



# Pilkkeiden keinokuivaus

**Pilketuotanto –seminaari**  
**Härmä 26.3.2014**  
**Jyrki Raitila, erikoistutkija**  
**VTT**

# Johdanto

# Yleistä

- Polttopuun tärkeimmät ominaisuudet käyttäjän kannalta ovat
  - Riittävän alhainen kosteus <20 %
  - Sopivat mitat – riippuu tulisijasta
  - Puhtaus – ei hometta
- Useissa tutkimushankkeissa (VTT) on seurattu polttopuun kuivumiseen vaikuttavia tekijöitä ja erilaisia kuivaustapoja
- Pääasialliset lähteet: *Lämpöyrittäjyyden ja polttopuuliiketoiminnan kehittäminen* (Energiapilke) ja *Biolämpöliiketoiminnan laatu- ja kannattavuushanke* (Biolämpö)

# Kuivumiseen vaikuttavat tekijät

- Tärkeimmät kuivausaikaan ja pilkkeiden väliseen kosteuseroon vaikuttavat tekijät:
  - Pilkkeen ominaisuudet
    - Alkukosteus
    - Pilkkeen mitat (tilavuus/pinta-alasuhde, pituus/paksuussuhde)
    - Kuoren peittämä osuus, halkaistun pinnan osuus
    - Puulajikohtaiset ominaisuudet, erityisesti diffusiviteetti, muita: tiheys, lämmönjohtavuus, ominaislämpö)
  - Ympäristö
    - Kuivauslämpötila
    - Ilman suhteellinen kosteus
    - Ilman virtausnopeus
    - Mahdollinen auringon säteily
    - Sade

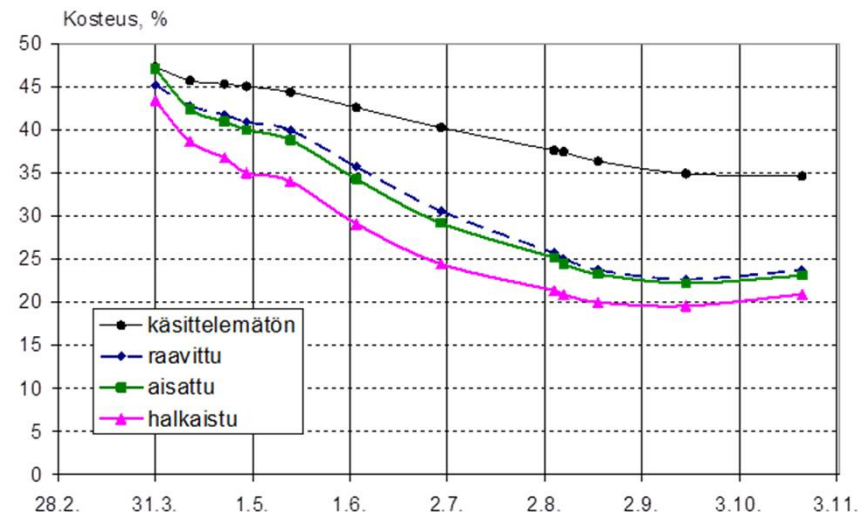
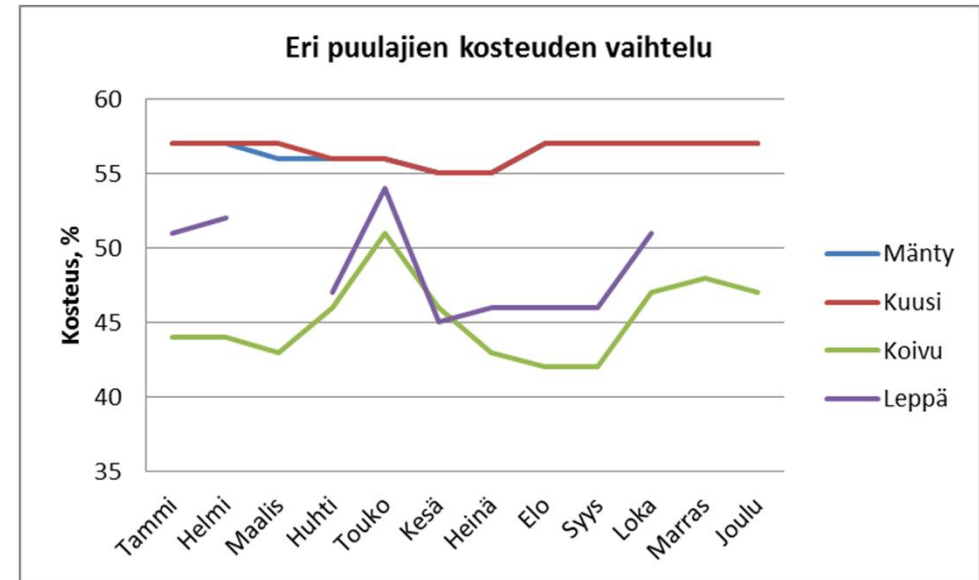


Keinokuivaus:  
kuivausjärjestelyt

Luonnonkuivaus: mm. pilkekasan koko, aluspuut, peittäminen, kuivauspaikka

# Raaka-aineen vaikutus

- Puun luontainen kosteus
  - Vaihtelee puulajeittain, kasvupaikoittain ja yksilöittäin
  - Vaihtelee puun sisällä
  - Vaihtelee vuodenaikojen mukaan
  
- Raaka-aineen kuivuminen
  - Kuoren rikkominen edistää kuivumista ➔
  - Kuivattaminen osittain kuorittuna jatkaa pilkonta-aikaa

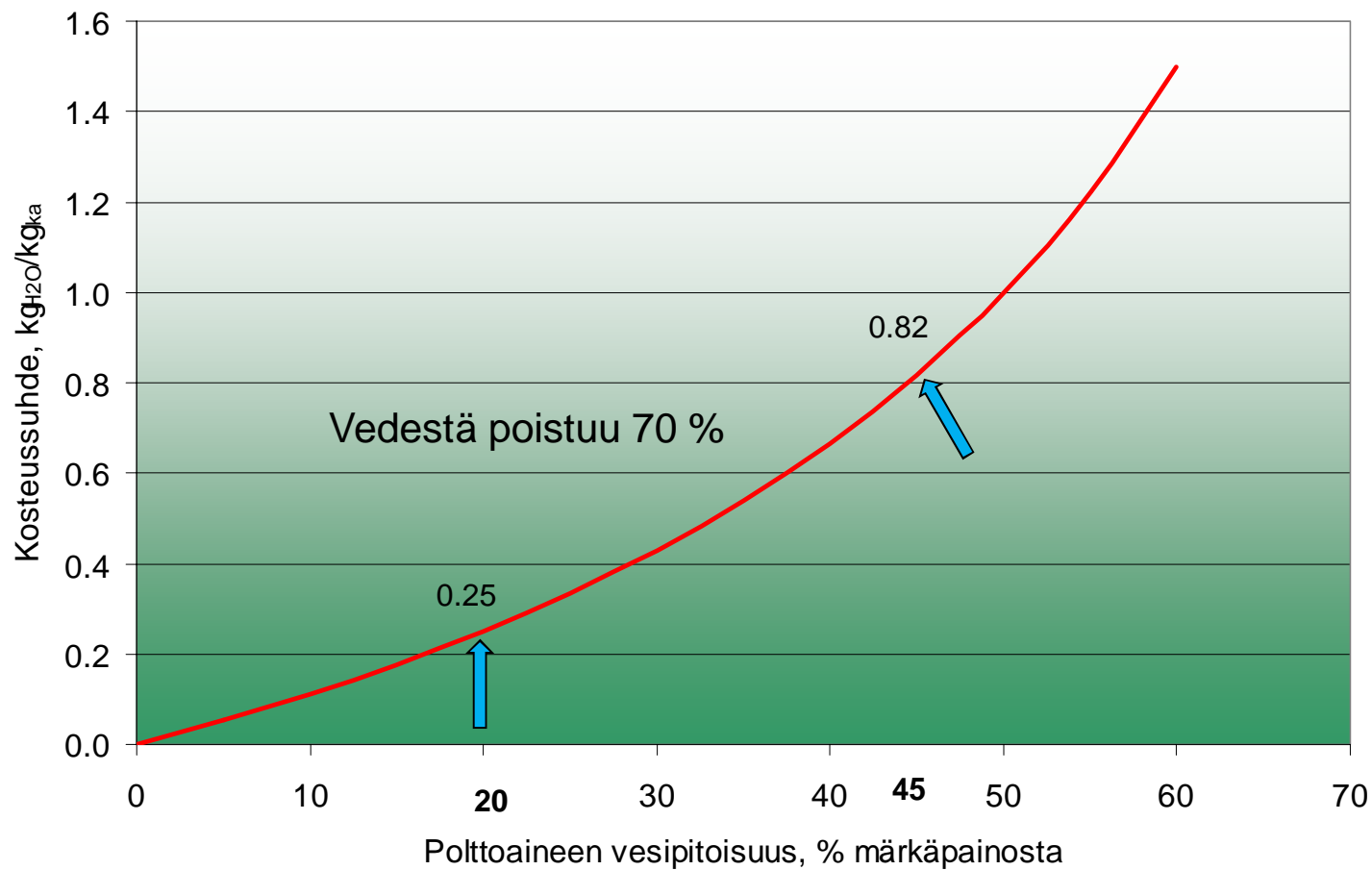


# Polttopuun kuivaustavat

- Luonnonkuivaus, ulkoilman lämpötila
  - Edullinen, hidas, voi heikentää laatua, sääriippuva
  
- Kylmäilmakuivaus, ulkoilman lämpötila
  - Nopeuttaa kuivumista, tasaisempi laatu, sääriippuva
  
- Lämminilmakuivaus,  $T < 100$  °C
  - Mahdollistaa ympärivuotisen toiminnan
  - Nopeuttaa raaka-aineeseen sitoutunutta pääoman kiertoa
  - Lämpöenergian kulutus (ilman lämmön talteenottoa)
    - n. 100 kWh/i-m<sup>3</sup>, kun ulkolämpötila on +15
    - n. 160 kWh/i-m<sup>3</sup>, kun ulkolämpötila on -15

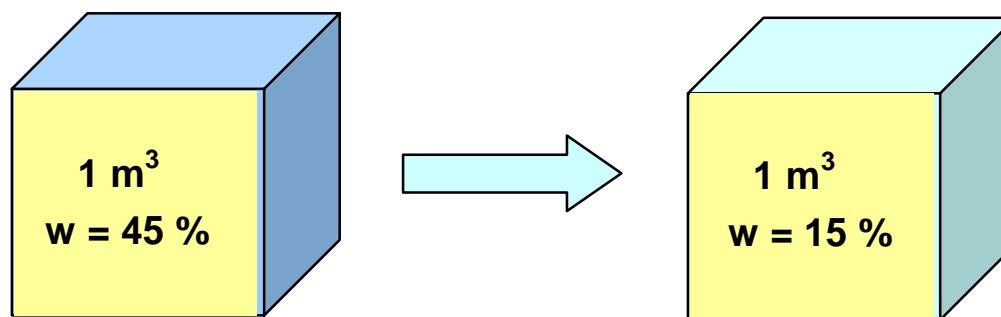
# Kuivauksen teoriaa

# Kuivauksessa poistettava veden määrä

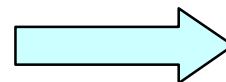




## Kuivauksen aikana irtokuutiosta haihdutettu vesimäärä



Kokonaismassa      350 kg  
 Veden massa        158 kg  
 Kuiva-aineen massa 192 kg



226 kg  
 34 kg  
 192 kg

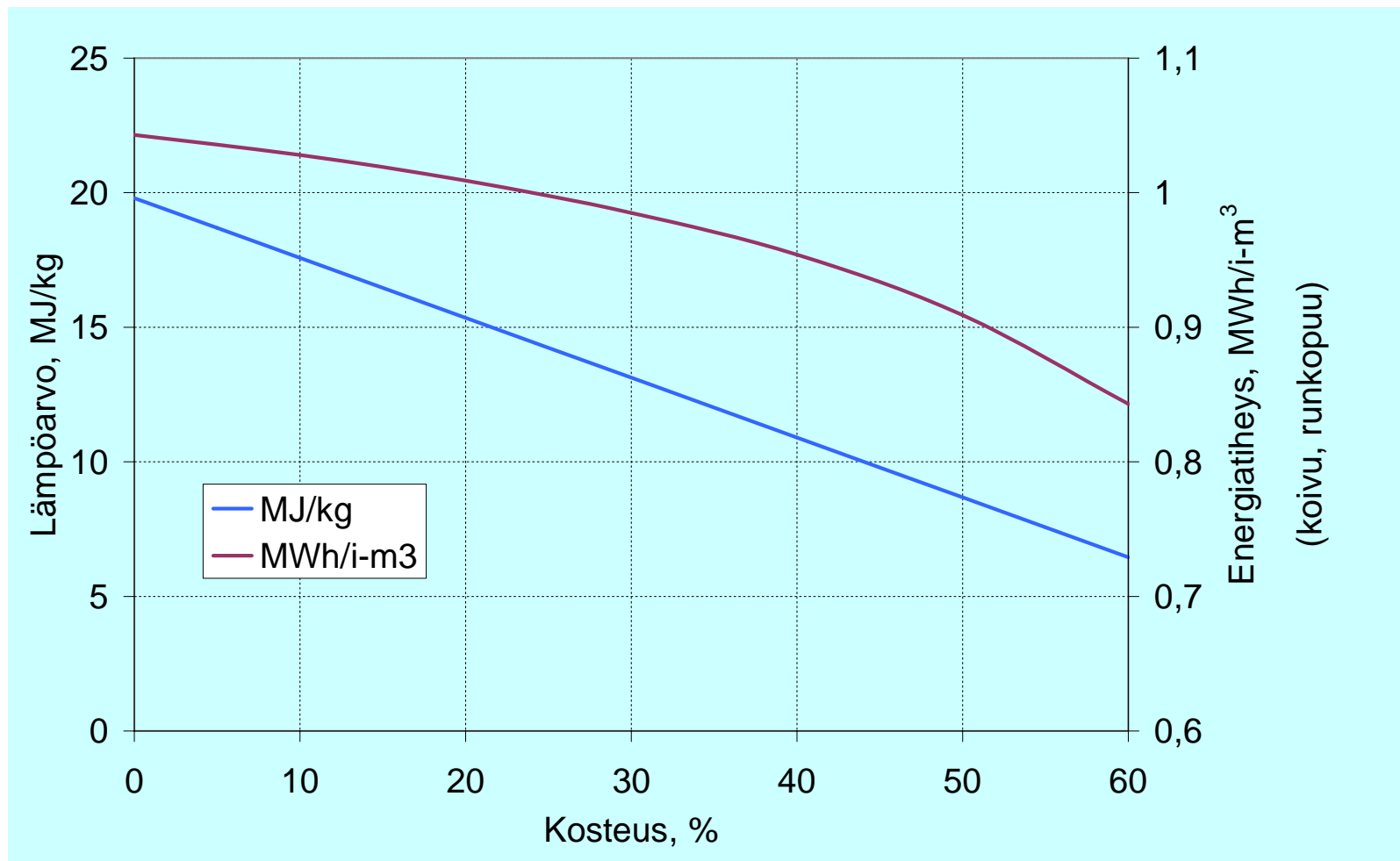
Haihdutettu vesimäärä

124 kg/i-m<sup>3</sup>

Tarvittava lämpömäärä (T = 60 °C) (ilman häviöitä)

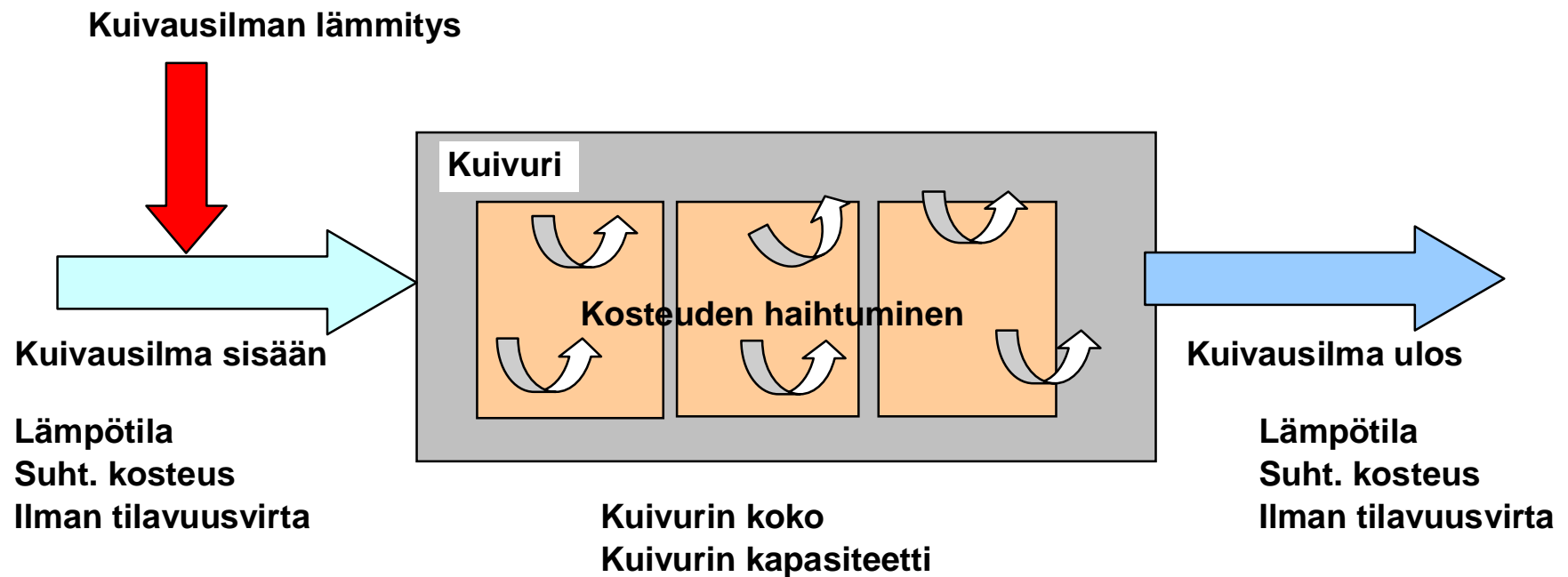
81 kWh/i-m<sup>3</sup>

# Kosteuden vaikutus puun lämpöarvoon ja energiatiheyteen

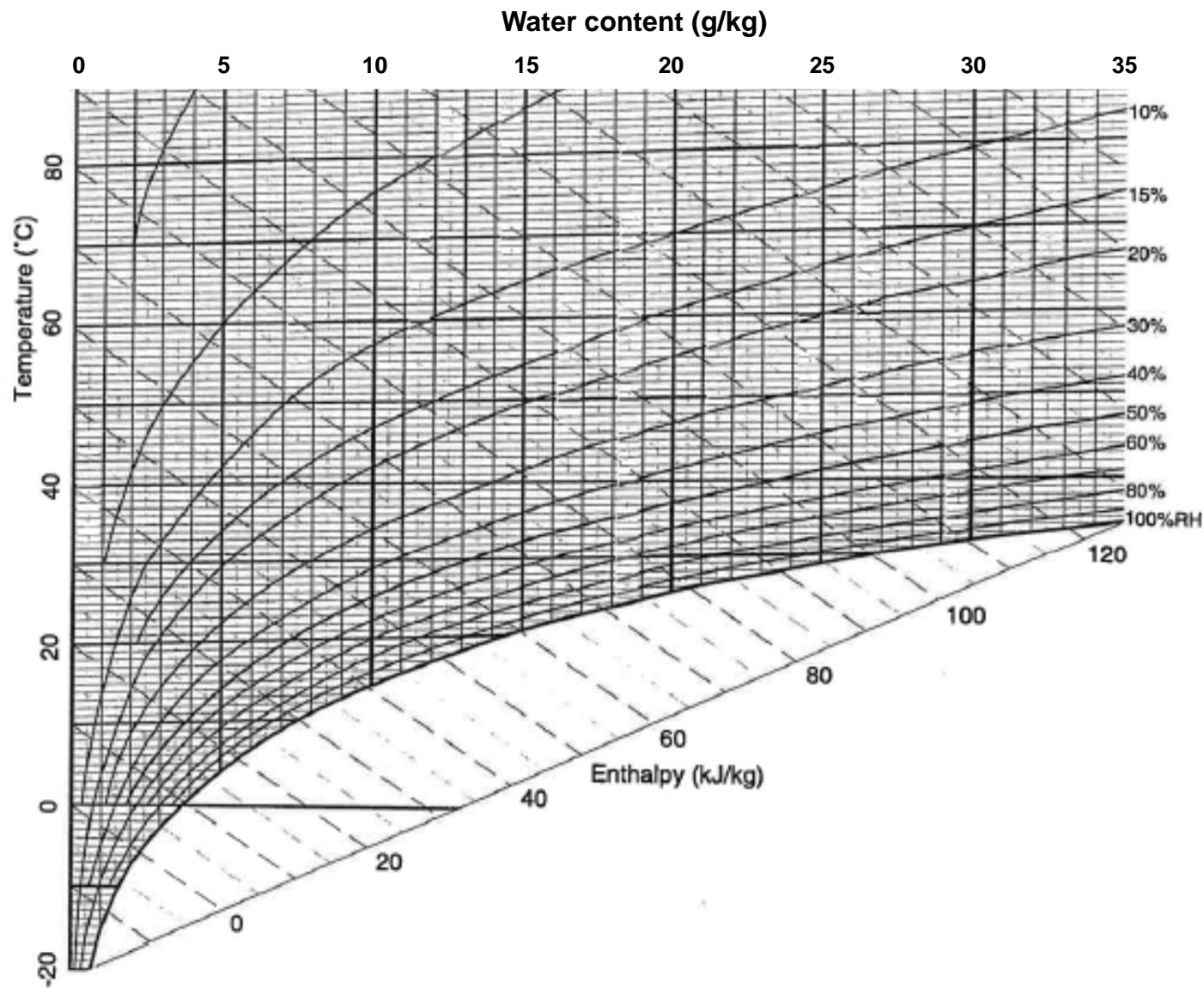


1 MJ = 0,2778 kWh, 1 MWh = 1000 kWh

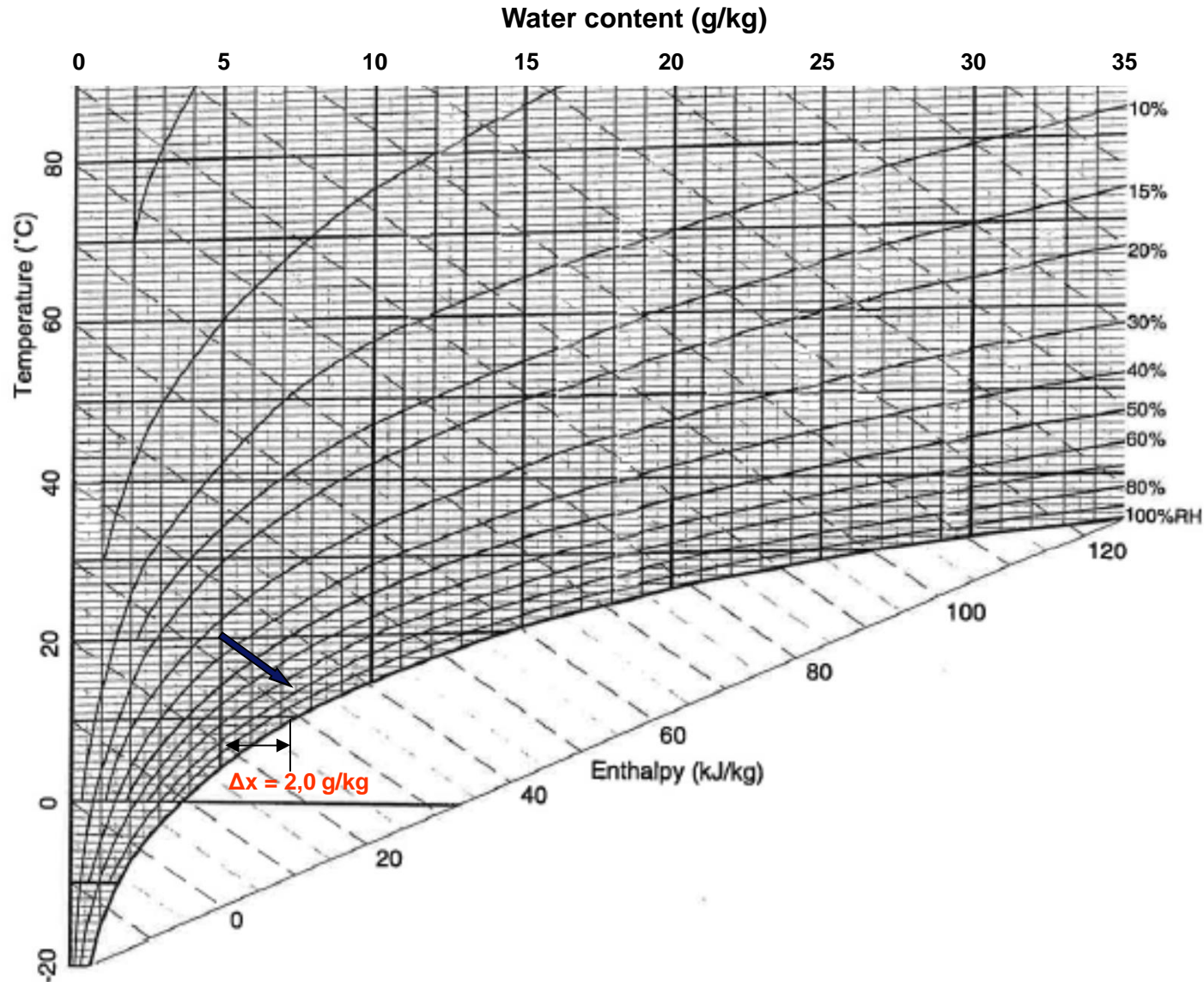
# Kuivauksen lähtökohta



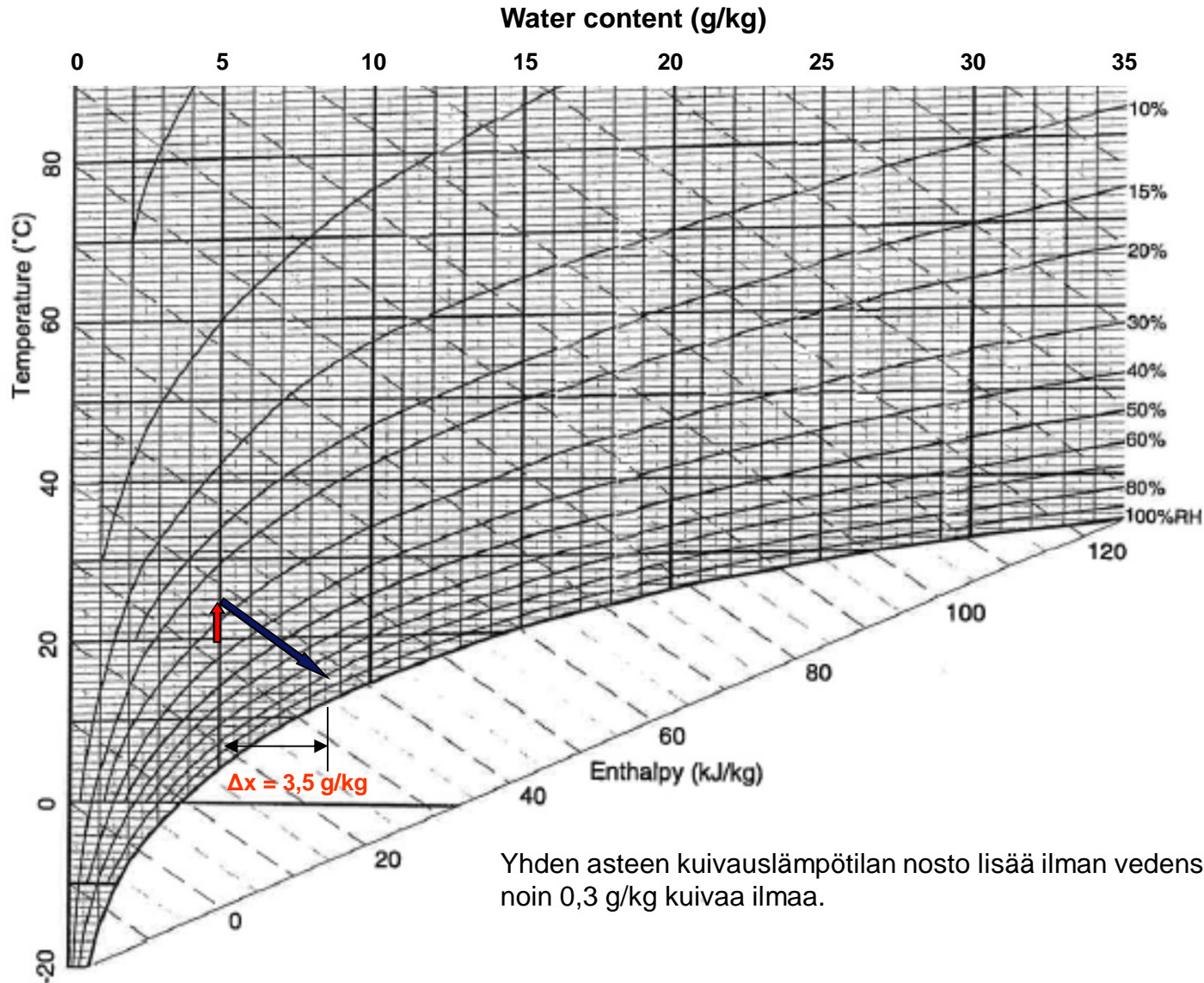
# Kostean ilman Mollier-diagrammi



# Kylmäilmakuivurissa tapahtuva veden haihtuminen

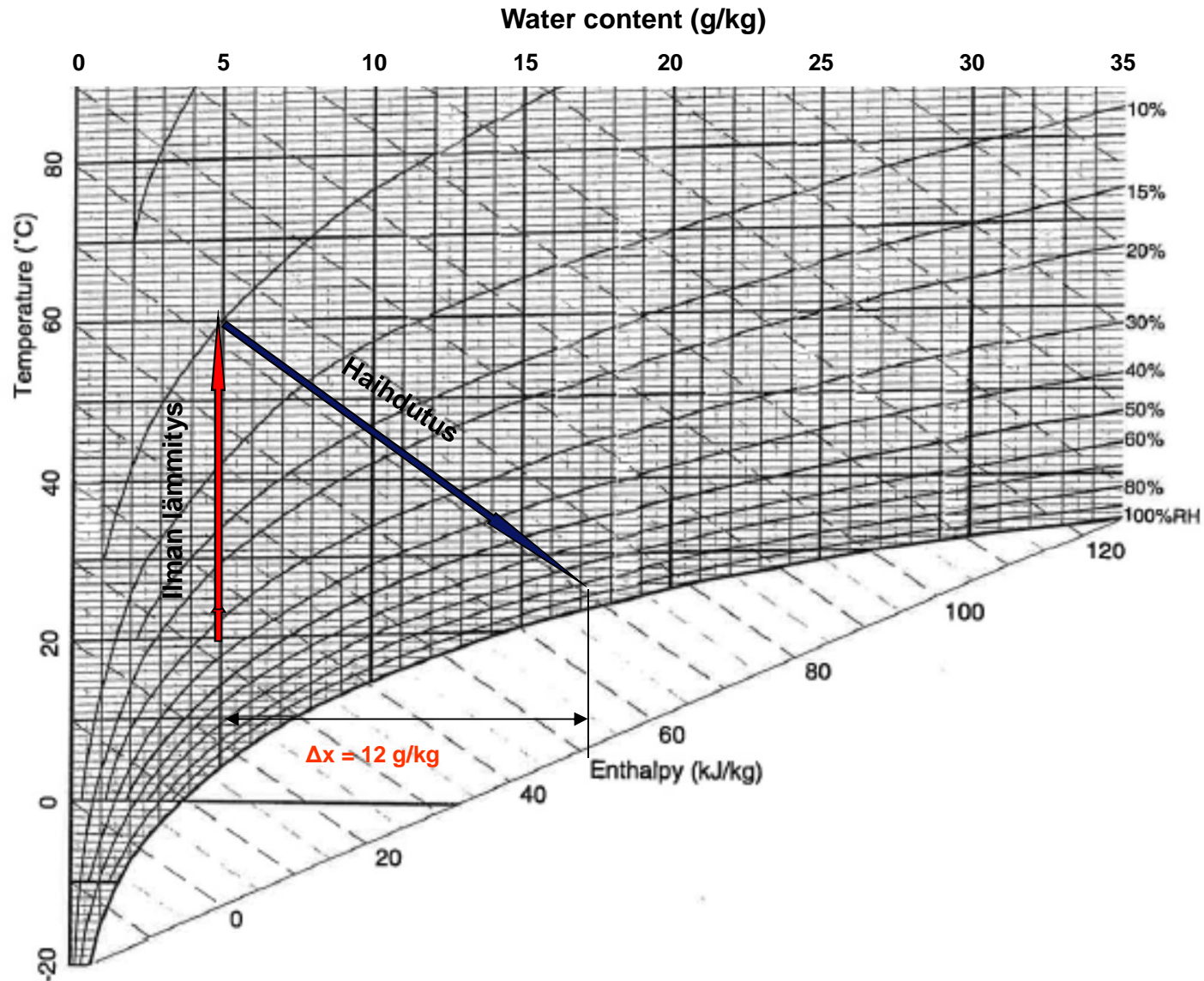


# Kylmäilmakuivuri + aurinkokerääjä

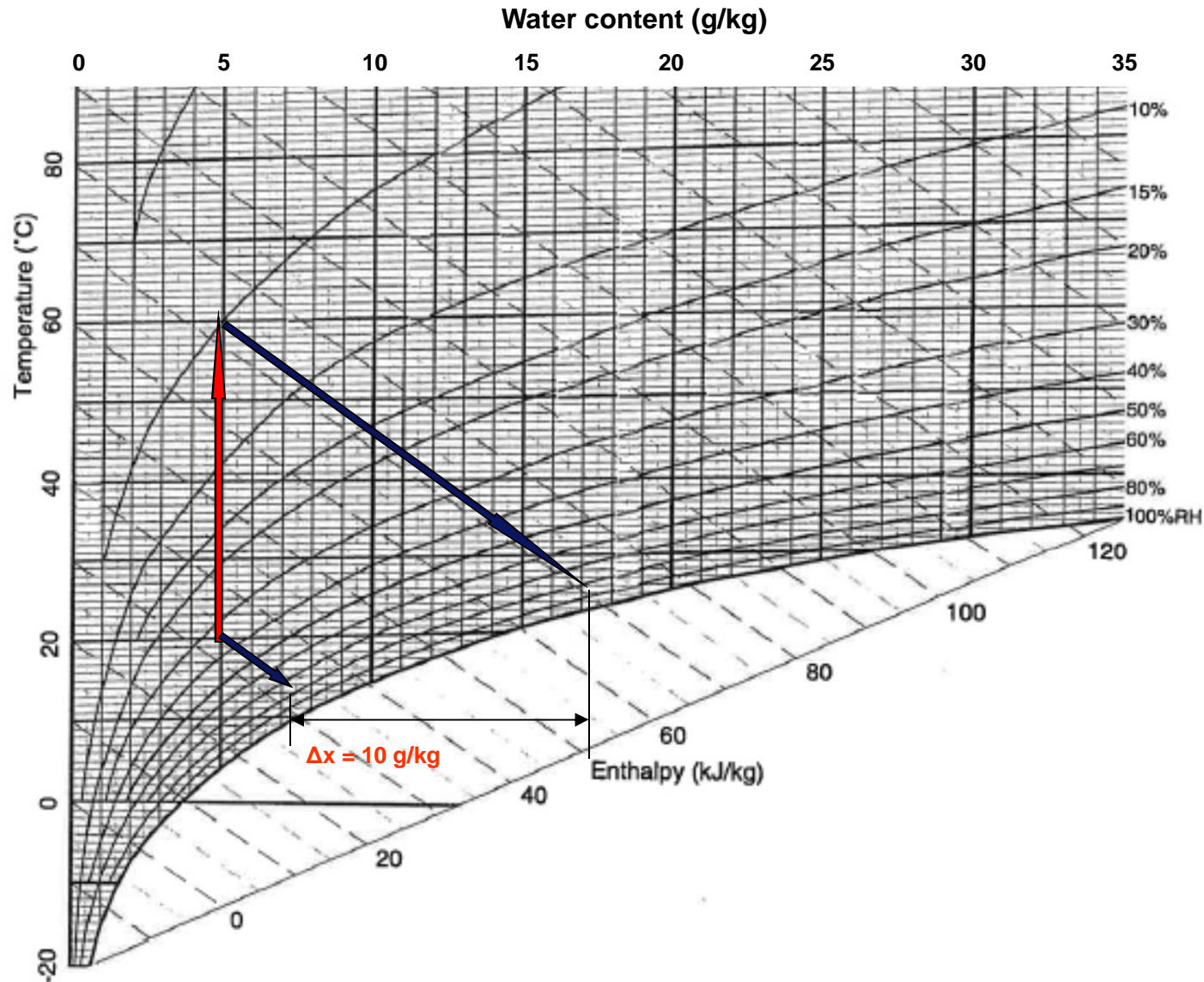


Yhden asteen kuivauslämpötilan nosto lisää ilman vedensitomiskykyä noin 0,3 g/kg kuivaa ilmaa.

# Lämminilmakuivuri

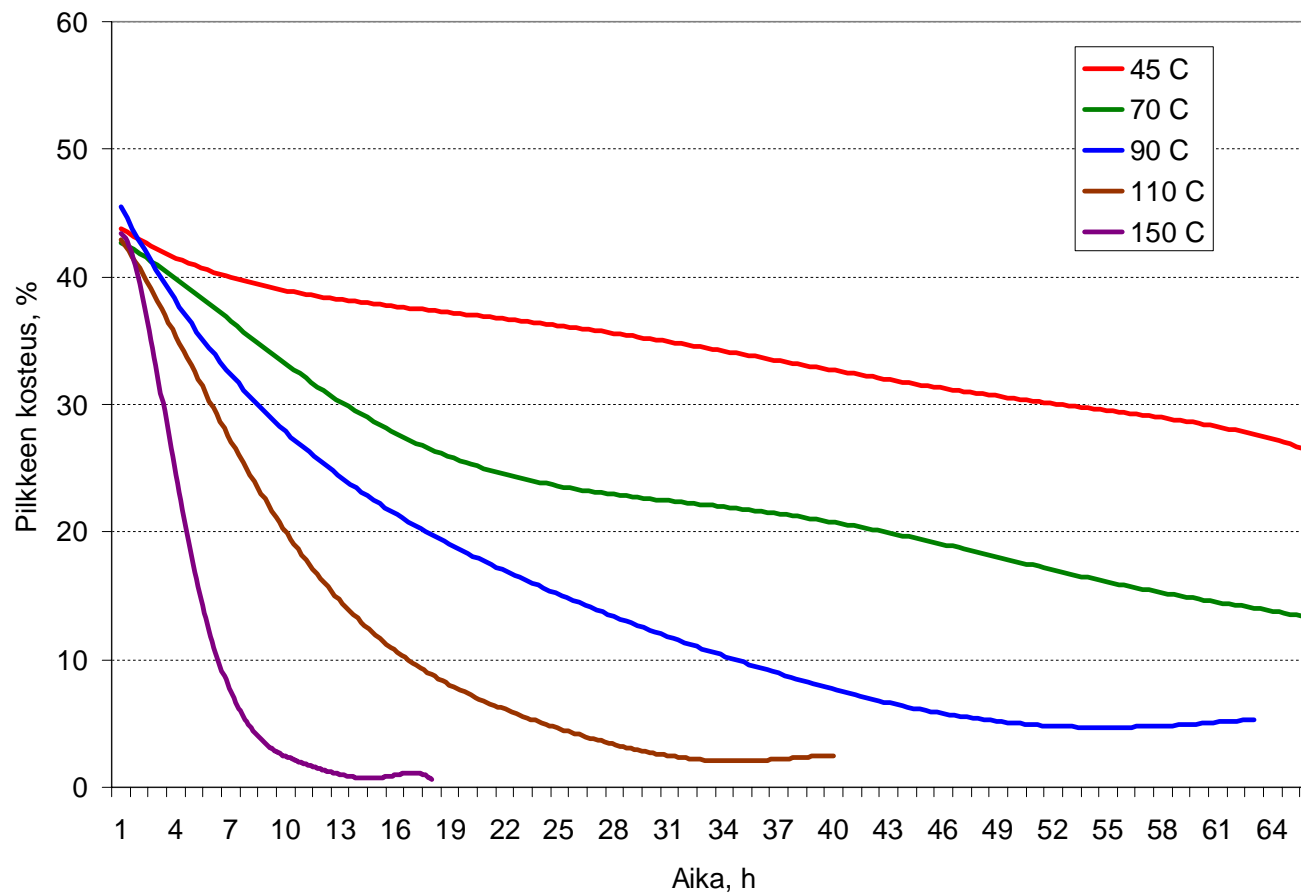


# Lämminilmakuivuri vs. kylmäilmakuivuri



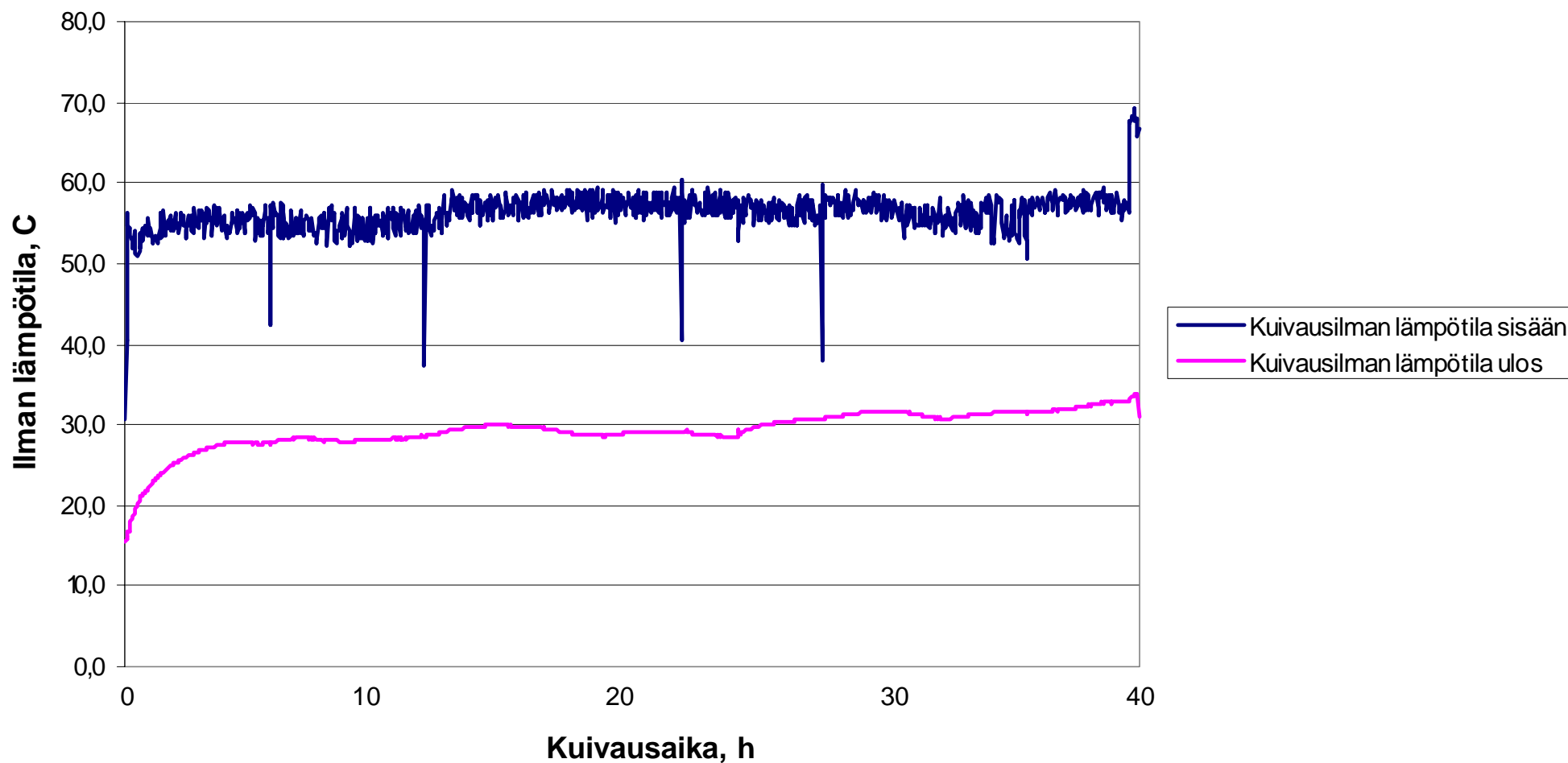


# Kuivausilman lämpötilan vaikutus kuivausaikaan



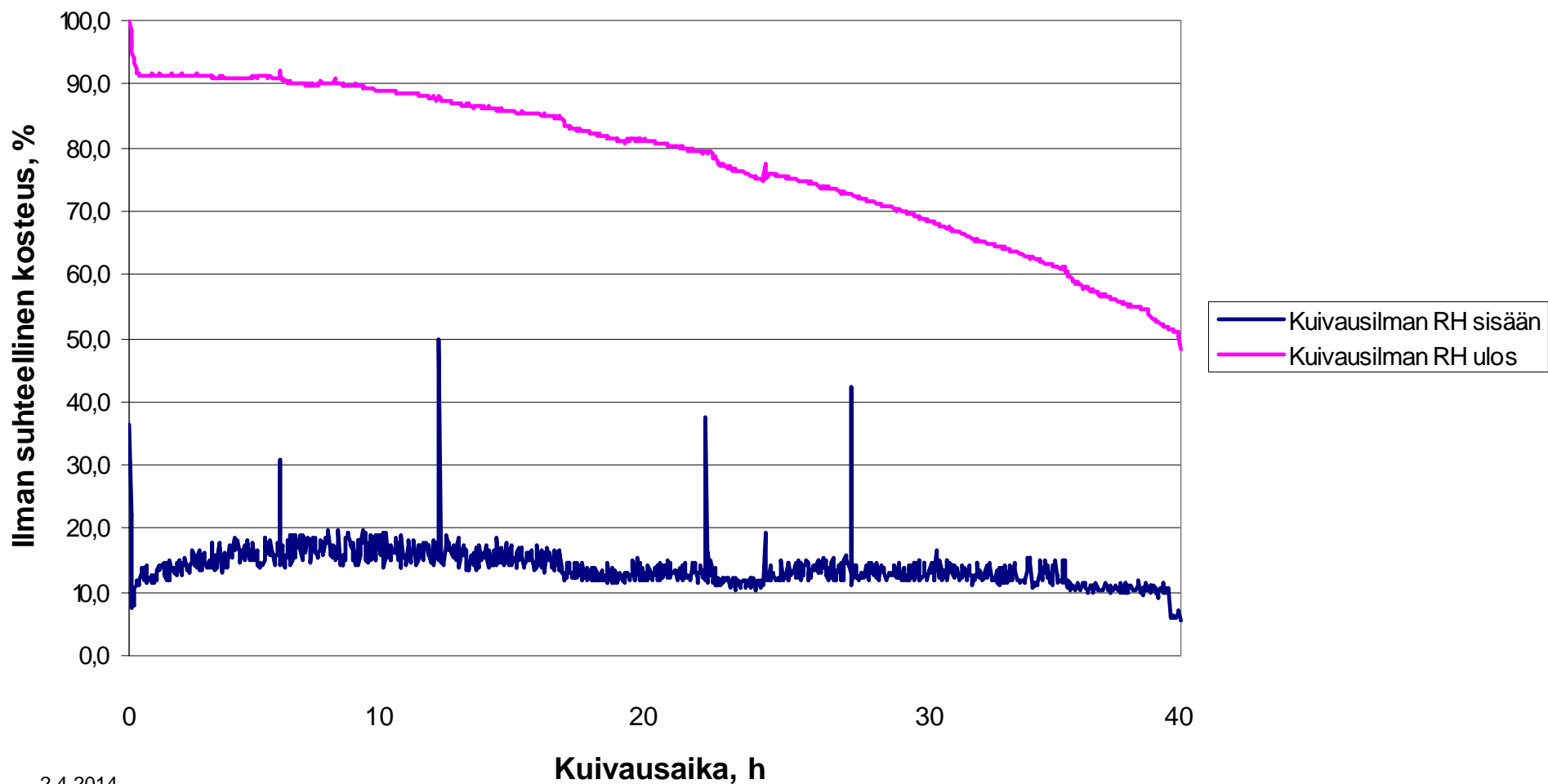
# Esimerkki 1

## Kuivuriin tulevan ja kuivurista poistuvan ilman lämpötilä



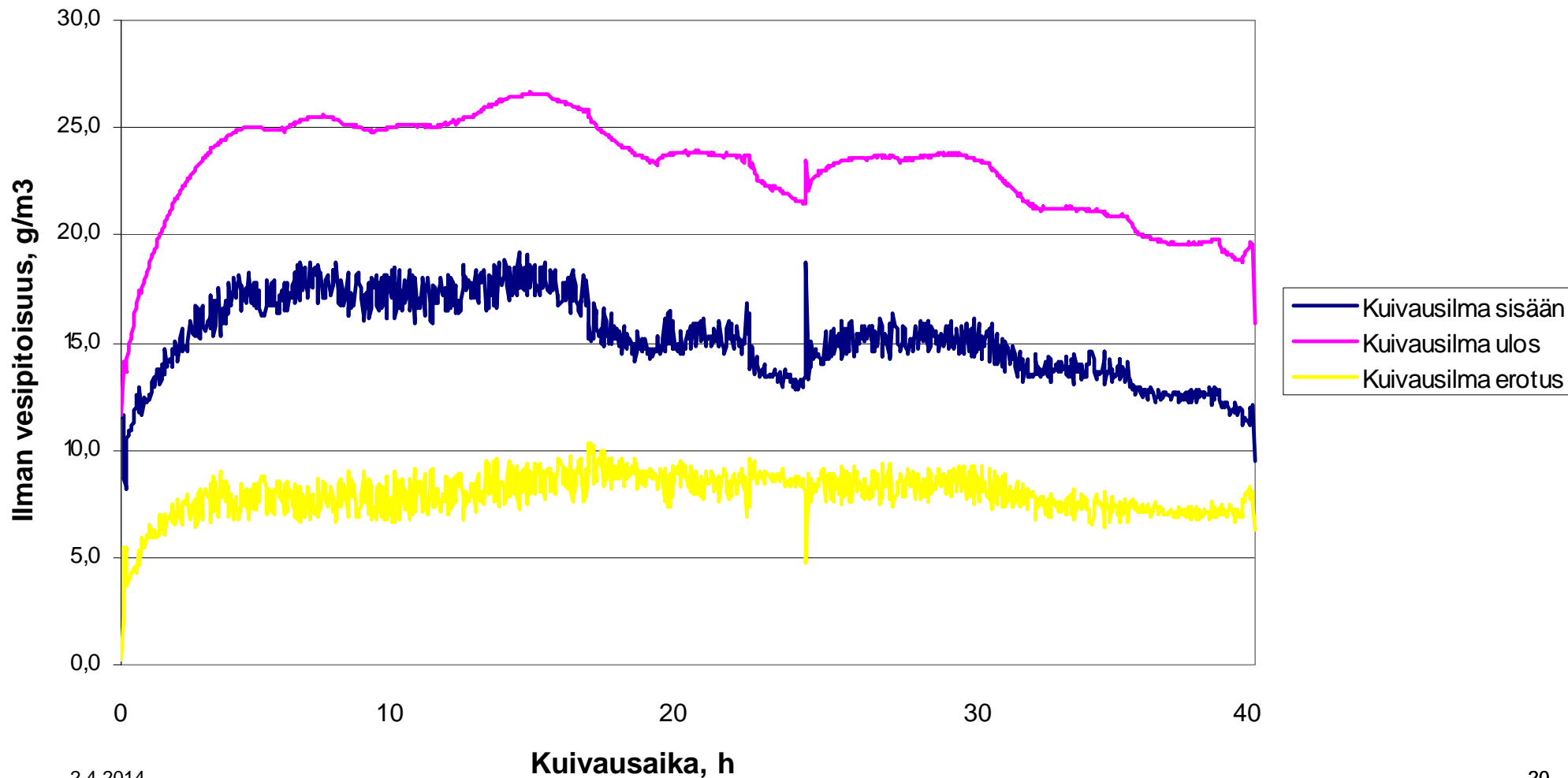
## Esimerkki 2

### Kuivuriin menevän ja kuivurista poistuvan ilman suhteellinen kosteus



# Esimerkki 3

## Kuivausilman ja poistuvan ilman vesipitoisuus



# Kuivauksen energiatarve

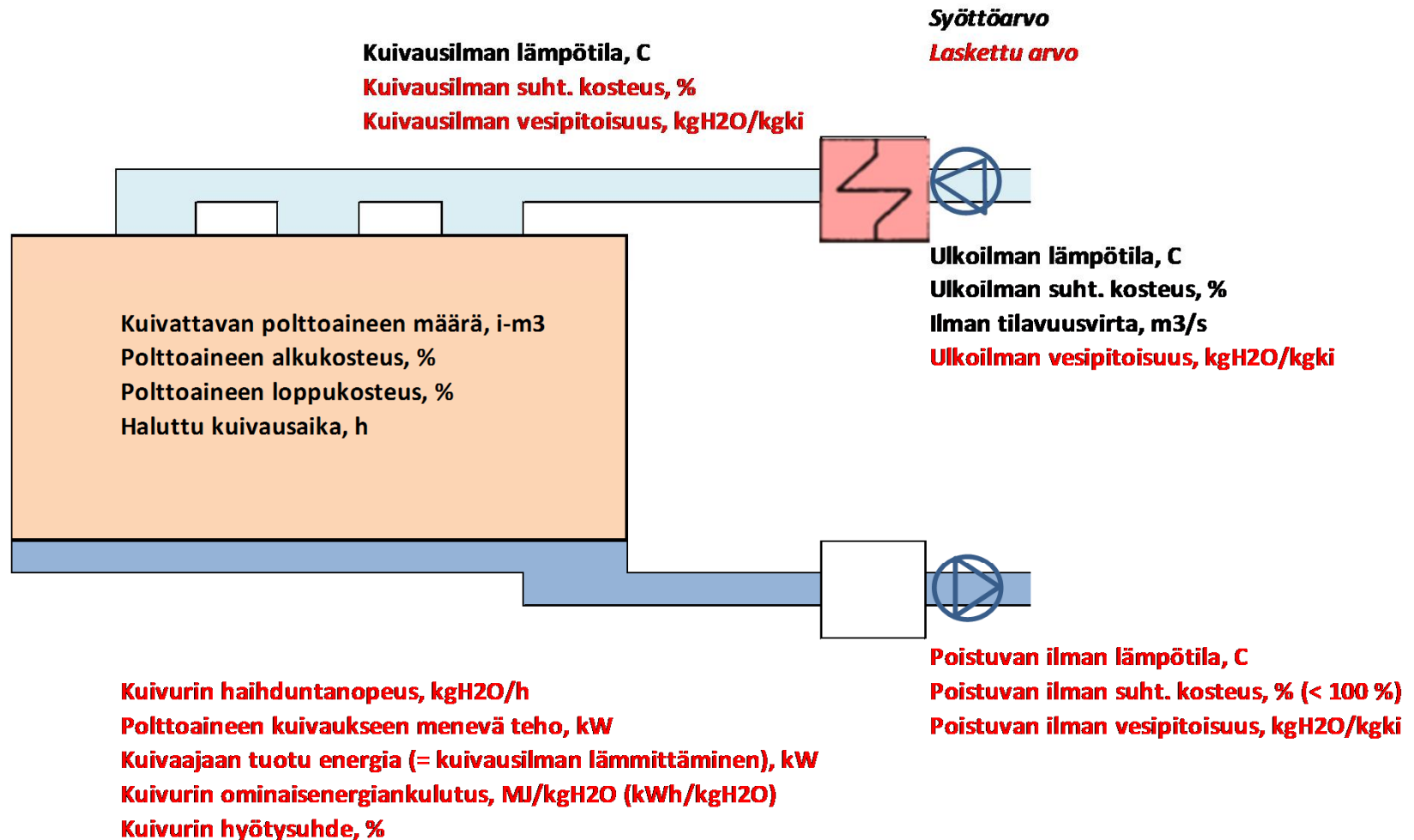
1. Puussa olevan jään lämmittäminen, P1
2. Puussa olevan jään sulattaminen, P2
3. Puussa olevan veden lämmittäminen veden höyrystyslämpötilaan, P3
4. Puuaineen (kuivan) lämmittäminen kuivurin loppulämpötilaan, P4
5. Veden höyrystäminen, P5
6. Kuivurin lämpöhäviöt ympäristöön, P6
7. Kuivuriin tuotu energia, P7

## Kuivurin hyötysuhde

$$\eta = (P1+P2+P3+P4+P5)/P7 * 100 \% = (1 - P6/P7) * 100 \%$$

# Kuivureiden toiminnan mallintaminen

Ei ilman takaisinkieräystä

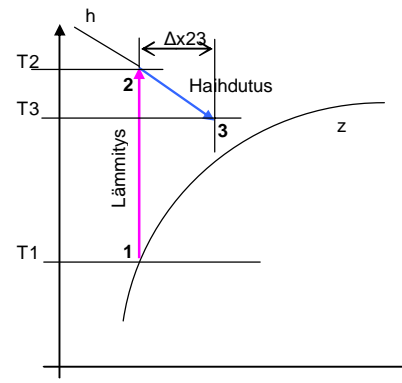


# Kuivurin laskentaa

## Syöttöarvo lihavoitu sininen

### Lähtötiedot

Veden ominaislämpökapasiteetti	4,19 kJ/kgK	
Vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti	1,87 kJ/kgK	
Ilman ominaislämpökapasiteetti	1,008 kJ/kgK	
Kuivurin ominaisenergiankulutus	<b>4,2 MJ/kg<sub>H2O</sub></b>	
Lämpöhäviöt kuivurista	<b>5 %</b>	
Haihduntanopeus	124 kg <sub>H2O</sub> /h	= vesihöyryn massavirta
Ilmanpaine	<b>1 bar</b>	



sis. lämpöhäviöt 119 **Ilman lämmitys, kW** ominaisenergiankulutuksen mukaan 151 **Haihdutus**

Lämpötila  
Ilman suht. kosteus  
Ilman absol. kosteus  
Kostean ilman entalpia  
Ilman tilavuusvirta  
Kostean ilman tiheys  
Kostean ilman massavirta  
Kuivan ilman massavirta

Ulkoilma		Kuivausilma		Höyrytetty vesi	
T1	20 °C	T2	30 °C	T3	22,2 °C
z1	0,70 -	z2	0,39 -	z3	0,799 - (Huom! On oltava < 1)
x1	0,010354 kg <sub>H2O</sub> /kgki	x2	0,010354 kg <sub>H2O</sub> /kgki	x3	0,0136 kg <sub>H2O</sub> /kgki
h1	46,4 kJ/kgki	h2	56,6 kJ/kgki	h3	56,73 kJ/kgki
Q	34010 m <sup>3</sup> /h	Q	34010 m <sup>3</sup> /h	Q	34010 m <sup>3</sup> /h
pk1	1,181 kg/m <sup>3</sup>	pk2	1,142 kg/m <sup>3</sup>	pk3	1,170 kg/m <sup>3</sup>
m'1	40164 kg/h	m'2	38840 kg/h	m'3	124 kg/h
mi'1	39753 kg/h	mi'2	38441 kg/h	mi'3	122 kg/h
				e	124 kg <sub>H2O</sub> /h Haihduntanopeus
				Δx23	0,0032 kg <sub>H2O</sub> /kgki Abs. Kosteuden muutos
				Δh23	0,13 kJ/kgki Entalpiain muutos

### Märkä raaka-aine

45 w-%  
350 kg/h  
193 kg<sub>ka</sub>/h  
158 kg<sub>H2O</sub>/h  
10 °C



### Kuivattu raaka-aine

15 w-%  
226 kg/h  
193 kg<sub>ka</sub>/h  
34 kg<sub>H2O</sub>/h

# **Kuivuriesimerkkejä ja kuivaustuloksia**



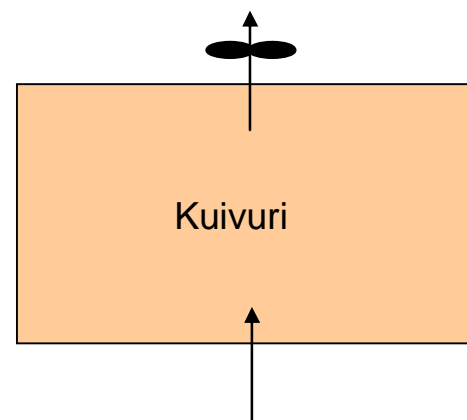
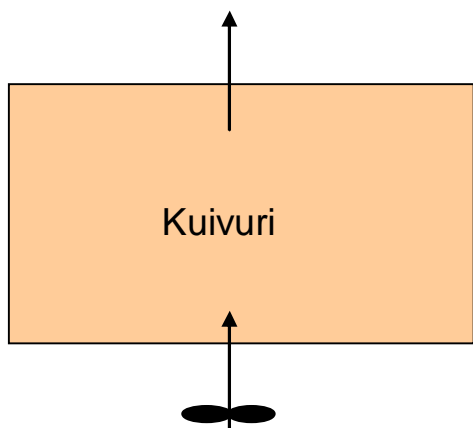
# Yli- ja alipaineekuivuri



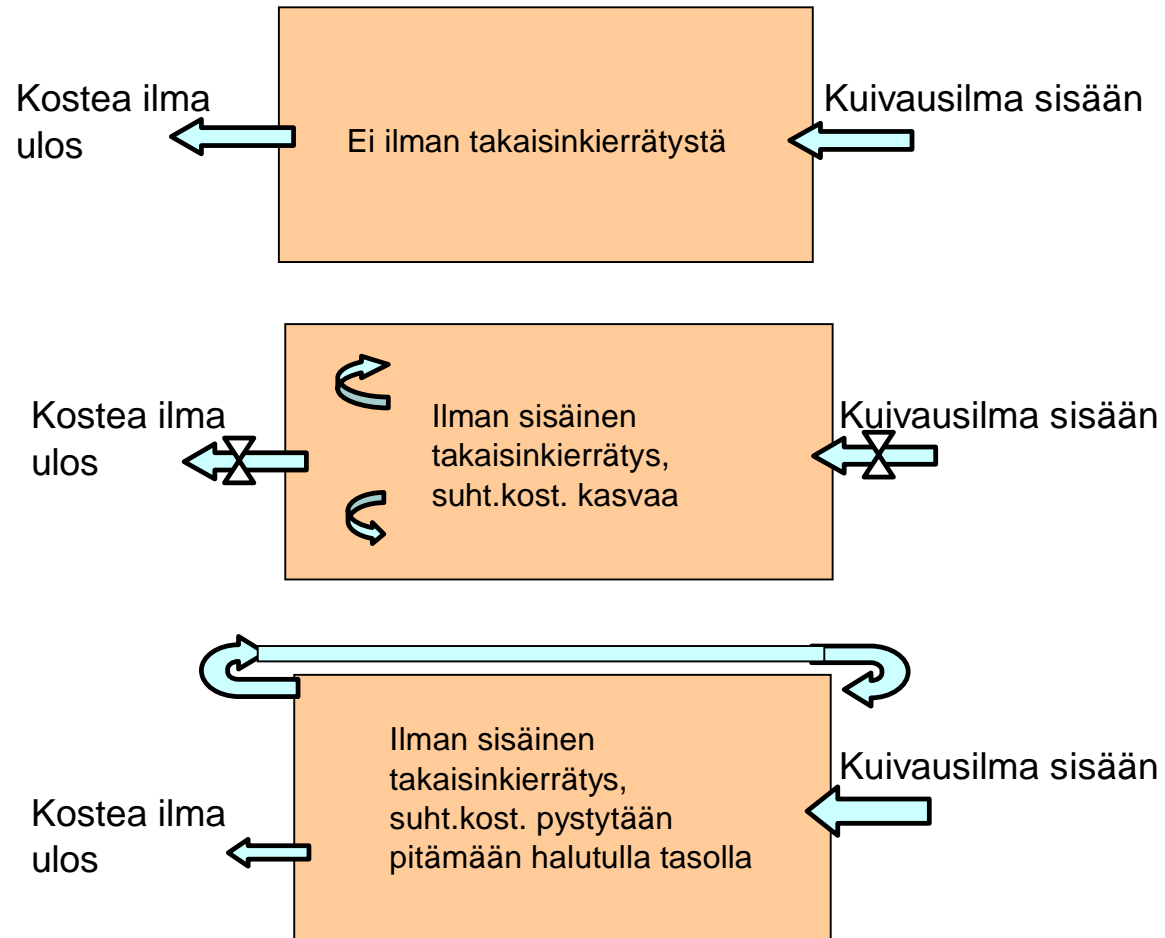
Kuivausilman puhallus (ylipaineekuivuri)



Kuivausilman imu (alipaineekuivuri)

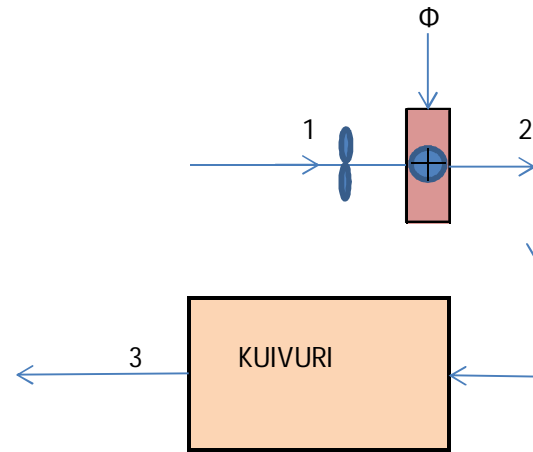


# Kuivausilman kierrätys

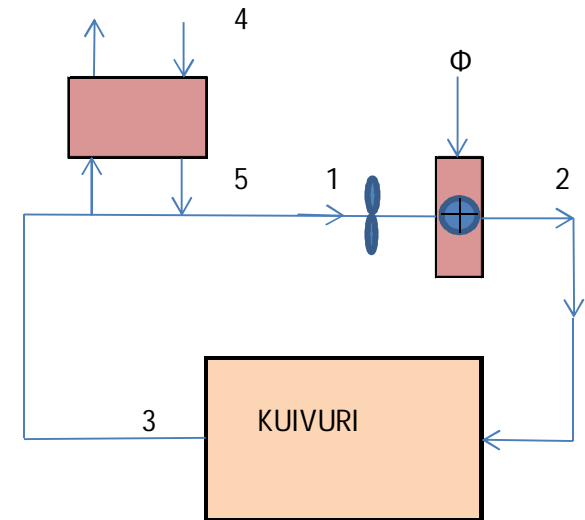


# Kuivausilman kierrätys ja LTO

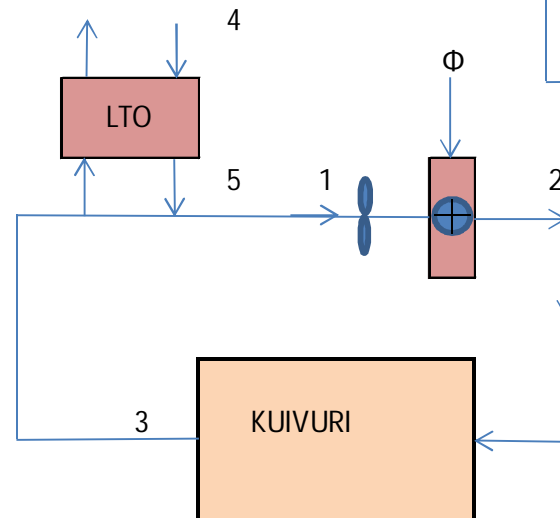
- Ei ilman takaisinkierrätystä



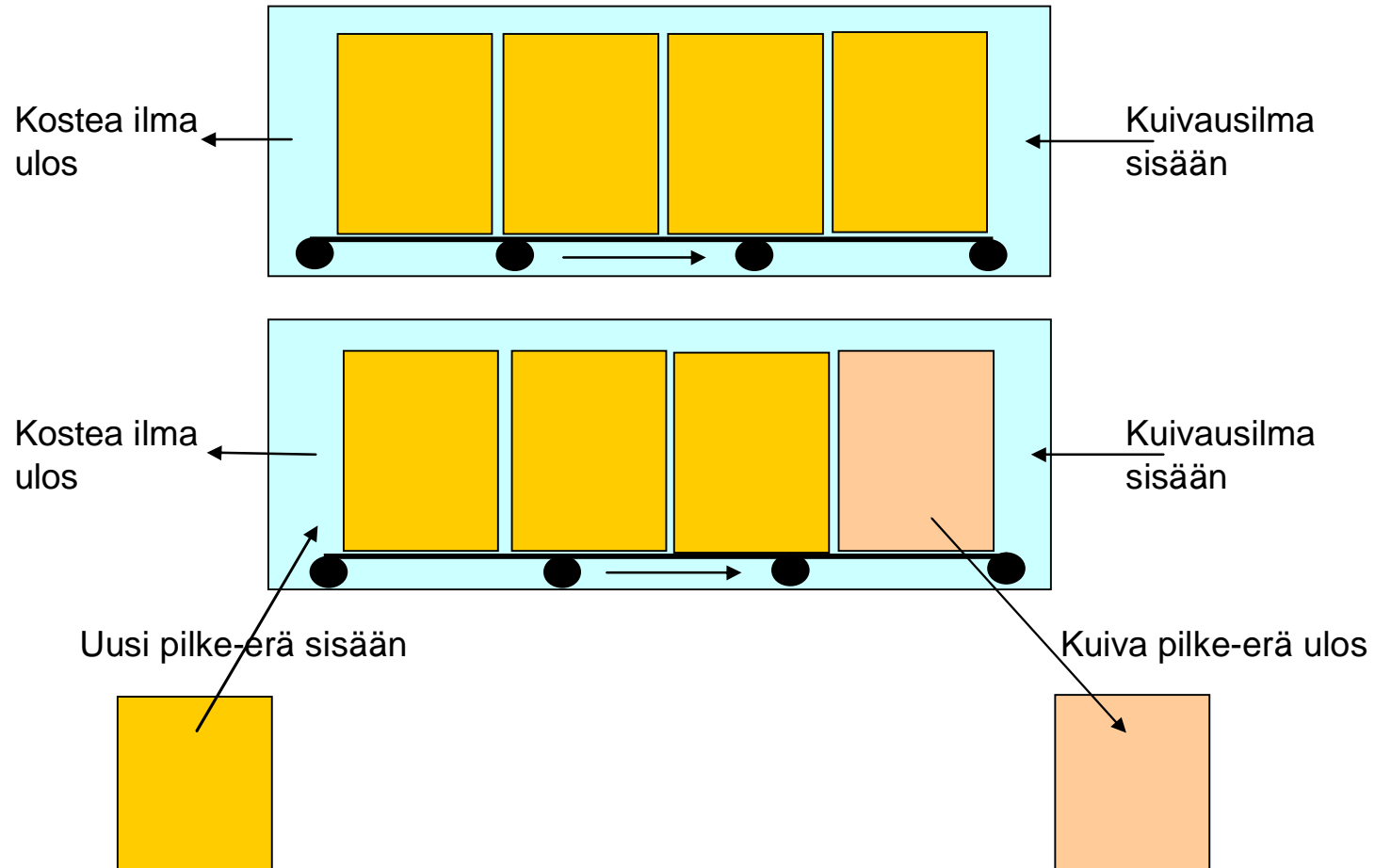
- Ilman takaisinkierrätys/sekoitus



- Ilman takaisinkierrätys/sekoitus ja lämmön talteenotto (LTO)



# Jatkuvatoiminen kuivuri



# Pilkkeiden kylmäilmakuivausta



## Merikontista tehty kuivuri



# Konttikuivurin pohjaratkaisu



# Potkuripuhallin 50 cm, 2,2 kW/3000 kierr. moottorilla





# Lämminilmakuivuri – esimerkki kuivausilman kanavoinnista



Kuivausilman tulokanava katossa



Poistoilman kanavat

# Kuivaus 80 kuution kylmäilmakonttikuivurissa



## Kontin 1. koivupilke-erä

Kuivaus huhtikuun alusta.,  
keskiarvokosteus:

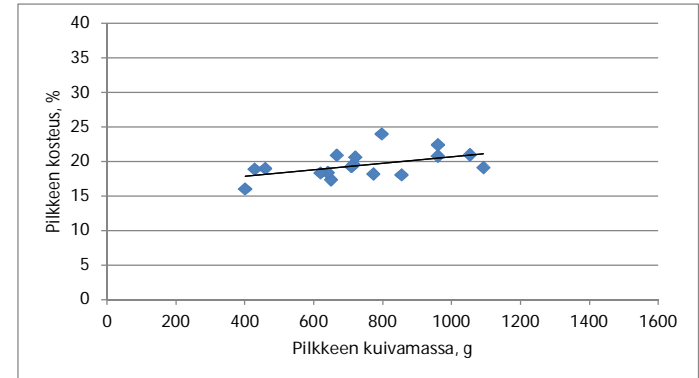
31.5. 19,5 %  
keskihajonta 2,9 %.

## Kontin 2. koivupilke-erä

Kuivaus alkoi 6.6.,  
keskiarvokosteudet:

4.7. 21,7 %  
27.10. 17,2 %  
4.11. 20,7 %

keskihajonnat 1,9 % – 2,1 %.

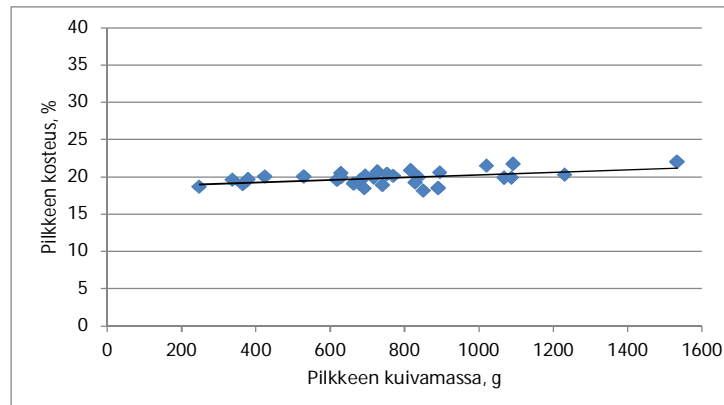


Puhaltimia käytetään sääolosuhteiden (T, rh) ja kuivumisvaiheen mukaan. Tuloksena tasalaatuiset kuivat pilkkeet.

## Toisen kontin 1. koivupilke-erä

Kuivaus alkoi 20.7.2011.,  
keskiarvokosteus:

14.12. 19,9 %  
keskihajonta 1,4 %.



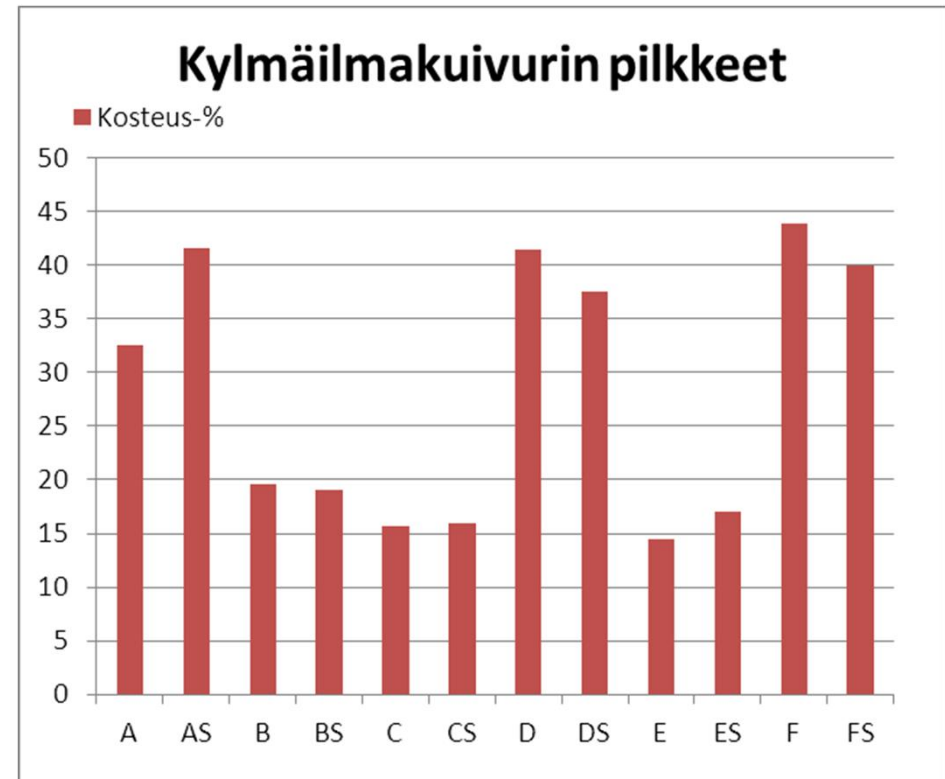
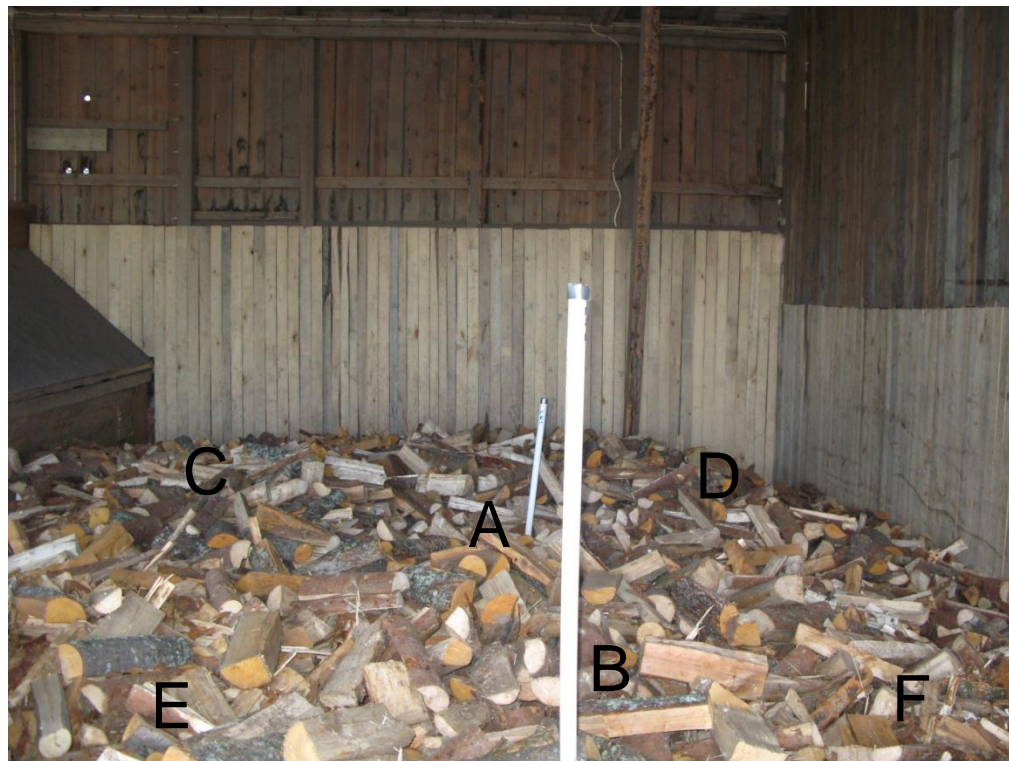
# Kuivaus latomallisessa kylmäilmakuivurissa

- Kylmäilmakuivurin rakenne
  - Puhallin 9 kW, tuulitunneli, puusiilo
- Raaka-aineet
  - Talvella tehtyä sekaklapia
  - Keväällä pilkottua sekaklapia
- Kylmäilmakuivurin anturit
  - Imupuolen seinusta, puhalluskanava, 0,7 m pohjasta, 1,3 m pohjasta, puiden yläpuolella ilmassa
- Kuivausjaksot
  - 10.5. – 14.6. anturit
- Pilkenäytteet 0,5 metrin ja noin 1 metrin syvyydeltä pinnasta
- Pilkekerroksen paksuus noin 2 metriä



# Pilkkeiden kuivuminen

- Kylmäilmakuivurissa kuivausaika 5 viikkoa
- pilkkeiden alkukosteus 45 – 59 %, loppukosteus 15 – 43 %
- Kanavan vieressä kuivui, seinustalla ei, irronnut kuori yms. sälä vaikeuttaa ilman liikkumisen, värimuutoksia

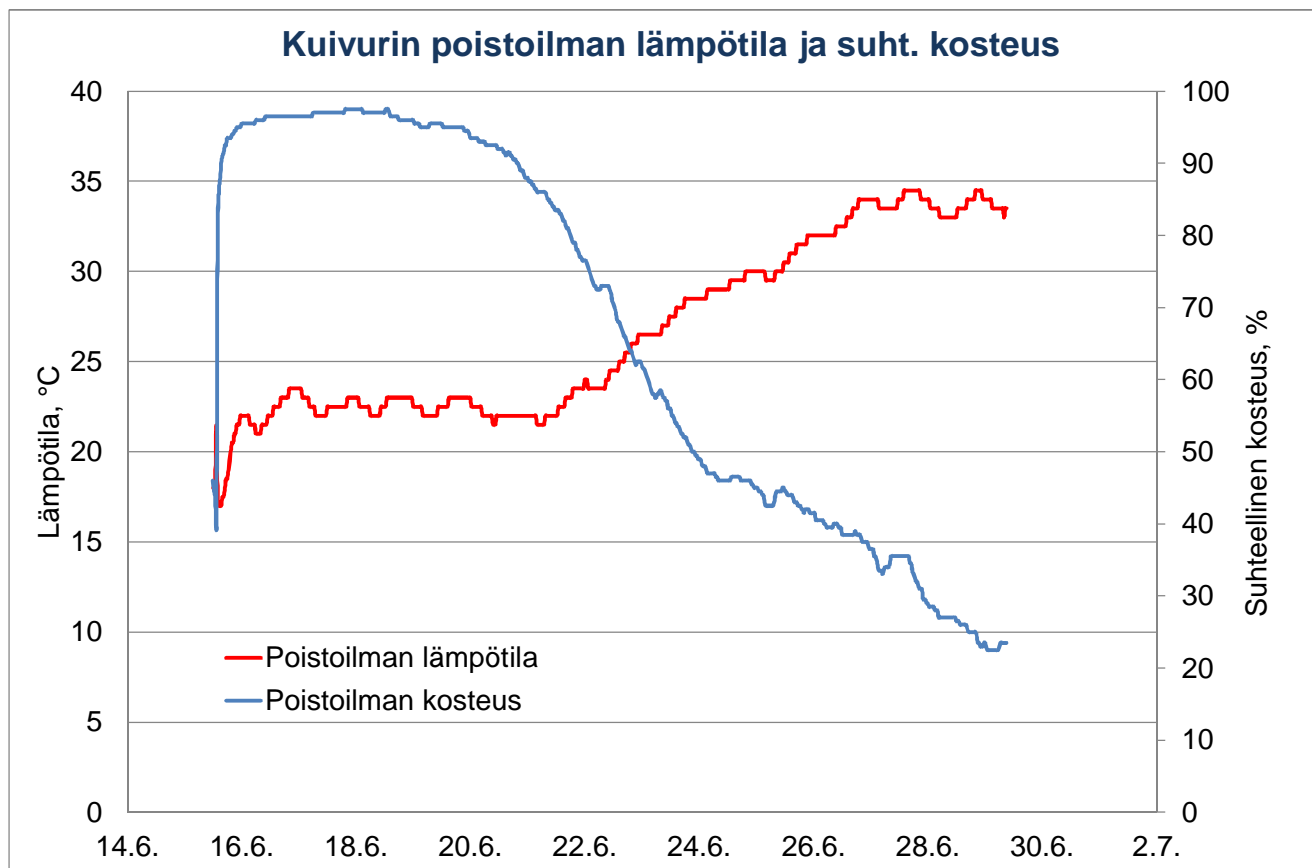


# Peräkärrikuivuri



- Kärriin tilavuus 23 i-m<sup>3</sup>, pilkkeet etukuormaajalla sisään
- Lämmin ilma pohjasta sisään, katosta ulos; lämpö maatilän lämpökattilasta
- Kuivat pilkkeet suoraan asiakkaalle

# Kuivauksen poistoilman säätö



- Tyypillisesti poistuvan ilman kosteus vähenee, kun puut alkavat kuivua
- Hyötysuhteen parantamiseksi ilman säätöä pitää optimoida

# Kuivaus lämminilmakuivurissa

- Lämminilmakuivuri
  - DRY-AIR DA 6 -puutavarakuivaamo
  - Kostean ilman kondensointi (lämpöpumppuperiaate), nimellistäyttö 15 m<sup>3</sup>, kuivauslämpötila 60 °C, nimellishaihdutusteho 450 litraa/vrk, kiertoilmapuhaltimet 6 kpl 0,55 kW, joissa pyörimissuunnan vaihto, kompressorin teho 5,8 kW
  - Lämmöntuotanto pellettilämpökeskuksesta



# Pilkkeiden valmistus

- Pilkonta häkkeihin

- Pilkonnan tehotuntuottavuus (2 hlöä)

- 27.4. koivu: 6,8 i-m<sup>3</sup>/h
    - 23.5. sekapuu: 8,6 i-m<sup>3</sup>/h



- Punnitus

- Kesto 3 – 5 min/häkki (2,4 i-m<sup>3</sup>)

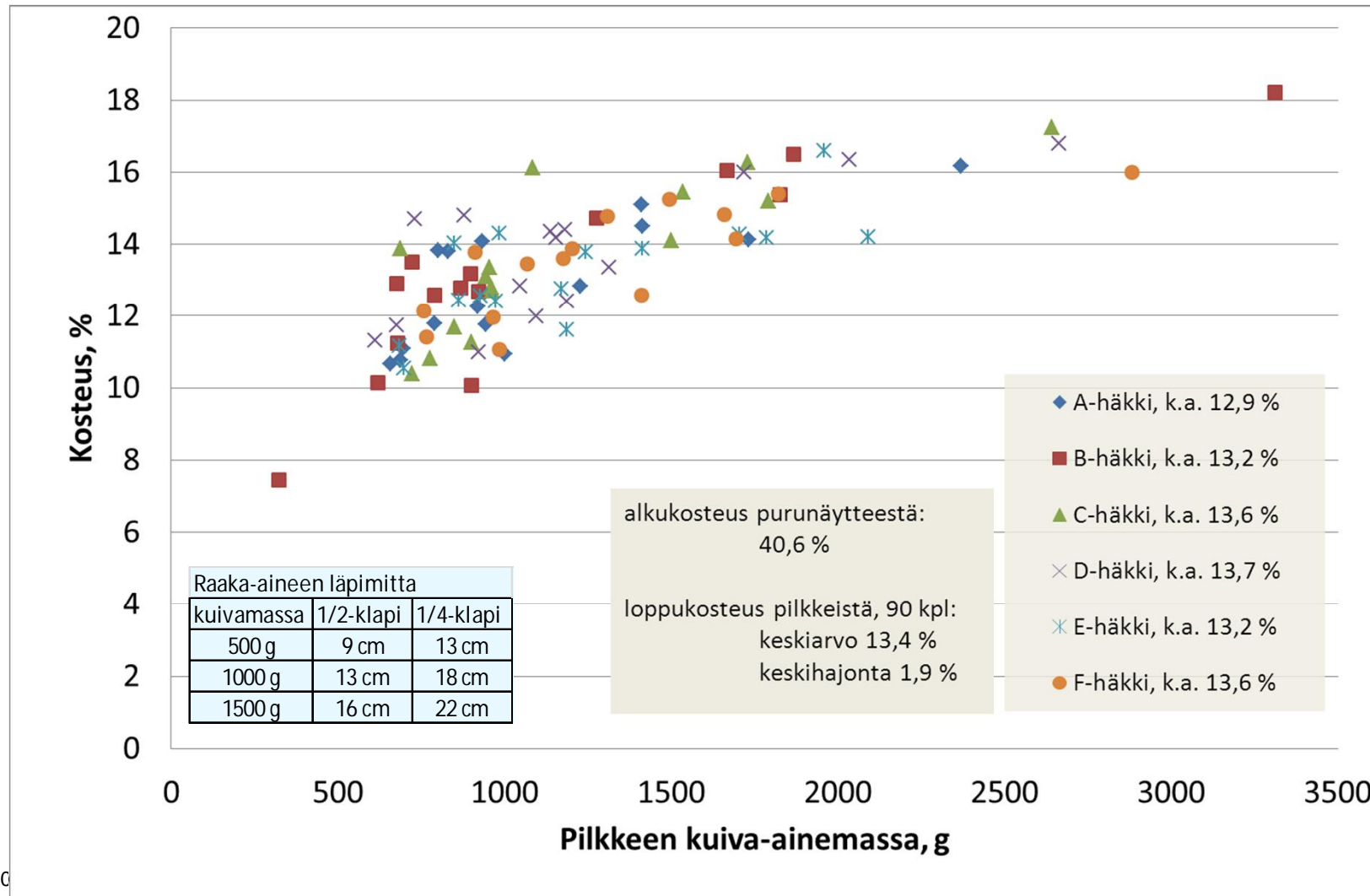


- Kuivaus lämminilmakuivurissa



# Pilkkeiden kuivuminen lämminilmakuivurissa

## 27.4.-4.5.2011 koivupilkkeet



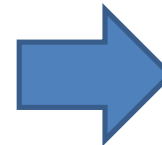
# Pilkkeiden kuivuminen lämminilmakuivurissa

Laukaa:

- Lämminilmakuivurissa kuivausaika oli keväällä 5 vrk
- Pilkkeiden alkukosteus 45 – 50 %, loppukosteus 15 – 20 %
  - Vettä poistui 100 kg/irtokuutio, 250 kg/häkillinen, yhteensä 1 500 litraa
  - Häkillisen energiasisältö kuivauksen jälkeen noin 2 100 kWh
- Kesän aikana yksi pilke-erä viikossa, kuivausaika 3 vrk
  - pilkonta torstaina, kuivauksen käynnistys perjantaina, purku maanantaina

# Havaittuja hyötyjä Laukaan vankilan tilalla

- Valmistusketjun logistiikka kehittynyt sujuvammaksi, ei turhia raaka-aineen ja pilkkeiden siirtelyjä
- Laadun varmistus alkaa jo pilkkeen teon yhteydessä
  - alkukosteus ja punnitus
- Kuivumisen kontrollointi kuivurin mittaustiedoista
  - kuivausilman suhteellinen kosteus yhteydessä pilkkeiden kosteuteen
- Loppupunnituksen avulla voidaan laskea energiasisältö
- Asiakkaalle voidaan antaa tuoteseloste
- Verkostoitumisessa myös jakelun hoitaja tietää vievänsä kuivia pilkkeitä
- Laadukasta toimintaa koko valmistus- ja toimitusketjussa



**Tyytyväiset  
asiakkaat**

# Yhteenveto

- Raaka-aine vaikuttaa alkukosteuteen ja kuivumiseen – raaka-ainetta voidaan kuivata jo ennen pilkkeiden valmistusta
- Keinokuivauksella voidaan nopeuttaa puun kuivumista ja hallita kuivausprosessia paremmin – kuivaustapa riippuu tuotantovolyymistä, toimintamallista ja investointihalukkuudesta
  - Pilkkeen tuotannon sesonkiluonteisuus vähenee
  - Varaston kierto lyhenee
  - Voidaan vastata paremmin muuttuvaan kysyntään
  - Parempi hinta?
- Tehokkaan ja toimivan kuivurin voi rakentaa edullisesti, mutta kuivauksen taselaskentaan ja mitoitukseen kannattaa kiinnittää huomiota
- Kaikilla kuivaustavoilla voidaan saavuttaa hyvää polttopuuta kunhan kiinnitetään huomiota koko tuotantoketjuun



# TEKNOLOGIASTA TULOSTA

