

Joonas Lappeteläinen

KAMARIKUIVAIMEN OPTIMOINTI PILKKEEN KUIVAUKSESSA

KAMARIKUIVAIMEN OPTIMOINTI PILKKEEN KUIVAUKSESSA

Joonas Lappeteläinen
Opinnäytetyö
Kevät 2018
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä: Joonas Lappeteläinen
Opinnäytetyön nimi: Kamarikuivaimen optimointi pilkkeen kuivauksessa
Työn ohjaaja: Jukka Ylikunnari
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2018
Sivumäärä: 50 + 5

Opinnäytetyö tehtiin Ruukin saha ja höyläämön toimeksiannosta. Työn tarkoituksena oli optimoida kamarikuivaimen kuivausjakso pilkkeen eli polttopuun kuivauksessa. Kuivausjaksojen kesto alkutilanteessa oli 140–150 tuntia. Työn tavoitteena oli lyhentää kamarikuivaimen kuivausjakson kesto ilman rakenteellisia muutoksia kamarikuivaimen. Kuivausjakson optimointi suoritettiin muuttamalla kamarikuivaimen automaatiojärjestelmän kuivauskaavaa. Myös kamarikuivaimen mahdolliset rakenteelliset kehitysideoita kuivausjakson seurantaan ja energiansäästöön liittyen tuotiin teoriatasolla työssä esille.

Kamarikuivaimen kuivauskaavaa muutettiin puun kuivauksen teorian pohjalta. Kuivausjakson kesto optimoitiin Ruukin saha ja höyläämön aikaisempien kuivausjaksojen tuloksista, joiden kuivausjaksojen kesto vaihtelee, välillä 140–150 tuntia. Työ suoritettiin neljällä eri kuivausjaksolla ja kolmella eri kuivauskaavalla. Kaavoja muutettiin käyttämällä etähallintaohjelmistoa, jolla pystyttiin käyttämään kuivaamon automaatiojärjestelmää myös kotoa käsin. Kuivauskaavojen muutokset tehtiin kuivausjaksojen aikana ja kuivausjaksojen jälkeen.

Kamarikuivain optimoitiin neljällä kuivausjaksolla. Testattavien kuivausjaksojen kesto vaihteli 6,5 vuorokaudesta 5 vuorokauteen. Kuivausjaksojen optimoinneissa onnistuttiin kuivauksissa 2, 3 ja 4. Työn tuloksena alkutilanteen kuivausjaksoista saatiin kuivausjaksoa lyhennettyä noin 10–20 tunnilla.

Ajan puutteen takia haasteena työssä oli vaikeus verrata toisiinsa kuivausjaksojen kestoja, sillä vedenpoistoa vuorokautta kohden ei voitu määrittää. Vedenpoisto vuorokautta kohden pystyttäisiin määrittelemään, mikäli pilkkeen tuotannon työvaiheeseen lisättäisiin alkupunnitus ja kosteuden määrittäminen. Tällöin saatisiin kamarikuivaimen vedenpoisto vuorokautta kohden. Tällä tiedolla eri kuivausjaksoja voisi vertailla paremmin toisiinsa.

Asiasanat: pilke, polttopuu, kuivaus, kamarikuivaamo, optimointi, kuivausjakso

ALKULAUSE

Haluan kiittää toimeksiantajaani Mika Herkkolaa Ruukin saha ja höyläämöltä hyvästä opinnäytetyön aiheesta, sekä koululta ohjaajia Jukka Ylikunnaria ja Pirjo Partasta. Kiitokset ohjauksesta opinnäytetyössäni ja sen etenemisen suuntaamisesta.

Oulussa 17.4.2018

Joonas Lappeteläinen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
2 UUSITUVAN ENERGIAN KÄYTTÖ SUOMESSA	8
2.1 Bioenergia	8
2.2 Uusiutuvien energialähteiden käyttö	9
3 POLTTOPUUN KÄYTTÖ SUOMESSA	12
3.1 Polttopuu eli pilke	12
3.2 Polttopuun käyttö	12
4 PILKKEEN TUOTANTO	15
4.1 Raaka-aineen hankinta	15
4.2 Ruukin saha ja höyläämön pilkkeen tuotannon vaiheet	16
5 PILKKEEN KUIVAUS	19
5.1 Pilkkeen kuivaukseen vaikuttavia tekijöitä	19
5.2 Kuivausilman vaikutus	21
5.3 Veden poistamiseen kuluva lämpöenergia ja aika	24
5.4 Luonnonkuivaus	28
5.5 Keinokuivaus	29
5.5.1 Kylmäilmakuivaus	29
5.5.2 Lämminilmakuivaus	30
6 KAMARIKUIVAIN RUUKIN SAHA JA HÖYLÄÄMÖ	34
7 KUIVAUSJAKSOJEN TESTAUS	36
7.1 Ensimmäinen testaus	36
7.2 Toinen testaus	38
7.3 Kolmas testaus	41
7.4 Neljäs testaus	43
8 JATKOKEHITYSIDEAT	45
8.1 Mittausantureiden lisääminen	45
8.2 Lämmöntalteenotto ja laskennallinen säästö €/i-m ³	45
9 YHTEENVETO	47

LÄHTEET	49
LIITTEET	51

Liite 1 Alkutilanteen graafi

Liite 2 Ensimmäisen testauksen graafi

Liite 3 Toisen kuivauksen graafi

Liite 4 Kolmannen kuivauksen graafi

Liite 5 Neljännen kuivauksen graafi

1 JOHDANTO

Ruukin saha ja höyläämö Ky on puunjalostuksen mekaanisen tuotannon yritys, joka on perustettu vuonna 1995. Yritys sijaitsee Ruukin yrityspuistossa Siikajoen kunnassa. Ruukin saha ja höyläämön tuotantoon kuuluu Optimi-kattoelementit sekä osana toimintaa pilke eli uunivalmiin polttopuun valmistus.

Tämän työn tarkoituksena oli saada optimoitua kuivatuskaavoja Ruukin saha ja höyläämön vanhaan sahatavaran kamarikuivaamoon pilkkeen kuivauksessa ilman kuivaamon rakenteellisia muutoksia. Optimoinnilla tässä työssä tarkoitetaan kuivausprosessiajan lyhentämistä ja kuivausjakson energianhallintaa kuivauskaavojen avulla. Kuivauskaava on kamarin automaatiojärjestelmään laadittu kaava, jolla kamari toimii asetetuilla arvoilla ja pyrkii ajamaan kuivausta sen mukaisesti. Työssä lähestytään teoreettisesti kamarin toimivuuden tarkastelua ja mahdollisia jatkokehitysideoita.

Työssä käsitellään kuivausilman vaikutukset ja muut vaikuttavat tekijät pilkkeenkuivaamisessa, on se keinotekoisesti tai luonnonmukaisesti kuivattua. Työssä käydään lisäksi läpi polttopuun muita kuivausmenetelmiä.

Työssä käsitellään tulevaisuuden näkymät bioenergian tarpeesta ja pilkkeen tuotannon mahdollisista muutoksista joihin liittyvät uudet EU-säädökset, joiden mukaan Suomi on sitoutunut vaiheittain lisäämään uusiutuvien energialähteiden osuutta energiantuotannossa.

2 UUSITUVAN ENERGIAN KÄYTTÖ SUOMESSA

Uusiutuviin energialähteisiin kuuluu aurinko-, tuuli-, vesi ja bioenergia sekä maalämpö. Bioenergian osuus uusiutuvista energialähteistä on Bioenergia ry:n mukaan 80 % (1).

Suomen uusiutuvan energian tavoitteet ovat olleet EU:n direktiivin mukaisia. Suomen ensimmäinen tavoite on ollut, että vuoteen 2020 mennessä 38 % loppukäytöstä on oltava uusiutuvia energialähteitä. Tämä tavoite saatiin toteutettua jo vuonna 2014. (2.) Suomessa tullaan siis tarvitsemaan hiilineutraaleja energialähteitä energian tuotannossa kasvavissa määrin lähitulevaisuudessa. Hiilineutraaleihin energialähteisiin kuuluu muun muassa polttopuu.

Vuonna 2016 päivitettiin kansallinen energia- ja ilmastostrategia linjaamaan konkreettisia toimia ja tavoitteita. Suomen tavoitteena on kasvattaa uusiutuvien energialähteiden osuus 50 prosenttiin vuonna 2030 ja energian omavaraisuus 55 prosenttiin. (2.)

2.1 Bioenergia

Bioenergia on energialähteistä merkittävin Suomessa. Sitä käytetään erikokoluokissa aina metsäteollisuuden laitoksista yksittäisiin kotitalouksiin ja kiinteistöihin. (3.) Hiilidioksidipäästöjä saadaan vähennettyä, kun fossiilisten polttoaineiden korvaukseen käytetään biomassoja. Biomassat ovat hiilidioksidineutraaleja, eli niiden poltossa vapautuva hiili sitoutuu takaisin uudestaan kasvavaan biomassaan. Käyttämällä biomassoja saadaan hidastettua tapahtuvaa ilmastonmuutosta. Biomassa on myös hyvä kompensoimaan energiatuotantolaitosten raskasmetalli- ja rikkipäästöjä niin sanotulla yhteispoltolla esim. voimalaitoksessa joka käyttää pääpolttoaineena turvetta pystyy hyödyntämään yhteispolttona puupolttoaineita. Biomassojen käyttö lisää myös Suomen energiatuotannon omavaraisuutta. (4.)

Suomen Lähienergialiiton mukaan puuperäisten polttoaineiden lisääminen energiantuotannossa täytyy olla kasvavan käytön kestävyuden mukaista (5). Suomen Lähienergialiitto pitää myös tärkeänä, että metsäluonnon monimuotoisuutta ei

heikennetä ja että puuenergian käyttö ei heikennä metsien toimintaa hiilinieluinä eikä ole esteenä metsäteollisuuden tuotannon kasvulle. (5.)

2.2 Uusiutuvien energialähteiden käyttö

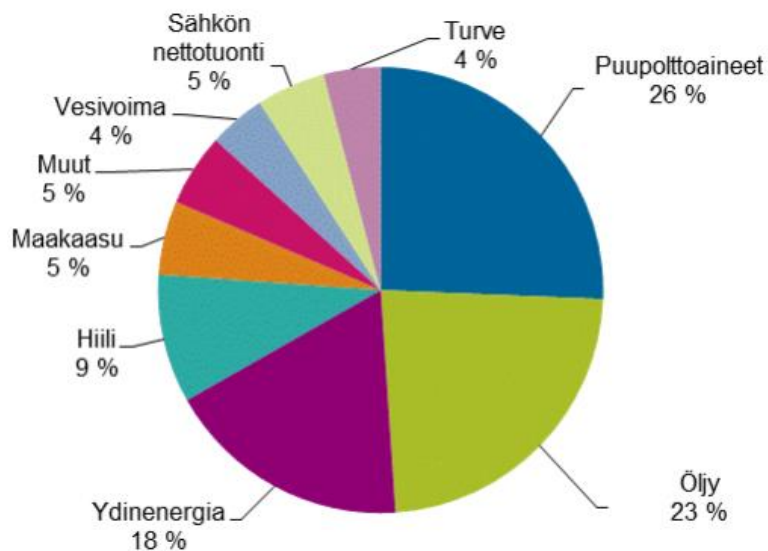
Tilastokeskuksen mukaan uusiutuvien energialähteiden käyttö oli huipussaan vuonna 2016 kasvaen edellisestä vuodesta 2 prosentilla. Kokonaisenergiankulutus vuonna 2016 oli 1,36 miljoonaa terajoulea, uusiutuvilla energialähteillä tuotettiin 34 prosenttia, mikä vastasi 0,4624 miljoonaa terajoulea. Suomen suurimpana uusiutuvana energianlähteenä toimi puupolttoaineet, joiden osuus uusiutuvista energianlähteistä oli 26 prosenttia. (6.)

Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty eri polttoaineiden energiankulutuksen muutosta vuodesta 2015 vuoteen 2016. Tämän työn kannalta tärkeää on huomata, että puupolttoaineiden osuus on kasvanut 5 prosenttia eli 18 173 terajoulea. Tämä siis kuvastaa hyvin Suomen tämän hetkistä kantaa millä tuotantomuodoilla saavutettaisiin EU:n asettamat tavoitteet vuodelle 2020. Vaikka tuulivoima on kasvanut 32 prosenttia edellisestä, on sen muutos vain 2 667 terajoulea edellisestä vuodesta.

TAULUKKO 1 Tuotantomuodon energiankulutus 2015 - 2016 terajouleina ja muutos edellisestä prosentteina (6, s. 2)

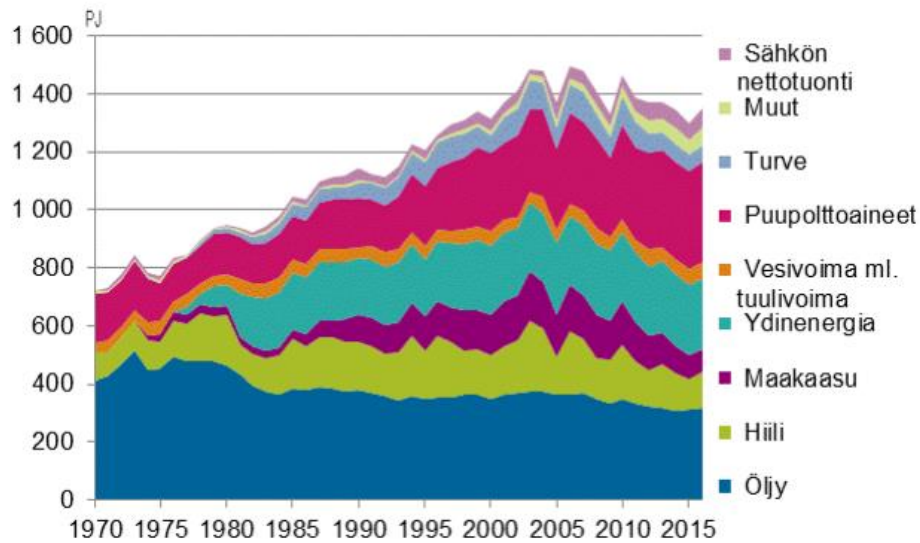
	2015	2016	Muutos-%
Puupolttoaineet	330 939	349 112	5
Öljy	312 071	317 197	2
Ydinenergia	243 556	243 056	0
Hiili	102 642	127 051	24
Maakaasu	82 363	72 913	-11
Turve	57 755	56 163	-3
Sähkön nettotuonti	58 813	68 222	16
Vesivoima	59 703	56 283	-6
Tuulivoima	8 378	11 045	32
Muut	52 885	60 586	15
Yhteensä	1 309 106	1 361 627	4

Kuvassa 1 on tilastokeskuksen tekemä energiankulutuksen yhteenveto vuodelta 2016. Tästä nähdään, että puupolttoaineen osuus koko energiankulutuksesta on ollut merkittävä 26 prosenttia ja sen osuus on ollut suurempi kuin öljyn. Tulevaisuudessa puupolttoaineiden käyttö todennäköisesti nousee EU:n säädösten takia.



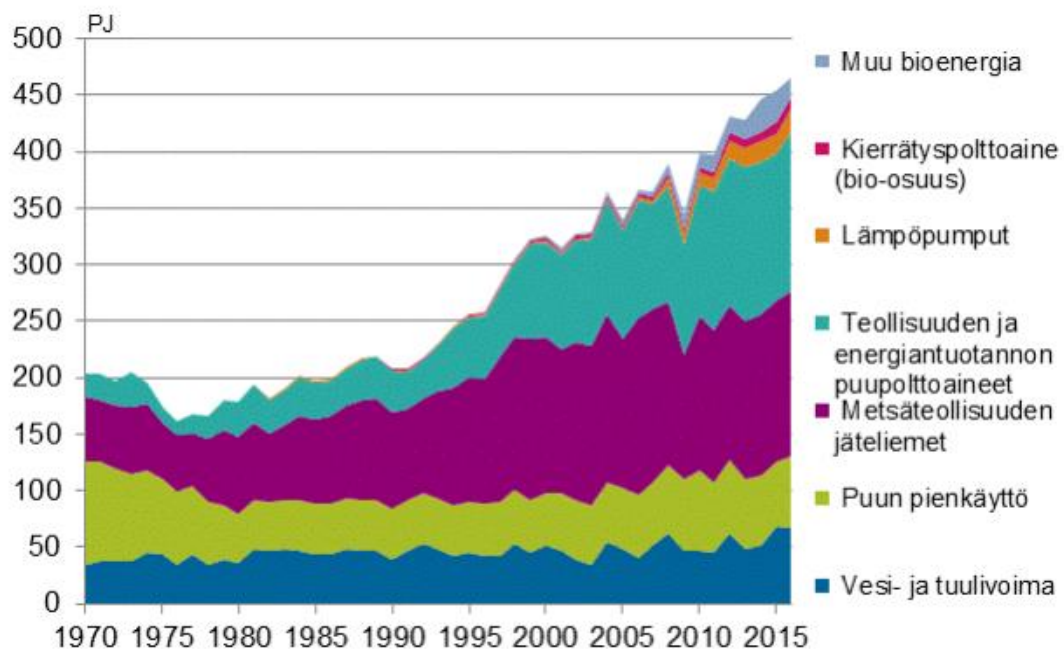
KUVA 1 Energiankulutuksen osuudet vuodelta 2016 (6, s. 4)

Kuvassa 2 on energialähteiden käytön kehitys vuodesta 1970 vuoteen 2015. Vuodesta 1995 puupolttoaineiden osuus on ollut tasaisessa nousussa, vaikka itse energiankulutus on ollut hieman laskevaa. Puupolttoaineiden osuus on myös kohtalaisen suuri, mikä on todettu myös aikaisemmin kuvassa 1. Kuvasta 2 nähdään myös öljynkulutuksen loiva lasku.



KUVA 2 Energiankulutuksen kehitys 1970 - 2015 (6, s. 4)

Kuvassa 3 nähdään eri uusiutuvien energialähteiden osuuden kehitys vuodesta 1970 lähtien vuoteen 2015. Kuvasta nähdään vuonna 1995 tapahtunut nousu ja tämä nousu jatkuu edelleen. Puun pienkäyttö on ollut tasaista, mutta hieman voidaan nähdä 2005 vuodesta lähtien kasvua sen käytössä.



KUVA 3 Uusiutuvien energialähteiden käytön kehitys 1970 - 2015 (6, s. 5)

3 POLTTOPUUN KÄYTTÖ SUOMESSA

Polttopuulla on monta nimitystä: polttopuu, klapi, pilke, hellapuu, uunipuu. Tässä työssä puhutaan pilkkeestä eli polttopuusta joka on katkaistu taulukon 2 mukaiseen pituuteen 25 cm tai 33 cm. Polttopuusta käytetään nimitystä halko, mikäli tämän katkaisupituus on yhden metrin. Halkoa käytetään useimmiten isoimmissa tulipesissä kuten keskuslämmityskattiloissa. Pilkettä taas käytetään pienemmissä ratkaisuissa kuten, uuneissa, takoissa, helloissa ja kiukaissa. (7.)

3.1 Polttopuu eli pilke

Pilkkeellä tässä työssä tarkoitetaan polttopuuta, joka määritellään standardin EN 14588 mukaisesti. Polttopuun on oltava katkottu, halkaistu ja uunivalmis, ja sen kosteuden on oltava vähintään 20 % märkäpainosta. Sitä käytetään kotitalouksien puulla lämmitettävissä laitteissa, kuten liesissä, takoissa ja mahdollisesti keskuslämmityskattiloissa (8, s. 1). Polttopuut on katkottu yleensä taulukon 2 mukaisesti. Pilkkeen koot ja laatuvaatimukset ovat polttopuun EN 14961-5 standardin mukaisia (8, s. 5). Ruukin saha ja höyläämö käyttää pilkkeen kokoa 33 cm.

TAULUKKO 2 Pilkkeen eli polttopuun pituudet (8, s. 5)

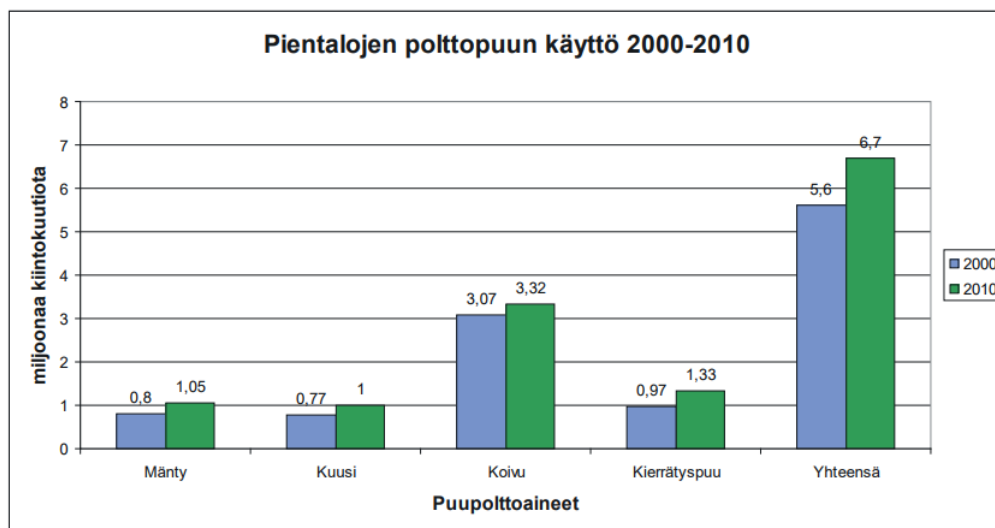
Pilke	25 cm +/- 2 cm
Pilke	33 cm +/- 3 cm
Pilke	40 cm +/- 4 cm
Pilke	50 cm +/- 5 cm
Pilke (halko)	100 cm +/- 5 cm

3.2 Polttopuun käyttö

Suomen Metsäkeskuksen mukaan polttopuuta käytettiin Suomessa eniten pientalojen lämmitykseen. Pientaloihin luokitellaan omakoti-, pari- ja rivitalot, maatilat

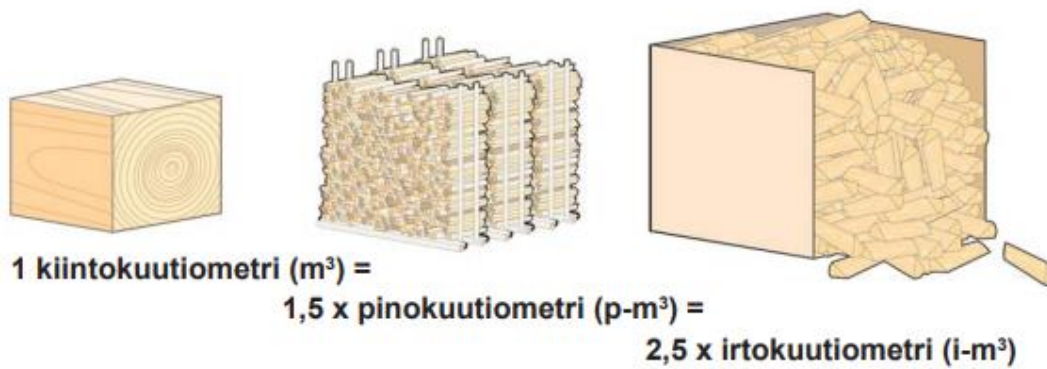
ja vapaa-ajan asunnot. Pientalot käyttivät vuonna 2010 polttopuuta yhteensä noin 6,7 miljoonaa kiintokuutiometriä. Jalostamattoman raakapuun osuus oli 5,4 miljoonaa kiintokuutiometriä ja erilaisten jätepuiden osuus 1,3 miljoonaa kuutiometriä. Polttopuun käyttö oli keskimäärin 4,6 kiintokuutiometriä kiinteistöä kohti. (9, s. 5.)

Kuvassa 4 on käyty läpi puupolttoaineen käytön kehitys vertaillen vuoden 2000 ja 2010 kulutuksia. Kuvassa 4 on myös eritelty puulajien osuus kokonaismäärästä, minkä mukaan suurin käytön kulutus on ollut koivulla. Kuvasta 4 voidaan myös todeta polttopuun kulutuksen kasvua vuodelta 2000 verrattuna vuoteen 2010, joten tarve polttopuun tuotannolle tulee jossain määrin näkymään kysynnän kasvamisella, joka on todettu myös aikaisemmin kuvasta 3.



KUVA 4 Pientalojen polttopuun käyttö vuonna 2000 ja 2010 (9, s. 5)

Kuvassa 5 on kuvattu, kuinka kiintokuutiometristä (m^3) saadaan muunnettua karkeasti pinokuutiometri ($p\text{-}m^3$) ja irtokuutiometri ($i\text{-}m^3$).



KUVA 5 Kiintokuutiometrin muunnos (9, s. 23)

Kuvassa 6 nähdään valmiita polttopuita kuluttajille myytäväksi piensäkeissä.



KUVA 6. Polttopuita valmiiksi kuivattuna ja pakattuna.

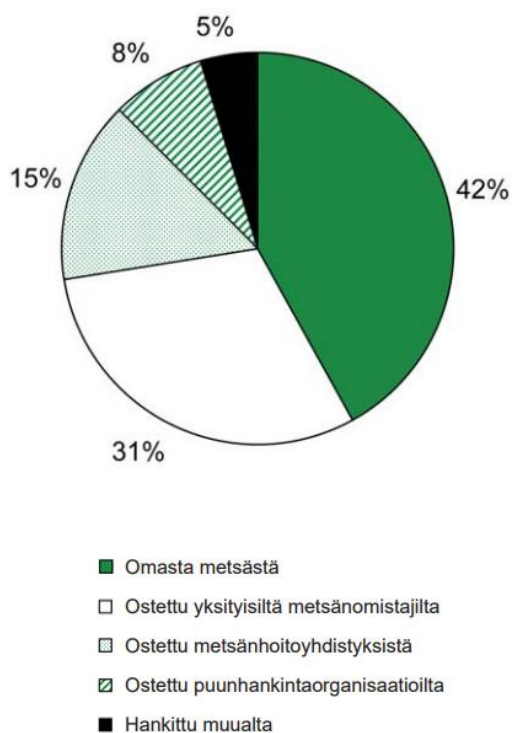
Tilastokeskus on aloittanut myös uuden tutkimuksen aiheena pientalojen lämmitysenergian käyttö (10). Tutkimuksessa on keskitytty tutkimaan pientalojen energiankulutusta uusiutuvilla energianlähteillä, joihin kuuluu myös polttopuu. Lähtötilaisuuksissa saadaan uudempaa tietoa polttopuun kulutuksesta energianlähteenä pientalouksissa.

4 PILKKEEN TUOTANTO

Poltettavasta polttopuusta eri puulajien osuudet metsäkeskuksen mukaisesti ovat 2/3 koivu ja muut lehtipuut, 1/3 mänty ja kuusi. Polttopuuta hakataan energianlähteeksi 5,4 miljoonaa kiintokuutiota vuodessa (9, s. 8). Ruukin saha ja höyläämö käyttää yleensä pelkästään koivua pilkkeiden teossa, mutta joskus käytössä on myös sekapuuta.

4.1 Raaka-aineen hankinta

Raaka-aineena tulisi aina käyttää vähintään kuitupuun mittaista runkopuuta. Kuvassa 7 on Suomen raaka-aineen hankinta polttopuun tuotannossa. (9, s. 8.)



KUVA 7 Puupolttoaineen raaka-aine hankinta. (9, s. 8)

Ruukin saha ja höyläämö hankkii raaka-aineensa Metsänhoitoyhdistykseltä ja Biowatilta.

4.2 Ruukin saha ja höyläämön pilkkeen tuotannon vaiheet

Kuvassa 8 nähdään vasemmassa laidassa koivurankaa. Koivuranka ajetaan linjastolle, jossa se katkaistaan sopivaan mittaan ja halkaistaan. Keskellä kuvaa nähdään hihna joka nostaa halkaistun puun rumpuun, jossa pilkkeestä poistetaan ylimääräiset roskat ennen kuin pilke tippuu kuivaushäkkiin. Kun kuivaushäkki on saatu täytettyä, siirretään siihen uusi tilalle ja täytetty viedään odottamaan kuivausta.



KUVA 8 Koivurangasta pilkkeeksi ja valmiina kuivaukseen

Kuvassa 9 nähdään valmiiksi pilkottua pilkettä, joka odottaa kuivausta. Häkit siirretään trukin avulla alla olevista piikkien mentävistä urista. Häkkiin mahtuu noin 12 i-m³, joka vastaa 4,8 kiintokuutiota.



KUVA 9 Valmis häkki kuivausta varten

Kuvassa 10 on kamarikuivaimen etuseinä ulkoa. Kuvassa nähdään myös pienempi ovi, jonka kautta voidaan käydä kesken prosessin mittaamassa puun kosteutta ja tarkistamassa kuivausprosessia, mikäli tarve.

Kuivauksen jälkeen pilkkeet ovat valmiita pakkauslinjastoon, jonka jälkeen pilkkeet pakataan trukkilavoille. Aikaisemmin esitettyssä kuvassa 6 on valmis lava rekkaan lastattavaksi.



KUVA 10 Kamarikuivaimen etuseinä ulkoa

5 PILKKEEN KUIVAUS

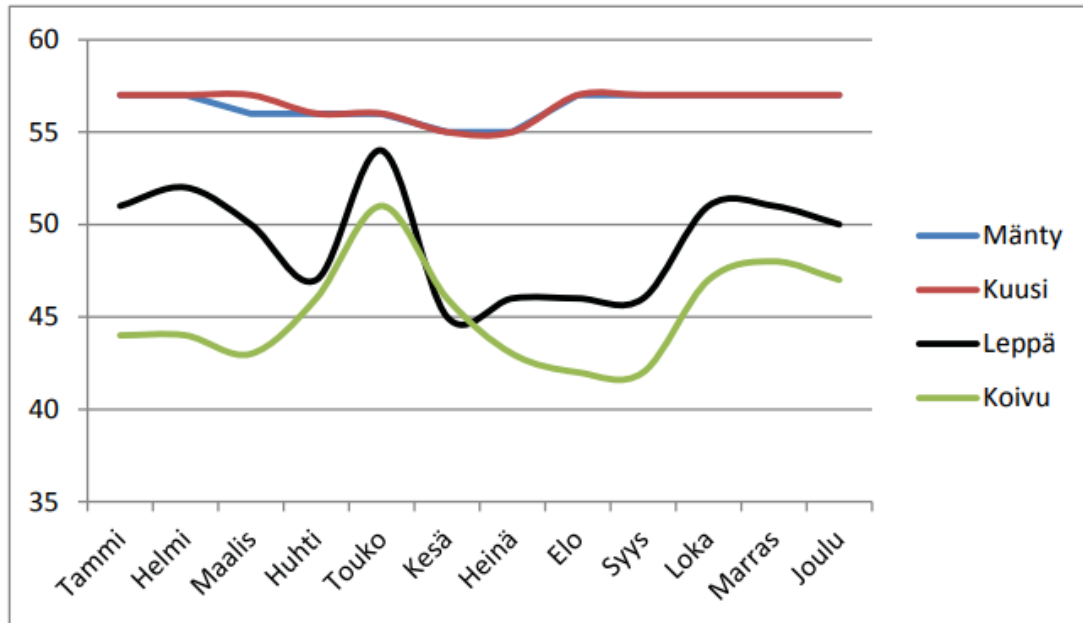
Pilkkeen kuivauksessa vaikuttavia tekijöitä on monia. Alle on lueteltu tärkeimmät pilkkeen kuivauksessa huomioon otettavat asiat metsäkeskuksen kuivurioppaan mukaan:

- alkukosteus
- palakoko
- kuivattava määrä ja asettelu kuivuriin
- lämpötila
- ilman suhteellinen kosteus
- ilman virtausnopeus
- puulajikohtaiset ominaisuudet (11.)

5.1 Pilkkeen kuivaukseen vaikuttavia tekijöitä

Polttopuun tuotannon kannalta tärkeää on tietää milloin lehtipuu pitäisi kaataa. Lehtipuiden luontainen kosteus vaihtelee kasvukauden aikana, pienimillään se on keskikesällä ja suurimmillaan kasvukauden alkuvaiheessa eli keväällä. Havupuissa kosteus ei vaihtele paljoa kasvukauden aikana. Kasvukauden vaihteluväli on noin 10 %. (11.)

Alla olevassa kuvassa 11 on kuvattu, kuinka eri puulajien kosteus vaihtelee kasvukauden aikana tammikuusta joulukuuhun. Kuvasta 8 huomataan havupuiden kosteus ei juurikaan vaihtelee kasvukauden aikana. Pieni kosteuden notkahdus nähdään kuitenkin alkavan kesäkuun aikana ja päättyvän elokuun aikana. Lehtipuilla taas kevään kosteus nousee jopa hieman alle 45 %:sta lähelle 55 %:a ollen alimmillaan syyskuussa hieman yli 40 %.



KUVA 11 Puulajien kasvukauden kosteuden vaihtelu (11, s. 6)

Pilkkeen kuivaukseen vaikuttavat sekä pilkkeen että kuivausympäristön tekijät. Pilkkeen kuivaukseen liittyviä tekijöitä ovat alkukosteus, kuoren peittävä osuus, halkaistun pinnan osuus, tilavuuden ja pinta-alan suhde, pituuden ja paksuuden suhde sekä puulajikohtaiset ominaisuudet. Puulajikohtaisia ominaisuuksia ovat diffusiviteetti, tiheys, lämmönjohtavuus ja ominaislämpö. Diffusiviteetillä tarkoitetaan puuaineen kykyä johtaa lämpöä suhteessa sen kykyyn varastoida lämpöä. (12.)

Kuivaukseen vaikuttavat voimakkaasti ympäristölliset vaikutukset joita ovat kuivauslämpötila, ilman suhteellinen kosteus ja kuivausilman virtausnopeus. (11.)

VTT:n tutkimuksen mukaan pilkkeen kuivaukseen huomattavasti vaikuttava tekijä on sen koko ja kuoren osuus pilkkeestä. Kuitenkin pilkkeen paksuuden vaikutus on niistä suurin, joten sen puolittaminen vähentää kuivausajan noin puoleen. Pilkkeen kuivausta voi myös tehostaa rikkomalla pilkkeen kuorta. (12.)

Pilkkeen keinokuivauksessa olisi tärkeää tietää, kuinka paljon vettä pitäisi haihduttaa, jotta päästäisiin tavoitekosteuteen (11, s. 10). Pilkkeen keinokuivauksesta kerrotaan tarkemmin luvussa 4.5. Tavoitekosteus kotitalouspilkkeelle on 20 %,

jonka yli kosteus ei saisi mennä. Kosteuden ylittäessä 20 % on erilaisten homeiden syntyminen mahdollista, mikä heikentää pilkkeen laatua. Kosteus vaikuttaa myös pilkkeestä saatavaan energiaan, jonka osuus pienenee kosteuden noustessa. Kaavassa 1 on esitetty, kuinka kuivauserän haihdutettavan vesimäärän voi laskea. (11, s. 10.) Ruukin saha ja höyläämö kuivaa pilkkeensä hieman alle 20 %:iin, yleensä noin 18 %:iin.

$$m_{vesi} = m_{kok} * \left(1 - \frac{100 - W_1}{100 - W_2}\right)$$

KAAVA 1

m_{vesi} = haihdutettava vesimäärä [kg]

m_{kok} = kuivauserän kokonaismassa alussa [kg]

w_1 = kuivauserän alkukosteus [%]

w_2 = kuivauserän loppukosteus [%]

5.2 Kuivausilman vaikutus

Puu on aineominaisuudeltaan hygroskooppinen, eli se sitoo vesihöyryä itseensä ympäröivästä ilmasta. Näin ollen ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila ovat vaikuttavia tekijöitä puun kosteustasapainoon. Puusta vesihöyry voi siis poistua jollain tapahtuu kosteusprosentin laskua tai siihen voi imeytyä kosteutta ja silloin kosteusprosentti nousee. (13, s. 6.)

Ilman kuivauskyky riippuu ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Ilma sisältää energiaa jota voidaan käyttää kuivauksessa hyödyksi. Mitä korkeampi kuivausilman lämpötila sitä enemmän ilma sisältää energiaa, joka parantaa kuivausta. Ilmaan sitoutuu vesihöyryä kuivausprosessin aikana, näin ilman suhteellinen kosteus nousee ja lämpötila laskee eli ilman energia siirtyy vesihöyryn energiaksi. Mitä pienempi ilman suhteellinen kosteus sitä enemmän se voi sitoa vettä suhteessa sen kykyyn sitoa vettä kyseisellä lämpötilalla. Ohjeellisena ilmamääränä pilkkeen kuivaukselle voidaan pitää 200 m³-ilmaa/h/i-m³ pilkettä. (13, s. 8, 14.)

Ilman suhteellisen kosteuden voi laskea kaavalla 2. Ilman suhteellisella kosteudella tarkoitetaan, kuinka paljon ilmassa on vettä sitoutuneena sen maksimimäärästä kyseisellä lämpötilalla. (13, s. 9.)

$$SH = \frac{iv}{iv,max} * 100 \%$$

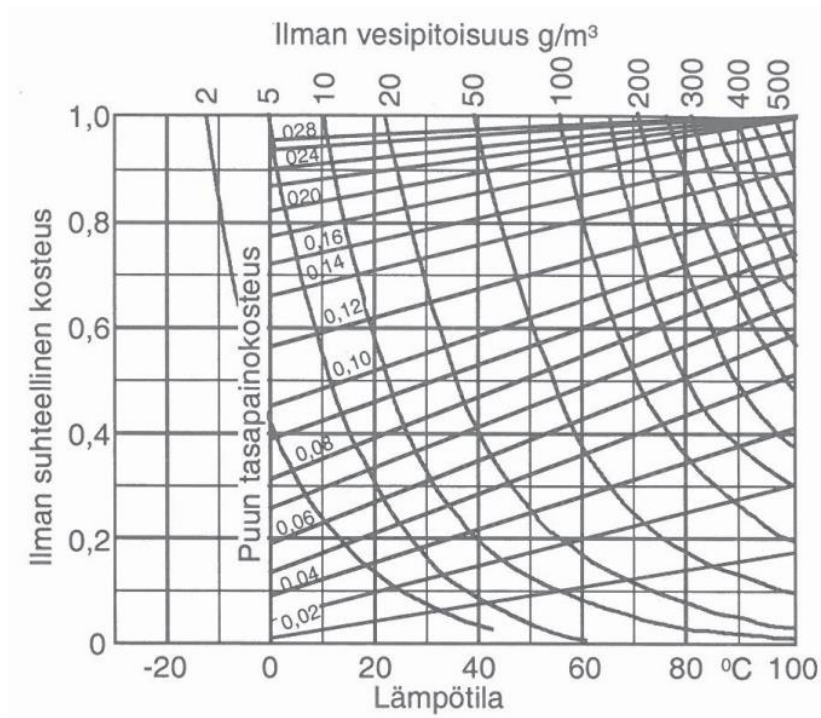
KAAVA 2

SH = ilman suhteellinen kosteusprosentti

iv = ilmanvesisisältö [g/kg]

iv, max = ilman maksimivesisisältö [g/kg]

Kuvassa 12 nähdään ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaikutus puun tasapainokosteuteen. Puun tasapainokosteudella tarkoitetaan puun asettumista sen ympäristön kosteuteen ajan kuluessa, mikäli ympäristön tila ei muutu. Alla olevasta kuvasta voidaan esimerkiksi katsoa lämpötilalla 20 °C ja suhteellisella kosteudella 60 %, silloin puu ei kuivu alle 12 %. Alla olevasta voidaan myös laskea ilman kyky sitoa kosteutta. Esimerkiksi ilman suhteellisen kosteuden ollessa 40 % ja lämpötilan 40 °C on sen vesipitoisuus noin 22 g ja maksimisisältö 50 g. Näiden erotus on 28 g, joka on ilman kyky ottaa vastaan vettä kyseisellä lämpötilalla, oletuksena että poistettu ilma lähtee kuivaamosta 100 %:n kosteudessa. (11, s. 49.)



KUVA 12 ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaikutus puun tasapainokosteuteen. (12, s. 56)

Puun kuivauksessa soluonteloihin irtovetenä sitoutunut vesi haihtuu ensin. Tämän jälkeen puusta poistuu sidottuna oleva vesi soluseinästä. Soluseinästä vesi alkaa poistua kosteuden ollessa n. 23 %. Tarvittavan energiamäärä kasvaa, kun kosteutta lähdetään poistamaan soluseinästä alle 23 %. (13, s 6.)

Pilkkeen kosteudesta puhuttaessa tarkoitetaan pilkkeen veden suhdetta sen märkäpainoon, mikä on esitetty kaavassa 3. Kaavassa 4 on esitetty kosteussuhde eli vedensuhde kuivapainoon. (13, s. 8.)

$$X = \frac{m_v}{p k_m + m_v} * 100 \%$$

KAAVA 3

X = kosteusprosentti

m_v = veden massa [kg]

$p k_m$ = puun kuiva-aineen massa [kg]

$$U = \frac{m_v}{m_{ka}}$$

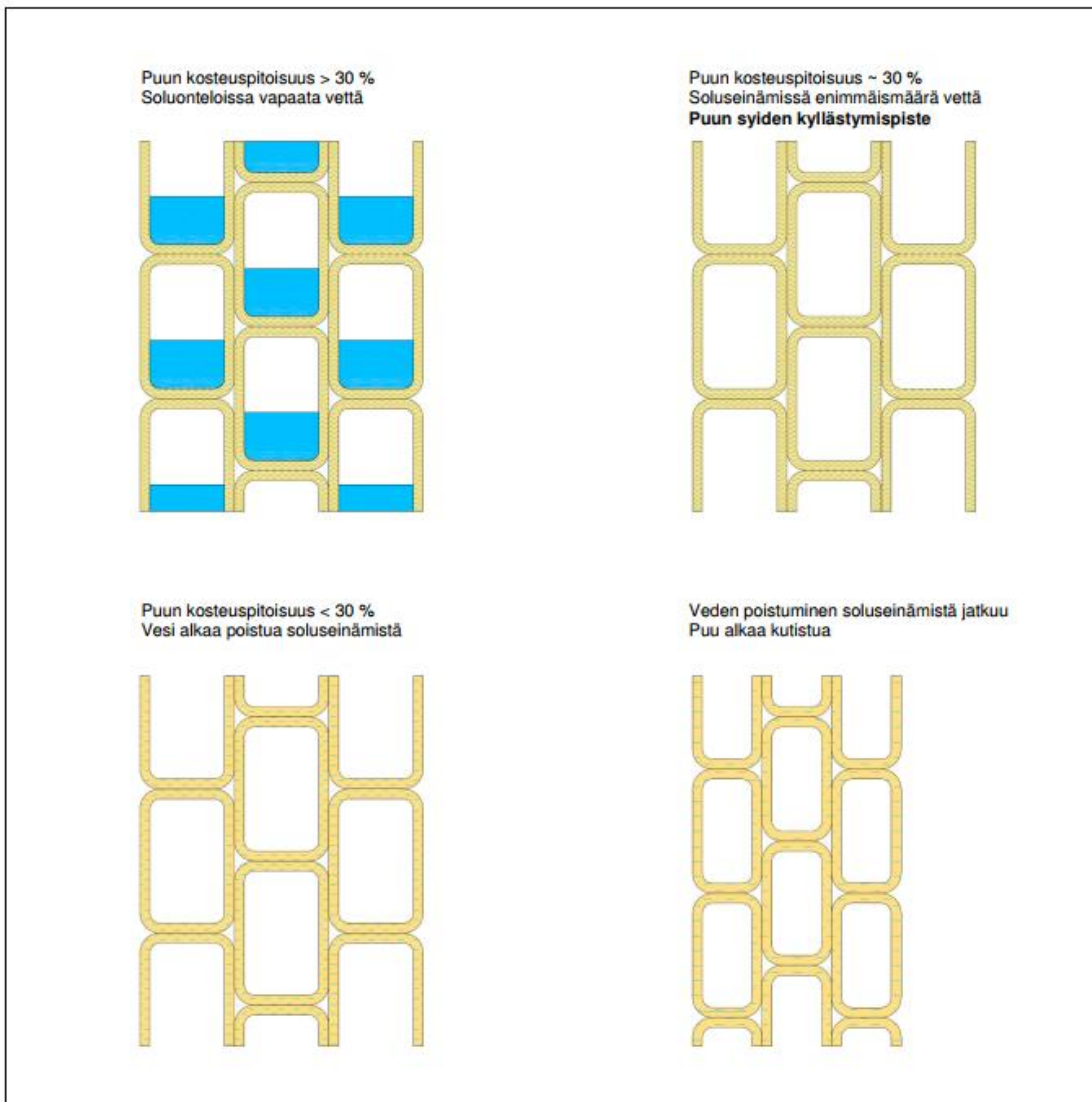
KAAVA 4

U = kosteussuhde

m_v = veden massa [kg]

m_{ka} = puun kuivapaino

Kuvassa 13 on havainnollistettu puun kuivuminen. Puusta ensin haihtuu irtovesi, minkä jälkeen kuivuminen jatkuu soluseinämistä.



KUVA 13 Puun veden haihtumisen vaiheet (14)

5.3 Veden poistamiseen kuluva lämpöenergia ja aika

Puuhun on sidottuna vettä soluseinämiin ja sitä on myös soluseinämiä ulkopuolella vapaana vetenä. Sidottu vesi on sitoutunut tiukasti soluseinämiin ja vaatii

näin enemmän energiaa sen poistamiseen kuin vapaana oleva vesi. Puun syiden kyllästymispisteellä (PSK) tarkoitetaan, että vapaana oleva vesi on kokonaan haihtunut ja jäljellä on sidottu vesi. PSK:n rajakosteussuhdearvona käytetään 0,30, joka on lämpötilavälillä 0 °C – 60 °C, jolloin kosteusprosentti X on 23. Lämpötilan vaikutus voidaan ottaa huomioon laskennallisesti kaavassa 5. (15, s. 11.)

$$U_{PSK} = 0,33 - 0,001 * T$$

KAAVA 5

T= kuivauslämpötila [°C]

Tarvittava lämpöenergia riippuu puun kosteussuhteesta U. Kosteussuhteen ollessa lähellä nolla-arvoa, on tarvittava energiamäärä veden haihduttamiseen moninkertainen vapaan veden poistamiseen nähden (15, s. 11).

Vapaan veden höyrystämiseen tarvittavana energiamääränä voidaan käyttää arvoa 2,443 MJ/kg, joka on noin 0,68 kWh/kg. Soluseinämiin sitoutuneen veden tarvittava energiamäärä voidaan laskea oletuksena, että energiamäärän ja kosteussuhteen riippuvuus toisistaan on lineaarinen. Oletuksena myös, että kosteussuhteen ollessa 0 on tarvittava energiamäärä kolminkertainen veden normaaliin höyrystyslämpöön verrattuna. Näin saadaan kaava 6 veden poistamiseen soluseinämistä ja sen höyrystämiseen kuluva energia yhtä vesikiloa kohti. (15, s. 12-13.)

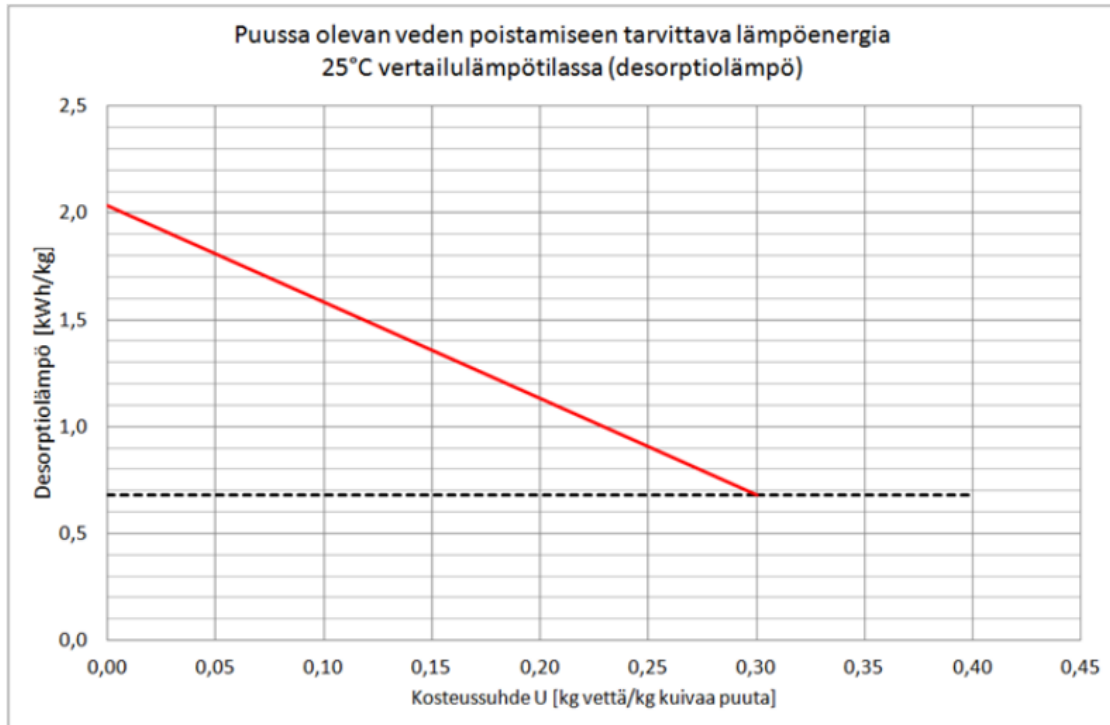
$$q_{des} = 2,036 - 4,524 * U$$

KAAVA 6

q_{des} = energiamäärä soluseinämistä veden haihduttamiseen

U = kosteussuhde

Kuvassa 14 on myös havainnollistettu lineaarista riippuvuutta energiankulutuksen ja kosteussuhteen ollessa 0,30 tai alle.



KUVA 14 Veden poistamiseen tarvittava lämpöenergia, kun $U = < 0,30$. (15, s. 13)

Talvella polttopuussa oleva vesi on jään muodossa, minkä takia talvella kuluu enemmän energiaa polttopuun kuivauksessa kuin kesällä. Polttopuusta pitää saada jää lämmitettyä sen alkulämpötilasta 0 °C:seen. Jään lämmittämiseen kuluva lämpöenergia voidaan laskea käyttämällä kaavaa 7, jossa jään ominaislämpökapasiteetti kerrotaan sen massalla ja lämpötilaerolla. (16.)

$$Q_{\text{jää}} = C_p * m * \Delta T$$

KAAVA 7

C_p jään ominaislämpökapasiteetti = 2,090 kJ/kg °C

m = jään massa [kg]

ΔT = Alkulämpötilan erotus 0 °C:seen

Kaavassa 8 on esitetty jään sulattamiseen kuluva energia. Jään lämmitettyä sen olomuoto on jään ja veden seosta, joka pysyy 0 °C:ssa. Jään sulattamiseen kuluva energia on jään sulamislämpö s kerrottuna jään massalla. (16.)

$$Q_{sulaminen} = s * m$$

KAAVA 8

s sulamislämpö = 333 kJ/kg

m = massa [kg]

Veden poistamiseen kuluva aika voidaan laskea kaavalla 9, kun tiedetään kuivauserästä poistuvan veden määrä ja kuivausteho. Näin voidaan nyt laskea joka kuivausvaiheelle kuluva aika, oletuksena tosin, että kuivausteho siirtyy suoraan kuivaukseen ilman häviöitä. (16.)

$$t = \frac{Q_{kuivaus\ vaihe}}{P}$$

KAAVA 9

t = aika [s]

Q = kunkin kuivausvaiheen vaatima lämpöenergia

P = kuivausteho

Taulukossa 3 on esitetty eri puulajien irtotiheydet kosteuksilla 20 % ja 30 %.

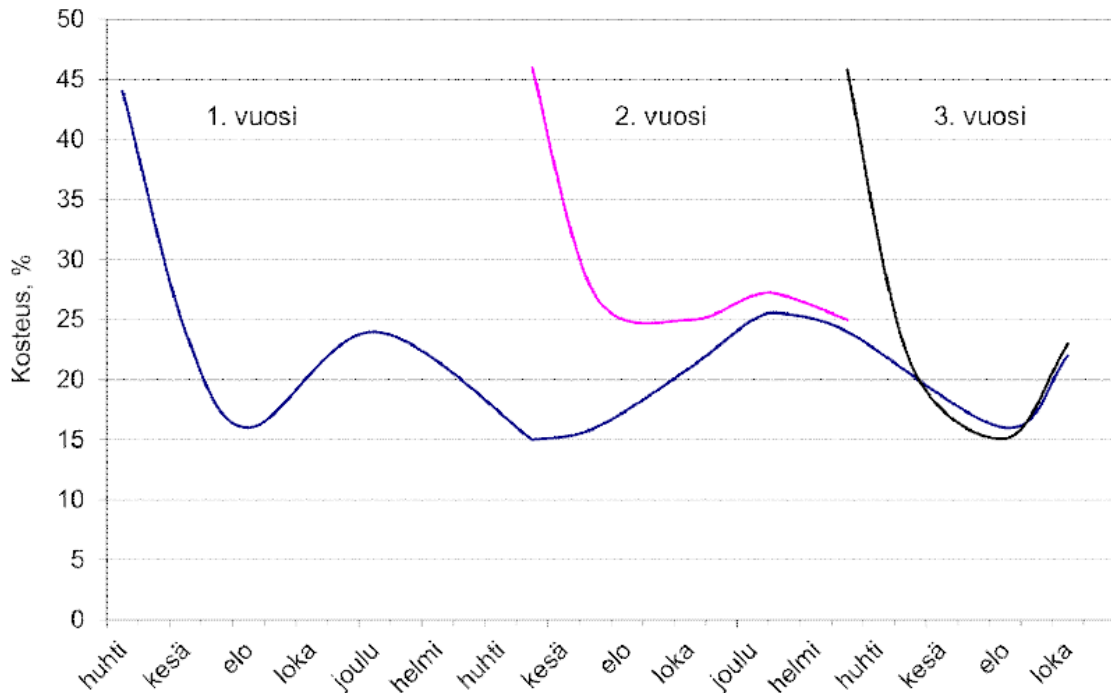
TAULUKKO 3 Puulajikohtainen irtotiheys kosteuden mukaan (13, s. 26)

Puulaji	Irtotiheys kg/m ³			
	Kiintopuupitoisuus			
	0.4		0.63	
	Kosteus 20% 30%		Kosteus 20% 30%	
Koivu	248	283	390	446
Leppä	183	209	288	328
Mänty	202	231	319	364

5.4 Luonnonkuivaus

Luonnonkuivaus tapahtuu luonnonmukaisesti ulkoilman lämpötilassa. Kuivausmenetelmä on halpa mutta säästä riippuvainen sekä ajallisesti pitkä verrattuna keinokuivaukseen. Kuivausaikaan vaikutta tekijä on pilkkeen tekohetki, minkä vuoksi keväällä kaadetut rangat ja tehdyt pilkkeet kuivavat jopa yhdenkesän aikana 20 prosenttiin asti. Luonnonkuivauksessa on myös huolehdittava ilman virtauksesta pilkekasan läpi. Pilkekasa tulee myös olla alustettu ilmavasti, jotta ilma pääsee kiertämään tarpeeksi hyvin ja maasta tuleva kosteus ei tartu pinon alimmaisii pilkkeisiin. Keväällä tehdyt pilkkeet pitäisi kattaa ennen kesäheinäkuuta, jotta sade ei kastelisi pinoa. (12.)

Kuvassa 15 on esimerkki, kuinka koivupilke kuivuu luonnonkuivauksella 45 prosentista saman vuoden elokuussa jo lähelle 15:tä prosenttia. Kuvasta nähdään myös talvikuukausien vaikutus puun kosteuteen. Talvella ilman mahdollisen kosteuden sitovuus on pienempi kuin lämpimällä kesäsäällä, mikä voidaan nähdä aikaisemmin esitettyssä kuvassa 12.



KUVA 15 Pilkkeen kosteus katetussa verkkokehikossa (12, s. 55)

5.5 Keinokuivaus

Keinokuivauksella tarkoitetaan pilkkeen kuivausmenetelmää, joka on koneellinen kylmäilmakuivaus tai lämminilmakuivaus. Keinokuivauksella saadaan yleensä kuivausaika lyhyemmäksi kuin luonnonkuivauksella. Lämminilmakuivauksella voidaan kuivaustoiminnasta tehdä ympärivuotista, mikä tekee kuivauksesta enemmän teollisen tuotannon tapaista. (9, s. 18–19.)

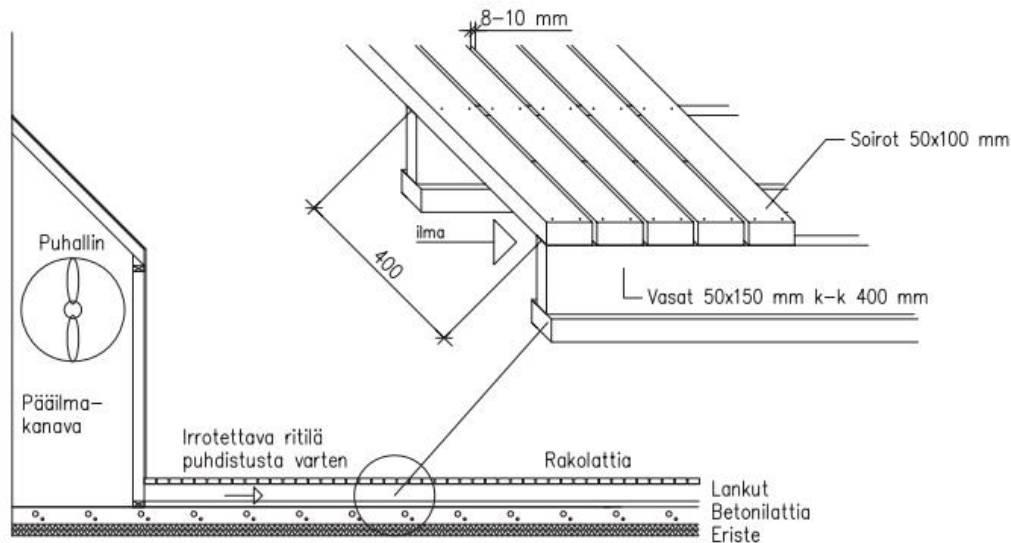
5.5.1 Kylmäilmakuivaus

Kylmäilmakuivauksessa ulkoilma puhalletaan kuivaustilaan tai imetään kuivaustilasta, jolloin kyseessä on alipainekuivaus. Kylmäilmakuivauksen heikkoutena voidaan pitää sen riippuvuus säästä, kuten luonnonkuivauksessa. Mikäli pilkkeen kuivausjakso pitkittyy voi pilkkeen laatu heikentyä homeisuuden ja värivikojen takia. (9, s. 18–19.)

Kuivatuslaskelmissa kylmäilmakuivauksessa vedensitomiskykynä voidaan käyttää 2 g vettä yhtä ilmaukuutiota kohti, mikäli kuivaus tapahtuu kesäkuukausien aikaan. Kuivauksen ollessa loppukesällä sitomiskykynä voidaan käyttää 1 g:aa vettä yhtä ilmaukuutiota kohti. Ohjeellinen ilmamäärä on noin 200 m³/h pilkeirto-kuutiota kohti. Kuivauksessa yleensä pyritään käyttämään suuria ilmamääriä, jotta saadaan riittävästi kuivauskykyistä ilmaa kulkemaan pilkkeiden läpi. Ilmamäärää ohjataan mittaamalla ulkoilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Puhaltimen käyntiaikaa ohjataan ilman kuivauskyvyn perusteella käyttäen kuivausautomaatiikkaa ja -kaavoja. (9, s. 18–19.)

Kuvassa 16 on esitetty Metsäkeskuksen periaatekuva kylmäilmakuivurista. Kuvasta nähdään, kuinka pääilmakanavaa pitkin kuivausilma kulkee rakolattian läpi, minkä jälkeen ilma kulkeutuu pilkekasan läpi. Tämän jälkeen ilma kulkeutuu pois kuivurista, sitoen mukanaan puun kosteutta.

PUHALLINLATTIA:
 50x150 syrjällään k 400
 50x100 lappeellaan k 400
 bitumihiopakkaistat betonilaatan ja puuniskojen välissä.

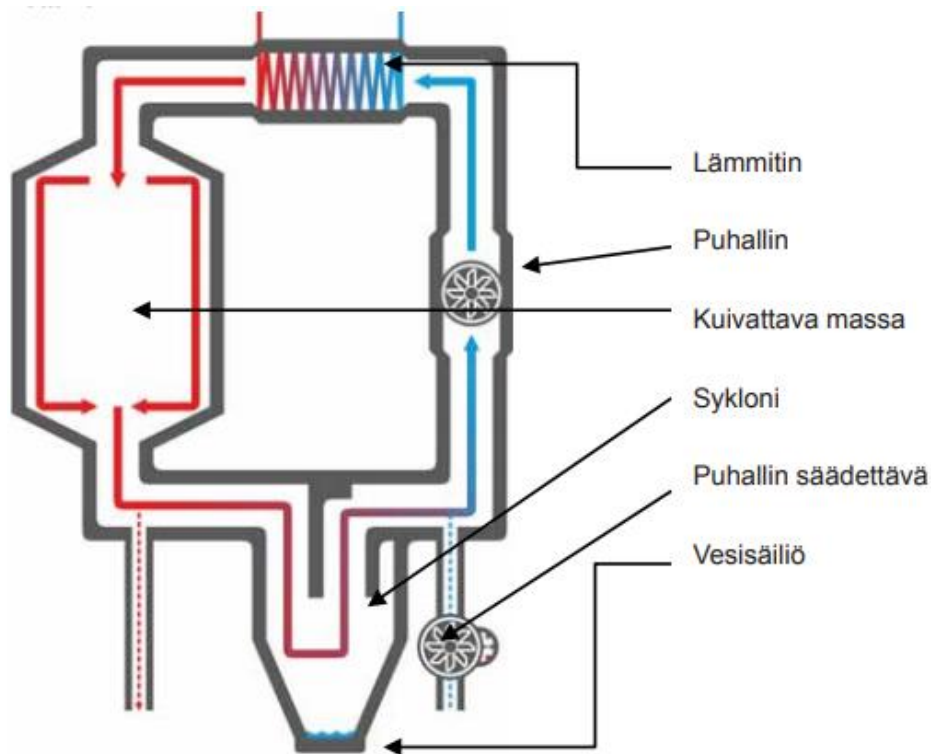


KUVA 16 Kylmäilmakuivurin periaatekuva (9, s. 18)

5.5.2 Lämminilmakuivaus

Lämminilmakuivauksella saadaan pilkkeen kuivauksesta ympärivuotista ja kuivausaikaa lyhennettyä. Lämminilmakuivausjärjestelmät ovat yleensä hyvin automatisoituja. Järjestelmää ohjataan erilaisilla antureilla, jotka mittaavat prosessin tietoja sekä säätävät järjestelmän ajoa sen mukaan. Lämminilmakuivauksessa sen tärkein kuivaukseen liittyvä ominaisuus on kuivauslämpötila, jonka ylärajana pidetään yleensä 100 °C. Mikäli kuivausilma on yli 100 °C on silloin kyseessä kuumailmakuivuri. Lämpötilan nosto 40 °C:sta 70 °C:seen lyhentää kuivausaikaa 1/3:lla. Kuivausilman kulku on myös suuri vaikuttava tekijä kuivausaikaan. Kuivausilman pitäisi pystyä kulkemaan tasaisesti koko kuivattavan pilke-erän läpi. Näin kaikki pilkkeet kuivuisivat mahdollisimman tasaisesti, eikä kuivausjaksoa tarvitsisi jatkaa pidempää epätasaisesti kuivuneiden pilkkeiden takia. (9, s. 20; 11, s. 34.)

Kuvassa 17 nähdään lämminilmakuivurin ja kuivurin ilmankierron toimintaperiaate.

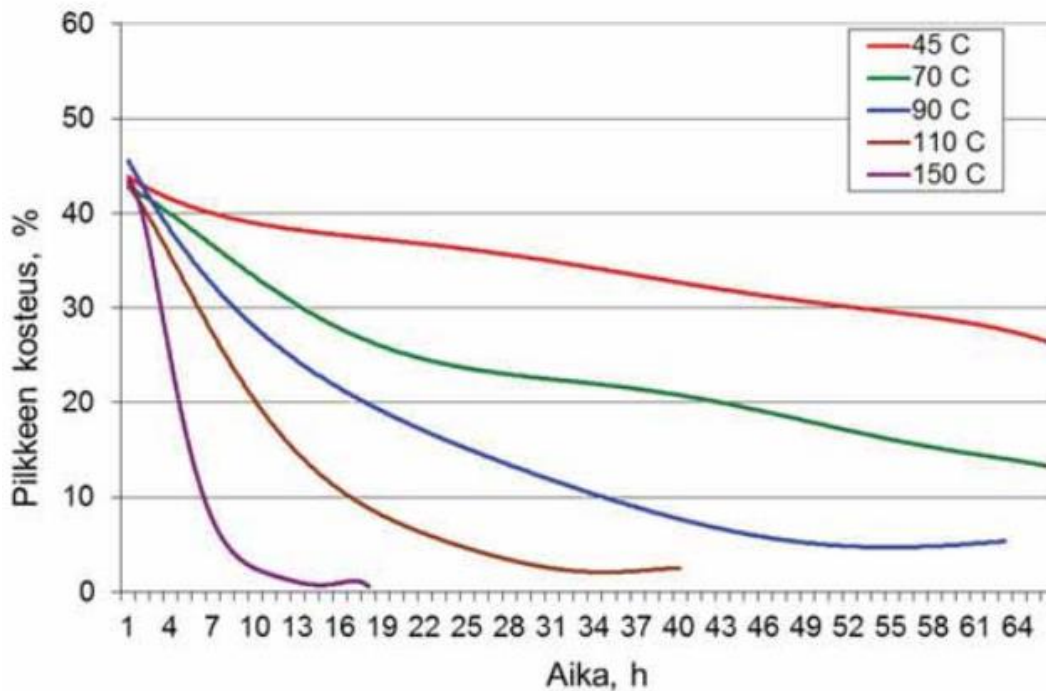


KUVA 17 Periaatekuva lämminilmakuivurista ja kuivausilman kierrosta (11, s. 34)

Lämminilmakuivauksessa täytyy välillä poistaa kostea ilma sisäisestä kierrosta, jolloin saadaan vesi siirrettyä kuivatettavista pilkkeistä. Samalla kun kostea ilma poistetaan kierrosta, täytyy sinne ottaa uutta ilmaa tilalle. Sisäisen ilmakehän tulisi olla vähintään kymmenkertainen ulkoiseen puhallukseen verrattuna. Ulospuhallusta voidaan tarkkailla ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden avulla. (11, s. 35.)

Lämminilmakuivureihin voidaan myös asentaa energiasäästävä ratkaisu, jolloin kuivausmenetelmää kutsutaan kondenssikuivaukseksi. Kondenssikuivauksessa veden haihtumislämpö otetaan talteen lauhduttimen avulla. Kostea höyry siis lauhdutetaan ja vesi tiivistetään lämpöpumppperiaatteella. (11, s. 36.)

Kuvassa 18 nähdään kuivausilman lämpötilan vaikutus pilkkeen kuivaukseen. Metsäkeskuksen tekemän laboratoriotutkimuksen pohjalta voidaan todeta eri lämpötilojen vaikutus pilkkeen kuivaukseen. Pilkkekokona testissä oli ollut 33 cm ja pilkkekan läpi puhallettiin 3 m/s kuivausilmaa suhteellisen kosteuden ollessa 10 %. (11, s. 18.)

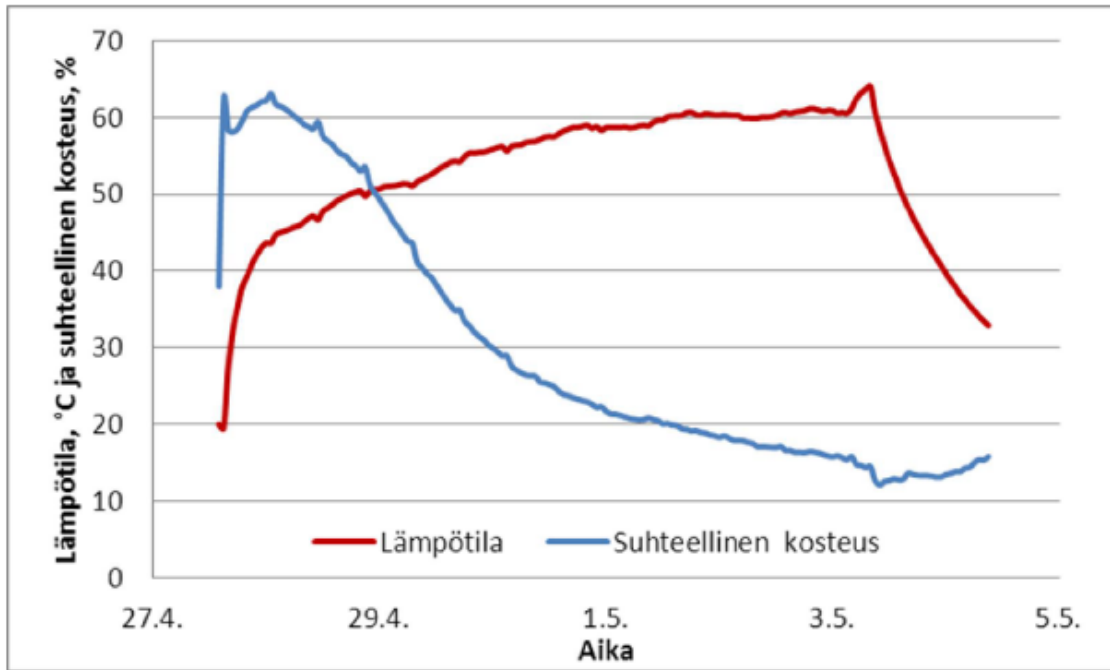


KUVA 18 Pilkkeen kuivaus laboratorio-olosuhteissa (11, s. 18)

Lämminilmakuivauksessa yleensä ongelmana ei ole puun pinnalta haihdutettava vesimäärä, vaan se kuinka saada tasaisesti puun sisäosista vesi kulkeutumaan puun pinnalle. Mikäli haihtumisnopeus on suurempi kuin kosteuden siirtyminen puun pintaosiin, pinta lähtee kuivumaan liikaa ja kosteuden siirtyminen sisäosista vaikeutuu. (17, s. 31.)

Kuvasta 18 nähdään laboratorio-olosuhteissa saatu graafi, kun puu kuivataan 70 °C:n lämpötilassa, joka on lähelle Ruukin saha ja höyläämön kuivauslämpötilaa. Nyt jos tarkastellaan esimerkiksi liitteessä 1 olevaa kuivauksen graafia, voidaan todeta, että kuivausjakso on samankaltainen kuin kuvassa 18 lämpötilalla 70 °C.

Vertailun vuoksi mainittakoon, että Laukaan vankilan lämminilmakuivaimen mahtuu 15 i-m³ pilkettä, kuivaaminen tapahtuu 60 °C:n lämpötilassa ja viidessä vuorokaudessa on päästy alle 20 %:n tavoitekosteuteen. Kuvassa 20 on kyseisen kuivauksen suhteellinen kosteus ja lämpötilat kuivauksen aikana.



KUVA 19 Laukaan vankilan lämminilma-kuivauksen suhteellinen kosteus ja lämpötila (12, s. 51)

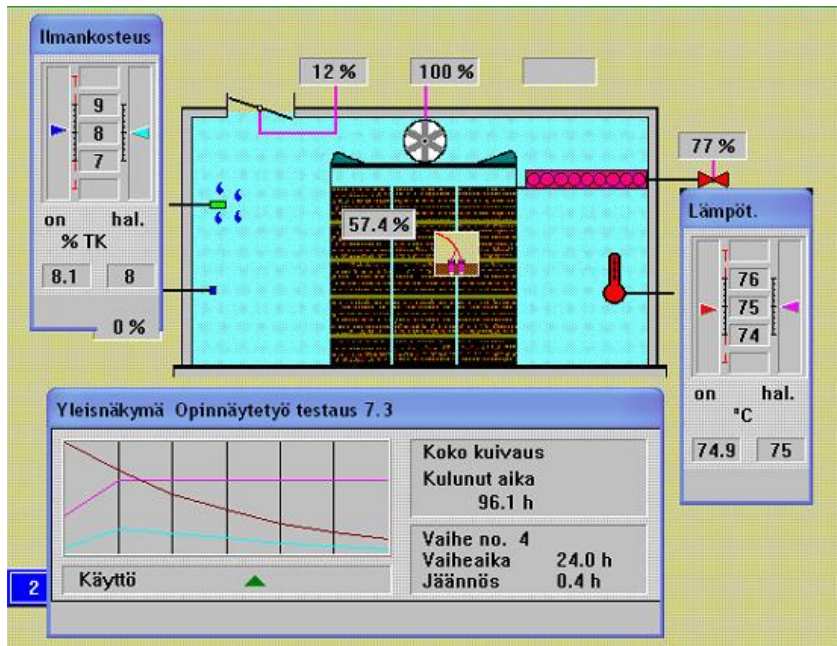
6 KAMARIKUIVAIN RUUKIN SAHA JA HÖYLÄÄMÖ

Ruukin saha ja höyläämössä pilkkeet kuivataan kamarikuivaimessa, joka on malliltaan Bollmann 810 LC. Kamarikuivaamo toimii kertalatausperiaatteella. Kuivatava erä ladataan kamariin, minkä jälkeen kuivatusjakso alkaa. Kamarin kuivausprosessia ohjataan automaatiolla, joka toimii kuivauskaavoilla. Kamarista mitataan ilmanlämpötilaa, kuivauseränpölyä ja ilman suhteellista kosteutta. Kuivatusjakso lopetetaan pilkkeen kosteuden ollessa noin 20–25 %, jolloin pilkkeen kosteus asettuu lähelle 18 %:a. Kuivauslämpötilana käytetään noin 75 °C, joka tuotetaan paikallisella teollisuusalueen kaukolämpöyhtiöllä. Kamarissa on käytetty kahdeksaa kuivaushäkkiä ja kuivaushäkkiin mahtuu noin 12 i-m³ pilkettä. Kuivatusjaksojen kesto on vaihdellut 140 ja 150 tunnin välillä.

Kamari on alun perin ollut sahatavarakuivaamo, joten järjestelmän automaatio on luotu kyseiselle puun ajotavalle.

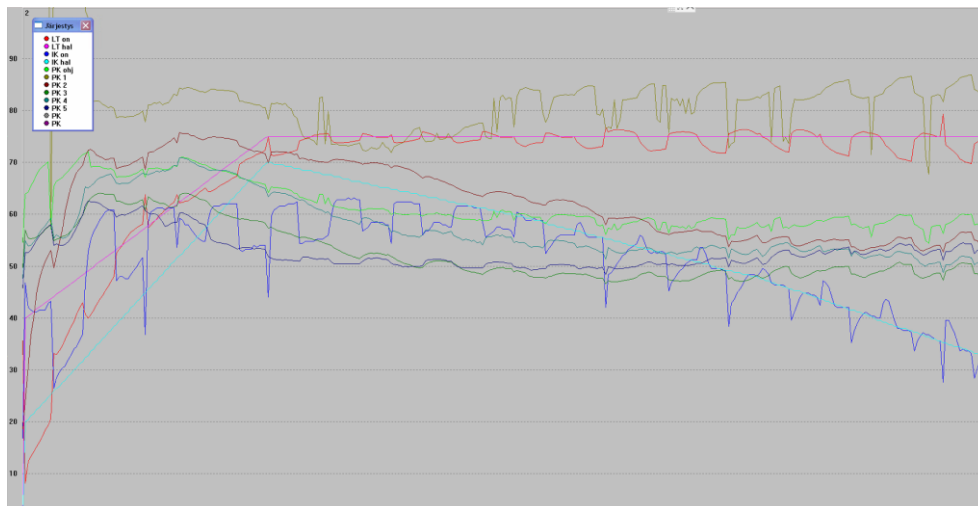
Kuivausjärjestelmän automaation ohjaukseen pääsin käsiksi myös kotoa, käyttämällä tietokoneen etäohjausohjelmistoa TeamViewer. Sieltä pystyi tarkastelemaan kuivatusjakson tilannetta ja muokkaamaan kuivauskaavoja.

Kuvassa 20 on käynnissä olevan kamarin sen hetken kuivatusjärjestelmän tilatiedot. Kuvasta nähdään myös kamarin rakenne. Kamari sisältää puhaltimen ylätasossa, mikä kierrättää kuivausilmaa kamarin sisällä vaihtaen välillä suuntaa. Ylätasolla on myös lämmityspatteri, joka lämmittää kuivausilmaa. Kamarissa on myös kaksi peltiä, joilla voidaan poistaa kosteaa kuivausilmaa kamarista ja ottaa korvausilmaa takaisin kierto. Pilkkeistä mitataan kosteutta noin neljästä eri kohtaa ja järjestelmä näyttää näiden keskiarvon, joka kuvassa 20 on 57,4 %.



KUVA 20 Kamarikohtaisen kuivauksen tilatiedot

Tietoja voidaan myös tarkastella graafin muodossa. Alla olevassa kuvassa 21 on kuivausprosessin tiedot sen hetken kuivauksen tilanteesta. Graafista ilmenee ilman lämpötila ja kosteus sekä puun kosteus eri mittapisteistä. Liitteissä käydään tarkempina kuvina läpi kuivausjaksoja.



KUVA 21 Graafi kuivausjaksosta

7 KUIVAUSJAKSOJEN TESTAUS

Tässä luvussa käydään läpi eri kuivausjaksojen testaukset kamarikuivaimella. Testaus tapahtui muuttamalla kuivauskaavoja automaatiojärjestelmään etäohjelman avulla. Kuivausjaksoja seuratiin myös koko kuivauksen ajan käyttämällä etäohjelmistoa ja tarpeen vaatiessa kuivausta voitiin ajaa käsiajolla, jolloin automaatio voitiin ohittaa. Kuivauksen kaavoja pystyttiin muokkaamaan kesken ajon. Kuivausjaksojen kestot ovat vaihdelleet aikaisemmin 140 ja 150 tunnin välillä.

Kuivauksissa käytettiin kahdeksaa kuivaushäkkiä, joihin mahtui 12 i-m³ pilkettä. Kuivattavaa pilkettä oli yhteensä kuivausjaksoissa 96 i-m³. Kuvan 5 mukaisesti 1 kiintokuutio vastaa 2,5 irtokuutiota pilkettä. Laskennallinen kiintokuutiomäärä saatiin jakamalla irtokuutioiden määrä 2,5, joten kuivausjakson kiintokuutiomäärä oli noin 38,4.

7.1 Ensimmäinen testaus

Kuivauserän alkukosteutta ei voitu määrittää resurssisyistä eikä myöskään kyseisen erän painoa. Mikäli kyseiset arvot olisivat tiedossa, voitaisiin kuivaukseen kuluva energia laskea luvussa 4.3 esitetyillä kaavoilla. Myös kuivausteho saataisiin laskettua kaavalla 9, käyttämällä kuivausjaksoon kulunutta aikaa.

Ensimmäiseksi kokeiltiin muuttaa kuivauksen liitteessä 1 näkyvän lämpötilan pudotusta ja pitää suhteellista kosteutta korkeampana. Näin saataisiin pidettyä peltejä hieman enemmän kiinni, jolloin lämmitettyä kuivausilmaa päästetään kierrosta vähemmän pois ja säästettäisiin lämmitykseen kuluva energia. Vaikka ilman suhteellinen kosteus tulisikin nousemaan, pitäisi puun tasapainokosteuden asettua alle vaaditun 20 % kuvan 12 mukaan.

Kuvassa 22 on kuivauskaavan arvojen syöttöikkuna. Tässä kuivauksessa lähdettiin siis muuttamaan tasapainokosteusprosenttia (TK %) siten, että alussa nostettiin sitä, että järjestelmä ajaa suhteellisen kosteuden noin 70 %:iin. Tämän jälkeen suhteellinen kosteus lähtisi laskemaan, kun TK % tiputetaan vaiheiden 1 - 6 välillä aina 4 %:iin asti. Kuivaimen lämpötilaa ajettiin koko jakson ajan 75

°C:ssa. Järjestelmä näyttää puun kosteusprosentin kuivauskaavan syöttöikkunassa, mikä ei kuitenkaan ole ohjaavana tekijänä automaatioissa. TK % järjestelmän ajotapa ei todellisuudessa vastaa aivan kuvan 12 mukaisia puuntasapainokosteuksia ja ilman suhteellisia kosteuksia. Tätä yritettiin selvittää järjestelmän ohjekirjasta, eikä löytynyt selvitystä, mitä järjestelmän TK %:lla tarkoitetaan tarkalleen. Kyseinen kamari on alun perin sahatavarakuivaukseen ohjelmoitu, joten se todennäköisesti liittyy kyseisen kuivauksen ohjaukseen.

Lähtökost.	50	Loppukost.	15	%	Paksuus	40	mm	Puulajit
Tunnusluku	28	Puuryhmä	3		Birke			Ohjelma
Vaihe	1	2	3	4	5	6		
Ohjaus	T	T	T	T	T	T		
Aika	24	24	24	24	24	24		
Lämpöt. alku [°C]	40	75	75	75	75	75		
Lämpöt. loppu [°C]	75	75	75	75	75	75		
Puunkost. [%]	38.9	27.8	20.1	14.6	10.5	7.53		
Kosteus alku [% TK]	5	17.5	15	12	8	5.5		
Kosteus loppu [% TK]	17.5	15	12	8	5.5	4		
Kuiv.voima alku []	6	2.3	1.9	1.7	1.9	1.9		
Kuiv.voima loppu []	2.3	1.9	1.7	1.9	1.9	1.9		
Kierrosluku alku [%]	95	100	100	100	100	100		
Kierrosluku loppu [%]	100	100	100	100	100	100		
Lämpö Pellit	Auto	Auto	Auto	Auto	Auto	Auto		
Sumutus	0	Auto	Auto	Auto	Auto	Auto		
	0	0	0	0	0	0		

Lisää PK [H]
 Lisää Aika [T]
 Lisää PO [P]
 Poista
 << >>
 < >
 Vaiheaika [h] 24.0
 Kuivausaika [h] 144.0
 Menetelmä Normaali

Yleiskuva

KUVA 22 Kuivauskaavan syöttö automaatiojärjestelmään

Ensimmäisen testauksen yhteenveto

Kuivaus oli kokonaiskestoltaan noin 155 tuntia. Kuivauksen graafi on esitetty liitteessä 2. Kuivauksella lähdettiin kokeilemaan luukuttamisen vähentämistä ja tätä kautta lämpötilan tasaisuutta läpi kuivausjakson.

Graafissa väriltään pinkki viiva on haluttu lämpötila ja sen lähetyvillä sahaava punainen viiva on mitattu lämpötila. Lämpötila pysyy hyvin keskiarvoltaan 75

°C:ssa kuivauksen puoleenväliin asti. Tämän jälkeen kuivauksessa tapahtuu pieni notkahdus. Notkahdukseen vaikuttaa puusta irtoava vesi, joka sitoutuu ilmaan ja nostaa suhteellista kosteutta sekä laskee lämpötilaa. Lämpötilan laskuun vaikuttaa myös luukuttaminen, jolloin kamarista poistetaan kosteaa kuivausilmaa ja otetaan tuoretta ulkoilmanlämpötilassa olevaa ilmaa kiertoon. Kuivauksen aikana ulkoilman lämpötila oli noin -10 °C. Lämpötila saatiin pidettyä paremmin halutulla tasolla kuin liitteessä 1, josta muutosta haluttiin tehdä.

120 h:n kohdalla puun kosteus oli pitkään samalla tasolla keskiarvoltaan 55 %. Kuivauksen aikana ilman suhteellinen kosteus laski halutulla tavalla ja kosteus-erokin oli puuhun nähden suurimmillaan noin 25 %. Kamarikuivaimen lämpötilan ohjausta jouduttiin käyttämään käsikäytöllä pilkkeen tuotannollisista tarpeista johtuen. Ohjauksen muutoksen jälkeen saatiin lämpötila kamarissa pakotettua niin ylös kuin se menisi. Käsikäytöllä lämpötila saatiin nousemaan 80 °C:seen. Lämpötilan noston jälkeen polttopuiden kosteus lähti laskemaan ja kuivausjakson loppullinen aika oli noin 155 tuntia.

Kuivauksessa onnistuttiin pitämään lämpötila halutulla tasolla. Vaikka lämpötila olikin tasaisesti hyvä, ei puun kosteus laskenut tarpeeksi nopeasti. Tähän saattoi vaikuttaa liian korkea suhteellinen kosteus ja liian alhainen ilman tilavuusvirta kyseisellä ilmankosteudella.

7.2 Toinen testaus

Kuivattava erä oli 8 häkkiä eli noin 96 m^3 . Kuivattavan erän painoa ei edelleen voitu punnita, joten näin ollen oletetaan kuivattavan erän olevan kuitenkin samanlainen kosteudeltaan kuin ensimmäinen.

Kuivauksen tarkoituksena oli löytää erilainen ajotapa kuin kuivauksessa 1. Myös kuivauksen 1 aika venyi liian pitkäksi. Testauksessa lähdettiin vaihtamaan automaatio-ohjelman ajotapa tasapainokosteudesta suhteelliseen kosteuteen ja järjestelmään muutettiin jakson aika 24 h:sta 20 h:iin. Näin saataisiin täysin erilainen ajotapa verrattuna aikaisempaan ja nähtäisiin mahdollisimman erilainen kuivaus. Kuvassa 23 on järjestelmään tehty muutos ajotavassa.

Lähtökost.	60	Loppukost.	15 %	Paksuus	40 mm	Puulajit	
Tunnusluku	28	Puuryhmä	3	Birke		Ohjelma	
Vaihe	1	2	3	4	5	6	
Ohjaus	T	T	T	T	T	T	
Aika	20	20	20	20	20	20	
Lämpöt. alku [°C]	75	75	75	75	75	75	
loppu	75	75	75	75	75	75	
Puunkost. [%]	44.8	36.3	24.3	14.9	11.2	7.77	
Kosteus alku [% SK]	60	60	30	20	20	20	
loppu	60	30	20	20	20	20	
Kuiv.voima alku []	6	6	6	6	4.8	3.1	
loppu	6	6	6	4.8	3.13	2.25	
Kierrosluku alku [%]	95	100	100	100	100	100	
loppu	100	100	100	100	100	100	
Lämpö Pellit Sumutus	Auto 0	Auto 0	Auto 0	Auto 0	Auto 0	Auto 0	

Lisää PK [H]

Lisää Aika [T]

Lisää PO [P]

Poista

<< >>

< >

Vaiheaika [h] 20.0

Kuivausaika [h] 120.0

Menetelmä Normaalii

KUVA 23 Toisen kuivauskaavan arvot

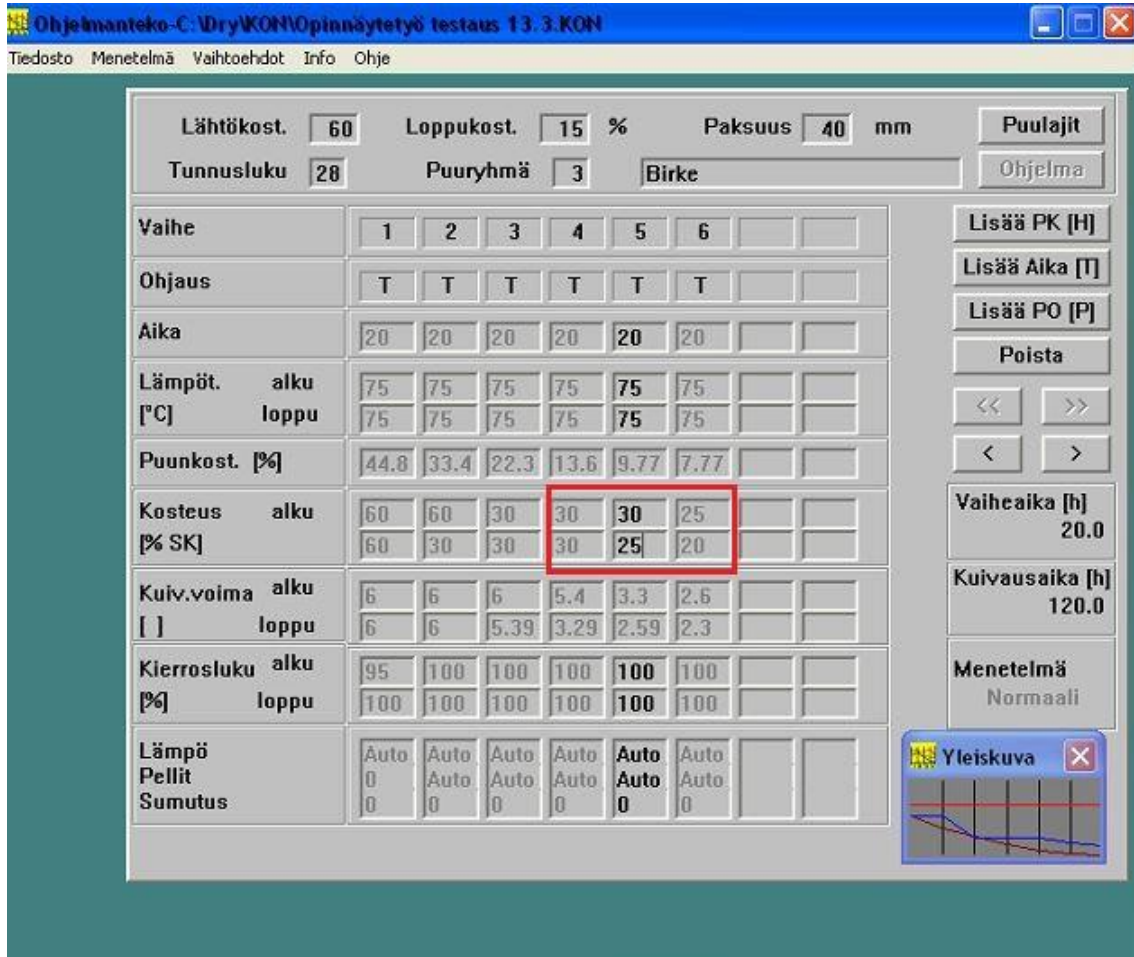
Alussa ilman suhteellista kosteutta lähdettiin nostamaan 60 %:iin, kuten kuvassa 23 on nähtävissä vaiheen 1 kohdalla. Tämän jälkeen suhteellista kosteutta tiputettiin 60 %:sta 30 %:iin vaiheeseen 3 mennessä. Vaiheesta 4 alkaen suhteellinen kosteus olisi 20 % kuivauksen loppuun asti. Lämpötila pidettäisiin koko ajan 75 °C:ssa.

Toisen testauksen yhteenveto

Kuivaus oli kestoltaan 122 h. Kuivauksen koko graafi on esitetty liitteessä 3. Kuivauksella lähdettiin hakemaan erilaista ajotapaa, joka poikkeaa mahdollisimman paljon ensimmäisestä testauksesta. Tämän takia kamaria ajettiin nyt ilman suhteellisen kosteuden avulla. Jostain syystä järjestelmä piirsi ilman suhteellisen kosteuden niin ylös graafiin, että se ei ollut nähtävillä.

Kuivauksen aikana täytyi kuitenkin vaiheen 4 aikana nostaa suhteellinen kosteus vielä 30 %:iin sekä suhteellinen kosteus muutettiin laskemaan hitaammin 20 %:iin

loppua kohden. Sillä lämpötila kamarissa laski paljon, mikä on nähtävissä liitteessä 3. Tämän takia kaavaan tehtiin muutos kesken kuivausjakson, joka näkyy kuvassa 24. Kuivauksen lopussa kamarin lämpötilaa pakotettiin käsiajolla ajamaan mahdollisimman ylös, jolloin maksimilämpötila oli kuivauksen lopussa noin 80 °C.



KUVA 24 Muutos vaiheen 4 suhteelliseen kosteuteen

Kuivausta piti myös jatkaa lisäämällä viimeiseen vaiheeseen 10 tuntia, sillä muutoin kuivaus olisi loppunut kesken ja puiden kosteus ei olisi laskenut vaaditulle 20 %:n tasalle.

Kuivausjakso oli kuitenkin hyvä ajallisesti. Lopussa nähdään myös hyvin puun kosteuden laskeminen tasaisesti loppuun asti, kuten kuvassa 19 laboratoriossa kuivattu pilke.

7.3 Kolmas testaus

Kuivattava erä oli saman 96 i-m³ kuin edellisissä. Erän alkupainoa ei voitu määrittää. Oletetaan sen olevan laadultaan samanlainen kuin aikaisemmat.

Tässä testauksessa säädettiin toisen testauksen alkua, jossa lämpötila putosi liikaa luukuttamisen vaikutuksesta, koska suhteellinen kosteus pudotettiin liian rajusti. Suhteellinen kosteus pudotettiin nyt 45 %:iin kun se edellisessä pudotettiin 30 %:iin. Loppu pidettiin samanlaisena kuin edellisessä testauksessa, paitsi koko kuivausjakson haluttua lämpötilaa nostettiin 75 °C:sta 80 °C:seen.

Kuvassa 25 on esitetty muutokset kuivauskaavoihin toisen kuivauksen pohjalta.

Ohjelmanteko-Opiinäytetyö testaus 22.3.KON

Tiedosto Menetelmä Vaihtoehdot Info Ohje

Lähtökost. **60** Loppukost. **15** % Paksuus **40** mm Puulajit
Tunnusluku **28** Puuryhmä **3** **Birke** Ohjelma

Vaihe		1	2	3	4	5	6		
Ohjaus		T	T	T	T	T	T		
Aika		20	20	20	20	20	30		
Lämpöt. [°C]	alku	40	80	80	80	80	80		
	loppu	80	80	80	80	80	80		
Puunkost. [%]		48.2	35.3	23.6	14.9	10.2	6.5		
Kosteus [% SK]	alku	60	60	45	35	30	25		
	loppu	60	45	35	30	25	20		
Kuiv.voima []	alku	6	6	6	5.4	3.7	2.9		
	loppu	6	6	5.4	3.7	2.9	2.3		
Kierrosluku [%]	alku	95	100	100	100	100	100		
	loppu	100	100	100	100	100	100		
Lämpö Pellit		Auto	Auto	Auto	Auto	Auto	Auto		
Sumutus		0	0	0	0	0	0		

Lisää PK [H]
Lisää Aika [T]
Lisää PO [P]
Poista
Vaiheaika [h]
Kuivausaika [h]
Menetelmä Normaaali

Yleiskuva

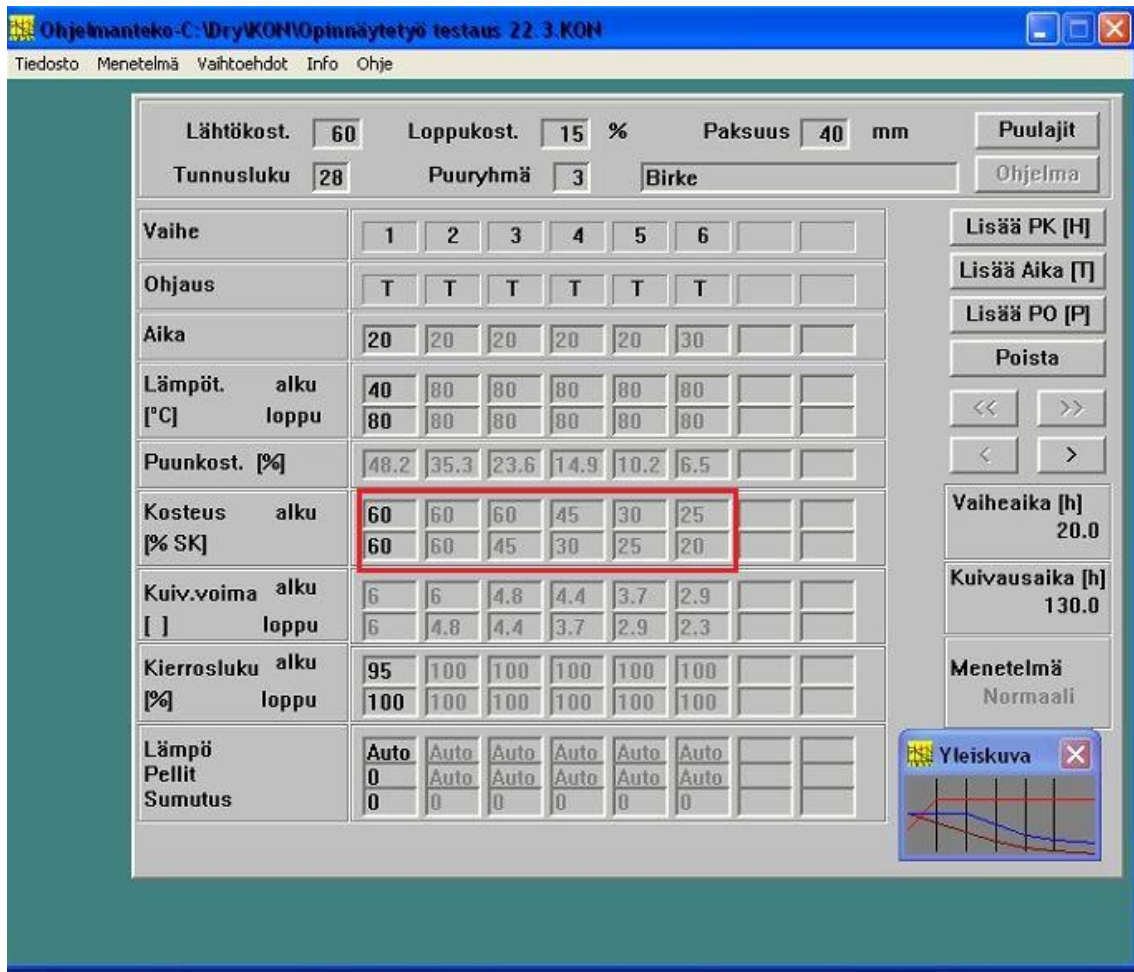
KUVA 25 Kolmannen kuivausjakson kaava

Kolmannen testauksen yhteenveto

Kuivauksen graafi on esitetty liitteessä 4. Kuivaukseen kului 132 tuntia, joka oli hieman enemmän kuin edellisessä, vaikka kuivauksen loppu 50 tuntia pidettiin täysin samana kuin aikaisemmin. Kuivattavan erän koko oli sama kuin aikaisemmissa. Kuivausjaksoon tuli noin 10 tuntia lisää edelliseen verrattuna. Kuivausjakson eroavaisuuteen todennäköisesti vaikutti pilkkeen laatu. Mikäli kuivauserät punnittaisiin, saataisiin tarkemmin tietoa esimerkiksi kuivauksen vedenpoistosta vuorokaudessa ja näin voitaisiin hyvin vertailla eri kuivauseriä toisiinsa.

Kuivausjakson aikana täytyi tehdä muutos kaavaan, sillä luukuttamista tapahtui kuivauksen alussa liikaa edelleen ja lämpötila kamarissa putosi rajusti, eli muutos ilman suhteelliseen kosteuteen alussa 45 %:iin ei ollut riittävä, joten sitä nostettiin 60 %:iin. Tämän jälkeen luukuttamista tapahtui hieman hillitymmin, voisi olla mahdollista myös pitää ilman suhteellista kosteutta 70 %:ssa alussa pidempään, koska luukuttamista oli 60 % suhteellisella kosteudella vielä paljon. Tärkeää tosin kuivauksessa on saada poistettua kosteutta kierrosta, mutta lämpötilan vaikutuskin on huomattava kuivauksessa. Kuivaus oli kuitenkin hyvä ajallisesti, sillä aika lyheni noin 10 h alkutilanteesta

Kuvassa 26 on muutos alkuperäisen kolmannen testauksen kaavaan. Kaavassa siis jatkettiin pidemmälle ilman suhteellista kosteutta 60 %:lla.



KUVA 26 Muutokset kolmannen testauksen ajotapaan

7.4 Neljäs testaus

Neljännessä testauksessa kuivattava erä oli sama kuin aikaisemmissa kuivauksissa. Kuivauserän alkupainoa ei voitu määrittää. Testaus suoritettiin samalla kaavalla kuin kolmastestaus. Tämän testauksen tarkoituksena oli katsoa, kuinka kuivaus mahdollisesti eroaa kolmannesta kuivauksesta, kun käytössä on sama kaava.

Neljännän testauksen yhteenveto

Kuivauksen graafi on esitetty liitteessä 5. Kuivaukseen kului 131 h, joka oli sama kuin edellisessä kuivauksessa. Kuivauskaavana toimi sama kaava kuin kolman-

nessa kuivauksessa. Kuivaukseen ei tehty muutoksia kesken kuivausjakson. Kuivaustulos oli hyvä ajallisesti, koska sillä saatiin lähes 10 h tuntia pois lähtötilanteen kuivauksen kestosta.

Alla olevassa taulukossa 4 on kaikkien kuivausjaksojen tiedot taulukoituna.

TAULUKKO 4 Kuivausjaksojen tiedot

Kuivausjakso	1	2	3	4
Määrä [i-m3]	96	96	96	96
Aika [h]	155	122	132	131
Vuorokautta	6,5	5	5,5	5,5

8 JATKOKEHITYSIDEAT

Tässä luvussa käsitellään lyhyesti muutamia kuivauksen kannalta mahdollisia kehitysideoita, kuten kuivauksen seurantaan liittyviä ja energiansäästöön.

8.1 Mittausantureiden lisääminen

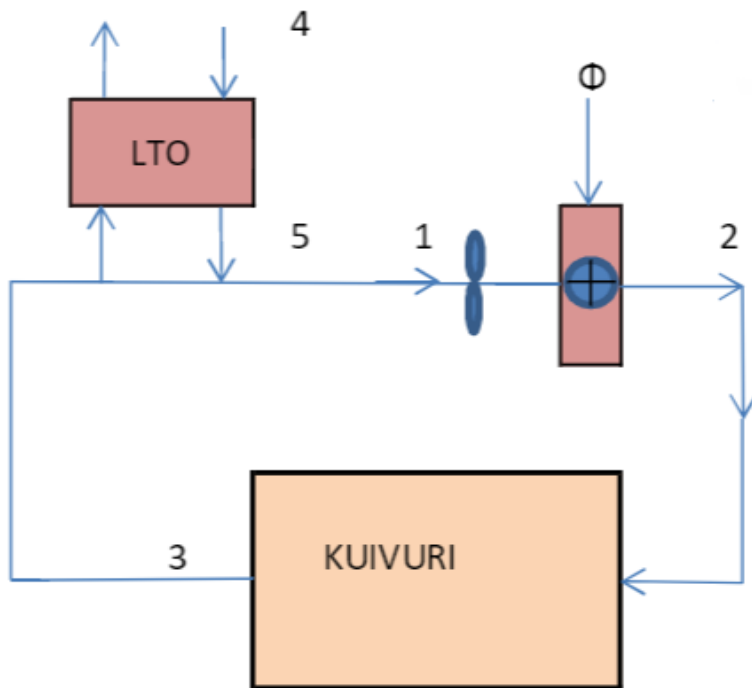
Kuivausjaksosta voisi mitata tarkemmin eri suureita. Esimerkiksi, sieltä lähtevän ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Tämän tiedon avulla tiedettäisiin ilman mukana poistuvan veden määrä. Eri kohdista pilkkeitä olisi hyvä mitata ilmavirtoja, millä saataisiin tietoa, kuinka ilmavirtaus virtaa kuivattavassa erässä. Tätä kautta voisi mahdollisesti vaikuttaa ilmankiertoon kamarissa, mikäli havaitaan huonoa ilmankulkua pilkkeiden läpi erikohdissa. Tasaisempi ilmankulku pilkekanan läpi tarkoittaa tasaisemmin kuivuvaa pilke-erää. Mahdolliset kamarikohtaiset energiankulutusmittaukset toisivat hyvin tietoa kuivauserän energiankulutuksesta ja helpottaisi energiankulutuksen seuranta kuivausjakso kohtaisesti.

Myös kuivauserän alkupainon ja kosteuden mittaaminen toisi hyvin tietoa kuinka paljon kamari pystyy poistamaan vettä kuivauserästä. Näin saataisiin tietää hie-man kamarin toimivuudesta ja verrattua eri kuivauseriä toisiinsa. Laskennalliset kuivausjakson energiankulutukset voitaisiin laskea työssä esitetyillä kaavoilla, mikäli alkupaino ja kosteus tiedettäisiin.

8.2 Lämmöntalteenotto ja laskennallinen säästö €/i-m³

Kamarissa kuivausilman lämpötila on korkea ja sen lämmittämiseen on kulutettu paljon energiaa prosessin aikana. Laskennallinen lämminilmakuivauksen lämpö-energiankulutus ilman lämmöntalteenottoa tuloilman lämpötilalla +15 °C on noin 100 kWh/i-m³ ja tuloilman ollessa -15 °C lämpöenergiaa kuluu 160 kWh/i-m³. Lämmöntalteenotolla saadaan lämpöenergian kulutus noin puolitettua. (12, s. 49.)

Kuvassa 27 on havainnollistettu periaatekuvana kamarikuivain lämmöntalteenotolla.



KUVA 27 Kamarikuivaimen havaintokuva lämmöntalteenotolla (18)

Esimerkiksi ensimmäisen testikuivauksen laskennallinen lämpöenergiankulutus aikaisemmin mainituilla arvoilla $160 \text{ kWh/i-m}^3 * 96 \text{ i-m}^3 = 15360 \text{ kWh} = 15,36 \text{ MWh}$. Lämpöenergian hinta paikalliselta lämpölaitokselta Ruukin saha ja höyläämölle on noin 45 €/MWh . Kuivauksen kokonaiskustannus näillä laskennallisilla arvoilla olisi siis $45 \text{ €/MWh} * 15,36 \text{ MWh} = 691,2 \text{ €}$, joka tekee irtokuutiota kohden $7,2 \text{ €}$.

Oletetaan että lämpöenergiankulutus saadaan puolitettua ensimmäisessä testissä, mikäli kamarissa olisi lämmöntalteenotto. Lämpöenergian kulutus olisi nyt $80 \text{ kWh/i-m}^3 * 96 \text{ i-m}^3 = 7680 \text{ kWh} = 7,68 \text{ MWh}$ ja kustannus olisi koko kuivaukselle $345,6 \text{ €}$, sekä $3,6 \text{ €/i-m}^3$. Säästöä tulisi noin irtokuutiota kohden $7,2 \text{ €} - 3,6 \text{ €} = 3,6 \text{ €}$.

Lämmöntalteenotto onkin ratkaisu, jolla tultaisiin säästämään todellisuudessaakin lämmityskustannuksista. Investoinnin kannattavuuden laskenta voitaisiin suorittaa, mikäli järjestelmän investointi kustannukset tiedettäisiin.

9 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli saada lyhennettyä kuivausjakson kestoja aikaisemmista kuivausjaksoista, joiden kestot ovat olleet 140–150 tuntia. Kamarikuivaamoon ei tehty rakenteellisia muutoksia, ainoastaan automaatiojärjestelmän kuivauskaavan muutoksilla pyrittiin saamaan lyhennettyä kuivausjaksoon kuluvaan aikaa.

Ensimmäisellä kuivausjaksolla säädettiin lämpötilan pudotusta alkutilanteesta pitämällä se mahdollisimman tasaisena kuivausjakson ajan, koska korkeammalla ilmanlämpötilalla ilman suhteellinen kosteus on pienempi ja ilma pystyy sitomaan silloin enemmän vettä. Kuivauksen lämpötila saatiin pidettyä hyvin halutulla tasolla. Ilman suhteellinen kosteus kuitenkin laski liian hitaasti kuivauksen aikana ja tästä johtuen kuivausjaksoon kului 155 tuntia, joka oli tuotannon kannalta liikaa eikä ollut työn kannalta hyvä tulos. Tämän tuloksen pohjalta lähdettiin suhteellista kosteutta laskemaan rajummin kuivausjakson aikana. Tulosta ei voida kuitenkaan verrata aikaisempiin suoranaisesti, sillä kuivauksesta ei tiedetä poistetun veden määrää.

Toisella kuivausjaksolla kuivausautomaatiota säädettiin suhteellisen kosteuden mukaan, kun aikaisemmin sitä oli säädetty tasapainokosteuden mukaan. Suhteellisen kosteuden ajotapa oli helpommin säädettävissä kuin tasapainokosteudella ajettu kuivausjakso. Tasapainokosteuden säädöllä ei pystytty vaikuttamaan ilman suhteellisen kosteuden muutokseen suoranaisesti kaavaan, vaan se muutti tasapainokosteutta. Tämä tasapainokosteuden säätö ei vastannut kuitenkaan kuvassa 12 olevia arvoja. Tätä yritettiin selvittää järjestelmän ohjekirjasta, mutta selvyttä siihen ei saatu. Toinen kuivaus olikin nyt paljon parempi kuin ensimmäinen kuivaus, sillä toisen kuivauksen kulunut aika oli 122 tuntia. Kuivausaikaan kuitenkin vaikuttaa kuivattavan pilkkeen laatu, joten kuivausjaksoja ei pysty suoraan vertaamaan toisiinsa, kun ei tiedetä kuivauserästä poistetun veden määrää. Tulos on siis suuntaa antava.

Kolmannella kuivausjaksolla muutettiin hieman edellisen kuivauksen alkua, koska toisen kuivauksen alussa ilmanlämpötila laski rajusti johtuen turhan vaativasta luukutuksesta kamarissa. Kuivauksen suhteellista kosteutta muutettiin siten, että kuivausjakson suhteellista kosteutta laskettiin vähemmän alussa, mutta muuten kuivauskaava pidettiin samanlaisena kuin edellisessä. Kuivaukseen kului 132 tuntia. Kuten aikaisemmin mainittu tuloksia on hankala vertailla toisiinsa. Tulos oli kuitenkin hyvä ja sillä saavutettiin alle 140 tunnin tulos, joka oli tämän työn tarkoituksena.

Neljännellä kuivausjaksolla kuivausta ajettiin samalla kaavalla kuin kolmannessa. Lopputuloskin on lähes sama, ainoastaan tunnin ero. Työn kannalta hyvä oli saada kaksi samanlaista kuivausjaksoa ja nähdä niiden keston olevan samaa luokkaa.

Lopputulokset ovat työn kannalta hyviä. Kuivausjaksojen vertailun kannalta lisäksi tuotannon työvaiheeseen alkupunnituksen ja alkukosteuden määrittämisen.

Selvitysten perusteella Ruukin saha ja höyläämön kamarikuivain toimii, kuten sen tyyppiseltä kuivaimelta oletetaankin. Alussa ilman suhteellinen kosteus nostetaan ylös, minkä jälkeen sitä lähdetään laskemaan luukuttamalla, jotta vettä saadaan poistettua kierrosta. Kuivauksen loppuvaiheessa lämpötila lähtee hyvin nousuun, kun ilman suhteellista kosteutta saadaan laskettua. Lämpötilan nousu nähdään hyvin kuivausgraafeissa.

Energiankulutuksen kannalta suurin vaikuttava tekijä olisi lisätä järjestelmään lämmöntalteenotto, jolloin saadaan energiankulutus karkeasti puolitettua. Ruukin saha ja höyläämö aikookin asennuttaa tämän järjestelmän mahdollisimman pian.

LÄHTEET

1. Tietoa bioenergiasta ja turpeesta. Bioenergia Ry. Saatavissa: <http://www.bioenergia.fi/Bioenergiatietoa>. Hakupäivä 18.1.2018.
2. Uusiutuva energia suomessa. 2018. Motiva. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa. Hakupäivä 18.1.2018.
3. Bioenergia. 2018. Motiva. Saatavissa: <https://www.motiva.fi/bioenergia>. Hakupäivä 18.1.2018.
4. Bioenergian käyttö. 2018. Motiva. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/bioenergian_kaytto. Hakupäivä 22.1.2018.
5. Bioenergia. Suomen Lähienergialiitto. Saatavissa: <https://www.lahienergia.org/lahienergia/bioenergia/>. Hakupäivä 22.1.2018.
6. Energian hankinta ja kulutus 2016. 2017. Suomen Tilastokeskus. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehk/2016/ehk_2016_2017-12-08_fi.pdf. Hakupäivä 26.1.2018.
7. Polttopuut. 2017. Motiva. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/puulammitys_kiinteistoissa/polttopuut. Hakupäivä 26.1.2018.
8. Alakangas, Eija 2011. Uuni valmiin polttopuun laatuvaatimukset EN 14961-5 standardin mukaan. Saatavissa: http://www.halkoliiteri.com/tiedostot/Tiedostot/Alakangas_Eurooppalaiset_pilkestandardi_EN14691_5_04012011.pdf. Hakupäivä 15.1.2018.
9. Pilketuotannon opas. 2012. Suomen Metsäkeskus. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/pilketuotanto-opas.pdf>. Hakupäivä 26.1.2018.
10. Käynnissä olevia tutkimuksia. Suomen Tilastokeskus. Saatavissa: <http://www.stat.fi/tup/htpalvelut/tutkimukset.html>. Hakupäivä 18.1.2018.
11. Puupolttoaineen kuivuriopas. 2014. Suomen Metsäkeskus. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/kuivuriopas-web.pdf>. Hakupäivä 6.2.2018.

12. Energiapilke-konsepti polttopuun tuotanto- ja toimitusketjussa. 2012. Tutkimusraportti VTT-R-00152-12. VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2012/VTT-R-00152-12.pdf>. Hakupäivä 6.2.2018.
13. Vääräsmäki, Markku 2003. Pilkkeen keinokuivauksen vaihtoehdot kaupallisessa pilketuotannossa. Bioenergiakeskuksen julkaisusarja. Asiantuntijuushanke. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20521/mv_asiantuntijuushanke_nro2.pdf?sequence=3. Hakupäivä 20.2.2018.
14. Puun kosteuskäyttäytyminen. 2011. Tekninen tiedote. Puuinfo. Saatavissa: https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/kysymyksiä-ja-vastauksia/puun_kosteuskayttaytyminen_lattia.pdf. Hakupäivä 20.2.2018.
15. Härkönen, Martti 2012. Puun polttoainekäyttö pienissä aluelämpölaitoksissa. Centria tutkimus ja kehitys. Keski-pohjanmaan ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/41034/Puun%20polttoainekaytto.pdf?sequence=1>. Hakupäivä 26.2.2018.
16. Rahikka, Mikko 1999. Fysiikka jään lämmittäminen. Saatavilla: <http://hyl.edu.hel.fi/sivut/mikko/fysiikka/jaa/jaanlaam.html> Hakupäivä 27.2.2018.
17. Kiianmies, Miia 2014. Sahan sivutuotteiden jalostusarvon lisääminen kuivaamalla. Opinnäytetyö. Kymenlaakso: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, puutekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/77529/Kiianmies_Miia.pdf?sequence=1. Hakupäivä 27.2.2018.
18. Raitilan Jyrki 2014. Pilkkeiden keinokuivaus pilkepäivät, energiametsähanke. Saatavissa: <http://docplayer.fi/7117625-Pilkkeiden-keinokuivaus-pilkepaiva-energiametsa-hanke-oulu-10-12-2014-jyrki-raitila-erikoistutkija-vtt.html>. Hakupäivä 20.3.2017.

