

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma / Energia- ja ympäristötekniikka

Olle Korte

PILKEPUUN ALIPAINEKUIVAUS AUMASSA

Opinnäytetyö 2013

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

KORTE, OLLE

Opinnäytetyö

Työn ohjaaja

Toimeksiantaja

Marraskuu 2013

Avainsanat

Pilkepuun alipainekuivaus aumassa

38 sivua + 9 liitesivua

Jyri Mulari, lehtori

Hyötypaperi Oy

klapi, pilke, kuivaus, kosteus, alipaine, puuenergia

Insinööriyön tarkoituksena oli tutkia alipainekuivausmenetelmän soveltuvuutta ja teknillistä toteutusta pilkeaumassa. Pilkkeen kuivaukseen on olemassa useita erilaisia menetelmiä, mutta yleensä ne ovat suuria ja kalliita investointeja. Haluttiin siis tarkastella menetelmää, joka on käyttö- ja hankintakustannuksiltaan edullinen. Menetelmässä alipaine ja virtaus kuivuriin luotiin imemällä kuivausilmaa kuivattavan aineksen läpi. Tavoitteena oli tehdä kuivuri, jossa aines kuivuu mahdollisimman tasaisesti ja tehokkaasti. Lisäksi kuivurista tuli tehdä konstruktioltaan mahdollisimman yksinkertainen ja toimiva.

Aines kuivattiin Hyötypaperi Oy:n Valkealan toimipisteessä. Kuivauksia suoritettiin kaksi, ja niissä kuivurin runko oli sama. Kuivumista tarkkailtiin seuraamalla sisäänmenevän ja ulostulevan ilman suhteellisten kosteuksien sekä lämpötilojen eroja. Poistuneen veden määrä selvitettiin mittaamalla kuivattavan pilkkeen alku- ja loppukosteudet. Kuivaukset suoritettiin ulkoilmassa ja kokeiden aikana seurattiin myös ulkoisia olosuhteita, jotta niiden vaikutusta kuivumiseen voitaisiin arvioida.

Kuivauskokeissa päästiin asetettuun tavoitteeseen, eli pilkkeiden loppukosteudet saavuttivat halutun kosteuden, ja myös kuivurin rakenne todettiin toimivaksi. Suoritetuissa kokeissa pilkkeiden alkukosteudet olivat tosin melko alhaisia, joten mittausseuranan perusteella tavoitteeseen päästiin jo ennen kokeen päättymistä.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Mechanical and Production Engineering

KORTE, OLLE

Bachelor's Thesis

Supervisor

Commissioned by

November 2013

Keywords

Underpressure Drying of Wood in a Logstack

38 pages + 9 pages of appendices

Jyri Mulari, Senior Lecturer

Hyötypaperi Oy

log, drying, humidity, underpressure, wood energy

This thesis deals with the applicability and technical implementation of the underpressure drying method in a logstack. There are already a lot of drying methods in log drying, but they are too big and expensive. Therefore a need arose at Hyötypaperi Oy to study and develop a method with lower investment and operating costs. The underpressure and airflow in the drier were created by a fan, which sucked air through the logstack. The aim was to build a drier where material would dry evenly and effectively. In addition, the construction of the drier had to be simple and functional.

The experimental part of this study was made at Hyötypaperi Oy in Valkeala. Two dryings were performed and the frame of the drier was the same in both of them. The drying process was observed by monitoring the relative humidity and temperature of the incoming and outgoing air during the test. The humidity of the drying material was also registered both at the beginning and the end of the test to find out how efficient the drying was. Because the tests were made outdoors, external conditions were monitored so that their effects on the drying results could be estimated in.

The tests achieved the expected objective. This means that humidity in the dried logs after the test was sufficiently dry. The construction of the drier was found to be functional. The humidity of the logs, however, was quite low before the tests. For this reason the set aim in the humidity of the logs was already reached before the tests ended.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
1.1	Puuenergia ja sen merkitys Suomen energian tuotannossa	7
1.2	Pilkkeen tuotanto ja käyttö Suomessa	7
1.3	Tutkimuksen tavoitteet	8
1.4	Yritysesittely	8
2	TEORIA	9
2.1	Pilkkeen valmistus	9
2.1.1	Yleistä	9
2.1.2	Pilkkeen valmistus yksinkertaistettuna	10
2.2	Puun, veden ja ilman suhde	11
2.2.1	Puun lämpöarvo	11
2.2.2	Veden sitoutuminen ja sijainti kasvavassa puussa	13
2.2.3	Lämpötilan vaikutus ilman vedenpidätyskykyyn	14
2.2.4	Puun kosteuden määrittäminen	14
2.3	Puun kuivuminen	15
2.3.1	Yleistä	15
2.3.2	Vapaan veden poistuminen puusta	16
2.3.3	Veden haihtuminen puun pinnalta	16
2.3.4	Veden siirtyminen puun sisäosista sen pinnalle	16
2.4	Kuivattavasta aineksesta poistuneen vesimäärän laskeminen	17
2.4.1	Poistuneen vesimäärän laskeminen kuivurin tuloilman lämpötilan, poistoilman lämpötilan ja ulkoilman suhteellisen kosteuden avulla	17
2.4.2	Ilman absoluuttinen kosteus	17
2.4.3	Vesihöyryn paine	17
2.4.4	Ilman suhteellinen kosteus	18
2.4.5	Ilman entalpia	18
2.4.6	Mollier-diagrammi	20
3	AINEISTO JA MENETELMÄT	22
3.1	Kuivausaumojen rakenteet	22

3.2	Ilman virtauksen tuottaminen	23
3.3	Ilman virtausnopeuden mittaus	24
3.4	Poistuneen vesimäärän seuranta	25
3.5	Kokeissa käytetty pilke	26
3.6	Ulkoisten olosuhteiden seuranta	27
3.7	Poistuneen vesimäärän selvitys punnitus-kuivausmenetelmällä	27
4	TULOKSET	28
4.1	Ensimmäinen kuivauskoe 24.5. - 12.7.2011	28
4.1.1	Pilkkeiden alku- ja loppukosteudet sekä kuivumisen tasaisuus	28
4.1.2	Lämpötilan muutos sisäänmeno- ja ulostuloilman välillä	30
4.1.3	Auman läpi kulkeneen ilman suhteellisten kosteuksien muutokset	30
4.2	Toinen kuivauskoe 11.7. - 28.7.2011	31
4.2.1	Pilkkeiden alku- ja loppukosteudet	31
4.2.2	Lämpötilan muutos sisäänmeno- ja ulostuloilman välillä	32
4.2.3	Auman läpi kulkeneen ilman suhteellisten kosteuksien muutokset	33
5	TULOSTEN TARKASTELU	34
5.1	Ensimmäinen kuivauskoe 24.5. - 12.7.2011 ja sen onnistuminen	34
5.2	Toinen kuivauskoe 11.7. - 28.7.2011 ja sen onnistuminen	34
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	35
6.1	Virhelähteet ja tulosten yleistettävyys	35
6.2	Parannusehdotukset	36
6.3	Loppupäätelmät	36

LÄHTEET

LIITTEET

- Liite 1. Taulukko pilkkeiden laatuluokituksesta
- Liite 2. Taulukko ilman maksimaalisesta vedenpidätyskyvystä lämpötilan funktiona
- Liite 3. Kuivauskokeen 24.5. - 12.7.2011 pilkkeiden alkukosteudet
- Liite 4. Kuivauskokeen 24.5. - 12.7.2011 pilkkeiden väli- ja loppukosteudet
- Liite 5. Kuivauskokeen 24.5. - 12.7.2011 mittauspöytäkirja
- Liite 6. Kuivauskokeen 24.5. - 12.7.2011 puhaltimen käyntitunnit
- Liite 7. Kuivauskokeen 11.7. - 28.7.2011 pilkkeiden alku- ja loppukosteudet
- Liite 8. Kuivauskokeen 11.7. - 28.7.2011 mittauspöytäkirja
- Liite 9. Kuivauskokeen 11.7. - 28.7.2011 puhaltimen käyntitunnit

1 JOHDANTO

1.1 Puuenergia ja sen merkitys Suomen energian tuotannossa

Puu energian tuotannossa luetaan kuuluvan biomassoihin. Biomassa on eloperäistä hiilipitoista ainetta, johon on yhteyttämisessä sitoutunut auringon energiaa. Biomassaa ovat mm. puu, peltokasvit sekä bioperäiset jätteet. Yleisin biomassan käyttötapa bioenergian tuottamiseksi on polttaminen. (Hellgren, Heikkinen, Suomalainen & Kala 1999, s. 30.) Bioenergia on hiilidioksidineutraalia eikä siis lisää hiilidioksidipäästöjä. Esimerkiksi puun poltossa vapautuva hiili sitoutuu takaisin kasvavaan puuainekseen, eli hiili kiertää ilmakehän ja puuaineksen välillä ja näin ollen hiilen määrä pysyy vakiona. (Hakkila 2003, s. 24.)

Suomen kokonaisenergian kulutus oli vuonna 2010 yhteensä 1 460 petajoulea, joka vastaa 406 terawattituntia. Saman vuoden kokonaisenergian kulutuksesta uusiutuvan energian osuus oli 27 % eli 380 PJ. Puuenergian osuus uusiutuvista energianlähteistä oli 81 %. Puuenergiasta suurin osa saadaan kemiallisen metsäteollisuuden jäteliemistä, erityisesti mustalipeästä. Toiseksi suurin puuenergian lähde vuonna 2010 oli teollisuuden ja energiantuotannon puupolttoaineet, joihin lukeutuvat esimerkiksi metsäteollisuuden sivutuotteet kuten kuori ja hakkuutähteet. Loppu puuenergiasta tuotetaan puun pienkäytöllä asuintalojen tulisijoissa ja pienissä lämpökeskuksissa. (Motiva 2013.) Yhdestä pinokuutiometristä koivupilkettä saadaan 1,50 MWh energiaa. (Puuenergia 2003, s. 11.)

1.2 Pilkkeen tuotanto ja käyttö Suomessa

Perinteisen polttopuun – pilkkeiden eli klapien ja halon – merkitys Suomen lämmön- tuotannossa on edelleenkin merkittävä. Polttopuuta käytetään Suomessa vuosittain noin 6,1 miljoonaa kiinto- m^3 , josta myyntipilkkeiden osuus on noin 300 000 kiinto- m^3 (750 000 i- m^3). Suomen noin 2 000 pilkekauppiaasta parisensataa saa päätoimeentulonsa pilkkeitä myymällä ja pilkekaupan vuotuinen liikevaihto on 30 - 40 miljoonaa euroa. (Hillebrand, Kouki, 2006, s. 9.) Polttopuuta käyttävien pientalojen bruttoenergisäily on noin 13 TWh, joka vastaa Suomen kokonaisenergian kulutuksesta noin 3,5 %. Polttopuulla tuotetaan piensektorin eli maatilojen, omakotitalojen ja vapaa-ajan asuntojen käyttämästä energiasta noin 40 %. Suomessa siis lähes viidesosa puuperäi-

sestä polttoaineesta käytetään edelleenkin perinteisessä muodossaan eli lämmön tuottamiseen pientaloissa. (Gumse, 2006, s. 35.)

Pilkkeen ja hakkeen käytölle on asetettu lisäystavoite vuoteen 2010, johon mennessä niiden käyttömäärää pyritään lisäämään vuositasolla 2,5 miljoonaa m³:iin. Lisäyksellä pyritään korvaamaan kevyen polttoöljyn käyttöä lämmityksen polttoaineena. Pilkkeen ja hakkeen käytön lisäämiselle on kuitenkin omat haasteensa. Kevyttä polttoöljyä harvoin korvataan hakkeen polttoa lisäämällä, sillä usein kysymyksessä on siirtyminen työläästä pilkelämmityksestä vaivattomampaan hakkeeseen tai mekaanisen puunjalostuksen sivutuotteista valmistettuihin puupuristeisiin, pelletteihin. Puuenergian käyttöaste seuraa myös öljyn hintatasoa, eli öljyn jyrkkä kallistuminen lisää polttopuun käyttöä. Merkittävin keino saada polttopuuhun perustuva lämmitys kilpailukykyiseksi sähkö- ja öljylämmitykselle on kehittää pilketuotantoa, pilkkeiden jakelua sekä niiden markkinointia. Lisäksi hyvälaatuista polttopuuta tulisi olla helposti ja luotettavasti saatavilla kohtuulliseen hintaan. Tästä syystä monet energiayhtiöt ovatkin Hyötypaperi Oy:n tapaan perustaneet omia polttopuujakelujärjestelmiään, joiden kautta asiakas voi tilata haluamansa määrän polttopuuta lähialueiden pilkeyrittäjiltä. (Gumse, 2006, s. 36.)

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Valkealan Hyötypaperi Oy:llä oli mietitty liiketoiminnan laajentamista myymällä poltokuivaa pilkettä pienkuluttajille. Pilkkeiden keinokuivaamiselle pohdittiin erilaisia vaihtoehtoja ja lopulta päädyttiin kokeilemaan niin sanottua **alipainekuivausmenetelmää pilkeaumassa**. Menetelmään päädyttiin paitsi muiden vastaavalla menetelmällä puita kuivaavien yrittäjien kokemusten perusteella, myös siksi, että puhallinta lukuun ottamatta auman rakentamiseen tarvittavat välineet ja rakennustarvikkeet olivat Hyötypaperi Oy:llä jo valmiina. Tehtävänäni ja samalla lopputyöni aiheena oli tarkastella kyseisen **kuivausmenetelmän teknistä toteutusta ja soveltuvuutta pilkkeiden aumakuivauksessa**.

1.4 Yritysesittely

Hyötypaperi Oy on perustettu vuonna 1986, ja se toimii Kaakkois-Suomen alueella. Konsernin käsittelylaitokset sijaitsevat Lappeenrannassa, Kuusankoskella ja Valkealassa. Hyötypaperin ja kuormalavatoimintaa harjoittavan A-Aluslava Oy:n muodosta-

man Hyötypaperikonsernin henkilöstömäärä on noin 65 ja vuonna 2011 konsernin liikevaihto oli 12,9 miljoonaa euroa. Hyötypaperi Oy:n liiketoiminta-alueita ovat eri materiaalien kierrätys ja uusiokäyttö sekä bio- ja kierrätyspolttoaineiden valmistus. (Hyötypaperi Oy 2013.)

Hyötypaperi Oy kerää ja käsittelee paperia, metsätähteitä, teollisuuden, kaupan alan yritysten sekä logistiikkayritysten ja muiden yritysten uusiokäyttöön soveltuvia materiaaleja. Hyötypaperi Oy:n Valkealan laitoksella tuotetaan myös biopolttoainetta polttolaitosasiakkaille energiantuotantoa varten. Valkealan biopolttoainelaitos perustettiin vuonna 2002 ja sen vuosittainen tuotantokapasiteetti on 200 000 tonnia. Biopolttoaineiden raaka-aineina ovat metsätähteet, risut, latvukset, lahopuu, kannot, ruokohelppi, rakennus- ja purkupuuhuonekalat, sahauspätkät, muovi ja kuitujakeet. (Hyötypaperi Oy 2013.) Kuvassa 1 esitetään Hyötypaperi Oy:n Valkealan toimipiste.



Kuva 1. Hyötypaperi Oy:n Valkealan käsittelylaitos

2 TEORIA

2.1 Pilkkeen valmistus

2.1.1 Yleistä

Pilkkeellä eli klapilla tarkoitetaan rankapuusta katkaistua ja halkaistua polttopuuta. Pilkkeiden pituus määräytyy käyttötarkoituksensa eli tulipesän syvyyden mukaan. Pituukseltaan 25 - 33 senttimetrin pilkkeitä käytetään takoissa ja uuneissa, kun taas 50

senttimetrin pituiset pilkkeet soveltuvat leivinuuneihin ja keskuslämmityskattiloihin. Pilkkeen minimipaksuus on 4 senttimetriä ja maksimipaksuus 10-15 senttimetriä. (Motti 2013.) Opinnäytetyön liitteessä 1 on esitetty pilkkeiden laatuluokitukset, joiden perusteella pilkkeiden myyntiarvo määritetään.

Pilkkeet valmistetaan yleisimmin koivusta. Suomessa metsistä hankitaan polttopuun raaka-ainetta noin 5,4 miljoonaa kiintokuutiometriä vuosittain, josta koivun ja muiden lehtipuiden osuus on noin 2/3 ja männyn ja kuusen osuus 1/3. (Pilketuotanto-opas 2013, s. 8.) Koivun etuna verrattuna muihin kotimaisiin puulajeihin on sen suuri tiheys, joka vaikuttaa siihen, paljonko puuaineksessa on energiaa tilavuusyksikköä kohden. Koivu palaa myös räiskymättömästi, mikä tekee sen poltosta miellyttävämpää ja paloturvallisempaa verrattuna esimerkiksi mänty- ja kuusipilkkeeseen, jotka pihkapuina voivat aiheuttaa kipinöitä ympäristöön. (Gumse 2003, s. 53.)

2.1.2 Pilkkeen valmistus yksinkertaistettuna

Pilkkeiden valmistus alkaa luonnollisestikin metsästä, josta rankapuut kaadetaan. Suuren mittakaavan tuotannossa puut kaadetaan koneellisesti erilaisilla hakkuukoneilla. Tällöin kyseessä on yleensä metsävarusteinen maataloustraktori, jonka nosturiin on asennettu hakkuuseen tarkoitettu laite. Tämä laite on joko syke-, rulla- tai telavetoinen laite, jolla puut kaadetaan, karsitaan ja katkotaan. Sykesyöttöiset laitteet toimivat traktorin omalla hydraulikalla, muut laitteet vaativat lisähydraulikkaa. Koneellinen hakkuu erilaisilla maataloustraktorilaitteilla lisää työn tuottavuutta verrattuna esimerkiksi moottorisahatyöhön noin kaksin- kolminkertaisesti eli noin 2,5 - 3 m³ käyttötunnissa. Pienemmän mittakaavan tuotannossa polttorangan hankinta metsistä on tavallisesti omatoimista, eli pientalojen ja maatalojen polttopuu hankitaan usein omista metsistä, omalla työllä ja omilla laitteilla. Puiden kaatoon ja pilkkontaan näissä tapauksissa välineiksi riittää moottorisaha ja kirves. (Gumse 2003, s. 53.)

Rankojen katkaisu ja pilkkominen pilkkeeksi suoritetaan moottorisahalla ja kirveellä usein silloin, kun pilkkeiden tarve on vähäinen eikä työn tuottavuudella ole merkitystä. Suurempaa tuotantoa varten rankojen pilkkomisen nopeuttamiseksi ja helpottamiseksi käytetään tavallisesti erilaisia katkaisu- ja halkaisulaitteita. Usein näissä pilkekoneissa on käyttövoimana maataloustraktori, mutta myös sähkö- ja polttomoottorikäyttöisiä malleja on olemassa. Myös puita katkaisevia ja halkaisevia

yhdistelmäkoneita on kehitetty erillisten katkontasirkkeleiden ja halkaisulaitteiden ohelle. Esimerkiksi yhdistelmäpilkekoneissa pilke valmistetaan syöttämällä kuljetinhihnaa pitkin karsittu rankapuu, jonka laite katkaisee oikean pituiseksi. Katkaistu pala putoaa kouruun, jossa hydraulisesti toimiva mäntä työntää palan kiilaa vasten, joka taas halkaisee puun halutun kokoiseksi pilkkeiksi. Monet näistä pilkekoneista on varustettu myös kuljettimella, jonka avulla valmiit pilkkeet voidaan siirtää suoraan esimerkiksi perävaunuun tai varastoon. (Gumse 2003, s. 54.)

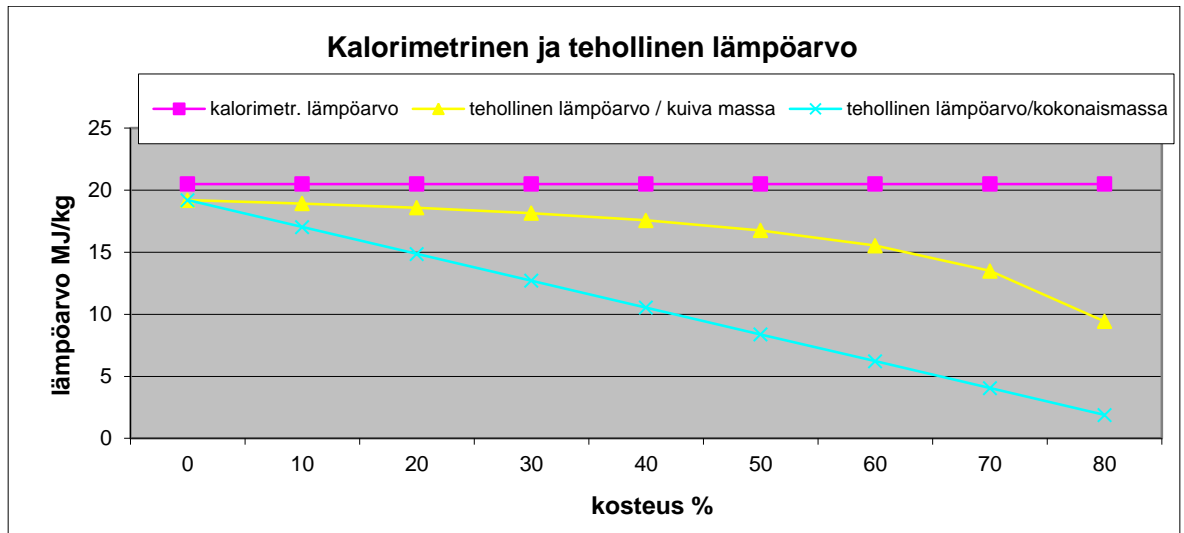
2.2 Puun, veden ja ilman suhde

2.2.1 Puun lämpöarvo

Polttoaineen lämpöarvon mittasuurena käytetään yleensä joko MJ/kg tai kWh/kg. Puun lämpöarvoa tarkasteltaessa on erotettava kaksi termiä. (Hakkila 2003, s. 26.)

Kalorimetrinen lämpöarvo kertoo puun palamisessa vapautuvan kokonaislämpömäärän ottamatta kantaa puun kosteuteen. Tätä vapautuvaa lämpömäärää on kuitenkin mahdotonta saavuttaa, sillä osa lämmöstä joudutaan aina käyttämään puun sisältämän veden höyrystämiseen. Puu hygroskooppisena eli vettä imevänä aineena sisältää aina vettä, jota se sitoo itseensä ympäröivän ilman vesihöyrystä. Puun kosteus siis seuraa sitä ympäröivän ilmankosteuden muutoksia. Puun kalorimetrinen lämpöarvo on näin ollen lähinnä teoreettinen arvo, joka on laboratorisesti määritelty absoluuttisen kuivasta puusta. Puun kalorimetrinen lämpöarvo on määritelty olevan sen kosteudesta riippumatta aina noin 20,5 MJ/kg. (Hakkila 2003, s. 26.)

Puun *tehollisen lämpöarvon* laskemisessa otetaan huomioon puun sisältämän kosteuden höyrystämiseen kuluva energia. Puun tehollisen lämpöarvon selvittäminen on usein käytännöllisempää, koska se kertoo kuinka paljon puun palamisesta vapautuu lämpöä sen varsinaiseen tarkoitukseen, kuten vaikkapa höyryturbiinin pyörittämiseen. (Hakkila 2003, s. 26.) Kosteuden vaikutus puun teholliseen lämpöarvoon on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Kuvaajassa esitettynä kosteuden vaikutus puun teholliseen lämpöarvoon. (Sentre 2013.)

Puun kalorimetristä lämpöarvoa ei ole mahdollista saada puusta myöskään sen sisältämän vedyn takia. Polton aikana vety yhdistyy happeen muodostaen vettä. Kun polton yhteydessä syntyvä vesi otetaan huomioon, absoluuttisen kuivan puun tehollinen lämpöarvo saadaan selville kaavasta 1. (Hakkila 2003, s. 27.)

$$q_{net,d} = q_{cal} - 2,443 \frac{MJ}{kg} * 0,09H = q_{cal} - 0,219H, \quad (1)$$

missä

$q_{net,d}$ = absoluuttisen kuivan puun tehollinen lämpöarvo, MJ/kg

q_{cal} = puun kalorimetrinen lämpöarvo, noin 20,5 MJ/kg.

Kaavassa esiintyvä arvo 2,443 MJ/kg vastaa sitä energiamäärää, joka tarvitaan höyrystämään 25 °C:n lämpötilassa oleva vesi.

0,009H osoittaa sitä veden määrää, joka syntyy poltettaessa absoluuttisen kuivaa puuta.

Kun puun keskimääräinen vetypitoisuus on 6 %, saadaan absoluuttisen kuivan puun teholliseksi lämpöarvoksi: 20,5 MJ/kg – 0,219*6 = 19,186 MJ/kg. Kalorimetrisen ja tehollisen lämpöarvon ero kuivassa puussa on siis noin 1,3 MJ/kg.

Vettä sisältävän puun tehollinen lämpöarvo kuivamassaa kohti saadaan kaavasta 2. (Hakkila 2003, s. 27.)

$$q_{net,ar} = q_{net,d} - 2,443 \frac{MJ}{kg} * M_{ar} / (100 - M_{ar}), \quad (2)$$

missä

$q_{net,d}$ = absoluuttisen kuivan puun tehollinen lämpöarvo 19,2 MJ/kg

$q_{net,ar}$ = vettä sisältävän puun tehollinen lämpöarvo MJ/kg

M_{ar} = puun kosteus, %.

Kaavassa esiintyvä arvo 2,443 MJ/kg vastaa sitä energiamäärää, joka tarvitaan höyryttämään 25 °C:n lämpötilassa oleva vesi.

Vettä sisältävän puun tehollinen lämpöarvo voidaan laskea myös aineksen kokonaisuutta kohden. Tämä saadaan kaavasta 3. (Hakkila 2003, s. 27.)

$$q_{net,ar} = q_{net,d} * \frac{100 - M_{ar}}{100} - 0,02443 * M_{ar} \quad (3)$$

2.2.2 Veden sitoutuminen ja sijainti kasvavassa puussa

Kasvava puu ottaa elintoiminnoilleen välttämättömän veden juuriensa avulla maasta. Puun tarvitsemat ravintoaineet kulkevat juuresta latvaan laimeina vesiliuoksina puun vedenjohtosoluissa. (Alanen 1961, s. 43.) Puun sisältämä vesi on sitoutuneena siihen kahdella eri tavalla. Puun solujen seinämissä on niin sanottua *sidottua vettä*, joka kuuluu luonnostaan soluseinämään. Puun soluonteloissa vesi on taas niin sanottuna *vapaina vetenä*. (Alanen 1961, s. 47.)

Puun kosteus rungon eri osissa vaihtelee puulajeittain. Esimerkiksi kasvavassa havupuussa veden virtaus tapahtuu sen rungon uloimmissa kerroksissa, joten sen pintapuun on usein veden kyllästämää. Koivussa taas kosteussuhde sydän- ja pintapuun välillä voi olla jopa päinvastainen. Rungon eri korkeuksillakin esiintyy kosteuseroja. Latvaa kohden pintapuun kosteus lisääntyy voimakkaasti, kun taas sydänpuun kosteus pysyy

suhteellisen samana. Koska sydänpuun osuus latvapuolelta vähenee, puun latvaosat ovat tyviosia kosteampia. (Alanen 1961, s. 43.)

2.2.3 Lämpötilan vaikutus ilman vedenpidätyskykyyn

Ilman kykyyn sitoa vettä kuivauksen yhteydessä vaikuttaa kuivausilman suhteellinen kosteus. Suhteellinen kosteus kertoo, kuinka paljon ilmassa on vettä verrattuna siihen suurimpaan määrään, jonka ilma kykenisi tietyssä lämpötilassa pidättämään höyrynä. Ilman suhteellisen kosteuden suurin arvo on sata prosenttia, ja tässä määrässä ilman vedenpidätyskyky on täysin käytetty. Tällöin ilma on kylläistä ja ylimääräinen vesi tiivistyy näkyvään muotoon sumuksi ja kasteeksi, eikä kuivumista voi tapahtua. Ilman vedenpidätyskyky kasvaa jyrkästi lämpötilan noustessa.

Esimerkkinä siitä, kuinka ilman lämpötila vaikuttaa ilman suhteelliseen kosteuteen, voidaan tarkastella ilmaa, jonka absoluuttinen vesisisältö on 6 g/kg, kolmessa eri lämpötilassa. Lämpötilassa 5 °C ilmakilo voi sitoa enimmillään 5,3 grammaa vettä höyrynä. Lämpötiloissa 10 °C ja 20 °C vastaavat luvut ovat noin 7,7 g/kg ja 15 g/kg. Ilman suhteelliseksi kosteudeksi 5 °C:n lämpötilassa saadaan $6/5,3 \cdot 100 = 113 \%$, 10 °C:n lämpötilassa $6/7,7 = 78 \%$ ja 20 °C:n lämpötilassa $6/15,0 = 40 \%$.

Ilman lämpötilan ollessa viisi astetta havaitaan esimerkkitalanteesta, että kuivausta ei voi tapahtua. Ilman suhteellinen kosteus on jo yli sata prosenttia, joten ilma on täysin kyllästynyt ja sadan prosentin yli menevä osuus tiivistyy sumuksi. Lämpötilan ollessa 10 °C ilmalla on jo kuivauskykyä 20 °C asteessa kuivaus on jo varsin tehokasta. (Järvenpää, Kivinen 1993, s. 4.)

2.2.4 Puun kosteuden määrittäminen

Puun kosteuden määrittämisen yksinkertaisin ja eniten käytetty menetelmä on ns. lämpökaappimenetelmä. Menetelmässä puun massa mitataan kosteana, minkä jälkeen näyte kuivataan lämpökaapissa. Kuivauksen jälkeen puu punnitaan uudelleen, jotta saadaan selville kuivamassa. Tällöin puun kosteussuhde saadaan kaavasta 4. (Kärkkäinen 2003, s. 178.)

$$\frac{(m_u - m_0)100}{m_u} = u, \quad (4)$$

missä

u = kosteussuhde, %

m_u = puun massa kosteana, g

m_o = puun massa absoluuttisen kuivana, g

Lämpökaappimenetelmällä puun kosteuden määrittämiseen tarvitaan vaaka, jossa on riittävä tarkkuus (usein 0,1g), sekä lämpökaappi joka voidaan säätää 105 ± 2 °C:n lämpötilaan. Kuivausaika on 12 - 24 tuntia, mutta jos näytteet ovat hyvin kosteita tai näytteitä on kaapissa paljon, kuivausaikaa tulee pidentää. (Laine, Sahrman 1985, s. 47.) Tällaisissa tapauksissa suositellaan näytteitä kuivattavan niin kauan, kunnes kahdessa peräkkäisessä punnituksessa saadaan näytteen kuivasta massasta sama tulos.

2.3 Puun kuivuminen

2.3.1 Yleistä

Ennen polttamista puu tulee kuivata, sillä tuoreen puun painosta jopa puolet voi olla vettä. Kuten luvussa 2.2.1 todettiin, märän puun poltossa osa lämpöenergiasta menee puun kosteuden höyrystämiseen, mikä laskee puun polttoarvoa. Puun palaminen kosteana on myös epätäydellistä ja aiheuttaa pienhiukkaspäästöjä savukaasujen mukana. Polttokuivan puun tavoitekosteus on noin 20 prosenttia. (TTS 2009, s. 1.)

Pilkkeiden nopealla kuivauksella ehkäistään myös erilaisten sienten aiheuttamia tuhoja eli värivikaa, hometta ja lahoa. Pilkkeen kosteuden ollessa alle 23 prosenttia sienten toiminta vaikeutuu, ja kosteuden ollessa alle 17 prosenttia niiden toiminta lakkaa kokonaan. Sienituhot alentavat puun laatua ja myyntiarvoa. Pilkkeiden ohjeellinen laatu-luokitus on nähtävissä liitteessä 1. Jotkin sienet tuottavat myös homemyrkyjä, jotka ovat haitallisia ihmisille. Oireina voivat olla esimerkiksi silmien ja hengitysteiden ärsytysoireet. Puun kuivaamisen tavoitteena voidaankin siis pitää polttovalmiin, varastoinnissa laatunsa säilyttävän pilkkeen valmistamista ja mahdollisten terveyshaittojen ehkäisemistä. (TTS 2009, s. 2.)

2.3.2 Vapaan veden poistuminen puusta

Puun soluseinämien välissä oleva vapaa vesi alkaa poistua puusta heti, kun tuore puu kaadetaan. Vapaa vesi poistuu puusta helposti siihen asti, kunnes saavutetaan niin sanottu *puunsyiden kyllästymispiste*. Tämän jälkeen kuivuminen hidastuu ja vaikeutuu. Puun syiden kyllästymispiste saavutetaan puulajista riippumatta noin 28 prosentin kosteudessa. Tällä puun kosteustilalla tarkoitetaan vaihetta, jossa kaikki vapaa vesi on poistunut puusta ja soluseinämissä oleva sidottu vesi alkaa poistua. (Alanen 1961, s. 47.) Vapaata vettä on myös mahdollista poistaa mekaanisesti esimerkiksi tyhjiön avulla. Käytännön syistä vettä tulee kuitenkin poistaa puusta huomattavasti enemmän ja nopeammin, kuin mekaanisin keinoin pystytään. Tällöin puhutaan puussa olevan veden haihduttamisesta kuivauksessa, jossa myös sidottu vesi poistuu puusta tehokkaasti. Puussa olevan veden haihduttamisessa on kaksi vaihetta: veden haihtuminen puun pinnalta ja veden siirtyminen puun sisäosista sen pinnalle. (Alanen 1961, s. 157.)

2.3.3 Veden haihtuminen puun pinnalta

Vesi muuttuu höyryksi joko haihtumalla tai kiehumalla. Haihtumista tapahtuu kaikissa lämpötiloissa, mutta haihtuminen on sitä nopeampaa, mitä korkeampi lämpötila on. Kiehumista puolestaan tapahtuu vain tietyssä lämpötilassa, joka taas riippuu vettä ympäröivästä paineesta, ollen alhaisempi paineen aletessa. Kun vesi höyrystyy, siirtyy syntynyt vesihöyry ympäröivään ilmaan ja poistuu sen mukana. Ilman kykyyn sitoa itseensä vesihöyryä on käsitelty luvussa 4.4. Keinokuivauksella pyritään siis tehostamaan kuivumista nostamalla kuivausilman lämpötilaa ja tehostamalla tuuletuksen avulla ilmanvaihtoa. (Alanen 1961, s. 157.)

2.3.4 Veden siirtyminen puun sisäosista sen pinnalle

Jotta puun sisäosien kosteus siirtyisi puun pinnalle, puun pinnan täytyy olla sen sisustaa kuivempaa. Kosteus siirtyy sisäosista kohti pintaa sitä nopeammin, mitä nopeammin vettä haihtuu puun pinnalta. Puun lämmittäminen myös helpottaa veden siirtymistä, sillä lämpötilan nousu alentaa veden viskositeettia. Etenkin paksussa sahatavaran kuivauksessa on myös otettava huomioon mahdollisten kuivausvikojen syntyminen, sillä liian voimakas pintahaihtuminen puun ollessa sisältä kostea voi aiheuttaa puuhun jännityksiä ja kieroutta. (Alanen 1961, s. 159.)

2.4 Kuivattavasta aineksesta poistuneen vesimäärän laskeminen

2.4.1 Poistuneen vesimäärän laskeminen kuivurin tuloilman lämpötilan, poistoilman lämpötilan ja ulkoilman suhteellisen kosteuden avulla

Kuivausta ja ilmakehän kosteuden muutoksia voidaan tarkastella ns. Mollier-piirroksen avulla. Kaaviosta voidaan katsoa kaikki tarpeellinen kuivauksen ymmärtämiseksi ja piirroksen tarkkuus on yleensä riittävä esimerkiksi kuivausaikojen ja kuivauslämpötilojen selvittäessä. (Järvenpää & Kivinen, s. 4.) Mollier-diagrammi saadaan piirrettyä seuraavana esitettävien kaavojen avulla. (Seppänen 1996, s. 188.)

2.4.2 Ilman absoluuttinen kosteus

Ilman sisältämä absoluuttinen vesimäärä x (g/m^3) saadaan kaavasta 5. (Seppänen 1996, s.188.)

$$X = \frac{m_h}{m_i}, \quad (5)$$

missä

m_h = tilavuudessa V olevan vesihöyryn massa, g/m^3

m_i = tilavuudessa V olevan kuivan ilman massa, g/m^3 .

Kaavalla 5 saadusta kosteudesta käytetään myös nimitystä ilman *absoluuttinen kosteus*, jotta se erotettaisiin ilman *suhteellisesta kosteudesta*.

2.4.3 Vesihöyryn paine

Jokaiselle lämpötilalle voidaan määrittää vesihöyryn maksimaalinen paine, jota kutsutaan vesihöyryn kyllästymispaineeksi. Kyllästymispaine kertoo, kuinka paljon ilma voi sitoa itseensä vesihöyryä tietyssä lämpötilassa. Koska kyllästymispaine muuttuu lämpötilan mukana, se johtaa siihen, että lämmin ilma pystyy sisältämään enemmän vesihöyryä kuin kylmä ilma. Taulukko ilman maksimaalisesta vedenpidätyskyvystä lämpötilan funktiona on esitetty liitteessä 2. Vesihöyryn kyllästymispaine P_{hs} saadaan kaavasta 6. (Seppänen 1996, s. 188.)

$$\rho_{hs} = \frac{\exp(77,345 + 0,0057T - \frac{7235}{T})}{T^{8,2}}, \quad (6)$$

missä

T = kostean ilman lämpötila, K.

2.4.4 Ilman suhteellinen kosteus

Ilman suhteellinen kosteus RH saadaan kaavasta 7, kun tiedetään vallitseva lämpötila ja sitä vastaava vesihöyryn kyllästymishöyrynpaine p_{hs} sekä vallitseva vesihöyryn osapaine p_h . (Seppänen 1996, s. 188.)

$$RH = \frac{p_h}{p_{hs}} \quad (7)$$

2.4.5 Ilman entalpia

Ilman entalpialla kuvataan sen sisältämää suhteellista lämpösisältöä. Ilman entalpia saadaan kaavasta 8 laskemalla kuivan ilman ja vesihöyryn entalpiat yhteen. (Seppänen 1996, s. 189.)

$$H = m_i h_i + m_h h_h, \quad (8)$$

missä

H = entalpia, kJ

h_i = kuivan ilman ominaisentalpia, kJ/kg

h_h = vesihöyryn ominaisentalpia, kJ/kg.

Useimmiten kostean ilman entalpiaa tarkastellaan kuivan ilman massayksikköä kohti. Tämä on esitetty kaavassa 9. (Seppänen 1996, s. 189.)

$$h = \frac{H}{m_i} \quad (9)$$

Yhdistämällä kaavat 8 ja 9 sekä ottamalla huomioon absoluuttisen kosteuden määrittelmä kaavasta 5 saadaan kaava 10. (Seppänen 1996, s. 189.)

$$h = h_i + xh_h \quad (10)$$

Ilman ominaisentalpia h_i saadaan kaavasta 11 ja vesihöyryyn ominaisentalpia h_h saadaan kaavasta 12. Kaavoissa 0-pisteeksi valitaan 0°C . (Seppänen 1996, s. 189.)

$$h_i = c_{pi}t = 1,006t, \text{kJ/kg}^\circ\text{C}, \quad (11)$$

missä

c_{pi} = ilman ominaislämpökapasiteetti, $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$.

$$h_h = I_{ho} + c_{ph}t = 2\,501 + 1,85t, \text{kJ/kg}^\circ\text{C}, \quad (12)$$

missä

c_{ph} = vesihöyryyn ominaislämpökapasiteetti $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$.

I_{ho} = veden ominaislatenttilämpö 0°C :ssa. Latenttilämpö kertoo aineen olomuodon muutokseen vaadittavaa energiaa. Yhden vesikilon höyrystämiseen tarvitaan 2 501 kJ energiaa.

Yhdistämällä kaavat 11 ja 12 entalpian laskentakaavaan 10 saadaan käyttökelpoinen laskentakaava 13. (Seppänen 1996, s. 189.)

$$h = 1,006t + x(2\,501 + 1,85t)\text{kJ/kg}, \quad (13)$$

missä

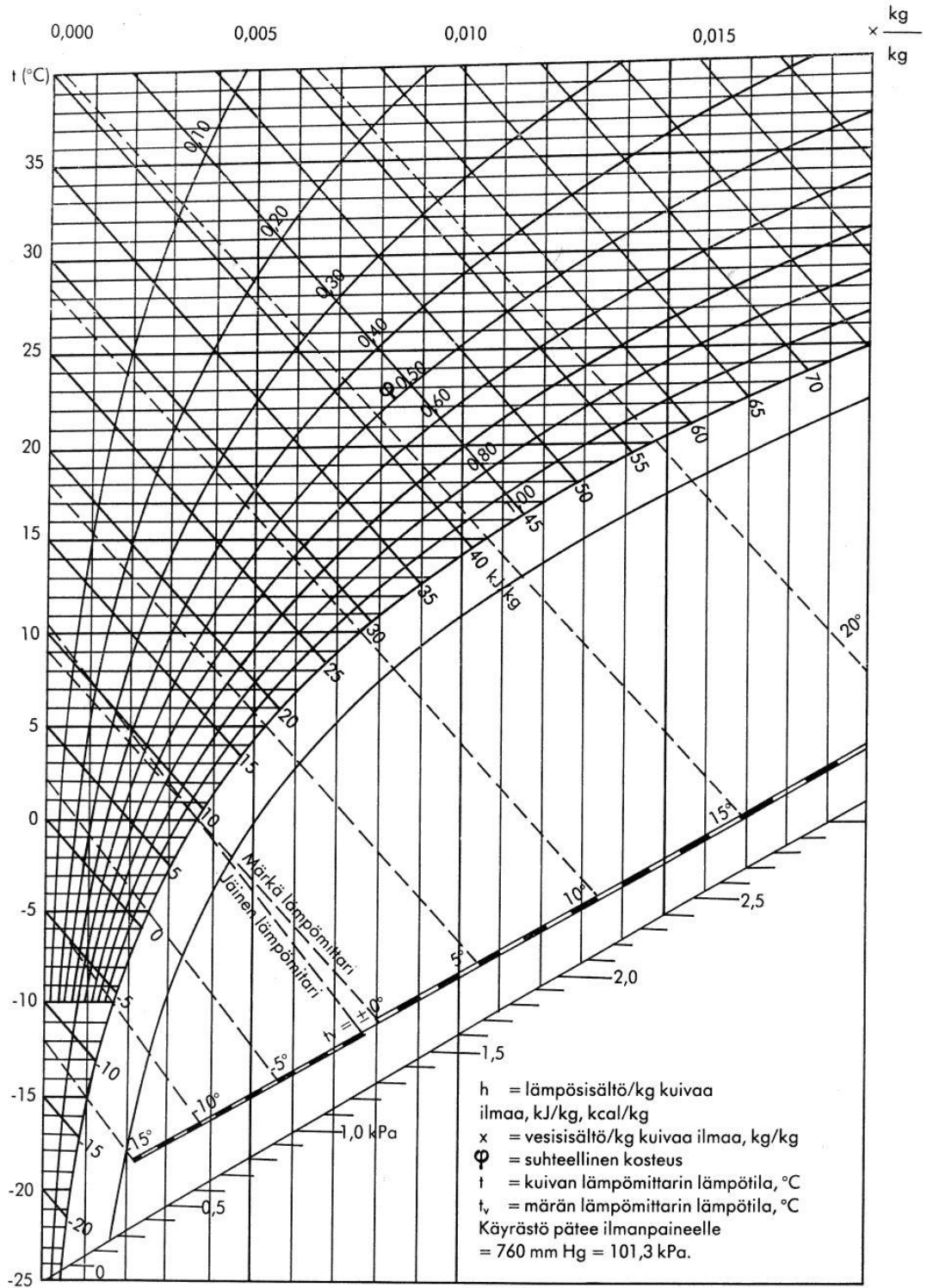
t = kostean ilman lämpötila, $^\circ\text{C}$

x = ilman kosteus, $\text{kg vettä/kg kuivaa ilmaa}$.

2.4.6 Mollier-diagrammi

Kuivausprosessin mitoittamista Mollier-diagrammin avulla ei tässä opinnäytetyössä yksityiskohtaisesti esitellä, mutta ohjeet ja selventävä esimerkki on esimerkiksi Työtehoseuran julkaisemasta Kylmäilmakuivausoppaassa (Järvenpää & Kivinen 1993). Mainittakoon kuitenkin, että Mollier-piirroksessa (kuva 3) on vinokulmaisessa koordinaatistossa esitetty ilman lämpötila, entalpia, absoluuttinen kosteus, suhteellinen kosteus, ilman märkälämpötila, tilamuutosasteikko $\Delta h/\Delta x$ (ei aina) sekä ilman tiheys (ei aina). Vakioentalpiasuorat sekä vakiokosteussuorat ovat yhdensuuntaiset, kun taas lämpötilasuorat sekä märkälämpötilasuorat eivät ole täysin yhdensuuntaisia. Kahden suureen avulla saadaan Mollier-piirroksesta muut ilman tilasuureet. (Seppänen 1996, s. 189.)

Kostean ilman Mollier-käyrästä



Kuva 3. Mollier-diagrammi

3 AINEISTO JA MENETELMÄT

3.1 Kuivausaumojen rakenteet

Ensimmäisen kuivausauman pituus oli 12,5 metriä, leveys 7,2 metriä ja auman laki-
korkeus 3,0 metriä. Päätyseinämä, jossa puhallin sijaitsi, rakennettiin puisista kuorma-
lavoista. Kuormalavoista rakennettiin myös ilmanottoaukko, jotta pilkkeiden päälle
levitettävän aumamuovin liepeet eivät estäisi ilman virtausta vapaasti auman sisälle.
Auman päälle levitettiin päätyjen rakentamisen jälkeen aumamuovi, jonka liepeet ti-
vistettiin pahvipaaleilla. Aumamuovilla peitettiin myös puhaltimen päätyseinämä, jo-
hon puhkaistiin puhaltimen torvelle reikä. Puhaltimen torvi teipattiin tiiviisti kiinni
muoviin ja päätyseinämän liepeet tiivistettiin kasaamalla päälle metsähaketta. Työssä
käytettiin miestyövoiman lisäksi trukkia kuormalavojen ja pahvipaalien siirtämiseen
sekä pyöräkonetta klapien kasaamiseen. (Kuva 4.)



Kuva 4. Ensimmäinen kuivausauma

Toisen kuivausauman pituus oli 14,0 metriä, leveys 7,2 metriä ja korkeus 2,5 metriä.
Ensimmäisestä kuivausaumasta saatujen kokemusten perusteella toisessa kuivausau-
massa käytettiin aumamuovin liepeiden tiivistämiseksi metsähaketta pahvipaalien si-
jaan. Metsähakkeella tiivistäminen oli helpompaa, ja sen huomattiin hyvin riittävän pi-
tämään muovin liepeet paikallaan. Lisäksi toisen auman pohjalle asfaltin ja pilkkeiden

väliin asennettiin aumamuovi. Tällä tarkkailtiin, johtuiko ensimmäisen koeauman pohjalle kertynyt vesi sateiden valumavesistä. (Kuva 5.)



Kuva 5. Toisen kuivausauman ilmanottopäät

3.2 Ilman virtauksen tuottaminen

Ilman virtaus tuotettiin aumaan puhaltimella, joka imi ilmaa auman läpi. Ensimmäisessä koeaumassa oli käytössä puhallin, jonka teho oli 5,5 kW. Toisessa kuivausau-
massa käytettiin puhallinta, jonka teho oli 4 kW. Imureiden käyttötunnit kirjattiin ylös,
ja taulukko kirjatuista käyttötunneista on nähtävissä työn liitteissä 6 ja 9. Kuvassa 6
näky toisen kuivausauman puhallin asennettuna.



Kuva 6. Toisen kuivausauman puhallin toiminnassa

3.3 Ilman virtausnopeuden mittaus

Virtaavan kuivausilman nopeus mitattiin ilman virtausnopeusmittarin avulla puhaltimen poistoilmakanavasta. Nopeus mitattiin työntämällä mittarin pitot-putki poistoilmakanavaan. Kanavan eri kohdista kirjattiin virtauslukemat ylös, joista laskettiin keskiarvo. Ilman nopeuden arvona käytettiin m/s. Auman läpi kulkevan ilman määrän mittaaminen on tärkeää veden poistumaa laskettaessa lämpötilojen avulla. Nopeuden avulla saadaan selville ilman määrä kuutioina, mutta siihen tarvitaan myös poistoilmakanavan poikkipinta-ala. Suorakulmion muotoisesta kanavasta pinta-ala A (m^2) saadaan selville kaavasta 14.

$$A = ab, \tag{14}$$

missä

a = kanavan leveys, m

b = kanavan korkeus, m

Ilman tilavuusvirta V (m^3) saadaan selville kaavasta 15.

$$V = A * v, \tag{15}$$

missä

v = ilman nopeus kanavassa, m/s.

Ensimmäisen kuivausauman puhaltimen poistoilmatorven mitat olivat 0,25 m x 0,25 m, ja ilman nopeuden keskiarvoksi mitattiin 12 m/s. Toisen auman puhaltimen mitat olivat 0,90 m x 0,90 m, ja ilman nopeudeksi mitattiin 9 m/s. Toisen puhaltimen poistoilmatorven lyhyys aiheutti ilmavirtaukseen huomattavaa turbulenssia, joka vaikeutti tarkan mittauksen suorittamista.

3.4 Poistuneen vesimäärän seuranta

Kuivauksen aikana aumasta poistunutta veden määrää mitattiin digitaalisella pikamittarilla (kuva 7). Laitteella mitattiin ilman suhteellinen kosteus sekä lämpötila auman sisään- ja ulostuloilmasta. Auman sisääntuloilma mitattiin auman ilmanottoaukon edestä ja ulostuloilma puhaltimen poistoilmasta. Saaduilla tiedoilla voitiin laskea aumasta poistuneen veden absoluuttinen määrä luvun 2.4 kaavojen avulla. Mittausfrekvenssi ja tarkat mittaustulokset ovat työn liitteissä 5 ja 8.



Kuva 7. Ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittausta digitaalisella mittarilla puhaltimen ulostuloilmasta

3.5 Kokeissa käytetty pilke

Kuivauksessa käytetty pilke oli valmistettu koivusta. Karsitut koivurangat oli hankittu Valkealan Hyötypaperi Oy:n lähialueiden metsänomistajilta. Aliurakoitsija valmisti pilkkeet rangoista pilkekoneilla Hyötypaperin alueella kevään ja kesän 2011 aikana. Valmiit pilkkeet varastoitiin väliaikaisesti katokseen, kunnes pilkkeitä oli riittävästi auman rakennusta varten. Välivarastosta pilkkeet siirrettiin pyöräkoneella aumaksi ja samalla pilkkeistä otettiin satunnainen otos kosteusnäytteitä. Kosteus määriteltiin punnitus–kuivausmenetelmällä.

3.6 Ulkoisten olosuhteiden seuranta

Kuivauskokeiden aikana vallinneita sääolosuhteita seurattiin Hyötypaperi Oy:n omasta sääasemasta.

3.7 Poistuneen vesimäärän selvitys punnitus-kuivausmenetelmällä

Kuivauskokeen jälkeen poistunut vesimäärä selvitettiin paikallisesti otettujen kosteusnäytteiden perusteella. Samalla haluttiin selvittää kuivumisen tasaisuutta auman eri kohdissa. Kosteusnäytteet suoritettiin samoin kuin kuivausta aloitettaessa.

Aineksen kuivuminen määritettiin punnitus-kuivausmenetelmällä. Kokonaisvaltaisen tuloksen saamiseksi klapien kostea massa saatiin punnitsemalla ne vaa'alla (kuva 8) sellaisinaan, jonka jälkeen ne laitettiin lämpökaappiin (kuva 9). Klapien massanmuutosta seurattiin välipunnituksilla. Kun kahden peräkkäisen punnituksen tulos oli sama, katsottiin klapien saavuttaneen kuivamassansa. Tästä saadun tuloksen jälkeen voitiin laskea näytteiden kosteus. (Seppänen 1996, s. 188.)



Kuva 8. Kokeissa käytetty vaaka



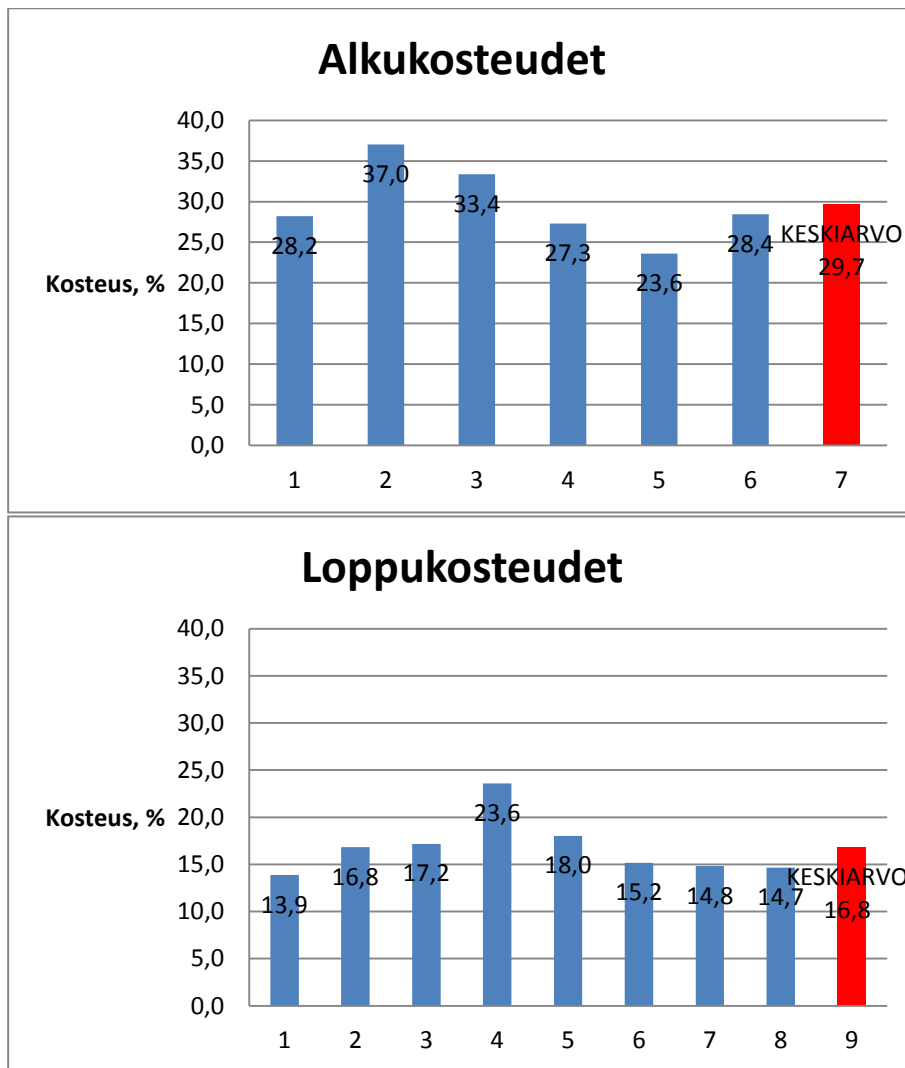
Kuva 9. Kuivauskokeessa käytetty lämpökaappi

4 TULOKSET

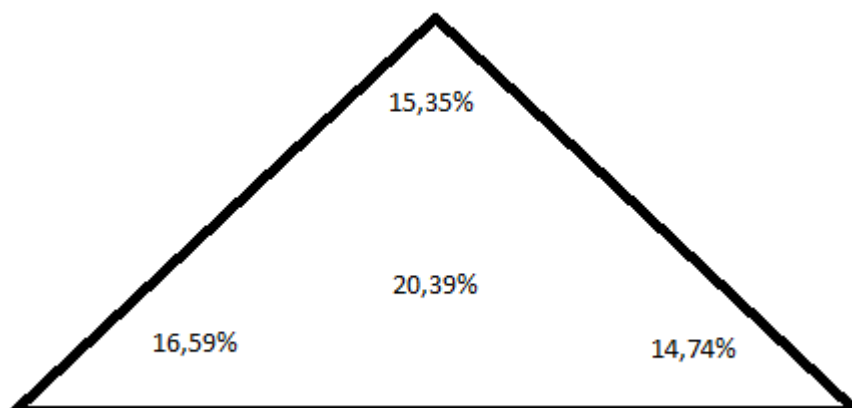
4.1 Ensimmäinen kuivauskoe 24.5. - 12.7.2011

4.1.1 Pilkkeiden alku- ja loppukosteudet sekä kuivumisen tasaisuus

Pilkkeiden alkukosteus määritettiin kuuden valitun klapin keskiarvon perusteella. Näytepilkkeiksi valikoitui silmämääräisesti tarkasteltuna paksuudeltaan ja kuorellisuudeltaan erilaisia klapeja, jotta keskiarvokosteudesta saatiin mahdollisimman kattava. Kuivauskokeen varsinainen tarkastelu katsottiin päättyneeksi kuukauden jälkeen kuivauksen aloittamisesta, jolloin aumaa päästiin purkamaan. Tällöin otettiin myös näytteet pilkkeiden lopullisista kosteuksista. Loppukosteudet on määritetty läpileikkauksena ilmanottopäästä katsottuna noin 4 metrin syvyydeltä aumasta, jotta kuivumisen tasaisuutta eri kohdista pystyttiin tarkastelemaan. Loppukosteuden määrittämistä varten näytteitä otettiin auman neljästä eri kohdasta: keskeltä, ylhäältä, ja kummaltakin reunalta kaksi kappaletta, eli loppukosteuden keskiarvo laskettiin yhteensä kahdeksasta näytteestä (Kuva 10). Kuivumisen tasaisuus auman eri kohdissa on nähtävissä kuvassa 11.



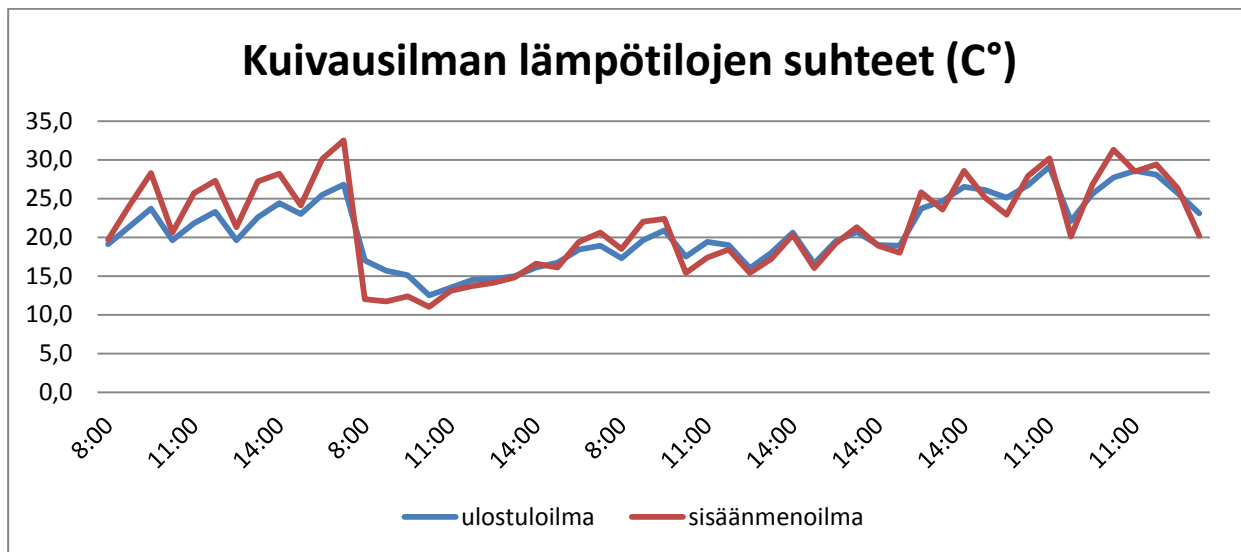
Kuva 10. Ensimmäisen auman pilkkeiden alku- ja loppukosteudet sekä niistä lasketut keskiarvot



Kuva 11. Kuivumisen tasaisuus auman eri kohdista kuivauskokeen päätyttyä. Kuva esittää läpileikkauksen aumasta 4 metrin syvyydeltä ilmanottopäädystä katsoen.

4.1.2 Lämpötilan muutos sisäänmeno- ja ulostuloilman välillä

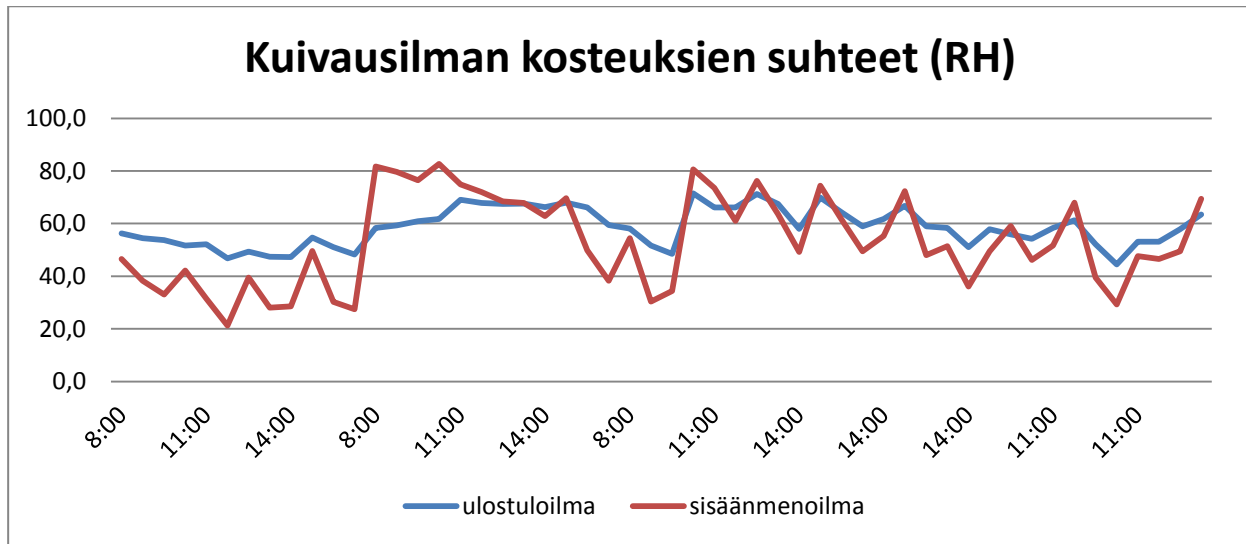
Kuvasta 12 nähdään, että kuivauskokeen alussa ulostuloilma on hieman viileämpää kuin sisäänmenevä ilma. Tästä voidaan päätellä, että aumassa on tapahtunut puun kuivumista, sillä kosteuden sitoutuminen ilmaan vaatii energiaa, jota se on ottanut kuivausilman sisältämästä lämpöenergiasta. Kuivauskokeen loppua kohden lämpötilojen ero kavenee. Tästä voidaan päätellä puiden saavuttaneen alhaisimman mahdollisen kosteuden, jota kyseisellä kuivausmenetelmällä kyetään saavuttamaan.



Kuva 12. Kuivausilman lämpötilojen erot sisäänmeno- ja ulostuloilman välillä kokeen aikana

4.1.3 Auman läpi kulkeneen ilman suhteellisten kosteuksien muutokset

Kuvasta 13 nähdään, että kuivausilma on sitonut itseensä kosteutta kokeen alussa tehokkaasti, kun taas loppua kohden ero sisään menevän ilman ja ulos tulevan ilman välillä on kaventunut. Kaaviossa nähtävät piikit, joissa sisäänmenoilman suhteellinen kosteus on suurempi verrattuna ulostulevaan ilmaan, selittynee sääolosuhteilla, nimittäin kuivauskokeen aikana esiintyi melko runsaasti sadepäiviä. Tällöin kuivaus ei ollut suotuisaa, vaan aumassa puut jopa kostuivat.

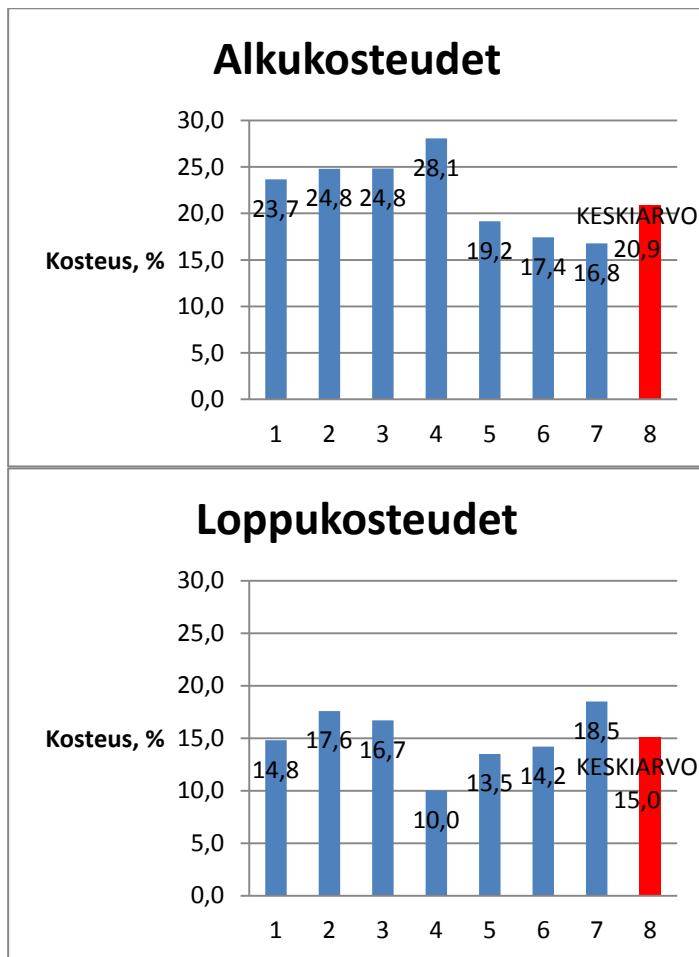


Kuva 13. Kuivausilman suhteellisen kosteuden erot sisäänmeno- ja ulostuloilman välillä kokeen aikana

4.2 Toinen kuivauskoe 11.7. - 28.7.2011

4.2.1 Pilkkeiden alku- ja loppukosteudet

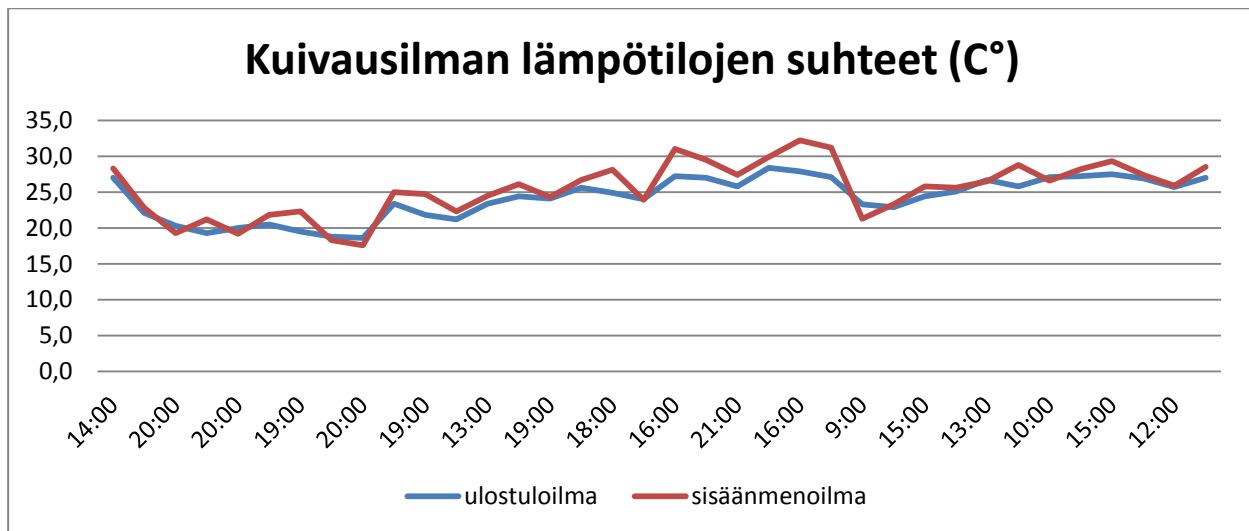
Pilkkeiden alku- ja loppukosteudet mitattiin samoin kuin ensimmäisessä kuivausau-massa. Kuivumisen tasaisuutta tässä aumassa ei työssä tarkastella, koska loppukosteudet mitattiin aumasta vasta sen purkuvaiheessa, ja tällöin kesätyöni Hyötypaperilla Oy:llä oli jo päättynyt.



Kuva 14. Toisen auman pilkkeiden alku- ja loppukosteudet sekä niistä lasketut keskiarvot

4.2.2 Lämpötilan muutos sisäänmeno- ja ulostuloilman välillä

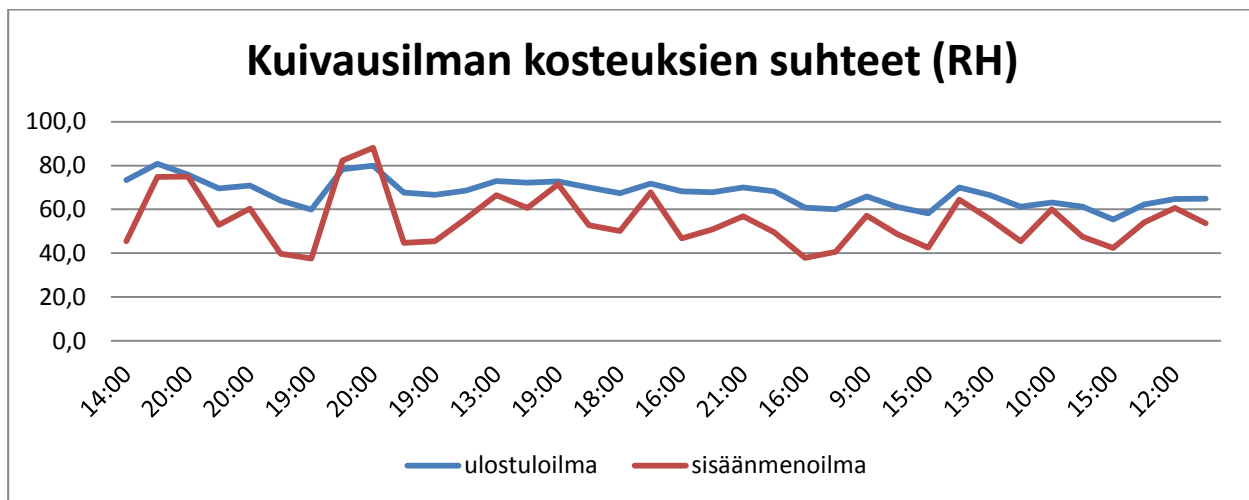
Kuvan 15 tiedot tukevat havaintoa puiden alhaisista alkukosteuksista, nimittäin kovin merkittäviä eroja kuivauslämpötiloissa ei ole. Puut ovat siis jo ennen kuivauskoetta olleet keskiarvoltaan lähes tavoitekuivia.



Kuva 15. Kuivausilman lämpötilojen erot sisäänmeno- ja ulostuloilman välillä kokeen aikana

4.2.3 Auman läpi kulkeneen ilman suhteellisten kosteuksien muutokset

Kuivausilman suhteellisten kosteuksien eroja kuvaava kaavio kuvassa 16 kertoo puiden kuivuneen lähes koko kokeen seurannan ajan, sillä ulostuloilma on yhtä piikkiä lukuunottamatta kosteampaa kuin sisään menevä ilma. Kyseinen piikki selittynee sadepäivinä.



Kuva 16. Kuivausilman suhteellisen kosteuden erot sisäänmeno- ja ulostuloilman välillä kokeen aikana

5 TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Ensimmäinen kuivauskoe 24.5. - 12.7.2011 ja sen onnistuminen

Kuivauskokeen jälkeen otettujen näytteiden perusteella pilkkeille saatiin 16,8 prosentin keskiarvokosteus. Tämä oli alle tavoitteeksi asetetun 20 prosentin kosteuden, joten kuivauskoe oli siltä osin onnistunut. Pilkkeiden loppukosteusdiagrammista on nähtävissä yksi näyte, joka on yli asetetun tavoitekosteuden. Näyte oli auman keskellä ja lähellä maata. Kyseinen näyte vääristää jonkin verran tuloksen keskiarvoa, koska aumassa aivan asfalttia vasten olleet pilkkeet olivat silmin nähden märkiä. Tämä saattoi johtua asfalttikentän kaadoista, joiden vuoksi sadevedet olivat päässeet valumaan auman liepeen alta sisään. Osasyynä saattoi olla myös puhaltimen riittämätön teho, sillä sään ollessa tuulinen, tuuli pääsi auman sisään nostattaen aumamuovin irti pilkkeistä ja tuulen laantuessa muovi asettui taas paikoilleen. Tästä syystä aumamuoviin syntyi reikiä kulmikkaita pilkkeitä vasten, ja sadevesi pääsi valumaan aumaan. Aumamuovin paikallaan pysymiseen vaikutti myös sen tiivistäminen liepeistään pahvipaaleilla, joilla muovia ei saatu tarpeeksi tiukasti pingotettua aumaa vasten.

Kuvassa 11, jossa on tarkasteltu kuivauksen tasaisuutta aumassa, huomataan pilkkeiden olevan kosteampia auman keskellä. Tämä selittyy kuivausilman pyrkimyksellä kulkea aumassa helpointa tietä, joten ilma on suurimmaksi osaksi kiertänyt auman ja aumamuovin välistä eli pilkekan sivilta, joissa ilmankulkua vastustava vastapaine on pienimmillään. Lisäksi kuivumisen tasaisuudessa on havaittavissa eroja auman vasemman ja oikean sivustan kosteuksissa. Tähän voi olla syynä pilkeaman rakentaminen itä-länsisuuntaiseksi; näin oikea sivusta sai vasempaa sivustaa enemmän aurin-
gonpaistetta. Aurinko lämmitti kuivausilmaa mustaa aumamuovia vasten auman sisäältä. Ilman ollessa lämpimämpää se pystyy sitomaan tehokkaammin pilkkeistä kosteutta itseensä, kuten luvussa 2.2.3 käsiteltiin. Kuivauskokeen jälkeen pilkkeissä ei havaittu minkäänlaisia home- tai värivikoja.

5.2 Toinen kuivauskoe 11.7. - 28.7.2011 ja sen onnistuminen

Kuivauksessa saavutettiin pilkkeille keskiarvokosteudeksi 15 prosentin kosteus, joka oli niin ikään alle asetetun 20 prosentin tavoitekosteuden. Huomioitavaa tosin on, että kesän 2011 helteillä pilkkeet ehtivät kuivua jo luonnollisesti ennen niiden siirtämistä aumaan. Niinpä pilkkeiden lähtökosteudet olivat jo keskiarvoltaan lähes tavoitekuivia.

Auman pohjalle levitettiin ikään kuin matoksi aumamuovi, jonka avulla pyrittiin tarkastelemaan, aiheutuiko ensimmäisen kuivausauman pohjalle kerääntynyt vesi sadevesien valumisesta. Pohjalle asetetun muovin liepeet käännettiin ylös maasta, eli valumavesien oletettiin kulkevan asfaltin ja muovin välissä päätyttyä auman sisään. Tämän ratkaisun toimivuudesta en saanut tietoa, koska auma purettiin vasta, kun olin jo lopettanut kesätyöni Hyötypaperi Oy:llä. En siis ollut purkuvaiheessa sitä tarkastelemassa, eikä tuloksesta minua myöskään informoitu. Aumamuovin liepeiden tiivistys tehtiin metsähakkeella, joka todettiin paremmaksi vaihtoehdoksi kuin hankalasti siirreltävät pahvipaalit. Metsähakkeella aumamuovi pystytettiin myös tehokkaammin pingottamaan pilkekasaa vasten, joten se ei päässyt tuulen vaikutuksesta liikkumaan ja rikkoutumaan. Muovin pysymistä paikallaan edesauttoi myös aumassa käytetty tehokkaampi puhallin, joka loi suuremman alipaineen auman sisälle pitäen muovin tiukemmin kiinni klapeissa.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Virhelähteet ja tulosten yleistettävyys

Pilkkeiden lähtökosteudet olivat melko alhaisia jo ennen kuivauskokeiden aloittamista, koska pilkkeet ehtivät halkomisen jälkeen kuivua kasoissa ennen aumaan siirtämistä. Siksi kuivausmenetelmän todellista tehokkuutta oli vaikea arvioida. Myöskin lopullisten kosteuksien selvittäminen oli ensimmäisessä kuivausaumassa haasteellista, koska auma toimi pilkkeille väliavarastona ennen kuin se voitiin lopullisesti purkaa. Aumaa purettiin vaiheittain, jolloin loppukosteusnäytteitä päästiin auman eri kohdista keräämään vasta sitä mukaa, kun pilkkeitä myytiin kuluttajille. Kosteusnäytteiden otanta ei myöskään voinut olla kovin kattava kuivauskaapin kapasiteetin rajallisuuden takia, sillä kaappia käytettiin aktiivisesti samaan aikaan myös muihin Hyötypaperi Oy:n kosteusmittauksiin. Auman sisälle mahdollisesti syntyneitä alipainetta verrattuna ympäröivään ilmanpaineeseen ei mitattu, koska mittausslaitetta siihen tarkoitukseen ei ollut. Olisi ollut myös mielenkiintoista seurata auman sisällä eri kohdissa vallinneita lämpötiloja, mutta siihenkään tarkoitukseen sopivia mittauslaitteita ei ollut käytettävissä.

6.2 Parannusehdotukset

Kuivauskokeiden havaintojen perusteella kuivausauma tulisi rakentaa etelä-pohjoissuuntaisesti, jotta auman sivustat saisivat tasaisesti aurinkoa ja niin muodoin kuivuminenkin olisi tasaisempaa. Tällöin lisäksi ilmanottoaukon edusta saisi enemmän suoraa auringonpaistetta, joka puolestaan varsinkin mustaa asfalttia vasten lämmittäisi aumaan virtaavaa kuivausilmaa. Ilman suhteellisten kosteuksien taulukoinnista on nähtävissä kuivausilman suhteellisessa kosteudessa kohta, jossa kuivumista ei tapahdu. Sisäänmenoilman suhteellisen kosteuden ollessa noin 70 prosenttia ja yli, huomataan ulostuloilman olevan yhtä kosteaa, joten edellä mainitussa pisteessä ja sen yläpuolella pilkkeet eivät kuivu, vaan jopa kostuvat. Tosin ilman suhteellisen kosteuden ollessa pitkään epäsuotuisa kuivaukselle puhallinta tulisi pitää toiminnassa koko ajan. Näin estettäisiin puun mahdollisten sieni- ja homeitiöiden kehittyminen sekä värivikojen syntyminen, jotka alentavat puun laatuluokitusta. Ajatukseni oli, että kuivauksen kannattavuutta voitaisiin ehkä nostaa ja samalla vapauttaa yhden työntekijän työpanos kuivausauman seurannasta ja puhaltimen käytöstä. Ratkaisuna voisi olla jonkinlaisen ilman suhteellista kosteutta mittaavan hygroskoopin liittäminen puhaltimeen. Mittari seuraisi ilman suhteellista kosteutta ja pitäisi puhallinta päällä sään ollessa suotuisa.

6.3 Loppupäätelmät

Pilkkeiden alipainekuivauksen tutkiminen aumassa oli erittäin mielenkiintoinen opinäytetyön aihe. Tosin kunnollisen tutkimussuunnitelman puuttuminen ennen kokeiden aloitusta teki kuivauksen tarkastelusta haastavan. Lisäksi monissa muissa käytännön järjestelyissä oli puutteita kattavan tutkimustuloksen saavuttamiseksi. Tästä syystä työn tarkastelu jäi melko käytännönläheiseksi. Työ tosin nostatti esiin monia mielenkiintoisia asioita, joihin myöhemmissä vastaavissa tutkimuksissa voi tarkemmin paneutua.

LÄHTEET

Alanen, J. 1961. Puualan aineoppi.

Gumse, S-I. 2003. Perinteinen polttopuu. Teoksessa Knuuttila Kirsi (toim.) Puuenergia.

Gumse, S-I. 2003. Pilketuotanto. Teoksessa Knuuttila Kirsi (toim.) Puuenergia.

Hakkila, P. 2003. Biomassan synty ja palaminen. Teoksessa Knuuttila Kirsi (toim.) Puuenergia.

Hellgren, M. Heikkinen, L. Suomalainen, L. Kala, J. 1999. Energia ja ympäristö. Kustantaja: Opetushallitus.

Hillebrand, K. Kouki, J. 2006. Pilkkeen kuivaus – luonnonkuivaus, keinokuivaus ja laadun hallinta. TSS. Työtehoseuran julkaisuja 398. Helsinki 2006.

Hyötypaperi Oy 2013. <http://www.hyotypaperi.fi/>. 14.3.2013.

Järvenpää, M. Kivinen, K. 1993. Kylmäilmakuivausopas. Työtehoseura. Pellervo-lehti.

Kärkkäinen, M. 2003. Puutieteen perusteet. Kustantaja: Kustannusosakeyhtiö Metsälehti.

Laine, R. Sahrman, K. 1985. Puupolttoaineiden ominaisuudet ja hinnoitteluperusteet. Valtion teknillinen tutkimuskeskus: Espoo. VTT:n tiedotteita 513.

Motiva 2013.

http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/uusiutuvan_energian_kaytto_suomessa. 20.2.2013.

Motti 2013. <http://www.motti.fi/index.php?osio=Polttopuut&sivu=Mittayksik%F6t>. 20.2.2013.

Pilketuotanto-opas 2013.

http://www.halkoliiteri.com/tiedostot/Tiedostot/109GNSpilketuotanto_opas_web.pdf.
8.8.2013.

Puuenergia 2003. Jyväskylän teknologiakeskus Oy. Knuuttila Kirsi (toim.)

Rukan pilkepiha 2013. <http://www.rukanpilkepiha.fi/laatuohje.htm>. 17.9.2013.

Sentre 2013, Kestävien energiaratkaisujen keskus:

<http://www.hermia.fi/@Bin/787598/Energia-arvonmaaritys.xls>. 3.6.2013.

Seppänen, O. 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto.

Siimes, H. 1983. Mekaanisen metsäteollisuuden energiatutkimus 1980 - 1982. Sahataran kuivauskäsikirja. Valtion teknillinen tutkimuskeskus: Espoo. VTT:n julkaisuja 243.

TTS - Työtehoseuran tutkimuksen tiedote, Luonnonvara-ala: metsä 5/2009 (731).

Taulukko pilkkeiden laatuluokituksesta

Puulaji: Erä luokitellaan pääasiallisen puulajin mukaan.
Pituudet ja pituustoleranssit:

	1. luokka	2. luokka	3. luokka
25 cm:n pilke:	25 ± 1 cm	25 ± 3 cm	25 ± 4 cm
33 cm:n pilke:	33 ± 2 cm	33 ± 4 cm	33 ± 6 cm
50 cm:n pilke:	50 ± 2 cm	50 ± 4 cm	50 ± 6 cm

Pilkkeen laatuluokitus

PILKKEIDEN	LAATULUOKKA		
	1. luokka	2. luokka	3. luokka
LAATUTUNNUS			
Puulaji *			
- Koivu	Ei muita puulajeja	Enintään 5 % muuta lehtipuuta	Enintään 10 % muuta lehtipuuta
- Lehtipuut	Ei havupuuta	Enintään 5 % havupuuta	Enintään 10 % havupuuta
- Havupuut	Lehtipuuta sallitaan rajoituksetta	Lehtipuuta sallitaan rajoituksetta	Lehtipuuta sallitaan rajoituksetta
Pituus	±2 cm (±1 cm**)	±4 cm (±3 cm**)	±6 cm (±4 cm**)
Paksuus halkaistuna	4 - 10 cm	4 -12 cm	4-15 cm
Kosteus	Enintään 20 %	Enintään 25 %	Enintään 30 %
Katkaisupinta	Tasainen ja suora	Päiden epätasaisuus sallitaan	Päiden epätasaisuus sallitaan
Vaillinaisesti halottujen/aisattujen osuus tilavuudesta	Enintään 5 % tilavuudesta	Enintään 15 % tilavuudesta	Enintään 25 % tilavuudesta
Puhtaus	Ei vieraita aineita	Ei vieraita aineita	Ei vieraita aineita
Home	Ei sallita	Yksittäisiä täpliä sallitaan	Pieniä esiintymiä sallitaan
Väri	Värivikaa ei sallita	Vähäinen värivika sallitaan	Värivikaa sallitaan
Laho	Ei sallita	Vain kovaa lahoa enintään 5 % tilavuudesta	Kovaa lahoa enintään 5 %, pehmeätä lahoa enintään 1 % tilavuudesta
* Ei koske sekapilkettä			
** 25 cm:n pituiselle pilkkeelle			

(Rukan pilkepiha 2013.)

Taulukko ilman maksimaalisesta vedenpidätyskyvystä lämpötilan funktiona

ilman lämpötila °C	höyry-pitoisuus g/m ³	höyrymäärä g/kg ilmaa	vesihöyryn kyllästymispaine P _k , mbar
-10	2,14	1,62	2,59
-9	2,32	1,77	2,83
-8	2,53	1,93	3,09
-7	2,75	2,11	3,38
-6	2,99	2,30	2,68
-5	3,24	2,50	4,01
-4	3,52	2,73	4,37
-3	3,81	2,97	4,75
-2	4,13	3,23	5,17
-1	4,47	3,52	5,62
0	4,84	3,83	6,11
1	5,19	4,11	6,57
2	5,56	4,42	7,05
3	5,94	4,75	7,58
4	6,36	5,10	8,13
5	6,79	5,47	8,72
6	7,26	5,87	9,35
7	7,74	6,29	10,01
8	8,26	6,74	10,72
9	8,81	7,22	11,47
10	9,39	7,73	12,27
11	10,00	8,27	13,12
12	10,65	8,84	14,02
13	11,33	9,45	14,97
14	12,06	10,10	15,97
15	12,82	10,78	17,04
16	13,62	11,51	18,17
17	14,46	12,58	19,36
18	15,35	13,10	20,63
19	16,29	13,97	21,96
20	17,27	14,88	23,37
21	18,31	15,85	24,86
22	19,40	16,88	26,42
23	20,55	17,97	28,08
24	21,75	19,12	29,82
25	23,01	20,34	31,66
26	24,34	21,63	33,60
27	25,73	22,99	35,64
28	27,19	24,42	37,79
29	28,72	25,94	40,04
30	30,32	27,55	42,42

(Siimes 1983, s.31.)

Kuivauskokeen 24.5. - 12.7.2011 pilkkeiden alkukosteudet

alkukosteudet 24.05.2011			
näyte	massa kosteana, g	massa kuivana, g	kosteus, %
1	610	438	28,20
2	551	347	37,02
3	1109	739	33,36
4	487	354	27,31
5	525	401	23,62
6	1143	818	28,43
		ka	29,66

Kuivauskokeen 24.5. - 12.7.2011 pilkkeiden väli- ja loppukosteudet

välimittaukset 14.06.2011 auman ilmanottopäädystä				
näyte	sijainti aumassa	massa kosteana, g	massa kuivana, g	kosteus, %
1	ylh.	452	386	14,60
2	kesk.	439	364	17,08
3	vas.	525	443	15,62
4	oik.	317	276	12,93
			ka	15,06
välimittaukset 21.06.2011 auman ilmanottopäädystä				
näyte	sijainti aumassa	massa kosteana, g	massa kuivana, g	kosteus, %
1	ylh.	421	354	15,91
2	kesk.	509	429	15,72
3	vas.	419	347	17,18
4	oik.	508	435	14,37
			ka	15,80
loppukosteudet 29.06.2011 auman sisältä n. 3-4m ilmanottopäädystä				
näyte	sijainti aumassa	massa kosteana, g	massa kuivana, g	kosteus, %
1	ylh.	483	416	13,87
2	ylh.	654	544	16,82
3	kesk.	786	651	17,18
4	kesk.	691	528	23,59
5	vas.	838	687	18,02
6	vas.	442	375	15,16
7	oik.	432	368	14,81
8	oik.	423	361	14,66
			ka	16,76
loppukosteudet 13.07.2011 auman sisältä n. 3-4m puhaltimesta				
näyte	sijainti aumassa	massa kosteana, g	massa kuivana, g	kosteus, %
1	ylh.	416	369	11,30
2	ylh.	415	370	10,84
3	kesk.	557	461	17,24
4	kesk.	791	655	17,19
5	vas.	518	420	18,92
6	vas.	446	363	18,61
7	oik.	509	426	16,31
8	oik.	793	702	11,48
			ka	15,24

pvm	klo	sisäänmenoilma			ulostuloilma		
		kosteus, %	lämpötila, °C	abs. kosteus, g/m ³	kosteus, %	lämpötila, °C	abs. kosteus, g/m ³
7.6.	8:00	46,6	19,7	7,94	56,3	19,1	9,26
	11:00	38,3	24,1	8,41	54,4	21,4	10,23
	14:00	33,1	28,3	9,18	53,7	23,7	11,53
8.6.	8:00	42,2	20,6	7,58	51,6	19,6	8,74
	11:00	31,5	25,7	7,57	52,2	21,8	10,05
	14:00	21,3	27,3	5,59	46,8	23,3	9,82
9.6.	8:00	39,5	21,3	7,39	49,4	19,6	8,37
	11:00	28,1	27,2	7,34	47,4	22,6	9,55
	14:00	28,5	28,2	7,86	47,3	24,4	10,56
10.6.	8:00	49,6	24,1	10,89	54,7	23,0	11,28
	11:00	30,3	30,1	9,27	51,0	25,5	12,12
	14:00	27,5	32,5	9,57	48,3	26,8	12,34
13.6.	8:00	81,7	12,0	8,74	58,3	17,0	8,46
	11:00	79,6	11,7	8,35	59,3	15,7	7,96
	14:00	76,5	12,4	8,39	60,9	15,1	7,88
14.6.	8:00	82,7	11,0	8,31	61,7	12,5	6,81
	11:00	74,9	13,1	8,58	69,0	13,5	8,10
	14:00	72,0	13,7	8,55	67,8	14,5	8,46
15.6.	8:00	68,5	14,1	8,34	67,5	14,6	8,47
	11:00	67,8	14,8	8,62	67,6	15,0	8,70
	14:00	62,8	16,6	8,90	66,3	16,1	9,12
16.6.	8:00	69,7	16,1	9,59	68,0	16,7	9,70
	11:00	49,8	19,4	8,34	66,1	18,4	10,43
	14:00	38,3	20,6	6,88	59,4	18,9	9,66
17.6.	8:00	54,5	18,5	8,65	58,1	17,3	8,59
	11:00	30,4	22,0	5,92	51,6	19,6	8,74
	14:00	34,4	22,4	6,86	48,5	20,9	8,86
20.6.	8:00	80,6	15,4	10,62	71,5	17,5	10,70
	11:00	73,5	17,4	10,93	66,1	19,4	11,07
	14:00	61,0	18,4	9,63	66,1	19,0	10,81
21.6.	8:00	76,2	15,4	10,04	71,2	16,0	9,73
	11:00	63,6	17,2	9,34	67,5	18,0	10,40
	14:00	49,2	20,3	8,68	58,0	20,6	10,42
22.6.	8:00	74,4	16,0	10,17	69,9	16,6	9,91
	11:00	61,6	19,2	10,19	64,3	19,5	10,83
	14:00	49,5	21,3	9,26	59,0	20,7	10,66
23.6.	14:00	55,3	18,9	8,99	61,7	19,0	10,09
27.6.	8:00	72,3	18,0	11,14	66,7	18,9	10,84
	14:00	48,0	25,8	11,60	59,0	23,7	12,66
28.6.	11:00	51,4	23,6	10,97	58,4	24,7	13,26
	14:00	36,1	28,6	10,18	51,1	26,5	12,84
29.6.	11:00	49,5	25,1	11,50	57,9	26,1	14,22
30.6.	11:00	59,1	22,9	12,12	55,9	25,1	12,99
	14:00	46,2	27,9	12,54	54,2	26,7	13,77
1.7.	11:00	51,7	30,2	15,91	58,4	29,1	16,93
5.7.	13:00	67,9	20,1	11,84	61,3	22,1	12,01
6.7.	13:00	39,5	26,8	10,09	52,2	25,6	12,47
7.7.	14:00	29,3	31,3	9,17	44,5	27,7	11,95
8.7.	11:00	47,7	28,5	13,38	53,1	28,6	14,98
	15:00	46,6	29,4	13,73	53,1	28,1	14,57
11.7.	14:00	49,5	26,3	12,30	57,8	25,7	13,89
12.7.	20:00	69,4	20,2	12,18	63,5	23,1	13,17

Kuivauskokeen 24.5. - 12.7.2011 puhaltimen käyntitunnit

Liite 6

pvm	puhallin käynnissä, klo	käyntitunnit, h
24.5.	14:00 - 24:00	10
25.5.	00:00 - 24:00	24
26.5.	00:00 - 24:00	24
27.5.	00:00 - 24:00	24
28.5.	00:00 - 24:00	24
29.5.	00:00 - 24:00	24
30.5.	00:00 - 24:00	24
31.5.	00:00 - 24:00	24
1.6.	00:00 - 24:00	24
2.6.	00:00 - 24:00	24
3.6.	00:00 - 24:00	24
4.6.	00:00 - 24:00	24
5.6.	00:00 - 24:00	24
6.6.	00:00 - 24:00	24
7.6.	00:00 - 24:00	24
8.6.	00:00 - 24:00	24
9.6.	00:00 - 24:00	24
10.6.	00:00 - 24:00	24
11.6.	00:00 - 24:00	24
12.6.	00:00 - 24:00	24
13.6.	00:00 - 24:00	24
14.6.	00:00 - 22:00	22
15.6.	07:00 - 24:00	17
16.6.	00:00 - 22:00	22
17.6.	07:00 - 24:00	17
18.6.	00:00 - 24:00	24
19.6.	00:00 - 24:00	24
20.6.	00:00 - 24:00	24
21.6.	00:00 - 24:00	24
22.6.	00:00 - 15:00	15
23.6.	11:00 - 24:00	13
24.6.	00:00 - 24:00	24
25.6.	00:00 - 24:00	24
26.6.	00:00 - 24:00	24
27.6.	00:00 - 08:00, 12:00 - 15:00	11
28.6.	09:00 - 15:00	6
29.6.	09:00 - 13:00	4
30.6.	09:00 - 15:00	6
1.7.	09:00 - 13:00	4
2.7.	ei päällä	0
3.7.	ei päällä	0
4.7.	ei päällä	0
5.7.	12:00 - 14:00	2
6.7.	12:00 - 15:00	3
7.7.	12:00 - 15:00	3
8.7.	10:00 - 24:00	12
9.7.	00:00 - 24:00	24
10.7.	00:00 - 24:00	24
11.7.	12:00 - 15:00	3
12.7.	19:00 - 21:00	2
	yht.	868

Kuivauskokeen 11.7. - 28.7.2011 pilkkeiden alku- ja loppukosteudet

alkukosteudet 07.07.2011			
näyte	massa kosteana, g	massa kuivana, g	kosteus, %
1	761	581	23,65
2	718	540	24,79
3	536	403	24,81
4	538	387	28,07
5	543	439	19,15
6	396	327	17,42
7	734	611	16,76
8	422	334	20,85
		ka	21,94
loppukosteudet 23.08.2011			
näyte	massa kosteana, g	massa kuivana, g	kosteus, %
1	-	-	14,8
2	-	-	17,6
3	-	-	16,7
4	-	-	10,0
5	-	-	13,5
6	-	-	14,2
7	-	-	18,5
		ka	15,0

Kuivauskokeen 11.7. - 28.7.2011 mittauspöytäkirja

pvm	klo	sisäänmenoilma			ulostuloilma		
		kosteus, %	lämpötila, °C	abs. kosteus, g/m ³	kosteus, %	lämpötila, °C	abs. kosteus, g/m ³
11.7.	14:00	45,4	28,3	12,60	73,3	27,0	18,93
12.7.	15:00	74,8	22,8	15,25	80,8	22,1	15,83
	20:00	74,9	19,3	12,47	75,8	20,3	13,40
13.7.	17:00	52,9	21,2	9,84	69,5	19,3	11,57
	20:00	60,4	19,2	9,99	70,8	20,0	12,28
14.7.	15:00	39,8	21,8	7,66	64,0	20,5	11,43
	19:00	37,5	22,3	7,43	59,9	19,5	10,09
15.7.	18:00	82,3	18,3	12,91	78,3	18,8	12,65
	20:00	88,1	17,6	13,26	80,0	18,6	12,78
18.7.	15:00	44,7	25,0	10,33	67,6	23,4	14,26
	19:00	45,5	24,7	10,33	66,6	21,8	12,82
	21:00	55,7	22,3	11,04	68,6	21,2	12,76
19.7.	13:00	66,5	24,5	14,93	72,9	23,4	15,38
	16:00	60,7	26,1	14,91	72,2	24,4	16,08
	19:00	71,4	24,3	15,85	72,8	24,1	15,98
20.7.	16:00	52,8	26,7	13,41	70,0	25,6	16,72
	18:00	50,1	28,1	13,75	67,3	24,9	15,46
	21:00	67,8	23,9	14,72	71,8	24,0	15,68
21.7.	16:00	46,7	31,0	15,00	68,2	27,2	17,81
	18:00	50,8	29,5	15,05	67,8	27,0	17,51
	21:00	56,8	27,4	15,00	70,0	25,8	16,91
22.7.	13:00	49,5	29,9	14,98	68,2	28,4	19,03
	16:00	37,8	32,2	12,94	60,8	27,9	16,50
	19:00	40,7	31,2	13,21	60,0	27,1	15,58
25.7.	9:00	57,2	21,3	10,70	65,9	23,3	13,83
	11:00	48,7	23,3	10,22	61,1	22,9	12,53
	15:00	42,5	25,8	10,27	58,2	24,4	13,00
26.7.	11:00	64,4	25,6	15,39	70,0	25,1	16,26
	13:00	55,5	26,5	13,94	66,5	26,7	16,89
	16:00	45,4	28,8	12,94	61,3	25,8	14,81
27.7.	10:00	60,1	26,6	15,18	63,2	27,1	16,41
	12:00	47,5	28,2	13,11	61,3	27,2	16,01
	15:00	42,4	29,3	12,42	55,4	27,5	14,71
28.7.	10:00	54,0	27,4	14,26	62,2	26,9	15,98
	12:00	60,6	25,9	14,72	64,7	25,7	15,54
	15:00	53,7	28,5	15,06	64,9	27,0	16,76

Kuivauskokeen 11.7. - 28.7.2011 puhaltimet käyntitunnit

pvm	puhallin käynnissä, klo	käyntitunnit, h
11.7.	14:00 - 24:00	10
12.7.	00:00 - 24:00	24
13.7.	00:00 - 24:00	24
14.7.	00:00 - 24:00	24
15.7.	00:00 - 12:00, 17:00 - 24:00	19
16.7.	00:00 - 24:00	24
17.7.	00:00 - 24:00	24
18.7.	00:00 - 24:00	24
19.7.	00:00 - 19:00	19
20.7.	15:00 - 22:00	7
21.7.	15:00 - 22:00	7
22.7.	12:00 - 20:00	8
23.7.	ei päällä	0
24.7.	ei päällä	0
25.7.	08:00 - 16:00	8
26.7.	10:00 - 16:00	6
27.7.	08:00 - 15:00	7
28.7.	09:00 - 16:00	7
	yht.	242