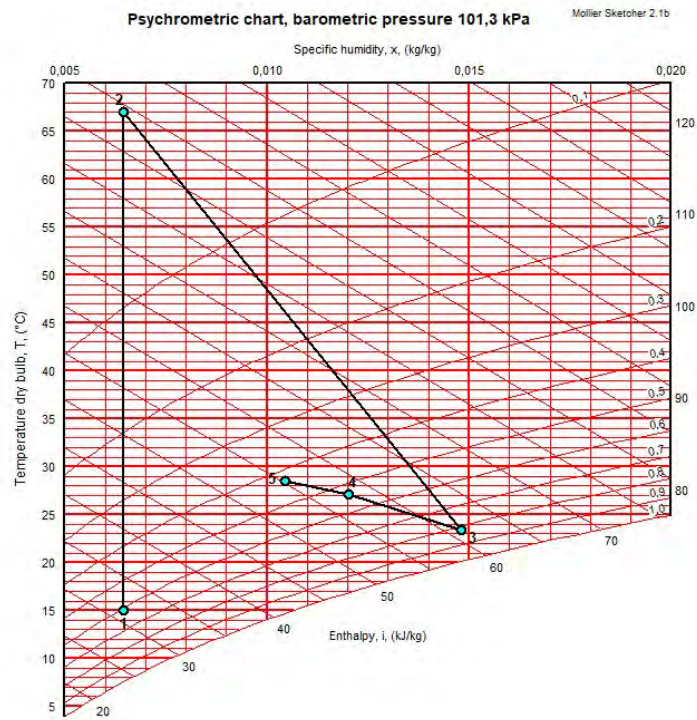


AGROTEKNO



# Viljankuivauksen kapasiteetti

Jukka Ahokas

# Sisällys

<b>1</b>	<b>Viljankuivauksen kapasiteetti</b>	<b>3</b>
1.1	Materiaalien kosteuden ilmoittamistavat . . . . .	3
1.2	Ilman ominaisuudet . . . . .	3
1.3	Kuivuriuunit . . . . .	4
1.4	Veden poistumisnopeus . . . . .	5
1.5	Kuivurin mitoitus . . . . .	6
1.5.1	Kuivurisiilojen koko . . . . .	7
1.5.2	Kuivuriuunin koko . . . . .	7

## Luku 1

# Viljankuivauksen kapasiteetti

Tarkastellaan aluksi kuivauksen perusteita, miten kosteus ilmoitetaan ja miten poistettava vesimäärä lasketaan. Seuraavaksi tarkastellaan kuivuriuunin periaatetta. Näiden jälkeen päästään pohtimaan miten kuivurin koko voidaan valita.

### 1.1 Materiaalien kosteuden ilmoittamistavat

Materiaalin kosteus (vesipitoisuus) ilmoitetaan veden osuutena joko kuivan materiaalin massasta tai märän materiaalin massasta. Meillä käytetään lähes yksinomaan vertailukohtana märän materiaalin määrää. Ulkomaisissa ja etenkin anglosaksisissa tutkimuksissa käytetään melko paljon vertailukohtana kuivan materiaalin määrää. Se on järkevin tapa ilmoittaa kosteuspitoisuus erilaisissa prosesseissa, koska kuivan viljan määrä säilyy samana läpi koko prosessin, mutta märän viljan määrä vaihtelee jatkuvasti. Laskentaperusta ilmoitetaan niissä kirjaimilla wb = wet basis = märkäkosteus ja db = dry basis = kuiva kosteus.

Poistettava vesimäärä voidaan laskea viljan alkukosteuden ja viljamäärän perusteella. Viljamäärät ja sadot ilmoitetaan varastointikosteuden mukaan eli viljoilla 14 % kosteuden mukaan ja kosteusprosenttina käytetään märkäkosteutta eli vesimäärä ilmoitetaan erän kokonaispainon (kuiva aines + vesi) mukaan. Viljassa oleva vesimäärä  $M_{vesi}$  ja kuivaaineksen määrä  $M_{kuiva}$  saadaan viljerän kokonaismäärästä  $M_{koko}$ , kun kosteuspitoisuus on  $w$  (sadasosa) seuraavasti.

$$M_{vesi} = w \cdot M_{koko} \quad (1.1)$$

$$M_{kuiva} = (1 - w) \cdot M_{koko} \quad (1.2)$$

Yleensä tunnetaan erän tai hehtaarisadon määrä varastointikosteudessa sekä korjuu- ja varastointikosteudet. Poistettu vesimäärä voidaan laskea määrittämällä ensin varastointikosteudessa oleva kuiva-aineksen määrä. Tämä kuiva-ainemäärä säilyy samana kosteuspitoisuuden muuttuessa, vain vesimäärä muuttuu kosteuden muuttuessa. Puintikosteudessa viljassa oleva vesimäärä  $M_{vkorjuu}$  saadaan seuraavasti, kun korjuukosteus on  $w_{ko}$ .

$$M_{vkorjuu} = \frac{w_{ko} \cdot M_{kuiva}}{1 - w_{ko}} \quad (1.3)$$

Jos käytetään märkäkosteuksia, poistettavalle vesimäärälle voidaan johtaa yhtälö 1.4. Yhtälössä sato on ilmoitettu kuivattuna satona (kosteus  $w_v$ ) ja kosteudet ovat märkäperusteisia.

$$M_{vpoisto} = M_{sato} \frac{w_{ko} - w_v}{1 - w_{ko}} \quad (1.4)$$

Vastaavasti, jos sato ilmoitetaan puintikosteudessa ( $w_{ko}$ ), saadaan poistettavalle vesimäärälle yhtälö:

$$M_{vpoisto} = M_{puinti} \frac{w_{ko} - w_v}{1 - w_v} \quad (1.5)$$

$M_{vpoisto}$	Kuivauksessa poistettava vesimäärä
$M_{sato}$	Sadon massa varastointikosteudessa
$M_{puinti}$	Sadon massa puitaessa
$w_{ko}$	Sadon puintikosteus, sadasosa
$w_v$	Sadon varastointikosteus, sadasosa

**Esimerkki.** Viljasato on 4000 kg/ha varastointikosteudessa 14 % (wb). Puintikosteus oli 22 % (wb). Kuinka paljon öljyä tarvitaan kuivaamiseen, jos kuivauksessa tarvitaan 100 g kevyttä polttoöljyä yhden vesikilon poistamiseen? Kuinka kauan kuivuminen kestää, jos veden haihtumisnopeus on 146 kg/h?

Varastointikosteudessa yhden hehtaarin sadossa on vettä  $0,14 \cdot 4000 = 560$  kg ja kuiva-ainetta  $4000 - 560 = 3440$  kg. Puintikosteudessa hehtaarisadossa on vettä yhtälön 1.3 mukaisesti  $\frac{0,22 \cdot 3440}{1 - 0,22} = 970$  kg ja hehtaarisato märkinä on  $3440 + 970 = 4410$  kg. (Satohan ilmoitetaan varastointikosteudessa, laskussa on lähdetty tästä.) Kuivauksessa vettä poistui  $970 - 560 = 410$  kg. Vedenpoistoon tarvitaan  $410 \cdot 100 = 41,0$  kg kevyttä polttoöljyä. Jos polttoaineen tiheys on 830 g/l, tarvitaan 49 l öljyä. Veden poistumisnopeus on 146 kg/h, jolloin 410 kg haihduttaminen kestää  $\frac{410}{146} = 2,8$  h. Kun polttoöljyn energiasisältö on 42,9 MJ/kg, kuivaamisen aikainen polttoaineteho on  $\frac{41 \cdot 42,9}{2,8} = 174,5$  kW. Veden poiston lisäksi energian tarvitaan viljamassan lämmittämiseen kuivauslämpötilaan.

### 1.2 Ilman ominaisuudet

Viljassa oleva kosteus siirtyy jyvistä ilmaan ja ilma vie kosteuden kuivurista pois. Jotta tämä prosessi voidaan

ymmärtää ja laskea, pitää tuntea myös ilman ominaisuudet. Koska olemme laskemassa kuivauksen kapasiteettia, meille riittää se miten saamme ilman arvoja selville. Jos haluat tietää tarkemmin kuivauksen kulusta ja kuivausilman ominaisuuksista, ne löytyvät julkaisusta Maatilakuivurit [Hautala M., Jokiniemi T., Ahokas J. 2013]

Ilmalla on seuraavat ominaisuudet, jotka pitää tuntea:

- **Suhteellinen kosteus** kuvaa sitä kuinka lähellä ollaan ilman suurinta kosteuden sitomiskykyä. Kun saavutetaan 100% kosteus ilma ei voi ottaa enempää vettä vastaan ja vesihöyry alkaa tiivistymään (kondensoitumaan) vedeksi. Lämpötila vaikuttaa siihen kuinka paljon ilma voi sisältää vesihöyryä ja mitä korkeampi lämpötila on, sitä enemmän se pystyy sitomaan vesihöyryä.
- **Kosteussuhde** (absoluuttinen kosteus) ilmaisee kuinka paljon vesihöyryä ilmassa on kuivan ilman kilogrammaa kohden. Yksikkönä voi olla vesihöyry kg/kuivailma kg tai vesihöyry g/kuivailma kg. Kuivuriuunin imemän ulkoilman kosteussuhde pysyy samana ilman kulkiessa uunin läpi, mutta suhteellinen kosteus muuttuu.
- **Ilman tiheys** muuttuu ilmanpaineen, lämpötilan ja kosteuspitoisuuden mukaan. Kosteuden vaikutus on pieni, joten usein laskuissa käytetään kuivan ilman tiheyttä. Normaalissa ilmanpaineessa ja 15 C lämpötilassa kuivan ilman tiheys on 1,226 kg/m<sup>3</sup>. Kun ollaan ulkoilman lämpötiloissa 0 - 20 C kuivan ilman tiheys on 1,3 - 1,2 kg/m<sup>3</sup>
- **Ominaisilavuus** on tiheyden käänteisarvo, 0 - 20 C lämpötiloissa ilman ominaisilavuus on 0,77 - 0,83 m<sup>3</sup>/kg
- **Entalpia** on ilman lämpösisältö siten, että 0 C lämpötilassa entalpia on 0 kJ/kg. Entalpiaa vaikuttaa ilman lämpötila ja vesihöyry määrä
- **Tilavuusvirtaus**, materiaalin virtaus (esimerkiksi kuivausilma, veden poistumisnopeus) ilmoitetaan tilavuuden avulla, m<sup>3</sup>/h tai m<sup>3</sup>/s.
- **Massavirtaus**, materiaalin virtaus ilmoitetaan massan avulla, esimerkiksi kg/s. Jos tilavuusvirtaus tunnetaan, massavirtaus saadaan kertomalla tilavuusvirtaus materiaalin tiheydellä.
- **Adiabaattisessa** prosessissa ilmasta ei poistu lämpöä eikä siihen tule lisää lämpöä. Hyvin eristetty kuivuri toimii lähes adiabaattisesti, lämpöhäviöt ovat hyvin pienet.
- **Mollier** diagrammin avulla voidaan esittää ilman tilan muutokset ja siitä saadaan ilman arvot selville. Mollier diagrammin lisäksi on Carrier diagrammi, jossa samat asiat esitetään hieinan toisella tavalla. Netissä hakusanoilla 'Mollier diagram', 'Carrier diagram' tai 'Psychrometric chart' voi ladata näitä diagrammeja.

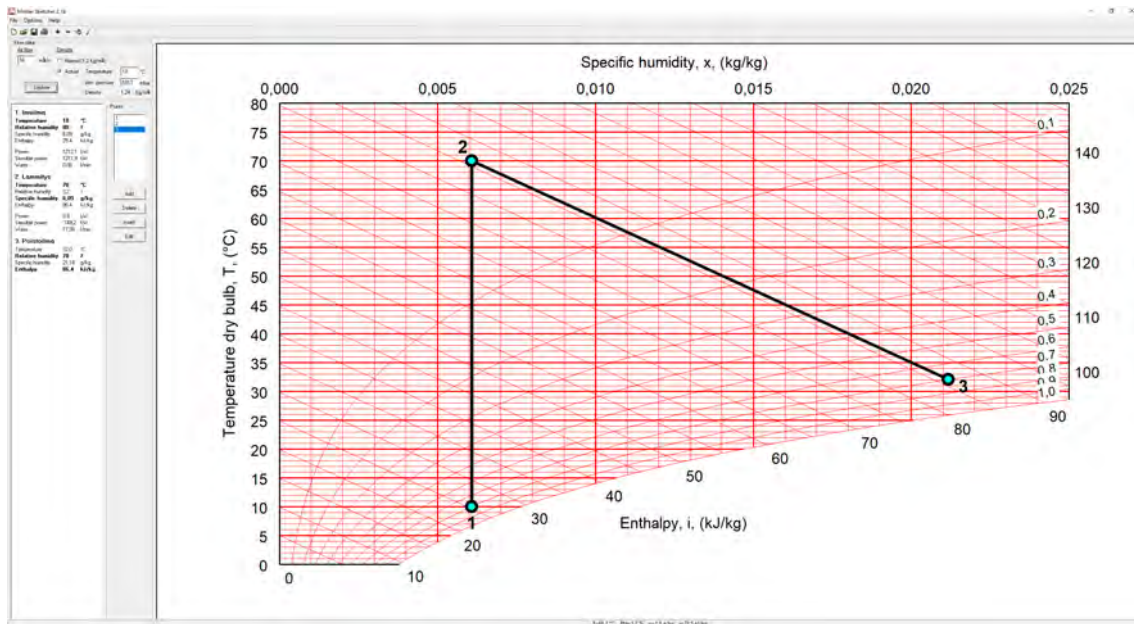
- **Kuiva lämpötila** on normaalisti mitattu ilman lämpötila
- **Märkä lämpötila** saadaan kun lämpömittari peitetään kostealla harsolla ja siihen kohdistetaan ilman virtaus. Veden haihtuminen viilentää mittarin ja tuloksena saadaan ilman märkälämpötila. Ennen elektronisia antureita tämä oli yleisin ilman kosteuden mittaustapa ja esimerkiksi Mollier diagrammissa on kuiva- ja märkälämpötilat ja niiden risteuskohdasta voidaan lukea ilman kosteus.
- **NTP** (Normal Temperatur and Pressure). Ilman lämpötila ja paine vaikuttavat ilman tiheyteen. Kun ilma lämpenee uunissa, se myös harvenee ja ilmamäärä m<sup>3</sup>/h kasvaa. Ilman massavirtaus kg/s pysyy samana. Jos puhaltimen ilmamäärät mitataan ennen tai jälkeen uunin, saadaan erilaiset arvot. Puhaltimien testauksissa arvot normioidaan normaalitilaan (NTP). Ilmanpaineena käytetään yleensä ilmakehän normaalipainetta, mutta lämpötila voi olla 0 C, 15 C tai 20 C.

Tarkastellaan kuivauksen kulkuva Mollier diagrammin avulla, kuva 1.1. Imuilman lämpötila on 10 C ja kosteus on 80%, piste 1. Vasemmassa yläkulmassa näkyy imuilman lasketut arvot, kosteussuhde 6,09 g vettä/kg kuivaa ilmaa ja entalpia 25,4 kJ/kg. Uunissa ilma lämpenee 70 C lämpötilaan. Kosteussuhde pysyy samana, ilmaan ei tule lisää vettä eikä siitä poistu vettä. Suhteellinen kosteus muuttuu 3,2 prosenttiin, koska ilma pystyy sitomaan kuumana paljon enemmän vettä itseensä. Entalpia on 86,4 kJ/kg lämpenemisen takia. Piste 3 kuvaa kuvitteellista poistoilman tilaa. Poistoilman lämpötila on 32 C ja entalpia on sama kuin uunin jälkeen (adiabaattinen prosessi). Todellisuudessa kuivurin rakenteissa on lämpöhäviöitä ja piste 3 olisi enemmän vasemmalla. Poistoilman suhteellinen kosteus on nyt 70 % ja ilmassa on 21,18 g vettä/kg kuivaa ilmaa. Viljasta on siirtynyt vettä kuivausilmaan ja veden sitominen on alentanut ilman lämpötilaa.

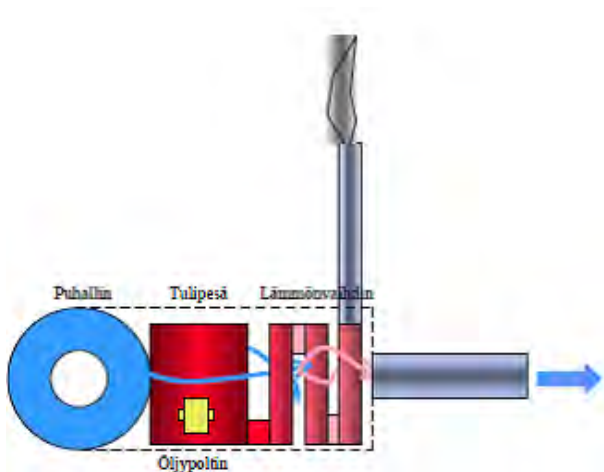
### 1.3 Kuivuriuunit

Kuivuriuunit poikkeavat keskuslämmityskattiloista, joissa vesi on välityksineena. Kuvureissa käytetään lähes yksinomaan suoraa ilmalämmitystä. Sillä saadaan aikaan yksinkertainen ja edullinen rakenne ja jäätymisvaaraa ei ole. Kuivuriuunissa on samanlaiset osat kuin keskuslämmityskattiloissa. Tulipesä on erikseen ja samoin lämmönvaihdin on erikseen, kuva 1.2. Kuivuri-puhaltimen ilma puhalletaan tulipesän ohi ja lämmönvaihtimen läpi kuivuriin. Lämpimät pinnat lämmittävät kuivausilman.

Kuivauslämpötila valitaan kuivattavan viljan ja käytön perusteella (siemen, rehu, mallas) ja sen halutaan pysyvän tasaisena. Kuivausilma otetaan ulkoa ja sen lämpötilan muutokset vaikuttavat kuivausilman lämpötilaan. Päiväaikaan imuilma voi olla jopa 15 - 20 C



Kuva 1.1: Kuivauksen kulku Mollier diagrammissa [Mollier Sketcher]



Kuva 1.2: Kuivuriuunin rakenne

ja yöaikaan voidaan liikkua nollan paikkeilla. Jotta kuivauslämpötila pysyisi tasaisena, uunin tehon on muututtava. Sitä voidaan säätää öljyuuneissa öljypolttimen suuttimien kokoa vaihtamalla tai öljynpainetta muuttamalla. Tämä säätö on tehtävä käsin ja automaattiseen toimintaan päästään, jos poltтин on kaksiteho tai moduloiva poltтин. Biokattiloita käytettäessä tehoa voidaan säätää polttoaineen syöttöä muuttamalla. Kuivuriuunin lämpötehon ja ilmamäärän välillä on yhtälön 1.6 mukainen yhteys. Sen mukaisesti uunin teho riippuu puhaltimen ilmamäärästä ja siitä kuinka paljon ilmaa lämmitetään kuivuriuunissa (kuivauslämpötila).

$$P = q_v r_i c_i \Delta T \quad (1.6)$$

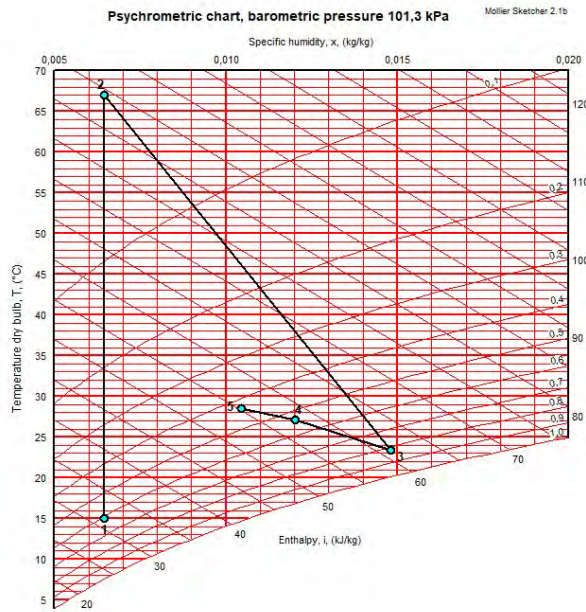
- P Uunin lämpöteho
- $q_v$  Uunin tilavuusvirtaus
- $r_i$  Ilman tiheys
- $c_i$  Ilman ominaislämpökapasiteetti 1,0 kJ/(kg K)
- $\Delta T$  Kuivausilman lämpötilan nousu uunissa

**Esimerkki.** Kuivuriuunin puhallusilmamäärä on 15 000 m<sup>3</sup>/h ja uuni nostaa imuilman 10 °C lämpötilasta lämpötilaan 65 °C. Kuinka suuri on uunin lämmitysteho?

Oletetaan ilman tiheydeksi 1,25 kg/m<sup>3</sup>, jolloin masvirraksi saadaan 15 000 m<sup>3</sup>/3600s · 1,25 kg/m<sup>3</sup> = 5,21 kg/s. Ilman lämpökapasiteetti on 1,0 kJ/(kg·K) ja uuni nostaa lämpötilaa 55 K (65 °C - 10 °C = 55 °C). Lämmitysteho  $P = 5,21 \text{ kg/s} \cdot 1,0 \text{ kJ/(kg·K)} \cdot 55 \text{ K} = 287 \text{ kW}$ . Jos imuilman lämpötila muuttuu, silloin vastaavasti uunin tehon on muututtava, jos kuivausilman lämpötila halutaan pitää samana. Ilmamäärän säätö kuristamalla vähentää ilmamäärää ja jos uunin teho pysyy samana, kuivausilman lämpötila kohoaa.

## 1.4 Veden poistumisnopeus

Jyvissä oleva kosteus siirtyy kuivausilmaan, joka siirtää veden kuivurista pois. Periaatteessa mitä suurempi ilmamäärä on, sitä nopeammin kosteus siirtyy kuivurista pois. Rajana on jyvien kulkeutuminen ilman mukana. Jyvät lähtevät liikkeelle kun ilman nopeus on luokkaa 7-10 m/s. Veden poistumisnopeus voidaan laskea ilman sisältämän vesimäärän mukaan. Jos esimerkiksi kuivausilman kosteussuhde on 0,008 kg vettä kuivaa ilmakiloa kohden ja kuivurista poistuvan ilman vastaava arvo on 0,023, jokaista ilmakiloa kohden vesimäärä on lisääntynyt 0,023 - 0,008 = 0,015 kg. Veden poistumis-



Kuva 1.3: Kuivauksen kulku

nopeus saadaan laskettua yhtälön 1.7 mukaan. Yhtälössä  $q_m$  on ilman massavirtaus ja  $\Delta x$  on ilman sitoma lisävesimäärä.

$$q_{H_2O} = q_m \cdot \Delta x \quad (1.7)$$

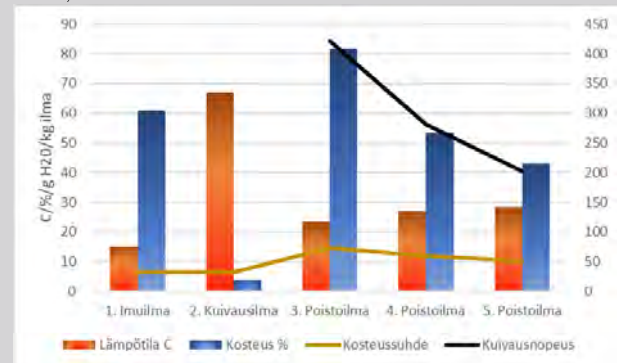
$q_{H_2O}$	Veden poistumisnopeus
$q_m$	Kuivausilman massavirtaus
$\Delta x$	Kuivausilman sitoma vesimäärä

*Jos esimerkiksi ilman massavirtaus olisi 4,44 kg/s (13 000 m<sup>3</sup>/h), veden poistumisnopeus on 4,44 · 0,015 = 0,067 kg/s = 240 kg/h.*

Kuivauksen alussa veden poistuminen on nopeaa, jyvistä lähtee pinnalla oleva helposti irtoava vesi ensin. Kuivauksen loppuvaiheessa poistumisnopeus pienenee, koska veden siirtyminen jyvän sisästä pintaan hidastaa veden poistumista jyvistä. Käytettäessä tavanomaista kuivauslämpötilaa (65 - 70 °C) kuivauksen alussa poistoilman kosteus on 90 - 100% ja poistolämpötila on 5 - 10 °C imuilmaa korkeampi. Kuivaus lopetetaan normaalisti kun poistoilman lämpötila on 35 - 40 °C. Poistoilman kosteus on tällöin 40% luokkaa.

Koska veden siirtyminen jyvistä muuttuu kuivauksen aikana, myös kuivausnopeus muuttuu kuivauksen aikana. Kuvassa 1.3 on esitetty kuivauksen kulku Mollier diagrammissa. Kuivauksen alkuvaiheessa poistoilma on pisteen 3 mukaisessa tilassa ja kuivauksen edistyessä poistoilma lämpenee ja kuivuu (pisteet 4 ja 5). Kuvan esimerkki on todellisesta kuivurista ja sen lämpöhäviöt näkyvät siinä ettei prosessi ole adiabaattinen vaan kuivurisiilon lämpimät pinnat aiheuttavat lämpöhäviöitä. Uunin jälkeen ilman entalpia on 84 kJ/kg ja pisteessä 3 poistoilmassa se on 61 kJ/kg.

**Esimerkki.** Mikä on kuvan 1.3 kuivauksessa veden poistumisnopeus kun uunin ilmamäärä on 14 kg/s? Imuilman lämpötila on 15 °C ja suhteellinen kosteus on 61%. Kun käytetään Mollier Sktecher ohjelmaa tilapisteiden arvot saadaan ohjelmasta. Imuilma sisältää vettä 6,45 g jokaista kuivan ilmakilon kg kohti. Kuivausilman lämpötila on 67 °C, jolloin suhteellinen kosteus on 3,8%. Vesimäärä on sama kuin imuilmassa, 6,45 g/kg ilma. Pisteen 3 kohdalla poistoilman lämpötila on 23,4 °C ja suhteellinen kosteus on 81,8 %. Kosteussuhde on 14,8 g/kg ilmaa. Ilma on sitonut viljasta vettä 14,8 - 6,45 = 8,35 g/kg ilma. Kuivausilman massavirta oli 14 kg/s, jolloin veden poistumisnopeus on 8,35 · 14 = 116,9 g/s = 421 kg/h. Kun muutkin tilapistet laskeaan, saadaan alla oleva kuva.



## 1.5 Kuivurin mitoitus

Kuivurin koolle ja kapasiteetille on hyvin vaikeata antaa selvää valintaohjetta. Valintaan vaikuttaa viljelyala, kasvilajit ja -lajikkeet, varastointi ja mitoitetaan ko kuivurin keskimääräisten vai huonojen olosuhteiden mukaisesti. Mitoitukseen vaikuttaa hyvin voimakkaasti viljan kosteus. Märkkää viljaa ei välttämättä kuivata kahta erää vuorokaudessa.

Kuumailmakuivurin kapasiteetin voidaan sanoa riippuvan seuraavista seikoista:

- Kuivurin tilavuus
- Elevaattorin siirtoteho
- Kuivuriuunin teho
- Viljan alkukosteus
- Puskurivaraston koko
- Erillisen jäähdytysilön käyttö
- Vuotuinen satotaso

Yleensä kuivurin kokona käytetään sen tilavuutta. Tämä ei kylläkään kerro kuivurin kuivaustehoa yksinään, vaan oheislaitteitteet (uuni, elevaattori) vaikuttavat erään kuivausnopeuteen. Elevaattorin siirtoteho vaikuttaa kuivurin täyttö ja tyhjennysaikoihin. Jos elevaattorin teho on pieni, viljan siirtoajat voivat tulla pitkiksi, jolloin varsinainen kuivurin käyttöaste jää pieneksi. Erillisen

jäähdytyskilon käyttö liittyy myös kuivurin käyttöasteen parantamiseen. Ennenkuin vilja voidaan varastoida, se on jäähdytettävä. Tämä jäähdytysvaihe kestää aikansa. Jos vilja voitaisiin siirtää erilliseen jäähdytyskiloon, kuivurin käyttöastetta voitaisiin nostaa. Viljan alkukosteus ja satotaso vaikuttavat poistettavaan vesimäärään. Mitä kosteampaa vilja on, sitä enemmän vettä on poistettava ja sitä kauemmin kuivauserän kuivaus kestää.

### 1.5.1 Kuivurisiilojen koko

Otetaan kuivurin valintakriteeriksi se, että pystytään kuivaamaan päivän aikana korjattu sato seuraavan vuorokauden aikana ja vielä niin, että kuivaus tapahtuu kahdessa erässä. Tällöin normaalisti yö voidaan nukkua rauhassa. Jos leikkuupuimuri pui keskimäärin 1 ha/h tunnissa, päivässä puidaan 10 ha sato eli märkäsadon ollessa 4 t/ha saadaan päivässä 40 t viljaa. Jos kuivauseriä on kaksi, yhteen erään pitää mahtua 20 t viljaa ja esimerkiksi 60 kg hehtolitrarapainon mukaan tämä tarkoittaa 33 m<sup>3</sup> kuivurisiiloa. Laitetaanpa tämä järkeily yhtälöiden muotoon. Puimurin kapasiteetti voidaan laskea yhtälöstä 1.8.

$$q_A = \frac{v \cdot b}{10} \cdot \eta \quad (1.8)$$

$q_A$	Puimurin pintiteho ha/h
$v$	puintinopeus km/h
$b$	puimurin työleveys m
$\eta$	puinnin tehokkuus (hyötysuhde), normaalisti 0,65 - 0,8

Päivässä saatava viljamäärä on siten yhtälön 1.9 mukainen.

$$M_{vrk} = q_A \cdot t_{vrk} \cdot s \quad (1.9)$$

$M_{vrk}$	päivässä puitu viljamäärä
$t_{vrk}$	päivittäinen puintiaika h/vrk
$s$	satotaso kg/ha (märkää viljaa)

Kuivurin koko saadaan sitten sen perusteella kuinka monessa erässä puitu sato halutaan kuivata, yhtälö 1.10.

$$V_k = \frac{M_{vrk}}{n \cdot r} \quad (1.10)$$

$V_k$	kuivurin kennoston tilavuus m <sup>3</sup>
$r$	viljan tilavuuspaino kg/m <sup>3</sup>
$n$	vuorokaudessa kuivattavien viljaerien määrä, 1 - 3 kpl

**Esimerkki.** Tilalla on 100 ha viljalla ja puimurin työleveys on 3,5 m. Kuinka suuri kuivuri tilalle kannattaa hankkia?

Mitoitetaan kuivuri sen mukaan kuinka paljon puimuri pystyy puimaan päivässä. Jos puimurin ajonopeus on 5 km/h, työsaavutus on kun käytetään puinnin tehokkuutena 0,7.  $q_A = 5 \cdot 3,5 \cdot 0,7/10 = 1,2$  ha/h. Jos satotaso on 4000 kg/ha, tilavuuspaino on 600 kg/m<sup>3</sup> ja puintiaika on 8 h, saadaan päivän puintimääräksi  $M_{vrk} = 1,2 \cdot 8 \cdot 4000 = 38400$  kg. Kuivurin tilavuus on tällöin, jos kuivataan kaksi erää vuorokaudessa,  $V = 38400/2/600 = 32$  m<sup>3</sup>. Kun kyseessä on 100 ha tila, kaikkiaan saadaan 4000 kg/ha sadon mukaisesti 400 000 kg kokonaissato. Tämä puiminen kestää 100 ha/1,2 ha/h = 83 h eli reilut 10 vrk. Kriteereistä riippuen syksyisin on Etelä-Suomessa keskimäärin 15 puintikelpoista vuorokautta eli puimurin kapasiteetti on riittävä, jos vain kuljetukset pellolta kuivurille toimivat hyvin. Kaikkiaan kuivauseriä on 400 000 kg/600 kg/m<sup>3</sup>/32m<sup>3</sup> = 21 kpl.

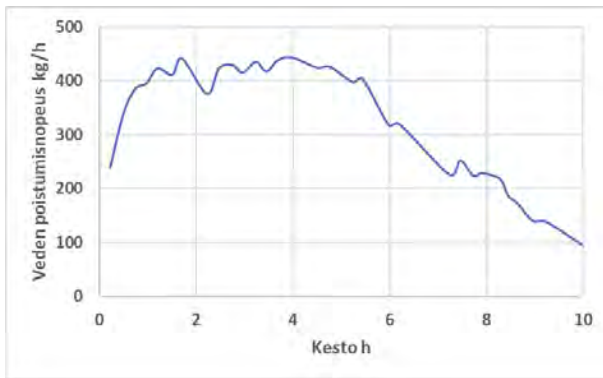
Lämminilmakuivurin vastaanottokapasiteetti ei etenkään hyvien säiden aikana ole riittävä. Kapasiteettia voidaan parantaa puskurivarastolla, joka on joko kylmäilmakuivuri tai tuuletettu siilo. Nämä takaavat viljan säilymisen puskurissa ja tämä puskuri voidaan jälleen purkaa kuumailmakuivurilla. Lisäksi määrän viljan alkukuivaus puskurissa nostaa varsinaisen kuivurin kapasiteettia, koska vilja kuivuu siinä jo jonkin verran. Puskurivarastojen avulla voidaan myös pienentää kuivurin kokoa edellä olevan laskuesimerkin antamasta tuloksesta, sillä on todennäköistä, että puinti jossain vaiheessa keskeytyy. Kun puskurivarastoja puretaan taukojen aikana, paranee myös varsinaisen kuivurin käyttöaste. Sadonkorjuukauden loppuksi puskurivarastoja voidaan käyttää viljan varastointiin normaaliin siilojen tavoin.

### 1.5.2 Kuivuriuunin koko

Määritetään ensin uunin tilavuuvirtauksen tarve. Kuivurin kennoston tilavuus on  $V_k$ . Kennostoon mahtuvan viljan massa on tällöin  $M_k = r \cdot V_k$ , jossa  $r$  on määrän viljan tilavuuspaino. Määrän viljan tilavuuspaino on 5 - 10 % alhaisempi kuin kuivan viljan tilavuuspaino (hehtolitrarapaino). Kuivussa viljaerä kutistuu tämän takia. Seuraavaksi voidaan laskea yhtälöllä 1.5 poistettava vesimäärä. Tämä vesimäärä pitäisi saada poistettua halutussa ajassa. Näistä saadaan kuivurin ilmavirtaukselle yhtälö 1.11.

$$q_m = \frac{q_{H_2O}}{\Delta x} = \frac{r_k \cdot V_k}{t \cdot \Delta x} \frac{w_k - w_v}{1 - w_v} \quad (1.11)$$

$V_k$	kuivurin kennoston tilavuus m <sup>3</sup>
$r_k$	viljan tilavuuspaino puitaessa kg/m <sup>3</sup>
$t$	erän haluttu kuivausaika h
$\Delta x$	kuivausilman sitoma vesimäärä



Kuva 1.4: Esimerkki veden poistumisnopeudesta kuivauksen aikana

Yhtälö 1.11 antaa keskimääräisen puhallusilman tarpeen. Viljan kuivausnopeus ei kuitenkaan ole vakio, vaan se vaihtelee kuivauksen aikana, kuva 1.4. Alussa osa uunin lämmöstä kuluu viljan ja kuivurin rakenteiden lämmittämiseen. Sen jälkeen tullaan vaiheeseen, jossa veden poistumisnopeus pysyy tasaisena. Jyvän kuivussa kosteuden pitää siirtyä sisältä pintaan. Tämä hidastaa kuivumista loppuvaiheessa. Kuvan esimerkissä tasaisen vaiheen nopeus on 35% suurempi kuin keskimääräinen nopeus. Yhtälön 1.11 antama keskimääräinen nopeus on kuivauksen kannalta hieman liian alhainen ja käytännössä pitää käyttää suurempia arvoja. Vilja määrittää lopulta kuinka se luovuttaa kosteutta ja oikein valitun ilmamäärän voi todeta mittaamalla poistoilman kosteuden. Kun veden poistuminen on nopeimmillaan poistoilman kosteuden pitäisi olla 90 - 95 %. Alhaisempi lukema tarkoittaa turhan suurta ilmamäärää ja korkea lukema liian pientä ilmamäärää. Kuivauksen energiatehokkuutta voitaisiinkin parantaa säätämällä virtausta kuivauksen aikana. Jokiniemi [Jokiniemi 2016] sai kokeissa ilmanvirran säädöllä 5 - 14 % energiasäästön.

**Esimerkki.** Kuivurin kennoston tilavuus on  $32 \text{ m}^3$ . Yhden erän kuivausajaksi halutaan 5 h, kun puidaan viljaa, jonka kosteus on 22% ja tilavuuspaino puitaessa on  $650 \text{ kg/m}^3$ . Ilman oletetaan pystyvän sitomaan 16 g vettä/kg ilmaa ja kuivauksen loppukosteus on 14%. Ilman tiheys on  $1,25 \text{ kg/m}^3$ . Kuinka suuri pitää uunin antaman tilavuusvirtauksen olla?

Kuivattava viljaerä on  $32 \cdot 650 = 20800 \text{ kg}$ . Poistettava vesimäärä on  $20800 \frac{22 - 14}{100 - 100} = 1935 \text{ kg}$ . Tämä pitää kuivata 5 h aikana, jolloin vettä pitäisi poistua  $\frac{1935}{5} = 387 \text{ kg/h}$ . Yksi ilmakilo pystyy sitomaan 16 g vettä, jolloin tarvitaan koko vesimäärän poistoon  $120\,938 \text{ kg}$  ilmaa ja  $\frac{120938}{5} \approx 24200 \text{ kg/h}$ . Suoraan yhtälöön sijoitettuna saadaan  $q_m = \frac{650 \cdot 32}{5 \cdot 0,016} \frac{22 - 14}{100 - 100} \approx 24200 \text{ kg/h} \Rightarrow 19400 \text{ m}^3/\text{h}$ . Käytännössä kannattaneekin hankkia 20 - 30 % suurempi virtausmäärä, joka ottaa huomioon suurimman ja keskimääräisen veden poistonopeuden eron.

Uunin antama teho voidaan nyt laskea yhtälöstä 1.6.

**Esimerkki.** Jatketaan edellistä esimerkkiä. Uunin tehon halutaan olevan sellainen, että vaikka ulkoilma on nollassa niin halutaan  $70 \text{ C}$  kuivauslämpötila. Lämpötilan nousu on tällöin  $70 \text{ C}$ .

$$P = \frac{24200 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} \cdot 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} 70 \text{ K} = 470 \text{ kW}$$

11.6.2021



# Kirjallisuutta

- [Hautala M., Jokiniemi T., Ahokas J. 2013] Hautala M. Jokiniemi T, Ahokas J. Maatilakuivurit. Maataloustieteiden laitoksen julkaisuja 28. Helsingin Yliopisto Maatalousmetsätieteellinen tiedekunta 2013.
- [Jokiniemi 2016] Jokiniemi T. Energy efficiency in grain preservation. University of Helsinki Department of Agricultural Sciences, 2016. <https://researchportal.helsinki.fi/fi/publications/energy-efficiency-in-grain-preservation>
- [Mollier Sketcher] <https://www.ivprodukt.com/software/mollier-sketcher>