

Puun kuivumisen matemaattinen mallintaminen korkeissa lämpötiloissa

Antti Hukka

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-4524-9
ISSN 1235-0613
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1996

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 42, 02151 ESPOO
puh. vaihde (09) 4561, telekopio (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 42, 02151 ESBO
tel. växel (09) 4561, telefax (09) 456 4374

Technical Research Centre Of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 42, FIN-02151 ESPOO, Finland
phone internat. + 358 9 4561, telefax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusmateriaalit ja -tuotteet sekä puutekniikka, Puumiehenkuja 2 A, PL 1806, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7027

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsmaterial och -produkter, träteknik, Träkarlsgränden 2 A, PB 1806, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7027

VTT Building Technology, Building Materials and Products, Wood Technology,
Puumiehenkuja 2 A, P.O.Box 1806, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7027

Technical editing Kerttu Tirronen

VTT OFFSETPAINO, ESPOO 1996

Hukka, Antti. Puun kuivumisen matemaattinen mallintaminen korkeissa lämpötiloissa. [A mathematical model for wood drying at high temperatures]. Espoo 1996, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Julkaisuja - Publikationer 815. 50 s. + liitt. 1 s.

UCD 691:674.04:51-7

Keywords construction materials, wood, structures, structural timber, drying, mathematical models, models, simulation, softwoods, temperature, wooden structures

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa luodaan tiedolliset edellytykset puun kuivumisen simuloinnille tavanomaisen lämminilma-kuivauksen olosuhteet ylittävissä lämpötiloissa. Kirjallisuudessa esitettyihin huokoisen, hygroskooppisen materiaalin yleisen kuivumisen malleihin perustuen esitetään yleinen teoria puun kuivumisen kuvaamiseksi yksityiskohtaisella matemaattisella mallilla. Malli koostuu kytketyistä kosteuden- ja lämmönsiirron integraaliyhtälöistä, joiden lisäksi kokonaispaineen laskemiseksi tarvitaan oma yhtälö. Yhtälöiden ratkaisemiseksi tarvittavista numeerisista menetelmistä tarkastellaan erityisesti kontrollitilavuusmenetelmää, jonka pohjalta on tehty mikrotietokoneessa toimiva sahatavaran kuivauksen simulointiohjelman prototyyppi.

Malliin tarvittavia materiaaliominaisuuksia on tarkasteltu suomalaisen sydänpuuvaltaisen havusahatavaran osalta tämän kanssa rinnakkaisen projektin 'Sahatavaran koekuivaukset korkeissa lämpötiloissa' tuottamien laboratoriomittakaavassa tehtyjen kuivauskokeiden perusteella. Näin on saatu sekä männyn että kuusen sydänpuun diffuusio- ja permeabiliteetikertoimille arvot, jotka tyydyttävällä tarkkuudella kuvaavat kuivumista lämpötila-alueella 45 - 120 °C. Puun materiaaliominaisuuksia ja niiden muuttumista kuivumisen seurauksena on tarkasteltu sekä teoreettisesti että kokeissa tehtyjen havaintojen pohjalta.

Verrattaessa kuivauskokeiden tuloksia simulointiohjelmalla laskettuihin arvoihin huomiota on erityisesti kiinnitetty puun sisäisen kosteusjakauman kehittymiseen kuivauksen aikana. Sen lisäksi, että kosteusgradientti itsessään on olennaisimpia hyvän kuivauslaadun osatekijöitä, sen tunteminen luo perustan kuivumisjännitysten ja siis myös halkeilun laskennalliselle tarkastelulle. Näin täydennettynä tehty simulointiohjelma antaa mahdollisuudet teollisuudessa käytettävien kuumakuivauskaavojen kehittämiseen ja optimointiin.

Aikaansaatu kuivumisen yleinen malli luo edellytykset myös muiden uusien kuivausmenetelmien laskennalliselle tarkastelulle. Tällaisia sovelluskohteita voivat olla ali- ja ylipaine-kuivaus sekä dielektrisellä lämmityksellä tapahtuva kuivaus. Kuivattavana tavarana tulevat sahatavaran lisäksi kyseeseen ainakin hirret, pylvää ja aihiot.

Hukka, Antti. Puun kuivumisen matemaattinen mallintaminen korkeissa lämpötiloissa. [A mathematical model for wood drying at high temperatures]. Espoo 1996, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Julkaisuja - Publikationer 815. 50 s. + liitt. 1 s.

UCD 691:674.04:51-7

Keywords construction materials, wood, structures, structural timber, drying, mathematical models, models, simulation, softwoods, temperature, wooden structures

ABSTRACT

The study provides knowledge needed for simulation of wood drying in conditions exceeding the conventional drying temperatures. Based on existing models for drying of a general hygroscopic porous material a general theory of wood drying is represented in a detailed mathematical form. The model consists of interconnected integral equations for heat and mass transfer in addition to which a separate equation is needed to calculate the total pressure. Numerical methods are investigated to solve the equations and a prototype of a timber drying simulation program is created based on the control-volume method.

The evaluation of the material properties needed for the model is based on experimental drying tests conducted on a laboratory scale. The experiments have concentrated on heartwood-dominated Finnish softwoods. Adequate diffusion and permeability functions are thus formulated for pine and spruce heartwood. The material properties and their evolution during the drying process is discussed based both on theoretical considerations and experimental observations.

Comparing the simulated results against the experimental values a special attention is paid to the evolution of the internal moisture distribution of the wood during drying. Knowing the moisture gradient provides a basis for simulation of the drying stresses and thus also checking in drying. When linked to a creep model the simulation program gives possibilities for development and optimisation of high-temperature drying schedules on an industrial scale. The general theory also provides knowledge needed for application of simulation for other novel drying methods and drying of other wood products. Such areas of future application could be vacuum drying and drying with dielectric heating.

ALKUSANAT

Tämä julkaisu on “Puun kosteuden ja lämmönsiirron malli korotetuissa lämpötiloissa” -projektin loppuraportti. Projektin tavoitteena oli määrittää malli kosteuden ja lämmön siirtymiselle puussa kuumakuivauksessa käytettävissä lämpötiloissa. Malli tarvitaan kuumakuivauksen simulointiohjelman ja kuumakuivauskaavojen kehityksen perustaksi.

Projekti toteutettiin vuosina 1994-1996. Samanaikaisesti oli käynnissä myös projekti “Sahatavaran koekuivaukset korkeissa lämpötiloissa”. Mallin kehittämiseen tarvittavat lämpötilan ja kosteuden jakaumat määritettiin projektien yhteisissä kuivauskokeissa.

Molemmat projektit kuuluvat Teknologian kehittämiskeskuksen Puun mekaanisen teknologian (PMT) teknologiaohjelmaan. TEKESin lisäksi hankkeita rahoitti Suomen Puututkimus Oy. Projektin aktiivisen johtoryhmän puheenjohtajana toimi kehitysjohtaja Seppo Vainio Enso-Gutzeit Oy:stä. Muut jäsenet olivat kehitysjohtaja Kalevi Asikainen Kaukas Oy:stä, tutkuspäällikkö Olli-Pekka Nordlund TEKESistä, professori Tero Paajanen Teknillisestä korkeakoulusta ja tutkimuksen vastuullinen johtaja professori Alpo Ranta-Maunus VTT Rakennustekniikasta. Projektin päätutkijana oli tutkija Antti Hukka ja projektipäällikkönä allekirjoittanut.

Haluan kiittää johtoryhmän jäseniä ja kaikkia muita henkilöitä, jotka ovat asiantuntemuksellaan auttaneet tutkimuksen toteutuksessa.

Veikko Tarvainen

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT.....	4
AKUSANAT.....	5
SYMBOLILUETTELO.....	7
1 JOHDANTO	9
2 KUIVAUKSEN LAATU JA SIMULOINTIMAHDOLLISUUDET	11
3 YLEINEN TEORIA PUUN KUIVUMISELLE.....	14
3.1 Puunsyiden kyllästymispiste ja sorptiokäyrästä	14
3.2 Jatkuvuusyhtälö	17
3.2.1. Vapaa vesi	18
3.2.2. Sitoutunut vesi	19
3.2.3. Vesihöyry	20
3.3 Energiayhtälö.....	20
3.4 Kokonaispaine	22
3.5 Reunaehdot.....	23
3.5.1 Ulkoiset olosuhteet: märkä- ja kuivalämpötila sekä suhteellinen kosteus	23
3.5.2 Lämmönsiirtokerroin.....	24
3.5.3 Energiayhtälön reunaehto.....	25
3.5.4 Jatkuvuusyhtälön reunaehto	26
3.5.5 Kokonaispaine reunalla.....	27
3.6 Alkuehdot	28
4 MATERIAALIOMINAISUUDET.....	29
4.1 Sydänpuu ja pintapuu	29
4.2 Permeabiliteetti.....	30
4.2.1 Aspiroituminen.....	31
5 TEORIAN SOVELLUS SAHATAVARAN KUIVATUKSESSA.....	32
5.1 Mallin yksinkertaistaminen	32
5.2 Numeerinen 1-ulotteinen menetelmä.....	33
5.3 Numeerinen 2-ulotteinen menetelmä.....	35
6 MALLIN SOPIVUUS LABORATORIOKUIVAUSKOKEIDEN TULOKSIIN.....	38
6.1 Männyn sydänpuun kosteusjakauma kuivauksen aikana eri lämpötiloissa	38
6.2 Kuusen sydänpuun kosteusjakauma kuivauksen aikana eri lämpötiloissa	41
6.3 Keskimääräinen kosteus ja kosteusgradientti kuivauksen aikana: kaikki kokeet.....	43
7 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	46
LÄHDELUETTELO	48

LIITE1

Laskennassa käytety materiaalivakiot

SYMBOLILUETTELO

ϕ	yleinen potentiaali
α	lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
σ	pintajännitys [N/m]
η	dynaaminen viskositeetti [kg/ms]
ρ	tiheys [kg/m^3]
Λ, λ	lämmönjohtavuus [W/mK]
β, γ	implisiittisen aikadiskretoinnin kertoimet [-]
a	vesihöyryn diffuusiojohtavuus [-]
c	ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]
D	diffuusiokerroin [m^2/s]
E	energiatiheys [J/m^3]
F	vuontiheysvektori
h	entalpia [J/kg]
K	permeabiliteetti [m^2/s]
k	vakio
Le	Lewiksen luku [-]
n	pinnan ulospäin osoittava yksikkönormaalivektori [m^2]
p	paine [Pa]
PSK	puunsiiden kyllästymispiste [-]
R	kaasuvakio [J/kgK]
RH	suhteellinen kosteus [%]
S	kyllästysaste [-]
t	aika [s]
T	lämpötila [$^{\circ}\text{K}$]
U	konservatiivisten suureiden vektori
u	kosteuspitoisuus [kg/m^3]
V	diskreetti kontrollitilavuus
Q	yleinen lähdetermien vektori

Alaindeksit:

1D	yksiulotteinen poikkileikkaus
2D	kaksiulotteinen poikkileikkaus
a	ilma
AB	binäärinen
b	sitoutunut vesi
c	kapillaari-
E	energia
g	kaasufaasi
i,j	diskreetti laskentatilavuus
IR	infrapuna-
K	kuivalämpötila
l	vapaa vesi
M	märkälämpötila
RF	dielektrinen
S	sorptio-

sat	kylläinen
tot	kokonais-
u	kosteus
v	vesihöyry
w	puu

Yläindeksit:

*	puun pinta
ϕ	yleinen potentiaali
n	diskreetti ajan hetki

1 JOHDANTO

Puun ja erityisesti sahatavaran kuivauksen matemaattinen mallintaminen on ollut VTT:ssä jatkuvan tutkimuksen kohteena 1980-luvun loppupuolelta alkaen. Vuosina 1990-1992 toteutettiin usean eri tahon kanssa yhteistyössä tähän asti laajin asiaan liittynyt tutkimusprojekti "Sahatavaran kuivauksen laadun parantaminen", jonka eräänä lopputuotteena oli teollisuuden käyttöön tarkoitettu LAATUKAMARI-simulointiohjelma. Se simuloi sahatavaran kuivauksen laatua perinteistä lämminilmakuivausta käytettäessä kamarikuivaamossa lämpötila-alueella 40 - 80 °C ja on tällä hetkellä käytössä yli 20 suomalaisella sahalla. Ohjelman avulla kuivaamonhoitajilla on mahdollisuus käyttämiään kuivauskaavoja itsenäisesti parantamalla lyhentää kuivausaikaa ja parantaa kuivatun sahatavaran laatua. Kolmen vuoden käytöstä kerätyn kokemuksen perusteella ohjelman avulla on mahdollisuus päästä sen pohjana olleen projektin alkuperäiseen tavoitteeseen, paksun sydänpuuvaltaisen havusahatavaran halkeilun vähentämiseen puoleen alkuperäisestä.

Sahatavaran kuivauksen laatu on tuotteiden lisääntyvän erikoistumisen myötä sahoille yhä tärkeämpi kilpailutekijä. Niin ikään vaatimus kuivauksen taloudellisuudesta korostuu kilpailun myötä. Kuumakuivauksen antamia mahdollisuuksia näihin vaatimuksiin vastaamiseksi on selvitetty Tarvaisen (1994) esiselvityksessä, jonka pohjalta kuivaus yli 100 °C:n lämpötiloissa on todettu käyttökelpoiseksi menetelmäksi erityisesti rakennuskäyttöön meneville sahatuotteille. Samoin todettiin, että kuumakuivauksen menestyksellinen hyväksikäyttö vaatii perinteistä kuivaamoja selvästi parempaa säätötekniikkaa ja ehdottomasti oikeiden kuivauskaavojen hallintaa. Käytännössä vaaditaan myös kokonaan uusien kuivaamoiden suunnittelua ja rakentamista. Avaimeksi tähän tietämykseen on katsottu valmiuksien kehittäminen puun kuivumisen yleiseen matemaattiseen mallintamiseen.

Tämä tutkimus antaa suoraan mahdollisuudet kuivauksen simulointiin lämpötila-alueella 40 - 140 °C ja muodostaa pohjan myös erikoisempien kuivausmenetelmien laskennalliselle käsittelylle. Tällaisia jatkosovelluskohteita voisivat olla ali- ja ylipaine kuivaus, mikroaalto- ja radiotaajuuskuivaus sekä näiden erilaiset yhdistelmämenetelmät. Yleisen matemaattisen teorian sovelluskohteina kysymykseen tulevat sahatavaran kuivauksen ohella myös muiden puutuotteiden kuten hirsien, pylväiden, aihoiden ja muiden erikoistuotteiden kuivaus.

Matemaattiselta perustaltaan aikaisemmin kehitetty LAATUKAMARI-simulointimalli oli kosteuden siirtymisen osalta varsin voimakkaasti yksinkertaistettu, ja siinä kuvattiin kuivumista yksinkertaisella diffuusioyhtälöllä. Näin puussa vallitseva lämpötilagradientti jäi kokonaan huomiotta kosteuden siirtymistä laskettaessa, vaikka puun lämpötilajakauma

onkin simuloitava kosteudenlaskennan reunaehtojen lämpötilariippuvuuden vuoksi. Lämminilma-kuivauksessa tällainen yksinkertaistettu malli on varsin riittävä ja mikrotietokoneen laskentakapasiteetin käytön kannalta tarkoituksenmukainen, mutta siirryttäessä yli 100 °C:n lämpötiloihin painegradientin vaikutusta ei voi jättää huomiotta, vaan “täydelliset” yhtälöt ovat tarpeen. Tässä työssä tätä teoriaa on laajennettu sellaiselle tasolle, että toimivan, yleispätevän puun kuivauksen simulointimallin konstruointi on teorian pohjalta mahdollista.

2 KUIVAUKSEN LAATU JA SIMULOINTI MAHDOLLISUUDET

Kuivauksen laadulla on perinteisesti ymmärretty erityisesti sahoilla lähinnä halkeilun ja liian kosteiden kappaleiden välttämistä. Sahan toiminnan kokonaistaloudellisuuden ja asiakkaiden tyytyväisyyden kannalta on kuitenkin tarkoituksenmukaista kiinnittää huomiota yhtäläisesti kaikkiin kuivauslaadun osatekijöihin, joita ovat

- kuivauserän keskimääräinen kosteus
- kosteuden hajonta kappaleiden välillä
- kappaleen sisäinen kosteusjakauma eli kosteusgradientti
- halkeilu niin pinnassa kuin kappaleen sisälläkin
- kuivauksen aiheuttamat välittömät muodonmuutokset, erityisesti kierous
- kuivatun puun ulkonäkö, erityisesti väri
- jäännösjännitykset, jotka aiheuttavat muodonmuutoksia jatkojalostuksessa.

On selvää, että kuivauslaadun eri osatekijöiden suhteellinen merkittävyys riippuu täysin tarkasteltavasta tuotteesta. Tietyissä rakennuskäytön kohteessa sahatavaran laaduksi saattaa riittää sellainen loppukosteus, että puu ei homehdu, kun taas puuseppä vaatii jokaisen kappaleen täsmälleen oikean loppukosteuden, virheettömän pinnan ja täysin tasaantuneet kuivausjännitykset. Asiakkaiden erilaiset vaatimukset on helpointa tyydyttää kuivaamalla kutakin varten sahatavara sellaisella menetelmällä, että kuivauksen laatu on juuri oikea. Näin saadaan samanaikaisesti sekä kuivauksen kokonaiskustannukset minimoiduiksi että asiakastyytyväisyys maksimoiduksi. Tällainen tuotelähtöinen ajattelutapa kuivauksessa edellyttää erilaisten kuivausmenetelmien laaja-alaista käyttöä, jolloin kuumakuivaus tulee kysymykseen yhtenä menetelmänä perinteisten kamari- ja kanavakuivausten joukossa.

Kaikkien mainittujen kuivauslaadun osatekijöiden matemaattinen mallintaminen ja niiden simulointi on sinänsä mahdollista. Useimpien osatekijöiden kohdalla tarvittava teoreettinen tietämys on riittävän korkeatasoista, ja ongelmat liittyvät lähinnä materiaaliominaisuuksien puutteelliseen hallintaan.

Keskimääräinen kosteus voidaan mallintaa monimutkaisuudeltaan hyvin eritasoisten teorioiden avulla. Perinteiset kosteuden eksponentiaaliseen vähenemiseen perustuvat mallitkin antavat riittävän tarkan lopputuloksen sillä kosteus- ja lämpötila-alueella, jolta koeaineisto on kerätty. Tällaiset yksinkertaistetut mallit eivät kuitenkaan tuota muiden kuivauslaadun osatekijöiden mallintamiseen tarvittavaa lähtötietoa, joten puun sisäisen kosteusjakauman simulointiin perustuvat mallit ovat tietokoneiden käyttömahdollisuuksien myötä yleistyneet. Tällaista lähestymistapaa käyttäen riittää keskimääräisen kosteuden simulointiin yksiulotteinen malli. Myös muodoltaan neliötä lähellä olevien poikkileikkausten keskimääräisen kosteuden laskenta yksiulotteisella mallilla on mahdollista, kun käytetään sopivia korjauskertoimia.

Kosteuden hajonta kuivattavien kappaleiden välillä riippuu useasta eri osatekijästä. Näistä tärkeimmät ovat puun makroskooppisten ominaisuuksien vaihtelu (tiheys, sydänpuuosuus), kuivausolosuhteiden epätasaisuus (sekä puhallussyvyys että kuivaamon epäoptimalisuus) sekä puun kosteudensiirto-ominaisuuksien satunnainen vaihtelu tiheydeltään ja alkukosteudeltaan samanlaistenkin kappaleiden välillä. Nämä tekijät voidaan ottaa huomioon simuloimalla riittävä määrä ominaisuuksiltaan erilaisia kappaleita erilaisissa olosuhteissa, jolloin tulokseksi saadaan odotettavissa oleva keskimääräisen kosteuden vaihteluväli kuivauskuormassa. Tämä edellyttää tietysti tietoa kosteudensiirto-ominaisuuksien riippuvuudesta, tiheydestä sekä sydän- että pintapuulle sekä mittauksia sydänpuuosuuden vaihtelusta. Vaikeinta on ottaa huomioon kuivausolosuhteiden epätasaisuudesta aiheutuvan hajonnan komponentti, koska se edellyttää varsin laajoja mittauksia kussakin tarkasteltavassa kuivaamossa erikseen.

Kosteusgradientti on suora tulos kappaleen sisäisen kosteusjakauman simuloivasta mallista. Tällöinkin asiasta voidaan saada hyvin erilaisia tuloksia sen mukaan, kuinka paksua kerrosta kappaleen pinnan läheisyydessä tarkastellaan. Pelkkä tieto simuloitun kappaleen keskiosan ja pinnan kosteuserosta ei siis vielä kerro gradienttia yksikäsitteisesti, kun tehdään vertailuja mittautuloksiin. Kosteusgradientin laskenta riittävän tarkasti on mahdollista yksiulotteisella mallilla.

Puun halkeilun simulointi edellyttää kosteusgradientin lisäksi mallia kuivumisjännitysten laskemiseksi, mikä vaatii tiedon puun virumisesta eri lämpötiloissa ja kosteuksissa. Lisäksi tarvitaan puun kuormituksen pitkäaikaisuuden ja vaihtelevuuden huomioon ottava halkeilukriteeri, jonka avulla lasketut jännityksen arvot saadaan vastaamaan havaittua halkeilun määrää. Puun pinnan halkeilun simulointi on mahdollista yksiulotteisellakin mallilla, mutta sisähalkeilun laskennallinen käsittely vaatii kaksiulotteisen mallin (puun säteen ja tangentin suunnat).

Kuivauksen aiheuttamat välittömät muodonmuutokset voidaan selvittää virumismallin avulla kuten halkeilukin. Ne johtuvat kuitenkin yleensä myös puun syiden suuntaisesta rakenteesta, joten käytettävän jännitysten laskentamallin on oltava kolmiulotteinen. Tämä vaatii sekä puun materiaaliominaisuuksien erittäin laajaa hallintaa että tietokoneen suurta laskentatehoa.

Puun ulkonäkö kuivauksen jälkeen koostuu monesta osatekijästä: yleinen väri ja sen tasaisuus, oksien käyttäytyminen, pihkan valuminen jne. Lisäksi jatkojalostuksen kannalta on käytännön merkitystä muun muassa sillä, kuinka syvälle puun pinnasta syntyneet värimuutokset ulottuvat. Ulkonäkö on tähän saakka vähiten mallinnettu kuivauslaadun osatekijä, mutta ilmeisesti tyydyttävään tulokseen pääseminen tälläkin sektorilla on sinänsä mahdollista. Ongelmia on asiaan vaikuttavien prosessien lukuisuuden lisäksi myös vaikeudella mitata objektiivisesti ulkonäön eri tekijöitä.

Osa kuivauksessa syntyvistä jännityksistä tasaantuu, kun kosteuserot poistuvat, mutta osa on pysyviä. Nämä jäännösjännitykset merkitsevät muodonmuutosten syntymistä puuta jatkojalostettaessa, lähinnä höylättäessä ja halkaistaessa. Poikkileikkauksen muodon muuttumisen työstettäessä määrää siinä kuivauksen jälkeen vallitseva jännitystila, joka on laskettavissa kaksiulotteisilla laskentamalleilla.

3 YLEINEN TEORIA PUUN KUIVUMISELLE

Tämän työn lähtökohtana on ollut huokoisen materiaalin kuivumisen yleinen teoria, joka rakentuu pääasiassa Luikovin (1975) ja Whitakerin (1977) esitysten varaan. Kumpikin muodosti yhtälöt kosteuden liikkeelle huokoisessa, hygroskooppisessa aineessa hyvin yleisellä tasolla, joka perustuu materiaalin sisäisen rakenteen tarkasteluun. Tällöin materiaalissa erotetaan avoimet huokokset ja niiden välinen hygroskooppinen materiaali. Tästä puun kannalta solutasolla sijaitsevasta lähtökohdasta huolimatta tämä yleinen teoria olettaa muiden materiaalien ohella myös puun niin sanotuksi kontinuumiksi, eli riittävän suurina osina tarkasteltuna homogeeniseksi, jatkuvaksi aineeksi. Kontinuumioletus ei kuitenkaan rajoita mahdollisuuksia ottaa huomioon puuaineksen todellisesta solurakenteesta johtuva ortotrooppisuus eli ominaisuuksien riippuvuus tarkastelusuunnasta.

Kosteuden siirtymistä puussa kuvaa kolme toisiinsa kytkettyä integraaliyhtälöä: jatkuvuusyhtälö, energiayhtälö ja kokonaispaine-yhtälö. Niissä olevat riippumattomat muuttujat voidaan valita usealla eri tavalla, sillä esimerkiksi kokonaisenergia ja lämpötila riippuvat yksikäsitteisesti toisistaan, samoin kokonaispaine ja ilman tiheys. Käsillä olevassa mallissa riippumattomat muuttujat on valittu fysikaalisten säilymislakien pohjalta, jolloin luontevat konservatiiviset suureet ovat puun kokonaiskosteus, lämpötila ja siinä olevan ilman tiheys. Lämpötilaa käytetään kokonaisenergian sijasta lähinnä yhtälöiden formuloinnin yksinkertaistamiseksi.

3.1 PUUNSYIDEN KYLLÄSTYMISPISTE JA SORPTIOKÄYRÄSTÖ

Kuten tunnettua, tuoreessa puussa esiintyy vettä pääasiassa kolmessa eri muodossa: soluonteloissa nesteinä (ns. vapaa vesi), soluseinämissä kemiallisesti ja fysikaalisesti sitoutuneena sekä soluonteloissa vesihöyryinä. Näiden lisäksi vapaata vettä voi esiintyä jään muodossa lämpötilan alittaessa 0 °C. Myös sitoutuneen veden on mainittu jäätyvän, joskin selvästi vapaata vettä alemmassa lämpötilassa, mutta tämän ilmiön merkitys on ilmeisen vähäinen. Loppu soluonteloista on täyttynyt ilmalla.

Suurimman mahdollisen soluseinämiin sitoutuneen kosteuspitoisuuden määrää puunsyiden kyllästymispiste (PSK), jonka arvo riippuu puun lämpötilasta. Tätä riippuvuutta on lähinnä virumiskokeiden tulosten perusteella havaittu hyvällä tarkkuudella kuvaavan yhtälön

$$PSK = 0,33 - 0,001 \cdot (T - 273,15) . \quad (1)$$

Tarkkaan ottaen PSK riippuu myös puulajista, mutta erot suomalaisten lajien välillä ovat vähäisiä. Myös sydän- ja pintapuun välillä esiintyy ero, mutta sekään ei käytännön kannalta ole merkittävä. Yleisesti ajatellaan PSK:n määräävän kosteuspitoisuuden, jossa vapaata vettä ei enää ole, eli puuhun sen ulkopuolelta tulevan veden ajatellaan sitoutuvan soluseinämiin viiveettä, jos soluseinämiä ei ole kyllästynyt. (Tämä ajatus pätee luonnollisesti vain differentiaalitasolla; todelliseen kappaleeseen syntyy aina sisäinen kosteusjakauma). PSK:n käsitteen avulla puussa paikallisesti vallitseva kokonaiskosteuspitoisuus voidaan näin aina jakaa vapaan ja sitoutuneen veden osuuksiin, kun puun lämpötila tiedetään.

Vesihöyryn osapaine puun soluonteloissa on kokeellisesti selvitettävissä mittaamalla puun tasapainokosteus erilaisissa ulkoisissa olosuhteissa. Tällöin ulkoinen höyryn osapaine ja puun sisällä vallitseva höyryn osapaine ovat samat, koska muutoin kosteutta siirtyisi joko puuhun tai siitä pois. Samoin puun lämpötila ja ulkoinen lämpötila asettuvat samoiksi, mikä sinänsä onkin ilmeistä. Vesihöyryn osapaine riippuu näin ollen kahdesta tekijästä: puun lämpötilasta ja sen kosteudesta. Lämpötila määrää kylläisen vesihöyryn paineen kautta suurimman mahdollisen soluontelossa vallitsevan höyryn osapaineen, joka saavutetaan PSK:n kohdalla. Näin ajateltaessa oletetaan, että vapaaseen veteen liuenneet epäpuhtaudet eivät merkittävästi alenna puhtaan veden kylläisen höyryn painetta. Kosteuden ollessa PSK:n alapuolella vesihöyryn osapaine soluonteloissa alenee puun kosteuden mukana soluseinämien hygroskooppisuuden vuoksi. Näin ollen vesihöyryn osapaine soluonteloissa on aina muotoa

$$p_v = p_{sat}(T) \cdot RH\left(\frac{u}{\rho_w}, T\right). \quad (2)$$

Lausekkeen ensimmäinen osa on lämpötilasta yksikäsitteisesti riippuva kylläisen höyryn paine ja jälkimmäinen osa siis puun tasapainokosteuskäyrästä. Tasapainokosteus ei merkittävästi riipu puun tiheydestä, koska puussa olevien sorptiopaikkojen lukumäärä soluseinämän tilavuusyksikköä kohti on hyvällä tarkkuudella vakio. Tarvittava kylläisen vesihöyryn paine on vain lämpötilan funktio ja se voidaan laskea Stanishin ym. (1986) mukaan numeerisena sovitteena seuraavasti:

$$p_{sat}(T) = \exp(A) \cdot R_v T \quad (3)$$

$$A = -46,49 + 0,26179T - 5,0104 \cdot 10^{-4} T^2 + 3,4712 \cdot 10^{-7} T^3$$

Yhtälö (2) perustuu siihen olettamukseen, että puun soluseinämiä ja sitä ympäröivä kaasufaasi ovat koko ajan termodynaamisessa tasapainotilassa. Tämä merkitsee hyvin nopeiden lämmitystapahtumien osalta tarvetta yhtälön (2) asettamiseen kyseenalaiseksi, mutta ongelmia ei ilmeisesti vielä synny tavanomaista kuumakuivausprosessia tarkasteltaessa.

Hygrooskooppisen materiaalin tasapainokosteus riippuu myös siitä, onko se jo kertaalleen kuivunut ja onko sen kosteuspitoisuus kasvamassa vai vähenemässä. Tämän hystereesi-ilmiön syvin olemus kosteuden siirtymisen teorian kannalta ei ole täysin selvä, mutta kuivauksen kannalta riittää yleensä tietää materiaalin desorptiokäyrä, koska kosteus on tällöin pääasiassa monotonisesti vähenevä. Sorptiokäyrän kokeellinen määrittäminen on sinänsä yksinkertaista lukuunottamatta hyvin korkeita ilman suhteellisia kosteuksia. Tällöin koetta vaikeuttavat toisaalta suurten RH-arvojen vaikea kontrollointi ja mittaus sekä toisaalta se, että puu ei kosteuden lähestyessä 100 %:a enää kuivu. Teoreettisella tasolla tarkasteltuna puu päinvastoin kyllästyy 100 %:n suhteellisessa kosteudessa vedellä myös soluonteloiden osalta, koska sielläkin vallitseva höyrinpaine on muun muassa kapillaarissa vallitsevan veden pinnan kaareutumisen ja veden epäpuhtauden vuoksi aina ulkoista höyrinpainetta alhaisempi (Skaar 1988). On siis jo periaatteellisestikin mahdotonta määrittää PSK:n arvo kokeellisesti, joten kaikki PSK:n kokeelliset arvot ovat ekstrapolaatioita ja sellaisina liian alhaisia. Yhtälön (1) mukaista puun tasapainokosteutta ei siis pidäkään voida käytännössä saavuttaa.

Sorptiokäyrästäjä ovat tutkineet muun muassa Simpson (1971) ja korkeammissa lämpötiloissa Simpson ja Rosen (1981). Kattavimman koeaineiston muodostavat ilmeisesti USA:ssa 1950-luvulla tehdyt kokeet. Suomessa kuumakuivausta ovat tutkineet Siimes ja Uimonen (1953), jotka esittävät tasapainokosteuskäyrästäön aina 150 °C-asteeseen saakka, tosin alkuperäistä lähdettä mainitsematta. Tämä käyrästä voidaan esittää Hailwood-Horrobin sorptioteorian mukaisena numeerisena sovitteena seuraavasti:

$$\frac{RH}{100} = a_4 + \sqrt{a_4^2 + \frac{1}{a_1 a_2^2}} \quad (4)$$

$$a_1 = 34,91 - 0,1434T + 1,526 \cdot 10^{-4} T^2$$

$$a_2 = -0,06354 + 4,819 \cdot 10^{-3} T - 6,799 \cdot 10^{-6} T^2$$

$$a_3 = 721,1 - 4,222T + 9,043 \cdot 10^{-3} T^2$$

$$a_4 = \frac{1 - \frac{18\rho_w}{ua_3}}{2a_2} - \frac{1 + \frac{18\rho_w}{ua_3}}{2a_1 a_2}$$

Yhtälön (4) mukainen sorptiokäyrä ei kuitenkaan tuota PSK:n kohdalla yhtä korkeita arvoja kuin yhtälö (1), minkä vuoksi käyrästä on tarkoituksenmukaista korjata seuraavasti:

- sovitaan yhtälöstä (4) ratkaistu PSK:ta vastaava tasapainokosteus (RH=100) saavutettavaksi 98 %:n suhteellisen kosteuden arvolla
- lasketaan tätä suurempia suhteellisia kosteuksia vastaavat tasapainokosteuden arvot interpoloimalla näin saadusta ja yhtälöstä (1) lasketusta arvosta.

Näin saatu sorptioisotermi on hyvä aproksimaatio Simpsonin ja Rosenin (1981) esittämille mittaustuloksille. Ongelman muodostavat kuitenkin tilanteet, joissa puu on ulkoisen ylipaineen alaisena, eli kuivausilman märkälämpötila on yli 100 °C. Tämä vastaa tilannetta kuumakuivauksen aikana puun sisäosissa. Mittaustuloksia tältä alueelta ei ole saatavissa, mutta ainakaan Siimeksen ja Uimosen (1953) käyrästä ei ole näiltä osin uskottava: se antaa puunsiiden kyllästymispisteeksi jo 150 °C:n lämpötilassa alle 12 %. Kosteuden siirtymisen kannalta on kuitenkin olennaista pystyä jakamaan kokonaiskosteus sitoutuneen ja vapaan veden osuuksiin puun sisäosissa, joten lisäkokeet tältä alueelta ovat tarpeen.

3.2 JATKUVUUSYHTÄLÖ

Kosteuden siirtymistä materiaalissa mahdollisimman yleisellä tasolla kuvaa niin sanottu jatkuvuusyhtälö. Jatkuvuusyhtälö on luonteeltaan fysikaalinen tosiasia asiayhteydestä ja käytetystä matemaattisesta mallista riippumatta, sillä pohjimmiltaan se merkitsee vain ajatusta materian häviämättömyydestä. Sanallisena esityksenä se kertoo tietyssä tilavuudessa sijaitsevan massan muuttumisen nopeuden (so. aikaderivaatan) olevan yhtä kuin samaiseen tilavuuteen sen reunojen kautta saapuvan massan nettovirtaus, kun tarkasteltavalla aineella ei ole lähteitä eikä nieluja. Yhtälöksi kirjoitettuna tämä ajatus on

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V u dV + \oint_{\partial V} \mathbf{F}_u \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (5)$$

Tällainen sanallinen esitys pohjautuu virtausmekaniikassa yleiseen ns. Eulerin esitystapaan, jolloin tarkasteltava tilavuus V on avaruuteen kiinnitetty mielivaltainen tilavuus (kontrollitilavuus) ja kiinnostuksen kohteena ovat siis tietyssä avaruuden pisteessä tapahtuvat muutokset ajan suhteen. Yhdessä pisteessä tapahtuviin muutoksiin päästään raja-arvotarkastelujen kautta, jolloin integraaliyhtälö (5) muunnetaan osittaisdifferentiaaliyhtälöksi. Vaihtoehtoinen tapa olisi käyttää Lagrangen esitystapaa, jolloin tarkasteltavina ovat yksittäiset partikkelit ja tuloksena siis tiettyyn materiaalipisteeseen kulloinkin liittyvät suureet, kun materiaalipisteellä tarkasteltavassa ongelmassa ymmärretään nyt yksittäistä ‘kosteuspartikkeliä’.

Eulerin esitystapa voidaan nähdä syvällisemmin myös yhteytenä käytettävän matemaattisen mallin ja tarkasteltavan fysikaalisen rakenteen välillä. Se ei vaadi, että kontrollitilavuus on kooltaan infinitesimaalinen, vaan antaa mahdollisuuden muotoilla yhtälöt suoraan integraalimuodossa Whitakerin (1977) esityksen mukaisen alkeistilavuuden (representative elementary volume) yli. Ajatuksena on siis mahdollistaa mikrorakenteen unohtaminen matemaattista teoriaa formuloitaessa, mutta pitää se kuitenkin koko ajan taustalla tarkasteltaessa kosteuden erillisiä siirtymismekanismeja fysikaalisessa mallirakenteessa.

Yhtälössä (5) oleva vuontiheysvektori \mathbf{F} koostuu useasta eri osasta, joista kukin edustaa yhtä kosteuden siirtymismekanismia. Nämä ovat ominaisia eri kosteuden esiintymismuodoille ja näin myös tietylle kosteusalueelle. Tulee kuitenkin huomata, että eri ilmiöt ovat keskenään rinnakkaisia ja sinänsä toisistaan riippumattomia.

3.2.1 Vapaa vesi

Vapaa vesi on puun soluonteloissa sijaitsevaa nestemäistä vettä, joka liikkuu painegradientin vaikutuksesta. Painegradientti nestefaasissa aiheutuu kuivauksessa kahdesta eri syystä: toisaalta puussa oleva ilma ja vesihöyry aiheuttavat lämpötilan muutosten seurauksena paineen vaihteluita ja toisaalta kapillaari-ilmiö aiheuttaa aina ohuessa kapillaarissa olevaan nestefaasiin sitä ympäröivää kaasufaasia alemman paineen. Näin ollen nestefaasin paine on sama kuin vallitseva kaasufaasin kokonaispaine vähennettynä kosteudesta riippuvalla kapillaaripaineella, joka määräytyy puun soluonteloiden muodostaman kapillaariverkoston kokojakaumasta. Yhtälö kosteusvuon tiheyden vapaan veden komponentille on Darcyn laki

$$\mathbf{F}_l = -\frac{\rho_l}{\eta_l} \mathbf{K}_l \nabla(p_{tot} - p_c). \quad (6)$$

Kapillaaripaine riippuu aina nesteen pintajännityksestä, joka on lämpötilan vähenevä funktio. Kapillaaripaineen kosteusrippuvuus voidaan johtaa puun poikkileikkauksesta mikroskoopilla mitatusta kapillaarien kokojakaumasta, kun oletetaan, että vesi minimoi aina energiansa eli täyttää kapillaarit järjestyksessä pienimmästä alkaen. Kokojakauma on tällöin määritettävä niin suurelta alalta, että keväät- ja kesäpuun aiheuttama vaihtelu tasoittuu. Tällaisia mittauksia ovat tehneet muun muassa Absetz (1991a) ja Perré (1994a), joka on sovittanut tuloksensa valmiiksi kuusen kapillaaripainetta soluonteloiden täyttöasteen funktiona kuvaavaksi kaavaksi:

$$p_c(S) = \sigma(T) \cdot \left[\frac{a}{S + 0.005} - \frac{b}{1.02 - S} + c(1 - S) + d \right] \quad (7)$$

$$a = 3150$$

$$b = 1047 + 3,368\rho_w$$

$$c = 149,8\rho_w$$

$$d \text{ on määriteltävä ehdosta } p_c(1) = 0.$$

Huoneenlämpötilassa kapillaaripainetta on määritetty myös kokeellisesti sentrifugin avulla (Spolek ja Plumb 1981).

3.2.2 Sitoutunut vesi

Sitoutunut vesi kulkeutuu ei-kylläisessä soluseinämässä, jossa vesimolekyylit siirtyvät kohti puun pintaa seuraavaan vapaaseen sitoutumispaikkaan. Tämän kosteusliikkeen aiheuttavasta potentiaalista ei vallitse tutkijoiden keskuudessa minkäänlaista yksimielisyyttä, vaan useita vaihtoehtoisia teorioita on käytössä. Useimmat näistä pohjautuvat palautumattoman termodynamiikan teoriaan, mutta diffuusiomalleilla on omat kannattajansa. Hunter (1993) on osoittanut, että veden kulkeutumisen potentiaali on välttämättä yksikäsitteinen tilanfunktio, ja ehdottanut, että sitoutuneen veden kulkeutuminen on kuvattavissa yksinomaan höyryfaasin diffuusion yhtälöllä. Hänen teoriansa ei kuitenkaan nähtävästi sulje pois useiden rinnakkaisten kosteudensiirtymismekanismien olemassaolon mahdollisuutta, joten sitoutuneen veden höyryfaasista erillinen kosteusliike on ilmeinen tosiasia.

Erityisesti sitoutuneen veden kulkeutumisen problematiikkaa on tutkinut Siau (1985, 1993), jonka yhteistyössä lukuisten muiden tutkijoiden kanssa kehittämät mallit pohjautuvat kuitenkin stationääritilassa tehtyyn kuivan puun kosteuskäyttäytymisen havainnointiin. Siau'n kokeissa on ollut vaikuttamassa samanaikaisesti sekä kosteus- että lämpötilagradientti, joiden yhteisvaikutuksen selittämisessä hänen mallinsa näyttävät menestyvän sinänsä erinomaisesti. Tällaiset mallit sisältävät kuitenkin vain yhden vapaan parametrin, eikä niiden soveltaminen kuivaustilanteessa mitattuihin koetuloksiin ole näin ollen riittävällä tarkkuudella mahdollista.

Kuvatuista syistä käsillä olevassa mallissa on päädytty käyttämään sitoutuneen veden liikkeen kuvaamiseen yksinkertaista diffuusiomallia. Sitoutuneen veden pitoisuus on kylläisessäkin soluseinämässä kuitenkin lämpötilan myötä vaihteleva suure, joten se ei sellaisenaan kelpaa potentiaaliksi. Tämän vuoksi muodostetaan uusi potentiaali jota kutsuttakoon soluseinämän kylläisyysasteeksi. Sen avulla sitoutuneen veden vuontiheys on ilmaistavissa lausekkeena

$$\mathbf{F}_b = -\mathbf{D}_b \nabla \left(\frac{u_b}{u_{PSK}} \right). \quad (8)$$

Mittaustuloksia kuvaamaan käytetään eksponentiaalista diffuusiokertoimen lauseketta:

$$D_b = \exp(a_0 + a_1 \frac{u}{\rho_w} + a_2 T) \quad (9)$$

Tällainen teoria on käsiteltävä ensisijaisesti matemaattiseksi malliksi ilman sen syvällisempää yritystä sitoutuneen veden kosteusvuon todellisen aiheuttajan selittämiseksi. Diffuusiokertoimen lausekkeen (9) vakiot on sovitettava

kuivauskokeista saadun tiedon perusteella, joten tuloksena saadun mallin antamien arvojen vertailu Siaun koetuloksiin ei ole oikeutettua.

3.2.3 Vesihöyry

Vesihöyry kulkeutuu soluonteloissa ja niiden välillä soluhuokosten kautta. Höyryn kulkeutumiseen on laskettava myös soluseinämien läpi tapahtuva kosteuden liike, jossa vesi sitoutuu soluseinämään ja höyrystyy sen toiselta puolelta seuraavaan onteloon. Höyry kulkeutuu aina sekä diffuusion että kokonaispainegradientin vaikutuksesta. Diffuusiosta on kysymys molekyylien satunnaisliikkeen konsentraatioeroja tasaavasta vaikutuksesta (ns. Brownin liike), kun taas painegradientin aiheuttama konvektio merkitsee Newtonin 2. lain mukaista ulkoisen voiman aiheuttamaa vaikutusta. Nämä prosessit ovat rinnakkaisia ja tapahtuvat yleensä eri suuntiin. Painegradientin vaikutus on useassa tapauksessa dominoiva, mutta tämä ei merkitse sitä, ettei diffuusiota olisi olemassa.

Konvektiivinen vuo on matemaattiselta muodoltaan Darcyn laki. Diffuusiovuon tiheyden laskemiseksi oletetaan vesihöyry ja ilma ideaalikaasuiksi, jotka muodostavat soluonteloissa ideaalisen binäärisen seoksen. Tällöin kosteusvuon kokonaiskomponentti vesihöyryn osalta on kiinteässä koordinaatistossa ilmaistuna (Geankoplis 1984)

$$\mathbf{F}_v = -\frac{\rho_v}{\eta_g} \mathbf{K}_g \nabla p_{tot} - \rho_v a \mathbf{D}_{AB} \nabla \left(\frac{\rho_v}{\rho_v + \rho_a} \right). \quad (10)$$

Tässä yhtälössä esiintyvä vesihöyryn tiheys merkitsee nyt kyseisessä kohdassa vallitsevasta vesihöyryn osapaineesta laskettua vesihöyryn tiheyttä soluonteloissa.

3.3 ENERGIAKYHTÄLÖ

Energiayhtälön perusta on fysikaalisiin havaintoihin perustuva energian häviämättömyyden laki. Eulerin ajatusmallia käyttäen se merkitsee tietyssä tilavuudessa sijaitsevan kokonaisenergian muutosnopeuden olevan yhtä kuin kyseiseen tilavuuteen virtaavan energian vuo lisättynä sen sisällä sijaitsevien nielujen ja lähteiden yhteenlasketulla kokonaisteholla. Yhtälönä asia voidaan esittää suoraan integraalimuodossa:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V E dV + \oint_{\partial V} \mathbf{F}_E \cdot d\mathbf{S} = \int_V \left(Q_{RF} - Q_S \frac{\partial u}{\partial t} \right) dV. \quad (11)$$

Kokonaisenergiaksi on ajateltava puun ja sen sisältämän kosteuden eri faasien yhteenlasketun entalpian ja jonkin sovitun 0-tilan entalpian erotus. Tarkkaan ottaen tätä 0-tilaa ei tarvitse edes määrittellä, koska laskennassa tulevat

käsiteltäviksi vain kokonaisenergian muutokset ajan suhteen. Määrittelemällä kokonaisenergiaksi aina muuttumattomana pysyvää kuivan puun massaa kohti voidaan siis kirjoittaa

$$E = (c_l u + c_w \rho_w) T . \quad (12)$$

Tällöin on merkityksettöminä tekijöinä jätetty huomiotta sitoutuneen veden vapaata vettä suurempi ominaislämpökapasiteetti sekä vesihöyryn ja ilman entalpiasisällöt soluontelossa.

Energiavuon tiheys koostuu lämmön johtumisesta stationäärisessä aineessa sekä massan nettosiirtymään liittyvästä entalpiavuosta. Lämmön johtumista kuvaa Fourier'n laki ja siihen liittyvä ortotrooppinen lämmönjohtavuustensori. Massavuohon liittyvä entalpiavuo koostuu kunkin siirtyvän faasin ominaisentalpiasta, joten energiavuon kokonaistiheydeksi saadaan vektorisumma

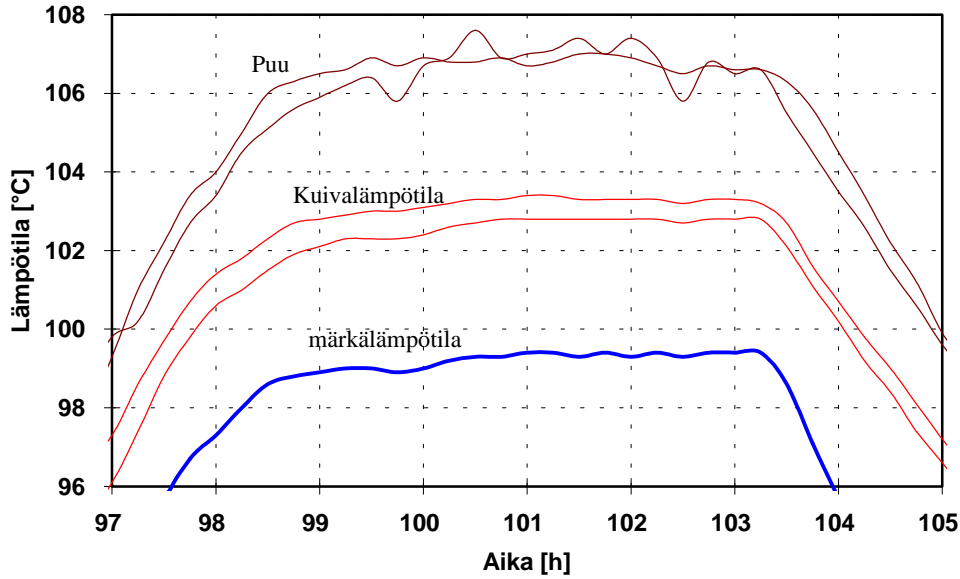
$$\mathbf{F}_E = -\Lambda \nabla T + \mathbf{F}_l h_l + \mathbf{F}_b h_b + \mathbf{F}_v h_v + \mathbf{F}_a h_a . \quad (13)$$

On huomattava, että yleisessä tapauksessa tämän yhtälön eri komponentit vaikuttavat eri suuntiin.

Yhtälön (11) oikean puolen energian lähteenä kysymykseen tulee sähkömagneettisella energialla tapahtuva puun lämpeneminen, joka riippuu monimutkaisella tavalla paitsi puun kosteudesta ja lämpötilasta myös sitä aiheuttavasta ulkoisesta sähkökentästä. Energian nieluksi puussa on käsiteltävä sitoutuneen veden pitoisuuden muutoksiin liittyvä sorptioenergia, joka riippuu puun kosteudesta. Sen suuruus voidaan laskea Avramidiksen ja Dubois'n (1992) antaman empiirisen kaavan avulla:

$$Q_s = -7.67 \cdot 10^5 \cdot \exp\left(-11.7 \frac{u}{\rho_w}\right) . \quad (14)$$

Sorptioenergia kuluu veden höyrystyslämmön lisäksi puuta kuivattaessa PSK:n alapuolella. Vastaavasti kuivan puun kostuessa sorptioenergia vapautuu lämpöenergiana. Ilmiö voidaan havaita sahatavaran kuivauksen tasaannutusvaiheen aikana (kuva 1), jolloin puun lämpötila kohoaa sorptiolämmön vaikutuksesta ympäröivän ilman lämpötilaa korkeammaksi.



Kuva 1. Sorptiolämmön aiheuttama puun lämpötilan nousu kuivalämpötilan yläpuolelle kahdessa eri koekappaleessa loppuhöyrytyksen aikana.

3.4 KOKONAISPAININE

Kaasufaasin kokonaispaine puun soluontelossa on sen täyttävien vesihöyryn ja ilman osapaineiden summa. Kokonaispainegradientti aiheuttaa edellä kuvatuilla tavoilla sekä vapaan veden että vesihöyryn konvektiiviset vuot, joilla on olennainen vaikutus kuivumisprosessissa. Näin ollen kokonaispaineen tunteminen on olennaisimpia tekijöitä kuivauksen mallintamisessa. Kun vesihöyryn osapaine voidaan laskea yhtälön (2) esittämällä tavalla, on kokonaispaineen tuntemiseen riittävä tieto soluonteloissa olevan ilman määrä. Ilma voidaan puun kuivumisen mallintamisessa ymmärtää yhdeksi puun kannalta irrektiiviseksi kaasuksi, vaikka se todellisuudessa onkin useamman komponentin seos. Ei ole mitään syytä olettaa, että puu läpäisisi ilman eri komponentteja eri tavoin eli kykenisi suodattamaan ilman sisältämiä eri kaasuja.

Ilman pitoisuus on laskettavissa yhtälöä (5) vastaavasta jatkuvuusyhtälöstä, jossa konservatiivisena suurena on ilman massa tilavuutta kohti:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho_a dV + \oint_{\partial V} \mathbf{F}_a \cdot d\mathbf{S} = 0. \quad (15)$$

Massa voidaan muuttaa paineeksi, kun oletetaan ilman noudattavan ideaalikaasun tilanyhtälöä.

Koska ilma on toinen komponentti vesihöyryn ja ilman seoksesta, se liikkuu puun sisällä täysin analogisesti vesihöyryn kanssa. Ilman massavuon tiheys koostuu siis diffusiivisesta ja konvektiivisesta osuudesta ja on lausekkeen (10) kanssa yhtenevä:

$$\mathbf{F}_a = -\frac{\rho_a}{\eta_g} \mathbf{K}_g \nabla p_{tot} - \rho_a a \mathbf{D}_{AB} \nabla \left(\frac{\rho_a}{\rho_v + \rho_a} \right). \quad (16)$$

3.5 REUNAEHDOT

Yhtälöt (5), (11) ja (15) kuvaavat kosteuden liikettä huokoisen, hygroskooppisen aineen sisällä. Kiinnostuksen kohteena oleva laskenta-alue kattaa kuitenkin aina myös puun ja sitä ympäröivän ilman välisen rajapinnan, jossa lämpö siirtyy ilmasta puuhun ja kosteus vastaavasti puusta ilmaan. Tämän rajapinnan tarkastelemiseksi kuivumisen simulointi tulisi ulottaa tarkasti myös puuta ympäröivän kostean ilman virtauksiin ja näin onkin eräissä tutkimuksissa menetelty (Masmoudi & Prat 1991). Tällöin puun ulkopuolista virtausta kuvaavat kitkallisen, kokoonpuristumattoman virtauksen Navier-Stokesin yhtälöt ja myös ulkoinen virtauskenttä on tarkasti ottaen ajasta riippuva. Lisäksi ulkoisen virtauskentän kuvaukseen tarvitaan turbulenssimalli, koska geometrian ja puun pinnan epätasaisuuden vuoksi virtaus on aina turbulenti ainakin osassa kuivaamaa.

Ulkoisen virtauskentän kuvaus kuivaamossa on vaatavuudeltaan ilmeisesti samaa luokkaa oleva ongelma kuin puun sisällä tapahtuvan kosteudensiirron matemaattinen mallintaminen. Näin ollen voidaan olettaa, että nykyisellä puun materiaaliominaisuuksien tuntemuksen tasolla ulkoisen kentän kuvauksen sisällyttäminen kuivauksen simulointimalliin ei paranna laskennalla saavutettavissa olevaa tarkkuutta. Sen sijaan tarpeellista voisi olla lämmön ja massan siirtymistä rajapinnalla kuvaavien kertoimien tarkastelu virtausmekaanisin perustein erilaisilla kuivaamon ja kuivauskuorman geometrioilla, jolloin voitaisiin saada lisävalaistusta muun muassa lämmönsiirtokertoimen vaihteluun kuivattavan kappaleen leveyden funktiona. Asialla on merkitystä etenkin kosteudeltaan korkean pintapuun kuivumista tarkasteltaessa, jolloin kuivauksen perusongelmana on saada mahdollisimman tehokkaasti lämpö siirretyksi kuivattavaan puuhun. Lämmönsiirtokertoimen vaihtelu tällaisessa tilanteessa on myös kokeellisesti todennettu.

3.5.1 Ulkoiset olosuhteet: märkä- ja kuivalämpötila sekä suhteellinen kosteus

Puun kuivumisen missä tahansa tapauksessa määräävät luonnollisesti ne ulkoiset olosuhteet, joille se on altistettu. Ulkoisten olosuhteiden tuntemiseksi on tiedettävä vallitseva lämpötila ja kokonaispaine sekä vesihöyryn osapaine. Vesihöyryn osapaineen kanssa ekvivalentteja suureita ovat märkälämpötila, suhteellinen kosteus, ilman vesisisältö ja kastepiste. Kun yksi näistä on ulkoisen lämpötilan ja kokonaispaineen ohella tunnettu, kaikki muut voidaan laskea. Käytännössä kuivausilman kosteuden määrittäminen perustuu joko märän lämpötilan

mittaukseen määritelmänsä perusteella kosteaan kankaaseen kiedotun lämpömittarin avulla tai kastepisteen mittaukseen sähköisellä anturilla. Myös puun tasapainokosteuden mittaus ohuesta lastusta sähköisen kosteusanturin avulla on mahdollista, mutta näin saavutettavissa oleva tarkkuus on selvästi muita mainittuja menetelmiä huonompi. Lisäksi kysymyksessä on tällöin ilman kosteuden epäsuora mittaus, jonka tulos riippuu myös käytetyn lastun ominaisuuksista.

Simuloinnissa käytettäväksi tuleva ilman kosteutta kuvaava suure on joka tapauksessa vallitseva vesihöyryn osapaine, joka on laskettava mitatusta ilman vesisisältöä kuvaavasta suureesta. Jos on mitattu märkälämpötila, vesihöyryn osapaine saadaan Krischerin ja Kastin (1978) mukaan seuraavasti:

$$p_v = p_{sat}(T_M) - 6,48 \cdot 10^{-4} \left[1 - \frac{p_{sat}(T_M)}{p_{tot}} \right] p_{tot} \left(1 + \frac{T_w}{1000} \right) (T_K - T_M). \quad (17)$$

Jos mitattu suure on suhteellinen kosteus, saadaan suoraan määritelmän perusteella yhtälö

$$p_v = \frac{RH}{100} \cdot p_{sat}(T). \quad (18)$$

3.5.2 Lämmönsiirtokerroin

Ulkoisen virtauksen ominaisuuksia lämpötilan, ilman vesisisällön ja kokonaispaineen lisäksi kuvaa puun pinnalla vallitseva lämmönsiirtokerroin. Se kuvastaa lähinnä ulkoisen virtauskentän nopeus- ja lämpötilajakaumaa tarkasteltavan pinnan välittömässä läheisyydessä ja riippuu muista virtauksen ominaisuuksista vain hyvin heikosti. Myöskään se ei siis ole millään tavoin puun tai muun pinnan materiaalin ominaisuus. Lämmönsiirtokertoimen määräävä nopeusjakauma riippuu virtauksen keskimääräisen nopeuden lisäksi sen turbulenssiasteesta, jonka kuivaustapauksessa kuivaamon geometria ja sahatavaran pinnan laatu määräävät. Keskimääräinen nopeus voidaan mitata tunnetusti kuumalanka- tai siipipyöranemometrillä. Myös turbulenssiasteen kokeellinen määrittäminen kuumalanka-anemometrillä on mahdollista, mutta näin saadun tiedon hyödyntäminen on epätasaisia pintoja koskevien mittaustulosten vähyyden vuoksi ilmeisesti vaikeaa. Lämmönsiirtokertoimeen liittyvää problematiikkaa on nimenomaan sahatavaran kuivauksen näkökulmasta tarkastellut Laurila (1993), mutta hänen esittämänsä tulokset eivät muiden kirjallisuudessa esiintyvien mittaustulosten valossa ole kaikilta osin uskottavia.

Virtausmekaniikan rajakerrosteorian mukaisesti kiinteällä pinnalla oletetaan aina vallitsevan liikkumaton infinitesimaalinen ainekerros, jonka läpi johtumalla lämpö siirtyy virtauksesta kappaleeseen. Lämmönsiirtokerroin voidaan laskea sekä

laminaarissa että turbulentissa virtauksessa sen pintaa vastaan kohtisuorasta lämpötilajakaumasta näin ollen seuraavasti:

$$\alpha \cdot (T_K - T^*) = \lambda_a \frac{\partial T}{\partial n}. \quad (19)$$

Määritelmän perusteella lämmönsiirtokerroin on aina laskettavissa virtauksesta pintaan konvektion seurauksena siirtyvästä lämpövuon tiheydestä seuraavasti:

$$\alpha = \frac{F_E}{T_K - T^*}. \quad (20)$$

Lämmönsiirtokerroimen kokeellinen määrittäminen perustuu tähän yhtälöön. Tällöin siirtyvä lämpövuoto määritetään epäsuorasti kuivumisnopeuden kautta, kun oletetaan hyvin märkää puuta (tuore pintapuu) kuivattaessa kaiken siirtyvän energian kuluvan veden höyrystämiseen. Puun lämpötilan oletetaan olevan vakio ja yhtä kuin virtauksen märkälämpötila, joka siis mitataan. Tuloksena saadaan keskimääräinen lämmönsiirtokerroin käytetylle geometrialle ja ilman nopeudelle. Käytännön koetulosten mukaan kuivuminen kuitenkin hidastuu jatkuvasti jo kuivauksen alkuvaiheessakin, joten paras tulos lämmönsiirtokerroimelle saadaan määrittämällä kuivumisnopeus aivan kuivumisen alussa.

Tulee kuitenkin huomata, että lämmönsiirtokerroimen riippumattomuus muista virtauksen suureista ei merkitse sitä, etteikö lämmönsiirtokerroin lainkaan muuttuisi esimerkiksi kuivaamon lämpötilan noustessa ulkolämpötilasta kuivauslämpötilaan. Tämä muutos johtuu ilman nopeuden kasvusta virtausvastuksen vähetessä, jolloin tietyllä puhallinteolla aikaansaattava ilman nopeus on lämpötilan funktio. Sama ilmiö huomattavasti voimakkaampana ilmenee ulkoista painetta pienennettäessä (alipainekuivaus), jolloin ilman virtausnopeuden määrittäminen ei siis riitä lämmönsiirtokerroimen arvioinnin perustaksi.

3.5.3 Energiayhtälön reunaehto

Energiayhtälöön (11) liittyy reunaehtona energiavuon tiheys, joka lasketaan edellä kuvatulla tavalla lämmönsiirtokerroimen kautta. Näin saatava energia ei kuitenkaan absorboitu puuhun kokonaisuudessaan, vaan osa siitä kuluu välittömästi puun pinnalla tapahtuvaan veden höyrystymiseen. Energiaa voi lisäksi absorboitua myös suoran lämpösäteilyn muodossa esimerkiksi viilua kuivattaessa, jolloin yleisessä tapauksessa energiayhtälön kannalta puuhun sen pinnan kautta saapuva lämpövuon kokonaistiheys on

$$\mathbf{F}_E \cdot \mathbf{n} = \alpha(T^* - T_K) + P_{IR} - h_v \mathbf{F}_u^* \cdot \mathbf{n} - h_a \mathbf{F}_a^* \cdot \mathbf{n}. \quad (21)$$

Hyvin korkeissa lämpötiloissa säteilyenergiaa syntyy myös vesihöyryn aiheuttamasta säteilylämmöstä, jonka osuus joissakin erikoistapauksissa saattaa muodostua merkittäväksi. Ilmeisesti lähinnä tähän ilmiöön perustuu kirjallisuudessa esiintyvä käännepisteenä (inversion point) tunnettu lämpötila, josta alkaen kuivausilman kosteuden lisääminen eli märkälämpötilan kasvattaminen nopeuttaa kuivumista. Fysikaalisena taustana asialle on vesihöyryn ilmaa ratkaisevasti suurempi emissiokerroin, mikä johtuu vesimolekyylien polaaraisuudesta (Incropera ym. 1990). Lämpötilan käännepisteen arvo riippuu tarkasteltavasta geometriasta, mutta on joka tapauksessa yli 150 °C. Puun kuivauksessa asiasta ei kuitenkaan ole tilastollisen tarkastelun kestävästä kokeellista näyttöä, vaikka Taylor (1993) 150 °C lämpötilassa saamiaan tuloksia tällä selittääkin.

3.5.4 Jatkuvuusyhtälön reunaehto

Jatkuvuusyhtälön (5) luonnollinen reunaehto on kosteusvuon tiheys. Sen oletetaan olevan verrannollinen puun pinnalla ja sitä ympäröivässä ilmassa vallitsevien vesihöyryn osapaineiden erotukseen (Perré 1994a, Salin 1990). Verrannollisuuskertoimenä on massansiirtokerroin, jonka laskenta perustuu rajakerrosteorian mukaiseen olettamukseen lämmön- ja massansiirron analogiasta. Tällöin oletetaan puusta haihtuvan kosteusvuon olevan sama kuin vapaalta vesipinnalta haihtuva vuo, jota korjataan puun pinnan kosteudesta riippuvalla korjauskertoimella. Tämänkaltaisen korjauskertoimen käyttöä on esittänyt muun muassa Plumb ym. (1985). Korjauskertoimen käyttö on mittautustenkin mukaan tarpeellista, koska puun pinnan lämpötila alkaa käytännössä nousta märkälämpötilan yläpuolelle jo hyvin aikaisessa kuivumisen vaiheessa, puun pinnan kosteuden ollessa vielä selvästi PSK:n yläpuolella. Tämä korjauskerroin on määritettävä märän, ohuen pintapuun kuivauskokeista, koska tällöin asialla on suurin käytännön merkitys. Sydänpuun voidaan olettaa olevan pinnan laadun suhteen pintapuun kanssa niin samanlainen, että sille voidaan käyttää pintapuukokein määritettyä korjauskerrointa.

Vapaalta vesipinnalta haihtuva kosteusvuon tiheys ja siihen liittyvä massansiirtokerroin voidaan laskea Lampisen (1986) yhtälöiden mukaisesti:

$$F_u = \frac{k_c}{R_v T} (p_v^* - p_v) = \beta (p_v^* - p_{v,\infty}) \quad (22)$$

$$k_c = \frac{P_{tot}}{P_{BM}} k_c'$$

$$P_{BM} = \frac{P_a - p_a^*}{\ln \frac{P_a}{p_a^*}}$$

$$k_c' = \frac{\alpha}{c_p \rho_a} L e^{1-n}$$

Yhtälöä (22) johdettaessa on rajakerrosteorian mukaisesti oletettu massan siirtyvän diffuusion vaikutuksesta puun pinnassa olevan infinitesimaalisen ohuen liikkumattoman ilmakerroksen läpi. Tätä ilmentää tekijän p_{BM} muuttuminen määrittelemättömäksi, kun kuivausilman ilmasisältö vähenee kohti nollaa. Tällöin vesihöyryn osapaineet puun pinnalla ja kuivausilmassa ovat samat, eikä diffuusiota voi enää tapahtua. Sen sijaan pinnalla tapahtuu kiehumista, jolloin kosteusvuon tiheyttä kuvaavaan yhtälöön (22) on lisättävä pinnassa vaikuttavan painegradientin aiheuttama osuus kosteusvuohon. Yhteensä saadaan siis lauseke

$$\mathbf{F}_u^* \cdot \mathbf{n} = \beta (p_v^* - p_{v,\infty}) - \left(\mathbf{K}_g \frac{\rho_v}{\eta_g} + \mathbf{K}_l \frac{\rho_l}{\eta_l} \right) \nabla p_{tot} \cdot \mathbf{n}. \quad (23)$$

Lauseke (23) vastaa täysin yhtälön (10) mukaista höyryn kulkeutumista puun sisäosissa. Se koostuu diffusiivisesta ja konvektiivisesta osasta, joista jälkimmäinen puolestaan jakautuu nestefaasin ja kaasufaasin osuuksiin. Nestefaasin osuutta voidaan kokeellisesti ilmentää lämmittämällä märkää puuta mikroaalloilla, jolloin muodostuva puun sisäinen paine aiheuttaa veden poistumista nesteen muodossa syitä vastaan kohtisuorasta leikkauspinnasta. Kaasufaasin osuus ilmenee simuloitaessa tavanomaisesta kuumakuivausta, jolloin tämä reunavuon konvektiivinen komponentti näkyy puun kuivumisnopeuden lisäyksenä.

Kirjallisuudessa julkaistuissa puun kuivumisen matemaattisissa malleissa painegradientin osuus jatkuvuusyhtälön reunaehdosta on poikkeuksetta jätetty pois. Tällöin laskennan tuloksena on saatu kosteuden kerääntyminen sahatavaran pätyyn, kun on tarkasteltu kuivumista säteen ja syyn suuntien muodostamassa kaksiulotteisessa tapauksessa. Tulos vaikuttaa epärealistiselta, mutta ajatuksen hylkääminen vaatii vielä kokeellista vahvistusta.

3.5.5 Kokonaispaine reunalla

Kaasufaasin kokonaispaine on fysikaalisin perustein aina matemaattisessa mielessä jatkuva suure, joten näin on oltava myös puun ja sitä ympäröivän ilman

välisessä rajapinnassa. (Epäjatkuvuus aiheuttaisi äärettömän painegradientin kautta äärettömän massavuonon, jos permeabiliteetti ei ole nolla.) Näin perustellen saadaan ilman tiheyttä puussa kuvaavan jatkuvuusyhtälön (15) reunaehdoksi puun pinnalla

$$\rho_a^* = \frac{P_{tot} - P_v^*}{R_a T^*}. \quad (24)$$

3.6 ALKUEHDOT

Alkuehdot puun kuivumista kuvaaville integraaliyhtälöille saadaan kasvavassa puussa vallitsevasta tilanteesta. Puun alkukosteus on mittausten mukaan ytimestä pintaa kohti kasvava funktio, joka lisäksi riippuu ratkaisevasti siitä, onko kysymyksessä sydän- vai pintapu. Simuloinnin kannalta on tarkoituksenmukaista olettaa alkukosteuden olevan vakio läpi puun siten, että pintapuun alkukosteus on 120-160 % ja sydänpuun 35-40 %. Kuusen arvot ovat tyypillisesti hieman korkeammat kuin männyn, mikä ilmeisesti johtuu sen mäntyä alemmasta tiheydestä. Olennaista on kuitenkin ymmärtää puun alkavan kuivua välittömästi kuorinnan ja erityisesti sahauksen jälkeen, jolloin olosuhteista riippuen jo yhdenkin vuorokauden esikuivuminen riittää kuivattamaan puun pinnan PSK:n alapuolelle ja siten aiheuttamaan pinnan halkeilua. Tilannetta pahentavat kuivan sään lisäksi kappaleiden väljä ladonta (sahatavara rimoilla), suora auringonpaiste ja ilmavirtaukset. Näiden tekijöiden huomiointi on siis simuloinnin antamaa tulosta erityisesti halkeilun kannalta tarkasteltaessa ensiarvoisen tärkeää.

Lämpötilan voidaan puussa olettaa ennen kuivausta olevan vakio läpi kappaleen ja yhtä kuin ulkoinen lämpötila. Jos lämpötila on alle 0 °C, on syytä olettaa vapaan veden olevan jäässä. Tämä lisää puun lämmitykseen tarvittavan energian tarvetta ja näin hidastaa puun lämpenemistä.

Kokonaispaineen osalta ei ole syytä olettaa, että puussa vallitsisi niin paljon ulkoisesta paineesta poikkeava paine, että asialla olisi kuivumisen kannalta merkitystä. Kokonaispaineen alkuehtona on siis ulkoista ilmanpainetta vastaava vakiopaine. Paineen muutosten tasaantumiseen menee kuitenkin aikaa, joten alipainekuivauksen simuloinnin tapauksessa kuivaamon paineen alenemiseen kuivauksen käynnistysvaiheessa on kiinnitettävä erityistä huomiota.

4 MATERIAALIOMINAISUUDET

Esitetty puun kuivumisen matemaattinen malli sisältää noin kymmenen vapaata parametria, joiden avulla malli on liitettävä reaalimaailmaan. Puhtaasti tieteellisistä lähtökohdista katsoen kukin parametri olisi määritettävä muista riippumattomasti käyttämällä pieniä koekappaleita, jolloin eri tekijöiden väliset suhteet saataisiin varmalta pohjalta oikeiksi. Tällainen lähestymistapa vaatii kuitenkin jo yhden parametrin määrittämiseksi suuren määrän laboratorikokeita, minkä lisäksi kaikkien tekijöiden muista riippumaton määrittäminen ei ole edes mahdollista. Alhaisemmissa lämpötiloissa tehdyn kuivauksen mallintamisesta saatujen kokemusten perusteella ei ole myöskään selvää, että tällainen lähestymistapa johtaa toimivuudeltaan edes välttävään lopputulokseen. Tämän vuoksi tarvittavat materiaaliominaisuudet päätettiin tämän projektin tarpeisiin määrittää suoraan kuivauskokeiden antamien tulosten perusteella.

4.1 SYDÄNPUU JA PINTAPUU

Sekä kuusen että männyn rungossa erottuvat erityisesti heti kaadon jälkeen selvästi toisistaan poikkeavat sisempi sydänpuuosa ja ulompi pintapuosa. Sydänpuuosa alkaa muodostua puun solujen kuollessa viimeistään muutaman kymmenen vuoden ikäisinä, ja näin ollen se kasvaa jatkuvasti (Kärkkäinen 1985). Ilmiö esiintyy kaikilla puulajeilla, mutta kaikilla lajeilla selvästi havaittavaa ulkonäöllistä eroa ei synny. Sydänpuun osuus koko rungon tilavuudesta kasvaa koko ajan puun vanhetessa, joten samanlaisissa olosuhteissa kasvaneita yhden puulajin edustajia tarkasteltaessa sydänpuuosuus on likimain puun iän eli rungon halkaisijan funktio. Tämä johtaa sahatun sydäntavaran kohdalla yleensä sydänpuuosuuden kasvuun lankun dimensioiden kasvaessa, sillä sahaus suoritetaan pääsääntöisesti järeimmän tukista saatavilla olevan dimension mukaan.

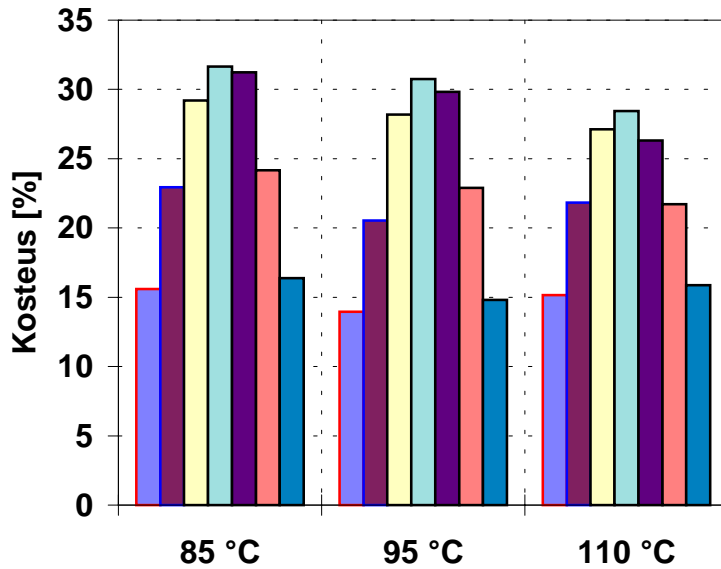
Sydänpuu poikkeaa kosteudensiirto-ominaisuuksiltaan sitä ympäröivästä pintapuusta ratkaisevasti. Alkukosteus on sekä kuusella että männyllä selvästi pintapuun alkukosteutta pienempi (koivulla näin ei ole), mutta siitä huolimatta sydänpuun ja pintapuun välisen rajapinnan läpi ei kasvavassa puussa tapahdu kosteuden siirtymistä. Absetzin (1991b) mittauksen perusteella sydänpuun ja pintapuun välisen tasapainokosteuden ero koskee vain vapaan veden kosteusaluetta eli PSK:n alapuolella sydänpuu ja pintapuut ovat keskenään kosteustasapainossa ollessaan samassa kosteuspitoisuudessa. Tämä johtuu ainakin osittain siitä, että sydänpuun solujen muodostamat kapillaarit ovat pintapuun kapillaareja pienempiä (Absetz 1991a), jolloin saman kapillaaripaineen aiheuttamiseen riittää pienempi kyllästymisaste. On myös esitetty (Perré 1994b), että kasvavassa puussa vallitseva sydänpuun ja pintapuun välinen kosteusero olisi ilmiönä dynaaminen ja että kosteudensiirtoa alkaisikin tapahtua pintapuusta sydänpuuhun, kun puu kaadetaan.

4.2 PERMEABILITEETTI

Pääasiallinen kosteuden siirtymistä puussa kuvaava ominaisuus kosteusvuon tiheyden eri komponenteissa on permeabiliteetti eli läpäisevyys. Permeabiliteetti on nesteen suhteen eri asia kuin kaasun suhteen, mutta kummassakin tapauksessa se on tarkasteltavan huokoisen aineen sisäisen rakenteen yksinomainen ominaisuus. Täten sen ei pitäisi riippua esimerkiksi siitä kaasusta, jolla mittaus sen määrittämiseksi tehdään, vaan tämän ottaa huomioon kaasun viskositeetti yhtälössä (10). Nesteen suhteen tilanne on periaatteessa sama, mutta tarkasteltaessa molekyylikooltaan ja viskositeetiltaan kovin erilaisia nesteitä eroja voidaan kyllä puussa havaita, jolloin kysymys on nesteen molekyylien 'mahtumisesta' rakenteen sisään.

Muun muassa Tesoron ym. (1974) mukaan permeabiliteetti sekä kaasun että nesteen suhteen riippuu materiaalin kyllästysasteesta eli siitä, kuinka suuren tilavuusosuuden puun huokosista tarkasteltava faasi täyttää. Riippuvuus on tällöin potenssifunktion kaltainen käyrä, jolloin nesteen permeabiliteetti putoaa nolnaan kosteuden alentuessa PSK:n kohdalle. Samaisen ilmiön ovat havainneet Spolek ja Plumb (1981) sentrifugitutkimuksessaan, jossa permeabiliteetin esitetään olevan nolla jo puunsyiden kyllästymispistettä korkeamman ns. vähentymättömän kyllästysasteen (irreducible saturation) kohdalla. Syyksi ilmiölle esitetään nestefaasin jatkuvuuden loppuminen. Tämän kapillaari-ilmiön vaikutusalueen alarajaksi mainitaan kyllästysaste 10 %, joka vastaa likimain puun kosteutta 15 %-yksikköä PSK:n yläpuolella.

Havupuun sydänpuussa kohdalla irreducible saturation -pisteen olemassaolo merkitsisi sitä, että vapaa vesi ei liikkuisi puussa lainkaan, koska alkukosteus on tyypillisesti vain luokkaa $35 \% \approx \text{PSK} + 5 \%$ -yksikköä. Tällöin PSK:n kohdalle syntyisi väistämättä merkittävä kosteusgradientti. Kuivauskokeista saadut tulokset (kuva 2) osoittavat kuitenkin selvästi, että myös puun keskiosan kosteus PSK:n yläpuolella alkaa selkeästi alentua heti kuivauksen alettua ja että puun keskiosiin ei milloinkaan muodostu suurta kosteusgradienttia. Kokeet on tehty nimenomaan sydänpuulla, joten on pääteltävä, että irreducible saturation -pisteen sisältävä ajatusmalli ei sovellu ainakaan suomalaisen sydänpuun kuivumiskäyttäytymisen kuvaamiseen.



Kuva 2. Sydänpuun sisäinen kosteusjakauma kuivumisen alkuvaiheessa.

4.2.1 Aspiroituminen

Yleisesti puun kuivumista tarkastelevissa matemaattisissa esityksissä oletetaan puun sisäisen geometrian pysyvän kuivumisen aikana muuttumattomina. Tämä ilmenee erityisesti kaasunläpäisevyyden riippumattomuutena puun kosteudesta, mikä ainakaan havupuun sydänpuulle ei aspiroitumisilmiön vuoksi ole käypä ajattelumalli. Aspiroituminen merkitsee solujen välisen rengashuokosen toruksen liimautumista kiinni siten, että huokonen veden läpäisevyyden kannalta lähes sulkeutuu. Ilmiötä mainitaan olevan kahta tyyppiä (Kärkkäinen 1985): sydänpuun muodostumiseen liittyvä aspiraatio ja kuivumisaspiraatio. Ilmiöiden eroista ja yhtenevyyksistä ei vallitse yksimielisyyttä, mutta joka tapauksessa molempia ilmiöitä voidaan pitää palautumattomina.

Aspiroitumisilmiö ja erityisesti sen palautumattomuus merkitsee kuivumisen kannalta sitä, että puuaineksen kaasunläpäisevyyttä (permeabiliteettiä) on pidettävä muuttuvana suurena. Tällöin permeabiliteetti alkaa pienentyä puun kosteuden saavuttaessa PSK:n ja sen määrää alin puun historiansa aikana saavuttama paikallinen kosteuspiitoisuus. Nesteen suhteen permeabiliteettiä sitä vastoin on pidettävä vakiona, koska nestefaasi voi tehtyjen oletusten mukaan esiintyä vain PSK:n yläpuolella, jolloin puun sisäisessä rakenteessa ei vielä tapahdu muutoksia. Tilanne voisi olla erilainen, jos tarkastelu halutaan ulottaa koskemaan jo kerran kuivumiseen puun kostumista uudelleen esimerkiksi puisen rakenteen kastuessa tai tarkasteltaessa kyllästystä. Tällöin permeabiliteetin voidaan olettaa olevan alentunut aspiroitumisilmiön vuoksi myös nesteen suhteen.

5 TEORIAN SOVELLUS SAHATAVARAN KUIVAUKSESSA

Esitetty yleinen teoria puun kuivumiselle antaa mahdollisuudet rakentaa simulointiohjelma, jonka avulla voidaan tarkastella tietyn muotoisen puukappaleen kuivumista annetuissa ulkoisissa olosuhteissa. Teoria koostuu kolmessa ulottuvuudessa kirjoitetuista integraaliyhtälöistä, jotka on suuriakin yksinkertaistuksia tehtäessä ja helpollakin geometrialla aina ratkaistava numeerisesti. Numeerisen ratkaisumenetelmän johtaminen tälle yhtälöryhmälle on sinänsä suoraviivaista, mutta useimmissa tapauksissa täydellisten kolmiulotteisten yhtälöiden käyttö ei ole tarpeellista. Tehdyissä koekuivauksissa on havaittu syyn suuntaisen kosteuden siirtymisen olevan merkitykseltään vähäistä jo 1,2 metriä pitkissä havusahatavarakappaleissa, joten tarve kolmiulotteisen analyysin käyttöön rajoittuu mitoiltaan pieniin kappaleisiin (aihiot) ja kenties lehtipuiden kuivauksen tarkasteluun. Kolmiulotteinen kosteudensiirron analyysi ei ole tarpeellinen myöskään kolmiulotteisen jännityslaskennan lähtökohtana esimerkiksi sahatavaran kieroutumista analysoitaessa, koska tällöinkin päätyvaikutukset ovat merkitykseltään vähäisiä.

Kuvatuista syistä puun säteen ja tangentin suunnat sisältävä kaksiulotteinen poikkileikkaus on siis kuivumisen kannalta kiinnostavin. Sen analysointi antaa mahdollisuudet kuivumisjännitysten laskennalliseen määrittämiseen ilman suuria yksinkertaistuksia, jos käytettävissä on nämä suunnat kattava virumismalli. Toisaalta tyypillisen sahatavaran dimensiot ovat sellaiset, että kosteuden siirtyminen on olennaisesti yksiulotteinen ilmiö ja syrjien vaikutus poikkileikkauksen kosteusjakaumaan vain vähäinen. Alemmista lämpötiloista saatujen kuivauksen simuloinnin kokemusten perusteella (Ranta-Maunus ym. 1995) voidaankin olettaa, että keskimääräinen kosteus ja puun pinnan halkeilu on myös kuumakuivauksessa selvitettävissä yksiulotteisella analyysillä. Sisähalkeilun mallintaminen ei näin kuitenkaan ole mahdollista.

5.1 MALLIN YKSINKERTAISTAMINEN

Puu on ortotrooppinen aine, jossa on erotettavissa kolme toisiaan vastaan kohtisuoraa suuntaa: säteen, tangentin ja syyn suunta. Lähinnä puun solujen syiden suuntaisesta asennosta johtuen kosteuden siirtyminen tapahtuu syyn suunnassa olennaisesti paremmin kuin syitä vastaan kohtisuorissa suunnissa. Säteen suunta puolestaan on kosteuden siirtymiselle suosiollisempi kuin tangentin suunta, koska tässä suunnassa olevat ydinsäteet muodostavat kosteuden siirtymiselle otollisia reittejä. Näin ollen kaikki kosteuden siirtymistä puussa kuvaavat materiaaliominaisuudet (diffuusiokerroin ja permeabiliteetit) ovat tarkastelusuunnasta riippuvia. Toimittaessa sylinterikoordinaatistossa nämä matriisit ovat muodoltaan diagonaalisia, mutta käytettäessä kosteuden siirtymistä kuvaavia yhtälöitä karteesisessä koordinaatistossa tarvitaan tarkasti laskettaessa siis aina koordinaatistomuunnos. Tämän välttämiseksi mallia voidaan

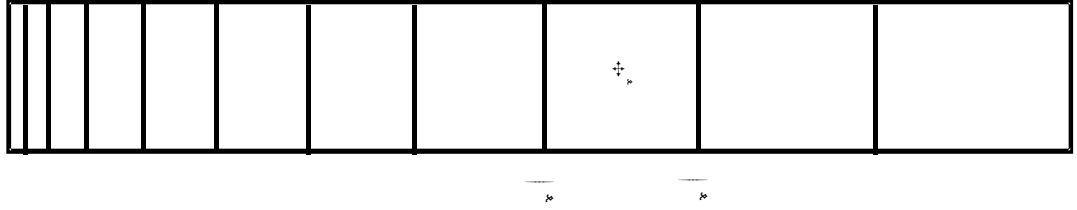
yksinkertaistaa käyttämällä säteen ja tangentin suunnissa samoja materiaalivakioita, jolloin materiaalmatriisit ovat karteesisessäkin koordinaatistossa diagonaalisia. Tätä voidaan perustella kosteudensiirtominaisuuksien vähäisellä eroavuudella säteen ja tangentin suuntaisten koekappaleiden välillä (Rosenkilde 1996).

Puun soluonteloissa olevan ilman vaikutusta kuivumisessa on tämän työn aikaisemmassa vaiheessa tutkinut Hukka (1996). Näiden laskelmien mukaan vaikutus kuusen sydänpuun kuumakuivauksessa on hyvin vähäinen, joten ainakin sydänpuun kohdalla kaasufaasin kokonaispaineen laskennassa on mahdollista jättää ilman osuus pois. Tällöin voidaan olettaa kokonaispaineen olevan aina sama kuin ulkoinen paine, ellei yhtälön (2) mukainen höyrynpaine sitä kohota. Tällöin jatkuvuusyhtälöä (15) ei tarvita ja kosteuden siirtymistä kuvaavat yhtälöt (5) ja (11). On kuitenkin epäselvää, kuinka olennaisesti tämä yksinkertaistus vaikuttaa laskentaan kuluvaan aikaan.

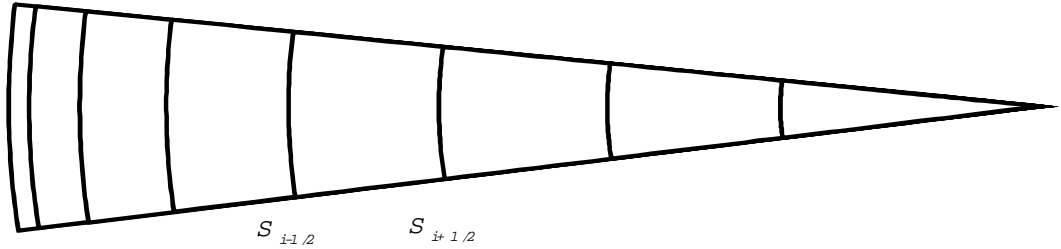
5.2 NUMEERINEN 1-ULOTTEINEN MENETELMÄ

Kuivumista kuvaavien integraaliyhtälöiden ratkaisemiseen käytettävistä numeerisista menetelmistä tärkeimmät ovat elementtimenetelmä, differenssimenetelmä ja niin sanottu kontrollitulavuusmenetelmä. Elementtimenetelmä soveltuu parhaiten sen kehittämisen pohjana olleiden lujuusopillisten ongelmien ratkaisemiseen, kun taas toisilleen läheistä sukua olevat differenssi- ja kontrollitulavuusmenetelmä ovat paremmin virtausprobleemoiden ratkaisemiseen sopivia. Tässä käytettävä kontrollitulavuusmenetelmä merkitsee ratkaistavien integraaliyhtälöiden integrointia suoraan äärellisen laskentatulavuuden yli ilman että yhtälöitä tarvitsee ensin muuntaa osittaisdifferentiaaliyhtälöiksi. Näin voidaan taata yhtälöiden pohjana olevien fysikaalisten säilymlakien tarkka toteutuminen myös diskreetissä tapauksessa (Patankar 1980).

Tarkasteltaessa kuivumista 1-ulotteisessa tapauksessa kaikki edellä johdetut yhtälöt pätevät sellaisinaan, kun gradienttioperaattori merkitsee nyt derivointia ainoan paikkakoordinaatin suhteen ja kontrollitulavuusmenetelmän mukaiset laskentatulavuudet ovat kuvassa 3 esitetyn kaltaisia. Tällaisen sahatavaraa aproksimoivan levymäisen rakenteen kuivumistarkasteluiden lisäksi yksiulotteinen analyysi soveltuu sylinterisymmetrisen kappaleen laskentaan (pyöröhirret). Kontrollitulavuusmenetelmä ei tällöin vaadi itse ratkaistavien yhtälöiden muuntamista toiseen koordinaatistoon, vaan muunnos hoidetaan laskentageometrian kautta. Hila on tällöin kuvassa 4 esitettyä muotoa. Hilat eroavat toisistaan ainoastaan kappaleiden rajapintojen pinta-alojen S suhteen.



Kuva 3. Kontrollitilavuusmenetelmän mukainen 1-ulotteinen laskentahila.



Kuva 4. Kontrollitilavuusmenetelmän mukainen 1-ulotteinen laskentahila sylinterisymmetrisessä tapauksessa

Ratkaistavat yhtälöt voidaan vektorimuodossa kirjoittaa yhtenä yhtälönä

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \mathbf{U} dV + \oint_{\partial V} \mathbf{F} dS = \int_V \mathbf{Q} dV. \quad (25)$$

Diffuusiokerroin- ja permeabiliteettimatriisit redusoituvat yksiulotteisessa tarkastelussa skalaareiksi. Kun yhtälö (25) nyt integroidaan yhden laskentatilavuuden yli ja seurataan Fletcherin (1987) esittämää kolmea aika-askelta käyttävää aikaintegrointimenetelyä, saadaan tulos

$$(1 + \gamma) \frac{\Delta \mathbf{U}_i^n}{\Delta t^n} - \gamma \frac{\Delta \mathbf{U}_i^{n-1}}{\Delta t^{n-1}} = -\frac{1}{V_i} \left(\mathbf{F}_{i+1/2} S_{i+1/2} - \mathbf{F}_{i-1/2} S_{i-1/2} \right) + \mathbf{Q}_i V_i. \quad (26)$$

Parametri γ määrää aikaintegrointimenetelmän ja katkaisuvirheen kannalta parhaassa tapauksessa se saa arvon 1/2. Yhtälössä (26) esiintyvän vuontiheysvektorin komponentit koostuvat edellä esitetyn yleisen teorian mukaisista termeistä, joista kukin lasketaan diskreetissä muodossa vanhan ja uuden ajanhetken arvojen avulla seuraavasti:

$$F_{i+1/2} = \beta D_{i+1/2}^\phi \frac{\phi_{i+1}^{n+1} - \phi_i^{n+1}}{\Delta x} + (1 - \beta) D_{i+1/2}^\phi \frac{\phi_{i+1}^n - \phi_i^n}{\Delta x} \quad (27)$$

Parametri β saa arvoja väliltä 0..1 ja se kuvaa menetelmän implisiittisyyden astetta. Käytännön laskelmissa täysin implisiittinen menetelmä ($\beta=1$) on osoittautunut käyttökelpoisimmaksi. Rajapinnalla vallitsevien verrannollisuuskertoimien D laskennassa käytetään Crumptonin ym. (1995) antamin perustein harmonista keskiarvoa rajapinnan eri puolilla sijaitsevien laskentatilavuuksien keskellä lasketuista kertoimista.

Kontrollitilavuusmenetelmän perusongelma on lausekkeen (27) mukaisten vooarvojen laskenta, koska uuden ajanhetken $n+1$ potentiaalien arvot eivät ole vuokomponentteja laskettaessa käytettävissä. Tämän ongelman ratkaisemiseksi käytetään usein sinänsä yksinkertaista iteratiivista menettelyä, jossa jokaisen aika-askelen sisällä joudutaan ratkaisemaan lineaarinen yhtälöryhmä useaan kertaan. Parempaan lopputulokseen, eli nopeampaan laskentaan, päästään kuitenkin käyttämällä hieman monimutkaisempaa niin sanottua vuon linearisointia. Tämä merkitsee uuden ajanhetken vooarvojen laskentaa vanhan ajanhetken tilanteesta käyttämällä ensimmäisen termin jälkeen katkaistua Taylorin sarjakehitelmää:

$$\mathbf{F}_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} = \mathbf{F}_{i+\frac{1}{2}}^n + \frac{\partial \mathbf{F}_{i+\frac{1}{2}}}{\partial \mathbf{U}_i} \Delta \mathbf{U}_i + \frac{\partial \mathbf{F}_{i+\frac{1}{2}}}{\partial \mathbf{U}_{i+1}} \Delta \mathbf{U}_{i+1}. \quad (28)$$

Vastaavalla tavalla saadaan lähdetermille

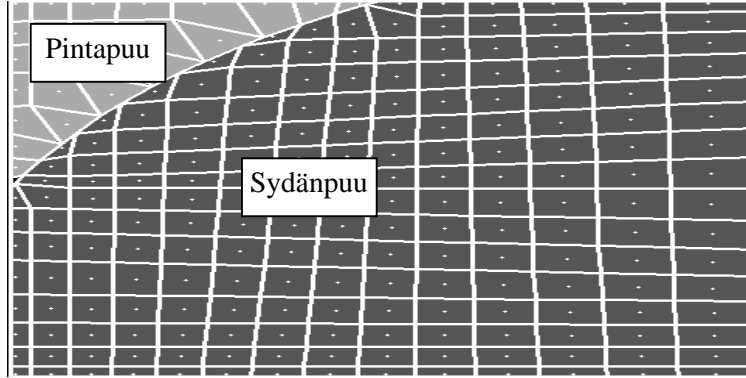
$$\mathbf{Q}_i^{n+1} = \mathbf{Q}_i^n + \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{U}_i} \Delta \mathbf{U}_i \quad (29)$$

Näiden lausekkeiden sisältämien Jacobin matriisien termit lasketaan käytännössä laskemalla ensin numeerisesti tarvittavat potentiaalikomponenttien osittaisderivaatat konservatiivisten suureiden suhteen. Tulokseksi saadaan kytkettyjen algebrallisten yhtälöiden ryhmä, jossa tuntemattomina ovat aika-askeleella tapahtuvat konservatiivisten suureiden muutokset. Ryhmää vastaava matriisi on tavallisen yksiulotteisen diffuusioyhtälön tuloksena syntyvän tridiagonaalisen matriisin kanssa täysin samanlainen siten, että matriisin kukin elementti koostuu nyt 3x3-lohkosta. Matriisi on siis 7-nauhainen siten, että välittömästi diagonaalien kummallakin puolella on kolme täyttä nauhaa ja muuten matriisi on tyhjä. Ratkaisu on näin taloudellisesti mahdollista suorallakin menetelmällä (Gaussin eliminaatio).

5.3 NUMEERINEN 2-ULOTTEINEN MENETELMÄ

Kaksiulotteinen kontrollitilavuusmenetelmä on johdettavissa täysin analogisesti 1-ulotteisen tapauksen kanssa, kun ongelmaa on yksinkertaistettu siten, että materiaali oletetaan isotrooppiseksi. Tällöin kysymyksessä voi olla joko "tarkka menetelmä" säteen ja syyn suunnat sisältävälle probleemalle tai aproksimatiivinen menetelmä säteen ja tangentin suunnista koostuvalle poikkileikkaukselle.

Edellisessä tapauksessa laskentahila koostuu luontevasti suorakulmioista, kun taas jälkimmäisessä hila on tarkoituksenmukaista muodostaa nelikulmioista kuvan 5 esittämällä tavalla. Tällöin hila on säännöllinen ja kullakin laskentatilavuudella on neljä rajapintaa, mutta siitä huolimatta sydänpuun ja pintapuun välisen rajapinnan huomiointi on mahdollista.



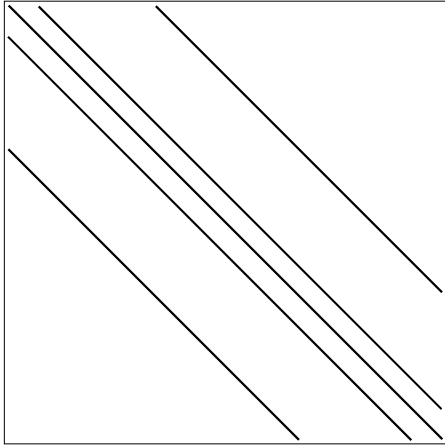
Kuva. 5. Kontrollitilavuusmenetelmän mukainen 2-ulotteinen laskentahila syitä vastaan kohtisuorissa suunnissa.

Yhtälöä (26) vastaa kaksiulotteinen yhtälö

$$(1 + \gamma) \frac{\Delta U_{i,j}^n}{\Delta t^n} - \gamma \frac{\Delta U_{i,j}^{n-1}}{\Delta t^{n-1}} = \quad (30)$$

$$- \frac{1}{V_{i,j}} \left(\mathbf{F}_{i+1/2,j} S_{i+1/2,j} - \mathbf{F}_{i-1/2,j} S_{i-1/2,j} + \mathbf{F}_{i,j+1/2} S_{i,j+1/2} - \mathbf{F}_{i,j-1/2} S_{i,j-1/2} \right) + \mathbf{Q}_{i,j} V_{i,j}$$

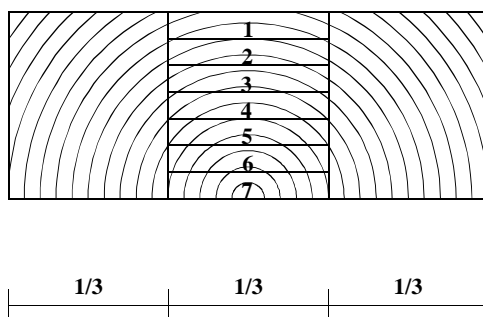
Uuden ajanhetken vuot lasketaan linearisoimalla kuten 1-ulotteisessakin tapauksessa ja tulokseksi saatavan yhtälöryhmän kerroinmatriisi on kuvan 6 mukainen. Kukaan nauha koostuu jälleen 3x3 -lohkoista. Laskentatilavuuksien numeroinnissa on käytetty luonnollista riveittäin ja sarakkeittain etenevää järjestystä. Yhtälöiden lukumäärä on $3 * i_{max} * j_{max}$. Ratkaisu on edelleen mahdollinen suoralla menetelmällä, kun käytetään matriisin nauhamaisuuden huomioivaa ratkaisinta.



Kuva 6. Kontrollitilavuusmenetelmän tuottaman yhtälöryhmän kerroinmatriisin rakenne 2-ulotteisessa tapauksessa. Nauhat koostuvat 3x3-kokoisista lohkoista.

6 MALLIN SOPIVUUS LABORATORIOKUIVAUSKOKEIDEN TULOKSIIN

Edellä luotu matemaattinen malli sisältää yksiulotteisessa muodossaan noin 10 vapaata parametria, joiden avulla sen antamat tulokset on sovitettava koekuivauksissa mitattuihin tuloksiin. Parametrien arvoja sovitettaessa on kiinnitettävä huomio lähinnä puussa vallitsevaan kosteusjakaumaan (gradienttiin), koska se määrää sekä keskimääräisen kosteuden että kuivumisjännitysten kehittymisen ja näin kaikki tärkeimmät kuivauslaadun osatekijät. Lisäksi tällöin on mahdollista erottaa sydänpuun materiaaliominaisuudet omaksi kokonaisuudekseen, sillä puun poikkileikkaus gradienttipalojen leikkauskohdasta (kuva 7) on tehdyissä kokeissa lähes poikkeuksetta ollut puhdasta sydänpuuta.



Kuva 7. Gradienttipalojen viipalointi sahatavaran poikkileikkauksesta.

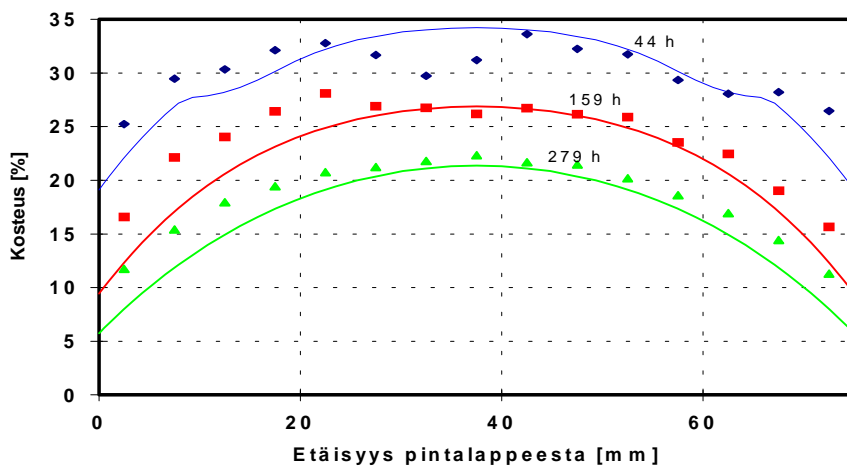
Puun sisäisestä kosteusjakaumasta laskettu keskimääräinen kosteus ei luonnollisesti edusta koko kappaleen vastaavaa arvoa, vaan näin saatua arvoa on todellisen kuivumisen kaksiulotteisuuden vuoksi korjattava alaspäin. Korjaus perustuu kuivauskokeiden tuloksista tehtyyn regressiomalliin, jonka mukaan keskimääräistä puun kosteutta voidaan kuvata gradienttipaloista laskettujen kosteuksien avulla likimain kaavalla

$$\bar{u}_{2D} \approx \bar{u}_{1D} - 0,1 \cdot (u_{\text{keskiosa}} - u_{\text{pinta}}). \quad (31)$$

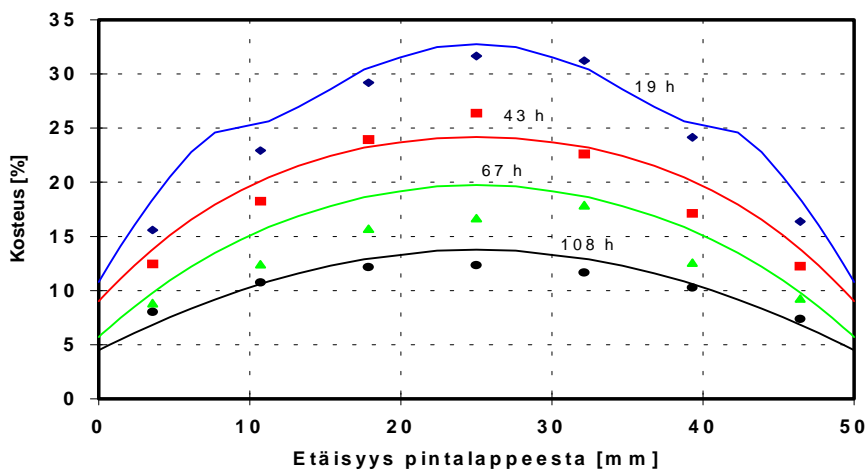
6.1 MÄNNYN SYDÄNPUUN KOSTEUSJAKAUMA KUIVAUKSEN AIKANA ERI LÄMPÖTILOISSA

Männyn 50x150 mm² sydänpuuta on kuivattu puusepänkuivaksi lämpötiloissa 45, 85, 95, 110 ja 120 °C. Märkälämpötila on kolmessa ensin mainitussa kokeessa

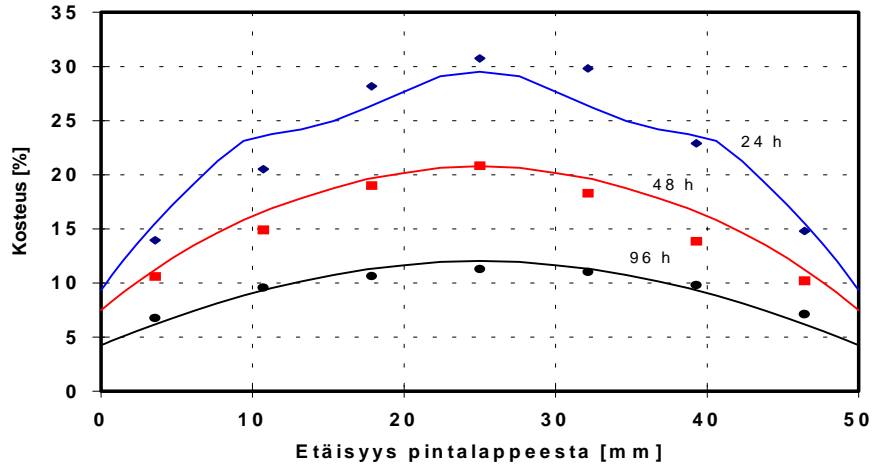
ollut vaihteleva ja jälkimmäisissä tapauksissa vakio noin 98 °C. Kuivauksen aikana kuivaamosta on otettu eri ajanhetkinä ulos 3-5 koekappaletta kerrallaan, joista on jäädytyksen jälkeen määritetty sisäinen kosteusjakauma ja keskimääräinen kosteus punnitus-kuivaus menetelmällä. Näiden tulosten perusteella on optimoitu kuivauksen yksiulotteisen simulointimallin vapaat parametrit männyn sydänpuun osalta, jolloin tulos siis kuvaa kuivumista poikkileikkauksessa puun säteen suunnassa. Kuvissa 8-12 nähdään näin simuloidun kosteusjakauman (yhtenäinen viiva) vastaavuus koetuloksiin (pisteet) eri lämpötiloissa kuivauksen kuluessa. Käytetyt parametrien arvot on esitetty liitteessä 1.



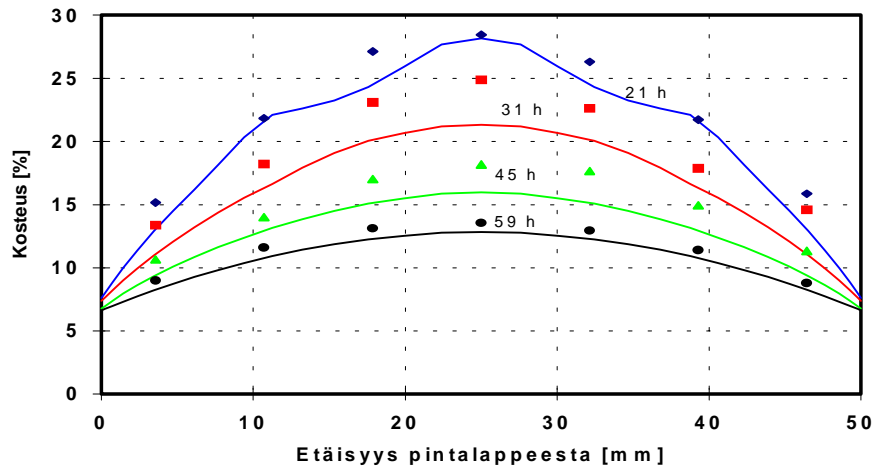
Kuva 8. Männyn sydänpuun kosteusjakauma kuivauksen aikana lämpötilassa 45 °C.



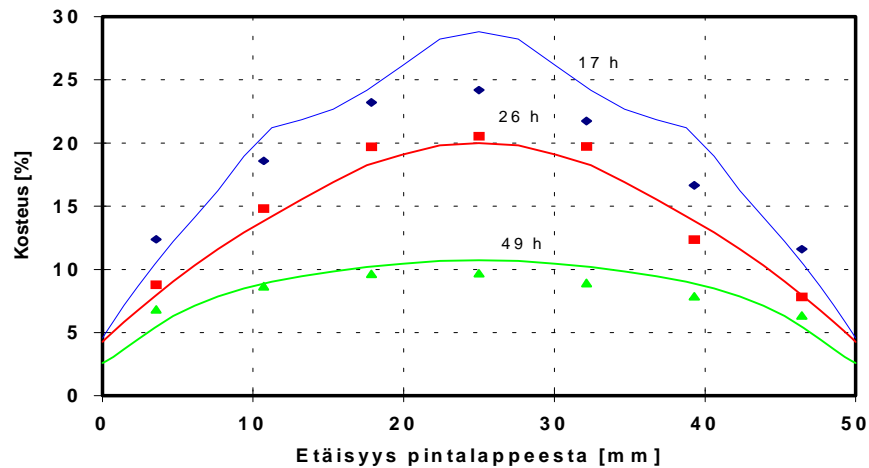
Kuva 9. Männyn sydänpuun kosteusjakauma kuivauksen aikana lämpötilassa 85 °C.



Kuva 10. Männyn sydänpuun kosteusjakauma kuivauksen aikana lämpötilassa 95 °C.



Kuva 11. Männyn sydänpuun kosteusjakauma kuivauksen aikana lämpötilassa 110 °C.



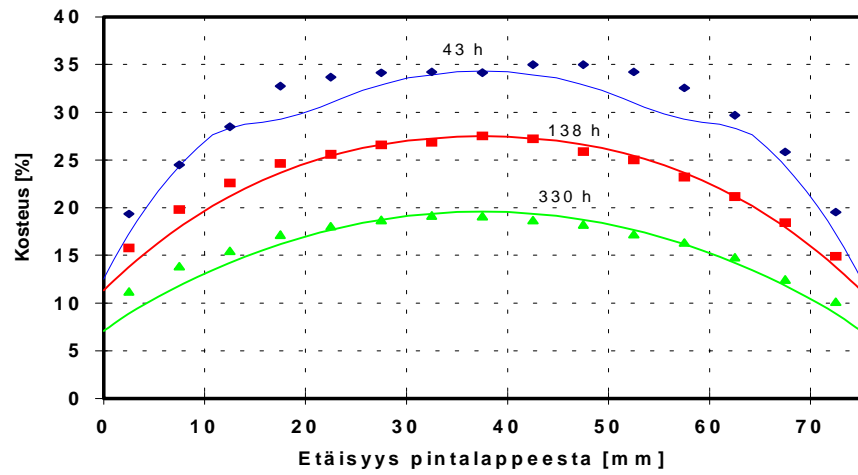
Kuva 12. Männyn sydänpuun kosteusjakauma kuivauksen aikana lämpötilassa 120 °C.

Mittaustuloksista on huomattava etenkin korkeampien keskimääräisten kosteuksien osalta, että hajonta koetuloksissa on suurta ja mittausten luotettavuus näin ei kaikilta osin ole paras mahdollinen. Lisäksi etenkin puun pinnan läheisyydessä oleva kosteusgradientti on niin suuri, että ensimmäisen tutkitun viipaleen keskikohta (3,5 mm pinnasta) ei välttämättä ole paras mahdollinen kohta kuvaamaan saatua tulosta.

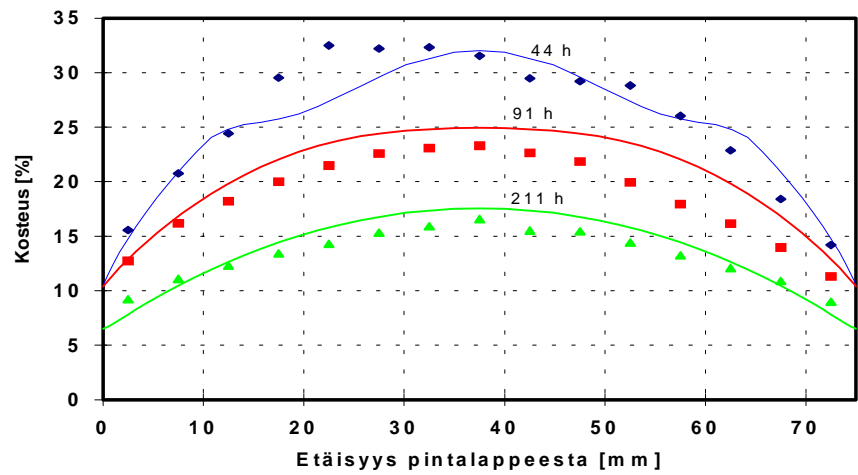
Laskettujen ja mitattujen kosteusjakaumien vertailusta voidaan päätellä, että kosteusjakauman keskimääräinen kehitys kuivumisen aikana on ennustettavissa sellaisella tarkkuudella, että edellytykset sen antamien tulosten käyttöön kuivumisjännityksiä laskevan mallin lähtötiedoksi ovat hyvin olemassa. Tätä käsitystä tukee laskettujen kosteusjakaumien hyvä verrattavuus koetuloksiin erityisesti PSK:n alapuolisella kosteusalueella; PSK:n yläpuolella laskettu jakauma näyttää muodoltaan osin epärealistiselta. Tarkan kuvan saamiseksi todellisesta kosteusjakaumasta mittaukset olisi kuitenkin suoritettava nyt tehtyä selvästi tiheämmällä jakovälillä.

6.2 KUUSEN SYDÄNPUUN KOSTEUSJAKAUMA KUIVAUKSEN AIKANA ERI LÄMPÖTILOISSA

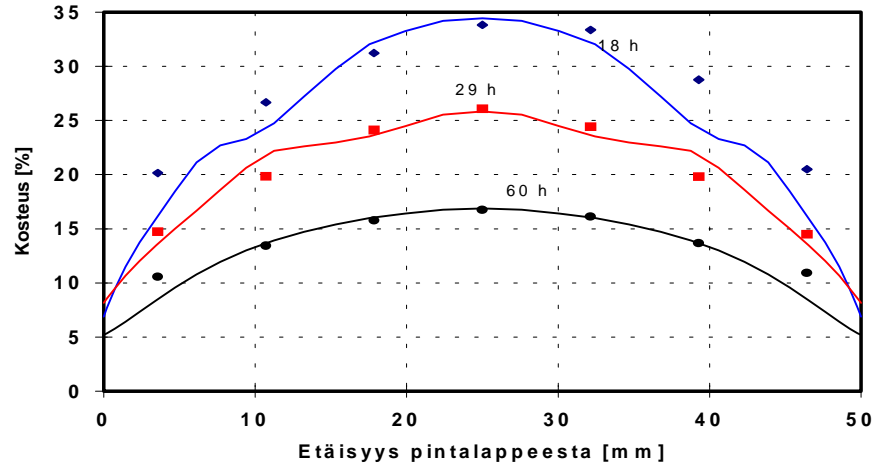
Kuusen sydänpuun osalta on kuivauksenaikaisen kosteusgradientin kehittymisestä käytettävissä koetulokset lämpötiloissa 45, 80, 110 ja 120 °C. Näistä kaksi ensimmäistä oli dimensiota 75x225 mm² ja kaksi muuta poikkileikkaukseltaan 50x150 mm². Mitattuja jakaumia käyttäen on optimoitu kuusen sydänpuun kuivumista kuvaavat simulointimallin parametrit. Simuloitujen arvojen ja koetulosten vastaavuus on esitetty kuvissa 13-16. Niistä nähdään, että simulointimallin tarkkuus kuusen kohdalla on täysin vastaava kuin männyn tapauksessa. Kuusi ja mänty ovat kuivumisominaisuuksiltaan hyvin lähellä toisiaan, mikä käy ilmi myös verrattaessa niille optimoituja simulointimallin parametrejä toisiinsa liitteessä 1.



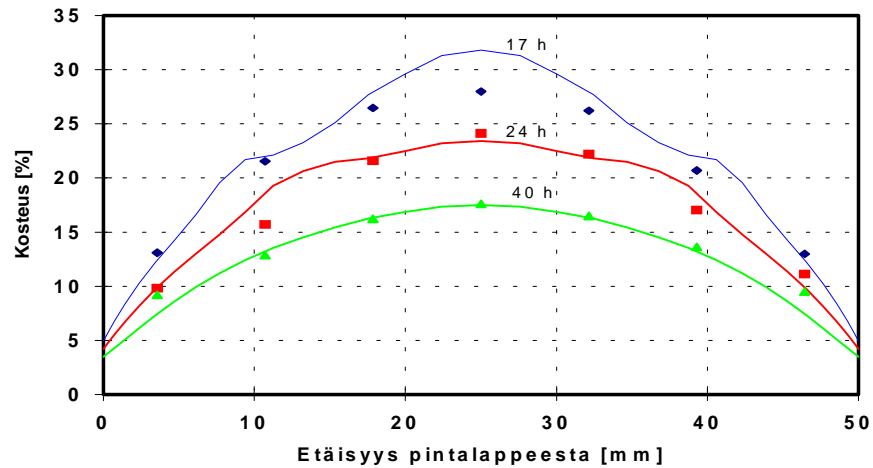
Kuva 13. Kuusen sydänpuun kosteusjakauma kuivauksen aikana lämpötilassa 45 °C.



Kuva 14. Kuusen sydänpuun kosteusjakauma kuivauksen aikana lämpötilassa 80 °C.



Kuva 15. Kuusen sydänpuun kosteusjakauma kuivauksen aikana lämpötilassa 110 °C.



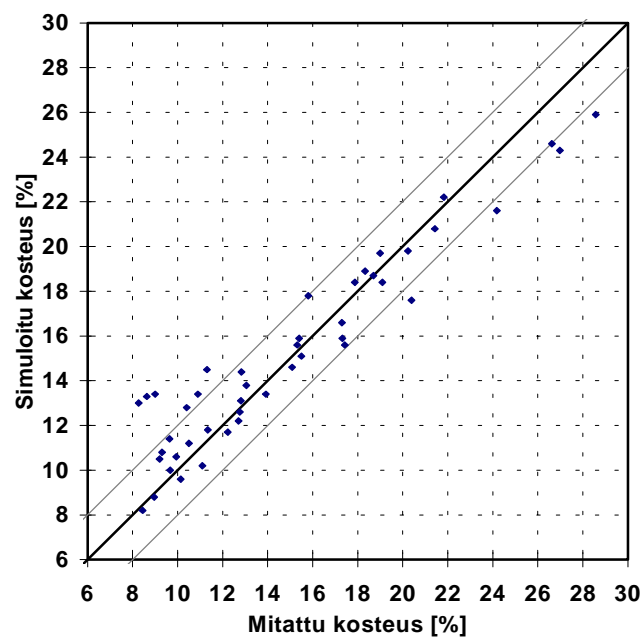
Kuva 16. Kuusen sydänpuun kosteusjakauma kuivauksen aikana lämpötilassa 120 °C.

6.3 KESKIMÄÄRÄINEN KOSTEUS JA KOSTEUSGRADIENNTTI KUIVAUKSEN AIKANA: KAIKKI KOKEET

Vuosien 1994 - 1996 kuumakuivaustutkimusten yhteydessä VTT:ssä on suoritettu yhteensä 23 sahatavaran laboratoriomittakaavaista kuivauskoetta lämpötila-alueella 85 - 150 °C. Lisäksi vuonna 1993 suoritetussa esiselvityksessä tehtiin 6 koetta. Näistä yhteensä 19 on sellaisia, joissa on määritetty sahatavaran keskimääräinen kosteus ja kosteusgradientti ennen kuivauksen lopussa olevaa tasaannutusvaihetta. Lisäksi osasta kokeita on otettu kosteusjakaumanäytteitä myös kesken kuivauksen. Tämä aineisto muodostaa erinomaisen vertailupohjan tässä tarkasteltavan kuumakuivauksen simulointimallin suorituskyvyn arvioinnille.

Parhaan kokonaiskuvan saamiseksi verrataan kuvassa 17 simulointiohjelman laskemaa keskimääräistä kosteutta kokeissa mitattuun sahatavaran keskimääräinen kosteuteen. Kaikki laskelmat on tehty termoelementeillä mitattua, toteutunutta kuivauskaavaa käyttäen (kuiva- ja märkälämpötila). Mukana ovat vain ennen loppuhöyrytystä tehdyt mittaukset, koska loppuhöyrytyksessä puun pinnalla tapahtuvan höyryn kondensoitumisen on katsottu vaativan oman tutkimuksensa. Mittausten luotettavuus vaihtelee koekappalemäärien erilaisuudesta johtuen, mutta on yleisesti ottaen paras kuivauksen lopputilanteessa. Tämä johtuu sekä suurimmista koekappalemääristä että kosteuden hajonnan alenemisesta kuivumisen edistyessä.

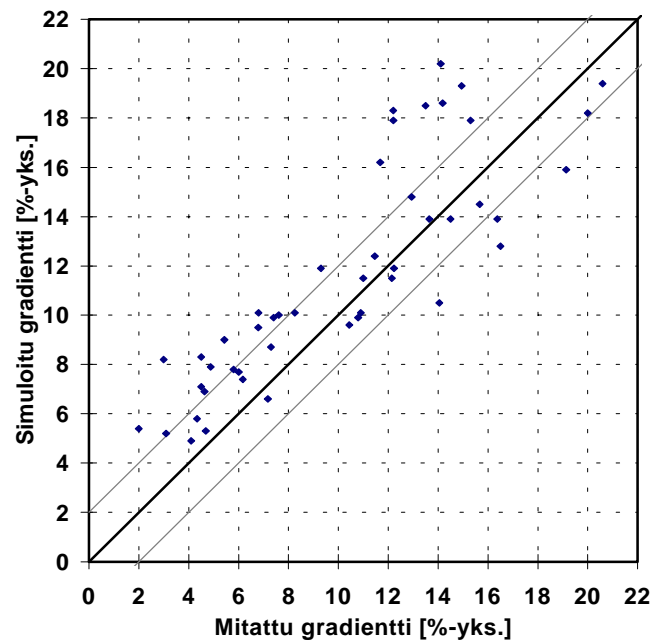
Kuvasta nähdään, että pelkän sydänpuun yksiulotteinen simulointi riittää kertomaan koko todellisen kappaleen keskikosteuden, kun kosteus on alle 30 %. Tämä johtuu sydänpuun ja pintapuun kuivumisen samankaltaisuudesta PSK:n alapuolella. Simuloitu keskimääräinen kosteus poikkeaa mitatusta arvosta pääasiassa ylöspäin. Pisteistä 72 % sijoittuu siten, että simuloinnin virhe on pienempi kuin 2 %-yksikköä. Yli 3 %-yksikön virhe syntyy 13 %:ssa tapauksista.



Kuva 17. Mitatun ja simuloitun keskimääräisen kosteuden vastaavuus.

Vastaavalla tavalla on kuvassa 18 tarkasteltu simuloitun ja toteutuneen kosteusgradientin vastaavuutta. Tässä tapauksessa simuloinnin tuottama tulos on paras pienillä kosteusgradientin arvoilla. Etenkin suurimmilla arvoilla havaitaan simuloitujen arvojen olevan mittaustuloksia suurempia. Tämä johtuu lähinnä siitä, että laskentamalli aliarvioi puun pinnan kosteutta sen ollessa suuri. Kokonaisuudessaan simuloitun gradientin on tosin oltavakin hieman mitattua suurempi, koska mittaukset on tehty vasta sahatavaran jäähtymisen jälkeen ½-2

vuorokautta kyseisen kappaleen kuivauksen päättymisestä. Simuloinnin virhe on alle 2 %-yksikköä 47 %:ssa tapauksista ja yli 4 %-yksikköä 13 %:ssa tapauksista.



Kuva 18. Mitatun ja simuloitun kosteusgradientin vastaavuus.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän julkaisun pohjana olleen projektin tavoitteena oli saada aikaan puun kosteuden- ja lämmönsiirron malli korotetuissa lämpötiloissa. Tutkimuksen tuloksena on laajennettu puun kuivumistapahtumasta vallitsevaa kokonaiskuvaa lämpötila-alueelle 80 - 150 °C, minkä lisäksi projektiin osallistuneiden tutkijoiden yleiset edellytykset ymmärtää kuivumisen dynamiikkaa ovat ratkaisevasti parantuneet. Tulokset antavat edellytykset teollisuudessa hyödynnettävissä olevan kuumakuivauksen simulointiohjelman kehittämiseksi. Myös tietämys kuumakuivaamon mitoitus- ja suunnitteluperusteista on parantunut olennaisesti.

Konkreettisenä lopputuloksena projektista on tutkimuskäyttöön soveltuva puun kuivumisen simulointiohjelma, jolla voidaan ennustaa puhallussyvyydeltään pienessä kuivaamossa tapahtuva puun sisäisen kosteusjakauman kehitys kuivauksen aikana. Malli toimii lämpötila-alueella 20 - 150 °C, joten se periaatteessa soveltuu sekä kuumakuivauksen että perinteisen lämminilma-kuivauksen simulointiin. Toimivuus tavanomaisella lämpötila-alueella mahdollistaa myös erityisesti värin suhteen arkojen tuotteiden kohdalla kysymykseen tulevan ns. yhdistelmäkuivauksen simuloinnin, jossa lämpötila alkuvaiheessa pidetään selvästi 100 °C:n alapuolella, mutta lopussa nostetaan kuumakuivausalueelle.

Simulointimalli sisältää seuraavat osatekijät:

- Puun fysikaaliseen rakenteeseen perustuva teoreettinen malli, so. kosteus-, lämpötila- ja painekenttiä puussa kuvaavat matemaattiset yhtälöt reunaehtoineen.
- Teoreettisen mallin tarvitsemat materiaaliominaisuudet suomalaisen havupuun sydänpuun osalta (mänty ja kuusi). Materiaalin ominaisuuksia kuvaavat parametrit perustuvat lähinnä laboratoriossa tehtyjen kuivauskokeiden tuloksiin.
- Numeerinen menetelmä näin luotujen yhtälöiden ratkaisemiseksi. Yksiulotteinen tarkastelu riittää sahatavaran kuivumisen tarkasteluun ja kaksiulotteinen malli muodostaa pohjan myös sisähalkeilua ennustavan simulointiohjelman kehitystyölle.
- Käyttöliittymä numeerisen menetelmän tuomiseksi helpokäyttöisesti tutkijan ulottuville.

Tehty simulointimalli on luonteeltaan kuumakuivauksen simulointimallin prototyyppi. Sillä ei vielä voida ennustaa kuivauksen laadun kaikkia olennaisimpiakaan osatekijöitä, vaan se on tehty pohjaksi teollisuuden toiveita vastaavan simulointimallin tuotekehitykselle. Tätä tarkoitusta mallin voidaan ennakoida palvelevan hyvin, sillä saavutettu vastaavuus simulointitulosten ja laboratoriossa tehtyjen kokeiden välillä on niin hyvä, että mahdollisuudet hyvälaatuisen sahatavaran tuottamiseen teollisuuden mittakaavassa tehtävissä kuumakuivauksen koekuivauksissa ovat varmasti olemassa. Myös niiden kuivauksen laadun osatekijöiden ennakoimiseksi, joita käsillä oleva

simulointimalli ei kuvaa, on tämän projektin tuloksena olemassa selkeät kokeelliset perusteet.

Myös muiden uusien kuivausmenetelmien laskennallisen tarkastelun jatkotutkimukselle luotu malli antaa erinomaisen lähtökohdan. Tällaisia jatkotutkimuskohteita voivat olla ali- ja ylipainekuivaus, mikroaaltokuivaus sekä näiden yhdistelmät. Niin ikään muiden puutuotteiden kuin sahatavaran kuumakuivauksen simuloinnille on tämän projektin tuloksena olemassa hyvät kehitysedellytykset.

Tehdyllä simulointiohjelmalla suoritettavat vertailulaskelmat osoittavat, että simuloinnin antamat kosteusprofiilit vastaavat kokeissa mitattuja arvoja selkeästi paremmin kuin mitä tilanne oli lämmilmakuivauksen osalta vuosien 1990 - 1992 mallintamisprojektin päättyessä. Myös keskimääräisen kosteuden tarkastelun osalta mallin ja kokeiden väliseen vastaavuuteen on oltava tyytyväinen.

Suoritettujen tutkimusten tuloksia katsottaessa voidaan todeta niiden vastaavan projektin tavoitteisiin kirjattuja odotuksia hyvin.

LÄHDELUETTELO

- Absetz, I. 1991a. Capillary moisture transfer modeling of softwoods based on pore size distribution measurements. Espoo: Teknillinen korkeakoulu. 44 s. + 13 s. liitt. (Talonrakennustekniikan laboratorio, julkaisu 28).
- Absetz, I. 1991b. Sydänpuu-pintapuu rajapinnan tasapainokosteus puun syiden kyllästymispisteen yläpuolella. Espoo: Teknillinen korkeakoulu. 42 s. + 27 s. liitt. (Talonrakennustekniikan laboratorio, julkaisu 22).
- Avramidis S. & Dubois J. 1992. Sorption energies of some Canadian species. *Holzforschung*, vol 46, nro 2, s. 177 - 179.
- Crumpton P. I., Shaw G. J. & Ware A. F. 1995. Discretisation and multigrid solution of elliptic equations with mixed derivative terms and strongly discontinuous Coefficients. *Journal of Computational Physics* 116, s. 343 - 358.
- Fletcher C.A.J. 1991. Computational techniques for fluid dynamics, Volume I. Berlin: Springer-Verlag. 401 s.
- Geankoplis C. J. 1984. Mass transport phenomena. Ohio: State University Press. 495 s.
- Hukka A. 1996. A mathematical model for simulation of softwood drying in temperatures above boiling point of water with special attention to the boundary conditions. *Drying Technology J.*, Vol 14, No 7. (In press).
- Hunter A. J. 1993. On movement of water through wood - The diffusion coefficient. *Wood Sci. Technol.* vol 27, s. 401 - 408.
- Incropera F. P. & De Witt A. P. 1990. Fundamentals of heat and mass transfer. Singapore: John Wiley & Sons. 919 s. + 42 s. liitt.
- Krischer O. & Kast W., 1978. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 489 s.
- Kärkkäinen M. 1985. Puutiede. Hämeenlinna: Sallisen kustannus Oy. 415 s.
- Lampinen M. 1988. Aineensiirto-oppi. Espoo. Otakustantamo (nro 864). 123 s.
- Laurila A.-M. 1993. Veden haihtuminen sahatavaran kuivauksessa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, kemiantekniikan osasto. 85 s. + 36 s. liitt.
- Luikov A. V. 1975. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review). *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 18, s. 1 - 14.

- Masmoudi W. & Prat M., 1991. Heat and mass transfer between a porous medium and parallel external flow. Application to drying of capillary porous materials. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No 8, s. 1975 - 1989.
- Patankar S. V. 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. Washington, New York, London: Hemisphere publishing. 197 s.
- Perré P. 1994a. The importance of wood anatomy to drying behaviour: examples based on convective, microwave and vacuum drying. *Proc. Fourth IUFRO Conference on Wood Drying*, Rotorua, New Zealand.
- Perré P. 1994b. Henkilökohtainen tiedonanto. Nancy, joulukuu 1994.
- Plumb O. A, Spolek G. A. & Olmstead B. A., 1985. Heat and mass transfer in wood during drying. *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol 28, no 9, s. 1669 -1678.
- Ranta-Maunus, A., Forsèn H., Hanhijärvi, A., Hukka A. & Partanen, J. 1995. Sahatavaran kuivauksen simulointi. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 62 s. + 50 s. liitt. (VTT Julkaisuja 797).
- Rosenkilde A. 1996. Mätningar av fuktkvotsgradienter och ytfenomen vid virkestorkning. Lisensiaattityö. Tukholma: Kungliga Tekniska Högskolan. 17 s. + 46 s. liitt.
- Salin J.-G. 1990. Simulation of the timber drying process. Prediction of moisture and quality changes. Helsinki: Ekono Oy. 101 s.
- Siau J. F. & Avramidis S. 1993. Application of a thermodynamic model to experiments of nonisothermal moisture diffusion in wood. *Wood Sci. Technol.* vol 27, s. 131 - 136.
- Siau J. F. & Jin Z. 1985. Nonisothermal moisture diffusion experiments analyzed by for alternative equations. *Wood Sci. Technol.*, vol 19, s. 151 -157.
- Siimes F. E. & Uimonen M. 1953. Kuivauskokeita kuumakuivaajalla. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. (VTT Tiedotus 113).
- Simpson W. T. & Rosen H. N. 1981. Equilibrium moisture content of wood at high temperature. *Wood and Fibre*, vol 13, nro 3, s. 151 - 158.
- Simpson W. T. 1971. Equilibrium moisture content prediction for wood. *Forest Products Journal*, vol 21, nro 5, s. 48 - 49.
- Skaar C. 1988. *Wood-Water Relations*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 283 s.
- Spolek G. A. & Plumb O. A. 1981. Capillary pressure in softwoods. *Wood Sci. Technol.* vol 15, s. 189 - 199.

Stanish M. A., Schajer G. S. & Kayihan F. 1986. A mathematical model of drying for hygroscopic porous media. *AIChE Journal*, vol 32, nro 8, s. 1301 - 1311.

Tarvainen V. 1994. Sahatavaran kuuma kuivaus. Esiselvitys. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. (Julkaisu 797). 94 s. + 32 s. liitt.

Taylor F. W. 1993. Warp threat unaffected by higher drying temps. *Wood Technology*, May/June, s. 36 - 37.

Tesoro F. O., Choong E. T. & Kimbler O. K. 1974. Relative permeability and the gross pore structure of wood. *Wood and Fiber*, vol 6, nro 3, s. 227 -236.

Whitaker S. 1977. Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: A theory of drying. *Advances in Heat Transfer*, Vol 13, s. 119 - 203.

LASKENNASSA KÄYTETYT MATERIAALIVAKIOT

Sydänpuu

	MÄNTY	KUUSI
Permeabiliteetti nesteen suhteen	$K_l = 1,2 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{s}$	$K_l = 1,4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2\text{s}$
Permeabiliteetti kaasun suhteen	$K_g = 9,3 \cdot 10^{-17} \cdot a(u) \text{ m}^2\text{s}$	$K_g = 8,2 \cdot 10^{-17} \cdot a(u) \text{ m}^2\text{s}$
Vesihöyrynjohdavuus	$a_0 = 10 \cdot 10^{-3}$	$a_0 = 9 \cdot 10^{-3}$
Aspiroituminen	$a(u) = 0,09 + 0,91 \cdot \left(\frac{u_{\min}}{u_{PSK}} \right)^3$	$a(u) = 0,05 + 0,95 \cdot \left(\frac{u_{\min}}{u_{PSK}} \right)^3$
Sitoutuneen veden diffusiviteetti	$\frac{D_b}{PSK} = \exp \left[-0,48 + 3,0 \frac{u}{\rho_w} + 0,017 \cdot (T - 353) \right] \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$\frac{D_b}{PSK} = \exp \left[-0,71 + 3,0 \frac{u}{\rho_w} + 0,016 \cdot (T - 353) \right] \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$