi oksat ovat huomattavasti muuta puuainesta kovempia. Tämä aiheuttaa työstettävyyteen erityisvaatimuksia, joita ei välttämättä pystytä ratkaisemaan tavanomaisia työvälineitä, teriä ja teräaineita käytettäessä. Käyttäjiltä tulleen palautteen perusteella kovuuseroista johtuviin ongelmiin on löydettävissä ratkaisuja esim. teräkulmia muuttamalla.

Jos on syyrakenne ongelma työstössä, on se myös erikoispiirre, joka antaa lehtikuusituotteelle ilmettä. Voimakasta syykuviota voidaan käyttää tehokeinona tuotesuunnittelussa. Sopivan pintakäsittelyn avulla syykuvion selkeyttä voidaan entisestään voimistaa.

4 LEHTIKUUSEN TYÖSTÖ

4.1 Sahaus

Sahattaessa lehtikuusta vannesahalla syiden suuntaan terä kulkeutuu helposti syiden mukaisesti ja haluttua sahauslinjaa on vaikea säilyttää. Tämä on ilmeistä erityisesti silloin, kun sahataan kapealla ja vähänkin tylsällä terällä.

Pyörösahalla sahattaessa halkisahaus onnistuu kuten männyllä. Katkaisusahauksessa taustavasteiden on oltava erittäin hyväkuntoisia, jotta leikkuupinnan repeilyä ei tapahtuisi.

4.2 Höyläys oiko- ja tasohöylällä

Lehtikuusipuu repeilee herkästi oksakohtien läheisyydessä, erityisesti syidenvastaiseen suuntaan höylättäessä. Erityisen hankalia ovat kovat kuolleet mutta myös terveet oksat. Höylättäessä vähänkin tylsillä terillä lustot irtoavat tangentiaalisessa leikkauspinnassa aiheuttaen pinnan tikkuuntumista. Säteittäisessä leikkauspinnassa höyläämineri onnistuu lehtikuusella yhtä hyvin kuin männyllä.

4.3 Jyrsintä

Jyrsittäessä lehtikuusipuuhun syiden suuntaisia muotoja lustot saattavat irtaantua lohkeamalla pitkinä tikkuina jyrsinterän edessä. Pieni syöttönopeus vähentää tikkuuntumista, mutta samalla palolaikkujen syntymisen riski kasvaa. Syiden poikkisuuntaan jyrsittäessä ongelmana on kevät- ja kesäpuun suuri kovuusero. Tästä syystä jyrsintäjäljestä tulee karkea ja pienet tarkat muodot murtuvat lustorajoja pitkin.

4.5 Hionta

Lehtikuusipuun hiominen on erityisen hankalaa korkean pihkapitoisuuden vuoksi. Hiomanauhat tukkeutuvat paljon nopeammin kuin ne ehtivät tylsyä. Jos yritetään hioa tukkeutuneella nauhalla, joudutaan käyttämään tavallista suurempaa puristuspainetta. Tämä aiheuttaa pehmeämmän kevätpuuvyöhykkeen kulumisen kesäpuuta syvemmälle ja siis epätasaisen pinnan. Liian tylsät hiomanauhat aiheuttavat palolaikkuja etenkin päiden puuaineessa.

4.6 Poraaminen

Etenkin pienten reikien poraaminen sahatavaran päihin on lehtikuusella vaikeaa, sillä syyt ohjaavat poran kulkua. Lapepinnalle porattaessa reiän reunat nousevat ylös leikkautumatta, jos terässä ei ole kunnollisia syyt katkaisevia sivuleikkuusärmiä.

4.7 Talttaaminen

Lehtikuusi vaatii erittäin terävät taltat. Siitä huolimatta puun syyt pyrkivät painumaan kasaan huomattavasti enemmän kuin männyllä. Taltan teroituskulman pienentäminen tasolle 22-25° parantaa lopputulosta, mutta terän särmä voi tällöin vaurioitua ja työstäminen hidastuu ja vaikeutuu.

4.8 Sorvaaminen

Lehtikuusipuuta on sorvattu hyvin monenlaisilla taltoilla, eri syysuuntiin, eri pyörimisnopeuksilla, erilaisia muotoja tehden, jne. Täten sorvattavuusominaisuuksien tutkimiseksi tarvittaisiin erityisesti määritelty tehtävä ja toteuttamistapa. Useat tähän tutkimukseen osallistuneet puusepät kokeilivat sorvaamista ja tekivät sen yhteydessä samoja havaintoja kuin mitä on tullut esiin muiden työstötapojen yhteydessä. Sorvaamisessa jokaisella puusepällä oli myös eniten mahdollisuuksia varioida työstötapahtumaa. Tässä jotkut onnistuivat mutta toiset eivät onnistuneet ratkaisemaan esiin tulleita ongelmia. Onnistuneista sorvausratkaisuista voitaisiin löytää enemmänkin ratkaisuja lehtikuusen työstöongelmiin.

4.9 Veistäminen

Lehtikuusen sopivuutta koristeveisto- ja yleensä veistopuuksi kokeili tässä tutkimuksessa vain yksi henkilö, joka on koristeveiston huippuammattilainen. Edellämainitut työstettävyysominaisuudet tulevat erityisen korostuneesti esille lehtikuusen veistotyössä. Kova kesäpuu ja kovat oksat aiheuttavat vaurioita huipputeräville veistoraudoille, kevät- ja kesäpuun kovuusero aiheuttaa lohkeilua ja syiden irtaantumista, jne. Lehtikuusen puuaines on sitä kovempaa ja vaikeampaa veistää, mitä kuivempaa se on. Veiston kannalta sopivimpana kosteutena voidaan pitää tasoa 15-17 %. Tällöin on kuitenkin riski valmiin veistoksen halkeilemisesta puun jatkaessa kuivumistaan veistotyön jälkeen. Tähän tutkimukseen osallistunut veistäjä tarvitsee lisäaikaa tarkkojen havaintojen tekemiseen. Lehtikuusen voimakasta syykuviota voidaan hänen mukaansa käyttää hyödyksi erityisesti suurissa pinnoissa.

5 MUITA HAVAINTOJA

5.1 Naulaaminen ja ruuvaaminen

Nauloja ja ruuveja asennettaessa havaittiin, että niitä varten kannattaa porata alkureiät. Lisäksi pinnoittamattomat kuten myös kuumasinkityt naulat ja ruuvit tummensivat ulko-olosuhteissa puuaineksen läheisyydestään varsin nopeasti. Oletettavasti lehtikuusessa oleva etikkahappo aiheuttaa tämän korroosioilmiön.

5.2 Liimaaminen

Liimaliitosten tekeminen tavanomaisia PVAc-liimoja käyttäen onnistui lehtikuusella männyn tapaan. Puristusaikaa tarvittiin lehtikuusen liimauksessa kuitenkin enemmän kuin männyn liimauksessa.

5.3 Pintakäsittely

Lehtikuusen pintakäsittelyt luonnonöljyillä tuntuivat onnistuvan erittäin hyvin. Lakkaamisessa tarvittiin yksi ylimääräinen lakkauskerta pinnan tasaamiseksi, koska lehtikuusen kevät- ja kesäpuu imevät eri tavoin lakkaa.

YHTEENVETO

Tämä tutkimus osoitti, miten huonosti me vielä tunnemme metsissämme kasvavia puulajeja. Joistakin puulajeista tietoa on enemmän, toisista hyvin vähän. Tässäkin tutkimuksessa löydettiin lähinnä ongelmia, ainakin puuaineen työstettävyyden suhteen. Tämäkin on erittäin hyvä lopputulos, sillä tiedostettuihin ongelmiin vasta voidaan etsiä ratkaisuja. Lehtikuusta ei pidä missään tapauksessa tuomita puusepänteollisuuteen sopimattomaksi puumateriaaliksi vain sen takia, että sen käyttöön ja esim. työstämiseen sisältyy vielä ratkaisemattomia ongelmia. Työtä tulisi jatkaa keskeytymättömästi tämän hyvän aloituksen jälkeen.

Lehtikuusipuuhun liittyy suuria mahdollisuuksia. Sen ulkonäkö, kauneus on monessa käyttötarkoituksessa vertaansa vailla. Sen tiedetään kestävän verraten hyvin lahoamista vastaan ja se on kovaa ja kestävää. Lehtikuusi myös kasvaa Suomen olosuhteissa suureen tukkikokoon viljavilla kasvupaikoilla ja tällöin muita puulajeja nopeammin. Lehtikuusesta tuskin tulee puusepänteollisuudessamme kovin laajasti käytettyä puulajia, mutta se voi tuoda kilpailukykyisen vaihtoehdon erityisesti pienelle ja keskisuurelle teollisuudelle. Tiedot lehtikuusen käyttömääristä muualla maailmassa viittaavat siihen, että käyttöön liittyviä ongelmia on pystytty ratkaisemaan. Jatkotutkimuksissa pitäisikin perehtyä muualla tehtyihin ratkaisuihin ja niistä saatuihin kokemuksiin.

KOKEMUKSIA LEHTIKUUSEN KÄYTÖSTÄ SUKEVAN KESKUSVANKILAN JA JUUAN AVOVANKILAOSASTON TYÖOSASTOILLA

Ilkka Kuva, Erkki Palm ja Alpo Turunen

1 TAUSTATIETOJA

Vankiloiden työtoiminta on peräisin jo Venäjän tsaarinvallan ajoilta eli 1800-luvulta ja 1900-luvun alkupuolelta. Työtoiminnan järkiperäinen teollistaminen alkoi 1930-luvulla. Laitoksille asetettiin tällöin mm. sellaisia tavoitteita, että niiden haltuun annettu työvoima tuli sijoittaa tuottavaan työhön siten, että vankilat työtuloksillaan korvaisivat mahdollisimman suuren osan aiheuttamistaan menoista. Aluksi työt olivat ensisijaisesti maatalousmaan raivaamista, peltojen viljelyä, karjan kasvatusta ja uusien vankilakiinteistöjen rakentamista sekä tähän liittyvää rakennustarvikkeiden valmistusta (mm. saha- ja tiilituotantoa).

Vankeinhoitolaitoksen eli Vahon puusepänteollisuus juontaa juurensa niinikään 1930-luvun alkupuolelle. Tästä lähtien on valmistettu puukalusteita aluksi omaan ja myöhemmin, pääasiassa 1930-80-luvuilla, muun julkisen hallinnon käyttöön (mm. Puolustuslaitos, Posti, Rautatiehallinto, Tiehallinto, kunnat). Muun valtionhallinnon ja kuntien työtilaukset ovat vähentyneet ja osin loppuneet 1980-luvulta alkaen, jonka vuoksi Vahon työtoiminnan on täytynyt sopeutua normaalin markkinatalouden ehdoilla toimivaan tuotantoon. Kun lisäksi vankityövoiman määrässä ja laadussa on tapahtunut valtaisat muutokset kuluneen vuosikymmenen aikana, koko vankiloiden tuotannon suunnittelu ja ohjaus, yksittäisten tuotteiden suunnittelu ja kehittäminen sekä tuotteiden valmistus ja markkinointi ovat suurien haasteiden edessä.

Tähän haasteeseen vastatakseen Vahon puusepänteollisuus on innovoinut normaalin suomalaisen puumateriaalin rinnalle (mänty/kuusi/koivu) myös uusia materiaaleja (lehtikuusi, lämpöpuu). Tavoitteena on uusien tuotteiden suunnittelu ja tuotteiden menekin parantaminen markkinaohjautuvaan asiakaspiiriin, jota vankiloiden puusepäntuotannolle tänä päivänä edustavat paljolti vankilamyymälöissä asioivat yksityisasiakkaat.

Yhtenä Vahon puusepänteollisuuden tavoitteena on laajentaa ja vahvistaa ulkokäyttöön tarkoitettujen kesäkalusteiden materiaalipohjaa ns. luonnonmukaisilla raaka-aineilla, joiden hävittäminen tuotteen elinkaaren umpeuduttua ei tuottaisi asiakkaille ongelmia, kuten nykyisin käytössä olevat painekyllästetyt raaka-aineet aiheuttavat. Myös lehtikuusen soveltuvuus ja käytettävyys kestävänä ja luonnon monia eri värisävyjä sisältävänä materiaalina vaativiin sisäkalusteisiin ja kodin tarve-esineisiin herättää Vahon tuotesuunnittelusta vastaavan työnjohdon ideoimaan uusia käyttökohteita.

Vastatakseen edellä kuvattuihin haasteisiin vankiloiden puusepän tuotanto lähti mukaan tähän hankkeeseen lähinnä ideoimaan uusia materiaalivaihtoehtoja pihakalusteiden suunnittelemiseksi ja korvaamiseksi luonnonmukaisilla vaihtoehdoilla, kuten lehtikuusella.

Tässä hankkeessa mukana olleet Sukevan keskusvankila ja Juuan avovankilaosasto ovat vuosia valmistaneet kotimaisesta raaka-aineesta (mänty, kuusi) puutarhakalusteita, jotka on painekyllästetty kestämään ilmastorasituksia ja maaperän kosteusolosuhteita. Tähän asti on tunnistettu ilman tutkimuksia, asiantuntijoiden omien arvioiden perusteella lehtikuusen luontaiset ominaisuudet kestää ilmastorasituksia vaativissa puusepänteollisuuden kohteissa kuten ulkorakenteissa ja muissa kosteudelle alttiissa paikoissa.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli todentaa tulosten kautta edellä kuvatut lehtikuusen ominaisuudet sekä saada ajankohtaista ja entistä parempaa tietoa vankiloiden puusepäntuotannon käyttöön mm. lehtikuusen kuivauskaavoista lämminilma-, lauhde- ja alipainekuivaamoissa sekä materiaalin työstettävyys- ja liimausominaisuuksista ja pintakäsittelymenetelmistä.

2 TUTKIMUSSUUNNITELMA

Sukevan ja Juuan vankiloille laadittiin hankkeen alussa pihakalustojen valmistuksen eri vaiheita kuvaava tutkimussuunnitelma, josta kävisivät seikkaperäisesti ilmi lehtikuusimateriaalin ominaisuudet ja työstettävyys eri työvaiheissa (kuivaus lämminilma- ja lauhdekuivaamossa, työstö, liimaus, kasaus, pintakäsittely).

Suunnitelman ja sen seurannan pääsisältö oli seuraava:

1 Tavaran toimittaja ja sen varastointiajankohta vankilassa. Pyritään ostamaan ulkokuivaa tavaraa (kosteus 15-20 %).
2 Materiaalien alkuperät:
   Suomalainen lehtikuusi (Metlan koemetsiköt) / Venäläinen lehtikuusi (tarkempi sijaintipaikka, mikäli tieto saatiin myyjältä) / muu (jos tiedossa).
   Lehtikuusilaji (jos tiedossa).
   Jokaisen raaka-aine-erän alkuperätodistus tai kirjallinen selvitys myyjältä raaka-aineen alkuperästä, merkintä tutkimussuunnitelmaan.
3 Yleispiirteet materiaalista: työnjohdon dokumentoima, silmämääräiseen tarkasteluun perustuva oma kuvaus materiaalin mitoista ja laatutekijöistä (oksaisuus, oksien laatukriteerit, yms.).
4 Sahausjälki: hyvä/epätasainen/huono
   paksuusvaihtelua on/ei ole.
5 Sahaussuunta: säteen suunta/tangentin suunta/läpisahattu.
6 Saheiden muoto ja laatu: suoraa/mutkaista/kieroa/vinosyistä/oksaista/vikaista (lahoa).
7 Materiaalin varastointi: ulko/sisä.
8 Kuivaustapa: ulko/lämminilma/kuuma/muu (mikä?).

9 Kuivausmuutokset: halkeilu/kieroutuminen/värinmuutos.
Jokaisesta kuivauserästä pyritään selvittämään laatuvirheiden (kieroontuneet ja käyristyneet, halkeamat, värimuutokset) suhteellinen osuus prosentteina kuivatun erän kokonaistilavuudesta. Lisäksi jokaisesta kuivauserästä selvitettiin kosteuden hajonta kuivauksen jälkeen, jos se oli mahdollista.

10 Höyläysjälki: tasainen/epätasainen/aaltoileva.
Lehtikuusen työstöstä puusepänteollisuudessa saadut kokemukset viittasivat materiaalin kovuuteen mm. terien nopeana kulumisena, jota seurattiin vertaamalla normaalin havupuun työstöön.

11 Muut huomiot: liimauskokeet ja pintakäsittelykokeet luonnonmukaisesti valmistetuilla kovettuvilla öljyillä (Kiinanpuuöljy, Tikkurilan puuöljy)

3 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

3.1 Sukevan keskusvankilan puusepänteollisuus

3.1.1 Raaka-aine

- 50 mm * 50 mm siperianlehtikuusi
- toimittaja: Lappeenrannan Puukeskus 19.05.1998
- sahausjälki: kohtalainen kehäsahausjälki
- paksuusvaihtelu: ylimittaa paksuudessa, alimittaa leveydessä
- sahaussuunta: pelkka-/jakosahaus

3.1.2 Kuivaus

Käytetty lehtikuusisahatavara oli ulkokuivaa, jota oli ulkovarastoitu 3 kk. Saheista tehtiin kosteusmittauksia ennen ja jälkeen kuivauksen sekä määritettiin kuivamitat ja kuivausvirheet (taulukko 1). Sahatavara kuivattiin GANN Hydromat TKA-6 lämminilmakuivaamossa, johon mahtuu kerrallaan 40 m^3 puutavaraa. Kuivausnipun koko oli 1000 mm *1500 mm * 6000 mm, jollaisia kuivaamoon mahtuu kerrallaan 4 kpl päällekkäin ja 3 kpl rinnakkain. Kuivaamossa oli kuivumassa samanaikaisesti lehtikuusierän kanssa kolme nippua kuusilankkua. Lehtikuuset olivat päällimmäisinä, joista päällimmäisimmät lankut kieroutuivat voimakkaasti. Kuivausprosessi perustuu automatiikan hoitamaan ohjelmaan, eikä siinä ole paljon säätömahdollisuuksia. Kuivauskaavana käytettiin kuivaamon valmistajan tekemää lehtikuusen kuivauskaavaa. Kuivausprosessin asetusarvot olivat seuraavat:

Lämmitysaika	10 h
Alkulämpötila	60 °C
Loppulämpötila	70 °C
Kuivausvoima	2,2
Tasaus	2 * lämmitysaika
Koko prosessin läpimenoaika	5 vrk 12 h

Taulukko 1. Sahemittaukset Sukevan keskusvankilan lehtikuusen kuivauksessa. Halkeamat: LH = läpihalkeama, PH = pintahalkeama.

Sahe nro	Kosteus %		Mitat mm	Oksat Kpl/suurin läpimitta, mm			Halkeamat kpl/pituus, mm
	Ennen kuivausta	Kuivauksen jälkeen	Kuivauksen jälkeen	Kuiva	Terve	Helmi (kpl)	
1	19,4	7,9	53 * 150	9/40	1/20	...	PH 5/300
2	19,3	10,2	51 * 143	5/65	5/15	22	...
3	18,1	9,5	55 * 148	2/15	6/25	23	PH 7/300
4	20,1	7,3	53 * 150	6/45	2/15	...	...
5	18,7	8,7	52 * 143	7/35	...	...	PH 6/400
6	20,1	9,6	54 * 142	6/15	...	22	...
7	17,6	8,6	53 * 150	...	...	6	PH 10/300
8	18,1	6,7	55 * 148	7/20	...	5	...
9	18,9	11,4	53 * 150	9/20	...	5	PH 2/500
10	17,1	12,2	53 * 155	7/15	...	18	PH 5/400
11	15,1	9,0	55 * 150	6/50	6/20	...	
12	15,7	12,4	55 * 140	...	5/30	30	LH 3/900
13	14,5	8,7	52 * 152	4/20	11/15	19	...
14	13,3	8,5	53 * 150	5/20	5/50	16	PH 10/500
15	11,2	11,4	52 * 150	2/15	...	4	...
16	15,4	5,5	53 * 155	14/40	5/15	...	...

Kuivaus epäonnistui osaksi siitä syystä, että kuivaamon sähkölaitteissa oli viallinen komponentti, minkä vuoksi puhaltimet pyörivät vain toiseen suuntaan. Suunnanvaihdon jälkeen puhaltimet seisoivat 4 h. Vika huomattiin vasta jälkeen päin.

Ennen kuivausta lehtikuusiraaka-aine näytti hyvältä nipussa. Kuivauksen jälkeen lankut halkeilivat voimakkaasti (taulukko 1). Halkeamia oli noin puolessa tavaran määrästä. Halkeamat kulkivat vinottain lankun pituussuunnassa. Halkeamien syvyys oli 5-15 mm ja pituus pääasiassa 300-500 mm. Oksat olivat osittain irti helmioksia lukuunottamatta.

3.1.3 Työstö

Lehtikuusilankut halkaistiin ennen höyläystä vannesahalla seuraaviin mittoihin (mm): 19*50, 25*100, 32*75, 32*100. Halkaisussa kuivat, osittain irti olleet oksat ja halkeamat tulivat esille ja terä tukkeutui mutta ei lähtenyt kiertämään. Halkaistut lankut höylättiin pitkinä seuraaviin valmiisiin mittoihin (mm): 16*40, 21*88, 28*70, 28*95. Höyläys tehtiin 8-kutterisella listahöylällä silityskutteria käyttäen, kulmiin tehtiin R5-pyöristys. Höyläysjälki oli aluksi hyvä, mutta terien tylsyessä jälki huononi ja tikkuuntumista alkoi ilmetä. Silityskutterin käyttö lisäsi edelleen puunsyiden nousemista koholle. Höylätyt lankut katkaistiin optimoivalla katkai-

susahalla, jossa yhteydessä myös poistettiin liidulla merkityt vikakohdat. Muotokappaleet työstettiin CNC-työstökeskuksella. Terät tylsyivät varsin nopeasti, minkä jälkeen alkoi ilmetä repimistä. Suorien kappaleiden päät pyöristettiin tavallisella alajyrsinkoneella. Päihin tulevia nauloja samoin kuin ruuveja varten porattiin reiät.

3.1.4 Pintakäsittely

Lehtikuusikalusteiden osat käsiteltiin irtokappaleina sivelyllä valmisteella Tikkurilan Puuöljy 20. Kuivuminen oli hidasta ja kappaleet tahrasivat useita päiviä. Kuivuttuaan kappaleet olivat erittäin liukkaita; niput eivät myöskään pysyneet hyvin kasassa kuormalavalla kuljetettaessa.

3.1.5 Naulaus

Lehtikuusikalusteet naulattiin kokoon paineilmanaulaimella. Naulana käytettiin kuumasinkittyä taiwanìlaista naulaa, koot (mm): 2,1*45, 2,1*50. Ohuet ja kapeat rimat (16 mm * 40 mm) pyrkivät halkeamaan siitä huolimatta, että niihin oli porattu alkureiät ja naulaus tehtiin 50-70 mm:n päähän riman päästä. Puu oli osittain niin kovaa, että naulat vääntyivät ja tulivat näkyviin kappaleen sivusta. Myös 28 mm paksut runkokappaleet halkeilivat naulattaessa.

3.1.6 Valmiit tuotteet

Lehtikuusituotteiden valmistuksessa raaka-ainehukka oli 24,6 %. Tuotteet olivat SuKeVa-puutarhakalusteita seuraavin valmistusmäärin:

Tuote	Tavoite	Valmistui
	Kpl	
Pöytä, pituus 1600 mm	25	20
Tuoli	50	56
Penkki	25	18

3.1.7 Myynti

Lehtikuusikalusteille olisi ollut enemmän kysyntää kuin mitä voitiin tarjota. Tuotteen hinta voi olla huomattavasti korkeampi kuin vastaavalla painekyllästetyllä mäntykalusteella. Reklamaatioita tuli neljästä toimituksesta, joista kustannuksia koitui vajaa 500 mk. Reklamaatioiden syyt olivat:

- oksaisuus
- halkeamat
- vajaasärmäisyys
- pintaan nousseet tikut
- harmaantuu nopeasti
- yhdessä tuolin käsinojassa oli tavallista mäntyä

3.1.8 Kalusteiden ulkotestaus

Yksi lehtikuusikalusto oli ulkona säätestissä koko kesän 1999. Lehtikuusipuu tummui voimakkaasti naulojen ja ruuvien ympäriltä, vaikka kesä oli kuiva. Muuten kaluston pinta vaalentui auringon valon vaikutuksesta.

3.1.9 Yhteenveto

Lehtikuusi on materiaalina ongelmallisempi ja vaikeampi työstää kuin mänty ja kuusi. Lehtikuusen työstö vaatii tavallista terävämmät terät, joten teriä on myös vaihdettava tavallista useammin. Työstö onnistui kuitenkin suhteellisen hyvin CNC-työstökeskuksella. Pintakäsittely puuöljyllä tekee kappaleista liukkaita ja niput hajoavat helposti kuormalavalla kuljetettaessa. Puuöljy kuivuu hitaasti. Suurissa sarjoissa pintakäsittelystä tulee ongelmia kuivumisen ohella.

Oksaton lehtikuusi on ulkonäöltään kaunispiirteistä. Raaka-aineen pitäisi olla kuitenkin lähes oksatonta ja kuivauksen onnistua hyvin, jotta lopputuote olisi virheetön. Laadunvalvonnassa on käytettävä tiukempaa kontrollia kuin nyt tehdyssä sarjassa. Muussa tapauksessa laatu muodostuu alhaiseksi oksaisuuden ja halkeamien vuoksi ja reklamaatioita tulee usein.

3.2 Juuan avovankilaosaston puusepänteollisuus

3.2.1 Taustaa

Lehtikuusta on käytetty Juuan avovankilaosaston puusepänverstaassa kolme vuotta puutarhakalusteiden raaka-aineena. Kalustojen valmistukseen hankitut raaka-aineet ovat pääosin Venäjältä siperianlehtikuusimetsiköistä, joiden tarkkaa alkuperää materiaalin välittäjä ei ole pystynyt paikallistamaan.

3.2.2 Raaka-aine

Tässä hankkeessa tutkimuksen kohteena olleesta lehtikuusierästä valmistaja dokumentoi seuraavat tiedot:

- siperianlehtikuusta; u/s 25*125, u/s 50*125-200, u/s 32*125
- raaka-aine on Niiralan raja-asemalla toimivan yksityisen välittäjän Venäjältä tuomaa lautatarhakuivattua lehtikuusisahatavaraa
- sahattu kehäsahalla

3.2.3 Kosteus ja kuivaus

Sahatavara oli lautatarhakuivattua, kosteus 15-20 %. Loppukuivaus tehtiin Juuan avovankilaosaston Eurotec Oy:n Dryfinn-15 lauhdekuivaamossa, jossa kuivauserä oli n. 8 m^3. Sahatavara kuivattiin ns. pitkän kaavan ohjelmalla, jossa alkulämpötila oli useamman vuorokauden ajan 25 °C. Kuivauksen annettiin edetä ilman koneellista kosteuden poistoa. Kuivausrimojen paksuus oli 30 mm. Sahatavaran pinta kuivui nopeammin kuin sisäosa. Kosteuden alentuessa alle 30 prosenttiin pinnan nopea kuivuminen aiheutti paksussa, 50 mm:n tavarassa runsaasti pinnansuuntaista hiushalkeilua ja jonkin verran myös syviä halkeamia. Lautatavaran (paksuus 25 mm) kuivauksessa ei juuri ilmennyt ongelmia. Kuivausaika oli lehtikuusella pitkä, jopa kolme viikkoa. Lehtikuusisahatavaran annettiin tasaantua kuivauksen jälkeen varastohallin normaalilämpötilassa rimoitusvaunuissa mahdollisten vesitaskujen poistamiseksi, jolloin kosteus tasaantui tasolle 6-8 %.

3.2.4 Työstö ja liimaus

Lehtikuusen puuaine on tavallista kovempaa ja työstöterät tylsyvät lehtikuusisahatavaraa työstettäessä nopeammin kuin mänty- tai koivusahatavaraa työstettäessä. Puutarhakalusteiden valmistuksessa käytetään kolmen vuoden kokemuksen perusteella ruuvi- ja PVAc-liimaliitoksia. Liimana on käytetty Kiilto Oy:n D-3 Kestokol–liimaa. Ruuveille on tehtävä alkureiitys, jotta voidaan välttää halkeamat ruuvien sijaitessa lähellä kappaleiden reunoja. Pihakalusteiden istuinosien rimat kiinnitetään sekä ruuvi- että liimaliitoksin, jolloin liitoksen kiinnipysyminen on varmempaa kuin pelkkiä ruuveja käytettäessä. Lehtikuusiliimalevystä on valmistettu pöytätasoja sisäpirttikalusteisiin hyvin kokemuksin niin työstön, liimauksen, ulkonäön kuin asiakaspalautteen suhteen.

3.2.5 Pintakäsittely

Lehtikuusikalusteiden pintakäsittelyssä käytettiin aluksi Tikkurilan puuöljyä, joka siveltiin puupintaan käsisiveltimellä. Tällöin kaluston pinta harmaantui muutaman vuoden ulkokäytössä. Tämän vuoksi siirryttiin maalinvalmistajan ohjeen mukaan käyttämään Valtti-pohjustetta ja sen päällä kovapuuöljyä. Tämän on todettu parantavan kaluston säänkestävyyttä ja alkuperäisen värin näkyvyyttä. Kalusteet pintakäsitellään valmiina tuotteina.

HANKKEEN YHTEENVETO

1 Lehtikuusitukkien hankinta, esivarastointi ja sahaus

Metsäntutkimuslaitoksen Joensuun tutkimuskeskuksen toteuttamassa osatutkimuksessa tavoitteena oli kerätä tarvittavat empiiriset metsikkö-, runko-, tukki-, sahatavara- ja puunäyteaineistot ja samalla osaltaan selvittää tukkien esivarastoinnin ja sahaustavan merkitystä sahatavaran kuivaukseen ja työstettyjen aihioiden liimaukseen.

Pääaineisto käsitti 23 runkoa 101 vuoden ikäistä siperianlehtikuusta Metlan Punkaharjun tutkimusalueesta, joista huhti-toukokuussa 1998 sahattiin tuoreena 13 rungon tukit ja kevään 1999 sahauksia varten varastoitiin 10 rungon tukit; tuoreina sahatuista toimitettiin hankkeessa mukana olleille yrityksille viiden rungon tukeista sahatut kappaleet. Rungoista otettiin 2 kpl 3 m:n tyvitukkeja sekä lisäksi 3 m:n välitukit, joiden minimilatvaläpimitta oli 30 cm. Tutkimukseen otettiin myös 5 kpl 1996-97 Kiteen Puhokselta kaadetuista lehtikuusista tehtyä yli 40 cm:n ja 6 m:n tyvitukkia, joita Lehtikuusela Ky oli varastoinut 2-3 vuotta. Lisäksi tutkimukseen hankittiin materiaalia Metsähallitukselta siperianlehtikuusen harvennusmetsikkövaiheessa olevasta kloonikokeesta Keski-Suomesta, kaikkiaan 15 runkoa, latvaläpimitaltaan 15-30 cm. Näistä sahattiin vain 3 m:n tyvitukit 50 mm:n sahatavarapaksuuksille. Saheita ei kuitenkaan tutkitti tarkemmin, koska pikkutukista saatavien tulosten käyttösovellukset arvioitiin pieniksi järeisiin tukkeisiin verrattuna, joista tehtiin vastaavasti suunniteltua enemmän erilaisia määrityksiä. Tavoitteet toteutuivat muutoin suunnitellusti sekä määrän että laadun suhteen.

Rungoista ja tukeista mitattiin yleiset ulkoiset laatutunnukset ja ne esivarastoitiin kuoripäällisenä ulkona Pieviläisen sahalla Enossa. Tutkimukseen otettiin myös Puukeskus Oy:n toimittamaa, Venäjältä tuotua lehtikuusisahatavaraa (50*125 mm) kuivaus- ja liimaustutkimuksia varten sekä Lehtikuusela Ky:n Venäjältä Krasnojarskin alueelta hankkimaa lehtikuusisahatavaraa (50*150 mm) kuivaustutkimuksia varten. Näiden materiaalien alkuperä vaihteli, puutavara tuli Suomeen sahattuna ja laivauskuivana. Vertailumateriaaleiksi hankittiin aiemmin kaadettua ja kuivattua haapaa ja mäntyä.

Punkaharjun ja Kiteen järeät tukit läpisahattiin pääasiassa 50 mm:n sahatavarapaksuuksille, pinnoista otettiin kuitenkin myös 32 mm:n saheita sahaussaannon pitämiseksi kohtuullisella tasolla. Tyvitukeilla kokeiltiin pinnansuuntaista sahausta, joka kuitenkin johti sydäntavaran muoto-ongelmiin (kartiomaisia saheita). Muutenkaan erikoissahausasetteiden soveltaminen ei osoittautunut ongelmattomaksi käytetyllä pyörösahauskalustolla (mittatarkkuus, sahatavaran saanto ja laatu). Sahaukset jälkeen saheet laatuluokiteltiin ja niistä määritettiin viat (oksaisuus, vinosyisyys, muoto- ja kasvuviat, pihkataskut), minkä jälkeen ne toimitettiin kuivaustutkimuksiin VTT:lle, JoY:lle ja hankkeessa mukana olleille yrityksille. Keski-Suomen pieniläpimittaiset tukit sahattiin Pohjois-Karjalan AMK:n Utran sahalla. Kaikkien sahattujen tukkien päistä otetuista näytteistä määritettiin kosteus, tiheys, vuosiluston leveys ja uuteainepitoisuus, erikseen pinta- ja sydänpuusta.

Materiaali oli huomattavan tiheälustoista suomalaiseksi lehtikuuseksi, pintapuussa 1 mm ja sydänpuussa 2 mm, mutta tiheys oli tavanomaisella tasolla, tuoretiheys 750-800 kg/m^3.

Ulkokuivauksessa olleen sahatavaran kosteuden kehittymistä eri osissa saheita seurattiin tavanomaisin mittauksin resistanssityyppisellä Protimer Timberlogger-piikkikosteusmittarilla. Kuivuminen ulkokuivauksessa kuten myös kuivauksen lopputulos noudattivat lehtikuusella samoja malleja kuin männyllä ja kuusella. Lokakuussa 1998 kosteussuhde oli 19-21 %, mikä vastasi laivauskuivaa puutavaraa; heinäkuussa 1999 kosteussuhde oli kuivan kesän ansiosta enää 15-16 %. Tyvitukkien saheiden kosteus oli molemmilla mittauskerroilla alhaisempi kuin välitai latvatukkien saheiden kosteus, erityisesti pintapuussa. Sydänpuun pintaosan kosteus oli jonkin verran alhaisempi kuin pintapuun sisäosan ja sydänpuun kosteus. Kosteuden aleneminen oli pintapuussa hieman nopeampaa kuin sydänpuussa. Saheissa ei havaittu mittausten yhteydessä poikkeuksellisen suurta halkeilua tai kieroutumista. Pintapuolella oli kuitenkin jo ensimmäisen mittauksen aikaan jonkin verran käyttöä haittaavia ohuita pintahalkeamia, jotka pahenivat mittauskertojen välillä. Sinistymää ja hometta oli muutamissa saheissa, pääosin pintapuuosassa ja erityisesti aivan pintakerroksessa.

2 Lehtikuusen kuivaus

Joensuun yliopiston metsätieteellisen tiedekunnan osatutkimuksissa ensisijaisena tarkoituksena oli selvittää lehtikuusen kuivumista lämminilma- ja alipainekuivauksessa. Lisäksi selvitettiin, miten lehtikuusen varastointi ulkona läpisaheina sekä tukkeina vaikuttaa kuivaustulokseen. Kokeissa tuotettua empiiristä lehtikuusen kuivausaineistoa käytettiin vertailuaineistona VTT:n Laatukamari –kuivaussimulaattoriohjelman kalibroinnissa lehtikuuselle sopivaksi. Tutkimuksessa verrattiin saheiden kosteuspitoisuutta, halkeamia ja muodon- ja värinmuutoksia kaikkiaan kahdeksan kuivauserän välillä. Normaaleja lämminilma- ja alipainekuivauseriä oli kumpiakin kolme. Mukana oli myös kaksi lämminilmakuivauserää, joista toisen saheita oli varastoitu tuoreena vuosi ennen kuivausta ja toisessa raaka-ainetta oli varastoitu vuosi tukkeina ennen sahausta ja kuivausta. Osatutkimuksen tavoitteet toteutuivat suunnitellusti sekä määrän että laadun suhteen.

Tutkimusmateriaali koostui Metsäntutkimuslaitoksen Puhoksen tutkimusalueesta talvella 1997-1998 kaadetuista siperianlehtikuusista. Rungot katkottiin tukeiksi, joista osaa varastoitiin sahalla kuoripäällisenä ulkona ja osa sahattiin heti kaadon jälkeen. Jokaisesta tukista läpisahattiin kuoripäällisenä neljä 50 mm paksua sahetta. Sahauksen jälkeen saheet niputettiin ja käärittiin muoviin kuivumisen estämiseksi. Ennen kuivausta nippuja säilytettiin kylmähuoneessa, jonka lämpötila oli 5-7 °C ja suhteellinen kosteus 70-80 %. Vuoden varastoitujen tukkien ja saheiden varastointi tapahtui ulkona. Loppukosteudet vaihtelivat eri kuivausten välillä varsin paljon. Kaikissa alipainekuivauksissa jäätiin aivan liian kauas tavoitellusta loppukosteudesta. Myös aineistojen kuiva-tuoretiheydet poikkesivat toisistaan huomattavasti. Kosteusgradienttien perusteella kaikkein tasaisimmin olivat kuivu-

neet erät, joiden raaka-ainetta oli varastoitu yli vuosi. Yhden alipainekuivauserän sisäosien kosteudet jäivät huomattavan korkealle tasolle. Sisä- ja pintaosista otettujen koepalojen kosteuserot olivat kaikkien kuivausten sisällä merkitseviä. Kuivauserien välillä ei ollut eroja kaikissa tapauksissa.

Pintahalkeilua ilmeni vähiten yhden vuoden tukkeina varastoidussa erässä. Halkeilun suhteen paras kuivauslaatu saatiin toisella alipainekuivauserällä, tämä erä osoittautui myös muodonmuutosten suhteen parhaaksi. On kuitenkin huomattava, että etenkin sydänlappeen halkeilu johtuu lähinnä puun anisotrooppisuudesta eikä niinkään kuivausolosuhteista. Ulkona yhden vuoden varastoidut saheet olivat haljenneet jo ennen kuivausta. Ulkokuivauksessa kuivausolosuhteet ovat hallitsemattomia, ja sateisesta kesästä huolimatta halkeamia syntyi paljon. Koneellisesti kuivattujen erien välillä halkeiluerot olivat vähäisiä. Tietyistä puuyksilöistä sahatut saheet halkesivat kaikissa kuivauksissa. Höyläyksen jälkeen väriltään kirkkaimpina säilyivät yhden alipainekuivauserän saheet. Värierot höyläyksen jälkeen olivat kuitenkin erittäin pieniä.

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osatutkimuksen tavoitteina oli mallintaa siperianlehtikuusen kuivuminen LAATUKAMARI-simulointiohjelmalla sekä laatia kuivauskaavasuositukset tutkitulle lehtikuusilajille. Sopivien parametrien löytämiseksi LAATUKAMARI-simulointiohjelmalle tehtiin 2 koekuivausta 50 mm * 150 mm lehtikuusisahatavaralla. Kokeissa määritettiin saheiden keskikosteus ja kosteusgradientti neljänä eri ajankohtana. Ensimmäinen ryhmä kuivattiin lämpötilassa 50 °C ja toinen 70 °C. Kuivauskaavat valittiin sellaisiksi, että halkeilua esiintyisi mahdollisimman vähän. Apuna kaavan teossa käytettiin kirjallisuutta ja LAATUKAMARI-simulointiohjelmaa, jonka lähtöarvoina käytettiin männyn parametreja sekä mitattuja lehtikuusen alkukosteuksia ja tiheyksiä.

Saatujen mittaustulosten perusteella etsittiin LAATUKAMARI-simulointimallille uudet parametrit, joita käytettäessä malli mahdollisimman hyvin simuloi toteutuneita kuivauksia. Mallissa on yhteensä kuusi puun sisäistä kosteuden liikkumista ja veden haihtumista puun pinnalta kuvaavaa optimoitavaa parametria. Optimiarvojen määrittämistä varten tehtiin erillinen laskentaohjelma, joka etsii sellaisten parametriarvojen yhdistelmän, jolla simulointimallin laskema kosteuden kehitys kuivauksen aikana poikkeaa mahdollisimman vähän toteutuneista kuivauksista.

Uusien parametrien avulla simulointimallilla on mahdollista ennustaa lehtikuusen kuivuminen kohtuullisen tarkasti, kun puun alkukosteus ja tiheys tunnetaan. Simulointiohjelman saattaminen lehtikuusen osalta yhtä tarkaksi kuin männyllä ja kuusella edellyttäisi lisää kuivauskokeita. Erityisen käyttökelpoinen kehitetty LAATUKAMARI-versio on lehtikuusen kuivauskaavojen kehittämisessä, kun halutaan minimoida halkeilua.

3 Lehtikuusen liimaus

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osatutkimuksen tavoitteena oli selvittää mahdollisimman monipuolisesti lehtikuusen liimausta. Onnistunut ja kestävä liimaus on eräs keskeinen edellytys puumateriaalin laajamittaiselle käytölle. Tavallisten suomalaisten puulajien, kuten männyn, kuusen ja koivun, liimaus onnistuu yleensä hyvin ja liimasaumat ovat kestäviä, kun on valittu oikea liima oikeaan paikkaan ja liimaus tehdään hallitusti oikein. Lehtikuusi poikkeaa monin tavoin tavallisista suomalaisista puulajeista: lehtikuusen tiheys on usein korkeampi, uuteainekoostumus on erilainen, puun läpäisevyys on pienempi ja muodonmuutokset kosteusvaihteluiden seurauksena ovat suuremmat.

Osatutkimuksessa tehtiin liimauskokeita eri tavoin kuivatuilla lehtikuusikappaleilla kolmella eri liimatyypillä. Suurin osa kokeista oli lehtikuusi-lehtikuusiliimauksia, mutta tutkimuksessa tehtiin myös muutama lehtikuusi-haapaliimauskoe. Kosteusvaihteluiden vaikutusta lehtikuusesta valmistetun liimalevyn lujuusominaisuuksiin ja muodonmuutoksiin selvitettiin tutkimalla D3-liimattua lehtikuusilevyä sekä vastaavasti männystä tehtyä liimalevyä.

PVAc- ja RF-liimalla saatiin hyvät liimasauman lujuudet. Lehtikuusen kuivaustapa ei vaikuttanut liimasauman laatuun. Liimattavat kappaleet liimattiin vastakkain siten, että kappaleiden syysuunta liimasaumassa oli noin 45°. Kokeissa tehtiin yksi liimaussarja, jossa liimattiin yhteen tangentin ja säteen suuntaiset pinnat. Syysuunnalla ei ollut vaikutusta liimaustuloksiin, vaan tuloksena saatiin yhtä hyvä liimasauman laatu kuin samansuuntaisia pintoja liimattaessa. Murtuminen liimasaumassa tapahtui kaikissa liimauksissa puusta (korkeat puustamurtuma-arvot), joten itse liimasauman voidaan todeta olevan lujemman kuin puu.

RF-liimalla tehdyissä lehtikuusiliimauksissa delaminoitumisprosentti oli pääsääntöisesti alhainen, yleensä alle 5 %. Lehtikuusen liimauskokeissa haapapuun kanssa saatiin hyvät liimasauman lujuus- ja puustamurtuma-arvot. Liimasaumojen delaminoitumista ei tapahtunut.

Mikroskooppisen tarkastelun perusteella näyttää siltä, että liima tunkeutuu liimattaviin lehtikuusipintoihin hyvin, vaikka lehtikuusen uuteainekoostumus on erilainen kuin perinteisillä kotimaisilla puulajeilla, jolloin hyvä liimaustulos voi edellyttää puristusajan pidentämistä.

Lehtikuusi elää voimakkaasti ympäröivän ilman kosteuden vaihdellessa. Koska puun eläminen eri suuntiin on erilaista, lehtikuusta liimattaessa on erityisesti otettava huomioon minkä suuntaisia pintoja liimataan keskenään.

4 Lehtikuusen pintakäsittely

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osatutkimuksen tavoitteena oli määrittää lehtikuusen säänkesto- ja kosteusläpäisevyysominaisuuksia. Pintakäsitellyn puun säänkesto riippuu pintakäsittelyaineiden ja puualustan ominaisuuksista. Pintakäsittelyaineen peittokyky, tiiveys ja joustavuus samoin kuin puualustan kosteusomi-

naisuudet vaikuttavat ulkoisten tekijöiden, kuten auringonvalon, lämpötilan ja kosteusvaihteluiden aiheuttamiin muutoksiin. Puun tiiveys ja kemialliset ominaisuudet vaikuttavat kosteuselämiseen ja varsinkin kosteutta nopeasti läpäisevillä pintakäsittelyaineilla on edullista käyttää vettähylkivää maalausalustaa. Männyllä sydänpuu halkeilee pintakäsiteltynä säärasituksessa vähemmän kuin pintapuu.

Pintakäsittelyaineiksi valittiin kolme tuotetta, joita käytetään mm. puutarhakalusteissa ja aitarakenteissa. Pintakäsiteltyjen lehtikuusikappaleiden säänkesto testattiin prEN 927-3 mukaisella ulkotestillä ja veden- ja vesihöyrynläpäisevyydet prEN 927-4 ja 5 mukaisilla koetuksilla. Säänkestokoe oli hankkeessa hyvin lyhytaikainen, mutta koe on edelleen käynnissä. Pinnoitettujen lehtikuusi- ja mäntylautojen säärasitus alkoi keväällä 1999 ja kuusi kuukautta kestänyt testijakso oli poikkeuksellisen vähäsateinen.

Mitä läpäisevämpää pintakäsittelyainetta käytettiin, sitä enemmän puualustan ominaisuudet vaikuttivat vedenläpäisevyyteen. Tiivis pinnoite esti veden tunkeutumista sekä lehtikuusi- että mäntylautoihin, mutta läpäisevillä pinnoitteilla maalatuissa tai pinnoittamattomissa kappaleissa puulajin merkitys korostui: lehtikuuseen imeytyi vähemmän vettä kuin mäntyyn. Puuöljy esti vain vähän vesihöyryn imeytymistä myös männyllä, vaikka siihen imeytyi öljyä huomattavasti enemmän kuin lehtikuuseen.

Kappaleiden säänkestoon vaikutti eniten pintakäsittelyaine. Pintakäsittelyaineen kosteudenläpäisy selitti osittain koelautojen halkeilun säärasituksessa eli tiivein pinnoite suojasi tehokkaimmin halkeilulta. Puulajilla ei ollut vaikutusta halkeiluun, vaikka läpäisevyystesteissä lehtikuuseen ei imeytynyt vettä yhtä paljon kuin mäntyyn. Sahaussuunnalla oli merkittävä vaikutus kappaleiden halkeiluun, kun pinnoite oli läpäisevä: tangentiaalisesti sahatut kappaleet halkeilivat huomattavasti enemmän kuin radiaalisesti sahatut. Ulkotestiin pyrittiin valitsemaan radiaalisesti sahatut laudat, mutta pienen koeaineiston vuoksi osa koekappaleista oli tangentiaalisesti sahattuja.

Pintakäsittelyainetta valittaessa on mietittävä käyttökohteen vaatimukset samoin kuin huoltotoimenpiteiden helppous. Jos puumateriaali tulee esim. puutarhahuonekaluihin, kalvoa muodostavaa pintakäsittelyainetta ei voida suositella, elleivät huonekalut ole suojassa esim. katoksen alla. Suositus perustuu Lahontorjuntayhdistys ry.:n (LTY) laajoihin puutarhatuolitesteihin, joissa kalvoamuodostavat maalit hilseilivät varsinkin istuinosasta. Tällaisten tuolien huoltomaalaus on hankalaa, koska kaikki irtoava maalipinta pitää poistaa. Paras käsittely on tunkeutuva vettähylkivä käsittely, joka uusitaan vuosittain. Kalvoa muodostavat käsittelyt voivat sopia aitoihin, jos vesi ei pääse tunkeutumaan puun sisään esim. avonaisista päiden pinnoista. Vesi haihtuessaan maalikalvon läpi voi aiheuttaa maalipinnan kuplimista, hilseilyä tai puun halkeilua.

5 Lehtikuusen haihtuvat orgaaniset yhdisteet

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osatutkimuksen tavoitteena oli tutkia lehtikuusesta haihtuvia orgaanisia yhdisteitä ja niiden merkitystä lehtikuusen käytölle. Puumateriaalin käyttöön sisätiloissa vaikuttaa olennaisesti puusta haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) määrä ja koostumus. Tällä hetkellä sisäilmaan rajoittuvat pintamateriaalit (ML 95) on luokiteltu sisäilmastoluokituksessa (SIY 1995) kolmeen luokkaan: M1, M2 ja M3. Parhaaseen eli M1-luokkaan kuuluvat emissiotestatut materiaalit sekä sellaiset materiaalit kuten tiili, luonnonkivi, lasi, metallit sekä lauta ja hirsi (kotimaiset puulajit). Runsaspäästöisten materiaalien käyttöä on sisäilmastoluokituksen mukaan rajoitettava pyrittäessä mahdollisimman hyvään lopputulokseen. Puun osalta keittiövälineissä on entuudestaan käytetty ensisijassa vähän emittoivia puulajeja (haapa, koivu). Lehtikuusesta on tässä suhteessa hyvin vähän tietoa.

Tässä katsottiin tarpeelliseksi selvittää lehtikuusesta mahdollisesti haihtuvien aineiden määrä ja laatu sekä eri kuivausprosessien vaikutus emissioon. Tarkoituksena ei ollut hyväksyttää lehtikuusta sisäilmaluokitukseen vaan selvittää puusta haihtuvat aineet sekä niiden merkitystä mahdollisia eri käyttökohteita ajatellen.

Näytteitä otettiin sekä tuoreesta männystä, kuusesta ja lehtikuusesta että eri tavoin kuivatusta lehtikuusesta. Eri kuivauseristä otettiin näytteet samanaikaisesti, joten kuivauksen ja näytteenoton välinen aika vaihteli. Puumateriaalit jauhettiin VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa. Sen jälkeen materiaalit toimitettiin analysoitavaksi VTT Kemiantekniikkaan. Näytteet analysoitiin kaasukromatografisesti käyttäen näytteensyöttöön termodesorptiotekniikkaa. Analyysilämpötilat olivat 50, 100, 150 ja 200 °C. Analysointiin käytetty kaasukromatografi on varustettu liekki-ionisaatio-detektorilla (FID) ja massaselektiivisellä detektorilla (MSD). Menetelmän määritysherkkyys yksittäisten haihtuvien orgaanisten yhdisteiden eli VOC-yhdisteiden suhteen on 1 $\mu g/m^3$. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaismäärä, TVOC, laskettiin FID-kromatogrammin kokonaispinta-alasta tolueenin vastetekijän avulla.

Tuoreesta lehtikuusesta haihtuvien yhdisteiden määrä ja koostumus poikkesivat olennaisesti vastaavista männyn ja kuusen arvoista. Lehtikuusen puumateriaalissa oli mäntyyn verrattuna suhteellisen vähän haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC). Etenkin terpeenien määrä oli lehtikuusella pienempi, mutta lehtikuusesta vapautui etikkahappoa, mitä ei männyssä ja kuusessa ilmennyt lainkaan. Etikkahappo voi osaltaan vaikuttaa mahdollisiin puusta johtuvaan metallien korroosioon tai naulojen ruostumiseen. Lehtikuusimateriaalien välillä saattaa olla eroja mm. alkuperästä, rungosta, sijainnista rungosta, puun iästä, mittausajankohdasta sekä tuotantoprosesseista riippuen. Vaihtelua ei kuitenkaan analysoitu tarkemmin.

Alimmassa testauslämpötilassa (50 °C) lehtikuusesta haihtui hyvin vähän aineita. Tämäkin lämpötila on normaaleja sisätilan lämpötiloja korkeampi. Vain sahatavaran kuivaamossa tai auringon paisteelle altistuvilla pinnoilla esiintyy vastaavia arvoja, joten tutkimuslämpötilassa saatuja tuloksia ei voida suoraan verrata

käyttötilanteisiin eikä sisäilmaluokituksen perusteena olevien TVOC-mittausten tuloksiin, koska menetelmä on erilainen.

Kuivaustapa vaikutti jonkin verran siihen, miten paljon ja minkälaisia aineita puusta haihtui kuivauksen jälkeen, mutta se ei kuitenkaan vaikuttanut kovin merkittävästi puun uuteainekoostumukseen. Keskimäärin kuivatusta puusta haihtui vähemmän orgaanisia aineita kuin tuoreesta puusta.

6 Lehtikuusen käyttäjien kokemukset

Metsäntutkimuslaitoksen Joensuun tutkimuskeskuksen osatutkimuksessa kartoitettiin käyttäjien eli Puuseppämestarit ry:n jäsenten ja Vankeinhoitolaitoksen hankkeen aikana saamia kokemuksia lehtikuusesta materiaalina sekä tuotteiden valmistusprosessien eri vaiheissa ilmenneitä erityispiirteitä ja ongelmia.

Puuseppämestarit ry:n jäsenet tekivät lehtikuusella hyvin erilaisia kokeiluja: päreitä (= paksua viilua), huonekaluja, ovia, ikkunanpuitteita, marjapensaiden kehikoita, kosteiden tilojen lattiaralleja, pikkupaneelia, käyttöesineitä. Pääpaino johtopäätöksissä oli lehtikuusen työstettävyydessä: miten lehtikuusi soveltuu mäntyyn verrattuna. Vertailuun vaikuttavat hyvin monet tekijät: aihion sahaussuunnat, työstötapa ja työstössä käytettävät teräkulmat, puun kosteus sekä sen vaihtelu, puun solurakenteen ja kovuuden vaihtelut, puun tikkuisuus ja halkeamat, kosteuden muutoksesta johtuvat muodonmuutokset, puun oksaisuus ja oksien vaikutus työstöön, puun pihkaisuus jne.

Yleinen havainto oli, että mitä kuivempi puu on, sitä vaikeampaa sitä on työstää. Kriittistä kosteutta lehtikuusen työstölle ei voida määritellä nykytiedoilla. Ohut, 25 mm:n lehtikuusitavara on helpompaa työstää kuin paksu, 50 mm:n tavara, mihin syynä on ilmeisesti erilainen kappaleen sisäinen kosteusgradientti.

Työstettävyyteen ja käyttöön liittyvistä taustatekijöistä olivat keskeisiä kuivausvirheet, pahimpana halkeilu käyttöä rajoittavana ja materiaalihukkaa aiheuttavana tekijänä. Etenkin aluksi ilmakuivatussa 50 mm:n ja sitä paksummassa tavarassa esiintyi ytimen ympärillä, lankkujen päissä ja pinnanpuoleisella lapepinnalla niin paljon halkeamia, että puutavara oli puusepänkäyttöä ajatellen lähes käyttökelvotonta. Tilanne ei ollut läheskään yhtä huono ohuella sahatavaralla (26-34 mm). Kuivaustavalla (alipaine- tai lämminilmakuivaus) ei näyttänyt olevan suurta vaikutusta halkeiluun ja muihin kuivausvirheisiin. Sen sijaan lankun leikkuupinnan suunnalla oli ratkaisevan suuri vaikutus syntyneiden halkeamien määrään. Halkeilua esiintyi runsaasti tangentiaalisessa leikkauspinnassa, josta syystä puunhukka oli jatkovalmistuksessa jopa 60-70 %. Säteen suuntaiset pinnat olivat sen sijaan lähes virheettömiä, halkeilun aiheuttama hukka oli tällöin 5 %. Huomiota kiinnitettiin myös säteensuuntaisiin sydänhalkeamiin, jotka eivät mene ytimen kautta ja suuntautuvat paikasta toiseen säteensuunnassa. Sahatavaran halkeamat aiheuttivat hyvin suuren leveyshukan puusepäntöissä, keskimäärin 34 % (5-70 %).

Epätasainen loppukosteus osoittautui hankalaksi ongelmaksi. Vaikka sahatavaran piti olla riittävän kuivaa puusepänkäyttöä ajatellen, aihioiksi työstettyihin kappaleisiin syntyi kieroutumista ja vääntymistä niin paljon, että aihioiden oli

ensimmäisen vaiheen työstämisen jälkeen annettava tasaantua pitkähkön ajan ja ne oli työstettävä tämän jälkeen uudelleen. Tämän arveltiin johtuvan puutavaraan jääneiden kosteiden alueiden kuivumisesta alkutyöstön jälkeen. Puutavaran kuivauksessa syntyneillä jännityksillä oli kieroutumiseen ja mutkaisuuteen oma merkityksensä. Kuivauksen aiheuttama lankkujen kupertuminen (kovertuminen) oli huomattavan suurta. Tämän arveltiin johtuvan lehtikuusen säteen- ja tangentinsuuntaisen kutistumisen poikkeuksellisen suuresta erosta. Tätä muodonmuutosta eivät käyttäjät kuitenkaan pitäneet kovin suurena ongelmana, sillä halkaisemalla kupertunut lankku keskeltä saatiin siitä kaksi lähes suoraa puolikasta.

Osa lehtikuusimateriaalista oli varsin vähäoksaista ja siitä saatiin helposti oksattomia osia pienikokoisiin puutuotteisiin. Tavarassa oli toisaalta suuria rungon sisään kylestyneitä pystyoksia, jotka vaikeuttivat pitkien kappaleiden valmistamista. Oksakohdat olivat usein niin laajoja, että niitä ei voitu jättää valmistettavaan tuotteeseen vaan oksat piti poistaa katkaisemalla sahe oksien kohdalta. Kuivatussa sahatavarassa ei ollut juuri lainkaan ehjiä terveitä oksia, sillä terveetkin oksat olivat halkeilleet kuivuessaan. Oksaryhmien kohdalla puussa oli tavallisesti myös mutka pituuden suunnassa.

Lehtikuusessa on niin paljon pihkaa, että se on otettava huomioon puuta työstettäessä. Pahimmillaan pihkaa tihkuu kaikista puun leikkauspinnoista pieninä rakkuloina ja sitä esiintyy myös suurina pihkataskuina. Rungoilla ja rungon eri osilla näyttäisi olevan tässä suhteessa suuriakin eroja.

Etenkin keinokuivatun lehtikuusen sahepinnassa olevat tikut ovat niin pistävän teräviä, että puutavaraa on lähes mahdoton käsitellä saamatta tikkuja sormiinsa. Tämä ominaisuus on niin kiusallinen, että se vaatii käsineiden käyttämistä työstäjältä. Käsineet voivat toisaalta hankaloittaa työskentelyä, koska paljain käsin työskennellessä syntyvä tuntuma puuhun heikkenee. Sama tikkuongelma tulee esiin myös höylätyssä ja hiotussa pinnassa, kun puun syyt irtaantuvat ja nousevat pystyyn etenkin muotojen kulmakohdissa. Tikkuuntuminen on vain esiaste sitä voimakkaammalle ilmiölle, jossa lustopintojen voi joskus huomata irtautuvan toisistaan. Joissakin työstötilanteissa saattoivat etenkin ydintä lähellä olevat sydänpuun lustot irrota niin, että - kuten eräs käyttäjä kertoi - puun pystyisi vaikka purkamaan lustorajoja pitkin.

Lehtikuusen paksu kilpikaarna on sitkeää ja hyvin koossa pysyvää. Se on lisäksi kiinnittynyt erittäin lujasti puun pintaan, eikä irtoa siitä kuivauksenkaan aikana. Kaarnaa voidaan työstää joko sellaisenaan tai siten, että kaarnapintaa jää puutuotteeseen puumateriaalin lisäksi. Ominaisuutta voitaisiin hyödyntää esim. pienesineiden suunnittelussa ja valmistuksessa.

Lehtikuusen kevät- ja kesäpuu eroavat erittäin paljon kovuudessa. Sen lisäksi oksat ovat huomattavasti muuta puuainesta kovempia. Tämä aiheuttaa työstettävyyteen erityisvaatimuksia, joita ei välttämättä pystytä ratkaisemaan tavanomaisia työvälineitä, teriä ja teräaineita käytettäessä. Käyttäjiltä tulleen palautteen perusteella kovuuseroista johtuviin ongelmiin on löydettävissä ratkaisuja esim. teräkulmia muuttamalla.

Jos on syyrakenne ongelma työstössä, on se myös erikoispiirre, joka antaa lehtikuusituotteelle ilmettä. Voimakasta syykuviota voidaan käyttää tehokeinona

tuotesuunnittelussa. Sopivan pintakäsittelyn avulla syykuvion selkeyttä voidaan entisestään voimistaa.

Sahattaessa lehtikuusta vannesahalla syiden suuntaan terä kulkeutuu helposti syiden mukaisesti ja haluttua sahauslinjaa on vaikea säilyttää. Tämä on ilmeistä erityisesti silloin, kun sahataan kapealla ja vähänkin tylsällä terällä. Pyörösahalla sahattaessa halkisahaus onnistuu kuten männyllä. Katkaisusahauksessa taustavasteiden on oltava erittäin hyväkuntoisia, jotta leikkuupinta ei repeilisi.
Lehtikuusipuu repeilee herkästi oksakohtien läheisyydessä, erityisesti syidenvastaiseen suuntaan höylättäessä. Erityisen hankalia ovat kovat kuolleet mutta myös terveet oksat. Höylättäessä vähänkin tylsillä terillä lustot irtoavat tangentiaalisessa leikkauspinnassa aiheuttaen pinnan tikkuuntumista. Säteittäisessä leikkauspinnassa höyläämineri onnistuu lehtikuusella yhtä hyvin kuin männyllä. Jyrsittäessä lehtikuusipuuhun syiden suuntaisia muotoja lustot saattavat irtaantua lohkeamalla jyrsinterän edessä pitkinä tikkuina. Pieni syöttönopeus vähentää tikkuuntumista, mutta samalla palolaikkujen syntymisen riski kasvaa. Syiden poikkisuuntaan jyrsittäessä ongelmana on kevät- ja kesäpuun suuri kovuusero. Tästä syystä jyrsintäjäljestä tulee karkea ja pienet tarkat muodot murtuvat lustorajoja pitkin.

Lehtikuusipuun hiominen on erityisen hankalaa korkean pihkapitoisuuden vuoksi. Hiomanauhat tukkeutuvat paljon nopeammin kuin ne ehtivät tylsyä. Jos yritetään hioa tukkeutuneella nauhalla, joudutaan käyttämään tavallista suurempaa puristuspainetta. Tämä aiheuttaa pehmeämmän kevätpuuvyöhykkeen kulumisen kesäpuuta syvemmälle ja siis epätasaisen pinnan. Liian tylsät hiomanauhat aiheuttavat palolaikkuja etenkin sahatavaran päissä.

Etenkin pienten reikien poraaminen sahatavaran päihin on lehtikuusella vaikeaa, sillä syyt ohjaavat poran kulkua. Lapepinnalle porattaessa reiän reunat nousevat ylös leikkautumatta, jos terässä ei ole kunnollisia syyt katkaisevia sivuleikkuusärmiä. Lehtikuusi vaatii erittäin terävät taltat. Siitä huolimatta puun syyt pyrkivät painumaan kasaan huomattavasti enemmän kuin männyllä. Taltan teroituskulman pienentäminen tasolle 22-25° parantaa lopputulosta, mutta terän särmä voi tällöin vaurioitua ja työstäminen hidastuu ja vaikeutuu.

Lehtikuusipuuta on sorvattu hyvin monenlaisilla taltoilla, eri syysuuntiin, eri pyörimisnopeuksilla, erilaisia muotoja tehden, jne. Täten sorvattavuusominaisuuksien tutkimiseksi tarvittaisiin erityisesti määritelty tehtävä ja toteuttamistapa. Useat tähän tutkimukseen osallistuneet puusepät kokeilivat sorvaamista ja tekivät sen yhteydessä samoja havaintoja kuin mitä on tullut esiin muiden työstötapojen yhteydessä. Sorvaamisessa jokaisella puusepällä oli myös eniten mahdollisuuksia varioida työstötapahtumaa. Tässä jotkut onnistuivat mutta toiset eivät onnistuneet ratkaisemaan esiin tulleita ongelmia. Onnistuneista sorvausratkaisuista voitaisiin löytää enemmänkin ratkaisuja lehtikuusen työstöongelmiin.

Lehtikuusen sopivuutta koristeveisto- ja yleensä veistopuuksi kokeili yksi koristeveiston huippuammattilainen. Edellämainitut työstettävyysominaisuudet tulevat erityisen korostuneesti esille lehtikuusen veistotyössä. Kova kesäpuu ja kovat oksat aiheuttavat vaurioita huipputeräville veistoraudoille, kevät- ja kesäpuun kovuusero aiheuttaa lohkeilua ja syiden irtaantumista, jne. Lehtikuusen puuaines on sitä kovempaa ja vaikeampaa veistää, mitä kuivempaa se on. Veiston

kannalta sopivimpana kosteutena voidaan pitää tasoa 15-17 %. Tällöin on kuitenkin riski valmiin veistoksen halkeilemisesta puun jatkaessa kuivumistaan veistotyön jälkeen. Lehtikuusen voimakasta syykuviota voidaan puuveistoksissa käyttää hyödyksi erityisesti suurissa pinnoissa.

Nauloja ja ruuveja asennettaessa havaittiin, että niitä varten kannattaa porata alkureiät. Lisäksi pinnoittamattomat kuten myös kuumasinkityt naulat ja ruuvit tummensivat ulko-olosuhteissa puuaineksen läheisyydestään varsin nopeasti. Oletettavasti lehtikuusessa oleva etikkahappo aiheuttaa tämän korroosioilmiön. Liimaliitosten tekeminen tavanomaisia PVAc-liimoja käyttäen onnistui lehtikuusella männyn tapaan. Puristusaikaa tarvittiin lehtikuusen liimauksessa kuitenkin enemmän kuin männyn liimauksessa. Pintakäsittelyt luonnonöljyillä tuntuivat onnistuvan erittäin hyvin. Lakkaamisessa tarvittiin yksi ylimääräinen lakkauskerta pinnan tasaamiseksi, koska lehtikuusen kevät- ja kesäpuu imevät eri tavoin lakkaa.

Vankeinhoitolaitoksen eli Vahon kokeissa tulokset olivat pitkälti samanlaiset kuin puuseppien kokeissa. Tässä hankkeessa mukana olleet Sukevan keskusvankila ja Juuan avovankilaosasto ovat vuosia valmistaneet kotimaisesta raaka-aineesta puutarhakalusteita, jotka on painekyllästetty kestämään ilmastorasituksia ja muita maaperän kosteusolosuhteita. Tähän asti on tunnistettu ilman tutkimuksia, asiantuntijoiden omien arvioiden perusteella lehtikuusen luontaiset ominaisuudet kestää ilmastorasituksia vaativissa puusepänteollisuuden kohteissa kuten ulkorakenteissa ja muissa kosteudelle alttiissa paikoissa. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli todentaa tulosten kautta edellä kuvatut lehtikuusen ominaisuudet sekä saada ajankohtaista ja entistä parempaa tietoa vankiloiden puusepäntuotannon käyttöön mm. lehtikuusen kuivauskaavoista lämminilma-, lauhde- ja alipainekuivaamoissa sekä materiaalin työstettävyys- ja liimausominaisuuksista ja pintakäsittelymenetelmistä.

Sukevalla käytetty lehtikuusisahatavara oli Puukeskus Oy:n toimittamaa ulkokuivaa 50 mm * 150 mm siperianlehtikuusta, jota oli ulkovarastoitu 3 kk. Saheista tehtiin kosteusmittauksia ennen ja jälkeen kuivauksen sekä määritettiin kuivamitat ja kuivausvirheet. Ennen kuivausta lehtikuusiraaka-aine näytti hyvältä nipussa. Kuivauksen jälkeen lankut halkeilivat voimakkaasti. Halkeamia oli noin puolessa tavaran määrästä. Halkeamat kulkivat vinottain lankun pituussuunnassa. Halkeamien syvyys oli 5-15 mm ja pituus pääasiassa 300-500 mm. Oksat olivat osittain irti helmioksia lukuunottamatta. Lehtikuusi on materiaalina ongelmallisempi ja vaikeampi työstää kuin mänty ja kuusi. Lehtikuusen työstö vaatii tavallista terävämmät terät, joten teriä on myös vaihdettava tavallista useammin. Työstö onnistui kuitenkin suhteellisen hyvin CNC-työstökeskuksella. Pintakäsittely puuöljyllä tekee kappaleista liukkaita ja niput hajoavat helposti kuormalavalla kuljetettaessa. Puuöljy kuivuu hitaasti. Suurissa sarjoissa pintakäsittelystä tulee ongelmia kuivumisen ohella. Oksaton lehtikuusi on ulkonäöltään kaunispiirteistä. Raaka-aineen pitäisi olla kuitenkin lähes oksatonta ja kuivauksen onnistua hyvin, jotta lopputuote olisi virheetön. Laadunvalvonnassa on käytettävä tiukempaa kontrollia kuin nyt tehdyssä sarjassa. Muussa tapauksessa laatu muodostuu alhaiseksi oksaisuuden ja halkeamien vuoksi ja reklamaatioita tulee usein.

Juuassa käytetty sahatavara oli Niiralan raja-asemalla toimivan yksityisen välittäjän Venäjältä tuomaa lautatarhakuivattua siperianlehtikuusta. Sahatavara

kuivattiin ns. pitkän kaavan ohjelmalla, jossa alkulämpötila oli useamman vuorokauden ajan 25 °C. Kosteuden alentuessa alle 30 prosenttiin pinnan nopea kuivuminen aiheutti paksussa, 50 mm:n tavarassa runsaasti pinnansuuntaista hiushalkeilua ja jonkin verran myös syviä halkeamia. Lautatavaran (paksuus 25 mm) kuivauksessa ei juuri ilmennyt ongelmia. Kuivausaika oli lehtikuusella pitkä, jopa kolme viikkoa. Lehtikuusisahatavaran annettiin tasaantua kuivauksen jälkeen varastohallin normaalilämpötilassa rimoitusvaunuissa mahdollisten vesitaskujen poistamiseksi, jolloin kosteus tasaantui tasolle 6-8 %. Lehtikuusen puuaine on tavallista kovempaa ja työstöterät tylsyvät lehtikuusisahatavaraa työstettäessä nopeammin kuin mänty- tai koivusahatavaraa työstettäessä. Puutarhakalusteiden valmistuksessa käytetään kolmen vuoden kokemuksen perusteella ruuvi- ja PVAc-liimaliitoksia. Ruuveille on tehtävä alkureiitys, jotta voidaan välttää halkeamat ruuvien sijaitessa lähellä kappaleiden reunoja. Pihakalusteiden istuinosien rimat kiinnitetään sekä ruuvi- että liimaliitoksin, jolloin liitoksen kiinnipysyminen on varmempaa kuin pelkkiä ruuveja käytettäessä. Lehtikuusiliimalevystä on valmistettu pöytätasoja sisäpirttikalusteisiin hyvin kokemuksin niin työstön, liimauksen, ulkonäön kuin asiakaspalautteen suhteen. Pintakäsittely tehtiin aluksi Tikkurilan puuöljyllä, joka siveltiin puupintaan käsisiveltimellä. Tällöin kaluston pinta harmaantui muutaman vuoden ulkokäytössä. Tämän vuoksi siirryttiin maalinvalmistajan ohjeen mukaan käyttämään Valtti-pohjustetta ja sen päällä kovapuuöljyä. Tämän on todettu parantavan kaluston säänkestävyyttä ja alkuperäisen värin näkyvyyttä.

Lehtikuuselan Ky:n mukaan Venäjältä saatavan tuoreen lehtikuusisahatavaran hinta on rajalla n. 2000 mk/m^3; tämä pitää sisällään kaikenlaista laatua. *Puukeskus Oy* on lopettanut lehtikuusisahatavaran tuonnin Venäjältä kysynnän puutteen vuoksi. Pieniä tuojia on silti toiminnassa muutamia. Johtopäätös on, että Venäjältä lehtikuusi kannattaa tuoda tukkina, jolloin hinta on n. 500 mk/m^3, tukeissa on kuorta peräti 24 % (vrt. kuusi 10 %, mänty 12 %) ja käyttösuhde on sahauksessa n. 3,0. Halvimmalla lehtikuusta saa ostamalla 25 mm:n sahatavaraa Venäjältä, jossa on vähän halkeamia.

7 Tulosten hyödyntäminen ja jatkotutkimusten tarve

Tutkimuksen tulokset hyödyttävät suoranaisesti niitä olemassa olevia ja aloittelevia puusepäntuotteita valmistavia teollisuudenaloja ja yrityksiä, jotka arvioitiin potentiaalisiksi lehtikuusen käyttäjiksi jo hankkeen suunnitteluvaiheessa: ulkokalusteet, ulko- ja leikkipuistorakenteet, kosteiden tilojen pintarakenteet, ikkunat ja ovet sekä pienesineet ja erilaiset keittiötarvikkeet. Hanketta aloitettaessa tiedettiin erityisesti kuivaus, jossain määrin myös pintakäsittely ja haihtuvat orgaaniset yhdisteet ongelmakohdiksi lehtikuusta jalostettaessa. Nimenomaan kuivausta koskevat tulokset ovat välittömästi hyödynnettävissä sekä tuotannollisissa yrityksissä että VTT:n Laatukamari-simulointiohjelman edelleen kehittämisessä lehtikuusen kuivauskaavojen optimointiin.

Lehtikuusi on erikoisraaka-aine, joka sopii erityisen hyvin pieneen ja keskisuureen tuotantoon. Järeän lehtikuusen saatavuus kotimaasta on hyvin rajoitettu, 1000-2000 m^3/a. Säännöllisen tuonnin käynnistäminen Venäjältä avaisi kokonaan uudet mahdollisuudet laajamittaiseenkin tuotantoon. Raaka-aineen laadun säilyttämiseksi se olisi perustelluinta tuoda tukkina, kun taas hintataso puoltaisi tuontia vähäoksaisena lautana tai lankkuna. Harvennuslehtikuusen tarjonta 1960-luvulta lähtien istutettujen lehtikuusikoiden pohjalta tulee kasvamaan. Tämän käytettävyyttä puutuoteteollisuudessa ei tunneta vielä lainkaan.

Lehtikuusela Ky:llä on hankkeessa mukana olleista yrityksistä pisimmät perinteet hyvin erilaisten lehtikuusituotteiden valmistuksessa; lehtikuusta on käytetty vuodesta 1968 lähtien. Käyttökohteita ovat olleet: 1) ulkona käytettävät rakenteet ja kalusteet, 2) rakennusten ikkunat ja ovet, 3) saunan sisustus, lauteet ja lattiat, 4) huoneiden lautalattiat ja sisustus, 5) pöydänkannet ja huonekalut, 6) keittiön työvälineet, 7) elintarvikkeiden kuljetusalustat, 8) rakennusten vesikattolaudat, 9) tsasounan sipulin paanut, 10) räystään ns. potokkapuut, 10) rakennusten harjapuut (harjapelti), 11) nuohoussillat. Yrityksellä oli joulukuussa 1999 14 hyväksyttyä hyödyllisyysmallia lehtikuusen käyttökohteista. Yritys hyötyy erityisesti lehtikuusen kuivausta, liimausta ja haihtuvia orgaanisia yhdisteitä koskevista tuloksista.

Puuseppämestarit ry:n jäsenet saivat kokeilla hankkeen aikana lehtikuusta erilaisiin tuotteisiin ja hankkia ensikäden tietoa ja kokemusta tästä useille puusepille uudesta materiaalista. Heidän piirissään tehdyn kyselyn tulokset ovat välittömästi puuseppien hyödynnettävissä, joskin ne samalla paljastivat uusia aukkoja tiedoissa lehtikuusesta, ennen kaikkea sen työstöstä.

Vankeinhoitolaitos on keskittynyt piha- ja ulkokäyttöön tarkoitettujen kalusteiden kuten myös sisäkäyttöön tarkoitettujen ruokapöytäkalustojen valmistukseen lehtikuusesta. Vankeinhoitolaitos hyötyy erityisesti lehtikuusen kuivausta, liimausta ja pintakäsittelyä koskevista tuloksista.

Lappeenrannan PeTePu Oy valmistaa lehtikuusesta puutarhakalusteita, pihakeinuja ja leikkipaikkavälineitä. Yritys hyötyy erityisesti lehtikuusen liimausta ja pintakäsittelyä koskevista tuloksista.

Puukeskus Oy toi ja markkinoi venäläistä lehtikuusisahatavaraa hankkeen alkaessa, mutta sittemmin tämä toiminta on ollut keskeytyksissä kysynnän puutteen vuoksi. Perusteet mukanaoloon hankkeessa olivat otaksuttu lehtikuusen kysynnän kasvu, vihreiden ympäristöarvojen korostuminen, oikeanlaisen lehtikuusitavaran saannin parantuminen Venäjältä ja halu olla asiassa edelläkävijänä. Nämä perusteet ovat edelleen olemassa, myös muille lehtikuusisahatavaran maahantuojille.

Suomessa lienee kaikkiaan muutama kymmenen lehtikuusta käyttävää yritystä, jotka kaikki ovat pieniä. Tämän hankkeen kestäessä on aloittanut toiminnan kaksi huomattavaa, puutuotealan keskisuureen luokkaan luettavaa yritystä, jotka valmistavat lehtikuusituotteita. *Timberwise Oy* Loimaalla ja *Pariwood Oy* Parikkalassa valmistavat lattiamateriaaleja lehtikuusesta (kolmikerrosliimalevyä). Kumpikin yritys kaavailee käyttävänsä vuodessa useita tuhansia kuutiometrejä lehtikuusta. Nämä kuten myös lähivuosina todennäköisesti syntyvät uudet yritykset ovat potentiaalisia käyttäjiä tämän hankkeen kuten myös mahdollisten jatkohank-

keiden tuloksille. Peruste uusien yritysten syntymiselle on lehtikuusen kasvava kysyntä niin kotimaisten jalostajien piirissä kuin vientimarkkinoilla.

Jatkossa on ensiarvoista selvittää, millainen työstö sopii parhaiten lehtikuusipuulle: 1) rihlapohjainen rautasilityshöylä, hammashöylä, kaavinhöylä, 2) hiiliteräs-, pikateräs-, kovametalliterät, 3) rintakulma (ilmeisesti poikettava selvästi 45 asteesta), 4) teräkulma (kovalle puulle). Kaiken kaikkiaankin puusepäntöissä tarvittaisiin puulajikohtaiset työvälineet. Työstövoima kasvaa selvästi ensimmäisen työstökerran jälkeen eli lehtikuusta ei kannata työstää terävillä terillä; lisäksi puunsyyt ohjaavat työvälineen kulkua. Tarpeellinen jatkotutkimusaihe huonekaluym. tehtaiden tarpeisiin olisi siis teräaineet ja teroituskulmat lehtikuusta työstettäessä. Lisäksi olisi kiinnostavaa todentaa, voidaanko lehtikuusen hyvin kiinni pysyvää kaarnaa hyödyntää koriste-esineissä.

Toinen tärkeä jatkotutkimusaihe on lehtikuusen pintakäsittely. Yksi mahdollisuus on pehmeiden puulajien päällystäminen kovalla puulla, esim. lehtikuusella. Mielenkiintoa olisi myös selvittää pintakäsittelyn merkitystä lehtikuusen kestävyyteen säälle alttiissa kohteissa. Tutkimuksessa käynnistettiin säärasituskoe, jonka tuloksia ei voitu vielä hyödyntää. Mielenkiintoa olisi selvittää myös puun rakenteen ja kemiallisen koostumuksen vaikutusta puun teknisiin ominaisuuksiin.

Muina mahdollisina jatkotutkimusaiheina tulivat esille lehtikuusesta tehtävien kantavien rakenteiden suunnittelu ja lujuusarvot, ikkunoiden valmistus ja tuotevaatimukset sekä lattiarakenteet.

Lehtikuusituotteiden tuotantokustannukset ja kannattavuus eivät kuuluneet lainkaan tämän hankkeen aihepiiriin. Ne ovat olennaisimpia tutkimus- ja kehittämistoiminnan kohteita, mikäli lehtikuusta jalostava yritys haluaa vakavissaan kehittyä ja laajentaa tuotantoaan joko määrällisesti tai uusiin tuotteisiin suuntautumalla. Otollisimmat lehtikuusen tuoteryhmät ovat jatkotutkimusten suunnittelua ajatellen: 1) ulkokalusteet, 2) puusepäntuotteet (ikkunat, ovet), 3) pienesineet.

Pieniläpimittaisen harvennuslehtikuusen käytettävyyttä puutuoteteollisuudessa ei ole tutkittu lehtikuusivaltaisissa maissakaan juuri lainkaan. Tämä on lehtikuusta koskevista tutkimusaiheista ensisijaisia, mikäli kotimaisten lehtikuusivarojen teollista käyttöä ja varsinkin järeän lehtikuusen kasvatusta tulevaisuuden tarpeisiin halutaan edistää.

Tekes ja alueelliset puutuoteteollisuuden rahoitusorganisaatiot rahoittavat lehtikuusta koskevia mahdollisia jatkotutkimuksia sen mukaan, miten niihin on yrityskiinnostusta. Lehtikuusihankkeet eivät ole poissuljettuja, jos yritykset ovat valmiita panostamaan itse asiaan. Muita rahoitusmahdollisuuksia ovat mm. EU Craft, INTERREG, TACIS ja Suomen Akatemia.

KIRJALLISUUS

Alriksson, B.-Å. 1992. Nya nischer för trä. Kunden som hittade rätt. Träskyddsinsitutet: "Lärk inget alternativ". Skogen nr 5: 36-38.

Anuchin, N.P. 1967. Opredelenie ob'emov hlystov i sortimentov. Izdatel'stvo "Lesnaja Promyslennost", Moscow. 183 s. Tiivistelmä Determining the volumes of tree-lengths and assortments. Julkaisussa: Forestry Abstracts 1968 029-04311.

Björkman, E. 1944. Om röthärdigheten hos lärkvirke. Norrlands Skogsvårdförbunds Tidskrift nr 1: 18-45.

Bokschanin, Ju. R. 1982. [Lehtikuusipuun jalostus ja käyttö] Obrabotka i primenenie drevesiny listvennicy. Lesnaja promyslennost. 216 s. Sverdlovsk. Venäjäksi.

Carbonnier, C. 1959. Funktioner för kubering av europeisk, sibirisk och japansk lärk. Skogshögskolan, Institutionen för virkeslära. Moniste. Uppsala.

Chernenko, S.A. & Tolpygin, P.P. 1964. [Siperianlehtikuusen käyttö huonekalujen tuotannossa] Ob ispolzovanii listvennitsy sibirskoi v proizvodstve mebeli. Drevesnaja promyslennost 13(1): 9-11. Venäjäksi.

Chudinov, B.S. 1965. [Lehtikuusen fysikaaliset ominaisuudet] Fiziceskije svoistva drevesiny listvennitsy. Teoksessa: Drevesina listvennitsy i jejo obrabotka. Izdatelstvo Lesnaja promyslennost, s. 19-42. Moskova. Venäjäksi.

Dachrinnen aus Lärche. 1992. Holz-Kurier, Jg. 47, Nr. 12: 10.

Deppe, H.-J. 1995. Orienterende Untersuchungen zur Verleimung von harzreichem Kiefernholz. Holz als Roh- und Werkstoff 53 (1995): 243-247.

Dix, B. 1995. Zum Verhalten des Splint- und Kernholzes der *Lärche (Larix decidua)* bei der Herstellung von feuchtebeständigen Spanplatten unter Einsatz verschiedener Bindemittel. Holz als Roh- und Werkstoff 53 (1995): 357-367.

Edlund, E. 1966. Den sibiriska lärken i Norrland och Dalarna som skogsträd och industriråvara. Sveriges Skogsvårdförbunds Tidskrift 64(5-6): 461-560.

European standard EN 350-2. 1994. Wood and wood based products - Natural durability of wood - Part 2: Natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe. Brussels. European Committee for Standardization. 37 s.

Fagerstedt, K., Pellinen, K., Saranpää, P. & Timonen, T. 1996. Mikä puu – mistä puusta. Yliopistopaino, Helsinki. 180 s.

Hakkila, P. 1961. Lehtikuusipuun käyttömahdollisuuksista. Suomen Puutalous 2. Eripainos. 3 s.

- & Winter, A. 1973. On the properties of larch wood in Finland. Lyhennelmä: Suomessa kasvatetun lehtikuusipuun ominaisuuksista. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 79(7): 1-45.

Halvorsen, B. 1965. Properties of wood of some exotic tree species. Tiivistelmä. Julkaisussa: Forestry Abstracts 1966 027-02767.

Hokajärvi, T. 1993. Lehtikuusi Metsähallituksen mailla. Julkaisussa: Moilanen, M. & Murtovaara, I. (toim.). Metsäntutkimuspäivä Kajaanissa 1992. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 464: 4-8.

Home grown timbers. Larch. 1967. Ministry of Technology. Forest Products Research Laboratory. Her Majesty's Stationary Office. London.

Hukka A. 1996. A simulation program for optimisation of medium temperature drying on an industrial scale. Julkaisussa: 5th International IUFRO Wood Drying Conference. Québec City, Canada, 13-17 Aug. 1996., ss. 41-48. Forintek Canada Corp., Québec City.

- 1997. Sahatavaran kamarikuivauskaavojen optimointi LAATUKAMARI-simulointiohjelmalla. VTT Tiedotteita 1866. 27 s. + liitt. 2 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo.

Hutorschikov, I.S. 1959. The physical properties and chemical composition of the wood of *Larix sibirica*. Tiivistelmä. Julkaisussa: Forestry Abstracts 1961 022-03599.

- , Bujnickaja, M.I. & Zorina, G.A. 1967. The chemical composition and physical properties of *Larix sibirica* from the Irkutsk region. Tiivistelmä. Julkaisussa: Forestry Abstracts 1968 029-04573.

Ilvessalo, L. 1916. Ulkomaisten puulajien viljelemismahdollisuudet Suomen oloja silmälläpitäen. Acta Forestalia Fennica 17(2): 1-112.

- 1923. Raivolan lehtikuusimetsä. Metsätieteellisen koelaitoksen julkaisu 5(3): 1-87.

Juvonen, R., Sipi, M., Kotilahti, T. & Lahti, J. 1986. Lehtikuusen tuotanto- ja käyttöominaisuudet mekaanisessa metsäteollisuudessa. Esikokeita lehtikuusen soveltuvuudesta sahatavaran valmistukseen ja jatkojalostukseen. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostusosasto, puun mekaanisen teknologian laboratorio. Tiedonanto 36. 45 s.

- , Sipi, M. & Hannukainen, J. 1987. Lehtikuusen tuotanto- ja käyttöominaisuudet mekaanisessa metsäteollisuudessa. Siperianlehtikuusen kierteisyys ja sen vaikutus sahatavaran muodonmuutoksiin. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostusosasto, puun mekaanisen teknologian laboratorio. Tiedonanto 44. 29 s.

Kalinin, V.I. 1961. Polnodrevesnost' listvennicy proizrastajuschej v smeshannyh nasazhdenijah Pleseckogo rajona, Arhangel'skoj oblasti. Lesnoi-Zhurnal, Arhangel'sk 4(6): 16-19. Tiivistelmä The taper of larch growing in mixed stands in the Plesetsk part of the Archangel region. Julkaisussa: Forestry Abstracts 1962 023-05649.

Kasanen, J.-P., Pasanen, A.-L., Pasanen, P., Liesivuori, J., Kosma, V.-M. & Alarie, Y. 1999. Evaluation of sensory irritation of Δ^3-carene and turpentine, and acceptable levels of monoterpenes in occupational and indoor environments. Journal of Toxic and Environmental Health. Part A, 56:89-114.

Kellomäki, S. 1981. Mäntysahapuun laadun ja sydänpuuosuuden yhteys tukin ulkoisiin tunnuksiin. Folia Forestalia 489. 13 s.

Khrulev, V.M. 1982. Kinetics of thermal aging and prediction of the durability of glued joints of larch wood. Lesnoi Zhurnal No. 4 (1982): 76-81.

Kislyi, V.V. 1967. [Lehtikuusen sahaus] Raspilovka listvennitsy. Lesnaja promyslennost 46(12): 28-29. Venäjäksi.

Koponen, H. R. 1983. Veden siirtyminen puussa ja puulevyissä I. Kirjallisuustutkimus. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostusosasto, puun mekaanisen teknologian laboratorio. Tiedonanto.

Kostrikov, P.V. 1986. The physical and mechanical processes in gluing a bent- and glued set of larch veneer. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Lesnoi Zhurnal No. 5 (1986): 55-59.

Kärkkäinen, M. 1978. Havaintoja iän vaikutuksesta lehtikuusen puuaineen tiheyteen. Silva Fennica 12(1): 56-64.

Lappi-Seppälä, M. 1927. Tutkimuksia siperialaisen lehtikuusen kasvusta Suomessa. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 12: 1-46.

Lukkarinen, T. & Saarela, K. 1999. Puuseinärakenteen materiaalien emissiot pilot mittakaavan mittauksessa. Sisäilmastoseminaari 1999, Espoo, ss. 355-360.

Lähde, E., Werren, M., Etholen, K. & Silander, V. 1984. Ulkomaisten puulajien varttuneista viljelmistä Suomessa. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 125. 87 s.

Mattson, L. 1917. Form och formvariationer hos lärken. Studier över trädens stambyggnad. MSS: 841-922.

Mineev, A.V. 1976. Nekotorye razmerno-kachestvennye kharakteristiki krupnomernogo listvennichnogo syr'ya raionov vostochnoi Sibiri. Lesnoi-Zhurnal 6: 115-118. Tiivistelmä Some dimensional and qualitative characteristics of large larch roundwood in E. Siberia. Julkaisussa: Forestry Abstracts 1977 038-06822.

Nekhaichuk, O.G. & Bryantseva, Z.E. 1984. Effects of planting density and plantation age on anatomical structure of the wood of *Larix sibirica*. Tiivistelmä. Julkaisussa: Forestry Abstracts 1985 046-00255.

- & Moskaleva, V.E. 1979. Vliyanie lesokhozyaistvennykh faktorov na anatomicheskoe stroenie drevesiny eli, sosny i listvennitsy. Summary: Effect of forestry factors on the anatomical structure of the wood of spruce, pine and larch. Lesovedenie 4: 38-43. Moscow.

Nevalainen, K. & Hosia, M. 1969a. The suitability of larch as fibre raw material. Part I. Tiivistelmä: Lehtikuusen soveltuvuudesta kuituraaka-aineeksi. Osa I. Paperi ja Puu 51(5): 433-438.

- 1969b. The suitability of larch as fibre raw material. Part II. Tiivistelmä: Lehtikuusen soveltuvuudesta kuituraaka-aineeksi. Osa II. Paperi ja Puu 51(6): 503-510.

Paajanen, L., Viitanen, H. & Viitaniemi, P. 1997. Lehtikuusen lahonkestävyys ja sen hyödyntäminen. Rakentavaa tietoa 14/3.97. VTT Rakennustekniikka. 4 s.

Pelz, S.K., Hirschner, R. & Schmutz, I. 1999. Key properties and quality of Larch (*Larix* sp.) concerning end-user requirements. Julkaisussa: Nepveu, G. (ed.). IUFRO WP S5.01-04 Third Workshop "Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Softwares", La Londe-Les-Maures, France, September 5-12, 1999. IUFRO WP S5.01-04. Proceedings. Publication Equipe de Recherches sur la Qualité des Bois 1999/2, December: 356-362. INRA-Nancy, France.

Pedrotti, P. 1970. The use of larch wood for glulam beams. Utilizzazione del Legno, Vol. 13, No. 27: 53-62.

Polyakov, V.S. 1974. Characteristics of the *Larix sibirica* forests of the Tuva ASSR, as exemplified by the Shagonar leskhoz. Tiivistelmä. Julkaisussa: Forestry Abstracts 1975 036-06508.

Ranta-Maunus A., Forsén H., Hanhijärvi A., Hukka A. & Partanen J. 1995. Sahatavaran kuivauksen simulointi. VTT Julkaisuja 805. 62 s. + liitt. 50 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo.

Sairanen, P. 1982. Lehtikuusen ominaisuudet ja käyttö mekaanisessa metsäteollisuudessa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 72. 25 s.

Shultze-Dewitz, H. & Götze, H. 1988. Splintbreite und Spätholzanteil bei ostsibirischer Kiefer, Lärche und Arve. Holztechnologie 29(6): 296-298, 335.

Silander, V., Lehtonen, J. & Nikkanen, T. 2000. Ulkomaisten havupuulajien menestyminen Etelä-Suomessa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 787. 127 s.

Sipi, M. 1988 Lehtikuusen tuotanto- ja käyttöominaisuudet mekaanisessa metsäteollisuudessa. Lehtikuusitavaran kuivaus- ja laatuominaisuuksia. Teknillinen korkeakoulu, puun mekaanisen teknologian laboratorio. Tiedonanto 45. 41 s.

SIY 1995. Sisäilmaston, rakennustöiden ja pintamateriaalien luokitus. SIY raportti 5. Sisäilmayhdistys ry., Espoo. 32 s.

Strand, L. 1963. Tillvekst og produktion af europeisk og sibirisk lärk. Summary: Growth and yield - European and Siberian larch. Tidsskrift för skogsbruket 71(3): 143-164.

Suh, J.S. 1998. A study on veneer peeling, drying properties and plywood properties relevant to softwood species. Research Reports of the Forestry Research Institute (Seoul), No. 37: 55-62.

Tarvainen, V. & Forsén, H. 1996. European Drying Groupin (EDG) kuivauslaatusuositukset sahatavaralle. VTT Rakennustekniikka. Moniste.

- , Kurkela J. & Viitanen H. 1999. Lehtikuusen kuivaussimulointimallin ja kuivauskaavojen kehittäminen. Puumies 44 (9): 6-8.

Timofeev, V.P. 1944. Results of scientific work. Eightieth anniversary of the experimental forest of the Moscow Academy of Agriculture. Tiivistelmä. Julkaisussa: Forestry Abstracts 1945-46 007-01433.

Tkachenko, M.E. 1944. Rational logging in the Ural in connexion with the defence of the country. Tiivistelmä julkaisussa: Forestry Abstracts 1945-46 007-01241.

Tuimala, A. 1984. Lehtikuusi - tuttu, tuottoisa, vieras. Metsäliiton viesti 3: 12-13.

- 1993. Lehtikuusipuun ominaisuudet ja käyttö. Julkaisussa: Moilanen, M. & Murtovaara, I. (toim.). Metsäntutkimuspäivä Kajaanissa 1992. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 464: 79-90.

Verkasalo, E. 1993. Lehtikuusitukkien laatu Suomessa. Folia Forestalia 823. 27 s.

- 2000. Lehtikuusi puusepänteollisuuden raaka-aineena. TEKES-yhteistutkimushankkeen loppuraportti. Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimusasema. 13 s.

Vetsheva, V.F., Itskovich, Ya.A., Frumlina, S.I. 1982. Reduction in the number of sawlog lengths for the major softwoods of the Angara-Yenisei region. Tiivistelmä julkaisussa: Forestry Abstracts 1984 045-00921.

Viitanen, H. 1997. Lehtikuusi puusepänteollisuuden raaka-aineena. Tutkimussuunnitelma. Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimusasema. 7 s.

- 1999. Lehtikuusen lahonkestävyys- tarua vai totta. VTT Rakennustekniikka. Puulla Paremmaksi-seminaari, 3.2.1999. 6 s + liitteet 5 s.

- , Paajanen, L., Nurmi, A. & Viitaniemi, P. 1993. Korvaako lehtikuusi painekyllästetyn puun? Paperi & Puu 75(1993) 9-10, s. 680-681.

- , Paajanen, L., Saranpää, P. & Viitaniemi, P. 1997. Durability of larch (*Larix* spp.) wood against brown-rot fungi. The International Research Group on Wood Preservation, Stockholm. IRG Doc. No: IRG/WP 97-10223. 8 s.

- , Paajanen, L, Nikkanen, T. & Velling, P. 1998. Decay resistance of Siberian larch wood against brown rot fungi. Part 2. The effect of genetic variation. The International Research Group on Wood Preservation, Stockholm. IRG Doc. No: IRG/WP 98-10287. 6 s.

- , Villberg, K. & Saarela, K. 2000. New method to find out the volatile organic compounds (VOC) of wooden material. The International Research Group on Wood Preservation, Stockholm. IRG Doc. No: IRG/WP 00-20189. 6 s.

Vihrov, V.E. 1949. Stroenie i fizikomehaniceskie svoistva rannei i pozdnei drevesiny sibirskoi listvennicy. Trud. Inst. Les. 4: 174-194. Tiivistelmä "Structure and physical and mechanical properties of *Larix sibirica*" julkaisussa: Forestry Abstracts 1954 015-00639.

VTT Chemical Technology Method Description. 1996. Analysing of volatile organic compounds (VOC) from Tenax TA using GC-FID/MSD-technique. VTT:n sisäinen menetelmäohje. 5 s. Julkaisematon.

Vuokila, Y. 1960a. Lehtikuusen kuutioimisyhtälöt ja –taulukot. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 51(10): 1-89.

- 1960b. Siperialaisten lehtikuusikoiden kehityksestä ja merkityksestä maamme metsätaloudessa. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 52(5): 1-111.

Wiksten, Å. 1962. Några exemplar på den sibiriska lärkens (*Larix sibirica*, Ledeb.) produktionsförmåga i Sverige. Summary: Some examples of the yield for Siberian larch in Sweden. Meddelanden från statens skogsforskningsinstitut, Band 51(6). 43 s.

Zaharov, V.K. 1965. Form heights of trees and stands. Tiivistelmä. Julkaisussa: Forestry Abstracts 1966 027-04512.

Yhteensä 76 kpl

Liite. Lehtikuusi puusepänteollisuuden raaka-aineena –yhteistutkimushankkeen johto- ja projektiryhmät.

Johtoryhmä:

- Asikainen Antti, vt. professori, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu, puh. (013) 251 4429, faksi (013) 251 3590, sähköp. antti.asikainen@joensuu.fi
- Jääskeläinen Erkki, teknologia-asiantuntija, Pohjois-Karjalan TE-keskus, Teknologiayksikkö, PL 8, 80101 Joensuu, puh (013) 246 4672, faksi (013) 246 4679, sähköp. erkki.jaaskelainen@tekes.fi
- Kuusela Tapani, yrittäjä, Lehtikuusela Ky, Hirviniementie 24, 80710 Lehmo, puh. (013) 892 738, faksi (013) 892 738, 049-277382 (johtoryhmän puheenjohtaja)
- Kuva Ilkka, toimistoinsinööri, Oikeusministeriö, Vankeinhoito-osasto, PL 319, 00181 Helsinki, puh. (09) 1608 847, faksi (09) 1608 8486, (09) 1608 8475, sähköp. ilkka.kuva@om.vn.fi
- Markkanen Vesa, toimitusjohtaja, Lappeenrannan PeTePu Oy, Kivenkatu 2-4, 53600 Lappeenranta, puh. (05) 615 2127, faksi (05) 415 0140
- Niemelä Ari, johtaja, Puukeskus Oy, Taipalsaarentie 51, 53900 Lappeenranta, puh. 0204-165920, faksi 0204-165749, sähköp. ari.niemela@puukeskus.fi
- Saimovaara Juhani, lehtori, hallituksen jäsen, Puuseppämestarit ry., Mesikämmenkatu 20, 15900 Lahti, puh. (03) 828 2935, faksi (03) 828 2965, sähköp. juhani@lpt.fi
- Verkasalo Erkki, professori, Metla, Joensuun tutkimuskeskus, PL 68, 80101 Joensuu, puh. (013) 251 4143, faksi (013) 251 4111, sähköp. erkki.verkasalo@metla.fi
- Viitanen Hannu, erikoistutkija, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakennusmateriaalit ja –tuotteet sekä puutekniikka, Puumiehenkuja 2 A, PL 1806, 02044 VTT, puh. (09) 456 5528, 040-5123708, faksi (09) 456 7027, sähköp. hannu.viitanen@vtt.fi

Projektiryhmä:

Johtoryhmän jäsenten lisäksi:

- Ahola Pirjo, ryhmäpäällikkö, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakennusmateriaalit ja –tuotteet sekä puutekniikka, Puumiehenkuja 2 A, PL 1806, 02044 VTT, puh. (09) 456 5548, faksi (09) 456 7027, sähköp. pirjo.ahola@vtt.fi
- Kurkela, Juha, tutkija, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakennusmateriaalit ja -tuotteet sekä puutekniikka. PL 1804, 02044 VTT, puh (09) 456 5477, fax (09) 456 7027, sähköp. juha.kurkela@vtt.fi
- Liiri, Harri, maa- ja metsätaloustieteiden maisteri, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu.

- Mikkola Antero, tutkimusalueen esimies, Metla, Punkaharjun tutkimusasema, PL 10, 58451 Punkaharju, puh. (015) 730 2254, faksi (015) 644 333, sähköp. antero.mikkola@metla.fi
- Nikkanen Teijo, varttunut tutkija, Metla, Punkaharjun tutkimusasema, PL 10, 58451 Punkaharju, puh. (015) 730 2226, faksi (015) 644 333, sähköp. teijo.nikkanen@metla.fi
- Palm Erkki, työnjohtaja, Sukevan keskusvankila, 74235 Kalliosuo, puh. (017) 768 7176, faksi (017) 768 7299, sähköp. erkki.palm@om.vn.fi
- Rantonen Matti, yrittäjä, Urapaanu-puukate, Impilahdenkatu 2, 80200 Joensuu, puh. (013) 313 516. (-19.3.1999)
- Saarela, Kristina, Ryhmäpäällikkö, VTT Kemiantekniikka, Sisäilmakemia, PL 1403, 02044 VTT, puh. (09) 456 5292, fax. (09) 456 7022, sähköp. kristina.saarela@vtt.fi
- Sakki Timo, maa- ja metsätaloustieteiden maisteri, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu
- Suomi-Lindberg, Leena, tutkija, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakennusmateriaalit ja –tuotteet sekä puutekniikka, Puumiehenkuja 2 A, PL 1806, 02044 VTT, puh. (09) 456 5526, faksi (09) 456 4027, sähköp. leena.suomi-lindberg@vtt.fi
- Tarvainen Veikko, tutkija, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakennusmateriaalit ja –tuotteet sekä puutekniikka, Puumiehenkuja 2 A, PL 1806, 02044 VTT, puh. (09) 456 5551, faksi (09) 456 4027, sähköp. veikko.tarvainen@vtt.fi
- Tiainen Markku, metsätalousteknikko, Metla, Joensuun tutkimuskeskus, PL 68, 80101 Joensuu, puh. (013) 251 4032, faksi (013) 251 4567, sähköp. markku.tiainen@metla.fi
- Tolonen Yrjö, tutkimusjohtaja, YTI Ympäristötekniikan Instituutti, Jääkärinkatu 10 A, PL 181, 50101 Mikkeli, puh. (015) 355 6351, faksi (015) 355 6365, sähköp. yrjo.tolonen@mikkeliamk.fi
- Tuimala Aili, varttunut tutkija, Metla, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa, puh. (09) 857 05 352, faksi (09) 857 05 361, sähköp. aili.tuimala@metla.fi
- Turunen Alpo, työnjohtaja, Juuan avovankilaosasto, PL 26, 83901 Juuka, puh. (013) 470 851, faksi (013) 470 853, sähköp. alpo.turunen@om.vn.fi
- Venäläinen Martti, varttunut tutkija, Metla, Punkaharjun tutkimusasema, PL 10, 58451 Punkaharju, puh. (015) 730 2238, faksi (015) 644 333, sähköp. martti.venalainen@metla.fi
- Villberg Kirsi, tutkija, VTT Kemiantekniikka, Sisäilmakemia. PL 1403, 02044 VTT, puh. (09) 456 5233, faksi (09) 456 7022, sähköp. kirsi.villberg@vtt.fi

Etukannen kuvat:

Ylh. vas.
Istutettu 100-vuotias siperian-lehtikuusikko, huippulaatua viljavalla kivennäismaalla Metsäntutkimuslaitoksen Punkaharjun tutkimusalueessa.
Kuva: Erkki Verkasalo.

Ylh. oik.
Lehtikuusipuinen Nuoramoisen silta Sysmässä. Rakentanut kylätoimikunta, puutavaran toimittanut Lehtikuusela Ky, Kontiolahti.
Kuva: Tapani Kuusela.

Kesk. vas.
Lehtikuusipuisia huonekaluja ja käyttö- ja koriste-esineitä. Design ja valmistus Lehtikuusela Ky, Kontiolahti.
Kuva: Tapani Kuusela.

Kesk. oik.
Lehtikuusesta valmistettu ulkokalusteryhmä. Design ja valmistus Vankeinhoitolaitos, Sukeva keskusvankila ja Juuan avovankilaosasto.
Kuva: Erkki Palm.

Alh. vas.
Lehtikuusesta valmistettu Café-puutarhakalusteryhmä. Design ja valmistus Laptuote-säätiö, markkinointi PeTePu Oy, Lappeenranta.
Kuva: Vesa Mikkonen.

Alh. oik.
Lehtikuusipuisia pienesineitä. Puuseppämestarit ry., Lahti.
Kuva: Studio Matti Viljanen.

METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 809, 2001

ISBN 951-40-1782-X, ISSN 0358-4283