



Matti Norrkniivilä

BIOPOLTTOAINEIDEN KUIVAUSLAITTEISTO

BIOPOLTTOAINEIDEN KUIVAUSLAITTEISTO

Matti Norrkniivilä
Opinnäytetyö
5.5.2011
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

Koulutusohjelma	Opinnäytetyö	Sivuja	+	Liitteitä
Kone- ja tuotantotekniikan ko.	Insinööriyö	42	+	3
Suuntautumisvaihtoehto	Aika			
Energiatekniikka	2011			
Työn tilaaja	Työn tekijä			
OAMK/Luonnonvara-alan yksikkö	Matti Norrkniivilä			
Työn nimi				
Hakekuivuri				
Avainsanat				
kuivurit, hake, pelletti, kosteus				

Työssä suunniteltiin kuivuri pelletin raaka-aineiden kuivausta varten. Tavoitteena oli suunnitella liikuteltava keinokuivuri, joka soveltuu erilaisten raaka-aineiden kuivaukseen. Kuivurin suunnittelun lisäksi kuivurille laadittiin vastaanottokokeen mittaussuunnitelma.

Suunnittelussa hyödynnettiin Mekrijärven tutkimusasemalla olevaa hakekuivuria ja kuivurin käytöstä saatuja käyttökokemuksia. Tutkimusaseman kuivuri dokumentoitiin ja suoritettiin käyttäjähaastattelu. Tutkimusaseman kuivurista saatujen tietojen ja kirjallisuuden avulla suunniteltiin alustavasti käyttötarkoitukseen sopiva kuivuri. Suunnitelman perusteella hankittiin kuivurin rakentamiseen tarvittavat materiaalit ja laitteet. Kuivurille suunniteltiin vastaanottokoe, jonka avulla kuivurin toiminta voidaan todeta. Kuivurin ominaisuuksia ja kuivaustehoa ei voitu työssä todeta, koska suunniteltu laite rakennetaan myöhempänä ajankohtana.

Kuivurille myöhemmin suoritettavan vastaanottokokeen avulla voidaan selvittää kuivurin kuivausominaisuudet erityyppisillä materiaaleilla. Saatujen tietojen perusteella voidaan kuivuria edelleen kehittää ja tehdä tarvittaessa muutoksia kuivurin rakenteeseen tai laitteistoon. Vastaanottokokeen suunnittelussa pyrittiin siihen, että kokeista saatavilla tiedoilla pystytään jatkossa mahdollisesti laatimaan kuivurille käyttöön liittyviä ohjeistuksia sekä suunnittelemaan kuivurin huoltoa ja kunnossapitoa.

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO.....	6
2 PELLETTI.....	7
2.1 Valmistus	7
2.2 Raaka-aineet.....	9
3 HAKKEEN OMINAISUUKSIA.....	10
3.1 Kosteus ja kosteussuhde	10
3.2 Kosteuden vaikutus teholliseen lämpöarvoon	11
4 PUUN JA ILMAN OMINAISUUKSIA.....	13
4.1 Ilman vedensitomiskyky	13
4.2 Kuivuminen.....	15
4.3 Ilman kuivatuskyky.....	16
5 KEINOKUIVAUS	18
5.1 Kylmäilmakuivaus	18
5.2 Vastapaine.....	19
6 KOSTEUDEN MITTAAMINEN	20
6.1 Kaksivaiheiset menetelmät	20
6.1.1 Lämpökaappimenetelmä.....	20
6.1.2 Uuttamismenetelmä	21
6.1.3 K. Fischerin menetelmät	22
6.2 Yksivaiheiset menetelmät	22
6.2.1 Puun sähköisiin ominaisuuksiin perustuvat mittausmenetelmät	23
6.2.2 Muita menetelmiä	24
7 MEKRIJÄRVEN TUTKIMUSASEMAN HAKEKUIVURI.....	26
7.1 Rakenne.....	26
7.2 Laitteet	27
7.3 Käyttäjähastattelu.....	29
8 LUONNONVARA-ALA YKSIKÖN KUIVURI.....	31
8.1 Suunnittelun lähtökohdat	31
8.2 Tarvittavat laitteet	31

9 VALITUT MATERIAALIT JA LAITTEET.....	33
9.1 Materiaalit	33
9.2 Laitteet	34
10 KUIVAUSKOKEEN MITTAUSSUUNNITELMA.....	35
10.1 Kuivauskokeessa käytettävät menetelmät ja mitattavat suureet	35
10.2 Kokeen suorittaminen	36
10.3 Kuivauskokeen tavoite	38
11 YHTEENVETO	40
LÄHTEET.....	41
LIITTEET	
Liite 1. Mittauspöytäkirja	
Liite 2. Kuivurin rakennekuva	
Liite 3. Kuivurin pohjan runko	

1 JOHDANTO

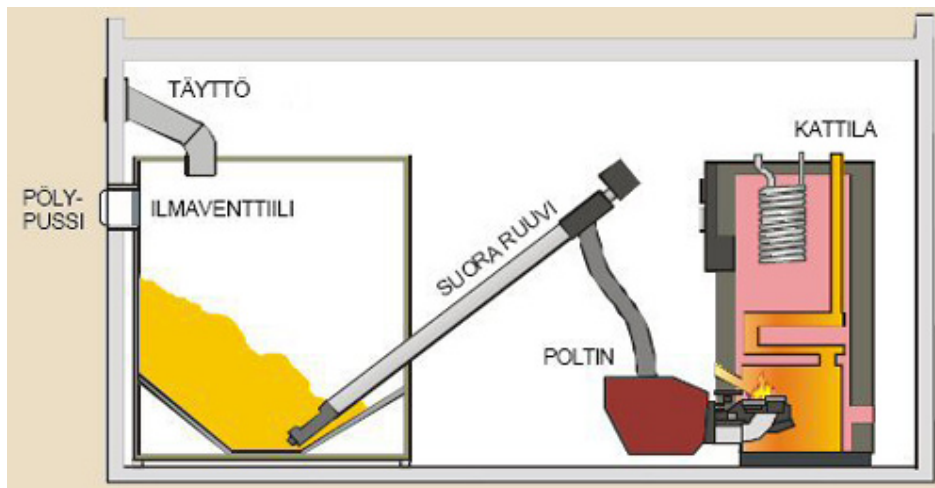
Oulun seudun ammattikorkeakoulun Luonnonvara-alan yksikössä käynnistyi vuonna 2010 projekti, jonka tarkoituksena oli tutkia erilaisten raaka-aineiden soveltuvuutta pelletöintiin. Tutkimusta varten tarvitaan kuivuri, jolla tutkittavat raaka-aineet voidaan kuivata pelletöinnin vaatimaan kosteuteen. Nykyään on olemassa paljon erityyppisiä keinokuivureita esimerkiksi viljan tai hakkeen kuivaamiseen. Keinokuivureita on käytetty vuosikymmeniä eritoten viljan kuivaukseen. Kuivurit ovat kuitenkin usein kiinteitä varastokuivureita. Tutkimusta varten suunniteltava kuivuri kuitenkin tulee olemaan siirrettävä.

Työssä käsitellään kuivumisen teoriaa ja kuivumiseen vaikuttavia tekijöitä. Ratkaisevana tekijänä suunnittelussa tulee olemaan kuivurin liikuteltavuus. Tämä asettaa kuivurin koolle ja erityisesti kuivurin painolle rajoitteita. On myös otettava huomioon kuivurin käyttöolosuhteet, jotka ovat riippuvat vallitsevista olosuhteista. Suunnittelussa tullaan hyödyntämään Mekrijärven tutkimusaseman kuivuria ja ennen kaikkea sen käyttäjiltä saatuja käyttökokemuksia. Käyttökokemuksia ja kirjallisuutta hyödyntämällä pyritään suunnittelussa välttämään Mekrijärvellä havaitut ongelmat.

Kuivurin suunnittelun ja dokumentoinnin lisäksi työssä esitellään mittaussuunnitelma, jolla kuivurin toimivuus voidaan todeta. Kuivurilla myöhemmin tehtävillä koekuivauksilla pyritään selvittämään kuivurin kuivausominaisuudet eri raaka-ainemateriaaleilla. Koekuivauksissa saatavien tietojen ja mahdollisesti havaittujen ongelmien avulla kuivuriin voidaan tehdä tarvittavia muutoksia.

2 PELLETTI

Pelletti on jalostettua biopolttoainetta. Pellettiä käytetään lämmitykseen erityisesti pientaloissa ja maataloilla. Yleisin omakotitalojen pellettilämmitysjärjestelmä on vesikeskuslämmitys (kuva 1). Yleensä pellettien raaka-aineena käytetään puuta, joten pellettien poltto ei lisää laskennallisesti ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Pellettien kosteuspitoisuus on 8 - 10 %. Pellettien tuhkapitoisuus on yleensä alle 0,5 %. Pelletin lämpöarvo on noin 5 kWh/kg. (Yleistä pelletistä. 2011.)



KUVA 1. Pellettilämmitysjärjestelmä (Yleistä pelletistä. 2011)

2.1 Valmistus

Ennen tuotannon aloittamista on raaka-aineesta poistettava tuotantoa haittaavat epäpuhtaudet, kuten metalli, kivet ja muovi. Valmistuksessa käytettävän raaka-aineen optimikosteus on noin 10 – 15 %. Mikäli raaka-aine on kosteampaa, on se kuivattava ennen pelletöintiä. Yleensä kuivaaminen tapahtuu joko kokonaan tai osittain ennen jauhamista. Kuivaaminen voi tapahtua osin myös jauhamisen yhteydessä, jolloin raaka-aineen läpi syötetään kuumaakaasua. Raaka-aineen ollessa valmiiksi kuivaa se syötetään suoraan vasaramyllyyn jauhamista varten. Myllyssä kaikki raaka-aine jauhetaan tasalaatuisiksi puristusta varten. Jauhamisessa syntyvä pöly voidaan ottaa syklonien

avulla talteen. Myllystä tullut tasalaatuinen raaka-aine syötetään kuljettimilla puristusvaiheeseen. (Pelletin tuotanto. 2011.)

Puristusvaiheessa raaka-aine syötetään pelletöintikoneeseen sekoitussäiliöön. Koneet eroavat toisistaan matriisityypeiltään ja puristusmekanismeiltaan. Matriisityypit ovat rengas- ja tasomatriisi. Sekoitussäiliössä on raaka-aineeseen mahdollista lisätä sideaineita tai lisäämällä höyryä parantaa puristustapahtumaa. Höyryllä ja sideaineilla voidaan myös pienentää energiankulutusta ja parantaa laitteiden käytettävyyttä ja kestävyyttä. Sideaineiden osuus on noin yksi prosentti painosta. Sekoitussäiliön jälkeen puristettava materiaali pakotetaan puristusrullilla matriisin reikien läpi. Tällöin materiaalin lämpö nousee ja sen luonnolliset hartsit ja sideaineet, kuten ligniini, pehmenevät hetkellisesti. Yhteen sitovina voimina pelleteissä ovat sisäpintojen koheesio, partikkelin kuitumaiset osat ja erityisesti sideaineen adheesio. Ligniini muodostaa jäähtyessään pelletin pintaan koossa pitävän kerroksen ja toimii luonnollisena liima-aineena. (Pelletin tuotanto. 2011.)

Leikkuuterät katkaisevat puristeet sopivan mittaisiksi. Normaalisti pituus on 10 - 30 mm. Matriisien ominaisuudet vaikuttavat oleellisesti puristusvaiheessa syntyvän lämmön määrään. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi kitkaominaisuudet reikien pituus sekä halkaisija. Puristustapahtuman onnistumiseen vaikuttavat matriisin pinnalle muodostuvan raaka-ainematon sekä matriisin reikään tiivistyvän materiaalikerroksen paksuus, matriisin ja rullien materiaalit ja ominaisuudet sekä laitteiston muut ominaisuudet kuten puristuskyky ja rullien pyörimisnopeus. (Pelletin tuotanto. 2011.)

Raaka-aineiden ominaisuudet ovat erilaisia, joten pelletöinnin haasteena on oikean matriisityypin ja materiaalin löytäminen. Matriisin valinta onkin usein kokeilua ja tapahtuu tapauskohtaisesti. Puristuksen jälkeen välmiit pelletit on vielä jäähdytettävä, jolloin ne saavuttavat lopullisen lujuutensa. Jäähdytyksen jälkeen pelletit yleensä seulotaan, jolloin raakapuru ja hienoaines saadaan erotettua ja ohjattua uudelleen prosessiin. (Pelletin tuotanto. 2011.)

2.2 Raaka-aineet

Raaka-aineina puupellettien tuotannossa käytetään mekaanisen puujalostusteollisuuden puhtaita puusivutuotteita. Raaka-aineina ovat pääasiassa havupuiden kuiva kutteri, sahanpuru tai hiontapöly. Tulevaisuudessa myös metsähaketta käytetään raaka-aineena nykyistä laajemmin. Valmistuksessa voidaan käyttää puiden omien sidosaineiden lisäksi myös muita luonnonsidosaineita pellettien käsittelykestävyyden parantamiseksi. Tällaisia ovat esimerkiksi maissi- ja perunatärkkelys. Pellettiä on valmistettu lähinnä tutkimusmielessä myös muista biomassoista, kuten ruokohelpistä, oljesta, puunkuoresta sekä edellä mainittujen erilaisista sekoituksista ja turpeesta. (Pelletin raaka-aine. 2010.)

Peltobiomassat ovat pelloilla tai soilla kasvatettavia energiakasveja tai energiametsää sekä viljakasvin osia. Tällaisia ovat esimerkiksi ruokohelppi, erilaiset öljykasvit, energiapaju ja olki. Niitä voidaan käyttää sellaisenaan tai jalostaa kiinteiksi tai nestemäisiksi polttoaineiksi. (Bioenergia Suomessa. 2010.)

Hake on puubiomassaa, joka on hakettu mekaanisesti terävillä työkaluilla tietynkokoisiksi palasiksi. Hakkeen käyttö pellettien raaka-aineena on kasvamassa. Metsähake on yleisnimitys suoraan metsästä energiakäyttöön tuleville hakkeille. Metsähaketta voidaan tehdä karsimattomasta kokopuusta, karsituista rangoista, raivauspuusta ja hakkuutähteistä, kuten latvuksista, oksista ja nykyään myös kannoista. Hakkeen palakoko on pääosin 5 – 30 mm. (Energiapuu. 2010.)

Metsähaketta käytetään teollisuuden lämpö- ja voimalaitoksilla, lämpölaitoksilla sekä rakennusten lämpökattiloissa. Metsähakkeen tärkeimmät laatutekniset ominaisuudet ovat kosteus, tehollinen lämpöarvo, irtokuutiometrin kuivamassa eli tiheys ja palakokojakauma. Kosteus on näistä selvästi tärkein. (Puhakka – Alakangas – Alanen – Airaksinen – Soini – Siponen – Kainulainen 2001, 5.)

3 HAKKEEN OMINAISUUKSIA

Hakkeen tärkein laatuominaisuus on kosteus. Kosteuden haihduttaminen puusta on energiaa kuluttava prosessi, jolloin tuottavuus etenkin energiantuotannossa heikkenee. Lämpöarvolla tarkoitetaan täydellisessä palamisessa vapautuvaa lämpö määrää massayksikköä kohti. Yksikkönä käytetään tavallisesti kiinteiden ja nestemäisten polttoaineiden osalta megajoulea polttoainekiloa kohti. Tehollinen lämpö määrä kertoo massayksikköä kohti vapautuvan lämpö määrän, kun polttoainetta poltetaan ja polttoaineen sisältämästä vedystä muodostuva vesi ja polttoaineen sisältämä vesi höyrystyvät. Tehollisen lämpöarvon ja kosteuden riippuvuus on suoraviivainen eli kosteuden kasvaessa lämpöarvo laskee. (Puhakka ym. 2001, 5 - 6.)

3.1 Kosteus ja kosteussuhde

Hakkeen kosteudella ymmärretään yleensä märkätainosta laskettua vesipitoisuutta w , joka lasketaan kaavasta 1. (Linna - Järvinen. 1983, 2.)

$$w = \frac{m_{\text{vesi}}}{m_{\text{kuiva}} + m_{\text{vesi}}} \cdot 100 \% \quad \text{KAAVA 1}$$

w = vesipitoisuus [%]

m_{vesi} = märkätaino [kg]

m_{kuiva} = kuivapaino [kg]

Kosteussuhteella u tarkoitetaan hakkeen sisältämän vesimassan suhdetta kuiva-ainemassaan. Se saadaan kaavasta 2. (Linna ym. 1983, 2.)

$$u = \frac{m_{\text{vesi}}}{m_{\text{kuiva}}} \quad \text{KAAVA 2}$$

u = vesimassan suhde kuiva-ainemassaan

Kosteudesta saadaan kosteussuhde kaavalla 3. (Linna ym. 1983, 2.)

$$u = \frac{w}{100 - w} \cdot 100 \% \quad \text{KAAVA 3}$$

Hakkeen kuivuessa alkukosteudesta w_i loppukosteuteen w_f saadaan irtokuutiosta poistuva vesimäärä kaavasta 4. (Linna ym. 1983, 4.)

$$\Delta m_{\text{vesi}} = \frac{100 \cdot (w_i - w_f)}{(100 - w_i) \cdot (100 - w_f)} \cdot \rho_{ka} \quad \text{KAAVA 4}$$

ρ_{ka} = hakkeen kuivairtoteiheys

w_i = alkukosteus

w_f = loppukosteus

3.2 Kosteuden vaikutus teholliseen lämpöarvoon

Tehollinen lämpöarvo riippuu puulajista ja käyttökosteudesta. Käyttökosteudesta riippuva tehollinen lämpöarvo lasketaan kaavasta 5. (Linna ym. 1983, 2.)

$$Q_w = \frac{100 - w}{100} \cdot Q_d - 0,02441 \cdot w \quad \text{KAAVA 5}$$

Q_w = tehollinen lämpöarvo[MJ/kg]

Q_d = lämpöarvo[MJ/kg]

Eri puulajien teholliset lämpöarvot saadaan Wahlroosin (1979) mukaan seuraavista kaavoista. (Linna ym. 1983, 2 - 3.)

$$\text{Koivu } Q_w = 18,9 - 0,213 \cdot w \quad \text{KAAVA 6}$$

$$\text{Mänty } Q_w = 19,3 - 0,218 \cdot w \quad \text{KAAVA 7}$$

$$\text{Kuusi } Q_w = 19,0 - 0,214 \cdot w$$

KAAVA 8

Riittävän tarkka hakkeen tehollinen lämpöarvo saadaan yleisesti kaavasta 9. (Linna ym. 1983, 3.)

$$Q_w = 19,0 - 0,215 \cdot w$$

KAAVA 9

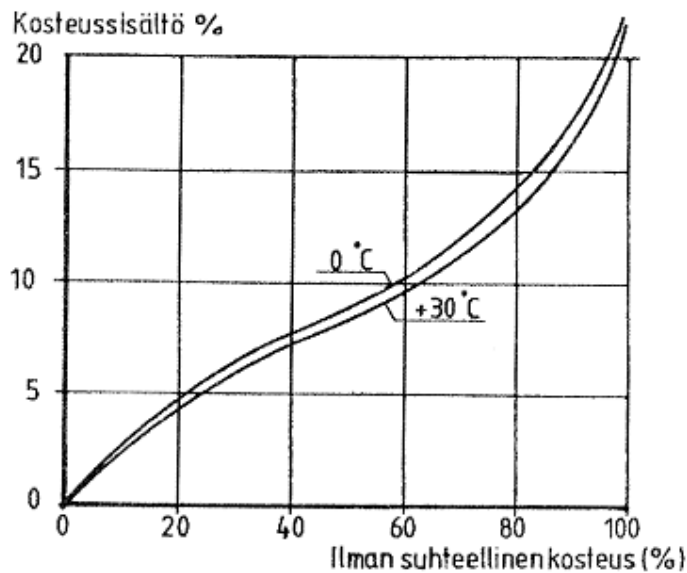
Hakkeen tehollinen lämpöarvo kuiva-ainekiloa kohti lasketaan kaavasta 10. (Linna ym. 1983, 3.)

$$Q_{w,d} = 19,0 - 2,441 \cdot \frac{w}{100 - w}$$

KAAVA 10

4 PUUN JA ILMAN OMINAISUUKSIA

Kun puu hygroskooppisena aineena joutuu kosketuksiin ilman kanssa, se pyrkii tasapainotilaan. Puu sitoo tai luovuttaa kosteutta kunnes se saavuttaa tasapainotilan. Puu luovuttaa vettä vesihöyrynä ilmaan, kun sen sitoman veden vesihöyryn osapaine on suurempi kuin ympäröivän ilman. Veden siirtymistä tapahtuu molempiin suuntiin kunnes osapaine erot tasoittuvat. Kyseinen ilmiö voidaan kuvata kosteustasapainokäyrällä (kuva 2). Vallitseva lämpötila vaikuttaa aina kosteustasapainokäyrään. (Kares – Linna 1983, 20.)

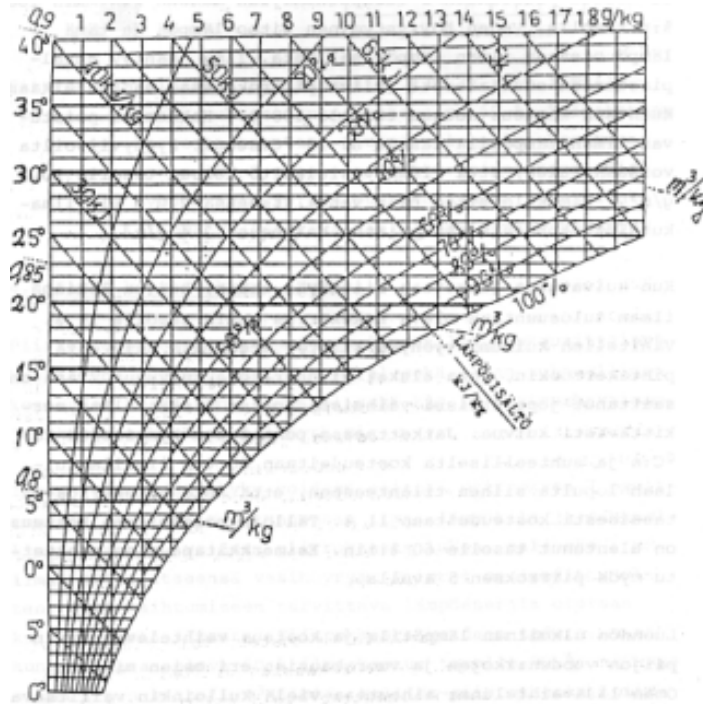


KUVA 2. Puun kosteuden ja ilman suhteellisen kosteuden välinen tasapainokäyrä lämpötilan ollessa 0 °C ja 30 °C (Kares ym. 1983, 20)

4.1 Ilman vedensitomiskyky

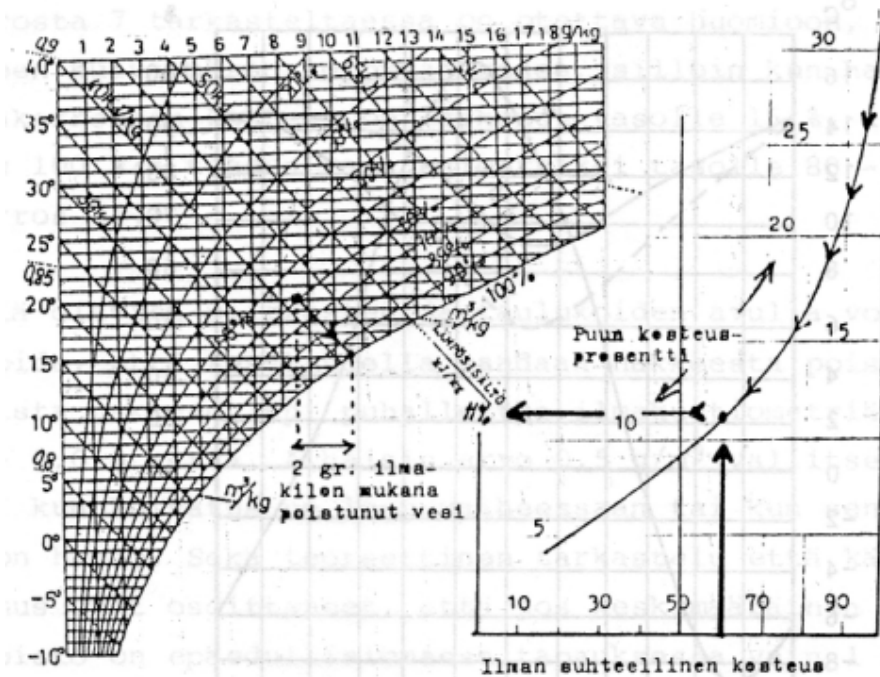
Ilman vedensitomiskykyä kuvaa kostean ilman diagrammi, ns. Mollier-piirros (kuva 3). Piirroksessa pystyviivat osoittavat ilman vesisisältöä, g/kg ja vaakaviivat ilman lämpötilaa, °C. Vinot viivat osoittavat ilman entalpiaa, lämpösisältöä, kJ/kg verrattuna 0 °C:ssa olevaan kuivaan ilmaan. Oikealle ylös kaartuvat käyrät osoittavat ilman

suhteellista kosteusprosenttia. Lisäksi kuvasta ilmenee, kuinka suuren tilavuuden 1 kg ilmaa ottaa normaalipaineessa kuutiometreinä. (Kares ym.1983, 21 - 22.)



KUVA 3. Kostean ilman diagrammi (Kares ym. 1983, 21)

Tarkastellaan kuvia 3 ja 4, tilanteessa jossa puhalletaan ilmaa, jonka suhteellinen kosteus on 60 % ja lämpötila 20 °C, hakekerroksen läpi, jonka kosteus 40 %. Puhallusilmassa on vettä 8,5 g/kg, ja kuvan 2 tasapainokäyrän mukaan se kostuu lähes 100 %:n tasolle. Höyrystyessään vesi sitoo lämpöä, joka saadaan ilman lämpösisällöstä. Kun Ilmankosteus nousee 100 % tasolle, samaan aikaan ilma jäähtyy kuvassa 3 olevien entalpiasuorien suuntaisesti. Tällöin hakkeesta poistuvan ilman lämpötila laskee noin 15 °C:seen. Ilman vesisisältö nousee tasolle 10,5 g/kg, joka voidaan lukea kuvan 3 pystyviivoilta. Voidaan todeta, että kyseisessä tilanteessa yksi ilmakilo sitoo vettä itseensä 2,0 g. Ilmakuutiota kohden vettä poistuu hakkeesta vastaavasti 2,4 g/m³. Esimerkki tilanne on esitetty kuvassa 4. (Kares ym. 1983, 22.)



KUVA 4. Esimerkki tapahtumista, kun ilmalla, jonka suhteellinen kosteus on 60 % ja lämpötila 20 °C, kuivatetaan kosteaa haketta (Kares ym.1983, 23)

Kuivatusta jatkettaessa, ilman tulosuunnasta lähin hakekerros kuivuu ensin tasolle 11 %. Kuivatuksen jatkuessa kuivumisvyöhyke siirtyy vähitellen kohti pintaa, jolloin myös pintakerros alkaa merkittävästi kuivua. Kuivatuksen alkuvaiheessa pintakerros ei merkittävästi kuivu, vaan saattaa jopa kostua lisää. Kun puhallusta jatketaan tarpeeksi kauan kyseisissä olosuhteissa, kuivuu koko hakekerros tasaisesti 11 % kosteuteen. Poistuvan ilman suhteellinen kosteus palaa 60 %:n tasoon. (Kares ym. 1983, 22.)

4.2 Kuivuminen

Kuivumisella tarkoitetaan veden poistumista kiinteästä ainesosasta. Puussa on periaatteessa kolmenlaista kosteutta. Puun pinnalla, rakosissa ja johtojänteiden välissä oleva kapilaarinen vesi on helpoiten poistettavissa. Tämän fysikaalis-mekaanisesti sitoutuneen veden haihduttamiseen tarvittava energiamäärä on likimain sama kuin

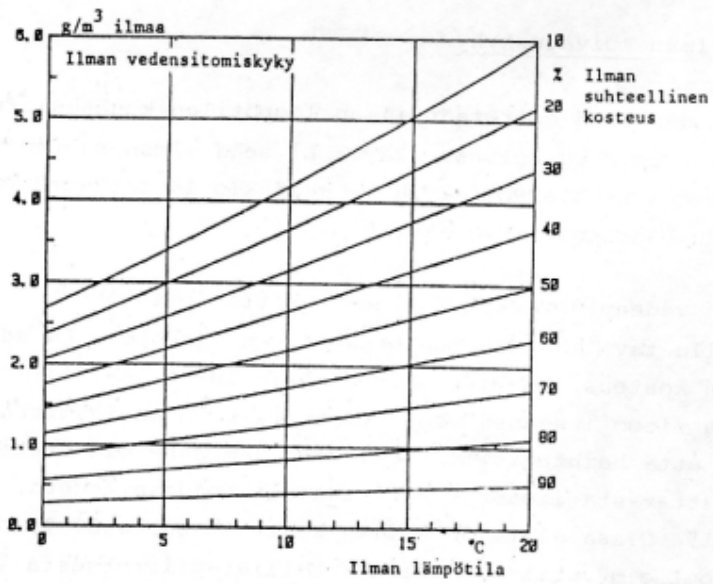
veden höyrystämiseen vapaasta pinnasta tarvittava energiamäärä, noin 2500 kJ/kg H_2O . (Kares ym. 1983, 19.)

Puuhun fysikaalis-kemiallisesti sitoutunut paisuntavesi on vaikeammin poistettavaa kosteutta. Paisuntavettä poistettaessa joudutaan muuttamaan tilavuutta, jolloin tarvitaan enemmän energiaa verrattuna fysikaalis-mekaanisesti sitoutuneen veden haihduttamiseen. Tarvittava energia on noin 1,5-kertainen vapaan veden haihduttamiseen eli noin 3 700 kJ/kg H_2O . Otettaessa huomioon eräiden mittahavaintojen säännönmukainen poikkeaminen vapaan veden haihtumiskäyttäytymisestä sekä kuivumisessa tapahtuva puun kutistuminen, havaitaan, että fysikaalis-kemiallisesti sitoutunutta vettä poistuu kuivattavasta materiaalista jo 20 - 25 % kosteustasolla. (Kares ym. 1983, 19.)

Kemiallisesti sitoutunut hydraatti- ja kidevesi on vaikeimmin poistettavissa. Sen poistamiseen ei riitä edes puun lämmittäminen veden kiehumispisteeseen. Kemiallisesti sitoutuneella vedellä ei ole merkitystä normaalissa kuivatuksessa. Puun kuiva-ainemäärää eli kosteutta määritettäessä kylläkin. (Kares ym. 1983, 19.)

4.3 Ilman kuivatuskyky

Tunnettaessa ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus voidaan ilman vedenpidätyskyky osoittaa kuvan 5 esittämällä tavalla. Piirroksesta voidaan lukea kuinka paljon 1 m³ ilmaa sitoo vesihöyryä itseensä. Haihtumiseen tarvittava lämpöenergia otetaan kuivattavasta ilmasta. Jos esimerkiksi 15 °C:ssa oleva 60 % ilma kostuu 80 % kosteuteen, sitoo se 1 g:n vettä/ 1 m³ ilmaa. Mollier-piirroksesta voidaan lukea, että samalla ilman lämpötila laskee 3 °C. (Kares ym. 1983, 23.)



KUVA 5. Ilman potentiaalinen vedensitomiskyky sen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muuttuessa (Kares ym.1983, 24)

5 KEINOKUIVAUS

5.1 Kylmäilmakuivaus

Yleisimmät kylmäilmakuivurit ovat joko taso- tai pystykuivureita, joissa kuivausilma puhalletaan hakepatjaan puhaltimen avulla. Kuivuri toimii samalla yleensä hakkeen varastona. Tasokuivureissa kuivauspinta-alan tarve on suuri, mikäli kuivattava hake on pienipalaista. Taulukossa 1 esitetään hakekerroksen maksimipaksuus palokoon mukaan. (Linna ym.1984, 22; Wahlroos 1981, 228)

TAULUKKO 1. Hakekerroksen suurin paksuus palokoon vaihdellessa (Wahlroos 1981, 228)

Hakkeen koko, cm	Hakekerroksen maksimipaksuus, m
0,5...1,0	0,8...1,0
1,0...2,0	1,0...1,5
2,0...3,0	1,5...2,0
3,0...5,0	2,0...2,5
5,0...7,0	2,5...3,0

Tasokuivurissa hakepatja on suomulevyn, reikälevyn tai ritiläpohjan päällä. Kuivausilma puhalletaan hakepatjaan alapäin. Pohjan aukkopinta-alan tulisi olla Kareksen (1981) mukaan 5 - 10 % koko pohjan alasta. Pystykuivurin puhalluskanava sijaitsee silon keskellä ja hakkeen läpi kulkenut ilma poistuu seinämien, jotka voivat olla verkkoa tai harvaa laudoitusta, läpi ulkoilmaan. (Linna ym.1984, 23 - 25.)

Kylmäilmakuivauksessa puhallettavaa ilmaa ei lämmitetä. Tarvittava ilmamäärä on 400 - 500 m³/h, kuivattavaa hakekuutiota kohti. Toisaalta mikäli hakekerros on noin 1,2 m paksu, tarvittava ilmamäärä on noin 400 m³/m². Hakekuivuri tulee täyttää niin, ettei hake ei lajitu. Myös hakkeen talleantumisesta tulee välttää, koska silloin hake tiivistyy

eikä kuivausilma pääse kulkemaan siitä läpi yhtä helposti kuin ympäröivästä tallaantumattomasta kerroksesta. Ilman kuivausilman lämmitystä hakkeen edullisin kuivatusajankohta on toukokuusta elokuuhun. Tällöin ilman vedensitomiskyky on suurimmillaan. Syksyllä ja talvella kuivauksen aloittaminen ei ole kannattavaa, koska kuivatusaika venyy kohtuuttomaksi. (Linna ym.1984, 22 - 26; Kares ym.1983, 52.)

5.2 Vastapaine

Tutkimuksissa on todettu, että hake aiheuttaa yleensä 100 - 250 Pa vastapaineen. Vastapaineen vaihteluun vaikuttavat erityisesti hakekerroksen paksuus ja puhalluksessa käytetty ilmamäärä (m^3/m^2). Muita vastapaineen vaihteluun vaikuttavia tekijöitä ovat hakkeen nimellispituus, hakkeen palakoon jakauma, puumateriaali ja sen kosteus. Vastapaineella ei ole suurta merkitystä energian kulutukselle tai kuivumiselle, mutta vastapaineen ollessa suurempi on kuivumisnopeus myös pienempi. Kuivuri on pyrittävä täyttämään tasakerroksin ja lopullisen hakekerroksen tulee olla tasainen, jotta tasainen vastapaine saavutetaan. (Kares ym. 1983, 51.)

6 KOSTEUDEN MITTAAMINEN

Kosteuden mittaamiseen on kehitetty lukuisia erilaisia menetelmiä, sillä vaadittu tarkkuus nopeus ja helppokäyttöisyys vaihtelevat paljon. Menetelmät voidaan jakaa yksivaiheisiin ja kasivaiheisiin menetelmiin. Yksivaiheisissa menetelmissä ei erikseen mitata puussa olevaa veden massaa ja puun massaa vaan kosteus pyritään määrittämään suoraan. Kaksivaiheisissa menetelmissä veden massa ja puun massa mitataan erikseen. (Kärkkäinen 2007, 182.)

6.1 Kaksivaiheiset menetelmät

6.1.1 Lämpökaappimenetelmä

Yleisin ja yksinkertaisin kosteuden mittaamenetelmä on lämpökaappimenetelmä. Menetelmässä puun massa mitataan kosteana, kuivataan puu lämpökaapissa ja mitataan puun massa uudelleen kuivauksen jälkeen. Tämän jälkeen esimerkiksi kosteussuhde saadaan lasketuksi kaavaa 2 käyttäen. (Kärkkäinen 2007, 182.)

Menetelmä on yksinkertainen, mutta siksi myös epämääräinen. Ongelmana ei ole kostean puun massan mittaaminen, mutta vaikeuksia aiheutuu pyrittäessä määrittämään absoluuttisesti kuivan puun massaa. Pelkästään lämpökaapissa pidettävä lämpötila vaihtelee riippuen käytetystä standardista. Kansainvälinen ISO on eniten käytössä, mutta nykyisinkin standardit poikkeavat toisistaan. (Kärkkäinen 2007, 182.)

Standardeissa ei yleensä ole tarpeeksi tietoa tuuletuksesta. Standardit myös suosittelevat erilaisia kuivausaikoja. Muutamissa standardeissa kehoitetaan näytettä kuivaamaan niin kauan, että kahdessa peräkkäisessä mittauksessa saadaan puuaineen kuivaksi massaksi sama tulos. Eri standardien erot johtuvat osin myös puulajista. Useissa puulajeissa on veden lisäksi muitakin haihtuvia komponentteja. Lämpötila, kuivausaika ja tuuletus vaikuttavat näiden komponenttien poistumiseen. (Kärkkäinen 2007, 182.)

Lämpökaappimenetelmässä lämpötila nostetaan veden kiehumispisteen yläpuolelle. Se ei kuitenkaan tarkoita sitä, että tuloksena olisi absoluuttisen kuiva kappale. Kun käytetään korkeaa lämpötilaa, tuodaan vesimolekyyleihin energiaa. Tällöin vesimolekyylien liike-energia kasvaa ja ne pyrkivät poistumaan puusta. Kaikkien vesimolekyylien liike-energia ei kuitenkaan riitä voittamaan niitä kiinnipitäviä voimia, jotka johtuvat siitä, että puu on vettä imevää ainetta. Kuivaan puuhun jäävä vesi voidaan todeta Litwayn ja Mckimmyn (1975) mukaan esimerkiksi titraamalla. (Kärkkäinen 2007, 182.)

Näytteiden kuivattaminen menetelmällä on kohtalaisen hidasta. Yleisesti käytetään vähintään vuorokauden kuivausaikaa. Kuivausaika kasvaa, mikäli kuivattavia näytteitä on useita ja näytteiden kosteus on korkea. Mikäli kosteuden määrittämisen ei tarvitse olla tarkka voidaan kuivatusaikaa lyhentää käyttämällä korkeampaa lämpötilaa. Menetelmästä käytetään nimitystä kuumakuivausmenetelmä. Menetelmässä voidaan käyttää esimerkiksi 160 °C lämpötilaa. Tällöin kuivumisaika vähenee 90 %. Käytettäessä korkeampaa lämpötilaa lopputulokseen vaikuttaa näytteen alkuperäinen kosteus.

Kuivuttuaan puuaine alkaa hapettua ja sen massa vähenee. On siis tärkeä, että standardissa määritellään kuivumisaika tarkoin käytettäessä korkeampaa lämpötilaa. Käytettäessä matalampia lämpötiloja (85 - 120 °C) hapettumista ei tapahdu merkittävästi, eikä ylipitkällä kuivumisajalla ole Björklundin ja Frykin (1989) mukaan merkittävää vaikutusta lopputuloksiin. (Kärkkäinen 2007, 182 - 183.)

6.1.2 Uuttamismenetelmä

Useissa trooppisissa lehtipuissa on veden lisäksi runsaasti muita haihtuvia aineita. Tällöin voidaan käyttää uuttamismenetelmää. Uuttamismenetelmässä näytettä keitetään ksyleenissä tai tolueenissa, jotka eivät sekoitu veteen. Keitettäessä syntyneet höyryt tiivistetään jäädyttimessä takaisin nesteeksi ja kerätään mitta-astiaan. Veden määrä voidaan mitata helposti, koska ksyleeni tai tolueeni jää uuteaineen pinnalle ja vesi keräytyy astian pohjalle. Veden uuttaminen puusta onnistuu myös vettä imevien

nesteiden avulla. Nopeassa refraktiomenetelmässä veden määrä mitataan syntyvän liuoksen valoa taittavien ominaisuuksien perusteella. Liuotteena on käytetty ainakin pyridiiniä, jonka valoa taittavat ominaisuudet poikkeavat veden valon taitto ominaisuuksista. (Kärkkäinen 2007, 183.)

6.1.3 K. Fischerin menetelmät

Pyrittäessä tarkempiin tuloksiin voidaan käyttää K. Fischerin menetelmää. Menetelmässä vesimäärä mittaamiseen käytetään ainetta, joka reagoi kemiallisesti puussa olevan veden kanssa. Veden massa määritetään titraamalla. Puun sisältäessä muita haihtuvia komponentteja veden lisäksi on K. Fischerin menetelmä erityisen käyttökelpoinen. Kokemusten perusteella voidaan todeta, ettei uuteaineilla ole vaikutusta menetelmän tarkkuuteen. Fischerin menetelmä on havaittu kokemusten perusteella käyttökelpoisimmaksi laboratoriomenetelmistä. Toisaalta mikäli näyte sisältää vain vähän muita haihtuvia komponentteja veden lisäksi on muiden menetelmien käyttö helpompaa. K. Fischerin menetelmän tarkkuus heikkenee näytteen kosteuden kasvaessa. (Kärkkäinen 2007, 183.)

6.2 Yksivaiheiset menetelmät

Yksivaiheiset menetelmät perustuvat useisiin eri suureisiin. Useat menetelmät ovat likimääräisiä, eikä niitä käytetä laboratorioissa. Puun kosteutta voidaan arvioida esimerkiksi mittaamalla puun pintalämpötilaa. Veden haihtuminen sitoo energiaa jolloin puun pintalämpötila laskee. Kun puun kosteus pyritään määrittämään nopeasti on käytetty esimerkiksi menetelmää, jossa kosteusherkällä aineella kyllästettyä paperia painetaan puuta vasten. Paperin värimuutoksen perusteella määritetään likimääräinen kosteus. (Kärkkäinen 2007, 183 - 184.)

Eräässä menetelmässä puuta jauhetaan määritelty määrä ja jauho laitetaan säiliöön, jossa on veden kanssa reagoivaa ainetta. Säiliössä muodostuu kaasua, jonka paine mitataan ja mitatun paineen avulla puun kosteus määritetään. On olemassa myös menetelmä, jossa puupurua säilytetään suljetussa astiassa. Astiaan muodostuu

vesihöyryä, jonka kosteus mitataan. Määräajassa syntyvän vesihöyryn kosteus kertoo puupurun kosteuden. (Kärkkäinen 2007, 184.)

6.2.1 Puun sähköisiin ominaisuuksiin perustuvat mittausmenetelmät

Yleisemmässä käytössä ovat mittarit, jotka perustuvat puun sähköisiin ominaisuuksiin. Mittareilla voidaan mitata sähkövastusta, dielektrisyysvakiota tai siihen liittyvää tehokerrointa. Sähkövastuksella tarkoitetaan jostakin aineesta tehdyn tasapaksun johtimen resistanssia, joka on suoraan verrannollinen johtimen pituuteen ja kääntäen verrannollinen johtimen poikkipinta-alaan. Lisäksi resistanssiin vaikuttaa puun ominaisvastus. Dielektrisyysvakio on puuaineesta johtuva tekijä, joka riippuu kosteudesta, lämpötilasta ja taajuudesta. Tehokerroin on virtapiirin ominaisjohtokyvyn ja näennäisjohtokyvyn suhde. Tehokerroin on puulajille ominainen ja kosteudesta riippuvainen tekijä. Tehokerroin on suoraan verrannollinen puukappaleen lämpötilan nousuna näkyvään tehohäviöön. (Kärkkäinen 2007, 183 - 184, 251 - 252.)

Sähkövastusmittarit perustuvat siihen, että kosteuden lisääntyessä sähkövastus alenee jyrkästi. Ongelmana sähkövastukseen perustuvissa mittareissa on epätarkkuus. Kosteus ei ole jakaantunut näytteessä tasaisesti ja vastus määräytyy kuivemmassa kohdassa olevasta elektrodista. Toisaalta myös lämpötilalla on suuri merkitys. Mitattaessa näytettä, jonka kosteus on alle 10 % ja lämpötilan noustessa 10 °C, alenee sähkövastus puoleen. Mittarit on kalibroitava erikseen eri puulajeille. Eurooppalaisilla puulajeilla erot ovat kuitenkin kohtuullisen pienet ja puulajin merkitys mittaustulokseen vähäinen. (Kärkkäinen 2007, 184.)

Lähes kuivan näytteen mittaaminen sähkövastukseen perustuvalla mittarilla on vaikeaa, koska vastus on liian suuri käytännöllisesti mitattavaksi. Mikäli näytteen kosteus on korkeampi kuin puun syiden kyllästymispiste, sähkövastuksen riippuvuus kosteudesta on vähäinen. (Kärkkäinen 2007, 184.)

Kosteuden määrittäminen tehokertoimen tai muiden dielektristen ominaisuuksien avulla perustuu siihen, että kuivan puun ja veden dielektriset ominaisuudet poikkeavat merkittävästi toisistaan tavallisessa lämpötilassa. Tavallisesti tehokerroin kasvaa

kosteuden noustessa. On kuitenkin huomioitava, että tehokertoimeen vaikuttavat myös lämpötila ja käytetty vaihtovirran frekvenssi. Dielektriset mittarit eivät sovellu esimerkiksi jäätyneen puun mittaamiseen, koska jään dielektrisyysvakion arvo on liian lähellä puun vastaavaa arvoa. mittarit ovat käytännössä kuitenkin tarkempia kuin sähkövastukseen perustuvat mittarit. (Kärkkäinen 2007, 184 - 185.)

6.2.2 Muita menetelmiä

Kosteuden määrittämiseen on olemassa myös uudempiä menetelmiä, kuten mikroaaltomenetelmä, infrapuna-aaltomenetelmä sekä menetelmä, joka perustuu ydinmagneettiseen resonanssiin. Edellä mainituista menetelmistä mikroaaltomenetelmä perustuu puun ja veden erilaisiin dielektrisiin ominaisuuksiin. Mikroaaltomenetelmän käyttöä rajoittaa Skaarin (1972) mukaan sen sopimattomuus jäätyneen puun kosteuden määrittämiseen. Tuloksiin vaikuttaa myös puun tiheys, kuten muissakin dielektrisiin ominaisuuksiin perustuvissa menetelmissä. (Kärkkäinen 2007, 184.)

Infrapuna-aaltomenetelmässä hyödynnetään sitä veden ominaisuutta, että säteily absorboituu tehokkaasti tietyillä aallonpituuksilla. Puun sisältämän veden määrä arvioidaan mitatusta infrapunäsäteilyn heijastumasta. Näytteen tulee olla homogeeninen, koska säteilyn tunkeumasyyvyys on maksimissaan noin 1mm. Näytteen pinnan kosteuden tulee siis vastata koko näytteen kosteutta. (Kärkkäinen 2007, 185.)

Ydinmagneettista resonanssia hyväksi käytävä menetelmä perustuu molekyylien käyttäytymiseen homogeenisessa magneettikentässä, kun sinne tuodaan energiaa radiotaajuusena aaltoliikkeenä. Menetelmällä päästään suurimpaan tarkkuuteen nykyisistä yksivaiheisista menetelmistä. Nanassyn (1973) mukaan menetelmän etuna on mitattavan kosteusalueen laajuus sekä tuloksien riippumattomuus vallitsevasta lämpötilasta. (Kärkkäinen 2007, 185.)

Magnusson ja Konradsson (1971) ovat laatineet taulukon (taulukko 2), joka perustuu hakkeen kosteuden määrittämistä koskevaan tutkimukseen. Taulukossa esitetään menetelmä, kosteuden mittausalue, käyttökelpoinen lämpötila-alue, tarkkuus

maksimaalisena absoluuttisena virheenä sekä menetelmän vaatima ajanmenekki.
(Kärkkäinen 2007, 185.)

TAULUKKO 2. Yhteenveto kosteuden määrittämenetelmistä (Kärkkäinen 2007, 186)

Menetelmä	Mitattava kosteus, %	Lämpötila-alue C	Tarkkuus, %-yksikköä	Ajanmenekki
Lämpökaappi	Ei rajoitusta	Ei rajoitusta	-0,7-+1,5	24 h
Kuumakuivaus	Ei rajoitusta	Ei rajoitusta	-0,7-+1,5	40 min
Uuttaminen	Ei rajoitusta	Ei rajoitusta	± 2	1 h
Sähkövastusmittaus	alle 30	Yli 0	± 5	Lyhyt
Tehohäviön mittaus	Ei rajoitusta	Yli 0	± 2	Lyhyt
Mikroaaltomittaus	15-30	Yli 0	± 1,5	Lyhyt
Infrapuna-aaltomittaus	Ei rajoitusta	Ei rajoitusta	± 3	Lyhyt
Ydinmagn. resonanssi	Ei rajoitusta	Ei rajoitusta	± 1	2 min

7 MEKRIJÄRVEN TUTKIMUSASEMAN HAKEKUIVURI

Mekrijärven tutkimusasema on Itä-Suomen yliopiston luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunnan yksikkö Iiomantsissa. Asema tarjoaa tiloja ja välineitä biologian ja metsätieteiden kenttäopetukseen sekä kokeellisen metsätutkimuksen tukipalveluja. Mekrijärven tutkimusasema on mukana noin 50 eri tutkimuksessa ja projektissa. Yksi projekteista on koepelletöinti eri raaka-aineilla. Pellettitutkimusta varten tutkimusasemalle on hankittu pelletöintilaitteisto ja samalla raaka-aineiden kuivausta varten liikuteltava kärrykuivuri. (Tietoja asemasta. Mekrijärven tutkimusasema. Itä-Suomen yliopisto. 2011.)

7.1 Rakenne

Mekrijärven tutkimusaseman kuivain on liikuteltava lavakuivuri, jossa kuivausilma puhalletaan kuivattavan materiaalin läpi. Alustana on käytetty jarrulla varustettua henkilöautolla vedettävää peräkärriä.

Alustana kuivurissa on Saris Aanhangar BV:n PKC20-peräkärri. PKC-20 on varustettu jarrulla ja sen kantavuus on 2 000 kg. Kärri on varustettu kolmen tonnin 3-osaisella hydraulisylinterillä. Sylinterin käyttö tapahtuu käsipumpulla. Kärriyssä on lisäksi lisavarusteena saatava verkkolaitasarja, joka on vuorattu vanerilla. Kärriyn perässä on nostamalla irroitettava vaneri kärriyn tyhjennystä varten. Kärriä on korotettu jälkeenpäin. Syynä tähän ovat olleet ilmeisesti kippauksen yhteydessä havaitut ongelmat.

Kuivurin pohjalevynä on 1mm kuumasinkitty Reikälevy Oy:n Sami-suomupohjalevy. Suomupohjalevyn reikäpinta-ala on 4 %. Kuvassa 6 näkyy kuivurin suomuhjalevy.

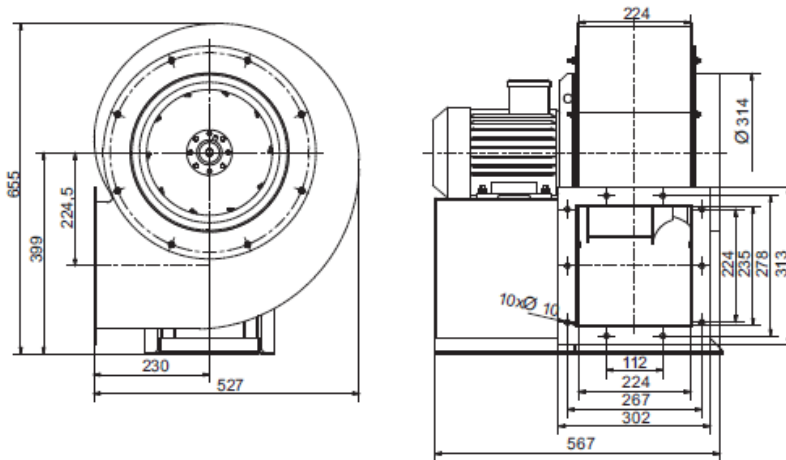


KUVA 6. Mekrijärven tutkimusaseman kuivurin suomupohjalevy (Koepelletöinti – Koepelletöintikokeet. Mekrijärven koepelletöintilaitteisto. Infokortti 13. 2010)

Pohjalevyn runko, joka yhdessä pohjalevyn kanssa muodostaa ilmanakanavan, on valmistettu hitsaamalla putkipalkeista. Putkipalkkeina on käytetty 40 x 20 x 2 (mm) ja 40 x 40 x 2 (mm) putkipalkkeja. Kehikossa on runsaasti tukipalkkeja sekä pituus, että poikittaissuunnassa. Käytetty putkipalkki on ohutseinämäistä, joten runsaalla tuennalla on todennäköisesti haluttu varmistaa kehikon kestäminen myös silloin, kun rasitus kohdistuu pienelle alalle. Runko ja samalla pohjalevy on suunniteltu viiden asteen kulmaan niin, että ilmanakanava, jonka kärryn pohja ja suomulevy yhdessä muodostavat, suppenee perää kohti. Tämä johtunee siitä, että pääilmanakanavan tulee olla tarpeeksi väljä. Tällöin ilmannoisuus ei kasva liian suureksi. Toisaalta taas kuivurin perällä tällä ei ole merkitystä, joten kanava on siellä suppeampi. Tällä tavalla kuivuriin saadaan lisää kuivaustilavuutta.

7.2 Laitteet

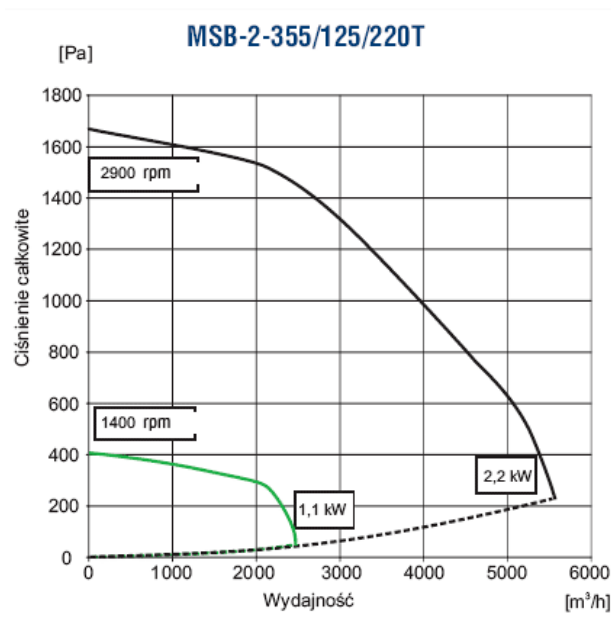
Puhaltimena kuivaimessa on Ventur finland Oy Ab:n MSB-2-355/125-220-keskipakopuhallin, joka soveltuu pölyiselle ilmalle. Puhallin on varustettu imuilman IRIS-säätimellä. Säätöasteikko oli kuitenkin sellainen, ettei säätimestä ole ollut juuri hyötyä. Puhaltimen sähkömoottorina on Busck ML90L-2. Puhaltimen ja sähkömoottorin tekniset tiedot ilmenevät kuvista 7 - 10.



KUVA 7. MSB-2-355/125-220 keskipakopuhallin (MSB-2-355/125-220-keskipakopuhallin. 2009)

Malli	Pyörimisnopeus (rpm)	Moottoriteho (kW)	Maksimi virrankulutus (A)	Jännite (V)	Maksimi ilmamäärä (m ³ /h)	Δp_{\max} [Pa]	[dB (A)]*	Paino (kg)
MSB-2-355/125-220T	2900	2,20	4,60	400	5500	1650	76	45

KUVA 8. Puhaltimen tekniset tiedot (MSB-2-355/125-220-keskipakopuhallin. 2009)



KUVA 9. Puhaltimen tuottokäyrä (MSB-2-355/125-220-keskipakopuhallin. 2009)

Typ	Effekt kW	Varv- tal rpm	Pris Kr			Ström 230 V A	Cos φ	η %	M Nm	Ist A	Mst/M	Kondensator		Vikt B3 kg
			B3 fot	B5, B14 fläns	B3/B14 B3/B5 fot/fläns							start 250 V μ F	drift 450 V μ F	
3000 rpm														
ML90L-2	2.2	2810	3 120	3 210	3 280	12.5	0.97	79	7.48	75	2.2	250	50	17

KUVA 10. Sähkömoottorin tekniset tiedot (Busck ML. 2010)

Puhallin on asennettu kuivaimen aisanpuoleiseen päätyyn suoraan painepuolen laipastaan niin, että se on ilmakehän kohdalla eikä tarvitse erillistä yhdettä ilmakehään. Puhallin ei ole sivusuunnassa keskellä vaan se on hieman sivussa. Tämä johtuu siitä, että aisassa olevat kärryn hallintalaitteet ovat estäneet puhaltimen sijoituksen keskelle. Kärryn perässä on tyhjennystä varten purkuruuvi, jonka kokonaisleveys on 2 043 mm (ruuvien pituus 1 490 mm ja nousu 160 mm). Ruuvia pyörittää 1,1 kW kulmavaihdemoottori.

7.3 Käyttjähaastattelu

Mekrijärven tutkimusaseman kärrykuivain on hankittu yhdessä pellettituotantolaitteiston kanssa käytettynä Vapolta. Sen takia metsätalousinsinööri Risto Ikonen (2010) Mekrijärven tutkimusasemalta ei osannut kertoa sen tarkemmin kuivaimen suunnittelusta ja siihen vaikuttaneista lähtöarvoista. Kuivaimelle oli hankittu erikoisvarusteltu merikontti, jossa kuivausolosuhteet pystytään vakioimaan. Kontti ei kuitenkaan ollut vielä käytössä, joten kuivainta oli käytetty tutkimusaseman autotallissa. Tutkimusasemalla ei ollut ainakaan tässä vaiheessa vielä seurattu itse kuivumisprosessia tai vallitsevia olosuhteita. Tavoitteena oli vain ollut saada raaka-aineesta tarpeeksi kuivaa pellettitutkimusta varten.

Ikonen kertoi, että hän oli kuitenkin seurannut kuivumista ja vallitsevia olosuhteita joidenkin kuivaustapahtumien aikana. Kyseessä ei kuitenkaan ole ollut varsinainen kuivauskoe. Eräissä kuivaustapahtumissa autotallin lämpötila oli nostettu pattereilla 28 °C asteeseen ja lisäksi puhaltimen imuilmaa lämmitettiin kahdella (1 kW + 1,5 kW)

öljypatterilla. Kuivattavan materiaalin kosteus ennen kuivausta oli ollut noin 10 %, ja sitä oli kuivattu yli viikon ajan, jolloin oli päästy noin 3,5 %:n kosteuteen.

Kysyttäessä Ikoselta huomioita ja mahdollisia ongelmia kuivaimessa hän mainitsi puhaltimen mahdollisen ylimitoituksen. Ikosen mukaan kuivatessa varsinkin hienoa materiaalia ongelmana oli pölyn leviäminen. Hän oli joutunut virittämään kuivaimen päälle mahdollisimman tiiviisti suodatinkankaan, tässä tapauksessa tavallisen lakanan, jotta kuivattava materiaali pysyisi kuivaimessa eikä pölisisi ympäristöön. Ongelmana oli myös se, että kärryn etuosassa, lähellä puhallinta kuivausilma puski kuivattavan materiaalin läpi ja kekosi sitä lopulta kohti peräosaa. Ikosen mukaan tämä ongelma olisi mahdollisesti poistettavissa sähkömoottorin kierroslukusäädöllä, jolloin puhaltimen tehoa voitaisiin säätää portaattomasti.

Ikonen huomautti, että liitoskohtien tiivistämisessä täytyisi olla tarkkana. Kuivaimesta huomasi, etteivät liitoskohdat eivät olleet täysin tiiviit vaan pölyä ja siten tietenkin myös ilmaa oli vuotanut liitoskohdista.

8 LUONNONVARA-ALA YKSIKÖN KUIVURI

8.1 Suunnittelun lähtökohdat

Toimeksiantaja asetti muutamia vaatimuksia rakennettavalle kuivurille. Kuivurin tuli olla siirrettävä ja irrallinen kokonaisuus. Hankkeessa hankittiin peräkärri, jolla kuivuria on tarkoitus kuljettaa. Kuivurin maksimileveys määräytyy hankitun peräkärryn mukaan. Tyhjän kuivurin ja hankitun peräkärryn yhteispaino ei saanut ylittää 750 kg. Kuivurilla on tarkoitus kuivata myös ruokohelpipaaleja, joka määritteli kuivurin minimi leveyden. Kuivuria on tarkoitus säilyttää kylmässä tilassa, ja myös kuivaus tulee tapahtumaan lämmittämättömässä tilassa. Tämän vuoksi kuivurissa käytettävien materiaalien tulee olla sään ja kosteuden kestäviä.

8.2 Tarvittavat laitteet

Keinokuivatuksessa tärkein laite on puhallin. Valittaessa puhallinta tulee ottaa huomioon, että puhaltimen tuottama ilmamäärä on riittävä. Toisaalta myös puhaltimen paineen tuotto tulee olla riittävä. Puhallin voi olla, joko aksiaali- tai radiaalipuhallin. Aksiaalipuhaltimen etuna on sen tuottama ilmamäärä. Radiaalipuhallin taas tuottaa aksiaalipuhaltimeen verrattuna suuremman paineen. Tarvittava ilmamäärä on helpommin määritettävissä ja on esimerkiksi hakkeella noin $400 \text{ m}^3 / \text{h}$. Puhaltimen ylimeritoitus on kuitenkin suotavaa, jotta hyvät kuivausolosuhteet saadaan hyödynnettyä. (Kares ym.1983, 60 - 61.)

Kuivattavan materiaalin aiheuttaman vastapaineen suuruus on hakkeella vain noin 250 Pa, mutta esimerkiksi erittäin kostean ruokohelpipaalin aiheuttaman vastapaineen määrittäminen on vaikeampaa. Tästä syystä valittavan puhaltimen paineentuoton tulee olla riittävä. Puhaltimen tulee myös soveltua pölyisen ilman puhaltamiseen, koska kuivattava materiaali on pölyistä ja täten myös puhaltimen tulee kestää pölyistä ilmaa. (Kares ym.1983, 61.)

Kuivuria tullaan käyttämään suunnitelmien mukaan läpi vuoden. Tutkimusten mukaan kylmäilmakuivaus on tehokkainta touko - elokuussa, jolloin esimerkiksi hakkeesta poistuva vesimäärä on 2–3 grammaa läpipuhallettua ilmamäärää kohti. Kuivurin käytön mahdollistaminen ja ennen kaikkea järkevän kuivausajan saavuttamiseksi on puhaltimen imuilman lämmitys varsinkin talvikuukausina välttämätöntä. Ilmanlämpötilan ja ilmankosteuden vaikutus poistuvaan vesimäärään ilmenee kuvasta 5 sivulta 17.

9 VALITUT MATERIAALIT JA LAITTEET

Kuivurin suunniteltu rakenne on esitetty liitteissä 2 ja 3. Kuivurin rakennetta suunniteltaessa pyrittiin hyödyntämään mahdollisuuksien mukaan Mekrijärven kuivurista saatuja tietoja ja lisäksi käyttäjähaastattelun perusteella korjaamaan havaittuja ongelma-kohtia. Kuivurin ja kuivattavan materiaalin siirtoa varten hankittiin Farmi pro 757T-peräkärri.

9.1 Materiaalit

Kuivurin materiaaliksi valittiin filmivaneri. Vaneri on pinnoitettu molemmilla puolilla filmipinnoitteella. Pinnoitteen ansiosta vanerin kosteuden ja sään kestävyys on parempi. Kuivurin rakennetta päätettiin jäykistää teräsrakenteilla ja lisäksi tarvittaessa myös puurimoilla.

Pohjalevyksi valittiin suomupohjalevy. Suomupohjalevyn aukkopinta-ala on vain 4 %. Suositeltu aukkopinta-ala hakkeelle on 5–10 %. Suomupohjalevyyn päädyttiin, koska kuivurilla on tarkoitus kuivata myös erittäin hienoa materiaalia. Reikälevyn käyttö vaikeuttaisi hienon materiaalin kuivausta suuremman aukkopinta-alan vuoksi.

Pohjalevyn runko, joka samalla yhdessä kuivurin pohjan kanssa muodostaa puhaltimen pääkanavan, suunniteltiin Mekrijärven kuivurin vastaavan mukaan. Toisin kuin Mekrijärven kuivurissa, runko kuitenkin suunniteltiin tasaiseksi. Tähän päädyttiin sen vuoksi, että suunnitelmissa on kuivata kuivurissa useampaa eri materiaalia kerralla. Tällöin materiaalit sijoitetaan erikseen rakennettaviin lokeroihin. Lokeroiden sijoitus ja lokeroiden väliin jäävien vapaiden ilmavälien tiivistäminen on helponpaa kun lokerot ovat tasaisella pohjalla. Pääkanavan korkeus mitoitettiin riittäväksi, jottei ilman nopeus kanavassa kasva liian suureksi.

9.2 Laitteet

Puhallinta valittaessa päädyttiin samaan puhaltimeen kuin Mekrijärven tutkimusaseman kuivurissa. Puhaltimen tekniset ominaisuudet ilmenevät kuvista 7 ja 8. Puhallin on tarkoitettu pölyiselle ilmalle. Tutkimusaseman kokemuksien mukaan puhaltimen teho on ollut riittävä ja joissakin tilanteissa jopa ylimitoitettu. Puhaltimen valinnassa ei haluttu ottaa riskiä koska kuivattavia materiaaleja tulee olemaan useita ja esimerkiksi kaikkien materiaalien aiheuttama vastapaine ei ole tarkkaan tiedossa.

Tutkimusaseman käyttökokemuksien perusteella päädyttiin taajuusmuuttajan käyttöön. Tutkimusaseman kokemuksien mukaan puhallin aiheutti hienolla materiaalilla ongelmia tehonsa vuoksi. Taajuusmuuttajaksi valittiin ABB:een 3-vaiheinen ACS550. Taajuusmuuttajan avulla puhaltimen kierroslukua voidaan säätää tarvittavan tehon mukaan. Puhaltimen imuilman lämmitystä varten hankittiin 9 kilowatin ITM09-sähkölämmitin.

10 KUIVAUSKOKEEN MITTAUSSUUNNITELMA

Kuivurin kuivatusominaisuuksien selvittämiseksi ja mahdollisten ongelmien löytämiseksi ja korjaamiseksi kuivurilla tulee suorittaa kuivauskokeita. Materiaalin kuivumista voidaan seurata materiaalin kosteutta mittaamalla tai vaihtoehtoisesti kuivuriin sisään menevän ilman lämpötilan ja kuivurista poistuvan ilman lämpötilan avulla.

Kuivauskokeen tarkoituksena on selvittää, kuivuuko materiaali kuivurissa tasaisesti, saadaanko kuivurilla riittävän kuivaa raaka-ainetta ja onko kuivausnopeus riittävä. Mittauspisteitä tulee sijoittaa laajalle alalle ja eri kuivaussyvyyksiin. Tällöin saadaan mahdollisimman tarkasti selville, miten ja missä ajassa kuivuminen kuivurissa etenee. Kun kuivumisen tarkka eteneminen tai mahdollisesti sen pysähtyminen saadaan selville, on kuivurin kehittäminen helpompaa. Koe tulisi suorittaa useilla materiaalilla. Tällöin kuivurin käyttäytyminen eri materiaaleilla saadaan selville.

10.1 Kuivauskokeessa käytettävät menetelmät ja mitattavat suureet

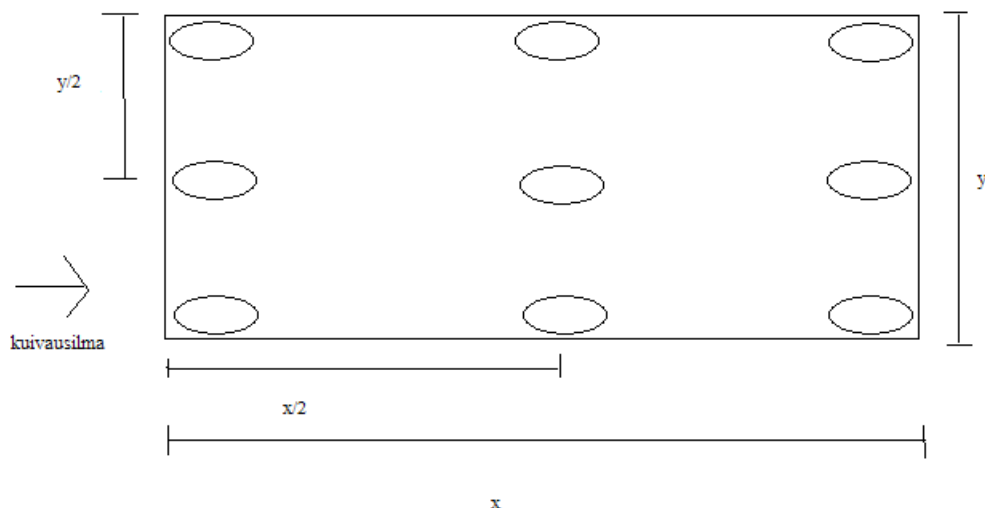
Kokeessa käytetään kosteuden määrittämiseen uunikuivausmenetelmää. Menetelmä on standardoitu, ja tässä kokeessa voidaan käyttää esimerkiksi standardia SFS CENT/TS 14774-2:fi. Näytteet otetaan kuivattavasta erästä ja pakataan ennen kuivausta verkkopusseihin, millä estetään näytteiden sekoittuminen. Punnittavan näyte-erän tulisi olla standardin mukaan vähintään 300 g. Pussien tulee olla näytteen koostumuksen mukaan tarpeeksi tiheitä, mutta kuitenkin niin, ettei pussi estä ilman kulkeutumista.

Kuivuriin menevän ja sieltä poistuvan ilman lämpötiloja mitataan. Kokeen aikana mitataan ilman lämpötilaa, jotta pystytään huomioimaan vallitsevien olosuhteiden vaikutus kuivumiseen. Kuivuri on varustettu kierrosluvun säädöllä. Tällöin koe on mahdollista suorittaa erilaisilla kuivausilman tilavuusvirroilla. Kuivausilman lämpötilaa voidaan myös säätää lämmittimen avulla. Kokeessa käytettävä lämpötila ja tilavuusvirta on kuitenkin pidettävä vakiona kokeen ajan. Lämpötilan vakioimisen suhteen ongelmia

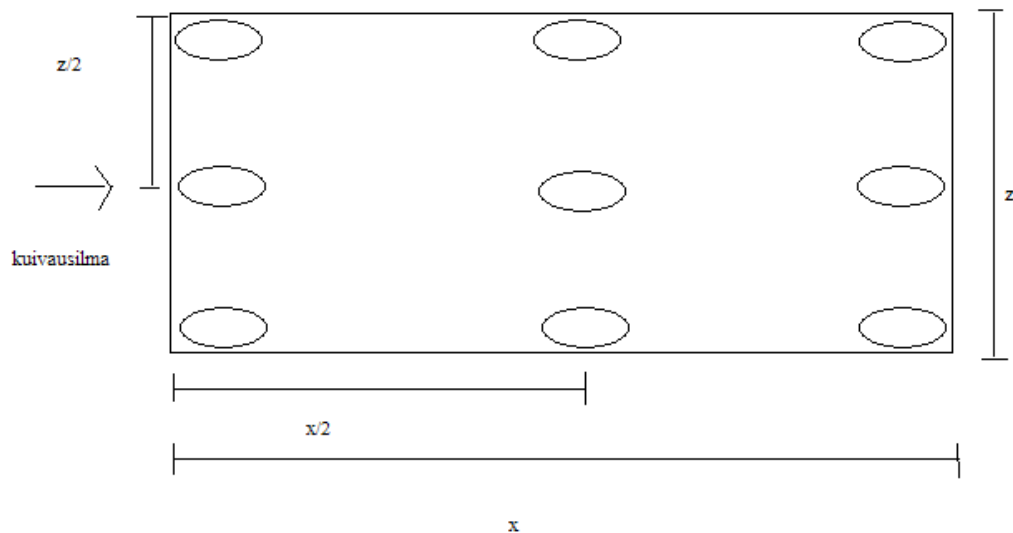
aiheutuu, mikäli koe suoritetaan ei vakioituissa olosuhteissa eli ulkoilmassa. Kokeessa voidaan käyttää myös sähköisiä kosteusmittareita. Näiden tarkkuus ei ole yhtä tarkka kuin uunikuivausmenetelmällä saatu, mutta tarkkuus on riittävä tämän kokeen tarkoitusta varten. Sähköisellä kosteusmittarilla, esimerkiksi Bio Moisture, voidaan seurata materiaalin kuivumista lähellä kuivauserän yläpintaa. Mittarin käyttöä rajoittaa kuitenkin sen soveltuvuus ainoastaan hakkeelle ja mitattava kosteus alue joka on 12 - 40 % hakkeelle ja 30–70 % hakkuutähdehakkeelle.

10.2 Kokeen suorittaminen

Kuivattavasta koe-erästä pakataan verkkopusseihin näyte-eriä, jotka punnitaan standardin ohjeiden mukaan ja numeroidaan ennen kuivauksen aloittamista ja sijoitetaan kuivuriin kuvien 11 ja 12 mukaan. Tämän jälkeen mitataan vallitseva lämpötila. Ennen kokeen aloittamista dokumentoidaan myös käytettävä kierrosluku tai ilmamäärä sekä imuilman lämpötila. Kierrosluvun avulla saadaan puhaltimen teknisistä tiedoista puhaltimen tuottama ilmamäärä. Tiedot merkitään mittauspöytäkirjaan (liite 1).



KUVA 11. Näytteiden sijoitus sivulta



KUVA 12. Näytteiden sijoitus ylhäältä

Näin usean näyte-erän käyttäminen riittänee ensimmäisellä koe kerralla. Tämän jälkeen tiedetään tarkemmin, miten kuivuminen etenee ja mitkä ovat kriittiset alueet. Seuraavilla kuivauserillä voidaan näytteiden ottopisteitä vähentää tarpeen mukaan.

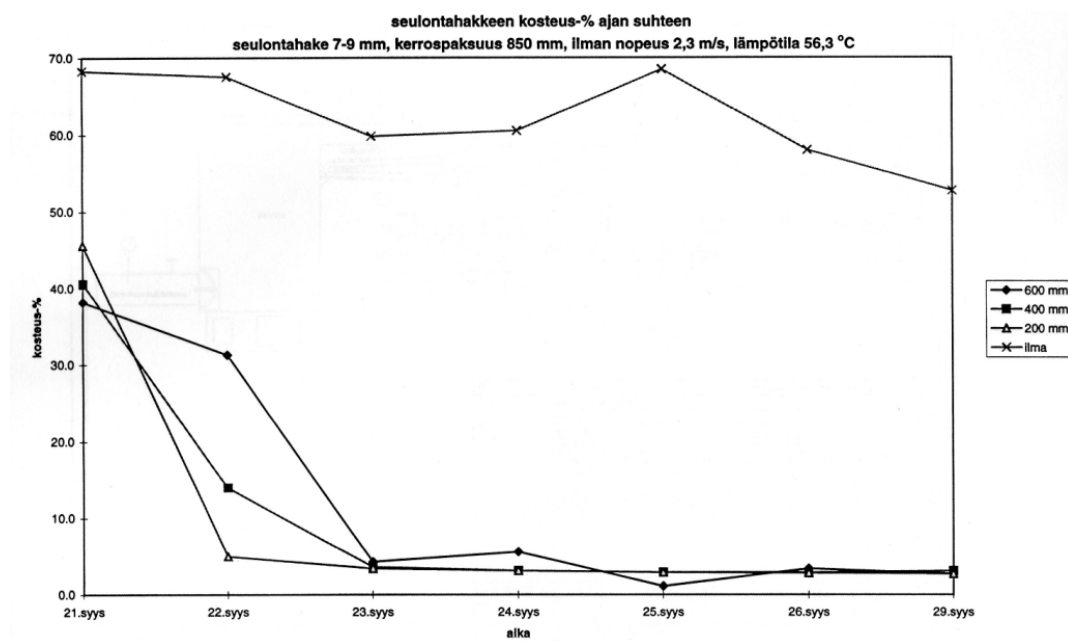
Koe aloitetaan, kun näytepussit on sijoitettu paikoilleen ja olosuhteet dokumentoitu. Kokeessa näytepussit punnitaan määrätyin väliajoin ja tämän jälkeen sijoitetaan takaisin samoille paikoille. Ennen näytepussien esiin kaivamista mitataan kuivurista poistuvan ilman lämpötilaa kuivurin eri kohdissa. Pöytäkirjaan merkitään lämpötilojen keskiarvo. Puhallin voidaan pysäyttää näytteiden punnituksen ajaksi.

Kokeen kestoaika määräytyy sen mukaan, miten kuivuminen edistyy. Kun saman näytteen perättäisissä punnituisissa painoissa ei enää tapahdu muutosta, voidaan kyseisten näytteiden punnitseminen lopettaa. Kun kaikki näyte-erät saavuttavat kyseisen pisteen, voidaan koe päättää. Toisaalta mitattaessa kuivurista poistuvaa ilman lämpötilaa voidaan havaita kuivumisen päättymisen. Pelkän poistuvan ilman lämpötilan mittaaminen ja sen perusteella tehtyjen havaintojen luotettavuus on kuitenkin siinä määrin epävarmaa, että koe on syytä päättää vasta, kun punnittavat näytteet saavuttavat vakioapainon. Kuivuminen on oletettavasti nopeinta kokeen alkuvaiheessa, ja siksi näytteet olisi punnittava alkuvaiheessa 2 tunnin välein. Kun havaitaan näytteiden painon muutosnopeuden hidastuminen voidaan otantojen aikaväliä kasvattaa.

Kokeen lopuksi näytepusseja kuivataan uunikuivausmenetelmällä standardin ohjeiden mukaan. Tämän jälkeen näytteet punnitaan, jolloin saadaan näytteiden kuivapaino. Tämän jälkeen voidaan kunkin näyte-erän kosteus eri punnitus hetkellä laskea kaavan 1 avulla.

10.3 Kuivauskokeen tavoite

Pelletöinnin raaka-aineen ihanne kosteus on 10–15 %. Kuivurilla todennäköisesti päästää tähän tulokseen ja vielä alhaisempiinkin kosteusprosentteihin. Ratkaiseva tekijä kuivurin suunnittelun ja rakentamisen onnistumiselle on aikamäärä, missä tavoitekosteuteen päästään. Vertailukohtana voidaan pitää VTT Energian tekemiä kuivauskokeita, joissa tutkittiin erilaisten hakelaatujen kuivumista traktorinperäkärriyn rakennetussa kuivurissa. Kuvasta 12 nähdään seulontahakkeen kosteusprosentti eri kerroskorkeuksissa ajan suhteen. (Puolamäki – Kouki 1999, 60.)



KUVA 12. 7–9 mm seulontahakkeen kosteusprosentti ajan suhteen (Puolamäki ym. 1999, 60)

Kuvasta nähdään, että noin 10 % kosteus on saavutettu kahden vuorokauden kuluessa kuivauksen aloittamisesta. Seulontahakkeen kosteusprosentti ennen kuivausta on ollut noin 40. Kuvasta nähdään lisäksi kuivausilman nopeus ja lämpötila.

Tavoitteeksi suunnitellulle kuivurille voidaan asettaa vertailukelpoiset kuivumisajat. Tuloksia vertailtaessa on otettava huomioon käytetty kuivausilman nopeus ja lämpötila.

11 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli suunnitella kuivuri, jolla pystytään kuivaamaan erilaisia materiaaleja pelletöintiä varten. Apuna käytettiin Itä-Suomen yliopiston Mekrijärven tutkimusasemalla olevaa kuivuria. Kuivuriin tutustuttiin paikan päällä ja sen käyttäjää haastateltiin. Näitä arvokkaita tietoja hyödyntäen suunniteltiin kuivuri sekä tehtiin laitteistovalinnat. Lisäksi kuivurille suunniteltiin vastaanottokoe, jolla kuivurin ominaisuuksia tutkittaisiin.

Kuivurin suunnittelussa rajoittavina tekijöinä olivat kuivurille asetetut koko vaatimukset ja ennen kaikkea sen painolle asetetut rajoitteet. Lisäksi kuivurissa kuivattavien useiden eri materiaalien erilaiset koostumukset vaikuttivat tehtyihin ratkaisuihin. Materiaali valinnoissa kiinnitettiin huomiota erityisesti niiden massaan. Tietyissä materiaaleissa tehtiin kompromisseja painon ja muiden ominaisuuksien välillä. Laitteistojen valinnoissa hyödynnettiin Mekrijärven tutkimusaseman kuivurista saatuja kokemuksia.

Kuivurin valmistuessa sille tulee suunniteltu vastaanottokoe. Kokeiden tuloksia pystytään hyödyntämään kuivurin kehittämisessä ja mahdollisesti löytyvien ongelmien ratkaisemisessa. Kokeista saatuja tuloksia hyödyntämällä voidaan kuivurille laatia käyttöön liittyviä ohjeita. Saatuja tietoja ja kokemuksia voidaan hyödyntää myös kuivurin huoltoa ja kunnossapitoa suunniteltaessa.

LÄHTEET

Bioenergia Suomessa. Peltobiomassat. 2010. FINBIO ry. Saatavissa:

<http://www.finbioenergy.fi/default.asp?SivuID=26476>

Hakupäivä 18.2.2011.

Busck ML. 2010. Busck & Co AB . Saatavissa:

<http://www.busck.se/sv/elmotorer/1-fasmotorer/hoegt-startmoment/busck-ml>.

Hakupäivä 19.12.2010

Energia puu. 2010. Motiva Oy. Saatavissa:

http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/energiapuu

Hakupäivä 20.1.2010.

Ikonen, Risto 2010. Metsätalousinsinööri. Mekrijärven tutkimusasema. Itä-Suomen yliopisto. Haastattelu marraskuu 2010.

Kares, Matti – Linna, Veli 1983. Polttohakkeen puhallinkuivatus pientaloissa ja maataloilla. Helsinki: Poly kopio Oy.

Koepelletöinti – Koepelletöintikokeet. Mekrijärven koepelletöintilaitteisto. Infokortti 13. 2010. Metsäenergia. Itä-suomen Yliopisto. Saatavissa:

[http://www.uef.fi/c/document_library/get_file?uuid=f4e5fa7b-6dfd-4f7e-9d53-](http://www.uef.fi/c/document_library/get_file?uuid=f4e5fa7b-6dfd-4f7e-9d53-77e62ec1c139&groupId=64184&p_1_id=127399)

[77e62ec1c139&groupId=64184&p_1_id=127399](http://www.uef.fi/c/document_library/get_file?uuid=f4e5fa7b-6dfd-4f7e-9d53-77e62ec1c139&groupId=64184&p_1_id=127399)

Hakupäivä 4.4.2011.

Kärkkäinen, Matti 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Hämeenlinna: Karisto Oy.

Linna, Veli – Järvinen, Timo 1984. Hakkeen keinokuivatuksen tekniset ratkaisut ja taloudellisuus. Helsinki: Poly kopio Oy.

MSB-2-355/125-220 keskipakopuhallin. 2009. Ventur Finland Oy Ab. Saatavissa:
<http://www.ventur.fi/fi/products/product/2865>
Hakupäivä 19.12.2010.

Pelletin raaka-aine. 2010. Suomen Pellettienergiayhdistys ry. Saatavissa:
[http://www.pellettienergia.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=102
&Itemid=135](http://www.pellettienergia.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=102&Itemid=135)
Hakupäivä 15.2.2011.

Pelletin tuotanto. 2011. Suomen Pellettienergiayhdistys ry. Saatavissa:
[http://www.pellettienergia.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=63&
Itemid=75](http://www.pellettienergia.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=63&Itemid=75)
Hakupäivä 15.2.2011.

Puhakka, Asko – Alakangas, Eija – Alanen, Veli-Matti – Airaksinen, Leevi – Soini,
Risto – Siponen, Tuomo – Kainulainen, Seppo 2001. Hakelämmitysopas. Helsinki,
Joensuu: Motiva.

Puolamäki, Kimmo – Kouki, Jyrki 1999. Stokeripolttoaineen valmistus sahakkeen
purujakeesta ja jakelutekniikka alle 500 kW:n laitoksille. Loppuraportti. Bioenergian
tutkimusohjelma 315. Jyväskylä: Bioenergian tutkimusohjelma.

Tietoja asemasta. Mekrijärven tutkimusasema. Itä-suomen yliopisto 2011. Saatavissa:
<http://www.uef.fi/mekri>
Hakupäivä 20.2.2011.

Wahlroos, Lasse 1981. Aurinkoenergia. Pori: Satakunnan Kirjateollisuus.

Yleistä pelletistä. 2011. Pellettilämpö Oy. Saatavissa:
http://www.pellettilampo.com/?Yleist%E4_pelletist%E4
Hakupäivä 10.4.2011

