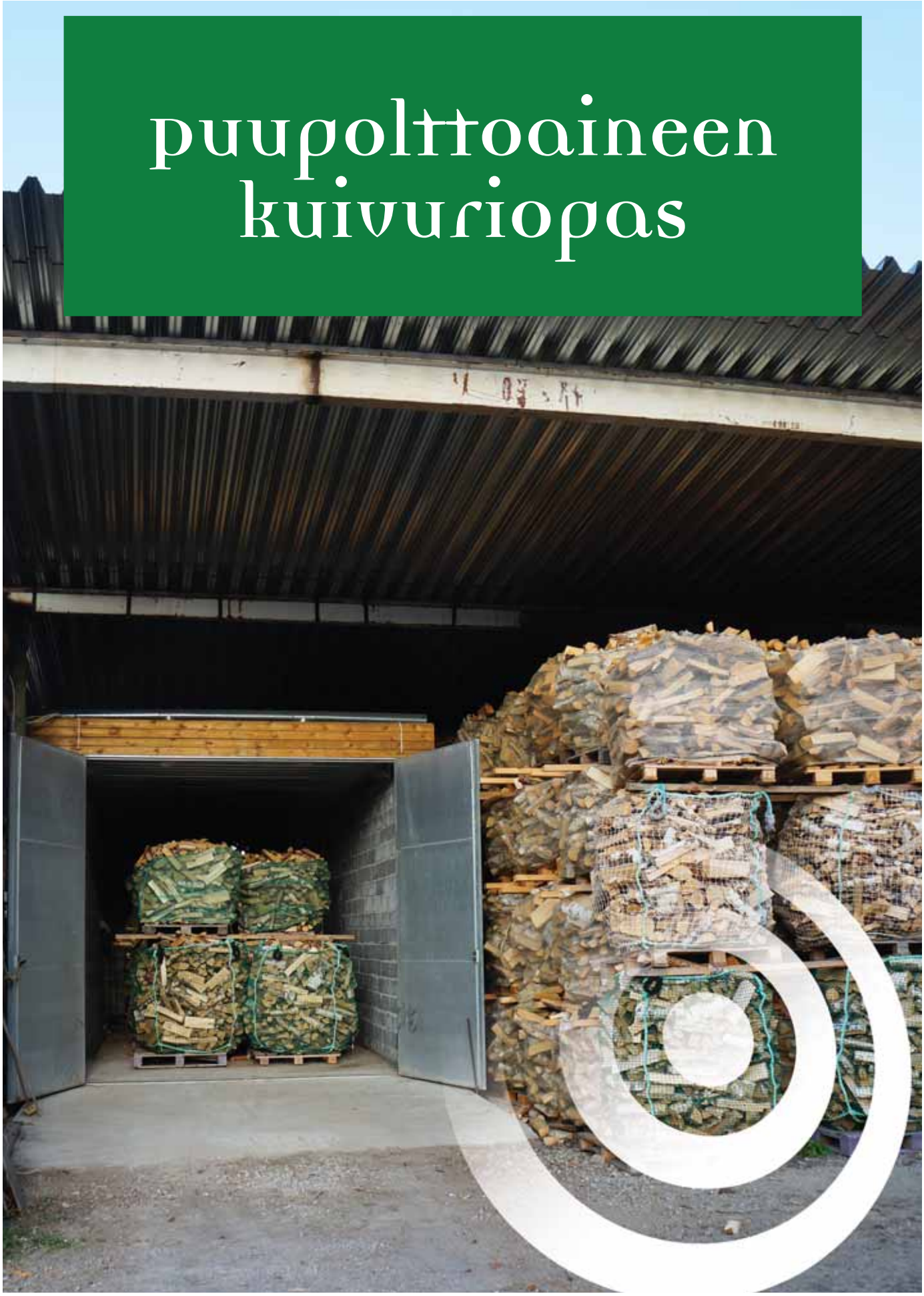
puupolttoaineen kuivuriopas



© Suomen metsäkeskus, Julkiset palvelut

Päätoimittaja Veli-Pekka Kauppinen, Metsäkeskus

Toimituskunta
Juha Viirimäki, Metsäkeskus
Juha Hiitelä, Metsäkeskus
Lasse Maunula, Metsäkeskus
Olli-Pekka Koisti, Metsäkeskus
Anders Wikberg, Metsäkeskus
Jyrki Raitila, VTT
Jyrki Kouki, TTS
Kari Vuorio, TTS
Markku Lappi, ProAgria, Etelä-Suomi
Hannu Vilkkilä, Jyväskylän ammattikorkeakoulu

Taitto Terttu Välkkilä, Metsäkeskus
Kannen kuva Veli-Pekka Kauppinen, Metsäkeskus
Takakannen kuva Veli-Pekka Kauppinen, Metsäkeskus

Painatus Vammalan kirjapaino Oy, Vammala, 2014
ISBN 978-952-283-016-6- nid.
978-952-283-017-3- pdf

sisällysluettelo

Esipuhe 4

1 Puun ominaisuuksien vaikutus kuivumiseen 5
1.1 Puun kosteus kasvukauden aikana 5
1.2 Pilkkeen koon ja kuoren vaikutus kuivumiseen 6
1.3 Hakkeen kosteuden vaikutus irtotiheyteen 7
2 Puun kuivaaminen 9
2.1 Haihdutettava vesimäärä 9
2.2 Luonnonkuivaus 11
2.3 Keinokuivaus 12
2.3.1 Kylmäilmakuivaus 12
2.3.2 Lämminilmakuivaus 13
2.4 Alku- ja loppukosteuden toteaminen 14
3 Tärkeimpiä puun kuivaamiseen vaikuttavia tekijöitä 16
3.1 Kuivausilman kyky sitoa vesihöyryä 16
3.2 Lämpötilan vaikutus pilkkeiden kuivumisnopeuteen 18
3.3 Kuivauksen energiatarve 19
3.4 Kuivurin suunnittelussa ja käytössä huomioitavaa 20
3.5 Pilkkeen ja hakkeen kuivaamisen erot 24
4 Kuivuriesimerkkejä 25
4.1 Kylmäilmakuivurit 25
4.2 Lämminilmakuivurit 34
4.3 Yhteenveto 42
5 Puupolttoaineen laadun hallinta 43
5.1 Puupolttoaineen pakkaaminen 45
6 Keinokuivauksen taloudellisuus 46
6.1 Kustannukset ja niiden rakenne 47
7 Termejä ja määritelmiä 49
8 Lähteet 51
9 Liitteet 52
9.1 Keinokuivauksen laskentamenetelmä 52
9.2 Esimerkkejä polttopuukuivurien elinkaarikustannuksista 54
9.3 Pilkekuivuriluonnos 55

esipuhe

Veli-Pekka Kauppinen, Suomen metsäkeskus

Polttopuun kysyntä on kasvanut tasaisesti viime vuosina. Suurin osa pilkkeen tuottajista ja myyjistä on sivutoimisia vuosimyynnin ollessa alle 300 irtokuutiometriä vuodessa. Useimmiten polttopuut tehdään ja kuivataan keväällä taivasalla. Pitkä luonnonkuivausaika ja sääriippuvuus ovat rajoittaneet useiden kasvuhaluisten yrittäjien toiminnan laajentamista. Monet yrittäjät muistavat vuoden 2012 sateisen kesän, jolloin osalle heistä jäi myymättä pilkkeitä, jotka olivat märkiä, homeisia ja värivikaisia.

Asiakkaat haluavat pilkkeiden olevan kuivia ja ulkoasultaan virheettömiä. Haketta käyttävät pienet lämpölaitokset sekä pienet sähköä tuottavat CHP-laitokset toimivat parhaiten kuivalla ja hyvälaatuisella puuhakkeella. Polttopuun kuivaus alkaa oikein toteutetusta raaka-aineen hankinnasta ja varastoinnista ennen puun haketusta tai pilkontaa. Näitä asioita käsitellään tämän kirjasarjan aikaisemmissa julkaisuissa Pilketuotanto-, Maatilan hakelämmitys- ja Laatuhakkeen tuotanto-oppaissa. Polttopuun laadun hallinta onnistuu varmimmin, kun käytössä on kuivuri.

Tässä oppaassa ei ole tarkkoja mittoja kuivureiden rakenteista tai niiden laitteista. Kuivurit ovat usein erilaisia käyttötarkoitukseltaan, mitoiltaan ja tekniikaltaan. Siksi ammattisuunnittelijat tekevät lopulliset rakennepiirrokset ja mitoituksen. Oppaassa kerrotaan kansantajuisesti kuivauksen teoriaa sekä esitellään muutamia toteutukseltaan erilaisia kylmä- ja lämminilmakuivureita.

Hakkeen ja pilkkeen kuivaus voi luoda uutta liiketoimintaa yrittäjille, joilla on lämpöyritys tai maatila. Näissä kohteissa lämmityskattilat toimivat suurimman osan vuotta vajaalla teholla. Suurin osa yrittäjistä on halukas myymään energiaa esimerkiksi konttikuivuriin, joka tuodaan lämpökeskuksen viereen. Sama kuivuri voisi kuivata haketta myös yrittäjän omaan käyttöön kovimpia pakkaspäiviä varten. Lämpökeskusinvestoinnit ovat kalliita ja siksi pilkeyrittäjien kannattaa harkita, löytyisikö kuivuria varten sopivaa lämmön myyjää paikallisesta lämpöyrittäjästä ja maatilasta, jolla lämpökeskus on mitoitettu suurempaa, lyhytaikaista käyttöä kuten viljankuivausta varten.

Opas on koottu yhteistyössä Suomen metsäkeskuksen energianeuvojien kanssa. Lisäksi VTT:n ja TTS:n tutkijoiden sekä Proagrian osuus asiasisällön kirjoittamisessa on ollut huomattava. Antoisia lukuhetkiä oppaan parissa.

1 puun ominaisuuksien vaikutus kuivumiseen

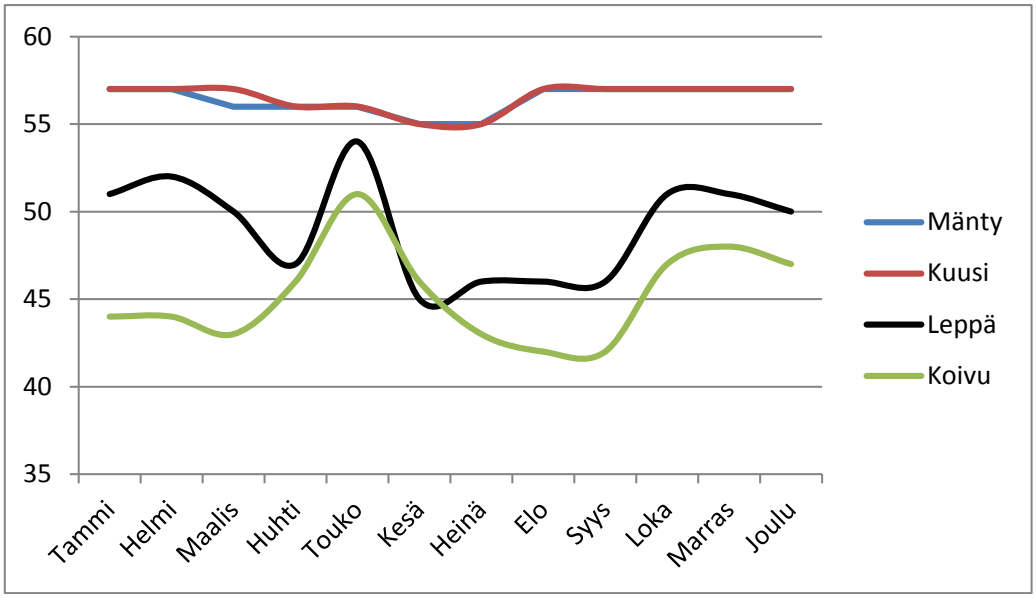
Jyrki Raitila, VTT

Monet tekijät vaikuttavat puun kuivumiseen sekä luonnon- että keinokuivauksessa. Näistä tärkeimpiä ovat:

- Puumateriaalin alkukosteus
- Kuivattavan puun palakoko
- Kuivattava puumäärä ja asettelu tai ladonta kuivurissa
- Kuivauslämpötila
- Ilman suhteellinen kosteus
- Ilman virtausnopeus
- Puulajikohtaiset ominaisuudet, kuten puuaineen kyky johtaa lämpöä suhteessa sen kykyyn varastoida lämpöä (diffusiviteetti) sekä tiheys, lämmönjohtavuus ja ominaislämpö

1.1 puun kosteus kasvukauden aikana

Kasvavien puiden kosteus vaihtelee vuodenajan mukaan. Havupuilla tämä vaihtelu on vain muutaman prosenttiyksikön luokkaa, mutta lehtipuilla jopa yli 10 prosenttiyksikköä. Tämä vaihtelu on yksilöllistä ja riippuu paljon myös puun koosta ja metsiköstä. Pienissä rungoissa kosteuden vaihtelut ovat suurempia. Yleensä puussa on vettä eniten juuri ennen kasvukauden alkamista ja vähiten keskikesällä, jolloin lehtien ja neulasten kautta tapahtuva haihtuminen on voimakkainta. Koska halot ja pilkkeet tehdään useimmiten lehtipuusta, on hyvä tietää, miten puun luontainen kosteus vaihtelee. Oikeaan aikaan kaadettu puu vähentää kuivauksen tarvetta. Toki on muistettava, että keskikesällä kaadettu puu ei välttämättä ehdi enää kuivua luonnonolosuhteissa, sillä kuivaukselle otolliset päivät vähenevät selvästi loppukesää kohti.



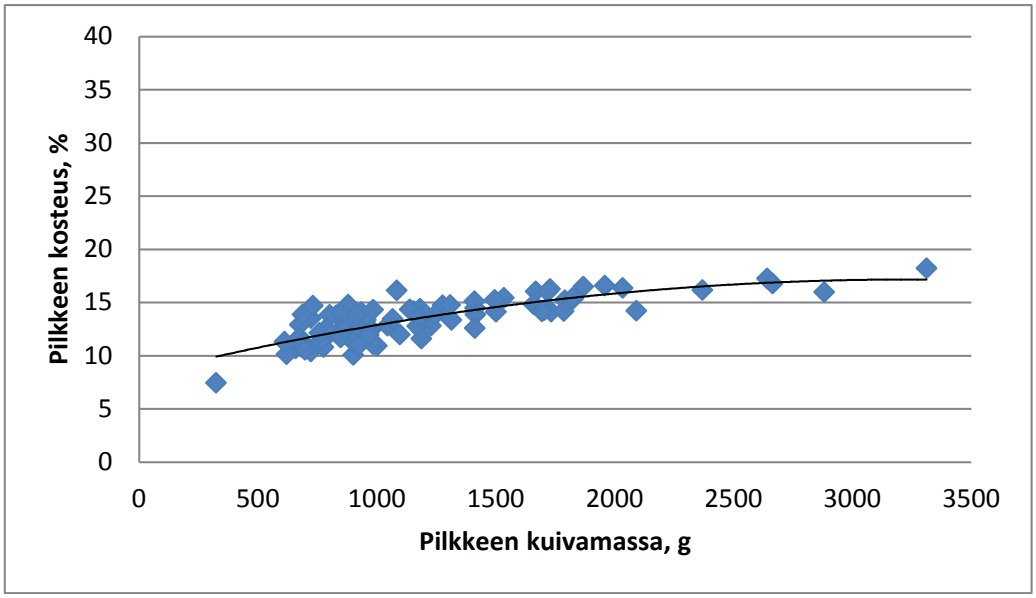
Kuva 1. *Eri puulajien kosteuden vaihtelu eri vuodenaikoina. (Routa 2014).*

1.2 Pilkkeen koon ja kuoren vaikutus kuivumiseen

Kuivausaikaan ja pilkkeiden väliseen kosteuseroon vaikuttavat sekä pilkkeestä että kuivausympäristöstä johtuvat seikat. Pilkkeestä johtuvia seikkoja ovat alkukosteus, pilkkeen mitat eli tilavuuden ja pinta-alan suhde sekä pituuden ja paksuuden suhde, kuoren peittämä osuus, halkaistun pinnan osuus sekä puulajikohtaiset ominaisuudet. Näitä ovat aineen kyky johtaa lämpöä suhteessa sen kykyyn varastoida lämpöä (diffusiviteetti), tiheys, lämmönjohtavuus ja ominaislämpö. (Erkkilä ym. 2012).

Pilkkeen koolla ja kuoren osuudella on huomattava merkitys pilkkeiden kuivumisnopeuteen. Kuivumisnopeuteen vaikuttaa eniten pilkkeen paksuus. Paksuuden puolittuminen lyhentää kuivumisaikaa noin puoleen. Pilkkeen kuivumista voidaan tehostaa merkittävästi rikkomalla kuorta esimerkiksi runkojen korjuun tai pilkkeiden teon yhteydessä. Jo pienikin kuoren rikkominen edistää pilkkeen kuivumista (Hillebrand & Frilander 2005).

Pilkkeiden kuivumisnopeus riippuu voimakkaasti ympäristön lämpötilasta ja ilman suhteellisesta kosteudesta. Usean kuukauden luonnonkuivauksessa kosteuserot erikokoisten pilkkeiden välillä ehtivät kuitenkin tasoittua, kun suurimmatkin pilkkeet ovat ennättäneet kuivua hyvin. (Erkkilä ym. 2012).



Kuva 2. *Koivupilkkeiden kosteus lämminilmakuivurissa kuivauksen jälkeen, kun kuivausaika oli noin yksi viikko. Pienemmät pilkkeet kuivuivat selvästi enemmän kuin suuret. (Erkkilä ym. 2012).*

1.3 Hakkeen kosteuden vaikutus irtotiheyteen

Puun tiheys ja tilavuus riippuvat kosteudesta, kuten myös puun kuivaamiseen tarvittava lämpöenergian määrä. Useissa tutkimuksissa on määritelty puun niin sanottu kuiva-tuoretiheys eli puun sisältämän kuiva-aineen määrä tuoretilavuudessa. Kun tiedetään puun kosteus, voidaan kuiva-tuoretiheyden avulla laskea hakkeen kiinto- ja irtotiheys. Samoin voidaan laskea kuivatiheys eli täysin kuivan puun tiheys. On muistettava, että puun tilavuus tuoreena on turpoamisen takia suurempi kuin täysin kuivana.

Puun märkätiheys tarkoittaa kostean puun todellista tiheyttä eli puun todellista massaa kyseisessä tilavuudessa. Tämän määrittämiseksi tarvitaan tiedot puun kuiva-tuoretiheydestä ja laskentahetken kosteudesta. Puu turpoaa kastuessaan puun syiden kyllästymispisteeseen (PSK-rajakosteus) asti, joka on noin 23 %. Tämän jälkeen tilavuus on vakio ja tiheys muuttuu samassa suhteessa kosteuden kanssa. (Härkönen 2012).

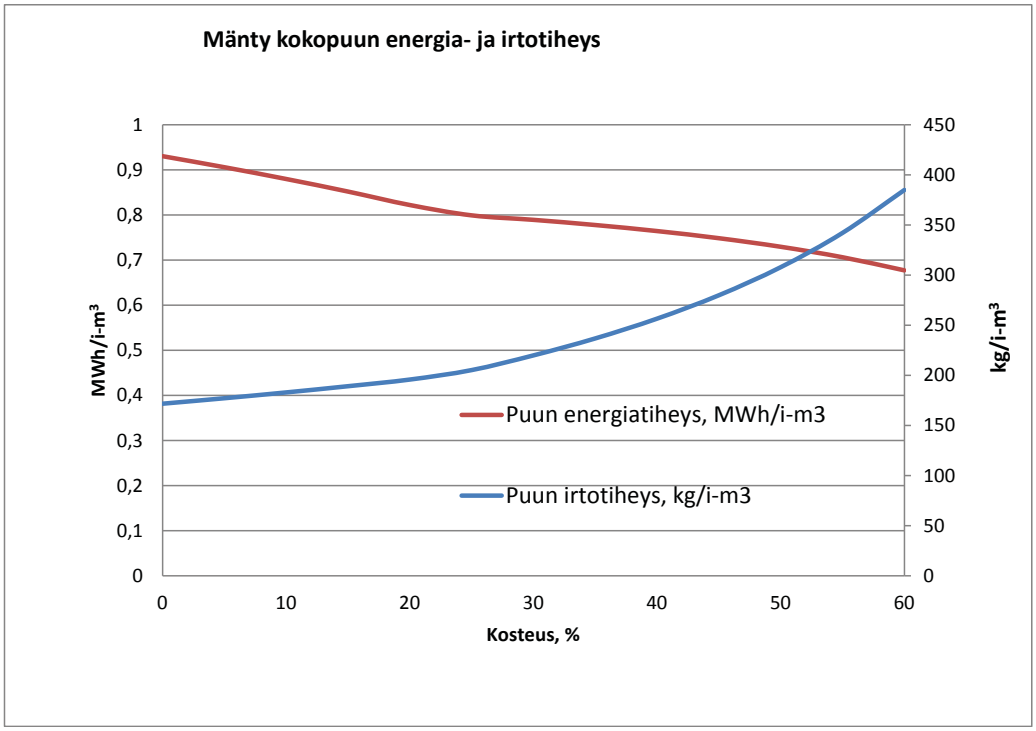
Rajakosteutta märemmän puun märkätiheys voidaan laskea yksinkertaisella kaavalla:

$$\rho_m = \frac{\rho_{kt}}{1 - x}$$

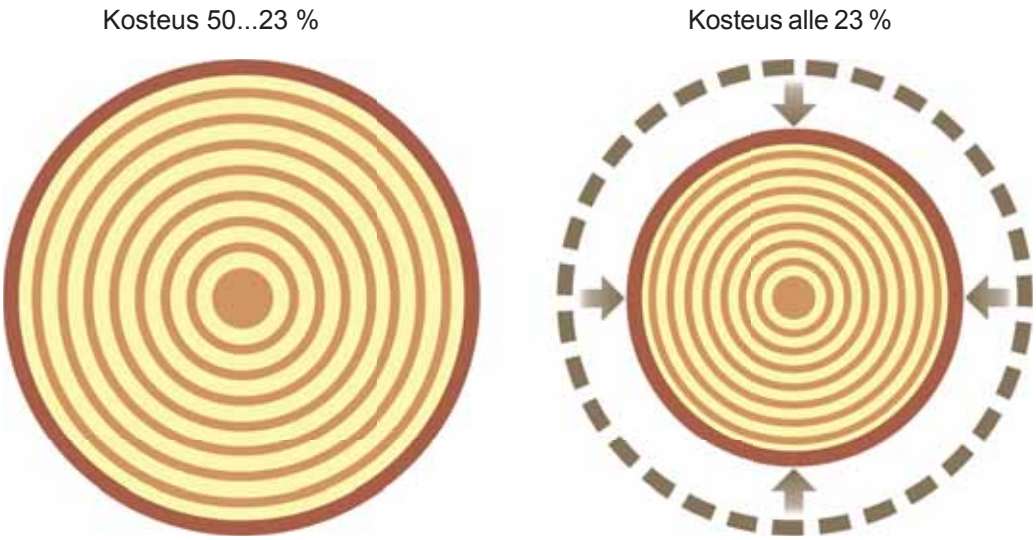
ρ_m = märkätiheys
ρ_{kt} = kuiva-tuoretiheys
x = kosteus desimaalilukuna

Hakkeen märkätiheys voidaan helposti muuttaa irtotiheydeksi kertomalla se hakkeen tiiviyskertoimella, joka kertoo, kuinka paljon tietyssä tilavuudessa on puuta. Jos kerrointa ei ole mitattu, voidaan käyttää yleisesti käytettyä arviota 0,4. Mikäli puuta kuivataan alle PSK-rajan, tulisi ottaa huomioon puun kutistuminen. Laskenta on tällöin monimutkaisempi. PSK-rajaa kuivemman hakkeen irtotiheys, ja varsinkin energiatiheys, muuttuvat jyrkemmin kuin täysin turvonneen puun. Tämä näkyy myös kuvassa 3.

Mikäli puuta halutaan kuivata alle PSK-rajan, vaatii veden haihduttaminen tällöin selvästi enemmän energiaa. Vettä täytyy haihduttaa puun soluseinämistä, kun taas PSK-rajaan asti haihdutetaan puun niin sanottua vapaata vettä. Puun kutistuminen johtuu juuri veden poistumisesta soluseinämistä ja on puulajista riippuen 10–15 %.



Kuva 3. *Kokopuuhakkeen (mänty) energia- ja irtotiheyksien riippuvuus kosteudesta.*



Kuva 4. *Puun tilavuuden muutos kuivauksessa. Puu alkaa kutistumaan, kun sen kosteus laskee alle 23 prosentin. (Piirros: Lasse Maunula).*

2 Puun kuivaaminen

Jyrki Raitila, VTT

2.1 Haihdutettava vesimäärä

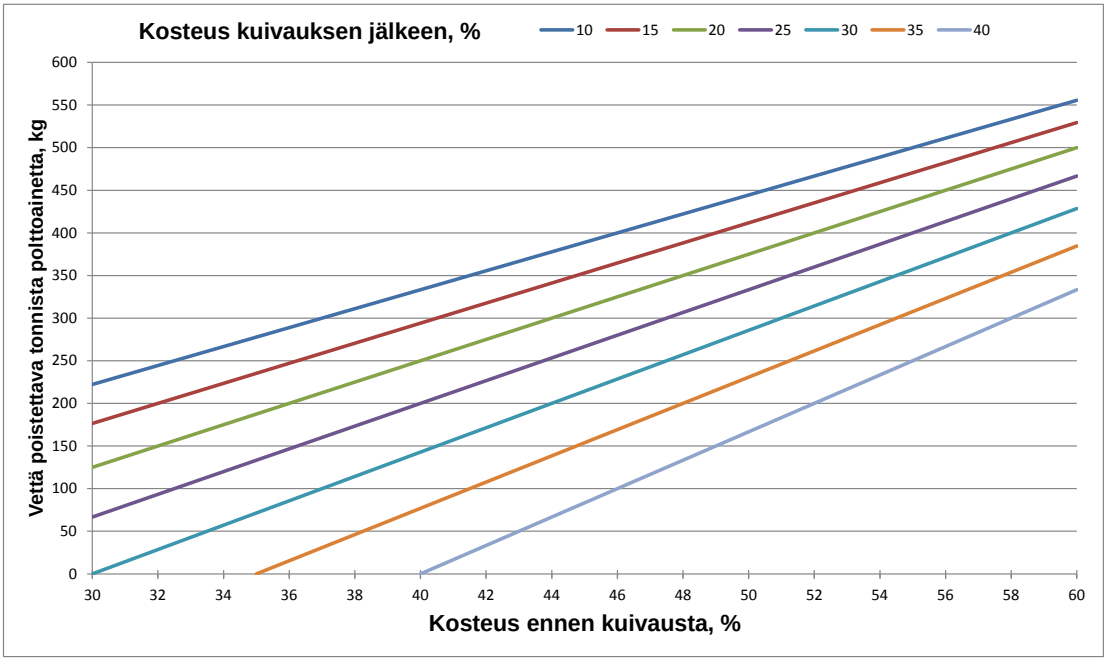
Suomen yleisimpien puulajien kosteus eli vesipitoisuus vaihtelee kaatotuoreena 40 ja 55 prosentin välillä. Kuivauksessa haihdutettavan veden määrä riippuu siitä, mikä on puupolttoaineelle asetettu tavoitekosteus. Suurissa voimalaitoksissa haketta voidaan polttaa kosteana, jopa lähes kaatotuoreena. Pienissä lämpölaitoksissa kiinteän polttoaineen tulisi olla huomattavasti kuivempaa. Pientaloissa käytettävä pilke sen sijaan ei saisi sisältää vettä enempää kuin 20 %, jotta puun sytyttäminen ja poltto olisi helppoa, taloudellista ja ympäristöystävällistä. Kuiva puu ei myöskään homehdu.

Puun keinokuivauksessa on tärkeätä tietää, paljonko vettä pitää haihduttaa tiettyyn tavoitekosteuteen pääsemiseksi. Kun tiedetään puuerän alkupaino ja -kosteus, voidaan haihdutettava vesimäärä laskea vieressä olevalla kaavalla, jossa oletuksena on, että kaikki painon muutos johtuu haihtuvasta vedestä.

Tällöin esimerkiksi kuivattaessa tuhannen kilon puuerä 50 % kosteudesta 30 % kosteuteen pitäisi haihduttaa 286 kiloa vettä. Vastaava asia on kuvattu alla olevassa käyrästössä.

$$m_{vesi} = m_{kok} \times \left(1 - \frac{100 - w_1}{100 - w_2} \right)$$

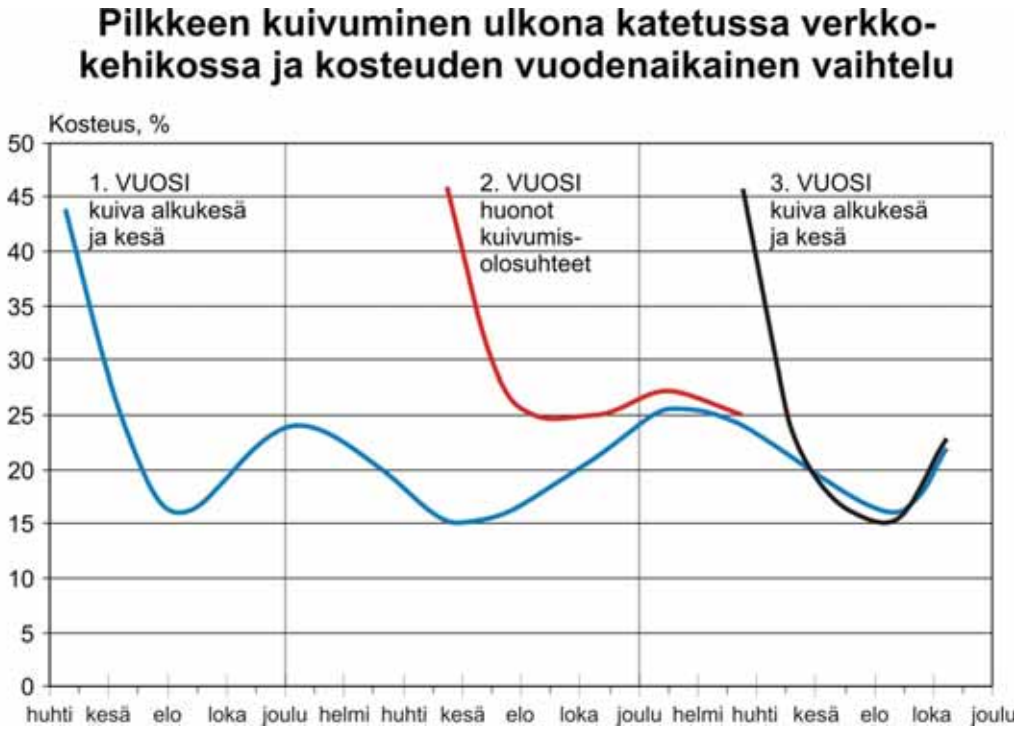
m_{vesi} = haihdutettava vesimäärä, kg
m_{kok} = puuerän kokonaismassa alussa, kg
w_1 = puuerän alkukosteus, %
w_2 = puuerän loppukosteus, %



Kuva 5. *Esimerkki, kuinka paljon tuhannen kilon puuerästä pitää poistaa vettä puun tavoitekosteuteen pääsemiseksi. Suorat edustavat eri tavoitekosteuksia.*

2.2 Luonnonkuivaus

Ylivoimaisesti suurin osa energiapuusta kuivataan luonnonolosuhteissa. Hakkeeksi tai murskeeksi pilkottavan puun annetaan yleensä kuivua raaka-aineena välivarastossa, useimmiten tienvarsivarastoissa. Viime vuosina energiapuuta on alettu entistä enemmän toimittaa niin sanottujen energiapuuterminaalien kautta, jolloin osa puun kuivatuksesta ja sen jatkokäsittelystä on mahdollista tehdä tehokkaammin terminaalikentällä(*). Myös tässä yhteydessä on syytä korostaa raaka-aineen oikean varastoinnin merkitystä. Sääolosuhteiden jälkeen puun kosteuden muutoksiin vaikuttavat eniten juuri varastopaikka ja varaston rakenne. Välivarastoidun ranka- ja kokopuun kuivumista voi nopeuttaa poistamalla kuorta osittain esimerkiksi aisaamalla. Hakkuukoneen syöttörullat rikkovat tehokkaasti kuorta edesauttaen veden haihtumista.



Kuva 6. *Ulkona klapihäkeissä (3,5 i-m³) kuivattujen ja varastoitujen puuerien kosteuden muutokset eri vuosina. (Hillebrand, Frilander 2005).*

(*) Energiapuun varastoinnista on hyviä ohjeita muun muassa tämän kirjasarjan osassa Laatuhakkeen tuotanto-opas.

Pilke valmistetaan lähes aina tuoreesta raakapuusta, jolloin sen työstäminen on helpompaa. Tuoreen raaka-aineen varastointiaika kannattaa pitää varsinkin keväällä mahdollisimman lyhyenä, jotta lopputuotteesta saadaan laadukasta ilman home- tai värivikoja. Pilkkominen nopeuttaa huomattavasti puun kuivumista, koska se lisää veden haihtumispintaa. Kuori puolestaan estää tehokkaasti pyöreän puun kuivumista. Polttopuut kannattaisi tehdä toukokuuhun mennessä, koska kevät ja alkukesä ovat yleensä säiden puolesta parasta luonnonkuivausaikaa. Keskimääräisinä tai sitä kuivempina vuosina pilkkeet ehtivät kuivua luonnonolosuhteissa käyttövalmiiksi myös yhden kesän aikana.

2.3 Keinokuivaus

Keinokuivaus eroaa luonnonkuivauksesta siten, että keinokuivauksessa kuivumisnopeutta pyritään lisäämään käyttämällä kuivaukseen lisäenergiaa. Käytännössä tämä tarkoittaa aina jonkinlaisen rakennelman käyttöä ja siihen yhdistettyä puhallinta. Kuivurit voidaan jakaa karkeasti neljään ryhmään: kylmäilmakuivuri, kylmäilmakuivuri ja ajoittainen lisälämpö, lämminilmakuivuri sekä kuumailmakuivuri. Kuumailmakuivurissa lämpötila nousee yli 100 °C:n. Mikäli kuivaus tapahtuu pelkästään höyryllä, käytetään termiä kuumakuivaus. Pilkkeen keinokuivaus Suomessa voidaan jakaa pääpiirteittäin kahteen kuivausprosessiin, kylmäilmakuivaukseen ja lämminilmakuivaukseen.

2.3.1 Kylmäilmakuivaus

Kylmäilmakuivaus tapahtuu ulkoilman lämpötilassa tai erilaisten auringon säteilyenergiaa hyödyntävien keräimien avulla, joilla puhallusilman lämpötilaa voidaan nostaa muutamia asteita. Tehostettu kuivausilman liikkuminen nopeuttaa kuivumista. On muistettava, että kylmäilmakuivauksen toimivuus riippuu hyvin paljon vallitsevasta säästä. Ulkoilma joko puhalletaan tai imetään koneellisesti kuivattavan pilke- tai hakekerroksen läpi. Kuivausilma pyritään ottamaan esimerkiksi aurinkoiselta seinustalta, jotta puukasaan menevän ilman lämpötila olisi mahdollisimman korkea ja suhteellinen kosteus alhainen. Puhaltimia ei kannata käyttää

silloin, kun ulkoilman suhteellinen kosteus on korkea. Puhaltamista säädellään ilman suhteellisen kosteuden ja puun kosteuden mukaan. (Erkkilä ym. 2012).

Yksinkertaisimmillaan ulkona oleva pilkeauma voidaan kuivata jättämällä auman keskelle toisesta päästä suljettu, esimerkiksi kuormalavoista tehty ilmanjakokanava. Yleensä kylmäilmakuivuri kuitenkin sijoitetaan sisätiloihin, jolloin pilkkeet tai hake ovat sateelta suojassa ja puhallusilman säätö ja kanavointi on helpompaa.

Kuivumistulokseen vaikuttaa se, kuinka tasaisesti kuivausilma saadaan puhallettua pilke- tai hakekerroksen läpi ilman puukasaa kiertäviä oikovirtauksia. Kamarimallisessa kylmäilmakuivurissa puhallettu ilma ei aina kulje tasaisesti puukerroksen läpi. Ilman läpäisyä haittaa osaltaan irtonainen kuori ja hakkeessa varsinkin neulaset ja hienoaines. Merikontista rakennetussa kylmäilmakuivurissa pilkkeet kuivuvat hyvin, kun ilma imetään hallitusti pilkekasan läpi. (Erkkilä ym. 2012)

Kuva 7. *Edullinen ja toimiva kylmäkuivuriratkaisu käytetystä merikontista. (Kuva: Ari Erkkilä).*

2.3.2 Lämminilmakuivaus

Mikäli kuivausaika ja kuivausprosessi halutaan hallituiksi, käytetään lämminilmakuivausta. Siinä kuivausilman lämpötilaa pidetään alle sadassa asteessa, yleensä noin 60–70 asteessa. Lämminilmakuivaus mahdollistaa ympärivuotisen toiminnan ja nopeuttaa raaka-aineeseen sitoutuneen pääoman kiertoa. Lämpöenergian kulutus ilman lämmön talteenottoa on noin 100 kilowattituntia (kWh) irtokuutiometriä (i-m^3) kohti, kun ulkoilman lämpötila on +15 °C, ja noin 160 kWh irtokuutiometriä kohti, kun ulkoilman lämpötila on -15 °C. Sähköenergian kulutus aiheutuu pääosaksi puhaltimista ja on yleensä enimmillään 10 kWh irtokuutiometriä kohti. Kuivausilman lämmön talteenotolla voidaan lämmityksen energiamäärä suunnilleen puolittaa. (Hillebrand & Kouki 2006).

2.4 Alku- ja loppukosteuden toteaminen

Hakkeen alkukosteus voidaan määrittää samaan tapaan kuin se suositellaan tehtäväksi lämpölaitoksilla eli niin sanotulla lämpökaappimenetelmällä (*).Vastaavasti saadaan kuivatun puun loppukosteus. Tässä kuten kaikissa kosteusnäytteeseen perustuvassa kosteuden määrityksessä on kiinnitettävä huomiota näytteen edustavuuteen. Kokoomanäytteeseen tulee kerätä useita osanäytteitä edustavasti koko hake-erästä. Näytteiden määrä riippuu hake-erän suuruudesta. Kokoomanäyte sekoitetaan ja siitä erotetaan esimerkiksi neliöimällä vähintään 300 g haketta kosteusanalyysia varten.

Lämpökaappimenetelmä on verraten hidas kosteuden määritysmenetelmä, koska siinä näytettä pidetään lämpimässä kaapissa tai uunissa niin kauan, kunnes näytteen paino ei enää muutu eli kaikki vesi on haihtunut (enintään 24 tuntia, lämpötilan ollessa 102 astetta ± 2 astetta). Jos kosteustulokset halutaan saada nopeammin, täytyy käyttää joko kosteusmittausvaakaa tai pikamittareita. Käsikäyttöisillä pikamittareilla ei kuitenkaan päästä kovin hyvään mittaustarkkuuteen mitattaessa kosteaa puupolttoainetta.

Kosteusmittausvaaka, joka on kuin lämpökaappi pienoiskoossa, antaa tulokset nopeasti ja tarkasti. Näytteen koko on korkeintaan 50 g ja se tulisi hienontaa kunnolla ennen analysointia. Analysaattori mittaa kuivumista vaa'an avulla kuivauksen edetessä. Esimerkiksi sahauspurunäytteitä analysoitaessa 3–15 g näytteeseen on kulunut aikaa 2–45 minuuttia ja tarkkuudeksi on havaittu ±1–2 % verrattuna lämpökaappimenetelmään (Erkkilä ym. 2012, Puolamäki 2014).

Kosteusmittausvaakaa voidaan käyttää myös pilkkeen kosteuden määrittämiseen, varsinkin jos alkukosteusnäytteet voidaan ottaa jo sahanpurusta. Loppukosteus voidaan määrittää klapinäytteistä, tai vaihtoehtoisesti voidaan seurata klapierän painon muutosta, josta kosteus voidaan tarkasti laskea. Tällöin klapit pitäisi jo tekovaiheessa panna esimerkiksi säkkiin tai kehikkoon, jossa punnitus onnistuu vaivattomasti.

(*) Tästä samoin kuin irtotiheyden mittaamisesta on hyvät ohjeet Puupolttoaineiden laatuohjeessa (VTT-M-07606-13).

Mikäli tyydytään muutaman prosenttiyksikön mittaustarkkuuteen, voidaan pilkkeiden loppukosteus mitata myös pikamittarilla. Tällöin näytepilkkeet halkaistaan kosteuden määritystä varten ja kosteus mitataan viiden senttimetrin etäisyydeltä pilkkeen päistä ja puolivälistä. Mittaustuloksista lasketaan sen jälkeen keskiarvo. Näytteiksi tarvitaan vähintään 5–10 eri kokoista pilkettä kuivaus- ja toimituserästä riippuen. Näytteet valitaan tasaisesti eri kohdista kustakin tarkasteltavasta pilkeerästä.

Esimerkiksi 5 klapia 2 i-m^3 toimitusyksikköä kohti antaa riittävän hyvän keskimääräisen mittaustarkkuuden. Useimmat pikamittarit perustuvat vastusmittaukseen, ja niiden tarkkuus on todettu olevan laboratorio-olosuhteissa ±1,5–2,5 % ja teollisuusolosuhteissa ±2–5 % (Forsén, Tarvainen 2000).

Kuva 8. *Kosteusmittausvaaka, jolla voidaan määrittää pienen ja tasalaatuisen näytteen kosteus nopeasti ja tarkasti. (Kuva: Ari Erkkilä).*

Kuva 9. *Kosteuden määrittäminen pilkkeestä pikakosteusmittarilla (Kuvat: Ari Erkkilä).*

3 Tärkeimpiä puun kuivaamiseen vaikuttavia tekijöitä

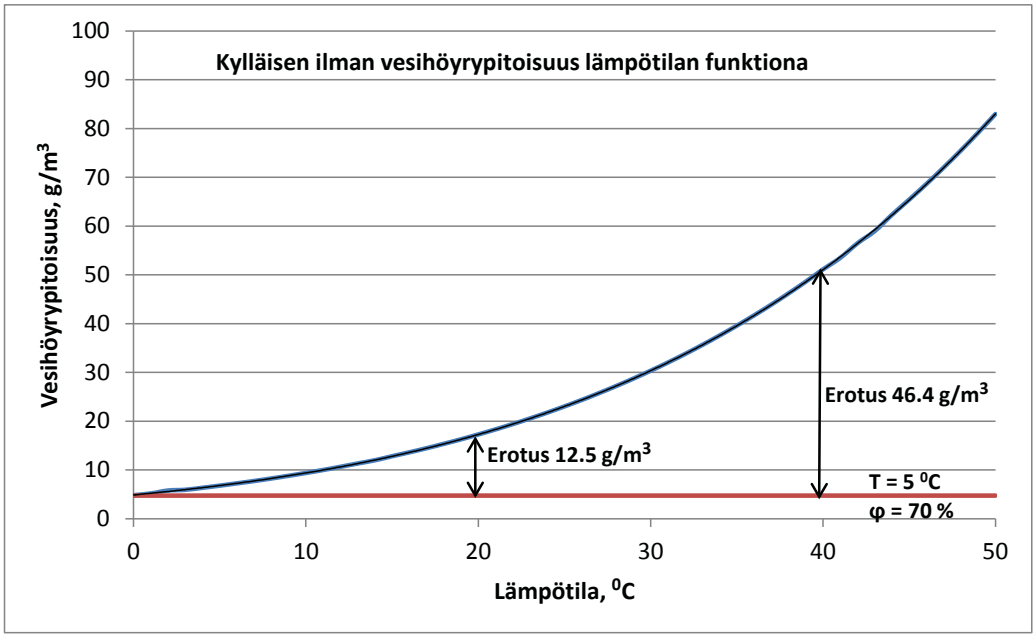
Veli-Pekka Heiskanen ja Jyrki Raitila, VTT

3.1 Kuivausilman kyky sitoa vesihöyryä

Lämmitetyn ilman kuivauskyky riippuu ensisijaisesti ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Kuvassa 10 on sinisellä käyrällä esitetty kylläisen ilman vesihöyrypitoisuus lämpötilan funktiona eli suurin vesihöyrymäärä, minkä ilma voi kyseisessä lämpötilassa sitoa vesihöyryä.

Kuvasta nähdään, että esimerkiksi 30 °C lämpötilassa ilma tulee kylläiseksi, kun siinä on vesihöyryä noin 30 g/m^3. Kuvassa oleva punainen suora viiva on ilman vesihöyrymäärä, kun ilman lämpötila on 5 °C ja suhteellinen kosteus 70 %. Vesihöyryn määrä ilmassa on tällöin noin 4,8 g/m^3.

Kuvasta voidaan nyt määrittää, kuinka paljon vesihöyryä 5 °C ilma, jonka suhteellinen kosteus on aluksi 70 % ja jonka sitoma vesihöyrymäärä 4,8 g/m^3, pystyisi sitomaan vettä kuivattavasta puumateriaalista ilmakuutiota kohti, mikäli kuivausilmaa lämmitettäisiin siten, että sen lämpötila vielä kuivurin jälkeen olisi 20 tai 40 °C. Ilman kuivauskyky on sinisen kylläisen käyrän arvon ja punaisen vakioarvokäyrän erotus, näissä esimerkkitapauksissa 12,5 ja 46,4 g/m^3. Kuvasta nähdään selvästi, kuinka paljon ilman lämmittäminen parantaa kuivausilman vesihöyrynsitomiskykyä.



Kuva 10. *Kylläisen ilman vesihöyrypitoisuus lämpötilan funktiona.*

Kun kostean polttoaineen kuivaus aloitetaan, kuivausilma voi aluksi muuttua kylläiseksi, jos hake- tai pilkekerros on riittävän paksu ja kuivausilman nopeus kerroksen läpi on riittävän matala. Kun kerroksen kuivuminen on edistynyt, ei samanlainen kuivausilmavirta pysty enää irrottamaan puusta yhtä paljon vettä kuin alussa ja ulos menevän kuivausilman suhteellinen kosteus alkaa pienentyä. Tällöin voidaan aloittaa kuivausilman kierrätys eli se johdetaan polttoainekerroksen läpi lämmönvaihtimelle, jossa kierrätetyn kuivausilman lämpötila nousee uudelleen ja sen suhteellinen kosteus laskee. Näistä syistä kuivausilman kyky kuivata polttoainetta paranee uudelleen ja samalla ilmalla voidaan vielä jatkaa kuivausta.

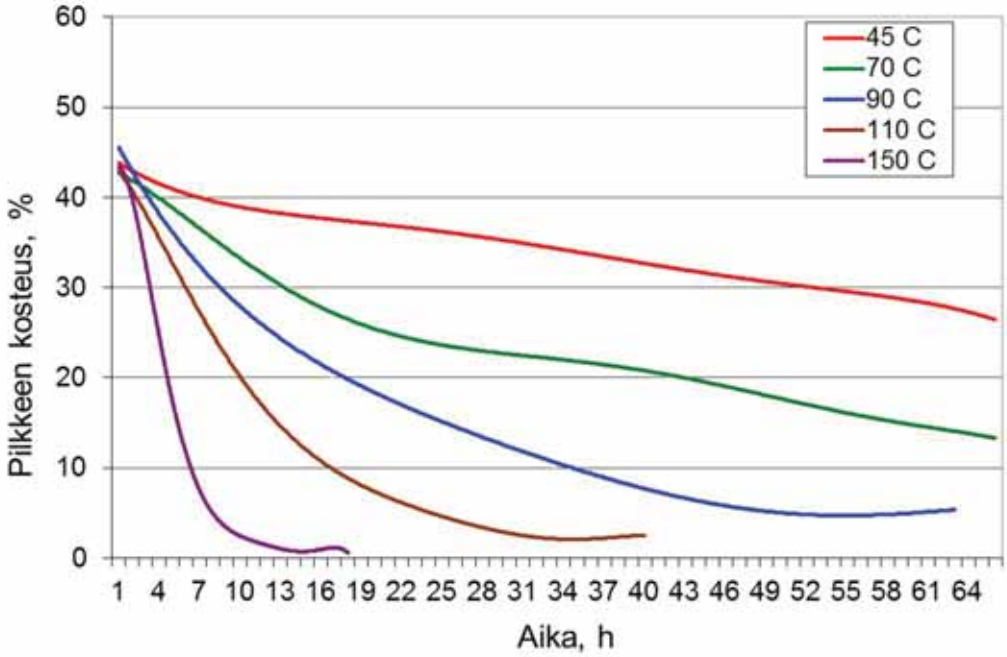
Hyötysuhteen parantamiseksi kuivuri on hyvä varustaa ilman esilämmityksellä. Tällöin kaikki kuivurista ulos poistettava ilma johdetaan esilämmittimelle, jossa toisella puolella virtaa kuivuriin ulkoilman lämpötilassa sisään menevä ilma, joka lämpiää kuivurista ulostulevan kostean ja lämpimän ilman avulla. Kuivurista poistettava ilma jäähtyy, jolloin osa siinä olevasta vesihöyrystä kondensoituu ja luovuttaa lämpöä sisään menevään ilmavirtaan. Lämpöä siirtyy myös sen vuoksi, että poistettavan ilman lämpötila laskee. Esilämmitin nostaa kuivuri-investoinnin hintaa, mutta saavutettava kuivausenergian säästö maksaa esilämmittimestä aiheutuvan lisäkustannuksen nopeasti jos esilämmitin on oikein mitoitettu.

3.2 Lämpötilan vaikutus pilkkeiden kuivumisnopeuteen

Lämpimän ilman käyttö puun kuivauksessa lyhentää kuivausaikaa merkittävästi. Asian havainnollistamiseksi pilkkeen kuivumisnopeutta mitattiin Työtehoseuran laboratoriossa eri kuivumislämpötiloissa. Testikuivuriin laitettiin noin 33 cm:n pituisia ja tuorepainoltaan noin 1 kg:n painoisia koivupilkkeitä. Kuivausilmaa puhallettiin pilkekasan läpi vähintään nopeudella 3 m/s ilman suhteellisen kosteuden ollessa alle 10 %.

Kuivausolosuhteet ovat laboratoriossa lähes optimaaliset, joten kuvassa 11 esitetyt kuivausajat kuvaavat lyhintä mahdollista kuivausaikaa tavallisessa lämmin- ja kuumailmakuivauksessa. Oheisessa esimerkissä ei ole myöskään kiinnitetty huomiota kuivausenergian kulutukseen.

Käytännössä kuivureissa tapahtuu aina lämpöhäviöitä eikä korkeamman kuivauslämpötilan parempaa kuivausominaisuutta saada täysin hyödynnettyä. Siitä huolimatta kuivausaika lyhenee noin kolmasosaan, mikäli kuivauslämpötila nostetaan esimerkiksi 45 asteesta 70 asteeseen.



Kuva 11. *Lämpötilan vaikutus pilkkeiden kuivumisnopeuteen. (Hillebrand, Kouki 2006).*

3.3 Kuivauksen energiatarve

Puun kuivauksen energiatarpeeseen vaikuttavat eniten edellisissä luvuissa luetellut asiat. Lisäksi on huomioitava kuivurin rakenteeseen ja hyötysuhteeseen liittyvät seikat, jotka ovat aina tapauskohtaisia. Kuivurin eristäminen ja kuivausilman kierrätys sekä poistoilman lämmön talteenotto lisäävät merkittävästi kuivauksen energiatehokkuutta. Tuloilman ja kuivattavan puuerän lämmittämiseen kuluu myös paljon energiaa, joten kesä- ja talvikuukausien energiankulutuksella on suuria eroja. Keinokuivauksessa kuluu lämpöenergiaa seuraaviin kuivauksen osavaiheisiin:

- Puussa olevan jään lämmittäminen (talvella)
- Puussa olevan jään sulattaminen (talvella)
- Puussa olevan veden lämmittäminen veden höyrystymislämpötilaan
- Kuivan puuaineen lämmittäminen kuivauksen loppulämpötilaan
- Veden höyrystäminen
- Kuivurin lämpöhäviöt

Alla olevaan taulukkoon on laskettu esimerkit 25 m^3 panoskuivurissa kuivattujen puuerien lämpöenergiankulutukset kesällä ja talvella. Lisäksi tulee huomioida puhaltimien käyttämä sähkönkulutus. Esimerkistä nähdään, että talvella kuivaukseen tarvitaan lämpöenergiaa selvästi enemmän kuin kesällä.

Taulukko 1. *Esimerkkilaskelmat 25 i-m^3 hake- tai pilke-erän kuivauksen lämmönkulutuksesta kesällä (17 °C heinäkuun keskilämpö) ja talvella (-7 °C tammikuun keskilämpö), kun puun lähtökosteus on 45 % ja loppukosteus 20 % ja kuivurin oletettu hyötysuhde kesällä on 70 % ja talvella 50 %. Suluissa on kunkin vaiheen suhteellinen osuus lämpöenergiankulutuksesta.*

Kesä		**Talvi**	
		Jään lämmittäminen; kWh	15 (<1 %)
		Jään sulattaminen, kWh	291 (10 %)
Puussa olevan veden lämmittäminen, kWh	147 (6 %)	Puussa olevan veden lämmittäminen, kWh	147 (5 %)
Puun kuiva-aineen lämmittäminen, kWh	28 (1 %)	Puun kuiva-aineen lämmittäminen, kWh	58 (2 %)
Veden höyrystäminen, kWh	1461 (63 %)	Veden höyrystäminen, kWh	1461 (52 %)
Hyötysuhteesta johtuva energiankulutus, kWh	701 (30 %)	Hyötysuhteesta johtuva energiankulutus, kWh	1972 (50 %)
Yhteensä, kWh	**2337**	**Yhteensä, kWh**	**3945**
kWh/i-m^3	**93**	**kWh/i-m^3**	**158**

3.4 Kuivurin suunnittelussa ja käytössä huomioitavaa

Kuivausilman vesihöyryn sitomiskykyyn vaikuttaa säätilan lisäksi vuodenaika, vuorokaudenaika ja paikalliset olosuhteet kuten esimerkiksi vesistöjen läheisyys. Kevät- ja kesäkuukausina ilman suhteellinen kosteus on matala, mikä tehostaa kuivausta. Lisäksi kesäkuukausina ilman lämpötila on korkeimmillaan, millä on merkittävä vaikutus kuivauksessa tarvittavan energian määrään ja sitä kautta kustannuksiin.

Energiankäytön optimoimiseksi kuivuriin kannattaa aina asentaa sekä sisään että ulos menevän ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaavia antureita, joiden avulla puhalluksen määrää ja ilman kierrätystä voidaan säädellä. Sähköisten anturien tarkkuus vaihtelee suhteellisen kosteuden osalta ± 1 %:sta ± 5 %:iin. Lämpötilan mittauksessa voidaan päästä ± 0,2 %:iin. Anturit on suojattava likaantumiselta ja ne on asennettava paikkoihin, joissa voidaan mitata keskimääräisiä ilmavirtoja.

Jos kuivausenergia otetaan kattilasta, sitä on yleensä edullisinta käyttää kesäkuukausina, jolloin kattilan teho on pieni ja hyötysuhde heikko. Tällöin tarvittava lisäteho nostaa kattilan hyötysuhdetta ja parantaa sen käytettävyyttä. Talvella, kattilan mitoituksesta riippuen, kuivaukseen tarvittavaa tehoa ei välttämättä ole edes saatavissa. Lisäksi polttoainetta tarvi-

Kuva 12. *Räystäässä oleva anturi mittaa kuivuriin tulevan ulkoilman kosteutta ja lämpötilaa. Antureita ja niiden komponentteja saa elektroniikkaliikkeistä. (Kuva: Veli-Pekka Kauppinen).*

taan yleensä eniten talvella, minkä vuoksi kuivausenergian käytön minimoimiseksi polttoainetta tulisi kuivata mahdollisimman paljon kesällä. Toisaalta tällöin tarvittavan varaston koko kasvaa ja siitä syystä myös tarvittava investointi tulee kalliimmaksi. Kuivurin ja siihen liittyvän varaston suunnittelussa tulisi löytää sellainen yhdistelmä, jolla koko investoinnin elinkaaren aikaiset kokonaiskustannukset saadaan minimoitua.

Mikäli kaikki polttoaine kuivataan kesällä (ja/tai keväällä ja syksyllä), voidaan valita teholtaan pienempi kattila ja säästää siten kustannuksissa. Kattilan teho valitaan tällöin talven oletetun maksimitehon perusteella. Isoimpien biomassakattiloiden (> 1 MW) kapasiteetti valitaan yleensä vastaamaan 60–80 % tarvittavasta maksimitehosta. Korkeimpien tehohuippujen aikana voidaan käyttää lisänä esimerkiksi öljyä.

Jos biomassakattilan kapasiteetiksi on valittu esimerkiksi 60 % talvella tarvittavasta maksimitehosta, tarvittava öljyn käyttö talvella vastaa tavallisesti noin 10–15 % kaikesta vuosittaisesta polttoaineen käytöstä.

Jos tarvittavan kattilan teho on vain muutamien satojen kilowattien luokkaa, voidaan valita myös biomassakattila, jonka kapasiteetti riittää talven huippukuormillakin, koska kattiloiden hintaerot pienemmissä kokoluokissa ovat yleensä hyvin pieniä. Esimerkiksi 300 kW:n kytkentävalmis lämpökontti voi maksaa 150 000 euroa, mutta saman valmistajan 500 kW:n lämmöntuotantoyksikkö maksaa vain 20 000 euroa enemmän.

Kostea hakekasa voi ennen kuivausta lämmetä mikrobitoiminnan vuoksi, ja samalla puun kuiva-aine vähenee. Kuiva-ainehävikki voi olla merkittävä, jos haketta säilytetään pitkään kasassa ennen kuivausta. Hakkeessa oleva suuri viherainemäärä edesauttaa mikrobien ja lahottajasienten toimintaa, pahimmassa tapauksessa kasa tai osa siitä voi homehtua. Näiden molempien estämiseksi hake kannattaisi kuivata alle 30 prosentin kosteuteen, mikäli sitä aiotaan varastoida useita kuukausia kuivauksen jälkeen. Sama pätee luonnollisesti myös pilkkeen kuivaamiseen.

Hakkeen palakoolla ja kuivattavan hakekerroksen paksuudella on merkitystä kuivauksen tehokkuuteen ja tarvittavan kuivausilmapuhaltimen kokoon. Ne molemmat vaikuttavat hakekasaan menevään ilmanpaineeseen sekä mahdolliseen kuivausilman kanavoitumiseen. Taulukossa 2 on esitetty hakekerroksen maksimikorkeus palakooltaan erilaisille hakkeille.

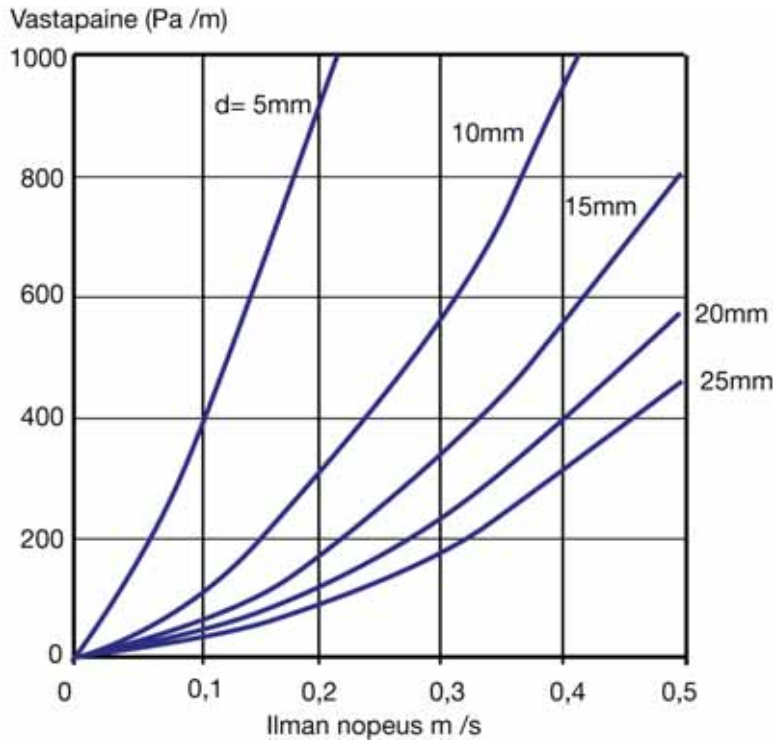
Taulukko 2. *Hakekerroksen maksimipaksuus (Linna ym. 1983).*

Hakkeen koko, cm	Kerroksen 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

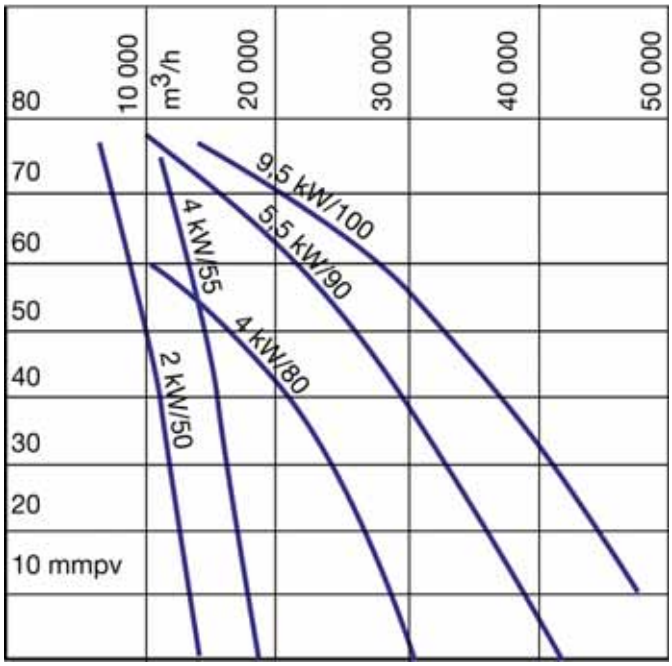
Kuvassa 13.a on esitetty hakekerroksen ilmavirtaukseen aiheuttama paine-ero ilman nopeuden ja hakkeen palakoon funktiona silloin, kun hakekerroksen paksuus on 1 metri.

Kuvassa 13.b on taas tarvittava puhallinteho paine-eron ja kuivausilman tilavuusvirran funktiona. Jos esimerkiksi hakekerroksen korkeus on 1,5 metriä, sen palakoko 20 mm, ilman nopeus 0,3 m/s ja puhaltimen halutaan tuottavan 30 000 m^3/h, haetaan ensin kuvasta 13.a hakekerrosmetriä kohti syntyvä paine-ero, joksi saadaan noin 240 Pa (Pascal). Koska kerroksen paksuus on 1,5 m, täytyy saatu luku kertoa vielä 1,5:llä, jolloin paine-ero koko kerroksen läpi on noin 360 Pa, mikä on n. 36 mmvp (millimetriä vesipatsasta).

Nyt kuvasta 13.b saadaan kohdasta 36 mmvp ja 30 000 m^3/h, että sopiva puhallin olisi teholtaan 5,5 kW ja halkaisijaltaan 90 cm. Kuva 13.b on vain yksi esimerkki puhallinkäyrästöistä. Puhaltimien valmistajilta saa vastaavat heidän omia puhaltimiaan vastaavat käyrät.



Kuva 13. a) *Hakekerroksen läpi menevän ilman paine-ero ilman nopeuden ja hakkeen palakoon funktiona (Linna ym. 1983).*



Kuva 13. b) *Tarvittava puhallinteho polttoainekerroksen paine-eron ja kuivausilman tilavuusvirran funktiona. (Linna ym. 1983).*

Kuva 14. *1500 i-m³ kuivailmakuivurin imupuhallinrivistö 5,5 kW:sta 7,5 kW:iin. (Kuva: Kari Vuorio).*

Puhaltimien sijoittelussa on huomioitava, että puhallin tarvitsee vapaata tilaa sekä ennen potkuria että sen jälkeen vähintään puhaltimen halkaisijan verran. Muuten puhallin ei pysty siirtämään sille luvattua ilmamäärää. Puhallin pyritään sijoittamaan aurinkoiselle ja kuivalle seinustalle, jotta hake- tai pilkekasaan menevän kuivausilman lämpötila olisi mahdollisimman korkea ja suhteellinen kosteus alhainen. Puhaltimia ei kannata käyttää silloin, kun ulkoilman suhteellinen kosteus on korkea. Puhaltamista säädellään ilman suhteellisen kosteuden ja puun kosteuden mukaan. (Erkkilä ym. 2012).

3.5 pilkkeen ja hakkeen kuivaamisen erot

Hakkeen ja pilkkeen kuivauksessa on jonkin verran eroja, joista keskeisimmät ovat:

• Hakkeesta irtoaa vettä kuivausilmavirtaukseen enemmän, koska polttoineen kuivauspinta-ala on hakkeen pienemmän palakoon vuoksi moninkertainen pilkkeeseen verrattuna. Vaikka polttoainekerrokset olisivat samanpaksuisia, hake kuivuu nopeammin.

• Paine-ero hakekasan läpi on suurempi kuin pilkkeellä, ja puhallin kuluttaa enemmän energiaa.

• Jos hakkeen joukossa on paljon hienoainesta, paine-ero hakekasan läpi kasvaa.

• Pilkkeellä kuivausilman kierrätystä tarvitaan enemmän, jotta kuivurista poistettavan ilman suhteellinen kosteus saadaan riittävän korkeaksi ja kuivurin hyötysuhde siten paremmaksi.

Edellä mainitut seikat pätevät silloin, kun hake- ja pilkekuivurissa polttoainekerrokset ovat yhtä suuria ja ilman tilavuusvirtaukset ja lämpötilat samoja. Käytännössä pilkekuivurissa kannattaa yleensä käyttää pienempää ilmavirtausta, jotta ilman suhteellinen kosteus saadaan muuttumaan riittävästi sen virratessa pilkekerroksen läpi. Tällä seikalla on jokseenkin sama vaikutus kuin ilman kierrätyksen lisäämisellä.

Polttoainekerroksen tulisi olla mahdollisimman tasalaatuinen ja samanpaksuinen kuivausilman kanavoitumisen välttämiseksi. Erityisesti hakkeella tämä on tärkeää, koska ilmanpaine-ero ennen hakekerrosta ja sen jälkeen on yleensä korkea ja aiheuttaa sen vuoksi helposti kuivausilman kanavoitumista.

4 Kuivuriesimerkkejä

Jyrki Kouki ja Kari Vuorio, TTS, Jyrki Raitila, VTT, Lasse Maunula, Metsäkeskus, Hannu Vilkkilä, JAMK, Pasi Nuutinmäki, Maatilayrittäjä.

Maaseudulla eniten kuivureita on rakennettu hyvälaatuisen, kaupallisen pilkkeen kuivaukseen. Siksi tähän oppaaseen on koottu esimerkkejä lähinnä pilkekuivureista.

4.1 Kylmäilmakuivurit

Ulkoilma joko puhalletaan tai imetään koneellisesti kuivattavan pilkekerroksen läpi. Rakenteellisesti tämän tyypin kuivureita on useita erilaisia. Yksinkertaisimmillaan se on auma, jonka keskelle on auman suuntaisesti jätetty toisesta päästään suljettu ilmanjakokanava. Kanavan toiseen päähän on asennettu puhallin, joka pakottaa ilman kiertämään kasan läpi. Kuivuri voidaan myös sijoittaa sisätiloihin, jolloin pilke on sateelta suojassa.

Rakenteeltaan edullinen kuivuri saadaan, kun pilkkeet kasataan kahden koottavan seinän väliin ja kasa peitetään muovilla. Toisesta päästä kasa jätetään auki ja toisesta päästä puhallin imee ilmaa kasasta (kuva 15). Peitteenä toimiva muovi pakottaa ilman kulkemaan avonaisesta päädystä sisään ja puhaltimen kautta ulos. Rakennettaessa tällainen kuivuri esimerkiksi asfaltin päälle, voidaan kasa tyhjentää esimerkiksi etukuormaimella. Tällaisessa imevässä kuivurissa pilkkeet alkavat kuivua ensimmäiseksi puhaltimen (tässä tapauksessa imurin) vastaisesta päästä.

Silloin kun kuivuri rakennetaan rakennukseen, kuivausilma voidaan jakaa pilkekasaan monella eri tavalla. Kallein rakenteellinen ratkaisu on päältä ajettava lattia, jonka alla olevista ilmanjakokanavista kuivausilma joko puhalletaan tai imetään ritilälattian läpi pilkekerrokseen. Päältä ajettavassa kylmäilmakuivurissa ongelmia aiheuttaa kuivurin rakenteesta johtuvat painehäviöt. Pitkä ja mutkikas ilmanjakokanava sekä liian pienireikäinen pohjapelti vaikeuttavat ilman kulkeutumista kuivurissa. Seurauksena on normaalia pidempi kuivausaika ja mahdolliset homeviat.

Mikäli pohjapellin reiät ovat liian suuret, lattia vaurioituu varsinkin etukuormaajaa käytettäessä.

Kallis ratkaisu on tehdä lattia lankuista ja jättää niiden väliin sopivat raot. Myös lankkulattia kuluu nopeasti etukuormainkäytössä.

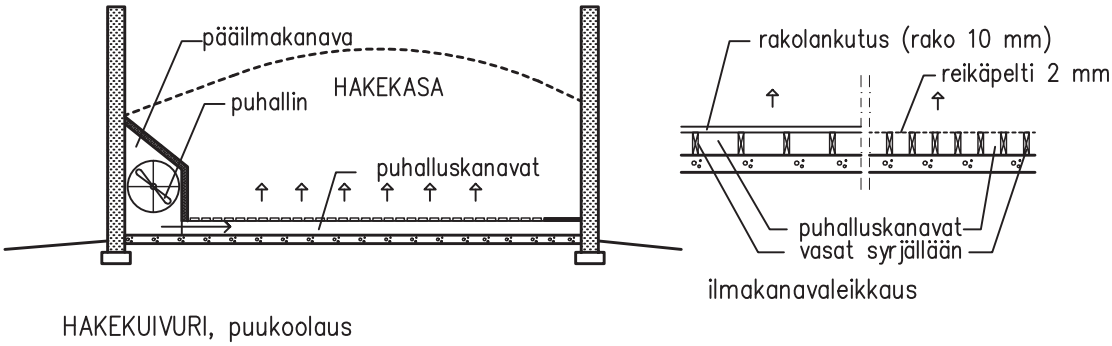
Kaikissa tapauksissa lattia tulee olla irrotettavissa puhdistusta varten, koska roskia ja lastuja varisee lattian alle tukkien ilmakanavat.

Niin sanottu alipainekuivuri voidaan rakentaa suoraan betonilattian päälle, jolloin kuivurin tyhjennys on helppo tehdä vaikka etukuormaajalla. Tällaisen kuivurin pilkkeet tulee aina peittää pressulla oikean ilmanjaon varmistamiseksi.

Kylmäilmakuivauksen suurin heikkous on sen riippuvuus säästä. Mikäli kevät ja kesä ovat sateisia ja kylmä kuivausjakso venyy pitkäksi, pilkkeen laatu kärsii (homeet ja väriviat). Ajoittaisella lisälämmöllä voidaan laskea kuivausilman suhteellista kosteutta, jolloin ilman kuivauskyky kasvaa. Lisälämmön taloudellinen käyttö kylmäilmakuivauksessa vaatii käyttäjältään huolellisuutta tai automatiikan käyttöä puhaltimen ja lämmittimen ohjauksessa.

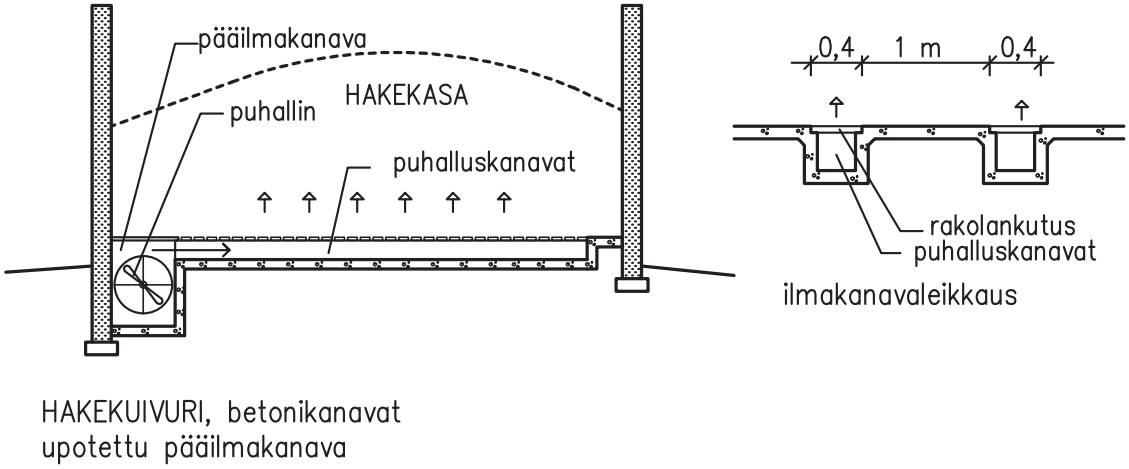
Kuva 15. *Muovin päälle rakennettu kevytrakenteinen alipainekuivuri. (Kuva: Olli-Pekka Koisti).*

Kuva 16. *Ilmakanavat betonilattian päällä. Lauta suojaa reikäpeltiä etukuormaimen kauhalta. Suojana voi käyttää myös lattarautaa. (Kuva: Veli-Pekka Kauppinen).*



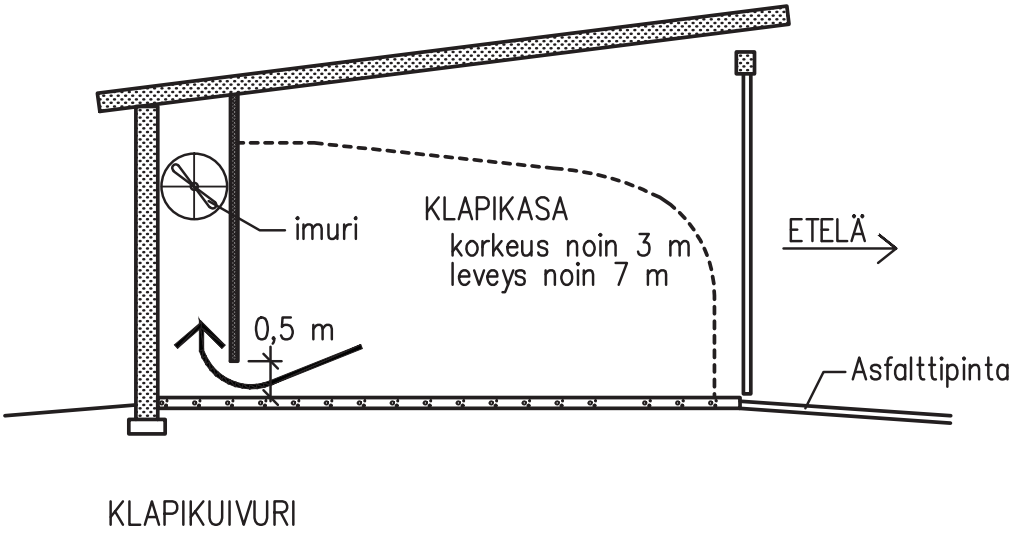
Kuva 17. *Periaatepiirros ilmakanavat betonilattian päällä. (Piirros: Timo Heinälä ProAgria, Keski-Suomi).*

Kuva 18. *Ilmakanavat upotettuna betonilattiaan. (Kuva: Veli-Pekka Kauppinen).*



Kuva 19. *Periaatepiirros ilmakanavat upotettuna betonilattiaan. (Piirros: Timo Heinälä ProAgria, Keski-Suomi).*

Kuva 20. *Alipainekuivuri betonilattialla. (Kuva: Kari Vuorio).*



Kuva 21. *Periaatepiirros alipainekuivuri betonilattialla. (Piirros: Timo Heinälä ProAgria, Keski-Suomi).*

siirrettävä kenttäkuivuri

Pilkeyrittäjä Pentti Romo Selkistä kehitti kevytrakenteisen siirrettävän kylmäilmakuivurin. Siihen mahtuu kerrallaan noin 70 irto-m³ pilkettä (kuva 22). Kevytrakenteinen ja helposti pystytettävä kuivuri ei vaadi perustuksia, vaan se lukitaan paikalleen maakiiloilla. Seinät on tehty joko trukkilavoista tai harvaan naulatuista laudoista. Kuivurin täytyttyä pressukatto rullataan kiinni. Lattia on kuiva maapohja, jossa eristeenä käytetään purua. Pystytys ja purkaminen käyvät kahdelta mieheltä kevyesti, kun käytössä on puutavarakuormain. Puutavara katkotaan ja halkaistaan pilkontakoneella, jonka kuusi metriä pitkällä poistokuljettimella pilke siirretään suoraan kuivuriin. Pilkekoneessa olisi hyvä olla purun ja roskanpoistomahdollisuus, jotta ne eivät kulkeutuisi kuivuriin. Nämä pienet roskat vaikeuttavat ilman kulkeutumista ja siten huonontavat kuivumista.

Jos sää on suosiollinen, pilkkeet voidaan kuivata kylmäilmakuivauksena. Jos sää on kylmä ja sateinen, voidaan käyttää lisälämpöä. Oleellista on, että kuivaus voidaan aloittaa heti ja pilke on sateelta suojassa. Kuivat pilkkeet voidaan varastoida kuivurissa, kunnes ne toimitetaan asiakkaalle. Kosteissa oloissa pilkkeiden päihin saattaa muodostua hometta. Tämä voidaan estää puhaltamalla kuivuriin lämmintä

Kuva 22. *Pentti Romon suunnittelema ja rakentama kevytrakenteinen siirrettävä kenttäkuivuri. (Kuva: Jyrki Kouki).*

ilmaa. Kuivuri tyhjennetään lisäpiikeillä varustetulla puutavarakuormaimella suoraan jakeluautoon asiakkaalle toimitusta varten. Kuivurin toisessa päädyssä on pariovet, joten kuivuria voidaan käyttää myös varastona tai muun materiaalin kuivaukseen.

Kuivuri on varustettu halkaisijaltaan 0,8 m potkuripuhaltimella, jonka teho on 4 kW. Puhallin siirtää ilmaa 100 Pa:n vastapaineella noin 15 000 m³/tunti. Ilma jaetaan pilkekasaan hieman kartiomaisella ilmanjakoputkella, joka voidaan vetää tarvittaessa kasasta ulos ennen kuivurin tyhjennystä. Puhallinta ohjaa imuaukon läheisyyteen sijoitettu säädettävä kosteuskytkin (hygrostaatti).

Työtehoseura mittasi kuivurin toimintaa 32 vuorokauden ajan, jolloin koivupilkkeet kuivuivat keskimäärin 40 %:n lähtökosteudesta 14 %:iin. Yhden irtokuution kuivaamiseen kului keskimäärin 15 kWh sähköä. Saavutettu 14 %:n loppukosteus oli turhan alhainen. Kuivausaika olisi siis käytännössä voinut olla lyhyempi.

vanhaan navettaan rakennettu kuivuri lämmönkeräimellä

Saarijärvellä Pasi Nuutinmäen kuivuri on tehty vanhaan parsinavettaan navetassa jo olevia lietekouruja hyödyntäen. Pilkkeet kuivataan entisten lietekourujen päällä kasoissa siten, että ilma imetään kourujen kautta pilkekasan läpi. Kuivurissa on kaksi kuivausosaa, yksi entisen syöttöpöydän kummallakin puolella. Kokonaisuudessaan kuivuriin mahtuu noin 125 i-m³ pilkkeitä. Molempiin lietekouruihin on sijoitettu puhaltimet, joiden kummankin sähköteho on noin 800 W. Puhaltimien avulla pilkkeiden läpi kulkee noin 10 000 m³ ilmaa tunnissa. Kuivurin rakenne mahdollistaa myös ilman kierrättämisen uudelleen puukasojen läpi. Pilkkeet siirretään kuivuriin ja siitä pois pienkuormaimella, sillä ritilät kestävät päällä ajamisen.

Navetan katolle on rakennettu lämmönkeräin, joka on tehty siten, että vanha tiilikatto on maalattu mustaksi ja sen päälle, noin 10 cm korkeudelle on asennettu valokate. Ilma siirretään syntyneen raon ja katon harjan alle rakennetun keräyskanavan kautta alas navettaan. Ilma imetään navettaan ja sieltä ulos eri puhaltimilla. Puhaltimien virtaus on hieman pienempi kuin pilkkeiden läpi puhaltavien puhaltimien, ja teho molemmilla on noin 400 W. Keräimen pinta-ala on noin 100 m². Parhaimmillaan ilma lämpenee keräimessä noin 15 astetta, mikä vastaa hieman yli 50 kW tehoa. Katon suunta ei ole aivan optimaalinen, vaan se on noin 60 astetta etelästä idän suuntaan. Katto on kaltevuudeltaan noin 30 astetta.

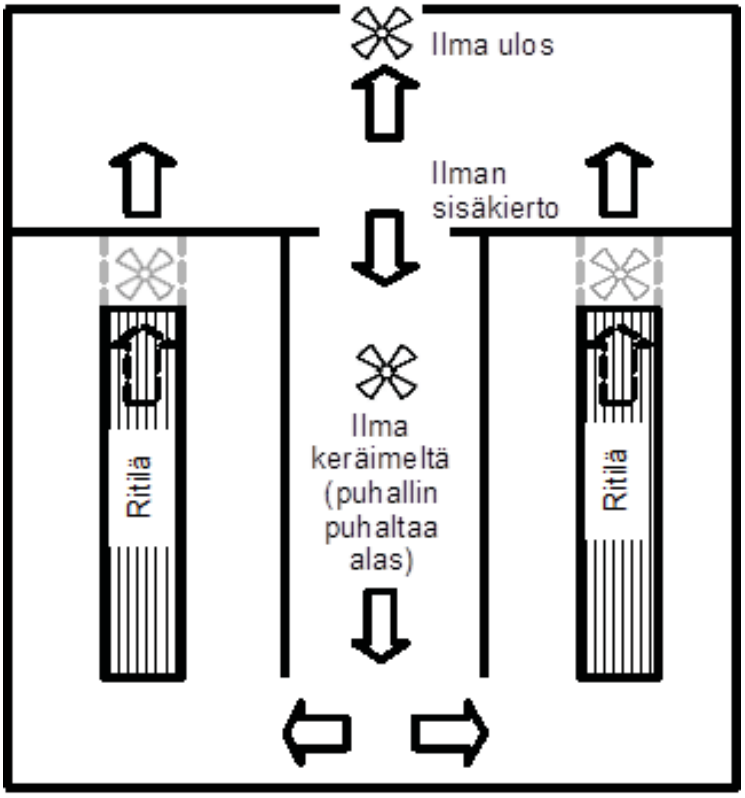
Kuva 23. *Navetan kuivausosa. Ritilä peitetään muovilla, jos kuivuri ei ole täysi. (Kuva: Veli-Pekka Kauppinen).*

Kuivausta ohjataan tietokoneella tarkoitusta varten suunnitellulla mittauslaitteistolla ja ohjelmistolla. Ohjauslaitteisto tarkkailee tulevan ja lähtevän ilman kosteuksia ja lämpötiloja niin, että ilmaa voidaan puhaltaa vain tarpeen mukaan ja sopivien olosuhteiden vallitessa. Kuivurin eri puolia voidaan myös ajaa eri asetuksilla, jolloin kuivaamista voidaan porrastaa halutusti, jotta täyttäminen ja purkaminen olisi mahdollista kuivauksen ollessa käynnissä toiselle puolelle.

Kuivuria käytetään vuosittain noin puoli vuotta, kevätpäiväntasauksesta syyspäiväntasaukseen. Normaalina kesänä kuivurilla saa kuivattua purkamiset ja täyttämiset huomioiden kaksi 125 i-m^3 erää. Keskikesän pitkä hellejakso mahdollistaisi myös kolmannen erän kuivaamisen, mikäli toinen erä olisi kuiva heinä-elokuun vaihteessa. Sähkön kulutus kuivurilla on kokemusten mukaan reilut 1000 kWh kuivurillista kohti (125 i-m^3) eli vajaat 10 kWh / i-m^3.

Käytännön kokemuksena on havaittu, että seinät ja sisäkatto olisi hyvä eristää paremmin. Nykyisin huonosti eristettyjen betonitiiliseinien ja katon takia noin puolet aurinkokeräimellä saadusta lämpöenergiasta kuluu hukkaan.

Kuva 24. *Navetta ja lämmönkeräin ulkoapäin. (Kuva: Veli-Pekka Kauppinen).*

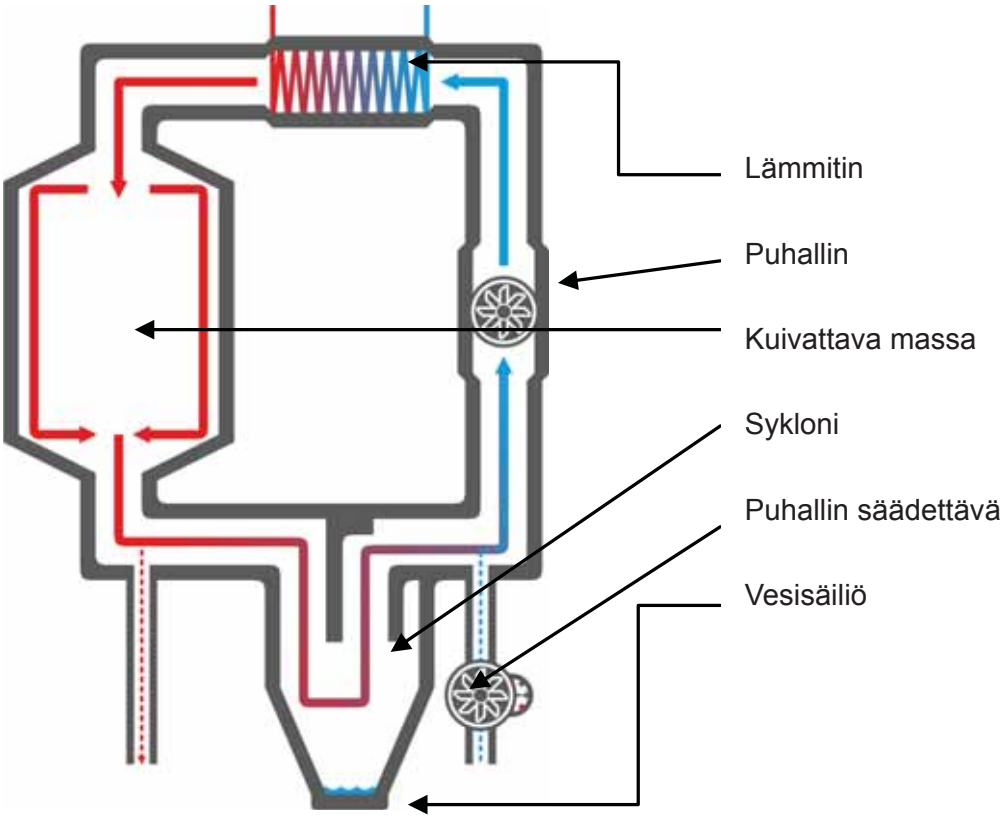


Kuva 25. *Periaatepiirros kuivurista. Harmaat osat lattian alla. (Piirros: Pasi Nuutinmäki).*

4.2 Lämminilmakuivurit

Mikäli kuivausaika halutaan lyhyeksi tai toiminta ympärivuotiseksi käytetään lämminilmakuivausta. Kuivausilman lämpötilan ylärajana pidetään 100 ˚C. Mikäli se on korkeampi, käytetään termiä kuumailmakuivaus. Tällöin kuivurit ovat samantyyppisiä kuin sahatavaran kuivauksessa käytetyt kuivurit. Kuivaamorakennus tulee olla hyvin kosteus- ja lämpöeristetty. Lämminilmakuivureita on joko jatkuvatoimisia tai eräkuivureita. Jatkuvatoimiset mallit soveltuvat hyvin pilkkeen suurtuotantoon, mutta vaativat tasaisen ympärivuotisen pilkevirran ollakseen taloudellisesti kannattavia.

Kuvassa 26 on esitetty periaatepiirros lämminilmakuivurista. Kuivuri on kauttaaltaan hyvin lämpöeristetty. Lämmönvaihtimessa lämmennyt ilma puhalletaan kuivattavan kerroksen yläosaan ja kostunut ja jäähtynyt ilma imetään kuivurin alaosasta syklonin kautta uudelleen lämmönvaihtimeen. Kuivattavan erän lämpötila alkaa nousta nopeasti ja kuivausilman suhteellinen kosteus pysyy korkeana. Kuivattavan kappaleen pinta ei kuivu liikaa ja lämpöä johtuu hyvin kappaleen sisäosiin, mikä mahdollistaa kappaleen kuivumisen myös sisältä. Voimakkaalla sisäisellä kierrolla



Kuva 26. *Ilman kierrätys lämminilmakuivurissa. (Malli TTS, piirros Lasse Maunula).*

varmistetaan lämmön jakautuminen tasaisesti koko kuivattavaan erään. Samalla osa kuivausilmasta vaihdetaan siten, että osa kosteaa ilmaa puhalletaan ulos ja samalla puhalletaan kuivempaa ulkoilmaa tilalle. Näin kierrosta saadaan vettä ulos. Kuivauksen alkuvaiheessa – varsinkin jos kuivattava erä on kaatotuoretta – tulee vettä myös syklonin pohjalle.

Sisäinen ilmankierto tulisi olla vähintään kymmenkertainen ulkoiseen kiertoon verrattuna, silloin ei puhalleta arvokasta lämmitysenergiaa liian aikaisin ulos. Ulkoista puhallusta voidaan ohjata tarkkailemalla kuivurista sykloniin menevän ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta.

Klapikeskus Oy:n Heinävedellä (kuva 27) sijaitseva lämminilmakuivuri on suunniteltu toimivaksi ympäri vuoden. Pilkkeet tehdään pilkekoneella suoraan trukkilavan päällä olevaan verkkosäkkiin, josta ne viedään trukilla kuivaamoon. Säkit pinotaan kuivuriin mahdollisimman tiiviisti vierekkäin ja kahteen kerrokseen. Kun kuivuri on täynnä, aloitetaan erän kuivaus, johon lämpö tuotetaan hakkeella. Rakenteet mahdollistavat lämpötilan noston aina 70 asteeseen saakka. Lämmin ilma puhalletaan katossa olevilla putkilla kuivuriin ja kostunut ilma imetään lattian ritilöiden kautta ulos kuivurista. Kylmennyt ja kostunut ilma johdetaan takaisin ilmalämmittimeen, josta se puhalletaan takaisin kuivuriin. Kun ilman suhteellinen kosteus on noussut riittävän korkeaksi, osa ilmasta puhalletaan ulos ja tilalle otetaan raitista ulkoilmaa edelleen lämmitettäväksi. Näin kosteus saadaan siirrettyä kuivurista ulos. Säkkien uloimmat pilkkeet kuivuivat nopeasti. Jotta myös sisäosien pilkkeet saadaan kuivaksi, joudutaan kuivausaikaa hieman pidentämään.

Kuva 27. *Heinäveden klapikeskus Oy:n lämminilmakuivuri. (Kuva: Kari Hillebrand).*

Alipainekuivuri

Alipainekuivauksen (50–400 mbar) etu on matala kuivauslämpötila ja nopea, vähän puun sisäisiä jännityksiä aiheuttava kuivaus. Energiankulutus on melko pieni ja mitään puusta haihtuvia aineita ei pääse ilmaan, koska syntynyt höyry tavallisesti lauhdutetaan nestemäiseen muotoon.

Alipainekuivaus perustuu veden kiehumispisteen alenemiseen paineen laskiessa ja ylipaineen muodostumiseen puun sisälle. Puun sisäisen ylipaineen vuoksi vesi kulkeutuu pintaa kohti nopeammin kuin normaalisti. Tästä syystä puun pinnan ja sisäosan välille ei synny jännityksiä aiheuttavaa kosteuseroa. Vesi kiehuu jopa 35–40 °C lämpötilassa, tavallisesti käytetään kuitenkin 50–80 °C kiehumispistettä vastaavaa alipainetta.

Sahatavarakuivurin käyttö pilkkeen kuivaamiseen

Sahatavaran kuivaukseen suunnitellut kuivurit soveltuvat hyvin myös pilkkeen kuivaukseen. Energian säästämiseksi niissä on yleensä tehokas ilman kierrätys, mikä voidaan yhdistää kondenssikuivaamiseen. Siinä puusta höyrystetty vesi kondensoidaan eli tiivistetään uudelleen vedeksi, jolloin veden haihtumislämpö voidaan ottaa talteen lauhduttimen avulla. Jatkuvatoimisessa kuivurissa lämmin höyry voidaan myös ohjata vastavirtaan kuivattavaan materiaaliin nähden, jolloin lauhtumislämpö sitoutuu kuivatettaviin pilkkeisiin ja kaikki kosteus poistuu vetenä.

Laukaan vankilan DRY-AIR DA 6 puutavarakuivaamo on hyvä esimerkki siitä, kuinka sahatavarakuivuri toimii pilkkeen kuivauksessa. Kuivuriin mahtuu kerralla noin 15 i-m^3 puuta, joka kuivataan 60 °C lämpötilassa viidessä vuorokaudessa alle 20 prosentin tavoitekosteuteen. Vuorokaudessa puusta pystytään haihduttamaan 450 litraa vettä. Kuivurissa on käytössä kuusi 0,55 kW puhallinta, joiden pyörimissuuntaa voidaan vaihtaa silloin, kun halutaan kierrättää kuivausilmaa. Kostea höyry lauhdutetaan ja vesi tiivistetään lämpöpumppuperiaatteella lauhduttimessa, jonka kompressorin teho on 5,8 kW. Varsinainen kuivauslämpö saadaan huoltorakennuksen pellettilämpökattilasta. Koko kuivaustapahtumaa säädellään automatisoidun ohjausyksikön avulla.

Kuva 28. *Pilkkeiden kuivaushäkkejä Laukaan vankilan tilalla lämminilmakuivurin ovella. (Kuva: Ari Erkkilä).*

Kuva 29. *Laukaan vankilan puutavarakuivaamon puhaltimet ja lämmönvaihtimet sijaitsevat kuivurin yläosassa. (Kuva: Ari Erkkilä).*

Jatkuvatoiminen kuivuri

Tampereen seudulla toimivan Tulenrako Oy:n kuivuri on rakennettu alun perin maalin kuivattamiseen tarkoitetuista uuneista. Jatkuvatoimista kuivausta varten uuninpätkistä koottiin noin 25 metriä pitkä tunneli. Jatkuvatoimista kuivuria täytetään sitä mukaa, kun sinne tulee tilaa. Toisin sanoen kuivurissa on yhtä aikaa sekä kuivia että märkiä pilkkeitä. Ylimääräinen kosteus poistetaan pilkkeiden matkatessa kuivurin läpi.

Tulenrako Oy:n kuivurissa jatkuvatoimisuus on toteutettu kuivurin lattiaan asennettujen kiskojen päällä kulkevien vaunujen avulla. Yhteen, noin metrin leveään ja pari metriä pitkään vaunuun voidaan kerralla lastata kolme kuution pilkesäkkiä. Vaunuissa ei ole vetoa, vaan ne siirretään kuivurin märästä päästä kohti kuivaa päätä joko manuaalisesti tai ulkopuolista konevoimaa hyödyntäen.

Kun linjassa pisimmällä olevan vaunun pilkkeet ovat riittävän kuivia, työnnetään vaunu kuivurista ulos. Samalla kuivuriin jäävät vaunut liikkuvat vaununmitan verran eteenpäin. Ulos pukatun vaunun pilkesäkit viedään varastoon ja vaunu siirretään pienkuormaajalla takaisin linjan alkupäähän täyttöä odottamaan.

Kuivausilmaa lämmitetään neljänkymmenen kilowatin tehoisella alapalokattilalla. Kattila, 700 litran lämminvesivaraaja ja lämmönvaihdin on toteutettu konttiratkaisuna. Lämmin kuivausilma puhalletaan kuivurin loppupäässä kyljestä sisään. Ilma

Kuva 30. *Jatkuvatoimisen kuivurin loppupää ja lämmityshuone. (Kuva: Veli-Pekka Kauppinen).*

poistuu kuivurin alkupäästä päätyoveen asennetun puhaltimen kautta. Jotta jatkuvatoimisesta kuivauksesta saa parhaan mahdollisen hyödyn, kannattaa pilkelämmitys korvata esimerkiksi hakekattilalla. Hakkeella kuivurin ympärivuorokautinen käyttö on huomattavasti helpompaa ja vähemmän työtä vaativaa kuin pilkekattilalla.

Jyväskylän ammattikorkeakoulun biotalousinstituutin lämpölaitoksen kuivuri

Jyväskylän ammattikorkeakoulun (JAMK) Biotalousinstituutin lämpölaitos ja kuivuri valmistuivat vuonna 2010. Kuivuria käytetään polttoaineen kuivaamiseksi haluttuun kosteuteen kattilatestauslaboratorion koeajoja varten. Kuivurilla voi kuivata klapeja, haketta ja viljaa. Lämpölaitos ja kuivuri on suunniteltu myös opetus- ja tutkimuskäyttöä ajatellen.

Kuivurin lattian pohjapinta-ala on 7,6 x 4,9 metriä ja sen alle on koolattu ilmakanava 50x120 lankulla. Kanavan päälle

Kuva 31. *Samassa rakennuksessa ovat lämpökeskus, hakevarasto ja kuivuri. (Kuva: Hannu Vilkkilä).*

Kuva 32. *Kuivurin katossa on lämmönvaihdin, jossa on oma puhallin. (Kuva: Hannu Vilkkilä).*

on asennettu reikälevyt, jotka on suojattu lattaraudoilla. Kuivurissa voidaan kerralla kuivata kolmen metrin kerros haketta, mikä vastaa yhtä rekkakuormallista. Kuivausilman imeminen hakekasan läpi on koettu tehokkaammaksi kuin ilman puhaltaminen. Imumenetelmällä vältytään terveysriskeiltä, sillä sisätiloihin ei tule pölyä eikä hometta. Puhaltimena on potkuripuhallin (4 kW), jonka puhallusteho on 23 500 m^3 ilmaa tunnissa.

Kuivuriin saadaan lämpöä lämpölaitokselta, jossa on lämmönvaihdin. Kuivurille on johdettu pakkasnesteellä täytetty lämpöverkko, josta energiamittarilla mitataan käytetty energia (kWh). Lämminvaihdinkennoja on kaksi, ja niiden teho on yhteensä 80 kW. Kuivurissa kuivataan kahden metrin korkuinen hakepatja noin 2-3 vuorokaudessa.

Lämpöyrittäjä kuivaa pilkeyrittäjän puut

Hämeenkyröläinen pilkeyrittäjä Keijo Gyldén valmistaa polttopuita tukkurin kautta välitettäväksi. Kuivurin hankinta tuli kyseeseen, koska tukkuliikkeen kanssa solmittu sopimus edellyttää, että kuivaa polttopuuta on saatavissa vuoden ympäri. Kun keinokuivattavan pilkkeen määrä suhteessa vuosituotantoon on verrattain vähäinen, ei lämpökeskuksen rakentaminen pelkästään pilkkeiden kuivausta varten ollut tarkoituksenmukaista. Lämpökeskusinvestoinnin sijaan yrittäjä rakennutti merikontista helposti paikasta toiseen siirrettävään kuivurin. Kuivaukseen käytetyn ilman Gyldén ostaa paikalliselta lämpöyrittäjältä.

Konttikuivuri on teknisesti yksinkertainen. Kuivurikäyttöä varten kontin peltikatto korvattiin pressulla, takanurkkaan puhkaistiin imuaukko ja kylkeen asennettiin ovet pilkkeiden tyhjennystä ja pakkausta helpottamaan. Lisäksi konttia pidennettiin kuudesta vajaaseen kahdeksaan metriin ja se varustettiin koukkulava-autokuljetukseen sopivaksi. Kontin sisäpuolelle ei tehty muutoksia. Töineen kuivurikontti maksoi yrittäjälle noin 10 000 euroa.

Pilkkeet kuormataan traktorin etukuormaajalla konttiin avonaisen katon kautta, ja kontti kuljetetaan lämpölaitokselle. Lämpölaitoksella konttiin puhalletaan radiaattorin lämmittämää, noin 60-asteista ilmaa, joka tuodaan konttiin sisään ilmanvaihtokäyttöön tarkoitetulla teräksisellä kierresaumakanavalla katon kautta. Konttiin puhallettu ilma imetään pilkekerroksen läpi ja poistetaan takanurkassa olevan aukon kautta. Täyden kontillisen kuivausaika on noin kolmesta viiteen vuorokautta pilkkeiden alkukosteudesta riippuen. Radiaattorin lämpöteho kuivauksen aikana on noin sata kilowattia. Kuivauksen ohjaus tapahtuu manuaalisesti, koska kontissa ei ole mittalaitteita.

Jos kuivaustarve ei ole jatkuva ja kuivattava puumäärä on pieni, kannattaa pilkeyrittäjän harkita pilkkeiden kuivattamista ostolämmöllä. Esimerkkitapauksessa kuivauskustannukset koostuvat rahdista, lämpöenergiasta ja kontin lämpölaitoksella kuluttamasta sähköenergiasta, joista kaksi ensin mainittua ovat selvästi suurimmat.

Kuva 33. *Lämpölaitoksella konttikuivurin betonilaatta ja lämmönvaihdin. (Kuva: Lasse Maunula).*

4.3 Yhteenveto

Kylmäilmakuivureissa pyritään käyttämään suuria ilmamääriä, jotta ne hetket, jolloin kuivausilma on lämmintä ja kuivaa, ehdittäisiin käyttää hyväksi. Kylmäilmakuivauksessa riittävä ohjaustapa on mitata ulkoilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Kuluneen kuivausajan perusteella voidaan puhaltimen käyntiaikaa rajoittaa siten, että puhallin käynnistyy vasta ilman suhteellisen kosteuden laskettua seuraavalle asetetulle tasolle.

Tärkein pilkkeiden kuivausaikaan vaikuttava seikka on kuivausilman lämpötila. Laskettaessa kuivauslämpötila 70 asteesta 45 asteeseen pitenee kuivausaika yli kolminkertaiseksi. Lämminilmakuivauksessa kuivurin lämmitin tulisi olla riittävän tehokas, jottei kuivausaika muodostuisi liian pitkäksi. Kuivurin toimintatavasta, rakenteista ja vuodenajasta johtuen energian tarve yhtä haihdutettavaa vesikiloa kohti saattaa olla kaksin tai kolminkertainen verrattuna pelkkään veden höyrystymisenergiaan.

Mikäli puut ovat jäässä, tulee kuivattava erä lämmittää mahdollisimman nopeasti kuivauslämpötilaan. Tällöin puun laatu säilyy parempana, koska hometta ja värivikaa ei ehdi kehittyä. Alkuvaiheessa suuri osa kuivurista tulevasta kosteasta ilmasta kannattaa kierrättää takaisin kuivuriin lämmittimen kautta. Kuivattavat pilkkeet lämpiävät sisältä nopeammin, jos niiden pinta ei ole kuivunut liikaa. Erityisesti tämä koskee halkaisijaltaan suuria pilkkeitä. Kuiva puu johtaa huonommin lämpöä kuin märkä puu. Kosteus siirtyy puun sisältä sen ulkopintaan pääasiassa lämmön avulla.

Pilkkeiden lajittelu painon ja koon mukaan eri luokkiin ennen kuivausta olisi hyödyllistä. Pilkkeet kuivattaisiin luokkakohtaisesti, jolloin kuivausaika olisi optimaalinen ja pilkkeiden kosteus samaa luokkaa. Tämä nostaisi pilkkeitten laatua ja helpottaisi myös koneellista pakkaamista.

Toinen tärkeä kuivausnopeuteen vaikuttava tekijä on ilmankierron tasaisuus kuivurissa. Mikäli ilma ei joissakin osissa kuivuria kulje riittävästi tai se pääsee karkaamaan kuivattavien kehikoiden tai hakekerroksen ja seinän välistä, kuivuminen tapahtuu epätasaisesti. Kuivausta on jatkettava, kunnes märimmätkin kerrokset saadaan kuivattua. Tällöin osa pilkkeistä ja hakkeesta kuivuu alle asetetun tavoitteen, mistä seuraa väistämättä suuremmat kuivauskustannukset ja pitempi kuivausaika.

5 puupolttoaineen laadun hallinta

Olli-Pekka Koisti, Metsäkeskus, Markku Lappi, Proagria, Etelä-Suomi Hämeen uusiutuvan energian tulevaisuus -hanke

Puupolttoaineen tärkeimmät ominaisuudet ovat puulaji, kosteus, palakoko, lahon määrä sekä puhtaus vieraista materiaaleista. Laadun kannalta näistä tekijöistä keskeisiä ovat puuaineen kosteus, palakoko, lahon määrä ja puhtaus.

Kaupallisen pilkkeen on oltava lähes puhdasta vieraista materiaaleista eikä pehmeää lahoa tai hometta juuri sallita. Kova laho sallitaan, mutta se pitää mainita tuoteselosteessa. Myös kaupallisen hakkeen pitää olla pääosin puhdasta vieraista aineista, mutta lahon määrää ei ole rajoitettu. Laho ei saa olla niin pehmeää, että se estää puun haketusta.

Kesäaikaan kattamattomissa ulkovarastoissa kaatotuore puutavara on kosteissa ja lämpimissä olosuhteissa alttiina sekä hyönteistuholaisille että lahottaja- ja homesienituhoille. Ne kaikki heikentävät tuotteen laatua ja voivat pahimmillaan jopa mitätöidä sen arvon kaupallisena tuotteena. Pilketuotannossa ulkonäköä heikentävät tekijät vaikuttavat tuotteen laatuun enemmän kuin haketuotannossa. Molemmissa puupolttoaineissa kannattaa kiinnittää huomiota laadun hallintaan, koska sen vaikutus polttoaineesta saatavaan lämpömäärään ja sen myötä saatavaan hintaan voi olla huomattava.

Puun lahottajasienet aiheuttavat otollisissa olosuhteissa herkästi tuoreeseen kosteaan puuainekseen värivikaa ja lahoamista. Lahottajasienten elinmahdollisuudet riippuvat paljon muun muassa sääolosuhteista. Sienet tarvitsevat elääkseen biomassan lisäksi kosteutta, lämpöä ja happea. Suotuisimmat olosuhteet sienten kasvulle ovat silloin, kun ilma on +15–35 asteista ja sen suhteellinen kosteus on 40–95 prosenttia. Kun puumateriaalin suhteellinen kosteusprosentti jää alle 25 prosentin, lahottajasienten elinkyky heikkenee huomattavasti ja myös riski hyönteisten aiheuttamille tuhoille laskee. Kun puun kosteus laskee alle 17 prosentin, muun muassa lahottajasienten toiminta loppuu lähes kokonaan.

Hyönteistuhoja voidaan torjua esimerkiksi suojaamalla tienvarsien puutavarakasoja kasojen päälle levitettävällä peitepaperilla. Samalla paperi suojaa myös syksyn sateilta ja puun uudelleen kastumiselta. Kylmissä olosuhteissa, esimerkiksi talvella, tuoreen puutavaran laatu heikkenee hitaasti, koska elinolosuhteet sienille ja hyönteisille ovat epäedulliset. Talviseen aikaan puun kuivuminen ulko-olosuhteissa on hidasta.

Pääosa pilkkeeksi tehtävästä puusta kaadetaan talven ja kevään aikana. Kaatotuoreena puuaineen kosteus on usein niin suuri, että kesäajan olosuhteissa kuorellisen puuaineen laatu huononee varsin nopeasti. Jos talvella tai keväällä kaadettu puu pätkitään ja pilkotaan vasta kuukausien jälkeen syksyllä, puuaineen laatu on todennäköisesti jo selvästi heikentynyt, eikä puun ulkonäkökään ole enää moitteeton. Siksi talvella tai keväällä kaadettu puu tulisi tehdä pilkkeeksi vielä saman kevään tai viimeistään alkukesän aikana.

Polttohake saadaan mahdollisimman kuivana varastoon, kun haketus tehdään ennen syksyn sateita. Tällöin puun kesäaikainen kuivuminen saadaan hyödynnettyä täysmääräisesti. Mikäli haketus jää talveen, kannattaa kiinnittää huomiota raaka-aineen kunnolliseen varastointiin.

Yhtenäiset polttopuun laatustandardit EU:n alueella saatiin käyttöön vasta muutaman vuosi sitten. Esimerkiksi uunivalmiin polttopuun laatuluokittelu tehdään **SFS EN14961-5** standardin mukaan.

Kuvat 34 ja 35. *Pilkkeet kannattaa peittää tai viedä katon alle ennen syyssateita. (Kuvat: Tuula Strömberg).*

Vastaavasti energiaksi käytettävälle puuhakkeella standardiluokitus on **SFS EN 14961-4**. Koska standardien käyttö on vasta suositeltavaa, mutta ei pakollista, niiden käyttöönotto ei ole vielä yleistä. Perinteinen kuluttajilta saatu palaute onkin yleensä tehokkain laatua kontrolloiva tekijä. Mikäli asiakas on saanut hyvää laatua sopivaan hintaan, asiakassuhde samaan polttopuun toimittajaan vakiintuu vuosikausiksi.

5.1 puupolttoaineen pakkaaminen

Puuhake myydään perinteisesti irtotavarana ja pakkaamattomana. Myös pilkkeestä pääosa myydään irtotavarana. Erilaiset pakkaukset ovat pilkekaupassakin yleistyneet. Suuret pakkaukset helpottavat tuotteen koneellista käsittelyä ja varastointia. Pienet pakkaukset puolestaan helpottavat pienasiakkaan klapin siirtelyä. Pienessä pakkauksessa on helppo kuljettaa sopiva määrä pilkettä suoraan käyttöpaikalle.

Markkinoille on viime vuosina tullut lukuisia pakkausmalleja, joista erilaiset verkkosäkit ja -pussit ovat yleisimpiä. Monet pilketuottajat ovat ottaneet ne käyttöön, koska niiden avulla voidaan helpottaa pilkkeiden käsittelyä ilman suuria lisäkustannuksia. Nykyään pilke ohjataan usein suoraan pilkekoneen tuotantolinjalta tuulettuvaan tilavaan suursäkkiin. Niitä voidaan kätevästi siirrellä esimerkiksi traktorin etukuormaimella. Ilmavat verkkosäkit toimivat hyvin pilkkeen varastosäkkeinä kuivausvaiheessa. Säkit toimivat myös myyntipakkauksina, joissa pilke toimitetaan selkeästi mitattavissa yksiköissä asiakkaalle. Yleisimmin käytettyjä ovat 1–2 m³ kokoiset suursäkit. Edullisimmat suursäkit ovat kertakäyttötuotteita, mutta lujarakenteisia ja vahvoja verkkosuursäkkejä voi käyttää useita kertoja. Panttimaksun avulla ne saadaan palautumaan takaisin pilketuottajalle ja näin pakkaus ei aiheuta suuria ylimääräisiä kustannuksia tuotantoketjuun. Suursäkkien käsittelyyn on kehitelty monia käytännön toimintaa helpottavia ratkaisuja kuten esimerkiksi säkitystelineitä ja nostokorvakkeita.

Käytössä on myös pienempiä verkkosäkkejä tai vastaavia muita myyntipakkauksia, kuten pahvilaatikoita. Näihin pilkkeet ladotaan useimmiten käsityönä, mikä aiheuttaa luonnollisesti lisäkustannuksia. Pakkauksen myötä polttopuun yksikköhinta voi nousta huomattavasti.

Kuva 36. *Kestävää suursäkkiä voi käyttää useamman käyttökerran. (Kuva: Tuula Strömberg).*

Verkkosäkeissä on puun kuivumista ajatellen syytä huolehtia riittävästä tuuletuksesta. Erityisesti luonnonkuivauksessa säkin keski- tai alaosiin saataa jäädä huonosti kuivuvia osia. Tällöin sinne voi muodostua hometta tai muuta sienikasvustoa.

6 Keinokuivauksen taloudellisuus

Olli-Pekka Koisti, Metsäkeskus, Markku Lappi, ProAgria, Etelä-Suomi Hämeen uusiutuvan energian tulevaisuus -hanke

Sivutoimisille polttopuuyrittäjille riittää useimmiten luonnonkuivaus, koska puumäärät ovat suhteellisen pieniä ja työ on muutenkin kausiluonteista. Toiminta ei taloudellisesti kestä suuria investointeja. Polttopuutuotannon volyymin kasvaessa luonnonkuivauksella ei ehdi saamaan valmista tuotetta markkinoille riittävästi. Tällöin kuivuri-investointi on perusteltua, usein jopa välttämätöntä. Keinokuivauksen avulla on mahdollista kuivattaa puu myös normaalia kuivemmaksi. Investointia ei kannata mitoittaa yhtään suuremmaksi kuin on tarve, sillä muuten sen takaisinmaksuaika saattaa venyä liian pitkäksi. Investoinnin kannattavuutta voi parantaa hyödyntämällä samaa kuivuria myös muuhun käyttöön, esimerkiksi hakkeen tai heinän kuivaukseen sekä valmiin tuotteen varastointiin.

6.1 Kustannukset ja niiden rakenne

Kuivauksen kustannukset voidaan jakaa muuttuviin kustannuksiin eli käyttökustannuksiin ja kiinteisiin kustannuksiin eli lähinnä pääomakustannuksiin. Muuttuvia kustannuksia ovat muun muassa pakkaus-, polttoaine- ja sähkökustannukset. Lisäksi laitteiden kunnossapito voidaan laskea pääosin niihin kuuluviksi. Kiinteitä kustannuksia eli käyttömäärästä riippumattomia kustannuksia ovat rakennusten ja laitteiden hankintakulut, muut pääomakulut ja vakuutusmaksut, sähköliittymäkulut sekä osa ylläpitokuluista.

Suurin osa kylmäilmakuivauksen kustannuksista on kiinteitä kustannuksia, jotka aiheutuvat kuivurin rakentamisesta. Kylmäilmakuivureilla päästään varsin edullisiin käyttökustannuksiin, sillä energiaa kuluu vain sähköpuhaltimien käyttöön. Kylmäilmakuivurissa kuivausilmaa tarvitaan noin 300 m^3 tunnissa kuivattavaa puuirtokuutiota kohti. Tämän mukaan sähköpuhaltimet kuluttavat kuivattua pilkekuutiota kohti suunnilleen 9 kWh/i-m^3.

Lämminilmakuivurin toiminta ei ole juurikaan riippuvainen ympäröivistä sääolosuhteista. Kannattaa kuitenkin muistaa, että kylmällä säällä merkittävä osa kuivauksen vaatimasta kokonaisenergiasta kuluu kuivattavan puun ja kuivuriin tulevan kuivausilman lämmittämiseen. Lämminilmakuivauksessa tarvitaan joka tapauksessa huomattavasti paljon enemmän energiaa itse kuivaukseen kuin kuivattaessa kylmällä ilmalla. Kuivauksen yksikkökustannuksista jopa yli 70 % voi koostua kuivausilman lämmittämisestä.

Liitteenä olevassa taulukossa (Liite 2) on verrattu erityyppisten kuivureiden ja kuivaustapojen kustannuksia ja tuotantokapasiteetteja toisiinsa. Vertailuun on otettu osa tässä oppaassa kuvattuja kuivurimalleja. On huomioitava, että jokainen kuivuriratkaisu on jossain määrin yksilöllinen. Rakenteiden kustannukset voivat toteuttamistavasta riippuen poiketa paljon taulukossa esitetyistä luvuista. Erityisesti hinnat, mutta myös kuivausmäärät, ovat sen takia suuntaa-antavia. Mikäli vuoden aikana tehdään useita kuivauseriä, on kuivat tuotteet yleensä välivarastoitava. Näitä kustannuksia ei ole huomioitu kustannustaulukossa.

1. Lämminilmakuivauksessa lähtökohtana on käytetty merikontti. Investoinnin poistoaikana on se laskennallinen aika, jonka rakennus tai rakennelma on arvioitu kestävän. Merikontin poistoajaksi on laskettu 10 vuotta ja koko vuoden kuivauskapasiteetiksi 2200 i-m^3.

2. Monikäyttöinen kiinteä kylmäilmakuivuri on investointina kallein. Pääomakustannukset ovatkin kuivurin suurin kuluerä. Tavoitteena on lämmittämättömän ilman

avulla kuivata puuta vuodessa 2500 i-m^3. Kuivauskauden ulkopuolisen ajan kuivuri voi toimia esimerkiksi valmiin pilkkeen myyntivarastona tai muun kaluston varastona. Laskennallinen poistoaika tälle kuivurille on 20 vuotta.

3-4. Kevytrakenteiset kylmäilmakuivurit eivät vaadi pysyviä rakenteita ja ovat sen takia edullisia perustaa. Suhteellisen lyhytikäisinä niissä aiheutuu suurimmat kustannukset uudelleenrakentamisesta ja vuosittaisista kunnostamisista. Mikäli kuivurin pohja edellyttää esimerkiksi asfalttikentän, siitä aiheutuvia kustannuksia ei ole laskettu mukaan. Näissäkin kuivureissa kuivausaika jää vuoden aikana kevät- ja kesäaikaan eli yhteensä noin viiteen kuukauteen. Vuoden kuivauskapasiteetti on noin 500 i-m^3.

5-6. Luonnonkuivauksessa voidaan polttopuukatoksessa selvitä ilman säkkien aiheuttamia kustannuksia. Usein säkit ovat käytössä myös puukatoksessa.

Ulkona kuivatessa puut ovat kuormalavojen päällä ilmavissa säkeissä tai kehikoissa, joten säkkikustannus on laskettu kuivauskustannuksiin. Päältä kastumisen estämiseksi on laskettu mukaan myös sateelta suojaavien pressujen käyttö. Luonnon kuivauksessa yhden erän kuivaamiseen on varattava koko kesäkausi.

Mikäli kuivaustoiminta jatkuu pitkään, on perusteltua investoida kunnolla rakenteisiin. Hyvin rakennettu kuivuri tai katos kestää jopa vuosikymmeniä ja sitä voidaan käyttää myös muuna varastona. Kevytrakenteiset kuivurit sopivat yrittäjälle, jolle kuivurin siirreltävyys on tärkeää tai toiminta on muuten lyhytaikaista. Kuivurin elinkaarikustannukset ovatkin merkittävä asia kustannusten tarkastelussa.

Kuva 37. *Katos on pitkäikäinen ja sitä voidaan käyttää myös muuna varastona. (Kuva: Tuula Strömberg).*

7 Termejä ja määritelmiä

Pilke (klapi): Karsitusta pyöreästä puusta valmistettu 0,2–0,6 metriseksi katkottu ja halkaistu tai aisattu polttopuu.

Kiintokuutiometri: m^3

Irtokuutiometri: i-m^3 (heittokuutiometri) on 1 m^3:n tilaan mahtuva pilkemäärä, kun pilkkeet ovat kasassa satunnaisessa järjestyksessä.

Pinokuutiometri: p-m^3 on 1 m^3:n tilaan mahtuva kuitupuu-, ranka- tai pilkemäärä, kun kappaleet on pinottu.

Ilman suhteellinen kosteus: Kun ilman ja vesihöyryn seoksen lämpötila on normaalissa ilmanpaineessa alle 100 ºC, kannattaa käyttää ilman suhteellisen kosteuden käsitettä. Tämä tarkoittaa ilmassa olevan vesimäärän suhdetta ilman maksimi vesimäärään kyseisessä lämpötilassa ja ilmanpaineessa (%). Mikäli ilman suhteellinen kosteus on 100 prosenttia, ilma ei pysty enää sitomaan itseensä vesihöyryä.

Ulkoilma = kuivan ilman ja vesihöyryn seos: Ilma pystyy sitomaan itseensä sitä enemmän vesihöyryä mitä lämpimämpää se on. Esimerkiksi 20 ºC:n lämpötilassa veden maksimimäärä ilmassa on noin 18 g/m^3, mutta 90 ºC:n lämpötilassa se on jo noin 420 g/m^3.

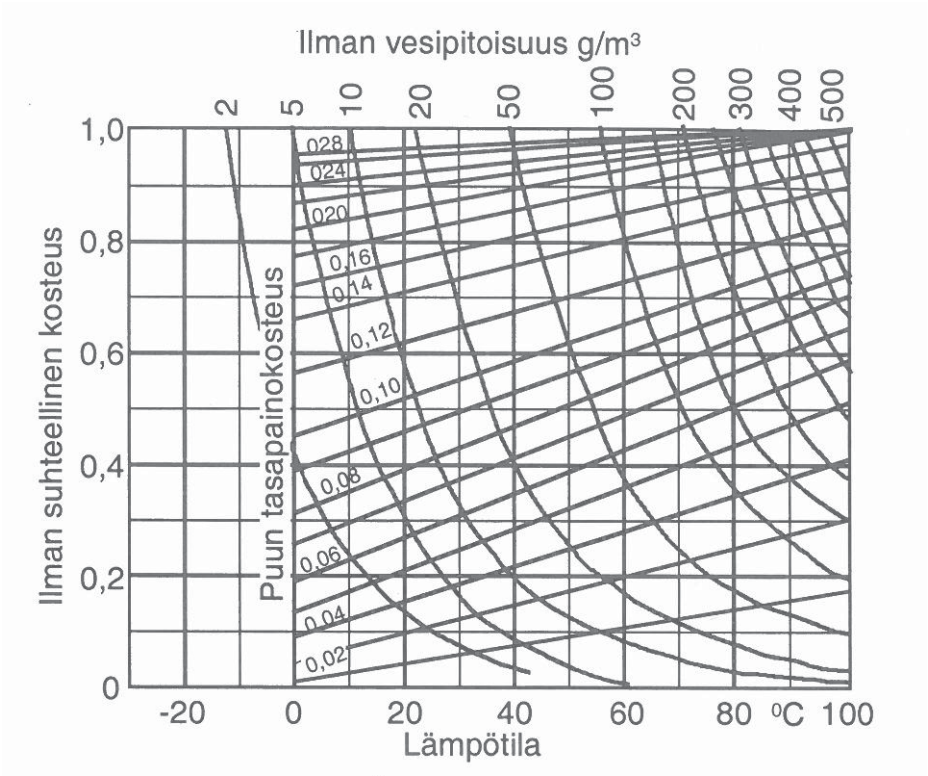
Puun kosteus: Veden massan osuus puun kokonaismassasta (%).

Puun kosteussuhde: Veden massan ja puun kuiva-aineen massan suhde.

Puunsyitten kyllästymispiste: Puulajille ominainen maksimikosteussuhde, kun ilman suhteellinen kosteus on 100 prosenttia. Puun soluseinät ovat sidotun veden kyllästämät, mutta soluonteloissa ei ole vapaata vettä.

Puun kuivuminen: Kuivattavan pilkkeen pinnalta vesi haihtuu aluksi samalla tavalla kuin vapaan veden pinnalta. Ohi virtaava ilma kuljettaa vesihöyryn pois. Puu kuivuu tehokkaimmin olosuhteissa, joissa ilman nopeus on suuri, lämpötila korkea ja ilman suhteellinen kosteus pieni. Puun kuivumisen kannalta optimaalisessa tilanteessa puun kosteus on puunsyitten kyllästymispisteen yläpuolella. Edellä mainitut tekijät vaikuttavat siis kosteuden haihtumiseen puun pinnalta, mutta veden siirtymiseen puun sisällä vaikuttaa vain lämpötila.

Puun tasapainokosteus: Mikäli minkä tahansa kosteutta sisältävän puukappaleen annetaan olla riittävän kauan tasaisessa lämpötilassa ja suhteellisessa kosteudessa, puukappale asettuu aina samaan kosteustilaan. Tätä sanotaan kyseisen lämpötilan tasapainokosteudeksi. Kuva 37. havainnollistaa ilman kosteuden ja lämpötilan vaikutusta tasapainokosteuteen. Esimerkiksi kuivurin lämpötilan ollessa 20 ºC ja suhteellisen kosteuden 60 prosenttia, pilke ei kuivu paljoakaan alle 12 prosentin.



Kuva 38. *Puun tasapainokosteus ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mukaan. Kuvasta näkyy myös ilman vesipitoisuus (g/m³) lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mukaan. (RIL 120-2004).*

Absoluuttinen kosteus eli ilman vesipitoisuus: Yksikkö on g/m³ (kuivaa ilmaa). Saadaan laskemalla kaavalla:

a = ((217,6 * e)/(T+273,16))*RH/100, g/m³ (kuivaa ilmaa)

jossa e = höyryn paine millibaareissa (SI, hPa), T = kuivalämpötila ˚C ja RH = suhteellinen kosteus %

e saadaan joko taulukosta (esimerkiksi ASHRAE Handbook, Fundamentals, Theory, Chapter 7, Psychometrics) tai laskemalla kun tiedetään ilman paine P (oletetaan yleensä paine merenpinnan tasolla eli P = 1013,25 hPa), suhteellinen kosteus ja kuivalämpötila.

Pilkekuivureiden paine-erot ovat yleensä niin pienet, että voidaan käyttää laskuissa normaalia ilmanpainetta. Tällöin riittää, että tunnetaan ainoastaan ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila.

Mikäli ei vaadita suurta tarkkuutta ja kastepiste on suurempi kuin jäätymispiste, niin e voidaan laskea kaavalla:

e = (1,0007+P*3,46E-6)*6,1115*exp((17,502*T)/(240,9+T)), koska P = 1013,25 saadaan

e = (1,0007+1013,25*3,46E-6)*6,1115*exp((17,502*T)/(240,9+T)).

8 Lähteet

Erkkilä, A., Strömberg, T. & Hillebrand, K. 2012. Energiapilke-konsepti polttopuun tuotanto- ja toimitusketjussa. Tutkimusraportti. VTT-R-00152-12. 72 s. + liitt. 2 s.

Forsén, H. & Tarvainen, V. 2000. Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters. VTT Publications 420. VTT Technical Research Centre of Finland. 70 p. + app. 17 p.

Hakkila, P. 1962. Polttohakepuun kuivuminen metsässä. Communicationes Instituti Forestalis Fenniaie 54. (Pieniläpimittaista energiarankaa.)

Hillebrand, K. & Frilander, P. 2005. Pilkkeen kuivaus ja laadunhallinta. Projektiraportti PRO2/P2068/05. VTT. 41 s. + liitt. 6 s.

Hillebrand, K. & Kouki, J. 2006. Pilkkeen kuivaus – luonnonkuivaus, keinokuivaus ja laadun hallinta. Työtehoseuran julkaisuja 398. Työtehoseura. 62 s.

Härkönen, M. 2012. Puun polttoainekäyttö pienissä aluelämpölaitoksissa. Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu. Centria tutkimus ja kehitys. ISBN 978-952-6602-34-9 (PDF).

Linna, V., Kaipainen, H. & Okkonen, J. 1983. Aurinkolämmön käyttö hakkeen ja palaturpeen puhallinkuivauksessa. VTT tutkimuksia 239.

Routa, J. 2014. Energiapuuvarastojen kosteusmallit. Laava-seminaari. Vantaa 19.2.2014.

RIL 120-2004. Puurakenteiden suunnitteluohjeet. Suomen Rakennusinsinööriliitto. Hakapaino Oy. 134 s.

Aiheeseen liittyvää muuta kirjallisuutta:

Puupolttoaineiden laatuohje. VTT-M-07608-13. Laadittu Bioenergia ry:n toimeksiannosta VTT:ssä.

Föhr, J. 2008. Metsähakkeen jalostusarvon nostaminen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Rinne, S. 2002. Puupolttoaineiden kuivausmenetelmien kartoitus. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Energiatekniikan osasto. Diplomityö. 96 s. + liitt. 12 s.

9 Liitteet

Liite 1.

Keinokuivauksen laskentamenetelmä

Veli-Pekka Heiskanen ja Jyrki Raitila VTT

VTT on kehittänyt laskentamenetelmän, jolla voidaan laskea kuivauksen energia- ja massataseet. Laskentamenetelmällä voidaan laskea, miten paljon energiaa tarvitaan annetun suuruisen polttoaine-erän kuivaamiseen, kun käytetyn kuivurityypin hyötysuhde tiedetään tai osataan arvioida kohtuullisella tarkkuudella:

Laskennassa tarvitaan 15 lähtötietoa:
- Polttoaineen kosteus alussa ja haluttu kosteus kuivauksen jälkeen
- Kuivausilman lämpötila ja suhteellinen kosteus ennen lämmitystä
- Kuivurin hyötysuhde
- Haluttu kuivausaika jne.

Laskennan tuloksena saadaan:
- Kuivausilman lämpötila ja suhteellinen kosteus lämmityksen jälkeen
- Kuivausilman keskimääräinen lämpötila ja kosteus kuivauksen jälkeen koko kuivausjakson ajalta
- Kuivattavasta materiaalista poistettu vesimäärä
- Kuivaukseen tarvittava energiamäärä ja teho jne

Laskennan lähtöarvoja (muutettavat arvot ovat vihreällä pohjalla)

Kuivattavan polttoaineen määrä	Vpa	25	i-m3
Polttoaineen irtotiheys	ρ	342	kg/i-m3
Polttoaineen alkukosteus	wpa1	55	%
Polttoaineen haluttu loppukosteus	wpa2	35	%
Polttoaineen sisäänmenolämpötila	Tpa1	-8	C
Polttoaineen ulostulolämpötila	Tpa2	40	C
Kuivausilman lämpötila ennen lämmitystä	Ti1	-8	C
Kuivausilman suht.kost. ennen lämmitystä	φ1	87	%
Vesihöyryä ilmassa ennen lämmitystä (T = Ti1)	xi1	2,81	g/m^3
Kuivurin pituus		4,9	m
Kuivurin korkeus		2,3	m
Kuivurin leveys		2,3	m
Kuivurin tilavuus		25,9	m^3
Kuivurin poikkipinta-ala		11,27	m^2
Kuivurin vaipan pinta-ala		55,66	m^2
Kuivurin lämmönläpäisykerroin		0,0002	kW/m^2C
Kuivausilman tilavuusvirta (lämpötila Ti1)		3000	m^3/h
Kuivurin hyötysuhde		70	%
Haluttu kuivausaika	vrk	2	= 48 h

Lasketut arvot

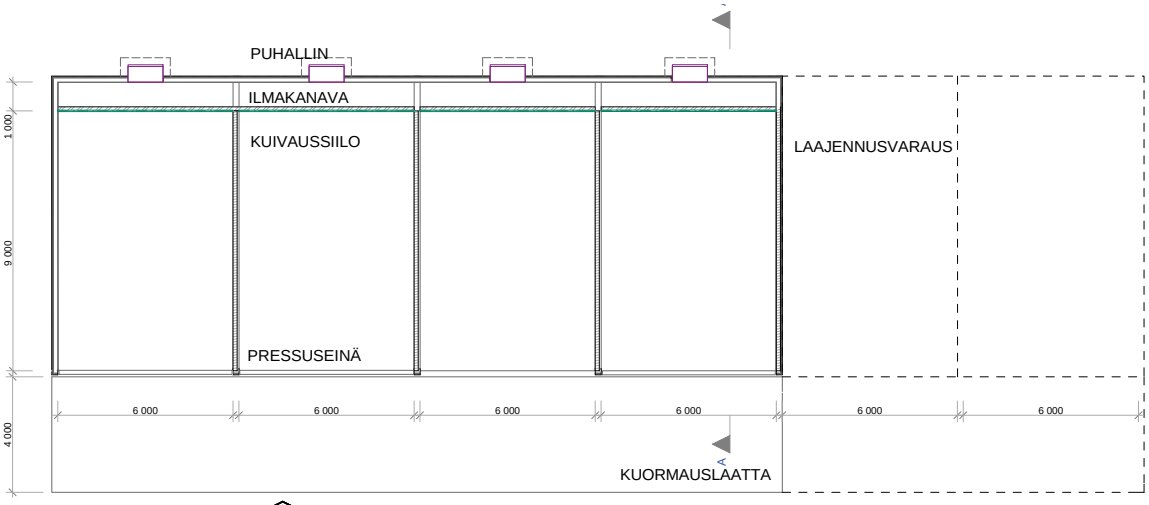
Polttoaineen ominaislämpö (puu)	kJ/kgC	1,1	
Höyrystymislämpö	kJ/kg	2463,0	
Kuivausilman keskimääräinen ominaislämpö	kJ/kgC	1,0	
Kostean polttoaineen massa	kg	8550,0	(Kosteus 55 %)
Kuivatun polttoaineen massa	kg	5919,2	(Kosteus 35 %)
Polttoaineessa vettä ennen kuivausta	kg	4702,5	
Polttoaineessa vettä kuivauksen jälkeen	kg	2071,7	
Kuivauksessa poistunut vettä	kg	2630,8	
Kuivauksessa lämpöä kuluu:			
1. Polttoaineessa olevan jään lämmittäminen	kWh	21,8	
2. Polttoaineessa olevan jään sulaminen vedeksi	kWh	435,0	
3. Polttoaineessa olevan veden lämmittäminen	kWh	218,9	
4. Kuivan polttoaineen lämmittäminen ulosmenolämpötilaan	kWh	58,4	
5. Veden höyrystäminen	kWh	1757,2	
6. Johtumishäviöt ympäristöön	kWh	25,6	
YHTEENSÄ ILMAN JOHTUMISHÄVIÖITÄ	kWh	2491,4	
Kuivausilman lämmittäminen:			
Vesihöyryn massavirta kuivausilmassa	kg/h	8,4	
Kuivan ilman massavirta kuivausilmassa	kg/h	3913,2	
Kuivausilman lämmitykseen tarvittava lämpömäärä	kWh	3559,1	(Kuivurin hyöty-suhde oli annettu:
Kuivausilman lämmitykseen tarvittava teho	kW	74,1	70 %)
Kuivausilman lämpötila lämmityksen jälkeen Ti2	C	59,3	
Kuivausilman lämpötila kuivauksen jälkeen Ti3	C	7,4	
Kuivausilman nopeus polttoainekerroksen pohjalla	m/s	0,1	
Vesihöyryä ilmassa lämmityksen jälkeen (T=Ti2)	xi2	2,2	g/m3
Kuivausilman suht.kost. lämmityksen jälkeen	φ2	1,7	%

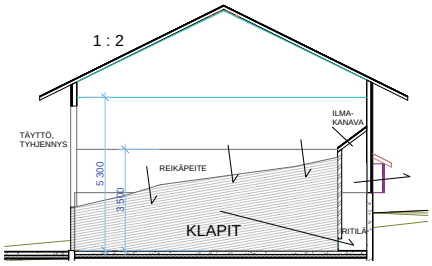
Esimerkkejä polttopuukuivurien elinkaarikustannuksista (hinnat alv 0 %)

Energian kulutus ja aikamäärät perustuvat Työtehoseuran v.2000 tekemiin käytännön mittauksiin ja arvioihin. Kustannusten hinnoittelussa rakennusten ja laitteiden hintatiedot perustuvat markkinoilta saatuun hintatietoon ja ProAgrian asiantuntijoiden hinta-arvioihin sekä metsäkeskuksen bioenergianeuvojien käytännön kokemukseen.

	Yksiköt	1. Lämminilmakuivaus lämpöeristetty 12m merikontti (Kuva 33)	2. Kylmäilmakuivaus kiinteä monikäyttökuivuri (Liite 3)	3. Kylmäilmakuivaus siirrettävä pilkekuivuri (Kuva 22)	4. Kylmäilmakuivaus kevytrakenteinen kenttäkuivuri (Kuva 15)	5. Luonnonkuivaus polttopuukatos	6. Luonnonkuivaus säkit ulkona kuormalavojen päällä
Kuivausaika vuodessa	kk /vuosi	**10**	**5**	**5**	**5**	**6**	**6**
Kuivurin kapasiteetti	i-m3/ erä	**55**	**500**	**70**	**100**	**500**	
Kuivauserät	eriä/vuosi	**40**	**5**	**7**	**5**	**1**	**1**
Yhden erän kuivausaika	vrk/ erä	**6**	**30**	**20**	**30**	**180**	**180**
Kuivauskapasiteetti/tuotantomäärä	i-m3/vuosi	**2200**	**2500**	**500**	**500**	**500**	**0**
Täyttö+ purkukustannukset	€/ i-m3	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**1**
Tarvikekustannukset (esim säkit)	€/ i-m3						**3**
Lämmön kulutus	*kWh/i-m3*	*120*					
Lämmön hinta	*€/MWh*	*30*					
Sähkönkulutus	*kWh/i-m3*	*10,7*	*8,8*	*9*	*8*		
Sähkön hinta	*€/kWh*	*0,1*	*0,1*	*0,1*	*0,1*		
Sähkökulut	€/ i-m3	**1,1 €**	**0,9 €**	**0,9 €**	**0,8 €**		
Lämmityskulut	€/ i-m3	**3,6 €**					
Kuivauksen muuttuvat kulut yht	€ / i-m3	**6,7 €**	**2,9 €**	**2,9 €**	**2,8 €**	**1,0 €**	**4,0 €**
Investoinnit							
Kuivurirakennus	€	**10000**	**72000**	**4000**	**2000**	**20000**	
Puhaltimet	€	**1600**	**4000**	**1000**	**1000**		
Lämmitysjärjestelmä kust.	€	**4000**					
Investoinnit yhteensä	€	**15600**	**76000**	**5000**	**3000**	**20000**	
Poistoaika (kuivurin käyttöikä)	vuotta	**10**	**20**	**5**	**2**	**20**	
Poisto /vuosi	€/vuosi	**1 560 €**	**3 800 €**	**1 000 €**	**1 500 €**	**1 000 €**	
Korkokulut (korko 5%)	€/v	**390 €**	**1 900 €**	**125 €**	**75 €**	**500 €**	
Vakuutus ja kunnosspito/vuosi	1,50%	**234 €**	**1 140 €**	**75 €**	**45 €**	**300 €**	
Kiinteät kulut/vuosi	€	**2 184 €**	**6 840 €**	**1 200 €**	**1 620 €**	**1 800 €**	
Kuivauksen kiinteät kulut	€ / i-m3	**1,0 €**	**2,7 €**	**2,4 €**	**3,2 €**	**3,6 €**	**0,0 €**
Muuttuvat + kiinteät kulut yht.	€ / i-m3	**7,7 €**	**5,6 €**	**5,3 €**	**6,0 €**	**4,6 €**	**4,0 €**

Liite 3.





PILKEKUIVURI
KUIVAUSSIILO 150M3 (YHTEENSÄ 600M3)
-BETONISET LAAKASIILOT 6 MX9 M,KORKEUS 2M;
SEINÄMÄKOROTUS PUURAKENTEINEN KORKEUS 1,5M
-ILMAKANAVA PUURAKENTEINEN N.1X2M,
ALIPAINEPUHALTIMET OSASTOITTAIN, TÄYTTÖKULJETIN
-PUURAKENTEINEN LATO-OSA

PILKEKUIVURI-LUONNOS

Etelä-Suomi

Tapio Pajunen
Uudenmaan aluetoimisto

Biolämpöliiketoiminnan laatu- ja kannattavuus -hanke

metsäkeskus

Euroopan maaseudun
kehittämisen maatalousrahasto:
Eurooppa investoi maaseutualueisiin

Suomen metsäkeskuksen aikaisemmin julkaisemat oppaat:

- Maatilan hakelämmitys, 2008
- Viljankuivaus kotimaisella polttoaineella, 2009
- Laatuhakkeen tuotanto, 2010
- Pilketuotanto, 2012
- Energiapuuta päätehakkuulta, 2013