

Sahatavaran loppukosteusjakauman selvittäminen ja kuivauslaadun kehittäminen

Metsä Fibre, Rengon saha

Tiivistelmä

Tekijä	Julkaisun laji	Valmistumisaika
Mika Lampola	Opinnäytetyö, AMK	2025
	Sivumäärä	
	31	
Työn nimi		
Sahatavaran loppukosteusjakauman selvittäminen ja kuivauslaadun kehittäminen		
Tutkinto ja koulutusala		
Insinööri (AMK), Puutekniikan koulutus		
Toimeksiantajaorganisaatio		
Metsä Fibre, Rengon saha		
Tiivistelmä		
<p>Opinnäytetyössä tutkittiin Rengon sahan kanavakuivaamoiden toimintaa ja selvitettiin niissä kuivattavien sivulautojen kosteushajontaa. Työn tavoitteena oli tutkia kuivauskuormien kosteusvaihtelua eri osissa kuormaa. Tulosten perusteella kuivaamon työntekijä voisi arvioida kuorman keskikosteuden tarkemmin.</p> <p>Työn teoreettisessa osassa esiteltiin toimeksiantaja, perehdyttiin puun kosteustekniisiin ominaisuuksiin ja käsiteltiin erilaisten kuivaamotyyppien peruseriaatteita. Tutkimusosan alussa havainnollistettiin tuoreen sahatavaran kosteuden vaihtelua, minkä jälkeen tarkasteltiin eri mittausmenetelmillä hankittuja kuivaustuloksia kuivauskuormista.</p> <p>Opinnäytetyössä saatiin selville eri mittaustapojen luotettavuus määritettäessä kuorman keskimääräistä kosteutta, sekä havaittiin yksittäisten mittausten välillä merkittävää hajontaa. Kuivauslaadun kannalta merkittäväksi tekijäksi osoittautui kuivauskannan pitäminen tasaisen kuormitettuna ja toiminnan säännöllisyys.</p>		
Asiasanat		
sahatavara, kanavakuivaamo, kuivauslaatu, tavoitekosteus		

Abstract

Author	Type of Publication	Published
Mika Lampola	Thesis, UAS	2025
	Number of Pages	
	31	
Title of Publication		
Determination of the final moisture content distribution of sawn timber and development of drying quality		
Degree, Field of Study		
Bachelor of Engineering, Wood technology		
Organisation of the client		
Metsä Fibre, Renko sawmill		
Abstract		
<p>The present thesis investigated the operation of the channel drying kilns at Renko Sawmill and explored the moisture variation of side boards being dried. The aim of this research was to analyze moisture variation of drying loads in the different part of the load. Based on the results of this study, the dryer workers should be better able to estimate average moisture content of the drying loads.</p> <p>The theoretical part of this thesis introduces the client company as well as explores the moisture technical properties of wood and explains the principles of different types of kilns. At the beginning of this study, the moisture content of fresh wood is explicated after which the results of the different measurement methods is compared.</p> <p>This thesis established the reliability of the different measurement methods when determining the average moisture content of the drying load and found a significant variation between the different individual measurements. The quality of drying was significantly influenced by maintaining a stable load in drying kilns and keeping the operations consistent.</p>		
Keywords		
sawn timber, single-zone kiln, drying quality, target moisture content		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	Metsä Fibre Oy	2
3	Sahatavaran tuotantoprosessi	3
3.1	Tukkien käsittely.....	3
3.2	Sahaus	3
3.3	Tuorelajittelu ja rimoitus.....	4
3.4	Kuivaus	5
3.5	Lajittelu ja paketointi	5
4	Puun kosteus.....	7
4.1	Puun kosteuspitoisuus.....	7
4.2	Puun kosteustekniset ominaisuudet	7
4.3	Kosteuden määrittäminen.....	9
5	Teollinen sahatavaran kuivaus.....	12
5.1	Kuivauksen peruserätyt	12
5.2	Kuivaamotyypit	12
5.3	Kuivausprosessin hallinta	16
5.4	Lämmöntuotanto ja energiatehokkuus	16
6	Tutkimustyö	18
6.1	Lähtötilanne.....	18
6.2	Laitteet ja tiedonkeruu	18
6.3	Tulokset.....	19
7	Tulosten tarkastelu	27
7.1	Toiminnan kehittäminen ja parannusehdotuksia	27
7.2	Kuivauskuorman keskikosteuden arviointi	28
8	Yhteenveto	30
	Lähteet	31

1 Johdanto

Sahatavaran kuivauksen onnistuminen on oleellinen osa laadukkaan puutavaran tuotannossa. Kuivausprosessin lopputulokseen vaikuttavat monet tekijät alkaen jo yksittäisten puiden ominaisuuksien vaihtelusta jatkuen kuivaamon ominaisuuksiin.

Kuivaus perustuu nykyisessä sahateollisuudessa lähes täysin keinokuivaukseen entisaikojen ilmakeivauksen sijaan. Kuivauksessa tavoitteena on poistaa sahatavarasta vettä mahdollisimman tehokkaasti välttämällä laatu tappioita. Kuivattavalle sahatavaralle on määritetty tavoitekosteus, johon koko kuivauserä pyritään kuivaamaan pyrkien mahdollisimman pieneneen hajontaan tavoitekosteudesta.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää kuivauskuormien kosteusjakaumaa eri kuivauskanavissa ja kuormatasolla riippuen missä kohdassa kuivauskuormaa sahatavarakappaleet ovat olleet. Lähtötilanteessa oli oletus kuivauskuormien kosteuksien hajonnan vaihtelusta kolmen eri yksivaiheisen kuivauskanavan välillä ilman tarkempaa tutkimusta. Tutkimuksessa päätettiin keskittyä sivulautojen kuivaustulosten analysointiin. Työn tavoitteena oli selvittää kuivauslaadun kannalta optimaalista kuorman ulosottokosteutta kuivaamosta, jolloin kuorman keskikosteus olisi mahdollisimman lähellä tavoitetta. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Metsä Fibre ja toimipisteenä yrityksen Rengon saha Hämeenlinnassa.

Opinnäytetyön teoreettisessa osassa esitellään toimeksiantaja ja käydään läpi sahatavaran tuotantoprosessia. Kuivauksen merkitystä puun ominaisuuksiin ja kuivaukseen liittyvää teoriaa käsitellään, jotta ymmärretään kuivauksen vaikutuksia puun ominaisuuksiin. Käytössä olevat kuivaamot ja eri menetelmät puun kosteuden määrittämiseksi esitellään osana teoriaa. Käytännön osuudessa analysoidaan valittujen kuivauskuormien kosteusjakaumaa hankittujen kuivaustulosten perusteella.

2 Metsä Fibre Oy

Metsä Fibre kuuluu osana suomalaiseen metsäteollisuuskonserni Metsä Groupiin. Metsä Groupin liiketoiminta jakautuu viiteen eri liiketoiminta-alueeseen, joita ovat Metsä Forest, Metsä Wood, Metsä Fibre, Metsä Board ja Metsä Tissue. (Metsä Group.) Metsä Fibre käsittelee sellun ja sahatavaran tuotannon. Päätuotteiden lisäksi yritys on merkittävä biokemikaalien, sekä sivutuotteena syntyvien uusiutuvien polttoaineiden tuottaja. Metsä Fibrellä on Suomessa neljä sahaa ja sellutehdasta, mitkä työllistävät 1600 työntekijää. (Metsä Fibre Oy.)

Rengon saha on Metsä Fibren Hämeenlinnan Rengossa toimiva yksikkö. Se perustettiin vuonna 1977, minkä jälkeen sen toimintaa on kehitetty ja kasvatettu. Sen päätuotteena on kuusisahatavara, josta noin 90 % päätyy vientiin ja käyttöön eri teollisuudenaloille. Käyttökohteita ovat muun muassa sisä- ja ulkoverhoustuotteet, liimapuun valmistus, rakentaminen, puusepänteollisuus ja betonimuotit. Käyttökohteesta riippuen sahatavaralla tulee olla asiakkaan vaatimat ominaisuudet, kuten sopiva kosteuspitoisuus, säänkesto, esteettiset ominaisuudet sekä mittapysyvyys ja lujuus. Rengon sahan tuotantokapasiteetti on noin 320 000 kuutiota valmista sahatavaraa, ollen kokoluokassaan Suomalaisittain keskikokoinen saha. Sen henkilöstöön kuuluu 80 työntekijää. (Metsä Fibre Oy.)

3 Sahatavaran tuotantoprosessi

3.1 Tukkien käsittely

Sahausprosessin ensimmäinen vaihe sahalaitoksella on tukkien vastaanotto ja tukkilajittelu. Tukkikuormien erätietojen perusteella tehdään ensimmäinen jaottelu, minkä perusteella on mahdollista tarkastella tukkieriä puukauppakohtaisesti. Tukkilajittelun tavoitteena on suorittaa vastaanottomittaukset puukauppojen tarpeisiin sekä tukkien lajittelu niiden ominaisuuksien perusteella sahan tuotantotarpeisiin. Sahan tuotantotarpeisiin tukit lajitellaan niiden ominaisuuksien, kuten laadun ja latvaläpimitan mukaan. Laadullisesti kelvottomat tukit, pyritään saamaan sivuun mahdollisimman aikaisin, ettei niistä aiheutuisi tuotantohäiriöitä myöhemmissä vaiheissa. Syitä hylkäämiseen voivat olla esimerkiksi liika lenkous, laho tai metallia sisältävät puut. (Sipi 2006, 49–50.)

Lajitellut tukit varastoidaan tukkikentälle tukkiteloihin. Tukkien kuorinta ja tyvisievennys ovat tukkilajittelua seuraavat työvaiheet. Kuorinnan tavoitteena on poistaa epäpuhtaudet ja kuori mahdollisimman tarkasti, jotta syntyvä sahatavara ja massahake olisivat mahdollisimman kuorettomia. Erityisesti massateollisuuden käyttöön menevässä hakkeessa kuoren osuus on tarkasti rajattu. (Sipi 2006, 53.)

3.2 Sahaus

Sahauksessa saanto on käsite, joka määrää miten tukki kannattaa sahata. Saantoa voidaan tarkastella saatavan sahatavaran tilavuutena suhteessa tukkiin tai arvosaantona, jossa huomioidaan sahatavaran arvon ja määrän lisäksi myös sivutuotteiden arvo. Yleinen tukista saatavien tuotteiden jakauma on 45–50 % sahatavaraa, 28–32 % haketta, 10–15 % purua ja 10–12 % kuorta. (Varis 2017, 46.)

Sahalinjan syöttökuljettimella ennen varsinaista sahausta on tukkimittari ja tukinpyörittäjä. Mittaustietojen perusteella tukinpyörittäjä kääntää tukin optimaaliseen asentoon huomioiden tukin ominaisuudet, kuten lenkouden, soikeuden ja pituuden, jotta sahausprosessi sujuisi mahdollisimman optimaalisesti. Ensimmäisenä sahauskoneena on usein pelkkahakkuri, jolla sahataan pelkan tai tukin kaksi vastakkaista sivua valmiiksi sahapinnaksi. Pelkkahakkuri hakettaa ulkopinnat suoraan hakkeeksi, jolloin vältetään pintojen käsittelyltä. Pelkkahakkurilla tehdyt sahapinnat toimivat ohjauspintoina myöhemmissä sahausvaiheissa. (Varis 2017, 93–94.)

Pelkkahakkurin jälkeen sahalinjoihin on käytössä erilaisia sahausmenetelmiä. Yleisimpiä ovat pyörösaha-, vannesaha-, veistosahalinjat sekä erilaiset niistä koostuvat yhdistelmäsaahalinjat. Sahakoneet ovat joko kiinteäasetteisiä tai muuttuva-asetteisiä. Kiinteä-

asetteinen sahaus edellyttää, että sahattavien tukkien tulee olla samaan tukkiluokkaan lajiteltuja. Muuttuva-asetteinen sahakone säädetään aina tukkikohtaisesti suurimman mahdollisen saannon saavuttamiseksi. Kiinteäasetteisten etuna on niiden tehokkuus. (Varis 2017, 89–99.)

3.3 Tuorelajittelu ja rimoitus

Sahauksen jälkeen seuraavana vaiheena on tuorelajittelu, jota kutsutaan myös dimensiolajitteluksi. Lajittelu erottaa eri dimensiot ja laadut kuivausta varten eri ryhmiin. Nykyisin tuorelajittelussa laatulajittelun merkitys on kasvanut, sillä konenäköjärjestelmien kehittyessä havaitut viat voidaan poistaa aikaisemmin. Tuoreen sahatavaran katkonnan etuna on maksimoida tuorehakkeen määrä sekä minimoida hukan käsittelyä seuraavissa vaiheissa. (Sipi 2006, 103–104.)

Lajiteltu sahatavara välivarastoidaan lokeroihin odottamaan määrän täyttymistä. Lajittelulokeroita on erilaisia ja ne voidaan jakaa häkkilokeroihin, pysty- tai vinolokeroihin ja vaakalokeroihin. Pysty- tai vinolokerot ovat yleisesti käytössä Suomessa, kuten myös toimeksiantajan sahallä on käytössä pystylokerot. Lajittelulokeroiden määrä vaihtelee tyypillisesti 10–70 välillä mitoitettuna tuotteiden lukumäärään, vaihtotiheyteen ja kuormakokoon. Automaattikka laskee kappaleiden määrän lokeroissa, mikä mahdollistaa halutun kokoisten kuormien rimoittamisen. Lokerot tyhjennetään niiden alla olevalle kuljettimelle, joka siirtää erän rimoitukseen. (Varis 2017, 118–124.)

Rimoituksessa sahatavarakappaleista ladotaan kuivaamokuormia, joiden kerrosten välissä on poikittaissuuntaiset rimat. Kiramot purkavat lokeroilta tulleet kasat matoksi, josta ladotaan kerroksia kuivauskuormaan. Kuivauskuormat ovat usein pidempiä kuin niissä olevat kappaleet, minkä vuoksi kappaleet päädytetään kerroksissa vuorotellen eri päihin. Kuivaamokuormien koko riippuu kuivaamokanavien tai -kamarien koosta. Yleensä kuorman pituus on 6000–6500 mm, leveys 1600–2100 mm ja korkeus 2300–6000 mm (Varis 2017, 129). Korkeussuunnassa päiden tulisi olla tasan, jotta alapuoliset kerrokset tukisivat seuraavia rimoja, eikä tapahtuisi vääntymistä. Ohuilla dimensioilla voidaan alimmissa kerroksissa laatoa ensimmäiset kaksi kerrosta tuplakerroksina tai käyttää useampia rimoja, ettei pohjakerroksissa olevat laudat vääntyilisi ja katkeilisi. Leveillä dimensioilla kuorman reunimmaisimmat rimat ovat lähellä kuorman päitä, jotta sahatavarakappaleiden päätyhalkeilua saataisiin rajoitettua.

3.4 Kuivaus

Kuivauksen tavoitteena on poistaa tuoreesta sahatavarasta vettä, sillä sahatavaralta vaaditut ominaisuudet paranevat puun kuivuessa. Kuivauksen jälkeen puu on kevyempää, lujuudeltaan ja jäykkyydeltään vahvempaa sekä suojassa lahottajien vaikutukselta. (Puuinfo Oy 2020.)

Teollinen sahatavaran kuivaus on ilmankiertoon perustuva kuivaustapahtuma. Yleisimpiä kuivaamotyyppejä ovat erilaiset kamari- ja kanavakuivaamot, joiden ominaisuuksissa ja käyttöperiaatteessa on eroja. Näissä kuivaamoissa kuivaus tapahtuu kierrättämällä lämmitettyä ilmaa hallituissa olosuhteissa aksiaalipuhaltimilla kuivauskuormien läpi. Kamari- ja kanavakuivaamoiden merkittävin ero on niiden toiminnassa. Kamarikuivaamoissa kuivaus tapahtuu erä kerrallaan kuivauskaavan mukaan, kun taas kanavakuivaamot ovat jatkuva-toimisia ja niissä kuivauskuorma etenee vaihtovälien tahdissa kanavan läpi. (Varis 2017, 132–134.)

Rengon sahalla on käytössä neljä kamarikuivaamoja ja yhdeksän kanavakuivaamoja, joista kolme on 2-vaiheisia ja loput 1-vaiheisia. Kuivauskuormien siirtäminen tapahtuu rullaradoilla rimoituksesta läpi kanavakuivaamojen. Kuormien siirtäminen rimoittamon kuljettimelta halutun kanavan varastoraiteelle tai erillisille varastoraiteille tapahtuu traverssilla. Kanavakuivaamoista poiketen kamarikuormien siirto tapahtuu trukeilla.

Sahatavaran kosteusvaatimukset asettavat tavoitteet puun kuivaukselle. Pohjoismaisen lajitteluohjeen mukaisesti kaikkien sahatavaramittojen maksimikosteus on 24 % ja koko erän kappaleista 93,5 % tulee olla EN 14298 asettamien vaatimusten sisällä. Kosteusvaatimukset perustuvat puun käyttökohteisiin, jotka asettavat tuotteelle vaatimuksia, jotta tuote soveltuu käyttötarkoitukseensa. Sahatavaran kuivausasteet jaetaan yleisesti vientikuivaksi ja puusepäнкуivaksi. Vientikuivan sahatavaran kosteus on 18–24 %, kun taas puusepäнкуivan sahatavaran kosteus on 8–14 %. (Varis 2017, 142–143.)

3.5 Lajittelu ja paketointi

Kuivauksen jälkeen kuivauskuormien tulee antaa tasaantua ja jäähtyä ennen paketointia, mikä tapahtuu kuivaamon ulkopuolisessa katoksessa. Sahatavaran jäähtymisvaiheessa sen pinnalta haihtuu vielä kosteutta ilmaan samalla kun puun kosteusgradientti pyrkii tasaantumaan. Etenkin paksummilla dimensioilla kosteuden tasaantuminen vaatii aikaa. (Anttila 2025.)

Kuivalajittelulaitoksen eli tasaamon tehtävä on katkoa ja lajitella saheet määrätyn kokoisiksi eriksi pakettiin. Lajittelu perustuu puun visuaalisiin ja lujuudellisiin ominaisuuksiin, joiden perusteella laatuluokka määräytyy. Sahatavaran katkonta tapahtuu moniteräisellä katkaisusahalla, jonka toimintaa ohjaa automaattinen laadutusjärjestelmä. Laadutusjärjestelmä arvio konenäön perusteella, onko havaittu vika katkaistavissa pois vai putoaako kappale kokonaisuudessaan alempaan laatuluokkaan. Saheiden päät tasataan aina ja pituuden katkonta perustuu moduulimittoihin tai asiakkaan vaatimukseen. (Varis 2017, 148–151.)

Laadutusautomaatiikan lisäksi linjakosteusmittarilla mitataan kuivatun sahatavaran kosteutta, jotta märäksi jääneet kappaleet voidaan hylätä tai määrän ollessa tarpeeksi suuri ne voidaan lajitella uudelleen kuivattavaksi eräksi. Edellisessä ajossa vajaiksi jääneet sahatavarapaketit tai muuten vaurioituneet päätyvät uudelleenajoon, jotta niistä saadaan kunnollisia paketteja.

4 Puun kosteus

4.1 Puun kosteuspitoisuus

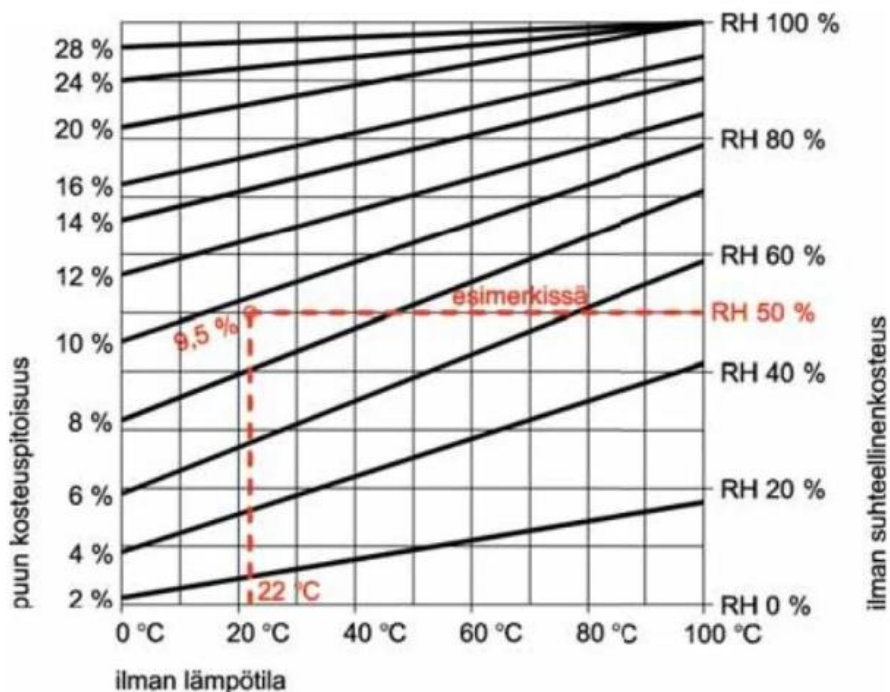
Tuoreen puun painosta veden osuus voi olla moninkertainen verrattuna puun kuivapainoon (Varis 2017, 129). Kasvavassa puussa vesi on tarpeellista, sillä sen avulla kuljetetaan ravinteita puun latvaan, lehtiin ja neulasiin. Vesi on myös tärkeä osa puukuidun soluseinämää. Elävän puun soluseinämät ovat kyllästyneet vedellä ja soluontelot sekä soluvälit ovat täynnä vettä. (Tapion taskukirja 2018, 417.)

Puun kosteus määritetään puussa olevan veden painon suhteena puun absoluuttiseen kuivapainoon ja se ilmoitetaan prosentteina. Lähtökosteus on yleensä 40–200 %. (Varis 2017, 129.) Lähtökosteuteen vaikuttaa useita tekijöitä, kuten puulaji, kasvupaikka, tiheys, vuodenaika ja tarkasteltava rungonosa. Havupuiden pintapuun ja sydänpuun kosteuden ero on huomattava. Kuusen pintapuun ja sydänpuun kosteussuhteet ovat noin 160 ja 36 %. Tämän takia puunrungon kosteussuhde kasvaa tyveltä latvaan, koska kuivemman sydänpuuosuuden määrä pienenee rungon läpimitan pienentyessä. (Tapion taskukirja 2018, 417.)

Puun kuivauksessa puun sisältämä vesi jaetaan soluonteloissa olevaan vapaaseen veteen ja soluseinämien sisältämään sidottuun veteen. Kuivauksessa puun sisältämä vapaa vesi poistuu puusta ensin. Puun syiden kyllästymispisteellä (PSK) tarkoitetaan tilannetta, jossa tuoreessa puussa ollut vapaa vesi on jo poistunut soluonteloista, mutta soluseinämät ovat täynnä vettä. Puun syiden kyllästymispiste vaihtelee puulajeittain. Suomessa päähavupuulajien puun syiden kyllästymispiste +20 °C:ssa on noin 30 %. (Puuinfo Oy, 2020.)

4.2 Puun kosteustekniset ominaisuudet

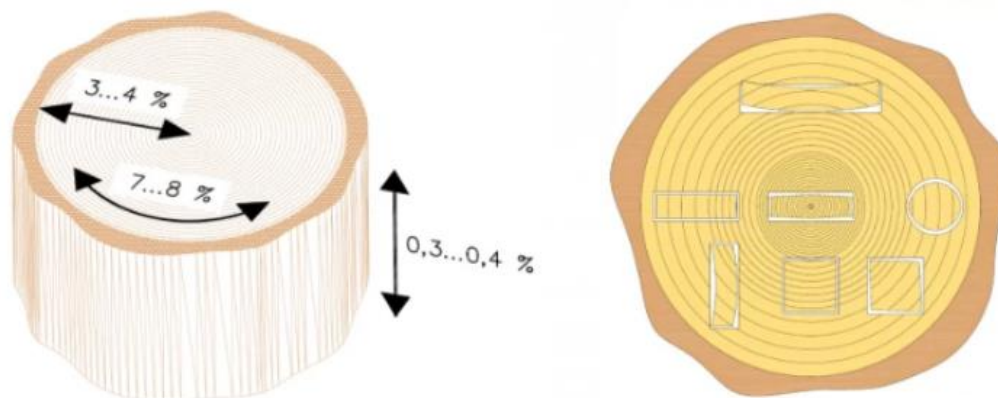
Puun kosteustekniset ominaisuudet vaikuttavat puumateriaalin käyttäytymiseen eri vaiheissa. Puun hygroskooppisuuden seurauksena vesi liikkuu puussa kapillaarisesti joko nesteinä, höyrynä tai molekylaarisena diffuusiona soluseinämän kautta. Hygroskooppisuuden takia puun kosteus vaihtelee ympäröivän ilmakehän kosteuden mukana. Taulukko 1 esittää puun tasapainokosteuden, eli kosteuden johon puutavara pyrkii tasaantumaan kulloinkin vallitsevissa olosuhteissa. Tasaantumisen vaatima aika riippuu ilman olosuhteista, pakkausten tiiviyydestä, kappaleen poikkeamasta tasapainokosteuteen sekä kappaleiden paksuudesta. (Varis 2017, 131.)



Taulukko 1. Puun tasapainokosteus (Puuinfo Oy 2020)

Puu on anisotrooppinen materiaali, eli sen ominaisuudet ovat erilaiset eri suunnissa. Anisotropisuus ilmenee puun kutistumisena ja turpoamisena kosteuden vaihtelujen seurauksena. Kuva 1 havainnollistaa puun mittojen muutosten suuruutta eri suunnissa, kun puun kosteuden vaihdellaan 30 prosentin ja 10 prosentin välillä.

Kosteuselämisen seurauksena puun mitat muuttuvat vuosirenkään suunnassa 5–6 %, säteen suunnassa 2–3 % ja pituussuunnassa 0,2–0,3 %. Mittojen muutokset tulee ottaa huomioon tuotannossa, jotta kuivattu lopputuote olisi mitoiltaan oikea. Kosteuselämisen seurauksena puun kuivussa kappaleeseen aiheutuu muodonmuutoksia, ja mahdollista halkeilua. Puun kuivussa sen lujuus- ja jäykkyysominaisuudet kasvavat. (Puuinfo Oy.)



Kuva 1. Puun kosteuseläminen eri suunnissa (Puuinfo Oy 2020)

Puun kosteus vaikuttaa puun säilyvyyteen, sillä kosteuden ollessa pitkään liian korkea puu alkaa homehtua ja myöhemmin lahota. Homeen kasvu on mahdollista, jos puun kosteus on pitkään yli 20 prosenttia. Ilmankosteus ja lämpötila vaikuttavat kuitenkin vaurioiden syntymiseen, sillä puun tasapainokosteuden nouseminen yli 20 prosenttiin vaatii yli 80 prosentin suhteellisen ilmankosteuden ja lahoamiseen vaaditaan jo yli 90 suhteellinen ilmankosteus. Puun homehtuminen ja lahoaminen edellyttää, että lämpötila on + 0 - + 40 °C. (Puuinfo Oy 2020.)

Puun sinistymisen on sinistäjäsiementen aiheuttamaa vauriota, joka värjää puun. Sinistymisen ulottuu puun pintaa syvemmälle toisin kuin homeet, jotka ovat vain pinnassa. Sinistymistä esiintyy etenkin varastoidussa tuoreessa havupuussa ilman lämpötilan ollessa vähintään + 5 °C. Sinistymisellä ei kuitenkaan ole oleellista vaikutusta puun lujuuteen. (Puuinfo Oy 2020.)

4.3 Kosteuden määrittäminen

Punnitus-kuivaus -menetelmä

Punnitus-kuivaus -menetelmässä sahatavarakappaleesta otetaan koepala, joka punnitaan ennen ja jälkeen kuivauksen. Koepala kuivataan lämpöuunissa 103 ± 2 °C absoluuttisen kuivaksi. Alkupainon ja koepalan kuivapainon avulla määritetään kappaleessa olleen veden massa, jota verrataan kuivan puuaineen massaan. Kertomalla veden ja kuivapainon suhde sadalla saadaan puun kosteusprosentti (kaava 1). Menetelmä on hidas, mutta sillä voidaan selvittää kosteus tarkasti. (Sipi 2006, 114.)

$$\text{Puun kosteusprosentti} = \frac{\text{alkupaino} - \text{kuivapaino}}{\text{kuivapaino}} \times 100 \quad (1)$$

Kaava 1. Puun kosteuden laskentakaava

Vastusmittari

Puun sähkövastukseen perustuva kosteuden mittaaminen perustuu puun sähköisten ominaisuuksien ja kosteuden väliseen riippuvuuteen. Mittaus tapahtuu käsimitarilla, jonka piikkimäiset elektrodit lyödään puuhun. Mittari mittaa sähköisen vastuksen piikkien välillä ja antaa vastukselle määritetyn kosteusprosentin. Mitattaessa mittariin on määritettävä oikea puulaji sekä puun lämpötila, jotta mittaustulokset ovat luotettavia. Vastusmittarit ovat yleisesti käytössä, sillä niillä saadaan määritettyä esimerkiksi kuivauskuorman ulosottokosteus riittävän tarkasti ja nopeasti. Mittarin toimivuus tarkastetaan säännöllisin väliajoin erillisen vastuskappaleen avulla. (Sipi 2006, 114.)



Kuva 2. Delmhorst-piikkimittari

FMI-linjakosteusmittaus

Rengon sahan tasaamolla on käytössä kontaktiton FMI-kosteusmittausjärjestelmä. FMI-järjestelmään kuuluu mikroprosessoriohjattu ohjausyksikkö ja yksi tai useampi mikroprosessoriohjattu kontaktivapaa anturi. FMI-järjestelmä on mittausperiaatteeltaan kapasitiivinen ja mittaus perustuu kappaleen dielektisyysvakioon. Anturit sijaitsevat poikittaiskuljettimella mitattavan kappaleen alapuolella. Yhdellä anturilla kosteus saadaan mitattua noin 50 cm:n pituudelta. Useampaa anturia käytettäessä ohjausyksikkö laskee kappaleen

keskikosteuden mittausten perusteella. (Sateko Finland Oy 2001.) Järjestelmän toiminta tarkastetaan säännöllisin väliajoin käyttämällä laitteen mukana toimitettuja erillisiä referenssikappaleita. Tarvittaessa järjestelmän asetuksia voidaan kalibroida, edellyttäen kuitenkin tietoa muutosten vaikutuksista kokonaisuuteen. (Anttila 2025.) Kuvan 3 etualalla näkyy yksi FMI järjestelmän anturi.



Kuva 3. Kosteusmittausjärjestelmän anturit

5 Teollinen sahatavaran kuivaus

5.1 Kuivauksen peruseriaate

Kuivauksen peruseriaate on haihduttaa vettä puun pinnalta kuivausilmaan. Kuivaukseen vaikuttaa kuivattavan puun ominaisuudet, kuten haihdutettavan veden määrä, puun tiheys, kuivattava dimensio, vuodenaika ja kuivaamon ominaisuudet, kuten kuivausilman nopeus, lämpötila ja kosteus. (Sipi 2006, 118–119.)

Veden haihtumisnopeuden tulisi olla samansuuruinen kuin veden liikenoisuus puun sisältä pinnalle, jotta puu kuivuisi tasaisesti, eikä syntyisi kuivumisen jopa estävää pintakovuutta. Kuivausilman lämpötilan nosto nopeuttaa sekä veden haihtumista, että veden liikettä puussa, samalla lämmin ilma pystyy myös sitomaan enemmän kosteutta. Ilmankosteuden tulee myös olla riittävän korkea, ettei kuivuminen olisi liian nopeaa. Lämpötilan lisäksi ilman nopeudella on merkitystä kuivauslaadun tasaisuuteen. Ilman nopeus vaikuttaa siihen, kuinka paljon lämpöenergiaa saadaan siirrettyä kuivattavaan sahatavaraan mahdollisimman tasaisesti. Heikko ilman nopeus sekä matala lämpötila aiheuttavat suurempaa hajontaa kuivauskuorman osien välillä. (Sipi 2006, 118–120.)

Puun tiheys vaikuttaa veden siirtymisnopeuteen puussa. Tiheämmässä puussa soluseinät ovat paksumpia, mikä hidastaa veden kulkua. Kesäpuun osuuden ollessa suuri puuaines on harvempaa ja soluseinämät ohuempia, mikä mahdollistaa nopeamman kuivumisen. (Sipi 2006, 118–121.)

5.2 Kuivaamotyypit

Kamarikuivaamot

Kamarikuivaamot ovat jaksoittain toimivia kuivaamoja, joissa kuivaus tapahtuu erä kerrallaan. Kamarikuivaamot soveltuvat monipuolisesti kaikenlaisen sahatavaran kuivaukseen, sillä kuivausprosessi tapahtuu kuivattavalle tuotteelle laaditun kuivauskaavan mukaan. Kuivauskaavassa kuivausprosessi on jaettu vaiheisiin, joiden aikana kuivaamon olosuhde vaihtelee. Kuivaamon puhaltimet, lämpöpatterit ja kostutusjärjestelmä sijaitsevat kuivaamon välitasolla kuormien yläpuolella. Jotta kuivausolosuhde olisi mahdollisimman sama kaikissa osissa kuivauskuormaa, ilman kiertosuunta vaihtelee muutaman tunnin välein. Ilmankosteuden ja lämpötilan mittaaminen on oleellista kuivausprosessin hallinnan kannalta. (Varis 2017, 132–133.)

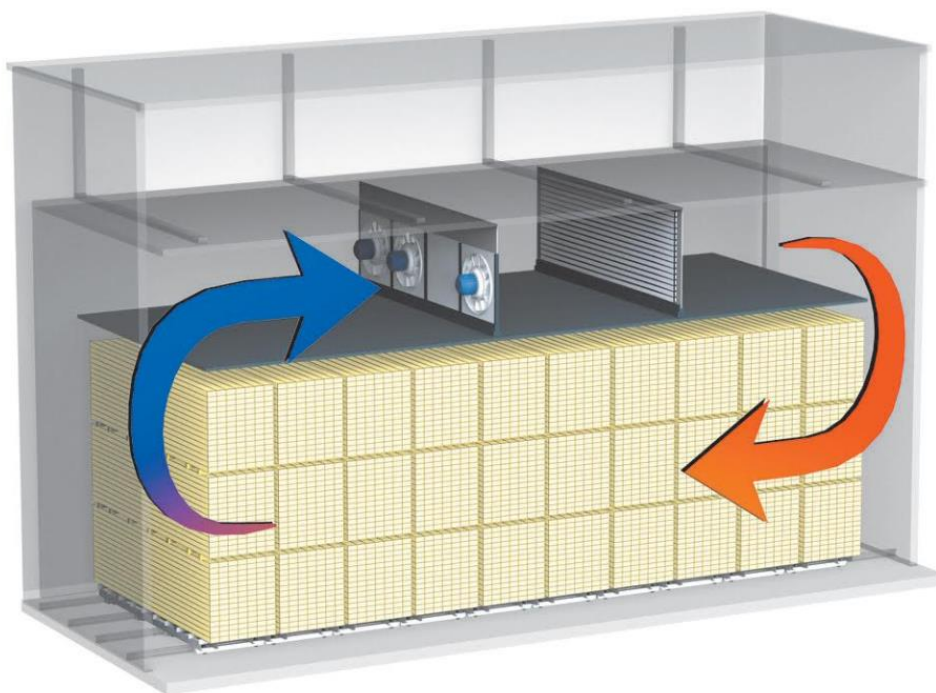
Kamarikuivaamoiden etuna on juuri kuivausolosuhteiden tarkka hallinta, mikä mahdollistaa korkeat vaatimukset kuivauslaadulle. Kuivauserän pienuus ja alhainen tavoitekosteus ovat

yleisiä syitä päätyä kamarikuivaukseen. Toisaalta järeän sahatavaran kuivauksessa on riski liian nopeasta pintojen kuivumisesta, jos kosteus ei ehdi siirtyä puun sisältä. Liian nopea kuivuminen aiheuttaa pintakovuutta ja halkeilua. Kamarikuivauksen erä koko vaihtelee 50–450 m³ ja tavoitekosteus välillä 5–20 %. (Valutec Oy 2025a.)

1-vaiheinen kanavakuivaamo

Kanavakuivaamot ovat jatkuvatoimisia kuivaamoja, joissa kuivauskuormat liikkuvat kuivaamon läpi kuorman olosuhteiden muuttuessa prosessin aikana. 1-vaiheiset kanavakuivaamot ovat yksinkertaisimpia ja vanhimpia kuivauskanavia, jotka soveltuvat parhaiten ohuiden lautojen tuotantoon. Niillä voidaan päästä keskimäärin 35 000 m³ vuotuiseseen tuotantoon kuivattaessa 15–18 % tavoitekosteuteen. Kuivauskanavan koko ja kuivattava tuote vaikuttavat kuivauskapasiteettiin. (Puuproffa.)

Kuivaus tapahtuu puhaltamalla kiertoilmaa ensin pattereiden läpi, josta se kulkee rimakuormien läpi vastoin kuormien syöttösuuntaa. Kuivauskanavan olosuhde muuttuu kuivauskuorman edetessä kohti ulosottopäätä, sillä ilman lämpötila ulosottopäässä on korkeampi ja kosteus matalampi. (Puuproffa.) Kuvassa 4 esitetään kuivaamon toimintaperiaate.



Kuva 4. 1-vaiheisen kanavakuivaamon toimintaperiaate. (Valutec Oy 2025c)

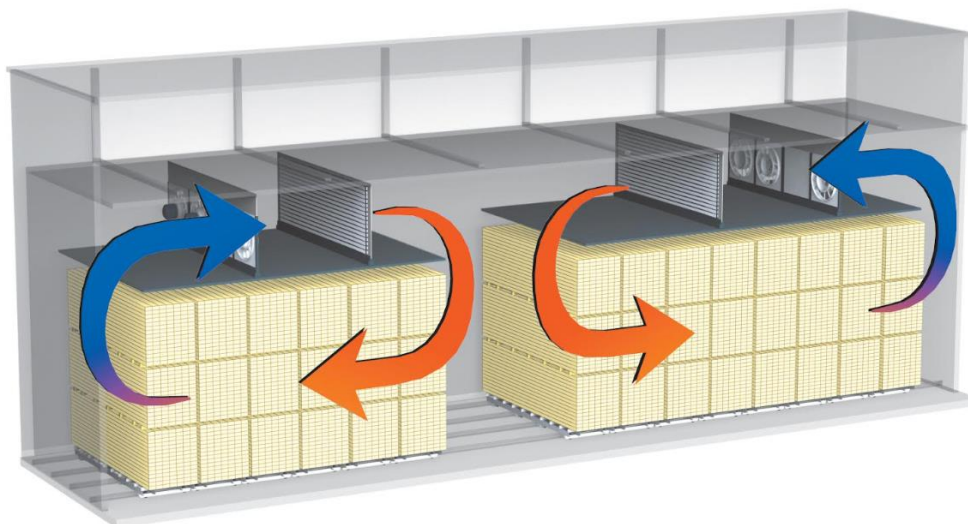


Kuva 5. Näkymä tyhjään 1-vaiheiseen kanavakuivaamoon ulosottopäästä.

Kuvasta 5 näkee kuivauskanavan rakenteita ja tekniikkaa. Kuvan yläosassa oleva teräsraakenne on kuivaamon välitaso, jonka yläpuolella patterit, puhaltimet ja poistoilmakanavat sijaitsevat. Kanavan reunoissa ja välitason alapuolella olevat punaiset viirat ovat ilmanohjaimia, joilla estetään ilman virtaamista kuivauskuormien ohitse. Rullaratojen väleissä näkyy kuormatuet, joilla etenkin ohuempia lautakuormia tuetaan kuivauksen aikana, ettei alimmat kerrokset vääntyilisi.

2-vaiheinen FB-kanava

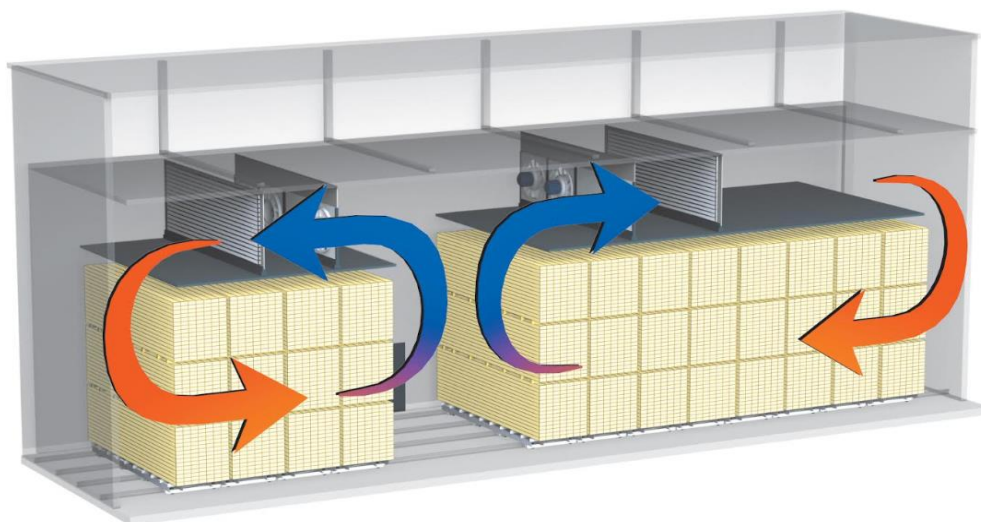
2-vaiheinen FB-kanava (Feed Back) mahdollistaa suuremman kapasiteetin ja laajemman toimivuuden kuin yksivaiheinen kanavakuivaamo. Kuivauskanava on jaettu kahteen osaan, joissa kuivausolosuhteita voidaan hallita. FB-kanavassa ensimmäinen osa on lyhyen 1-vaihekanavan kaltainen, siinä ilma kiertää vastoin kanavan syöttösuuntaa. Ensimmäisessä vaiheessa kuivausolosuhteen kosteus on suurempi, sillä vapaa vesi poistuu siinä nopeasti. Suurempi kosteus estää liian nopeaa kuivumista ja sen aiheuttamia kuivausvaurioita. Toinen osa toimii hitaammin kuivaavana ja kosteushajontaa tasaavana vaiheena. FB-kanavakuivaamot soveltuvat sekä sivulaudan, että keskitavaran tuotantoon ja niillä voidaan saavuttaa jopa 90 000 kuutiometrin vuotuinen kapasiteetti kuivattaessa 12–18 % tavoitekosteuteen. (Valutec Oy 2025b.) Kuvassa 6 esitetään FB-kanavakuivaamon toimintaperiaatetta.



Kuva 6. FB-kanavakuivaamon toimintaperiaate. (Valutec Oy 2025c)

2-vaiheinen OTC-kanava

2-vaiheisten OTC-kanavakuivaamoiden (Optimised Two-stage Continuous) eroavaisuutena FB-kanaviin on niiden erisuuntainen ilmankierto. Ensimmäisessä vaiheessa ilman kulkusuunta on kuorman kulkusuunnan mukainen ja toisessa vaiheessa kuorman kulkusuuntaa vastaan. OTC-kanavat pyrkivät jäljittelemään kamarikuivaamoiden kuivausolosuhteita, mutta samalla mahdollistaen suuremman kapasiteetin. Ilman puhallussuuntien ansiosta alussa vapaan veden poisto on nopeaa, jonka jälkeen kuivaus hidastuu antaen vedelle aikaa siirtyä sisäosista puun pintaan, ettei puuhun syntyisi kosteuselämisestä aiheutuvia vaurioita. Ulosottopäätä lähestyessä kuivaus jälleen tehostuu, mikä mahdollistaa kuivauksen alhaisiinkin loppukosteuksiin. (Valutec Oy 2025b.)



Kuva 7. OTC-kanavakuivaamon toiminnan periaatekuva (Valutec Oy 2025c)

kWh sähköenergiaa ja 25 000 kWh lämpöenergiaa. Yhden erän kuivaukseen kuluva energia vastaakin suunnilleen yhden omakotitalon vuosikulutusta. (Morén 2016, 3–4.)

Sahoilla lämpöenergiaa tuotetaan yleisesti polttamalla tuotannossa syntyviä sivutuotteita, kuten kuorta, purua ja haketta kulloinkin sopivana sekoituksena. Kiinteiden polttoaineiden osalta sahat ovat omavaraisia, sillä oma kulutus purusta ja kuoresta on noin kolmannes (Varis 2017, 147). Oman käytön jälkeen ylijäävä osuus voidaan myydä kaukolämmöntuotantoon tai muihin käyttötarkoituksiin. Käytössä olevasta voimalaitoksesta riippuen myös oma sähköntuotanto voi olla mahdollista, jolloin ainakin osa sähkönkulutuksesta pystytään tuottamaan itse. Rengon sahalla oman sähköntuotannon kapasiteetti vastaa suunnilleen kuivauksen vaatimaa tarvetta. Kuivauksen kannalta voimalaitoksen on oltava riittävän tehokas, jotta kuivaamojen olosuhteet pystytään pitämään tavoiteltuina. Energiatehokkuuden ja kapasiteetin näkökulmasta kuivauskanava kannattaa pitää mahdollisimman täynnä, sillä vajaa kanava tai tyhjän kanavan aloittaminen kuluttaa enemmän energiaa kuivattua määrää kohden. (Anttila 2025.) Kuivaamoiden energiatehokkuutta voidaan parantaa lämmön talteenottojärjestelmillä ilmanvaihdon yhteydessä sekä moottorien taajuusmuuntajilla (Pitkänen 2025).

6 Tutkimustyö

6.1 Lähtötilanne

Loppukosteusjakaumaa tutkittiin kolmesta eri 1-vaihekanavakuivaamosta, joiden ominaisuuksissa tiedettiin olevan eroja. Valitut kanavat olivat 3, 5 ja 6. Kanavissa 3 ja 6 kuivataan pääsääntöisesti pelkkiä sivulautoja, kun kanavassa 5 kuivataan tarpeen mukaan myös leiveitä sydäntavaradimensiota. Tutkimustyössä kanavien ja dimensioiden valinta tehtiin sen perusteella, mille tuotteille kanavien on todettu parhaiten soveltuvan.

Tutkimustyön alussa selvitettiin tuoreen sahatavaran kosteushajontaa ottamalla kahdesta kuivauskuormasta 25x100 ja 22x150 täyssärmäistä sivulautaa koepaloja. Tuoreet kuivauskuormat olivat olleet varastoituna ulkoilmassa talviaikaan pakkasella, josta voitiin olettaa, ettei merkittävää kuivumista ole tapahtunut. Koepaloja otettiin kymmenestä sahatavarakappaleesta yhteensä 20 kappaletta, ottaen ne noin 30 cm etäisyydellä kappaleiden päistä. Kappaleet sahattiin siten, ettei kappaleessa olisi oksia, pihkataskuja tai muita vikaisuuksia. Kappaleiden tuorepainot punnittiin ja kirjattiin ylös ennen kuivausta. Koekappaleita kuivattiin 35 tuntia kuivausuunissa 103 ± 2 °C:ssa, jonka jälkeen ne punnittiin uudelleen välittömästi. Lähtökosteudet laskettiin punnitus-kuivaus -menetelmällä.

Tutkittavat kuivauskuormat pyrittiin valitsemaan tilanteessa, jossa kuivauskanavan täyttöaste olisi mahdollisimman suuri, jolloin kanavan olosuhde olisi vakiintunut. Haasteeksi kanavan täyttöasteen pitämiseksi korkeana tuo kuivattavien sarjojen vaihtuminen etenkin lyhyen kuivausajan vaativilla tuotteilla ja täytettävien kuormien vähäinen määrä.

6.2 Laitteet ja tiedonkeruu

Tutkimustyössä tarkasteltavien kuivauskuormien kuivaustulosten hankinta toteutettiin kuivauksen päättyessä Delmhorst-käsikosteusmittarilla, sekä lajittelun yhteydessä olevalla FMI-kosteusmittausjärjestelmällä. Kuivauskuormien ulosotto kuivaamosta perustuu kuivaamon työntekijän tekemään mittaukseen kuivauskuorman etu- ja takareunasta, joiden keskiarvoksi tavoitellaan tuotteen tavoitekosteutta. Yleisesti mittaus toteutetaan mittaamalla kuusi kappaletta etu- ja takareunasta. Kuorman etu- ja takareunan välisen kosteuseron tarkista etureunan kappaleet kuivataan monesti hieman alle tavoitekosteuden, ettei takareuna jäisi liian kosteaksi.

Tutkittavista kuivauskuormista mitattiin kuivaamosta ulosoton yhteydessä tavanomaista enemmän kappaleita käsikosteusmittarilla, yhteensä 30 kappaletta molemmista reunoista. Mittaukset suoritettiin järjestyksessä mahdollisimman ylhäältä alaspäin, jolloin mittausalue alkoi noin 2,2 metristä laskien noin 0,8 metrin korkeuteen. Mitatut kappaleet merkittiin

etureunasta X:llä ja takareunasta O:lla, jotta kappaleet pystyttiin tunnistamaan niiden tullessa linjakosteusmittarille. Merkittyjen kappaleiden kosteudet kirjattiin ylös linjakosteusmittarilta, jolloin mittauksia pystyttiin vertaamaan kappalekohtaisesti. Merkittyjen kappaleiden lisäksi koko kuivauskuorman linjakosteusmittarilta saadut kuivaustulokset tallennettiin, joiden perusteella voitiin tarkastella eroja korkeussuunnassa.

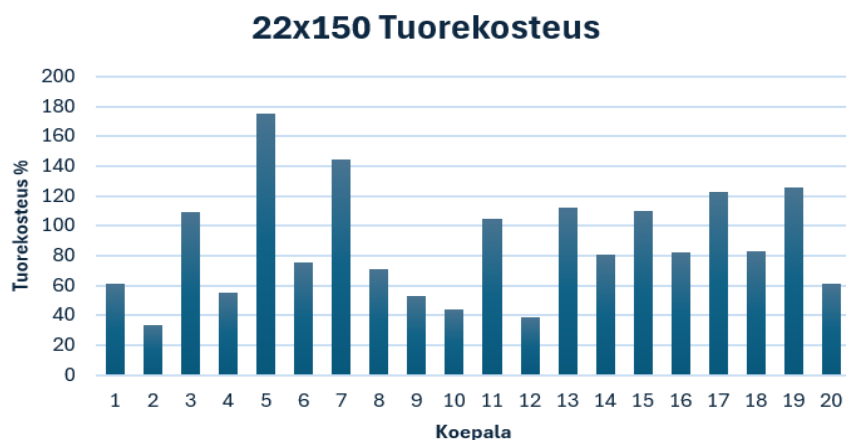
6.3 Tulokset

Kanava 5, kuusi 22x150 mm 17 %

Kanavasta 5 vertailuun otettiin kaksi peräkkäistä kuivauskuormaa tilanteessa, jossa kuivatava sarja oli äskettäin vaihtunut paksummasta 25x150 mm:stä ohuempaan dimensioon. Molemmat kuivauskuormat saatiin otettua ajallaan pois kuivauksesta, eikä ruuhkasta johtuvaa viivästymistä tapahtunut. Jälkimmäisen kuivauskuorman kuivausaika venyi kuitenkin neljä tuntia ensimmäistä pidemmäksi, sillä kuormat oli siirretty samaan aikaan kuivaukseen, jotta silloin vajaa kanava täytyisi nopeammin.

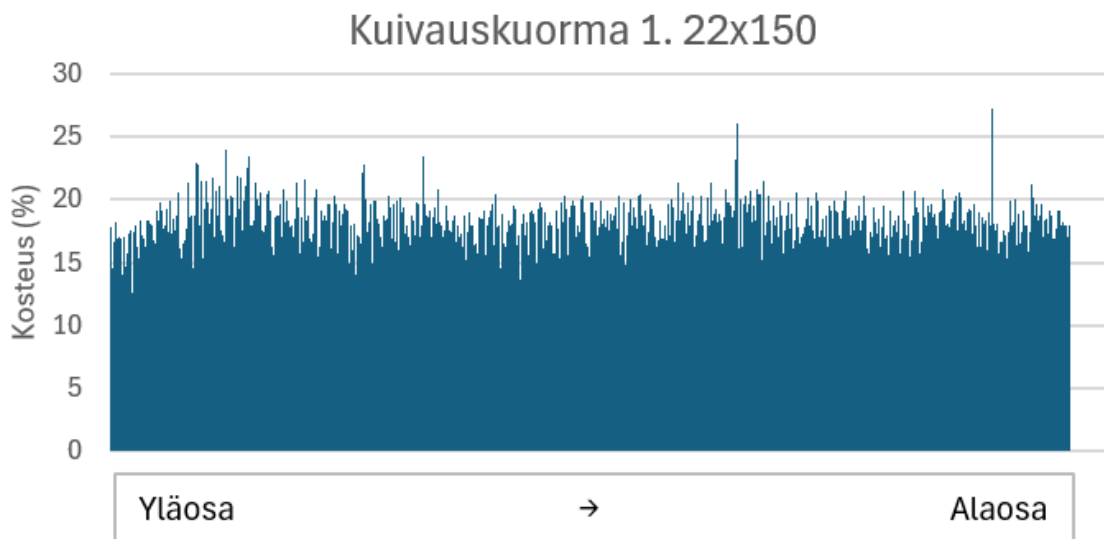
Kanavan 5 koe-erät olivat tutkimustyön ensimmäiset, minkä takia tutkimuksen toteutus eroaa hieman kahden muun kanavan koe-eristä. Eroavaisuutena on, ettei yksilöityjä etu- ja takareunan kappaleiden piikkimittarilla mitattuja kosteuksia verrattu linjakosteusmittarin tuloksiin.

Ennen kuivausta tuoreesta kuivauskuormasta otettiin lähtötilanteen havainnollistamiseksi koepaloja, joiden lähtökosteus määritettiin punnitus-kuivaus -menetelmällä. Tuoreen sahatavaran keskikosteus oli 87 % ja keskihajonta noin 37 %. Kuviossa 1. havainnollistetaan kappaleiden lähtökosteuksia.



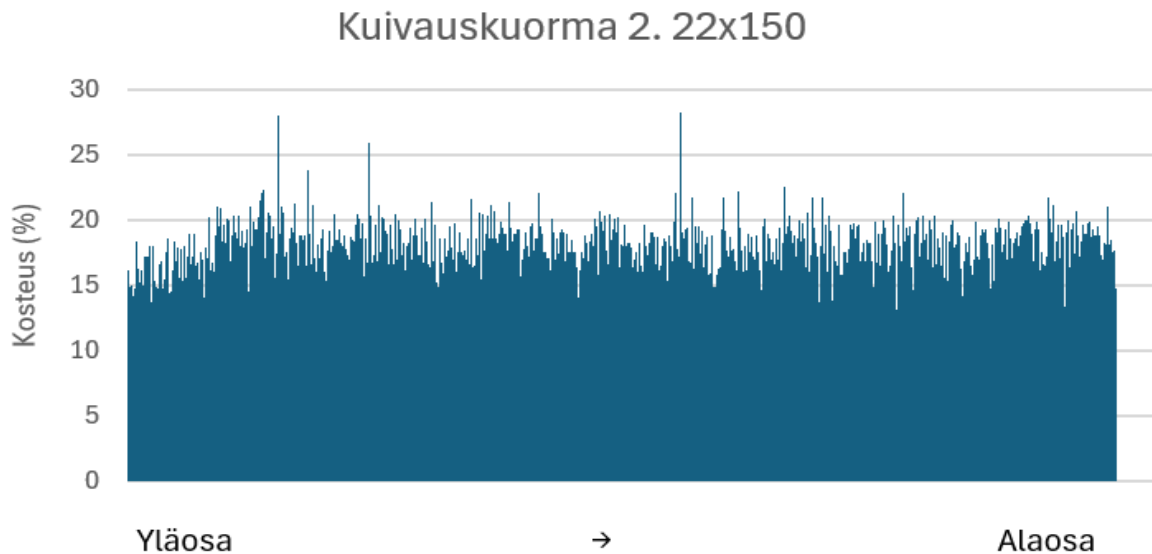
Kuvio 1. Tuorekosteushajonta kuusi 22x150 mm

Kuivauskuorman 1. kuivausaika oli noin 24 tuntia, jolloin 60 mittauksen keskikosteudeksi käsikosteusmittarilla mitattiin 17,4 %. Vastaavasti koko kuorman keskikosteudeksi linjakosteusmittarin mukaan mitattiin 17,3 %. Käsikosteusmittarilla etureunan 30:n kappaleen keskikosteudeksi mitattiin 15,7 % ja takareunan keskikosteudeksi 19,2 %. Linjakosteusmittarin mittausten keskihajonta oli 1,9 % ja piikkimittausten vastaavasti 2,9 %. Kuvio 2 esittää kuivauskuorman 1 kosteuden linjakosteusmittarin mukaan perustuen 1173 mitattuun kappaleeseen. Kuvioista voidaan lukea vasemmalta oikealle kuivauskuorman kuivaustulokset korkeussuunnassa sekä arvioida hajontaa ja keskikosteutta.



Kuvio 2. Kuivauskuorman 1. kuivaustulokset

Kuivauskuorman 2. kuivausaika oli noin 28 tuntia ja ulosottohetkellä sen keskikosteudeksi piikkimittarilla mitattiin 17,9 %, kun etureunan keskikosteus oli 16,6 % ja takareunan 19,4 %. Tasaamon linjakosteusmittarin mittaamaksi keskikosteudeksi saatiin 17,1 %. Linjamittausten keskihajonta oli 2,1 % ja piikkimittausten vastaavasti 3,1 %. Kuvio 3. esittää kuivauskuorma 2. kosteuden linjakosteusmittarin mukaan.



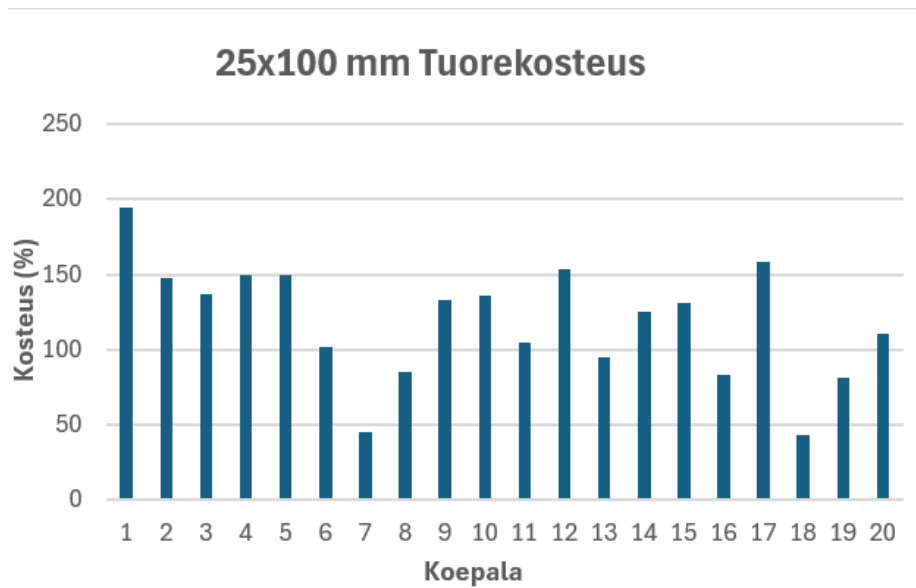
Kuvio 3. Kuivauskuorman 2. (22x150 mm) kuivaustulokset

Kuvioiden 2 ja 3 perusteella voidaan havaita, ettei kanavan 5 kuivauskuormissa ole merkittäviä eroja siinä, millä korkeudella kuivauskuormaa kappaleet ovat olleet. Tarkasteltaessa aivan ylimpiä kerroksia voidaan niiden havaita olevan noin 2 % keskiarvoa kuivempia, mikä johtuu voimakkaammasta ilmavirtauksesta kuorman ja ilmanohjainviirujen välistä. Vastavasti kuorman alaosa voisi olla merkittävästi kuivempi, jos ilmanvirtaus kuorman alta olisi voimakkaampi. Kuivaustuloksista rajattiin pois kaksi alinta ilman rimoja ladottua kerrosta, sillä niiden kosteuksissa oli suurta hajontaa.

Kanava 6, kuusi 25x100 mm 17 %

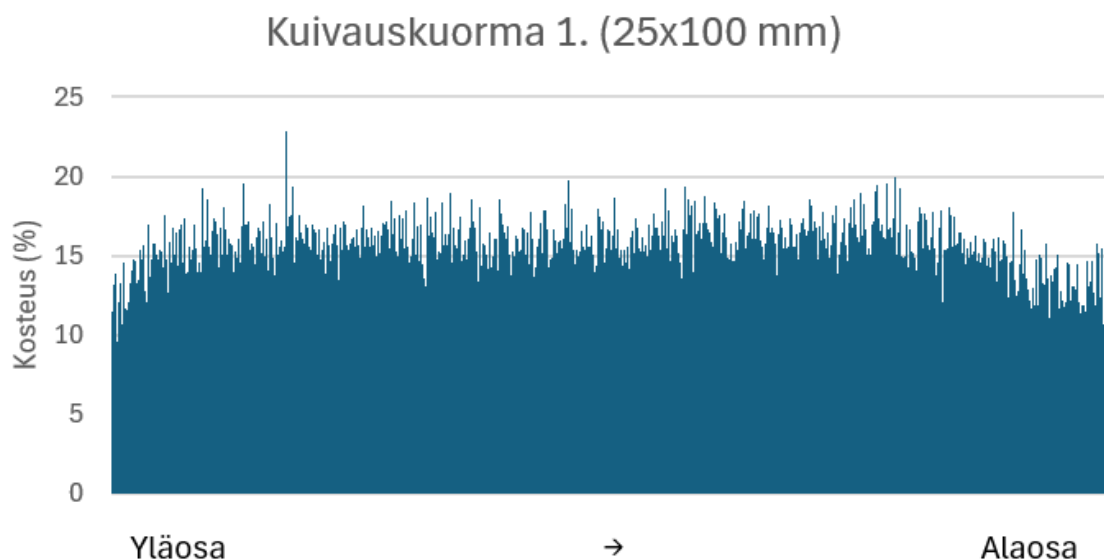
Kanavan 6 tarkasteltavat koe-erät kuivattiin eri aikoina, mutta kuitenkin vastaavissa tuotanto-olosuhteissa. Molempien kuormien kuivauksen aikaan kanava oli täysi ja kuivauskuormat olivat osana pidempää saman tuotteen kuivaussarjaa. Ensimmäisistä kanavan 5 testikuormista poiketen kanavan 6 kuormien etu- ja takareunan piikkimittarilla mitattujen merkittyjen saheidten kosteuksia verrattiin linjakosteusmittarin tuloksiin.

Tuoreen 25x100 mm sahatavaran lähtökosteushajontaa selvitettiin ottamalla koepalat vastaavalla tavalla kuin kanavan 5 kuivattavasta sahatavaradimensiosta. Koska kyseessä oli kapeampi dimensio, niin oletettiin sen lähtökosteudenkin olevan hieman suurempi, sillä siinä pintapuun osuus voisi olla suurempi kuin leveämmällä tuotteella. Tuoreen 25x100 mm sahatavaran keskimääräinen lähtökosteus oli 118 % ja keskihajonta noin 38 %. Kuvio 4 esittää koepalojen tuorekosteuden vaihtelun.



Kuvio 4. Tuorekosteusvaihtelu 25x100 mm

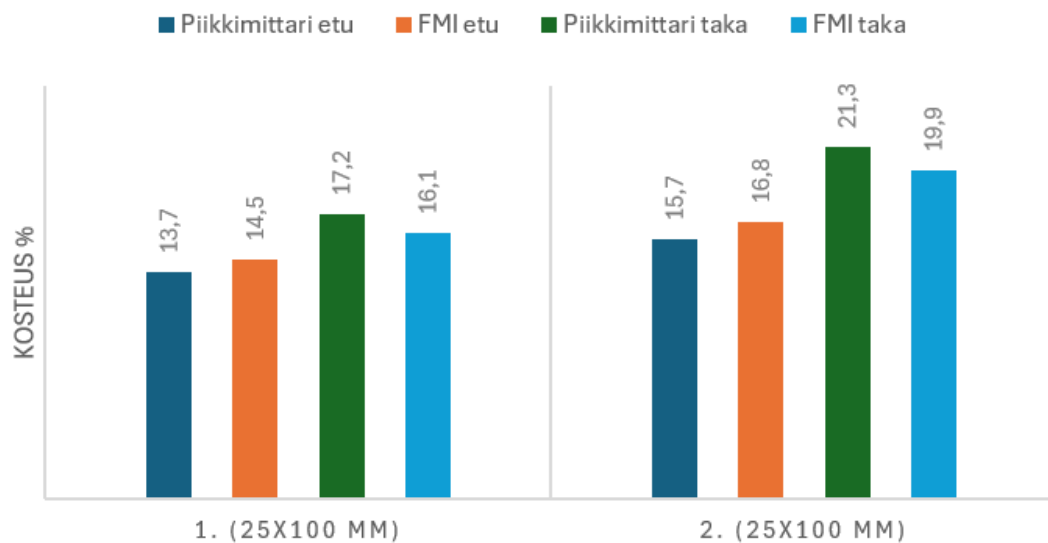
Ensimmäinen tutkimukseen valitun 25x100 mm kuivauskuorman kuivausaika oli noin 60 tuntia, mikä oli kyseisellä hetkellä yleinen kuivausaika edellisillä ulosotetuilla torneilla. Ulosottohetkellä piikkimittarilla 60:nen mittauksen keskikosteudeksi mitattiin 15,5 % ja keskihajonaksi 2,8 %. Koko kuorman kosteudeksi linjakosteusmittauksella saatiin 14,5 % keskihajonnan ollessa 1,9 %. Kuvio 5 voidaan myös havaita keskiarvon olevan tavoitekosteuden alapuolella ja lähinnä vain yksittäisten kappaleiden olevan sen yläpuolella.



Kuvio 5. Kuivauskuorman 1. (25x100 mm) kuivaustulokset

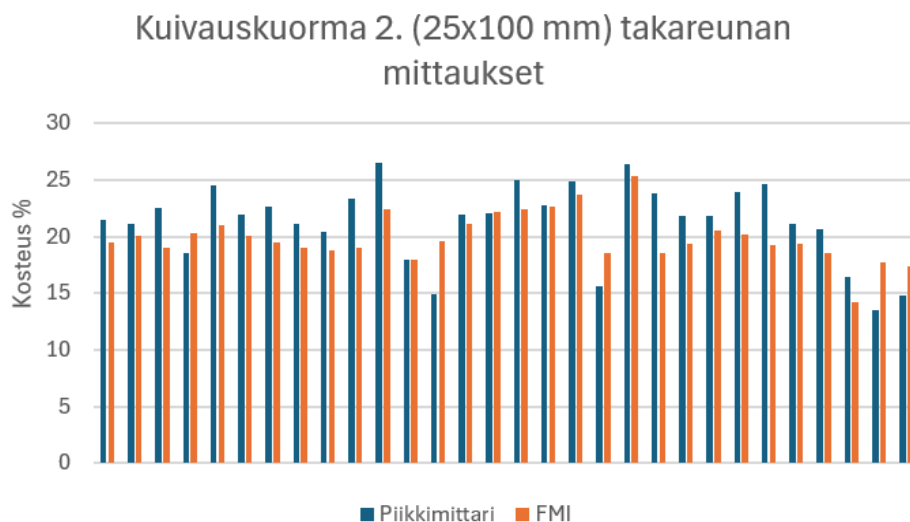
Kuivauskuorman 2. (25x100 mm) kuivausaika oli noin 59 tuntia, mikä oli yleinen myös aiemmin otetuille kuormille. Edellisen kuorman ulosoton ja testikuorman ulosoton välinen aika oli noin viisi tuntia. Ulosottohetkellä piikkimittarilla 60:nen mittauksen keskikosteudeksi

KOSTEUSMITTAUSTEN KESKIARVOT



Kuvio 7. Eri mittausmenetelmillä mitatut keskiarvot kuorman eri puolilta

Kuviossa 8 esitetään kuivauskuorma 2. (25x100 mm) takareunan mittaukset, josta voi todeta yksittäisissä mittauksissa olevan merkittävää hajontaa. Kuvion perusteella kosteimmat saheet olivat usein linjakosteusmittauksessa piikkimittausta kuivempia.



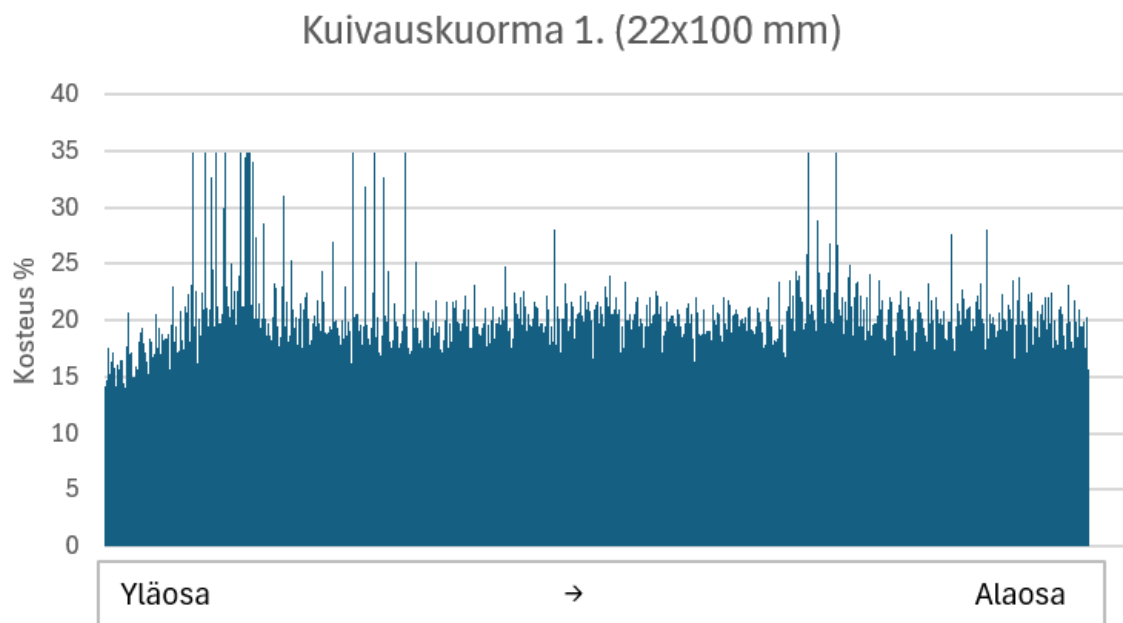
Kuvio 8. Kuivauskuorma 2. (25x100 mm) takareunan mittaukset

Kanava 3, kuusi 22x100 mm 17 %

Kanavasta 3 valittiin tarkasteluun kaksi testikuormaa tilanteessa, jossa kuivauskanavan täyttöasteissa oli ero. Ensimmäinen testikuorma otettiin tilanteesta, jossa kanava oli täynnä, kun taas toisen testikuorman kuivauksen aikaan kanava ei ollut täysi, eikä uusia

täyttöjä enää tehty. Kuivauslaadun kannalta muuttuvat tilanteet osoittautuivat kummassakin tapauksessa haastaviksi, sillä kanavan täytyessä kuivuminen hidastuu johtuen kuivausaikojen kasvamiseen. Täyden kanavan kuivausaikojen kasvu johtaa myös täyttöväljen kasvamiseen, jolloin kuivausajan seuraamisen lisäksi tulee kiinnittää huomiota siihen, kuinka pitkä aika on kulunut edellisen kuorman ulosotosta.

Kuivauskuorman 1 (22x100 mm) ulosottohetkellä kanavasta otettiin ulos kaksi kuivauskuormaa, joista jälkimmäinen valittiin testikuormaksi. Testikuorman keskiarvokosteudeksi 60:nen piikkimittauksen perusteella mitattiin 16,9 %, kun etureunan piikkimittausten keskiarvo oli 14,1 % ja takareunan 19,8 %. Linjakosteusmittauksella kuorman keskiarvokosteudeksi määritettiin 18,9 %, kun etureunan merkittyjen saheidten keskiarvokosteus Fmi-mittauksessa oli 17,2 % ja takareunan 20,7 %. Piikkimittausten keskihajonta oli 3,6 % ja linjamittausten 2,7 %.



Kuvio 9. Kuivauskuorma 1. (22x100 mm) kuivaustulokset

Kuivauskuorma 2. (22x100 mm) ulosottohetkellä kanavan täyttöaste oli vajaa, eikä sitä enää täytetty, mikä näkyi kuivausaikojen lyhenemisestä. Kuivauskuorman keskiarvokosteudeksi piikkimittarilla mitattiin 15,8 %, kun etureunan mittausten keskiarvo oli 13,5 % ja takareunan 18,1 %. Linjakosteusmittauksella koko kuorman keskiarvokosteus oli 15,4 %, kun etureunan saheidten keskiarvokosteus oli 15,2 % ja takareunan 18,3 %. Määritettäessä koko kuorman keskiarvokosteus etu- ja takareunan 60:nen merkityn kappaleen perusteella koko kuorman keskiarvokosteudeksi saatiin 16,7 %. Kyseisen kuivauskuorman tapauksessa erot kuivaustuloksissa korkeussuunnassa olivat merkittävät, sekä kuorman alaosassa että yläosassa olevan ylikuivan osuus oli huomattavan suuri.

Havaittu korkeussuuntainen vaihtelu johtui todennäköisesti kuivauskuormien välille jääneestä välistä, sillä kyseinen kuorma oli jäänyt paikoilleen kanavassa. Välit kuivauskuormien välillä vaikuttavat ilman virtaamiseen kuivauskuorman ohi, koska ilmanohjaimet eivät tällöin toimi suunnitellusti. Kuvion 9 perusteella kanavan 3 korkeussuuntainen kuivaustulosten vaihtelu ei ole merkittävää, kun kanava on täysi ja kuormat yhtenäisenä sarjana. Kuviossa 9 kuorman yläosassa kosteampien kappaleiden aiheuttama piikki johtuu mahdollisesti rimoituksessa käyneestä häiriöstä, jossa välirimat ovat jääneet pois.

7 Tulosten tarkastelu

7.1 Toiminnan kehittäminen ja parannusehdotuksia

Tasaisemman kuivauslaadun, kapasiteetin ja energiatehokkuuden kannalta olisi tärkeää pystyä pitämään kuivauskanavan olosuhteet mahdollisimman vakaina, jolloin kuivauskuormien siirto tapahtuisi säännöllisin väliajoin. Kuivauskanavan täyttöasteen lisäksi kuivauserien sarjoittaminen mahdollisimman pitkiksi sarjoiksi mahdollistaisi säännöllisyyden kuivauskanavan toiminnassa. Kuivauskuormien sarjoittaminen parantaa myös ilmanvirtausta kuivauskuormien läpi, kun ilmaraot osuvat kohdalleen.

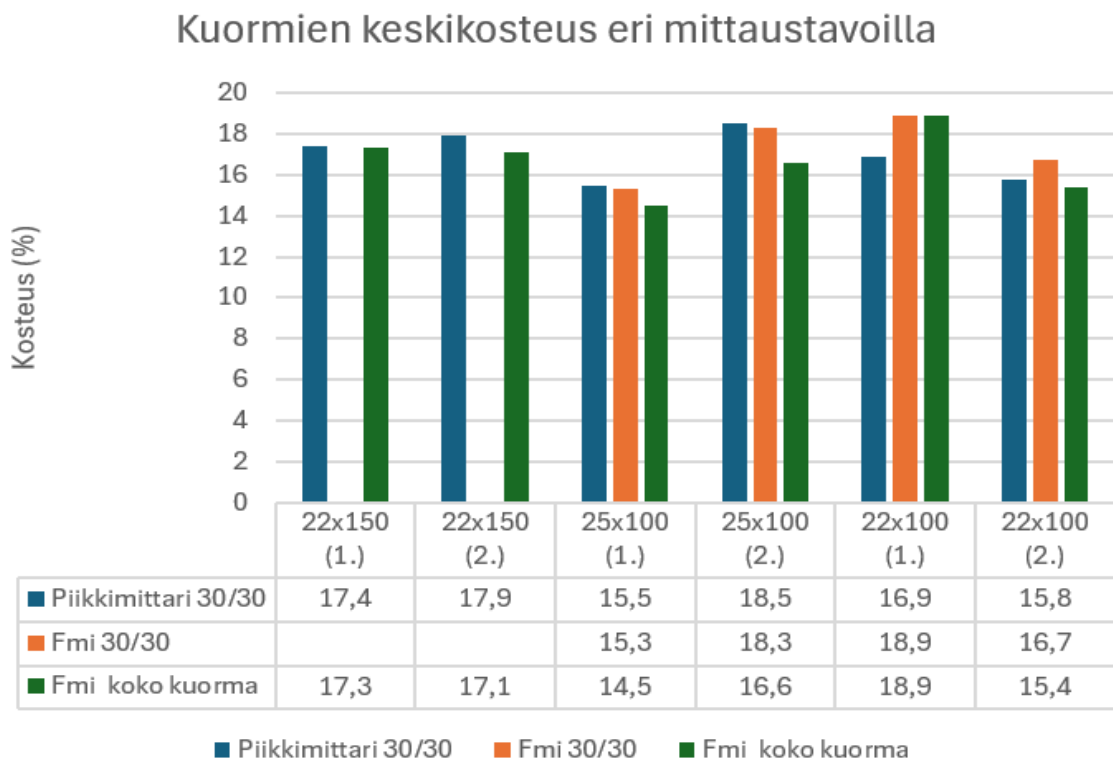
Testikuormien perusteella tarkastelussa olleiden kuivauskanavien 3 ja 5 välillä ei ollut merkittävää eroa siinä, millä korkeudella kuivauskuormaa kappale oli ollut. Kanavan 5 osalta havainto perustuu kahteen testikuormaan ja kanavan 3 osalta vain yhteen, koska toinen testikuormista oli ollut pysähtyneenä kanavaan, jolloin ilmavirtaus ei ole kulkenut suunnitellusti. Kanavan 6 testikuormissa näkyi selkeimmin sekä kuormien yläosan että alaosan keskiarvoa kuivemmat osat, vaikka kanava oli ollut täynnä koko kuivauksen ajan. Muista kanavista poiketen kanavan 6 kuormien alaosassa noin kymmenen varvia oli huomattavasti kuivempia.

Oletettavana syynä kuorman alimpien sekä ylimpien kerrosten ylikuivaukselle on voimakkaampi ilmanvirtaus kuorman ohi, mikä toisaalta heikentää kuivaustehoa kuorman muista osista. Ilmanohjainten toimivuudella sekä optimaalisen kokoisilla kuivauskuormilla on keskeinen merkitys ilmavirtauksiin. Kuorman alapuolisten ilmanohjainten parantaminen voisi olla yksinkertaisin keino pienentää ilman ohivirtausta, sillä kuorman alapuolella ei tarvita juurikaan ylimääräistä tilaa. Kuormien yläpuoliset ilmanohjaimet ja rakenteet rajoittavat kuormien korkeutta, sillä liian korkea kuorma rikkoo kuivaamon rakenteita ja tiputtaa kappaleita kuormien väliin, mikä heikentää osaltaan myös työturvallisuutta.

Kuivaamon täyttöasteen tai kuivattavan tuotteen vaihtuessa tulee kiinnittää huomiota kuivaamon olosuhteiden hallintaan. Käytännössä tämä tehdään säätämällä kuivaamon kuivalämmön asetusarvoa tarpeen mukaan. Kanavan täytyessä kuivalämpöä pyritään nostamaan, jotta kuivausaika ei venyisi tarpeettoman pitkäksi. Matala kuivauslämpö aiheuttaa kuivaamon työntekijöiden mukaan myös merkittävää kosteuseroa kuivauskuorman etu- ja takareunan välillä, mikä ilmenee niin sanottuna takamärkyytenä. Liian korkealla kuivauslämmöllä kuivuminen tapahtuu liian nopeasti johtaen helposti ylikuivaamiseen ja kuivausvi-kojen määrän kasvuun.

7.2 Kuivauskuorman keskikosteuden arviointi

Keskiahajonta oli tuorekappaleissa noin 38 %. Kuivimman kappaleen ollessa 39 % ja kosteimman ollessa 195 %. Suuri tuorekosteuksien vaihtelu on normaalia pintalaudoille, mutta tuottaa haastetta arvioida kuorman kosteutta otettaessa kuivauskuormaa ulos kanavasta. Liian varovainen arviointi saattaa johtaa herkästi ylikuivaamiseen, mikäli kosteimmatkin mitatut kappaleet kuivataan lähelle tavoitekosteutta. Etenkin takareunan kappaleissa mittaus-ten hajonta oli suurempaa, jolloin muutamalla mittauksella saatetaan arvioida kuorma kosteammaksi kuin se kokonaisuudessaan on. Kuviossa 10 on määritetty kuivauskuorman keskikosteus eri mittaustavoilla työntekijän mahdolliselta mittausalueelta, sekä linjakosteusmittarilla koko kuorman mukaan.



Kuvio 10. Kuivauskuormien keskikosteudet määritettynä eri tavoilla.

Kanavan 5 testikuormien linjamittauksen keskiarvojen ollessa lähellä tavoitekosteutta (17 %) etureunan piikkimittaukset olivat $1 \% \pm 0,3 \%$ alle tavoitekosteuden. Takareunan piikkimittauksen keskiarvo oli tällöin noin 2 % tavoitekosteutta suurempi. Kanavan 6 osalta ylä- ja alaosan kuivemmista osista johtuen ero linjamittauksen keskiarvon ja työntekijän mittausalueen välillä oli huomattavampi. Etureunan piikkimittauksen ollessa keskiarvoltaan noin 15,5 % ja takareunan keskiarvon ollessa 21 % kuorma oli kokonaisuutena lähellä tavoitekosteutta. Toinen kanavan 6 testikuormista osoitti kuorman olevan jo tarpeettoman kuiva, kun

takareunan mittaukset olivat keskiarvoltaan lähellä tavoitekosteutta (17 %). Kanavan 3 testikuormien osalta keskikosteuksien arviointi osoittautui haastavaksi, mutta noudattanee kanavasta 6 tehtyjä havaintoja.

Kuivaustulosten tarkastelun helpottaminen ja säännöllinen toimittaminen kuivaamolle voisi parantaa kuivaamonhoitajien arviointikykyä toiminnassaan. Yksinkertaisimmillaan jonkin ajanjakson kuivaustulosten toimittaminen kuivaamolle mahdollistaisi useamman työntekijän tutustumisen siihen. Kuivaustulosten saavuttaminen pelkästään tietojärjestelmästä johtaa helposti niiden huomiotta jättämiseen, jos niiden tarkasteluun ei koeta tarvetta.

8 Yhteenveto

Opinnäytetyön tarkoitus oli selvittää kolmessa eri kuivauskanavassa kuivatun sahatavaran kosteusvaihtelua eri osissa kuivauskuormia. Tavoitteena oli selvittää eroja valittujen kuivauskanavien välillä, minkä perusteella olisi mahdollista saada tarkempi käsitys juuri tietyn kanavan ominaisuuksista. Kuorman kosteuden mahdollisimman tarkka arviointi juuri etureunan mittauksilla on tärkeää, sillä takareunaa mitatessa kuorma on jo pois kuivauksesta, eikä sen siirtäminen takaisin kuivaukseen ole aina mahdollista tai aiheuttaa ylimääräistä työtä. Tarkemmalla kuivauskuorman kosteuden arvioinnilla pystyttäisiin parantamaan tuotteen laatua ja vähentämään mahdollisesta uudelleenkuivauksesta syntyvää työtä. Toisaalta uudelleenkuivauksen seurauksena sahatavarasta tulee helposti ylikuivaa, mikä aiheuttaa kuivausvikoja ja alentaa siten laatua.

Kokeellisessa osassa tarkasteltiin kahta testikuormaa valittua kanavaa kohden. Valittujen sahatavaradimensioiden lähtökosteusvaihtelua havainnollistettiin ennen kuivausta, jotta vaihtelun suuruusluokasta olisi käsitys. Kosteusmittaukset suoritettiin kuivauksen päättyessä piikkimittarilla ja Fmi-kosteusmittausjärjestelmällä kuorman ollessa jäätyneenä ajossa tasaamalla. Mittaustulosten käytettävyyden kannalta pidettiin tärkeänä, että ne on hankittu tuotannon kannalta tavanomaisissa vaiheissa. Verrattaessa eri aikoina tehtyjä mittauksia tulee huomioida kuorman jäähtymisen ja tasaantumisen vaikutus saataviin arvoihin. Kuivaamon jälkeiseen kuivumiseen vaikuttaa myös vallitseva vuodenaika, sillä ulkoilman ollessa lämpimämpää ja ilmankosteuden ollessa matalampi kuivaamon jälkeisen tasaantumisen oletetaan olevan merkittävämpää kuin kylmässä.

Suuresta alkukosteuksien vaihtelusta johtuen myös kuivauksen jälkeen kappaleiden kosteuksissa oli huomattavaa vaihtelua. Verrattaessa piikkimittarilla ja linjakosteusmittauksella määritettyjä kosteuksia yksilöidyistä kappaleista voidaan huomata piikkimittauksen arvoissa olevan suurempaa hajontaa ja toisaalta kosteimmiksi mitattujen kappaleiden olevan pääsääntöisesti kuivempia. Työntekijöiden mittaustavoissa saattaa olla pieniä eroavaisuuksia, jotka vaikuttavat mittaustuloksiin. Mitattavaksi valittujen kappaleiden visuaalisella valinnalla voi myös olla vaikutusta kokonaisuuden arviointiin, mikäli mittaukset kohdistetaan tietyn tyyppisiin sahatavarakappaleisiin. Mitattavien kappaleiden määrää kasvattamalla pystyttäisiin vähentämään mittausten hajonnasta johtuvaa arvioinnin haastetta, etenkin pyrkiessä määrittämään kuorman kosteus pelkästään etureunan mittauksilla.

Tulosten kannalta useamman kuin vain kahden kuorman tarkastelu kanavaa kohden olisi antanut laajempaa vertailupohjaa johtopäätösten tekoon. Tämän tarve korostui etenkin, jos kuormat poikkesivat huomattavasti toisistaan. Tuloksista on kuitenkin mahdollista tarkastella melko hyvin onnistuneita kuivauseriä ja niistä tehtyjä havaintoja.

Lähteet

Anttila, M. 2025. Osastoinsinööri, kuivaus ja laatu. Metsä Fibre Oy. Haastattelu 18.3.2025.

Metsä Fibre Oy. Rengon saha. Viitattu 16.11.2024. Saatavissa

<https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/sahatavaran-tuotanto/rengon-saha/>

Morén, T. 2016 The Basics of Wood Drying. 1. painos. Ruotsi: Valutec AB.

Pitkänen, M. 2025. Paikallisjohtaja. Valutec Oy. Haastattelu 11.3.2025.

Puuinfo Oy. 2020. Kosteustekniset ominaisuudet. Viitattu 28.12.2024. Saatavissa

<https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/puun-kosteustekniset-ominaisuudet/>

Puuproffa. Kanavakuivaamo. Viitattu 24.1.2025. Saatavissa

<https://puuproffa.fi/puutieto/puun-kuivaus/kanavakuivaamo/>

Sateko Finland Oy. FMI Kosteusmittausjärjestelmä Käyttöohje. 2001.

Sipi, M. 2006. Puutuoteteollisuus 5: Sahatavaratuotanto. 3. tarkistettu painos. Helsinki:

Edita Oy. Opetushallitus.

Tapion taskukirja. 2018. 26. painos. Helsinki: Metsäkustannus Oy.

Valutec Oy. 2025a. Kamarikuivaamot. Viitattu 23.1.2025. Saatavissa

<https://www.valutec.fi/tuotteet/kamarikuivaamot/trukilla-taeytettaevae-kamarikuivaamo/>

Valutec Oy. 2025b. Kanavakuivaamo 2–vaiheinen. Viitattu 23.1.2025. Saatavissa

<https://www.valutec.fi/tuotteet/kanavakuivaamot/kanavakuivaamo-fb-2-vaiheinen/>

Valutec Oy. 2025c. Kanavakuivaamoiden periaatekuvat. Pitkänen, M. 21.3.2025. Ei saatavissa.

Varis, R. 2017 Sahateollisuus. 3. painos. Äänekoski: Kirjakaari Oy.