

Tero Kämpö

# Klapikuivaamon lämmitysjärjestelmän ja ilmanvaihdon suunnittelu

Opinnäytetyö

Insinööri

Talotekniikka

2021



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (amk)
Tekijä/Tekijät	Tero Kämppe
Työn nimi	Klapikuivaamon lämmitysjärjestelmän ja ilmanvaihdon suunnittelu
Toimeksiantaja	Metsäyhtymä kuuskulma avoin yhtiö
Vuosi	2021
Sivut	43 sivua, liitteitä 4 sivua
Työn ohjaaja(t)	Anna Forsström

## TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tavoite oli mitoittaa 2016 valmistuneeseen klapikuivurirakennukseen ilmankierto- ja lämmitysjärjestelmä. Järjestelmän mitoitusta varten tutkittiin teoriaa liittyen klapien kuivumiseen ja laadun vaihteluihin kuivumisen seurauksena sekä tehtiin kuivauskoe, jolla puiden kuivaamista kokeiltiin pienimuotoisesti. Kuivauskoe suoritettiin autotalliolosuhteissa olemassa olevalla kalustolla kuivaamalla kolme irtokuutiota kosteaa koivuklapia polttokuivaksi.

Lähdekirjallisuutta tutkittiin niin polttopuiden valmistamisen, varastoinnin kuin kuivaamisen osalta sekä tutkittiin myös sahatavara-kuivureiden teoria ja toimintaperiaatetta. Lisäksi tutustuttiin rakennuksen ja toimilaitteiden vaatimuksiin, jotta ne kestäisivät kuivausolosuhteita.

Kuivauskokeessa tehtiin havaintoja, mitattiin energiankulutusta ja kuivumista-  
pahtumaa. Mittaustulosten perusteella verrattiin laskennallisia kuivausarvoja toteutuneisiin. Näiden tietojen pohjalta pystyttiin mitoittamaan suuremmissa mittakaavassa olevan kuivurin tarvitsemat ilmavirrat ja lämmitystehon tarve.

Mitoitustyön tuloksena pystyttiin myös tekemään layout suunnitelma kuivurin toiminnasta ja laskettiin esimerkkikuivauserän energian kulutus ja tarvittava käyttöaika.

Opinnäytetyö onnistui tavoitteessaan ja järjestelmä saatiin suunniteltua. Kuivauskoe antoi hyvät lähtökohdat varsinaiselle mitoitustyölle ja sen avulla saatiin eliminoidua monia mahdollisia ongelmakohtia varsinaisessa toteutuksessa.

**Asiasanat:** Polttopuun kuivaus, Klapien kuivaus, Klapi, Polttopuu

Degree	Bachelor of engineer
Author (authors)	Tero Kämppe
Thesis title	Designing a heating and air ventilation system for a firewood dryer
Commissioned by	Metsäyhtymä kuuskulma avoin yhtiö
Time	April 2021
Pages	43 pages, 4 pages of appendices
Supervisor	Anna Forsström

## ABSTRACT

The main object of this thesis was designing an air ventilation and heating system for a firewood dryer which was made in 2016. The theory part discusses firewood drying and quality changes during drying. A small scale drying test was also conducted, where the theory was examined in practice. The drying test was made in a garage. 3 cubic meters of moist firewood were dried to burnable condition.

The literature used dealt with manufacturing firewood, storing firewood and drying firewood. The saw mill sector and high capacity drying systems and principles were also discussed.

In the drying test energy consumption and the drying process were examined. Measurements were compared to calculated consumptions and time. With this information the process was designed on a bigger scale for the actual drying system.

Based on the results, dimensioning was made using Excel, which was used to select a suitable fan and coil for the actual process.

Based on the results of the dimensioning process, a layout for the dryer and calculated estimations about heating and electric consumption were made.

The goals of the thesis were achieved and the system was dimensioned as needed. The drying test gave a good starting point for the dimensioning and thanks to this some problems, which could appear in real installation, could be eliminated.

**Keywords:** firewood drying, firewood

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	1
2	POLTTOPUU ELI KLAPI .....	2
3	KLAPIEN KUIVAAMINEN .....	3
3.1	Ilman ominaisuudet klapien kuivaamisessa .....	6
3.2	Klapien kuivausprosessi .....	10
3.3	Klapien kuivausmenetelmät .....	12
4	KLAPIKUIVURIN RAKENNE .....	15
4.1	Kuivurissa käytettävät rakennusmateriaalit .....	15
4.2	Kuivurin ilmanvaihto .....	15
4.3	Kuivurin lämmitys .....	17
5	KLAPIEN KUIVAUSKOE .....	18
5.1	Koelaitoksen toiminta .....	19
5.2	Mittausmenetelmät .....	24
5.3	Kuivauskokeen mittaustulosten käsittely .....	27
6	KUIVAUSKOKKEEN TULOKSET .....	29
7	KLAPIKUIVURIN MITOITUS .....	31
7.1	Toimintaperiaate .....	31
7.2	Kuivurin lämmitysjärjestelmän mitoitus .....	32
7.3	Ilmankierron suunnittelu ja mitoitus .....	34
7.4	Kuivaamon energiankulutus ja kuivausaika .....	37
8	POHDINTA .....	39
8.1	Kuivauskokeessa tehtyjä havaintoja .....	41
	LÄHTEET .....	44

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella Metsäyhtymä Kuuskulma avoin yhtiön rakentaman klapi kuivurirakennukseen toimiva ja kustannustehokas kuivausjärjestelmä. Rakennus on valmistunut vuonna 2016, ja sitä on käytetty varastona, koska varsinaista kuivaustoimintaa ei ole tehty kuin satunnaisesti. Rakennus on tehty vanhan viljakuivurin jatkoksi ja rakennuksesta löytyy myös vanha viljankuivausuuni, joilla puita on tähän asti kuivattu satunnaisesti.

Maatilalle on suunnitelmissa hankkia uusi hakelämmitysjärjestelmä, jonka yhteyteen tehdään myös varaus kuivurin patterille. Opinnäytetyössä selvitetään kuivuriin tulevan lämmönsiirtojärjestelmän vaatima teho, jotta se osataan ottaa huomioon hakelämmitysjärjestelmää suunniteltaessa.

Opinnäytetyön tekijä on toiminut klapiyrittäjänä vuodesta 2009 asti, ja hän on tehnyt yhteistyötä Metsäyhtymä Kuuskulman kanssa polttopuun valmistukseen liittyen. Tekijää on aina kiinnostanut polttopuiden kuivaus ja laadun hallinta valmistettaessa suuria polttopuueriä, ja hän on kokeillut erilaisia tapoja kuivata klapeja isommassa ja pienemmässä mittakaavassa. Opinnäytetyön kautta oli oiva tilaisuus perehtyä asiaan myös teoreettisesti ja opiskella kuivaamista ammatillisesta näkökulmasta.

## 2 POLTTOPUU ELI KLAPI

Polttopuuta käytetään Suomessa pientalojen lämmittämiseen paljon, vuonna 2016/2017 lämmityskautena 4 667 000 m<sup>3</sup> (Luke, 2020). Suurin osa pientalojen polttopuusta tehdään omasta metsästä tai kerätään esimerkiksi naapurin tai sukulaisen omistamalta metsäpalstalta sekä tehdään pihapuista.

Ammattimainen polttopuun teko on ollut pitkään monella maatilalla sivuelinkeinona, ja laitteiden kehittyessä se on myös ammattimaistunut paljon. Nykyään on useita, ainoastaan polttopuuta valmistavia yrittäjiä, jotka hankkivat eläntonsa ympärivuotisesti pelkästään polttopuun myynnillä. Tämä tarkoittaa useimmiten yli 1000 heittomotin vuosituotantoa. Koneellinen kuivaus on tällaisessa tapauksessa ainoa järkevä vaihtoehto, koska monella yrittäjällä ei ole taloudellisesti mahdollista - eikä edes kannattavaa investoida varastoihin, joihin pystyttäisiin kerralla valmistamaan riittävä määrä klapiä koko vuoden myyntiä ajatellen. Lisäksi kausikohtaiset vaihtelut polttopuun menekissä ovat suuria, jolloin pitkä kuivausaika aiheuttaa tarpeettomia myyntitappioita, kun kysyntään ei pystytä vastaamaan.

Polttopuita myydään yleensä pilkottuina klapeiksi. 1900-luvulla suurin osa polttopuista tehtiin haloiksi. Tuolloin puuta käytettiin pääasiallisena lämmitysmuotona monessa rakennuksessa isoissa uuneissa sekä keskuslämmityskattiloissa, joihin mahtui metrinen halko hyvin sisään. Pönttöuunia, puukiuasta ja hellaa varten tehtiin erikseen lämmityshaloista pätkimällä eri alueen mukaan klapeja/pilkkeitä/klapuja jne. - rakkaalla lapsella on monta nimeä.

Klapeja myydään pääsääntöisesti kuivattuna polttokauden aikana. On myös mahdollista, että asiakas ostaa keväällä ns. tuoreita klapeja ja kuivaa ne itse omassa varastossaan.

Klapeja myydään irtotilavuusyksikössä kuutioittain, eli niin kutsuttuna irtotai heittokuutiona. Tämä tarkoittaa sitä, että yhden kuution (1m x 1m x 1m) kokoiseen kaukaloon tai säkkiin on heitelty kasa pilkkeitä ja puut ovat epäjärjestyksessä. Kun pilkkeet pinotaan esimerkiksi liiteriin tai autotallin seinustalle, saadaan mitattua polttopuupinon tilavuus pinokuutioina. Jos verrataan pinokuution suhdetta irtokuution metsäkeskus antanut yksiselitteisen laskennallisen

normin; 0,62 pinokuutio vastaa yhtä heittokuutiota. Kuutiosta käytetään yleisesti myös termiä ”motti”.

Normaali polttopuiden ostoerä omakotitalossa on yhden lämmityskauden tarve polttopuille. Nykyiset vaatimukset etenkin kaupunkialueella polttopuuvarastojen koille on aiheuttaneet sen, että polttopuita on alettu myydä pienemmissä erissä. Jopa yksittäisinä verkkosäkkeinä huoltoasemien ja tavaratalojen ovien edessä.

Klapin vakiintuneeksi kooksi on tullut 30–33 cm. Mitta perustuu siihen, että metrinen halko tarvitsi useimmiten katkaista kolmeen osaan, että se sopii esimerkiksi hellaan tai pönttöuuniin, jonka tulipesä oli pieni.

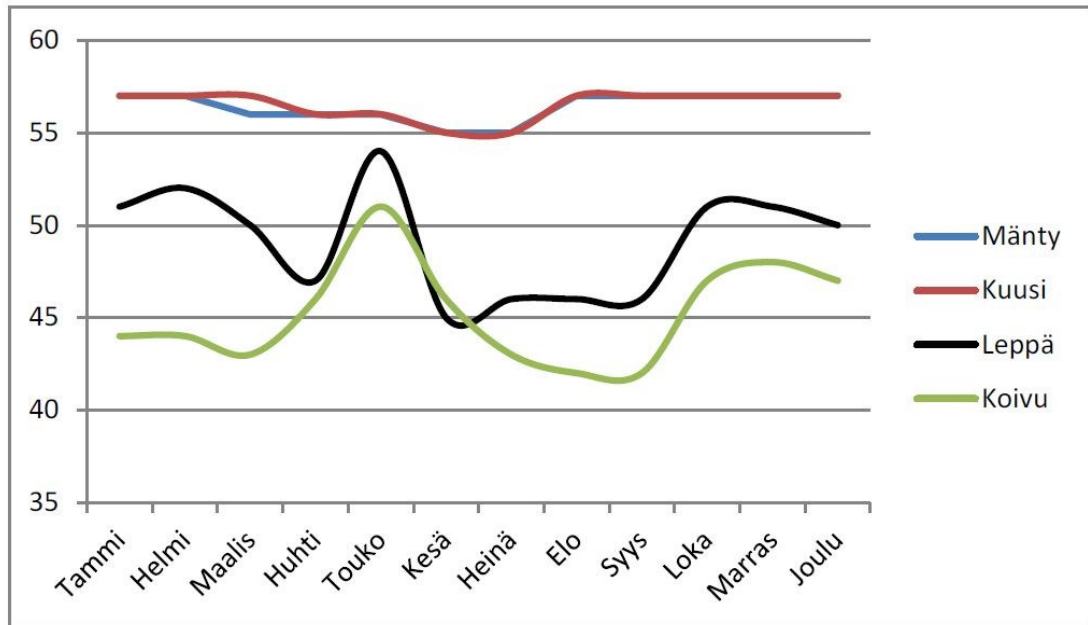
1980/1990-luvulla alkoi markkinoille ilmestyä erilaisia klapikoneita, joilla rangasta voitiin valmistaa eri mittaisia klapeja. Tässä valmistustavassa 30 cm mitta on tullut yleisimmäksi sen takia, että pääsääntöisesti klapeja valmistetaan kuitupuusta, jota koneellisessa metsänkorjuussa ja metsurintyönä kaadettaessa tehdään 3 m tai 3,3 m mittaan. Tästä puusta saadaan tehokkaimmin valmistettua 30 cm mittaista klapia, jolloin ei tule hukkaa.

Valmistusmittoja on myös muitakin, ja nykyiset uudemmissa omakotitaloissa useimmiten käytössä olevat tunnelmatakot ovat tulipesän rakenteeltaan niin pieniä, että kaupunkialueella paikoin ostajat vaativat jopa 20–25 cm pituista klapia.

### **3 KLAPIEN KUIVAAMINEN**

Klapien laatuun merkittävin vaikuttava tekijä on kosteus. Elävän puun kosteus on riippuvainen vuodenajasta. Lehtipuilla vaihtelu on suurempi kuin havupuilla. Koivu on yleisin pilkepuu, ja sen kosteus vaihtelee vuodenajasta riippuen, 36–50 %. Alimmillaan kosteus on loppukesällä, jolloin kasvukausi on täydessä vaiheessa - tällöin puussa on lehdet ja haihduttaminen on voimakasta. Syksyä kohti kosteus nousee, mutta suurimmillaan kosteus on toukuussa kasvukauden alussa ennen lehtien puhkeamista. Havupuissa kosteusvaihtelu on vähäisempää koska neulaset ovat puussa läpi vuoden. Kuvassa 1

on Metsäkeskuksen puupolttoaineen kuivurioppaassa esitetty Roudan (2014) tekemä kuva puuhun sitoutuneen kosteuden vaihteluista eri vuodenaikoina. (Hillebrand & Kouki, 2006, 5,12–13; Puupolttoaineen kuivuriopas 2014, 5–6.)



Kuva 1. Vuodenajan vaikutus kosteuteen (Routa 2014)

Home ja sienet vaikuttavat puun ulkonäköön, mutta myös laatuun. Tuore polttopuuranka on otollinen kasvupaikka monelle home- ja lahottajasienilajille, koska se sisältää paljon sokereita, ligniiniä, selluloosaa ja vettä. Lahottajasienet syövät tervettä puuainesta alentaen samalla puuaineen tiheyttä ja painoa. Homesienet tarvitsevat kosteutta ja kasvavat hyvin yli 20 % kosteassa puussa. Rangat tulisikin tehdä klapeiksi mahdollisimman pian, jolloin kuivuminen olisi mahdollisimman nopeaa. Tämä johtuu siitä, että halotussa puussa kuivumispinta-alaa on enemmän ja kuorella peittynyt osuus puusta on pienempi. Etenkin kesäaikana rankojen laatu heikkenee jo muutaman kuukauden aikana. Suurinta kosteus on heti kuoren alla, kuivumista rankana voidaan tehostaa kuorimalla puu tai rikkomalla puun kuorta esimerkiksi koneellisella korjuulla tai aisaamalla.

(Tuoreen sahatavaran käsittely ja kuivaus 1990, 24; Hillebrand & Kouki 2006, 5, 17–22; Kauppinen 2014, 12.)

Polttopuun kosteus vaikuttaa sen lämpöarvoon, sillä klapiin sitoutunut vesi vaatii höyrystymiseen energiaa alentaen näin luovutettavan lämmön määrää. Klakit ovat polttokelpoisia, kun niiden kosteus on 15–25 % välillä. Hyötysuhde



on suurempi, mitä kuivempaa puu on. Eli kuivan puun palaminen on tehokkaampaa ja lämpöenergiaa luovutetaan enemmän. (Puhakka ym. 2001, 5; Työtehoseura 1997, 28.)

Polttopuun lämpöarvo on kaikilla puulajeilla lähes sama. Koivua käytetään yleisesti klapipuuna, koska sen tiheys on suurempi kuin muilla puulajeilla, jolloin sen lämpöarvo on tilavuusyksikköä kohden suurempi. Kuvassa 2 nähdään koivu- ja sekapilkkeen eri lämpöarvoja eri kuivuudessa. (Työtehoseura 1997, 26,28.)

Pilkkeiden lämpömääriä eri kosteudessa  
irtto- ja pinokuutiometriä kohti.

Pilkelaji	Kosteus %	Lämpömäärä	
		kWh/i-m <sup>3</sup>	kWh/p-m <sup>3</sup>
Koivu	0	1040	1750
	10	1030	1730
	20	1010	1700
	30	990	1660
	40	970	1620
	50	930	1550
Sekalehtipuu*	0	790	1330
	10	780	1310
	20	760	1280
	30	740	1250
	40	720	1200
	50	680	1140
Sekahavupuu*	0	830	1380
	10	810	1360
	20	800	1340
	30	780	1310
	40	760	1270
	50	720	1200

\* Lehtipuun oletetaan sisältävän leppää ja haapaa molempia 50 % ja havupuun mäntyä ja kuusta molempia 50 %.

Kuva 2. Eri pilkelajien lämpöarvoja (Työtehoseura 1997)

Puun kuivuminen perustuu kosteuden siirtymiseen puusta ympäröivään ilmaan. Ilmaa kierrättämällä saadaan puu kuivumaan, koska kiertävä ilma tuo mukanaan lämpöä ja vie samalla haihtunutta vesihöyryä pois puun ympäriltä. (Tuoreen sahatavaran käsittely ja kuivaus 1990, 74.)

Tuoreessa puussa vettä on sitoutunut puun soluonteloihin ja soluseinämiin. Soluonteloiden vettä kutsutaan vapaaksi vedeksi, joka kuivumisen alkaessa haihtuu ensimmäisenä. Soluseinämiin sitoutunutta vettä kutsutaan sidotuksi

vedeksi. Tilannetta, jossa vapaata vettä ei puun sisällä enää ole, mutta soluseinämiin on vielä sitoutunut maksimimäärä vettä, kutsutaan kyllästymis- tai tasapainokosteudeksi. Tämä tasapainokosteus on 24–30 %. Tämä on myös raja-arvo, jonka jälkeen puu alkaa kuivuessaan kutistua. Klapit kutistuvat kuivuessaan n. 10 %. Puun kosteuden vähentyessä loppukosteuden pois saaminen on entistä hankalampaa, koska vesi on sitoutunut puuhun yhä tiukemmin. (Siimes 1983, 24; Tuoreen sahatavaran... 1990, 40, 75, 90.)

Vesi liikkuu puussa solukoiden välillä höyrystymällä, sitoutumalla viereiseen soluun ja kulkeutumalla solujen välissä. Kuivatessa vesi siis liikkuu puun sisältä pintaa kohti. Puun kuivumisessa olennaista on puun koko; mitä pienempää puu on, sitä lyhyempi reitti puuhun sitoutuneella vedellä on kohti pintaa. Lämpötila vaikuttaa puussa olevan veden haihtumisnopeuteen; mitä lämpimämpää puu on, sitä nopeammin puun sisältämä vesi kykenee siirtymään kohti puun ulkopintaa ja haihtumaan puun pinnalta. Kun puu saavuttaa tasapainokosteuden, puun kuivumista rajoittaa puun sisäosien lämpötila. Mitä lämpimämpää puumateriaali on, sitä tehokkaammin vesi kykenee siirtymään kohti pintaa. (Siimes 1983, 24; Tuoreen sahatavaran... 1990, 40, 75; Kauppinen 2014, 11.)

Puu materiaalina on hygroskooppista, ja se pyrkii tasapainokosteuteen ympärillä olevan ilman kanssa, jolloin puusta ei haihdu vettä ilmaan eikä ilmasta haihdu puuhun vettä. Puu ei kuitenkaan kykene sitomaan ilmasta nk. ”vapaata vettä”, eli klapien tapauksessa kerran kuivuneet klapit eivät kostu enää takaisin ns. tuorekosteuteen, vaikka ne olisivat pitkään varastossa. (Siimes 1983, 24; Tuoreen sahatavaran... 1990. 40, 75; Kauppinen, 2014, 11.)

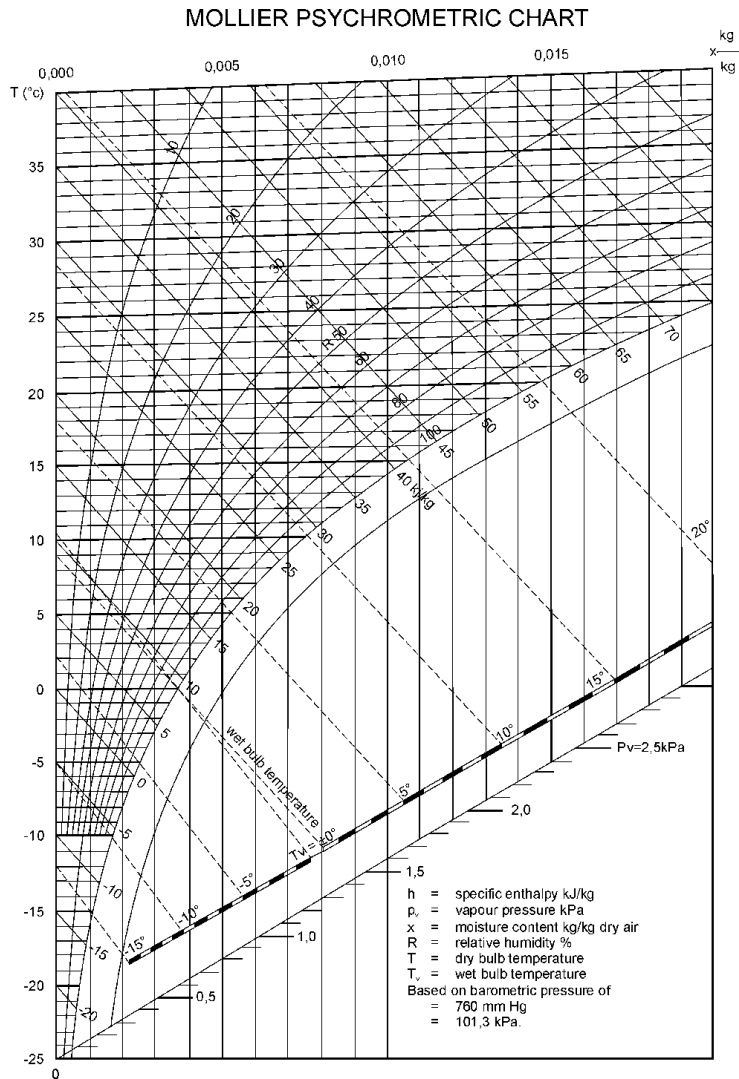
### **3.1 Ilman ominaisuudet klapien kuivaamisessa**

Klapien kuivuminen perustuu klapien pinnan ohi virtaavaan ilmaan, johon vesi pystyy vapaasti höyrystymään. Lämpötila vaikuttaa siihen, kuinka paljon vesihöyryä ilmassaan pystyy sitoutumaan ja kuinka nopeasti prosessi tapahtuu. Kun ilman suhteellinen kosteus alkaa lähestymään 100 % eli ilman kyllästymispistettä, ei ilmaan enää yksinkertaisesti mahdu enempää vesihöyryä.

Vastaavasti, mitä alhaisempi ilman suhteellinen kosteus on, sitä paremmin siihen pystyy sitoutumaan vesihöyryä. Ilman kokonaisenergiamäärä (entalpia) ei tällöin muutu, vaan energia muuttaa vain olomuotoaan. (Vääräsmäki 2003, 8; Culpepper 1990, 156.)

Ilman ominaisentalpia eli lämpösisältö tarkoittaa ilmamäärään sitoutuneen energian määrää. Tämä energia on siirretty ilmamassaan esimerkiksi lämmityspatterin tai auringon avulla. Entalpia on sitä suurempi, mitä enemmän ilmaan on sitoutunut vesihöyryä ja mikä on kuivan ilmamassan lämpötila. Ilman kyky sitoa kosteutta riippuu ilman lämpötilasta ja ominaisentalpiasta. Vapaa vesihöyry, mikä ei mahdu sitoutumaan ilmaan, tiivistyy takaisin nesteeksi. (Harju 2008, 40; Halminen, Kuvaja & Köttö. 1994, 8.)

Ilman suhteellista kosteutta voidaan tarkastella hx-piirroksen avulla, jota kutsutaan tekijänsä Richard Mollierin mukaan Mollier-diagrammiksi (kuva 3). Diagrammissa esitetään ilman lämpösisältö ( $h$ ) sekä vesisisältö ( $x$ ). Sitä käytetään yleisesti ilmanvaihtolaitteistoja mitoitettaessa, koska piirroksista saatujen pistekohtaisten arvojen tarkkuus on riittävä ilman tarkkaa yksityiskohtaista laskemista. (Harju 2008, 40.)



Kuva 3. Mollier-diagrammi

Mollier-diagrammissa ilma esitetään seuraavien suureiden avulla:

- |  |           |
|--|-----------|
| 1. Kuivan ilmakilogramman lämpösisältö | h(kJ/kg)  |
| 2. Kuivan ilmakilogramman vesisisältö  | x (kg/kg) |
| 3. Ilman kokonaispaine                 | p(kPa)    |

Apusuureina käytetään lämpötilaa (t) ja suhteellista kosteutta (rh). (Halminen, Kuvaja & Köttö. 1994, 132.)

Tarkasteltaessa Mollier diagrammia lämpötila suureita on kaksi: Märkä sekä kuiva. Kuiva lämpötila tarkoittaa suoraan ilmassa lämpötilaa anturilla mitattuna. Märkälämpötila on arvo, joka saadaan mittaamalla lämpötila märkään kankaaseen kiedotulla anturilla.

(Halminen, Kuvaja & Köttö. 1994, 132.)

Suhteellinen kosteus on arvo, jolla nähdään, kuinka paljon vettä on sitoutunut ilmassaan. Suhteellinen kosteus on arvo, joka saadaan vertaamalla kuivaa ja märkää lämpötilaa Mollier-diagrammista. Kun kankaaseen käärityn anturin ympäriltä haihtuu ilmaan vettä, jäädyttää tämä anturin pintaa ja alin lukema, minkä anturi osoittaa, on märkälämpötila. Kuiva- ja märkälämpötilasta voidaan päätellä ilmassan suhteellinen kosteus etsimällä Mollier-diagrammista kummankin arvon janan risteyskohdasta. (Culpepper 1990, 156.)

Suhteellisen kosteuden mittaamiseen on olemassa mittareita, jotka ilmoittavat suoraan ilman suhteellisen kosteuden. Tällainen on esimerkiksi psykometri, joka perustuu kuiva- ja märkälämpötilan mittaamiseen. Kosteutta voidaan mitata myös hius- tai bimetalli-mittareilla, joissa mittaus tapahtuu mekaanisesti. Kun ilman suhteellinen kosteus muuttuu, muuttuu myös mittaelementin pituus. (Suomen Lämpömittari Oy 2020; Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2014a. 89.)

Ilman absoluuttinen kosteus tarkoittaa kuivan ilman tosiasiallista vesisisältöä (g/kg), eli kuinka monta grammaa vesihöyryä on sitoutunut kiloon kuivaa ilmaa. Määrä pystytään lukemaan Mollier-diagrammista, mutta se voidaan myös laskea. Absoluuttista kosteutta käytetään ilmastointiprosessien laskennassa ja mitoituksessa. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2014a. 81, 85.)

Mollier-diagrammista saadaan myös muita hyödyllisiä tietoja klapien kuivaamisen kannalta. Tällainen tieto on esimerkiksi kastepistelämpötila. Kastepiste tarkoittaa sitä ilman kuivalämpötilaa, jossa ilmaan sitoutunut vesihöyry alkaa tiivistymään takaisin vedeksi, eli silloin ilma on kylläistä eikä siihen mahdu enempää vesihöyryä. Piste sijaitsee vesihöyryn kyllästyspaineikäyrällä, joka on samalla myös suhteellisen kosteuden 100 % käyrä, eli ilmaan ei mahdu enempää vettä. (Ilmastointilaitoksen mitoitus. 2014b 86; Harju P. 2008. 38.)

Vesihöyryn tiivistymistä vedeksi kutsutaan kondensoitumiseksi. Se ilmenee yleensä pinnalla, joka on kylmempi kuin ilman kastepistelämpötila. Tällaiseen pintaan törmäävästä ilmasta tiivistyy vettä heti pintaan osuessaan. Kun lämpötila ja ilman vesisisältö on suuri, tiivistyvät vesimäärät voivat olla isoja. (Harju P. 2008. 38, 39, 48.)

Ilmanpaineen vaihtelut eivät ole suuria matalissa lämpötiloissa, joten taulukko esitetään yleensä normaalissa ilmanpaineessa, joka on 101,3 Kpa. Tarkkoja laskelmia tehdessä tulee ilmanpaine ottaa huomioon. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. 2014a. 86; Halminen, Kuvaja, Köttö. 1994, 132)

### 3.2 Klapien kuivausprosessi

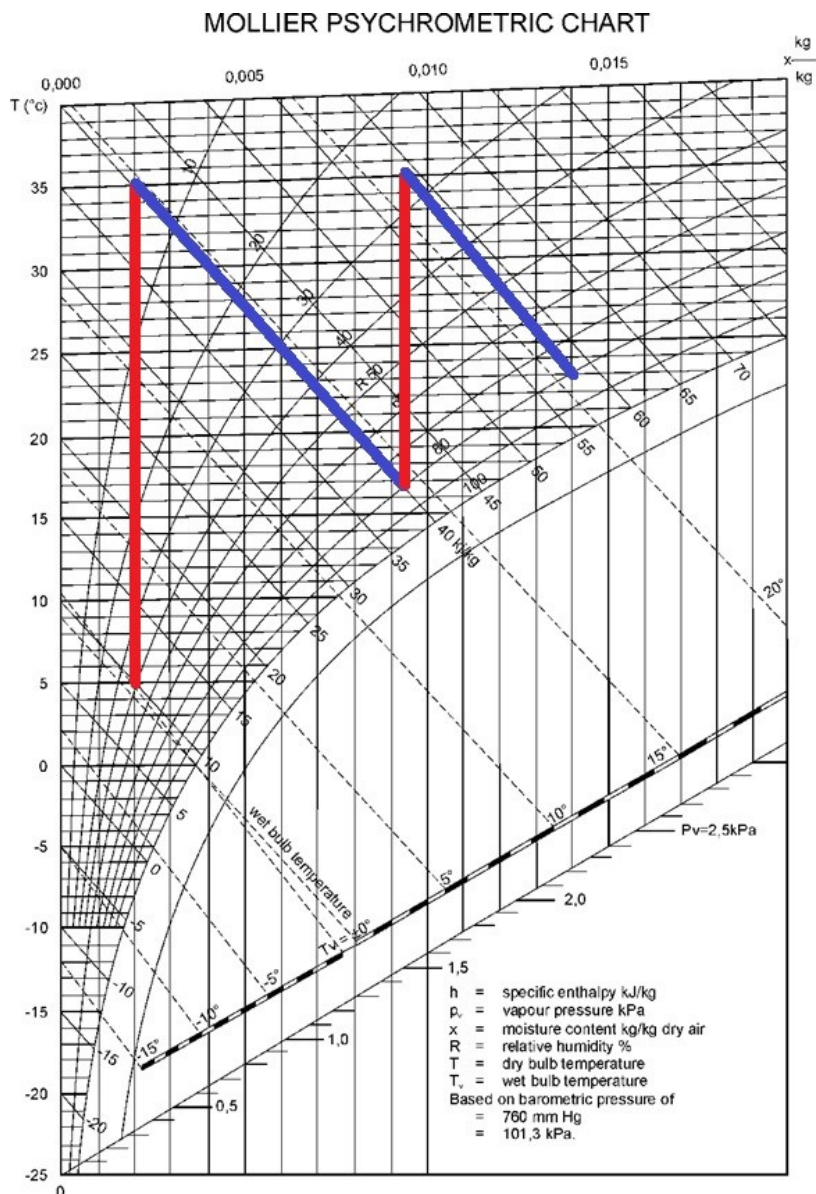
Klapien kuivausprosessi on käytännössä ilman kostuttamista klapeista höyrystyvällä vedellä. Vesikostutuksessa ilmamassaan haihdutetaan nestemäistä vettä. Veden höyrystymislämpö on 2501 kJ/kg, eli jokaista kilogrammaa nestemäistä vettä kohti tarvitaan edellä mainittu määrä lämpöenergiaa, jotta siitä tulisi vesihöyryä, joka voisi sekoittua ilmamassaan. (Harju P. 2008. 40.)

Ilmamassaan haihtuva vesi jäädyttää ilman lämpötilaa suhteellisen kosteuden ja vesisisällön noustessa. Eli ilman ominaisentalpia ei muutu, vaan kaikki höyrystymiseen tarvittava lämpöenergia siirtyy kuivan ilman lämpöenergiasta vesihöyryyn ja ilman kuiva lämpötila laskee. Kun ilman suhteellinen kosteus saavuttaa 100 %, ilma saavuttaa nk. kyllästymispisteen, eikä siihen enää pysty sitoutumaan enempää vesihöyryä. (Harju P, 2008, 39–41; Halminen, Kuvaja & Köttö. 1994, 144–145)

Lämmittämällä ilmaa esimerkiksi lämmityspatterilla siihen ei sitoudu, eikä siitä poistu vesihöyryä, tätä kutsutaan nk. vapaaksi lämmöksi ja Mollier-diagrammia katsomalla nähdään, että ilman kuivalämpötila nousee samalla, kun suhteellinen kosteus laskee, ja ilman absoluuttinen veden määrä pysyy samana, koska sitä ei tule mistään lisää. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2014a. 85; Halminen, Kuvaja & Köttö. 1994, 141.)

Kuvassa 4 nähdään kärjistetysti, mitä ilmalle tapahtuu prosessin aikana. Todellisuudessa lämpötilaerot ovat pienempiä ja itse kuivausprosessissa pyritään pitämään märkä- ja kuivalämpötila suhteellisen tasaisena ja suhteellinen kosteus mahdollisimman korkeana, jolloin kosteuden poistaminen on tehokasta.

Punainen viiva kuvaa lämmitysvaihetta, jossa prosessiin tuotua ulkoilmaa (+5 °C rh 40 %) lämmitetään lämmityspatterissa +35 °C, jolloin suhteellinen kosteus on alle 10 %. Lämmitetty ilma ohjataan puukasan läpi, jolloin puukasassa oleva vesi höyrystyy ilman mukaan ja jäähdyttää sitä. Sininen viiva kuvaa tätä osaa. Kun ilma on päässyt puukasan läpi, on ilma viilentynyt n. 17 °C -asteiseksi ja suhteellinen kosteus on noussut n. 80 % tietämille. Nyt ilma johdetaan uudestaan lämmityspatterin läpi ja prosessi toistuu, jolloin samaan ilmassaan saadaan sidottua lisää vettä. Kun prosessissa olevan ilman kosteus alkaa lämmitettynä lähennellä 100 %, ei siihen enää voida enempää vettä sitouttaa, jolloin se ohjataan pois prosessista ja otetaan sisään uutta ilmaa. (Harju P. 2008. 41; Culpepper L. 1990, 264–266.)



Kuva 4. Ilman olotilan muutokset

### 3.3 Klapien kuivausmenetelmät

Keväällä ja kesällä ilmankosteuden ollessa matala klapien kuivuminen ulkoilmassa on tehokasta ja varsinaista lisäkuivuria ei tarvita. Toukokuuhun mennessä tehdyt klapit kuivuvat yleensä yhden kesän aikana, riittävästi ennen lämmityskautta. Pilkkeiden kuivumisaikaan vaikuttavat sääolosuhteet ja vuosien välillä on eroa riippuen sademäärästä, lämpötilasta ja tuuliolosuhteista (Työtehoseura 1997; Ämmälä 2012, 18.)

Ympäristöministeriön rakennusasetuksessa uuden rakennuksen energiatehokkuudesta kuvataan eri alueilla vertailuarvona käytettäviä säätietoja. Taulukossa L1.2. on Helsingin säävyöhykkeen säätiedot ja auringon kokonaisenergia eri kuukausina. Taulukosta nähdään, että Huhti–Kesäkuussa auringon kokonaissäteilyenergia on suurta, mutta koska ulkoilman keskilämpötilat ovat pieniä, on ilman suhteellinen kosteus pieni ja ilmaan kykenee sitoutumaan paljon vesihöyryä.

Taulukko 1. Säätiedot kuukausittain (Ympäristöministeriö 2017)

<i>Taulukko L1.2. Säätiedot kuukausittain säävyöhykkeellä I Helsinki-Vantaa.</i>		
Kuukausi	Ulkoilman keskilämpötila, $T_u$ , °C	Auringon kokonaissäteilyenergia vaakatasolle, $G_{\text{säteily, vaakapinta}}$ , kWh/m <sup>2</sup>
Tammikuu	-3,97	6,2
Helmikuu	-4,50	22,4
Maaliskuu	-2,58	64,3
Huhtikuu	4,50	119,9
Toukokuu	10,76	165,5
Kesäkuu	14,23	168,6
Heinäkuu	17,30	180,9
Elokuu	16,05	126,7
Syyskuu	10,53	82,0
Lokakuu	6,20	26,2
Marraskuu	0,50	8,1
Joulukuu	-2,19	4,4
Koko vuosi	5,57	975

Luonnonkuivaus on yleisin tapa kuivata klapeja, mutta kaupallisessa mittakaavassa ongelmaksi muodostuvat varastointitilojen riittämättömyys ja erilaiset laadunvaihtelut. Luonnonkuivauksen onnistumisen edellytyksenä on se, että ilman kulku klapiikasassa ei ole estynyt millään tavalla. Tällä tavoin varmistee-



taan riittävä kuivuminen ja homehtumista ei tapahdu merkittävästi. Koska la-  
hottajasierien elävät +20 - +30 °C lämpötilassa, on huonosti tuulettuvassa kos-  
teassa klapiikasassa sopivat olosuhteet sienten kasvulle. (Ämmälä 2012, 18;  
Työtehoseura 1997, 24; Hillebrand & Kouki 2006, 32.)

Luonnonkuivauksen tehostettu versio on kylmäilmakuivaus, jossa kylmä ul-  
koilma puhalletaan tai imetään klapien läpi ja puhalletaan taas ulos. Imuperi-  
aateella toteutetussa kuivurissa ilman ohjaus on helpompaa kuin puhalluspe-  
riaatteella toimivassa, jolloin riskinä on, että ilma kiertää klapiikasan ohi eikä  
kuivumista tapahdu kaikissa osissa klapiikasaa. Kylmäilmakuivauksessa siis  
tehostetaan ilmankiertoa, jolloin puiden ohi virtaa enemmän ilmaa, johon vesi-  
höyry pystyy sitoutumaan ja kyllästynyt ilma johdetaan nopeammin klapien se-  
asta pois. Kylmäilmakuivurin heikkous on sääalittius. Kuivuria on mahdollista  
käyttää ainoastaan, silloin kun ilman suhteellinen kosteus on riittävän matala  
sitouttamaan itseensä riittävästi vesihöyryä. Kylmäilmakuivauksessa virtaa-  
vaan ilmaan mahtuu vettä noin 1–2 g / ilmakilo. Kylmäilmakuivuri mitoitetaan  
yleensä siten, että ilman puhallus on riittävä. Yleinen mitoitussääntö on 200  
m<sup>3</sup> / h / kuivattava klapikuutio. (Hillebrand & Kouki 2006,34; Ämmälä, 2012,  
18–19; Kauppinen 2014, 25–26.)

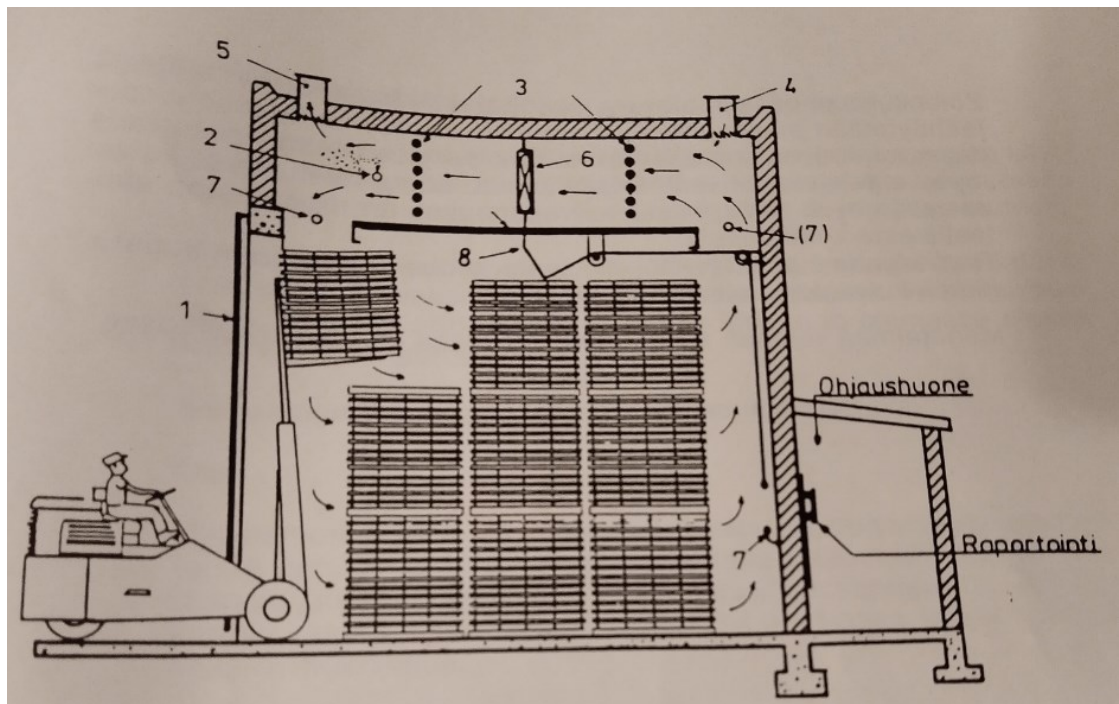
Kylmäilmakuivausta voidaan tehostaa lisäämällä lisälämpöä esimerkiksi aurin-  
gosta, öljylämmittimestä tai muusta lämmönlähteestä. Lisälämmöllä alenne-  
taan ilman suhteellista kosteutta, eli parannetaan vedensitomiskykyä lisää-  
mällä kuivan ilmamassan entalpiaa. Lisälämmön käyttö kuivauksessa edellyt-  
tää käyttäjältä paljon huolellisuutta ja prosessin ohjausta, että lämpöön hu-  
kattu energia saadaan hyödynnettyä kuivumisessa tehokkaasti, koska ilmaa ei  
kierrätetä klapiikasassa, vaan se puhalletaan pois välittömästi klapien läpi kul-  
jettuaan. (Vääräsmäki 2003, 10–11; Kauppinen 2014, 25–26.)

Tehokkain kuivausmenetelmä on sahatavaran kuivauksessa käytetty lämminil-  
makuivaustekniikka. Lämminilmakuivaus mahdollistaa ympärivuotisen klapien  
kuivaamisen. Lämminilmakuivauksessa kuivausilman lämpötila on alle 100 °C  
ja ilma kiertää erillisessä kammiossa, jossa kuivattava puutavara on kuivauk-  
sen ajan. (Hillebrand & Kouki 2006, 34.)

Lämminilmakuivurityyppejä on jatkuvatoimisia ja kamariperiaatteella toimivia. Kustannustehokkainta on käyttää jatkuvatoimista kuivuria, mutta se vaatii yhtäjaksoista polttopuutuotantoa ympäri vuoden ollakseen kustannustehokasta. (Puupolttoaineen kuivuriopas 2014, 34.)

Jatkuvatoimisessa kuivurissa sahatavara ladataan kuivurin toisesta päästä sisään ja niput liikkuvat kuivurin sisällä eteenpäin saavuttaen kuivurin toisen päässä ollessaan täysin kuivia. Kuivausilmaa kierrätetään kuivurissa vastakkaiseen suuntaan kuivurin läpi, jolloin kostunut ilma lämmittää puutavaraa ennen kuin se otetaan pois kuivauskammioista. Kuivurissa ilman kierrätykseen ja lämmitykseen vaadittavat puhaltimet ja lämmityspatterit sijaitsevat kuivauskammion yläpuolella. Kuivausprosessia hallitaan kammion alku- ja loppupään sijoitetuilla mittareilla. (Tuoreen sahatavaran... 1990. 46.)

Kamarikuivuriperiaatteella toimiva kuivuri on joustavampi klapien valmistuksen kannalta. Kamarikuivurissa lämmin ilma kierrätetään samalla periaatteella, mutta kuivurin sisällä on vain yhden kostuussisällön omaavaa puutavaraa. Kuivurin etuna on jatkuvatoimiseen kuivuriin verrattuna helpompi hallittavuus ja erikokoisen puiden kuivausohjelman helpompi säädettävyys. Kuvassa 5 on esitetty perusperiaate kamarikuivurista (Tuoreen sahatavaran... 1990. 56–57)



Kuva 5. Kamarikuivaamo (Tuoreen sahatavaran... 1990)

## **4 KLAPIKUIVURIN RAKENNE**

### **4.1 Kuivurissa käytettävät rakennusmateriaalit**

Kuivurirakennuksen materiaalivalinnat ja rakennustapa vaikuttavat energiankulutukseen merkittävästi. Seinän rakenteen, ovien, läpivientien ja saumojen tiiviyteen tulee kiinnittää huomiota. Kuivaustilan sisällä vallitsee korkea vesihöyryn osapaine verrattuna ulkoilmaan, jolloin vesihöyry tunkeutuu helposti pienestäkin raosta rakenteiden sisään ja kondensoituu siellä. Lisäksi kylmäsillat aiheuttavat kosteuden tiivistymistä materiaalien pinnoille, missä vesi voi aiheuttaa lahoamis- ja korroosiovaurioita rakenteisiin. (Culpepper 1990. 290–291, Siimes 1983. 64–66.)

Eristysmateriaalina on mahdollista käyttää normaaleja rakennuseristeitä, mutta niiden vedensitomiskyvyissä on eroa. Jos rakenteeseen tulee käytössä-reikä tai kolhu, jonka kautta vesihöyry pääsee tunkeutumaan eristeen sisään, voi se aiheuttaa eristeiden vettymisen ja lämmöneristyskyvyn heikkenemisen. Ovissa eristeiden lisäksi huomiota tulee kiinnittää tiivisteisiin ja niiden toimintaan. Tiivisteet ovat kuluvia osia, ja niiden vaurioituminen aiheuttaa energiankulutuksen lisääntymistä, kun kostea lämmin ilma pääsee karkaamaan hallitsemattomasti vaurioituneisiin tiivisteisiin syntyneistä raoista. (Culpepper 1990. 114–116, 290–291, Siimes 1983. 64–66.)

### **4.2 Kuivurin ilmanvaihto**

Puuta kuivataan kuivausilman avulla, joka kiertää kuivauskammiossa. Kuivausilma tuo puuhun lämpöä ja siirtää kosteutta pois. Jotta kuivausilma saadaan liikkumaan, tarvitaan puhaltimia. Lämmön siirtymistä ilmasta puuhun edesauttaa ilman pyörteinen käyttäytyminen. Jotta ilmavirta olisi pyörteistä, tulee ilman nopeuden olla vähintään 2 m/s polttopuukasan eri osissa. Kuivurin ilmankiertoa ja nopeutta säädetään kuivurin suhteellisen kosteuden perusteella. Jos kosteus on liian suuri, ilman kiertoa lisätään. Vastaavasti liian matala suhteellinen kosteus aiheuttaa kuivausvirheitä sahatavarassa, jolloin ilmankiertoa tulee vähentää. (Culpepper 1990. 130–131, Tuoreen sahatavaran... 1990. 57, 75, 86.)

Kuivaava ilmavirta tulee ohjata mahdollisimman tarkasti kuivattavan puumas-  
san läpi. Jos ilma pääsee kiertämään puukasan ohi, nostaa se kuivausaikaa ja  
sitä myöten energian kulutusta. Ilman virtausta ohjataan erillisillä ohjaimilla,  
joita sijoitellaan eri puolille kuivuria estämään ilman ohivirtauksen puukasan  
ylä- ja alapuolelta sekä sivuilta. Ohjurit ovat yleensä aseteltavia kuivuria lastat-  
taessa ja ne voivat olla kumia, terästä tai puuta. (Culpepper 1990. 96–114,  
Tuoreen sahatavaran... 1990. 60.)

Suunniteltaessa kuivurin ilmanvaihtojärjestelmää puhutaan prosessi-ilmastoin-  
nista. Järjestelmä siis mitoitetaan prosessin vaatimien arvojen mukaan. Kui-  
vauksen kannalta erittäin tärkeää on tasainen ilmavirta koko kuivattavan mate-  
riaalin läpi. Jos ilmavirta ei ole tasainen, voivat eri osat kuivattavasta materiaa-  
lista kuivua huonosti tai jäädä kosteaksi. (Culpepper 1990. 130–131, Ilmas-  
tointitekniikan mitoitus 2014. 535.)

Kuivurissa puhaltimet joutuvat hankaliin olosuhteisiin. Ilmaa kierrätettäessä  
lämpötila ja kosteus nousevat. Etenkin kosteus on vaarallista moottorin metal-  
likuoriselle rakenteelle. Kun puhallin käynnistetään kylmänä, alkaa lämmintä  
kosteaa ilmaa virrata moottorin ohi. Kosteassa ilmassa oleva vesihöyry saat-  
taa kondensoitua moottorin johtojen pinnalle aiheuttaen oikosulkuja. (Culpep-  
per 1990. 130–131)

Ilmavirran mitoitukselle ei ole olemassa tarkkaa kaavaa, mutta eri lähteistä on  
saatavissa kokemukseräiseen tietoon perustuvia arvioita. Sahatavarakuivu-  
reissa mitoituspäätteenä pidetään ilman kiertonopeutta, ja ne ovat suh-  
teessa paljon suurempia kuin klapiin kuivaamisessa. Esimerkiksi ”Tuoreen sa-  
hatavaran käsittely ja kuivaus” -julkaisussa optimaalisena nopeutena pidetään  
3–5 m/s. Larry Culpepper viittaa sopivan nopeuden olevan 3,6–5,6 m/s (700–  
1100 jalkaa minuutissa). Markku Vääräsmäki viittaa klapien ohjeelliseksi ilman  
nopeudeksi 360–720 m/h eli 0,1–0,2 m/s. Toisaalta samassa julkaisussa tode-  
taan, että sahatavarakuivurissa kuivatusta pilkkeestä tulee laadullisesti pa-  
rasta. (Culpepper 1990. 137, Tuoreen sahatavaran... 1990. 75; Vääräsmäki  
2003, 14,34.)

Suurin merkitys ilmavirran nopeudelle on silloin, kun klapien kosteus on yli kylästyspisteen. Silloin kaikki vapaa vesi, mikä vain kykenee irtoamaan klapeista, irtoaa ohi virtaavaan ilmaan. Kun klapien kosteus laskee alle kyllästyspisteen, alkaa sisältä pintaa kohti siirtyvän veden siirtymisnopeus rajoittaa ilmavirran mukaan haihtuvan veden määrää ja ilmavirran nopeutta voidaan laskea energian säästämiseksi. (Culpepper 1990, 231.)

Vastapaine on sitä suurempi, mitä kovempaa ilma kulkee, tämä vaikuttaa puhaltimen sähkökulutukseen. Klapien kuivaamisessa paine-ero on pienempi kuin esimerkiksi hakkeella, mutta koska klapien kuivuvan pinta-alan määrä on paljon pienempi, tarvitaan enemmän ilmavirtausta, jotta puut kuivuvat tasaisesti. Kuivattavan tavaran tulisi olla mahdollisimman tasakokoista, jotta kaikki puut kuivuisivat yhtäaikaisesti. (Puupolttoaineen kuivuriopas 2014, 24.)

### **4.3 Kuivurin lämmitys**

Lämminilmakuivureita lämmitetään tyypillisesti vesipattereilla, joissa käytettävän veden lämpötila saisi olla +80–120 °C. Patterin lämmitystehoa säädetään veden lämpötilaa muuttamalla. Vesipatteri mitoitetaan tarvittavan energiantarpeen mukaan siten, että se kykenee lämmittämään kuivurissa kiertävän ilman riittävän korkeaksi kuivausaikana. Kamarikuivaamotyyppisessä kuivurissa tehontarve normaaliin lämmityskäyttöön verrattuna on noin 3-kertainen. (Siimes 1983. 72.)

Lämmityspatteri voi olla muodoltaan lamelli- tai ripaputki tyyppinen. Patterin materiaalivalinnalla pystytään vaikuttamaan patterin kestoikään, koska eri puulajeista haihtuu ilman mukaan aineita, jotka voivat syövyttää esim. alumiinia. Toisaalta haponkestävästä teräksestä valmistetut patterin lamellit ovat hankintakustannukseltaan suurempia kuin alumiinisten. (Siimes 1983. 72, Tuoreen sahatavaran... 1990. 46.)

## 5 KLAPIEN KUIVAUSKOE

Klapien kuivausta kokeiltiin pienessä mittakaavassa autotallissa, jossa on erillinen 5 metriä leveä ja 8 metriä pitkä kokoonpano/huoltotila. Autotallin kokonaisala on 80 m<sup>2</sup> ja kokeessa käytetty osa käsitti puolet siitä. Tilan jakamiseksi oviaukko peitettiin pressulla.

Koelaitoksen tarkoituksena oli testata ja etsiä mahdollisia ongelmakohtia kuivausjärjestelmän toteutuksessa, tutkia teorian toteutumista käytännössä, sekä tutkia energian kulutusta, ja sen jakautumista eri osa-alueisiin. Koelaitoksen avulla tehtiin myös varsinaista mitoitustyötä auttavat vertailulaskelmat, joilla pystyttiin skaalaamalla mitoitettavaan varsinaisen kuivurin tehontarve ja kuivauskapasiteetti.

Autotallirakennuksen johtumislämpöhäviöt laskettiin Excel-laskentataulukon avulla. Taulukko on liitteenä 1. Rakennus on 1995 rakennettu puurakenteinen, tuulensuojalevyllä ja 125 mm paksulla lasivillalla eristetty. Seinän u-arvo on 0,3005 w/m<sup>2</sup>k. Katto on eristetty saman paksuisella lasivillaeristekerroksella. Sisäverhoiluna on käytetty kipsilevyä. Katon u-arvo on 0,3331 w/m<sup>2</sup>k. Alapohja on betonirakenteinen valettu laatta, jonka u-arvo on 0,0501 w/m<sup>2</sup>k. Tilassa on kolme ikkunaa ja iso nosto-ovi, joiden u-arvona on käytetty laskennassa 1,5 w/m<sup>2</sup>k.

Rakennuksen rakenneosien johtumislämpöhäviö laskettiin kaavalla 1.

$$\Phi_{\text{joht}} = \Phi_{\text{ulkoseinä}} + \Phi_{\text{yläpohja}} + \Phi_{\text{alapohja}} + \Phi_{\text{ikkuna}} + \Phi_{\text{ovi}} + \Phi_{\text{kylmäsiljat}} \quad (1)$$

Jossa

$\Phi_{\text{joht}}$	Johtumislämpöhäviö	[W]
$\Phi_{\text{ulkoseinä}}$	Johtumislämpöhäviö ulkoseinien läpi	[W]
$\Phi_{\text{alapohja}}$	Johtumislämpöhäviö Alapohjan läpi	[W]
$\Phi_{\text{ikkuna}}$	Johtumislämpöhäviö ikkunoiden läpi	[W]
$\Phi_{\text{kylmäsiljat}}$	Kylmäsiltojen johtumislämpöhäviöt	[W]

Eri rakenneosien johtumislämpöhäviö kaavalla 2.

$$\Phi_{\text{rakenneosia}} = \sum U_i A_i (T_{\text{sisäilma}} - T_{\text{ulkoilma}}) \quad (2)$$

Jossa

$\varnothing_{rakenneosa}$	Johtumilämpöhäviö rakenneosan läpi	[W]
$U_i$	Rakenneosan lämmön läpäisykerroin	[W/m <sup>2</sup> K]
$A_i$	Rakenneosan pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$T_{sisäilma}$	Sisäpuolen lämpötila	[°C]
$T_{ulkoilma}$	Ulkopuolen lämpötila	[°C]

Eri rakenneosien kylmäsillat kaavalla 3.

$$\varnothing_{Kylmäsilta} = \sum l_k \Psi_k (T_{sisäilma} - T_{ulkoilma}) \quad (3)$$

Jossa

$\varnothing_{Kylmäsilta}$	Kylmäsilan johtumislämpöhäviö	[W]
$l_k$	Viivamaisen kylmäsilan pituus	[m]
$\Psi_k$	Viivamaisen kylmäsilan lisä konduktanssi	[W/m K]
$T_{sisäilma}$	Sisäpuolen lämpötila	[°C]
$T_{ulkoilma}$	Ulkopuolen lämpötila	[°C]

Apuna käytettiin myös puufon tarjoamaa Excel-taulukkoa U-arvojen määrittämiseksi.

## 5.1 Koelaitoksen toiminta

Kuivauskoetta varten ei tehty mitään hankintoja, vaan käytettiin olemassa olevaa kalustoa ja mittareita. Autotallirakennuksen ilmanvaihtoventtiilit suljettiin lukuun ottamatta koetilassa ollutta venttiiliä, jotta pystyttiin arvioimaan paremmin poistuvan veden määrää kanavassa.

Koe aloitettiin pilkottujen puiden sisään ajolla. Puut pilkottiin edellisenä päivänä härkeihin klapi-koneella ja ajettiin aamulla halliin hake kerrallaan. Hallin lämpötila kokeen alussa oli noin +15 °C.

Kuivausosan runkona toimi henkilöauton kevyt perävaunu, jonka päälle oli tehty kolme heittomottia klapi metallihäkkeihin. Lisäksi perävaunun taakse pi-

nottiin 4 häkkiä puita lattialle, joiden tehtävänä oli toimia vertailukohtana perävaunussa oleville puille. Puut olivat vastaavia, ja oletus oli, että ne kuivuisivat lämmön vaikutuksesta kärryssä olevien puiden mukana.

Kiertoilmapuhaltimena käytettiin vanhaa liikekiinteistöstä purettua 1 kW tehoista potkuripuhallinta, jonka ilmavirta oli noin 1 m<sup>3</sup>/s luokkaa. Puhaltimella imettiin ilmaa häkkien läpi ja ilman virtausnopeuden häkkien läpi laskettiin olevan 1 m/s.

Ilman virtausnopeus laskettiin kaavalla 4.

$$v_{ilma} = q_{v,ilma} / A_{virtausaukko} \quad (4)$$

Jossa

$v_{ilma}$	Ilman virtausnopeus	[m/s]
$q_{v,ilma}$	Ilman massavirta	[m <sup>3</sup> /s]
$q_{v,ilma}$	Virtausaukon pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]

Ilman kierron ohjaamiseksi puuhäkkien päälle oli levitetty pressu, joka imun ansiosta painautui kiinni klapihäkkeitä vasten. Järjestely on esitetty kuvassa 6. Menetelmä pakotti ilman liikkumaan häkkien läpi. Reunoja tuettiin painoilla, jolloin ilmanvirtaus saatiin kulkemaan häkkijonon sisään toisen pään avonaisesta osasta. Heti alussa havaittiin, että ilma pyrki kulkemaan häkkien ali, joten puhaltimen alareuna häkkien edestä tukittiin, jolloin ilma joutui kulkemaan puilla täytetyn osan läpi.

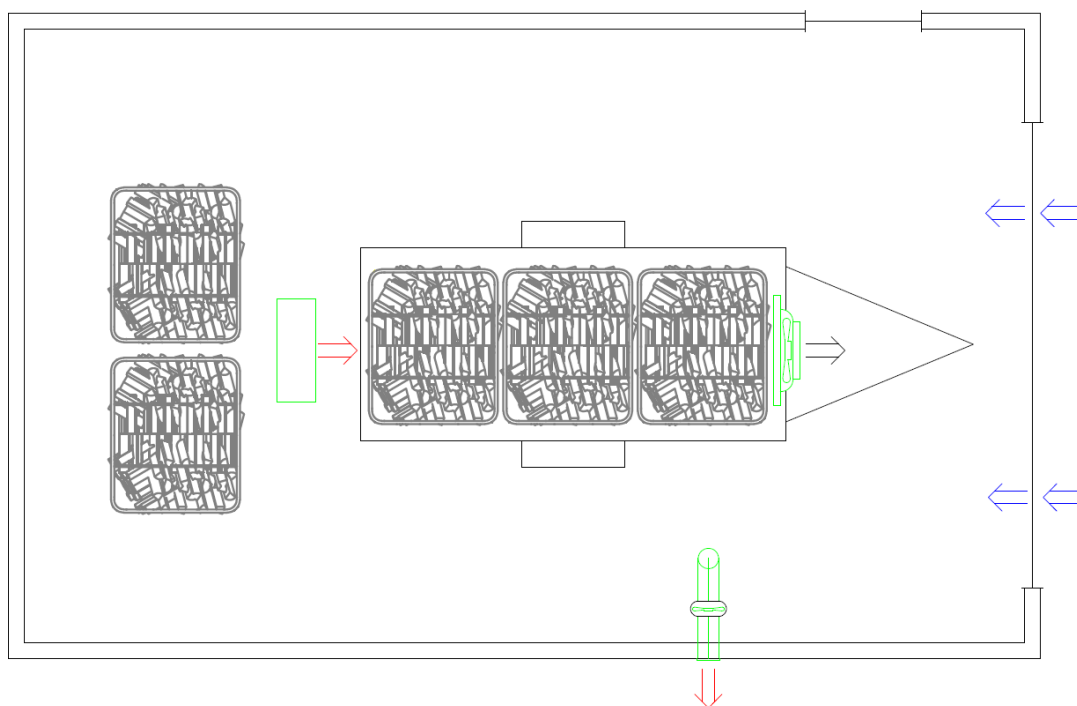




Kuva 6. Kuivausperävaunu ja puhallin

Huonetilan ilmaa lämmitettiin sähköpattereiden lisäksi öljykäyttöisellä lämmitimellä, joka sijaitsi perävaunun vastakkaisella puolella kuin puhallin. Ilmaan sitoutunut vesi johdettiin ulos hyödyntäen autotallirakennuksessa ollutta poistoilmakanavistoa. Korvausilman otossa hyödynnettiin poistoilmahuoltimen luomaa paine-eroa ja ilma tilaan saatiin nosto-oven alareunasta pitämällä harjan vartta kahdessa kohtaa tiivisteen ja betonilattian välissä.

Kuvassa 7 näkyy tilan pohjakuva, polttopuiden asettelu ja ovien sijainti tilassa. Kuvaan on merkitty myös, miten ilmankierto tilassa oli toteutettu.



Kuva 7. Koelaitos pohjakuva

Kuivattavana materiaalina käytettiin kuvassa 8 näkyvää ylivuotisesta koivurangasta tehtyä klapiä, joka oli kaadettu keväällä 2019. Ranka oli kuivunut tien laidassa kasassa osittain, joten se ei ollut enää täysin märkää. Klapeista tarkistettiin kosteuksia satunnaisotannalla. Klapit olivat halkaisun jälkeen mitattaessa vielä kosteita ja piikkikosteusanturin lukema vaihteli riippuen puun kohdasta 35 % - 50 % välissä. Klapirangan vahvuus oli 15-20 cm välillä ja klapit pilkottiin keskimäärin neljään osaan, jolloin poikkileikkaus oli maksimissaan 10 cm.



Kuva 8. kosteat klapit ennen kuivausta

Lämmittimenä käytettiin Airrex AH-200 -säteilylämmittintä (kuva 9), joka asetettiin aivan perävaunun avatun perälaidan taakse. Infrapunalämmittimen säteilyominaisuuden ansiosta lämpö johtui kääryssä oleviin puihin hyvin, vaikka ilman kierron saamiseksi jouduttiin käyttämään lisäksi erillistä puhallinta.

Kuivaus tapahtui useana perättäisenä päivänä, ja lämmitin sammutettiin yöksi palovaaran takia. Käytännössä lämmitin oli päällä noin kymmenen tuntia vuorokaudessa ja ilman suhteellinen kosteus lähti nousemaan lyhyen ajan kulluttua siitä, kun lämmitin oli käynnistetty. Tilassa käytiin keskimäärin tunnin välein tarkistamassa, että kaikki on kunnossa.





Kuva 6. Öljykäyttöinen lisälämmitin

## 5.2 Mittausmenetelmät

Puun kosteutta mitattiin Trotec BM18 -piikkikosteusmittarilla, joka perustuu vastusmittaukseen (kuva 10). Mittari oli hankittu pari vuotta aikaisemmin omaa klapin valmistusta varten. Valmistaja ei ilmoita mittarille tarkkuutta, mutta tämän tyylinen mittari on riittävän tarkka, kun arvioidaan puun polttokelpoisuutta.

Puun kosteus mitataan halkaisemalla puu kahteen osaan ja syntyneen halkeaman pintaan työnnetään mittauspiikit. Tällä menetelmällä voidaan varmistua, että mahdollisesti pinnalta nopeammin kuivunut osa ei muuta mitaustulosta.

Puiden kosteutta mitattiin satunnaisotannalla eri puolilta klapikaa jokaisena päivänä, ja tuloksista laskettiin keskiarvo.



Kuva 7. Puun kosteusmittari

Huoneilman suhteellista kosteutta mitattiin Trotec BC06 -kosteusmittarilla (kuva 11), jolla voidaan mitata huoneilman lämpötila sekä suhteellinen kosteus. Mittarilla mitattiin huoneilman lisäksi tilaan tulevan ja sieltä poistuvan ilman kosteutta sekä klapihäkkien läpi virtaavan ilman kosteutta. Mittarin suhteellinen kosteusarvo mitataan elektronisella mittapäällä ja valmistaja ilmoittaa mittaus tarkkuuden olevan +0–60 °C lämpötiloissa 5%.



Kuva 8. Ilman suhteellisen kosteuden mittari

Tilasta poistuvan ilman lämpötila ja kosteus mitattiin poistoilmakanavan suulta sekä sen ympäriltä. Poistoilmamäärä laskettiin kuvassa 12 näkyvän poistoilmapuhaltimen tietojen perusteella. Puhallin oli ONNLINEN 160 mm kanavapuhallin, joka imi kuivaustilan katosta ilmaa ja sen ilmansiirtokyky oli 767 m<sup>3</sup>/h. Puhaltimen tietojen perusteella laskettiin myös tilan ilmanvaihtokerroin kaavalla 5.

$$\text{Ilmanvaihtokerroin} = v_{\text{tila}} / q_{v,\text{poistoilmapuhallin}} \quad (5)$$

Jossa

$v_{\text{tila}}$	Tilan ilmatilavuus	[m <sup>3</sup> ]
$q_{v,\text{poistoilmapuhallin}}$	Poistoilmapuhaltimen massavirta	[m <sup>3</sup> /s]



Kuva 9. Poistoilmapuhallin

Koska autotallia ei ollut suunniteltu tämän tyyppiseen toimintaan ja rakennuksen kosteuskestävyys ei ollut hyvä, poistoilmapuhallin käynnistettiin heti kokeen aloittamisen jälkeen ja se pysyi käynnissä kokeen loppuun saakka.

### 5.3 Kuivauskokeen mittaustulosten käsittely

Kuivauskoetta jatkettiin aloituspäivän lisäksi neljänä perättäisenä päivänä, kuivaaminen jouduttiin lopettamaan 5. päivänä autotallin rakenteellisen kestävyysden takia.

Kuivauskokeessa tehtyjä havaintoja kirjattiin liitteenä 2 olevaan taulukkoon, johon kirjattiin keskimääräisen ulkoilman lämpötila, sisäilman lämpötila sekä kummankin absoluuttinen vesimäärä suhteellisen kosteuden avulla. Mittauksia tehtiin aistinvaraisesti sekä mittareiden avulla pari kertaa päivässä. Suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mitattiin kolme-neljä kertaa päivän aikana eri kohdista tilaa.

Kokeen aikana autotallin lämpötila oli noussut maksimissaan n. 30 asteeseen. Tästä pystyttiin laskemaan autotallin lämmitystehontarpeen kuivauksen aikana. Se oli 6,36 kW. Tilassa olevat sähköpatterit, joiden lämmitysteho oli 4 kW, pidettiin käytössä kokeen ajan, kuivaamiseen varatun lämmittimen lisäksi lämpötehon tarpeeksi laskettiin olevan 2,36 kW. Loput 11,64 kW olivat siis käytettävissä varsinaiseen kuivaamiseen, koska lämmitin oli lämmitysteholtaan 14 kW.

Poistuneen veden määrä kuivaustilasta laskettiin vertaamalla absoluuttisen vesimäärän erotusta poistuvan ja tilaan imettävän korvausilmaan, joka oli rakennuksen ympärillä vallitseva ulkoilma.

Poistuneen veden määrä laskettiin kaavalla 6.

$$m_{\text{poistunut vesi}} = t_{\text{kuivausaika}} * q_{v,\text{poistoilma}} * \rho_{\text{ilma}} * (AH_{\text{poistuva ilma}} - AH_{\text{ulko ilma}}) \quad (6)$$

Jossa

$m_{\text{poistunut vesi}}$	Poistuneen veden määrä	[kg]
$t_{\text{kuivausaika}}$	Kuivausaika	[h]
$q_{v,\text{poistoilma}}$	Poistoilman massavirta	[m <sup>3</sup> /s]
$\rho_{\text{ilma}}$	Ilman tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$AH_{\text{poistuva ilma}}$	Poistuvan ilman absoluuttinen kosteus	[g/kg]
$AH_{\text{ulko ilma}}$	Ulkoilman absoluuttinen kosteus	[g/kg]

Energian kulutusta tarkasteltiin laskemalla eri aineiden lämmittämiseen vaadittun energian määrä, kun tiedettiin polttopuun massa ja puuhun sitoutuneen veden määrä.

Puun kiinteän aineen lämmittäminen kaavalla 7.

$$Q_{\text{lämmitysenergia}} = m_{\text{puu kiintoaines}} * c_{p \text{ puu}} * (T_{\text{sisäilma}} - T_{\text{ulkoilma}})/3600 \quad (7)$$

Jossa

$Q_{\text{lämmitysenergia}}$	Lämmittämiseen tarvittava energia	[kWh]
$m_{\text{puu kiintoaines}}$	Puuaineksen massa	[kg]
$c_{p \text{ puu}}$	Puun ominaislämpökapasiteetti	[Kj/Kg K]
$T_{\text{sisäilma}}$	Puun tavoitelämpötila (hallin lämpötila)	[°C]
$T_{\text{ulkoilma}}$	Puun sisääntulolämpötila (ulkolämpötila)	[°C]

Puuhun sitoutuneen veden lämmittäminen kaavalla 8.

$$Q_{\text{lämmitysenergia}} = m_{\text{puu vesi}} * c_{p \text{ vesi}} * (T_{\text{sisäilma}} - T_{\text{ulkoilma}})/3600 \quad (8)$$

Jossa

$Q_{\text{lämmitysenergia}}$	Lämmittämiseen tarvittava energia	[kWh]
$m_{\text{puu vesi}}$	Puuhun sitoutuneen veden massa	[kg]
$c_{p \text{ vesi}}$	Veden ominaislämpökapasiteetti	[Kj/Kg K]
$T_{\text{sisäilma}}$	Puun tavoitelämpötila (hallin lämpötila)	[°C]
$T_{\text{ulkoilma}}$	Puun sisääntulolämpötila (ulkolämpötila)	[°C]

Korvausilman lämmittäminen kaavalla 9.

$$Q_{\text{lämmitysenergia}} = m_{\text{korvausilma}} * c_{p \text{ ilma}} * (T_{\text{sisäilma}} - T_{\text{ulkoilma}})/3600 \quad (9)$$

Jossa

$Q_{\text{lämmitysenergia}}$	Lämmittämiseen tarvittava energia	[kWh]
$m_{\text{korvausilma}}$	Ilman massa	[kg]
$c_{p \text{ ilma}}$	Ilman ominaislämpökapasiteetti	[Kj/Kg K]
$T_{\text{sisäilma}}$	hallin lämpötila	[°C]
$T_{\text{ulkoilma}}$	ulkolämpötila	[°C]



Veden höyrystymiseen käytetty energia laskettiin kaavalla 10.

$$Q_{\text{höyrystys}} = \frac{m_{\text{vesi}} * r_{\text{vesi}}}{3600} \quad (10)$$

Jossa

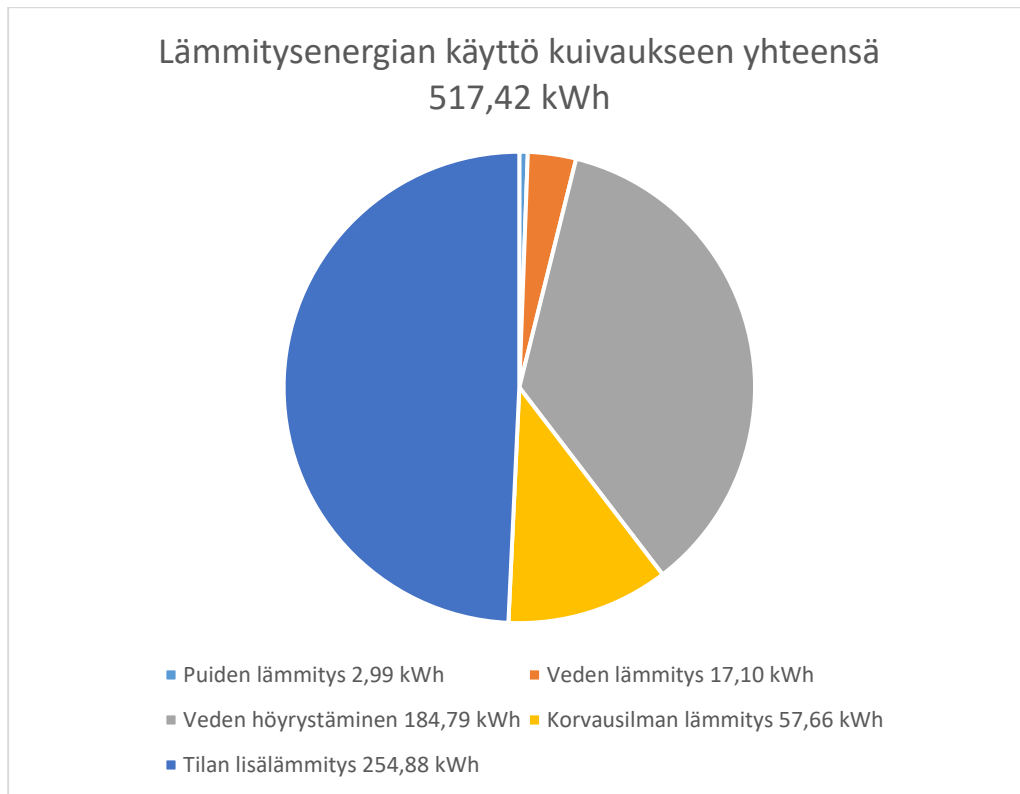
$Q_{\text{höyrystys}}$	Höyrystymiseen tarvittava energia	[kWh]
$m_{\text{vesi}}$	Veden massa	[kg]
$r_{\text{vesi}}$	Veden höyrystymislämpö	[Kj/kg]

## 6 KUIVAUSKOKEEN TULOKSET

Kun klapien kosteutta tarkasteltiin kuivauskokeen jälkeen eri kohdista, oli kaikki testiklapit ulkopinnaltaan alle 20 % kosteudessa, parhaimmat olivat alle 17 %. Halkaistaessa sisältä löytyi suurempia eroja, mutta perävaunun päällä olleista häkeistä ei testatessa löytynyt klapeja, joiden sisällä kosteus olisi ollut yli 25 %. Kaikki vapaa vesi oli siis päässyt irtautumaan klapeista pois, ja sitoutuneen veden siirtyminen puiden pintaan oli alkanut myös häkkien keskellä, josta yksittäisiä kosteampia puita löytyi. Puut olivat myös aistinvaraisesti tulkituna kuivan tuntuisia, kevyitä ja paloivat hyvin takassa. Jos kuivauskoetta olisi jatkettu vielä muutamalla päivällä, olisivat kaikki perävaunussa olleet klapit todennäköisesti tulleet kuiviksi.

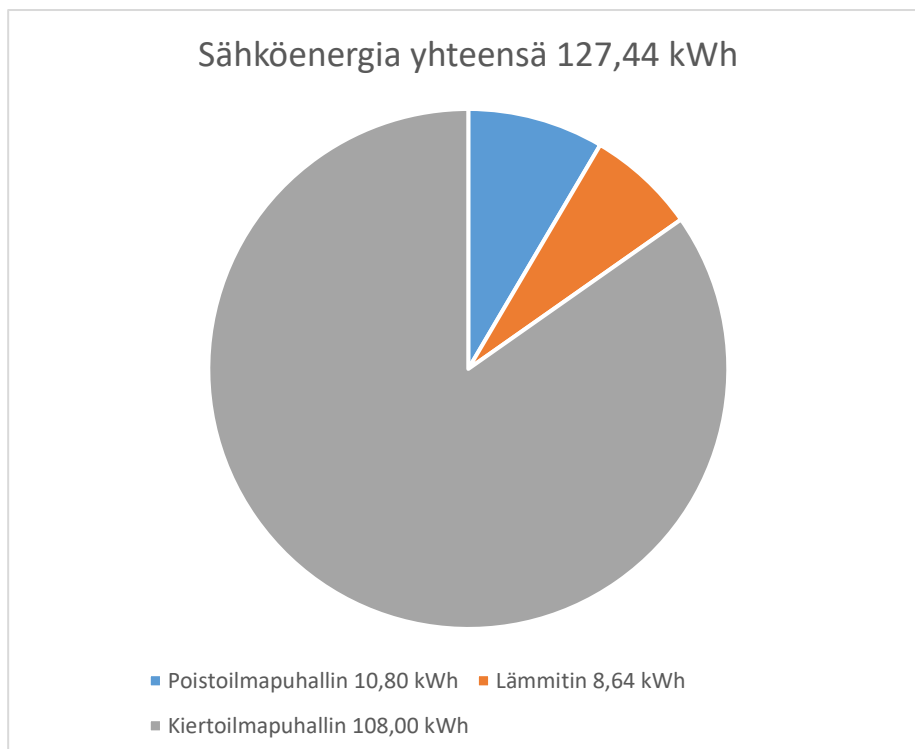
Perävaunun takana olleet neljä häkkiä eivät kuivuneet testin aikana ollenkaan. Häkkien ulkoreunalla olleiden puiden pinnat kuivuivat, koska lämmitin säteili niihin lämpöä, mutta halkaisun jälkeen todettiin, että puut olivat sisältä vielä märkiä. Syvemmältä häkkejä tutkittaessa havaittiin puiden pinnoilla myös homeetta, koska ilma ei ollut päässyt kulkemaan puiden välissä ja tilassa ollut lämpötila loi homeelle otolliset olosuhteet kasvaa.

Polttopuiden kuivaamiseen kului noin 60 litraa polttoöljyä. Kuvassa 13 nähdään miten polttoöljystä ja sähköstä saatu lämmitysenergia jakautuu eri kulutuskohteisiin. Lämmitysenergiaa kului kuivaustilan lämpimänä pitämisen lisäksi polttopuiden lämmittäminen 0 asteesta noin 30 -asteiseksi, puihin sitoutuneen veden lämmittämiseen samaan lämpötilaan, veden höyrystymiseen ja korvausilman lämmittämiseen.



Kuva 10. Lämmitysenergian käyttö

Polttopuiden kuivaamiseen kului myös sähköenergiaa. Kuvassa 14 nähdään, miten sähköenergian kulutus jakaantui eri kulutuskohteiden välillä. Sähköenergian kulutusta ei mitattu kulutusmittarilla, se laskettiin sähkölaitteiden tehojen perusteella.



Kuva 14. Lämmitysenergian käyttö

## 7 KLAPIKUIVURIN MITOITUS

Kuivauskokeessa tehtyjä havaintoja verrattiin laskennallisesti tehtyihin mittaustuloksiin Excel-taulukossa ja niiden yhteneväisyyden perusteella voitiin kuivaamorakennukselle tehdä mitoitus työ skaalaamalla saatuja tuloksia ja laskeamalla osa mittaustuloksista käänteisesti. Kuivauskokeessa tehtyjen havaintojen perusteella suunniteltiin kuivaamon layout, jossa kiinnitettiin huomiota ilman ohjaamiseen ja käyttäytymiseen.

### 7.1 Toimintaperiaate

Kuivuri on alun perin suunniteltu kylmäilmakuivuriksi, johon tuodaan puhallusilmaan lisälämpöä vanhalla viljankuivausuunilla. Suunnitelma päädyttiin kuitenkin toteuttaa kertatäyttöisen sahatavarakuivurin periaatteella, koska rakenne soveltuu tiiveytensä takia siihen ja kaikkea lämpöä ei tarvitse tällöin puhaltaa saman tien rakennuksesta ulos. Lisäksi tiedossa oli, että tilalle oli suunniteltu 150 kW lämmityskattilaa, joten sen teho tulisi paremmin hyödynnettyä kamarikuivuriperiaatteella toimivassa kuivurissa. Kuvassa 15 näkyy kuivaamorakennus. Se on varustettu kahdella nosto-ovella ja sen sisäpinta-ala on n. 65 neliötä.



Kuva 15. Kuivaamorakennus

Kamarikuivausperiaatteella toimiva kuivuri täytetään polttopuilla ja kuivausprosessi käynnistetään. Kuivaushuonetta aletaan lämmittämään puhallinpatereiden avulla kierrättämällä ilmaa huoneessa. Kun huoneen lämpötila nousee, alkaa puista haihtumaan kosteutta ilmaan, koska ilman suhteellinen kosteus laskee ja vesihöyry kykenee sitoutumaan kiertävään ilmamassaan.

Ilman suhteellisen kosteuden noustessa riittävän korkeaksi, imetään osa kosteasta ilmasta ulos kuivurista poistoilmapuhaltimen avulla ja samalla tilalle otetaan kuivempaa ilmaa ulkoa, jolloin ilmaan sitoutuneen vesihöyryn määrä laskee tilassa. Poistoilman määrä pyritään mitoittamaan siten, että ilman suhteellinen kosteus ei laskisi liikaa, vaan poispuhallus voisi toimia lähestulkoon jatkuvasti ilman, että kuivaamotilassa olevan ilman lämpötila jäähtyisi. Jos ilma alkaa jäähtyä, suljetaan poispuhallus ja ilman annetaan kiertää ja lämmentä uudestaan.

Kuivausprosessin jatkuessa ilman suhteellinen kosteus alkaa laskea, kun puu saavuttaa kylläisyyskosteuden ja kiertävään ilmaan ei enää haihdu vettä yhtä nopeasti. Tämän jälkeen suhteellinen kosteus tilassa alkaa laskea pikkuhiljaa alaspäin. Kun suhteellinen kosteus ei enää laske, puut ovat kuivia, prosessi pysäytetään ja kuivuri sammutetaan. Tämän jälkeen puita voidaan varastoida kuivurissa tai se voidaan tyhjentää ja aloittaa uusi kuivauserä.

Koska kuivurin maksimikapasiteetti on iso, oli tila suunniteltu jaettavaksi kahteen osaan. Ilmankierto suunniteltiin siten, että tilaan asennetaan kaksi itsenäisesti toimivaa kuivausaluetta. Tällä tavalla kuivuria on mahdollista käyttää myös puolitäytöllä jakamalla tila PVC-verhokankaalla keskeltä kahtia. Puolitäytön huonona puolena on kuitenkin se, että koko tila tulee lämmittää yhtä lämpimäksi, jolloin rakennuksen lämmitystehontarve suhteessa kuivattavaan puumäärään on suurempi.

## **7.2 Kuivurin lämmitysjärjestelmän mitoitus**

Lämmitystehontarpeen mitoitusta varten selvitettiin rakennuksen seinien ja katon sekä yläpohjan u-arvot käyttäen hyväksi rakennepiirrustuksia sekä

haastattelemalla kuivaamorakennuksen omistajaa. Näitä tietoja hyväksikäyttäen laskettiin rakenteiden u-arvot (liite 3). Apuna käytettiin puuinfon tarjoamaa Excel taulukkoa U arvojen määrittämiseksi. Samalla tavalla kuin koekuivurissa. Kun tiedettiin rakenteiden U-arvot, pystyttiin laskemaan kuivausrakennuksen lämmitystehontarpeen kuivaushetkellä, joka oli 53 kW kun haluttu sisälämpötila oli +60 °C ja ulkolämpötila -5 °C.

Tilalle oltiin hankkimassa 150 kW lämmitysjärjestelmää, jonka kokonaishyötysuhde olisi 0,85, joten tästä pystyttiin johtamaan itse kuivaamiseen käytettävissä olevan teho 127,5 kW. Tilalla on ennestään jokaisessa rakennuksessa oma klapeilla toimiva lämmitysjärjestelmä, ja suunnitelmassa on, että hakekattila liitettäisiin verkkoon ja vanhat lämmityskattilat jäisivät varakäyttöön. Tästä syystä kuivaustehossa on jätetty huomioimatta muiden kiinteistöjen tarvitseman lämmöntarpeen -5 °C lämpötilassa ja koko hakejärjestelmästä saatava lämpöteho on laskettu polttopuukuivurin kapasiteetiksi.

Kuivurin lämmitysjärjestelmä koostuu lämmityspatterista, sekoitusventtiilistä sekä pumpusta. Koska kuivaamotila oli tarkoitus jakaa kahtia mutta toisaalta kuivuria oli tarkoitus käyttää myös puolitäytöllä, päädyttiin valitsemaan kaksi noin 100 kW tehoista lämmityspatteria, jolloin pelkästään toista patteria käyttämällä saataisiin parempi hyötysuhde, kun käytettävissä olisi enemmän tehoa suhteessa puumäärään. Lisäksi toista patteria voidaan hyödyntää tilan lämmittämiseen puolitäytöllä. Ohjeiden mukaan lämmityspatterit tulisi mitoittaa kolminkertaiseksi suhteessa lämmitystehoon, joten tässä mielessä lämmitysjärjestelmä on jopa alimitoitettu.

Patterit mitoitettiin Fläktgroup Oy:n Coils-ohjelmalla, johon syötetään halutut lähtötiedot ja halutun patterin tyyppin. Patteri on helpointa kiinnittää iv-työntölistalla puhaltimen ja patterin väliin tulevaan puhallinkammioon, jolloin liitoksesta tulee pitävä ja asennus kattoon on yksinkertainen. Kuvassa 18 näkyy ohjelmaan syötetyt arvot, ja sen perusteella saatiin myös vaaditun nesteen tilavuusvirtaaman selvitettyä pumpun mitoitus varten. Pumpun mitoituksessa patterin painehäviön lisäksi tulee huomioida itse nestepiirin painehäviö.

Coils Lämmitys-/jäähdytyspatterit - [Metsäyhtymä Kuuskulma]

Arkisto Näytä Vaihtoehto Ohje

Vesi Höyrystän Höyry Lauhdutin

Id  
Tunniste: Lämmityspatteri

Patterisovellus  
Patterisovellus: Kanavapatteri

Ilmapuolen kehys  
 Reitetty laippaliitos  Työntölistaliitos

Patteri  
 Koteloituid kokoojaputli  Näkyvissä olevat kokoc

Tyyppi: QLHB QLHB  
Kanavan liitosmitta, leveys, mm: 2500 2500  
Kanavan liitosmitta, korkeus, mm: 1000 1000  
Putkirivien lukumäärä: 4 4  
Lamellijako: 5 5  
Vesiteiden määrä: 4 4  
Liitäntäpuoli: Oikea  
Liitäntäkkoko DN: DN1x80

Tuotetunnus ja hinta  
QLHB-250-100-04-50\_-1-A X ...  
QLHB-250-100-04-50-04-1-A  
Hinta: Hinta pyydettyessä Pattereitten lkm.: 1

Ilma  
Virta, m³/s: 6 6.0  
Lämpötila sisään, °C: 55 55.0  
Tuloilman kosteus, %: 80  
Lämpötila ulos, °C: 65 66.4  
Poistoilman kosteus, %: 47  
Nopeus, m/s: 3.4  
Painehäviö, Pa: 95

Vesi  
Lämpötila sisään, °C: 78 78.0  
Lämpötila ulos, °C: 71.7  
Virta, l/s: 4 4.00  
Etyleeniglykolia . paino %: 50  
Nopeus, m/s: 1.2  
Painehäviö, kPa: 20

Teho  
Teho, kW: 96.0

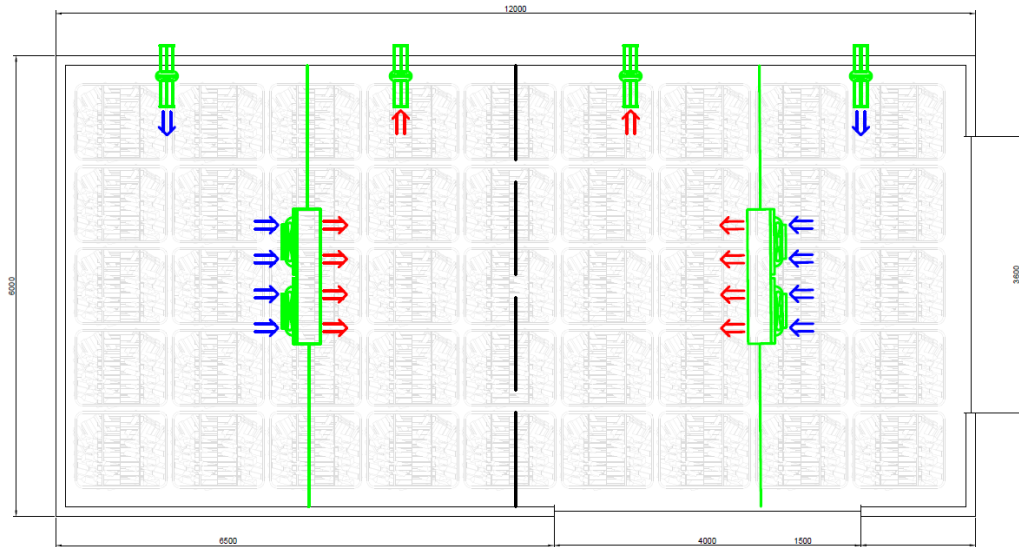
Kuva 18. Lämmityspatterin mitoitusohjelma

### 7.3 Ilmankierron suunnittelu ja mitoitus

Ilmankierron suunnittelun aloitettiin päättämällä ilman virtaus suunta ja laskemalla tarvittavan kiertoilman määrä. Laskennassa hyödynnettiin koelaitoksessa tehtyjä laskelmia ja niistä johdettua laskenta-Exceliä (liite 4).

Ilmankierron varmistamiseksi häkkien läpi puhallinpatterin kohdalle asennetaan PVC-verhokangas, joka ulottuu katosta lattiaan asti. Kun kuivuria lastataan, kangas nostetaan häkkien päälle, jolloin ilman täytyy kulkea jokaisen häkkirivin läpi, ennenkuin se nousee kohti puhallinpatteria. (kuva 16.)

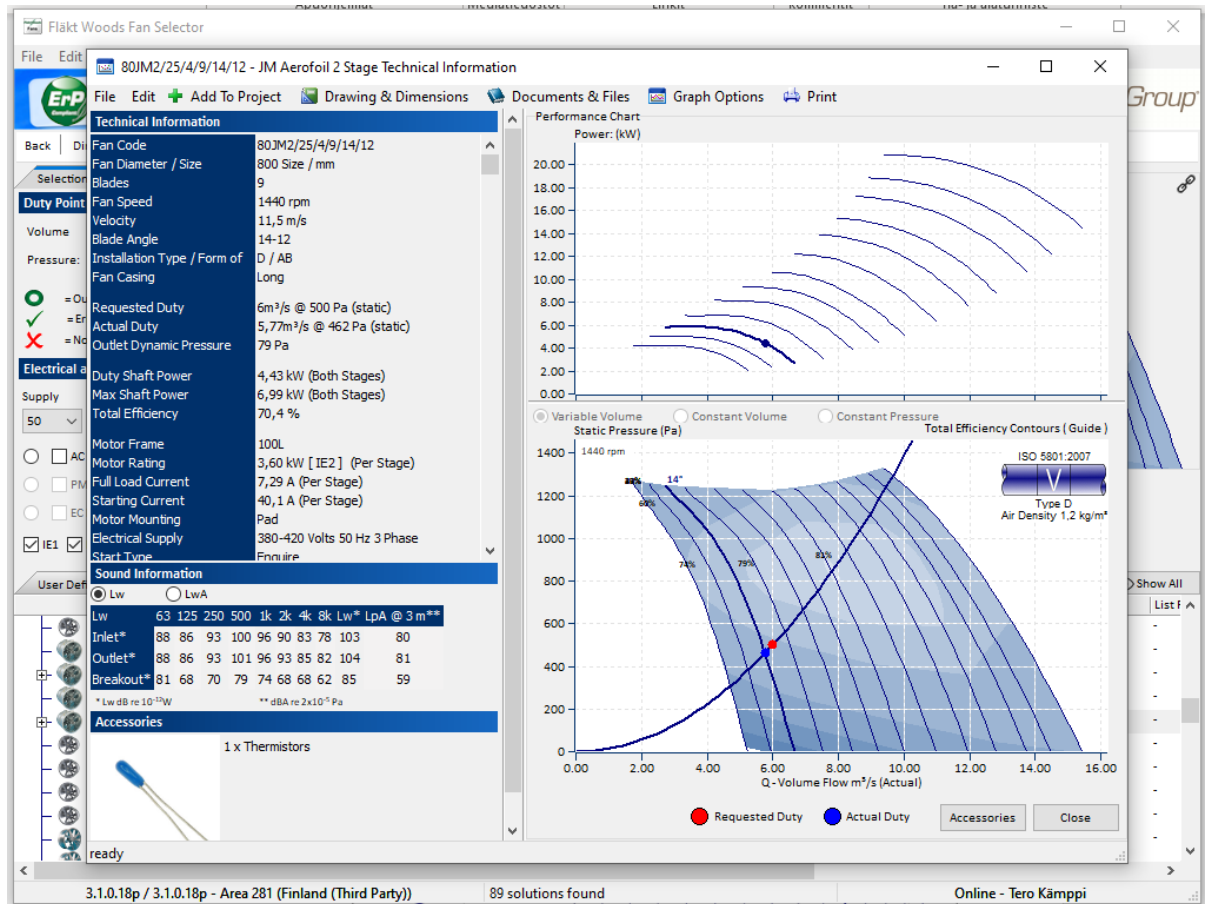
Puhallinpatterien lisäksi tilaan asennetaan ulospuhallus- ja korvausilma kanavat. Ilman vaihtokanavat sijoitettiin samalle puolelle rakennusta, jolloin on mahdollista tulevaisuudessa rakentaa lämmöntalteenottojärjestelmä. Ulkopuolella on vaarana, että poistuva ja sisään puhaltuva ilma sekoittuu, mutta tämä saadaan ratkaistua kanavoimalla poistuva ilma kauemmaksi rakennuksesta. Toisaalta kohteessa tuulee jonkin verran, joten suurta vaaraa ei ole.



Kuva 16. Kuivaamorakennus

Puhaltimia mitoittaessa käytettiin Fläktwoods'n mitoitusohjelmaa. Tarvittavan kiertoilman määrä laskettiin Excelillä (liite 4). Kun tiedettiin vierekkäisten ja päällekkäisten klapihäkkien määrä saatiin virtauspinta-alaksi 20 m<sup>2</sup>. Koska kuivaamorakennukseen ei tule isoa sähköliittymää, ei ilmanvirtausnopeutta voitu mitoittaa samaan tapaan kuin sahatavara kuivurissa ja koelaitoksessa. Ilman virtausnopeutena päädyttiin käyttämään klapien kuivaukseen annettua ohjetta, joten virtausnopeudeksi polttopuiden läpi valikoitui 0,3 m/s.

Tarvittavaksi virtausmääräksi laskettiin siis 6m<sup>3</sup>/s. Fläktwoods'n mitoitusohjelmaa hyödyntämällä valittiin aksiaalipuhallin, jonka malli on 80JM2/25/4/9/14/12. Se tuottaa 5,77 m<sup>3</sup>/s ilmamäärän 462 Pa staattisella paineella. Puhaltimet valittiin hieman järeämmät kuin mitä välttämättä tarvitsisi, jotta moottorissa riittää teho työskennellä kovassa paineessa, lisäksi suurempi moottorikoko edesauttaa riittävän jäähdytyksen varmistamiseksi myös kuumassa ilmassa (kuva 17).



Kuva 17. 80JM2/25/4/9/14/12 puhaltimen valintaohjelma

Koska tila mitoitettiin kahdella vastaavalla systeemillä, puhaltimia tuli kaksi kappaletta, yksi kummankin lämmityspatterin eteen. Yhden puhaltimen sähkötehtäjä suorituspaikassa oli 4,43 kW.

Ilmanvaihtopuhaltimet mitoitettiin vastaavalla tavalla. Excelin (liite 4) avulla laskettiin käytettävissä oleva teho veden höyrytämiseen, joka oli tilan lämmittämiseen tarvittavan tehon jälkeen 74,5 kW. Laskennassa käytettävän ilman keskimääräinen lämpötila ja suhteellinen kosteus päätettiin olevan +55 °C 65% RH. Tällöin ilmakilossa on 85 g/kg vesihöyryä.

Kuivaustehon ja keskimääräisessä lämpötilassa olevan absoluuttisen vesimäärän perusteella laskettiin poistoilmamäärä, joka voidaan poistaa tilasta suhteellisen kosteuden laskematta. Tämän laskettiin käänteisesti laskemalla kuivausrakennuksen tilavuus 284,6 m<sup>3</sup> ja sitä myötä ilmanvaihtokerroin, joka oli 3,6/h. Ilmantilavuusvirta on 1024,65 m<sup>3</sup>/h ja poistettavan veden määrä on silloin 104,51 kg/h ja veden höyrytämiseen tarvittava teho on 72,6 kW. Eli vähemmän kuin käytettävissä oleva kapasiteetti.



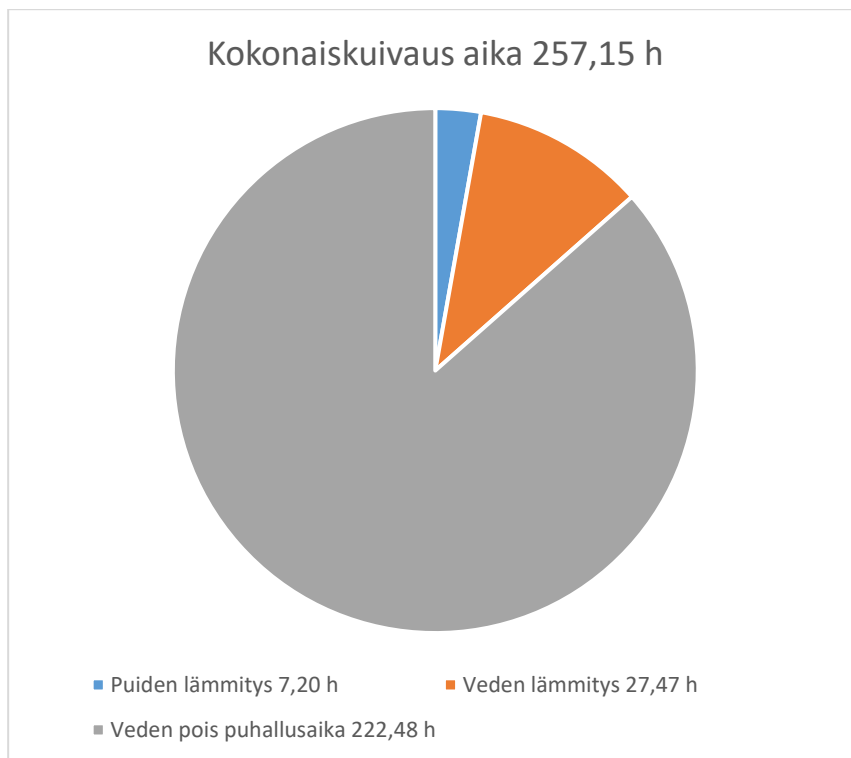
Ilmanvaihtoa mitoittaessa ei otettu huomioon korvausilman lämmittämiseen tarvittavaa energiamäärää, koska se on huomioitu kokonaiskuivausajassa ja ilmanvaihtopuhaltimet eivät käy silloin, kun tilaa lämmitetään.

Ilmanvaihtopuhallin valittiin samalla tavalla kuin kiertoilmapuhallin, Fläktwoodsin ohjelman avulla ja puhaltimeksi valikoitui 31JM/16/4/5/22, joka vaihtaa ilmaa  $1163\text{m}^3/\text{h}$  52 Pa paineenkorotuksella. Koska poistoilmakanava on lyhyt, siinä ei ole painehäviötä. Tällöin pieni paineenkorotus on riittävä koska tulo- ja poistoilmalle asennetaan samanlaiset puhaltimet ja koska tila jaetaan kahteen osaan, puhaltimia tulee 2 kpl / virtaussuunta. Kokonais sähkötehontarve kiertoilmapuhaltimilla on 0,12 kW (0,032 kW/puhallin)

#### **7.4 Kuivaamon energiankulutus ja kuivausaika**

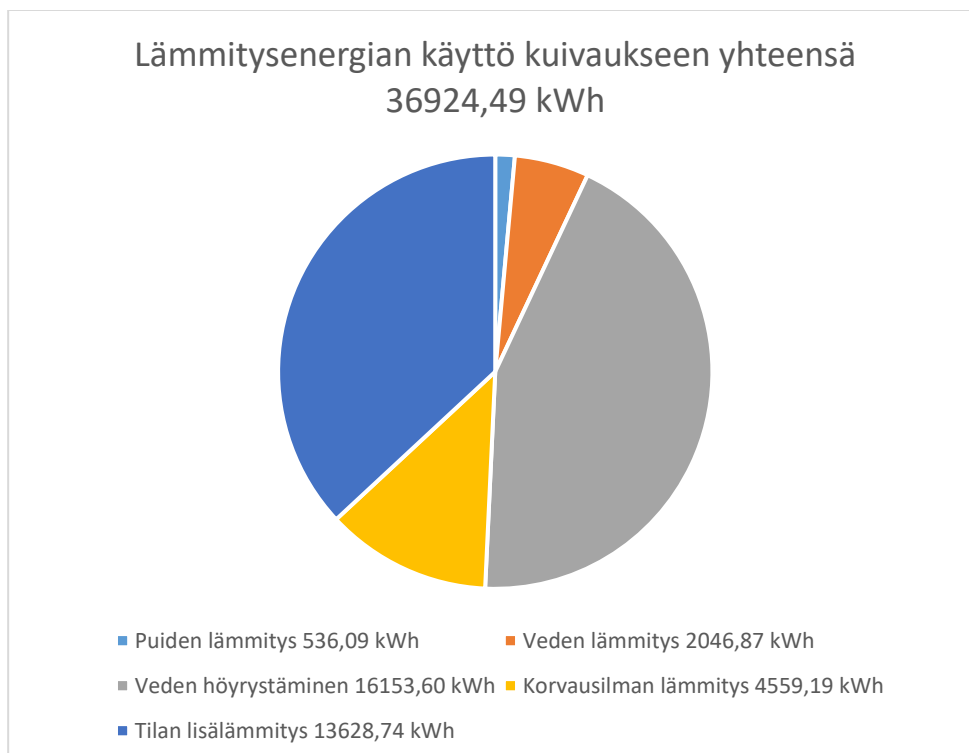
Koelaitoksesta saatujen tulosten perusteella laskettiin kuivurin energiankulutusta sekä aikaa, joka kuluu puiden kuivumiseen. Tarkka energiankulutus riippuu kuivattavan puuerän kosteudesta, vuodenajasta ja puun laadusta.

Kuvassa 19 nähdään kuivausaika, joka on noin 10 vrk. Kuivausajasta suurin osa menee veden höyrystämiseen ja pois puhaltamiseen. Kuivausaikaa voidaan nopeuttaa kuivaustehoa nostamalla, jolloin enemmän vettä voidaan puhaltaa nopeammin pois kuivurista. Aikaa menee myös puiden ja puuhun sitoutuneen veden lämmittämiseen.



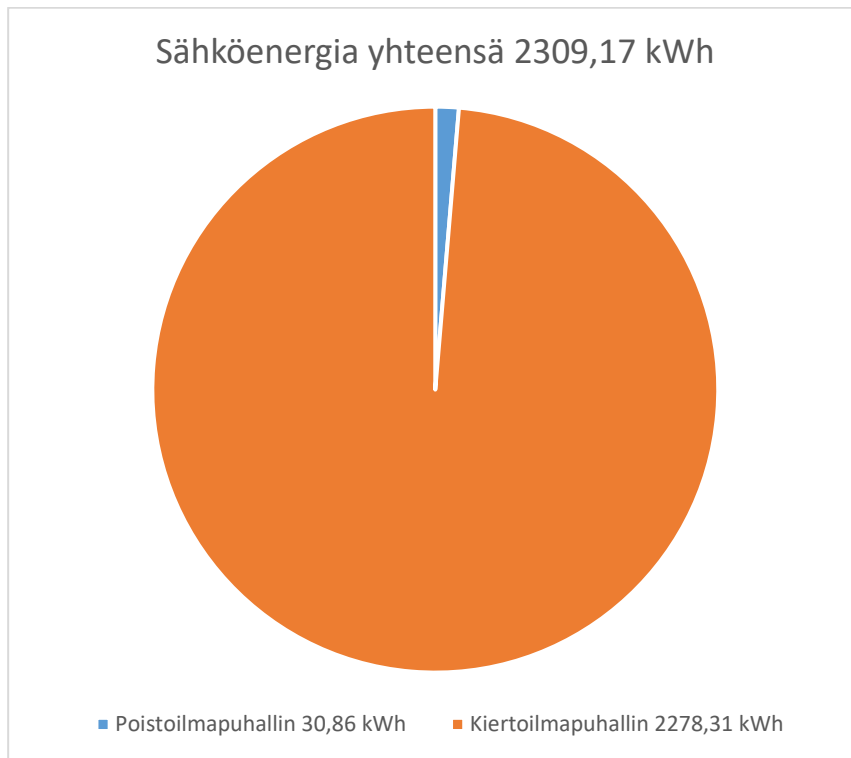
Kuva 19. Puiden kuivausaika

Kuvassa 20, on laskettu lämpöenergian tarve ja miten se jakautuu eri osaluokkiin. Suurin osa lämmitysenergiasta kuluu veden höyrystämiseen sekä tilan lämpimänä pitämiseen.



Kuva 20. Lämmitysenergian käyttöarvio kuivauksessa

Kuivurin sähköenergiantarve koostuu puhaltimien tarvitsemasta energiasta. Puhaltimien lisäksi kuivurissa tarvitaan myös lämmityspatterissa kiertävän veden pumppaamiseen energiaa, mutta sitä ei ole huomioitu, koska pumppu kuuluu hakelämmitysjärjestelmään ja pyörisi todennäköisesti jokapaikassa. Kuvasta 21 nähdään, että ylivoimaisesti suurin osa sähköenergiasta menee ilman kierrättämiseen kuivurissa.



Kuva 21. Sähköenergian käyttöarvio kuivauksessa

## 8 POHDINTA

Projekti oli erittäin mielenkiintoinen, ja oli kiinnostavaa tutustua olemassa olevaan aineistoon puun kuivauksesta. Projektin alussa huomattiin hyvin nopeasti, että varsinkin polttopuun kuivauksesta on saatavilla varsin suppeasti lähdeteoksia ja monessa teoksessa viitataan samoihin alkuteoksiin. Koska uusia lähteitä ei tuntunut helposti löytyvän, päädyttiin hakemaan teoriaa myös sahateollisuudesta. Tämä oli hyvä asia, koska sitä kautta löytyi paljon uusia ajatuksia nimenomaan teollisen kuivurin toiminnasta ja laadunhallinnasta. Toisaalta kaikki lähteet, jota puun kuivaukseen löytyi, olivat verrattain vanhoja. Ne olivat peräisin 80- ja 90-luvulta, joten etenkin automatiikka ja mitaustekniikka, jota teoksissa esiteltiin, ei olisi mitenkään relevanttia enää tänä

päivänä. Toisaalta teoria ei ole muuttunut miksiäkään, joten siltä osin lähdemateriaaleja voidaan pitää ajankohtaisina.

Mittaustekniikoista ei hirveästi pystytty hyödyntämään työssä mitään lähdekirjallisuutta, ja se puoli jätettiin siksi vähemmälle. Toisaalta toimiva klapi-kuivaamo vaatii erittäin tarkan ohjausjärjestelmän, joten suunnitelmaa voidaan tältä osin pitää vajavaisena.

Projektissa nousi myös esiin kysymys, onko polttopuiden kuivaaminen koneellisesti taloudellisesti järkevää. Kun ajatellaan, että kuivaamorakennuksessa tarvittavan lämmön ylläpitämiseksi kuluu jonkin verran lämmitysenergiaa ja itse kuivaaminen vaatii myös suuren määrän energiaa, vaikuttaa se polttopuun valmistuskustannuksiin merkittävästi. Toisaalta talvella kysynnän ollessa suurta myös polttopuun hinta on parempi ja silloin olisi hyvä pystyä vastaamaan kysyntään. Lisäksi koneellisen kuivauksen ehdoton etu on laadun tasaisuus verrattuna luonnon kuivauksella tehtävään polttopuiden kuivaamiseen, koska silloin voidaan olettaa, että suurempi osa kuivista puista on myyntikelpoisia ns. täydellä hinnalla.

Energiaa kuluu jonkin verran korvausilman lämmittämiseen, joka kertoo osaltaan siitä, että kuivaustoiminnan kustannukset nousevat, kun ulkoilman lämpötila laskee alle 0 °C asteen. Kuivauskokeessa lämpötila ero ei ollut kuin 29 Kelviniä ja energian tarve oli noin 6 litraa polttoöljyä. Jos lämpötilaero olisi ollut esimerkiksi 60 Kelviniä, olisi tuo polttoöljyn kulutus ollut huomattavasti suurempi.

Kuivauskokeessa sähköenergian kulutus koostui lähinnä puhaltimista ja infrapunalämmittimen ohjauslaitteista. Sähköenergian kulutusta on hankala optimoida muuten kuin puhaltimien nopeutta säätämällä kuivausprosessin edetessä.

Taloudellisesti ajateltuna kuivauskokeessa polttoöljyn kulutus oli huomattavasti suurempi kuin sähköenergian kulutus, ja tästä voidaan päätellä, että hakkeella käytettävä klapi-kuivuri on taloudellisempi kuin polttoöljyllä toimiva laitos.

Toinen hakelämmitysmuodon etu on se, että polttopuiden valmistamisesta syntyy paljon sahanpurua, kuorta ja muuta jaetta, jota voitaisiin hyödyntää osana polttopuiden kuivauksen vaatimaa energiaa.

### **8.1 Kuivauskokeessa tehtyjä havaintoja**

Kuivauskoe oli onnistunut, koska menetelmästä löytyi monta parantamisen arvoista kohtaa. Kun kuivauskoe aloitettiin ja ilman kierrätys alkoi, havaittiin, että ilman absoluuttinen kosteus ei merkittävästi lisääntynyt klapikasaan sisään menevän ja ulostulevan ilman välillä. Huoneilman kosteus kuitenkin nousi ja huoneilman absoluuttinen kosteus kasvoi samassa tahdissa klapikasassa kiertävän ilman kanssa.

Tämä vastasi tilannetta, mitä selostettiin useammassa kuivureihin liittyvissä oppaassa. Koska ilmasto-olosuhteet pyrkivät noudattamaan tasapainolakia, eivät muutokset ole nopeita, vaan kuivatessa kiertoilman suhteellinen kosteus pyritään ensin nostamaan mahdollisimman korkealle, ennen kuin kosteutta aletaan siirtämään ulos kuivaustilasta.

Kuivauskokeessa peräkärryn päälle tehdyn klapikasan läpi virtasi ilmaa ja se jäähtyi tehokkaasti. Tarkemmin mitatessa todettiin, että ilman jäähtymiseen vaikutti enemmän se, että infrapunalämmittimen lämmitti ympäristön pinnat suhteellisen kuumiksi, jolloin lämmittimen ympärille kerääntyvä ilma lämpeni ennen puukasan sisälle menoa. Kun ilma tuli toiselta puolelta jäähtyneenä ulos, ilmaan oli sitoutunut pari grammaa kosteutta, joten siltä osin prosessi osoitettiin toimivaksi.

Puiden kosteutta mitattiin kosteusmittarilla, ja kävi ilmi että lähimpänä lämmönlähdettä olleet puut myös kuivuivat pinnalta todella nopeasti, koska lämmitin säteili niihin paljon lämpöenergiaa. Puut olivat kuitenkin sisältä vielä kosteita ja vaikka klapin pinta oli mittarin mukaan alle 20 % kostea, saattoi halkaistun puun sisäpinta olla sormin kosketeltaessa märkä ja mittari näyttää jopa 40 % kosteutta. Kuivauksen edetessä klapien kosteus kuitenkin laski johdonmukaisesti ja suurin osa kärryn päällä olleista puista kuivui tasaisesti.

Useassa lähdekirjassa kerrottiin puun kyllästyskosteudesta, joka tarkoittaa sitä, että klapi sisältää niin kutsuttua vapaata vettä, joka irtoaa helposti puusta. Vapaata vettä poistettaessa on ilman liikkumisnopeudella iso merkitys kuivumisaikaan. Kun kyllästyskosteus on saavutettu ja aletaan siirtämään vettä enemmän soluista pois, alkaa puhallusnopeudella olla pienempi merkitys prosessin kannalta, koska nopeasti ohi virtaava ilma jäähdyttää puun pintaa ja hidastaa puun sisäosien lämpenemisprosessia. Tätä ajatusta silmällä pitäen kaikista tehokkain tapa hallita kuivausprosessin sähkönkulutusta on ohjata puhaltimien nopeutta sen mukaan, missä vaiheessa prosessia kuivaus on.

Tutkittaessa klapeja, veden siirtymien ulospäin näkyi halkaistulta pinnalta selkeästi hikoiluna. Puun sisällä vallitsi siis lämmittämisen seurauksena paine, joka pääsi vapautumaan halkaisun yhteydessä, ja polttopuun halkaisupintaan alkoi nopeasti tiivistymään vettä, vaikka kastepistelämpötila oli selkeästi matalampi kuin puun lämpötila, eli vesi ei voinut tiivistyä puun pintaan ilmasta.

Kuivatessa vesihöyry pääsi tehokkaasti siirtymään kiertävään ilmaan ja ilma poistui hyvin rakennuksesta. Poistuvaa ilmaa mitatessa todettiin, että ilman mittausta huonetilasta läheltä poistoaukkoa oli varmempaa, koska poistoilmakanavaa ei ollut eristetty ja kanavan pintaan kondensoitui todella paljon vettä, joka väärin mittaustulosta kanavan poistoaukon kohdalla ulkona.

Isona yllätyksenä tuli rakenteiden kosteuskestävyys. Vaikka hallin ilman lämpötilaa ei testin aikana saatu nousemaan yli +30 °C, oli ilmassa selkeästi merkittävästi vettä, ja tämä vesi tunkeutui autotallirakennuksen rakenteisiin erittäin aggressiivisesti. Osa kuivauskoetilan sisällä olleesta kosteasta ilmasta vuoti rakennuksen kylmälle puolelle tilan jakajana toimineen pressun ohi.

Pressu kykeni eristämään säteilylämmittimen tuottamaa lämpöä sen verran, että kylmässä tilassa kipsilevyjen pinnat olivat lähellä kastepistettä ja ilman mukana tullut vesihöyry pääsi kondensoitumaan niihin tehokkaasti. Kipsilevyn pinnassa ollut paperi kastui ja alkoi pehmentää kipsilevyjä. Tämä osoitti sen, että kylmäsiltojen merkitys kuivurissa on suuri lähinnä kosteuskestävyyden ja rakenteiden eliniän kannalta. Kun puut oli siirretty pois, jouduttiin lämmitintä ja ilmanvaihtoa pitämään täysillä vielä viikko, että sisäverhoiluun käytetyt

kipsilevyn sisään sitoutunut vesi saatiin pois ja kipsilevyt alkoivat taas tuntumaan kovilta.

Jatkokehittelynä kuivuriin olisi hyvä suunnitella vielä aurinkokeräimellä toimiva ilman esilämmitysjärjestelmä, jolloin korvausilman lämmittämiseen ei kuluisi niin paljon energiaa. Myös kiertoilmaa voisi mahdollisuuksien mukaan lämmittää osittain auringon avustuksella. Lisäksi kuivaamon lastaaminen ja tyhjentäminen ovat asioita mihin todennäköisesti tarvitsee kiinnittää paljon huomiota.

## LÄHTEET

Ari Erkkilä, T. Strömberg & K. Hillebrand. Energiapilke-konsepti polttopuun to-  
tanto- ja toimitusketjussa. 2012

<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2012/VTT-R-00152-12.pdf>

10.11.2020

Culpepper Larry. 1990. High Temperature Drying. Miller Freeman Puplicati-  
ons, inc. San Fransisco

Halminen E, Kuvaja O & Köttö R. 1994. Ilmastointitekniikka. Helsinki. Raken-  
nusalan Kustantajat RAK. Opetushallitus

Harju Pentti, Ilmastointitekniikan oppikirja 1, Penan tieto-opus Ky. Anjalan-  
koski

Hillebrand K & Kouki J. 2006, Pilkkeen kuivaus- luonnonkuivaus, keinokuivaus  
ja laadun hallonta. Työtehoseuran julkaisu 398

Jouhinaho Aki (toim.) 2004, Pilkkeen kaupallinen tuotanto. Työtehoseuran jul-  
kaisu 392

[https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE\\_04%20Metsa\\_04%20Talous\\_22%20Pientalojen%20polttopuun%20kaytto/03\\_Pientalo\\_polttop\\_lajit\\_maak.px/table/tableViewLayout1/?rxid=ef6bccc6-2f93-4970-a475-53ac1e03a8c4](https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_04%20Metsa_04%20Talous_22%20Pientalojen%20polttopuun%20kaytto/03_Pientalo_polttop_lajit_maak.px/table/tableViewLayout1/?rxid=ef6bccc6-2f93-4970-a475-53ac1e03a8c4)

30.3.2020

Marko Ämmälä, T. Valli, J. Hiitelä, J. Somerpalo, J. Raitila, A. Erkkilä, J. Viiri-  
mäki, A. Wikberg, T. Viitasaari, P. Moilanen & V.-P. Kauppinen. Pilketuotanto-  
opas. 2012. Suomen metsäkeskus.

Pirinen Hannu 1997, Polkeopas omakotitaloille, Työtehoseura.



Puhakka A, Alakangas E, Alanen V, Airaksinen L, Soini R, Sipponen T, Kainulainen S. 2001, Hakelämmitysopas, Pohjoiskarjalan Ammattikorkeakoulu

<https://puuinfo.fi/suunnittelu/mitoitustyokalu/puurakenteen-u-arvon-maarittaminen/>

<https://puuinfo.fi/suunnittelu/mitoitustyokalu/alapohjan-u-arvon-maarittaminen/>

Sandberg E. 2014a. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointiteknikka 1. Talotekniikka-julkaisut Oy

Sandberg E. 2014b. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Ilmastointiteknikka 2. Talotekniikka-julkaisut Oy

Suomen Lämpömittari Oy, Kosteuden mittaaminen, PDF dokumentti

<https://www.suomenlampomittari.fi/wp-content/uploads/2019/10/Kosteuden-mittaaminen-1.pdf> Viitattu 17.11.2020

Tuoreen sahatavaran käsittely ja kuivaus, 2. Painos 1990, Sepsilva LTD OY

Veli-Pekka Heiskanen, J. Kouki, K. Vuorio, L. Maunula, H. Vilkkilä, P. Nuutimäki, O-P Koisti, M. Lappi, Veli-Pekka Kauppinen. Puupolttoaineen kuivuriopas. 2014. Suomen metsäkeskus.

Vääräsmäki Markku. 2003. PILKKEEN KEINOKUIVAUKSEN VAIHTOEHDOT KAUPALLISESSA PILKETUOTANNOSSA.

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20521/mv\\_asiantuntijuushanke\\_nro2.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20521/mv_asiantuntijuushanke_nro2.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

30.3.2020

Ympäristöministeriön asetus eräiden rakennuksen teknisten järjestelmien energiatehokkuuden vaatimuksista 718/2020.

Rakennuksen lämmitystehon tarve kuivaushetkellä						
Mitoituslämpötila	Ulko	1 °c	Kuivaustilan lämpötila	30 °c	Δt	29 K
<b>Rakenneosa</b>	<b>U-arvo</b>		<b>Hallin koko</b>			<b>Seinät</b>
Seinän U	0,3005 W/m2K		Korkeus	3,5 m		Seinä1 28 m2
Välipohjan U	0,3331 W/m2K		Leveys	8 m		Seinä2 28 m2
Lattian U	0,0501 W/m2K		Pituus	10 m		Seinä3 35 m2
Ovien ja ikkunoiden U	1,5 W/m2K		Pinta-ala	80 m2		Seinä4 35 m2
<b>Ovet</b>			<b>Ovet Pinta-ala</b>		<b>Ikkunat</b>	<b>P-a</b>
Ovi 1 kork	2,5 m		6,25 m2	Korkeus	0,6 m	0,72 m2
lev	2,5 m			Leveys	1,2 m	<b>Yhteis P-a</b>
Ovi 2 kork	3 m		9 m2	Kokonaismäärä	7 kpl	5,04 m2
lev	3 m					
Ovi 3 kork	3 m		10,5 m2	Seinien yhteenlaskettu pinta-ala ilman ikkunoita		126 m2
lev	3,5 m					
Ovien yhteispinta-ala			25,75 m2	Seinien yhteenlaskettu pinta-ala poislukien ikkunat		95,21 m2
<b>Tehontarvelaskennassa käytettävät pinta-alat</b>			<b>Lisäkonduktanssit</b>	<b>pituus</b>		
Seinän pinta-ala	95,21 m2		yläpohja - seinä	36 m	kond	yht
Välipohjan pinta-ala	80 m2		alapohja - seinä	36 m	0,05 W/(mK)	52,2 W
Lattian pinta-ala	80 m2		Ulkonurkka	14 m	0,1 W/(mK)	104,4 W
Ovien ja ikkunoiden pinta-ala	25,75 m2		Ikkunat	25,2 m	0,04 W/(mK)	16,24 W
			Ovet	35 m	0,04 W/(mK)	29,232 W
			Yhteensä		0,07 W/(mK)	71,05 W
						273,122 w
<b>Lämmitystehontarve</b>	<b>6365,083 W</b>					
	<b>6,365083 kW</b>					

Polttopuu kuivaus koelaitos				
Lähtötiedot				
Puumäärä	3	m <sup>3</sup>	Poistoilma	767 m <sup>3</sup> /h
	1,2	km <sup>3</sup>	Lämmitysteho	13 kW
Tiheys	812,25	kg/km <sup>3</sup>	Lämmittimen sähköteho	0,08 kW
Puukasan massa	974,7	kg	Puhallusteho	1 kW
Alkukosteus	40	%	Poistopuhallusteho	0,1 kW
Tavoitekosteus	17	%	Ulkolämpötila (kesk)	1 °C
Poistettava vesimäärä	270,10	kg	Rh	88 %
Aika	108	h	Absoluuttinen vesimäärä	3,5 g/kgk
Lämmitin pössiä	45	h	Puun ominaislämpökapasiteetti	1,1 kJ/kgk
Poistoilmapuhallin pössiä	90	h	Veden ominaislämpökapasiteetti	4,2 kJ/kgk
Kiertoilmapuhallin pössiä	108	h	Ilman ominaislämpökapasiteetti	1 kJ/kgk
			Veden höyrystymisenergia	2463 kJ/kg
Rakennuksen lämmitystehon tarve kuivaushetkellä				
Koko rakennus	6,36	kW		
Varasto-osan lämmitys	4	kW		
Kuivausosan lämmitystehontarve	2,36	kW		
Mittaustulokset				
Puiden kosteus mittarilla				
	Alin	Ylin	Keskiarvo (arvio)	
Päivä 1	35	45	42	%
Päivä 2	30	45	38	%
Päivä 3	20	40	30	%
Päivä 4	18	35	25	%
Päivä 5	18	25	22	%
Poistuvan ilman kosteus ja lämpötila				
	Lämpötila (°C)	RH (%)	Absoluuttinen vesimäärä	
Päivä 1	15,4	54,2	5,85	g/kg
Päivä 2	25,8	65,1	13,47	g/kg
Päivä 3	29,2	53,4	15,02	g/kg
Päivä 4	30,4	56,1	15,20	g/kg
Päivä 5	29,5	58,4	15,02	g/kg
Keskimääräinen lämpötila	26,06	°C	<b>Poistuva vesimäärä keskimääräisenä</b>	
Keskimääräinen RH	58,64	%	8,80	g/kg
Absoluuttinen vesimäärä	12,3	g/kg	8,10	kg/h
Energian kulutus				
	Toteutunut		Laskennallinen	
Öljyä	60	L	Puiden lämmitys	2,39 kW/h
Energiasisältö	10	kWh/L	Veden lämmitys	17,10 kW/h
Lämmitysenergia	600	kWh	Veden höyrystäminen	184,79 kW/h
Sähköä	Laskennallinen		Korvausilman lämmitys	57,66 kW/h
Poistoilmapuhallin	10,80	kWh	Tilan lisälämmitys	254,88 kW/h
Lämmitin	8,64	kWh	<b>Lämmitysenergian käyttö kuivaukseen</b>	<b>517,42 kWh</b>
Kiertoilmapuhallin	108,00	kWh		
<b>Sähköenergia yhteensä</b>	<b>127,44</b>	<b>kWh</b>		

Kuivurin lämmitystehon tarve laskenta							
Mitoituslämpötila	Ulko	-5 °c	Kuivaustilan lämpötila	60 °c	$\Delta t$	65 K	
<b>Rakenneseosa</b>	<b>U-arvo</b>		<b>Hallin koko</b>			<b>Seinät</b>	
Seinän U	0,1838 W/m <sup>2</sup> K		Korkeus	4,5 m		Seinä1	27 m <sup>2</sup>
Välipohjan U	0,1071 W/m <sup>2</sup> K		Leveys	6 m		Seinä2	27 m <sup>2</sup>
Lattian U	0,2592 W/m <sup>2</sup> K		Pituus	12 m		Seinä3	54 m <sup>2</sup>
Ovien ja ikkunoiden U	1,5 W/m <sup>2</sup> K		Pinta-ala	72 m <sup>2</sup>		Seinä4	54 m <sup>2</sup>
<b>Ovet</b>			<b>Ovet Pinta-ala</b>			<b>Ikkunat</b>	<b>P-a</b>
Ovi 1 kork	4 m		12 m <sup>2</sup>	Korkeus	0 m		0 m <sup>2</sup>
lev	3 m			Leveys	0 m		<b>Yhteis P-a</b>
Ovi 2 kork	3,8 m		15,2 m <sup>2</sup>	Kokonaismäärä	0 kpl		0 m <sup>2</sup>
lev	4 m						
				Seinien yhteenlaskettu pinta-ala ilman ikkunoita			162 m <sup>2</sup>
				Seinien yhteenlaskettu pinta-ala poislukien ikkunat			134,8 m <sup>2</sup>
Ovien yhteispinta-ala			27,2 m <sup>2</sup>				
<b>Tehontarvelaskennassa käytettävät pinta-alat</b>			<b>Lisäkonduktanssit</b>	<b>pituus</b>			
Seinän pinta-ala	134,8 m <sup>2</sup>		yläpohja - seinä	36 m	kond	yht	
Välipohjan pinta-ala	72 m <sup>2</sup>		alapohja - seinä	36 m	0,05 W/(mK)		117 W
Lattian pinta-ala	72 m <sup>2</sup>		Ulkonurkka	18 m	0,1 W/(mK)		234 W
Ovien ja ikkunoiden pinta-ala	27,2 m <sup>2</sup>		Ikkunat	0 m	0,04 W/(mK)		46,8 W
			Ovet	29,6 m	0,04 W/(mK)		0 W
			Yhteensä		0,07 W/(mK)		134,68 W
							532,48 w
<b>Lämmitystehontarve</b>	<b>52136,85 W</b>						
	<b>52,13685 kW</b>						

## Polttopuu kuivaamo

<b>Lähtötiedot</b>			
Puumäärä	180 m <sup>3</sup>	Ulkolämpötila (kesk)	-5 °C
	72 km <sup>3</sup>	Rh	100 %
Tiheys	812,25 kg/km <sup>3</sup>	Absoluuttinen vesimäärä	0,00 g/kgk
Polttopuiden massa	58482,00 kg	Rakennuksen tilavuus	284,625 m <sup>3</sup>
Alkukosteus	50 %	Puun ominaislämpökapasiteetti	1,10 kJ/kgk
Tavoitekosteus	17 %	Veden ominaislämpökapasiteetti	4,20 kJ/kgk
Poistettava vesimäärä	23251,88 kg	Ilman ominaislämpökapasiteetti	1,00 kJ/kgk
		Veden höyrystymisenergia	2501,00 kJ/kg
<b>Rakennuksen lämmitystehon tarve kuivaushetkellä</b>			
Suunnitellun hakekattilan teho	150 kW	Lämmitysjärjestelmän hyötysuhde	0,85
Rakennuksen lämmitys	53 kW	Käytettävissä oleva lämmitysteho	127,5 kW
Kuivaukseen käytettävissä oleva teho	74,5 kW		
<b>Suunniteltu kuivauslämpötila</b>			
Keskimääräinen lämpötila	55 °C	Poistuva vesimäärä keskimääräinen	85,00 g/kg
Keskimääräinen RH	65 %		
Absoluuttinen vesimäärä	85 g/kg		
<b>Ilmanvaihtomäärä</b>			
Kuivaushuoneen tilavuus	284,625 m <sup>3</sup>	Ilmanvaihtokerroin	3,6 1/h
Poistopuhallusteho	0,12 kW	Poistoilma	1024,65 m <sup>3</sup> /h
Poistuva vesimäärä	104,51 kg/h		0,28 m <sup>3</sup> /s
	0,02903175 kg/s	Vähimmäishöyrystysteho	72,608407 kW
<b>Kiertoilmamäärä</b>			
Klapikasan leveys	5 m	Klapikasan korkeus	4 m
Haluttu nopeus	0,3 m/s	Tarvittava ilman massavirta	6 m <sup>3</sup> /s
		Puhallusteho (kiertoilma)	8,86 kW
<b>Laskennallinen kuivausaika</b>			
Puiden lämmitys	7,20 h	Veden höyrystymisaika	216,83 h
Veden lämmitys	27,47 h	Kiertoilmapuhallin päällä	257,15 h
Veden pois puhallusaika	222,48 h		
<b>Kokonaiskuivaus aika</b>	<b>257,15 h</b>		
	<b>10,71 vrk</b>		
<b>Energian kulutus</b>			
<b>Lämpö</b>		<b>Sähkö</b>	
Puiden lämmitys	536,09 kWh	Poistoilmapuhallin	30,86 kWh
Veden lämmitys	2046,87 kWh	Kiertoilmapuhallin	2278,31 kWh
Veden höyrystäminen	16153,60 kWh	<b>Sähköenergia yhteensä</b>	<b>2309,17 kWh</b>
Korvausilman lämmitys	4559,19 kWh		
Tilan lisälämmitys	13628,74 kWh		
<b>Lämmitysenergian käyttö kuivaukseen</b>	<b>36924,49 kWh</b>		
Muunnettuna hakkeeksi	52,74926953 m <sup>3</sup>		