

# Maatilakuivurit

Jukka Ahokas, Mikko Hautala

28. helmikuuta 2012



This material has been produced in ENPOS and Rural Energy Academy projects. ENPOS is acronym for *Energy Positive Farm*.

The ENPOS project partners are

- University of Helsinki, department of Agricultural Sciences – Agrotechnology
- MTT Agrifood Research Finland - Agricultural Engineering
- Estonian University of Life Sciences

Project home page is at <http://enpos.weebly.com/>

The project is financed by the EU Central Baltic IV A Programme 2007-2013

The Rural Energy Academy (Maaseudun Energia-Akatemia) project partners are:

- University of Helsinki, department of Agricultural Sciences – Agrotechnology
- Seinäjoki University of Applied Sciences, School of Agriculture and Forestry
- JAMK University of Applied Sciences, School of Technology
- The project is financed by the European Agricultural Fund for Rural Development

This publication reflects the authors views and the Managing Authority cannot be held liable for the information published by the project partners.



CENTRAL BALTIC  
INTERREG IV A  
PROGRAMME  
2007-2013



EUROPEAN UNION  
EUROPEAN REGIONAL DEVELOPMENT FUND  
**INVESTING IN YOUR FUTURE**



The European Agricultural Fund  
for Rural Development:  
Europe investing in rural areas

# Esipuhe

Tämä kirjanen on tarkoitettu maatiloilla kuivattavien materiaalien perusteokseksi. Sen takia etenkin kirjan alkuosassa on kuivaukseen ja kuivureihin liittyviä perusteita. Jos haluat tutustua tähän, silloin sinun kannattaa lukea luvut 1 - 4. Jos taas haluat perehtyä kuivureiden käytännön tekniikkaan ja käyttöön, silloin voit aloittaa luvusta 5. Kirjasessa on käytännön tekniikan luvuissa osittain toistettu alkuosien lukujen perusasioita. Siten sinun ei tarvitse välttämättä tutustua perusteisiin. Käytännön osassa on myös viittaukset vastaaviin perusteiden kappaleisiin. Niiden avulla voit saada selville mihin ilmiöihin asia perustuu.

Kirjanen soveltuu hyvin opetuksen ja tutkimuksen käyttöön. Siinä on myös tarvittavat kirjallisuusviitteet, jos lukija haluaa syventää tai saada lisätietoa joistakin asioista. Käytännön viljelijöille kirjanen antaa kuivauksesta hyvää tietoa. Lähtökohtana on kuitenkin ollut enemmänkin kuivauksen opetuksen ja tutkimuksen kehittäminen, jolloin kirjanen voi sisältää tähän käyttöön liiaksi perusasioita.

Tämä kirjanen on tehty palvelemaan sekä ENPOS (Energy Positive Farm) ja Maaseudun Energia-Akatemia tutkimushankkeita. Kummassakin hankkeessa yhtenä kohtana on kuivauksen energian säästö. Tämän takia tekstissä pohditaan myös energiansäästömahdollisuuksia. Viljan kuivauksessa voidaan märkinä syksyinä kuluttaa lähes yhtä paljon energiaa kuin koko viljan tuotannon muissa vaiheissa yhteensä. Kuivauksen energian kulutus asettaa myös suomalaisen viljelyn epäedullisempaan asemaan esimerkiksi keskieuropalaiseen viljelijään verrattuna. Siellä kuivaamistarve on huomattavasti vähäisempi ja siten energiankulutus pienempi.

Kirjaseen liittyviä kysymyksiä ja ehdotuksia voi lähettää sähköpostilla osoitteeseen: [jukka.ahokas@helsinki.fi](mailto:jukka.ahokas@helsinki.fi) tai [mikko.hautala@helsinki.fi](mailto:mikko.hautala@helsinki.fi).



# Sisältö

<b>1</b>	<b>Perusteita</b>	<b>6</b>
1.1	Paine . . . . .	6
1.2	Lämpötila . . . . .	6
1.3	Työ . . . . .	6
1.4	Energia . . . . .	6
1.5	Teho . . . . .	8
1.6	Konsentraatio, pitoisuus . . . . .	9
1.7	Ideaalikaasun tilanyhtälö . . . . .	9
1.7.1	Ideaalikaasuseokset . . . . .	10
1.8	Johdatusta termodynamiikkaan . . . . .	11
1.8.1	Lämpöenergia . . . . .	11
1.8.2	Terminologiaa . . . . .	11
1.8.3	Termodynamiikan nollas ja ensimmäinen pääsääntö . . . . .	12
1.8.4	Entalpia . . . . .	12
1.9	Lämpöoppi . . . . .	12
1.9.1	Lämpökapasiteetti . . . . .	13
1.9.2	Latenttilämpö . . . . .	14
1.10	Lämmönsiirtymismekanismit . . . . .	14
1.10.1	Lämmön konvektio . . . . .	14
1.10.2	Lämmön johtuminen . . . . .	14
1.11	Hydrodynamiikka . . . . .	16
1.11.1	Jatkuvuusyhtälö, virta, virrantiheys . . . . .	16
1.11.2	Bernoullin yhtälö . . . . .	16
1.11.3	Kitkalliset laminaarivirtaukset . . . . .	18
1.11.4	Turbulentti virtaus (putkessa) . . . . .	20
1.12	Aine- ja energiatase . . . . .	21
1.12.1	Tasapaino yleisesti . . . . .	21
1.12.2	Energiatase . . . . .	22
<b>2</b>	<b>Ilma kuivausaineena</b>	<b>24</b>
2.1	Kaasulaki . . . . .	24
2.2	Ilman tiheys . . . . .	25
2.3	Ilman kosteus . . . . .	25
2.4	Kosteuden mittaaminen ja laskenta . . . . .	26
2.5	Ilman entalpia . . . . .	27
2.6	Mollierin diagrammi . . . . .	27
2.7	Kastepistelämpötila . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Miten ja miksi materiaali säilötään</b>	<b>31</b>
3.1	Biomateriaalin säilyvyys . . . . .	31
3.2	Biomateriaalin tiheys ja huokoisuus . . . . .	33
3.3	Materiaalin kosteus . . . . .	34
3.4	Materiaalien kosteuden ilmoittamistavat . . . . .	34
3.5	Veden aktiivisuus ja tasapainokosteudet . . . . .	35
3.5.1	Veden aktiivisuus . . . . .	35
3.5.2	Tasapainokosteus . . . . .	36

3.5.3	Tasapainokosteuden yhtälöitä . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Jyvän lämpeneminen ja kuivuminen</b>	<b>41</b>
4.1	Jyvän rakenne . . . . .	41
4.2	Ajasta riippuva lämmön siirtyminen . . . . .	41
4.2.1	Lämpöhaude . . . . .	43
4.2.2	Aikaskaala: rajapinta vai lämmönsiirtyminen aineessa . . . . .	44
4.3	Jyvän kuivuminen: vesihöyryn diffuusio . . . . .	45
4.3.1	Kuivuminen . . . . .	45
4.3.2	Diffuusio . . . . .	46
4.4	Veden sitoutuminen jyvään . . . . .	47
4.5	Vesi rajapinnalla . . . . .	48
4.5.1	Vesi pinnoilla . . . . .	49
4.5.2	Vesi kapillaareissa . . . . .	50
4.6	Jyvän kuivumisen aikaskaala: Koetuloksia ja laskuja . . . . .	50
4.7	Lämpötilan vaikutus jyvän ominaisuuksiin . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Kuivumistapahtuma</b>	<b>55</b>
5.1	Ilman tilanmuutokset kuivauksessa . . . . .	55
5.2	Kuivuriuuni . . . . .	57
5.2.1	Kuivuriuunin teho . . . . .	57
5.2.2	Kuivuriuunin ilmamäärä . . . . .	59
5.3	Kuivauksen edistyminen . . . . .	59
5.4	Kuivauksen laskentayhtälöt . . . . .	60
5.4.1	Tasapainokosteus . . . . .	60
5.4.2	Viljan kuivumisnopeus . . . . .	60
5.4.3	Veden poistumisnopeus . . . . .	61
5.4.4	Kuivauksen energiatehokkuus . . . . .	61
5.4.5	Lämpötilan vaikutus kuivaukseen . . . . .	62
5.4.6	Ilmamäärän vaikutus kuivumiseen . . . . .	63
5.4.7	Viljan kiertonopeuden vaikutus kuivumiseen . . . . .	63
5.5	Viljan jäähdyttäminen . . . . .	64
5.6	Viljan kuivauksen simulointi . . . . .	66
<b>6</b>	<b>Kuivurirakenteet</b>	<b>71</b>
6.1	Lavakuivurit . . . . .	71
6.2	Siilokuivurit . . . . .	71
6.3	Kennokuivuri . . . . .	73
6.4	Erä- /jatkuvatoiminen kuivuri . . . . .	73
6.5	Ilman virtaussuunta . . . . .	74
6.6	Kuivuriuunit . . . . .	76
6.7	Kuivurin mitoitus . . . . .	76
6.7.1	Kuivurisiilojen koko . . . . .	77
6.7.2	Kuivuriuunin koko . . . . .	78
6.8	Kuivurin käyttö . . . . .	79
6.8.1	Kuumailmakuivurin käyttö . . . . .	79
6.8.2	Kuumailmakuivurin ohjaus . . . . .	79
6.8.3	Kylmäilmakuivurit . . . . .	79
6.8.4	Kylmäilmakuivurin puhaltimen valinta . . . . .	79
6.8.5	Kuivurin kerrospaksuus . . . . .	80
<b>7</b>	<b>Puhaltimet ja virtaus</b>	<b>82</b>
7.1	Jatkuvuusyhtälö . . . . .	82
7.2	Turbulenti ja laminaarinen virtaus . . . . .	83

7.3	Bernoullin yhtälö . . . . .	83
7.4	Virtausvastukset . . . . .	83
7.4.1	Kitkavastus . . . . .	83
7.4.2	Kertavastukset . . . . .	85
7.4.3	Biomateriaalin aiheuttama vastus . . . . .	86
7.5	Biomateriaali ilmavirtauksessa . . . . .	86
7.6	Puhaltimet . . . . .	87
7.6.1	Puhallintyyppit . . . . .	87
7.6.2	Puhaltimen suoritusarvot . . . . .	88
7.6.3	Tilavuusvirran mittaaminen . . . . .	90
7.6.4	Tilavuusvirran normiointi . . . . .	91
7.7	Energiansäästö . . . . .	92
<b>8</b>	<b>Kuivauksen energiansäästö</b>	<b>94</b>
8.1	Kuivurin lämpöhäviöt . . . . .	94
8.1.1	Lämmön johtuminen monikerrosrakenteessa . . . . .	94
8.1.2	Lämmön johtuminen putken läpi . . . . .	95
8.1.3	Kuivurin eristämisen vaikutus . . . . .	97
8.2	Lämmönsiirrin: rajapinnat . . . . .	97
8.3	Lämpösäteily . . . . .	98
8.4	Lämmönvaihtimet: Lämmön siirtyminen rajapinnalla . . . . .	99
8.4.1	Nusseltin luku = Nu: rajakerros eri tilanteissa . . . . .	100
8.5	Lämmönsiirto putkeen . . . . .	101
8.6	Lämmönvaihtimet . . . . .	101
8.7	Ilmalämpöpumppu . . . . .	103
8.8	Kuivausprosessin parantaminen . . . . .	104
8.8.1	Kuivauslämpötila . . . . .	104
8.8.2	Ilmamäärä . . . . .	105
8.8.3	Kiertonopeus . . . . .	106
8.8.4	Ulkoilman lämpötilan ja kosteuden vaikutus . . . . .	106
8.8.5	Prosessin säätäminen kuivauksen edistymisen mukaisesti . . . . .	106
8.9	Kotimainen polttoaine . . . . .	107

# 1 Perusteita

Tässä kappaleessa kerrataan oleelliset käsitteet. Perusteellisimmat asiat on käyty kirjoissa M. Hautala, Fysiikkaa pelosta pöytään ja M. Hautala ja Hannu Peltonen, Insinöörin (AMK) fysiikka, osa 1.

## 1.1 Paine

Pintaan vaikuttava paine  $p$  ( $\text{N/m}^2$  tai  $\text{Pa}=\text{pascal}$ ) on pintaan kohdistuva kohtisuora voima  $F$  (voiman kohtisuora komponentti) jaettuna pinta-alalla  $A$ , johon voima kohdistuu

$$p = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

Kaasun paine syntyy siitä, kun kaasumolekyylit törmäilevät seinään ja kohdistavat siten seinään voiman.

## 1.2 Lämpötila

$T(\text{K}) = 273,15 + T(^{\circ}\text{C})$ , missä  $T(\text{K})$  on absoluuttinen lämpötila  $\text{K}=\text{kelvineissä}$  ja  $T(^{\circ}\text{C})$  lämpötila celsiusasteissa. Fysiikassa on syytä aina käyttää kelvineitä. Jos tarkastellaan lämpötilaeroja, silloin tulos on sama kelvineissä ja celsiusasteissa,  $\Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C})$ . Miksi?

## 1.3 Työ

Jonkin voiman kappaleeseen tekemä työ  $W$  on voiman komponentti kappaleen kulkusuunnassa  $F_s$  kerrottuna kappaleen kulkemalla matkalla  $s$ .

$$W = F_s \cdot s \quad (1.2)$$

Yksikkö on silloin  $\text{N m}$ , jolle on annettu nimi joule =  $\text{J}$ .

## 1.4 Energia

Energia (usein  $E$ ) on kyky tehdä työtä. Mikä tahansa aine, laite tai henkilö, jolla sanotaan olevan energiaa, voi tehdä mekaanista työtä eli synnyttää liikkuvia voimia. Energian yksikkö on joule =  $\text{J} = \text{N m}$ . Kaikissa prosesseissa pätevät energian ja aineen säilymlait. Niihin perustuvat prosessien matemaattiset yhtälöt, joiden avulla prosessin hallinta, säätö ja automatisointi tapahtuvat. Maataloudessa käytetään polttoaineita kiinteinä, nestemäisinä tai kaasumaisina energian lähteinä tai sähköenergiaa. Polttoaineiden sisältämä energia vapautetaan polttamalla ja se hyödynnetään joko lämpönä tai mekaanisena työnä.

Energiasta käytetyt yksiköt vaihtelevat sen mukaan miten energiaa myydään. Sähköenergian määrä on helppo mitata  $\text{kWh}$  yksikkönä, joten sitä käytetään sähköenergian yksikkönä. Polttoaineet mitataan tilavuus- tai painomittoina ja ne ovat käytössä niiden kaupassa. Kuljetusvälineiden polttoaineet ostetaan aina litroina ja kulutukset ilmoitetaan litroina yhteisesti sovittua yksikköä kohti ( $1/100 \text{ km}$ ,  $1/\text{h}$ ,  $1/(\text{tn}\cdot\text{km})\dots$ ). Joitakin aikoja sitten energian yksikkönä koko maata käsittelevissä tilastoissa käytettiin öljytonneja (toe, mtoe). Perusyksikköä joulea ei ole energian kaupassa käytössä. Taulukossa 1.1 on esitetty eri energiayksiköiden muuntosuhteita.

SI-järjestelmässä käytetään varsinaisen yksikön lisänä yhteisesti sovittuja kirjainsymboleja esittämään tuhansien kertalukuja, nämä on esitetty taulukossa 1.2.

## 1 Perusteita

	MJ	kWh	toe	kcal
MJ	1	0,27778	0,00002388	238,89
kWh	3,6	1	0,00008598	860
toe	41990	11630	1	10000000
kcal	0,004199	0,001163	0,0000001	1

Taulukko 1.1: Energiayksiköiden muuntokertoimia

Nimi	Lyhenne	Suuruus
kilo	k	$10^3$
Mega	M	$10^6$
Giga	G	$10^9$
Tera	T	$10^{12}$
Peta	P	$10^{15}$
Exa	E	$10^{18}$

Taulukko 1.2: SI-järjestelmän tuhansien kertaluvut ja niiden symbolit

Materiaalien energiasisältö ilmoitetaan niiden lämpöarvojen avulla. Lämpöarvo tarkoittaa energiamäärää, joka materiaalista vapautuu lämpönä kun se poltetaan. Taulukossa 1.3 on esitetty muutaman materiaalin tyypillisiä lämpöarvoja silloin, kun tuote on täysin kuivaa. Energian muuntaminen lämmöksi tai työksi ei ole täysin häviötöntä, palamisessa päästään parhaimmillaan yli 90 % hyötysuhteeseen. Lihastyön hyötysuhde on korkeimmillaan yli 20 % eli syödyn leivän energiasta vain osa voidaan muuttaa fyysiseksi työksi. Polttomoottorit pystyvät muuntamaan polttoaineen energiasta parhaimmillaan 45% mekaaniseksi työksi.

Materiaaleissa on aina kosteutta mukana ja se otetaan huomioon vähentämällä veden osuus painosta sekä myös vähentämällä veden höyrystymiseen tarvittava energiamäärä, yhtälö 1.3.

$$H_a = H_{ak}(1 - w) - 2,443 \cdot w \quad (1.3)$$

- $H_a$  = materiaalin tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa
- $H_{ak}$  = materiaalin kuiva-aineen lämpöarvo
- $w$  = materiaalin vesipitoisuus

Materiaalin vesipitoisuus voidaan ilmoittaa kahdella eri tavalla, joko aineen kuiva-aineen suhteen tai kokonaismäärän (vesi ja kuivamateriaali) suhteen. Yhtälössä 1.3 on käytetty jälkimmäistä tapaa ja se on meillä yleisesti käytetty ilmoitustapa. Vesipitoisuus määritetään kuivaamalla näyte-erä ja vähentämällä alkuperäistä painosta kuivattu paino saadaan näytteestä poistunut vesimäärä. Jos tätä verrataan alkuperäiseen painoon, saadaan ns märkäkosteus ( $w_b = \text{wet basis}$ ). Jos vertailuna on kuivattu paino, saadaan kuivakosteus tai kosteussuhde ( $w_d = \text{dry basis}$ ). Tuotteen sisältämä energiamäärä saadaan kertomalla tuotemäärä sen lämpösisällöllä, yhtälö 1.4.

$$E_{tuote} = m \cdot H_a \quad (1.4)$$

- $H_a$  = materiaalin tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa
- $m$  = tuotteen massa

Materiaali	Lämpöarvo MJ/kg
Vilja	20
Olki	19
Rypsin siemen	37
Puu	19

Taulukko 1.3: Materiaalien tehollisia lämpöarvoja



## 1.5 Teho

Teho  $P$  (J/s tai W) on tehty työ jaettuna työn tekoon kuluneella ajalla,  $P=W/t$ . Yksikkönä on siten J/s, jolle on annettu nimi watti = W. Kääntäen energian yksikkönä käytetään usein Ws:a tai kWh. Akselin välittämä teho saadaan seuraavasti

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F_s \cdot s}{t} = \frac{F \cdot r \cdot \varphi}{t} = M\omega \quad (1.5)$$

jossa  $M$  on akselia vääntävä momentti,  $\omega$  akselin kulmanopeus ja  $\varphi$  on akselin kääntymiskulma.

**Esimerkki.** Sähkö maksaa noin 10 senttiä kWh = 3600000 Ws = 3,6 MJ. Se on työ, joka tulee tehdyksi tunnissa yhden kW:n teholla.

Pumppu ottaa fluidia (nestettä tai kaasua), jonka paine on  $p_i$  ja luovuttaa fluidin ulos paineessa  $p_o = p_i + \Delta p$ . Jos fluidin tilavuusvirta on  $q_v = \Delta V / \Delta t$ , jossa  $\Delta V$  on ajassa  $\Delta t$  pumpun läpi mennyt fluidimäärä, saadaan pumpun tehoksi

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \Delta p \frac{\Delta V}{\Delta t} = \Delta p \cdot q_v \quad (1.6)$$

**Esimerkki.** Viikin koetilan kuivuriin puhalletaan 11000 m<sup>3</sup>/h ilmaa. Viljassa ja putkissa tapahtuva painehäviö on 500 Pa. Puhalluksen teho on siten  $P = \frac{11000 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 500 \text{ Pa} = 1,5 \text{ kW}$ . Puhaltimien hyötysuhteet ovat 50% luokkaa, jolloin tarvittava sähkömoottorin teho on 3 kW.

Sähkötekniikassa teho saadaan kertomalla virta jännitteellä kun kyseessä on tasajännite, yhtälö 1.7. Vaihtojännitteen tehossa pitää ottaa huomioon sähkölaitteen mahdollisesti aiheuttama virran ja jännitteen vaihe-ero. Tämä  $\cos\phi$  arvo on usein ilmoitettu laitteen konekilvessä. Yksivaiheisen sähkölaitteen teho saadaan yhtälön 1.8 avulla. Kolmivaiheisen sähkölaitteen teho saadaan laskemalla kunkin vaiheen tehot yhteen. Usein kuormitus on symmetrinen eli kunkin vaiheen virta on yhtä suuri, silloin teho voidaan laskea yhtälön 1.9 avulla.

$$P = UI \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned} U &= \text{jännite} \\ I &= \text{virta} \end{aligned}$$

$$P = UI \cos\phi \quad (1.8)$$

$$\phi = \text{jännitteen ja virran välinen vaihe-ero}$$

$$P = \sqrt{3} U_p I_p \cos\phi \quad (1.9)$$

$$\begin{aligned} U_p &= \text{pääjännite (nimellisarvo 400 V)} \\ I_p &= \text{päävirta} \end{aligned}$$

Edellä olevat sähkötekniikan teho-yhtälöt määrittävät verkosta otetun sähkötehon. Sähkölaitteella voi olla myös muitakin häviöitä ja saatu hyötYTEHO on edellä esitettyjä alhaisempi.

**Esimerkki.** Pumpun sähkömoottorin tyyppikilvessä on ilmoitettu nimellistehoksi 11 kW ja  $\cos\phi$  arvoksi on annettu 0,85. Kuinka suuren tehon moottori ottaa sähköverkosta?

Esimerkkiä ei voida laskea, koska ei tiedetä moottorin kuormitusta. Se täytyy mitata esimerkiksi mittaamalla moottorin verkosta ottama virta. Mittauksissa on saatu, että moottori ottaa 6 A virran. Nyt voidaan laskea sen ottama pätöteho,  $P = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 6 \text{ A} \cdot 0,85 = 3,5 \text{ kW}$ .

## 1.6 Konsentraatio, pitoisuus

Ainemäärän yksikkö on mooli. Ainetta on yksi mooli, jos siinä on alkeisyksikköjä (atomeita, molekyyliä) yhtä paljon kuin on atomeita 12 g:ssa hiili-12:ta = Avogadron luku =  $6 \cdot 10^{23}$  kpl =  $N_A$ . Aineen moolimassa kertoo, paljonko painaa yksi mooli kyseistä ainetta. Mooliosuus on seoksen jonkin komponentin ainemäärä (mol) jaettuna seoksen kokonaisainemäärällä.

Kemiassa konsentraatio  $c$  on aina moolia litrassa eli mol/dm<sup>3</sup>. Tällöin voidaan puhua myös tilavuuskonsentraatiosta tai molaarisuudesta. Molaalisuus eli painokonsentraatio on puolestaan esimerkiksi kg/m<sup>3</sup>. Kirjallisuudessa ja tässäkin kirjassa aineen konsentraatio voi tarkoittaa pitoisuutta. Usein on kyseessä massa massayksikköä kohti (kg/kg) tai massa tilavuusyksikköä kohti (kg/m<sup>3</sup>).

Aine- tai massataseilaskuissa on useinkin perustana johonkin prosessiin tulevan raaka-aineen massavirta (kg/s) tai sitten kuiva-aineen massavirta, jolloin ainesosuuksia verrataan joko koko massaan (wet basis = wb) tai kuiva-aineeseen (dry basis = db). Joskus on järkevämpää laskea asioita jonkin muuttumattoman ainesosuuden suhteen. Viljan kuivauksessa se on kuivan ilman määrä. Ilmahan kastuu kuivauksessa, joten esimerkiksi vesihöyryä sisältävän ilman massavirta ei säily. Kuivaa ilmaa sen sijaan tulee sisään yhtä paljon kuin poistuu, joten taseyhtälössä aine- ja energiamäärät ovat kuivailmakiloa kohti.

## 1.7 Ideaalikaasun tilanyhtälö

Ilma on kaasua, ja kaasu on sinne tänne poukkoilevia molekyyliä. Jos kaasun tiheys on kohtalaisen pieni, molekyylien vuorovaikutus voidaan unohtaa. Kysymys on silloin ideaalikaasusta. Ideaalikaasussa molekyylin sisäinen rakenne ei merkitse mitään, siksi vain lukumäärä on tärkeä. Yksikkönä käytetään moolia. Moolissa on  $N_A$  molekyyliä.  $N_A$  on Avogadron luku =  $6 \cdot 10^{23}$  1/mol. Ilma koostuu erilaista kaasuista ja vesihöyrystä. Kutakin komponenttia voidaan tarkastella toisistaan riippumatta. Kaasun lämpötila tarkoittaa itseasiassa kaasumolekyylien liike-energiaa. Mitä korkeampi lämpötila, sitä vauhdikkaammin molekyylit liikkuvat, sitä isompi on niiden liike-energia  $E_k$ . Toisaalta isompi vauhti tarkoittaa, että molekyylin osuessa seinään siihen kohdistuu isompi voima ja kaasussa on siis isompi paine. Voidaan laskemalla osoittaa, että

$$pV = \frac{2}{3}nN_A E_k \quad (1.10)$$

missä  $E_k$  on yhden molekyylin liike-energia. Jos molekyylien liike-energia ei muutu,  $pV =$  vakio.

Saadussa yhtälössä ei esiinny lämpötila vaan molekyylien liike-energia. Näiden kahden asian välinen yhteys voidaan todeta eri tavoin. Edetään kokeellisesti. On kokemukseräisesti havaittu, että kaikille kaasuille riippumatta niiden kemiallisesta laadusta on riittävän pienessä paineessa ja vakiolämpötilassa paineen ja moolitilavuuden moolitilavuus  $V/n = V_m$  (= yhden moolin vaatima tilavuus) tulo  $pV_m$  vakio. Sen lisäksi vakiotilavuudessa  $p/T$  on vakio. Voidaan siis sopia, että  $pV_m$  on lämpötila eli

$$pV_m = T \quad (1.11)$$

Näin saadaan ideaalikaasulämpömittarin asteikko. Kelvin-asteikkoon eli normaaliin ideaalikaasun tilanyhtälöön päästään muuntokertoimella  $R$

$$pV_m = RT_{kelvin} \quad (1.12)$$

$R$  on kaasuvakio kaasuvakio,  $R = 8,3143$  J/(K mol). Mistä tulee  $-273,15$  °C = 0 K? Kuten todettiin, kokeellisesti tiedetään, että  $p/T$  on vakiotilavuudessa vakio. On siis voimassa  $T = a + bP$ . Jos piirretään eri kaasuille  $p(T)$ , havaitaan, että kaikki suorat leikkaavat samassa  $T$ -akselin pisteessä  $a = -273,15$  °C. Lämpötila-asteikon saamiseksi riittää siis määrittää  $p(T)$  yhdessä pisteessä. Vertailu kineettisen kaasuteorian tulokseen antaa tuloksen

$$\frac{2}{3}N_A \langle E_k \rangle = RT \quad (1.13)$$

**Esimerkki.** 1 NTP = Normal Temperature and Pressure tarkoittaa, että lämpötila on  $T_o=273,15$  K = 0 °C ja paine on  $p_o=101325$  Pa. Silloin 1 mooli kaasua vaatii tilavuuden  $V_o = \frac{nRT_o}{p_o} = \frac{RT_o}{p_o} = 22,4$  litraa, ja yksi moolillinenhan tarkoittaa  $N_A$  molekyyliä. Jos ajatellaan, että kukin molekyyli on yhtä isossa kuutiossa, tällaisen kuution särmän pituudeksi eli molekyylien keskimääräiseksi välimatkaksi tulee  $(22,4 \text{ dm}^3 / (6 \cdot 10^{23}))^{1/3} = 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 3,3 \text{ nm}$ . Ilma on aikamoista puuroa! Oletamus, jonka mukaan molekyylit törmäilevät vain seiniin, tuskin täsmälleen ottaen pätee. Jos otetaan huomioon molekyylien väliset vuorovaikutukset, päädytään mutkikkaampiin reaalikaasujen tilanyhtälöihin. Kaasu on ideaalikaasua niin kauan kuin molekyylit ovat keskimäärin paljon kauempana kuin mihin molekyylien välinen vuorovaikutus ulottuu. Vasta sitten joudutaan käyttämään reaalikaasujen tilanyhtälöitä, kun molekyylit keskimäärin ovat niin lähellä toisiaan, että molekyylien vuorovaikutusenergia alkaa olla verrattavissa molekyylien kineettiseen energiaan. Jos arvioidaan molekyylin halkaisijaksi 0,5 nm, 3,3 nm:n sivuinen neliö täyttyy  $(3,3/0,5)^2 = 44$  molekyylistä. Tarvitaan siis  $44 \cdot 3,3 = 140$  nm:n matka ennen kuin molekyyli törmää toiseen. Vapaa matka on siis 0,14  $\mu\text{m}$ . Jos kaasu on kovin pienissä huokosissa, kaasumolekyyli voikin törmätä useammin seiniin kuin toisiin molekyyliin. Tällöin tarvitaan muutoksia teoriaan.

Mikä on kuivan ilman tiheys normaalipaineessa, kun lämpötila on 20 °C ?

$$pV = nRT = \frac{m}{M} RT \text{ joten } \rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} = \frac{101325 \text{ Pa} \cdot 18 \text{ g/mol}}{8,3143 \text{ J/(Kmol)} \cdot 293 \text{ K}} = 1,20 \text{ kg/m}^3.$$

### 1.7.1 Ideaalikaasuseokset

Nyt kun ymmärrämme, mitä ovat lämpötila ja paine, voimme päätellä, miten kaasujen osapaineita lasketaan yhteen. Kunkin lajin molekyylit törmäilevät toisistaan riippumatta seinämään eli lisäävät painetta omalla osapaineella. Kaasuseoksen koko paine on selvästi komponenttien osapaineiden summa. Tämä on Daltonin laki. Ilmaan voidaan lisätä tietty määrä vettä. Veden maksimimäärä tilavuudessa ja sitä vastaava kylläisen vesihöyryn paine riippuu vain lämpötilasta, ei ilmanpaineesta (kunhan se nyt ei ihan tolkuton ole, niin etteivät molekyylit kovin pahasti törmäile toisiinsa). Vesimolekyylien välillä on voimakas adheesio ja kun tarpeeksi monta vesimolekyyliä joutuu nippuun, syntyy vesipisara. Toisaalta vesimolekyyli voi haihtuakin pisaran pinnalta. Syntyy tasapaino, joka riippu lämpötilasta. Mitä korkeampi lämpötila, sitä todennäköisemmin pisara haihtuu ja sitä enemmän siis vettä ilmaan mahtuu. Kun vesihöyryä lisätään ilmaan vaikkapa huoneessa, ei ilman koko paine mihinkään muutu, vaan se on noin 1 atm. Kokonaispaine pyrkii aina tasoittumaan. Tämä tapahtuu niin, että huoneessa on jonkin ajan kuluttua vesihöyryn lisäyksestä kuivaa ilmaa vähemmän kuin ennen. Olihan ihan sama, mitä molekyylejä ilmassa on, kokonaismäärä ratkaisee, mikä on paine. Diffuusio (kuten myöhemmin opitaan) perustuu puolestaan siihen, että kunkin kaasuseoksen komponentin osapaineet (konsentraatiot) pyrkivät tasoittumaan. Paine-erot synnyttävät virtauksen (konvektion), konsentraatioerot diffuusion. Olkoon seoksen koko massa  $m$ , ja olkoot komponenttien massat  $m_i, m = \sum m_i$ . Vastaavasti olkoon seosta  $n$  moolia ja kutakin komponenttia  $n_i = m_i / M_i$  moolia,  $n = \sum n_i$ .  $M_i$  on kunkin komponentin moolimassa. Seoksen moolimassa on  $M = m / n$ . Kuivalle ilmalle saadaan  $M = 28,964$  g/mol. Ideaalikaasun tilanyhtälö voidaan kirjoittaa seokselle

$$pV = nRT = \sum n_i RT = V \sum p_i \quad (1.14)$$

$$p = \sum p_i \quad (1.15)$$

$p$  on kokonaispaine ja  $p_i$  komponentin osapaine.

**Esimerkki.** Oletetaan, että ilmassa on 77 painoprosenttia typpeä ja 23 painoprosenttia happea. Lasketaan ilman keskimääräinen molekyylipaino. Typen moolimassa on 28 g/mol ja hapen 32 g/mol. Silloin 100 grammassa ilmaa on 23/32 moolia happea ja 77/28 moolia typpeä. Yhteensä mooleja on  $0,72 + 2,75 = 3,47$  ja keskimääräinen moolipaino siten  $100 / 3,47 = 28,8$  g/mol. Hapen mooliosuus on  $0,72 / (2,75 + 0,72) = 0,21$ . Lasketaan vielä hapen tilavuus- ja painokonsentraatiot, kun ilmanpaine on 1,5 atm ja lämpötila 25 °C. Oletetaan ilman olevan ideaalikaasua, jolloin  $pV = nRT$  ja ilman tilavuuskonsentraatio on

$$\frac{n}{V} = \frac{RT}{p} = \frac{0,08206 \text{ m}^3 \text{ atm} / (\text{molK}) \cdot 298 \text{ K}}{1,5 \text{ atm}} = 0,061 \text{ mol/m}^3.$$

Ilman painokonsentraatio eli tiheys on  $0,061 \cdot 28,8 = 1,76$  kg/m<sup>3</sup>. Tästä 23 % on happea eli hapen painokonsentraatio on  $0,4$  kg/m<sup>3</sup> ja tilavuuskonsentraatio  $0,4 / 32 = 0,013$  mol/m<sup>3</sup>.

## 1.8 Johdatusta termodynamiikkaan

Termodynamiikka on fysiikan osa, joka käsittelee energian muuttumista muodosta toiseen. Mikä tahansa, jolla on energiaa, voi tehdä työtä. Siksi energian ja työn yksikkö on sama, joule. Energiaa ovat mm. mekaaninen (kineettinen), potentiaali-, kemiallinen, lämpö-, sähkö- ja äänienergia. Kokonaisenergia säilyy, kun jätämme huomiotta ydinenergiaprosessit, joissa massa muuttuu energiaksi. Kokonaisenergiatase ja ainetase ovat kaksi tosiasiaa, joihin matemaattiset mallimme perustuvat. Systeemiin (vaikka pa viljankuivaa ja) tulevat energia- ja ainevirrat ovat joka hetki yhtä isot kuin systeemiin aikayksikössä jääneen energian ja aineen ynnä systeemistä poistuvien energia- ja ainevirtojen summa. Energiaa voi muuttua muodosta toiseen. Primaarinen energianlähde maapallolla on auringossa tapahtuva massan muuttuminen energiaksi. Tämä energia säilyy maapallolla yhteyttämisessä hiileksi, kaasuksi, öljyksi ja puuksi. Ne sisältävät kemiallista energiaa atomien välisissä sidoksissa. Tämä energia voidaan muuttaa polttamalla lämpöenergiaksi.

### 1.8.1 Lämpöenergia

Lämpöenergia on itse asiassa molekyylien liike-energiaa. Molekyylit voivat kaasuissa ja nesteissä edetä, pyöriä ja värähdellä. Aineen lämpösisältö ja lämmön liikkuminen aineessa ovat kaksi eri asiaa. Aineella, oli se sitten kaasua, nestettä tai kiinteää, on tietty lämpötila, joka kertoo aineen olomuodon. Lämpötilan absoluuttisessa nollassa kaikki liike lakkaa. Termodynamiikan mukaan siihen ei ole mahdollista päästä. Kaikilla kappaleilla on lämpöenergiaa. Sen yksikkö oli alkujaan kalori = cal. Se on energiamäärä, joka tarvitaan lämmittämään 1 g vettä yhden celsiusasteen. On mahdollista vispata vettä eli tehdä mekaanista työtä veteen ja mittaamalla todeta, että 1 cal vastaa 4,18:aa joulea. Sanotaan, että veden ominaislämpökapasiteetti on 4,18 J/(g K). Valitettavasti termodynamiikka tai paremminkin luonto kieltää päinvastaisen mahdollisuuden: lämpöenergiaa ei voi kokonaisuudessaan muuttaa mekaaniseksi energiaksi. Tehokkuus riippuu koneen ja ympäristön lämpötiloista. Lämpöpumput, pakastimet ja moottorit ovat tällaisia lämpövoimakoneita.

### 1.8.2 Terminologiaa

Termodynamiikan kaavat vaihtelevat sen mukaan, minkälainen on tarkasteltava systeemi ja minkälainen on tarkasteltava tapahtuma. Jos putkessa olevaa kaasua puristetaan männällä kasaan, kaasu on systeemi ja kaikki muu on ympäristöä. Systeemin ja ympäristön välillä on rajapinta, kontrollipinta. Kontrollipinta ympäröi kontrollitilavuutta, joka sisältää tarkastelun kohteena olevan systeemin. Jos rajapinnan läpi ei mene mitään, systeemi on eristetty. Jos läpi pääsee vain energiaa, systeemi on suljettu systeemi. Avoimessa systeemissä rajapinnan läpi liikkuu sekä energiaa että ainetta. Ihminen ja elävä solu ovat avoimia systeemejä, putkessa oleva kaasu on suljettu systeemi, kun oletetaan, että kaasua ei pääse yhtään karkuun. Kun putki ympäröidään hyvällä eristeellä, saadaan eristetty systeemi. Näistä määrittelyistä näkyy kaksi termodynamiikan perustaa: massan ja energian säilyminen. Jos systeemin lämpötila pidetään vakiona, prosessi on isoterminen. Jos kaasua puristetaan kasaan, sen molekyylien liike-energia kasvaa ja lämpötila pyrkii nousemaan. Jos prosessi on isoterminen, systeemi ei voi olla eristetty. Kaasun puristaminen suljetussa systeemissä on adiabaattinen prosessi, jos lämmönvaihto on estetty. Yleensä ollaan näiden ääritilanteiden välissä. Esimerkiksi viljan kuivaus kylmäilmakuivurissa oletetaan adiabaattiseksi prosessiksi, vaikkei kuivuri kovin suljettu systeemi olekaan (kuivuri on nyt kontrollitilavuus, ja kontrollipinnan läpi siirtyy sekä lämpöä että vettä). Matemaattinen malli tulee näin yksinkertaisemmaksi ja on kuitenkin vielä käyttökelpoinen. Jotta systeemin termodynaaminen tila voidaan määrittellä, on tunnettava systeemin kemiallinen koostumus ja joukko intensiivisiä ominaisuuksia, esimerkiksi lämpötila ja paine. Ne eivät riipu aineen määrästä, toisin kuin ekstensiiviset suureet tilavuus, massa ja energia. Systeemin vapausasteiden määrä kertoo, miten monta ominaisuutta tarvitsee tuntea systeemin tilan määrittelemiseksi yksikäsitteisesti. Kaasusysteemin tila on tunnettu, jos tunnetaan systeemin lämpötila ja paine.

### 1.8.3 Termodynamiikan nollas ja ensimmäinen pääsääntö

Klassinen mekaniikka perustuu pelkästään Newtonin kolmeen lakiin. Termodynamiikan perustana on neljä pääsääntöä tai lakia, joista ensimmäistä kutsutaan nollanneksi sen takia, että ensin sovittiin muista ja vasta sitten tajuttiin, että nollas pääsääntö on niistä riippumaton. Sen tulee olla kuitenkin ensimmäinen, siksi sen nimi on nollas! Lämpöopin nollas pääsääntö, terminen tasapaino: toisiinsa kosketuksissa olevat kappaleet saavuttavat vähitellen saman lämpötilan. Tähän perustuu lämpötilan mittaaminen. Lämpömittari ilmoittaa oman lämpötilansa. Nollas pääsääntö kertoo siis sen tosiasian luonnosta, että lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan: lämpötilaero on lämpöenergiaa paikasta toiseen ajava voima. Erilaiset ajavat voimat ovat hyvin tärkeitä, ne kertovat, mikä on se syy, joka saa molekyyliä tai lämmön liikkumaan. I laki koskee energian säilymistä. Jos tarkastellaan systeemissä olevaa kaasua, kaasun sisäenergian (= molekyylien liike-energian) muutoksen  $\Delta U$ , kaasua kasaan puristettaessa tehdyn työn  $W$  ja kaasuun tuodun lämmön  $Q$  välillä on yhteys

$$\Delta U = Q + W \quad (1.16)$$

Tämä on ensimmäinen pääsääntö. Lauseke määrittelee, mitä tarkoittaa termodynaamisen systeemin sisäenergia  $U$ . Sisäenergian nollakohta on mielivaltaisen, lauseke kertoo vain, mitä sisäenergian muutos tarkoittaa. Kaasun tekemä työ on negatiivista, samoin kaasusta otettu lämpöenergia. Voit arvata, että kirjallisuudessa nämä merkkisäännöt ovat joskus toisinkin päin. Kun suljetussa systeemissä tapahtuu sisäenergian muutos, täytyy systeemin ympäristössä tapahtua samansuuruinen, mutta vastakkaismerkkinen muutos. Adiabaattisessa prosessissa  $Q = 0$  eli  $\Delta U = W$ . Kaikki työ menee sisäenergiaksi, joka näkyy systeemin lämpötilan nousuna. Paine ehkä kasvaa, kaasu saattaa nesteytyä tai vesi höyrystyä. Adiabaattinen ilman laajeneminen on merkittävä sateen tekijä. Kun ilmapaketti nousee nopeasti ylöspäin, se laajenee nopeasti paineen alenemisen takia. Paketti ei ehdi vaihtaa lämpöä ympäristön kanssa, joten paketin ilma jäähtyy. Kun lämpötila laskee alle kastepisteen, ilmassa oleva vesi tiivistyy ja sataa niskaamme. Neste ja kiinteä aine eivät paljon laajene. Niillä työn osuus on pieni ja kappaleeseen tuotu lämpö menee sisäenergian kasvuun, molekyylien liike-energia kasvaa, kappale lämpiää ja  $\Delta U = Q$ . Kaasun tekemä työ on  $dW = -pdV$ . Jos tilavuus ei muutu, kaasu ei tee työtä ja silloin  $\Delta U = Q$ . Tällainen on tilanne pommikalorimetrissä, jossa mitataan esimerkiksi ruoan energia-arvo polttamalla ruoka. Myös viljan kuivaus on adiabaattinen prosessi, kun unohdetaan lämpöhäviöt seinien läpi.

### 1.8.4 Entalpia

Meitä kiinnostavat kuivausprosessit tapahtuvat usein vakiopaineessa, normaalissa ilmanpaineessa. Tarkastellaan suuretta entalpia  $H$ , joka määritellään lausekkeella  $H = U + pV$ . Entalpiian muutos on

$$\Delta H = \Delta U + p\Delta V + V\Delta p \quad (1.17)$$

Jos kaasua lämmitetään vakiopaineessa,  $\Delta p = 0$ . Toisaalta I säännön mukaan  $\Delta U = Q - p\Delta V$ , jossa kaasun laajetessaan tekemä työ on  $\Delta W = -p\Delta V$ . Siis  $\Delta H = Q$ . Vakiopaineessa tapahtuvassa prosessissa entalpiian muutos on siirtynyt lämpömäärä. Tämä on entalpia-käsitteen käyttöönoton syy. Entalpiaa kutsutaan myös lämpösisällöksi. Entalpia on tilasuure (riippuu vain tilasta, ei historiasta), ja sen arvoja löytyy taulukoista. Voidaan siis laskea, paljonko jokin tapahtuma, esimerkiksi viljan kuivaus, vaatii energiaa. Riittää, kun tietää sisään tulevan ilman ja poistuvan ilman lämpötilan ja vesimäärän. Poistuvan ja tulevan ilman entalpioiden eron täytyy olla yhtä iso kuin systeemiin tuotu lämpömäärä. Tällöisten tilanteiden tarkastelua varten on olemassa ns. Mollierin diagrammi, josta voi suoraan katsoa esimerkiksi energiankulutuksen. Diagrammista tarkemmin vesihöyryn tarkastelun yhteydessä. Prosessi on isentalpinen, jos entalpia ei muutu.

## 1.9 Lämpöoppi

Tästä luvusta pitää oppia, mitä tarkoittavat (ominais)lämpökapasiteetti ja (ominais)latenttilämpö. Lämpökapasiteetti ja latenttilämpö ovat tärkeitä lämmönsiirtoon liittyviä suureita erityisesti lämmi-

tyksessä, jäädytyksessä, kuivauksessa ja vaikkapa laskettaessa miten maa keväällä lämpii. Ominaislämpökapasiteetti (= aineen energiasältö) täytyy tietää, jos haluaa laskea, paljonko jäädytyksessä täytyy ottaa energiaa pois tai paljonko lämmityksessä sitä tuodaan aineeseen. Latenttilämpö kertoo faasimuutoksissa (höyry, neste, kiinteä) vapautuvan tai sitoutuvan energian.

### 1.9.1 Lämpökapasiteetti

Jos kappaleen lämpötila nousee  $\Delta T$ :n verran, kappaleeseen täytyy tuoda lämpöä määrä  $Q$ . On luonnollista ajatella, että tarvittava lämpömäärä  $Q$  on suoraan verrannollinen lämpötilan muutokseen ja myös kappaleen massaan. Siispä

$$Q = C\Delta T = mc\Delta T \quad (1.18)$$

missä verrannollisuuskerroin  $C$  on nimeltään kappaleen lämpökapasiteetti, yksikkönä  $J/K$ . Ominaislämpökapasiteetti  $c$  on materiaalin ominaisuus eikä riipu kappaleen koosta eli massasta  $m$ , yksikkönä  $J/(kgK)$ . Varsinkin kaasujen tapauksessa on syytä erottaa toisistaan ominaislämpökapasiteetti vakio-paineessa  $c_p$  (eli lämpötilan muutoksen aikana pidetään paine vakiona) ja ominaislämpökapasiteetti vakio-tilavuudessa  $c_v$ . Tässä kirjassa käytetään yleensä pelkkää  $c$ :tä, joka tarkoittaa  $c_p$ :tä. Kaasuprosessit tapahtuvat ilmanpaineessa eli vakio-paineessa, ja nesteille ja kiinteille aineille  $c_p$  ja  $c_v$  ovat jokseenkin samat. (Sisäenergian muutos on kuitenkin  $\Delta U = mc_v\Delta T$ .) Entä mikä on viljan lämpökapasiteetti? Se koostuu eri aineista, kiinteästä aineesta, vedestä ja ilmasta. Ominaislämpökapasiteetti saadaan helposti, jos tunnetaan massaosuudet  $m_w/m$  (water) ja  $m_s/m$  (solid),  $m = m_w + m_s$ . Lämpökapasiteetin määritelmästä seuraa suoraan

$$mc = m_w c_w + m_s c_s \quad (1.19)$$

joten

$$c = \frac{m_w}{m} c_w + \frac{m_s}{m} c_s \quad (1.20)$$

Viljan jyvä on pääasiallisesti tärkkelystä ja vettä. Tärkkelyksen ominaislämpökapasiteetti on  $1,54$   $\text{kJ}/(\text{kgK})$  ja veden  $4,18$   $\text{kJ}/(\text{kgK})$ . Viljan ominaislämpökapasiteetti voidaan laskea summaamalla veden ( $c_v$ ) ja tärkkelyksen ( $c_t$ ) ominaislämpökapasiteetit ja ottamalla huomioon kunkin osuuden jyvässä. Tällöin saadaan yhtälö:

$$c = c_t(1 - w) + c_v w \quad (1.21)$$

Ominaislämpökapasiteetti riippuu kosteudesta ja kostealla viljalla se on suurempi kuin kuivalla, koska veden osuus on silloin suurempi.

**Esimerkki.** Viljan kosteus on 20%, mikä on sen ominaislämpökapasiteetti?  $c = 1,54 \cdot (1 - 0,2) + 4,18 \cdot 0,2 = 2,1 \text{ kJ}/(\text{kgK})$

Jos myös kiinteän aineksen ja veden osuudet annetaan tilavuusosuuksina  $q_s = V_s/V$  ja  $q_w = V_w/V$  (jolloin huokoisuus on  $1 - q_s$ ), tarvitaan myös viljan tiheyttä  $\rho = (m_s + m_w)/V$ , kuivatilavuuspainoa eli kuivan viljan tiheyttä  $\rho_b = m_s/V$  ( $b = \text{bulk}$ ), kiinteän aineksen tiheyttä eli ominaispainoa  $\rho_s = m_s/V_s$  ja veden tiheyttä  $\rho_w = m_w/V_w$  (veden). Tällöin saadaan esimerkiksi tulos

$$q_s = \frac{V_s}{V} = \frac{m_s/\rho_s}{m_s/\rho_b} = \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (1.22)$$

Voit itse johtaa tuloksen

$$\rho c = \rho_s q_s c_s + \rho_w q_w c_w \quad (1.23)$$

$\rho c$  on lämpökapasiteetti tilavuusyksikköä kohti, kun  $c$  on lämpökapasiteetti massayksikköä kohti.

**Esimerkki.** Kuivatun viljan ominaislämpökapasiteetti on  $c = 1,9 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ , viljan lämpötila kuivauksen jälkeen on  $34 \text{ }^\circ\text{C}$  ja viljaa on kaikkiaan  $m = 22 \text{ tonnia}$ . Kuinka paljon lämpöä vapautuu, kun erä jäähdytetään  $t = 2 \text{ tunnin}$  aikana  $16 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilaan ja mikä on keskimääräinen jäähdytysteho  $P$ ?

Vapautuva lämpö  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 22000 \text{ kg} \cdot 1,9 \text{ kJ}/(\text{kgK}) \cdot (34-16) \text{ K} = 750 \text{ MJ} = 209 \text{ kWh}$ . Jäähdytysteho  $P = Q/t = 104,5 \text{ kW} = 100 \text{ kW}$ .

### 1.9.2 Latenttilämpö

Veden höyrystyminen tai jään sulaminen vaatii energiaa. Näihin faasimuutoksiin liittyy latenttilämpö (sulamiseen sulamislämpö, höyrystymiseen höyrystymislämpö). Latenttilämpö kertoo, paljonko tietyn kappaleen olomuodon muutos vaatii energiaa. Kun jaetaan latenttilämpö kappaleen massalla, saadaan ominaislatenttilämpö. Veden ominaissulamislämpö  $l_s$  on  $333 \text{ J/g}$  sulamispisteessä ja ominaishöyrystymislämpö  $l_h$   $2260 \text{ J/g}$  kiehumispisteessä  $1 \text{ atm:n}$  paineessa. Jos meillä on  $m$  kiloa nolla-asteista jäätä (sata-asteista vettä), sen sulattaminen (höyrystäminen) vaatii energiaa  $\Delta Q = l_s \cdot m$  ( $\Delta Q = l_h \cdot m$ ). Molemmat lukuarvot riippuvat paineesta ja lämpötilasta. Veden lämpötilan nostaminen kymmenen celsiusastetta vaatii noin  $42 \text{ J/g}$  ja jään  $20 \text{ J/g}$ . Faasimuutoksiin liittyvät energiat ovat siis isoja lämpötilan nostamiseen verrattuna.

## 1.10 Lämmönsiirtymismekanismit

Lämmönsiirtymismekanismit ovat lämmön kulkeutuminen virtauksen mukana eli konvektio, lämmön johtuminen ja lämpösäteily. Lämmön johtuminen on keino siirtää lämpöä kiinteässä aineessa. Nesteissä ja kaasuissa on vapaata, lämpötilaeroista aiheutuvaa, ja pakotettua, pumpulla synnytettyä, konvektiota. Auringosta lämpö pääsee meille vain säteilemällä. Lämmönsiirtymismekanismit ja niiden vaikutuksen esto näkyvät hyvin termospullossa. Korkki estää kahvin valumisen ulos eli konvektion (lämpö poistuu pullosta nesteen mukana). Pullossa on sisä- ja ulkokuori, ja välistä on vedetty ilma pois. Kun ei ole molekyyliä kuljettamassa energiaa, ei ole myöskään lämmön johtumista. Ilma kaasuna on sinänsä paljon huonompi lämmönjohde kuin kiinteä aine, joten ilmaa ei välttämättä tarvitse poistaa. Hopeoimalla sisäkuori estetään lämpösäteilyn absorptio pullon vaippaan.

Lämmön siirtyminen vaatii aina lämpötilaeroja. Lämmön siirtymisessä on syytä erottaa toisistaan lämpötilojen tasoittuminen ja siirtynyt lämpömäärä. Lämmönsiirtymiskerroin kertoo, miten paljon lämpöä siirtyy. Ominaislämpökapasiteettia tarvitaan lisäksi kertomaan, miten nopeasti lämpötilaerot tasoittuvat. Lämpö on kuin nestettä, jota toisessa purkissa on enemmän kuin toisessa. Nestepintojen korkeusero (= lämpötilaero) tarkoittaa jotain muuta kuin purkeissa olevien nestemäärien ero (= lämpöäärien ero). Pienikin virtaus (lämmön siirtyminen) riittää siirtämään nesteen pienestä astiasta toiseen (tasoittamaan lämpötilaeron).

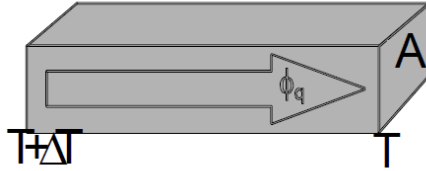
### 1.10.1 Lämmön konvektio

Lämpö voi siirtyä nesteissä ja kaasuissa virtauksen mukana. Konvektio jaetaan vapaaseen ja pakotettuun. Kun vettä lämmitetään, lämpötilaerosta johtuva tiheusero saa veden virtaamaan esimerkiksi lämmityspattereissa. Tämä on vapaata konvektiota, samoin ilman virtaus lämpöpatterin ohi tai ilman kierto ikkunalasien välissä. Jos lämmitysjärjestelmään lisätään pumpu tai puhallin, on kyseessä pakotettu konvektio. Systemiin on lisätty ulkoista energiaa.

### 1.10.2 Lämmön johtuminen

Minkähän takia meillä ei ole käytössä puukattiloita ja veden sijasta paistinpannuun laitetaan rasvaa?

Kun metalli- tai puutangon toista päätä lämmitetään (tai jäähdytetään) eli päähän tuodaan lämpöenergiaa (tai otetaan pois), tangossa olevien atomien tai molekyylien kineettinen energia lisääntyy ja lämpötila nousee. Tangon päiden välille syntyy lämpötilaero, joka pyrkii tasoittumaan. Lämpö siirtyy tankoa pitkin johtumalla. Metallissa siirtyminen tapahtuu nopeammin kuin puussa. Lämpö johtuu sen takia, että vierekkäin olevat molekyylit vaihtavat energiaa (eristeet, esimerkiksi puu), tai myös sen



Kuva 1.1: Lämmön johtuminen tangossa

takia, että elektronit pääsevät liikkumaan (metallit). Kyse on tällöin itse asiassa elektronien mukana siirtyvästä energiasta eli konvektiosta, mutta sopimuksen mukaan konvektiosta puhutaan vain, kun molekyylit pääsevät joukolla liikkumaan. Elektronien liike on paljon tehokkaampi tapa siirtää energiaa kuin atomien värähtelyjen avulla tapahtuva, ja siksi metallit johtavat lämpöä paremmin kuin puu. Miksi sitten saunassa puussa olevat naulan päät polttavat, mutta laude ei polta? Me aistimme ihoon siirtyneen lämmön määrää. Puussa lämpö on tiukemmassa, ja sitä on vähemmän kuin metallissa, ja puun pinnan lämpötila laskee hyvin nopeasti samaksi kuin ihomme lämpötila. Puu on hyvä eriste ja huono lämmönjohdin.

Tarkastellaan aluksi tasapainotilannetta (steady state). Tangon päiden välillä on vakio­lämpötilaero  $\Delta T$ . Tangon toinen pää on kuumassa vedessä ja toinen pää kylmässä, ja jollain keinolla pidetään vesien lämpötilat vakiona. Tangossa virtaa tietyn siirtymävaiheen jälkeen vakiona pysyvä lämpömäärä aikayksikössä, eli lämpövirta on  $q_q = \Delta Q / \Delta t$ .  $\Delta Q$  on ajassa  $\Delta t$  tangon läpi mennyt lämpömäärä.

Lienee luonnollista, että  $q_q$  on suoraan verrannollinen tangon poikkipinta-alaan. Koska meillä on ajasta riippumaton tilanne ja kun vielä kuvitellaan, että lämpöä ei pääse tangon sivuilta karkuun, lämpötilagradientti  $\Delta T / \Delta x$  on vakio, eli lämpötila muuttuu matkaan verrannollisena. On aika vaikea kuvitella, että näin ei välttämättä olisi. Näin järkeillen olemme päässeet perusluonteiseen yhtälöön, Fourierin I lakiin, jossa geometriset tekijät on saatu erotettua materiaalivakiosta  $\lambda$ , jota kutsutaan lämmönjohtavuudeksi

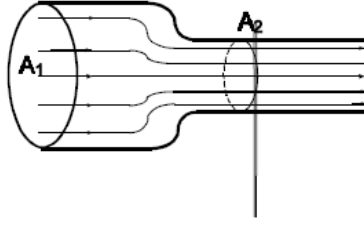
$$q_q = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1.24)$$

Yhtälössä oleva miinusmerkki kertoo, että lämpö virtaa lämpötilagradienttia vasten. Yleensä emme merkeistä paljon välitä, koska virtaussuunnat ovat itsestään selviä ja tarkastellaan vain yksiulotteista tapausta. Lämmönjohtavuuden yksikkö on  $J / (m \text{ K s})$ .  $\Delta Q / \Delta t = q_q$  kertoo pinnan A läpi aikayksikössä menneen lämpöenergian määrän. Sitä kutsutaan lämpövirraksi. Kun se jaetaan pinta-alalla A, saadaan lämpövirran tiheys

$$q_q'' = \frac{q_q}{A} \quad (1.25)$$

Hopea on paras lämmönjohde, kupari melkein yhtä hyvä,  $\lambda$  noin  $400 \text{ W} / (\text{mK})$ . Siitä huolimatta kattilat ja kahvipannut ovat nykyään terästä, jonka lämmönjohtavuus on  $8 - 16 \text{ W} / (\text{mK})$ . Myöhemmin opitaan, että lämmönsiirrossa elämän ja kuoleman kysymys ovat rajapinnat. Niillä on aina laminaarinen neste- tai kaasukerros, joiden lämmönsiirtymiskerroin on niin pieni verrattuna metallin lämmönjohtavuuteen, että metallin laadulla ei olekaan merkitystä lämmönsiirrossa. Veden lämmönjohtavuus on  $0,573 \text{ W} / (\text{mK})$  ja ilman vain  $0,0242 \text{ W} / (\text{mK})$ . Ohutkin kerros ilmaa torpedoi lämmönsiirron: 1 mm:n ilmakerros päästää lämpöä lävitseen saman verran kuin noin 20 m:n paksuinen kuparilevy. Ilmaa sisältävät materiaalit, kuten villapaita tai vuorivilla, ovat hyviä eristeitä. On hyvä huomata, että vuorivillassa eristää ilma, ei niinkään itse materiaali. Lämmönjohtavuus on vain hieman parempi kuin ilman. Eristemateriaalilta vaaditaan, että siitä saadaan kevyt levy, se on halpaa ja palaa huonosti. Levyn täytyy olla lisäksi sen verran tiivistä, että sen huokosissa oleva ilma pysyy paikallaan.





Kuva 1.2: Nesteen virtaus putkessa, jatkuvuusyhtälö

## 1.11 Hydrodynamikka

Fluidit ovat nesteitä ja kaasuja. Fluidille ei ole suomenkielistä vastinetta. Tarkastelemme tässä luvussa pelkästään kokoon puristumattomia ideaalisia nesteitä. Monet tuloksista pätevät kuitenkin myös kokoonpuristuviin kaasuihin kuten kuivurin kuivausilmaan. Hydraulikka on yleisnimitys fluidien hydrostatiikan ja hydrodynamikan teknisille sovelluksille. Hydrostatiikassa on kyse levossa olevista fluideista tai oikeastaan se keskittyy aika paljon paneen vaikutukseen. Hydrodynamikka tarkastelee liikkuvia nesteitä. Pneumatiikassa väliaineena on kaasu ja öljyhydraulikka käsittelee öljynesteitä.

### 1.11.1 Jatkuvuusyhtälö, virta, virrantiheys

Tarkastellaan nesteen virtausta putkessa, jonka poikkileikkauksen pinta-ala muuttuu (kuva 1.2)

Neste on kokoon puristumatonta, minkä vuoksi nestettä täytyy putkessa mennä jokaisen poikkileikkauksen läpi yhtä paljon aikayksikössä eli tilavuusvirran ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) täytyy olla sama putken joka kohdassa. Muussa tapauksessa vettä alkaisi kasaantua jonnekin.

Jos putken pinta-ala on  $A$  ja virtausnopeus  $v$  (unohdetaan toistaiseksi, että virtausnopeus vaihtelee putken poikkileikkauksen eri kohdissa), on tilavuusvirta

$$q_V = \frac{\text{tilavuus}}{\text{aikaväli}} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = Av = \text{vakio} \quad (1.26)$$

koska ajassa  $\Delta t$  menee poikkipinnan läpi  $Av\Delta t$  tilavuus (neste muodostaa sylinterin, jonka pohjan pinta-ala on  $A$  ja pituus  $v\Delta t$ ). Jos putken pinta-ala muuttuu, muuttuu myös virtausnopeus. Kapeikossa virtausnopeus kasvaa. On siis voimassa  $A_1v_1 = A_2v_2$ . Tämä on jatkuvuusyhtälö. Prosesseissa fluidin tiheys ei aina pysykään vakiona. Massataseet tarkastelevatkin massavirtoja massavirta  $q_m$

$$q_V = \frac{\text{massa}}{\text{aikaväli}} = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\rho \Delta V}{\Delta t} = \rho q_V = \rho Av \quad (1.27)$$

Massavirta on prosessin joka osassa sama, mikäli ainetta ei kerääny mihinkään. Käytämme vastedes seuraavaa terminologiaa: jonkin virta  $q$  tarkoittaa jotakin aikayksikössä poikkipinnan läpi. Se, mitä virtaa, voi olla tilavuus (tilavuusvirtaa merkitään  $q_V$ :llä), massa ( $q_m$ ), energia ( $q_e, q_q$ ), sähkövaraus (sähkövirtaa merkitään muista poikkeavasti  $I$ :llä) jne., jolloin virran yksikkö on jotakin/s eli  $\text{m}^3/\text{s}, \text{kg}/\text{s}, \text{J}/\text{s}, \text{C}/\text{s} = A =$  ampeeri jne. Vastaavasti jonkin virrantiheys (merkitään  $q'$ :llä) tarkoittaa jotakin aikayksikössä jaettuna putken poikkipinta-alalla, esimerkiksi

$$\text{tilavuusvirran tiheys} = q_V' = \frac{q_V}{A} = \frac{Av}{A} = v$$

Tilavuusvirran tiheys on siis sama kuin virtausnopeus. Virrantiheyden yksikkö on aina jotakin/( $\text{s} \cdot \text{m}^2$ ), esimerkiksi tilavuusvirran tiheyden yksikkö on  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2) = \text{m}/\text{s}$ .

### 1.11.2 Bernoullin yhtälö

Käsitellään aluksi kitkatonta ja laminaaria virtausta putkessa. Tällaista nestettä kutsutaan ideaaliseksi. Nestealkiot liikkuvat siististi jonossa pitkin virtausviivoja. Virtausviivoilla tarkoitetaan kuviteltuja viivoja, jotka osoittavat virtauksen nopeusvektorin suunnan kussakin virtauksen pisteessä. Kitkatomuudesta seuraa, että kussakin putken poikkileikkauksessa virtausnopeus on vakio eli virtausnopeus

ei riipu etäisyydestä putken keskeltä ( $v \neq v(r)$ ). Kuten tullaan oppimaan, kitkallisilla eli viskooseilla nesteillä on virtausnopeusjakauma. Itse asiassa kaikki muut nesteet kuin supranesteet ovat kitkallisia. Laminaarisuus myös edellyttää kitkallisuutta. Oletetaan lisäksi, että virtaus on ajasta riippumatonta eli stationaarista; virtaus näyttää joka hetki samanlaiselta. Tarkastellaan kuviteltua sylinterin muotoista nestepalasta, jonka poikkipinta-ala on  $A$  ja pituus  $s$ . Jos sylinterin päissä on erilaiset paineet, nestepala joutuu kiihtyvään liikkeeseen, koska nesteeseen vaikuttavien voimien summa ei ole nolla. Nestepalasen liike voidaan ratkaista Newtonin II lain avulla. Jos neste on kitkatonta ja kokoon puristumatonta eikä energian vaihtoa ympäristön ja virtauksen välillä ole, päädytään Newtonin II laista integroimalla Bernoullin yhtälöön, jonka mukaan ( $\rho$  on nesteen tiheys ja  $h$  tarkastelupisteen korkeus johonkin valittuun referenssitasoon nähden)

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{vakio} = \text{kokonaispaine} \quad (1.28)$$

Jos siirrytään pisteestä toiseen, tämän lausekkeen arvo pysyy muuttumattomana.  $p$  on staattinen paine ja  $\frac{1}{2}\rho v^2$  on kineettinen eli dynaaminen paine. Nimi tulee siitä, että lauseke on kineettinen energia  $E_k$  tilavuusyksikköä  $V$  kohti  $E_k/V = \frac{1}{2}mv^2/V = \frac{1}{2}\rho v^2$ . Bernoullin yhtälö kertoo vain, että energia säilyy, onhan  $p=F/A=F_x/(Ax)=W/V$  eli voiman tekemä työ tilavuusyksikköä kohti ja  $\rho gh = mgh/V$  eli potentiaalienergia tilavuusyksikköä kohti. Jos neste olisi kitkallista, osa energiasta muuttuisi lämmöksi. Tällöin neste virtaa vaakasuorassakin putkessa vain, jos putken päissä on eri paineet. Bernoullin yhtälöön pitäisi lisätä kitkasta johtuva häviötermi. Ensin täytyy määrittellä kitka ja sitten laskea, minkälainen painehäviö siitä tulee putkivirtauksessa.

Bernoullin yhtälö pätee kitkattomalle laminaarille virtaukselle. Kitka ja virtauksen luonne johtavat muutoksiin Bernoullin yhtälössä. Reaalielämässä lisävaikeuksia tulee putken mutkista, hanoista, pumpuista ja putken pinnan karheudesta. Sovitaan, että vauhti Bernoullin yhtälössä tarkoittaa keskivauhtia. Tällöin voidaan kirjoittaa, kun virtaus etenee pisteestä 1 pisteeseen 2,

$$\underline{p_1 + C \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1 + H \rho g = p_2 + C \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2 + \sum \Delta p_k} \quad (1.29)$$

Tässä  $\sum \Delta p_k$  on kitkasta aiheutuvat painehäviöt. Virtausenergiasta osa muuttuu lämmöksi. Kirjallisuudesta löytyy taulukoita, joissa kerrotaan, mikä  $\Delta p_k$  aiheutuu minkäkinlaisesta putken karheudesta, putken mutkasta ja hanasta.  $C$  on korjauskerroin, joka riippuu virtauksen laadusta. Jos virtaus on turbulenttia,  $C \approx 1$ , laminaarille virtaukselle  $C = 2$ . Taulukoissa on usein  $1/\sqrt{C}$  (eli  $v = C$  kertaa jotain), laminaarissa virtauksessa  $1/\sqrt{C} = 0,71$ . Pumppu tai puhallin saa aikaan painelisäyksen  $\Delta p = H \rho g$ , jossa  $H$  on toimilaitteen kehittämä paine-ero ilmoitettuna nostokorkeutena. Teoreettisesti tämä tekee fluidiin työn  $W = Hgm$ , kun se siirtää lävitseen massallisen  $m$  fluidia. Tällä tavalla pystyt laskemaan sopivan putkiston ja tarvitsemasi pumpun tai puhaltimen. Lisäksi täytyy erikseen tarkastella, kestääkö putki haluttuja paineita ja paineiskuja, joita syntyy, kun nesteen kulku nopeasti lopetetaan venttiilillä. Neste liikkuu, joten sillä on liikemäärää, ja pysäytys tarkoittaa liikemäärän muutosta, joka opitun mukaan tarkoittaa isoja voimia jossakin.

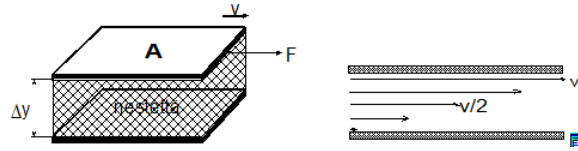
Laminaarissa virtauksessa suorassa putkessa tapahtuva kitkahäviö saadaan aiemmasta tilavuusvirran lausekkeesta (1.38), joka kertoi, mikä on painehäviö putken säteen ja tilavuusvirran funktiona. Tulos on

$$\underline{\Delta p = \phi_V \frac{8\mu}{\pi R^4} L = v \frac{8\mu}{R^2} L = \frac{64}{Re} \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho v^2 = 8f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho v^2} \quad (1.30)$$

jossa  $L$  on putken pituus ja  $D$  putken halkaisija. Yhtälöä kutsutaan **Fanningin yhtälöksi**. **Fanningin kitkatekijän**  $f$  määrittely näyttää jokseenkin omituiselta. Määrittely saa selityksensä seuraavasti. Poiseuillen virtausjakaumaa johdettaessa lähdettiin liikkeelle kitkavoiman ja painevoiman yhtäsuuruudesta. Tästä yhtäsuuruudesta saadaan selville paine-ero  $\Delta p$   $L$ :n mittaisessa putkessa:

$$\Delta p = 4\tau \frac{L}{D} = 8f \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot \frac{L}{D}, \text{ eli } f = \frac{\tau}{\rho v^2} \quad (1.31)$$

Jotkut määrittelevät  $f$ :n leikkausjännityksen ja dynaamisen paineen suhteena, jolloin  $f = 2\tau/(\rho v^2)$ . Toiset taas kirjoittavat  $8f$ :n tai  $4f$ :n sijasta  $f$ . Kitkatekijä löytyy kuvista  $Re$ :n ja putken pinnan karheuden funktiona, mutta edellä mainituista syistä ole tarkkana, mistä  $f$ :stä kuvissa milloinkin on kyse!



Kuva 1.3: Viskositeetin mittaus

Laminaarissa virtauksessa leikkausjännitys putken reunalla on

$$\tau(R) = \mu \left( \frac{dv}{dr} \right)_{r=R} = \frac{4v}{R} \mu. \quad (1.32)$$

Siispä L:n mittaista putkea yrittää siirtää eteenpäin voima

$$F = \tau A = \tau 2\pi RL = 8\pi\mu vL. \quad (1.33)$$

Virtausvastus on siis verrannollinen vauhtiin. Tämäntapainen voima hidastaa lentokoneen tai laivan liikumista. Jäänmurtajissa suihkutetaan vettä jään ja pellin väliin ja lentokoneiden ulkopintoihin suunnitellaan pieniä väkäsiä, jotka muuttaisivat virtauksen luonnetta sopivasti. Tässä yritetään matkia delfinejä, jotka liikkuvat vedessä kovempaa vauhtia kuin meidän yhtälömme antavat luvan, kun otetaan huomioon delfiinien potkurin teho. Virtauksen luonnetta muutetaan myös golfpallon kuopilla ja suksen pohjan urituksella.

Laminaarissa virtauksessa painehäviö on suoraan verrannollinen tilavuusvirtaan eli virtauksen keskimääräiseen vauhtiin, turbulentissa virtauksessa painehäviö lisääntyy vauhdin neliössä (eli f on jokseenkin vakio riittävän turbulentille virtaukselle). Sama pätee putken mutkiin, ulostuloihin, rajoittimiin ja hanoiin, joissa virtaus on aina enemmän tai vähemmän turbulenttista. Myös niissä painehäviöt ilmoitetaan dynaamisen paineen avulla;

$$\Delta p = \xi \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (1.34)$$

jossa  $\xi$  on **paikallisvastuskerroin** ja se löytyy taulukoista. Paikallisvastukset ovat tyypillisesti ykkösen suuruusluokkaa putken mutkille ja toimilaitteille. Yhtälö tulee suoraan Bernoullin yhtälöstä, jonka mukaan

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 - \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (1.35)$$

### 1.11.3 Kitkalliset laminaarivirtaukset

Tarkastellaan yksinkertaisinta kitkallista nestettä, joka noudattaa Newtonin viskositeettilakia. Vesi-kin on **Newtonin neste**. Samoin ilma. Nesteiden erilaista juoksevuutta luonnehtivaa ominaisuutta kutsutaan **juoksevuudeksi**. Juoksevuuden käänteislukua kutsutaan viskositeetiksi. Viskositeetti voidaan mitata seuraavan kaltaisella periaatteellisella järjestelyllä (kuva 1.3). Olkoon päällekkäin kaksi yhdensuuntaista levyä, joiden välissä on kerros d tutkittavaa nestettä.

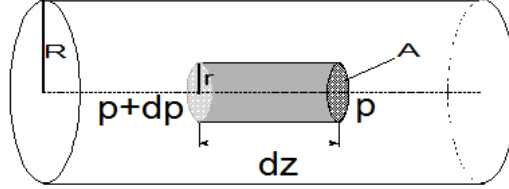
Vedetään päällimmäistä levyä **levyn suuntaisesti** voimalla F. Tällöin levy liikkukoon vauhdilla v. Kokeellisesti voidaan todeta monista nesteistä, että vauhti v on suoraan verrannollinen vetävään voimaan ja nestekerroksen paksuuteen  $\Delta y$  ja kääntäen verrannollinen levyn pinta-alaan A. Verrannollisuus suhteeseen  $F/A$  tulee siitä, että jos levyn pinta-ala kaksinkertaistuu, vetävän voiman täytyy myös kaksinkertaistua, jos halutaan levyn vauhdin pysyvän samana. Näiden geometrinen tekijöiden lisäksi vauhtiin vaikuttaa itse neste. Tälle vauhtiin vaikuttavalle ominaisuudelle annetaan nimi **viskositeetti**  $\mu$  ja se määritellään seuraavalla lausekkeella

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{v}{\Delta y} \quad (\text{Newtonin viskositeettilaki}) \quad (1.36)$$

Suhdetta  $\tau = F/A$  kutsutaan **leikkausjännitykseksi**. Edellä määritelty viskositeetti on itse asiassa **dynaaminen viskositeetti**. **Kinemaattinen viskositeetti** on  $\nu = \mu/\rho$ . Sen yksikkö on  $\text{m}^2/\text{s}$ . Tyypillisiä kinemaattisen viskositeetin arvoja on taulukossa 1.4.

Taulukko 1.4: Tyypillisiä kinemaattisen viskositeetin arvoja ( $\text{St} = \text{Stoke} = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$ )

Aine	$\nu$ cSt	$\nu$ m <sup>2</sup> /s
Vesi	1	$1 \cdot 10^{-6}$
Öljy	30	$30 \cdot 10^{-6}$
Ilma	15	$15 \cdot 10^{-6}$



Kuva 1.4: Nestepalanen

Viskositeetin määritelmään sisältyy nestekerroksen vauhtijakauma. Kun nestekerros menee olemattomiin, pitää vauhdinkin mennä nolnaan, jotta  $v/\Delta y$  säilyisi samana (kuva 1.3).  $v/d$ :n täytyy pysyä vakiona, jos kerran  $\mu$  on vakio. Siispä paikallaan olevan levyn reunalla nesteen vauhti on nolla. Vauhti kasvaa lineaarisesti etäisyyden muuttuessa, kunnes liikkuvan levyn reunalla virtausvauhti on  $v$ . Kunkin nestelevyn voidaan kuvitella vetävän alapuolella olevaa nestelevyä mukanaan aivan kuin nestekerroksen päällä oleva levy vetää koko nestekerrosta perässään.

**Nestekerrosten voidaan kuvitella liikkuvan toistensa suhteen. Kun ne liikkuvat eri vauhtia, niiden rajapinnat hankaavat toisiaan vastaan. Esiintyy kitkaa, jota viskositeetti kuvaa.** Todellisuudessa kyse on molekyylien törmäilyistä toistensa kanssa. Eri kerroksissa molekyylit liikkuvat keskimäärin vähän eri vauhtia, ja törmäyksissä ne siirtävät jatkuvasti liikemäärää toisilleen. Tästä enemmän myöhemmin.

Nyt meillä on apuvälineet määrittää nesteen vauhtijakauma **virtausputkessa** Newtonin nesteelle, kun virtaus on laminaaria. Tällaista virtausta kutsutaan **Poiseuillen virtaukseksi**. Sen sijaan että nestelevyt liikkuisivat toistensa suhteen (kuva 1.4), nyt sisäkkäiset nestesyylinterin kuoret liikkuvat toistensa suhteen. Keskellä putkea vauhti on ilmeisesti suurimmillaan ja reunoilla nolla. Jos mitataan etäisyyttä putken keskeltä reunoille  $r$ -koordinaatilla ja putken säde on  $R$ , on  $v(R) = 0$  ja  $v(0) = v_{max}$ . Ratkaistaan sitten, mikä on  $v(r)$ -jakauma. Otetaan putken keskeltä  $r$ -säteinen ja  $dz$ :n pituinen nestesyylinteri ( $z$ -koordinaatti on putken suunnassa) ja tarkastellaan siihen vaikuttavia voimia.

Nestepalan päiden välillä täytyy olla pieni paine-ero  $dp$ , joka työntää nestepalaa eteenpäin. Paine-erosta aiheutuva pieni työntövoima on  $dF = dp \cdot \pi r^2$ . Nestepala joutuu vetämään perässään ulkopuolellaan olevaa sylinterin kuorta, ja tasapainotilanteessa tämä kitkavoima on yhtä suuri kuin työntövoima  $dF$ . Kitkavoima saadaan viskositeetin määritelmästä. Pinta-ala on nestepalasan vaipan pinta-ala  $2\pi r dz$ . Saadaan kaikkiin nesteisiin pätevä virtausnopeuden tulos

$$v(r) = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} (r^2 - R^2) = v_{max} \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right), \quad v_{max} = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} R^2. \quad (1.37)$$

Tästä voidaan laskea tilavuusvirta  $\phi_V$  putken läpi

$$\phi_V = \int_0^R v(r) 2\pi r dr = \frac{\pi}{8\mu} \frac{dp}{dz} R^4 = \frac{R^2}{8\mu} \cdot \pi R^2 \frac{dp}{dz} = \underline{\underline{KA \frac{dp}{dz}}}. \quad (1.38)$$

**Nesteen saa siis liikkeelle paine-ero, ja ajavana voimana on painegradientti.** Tässä on otettu käyttöön käsite **hydraulinen johtavuus (hydraulinen konduktiviteetti) = K**. Kaavasta 1.38 nähdään, että tilavuusvirta laminaarisissa virtauksessa riippuu hyvin dramaattisesti putken säteestä,  $\phi_V \sim R^4$ .

**Virtauksen keskivauhti** tai keskimääräinen virtausnopeus voidaan nyt määritellä tilavuusvirran aiemman lausekkeen mukaisesti ( $\phi_V = vA$ )

$$\underline{\underline{v_k = \frac{\phi_V}{A} = \frac{1}{2} v_{max}}}. \quad (1.39)$$

Keskimääräinen virtausnopeus on siis laminaarisessa virtauksessa puolet putken keskiosan maksiminopeudesta. **Putken virtausnopeudella tarkoitetaan aina  $v_k$ :ta, joka on tilavuusvirta putkessa jaettuna putken poikkipinta-alalla.**

#### 1.11.4 Turbulentti virtaus (putkessa)

Milloin virtaus on laminaaria, pyörteetöntä? Tarkastellaan virtausta putkessa. Niin kauan kuin virtaus on laminaaria eli kerroksittaista, nestepalaset liikkuvat pitkin virtausviivoja, jotka ovat putken pituusakselin suuntaisia. Palaset eivät sekoitu keskenään. Palanen tarkoittaa suuruusluokkaa mooli molekyyliä, yksittäiset molekyylit toki liikkuvat myös poikkisuunnassa oman lämpöliikkeensä takia ja sekoittuvat toisiinsa. Tämä näkyy viskositeettina. Turbulentissa virtauksessa esiintyy palasten putken akselin suuntaisen siirtymisen ohella myös poikittaisliikettä, joka johtaa virtauspalasten jatkuvaan sekoittumiseen. Laminaari virtaus näyttää joka hetki samanlaiselta, turbulentti joka hetki erilaiselta. Virtaus muuttuu helpommin pyörteiseksi, jos neste on kovin herkkäliikkeistä eli sillä on pieni viskositeetti kuin vaikkapa tervan virtaus. Isossa putkessa voisi kuvitella herkemmin tapahtuvan fluktuaatioita, jotka johtavat kaottiseen käyttäytymiseen, kuin ohuessa putkessa, jossa ei ole tilaa poukkoilla muista nestepaloista riippumatta. Vertaa ihmisjoukkoa kulkemassa tunnelissa tai maantiellä. Tunnelissa on aika vaikeaa liikkua eri vauhdilla kuin lähellä olevat ihmiset. Erilainen vauhti johtaa törmäilyihin, viskositeetin kasvuun.

Tähän kaottiseen käyttäytymiseen on saatu hyväksi osoittautunut matemaattinen malli vasta 1960 - 1970-luvulta lähtien, ensin Mandelbrotin ja sitten lukemattomien muiden fyysikoiden ansiosta. Kaaosilmiöt ja niihin läheisesti liittyvät fraktaalit ovat tämän hetken fysiikan tutkimuksen eturintamaa. Ennen fraktaaleja oli tyytyminen (ja toki on enimmäkseen vieläkin) kokeellisesti mitattuihin arvoihin sekä dimensioanalyysin tuloksiin. Dimensioanalyysi perustuu siihen, että etsitään ilmiötä kuvaavia dimensiottomia muuttujia eli muuttujajoukkoja, jotka ovat pelkkiä lukuja. Tällöin voidaan ajatella, että ilmiön luonne ei muutu, vaikka geometriset ja muut tekijät muuttuvat, kunhan pidetään huolta siitä, että tilanteeseen sopiva dimensioton luku on sama kussakin tapauksessa. Virtaukseen liittyvä dimensioton luku on nimeltään **Reynoldsin luku** keksijänsä mukaan

$$Re = \frac{\rho v_k d}{\mu} = \frac{v_k d}{\nu}, \quad (1.40)$$

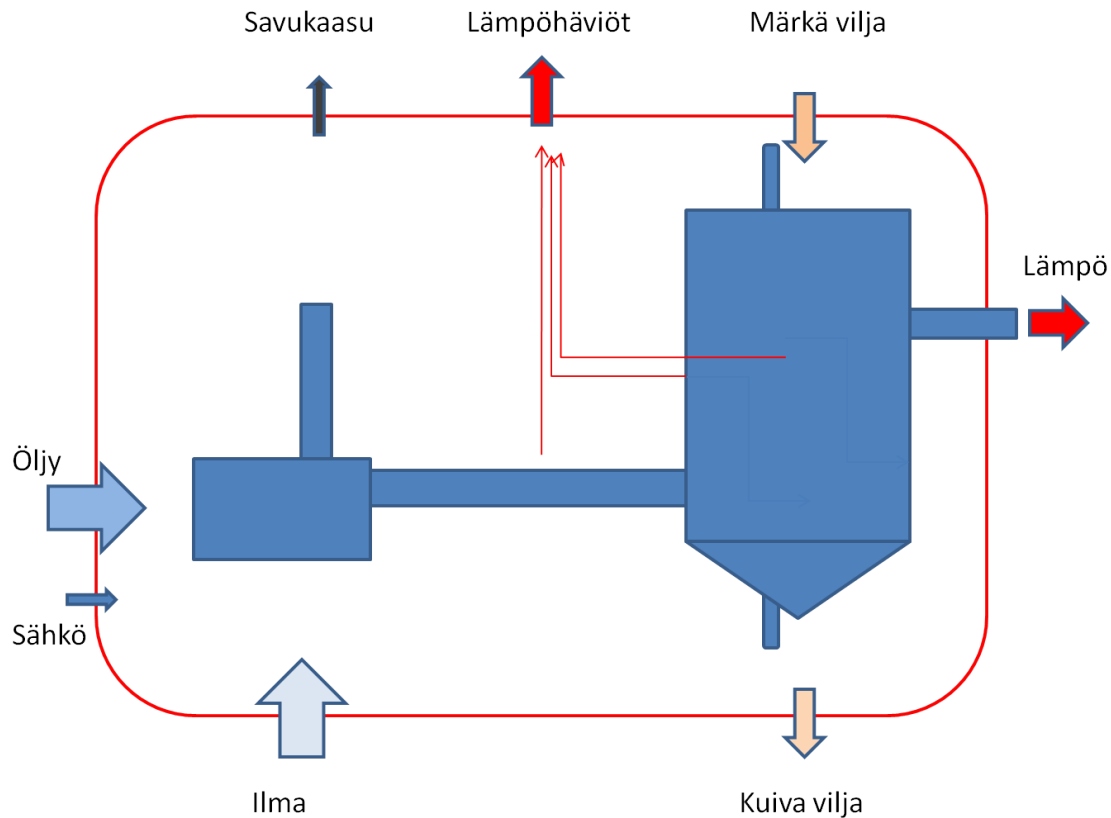
joka kuvaa hitausvoimien (paino,  $\rho$ ) suhdetta kitkavoimiin (viskositeetti  $\mu$ ).  $\rho$  on fluidin tiheys,  $v$  keskimääräinen vauhti ja  $d$  on karakteristinen pituus (putkivirtauksessa putken halkaisija on karakteristinen pituus). Jos kitkavoimat ovat isoja hitausvoimiin verrattuna, virtaus on laminaaria. Jos kitkavoimat ovat pieniä, virtaus on turbulenttia. Reynolds totesi kokeillaan, että virtaus *putkessa* on laminaaria, jos  $Re < 2100$  ja turbulenttia jos  $Re > 4000$ . Näiden lukujen välillä se voi olla kumpaa vain tai ei oikein kumpaakaan tapauksesta ja historiasta riippuvasti. Sopivin järjestelyin virtaus voi pysyä laminaarina virtausnopeuden kasvaessa, vaikka  $Re \simeq 4000$  ylittyisikin, mutta turbulentin virtauksen saa laminaariksi vasta kun  $Re < 2100$ .

**Esimerkki.** Viljankuivurin putken halkaisija on 630 mm ja puhaltimen antama ilmamäärä on 9800 m<sup>3</sup>/h. Mikä on ilman keskimääräinen virtausnopeus ja onko virtaus laminaarista vai turbulenttista?

Virtauspoikkipinta-ala saadaan putken halkaisijasta,  $A = \frac{\pi \cdot 0,63^2}{4} = 0,292 \text{ m}^2$ . Tilavuusvirta perusyksikkönä on,  $q_V = 9800/3600 = 2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ .  $v_k = \frac{2,7}{0,29} = 9,3 \text{ m/s}$  eli n 34 km/h. Kyseessä on ilma, jonka kinemaattinen viskositeetti on 15 cSt ja  $Re = \frac{9,3 \cdot 0,61}{15 \cdot 10^{-6}} = 378 \text{ 800}$  eli virtaus on reilusti turbulenttista.

Tuloksillamme on käytännön merkitystä. Nähdään heti, että jos putkistossa ei ole paine-eroa, jolloin  $dp = 0$ , ei ole myöskään virtausta. Mitä viskoosimpaa neste on ( $\mu$  on iso), sitä isompi paine-eron täytyy olla tietyn virtausnopeuden ja tilavuusvirran aikaansaamiseksi. Paine-ero syntyy pumpuissa tai siitä, että putken päät ovat eri korkeuksilla. Tilavuusvirtaan vaikuttavat lisäksi putken pituus ja erityisesti putken halkaisija. Putken halkaisija on rahakysymys, riippuu tilanteesta, kannattaako investoida puhaltimeen vai putkistoon.

Kuten tullaan havaitsemaan, laminaarissa liikkeessä putken reunoilla olevalla rajakerroksella on ratkaiseva merkitys lämmön siirtymisessä. Laminaarissa virtauksessa putken poikkisuunnassa lämpö pysyy siirtymään vain johtamalla eli molekulaarisen diffuusion avulla. Sama diffuusio aiheuttaa myös



Kuva 1.5: Kuivauksen massa- ja energiavirrat

viskositeetin. Tämän jälkeen ei ole yllättävää, että viskositeetin ja lämmön johtumisen välillä on riippuvuutta. Kaasuvirtauksissa ne ovat jokseenkin yhtä isot sopivissa yksiköissä esitettynä. Lämmön johtuminen on hidas prosessi verrattuna virtauksen mukana kuljettumiseen, konvektioon. Turbulentissa virtauksessa on pieniä ja suuria pyörteitä, joissa myös lämpö siirtyy. Myös pyörteiden synnyttämää lämmön konvektiosiiirtymistä voidaan tarkastella diffuusion omaisena prosessina. Pyörteet toimivat vähän kuin diffuusio, tosin useassa eri pituusskaalassa. Kaaosteoria olettaa, että jokin ilmiö tapahtuu samaan aikaan monessa eri pituusskaalassa, ja teoria sopii sen vuoksi hyvin turbulenssin kuvailuun. Laminaarissa virtauksessa paine- ja energiahäviöt ovat suoraan verrannollisia virtausnopeuteen, turbulentissa suurin piirtein nopeuden toiseen potenssiin.

## 1.12 Aine- ja energiatase

Kaikissa yksikköprosesseissa pätevät energian ja aineen (yksikkönä kg, mooli, lukumäärä) säilymislait. Niihin perustuvat prosessien matemaattiset yhtälöt, joiden avulla prosessin hallinta, säätö ja automatisointi tapahtuvat. Näin myös kuivurissa. Aine- ja energiataseet ovatkin avainasemassa kun laskemme systeemien kuten kuivauksen toteutumista.

### 1.12.1 Tasapaino yleisesti

Tarkastellaan jonkin suureen  $G$  (= energia, ainemäärä, raha ...) määrän muuttumista ns. kontrolli- tai tarkastelutilavuudessa kuvan 1.5 mukaisesti.

Silloin suureen, jota merkitään nyt vaikka  $G$ :llä säilyminen edellyttää, että pätee että  $G$ :n muutos =  $G$ :n lisäys ( $q_{Gsisään}$ ) -  $G$ :n poistuma ( $q_{Gulos}$ ) +  $G$ :n tuotanto ( $P_G$ ) tarkasteluaanjaksolla:

$$\frac{\Delta G}{t} = q_{Gsisään} - q_{Gulos} + P_G \quad (1.41)$$

Lausekkeen tekijöinä olevat virrat  $q$  ja  $P$  tarkoittavat energian ja aineiden muutoksia aikayksikössä

(sekunti, s). Energiaa mitataan yksiköissä joule (J), joten energian muutos ajassa on tehoa, jonka yksikkö on watti (W;  $W = J/s$ ). Ainetta voidaan mitata joko massana (yksikkö kilogramma, kg) tai tilavuutena (yksikkö kuutiometri,  $m^3$ ), joten ainevirrat, jotka siis ovat aineen määrän muutoksia aikayksikössä, ovat aineen mittaustavasta riippuen joko massavirtoja (yksikkö kg/s) tai tilavuusvirtoja (yksikkö  $m^3/s$ ).

Viljan kuivauksessa taseyhtälössä voidaan tarkastella kuivan ilman määrää. Ilmahan kostuu kuivauksessa eli siihen tulee lisää massa ja ilman kokonaismassavirta ei säily. Kuivaa ilmaa sen sijaan tulee sisään yhtä paljon kuin menee ulos, joten taseyhtälössä aine- ja energiamäärät ovat tämän takia kuivailmakiloa kohti.

Toisaalta voisimme tarkastella veden tasevirtaa, kuivuriin tulee vettä viljan kosteutena ja ilman kosteutena. Osa viljan kosteudesta siirtyy ilmaan. Kun tarkastellaan kuivuriin tullutta ja poistunutta vesimäärää, näiden pitää olla samoja, jotta kyseessä olisi tasapainotila. Ilman mukana poistuva kosteus voidaan laskea ilman tilasta ennen ja jälkeen kuivurin. Viljasta poistuva kosteus voidaan laskea viljamäärän ja viljan kosteuden avulla. Meille siis riittäisi periaatteessa jompi kumpi tapa kosteuden poistumisen mittaamiseen. Jos mittaamme sen kummallakin tavalla, voimme verrata saimmeko saman tuloksen. Jos suuruusluokka on erilainen, jossain on virhe tai kuivurista poistuu vettä muualtakin kuin poistoputkiston kautta.

Samalla tavalla voimme tehdä kuivurilla energiataseen. Määritetään kuivurin menevän ja poistuvan ilman energiamäärät. Kuivurissa tapahtuu käytännössä lämpöhäviöitä ja kuivuriin menevän ja sieltä poistuvan lämpömäärän erotus on sen lämpöhäviö.

### 1.12.2 Energiatase

Voidaan esimerkiksi tarkastella virtauksen mukana kulkevaa energiaa virtauksen massayksikköä kohti, esimerkiksi kineettistä energiaa:  $\frac{1}{2}mv^2/m = (1/2)v^2$ . Mutkistetaan nyt tilannetta tuomalla putkessa virtaavaan fluidiin energiaa  $\Delta Q$ :n verran. Silloin sen lämpötila nousee:  $\Delta Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$ . Tässä  $c_p$  on fluidin ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa. Sanotaan, että sen sisäenergia  $U$  muuttuu määrällä  $\Delta U = \Delta Q$ ,  $u = U/m$ . Fluidin energiasisällöksi saadaan

$$e = \frac{E}{m} = u + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = h + \frac{v^2}{2} + gz \quad (1.42)$$

tai

$$e = \frac{E}{V} = u + p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gz \quad (1.43)$$

jossa  $h$  on entalpia massayksikköä kohti. Fluidin mukana kulkeva energiavirta on

$$q_e = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{E}{V} \frac{\Delta V}{\Delta t} = eq_V \quad (1.44)$$

On suoraviivaista laskea virtauksen mukana siirtyvä lämpövirta

$$q_q = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(mcT)}{dT} = cTq_m = cT\rho q_V \quad (1.45)$$

jossa  $q_m$  on massavirta ja  $c$  virtaavan fluidin ominaislämpökapasiteetti. Tässä  $T$  on virtauksen lämpötila. Sen nollakohta voidaan vapaasti valita. Oleellistahan on vain systeemiin menevän ja sieltä poistuvan fluidin lämpötilan muutos. Entalpia  $h$  on nyt kutistunut muotoon  $cT\rho$ . Kuivauksessa tapahtuu myös olomuodon muutoksia, jotka täytyy entalpian lausekkeessa ottaa huomioon.

Tarkastellaan energiatasetta, kun jotain kappaletta lämmitetään vedellä, jonka massavirta on  $q_m$ , ja ominaislämpökapasiteetti  $c$ . Sisään tulevan veden lämpötila on  $T_{in}$ , ulos virtaavan  $T_{out}$ . Silloin kappaleeseen tuotava energia aikayksikössä on

$$\frac{dE}{dt} = cT_{in}q_m - cT_{out}q_m = cq_m(T_{in} - T_{out}) \quad (1.46)$$

Tämä on systeemin energiatase. Se kertoo vain, että energiaa ei joudu hukkaan.

**Esimerkki.** Viikin kuivurissa uunin teho on 150 kW ja ilmaa menee uunin läpi 10000 m<sup>3</sup>/h. Ilma lämpiää siis

$$T_{in} - T_{out} = \frac{P}{cq_m} = \frac{P}{c\rho q_V} = \frac{150}{1 \cdot 1 \cdot \frac{10000}{3600}} = 54^\circ C$$



## 2 Ilma kuivausaineena

Ilma kuivausaineena tarkoittaa, että ilma tuo veden höyrystämiseen tarvittavan energian ja vie haihtuneen vesihöyryn pois. Tässä luvussa käydään läpi tähän kuuluvat, kuivausprosessin oleellimmat asiat, paljonko ilmassa on energiaa ja paljonko ilmaan mahtuu vettä.

Ilma on eri kaasujen sekoitus. Eniten siinä on typpeä (N) 78,1 tilavuusprosenttia ja seuraavaksi happea (O<sub>2</sub>) 21,0 tilavuusprosenttia. Lopun muodostavat eri jalokaasut ja hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>, 300 ppm). Kaasujen lisäksi ilmassa on vesihöyryä, jonka määrä vaihtelee olosuhteiden mukaan. Ilman tilaa tarkasteltaessa sekä ideaalikaasulaki että kaasuseoksia käsittelevä Daltonin laki pätevät. Ilman tilaa tarkasteltaessa sille on olemassa omia nimityksiä, kuten: kastepiste (saturation), kuiva lämpötila (dry bulb temperature), märkälämpötila (wet bulb temperature), kastepistelämpötila (dew point temperature), suhteellinen kosteus RH ja kosteussuhde (absoluuttinen kosteus). Ilma on usein pakosta tai vapaaehtoisesti mukana eri prosesseissa, kuten palaminen, ilmanvaihto, kuivaus ja pneumatiikka. Vesihöyryn määrä ilmassa vaihtelee ja sen määrä vaikuttaa mikrobien elintoimintoon, ilman kuivauskykyyn ja ilman lämpösisältöön. Vesihöyry sitoo haihtuessaan paljon lämpöä ja siksi sen vaikutus lämpösisältöön on oleellinen. Ilman tilalaskuissa käytetään yksikkönä kuivaa ilmakiloa, koska kuivan ilman määrä ei muutu kosteuden muuttuessa. Kosteaa ilmaa on ilman ja vesihöyryn seos. Kosteaa ilmaa on osakaasujen paineiden summa (ilman ja vesihöyryn, Daltonin laki). Ilma voi sisältää vesihöyryä vain tietyn kokonaismäärän (osapaineen), ylimääräinen vesihöyry muuttuu vedeksi. Vesihöyryn maksimitilaa nimitetään kastepisteeksi, koska vesi alkaa tiivistyä (kondensoitumaan) tässä tilassa. Kastepisteen läheisyys ilmaistaan suhteellisen kosteuden avulla. Ilman tila esitetään usein nomogrammin avulla, näistä yleisin on Mollier-diagrammi. Ilman tila saadaan myös laskemalla. Internetistä on löydettävissä useita tällaisia laskimia. Ne voi löytää hakusanalla "psychrometric calculator" avulla. Eri laskentatavat voivat antaa hieman poikkeavia tuloksia johtuen siitä minkälaisia yhtälöitä laskennassa on käytetty.

### 2.1 Kaasulaki

Ilma noudattaa melko hyvin ideaalikaasulakia, yhtälö 2.1. Ainoastaan korkeissa paineissa ja korkeissa lämpötiloissa se poikkeaa siitä.

$$pV_m = RT \quad (2.1)$$

$$p = \frac{\rho RT}{M} \quad (2.2)$$

Kaasujen moolimassoja M on taulukossa 2.1. Normaali ilmanpaine on 1 atm = 101325 Pa ja yleisen kaasuvakion R arvo on 8,3143 J/(K mol).

Kaasulaki pätee myös kuhunkin ilman seoskaasuun erikseen, laskuissa paine on kyseisen kaasun osapaine ja moolimassa kyseisen kaasun moolimassa. Daltonin mukaan kaasuseoksen kokonaispaine on osakaasujen osapaineiden summa. Ilman kokonaispaine on siis kuivan ilman ja vesihöyryn osapaineiden summa.

Taulukko 2.1: Kaasujen moolimassoja

Kaasu	Moolimassa kg/kmol
Kuiva ilma	28,97
Typpi	28,02
Happi	32,00
Hiilidioksidi	44,01
Vesihöyry	18,00

## 2.2 Ilman tiheys

Kuivan ilman tiheys voidaan laskea ideaalikaasulain mukaisesti yhtälöstä 2.1 ratkaisemalla siitä tiheys, yhtälö 2.3.

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (2.3)$$

**Esimerkki.** Mikä on kuivan ilman tiheys normaalipaineessa, kun lämpötila on 20 C ?

Yhtälössä käytetään lämpötilan yksikköinä kelviniä eli  $T=273,15 + 20 = 293,15$  K. Tiheys  $\rho = \frac{pM}{RT} = \frac{101325 \cdot Pa \cdot 28,97 \cdot kg \cdot mol \cdot K}{kmol \cdot 8,3147 \cdot J \cdot 293,15 \cdot K} = 1,20$  kg/m<sup>3</sup>.

Kostean ilman tiheys on kuivan ilman tiheyden ja vesihöyryn tiheyksien summa. Vesihöyryn tiheys saadaan laskettua yhtälön 2.3 avulla käyttämällä paineena vesihöyryn osapainetta ja moolimassana vesihöyryn moolimassaa.

## 2.3 Ilman kosteus

Normaali ulkoilma on kuivan ilman ja vesihöyryn seos. Vesihöyryä ei kuitenkaan voi olla ilmassa rajattomasti, vaan sillä on tietty lämpötilasta riippuva suurin määrä. Jos ilmassa on liikaa vesihöyryä, ylimääräinen osuus siitä tiivistyy vedeksi ja ilma tulee kastepisteeseen. Ilman vesihöyrypitoisuus ilmoitetaan yleensä veden massana kuivaa ilmakiloa kohti ja sitä kutsutaan kosteussuhteeksi tai absoluuttiseksi kosteudeksi, yhtälö 2.4.

$$x = \frac{m_v}{m_i} \quad (2.4)$$

x ilman kosteussuhde  
 $m_v$  ilmassa olevan vesihöyryn massa  
 $m_i$  kuivan ilman massa

Maataloudessa ja puhekielessä ilman kosteutena käytetään suhteellista kosteutta, joka ilmaisee kuinka lähellä kastepistettä ollaan, kun lämpötila ja ilmanpaine on määrätty. Kun suhteellinen kosteus on 100%, ilma ei pysty sitomaan enempää vettä ja ilman sanotaan olevan kylläinen ja sitä vastaavaa vesihöyryn osapainetta sanotaan kylläisen vesihöyryn paineeksi. Suhteellinen kosteus esitetään prosentteina, yhtälö 2.5.

$$RH = \frac{p_v}{p_k} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

RH suhteellinen kosteus  
 $p_v$  ilmassa olevan vesihöyryn osapaine  
 $p_k$  kylläisen vesihöyryn paine

Se kuinka paljon ilmaan mahtuu vettä riippuu etenkin lämpötilasta. Kylmä ilma pystyy sitomaan vain vähän vettä ja kuuma ilma paljon. Jos ilman lämpötila muuttuu ilman että ilman vesimäärässä (kosteussuhteessa) tapahtuu muutosta, myös ilman suhteellinen kosteus muuttuu, koska ilman veden sitomiskyky muuttuu ja suhteellinen kosteus ilmaisee vain sen kuinka lähellä kylläistä tilaa ollaan. Näin käy esimerkiksi kuivurin uunissa. Jos uunin imuilman lämpötila on vaikka 10 °C ja suhteellinen kosteus 70%, uunin jälkeen lämpötila voi olla vaikka 70 °C ja suhteellinen kosteus on vain 3 % luokkaa. Ilman vedensitomiskyky parani lämmityksen ansiosta reilusti. Ilman kosteussuhde sen sijaan säilyy samana. Ilmassa on ennen ja jälkeen lämmittämisen n 5 g vettä jokaista kuivaa ilmakiloa kohti.

Sijoittamalla tiheys  $\rho = \frac{m}{V}$ , yhtälöön 2.4 saadaan kosteussuhteelle kaava  $x = \frac{\rho_v}{\rho_i}$ . Sijoittamalla tuohon yhtälön 2.3 mukaiset ilman ja vesihöyryn tiheydet saadaan  $x = \frac{M_v \cdot p_v}{M_i \cdot p_i}$ . Ilman kokonaispaine p on kuivan ilman  $p_i$  ja vesihöyryn  $p_v$  osapaineiden summan, jolloin saadaan  $p = p_i + p_v$  ja  $p_i = p - p_v$ . Sijoittamalla tämä ja kummankin moolimassat edellä olevaan kosteussuhteen yhtälöön saadaan yhtälö 2.6, joka ilmaisee ilman kosteussuhteen paineiden avulla. Ilman tilaa mitattaessa pystymme

mittaamaan suhteellisen helposti ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan. Näiden avulla meidän on laskettava ilman kosteussuhde ja silloin yhtälöämme tarvitaan.

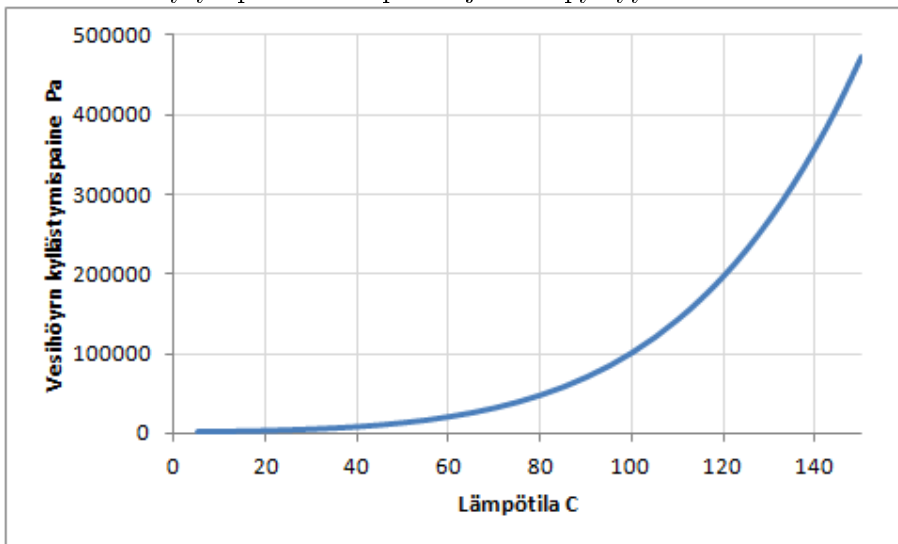
$$x = 0,6220 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (2.6)$$

Ilma voi sisältää vain tietyn maksimaalisen määrän vesihöyryä. Tätä tilaa kutsutaan kyllästymislaksiksi ja sitä vastaavaa vesihöyryn osapainetta kylläisen vesihöyryn paineeksi. Jos jäähdytämme vaikka huonetilaa, ilman että sen kosteussuhde muuttuu, lämpötilan aleneminen aikaan saa suhteellisen kosteuden kasvun. Kun lämpötila on tullut niin alas, että suhteellinen kosteus on 100%, meillä on kastepistelämpötila. Jos vielä jäähdytämme huonetta, kaikki vesi ei mahdu ilmaan ja ylimääräinen vesi tiivistyy vesipisaroiksi (kondensoituu). Käytännössä tilassa on aina joitakin kylmiä pintoja, esimerkiksi ikkunat, joissa tiivistyminen ensiksi alkaa.

Kylläisen ilman paineet saadaan taulukoista tai yhtälöistä. Esimerkiksi standardissa [?] on annettu empiiriset laskentayhtälöt. Seppänen ([?]) antaa laskuja varten yhtälön 2.7. Yhtälö on laadutettu ja antaa kyllästymispaineen Pascaleina, kun lämpötila on Kelvineinä.

$$p_{kas} = \frac{e^{77,345+0,0057T - \frac{7235}{T}}}{T^{8,2}} \quad (2.7)$$

**Esimerkki.** Laske vesihöyryn kylläisen vesihöyryn paine lämpötilan funktiona. Lasketaan yhtälö 2.7 lämpötilavälillä 0 C - +150 C. Tulos on alla olevassa kuvassa. Lämpötilan kohoaminen suurentaa kylläisen vesihöyryn painetta nopeasti ja ilma pystyy sitomaan lisää kosteutta.



## 2.4 Kosteuden mittaaminen ja laskenta

Mittalaitteet antavat ilman tilaa mitattaessa yleensä lämpötilan (kuivalämpötilan) ja suhteellisen kosteuden. Uusimmissa mittalaitteissa voidaan saada myös kastepistelämpötila ja kosteussuhde (absoluuttinen kosteus). Kun lämpötila ja suhteellinen kosteus on mitattu, kosteussuhde saadaan seuraavasti:

- Lasketaan mikä on kylläisen ilman vesihöyryn osapaine (suurin mahdollinen vesihöyryn osapaine), yhtälö 2.7.
- Lasketaan mikä on ilmassa olevan vesihöyryn todellinen osapaine  $p_v$ , tämä saadaan ratkaisemalla  $p_v$  yhtälöstä 2.5.
- Lasketaan kosteussuhde  $x$  yhtälöstä 2.6.

**Esimerkki.** Navetan suhteellinen kosteus on 87 % ja lämpötila 10 C, mikä on ilman kosteussuhde ?

Lasketaan ensin kylläisen vesihöyryn osapaine yhtälön 2.7 mukaisesti.  $p_{kas} = \frac{e^{77,345+0,0057 \cdot 283,15 - \frac{7235}{283,15^8,2}}}{283,15^8,2} = 1224$  Pa. Vesihöyryn osapaine on siten  $p_v = RH \cdot p_{kas} = 0,87 \cdot 1224 = 1065$  Pa. Kosteussuhde on  $x = 0,6220 \frac{p_v}{p - p_v} = 0,6220 \frac{1065}{101325 - 1065} = 0,0066$  kg vettä kuivaa ilmakiloa kohti. Jos lasketaan kyläistä tilaa 1224 Pa vastaava kosteussuhde, saadaan 0,0076 kg H<sub>2</sub>O/kg ilmaa eli ilmaan mahtuisi vielä 1 g vettä jokaista kuivaa ilmakiloa kohden ennenkuin tultaisiin kylläiseen tilaan (kastepisteeseen).

## 2.5 Ilman entalpia

Kostean ilman (jossa vesihöyryä  $m_v$  kg, kuivaa ilmaa  $m_i$  kg) lämpösisältö eli entalpia  $H$  on

$$H = c_i m_i T + m_v (l_h + c_h T). \quad (2.8)$$

Ensimmäinen termi edustaa kuivaa ilmaa ( $c_i$  on ilman ominaislämpökapasiteetti vakioapaineessa,  $c_i = 1,007$  kJ/(kg K)) ja jälkimmäinen vesihöyryä. Lausekkeen mukaan entalpia on nolla (näin on siis sovittu entalpian nollakohta), kun  $T = 0$  °C ja ilma on kuivaa. Siis  $T$  on celsiusasteissa Mollierin diagrammissa. Lämpötilasta riippuva veden höyrystymislämpö on  $l_h$  ja vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti on  $c_h$ . Veden höyrystymislämpö 0 °C lämpötilassa on 2502 kJ/kg ja vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti on 1,87 kJ/(kg K). Kun lauseke 2.8 jaetaan kuivan ilman massalla  $m_i$ , saadaan

$$h = \frac{H}{m_i} = c_i T + x(l_h + c_h T). \quad (2.9)$$

**Esimerkki.** Ilman kosteus on 87 % ja lämpötila on 10 C, mikä on sen lämpösisältö? Edellisen esimerkin mukaisesti kosteussuhde on 0,0066 kg/kg. Kuivan ilman lämpösisältö  $h_i = c_i T = 1,007 \text{ kJ/kgC} \cdot 10 \text{ C} = 10,07$  kJ/kg. Vesihöyryn lämpösisältö on  $h_v = l_h + c_h T = 2502 \text{ kJ/kg} + 1,87 \text{ kJ/kg C} \cdot 10 = 2521$  kJ/kg. Kostean ilman lämpösisältö  $h = h_i + x h_v = 10,07 + 0,0066 \cdot 2521 = 26,7$  kJ/kg.

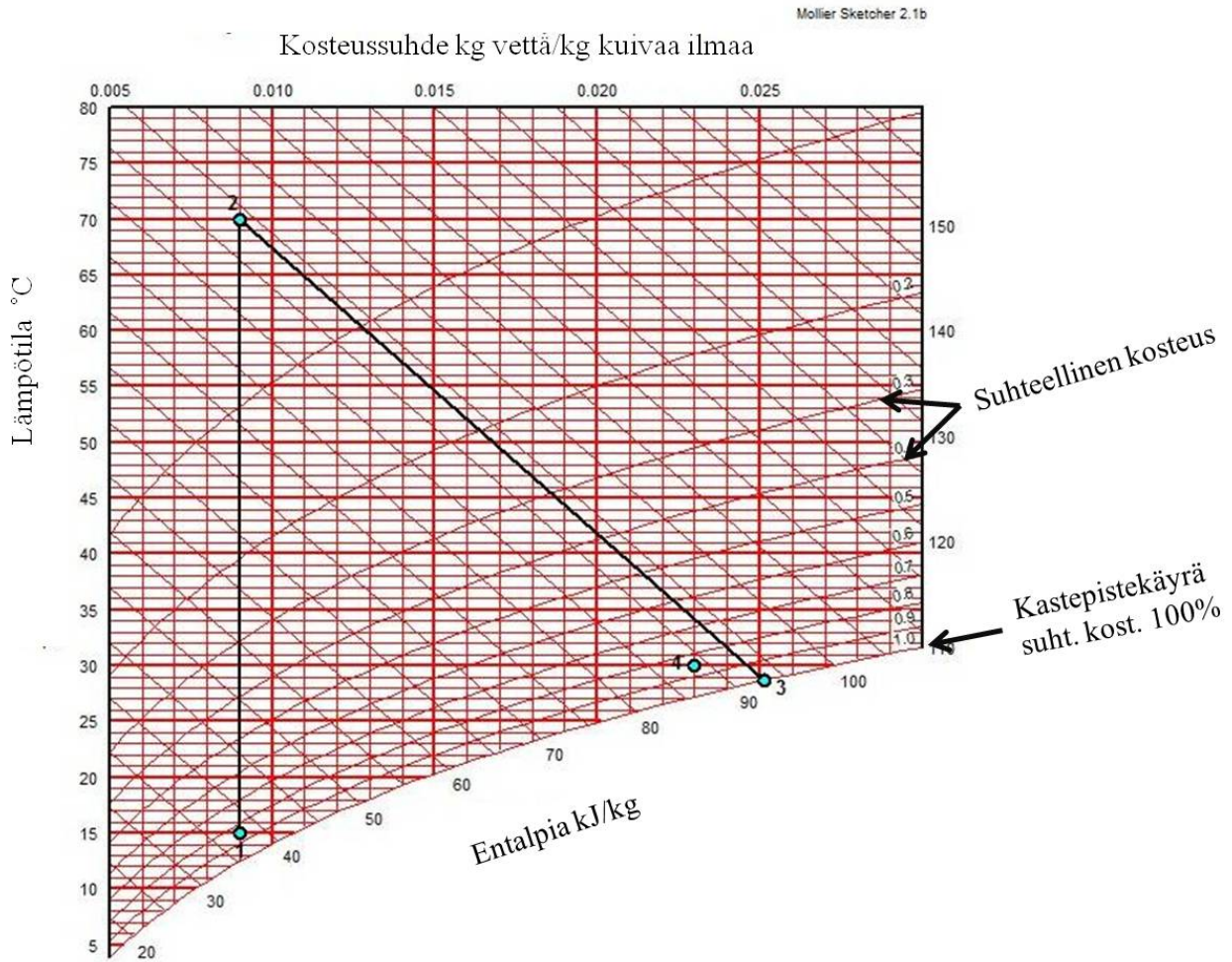
## 2.6 Mollierin diagrammi

Aikoinaan kun tietokoneita ei vielä ollut käytettävissä tekniset asiat ilmaistiin taulukoiden ja nomogrammien avulla. Niitä käytettäessä saatiin nopeasti laskuissa tarvittavat arvot. Ilman tila ilmaistiin Mollier-diagrammin avulla. Vaikka tietokoneet ovat korvanneet taulukot ja nomogrammit, niistä on silti hyötyä. Richard Mollier oli soveltavan fysiikan professori Saksassa 1900-luvun alkupuolella ja hän kehitti ilman tilan diagrammin. Amerikkalaisessa maailmassa käytetään vastaavasti Carrier-diagrammeja. Siinä on samat asiat kuin Mollier diagrammissakin, mutta kuva on piirretty hieman erilailla. Netistä voit löytää lisätietoja näistä kirjoittamalla hakusanaksi 'psychrometric chart'.

Mollierin diagrammi on näppärä tapa nähdä, mitä kuivauksessa tapahtuu. Kuvassa 2.1 on piirretty Mollier-diagrammiin neljä pistettä. Piste 1 on kuumailmakuivurin uunin imuilman tila, piste 2 on ilman tila uunin jälkeen ja piste 3 kuivauksennosta poistuttaessa. Tilapisteet menevät tähän tapaan, jos kuivurikoneikossa ei ole ilmavuotoja eikä lämpöhäviöitä. Puhumme adiabaattisesta prosessista eli ilman lämpösisältö (entalpia) säilyy samana koko prosessin aikana. Kuvaan 2.1 on piirretty pisteen 3 viereen piste 4. Todellisuudessa kuivurissa on lämpöhäviöitä (kuivuri ei ole eristetty) ja tilapiste siirtyy hieman sivuun ja lisäksi poistoilman kosteus saavuttaa vain alkuvaiheessa 100% arvon. Itse asiassa emme kuivausprosessissa hävitä ilman energiaa (entalpiaa) vaan se säilyy samana. Ennen kuivuria lämpötila on korkea ja suhteellinen kosteus alhainen. Kuivurissa veden sitoutuminen ilmaan alentaa lämpötilaa ja kohottaa suhteellista kosteutta. Lopulta puhallamme kylläkin tämän energian kuivurista ulos. Lämmönvaihtimilla voisimme hyödyntää poistoilman energiaa ja käyttää sitä uudelleen.

Mollierin diagrammin tekemiseen ja ilman tilapisteillä laskemiseen löytyy omat tietokoneohjelmansa. Tässä monisteessa on käytetty Mollier Sketcher ohjelmaa, joka on ilmaisohjelma ja saatavissa osoitteesta <http://www.ivprodukt.se/Produktvalsprogram.aspx>.

Mollierin diagrammissa on yleensä vaaka-akselilla kosteussuhde  $x$  ja pystyakselilla lämpötila  $T$  celsiusasteina (kuva 2.1). Kylläisen höyryn eli  $x_s(T)$ - käyrä (RH=100%) on saatu mittauksista. Sen jälkeen



Kuva 2.1: Esimerkki Mollier diagrammista

on voitu piirtää RH-käyrät  $x/x_s \cdot 100$ . Näiden lisäksi diagrammista löytyy kostean ilman vakioentalpiasuorat. Mistä ne saadaan?

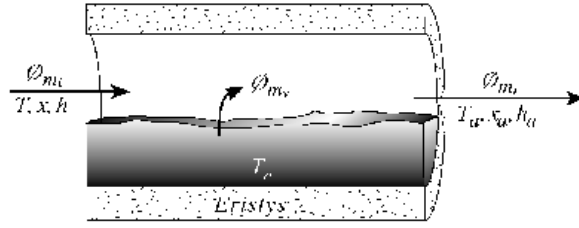
Vakioentalpiasuoraa pitkin liikuttaessa  $h$  pysyy muuttumattomana, kun ilman kosteus ja lämpötila muuttuvat:

$$0 = \Delta h \approx c_i \Delta T + \Delta x (l_h + c_h T) \approx c_i \Delta T + \Delta x l_h \text{ eli } \frac{\Delta T}{\Delta x} \approx -\frac{l_h}{c_i} \approx 2500 \text{ K.} \quad (2.10)$$

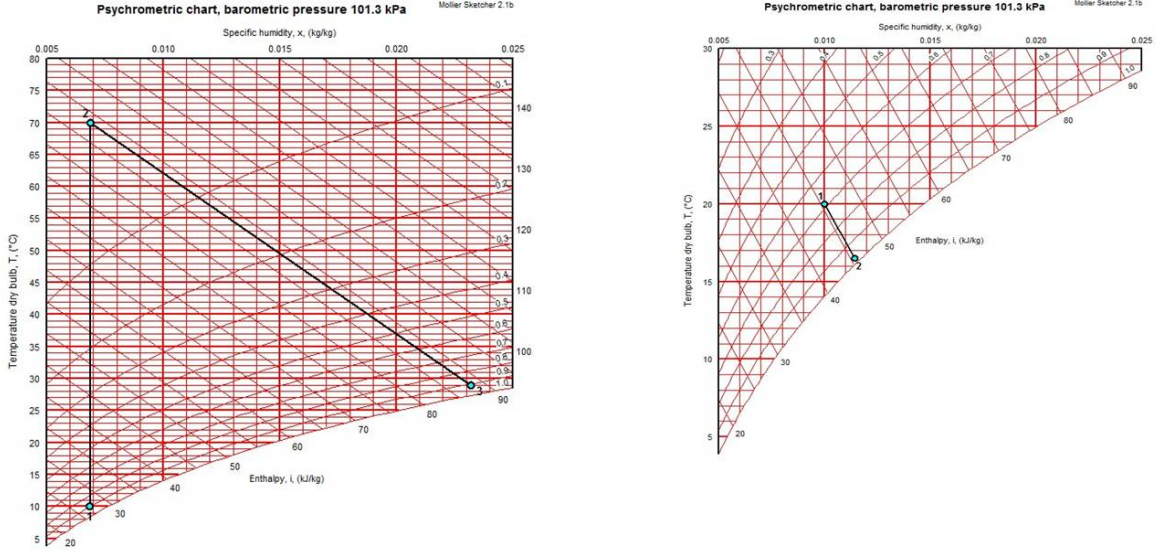
Tämä on vakioentalpiasuoran kulmakerroin. Huomaa, että kulmakerroin on 2500 K/(kg vesihöyryä / kg kuivaa ilmaa) tai 2,5 K/(g vesihöyryä / kg kuivaa ilmaa). Tässä approksimatiivisessa laskussa on oletettu, että  $c_i$ ,  $l_h$  ja  $c_h$  eivät riipu lämpötilasta. Lisäksi  $l_h = 2500 \text{ kJ/kg} \gg 1 \text{ kJ/(kgK)} \cdot 100 \text{ K} > c_h T$ . Kun liikutaan vakioentalpiasuoraa pitkin ilman lämpösisältö pysyy koko ajan samana. Ilman kosteuden lisääntyessä ilman lämpötilan pitää olla alempi, jotta lämpösisältö pysyisi samana. Tämähän nähdään jo entalpien yhtälöstä 2.8.

Tarkastellaan esimerkkinä  **kylmäilmakuivuria**  eli **adiabaattista kostutusta**. Siinä kaikki veden höyrystämiseen tarvittava lämpö otetaan sisään tulevasta ilmasta. Oletetaan kuvan 2.2 tilanne. Hyvin eristettyyn äärettömän pitkään astiaan, jossa on vettä, tulee ilmavirta, jossa kuivan ilman massavirta on  $q_{m_i}$  ja jonka lämpötila on  $T$ , absoluuttinen kosteus  $x$  ja entalpia kuivailmakiloa kohti  $h$ . Ilma luovuttaa lämpöään säiliössä olevaan veteen eli haihduttaa vettä, kunnes niiden lämpötilat ovat samat. Tämä lämpötila ( $T_a = \text{adiabaattinen lämpötila}$ ) on alin mahdollinen lämpötila, johon ilma kostuttamalla saadaan. Silloin ilman kosteus on  $x_a$  ja entalpia  $h_a$ . Ilmassa on silloin vettä niin paljon kuin siihen tässä

## 2 Ilma kuivausaineena



Kuva 2.2: Ilman adiabaattinen kostutus



Kuva 2.3: Mollier-diagrammi, vasemmalla kuumilmakuivuri, oikealla kylmäilmakuivuri

lämpötilassa mahtuu. Kirjoitetaan veden massatase ja energiatase

$$q_{m_v} = q_{m_i}(x_a - x) \quad (2.11)$$

$$q_{m_i}h + q_{m_v}c_h T_a = q_{m_i}h_a. \quad (2.12)$$

Tässä  $q_{m_v}$  on vesihöyryvirta vedestä ilmaan. Yhtälöt yhdistämällä saadaan tulos

$$\frac{h - h_a}{x - x_a} = \frac{\Delta h}{\Delta x} = c_h T_a. \quad (2.13)$$

$c_h T_a$  on niin pieni luku, että Mollierin diagrammissa liikutaan jokseenkin vakioentalpiakäyrää pitkin. Tätä hyödyntäen diagrammista voidaan suoraan katsoa poistuvan ilman lämpötila ja kosteus (kuva 2.3). Edellä kirjoitetuista yhtälöistä niitä olisi hankala laskea, koska  $T_a$  ja  $x_a$  riippuvat toisistaan ja toinen pitäisi tietää, jotta toisen saisi. Koska veden höyrystämiseen tarvittava lämpö tulee ilmasta, voidaan approksimatiivisesti kirjoittaa

$$(T - T_a)c_i = l_h(x_a - x) \text{ eli } \frac{T - T_a}{x - x_a} = -\frac{l_h}{c_i} \quad (2.14)$$

kuten edelläkin. Tässä meillä on kaksi tuntematonta, jotka riippuvat  $x_s(T)$ -käyrän kautta toisistaan.

**Lämminilmakuivuri** poikkeaa kylmäilmakuivurista vain siinä, että sisään tuleva ilma ( $= T_1$ ) ensin lämmitetään ( $= T_2$ ) (ks. kuva 2.3). Ilman entalpia lisääntyy  $h_1$ :stä  $h_2$ :een, kun lämpötila nousee  $T_1$ :stä  $T_2$ :een, mutta absoluuttinen kosteus  $x$  ei lisääny. Sen takia lasku menee samoin kuin edellä. Lämpöä tarvitaan sisään menevää kuivailmakiloa kohti määrä  $Q/m_i = h_2 - h_1$ . Vettä poistuu  $x_a - x$  grammaa vettä / tuleva kuivailmakilo).

**Esimerkki.** Viljan kuivaus kylmäilmakuivurissa: sisään tulee 20-celsiusasteista 60-prosenttista ilmaa. a) Jos ulos tulevan ilman kosteus on 100 %, mikä on sen lämpötila? (15 °C) b) Paljonko vettä poistuu

yhden ilmakilon mukana (1,5 g) Lämmitetään sisään tuleva ilma ensin 40 °C:seen. c) Paljonko tarvittavat energiaa ilmakiloa kohti? (25 kJ/kg ilmaa) d) Jos ulostulevan ilman kosteus on taas 100 %, mikä on sen lämpötila? (22 °C) e) Paljonko vettä poistuu nyt yhden ilmakilon mukana? (7.5 g/kg)

Lämmenilmakuivuri on hyvin eristetty ja sen voidaan katsoa toimivan adiabaattisesti ja ilman vuotoja. Puhallusilman lämpötila on 70 °C, kosteus 7 % ja ilmamäärä 17000 m<sup>3</sup>/h. Poistoilman kosteus on 100 %. a) Mikä on kuivumisnopeus ja b) kuinka kauan 25 m<sup>3</sup> kuivauserän kuivaus kestäisi, jos alkukosteus (w.b) on 25 % ja kuivuminen yhtä tehokasta koko kuivauksen ajan. Loppukosteudeksi halutaan 14 % ja viljan tiheys (ominaispaino) märkänä on 600 kg/m<sup>3</sup>. (283 kg/h, 6,8 h)

Kuivuriuunin lämpöteho on 350 kW. Kuinka paljon kuivausilman lämpötila vaihtelee, jos päivällä on 20 °C ja 50 % kosteus ja yöllä 3 °C ja 90 % kosteus. Puhaltimen ilmamäärä on 20 000 m<sup>3</sup>/h. (54 - 77 °C)

## 2.7 Kastepistelämpötila

Jos ilmaa jäädytetään, sen absoluuttinen kosteus ei muutu, mutta suhteellinen kosteus lisääntyy. Jäähdytystä jatkettaessa tullaan kastepistelämpötilaan. Ilma tulee kylmäiseksi ja tiivistyminen (kondensoituminen) alkaa. Silloin myös ilman absoluuttinen kosteus alkaa laskea. Ilman suhteellisen kosteuden saat siis selville jäädyttämällä jotain pintaa ja katsomalla, milloin kosteus alkaa tiivistyä pinnalle. Sitteen vain mittaat pinnan lämpötilan, kastepistelämpötilan. Taulukosta katsot, mikä on kylmän höyryn paine  $p_s$  siinä lämpötilassa, samoin kuin katsot, mikä on  $p_s$  vallitsevassa huoneen lämpötilassa. RH on näiden suhde kerrottuna 100:lla.

**Esimerkki.** Talvipakkasella huoneilma on kuivaa. Suhteellinen kosteus sisällä on 10 %. 20 °C:n lämpötilassa  $p_s$  on 0,023 bar eli  $p_v$  on 0,0023 bar. Tarvitaan 12 asteen pakkas ennen kuin  $p_s = 0,0023$  bar. Pinnan jäädyttäminen tähän lämpötilaan ei ole aivan helppoa. Toisaalta silmälasitkaan eivät huuru sisälle tultaessa, jos lasien lämpötila on korkeampi kuin -12 °C.

## 3 Miten ja miksi materiaali säilötään

Tässä luvussa käydään läpi biomateriaalin säilyvyyden kannalta tärkeimpiä käsitteitä kuten tasapainokosteus ja veden aktiivisuus. Se riippuu jossain huokoisessa aineessa siitä, missä vesi on ko. aineessa eikä pelkästään siitä, paljonko vettä on aineessa. Siksi on nhyvä ymmärtää veden sitoutumismuodot ja veden liikkumiskeinot huokoisessa aineessa.

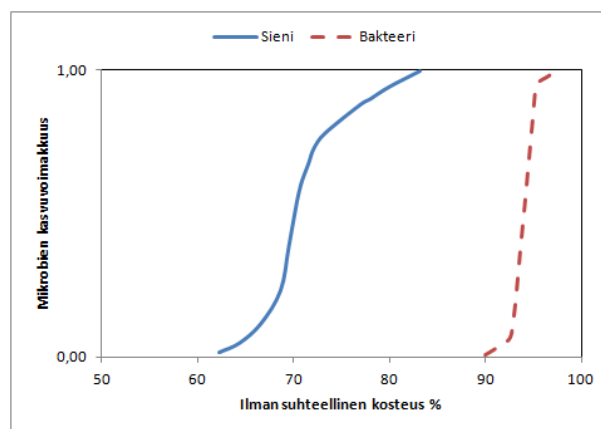
### 3.1 Biomateriaalin säilyvyys

Biomateriaali joudutaan useimmiten korjaamaan kosteana. Koska kosteus yleensä ilmoitetaan märkäkosteutena (wb), tässä kappaleessa käytetään tuota tapaa ilmoittamatta siitä erikseen. Hyvissä oloissa esimerkiksi viljan pintikosteus voi olla alle 20 %, mutta huonoissa oloissa joudutaan puimaan jopa 40 % viljaa. Näin kostea vilja ei säily kauaakaan käsittelemättömänä, vaan se alkaa pilaantua. Biomateriaalin pilaantuminen johtuu seuraavista tekijöistä:

- Mikrobien kehittymisestä (mikrobi = mikro-organismi = pieneliö, joka erottuu mikroskoopilla, esim. sieni, bakteeri, virus)
- Biomateriaalin omasta entsyymitoiminnasta
- Biomateriaalin hengityksestä itävyyden ylläpitämiseksi

Biomateriaali jatkaa kehitystään irrottamisen tai katkaisun jälkeenkin. Se hengittää, käyttää varastoitunutta hiilihydraattiansa ja luovuttaa hiilidioksidia. Tästä elintoiminnasta syntyy kosteutta ja lämpöä. Biomateriaalien pinnoilla on aina bakteereja, homeita ja sieniä (mikrobeja). Mikrobien kasvuun vaikuttavat seuraavat päätekijät:

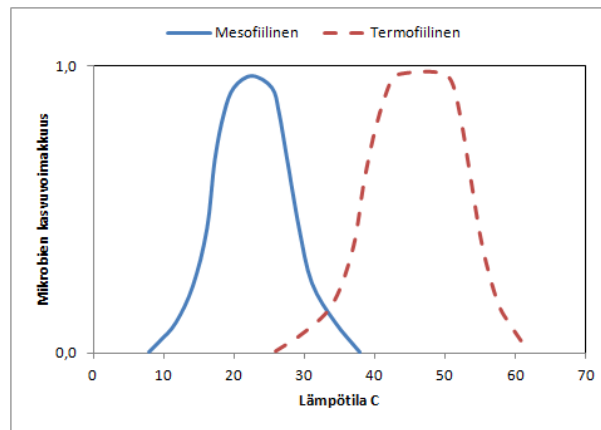
- Kosteus
- Lämpötila
- Happipitoisuus
- Happamuus
- Materiaalin fysikaalinen kunto



Kuva 3.1: Eräiden mikrobien elintoiminta kosteuden funktiona



### 3 Miten ja miksi materiaali säilötään



Kuva 3.2: Esimerkki mikrobin elinvoimaisuudesta lämpötilan funktiona

Taulukko 3.1: Viljan säilyvyys ja kuivauksen aloittaminen

Kosteus %	Pilaantumisen alkaa	Ominaisuuksien muuttuminen	Kuivaus aloitettava
yli 30	1 vrk	alkaa 1 - 2 vrk	12 h kuluessa
20 - 30	3 - 5 vrk	2 - 3 vrk	25 % 24 h kuluessa 20 % 48 h kuluessa

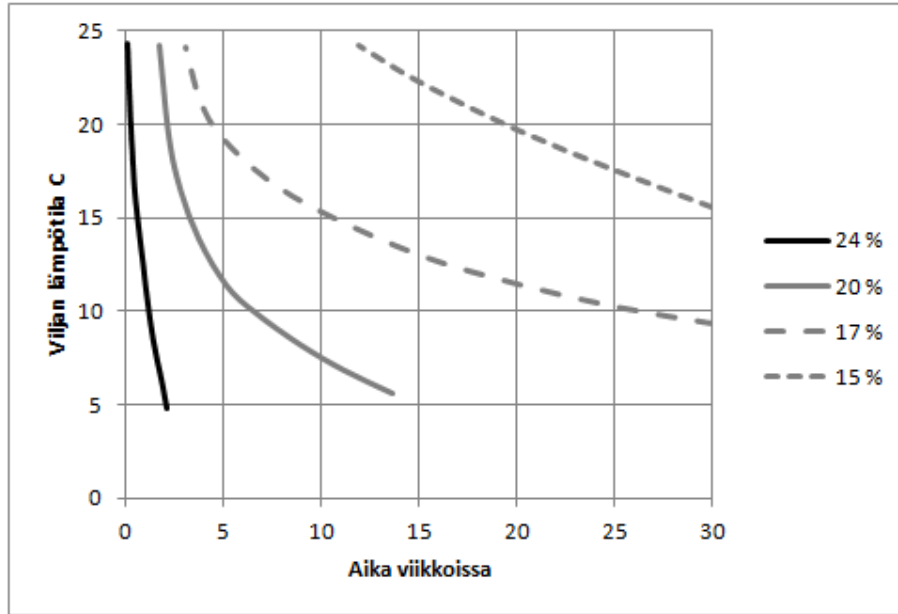
Näistä tekijöistä tärkein on kosteus. Jos se on tarpeeksi alhainen, niin muut tekijät eivät pysty vaikuttamaan. Kun ilman suhteellinen kosteus ylittää 62 %, sienten kasvu on mahdollista ja kosteuden ylittäessä 90 % myös bakteerien kasvu on mahdollista, kuva 3.1. Mikrobit käyttävät olemassa oloonsa materiaalin ravinteita ja kosteutta. Ne pystyvät absorboimaan siitä tarvitsemansa veden. Tämä absorbointikyky häviää ja mikrobin kasvu loppuu, jos:

- materiaali kuivataan niin kuivaksi, etteivät mikrobit pysty irrottamaan siitä vettä
- vesi jäädytetään
- materiaaliin lisätään aineita, jotka sitovat veden ja estävät siten mikrobin veden saannin

Lämpötila vaikuttaa mikrobin kasvunopeuteen. Samalla lailla kuin kosteudella, mikrobeilla on kasvuun suotuisat lämpötilat. Mesofiilisten mikrobin kasvuolosuhteet ovat erityisen suotuisia silloin, kun ilman suhteellinen kosteus on yli 90 % ja lämpötila on 20 - 35 °C. Tämän takia esimerkiksi lämpimissä maisissa kylmäilmakuivaus ei aina ole mahdollista, koska kuivausilman lämpötila voi olla erityisen sopiva mesofiilisten mikrobin kasvuun. Materiaali säilyy kosteana pilaantumatta jonkin aikaa. Esimerkiksi viljan säilyvyyttä perävaunussa, kaatosuppilossa tai tuulettamattomassa siilossa ennen kuivausta voidaan arvioida taulukon 3.1 avulla.

Viljan pitkäaikaista säilyvyyttä eri lämpötiloissa ja viljan kosteuden vaihdellessa voidaan arvioida kuvan 3.3 mukaan. Sen mukaisesti kosteuden alittaessa 20 % ja viljan pysyessä kylmänä (alle 5 °C) se säilyisi melko pitkään, yli 5 kk. Tämän perusteella on suositeltu, että talvella käytettävä rehuvilja voidaan säilöä 16 - 18 % kosteana. Meillä katsotaan, että 14 - 15 % kosteus takaa viljan pitkäaikaisen säilymisen. Lämpimämmässä ilmastossa voidaan vaatia pitkäaikaisessa säilytyksessä alhaisempaa kosteutta. Viljan laatuominaisuuksista herkin on itävyys. Se huononee ennen kuin muut ominaisuudet, kuten leipomisominaisuudet ja maku huononevat.

Kosteuden ja lämpötilan lisäksi viljan säilyvyyteen vaikuttavat happipitoisuus ja happamuus. Kosteaa viljaa voidaan säilöä ilmatiiviisti, jolloin jyvien hengitys ja mikrobin toiminta kuluttavat nopeasti hapen ja pilaantuminen estyy. Samoin säilöntäaineiden käyttö muuttaa happamuuden sellaiseksi, että mikrobin toiminta estyy.



Kuva 3.3: Viljan säilyvyys

Heinä, olki ja hake ovat samalla lailla kuin vilja alttiita mikrobin kasvulle. Kasvua voidaan myöskin hillitellä tai estää samalla lailla kuin viljallakin. Kosteuden suhteen näiden säilyvyys on yleensä varmistettu, kun heinäen kosteus on alle 20 % ja oljen n. 15%. Hakkeen kosteus on ongelmallisempi, pitkäaikainen varastointi merkitsisi n. 12 % kosteutta. Tämä on kuitenkin polton kannalta liian kuivaa. Käytännössä 20 % kosteus ja hakkeen käyttö lämmityskauden (talven) aikana takaa usein homeettomuuden.

Korsirehussa ja hakkeessa voi olla epätasaisen kuivumisen seurauksena märkiä kohtia. Näissä kohdissa tapahtuu paikallista pilaantumista ja homehtumista.

### 3.2 Biomateriaalin tiheys ja huokoisuus

Tiheys  $\rho$  on ainemäärän (kappaleen) massan  $m$  suhde ainemäärän (kappaleen) tilavuuteen  $V$ .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

$$m = \rho \cdot V \quad (3.2)$$

Mikä on huokoisen aineen kuten viljan tiheys ja minkä verran kokoon puristettuna? Voidaan selvästi erottaa koko materiaalin tiheys ja kiintoaineksen (esimerkiksi viljanjyvän) tiheys. Huokoinen aine koostuu kiinteästä materiaalista (viljanjyvistä) sekä viljakasan jyvien välisissä huokosissa olevasta ilmasta tai vedestä (tai molemmista). Toki viljanjyväkin koostuu kiintoaineesta, ilmasta ja vedestä. Otetaan esimerkiksi viljakasa, jonka koko tilavuus on  $V$  ja massa  $m$ . Siinä olevien ilmahuokosten tilavuus on  $V_i$  ja kiinteän aineksen tilavuus  $V_k$  (massa  $m_k$ ). Silloin viljan tiheys eli kuiva tilavuuspaino tilavuuspaino on  $\rho_{vilja} = m_k/V$ , kiinteän aineksen tiheys (hiukkastiheys) eli ominaispaino ominaispaino  $= \rho_k = m_k/V_k$ , kiinteän aineksen tilavuusosuus  $= V_k/V = \rho_{vilja}/\rho_k$  ja huokoisuus  $\varepsilon = V_i/V = 1 - \rho_{vilja}/\rho_k$ . Kiinteän aineksen ja ilman tilavuusosuuksien summa on 1, jos vilja on kuivaa.

Maataloudessa käytetään toisenlaisiakin sanoja: Materiaalin tiheys (specific gravity, density) ilmaisee itse materiaalin tiheyden, esimerkiksi viljan tiheys tarkoittaa itse jyväaineksen tiheyttä. Viljan jyville löytyy kirjallisuudesta taulukon 3.2 mukaisia tiheysarvoja. Tilavuuspaino ilmaisee materiaalin ns kuormapainon (viljoilla hehtolitraino) eli siinä on mukana jyvien väliin kasassa jäävät onkalot, joita pitkin esim. kuivausilma pääsee virtaamaan viljan läpi. Huokoisuus vaikuttaa siten ilman virtausvastukseen ja siihen kuinka suuri paine tarvitaan, että ilma virtaa jyväkasan läpi. Tästä käytetään myös nimitystä vastapaine. Huokoisuus liittyy materiaalin tilavuuspainoon ja se vaikuttaa tilantarpeeseen esim. varastoinnissa ja kuljetuksissa.

Taulukko 3.2: Jyvien tiheyksiä ja viljojen tilavuuspainoja ja huokoisuuksia

Materiaali	Tiheys	Tilavuuspaino	Huokoisuus
Vehnä	1300	740 - 830	0,57 - 0,64
Ohra	1100 - 1300	610 - 720	0,47 - 0,66
Kaura	1000 - 1100	530 - 580	0,48 - 0,58
Ruis	1200	710 - 770	0,59 - 0,64

### 3.3 Materiaalin kosteus

On hyvä ymmärtää, missä vesi jyvässä on, niin ymmärtää miksi sen liikkumisen mallintaminen on jokseenkin mahdotonta ja täytyy tyytyä kokeisiin. Jyvät eri vuosina ovat kuoreltaan ihan erilaisia ja kuivuminen on hyvin erilaista.

Vesi biomateriaalissa on joko huokosten välissä olevassa ilmassa vesihöyryinä tai rajapinnoilla kemiallisesti (kemiallinen sidos) tai fysikaalisesti (Coulombin sähköinen vuorovaikutus) sitoutuneena vetenä tai jokseenkin vapaan veden tapaan käyttäytyvänä kapillaarivetenä. Sen takia veden tasapainokosteus on eri, kun materiaalia kuivataan tai kostutetaan. Tämäkin kertoo, että täytyy tyytyä kokeisiin. Biomateriaali on mahdoton mallinnettava. On kuitenkin hyvä ymmärtää käsitteet, kuten veden aktiivisuus ja vesipotentiaali. Ne määräävät, miten biomateriaali säilyy ja miten vesi liikkuu.

Käsitellään aihetta ensin lyhyesti ja myöhemmin perusteellisemmin. Vesi on sitoutunut kolmella eri tavalla viljan jyvään:

1. Kemiallisesti sitoutunut vesi
2. Fysikaalis-kemiallisesti sitoutunut vesi
3. Fysikaalis-mekaanisesti sitoutunut vesi

Kemiallisesti sitoutunut vesi on jyvässä kidevetenä. Sitä ei voida poistaa jyvistä edes veden kiehumislämpötilassa. Kuivauksen kannalta tällä vedellä ei ole merkitystä. Fysikaaliskemiallisesti sitoutunut vesi on jyvän paisuntavettä. Tämä vesi on absorboitunut jyvään, jolloin jyvä on turvonnut. Fysikaalis-mekaanisesti sitoutunut vesi on jyvien kapillaareihin ja pinnalle tullutta vettä.

### 3.4 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  $w_b = \text{wet basis} = \text{märkäkosteus}$  ja  $w_d = \text{dry basis} = \text{kuiva kosteus}$ .

Märkäkosteus  $w$  saadaan punnitsemalla näyte-erä, kuivaamalla se ja vertaamalla painon vähennystä (veden haihtumista) alkuperäiseen painoon:

$$w = \frac{M_{\text{vesi}}}{M_{\text{koko}}} \quad (3.3)$$

$w$	materiaalin kosteus (märkä, $w_b$ )
$M_{\text{vesi}}$	materiaalissa (näyte-erässä) olevan veden massa
$M_{\text{koko}}$	materiaalin (näyte-erän) kokonaismassa

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  $w$  seuraavasti.

$$M_{vesi} = w \cdot M_{koko}$$

$$M_{kuiva} = (1 - w) \cdot M_{koko} \quad (3.4)$$

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

$$M_{vkorjuu} = \frac{w_{korjuu} \cdot M_{kuiva}}{1 - w_{korjuu}} \quad (3.5)$$

Poistettava vesimäärä saadaan nyt korjuu- ja varastointikosteuksien vesimäärien erotuksesta.

Monasti tällaiset laskelmat on helpompia tehdä kun kosteus ilmoitetaan kuiva-ainekiloa kohti. Tämän etuna on se, ettei laskentaperusta jatkuvasti muutu, vaan se säilyy samana. Kuivakosteus  $w_k$  saadaan märkäkosteudesta  $w$  yhtälöllä:

$$w_k = \frac{w}{1 - w} \quad (3.6)$$

Vastaavasti märkäkosteus saadaan kuivakosteudesta seuraavasti:

$$w = \frac{w_k}{1 + w_k} \quad (3.7)$$

Poistettava vesimäärä saadaan kuivakosteuksia (db) käytettäessä, kun korjuukosteus on  $w_k$  ja varastointikosteus on  $w_v$ , muodossa:

$$M_{vpoisto} = (w_k - w_v) \cdot M_{kuiva} \quad (3.8)$$

Jos käytetään märkäkosteuksia, poistettavalle vesimäärälle voidaan johtaa yhtälö 3.9. Yhtälössä sato on ilmoitettu kuivattuna satona ja kosteudet ovat märkäperusteisia.

$$M_{vpoisto} = M_{sato} \frac{w_a - w_l}{1 - w_a} \quad (3.9)$$

**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 kuivaainetta  $4000 - 560 = 3440$  kg. Puintikosteudessa hehtaarisadossa oli vettä yhtälön 3.5 mukaisesti  $\frac{0,22 \cdot 3440}{1 - 0,22} = 970$  kg ja hehtaarisato märkänä oli  $3440 + 970 = 4410$  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 energiaan tarvitaan viljamassan lämmittämiseen kuivauslämpötilaan.

## 3.5 Veden aktiivisuus ja tasapainokosteudet

### 3.5.1 Veden aktiivisuus

Veden aktiivisuuskäsite on lähtöisin elintarviketeknologian puolelta. Se määritellään ilman suhteellisen kosteuden tasapainoarvona, jossa materiaali ei ime eikä luovuta vettä. Se voidaan määrittellä myös

vesihöyryn osapaineiden avulla seuraavasti:

$$a_w = \frac{p}{p_o} = \frac{RH}{100} \quad (3.10)$$

$a_w$  veden aktiivisuus  
 $p$  veden höyrynpaine materiaalin lähellä  
 $p_o$  kylläisen veden höyrynpaine

Veden aktiivisuus voi olla korkeintaan 1,0. Märkien elintarvikkeiden, kuten hedelmien, vihannesten ja lihan  $a_w$  on 0,97 tai enemmän. Keskimärkien  $a_w$  on 0,6 - 0,9 ja kuivien alle 0,6. Jos ilma on kosteampaa kuin veden aktiivisuus, materiaali imee kosteutta, jos se on kuivempaa, materiaali luovuttaa kosteutta. Jos veden aktiivisuus on 1, materiaalit käyttäytyvät vapaan veden tapaan eli kuivuvat aina.

Materiaali	Veden aktiivisuus $a_w$
Kuivamaito, kuivatut hedelmät	0,2
Perunalastut	0,3
Suklaa, hunaja	0,5 - 0,6
Suolakala	0,7 - 0,8
Juustot, leivonnaiset, raaka kinkku, kuiva makkara	0,9 - 0,95
Tuore liha, vihannekset, hedelmät	0,95 - 1,00

Lämpötila vaikuttaa veden aktiivisuuteen yleensä niin, että lämpötilan noustessa aktiivisuusarvo kohoaa.

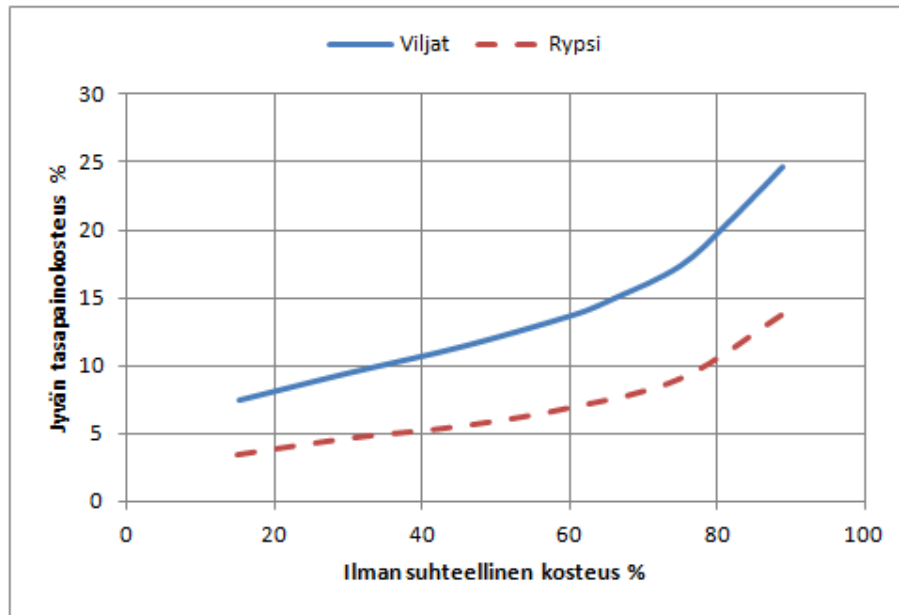
### 3.5.2 Tasapainokosteus

Tasapainokosteus on yleisesti käytössä maatalousteknologiassa sekä siihen liittyvässä teollisuudessa. Tasapainokosteudella tarkoitetaan sitä kosteutta, johon materiaalin kosteus asettuu, kun sitä ympäröivä ilman kosteus pysyy vakiona. Tapahtuma on kaksisuuntainen, materiaali voi kuivua tai se voi imeä kosteutta ilmasta. Tasapainokosteus riippuu ilman kosteuden lisäksi lämpötilasta ja materiaalista.

Jos kuivaat viljaa, haketta, pyykkiä tai perunalastuja, lämmin ilma poistaa kosteuden. Veden haihtumiseen tarvittava lämpöenergia tulee ilmasta. Niinpä ilma jäähtyy ja sen kosteus lisääntyy. Kosteassa saunassa hikoilee tehokkaasti, koska vesi ei haihdu ihon pinnalta ilmaan. Kuivassa saunassa iholta haihtuva vesi jäähdyttää tehokkaasti ihoa eikä tällöin tarvitse hikoilla niin paljon. Tuotteiden säilytyksessä on tuotteen ja ympäröivän ilman välillä kosteuden vaihtoa. Tietyissä ilman kosteudessa kullakin materiaalilla on tietty tasapainokosteutensa; pöydälle jätetty näkkileipä yleensä imee kosteutta, kakun pala sen sijaan kuivuu. Biomateriaalien tasapainokosteus riippuu useimmiten siitä, ollaanko materiaalia kuivaamassa (desorptio) vai kastelemassa (adsorptio, resorptio). Kyse on ns. hystereesi-ilmiöstä; materiaalin jokin ominaisuus riippuu materiaalin aiemmasta historiasta. Vakiolämpötilassa ja ilman kosteuden pysyessä samana materiaalin kosteuspitoisuus saavuttaa tietyn arvon, tasapainokosteuden (ERH = Equilibrium RH).

### Viljan tasapainokosteus

Kuvassa 3.4 on esitetty viljan tasapainokosteuksia standardin ASAE D 245.5 mukaisesti. Tasapainokosteuteen vaikuttaa ilman lämpötilan lisäksi viljalajike. Rypsi poikkeaa tasapainokosteudeltaan huomattavasti muista viljalajeista. Tämä tarkoittaa sitä, että rypsi on kuivattava kuivemmaksi, jotta mikrobin kasvun kannalta päästään alle 62 % ilman kosteuteen. Kun rypsin kosteus on n. 7 %, sitä ympäröivän ilman kosteus on 60 % ja mikrobin kasvuolot ovat huonot. Viljaa kuivattaessa sen läpi puhalletaan ilmaa. Tähän ilmaan siirtyy viljasta kosteutta ja viljakerroksen läpi mennessä kuivausilma kostuu ja sen lämpötila laskee veden sitomisen takia. Tällöin ensimmäiseksi ilman kanssa kosketuksiin joutuva vilja kuivuu ja viimeksi kosketuksiin joutuva osa ei alkuvaiheessa kuivu tai se voi jopa kostua. Vasta kun alkuosa on saavuttanut tasapainokosteuden, pystyy loppuosakin kuivumaan. Jos kostean viljan annetaan olla tuulettamattomassa tilassa, viljan hengityksen ja mikrobin kasvun takia lämpötila nousee ja kosteus lisääntyy. Tällöin tasapainokosteus asettuu viljan sisällä olevan kosteuden ja lämpötilan perusteella, ei sitä ympäröivän kosteuden mukaan.



Kuva 3.4: Viljojen tasapainokosteuksia

### Oljen, heinän ja hakkeen tasapainokosteudet

Samalla lailla, kuin viljalla, heinällä, oljella ja hakkeella on omat tasapainokosteuskäyränsä, kuva 3.5. Oljen samoin kuin heinänkin laadulla on vaikutusta tasapainokosteuteen, huonolaatuisen materiaalin käyrät voivat poiketa normaalilaatuisen käyrästä. Oljen tasapainokosteus poikkeaa selvästi heinän tasapainokosteudesta. Heinän säilyvyysrajana on 19 % kosteus, joka saadaan ilman kosteuden ollessa 60 %.

Oljella suositellaan varastointikosteudeksi n. 15 %, jolloin se säilyy talven yli pilaantumatta. Jos asiaa tarkastellaan mikrobien kannalta, 60 % ilman kosteus merkitsisi n. 12 % oljen kosteutta. Tällöin mikrobien elintoimintojen edellytykset ovat huonot. Oljen polttopuominaisuuksien kannalta kosteus ei saisi ylittää 20 %, jotta polttaminen onnistuisi. Yleensä 20 % hakkeen katsotaan säilyvän homehtumatta lämmityskauden yli. Kosteuden ollessa alle 15 % ongelmaksi tulee hakepolton hallitsemattomuus. Vähäinen vesimäärä aiheuttaa helposti esim. takapalovaaran.

### Lämpötilan vaikutus tasapainokosteuteen

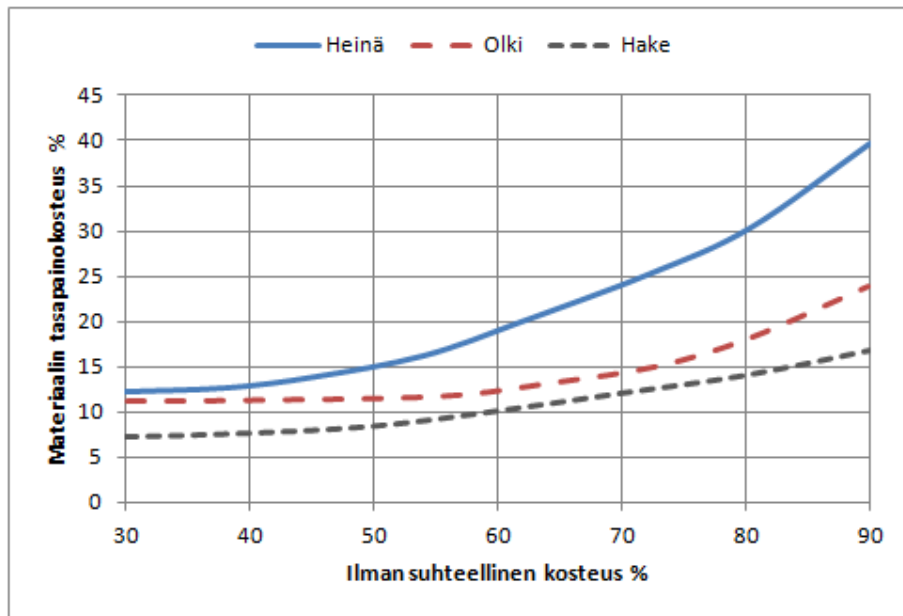
Viljojen tasapainokosteus riippuu ilman suhteellisen kosteuden lisäksi myös lämpötilasta. Kuvassa 3.6 on esitetty ohran tasapainokosteuden kosteus- ja lämpötilariippuvuus, [ASAE D245]. Ilman lämpötilan kohotessa tasapainokosteus alenee. Tällä on merkitystä viljan säilymisen kanssa. Jos vilja säilyy suhteellisen viileenä, silloin voidaan sallia suurempi kosteus kuin lämpimässä olevalla viljalla. Suomen oloissa turvallinen kuivauskosteus on 14 %, mutta meitä lämpimimmässä oloissa tarvitaan säilyvyyden kannalta alhaisempi kosteus. Moisture Relationships of Plant-based Agricultural Products. American Society of Agricultural and Biological Engineers

### 3.5.3 Tasapainokosteuden yhtälöitä

Kuivauksen simulointia varten tarvitsemme matemaattisia yhtälöitä, joiden avulla voidaan laskea viljan kosteuden luovutusnopeus. Tähän on olemassa sekä teoreettisia että empiirisiä yhtälöitä. Näitä tasapainoyhtälöitä on esitetty lähteissä [ASAE D245], [Henderson et al 1997] ja [Pabis et al 1998]. Yksi yleisesti käytetyistä yhtälöistä on empiirinen Hendersonin yhtälö, yhtälö 3.11. Yhtälön 3.11 kertoimet vehnälle ovat:  $c = 10,06 \cdot 10^{-7}$  ja  $n=3,03$ .

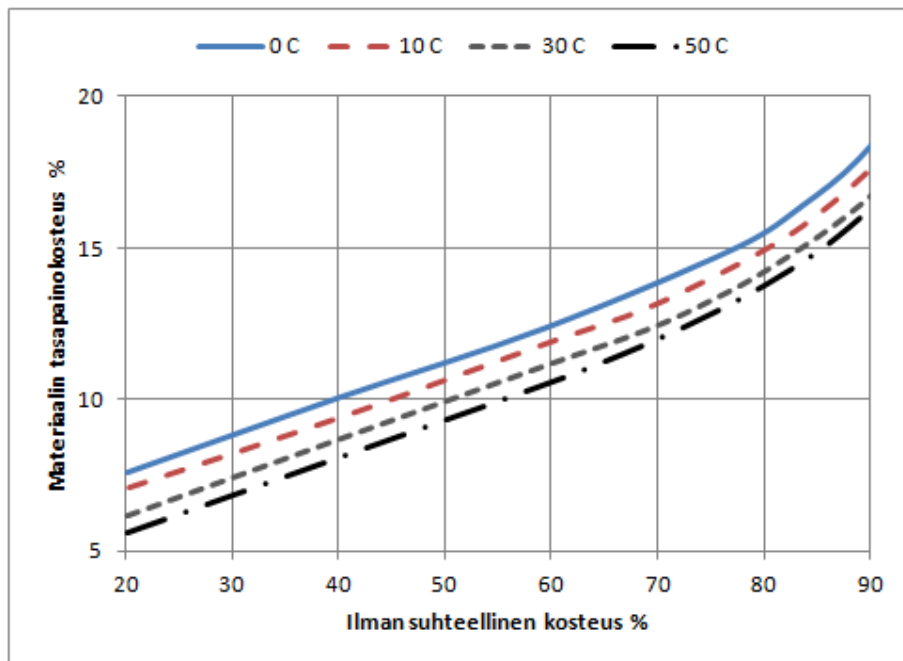
$$\frac{RH}{100} = 1 - e^{-cT w_k^n} \quad (3.11)$$

### 3 Miten ja miksi materiaali säilötään



Kuva 3.5: Oljen, heinän ja hakkeen tasapainokosteudet (wb)

myös



Kuva 3.6: Lämpötilan vaikutus ohran tasapainokosteuteen

Taulukko 3.3: Tasapainokosteusyhtälön kertoimia

Materiaali	E	F	C	Lämpötila- alue °C	Kosteusalue RH %
Ohra	0,33363	0,050279	91,323	0 - 50	20 - 95
Maissi	0,33876	0,058970	30,205	0 - 50	20 - 95
Kaura	0,28704	0,047108	35,803	25 - 65	15 - 92
Vehnä	0,27908	0,042360	35,662	0 - 50	20 - 95

RH Ilman suhteellinen kosteus, desim. luku

c,n Materiaalikertoimia

T Lämpötila °C

$w_k$  Materiaalin kuivakosteus % (db)

Usein meillä on ilman tilatiedot tiedossa ja olemme kiinnostuneita mihin viljan kosteus asettuu. Sitä varten voimme käyttää esim. Chung-Pfostin yhtälöä 3.12. Yhtälön kertoimet ovat taulukossa 3.3.

$$w_k = E - F \cdot \ln \left[ -(T + C) \cdot \ln \frac{RH}{100} \right] \quad (3.12)$$

Viljoille ja biomateriaaleille on kehitetty useita erilaisia tasapainokosteuden laskentayhtälöitä. Näitä on tarkemmin selostettu esim. viitteissä [Pabis et al 1998] ja [ASAE D245]

#### Esimerkki

Siilossa olevan vehnän kosteus on 15 % (wb) ja se on +15 °C lämpötilassa. Mikä on ilman suhteellinen kosteus viljan seassa siilossa?

Materiaalin märkäkosteus pitää ensin muuttaa kuivakosteudeksi,  $w_k = \frac{0,15}{1-0,15} \cdot 100 = 17,6$  %. Kun arvot sijoitetaan yhtälöön 3.11, saadaan  $RH = 1 - e^{-10,06 \cdot 10^{-7} (273,16+15) \cdot 0,176^{3,03}} = 82$  %. Jos ilman lämpötila on 15 °C ja kosteus 82 %, vilja asettuu 15 % (wb) kosteuteen.

**Esimerkki.** Kylmäilmakuivurin kuivausilman lämpötila on 15 °C ja kosteus 85%. Mihin kosteuteen ohra kuivuu?

Käytetään yhtälöä 3.12 laskennassa.  $w_k = 0,33363 - 0,050279 \cdot \ln [-(15 + 91,323) \cdot \ln(0,85)] = 19,0$  % (db). Tämä täytyy vielä muuttaa märkäkosteudeksi,  $w_m = \frac{0,19}{1+0,19} = 16,0$  % (wb). Kylmäilmakuivuri ei siten pysty näissä olosuhteissa kuivaamaan viljaa säilytyskuuntoon (14% kosteuteen).

Lämminilmakuivauksessa ilman tila on sellainen, että viljan tasapainokosteus on vain muutaman prosentin luokkaa. Jos kuivausta jatkettaisiin siinä hyvin pitkään, vilja päätyisi tähän kosteuteen. Kuivaus lopetetaan kuitenkin kun säilymiskosteus (13 - 14%) on saavutettu.



# Kirjallisuutta

- [ASAE D245] ASAE D245.6 Moisture Relationships of Plant-based Agricultural Products. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2007
- [Henderson et al 1997] Henderson S.M., Perry R.L. & Young J.H. Principles of Process Engineering, 4th edition. American Society of Agricultural Engineers 1997.
- [Pabis et al 1998] Pabis S., Jayas D. S. & Cenkowski S. Grain Drying, Theory and Practice. John Wiley & Sons 1998.

## 4 Jyvän lämpeneminen ja kuivuminen

Miten nopeasti jyvä lämpenee? Miten nopeasti vilja siilossa jäähtyy? Tässä luvussa käydään läpi lämpöenergiaan ja sen siirtymiseen liittyviä peruskäsitteitä. Vaikka varsinaisessa kuivausprosessissa näillä ei ole varsinaista merkitystä, on hyvä tietää, miten lämpöenergia ilmasta jyvään siirtyy rajapinnan läpi ja miten lämpö jyvässä liikkuu ja miten sen voi laskea. Toisaalta yhden jyvän lämpiämis- tai kuivumisaika antaa minimaikaskaalan viljaerän kuivumiselle.

### 4.1 Jyvän rakenne

Jyvän rakenne on kuvan 4.1 mukainen. Jyvässä uloimmaisena on kuitupitoinen kuorikerros, näiden alla tärkeä ydinosa ja sisimmäisenä rasva- ja proteiinipitoinen alkio. Ydin on 80–85 % jyvän painosta, kuorikerrokset 10–15 % ja alkio 2-3 %.

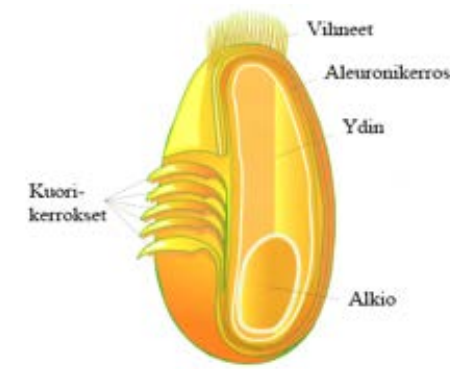
Vesi on sitoutunut jyvässä kolmella eri tavalla, kemiallisesti, fysikaalis-kemiallisesti ja fysikaalis-mekaanisesti. Kemiallisesti sitoutunut vesi on jyvässä kidevetenä. Sitä ei voida poistaa jyvistä edes veden kiehumislämpötilassa. Kuivauksen kannalta tällä vedellä ei ole merkitystä. Fysikaalis-kemiallisesti sitoutunut vesi on jyvän paisuntavettä. Tämä vesi on absorboitunut jyvään, jolloin jyvä on turvonnut. Fysikaalis-mekaanisesti sitoutunut vesi on jyvien kapillaareihin ja pinnalle tullutta vettä. Tästä vedestä pintavesi ja makrokapillaareissa (kapillaarin säde > 100 nm) oleva vesi haihtuvat kuten vapaan veden pinnalta ja ne on helppo poistaa.

Kun pintavesi ja makrokapillaarien vesi (fysikaalis-mekaaninen vesi) poistuvat, veden poistuminen tapahtuu vakionopeudella. Pesty vilja tai sateen kastelema vilja, joka kuivataan märkänä käyttäytyy näin. Normaalisti pinnaltaan märkää viljaa kuivataan hyvin harvoin. Kosteus on useimmiten fysikaalis-kemiallisesti sitoutunutta vettä. Kuivuminen tapahtuu silloin kahden mekanismin kautta, kosteuden siirtymisenä jyvän pintaan ja kosteuden poistumisena pinnasta. Ajavana ilmiönä on viljan ja ilman välinen vesipotentiaaliero. Jyvän kuivuessa kosteuden siirtyminen pintaan hidastuu ja viljan kuivuminen hidastuu kosteuden alentuessa, kuva 4.2.

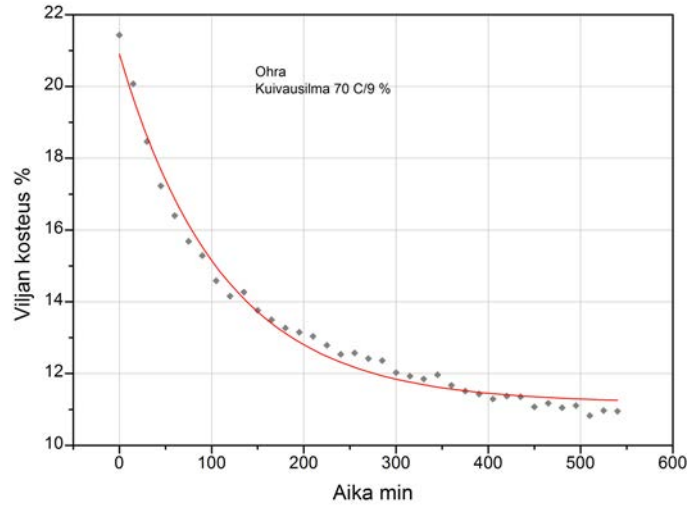
### 4.2 Ajasta riippuva lämmön siirtyminen

Viljan jyvän lämpiämiseen vaikuttaa kaksi asiaa. Lämmön täytyy siirtyä pinnan läpi jyvään ja lämmön pitää siirtyä jyvässä. Tässä luvussa opitaan, että Biot'n luku kertoo, kumpi määrää aikaskaalan.

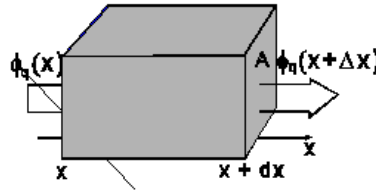
Kun jäädytät lihaa tai sulatat sitä, kestää jonkin aikaa, ennen kuin lämpö tai kylmä on johtunut sisäosiin saakka. Sama pätee viljanjyvän tai laudan kuivaamiseen, lämmön johtumiseen maaperässä,



Kuva 4.1: Jyvän rakenne [Leipätiedotus]



Kuva 4.2: Ohran kuivumisnopeus ajan funktiona



Kuva 4.3: Yksiulotteinen lämmön siirtyminen

kakun paistoon ja kananmunan keittämiseen. Useissa jokapäiväisissä lämmönsiirtotarkasteluissa pitäisi tietää, kuinka nopeasti lämpö siirtyy. Tasapainoprosesseissa, steady state -tilanteissa lämpövirta ei muutu ajan mukana. Silloin kiinnostuksen kohteena on vain, paljonko lämpöä aikayksikössä siirtyy jonkin pinnan läpi. Sen kertoo Fourierin I laki:  $q = \lambda dT/dx$ , eli lämpövirran tiheys riippuu vain lämpötilagradientista ja materiaalivakiosta  $\lambda$ . Jossakin vaiheessa isokin lämpövarasto ehtyy ja lämpötilat alkavat tasoittua lämpöenergian virtauksen takia. **Lämpötilan tasoittuminen riippuu lämpöenergian virtausvauhdin lisäksi selvästi myös siitä, paljonko lämpöä jossakin on eli kappaleen lämpökapasiteetista.** Tämä puolestaan riippuu lämpövaraston koosta ja varastomateriaalin ominaislämpökapasiteetista  $c$ . Tarkastellaan aluksi tapausta, jossa on vain lämmön johtumista, ei esimerkiksi sulamiseen tai höyrystymiseen liittyviä lämmön sitoutumisia tai vapautumisia.

Tarkastellaan yksiulotteista, x-akselin suuntaista lämmön siirtymistä suorakaiteen muotoisessa laatikossa, jonka toinen pää on kohdassa  $x$  ja toinen kohdassa  $x + dx$  (kuva 4.3). Päätyjen pinta-alat ovat  $A$ . Lämpöenergia säilyy. Se tarkoittaa, että joka hetki täytyy olla voimassa lämpöenergiatase:

laatikkoon tullut energia – laatikosta poistunut = lämpöenergian lisäys laatikossa.

Kirjaimilla esitettynä saadaan

$$q(x)A - q(x + dx)A = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(m c T)}{dt} = c \rho A dx \frac{dT}{dt}, \quad (4.1)$$

jossa  $dT/dt$  on lämpötilan muutos  $dT$  tarkasteluajavälinä  $dt$ ,  $A dx$  on laatikon tilavuus ja  $\rho$  materiaalin tiheys. Käytetään derivaatan määritelmää ja saadaan

$$\frac{q(x) - q(x + dx)}{dx} = -\frac{dq}{dx} = c \rho \frac{dT}{dt}. \quad (4.2)$$

Tämä yhtälö kertoo, että energia säilyy. Yhtälön vasemmalla puolella on energiavirran tiheyden muutos matkalla  $dx$  pisteessä  $x$  ja oikealla puolella samassa pisteessä energiamäärän muutos tilavuusyksikköä kohti aikana  $dt$ .

Onhan nimittäin  $dQ/V = cmdT/V = cpdT$  ominaislämpökapasiteetin määritelmän perusteella. Kun yllä olevaan lausekkeeseen sijoitetaan Fourierin I lain mukainen q:n lauseke, saadaan **Fourierin II laki**, joka kertoo miten lämpötila muuttuu ajassa ja paikassa ( $T = T(x,t)$ ), kunhan  $\lambda$  on vakio:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{c\rho}{\lambda} \frac{dT}{dt}. \quad (4.3)$$

Kertoimelle  $\alpha = \lambda/c\rho$  on annettu nimi lämmön diffuusiokerroin tai virallisesti **lämpötilantasoittumiskerroin**, ja sen yksikkö on  $m^2/s$ . **Se kuvaa, miten nopeasti lämpötila tasoittuu. Jos merkitään  $\alpha = x^2/t$ , niin osoittautuu, että ajassa  $t$  lämpö siirtyy suurin piirtein matkan  $x$ . Kaksinkertaisen matkan siirtyminen vaatii siis nelinkertaisen ajan.**

$\alpha$  kertoo lämmönsiirron tehokkuuden. Siksi se on kaikille kaasuille jokseenkin sama, samoin nesteille ja kiinteille aineille. Kaasuille sen arvo on noin  $10^{-5} m^2/s$ , nesteille  $10^{-7} m^2/s$  ja kiinteille  $10^{-1} - 10^{-4} m^2/s$ . Huomionarvoista on se, että nesteille  $\alpha$  on pienempi kuin kaasuille. Syy on se, että vaikka lämmönjohtavuus on isompi, myös tiheys ja ominaislämpökapasiteetti ovat isompia. Nesteissä täytyy siirtää enemmän lämpöä kuin kaasuissa, jotta lämpötilaerot tasoittuisivat. Kiinteissä aineissa lisää vaihtelua aiheutuu siitä, että metalleissa lämpöä kuljettavat elektronit, eikä sillä ole mitään tekemistä atomien diffuusion kanssa.

On hyvä huomata, että  $\alpha$  on sitä suurempi, mitä isompi on  $\lambda$  eli mitä isompi on lämpövirta. Toisaalta  $\alpha$  on sitä pienempi, mitä isompi on lämpökapasiteetti tilavuusyksikköä kohti eli  $c\rho$ . Se kertoo, että ison lämpövaraston tyhjentäminen on vaikeampaa kuin pienen.

#### 4.2.1 Lämpöhaude

Miten nopeasti jyvää lämpiää? Ratkaiseeko aikaskaalan lämmön siirtyminen jyvään ja lämmön siirtymisen jyvässä. Sen kertoo Biot'n luku, kuten myöhemmin nähdään. Tarkastellaan aluksi vain lämmön siirtymistä rajapinnan läpi.

Yksinkertainen ajasta riippuva lämmönsiirto on veden lämmittäminen tai jäädyttäminen lämpöhauteessa. Veteen siirtyy aikayksikössä lämpöä

$$\Phi_q = \frac{dQ}{dt} = kA(T_{st} - T), \quad (4.4)$$

jossa  $T_{st}$  on vakiona pysyvä lämpöhauteen (jyvän ympärillä olevan ilman) lämpötila,  $A$  sen pinnan ala, jonka läpi lämpö siirtyy,  $T$  lämmitettävän tai jäädytettävän veden lämpötila ja  $k$  lämmönläpäisykerroin pinnan ja ilmarajakerroksen läpi.  $k$ :ssa ovat mukana lämmön johtuminen ja rajakerrokset. Oletetaan, että  $k$  on vakio. Voidaksemme ratkaista lämpötilan ajan mukana, täytyy tietää, miten veteen siirtynyt lämpö  $dQ$  muuttaa veden lämpötilaa.  $dQ$  saadaan lämpökapasiteetin määritelmästä  $dQ = cmdT$ , jossa  $m$  on lämmitettävän veden massa. Siispä

$$mc \frac{dT}{dt} = kA(T_{st} - T). \quad (4.5)$$

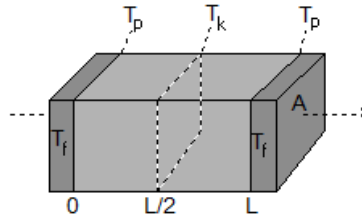
Saatiin I kertaluvun differentiaaliyhtälö, josta  $T(t)$  voidaan ratkaista integroimalla, kun tiedetään alkuehto  $T(t=0) = T_i$ . Jos loppulämpötilaksi halutaan  $T_f$ , lämmitys aika on

$$t = \frac{mc}{kA} \ln \frac{T_{st} - T_i}{T_{st} - T_f}. \quad (4.6)$$

Derivoimalla tämän yhtälön päätyy alkuperäiseen yhtälöön, josta voi päätellä, että tulos on todellakin malliyhtälön ratkaisu. Nähdään, että lämmitys aika on suoraan verrannollinen veden (jyvän) massaan ja ominaislämpökapasiteettiin ja kääntäen verrannollinen pinta-alaan ja lämmönsiirtymiskertoimeen. Olisit ehkä arvannut näin olevan laskemattakin. On hyvä muistaa, että laskuja ei tehdä laskemisen ilosta vaan nähdäksemme, millä tavalla mikin tekijä vaikuttaa lopputulokseen.

Ratkaisemalla yhtälöstä  $T_f$  nähdään, että lämpötilan nousu hidastuu eksponentiaalisesti, kun lähesytetään lämpöhauteen lämpötilaa:

$$T_f = T_{st} - (T_{st} - T_i) \exp\left(-\frac{kA}{mc}t\right). \quad (4.7)$$



Kuva 4.4: Lämmön siirtyminen rajapinnan läpi aineeseen

#### 4.2.2 Aikaskaala: rajapinta vai lämmönsiirtyminen aineessa

Jos kiinteää kappaletta lämmitetään, lämmitysaikaan vaikuttaa kappaleen lämmönjohtavuus  $\lambda$ , mutta myös pinnalla oleva nesteen tai kaasun muodostama rajakerros, jonka lämmönsiirtymiskerroin on  $h$ . Kumpi on tärkeä ja missä tapauksissa?

Otetaan yksinkertaistettu yksiulotteinen tapaus. Kiinteän aineen paksuus on  $L$ . Aineen lämpötila sen keskellä (kohdassa  $L/2$ ) on  $T_k$ , pinnan lämpötila on  $T_p$  ja ympäröivän fluidin lämpötila rajakerroksen ulkopuolella on  $T_f$  (kuva 4.4).

Rajapinnan läpi siirtyneen lämmön määrä aikayksikössä on  $\Phi_q = dQ/dt = hA(T_p - T_f)$ . Tämän verran energiaa täytyy siirtyä aineeseen pinnalta. Tämä vaatimus määrää, mikä on  $T_p$ . Fourierin I lain mukaan

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda A \frac{T_k - T_p}{L/2}. \quad (4.8)$$

Yhdistetään nämä kaksi tulosta ja järjestetään termit niin, että saadaan dimensiottomat ryhmät yhtälön kummallekin puolelle

$$\frac{hL/2}{\lambda} = \frac{T_k - T_p}{T_p - T_f} = \frac{\Delta T_{\text{aineessa}}}{\Delta T_{\text{rajapinnassa}}}. \quad (4.9)$$

Dimensioton luku  $hL/\lambda$  on Biot'n luku ja se on lämmönsiirtymiskertoimien  $h$  ja  $\lambda/L$  suhde. Kokemus ja laskut osoittavat, että kun  $Bi < 0,2$ , suurin este lämmön siirtymiselle on rajapinta. Siinä lämpötilan muutos on iso, sen sijaan kiinteä kappale on jokseenkin samassa lämpötilassa kaikkialla:  $\Delta T_{\text{raja}} > \Delta T_{\text{aineessa}}$ . Laskeminen olisi helppoa, kun tarvitsisi tarkastella vain rajapinnan vaikutusta. Valitettavan usein sekä lämmönjohtuminen että rajapinnan vaikutus ovat tärkeitä ja laskuista tulee hankalia. Biot'n luku auttaa arvioimaan, kumpi estää lämmön siirtymistä enemmän.

Jyvän lämmönjohtavuus on luokkaa  $0,2 \text{ W/(m K)}$  ja jyvän halkaisija  $4 \text{ mm}$ . Ilmassa  $h$  on luokkaa  $10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ , joten Bi-luku on

$$\frac{hL/2}{\lambda} = \frac{10 \cdot 0,002}{0,2} = 0,1. \quad (4.10)$$

Lämmön siirtyminen jyvään määrää jyvän lämpiämisen aikaskaalan. Kyse on siis lämpöhauteesta. Lämpöhauteelle aikaskaala on

$$\frac{mc}{hA} = \frac{5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000}{10 \cdot 4\pi(2 \cdot 10^{-3})^2} = 100 \text{ s}. \quad (4.11)$$

Aika on mitätön verrattuna jyvän kuivumisaikaan, joka on tunnin luokkaa. Lasketaan vielä, mikä olisi aikaskaala, jos lämmönjohtuminen ratkaisisi. Tarvitsemme arvon lämpötilantasoittumiskertoimelle:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{0,2}{1000 \cdot 500} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}. \quad (4.12)$$

Aikaskaala olisi siis

$$t = \frac{x^2}{\alpha} = \frac{(2 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 10^{-7}} = 0,1 \text{ s}. \quad (4.13)$$

Tilanne muuttuu, kun koko muuttuu. Jos viljasiilon halkaisija on  $4 \text{ m}$ , ja käytämme muuten samoja arvoja kuin jyvälle, saamme Bi-luvuksi  $100$ , joten nyt lämmönjohtuminen määrää aikaskaalan:

$$t = \frac{x^2}{\alpha} = \frac{(2)^2}{4 \cdot 10^{-7}} = 10^7 \text{ s} = \frac{10^7 \text{ s}}{24 \cdot 3600 \text{ s/vrk}} = 100 \text{ pv}. \quad (4.14)$$

Kestää siis kuukausia ennenkuin vilja siilossa jäähtyy. Jos rajapinta määräisi aikaskaalan, saataisiin tämän tapaista

$$\frac{mc}{hA} = \frac{10000 \cdot 1000}{10 \cdot 2^3} = 10^5 \text{ s.} \quad (4.15)$$

Tässä h on aika iso, mutta vaikka se olisi 0,1 W/m<sup>2</sup>K, joka rakenteelle on tosi hyvä U-arvo niin aikaskaala olisi sama kuin lämmön johtumiselle. Tarkoittaa, että vaikka viljasiilon eristäisi hyvin, se jäähtyisi yhtä nopeasti kuin eristämätönkin.

### 4.3 Jyvän kuivuminen: vesihöyryn diffuusio

Veden tai vesihöyryn liikkumisen määrää vesipotentiali. Vesi liikkuu aina siihen suuntaan, mihin vesipotentiali pienenee.

Opimme jo aiemmin, että kapillaarit jyvässä ovat yleensä tyhjiä ja vesimolekyylit liikkuvat siksi jyvässä vain diffundoitumalla.

Neste liikkuu virtaamalla. Kaasu liikkuu paikasta toiseen ensinnäkin sen takia, että aineella on pitoisuuseroja eri paikoissa. Tällöin on kyse diffuusiosta ainetta liikuttavana voimana. Toinen mahdollisuus on, että kaasussa on paine-eroja, jolloin paine-ero liikuttaa ainetta ihan kuin nesteen tapauksessa. Paine-ero saa aikaan makroskooppista liikettä eli ainakin moolillinen ainetta menee samaan suuntaan. Tässä luvussa käsitellään diffuusiota, jolloin molekyylin liike on riippumaton muiden molekyylin liikkeestä. Taaskin kuivauksen kannalta näillä ilmiöillä ei kuivauksen laskussa ole merkitystä, riittää kun tietää, mitä vauhtia vettä jyvistä haihtuu ilman että tietää minkä takia. Yhden jyvän kuivumisnopeus määrää kuivauksen minimiajan ja vain sitä tietoa tarvitaan, kun lasketaan koko viljakasan kuivumista ja mietitään kuivurin rakennetta.

#### 4.3.1 Kuivuminen

Biomateriaalin vesi voi olla huokosissa vapaana vetenä tai vesihöyrynä ja pinnoille sitoutuneena vetenä.

Jos meillä on aluksi läpimärkä kappale, vaikka viljanjyvä tai lankku, ensimmäisenä vesi alkaa poistua kapillaareista. Kappaleiden sisäosista tulee vettä sitä mukaa kuin pinnasta poistuu. Veden haihtumisnopeus on vakio. Vapaa vesi virtaa huokosissa paine-eron vaikutuksesta, samalla tavalla kuin vesi virtaa missä tahansa putkessa. Huokosten pienen koon takia virtaus on käytännössä aina laminaarista, eli kyseessä on Poiseuillen virtaus. Huokokset muodostavat monimutkaisen verkoston, ja makroskooppisesti tarkasteltuna kyse on Darcyn virtauksesta huokoisessa materiaalissa. Viime aikoina fyysikot ovat alkaneet soveltaa fraktaalikäsitettä myös tämän tapaisiin tilanteisiin. Voit itse todeta virtauksen monimuotoisuuden kastamalla paperin toisen reunan veteen ja tarkkailemalla kuivan ja märän rajapinnan etenemistä.

Pikkuhiljaa vesivarastot ehtyvät ja märän ja kuivan materiaalin rajapinta alkaa siirtyä sisäänpäin, kunnes kapillaarivesi loppuu sisältäkin. Sen jälkeen jäljellä on enää pintoihin sitoutunut vesi. Kun huokokset eivät enää ole täysin veden peitossa, vesi voi kulkeutua paikasta toiseen vesihöyrynä. Höyry siirtyy kahden eri mekanismin avulla. Jos kahden eri pisteen välillä on kokonaispaine-ero, ilma-höyryseos siirtyy paine-eron vaikutuksesta aivan samaan tapaan kuin vesikin. Kokonaispaine-ero tulee kyseeseen lähinnä materiaalia kuumennettaessa, jolloin vesihöyryn osapaine-ero voi olla huomattava. Toinen mekanismi on höyryn diffuusio, jonka ajavana voimana on kosteusero ilmassa eri pisteissä. Sitoutunut vesi siirtyy pinnoista ensin ilmaan ja sieltä näiden kahden eri mekanismin avulla. Veden haihtuminen sitoo lämpöä eli jäähdyttää materiaalia. Tämä aiheuttaa lämpötilaeroja materiaaliin, joka puolestaan myös saa vesimolekyylejä liikkumaan paikasta toiseen. Kylläisen höyryn painehan muuttuu 10 %, kun lämpötila muuttuu 1 %:n. Lisäksi molekyylit voivat siirtyä pinnoilla tapahtuvan diffuusion avulla. Lisäksi pitäisi ottaa huomioon sekin asia, että vettä liikuttaa oikeastaan muutos kemiallisessa potentiaalissa (tai veden aktiivisuudessa), ei pelkästään konsentraatioero tai paine-ero. Kuivatus on siis sangen mutkikas prosessi yleisessä tapauksessa.

Kun viljanjyvän kuivuu, alussa pinta on märkä ja pinnalla on kylläisen vesihöyryn paine. Kuivumisnopeus on vakio ja riippuu vesihöyryn osapaine-erosta pinnalla ja ilmassa. Kuivumisnopeuteen voi vaikuttaa lämmittämällä jyvistä (kylläisen höyryn paine kasvaa) ja tuulettamalla, jolloin ilman

kosteus jyvän lähellä pienenee. Vesihöyryn osapaine-eroa voi kasvattaa myös pienentämällä painetta pinnalla eli kuivaamalla alipainekammiossa. Tästä on myös se etu, että veden kiehumispiste laskee. Vesi kiehuu huoneen lämmössä, kun paine on noin 2 kPa. Tarvitaan siis 0,98 kPa:n alipaine. Tällainen laite ei ole ihan halpa.

Lopulta pinta alkaa kuivaa ja ratkaisevaksi tekijäksi tulee vesimolekyylien diffundoituminen tai konvektio kapillaarikäytäviä pitkin jyvän pinnalle. Kuivuminen alkaa hidastua, mikäli vesi sisällä ei kiehu. Mikäli kiehuu, höyrynpaine ajaa koko ajan vettä pois, kunhan jollain keinolla saadaan kuivattavaan kappaleeseen kiehumisen edellyttämä lämpöenergia. Jos kappale on iso, ainoa vaihtoehto on mikroaaltosäteily. Jos kuivataan ohutta kerrosta, johtuminenkin saattaa tulla kyseeseen. Kun kuivuminen tapahtuu tasaisesti koko kappaleessa, kappaleessa ei ole kosteusvaihteluita eikä kosteusvaihtelun synnyttämiä jännityksiä. Lankku tai viljanjyvä ei halkeile. Lankkuja näin jo kuivataan, viljaa tietääkseni ei.

Jos vesi ei kappaleen sisällä kiehu, kuivumiseen voi vaikuttaa lähinnä jyvän lämpötilalla (tietysti minimoidaan vesihöyryn paine pinnalla eli käytetään kuivaa ilmaa ja tuuletusta), koska diffuusio lisääntyy lämpötilan noustessa. Alkuvaiheessa jyvän sisällä on rajapinta, jossa vallitsee kylläisen höyryn paine. Kun rajapinta saavuttaa jyvän keskustan, jyvän joka kohdassa vesihöyryn paine on alle kyläläisen höyryn paineen. Kuivuminen hidastuu entisestään. Nämä kolme vaihetta erottuvat hyvin, kun seurataan jyväkasan painon muutosta eli kuivumisnopeutta eli massavirtaa ajan mukana. Jos jyvää kuumentaa kovin paljon, jyvän sisällä kylläisen vesihöyryn paine voi olla isompi kuin ilmanpaine ja jyvä saattaa haljeta. Halkeaminen voi tapahtua myös lämpötila- ja kosteuserojen takia, jyvä kun kutistuu kuivuessaan. Niin kauan kuin jyvän pinta on kostea, kaikki lämpö menee veden haihduttamiseen, mutta kuivan ja märän rajapinnan siirtyessä jyvän sisään lämmityksen kanssa pitää olla tarkkana. Sama koskee luonnollisesti myös esimerkiksi lankun kuivaamista.

### 4.3.2 Diffuusio

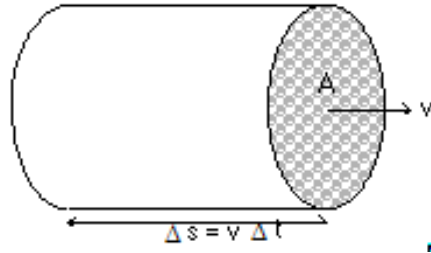
Vesihöyryn pitää saada jyvästä ulos. Se tapahtuu diffuusiolla, ensin jyvässä ja sitten ilmarajakerroksen läpi. Diffuusio on hyvin samankaltainen ilmiö kuin lämmönjohtuminen. Lämpötilan tasoittumiskerrointa vastaa diffuusiokerroin. Valitettavasti se on hyvin pahasti vesipitoisuuden funktio. Sen takia jyvän kuivumisnopeuden laskenta ei onnistu yhtä helposti kuin jyvän lämpiämisen lasku ja täytyy tyytyä kokeellisiin mittauksiin. On kuitenkin hyvä ymmärtää perusilmiöt.

Jos fluidissa (vesi tai ilma) on paine-ero, fluidiin syntyy tasapainokosteusvirtaus. **Painegradientti  $\frac{\Delta p}{\Delta x}$  on virtauksen ajava voima.** Tässä luvussa tarkastellaan diffuusiota, joka on mikroskooppinen aineensiirtymismekanismi. **Diffuusiossa ajavana voimana on tietyn lajisten molekyylien konsentraatiogradientti  $\frac{\Delta c}{\Delta x}$  eli osapainegradientti  $\frac{\Delta p_i}{\Delta x}$ .** Jos molekyyliä on eri paikoissa eri pitoisuudet, niiden satunnainen liike ajan mittaan tasoittaa erot.

Molekyylit nesteissä ja kaasuissa etenevät suoraviivaisesti, kunnes ne kimmoisassa törmäyksessä toiseen molekyyliin vaihtavat suuntaansa. Tämä molekyylien satunnainen liikkuminen ilmenee makroskooppisesti diffuusiona, jos molekyyliä on eri konsentraatio eri paikoissa. Molekyylien diffundoituminen on keino, jolla ihminen saa keuhkoissa olevasta ilmasta vereensä happea solukalvojen läpi, kasvit saavat hiilidioksidia sekä luovuttavat vettä ja happea, maassa olevat kasvin juuret saavat happea ja vettä ja viljanjyvästä poistuu kuivurissa vesi. Rajapinnoilla on aina paikallaan pysyvä tai laminaaristi liikkuva kaasu- tai nestekerros ja aineen siirtyminen tämän kerroksen läpi on mahdollista ainoastaan diffuusion avulla.

Molekyylien diffuusio johtaa ainevirtaan, lämpövirtaan ja liikemäärävirtaan. Miksi molekyylien satunnainen liike johtaa energian, liikemäärän ja aineen siirtymiseen? Jos molekyylit ovat aluksi laatikon yhdessä nurkassa, on paljon **todennäköisempää**, että jonkin ajan kuluttua ne ovat tasaisesti jakautuneet laatikon eri puolille kuin että ne edelleen olisivat samassa nurkassa. Kysymys on siis vain todennäköisyyslaskennasta. Molekyyliä vain on niin paljon – suuruusluokka on mooli eli  $10^{23}$  molekyyliä – että todennäköisyyksien erot ovat huikaisevat. Siksi me makroskooppisessa skaalassa tarkastellessamme näemme tapahtumien aina etenevän todennäköisempään suuntaan. Mikroskooppisessa mittakaavassa näkisimme esimerkiksi tiheysvaihteluita, fluktuaatioita.

Katsotaan nyt molekyyliatasolta lähtien, miten Fickin I lain voi ymmärtää ja mitä fysiikkaa diffuusio-kerroin  $D$  pitää sisällään.



Kuva 4.5: Ainevirta

Selvitetään ensin, mitä ovat hiukkasvirta ja hiukkasvirran tiheys. Olkoon hiukkasten etenemisvauhti  $v$ , ja hiukkaset liikkukoot  $x$ -akselin suunnassa. Hiukkasten konsentraatio on  $c$  (hitua/ $m^3$  tai mooleja/ $m^3$ ). Ajassa  $\Delta t$  menee poikkipinnan (pinta-ala  $A$ ) läpi  $Av\Delta t \cdot c$  hiukkasta (kuva 4.5). Silloin **hiukkasvirta** on

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\text{hiukkasia pinnan läpi}}{\text{aikaväli } \Delta t} = q = Avc \quad (4.16)$$

ja **hiukkasvirran tiheys**

$$q'' = \frac{q}{A} = cv \quad (4.17)$$

Molekyylit liikuessaan eivät pelkästään siirrä liikemääräänsä ja energiaansa vaan myös itseään. Kyseessä on aineensiirtyminen. Ei tarvitse olla suuri ennustaja, kun arvaa, että aineensiirtymiseen diffundoitumalla pätee taas samanlainen yhtälö kuin oli lämmön siirtymiselle. Kyseessä on **Fickin I laki**, ja se kirjoitetaan

$$\phi'' = -D \frac{dc}{dx}, \quad (4.18)$$

jossa  $c$  on molekyylien konsentraatio sopivissa yksiköissä (hitua/ $m^3$ , moolia/ $m^3$ , kg/ $m^3$ ,  $m^3/m^3$ ),  $\phi''$  on molekyylivirran tiheys (hitua/ $(m^2s)$ , moolia/ $(m^2s)$ , kg/ $(m^2s)$ ,  $m^3/(m^2s)$ ) ja  $D$  on **diffuusiokerroin**, yksikkönä  $m^2/s$ . **Ajava voima on konsentraatiogradientti**. Kaasuissa  $D$ :n suuruusluokka on taas sama kuin  $\alpha$ :lla tai  $\nu$ :lla; kaasuissa  $D$  on suuruusluokkaa  $10^{-5} m^2/s$ , nesteissä  $10^{-8} - 10^{-9} m^2/s$  ja kiinteissä aineissa  $10^{-11} - 10^{-12} m^2/s$ . Nesteissä  $D$  on selvästi pienempi kuin  $\alpha$  tai  $\nu$ , koska aineensiirtyminen välttämättä vaatii molekyylien itsensä siirtymisen toisin kuin liikemäärän ja lämmönsiirtymisen. Kiinteissä aineissa ero on suurempi:  $\alpha$  niissä on  $10^{-1} - 10^{-4} m^2/s$ .

#### 4.4 Veden sitoutuminen jyvään

Materiaalissa vesi on sitoutuneena sekä kemiallisesti että fysikaalisesti. Kemiallisia sidostyyppejä ovat esimerkiksi kovalenttinen sidos, vetysidos ja ionisidos. Useissa materiaaleissa vesi kuuluu luonnollisella tavalla materiaalin perusrakenteeseen ollen kemiallisesti sitoutunutta vettä. Perusrakenteessa vesi on kiteisissä aineissa osana kiderakennetta ns. hydraatti- eli kidevetenä. Kiteisillä yhdisteillä on tietty kidemuoto ja vesi on siihen kuuluva osa. Se irtautuu yleensä kuumennettaessa, jolloin kiderakenne särkyy. Kun aine on kosteassa, se ottaa kidevedet takaisin ja muodostaa kiteen uudelleen.

Kun kaksi toisiinsa sekoittumatonta ainetta tulevat kosketukseen toistensa kanssa, niin melkein aina havaitaan, että toisen aineen pitoisuus on näiden aineiden rajapinnalla suurempi kuin itse ko. aineessa. Tätä aineen kerääntymispyrkimystä jollekin pinnalle kutsutaan adsorptioksi. Adsorptioilmion synty johtuu siitä, että kaikkien aineiden pinnoilla eli tarkemmin sanottuna ainetta rajoittavassa pintakerroksessa on atomeja tai molekyyliä, joilla on pinnan normaalin suuntaisia tyydyttämättömiä sidosvoimia. Pintaan adsorboituvan aineen ja pinnan välisen sidoksen luonne ja lujuus vaihtelevat. Jos ne ovat sähköstaattisia tai sähködipolien muodostamia van der Waals-tyyppisiä sähköisiä voimia, kyseessä on fysikaalinen sitoutuminen. Jos syntyy sidos, kyseessä on kemiallinen sitoutuminen. Kun historiallisista syistä adsorptiosta huokosen aineen sisälle eli sen huokoseinämiin käytetään termiä absorptio, vaikka kyseessä on sama ilmiö, niin usein käytetään yhteistä termiä sorptio näistä ilmiöistä. Sorption seurauksena vapautuu lämpöä, jota kutsutaan adsorptiolämmöksi. Kemiallisen ja fysikaalisen sorption



(kemisorptio ja fysisorptio) erottaa selvimmin siitä, että fysisorptiossa adsorptiolämpö (1-10 kJ/mol) on noin kertaluvun pienempi kuin kemisorptiossa (50-500 kJ/mol).

Sen jälkeen kun vaikkapa jyvän pintaan on tällä tavoin syntynyt yhden molekyylikerroksen paksuinen kerros kemiallisesti tai fysikaalisesti sitoutunutta vettä, tämän kerroksen päälle voi syntyä uusia molekyylikerroksia fysikaalisin sidoksin. Vesimolekyyli on dipoli, sillä on sähköisesti negatiivisesti ja positiivisesti varautuneet päät. Negatiivinen ja positiivinen varaus vetävät toisiaan puoleensa. Sen vuoksi vesimolekyyli vetää toista vesimolekyyliä puoleensa. Mitä enemmän on molekyylikerroksia, sitä enemmän molekyylien lämpöliike sekoittaa sitoutumista ja sitä heikommin molekyyliä ovat toisissaan kiinni. Fysikaalisesti sitoutuneen kerroksen paksuus riippuu ilman kosteudesta. Adsorptiovesi (osa kemiallisesti sitoutunut), hygroskooppinen vesi ja vaippavesi tarkoittanevat juuri tätä fysikaalisesti sitoutunutta vettä. Molekyylikerrosten lisääntyessä huokosten koko tulee vastaan eli huokosten eri reunoilla olevat kerrokset liittyvät toisiinsa. Siirrytään pikkuhiljaa kapillaarisesti sitoutuneeseen veteen ja kapillaarien koon kasvaessa vihdoin vapaaseen veteen, veteen, joka käyttäytyy normaalin veden tapaan, eli sillä on sama kemiallinen potentiaali. Kun ilman kosteus on alle 99 %, kapillaarisesti sitoutunut vesi poistuu ajan mittaan kaikista niistä kapillaariputkista, joiden säde on yli 0,1  $\mu\text{m}$ .

Kapillaariputkessa veden kylläinen höyrynpaine on alempi kuin avoimessa tilassa (ks. kaava 4.19). Jos höyrynpaine ympäristössä on suurempi, tapahtuu vesihöyryn tiivistymistä kapillaariputkeen. Ilmiö on nimeltään kapillaarikondenssi. Jos huokosten koko on suurempi kuin noin 0,1  $\mu\text{m}$ , ei aine sido vettä kosteasta ilmasta (RH alle 99 %) muuten kuin adsorptiona pintaan, ts. kapillaarikondenssi ei pääse syntymään. Aineet, jotka kykenevät sitomaan vettä kosteassa ilmassa kapillaarikondenssilla, ovat hygroskooppisia. Riippuu siis ilman suhteellisesta kosteudesta, onko aine hygroskooppista (kaava 4.19).

## 4.5 Vesi rajapinnalla

Tässä käydään läpi lyhyesti peruskäsitteitä. Aineen olomuotoja ovat kaasu, neste ja kiinteä. Faasi on homogeeninen ainesos. Ilma, jää ja toisiinsa sekoittuvat liuokset ovat yksifaasisia. Veden ja jään sekoitus on kaksifaasisuomala E. Kuivausilman lämpötilan ja kuivurin sisäisten kuumien metallipintojen vaikutus ohran elinvoimaan viljaa kierrättävässä sekavirtaustyyppisessä kuivurissa. Kahden faasin välissä on raja; tätä rajaa kutsutaan pinnaksi (surface) kaasu-nestesysteemeissä ja rajapinnaksi (interface) neste-neste(kiinteä)systeemeissä. Tärkeitä kaksifaasisysteemejä ovat disperssit systeemit. Kun johonkin faasiin on sekoittunut toista faasia pieninä hiukkasina, sanotaan muodostunutta systeemiä disperssiksi systeemiksi. Edellistä sanotaan disperssioväliaineeksi ja jälkimmäistä disperssiksi faasiksi. Disperssit faasit jaetaan taulukossa esitetyllä tavalla.

Disperssi faasi	Disperssio väliaineen	Esimerkki
kaasu	neste	vaahto
kaasu	kiinteä	huokoinen materiaali
neste	kaasu	sumu
neste	neste	emulsio
neste	kiinteä	kiinteä emulsio
kiinteä	kaasu	savu, pöly
kiinteä	neste	suspensio, sooli
kiinteä	kiinteä	kiinteä sekoitus

Savi vedessä on suspensio, ja maitorasva maidossa on emulsio. Majoneesikin on emulsio öljyä vedessä. Jos disperssin faasin hiukkaskoko on suurempi kuin 100 nm, jolloin hiukkasessa on yli 10<sup>9</sup> atomia, hiukkaset sedimentoituvat ajan mittaan. Tällainen systeemi on karkeadisperssisysteemi. Jos hiukkaskoko on noin 100 nm (tai 1000 nm = 1  $\mu\text{m}$ ), hiukkasia kutsutaan kolloideiksi ja systeemiä kolloididisperssiksi systeemiksi. Jos hiukkaset ovat tätä pienempiä (hiukkasessa alle 1000 atomia), systeemi on homogeeninen.

Tärkeä yhteinen piirre kolloidisille systeemeille ovat suuri disperssin faasin pinta-alan ja tilavuuden suhde eli ominaispinta-ala ja disperssin faasin suuri kontaktipinta yhtenäisen faasin kanssa. Suuri

ominaispinta-ala mahdollistaa suuren vesimäärän sitoutumisen pinnnoille. Myös sumutuskuivaus perustuu suureen ominaispinta-alaan. Suurelta pinnalta vesihöyryn on helppo poistua, ja toisaalta pienessä pisarassa vettä on vähän, eli pisarat kuivuvat nopeasti.

#### 4.5.1 Vesi pinnoilla

Vesi ei voi olla pitkäkököjä aikoja kapillareissa eikä soluissaakaan. Paljonko vettä tyypillisesti on biologisessa materiaalissa? Männyn tasapainokosteuspitoisuus on noin 70 kg vettä/m<sup>3</sup> puuta, kun ilman suhteellinen kosteus on 60 %. Vettä on siis varsin paljon. Missä tämä vesi on? Jos vesi ei ole huokosissa, veden on oltava itse materiaalissa molekyylien välissä tai niihin sitoutuneena tai huokosten pinnoilla kemiallisesti tai fysikaalisesti sitoutuneena vetenä.

Lasketaan, kuinka paljon vettä pinnoilla ja huokosissa voi olla. Ajatellaan, että materiaali koostuu samankokoisista palloista, kunkin säde  $r$ . Hiekka on tämätapaista ainetta. Paljonko vettä voi olla pallojen välissä olevassa tilassa? Kukin pallo mahtuu kuutioon, jonka särmä on  $2r$ , joten materiaalin huokoisuus on  $\frac{(2r)^3 - \frac{4}{3}\pi r^3}{(2r)^3} \approx 0,48$ . Siis jos lasi on täynnä kuivaa hiekkaa, lasiin mahtuu vielä puoli lasillista vettä. Kokeile!

Paljonko vettä sitten on materiaalissa, jos pallojen pinnalla on yhden molekyylikerroksen paksuinen vesikerros? Olkoon kappale kuutio, jonka särmä on  $a$  ja tilavuus  $a^3$ . Kuutiossa on silloin  $N = [a/(2r)]^3$  kpl palloja. Vesimolekyyliä pinta-alayksikköä kohti on suurin piirtein  $n = 10^{19}/m^2$ . Yhden vesimolekyylin massa  $m = 3 \cdot 10^{-26}$  kg. Kosteuspitoisuudeksi saadaan  $\frac{m \cdot n \cdot N \cdot 4\pi r^2}{a^3} = \frac{m \cdot n \cdot \pi}{2r} \approx 0,5 \text{ kg/m}^3$ , jos  $r = 1 \mu\text{m}$ . Selvästi pinnalla on aika vähän vettä tässä tapauksessa. Vasta jos säde olisi  $0,01 \mu\text{m} = 10 \text{ nm}$ , saataisiin suurin piirtein se vesimäärä, joka puussa on. Jos vesimolekyylikerroksia olisikin 10, säteeksi tulisi 100 nm.

Tämä esimerkki kertoo, että veden on oltava hyvin mikrokooppisilla pinnoilla. Vettä täytyy tarkastella molekyyleinä, ei makroskooppisena vetenä. Pintoja on kahdenlaisia, hydrofilisia ja hydrofobisia. Hydrofiliset pinnat ovat polaarisia, niissä on kemiallisia ryhmiä, joihin polaarisen vesimolekyylin on helppo tarttua, eli syntyy kemiallinen sidos. Sidoksen syntyminen tarkoittaa, että vapautuu energiaa. Kappaleen lämpiäminen kostuessaan kertoo sidosten syntyemisestä. Villapaita lämpenee kostuessaan, mutta vastaavasti kuivattaminen vaatii paljon lämpöä. Ensimmäinen vesimolekyylikerros yleensä sitoutuu pinnalle kemiallisesti, kun materiaalin hydrofiilinen pää löytää vesimolekyylin polaarisen pään, ja muodostuu kemiallinen sidos. Kemialliset sidokset ovat lujia; niiden purkaminen vaatii paljon energiaa. Kemiallisesti sitoutuneen veden saakin pois vain lämmittämällä ainetta riittävästi. (Epäorgaanisissa aineissa on vielä itse rakenteeseen kuuluvaa kidevettä. Kuumennettaessa tällaista ainetta se muuttuu jauheeksi, kun koko kiderakenne häviää). Muutaman molekyylin eli alle nm:n hydrofiilisten kapillaariputkien vesi onkin sitoutunut kemiallisesti, eli kapillaarivedestä ei voi enää puhua.

Pinnalle kertynyt yhden molekyylin paksuinen vesikerros mahdollistaa sitten uuden vesikerroksen muodostumisen, koska vesimolekyyleistä jää toinen pää vapaaksi. Pikkuhiljaa kerrosten lisääntyessä sidokset käyvät yhä heikommiksi ja lähestytään melkein vapaan veden, kapillaariveden, tilannetta. Lämpöliikkeen takia vesimolekyylien järjestys muuttuu yhä enemmän nesteen kaltaiseksi molekyylikerrosten lisääntyessä, kun järjestys ensimmäisissä kerroksissa on melkein kuin jäässä. Pinnoille voi asettua ehkä kymmenen kerrosta vettä ennen kuin vesi alkaa käyttäytyä vapaan veden tapaan kapillaarivetenä.

Tasapainokosteuspitoisuus riippuu jonkin verran siitä, ollaanko kuivaamassa vai kostuttamassa materiaalia. Puhutaan hystereesistä. Syy on lähinnä se, että materiaali paisuu kastuessaan ja kutistuu kuivuessaan. Vesionkaloissa on eri lailla vettä niitä tyhjennettäessä ja täytettäessä, koska onkalo voi olla jonkin kaventuman päässä, jonka läpi vesi ei pääse menemään. Puhutaan mustepulloefektistä. Vesi kyllä pääsee poistumaan pullosta, mutta kapillaari-ilmiö pullon ohuessa kaulassa estää pullon täyttymisen.

Jos ilman RH = 0 - 20 %, tasapainokosteuden vallitessa jyvässä oleva vesi on kemiallisesti sitoutunut huokosten pinnalle alle yhden molekyylin paksuiseksi kerrokseksi tai sitten vesi on materiaalin molekyyli-rakenteeseen oleellisena osana kuuluvaa ns. hydraattivettä. Tällainen vesi ei osallistu reaktioihin, bakteerit eivät voi sitä hyödyntää, eikä vettä saa pois muutoin kuin kuumentamalla näyte uunissa. Jos RH = 20 - 80 %, vesimolekyyliä on yhä useampana kerroksena sitoutuneena vetenä, ja jos RH > 80

%, vettä alkaa olla kapillaareissa vapaana reaktioihin. Tämä vesi jäätyy helposti, ja höyrynpaine on jokseenkin sama kuin vapaan veden. Tämä antakoon jonkinlaisen kuvan siitä, mitä tarkoittavat vapaa ja sitoutunut vesi. Sitoutunut vesi jäätyy huomattavasti alhaisemmassa lämpötilassa kuin vapaa vesi, ja sitoutuneen veden höyrystymislämpö ja tiheys ovat suurempia kuin vapaan veden.

#### 4.5.2 Vesi kapillaareissa

Lienee luonnollista ajatella, että vesi olisi biomateriaalien huokosissa kapillaarivetenä. Esimerkiksi männyn kuivatiheys on 420 kg/m<sup>3</sup> ja puuaineksen (soluseinämien) tiheys on 1500 kg/m<sup>3</sup>. Soluseinämien tilavuus kokonaistilavuudesta on siis 420/1500 · 100 % = 28 % ja huokosten tilavuus 72 %. Huokosiin mahtuisi paljon vettä, mutta pysyykö vesi huokosissa? Todettiin, että avoimelta pinnalta vesi aina haihtuu. Milloin vesi haihtuu huokosista? Puhtaan edes kylläisen höyrynpaineen  $p$  kapillaariputkessa olevan koveran vesipinnan lähellä kertoo Kelvinin yhtälö:

$$p = p_s \cdot e^{\left(-\frac{2\gamma V_m}{rRT}\right)} \quad (4.19)$$

Höyrynpaine  $p$  on siis pienempi kuin tasaisella pinnalla ( $= p_s$ ). Miten paljon? Jos säde on 1  $\mu\text{m}$ , paineiden suhde on 0,999. Jos säde on 0,001  $\mu\text{m}$  eli 1 nm, suhde on 0,33. Luvut kertovat, että kapillaariputken säteen pitää olla todella pieni, jotta kylläisen höyrynpaine merkittävästi poikkeaa vapaan vesipinnan arvosta. Tämä puolestaan kertoo, että tavallisilla ilman suhteellisen kosteuden arvoilla kapillaariputket tyhjenevät. Jos kapillaariputken säde on 1 nm eli noin kolme vesimolekyyliä rinnakkain, kapillaariputki tyhjenee, kun ilman suhteellinen kosteus on alle 33 %. Jos säde on 5 nm, suhteelliseksi kosteudeksi tulee 80 %. Ilman kosteushan oli sama kuin vallitsevan höyrynpaineen suhde kylläisen höyrynpaineeseen. Toisaalta jos putki on noin pieni, Kelvinin yhtälön pätevyys on jokseenkin kyseenalainen. Eri asia on sitten se, miten vesi pääsee jyvän kapillaariputkiverkostosta ulos. Jokseenkin ainoa keino on diffuusio, ja sehän on hidaskäyttöprosessi. Voi myös käydä niin, että vesi höyrystyy jossain isossa huokosessa ja kapillaari kondensoituu uudestaan pienemmässä huokosessa, kun Kelvinin yhtälön  $p_s$  ylittyy jossain pienessä kapillaarissa.

### 4.6 Jyvän kuivumisen aikaskaala: Koetuloksia ja laskuja

Miten nopeasti jyvä kuivuu?

Biot'n luvun avulla voimme päätellä, onko lämmönsiirtymisen aikaskaalassa johtuminen aineessa vai lämmön siirtyminen rajapinnan läpi jäähtymisen/lämpiyämisestä määräävä aikaskaala. Diffuusion tapauksessa tilanne on identtinen. Määrääkö jyvän kuivumisen vesimolekyylien diffuusio jyvässä vai diffuusio ilmarajakerroksen läpi? Mitäs luulet?

Diffuusio kuten lämmön johtuminen on tärkeä erityisesti tarkasteltaessa aineen siirtymistä kahden faasin rajapinnan läpi. Kuten alussa todettiin, kaikki aineensiirtyminen ja myös lämmönsiirtyminen tapahtuvat rajapinnoilla ohuen laminaarin rajakerroksen läpi diffundoitumalla. Tällainen rajapinta on ilman ja veden rajapinta veden hapetuksessa tai vesihöyrynpaineen haihdutuksessa. Monissa prosessiteollisuuden yksikköprosesseissa aineen siirtyminen rajapinnan läpi on tärkein prosessin nopeuteen vaikuttava tekijä. Tällaisia yksikköprosesseja ovat kuivatus, tislaukset, absorptio ja uutto, josta esimerkkinä kahvin keitto. Mikrobin kasvu puolestaan riippuu siitä, miten nopeasti glukoosia diffundoituu mikrobiin sokeriliuoksesta.

Kuvassa 4.2 on esitetty tulos ohuen ohrakerroksen kuivauskokeesta. Koe-erä on kuivunut säilytyskosteuteen 14% n 3 h tunnin aikana. Tämän avulla voimme päätellä, määrääkö kuivumisnopeuden vesimolekyylien diffuusio jyvässä vai ilmarajakerroksen läpi.

Tarkastellaan rajakerrosta. Otetaan taas yksi jyvä ja annetaan sen kuivua 10 % eli sen massa pienenee sen verran. Silloin jyvistä poistuvan veden massa on

$$m = V \cdot \rho \cdot 0,1 = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho \cdot 0,1 \quad (4.20)$$

Vettä diffundoituu rajakerroksen  $\delta$  läpi ajassa  $t$

$$m = A \cdot \rho_i \cdot \frac{D}{\delta} \cdot \Delta x \cdot t \quad (4.21)$$

Mollierin diagrammista näet, että  $\Delta x$  on tyypillisesti luokkaa 10 g/kg.

Näin saamme ajan  $t$ , jossa jyvää kuivuu, jos rajapinta on ratkaiseva:

$$t = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho \cdot 0,1}{A \cdot \rho_i \cdot \frac{D}{\delta} \cdot \Delta x} = \frac{2 \cdot 10^{-3} m \cdot 1000 kg/m^3 \cdot 0,1}{3 \cdot 1 kg/m^3 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-5} m/s^2}{10^{-3} m} \cdot 10^{-2}} = 300 s = 5 \text{ min.} \quad (4.22)$$

Kuvaan 4.2 vertaamalla voimme päätellä, että rajapinta ei ole ratkaiseva vaan aikaskaalan määrää diffuusio jyvässä. Valitettavasti diffuusiokerroin jyvässä on hyvin voimakkaasti vesipitoisuuden funktio, joten aikaskaalan laskeminen ei onnistu yksinkertaisesti. Voimme kuitenkin arvioida diffusiokertoimen suuruusluokan, kun tiedämme, että jyvän kuivuminen kestää noin 3 tuntia:

$$D \sim \frac{x^2}{t} = \frac{(2 \cdot 10^{-3} m)^2}{3h} = 670 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{h} = 20 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s} \quad (4.23)$$

Mitatut D-arvot ovat luonnollisesti tätä luokkaa, kun jyvää alkaa olla kuiva.

## 4.7 Lämpötilan vaikutus jyvän ominaisuuksiin

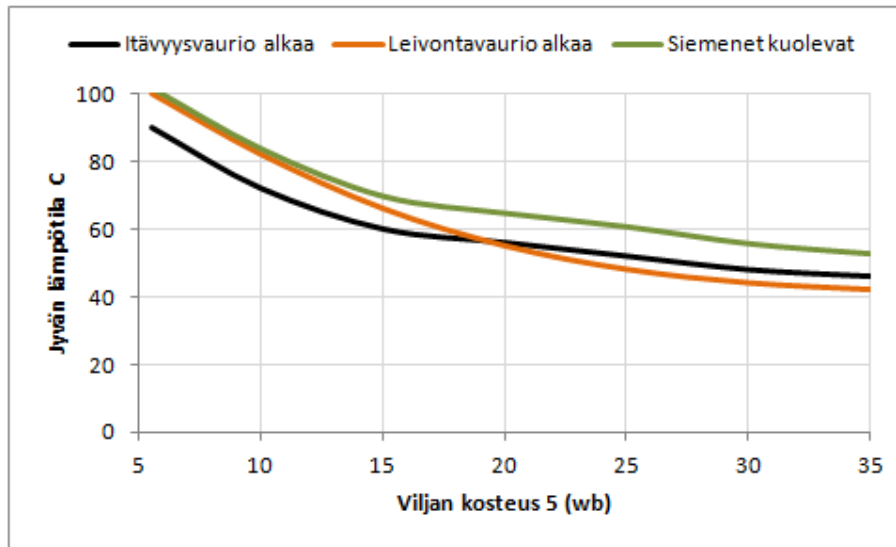
Jos jyvää lämpenee liikaa, sen ominaisuudet muuttuvat. Viljan itävyys, mallastuminen tai leivontaominaisuudet heikkenevät jyvän lämmitessä liian kuumaksi. Nopea korkeassa lämpötilassa tapahtunut kuivuminen voi myös aiheuttaa voimakkaan ulkokuoren kutistumisen ja jyvän halkeilun. Eri viljalajien lämmönkestävyyksissä on myös vaihtelua. Kuivurin kuivauslämpötilat ovat normaalisti 60 - 80 °C. Kuivurissa puhallusilman tulokohdan jyvät altistuvat tälle lämpötilalle. Kun kuivausilma sitoo vettä, sen lämpötila laskee. Vastaavasti kosteuden haihtuminen jyvistä viilentää sitä. Kuivauskapasiteettiä ja energiatehokkuutta voidaan parantaa nostamalla kuivausilman lämpötilaa. Jos kyseessä on rehuvilja, rehuominaisuudet säilyvät vaikka jyvää kuumentaisi reilusti. Lavakuivureissa vilja on paikallaan ja siellä etenkin on vaarana, että alimmaisat kerrokset lämpenevät liikaa ja myös kuivuvat liikaa. Siilo- ja kennokuivureissa vilja liikkuu koko ajan, jolloin tällaista vaaraa ei ole. Se kuinka lämmin kuivausilma voi olla riippuu siten myös kuivurin rakenteesta ja tarkkojen rajojen antaminen on vaikeaa. Meillä siemen-, mallas- ja leipäviljoille on käytetty nyrkkisääntöä, että kuivauslämpötila voi olla 90 °C vähennettynä viljan kosteudella. Siten esim. 20% viljan korkein kuivauslämpötila olisi 70 °C.

Kuivausvaurioiden syntyyn vaikuttavat seuraavat tekijät:

- Viljan historia, käsittely ja kastuminen/kuivuminen. Syksyn sateet voivat vaikuttaa hyvinkin voimakkaasti viljan ominaisuuksiin. Tämä näkyy esimerkiksi sakoluvun ja itävyyden muutoksina. Nämä muutokset kielivät jyvän rakenteen huomattavasta muutoksesta.
- Viljan kosteus. Hyvin kostean viljan kuivuessa jyvään syntyy jännityksiä, jotka voivat rikkoa jyvän rakenteen ja aiheuttaa vaurioita
- Lämmölle altistumisaika. Jyvää lämpenee nopeasti kuivausilman lämpötilaan ja vauriot lisääntyvät, jos altistumisaika pitenee.
- Kuivurin rakenne. Rakenne ja toimintatapa ratkaisevat kuinka kauan jyvää altistuu korkealle lämpötilalle.
- Viljalaji tai -lajike. Viljalajike vaikuttaa viljan kestävyyskykyyn.

Viljan jyvää lämpenee nopeasti, jo 3 - 5 min kuluessa jyvän ydin saavuttaa kuivausilman lämpötilan [Suomala 1988]. Kun kuivausilma tulee kuivuriin, veden sitominen alentaa sen lämpötilaa nopeasti ja poistolämpötilat esimerkiksi kennokuivureissa ovat 30 - 40 °C kun kuivausilman lämpötila on 70 °C. Kuivurissa olevat jyvät joutuvat siten 30 - 70 °C ilman kanssa tekemiseen.

Lämpövauriot näkyvät herkimmin jyvien itävyyden ja leivontaominaisuuksien muutoksina. Itävyyskään ei yksinään ole tarkka muutosindikaattori, vaan siementen elinvoima on tätä herkempi. Jyvät voivat itää, mutta niissä ei ole riittävästi elinvoimaa kunnollisten oraiden muodostumiseen. Jos halutaan tietää jyvien elinkelpoisuus pellolla, silloin pitäisi tutkia sirkkalehtien kasvunopeutta. Leivän



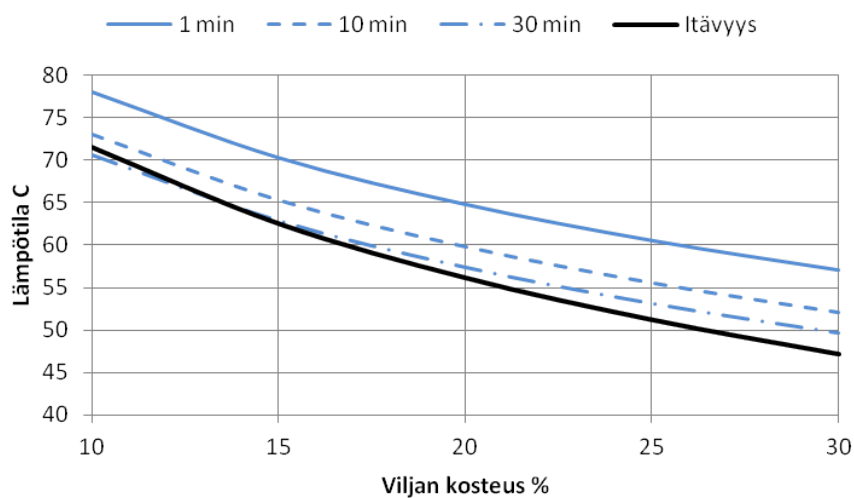
Kuva 4.6: Vehnän ominaisuuksien muutos jyvän lämpötilan ja kosteuden vaihtuessa

nousemiseen liittyvät sitko-ominaisuudet heikkenevät aiemmin kuin jyvän valkuaisissa tapahtuu muutoksia. Kuvassa 4.6 on esimerkki vehnän ominaisuuksien muutoksista, kun jyvien lämpötila ja kosteus vaihtelee [?]. Kuvasta näkyy selvästi alue, jossa muutokset tapahtuvat ja myös viljan kosteuden vaikutus. Täysin turvallisena rajana märille jyville on 40 °C kuivauslämpötila ja kuiville jyville (alle 15% kosteus) 60 °C kuivauslämpötila. Riippuu kuivurirankenteesta saavuttaako jyvä kuivausilman lämpötilan. Lavakuivureissa kuumalla ilmalla kuivattaessa näin käy ja myös siilokuivureissa voi käydä näin. Kennokuivureissa jyvän lämpötila on alempi kuin kuivausilman lämpötila. Tämä johtuu viljan sekoittumisesta ja kiertämisestä sekä kuivausilman lämpötilan alenemisestä kun se sitoo vettä.

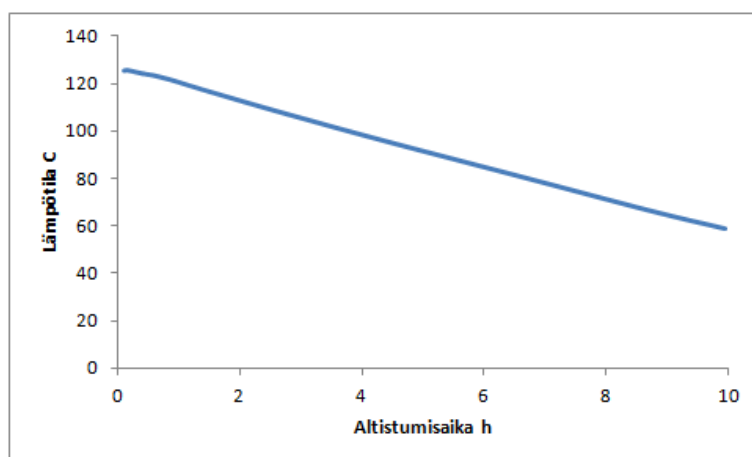
Kuvassa 4.7 on jyvien lämpötilakestävyysikä altistumisajan mukaan esitettyä [Hutchinson et al 1946, Lindberg ja Sörensson 1959]. Kuumassa oloaika vaikuttaa oletetusti eli mitä kauemmin jyvä on kuumassa tilassa, sitä suurempi on ominaisuuksien muutoksen todennäköisyys. Ilman sisäänmenokohdissa ja kennokuivurin harjojen päällä on korkeampia lämpötiloja ja jos jyvät ovat tässä lämpötilassa pidempään, niiden ominaisuuksissa voi tapahtua muutoksia. Suomalain [Suomala 1988] mukaan kennokuivureiden harjojen eristäminen ei vaikuttanut jyvien elinvoimaisuuteen. Sen sijaan elinvoimaisuudessa oli huomattavia eroja sen mukaan, mistä kohtaa kuivuria näytteet otettiin. Kennokuivureissa kuivausilmaharjat ja vastaavasti poistoilmaharjat ovat samalla pystysuoralla linjalla. Puhallusilmaharjan kohdalla jyvät joutuvat korkeampaan lämpötilaan ja niiden elinvoimaisuus oli huonompi. Kun verrattiin 70 °C kuivausilman vaikutusta jyvien lämpötilaan, kuuminta reittiä tulleet jyvät olivat 23 °C kuumempia kuin kylmintä reittiä tulleet. Sama ilmiö näkyy myös viljojen kosteuden vaihteluna [Mellmann et al 2011].

Rehuviljalle on aivan erilaiset vaatimukset kuin muulle viljan käytölle. Niissä kuumassa kuivaus voi jopa aiheuttaa rehun käyttökelpoisuuden paranemista maittavuuden ja sulavuuden parantuessa. Suomala [Suomala 1988] on kerännyt eri lähteistä rehuviljan raja-arvoja ja kiteyttänyt ne kuvan 4.8 mukaisesti. Sen mukaisesti esim. 120 C lämpötilan ei pitäisi kennokuivureissa muuttaa rehuominaisuuksia merkittävästi. Viljan lämpötilahan on niissä selvästi kuivauslämpötilaa alempi.

#### 4 Jyvän lämpeneminen ja kuivuminen



Kuva 4.7: Jyvän lämpötilakestävyksiä. Alin käyrä kuvaa itävyyden huomattavaa heikkenemistä ja ylimmät gluteenin koaguloitumista altistusajan muuttuessa.



Kuva 4.8: Rehuviljan turvalliset lämpötilat sen perusteella, kuinka pitkään jyvät ovat kyseisessä lämpötilassa

# Kirjallisuutta

- [Hutchinson et al 1946] Hutchinson J.B., Greer E.N. & Thomas P.T. Heat damage in cereal seeds. ref. Ahokas J. & Koivisto K. Energian säästö viljankuivauksessa. Tutkimuslaskelma 31, Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos 1983.
- [Hutchinson et al 1946 ref Suomala] Hutchinson J.B., Greer E.N. & Thomas P.T. Heat damage in cereal seeds. ref. Suomala E. Kuivausilman lämpötilan ja kuivurin sisäisten kuumien metallipintojen vaikutus ohran elinvoimaan viljaa kierrättävässä sekavirtaustyyppisessä kuivurissa. Progradu työ, Helsingin yliopisto, Maatalousteknologian laitos 1988.
- [Leipätiedotus] [http://www.leipätiedotus.fi/tietoa\\_leivasta/vilja\\_ja\\_viljalajit/viljalajit/](http://www.leipätiedotus.fi/tietoa_leivasta/vilja_ja_viljalajit/viljalajit/)
- [Lindberg ja Sörensson 1959] Lindberg J.E., Sörensson I. Upphetning- och torkningsförsök med spannmål företrädesvis vete, ref. Ahokas J. & Koivisto K. Energian säästö viljankuivauksessa. Tutkimuslaskelma 31, Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos 1983.
- [Mellmann et al 2011] Mellmann J., Iroba K.L., Metzger T., Original Research Article Tsotsas E., Mészáros C. & Farkas I. Moisture content and residence time distributions in mixed-flow grain dryers. Biosystems Engineering, Volume 109, Issue 4, August 2011, Pages 297-307
- [Suomala 1988] Suomala E. Kuivausilman lämpötilan ja kuivurin sisäisten kuumien metallipintojen vaikutus ohran elinvoimaan viljaa kierrättävässä sekavirtaustyyppisessä kuivurissa. Progradu työ, Helsingin yliopisto, Maatalousteknologian laitos 1988.

# 5 Kuivumistapahtuma

## 5.1 Ilman tilanmuutokset kuivauksessa

Palautetaan mieleen ilma-höyryseoksen tärkeimmät käsitteet (kappaleessa 2 jo käsitelimme tätä). Normaali ulkoilma on kuivan ilman ja vesihöyryn seos. Vesihöyryä ei kuitenkaan voi olla ilmassa rajattomasti, vaan sillä on tietty suurin määrä. Jos ilmassa liikaa vesihöyryä, ylimääräinen osuus siitä tiivistyy vedeksi ja ilma tulee kastetilaan. Ilman vesihöyrypitoisuus ilmoitetaan teknillisessä kirjallisuudessa yleensä veden massana kuivaa ilmakiloa kohti ja sitä kutsutaan kosteussuhteeksi tai absoluuttiseksi kosteudeksi.

$$x = \frac{m_v}{m_i} \quad (5.1)$$

$x$  ilman kosteussuhde  
 $m_v$  ilmassa olevan vesihöyryn massa  
 $m_i$  kuivan ilman massa

Maataloudessa ja puhekielessä ilman kosteutena käytetään suhteellista kosteutta, joka ilmaisee kuinka lähellä kastepistettä ollaan, kun lämpötila ja ilmanpaine on määrätty. Suhteellinen kosteus esitetään prosentteina seuraavasti:

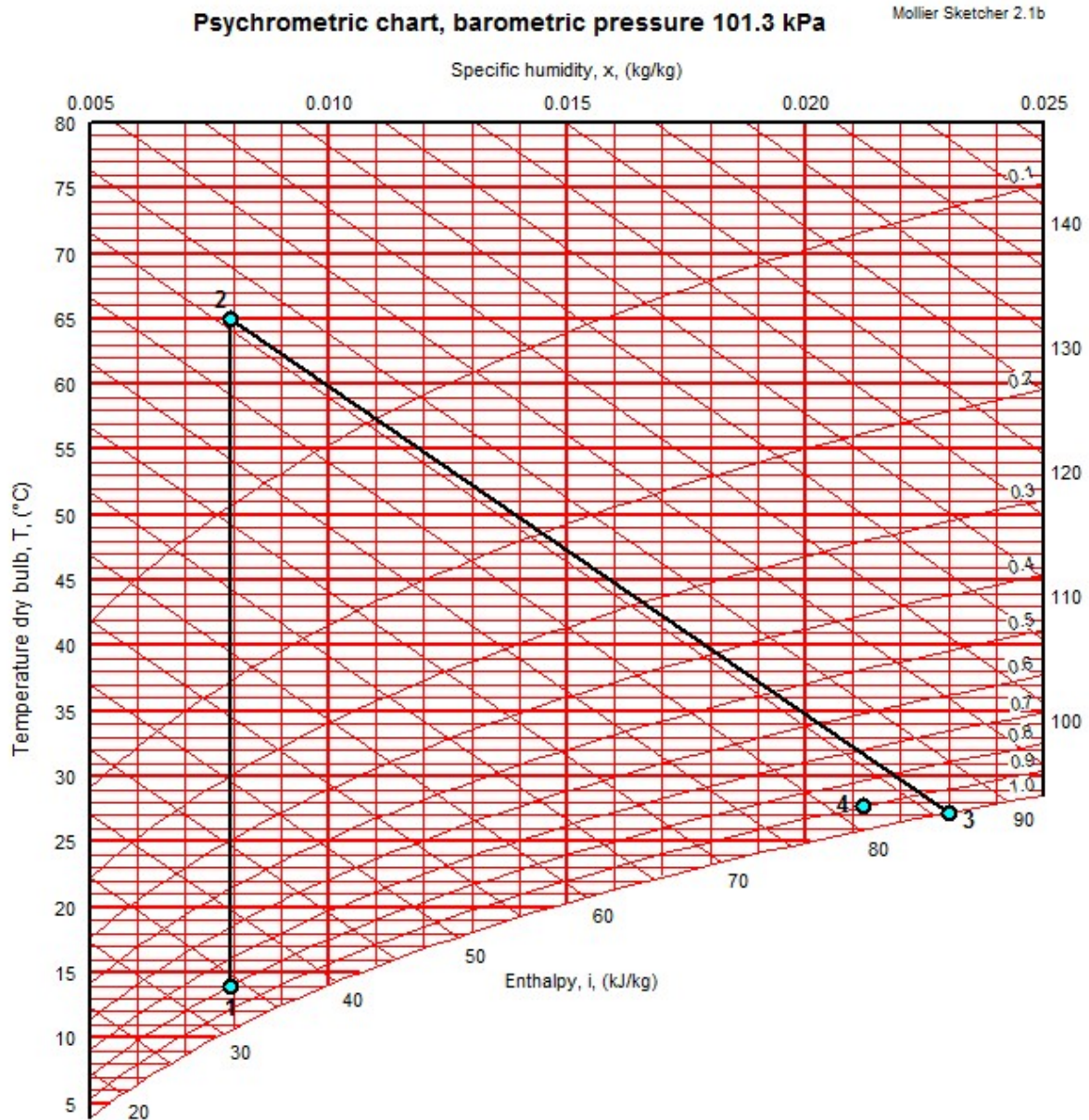
$$RH = \frac{p_v}{p_k} \quad (5.2)$$

$RH$  suhteellinen kosteus  
 $p_v$  ilmassa olevan vesihöyryn osapaine  
 $p_k$  kylläisen vesihöyryn paine

Kuivauksessa käytettävä kuivausilma voi olla vähän lämmitettyä tai kuumaa. Vähän lämmitettyä ilmaa käytettäessä puhutaan kylmäilmakuivauksesta. Siinä ilma lämpiää puhaltimessa hieman ja mahdollisesti tämän lisäksi ilmaa lämmitetään muutaman asteen verran lisälämmittimellä. Kuivailmakuivauksessa ilmaa lämmitetään useita kymmeniä asteita. Kuivausta voidaan tarkastella Mollier-diagrammin avulla, kuva 2.3. Se näyttää graafisesti ilman tilan, kun sen lämpötila ja kosteus tiedetään. Kuvassa x-akselina on ilman kosteussuhde, vesimäärä kg yhtä kuivaa ilmakilogrammaa kohti. Y-akselina on ilman lämpötila. Näiden lisäksi kuvaan on piirretty ilman suhteellisen kosteuden käyrät ja ilman energiasisällön (entalpian) suorat.

Kuvaan 5.1 on piirretty esimerkki viljan kuumailmakuivauksesta. Kuivuriuunin tuloilmaa on merkitty pisteellä 1. Tämän lämpötila on 14 °C ja suhteellinen kosteus 80 % sekä kosteussuhde 9 g ilmakiloa kohti. Kun tätä ilmaa lämmitetään uunissa, sen lämpötila kohoaa n. 50 °C eli loppulämpötila on 65 °C. Ilmaa lämmitettäessä siinä oleva absoluuttinen vesimäärä säilyy eli kuvassa siirrytään 0,009 kg H<sub>2</sub>O/kg kuivaa ilmaa kohdalla suoraan ylöspäin kohtaan, jossa lämpötila on 65 °C. Ilman suhteellinen kosteus pienenee siten, että se on uunin jälkeen vain 5 %. Tämä tarkoittaa sitä, että lämmitetty ilma pystyy sitomaan itseensä hyvin paljon lisää vettä. Kun ilma on sitonut itseensä kaiken mahdollisen veden, tullaan kastepisteeseen eli ilman suhteellinen kosteus on 100 %. Tämä nähdään myös mollier-piirroksessa. Lämmitetyn ilman pisteestä 2 siirrytään pisteeseen 3 vakioentalpiakäyrää pitkin (adiabaattisesti). Tässä pisteessä suhteellinen kosteus on 100 % ja ilma sisältää vettä n. 23 g ilmakiloa kohti. Tämä vedensitomistapa on adiabaattinen eli kaikki ilmassa oleva lämpö säilyy, lämpöhäviöitä ei tapahdu. Tällöin ilman sisältämä entalpia eli energiamäärä pysyy samana. Veden sitominen tarvitsee lämpöä ja tämä näkyy siten, että ilman lämpötila laskee 65 °C lämpötilaan 27 °C (piste 3). Käytännössä kuivaus ei tapahtu täysin adiabaattisesti eikä poistokosteus etenkään kuivauksen loppupuolella



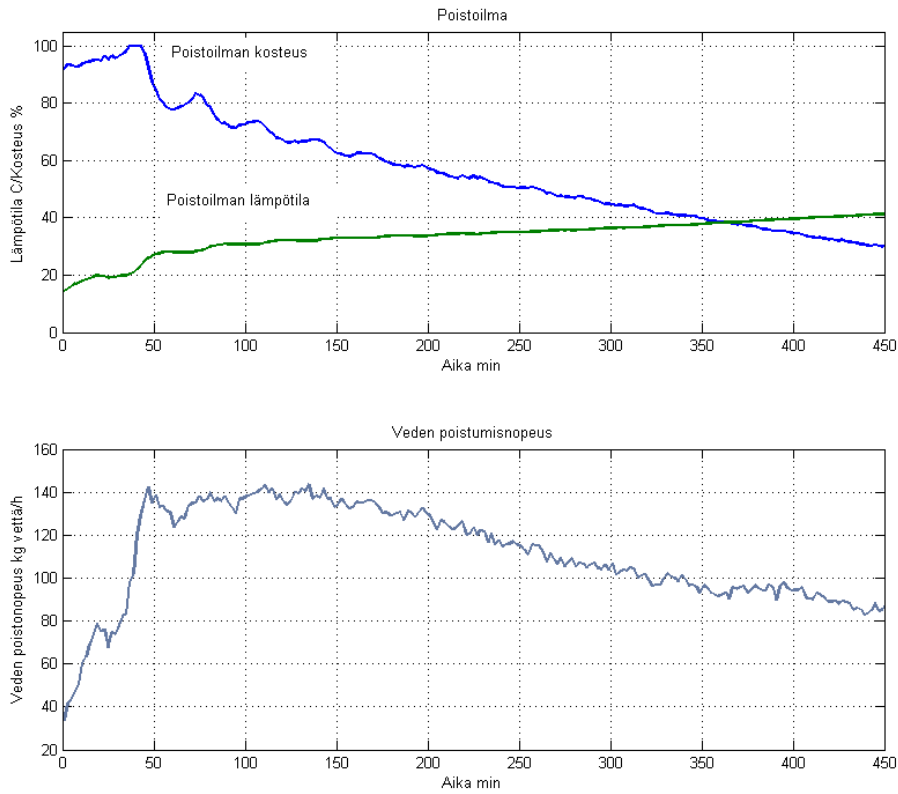


Kuva 5.1: Kuivauksen kulku Mollier diagrammissa

ole täysin 100%. Kuvaan 5.1 on piirretty piste 4, johon esimerkiksi ilman tila voisi tulla kuivattavan tavaran läpi kulkiessaan.

Kylmäilmakuivauksen voidaan katsoa olevan käytännössä häviötön eli siinä kuivausilman tila muuttuu siten, että ilman entalpia pysyy samana. Kuumailmakuivauksessa syntyy aina häviöitä. Nämä häviöt ovat ilmapuotoja ja lämpöhäviöitä eristämättömistä metalliosista. Ilmapuodot ja lämpöhäviöt tapahtuvat joko uunin ja kuivurin välisissä putkistoissa tai myös itse kuivurirakenteissa. Tällöin osa kuivausilman energiasta (entalpiasta) häviää ja todellinen kuivaustapahtuma noudattaakin kuvan 5.1 2-4 linjaa.

Kuvassa 5.2 on kokeellinen esimerkki kuivauksen edistymisestä. Alussa vilja lämpenee ja sitoo kuivausilman lämpöä. Samalla poistuu jyvän pinnalla oleva helposti irtoava vesi ja veden poistumisnopeus lisääntyy nopeasti. Kun pinta on kuivunut, jyvän sisällä olevan kosteuden pitää siirtyä jyvän pintaan. Tämä vaihe näkyy kuivausnopeuden hidastumisena. 50 min kohdalla on alkanut tasainen veden poistonopeus, nopeus on pysynyt lähes vakiona ja 150 min kohdalla kuivuminen on hidastunut (veden poistumisnopeus on alentunut). Mitä kuivemmaksi vilja tulee, sitä hitaammaksi tämä kosteu-



Kuva 5.2: Esimerkki kuivauksen poistoilman tilasta ja veden poistumisnopeudesta kuivauksen aikana

den siirtyminen tulee ja kuivumisnopeus hidastuu jatkuvasti. Jyvän ytimen lämpötila on aluksi melko alhainen, koska veden haihtuminen sitoo lämpöä. Kuivauksen edistyessä haihtuminen vähenee ja jyvän ytimen lämpötila nousee.

Viljan vedenluovutuksen muuttuessa kuivauksen aikana myös kuivausprosessi muuttuu. Kuvassa 5.3 on esitetty kuvan 5.2 kuivauskokeen poistoilman tilan muutos kuivauksen edistyessä. Kun kosteuden poistumisnopeus on suuri, myös poistoilman suhteellinen kosteus ja kosteussuhde ovat suuria. Kuivumisnopeuden hidastuessa loppuvaiheessa poistoilman tila muuttuu huomattavasti.

## 5.2 Kuivuriuuni

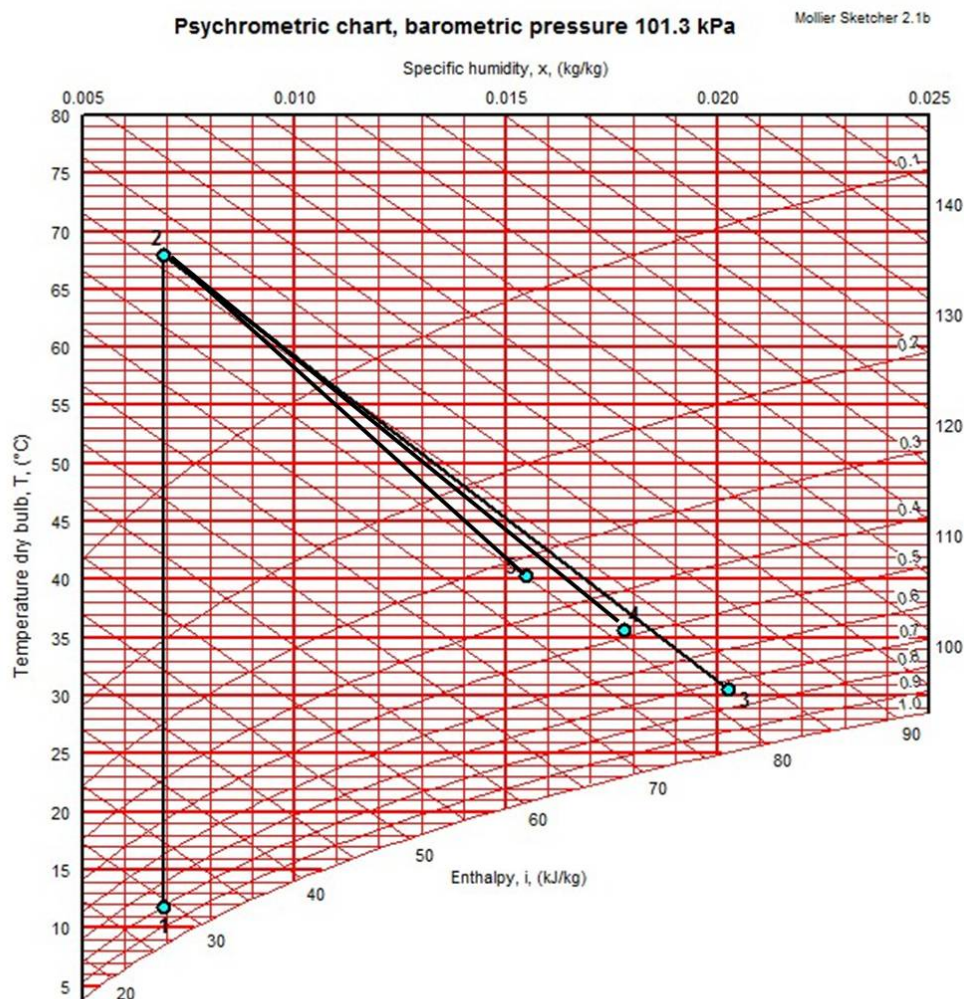
### 5.2.1 Kuivuriuunin teho

Kuivuriuunissa ilman lämpötilaa nostetaan, jolloin ilman vedensitomiskyky paranee. Kuvassa 5.3 kuivuriuuniin tuleva ilman tila on pisteessä 1 ja uunin jälkeen tila on pisteessä 2. Ilman entalpia eli lämpösisältö on muuttunut n 29 kJ/kg tilasta n 86 kJ/kg tilaan. Tarvittava lämmitysteho voidaan laskea yhtälö avulla 5.3. Yhtälössä  $q_v$  on ilman tilavuusvirtaus,  $\rho_i$  on ilman tiheys ja  $h$  on entalpia.

$$P = q_v \rho_i \Delta h \quad (5.3)$$

**Esimerkki.** Kuivuriuunin ilmamäärä on 13 000 m<sup>3</sup>/h, imuilman lämpötila on 15 °C ja kosteus 70%. Kuivausilman lämpötila on 70 °C. Mikä on uunin teho?

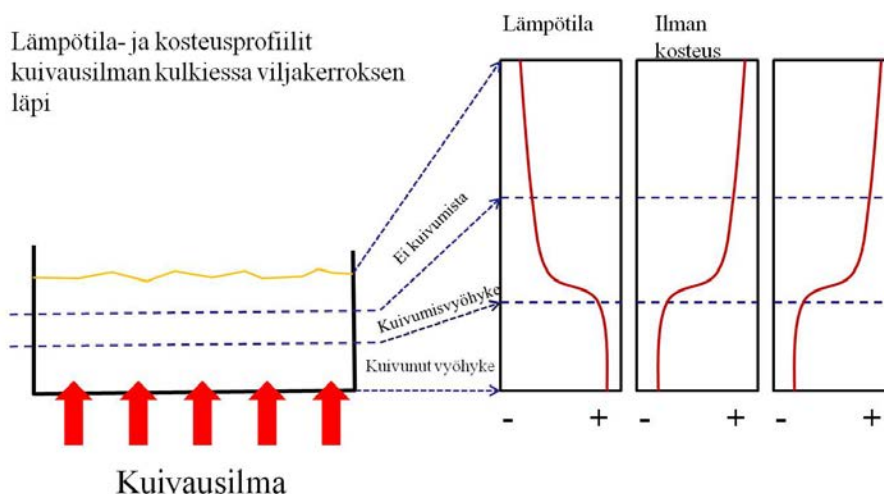
Laskentaa varten kertaa tai katso ilman ominaisuuksia käsittelevää kappaletta. Ilman tilan yhtälöt selityksineen ovat sieltä. Laskuissa käytetään ilmanpainetta normaalipainetta 101 300 Pa. Yhtälön 5.3 alkuosassa lasketaan ilman massavirtaus kun tilavuusvirtaus kerrotaan ilman tiheydellä. Jotta laskut menisivät oikein ilman tiheyden pitää vastata tilaa, jossa puhaltimen tilavuusvirta on ilmoitettu. Ilman lämmitessä sen tiheys muuttuu, ja jos uuni imee 15 °C ilmaa ja puhalttaa 70 °C, ilman tiheys



Kuva 5.3: Kuivumisprosessin muuttuminen kuivauksen edistyessä. 3 = poistoilman tila kuivauksen tapahtuessa vakionopeudella, 4 = poistoilman tila kuivausnopeuden hidastuessa, 5 = poistoilman tila kuivauksen lopussa

harvenee ja ulostulomäärä on tilavuutena suurempi kuin sisäänmenomäärä. Yleensä puhaltimien ilmämäärät (tilavuusvirrat) normioidaan tiettyyn lämpötilaan. Ongelmana on, että normiointilämpötiloja on ollut useita käytössä ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Oletetaan, että tilavuusvirtausta vastaava lämpötila on  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ilman tiheys saadaan yhtälöstä  $\rho = \frac{pM}{RT}$ ,  $\rho = \frac{101300 \cdot 28,97}{8,3143 \cdot (15+273)} = 1,23\text{ kg/m}^3$ . Massavirtaus on siten  $q_m = \frac{13000 \cdot 1,23\text{ kg}}{3600\text{ s}} = 4,44\text{ kg/s}$ . Ilman entalpia saadaan yhtälöstä  $h = c_i T + x(l_h + c_h T)$ . Laskentaa varten tarvitaan ilman kosteussuhde. Sitä varten täytyy laskea ensiksi kylläisen ilman vesihöyryn paine imuilman tilassa,  $p_k = \frac{e^{77,345+0,0057T-\frac{7235}{T}}}{T^{8,2}}$ ,  $p_k = \frac{e^{77,345+0,0057 \cdot (273+15)-\frac{7235}{273+15}}}{(273+15)^{8,2}} = 1684\text{ Pa}$ . Kun ilman suhteellinen kosteus on 70%, vesihöyryn osapaine on  $p_v = 0,7 \cdot 1684 = 1179\text{ Pa}$ . Kosteussuhde on silloin,  $x = 0,6220 \frac{p_v}{p-p_v} = 0,6220 \cdot \frac{1179}{101300-1179} = 7,3\text{ g vettä yhtä kuivaa ilmakiloa kohden}$ . Nyt entalpiat voidaan laskea,  $h_1 = 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} 15 + 0,0073 \cdot (2502 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1,87 \frac{\text{kJ}}{\text{kgC}} 15\text{C}) = 33,5\text{ kJ/kg}$ . Vastaavasti kuivausilman entalpia on  $89,8\text{ kJ/kg}$ . Ilmaan on siten tuotu lisäentalpiaa (lämpöä)  $89,8 - 33,5 = 56,3\text{ kJ/kg}$ . Uunin teho on siten  $P = 4,44\text{ kg/s} \cdot 56,3\text{ kJ/kg} = 250\text{ kW}$ . Sama lasku voidaan tehdä lukemalla arvot suoraan Mollier-diagrammista. Tekemällä laskentapohjat tai tarvittavat funktiot vaikka Exceliin voidaan nopeasti ja helposti laskea ilman tila eri alkuarvoilla. Netistä löytyy myös useita käteviä ilman tilan laskentohjelmia.

Uunin teho voidaan laskea kohtuullisella tarkkuudella olettaen, että ilman kosteuden vaikutus on pieni. Tällöin teho voidaan laskea kuivan ilman avulla yhtälön 5.4 mukaisesti.



Kuva 5.4: Lämpötilan ja kosteuden muutokset ilman kulkiessa viljakerroksen läpi

$$P = q_v \rho_i c_i \Delta T \quad (5.4)$$

**Esimerkki.** Lasketaan edellinen esimerkki kuivan ilman ominaisuuksien avulla,  $P = 4,44 \text{ kg/s} \cdot 1,0 \text{ kJ}/(\text{kgK}) \cdot (70 - 15) = 244 \text{ kW}$ . Tämä tapa antoi 2% pienemmän tehon kuin entalpioiden mukaan laskettu.

### 5.2.2 Kuivuriuunin ilmamäärä

Kuivuriuunin ilmamäärä (tilavuusvirtaus) ja teho riippuvat toisistaan. Kuivausilman lämpötila valitaan viljan mukaisesti ja uunin tehon on oltava riittävä, jotta lämpötila saavutetaan uunin ilmamäärällä. Tämä nähdään yhtälöstä 5.4. Ongelmana on uunin imuilman lämpötilan vaihtelu, jos uunin teho pysyy samana, kuivausilman lämpötila vaihtelee imuilman lämpötilan muuttuessa. Kuivuritekniikasta riippuen tätä on yritetty estää eri tavoilla. Vaihtamalla öljypolttimen suutin tai muuttamalla öljyn painetta saadaan myös lämmitystehoa muutettua. Uunin ilmamäärää voidaan pienentää kuristamalla puhaltimen ilmamäärää, jolloin kuivausilman lämpötila kohoaa. Nykyisin öljypolttimet ovat usein ns monitehoisia tai moduloivia, jolloin myös uunin tehoa voidaan säätää. Haketta tai turvetta käytettäessä tehonsäätö voidaan toteuttaa polttoaineen syöttämäärää säätämällä.

Tehon lisäksi ilmamäärää vaikuttaa kosteuden poistonopeuteen, tästä lisää kappaleessa 5.4.3.

## 5.3 Kuivauksen edistyminen

Jos tarkastellaan viljakerroksen kuivumista, tämä voidaan esittää kuvan 5.4 mukaisesti. Kuivattavan materiaalin alle puhalletaan kuivausilma. Kulkiessaan viljan läpi kuivausilma sitoo itseensä kosteutta. Kuvan tilanteessa kuivuminen on alkuvaiheessa ja ilmaan sitoutuu vettä pääasiassa kerroksen pohjalta. Ylempänä veden sitoutumista ei tapahdu, koska kuivausilma on jo niin kylläinen, ettei se pysty sitomaan itseensä lisää vettä. Tämä veden sitoutuminen alentaa lämpötilaa ja lisää ilman kosteuspiitoisuutta. Kuivattava materiaali kuivuu vain ohuessa kerroksessa, kuivumisvyöhykkeessä. Kuivuminen edistyy pohjalta ylöspäin ja kun kuivumisvyöhyke on saavuttanut pinnan, koko kerros on kuivunut.

Jos kyseessä on kylmäilmakuivaus ja kerros on paksu, voi kestää liian kauan, ennekuin kuivumisvyöhyke on saavuttanut pinnan. Tällöin pintakerros on voinut jo pilaantua tai kuoretua. Jos kyseessä on kuumailmakuivaus, viljakerroksen pohja on kuivuu liikaa ennen kuin pinta on kuivunut. Jotta kuivuminen olisi tasaista, kerrospaksuutta pitää muuttaa kuivattavan materiaalin kosteuden vaihdella.

Taulukko 5.1: Viljan kuivumisnopeuden kertoimia

Materiaali	k-kerroin	n-kerroin	Aikayksikkö
Ohra	$0,0462 \cdot e^{0,0154 \cdot T}$	$0,492 + 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 123)^2$	min
Maiissi	$e^{-7,1735 + 1,2793 \cdot \ln(1,8 \cdot T + 32) + 0,1378 \cdot v}$	$0,0811 \cdot \ln(RH) + 0,78 \cdot w_i$	h
Vehnä	$2000 \cdot e^{-\frac{5094}{T+273}}$	1	s

## 5.4 Kuivauksen laskentayhtälöt

### 5.4.1 Tasapainokosteus

Tasapainokosteutta olemme käsitelleet jo kappaleessa 3.5.2. Tasapainokosteus voidaan laskea käyttäen esim. Hendersonin yhtälöä, yhtälö 5.5.

$$\frac{RH}{100} = 1 - e^{-cT w_k^n} \quad (5.5)$$

- RH Ilman suhteellinen kosteus %  
 c,n Materiaalikertoimia  
 T Lämpötila °C  
 w<sub>k</sub> Materiaalin kuivakosteus % (db)

Yhtälön 5.5 kertoimet vehnälle ovat:  $c = 10,06 \cdot 10^{-7}$  ja  $n=3,03$ .

Usein meillä on ilman tilatiedot tiedossa ja olemme kiinnostuneita mihin viljan kosteus asettuu. Sitä varten voimme käyttää esim. yhtälöä 5.6. Yhtälön kertoimet ovat taulukossa 3.3.

$$w_k = E - F \cdot \ln \left[ -(T + C) \cdot \ln \frac{RH}{100} \right] \quad (5.6)$$

### 5.4.2 Viljan kuivumisnopeus

Edellisessä kappaleessa laskettiin mihin viljan kosteus asettuu, kun sitä ympäröivän ilman tila tiedetään. Siirrytään tästä eteenpäin eli lähdetään tarkastelemaan kuinka nopeasti kosteus siirtyy jyvistä sitä ympäröivään ilmaan. Viljan kuivumisen yhtälöitä on kehitetty lähtien mm diffuusiosta jyvissä. Näistä on kattava selostus Pabis et al ([Pabis et al 1998]) kirjan luvussa 4. Yleisimmin käytetään Page kehittämää mallia (ref. [ASAE S448]). Kuivumisnopeus voidaan laskea yhtälöstä 5.7.

$$w_s = \frac{w_h - w_e}{w_i - w_e} = e^{-kt^n} \quad (5.7)$$

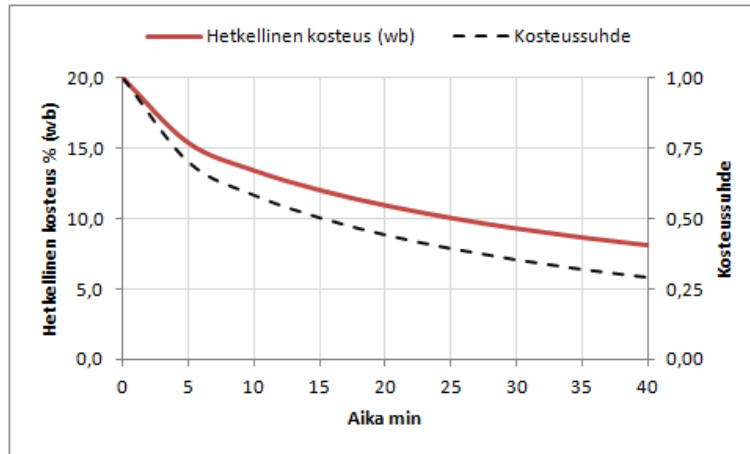
- w<sub>s</sub> kosteussuhde  
 w<sub>h</sub> hetkellinen kosteus (db)  
 w<sub>e</sub> materiaalin tasapainokosteus kyseissä tilassa (db)  
 w<sub>i</sub> materiaalin alkukosteus (db)  
 t aika, s  
 k,n kertoimia

Yhtälön kertoimia on esitetty taulukossa 5.1. Huomaa, että taulukossa aikayksikkö vaihtelee viljalajin mukaan.

**Esimerkki.** Kuinka nopeasti ohra kuivuu 20 % (wb) lähtökosteudesta 14 % (wb) loppukosteuteen, kun kuivausilman lämpötila on 70 °C ja suhteellinen kosteus 5%?

Lasketaan ensin ohran kertoimet.  $k=0,0462 \cdot e^{0,0154 \cdot 70} = 0,136$  ja  $n = 0,492 + 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot (70 - 123)^2 = 0,600$ . Laskenta antaa alla olevan kuvan siitä kuinka nopeasti kosteussuhde muuttuu. Viljan hetkellisen kosteuden laskemista varten meidän pitää ratkaista se yhtälöstä 5.7,  $w_h = w_e + w_s \cdot (w_i - w_e)$ .

Hetkellisen kosteuden laskentaa varten meidän pitää ensin laskea mikä on kyseisessä tilassa viljan loppukosteus (tasapainokosteus), jos vilja olisi tuossa tilassa pitkän ajan. Tämä lasketaan yhtälöstä 5.6,  $w_k = 0,33363 - 0,050279 \cdot \ln[-(70 + 91,323) \cdot \ln(0,05)] = 2,2 \%$  (wb). Jos kuivausta jatkettaisiin hyvin pitkään vilja kuivuisi tähän luokkaan. Tämän jälkeen voimme laskea mikä on kosteussuhdetta vastaava viljan hetkellinen kosteus. Tämä on esitetty kosteussuhteen kanssa samassa kuvaajassa yllä.



Edellä olleessa esimerkissä vilja kuivui nopeasti. Käytännössä kuivuminen kestää kuitenkin huomattavasti pidempään, miksi? Kun kuivausilma tulee viljakerrokseen, viljasta siirtyy kosteutta ilmaan ja ilman lämpötila alenee ja kosteus lisääntyy. Ilman kuivuskyky heikkenee siten koko ajan sen kulkiessa viljakerroksen läpi. Ainoastaan ensiksi ilman kanssa kosketuksissa oleva kerros kuivuu näin nopeasti. Muut kerrokset kuivuvat jo huomattavasti hitaammin. Kuva 5.4 esittää materiaalin kuivumista lava-kuivurissa. Ilma sitoo lavan alle tullessaan nopeasti viljasta kosteutta itseensä ja kuivuminen alkaa pohjalta edeten ylöspäin.

### 5.4.3 Veden poistumisnopeus

Jyvissä oleva kosteus siirtyy kuivausilmaan, joka siirtää veden kuivurista pois. Periaatteessa mitä suurempi ilmamäärä on, sitä enemmän kosteutta siirtyy kuivurista pois. Rajana on jyvien kulkeutuminen ilman mukana. Jyvät lähtevät liikkeelle kun ilman nopeus on luokkaa 7-10 m/s. Kun tarkastellaan kuvaa 5.1, sisään menevän ilman ja kuivausilman kosteussuhde on 0,008 kg vettä kuivaa ilmakiloa kohde. Poistuvan ilman vastaava arvo on 0,023. Poistuvassa ilmassa on siten runsaasti viljasta poistunutta vettä mukana. Jokaista ilmakiloa kohden vesimäärä on lisääntynyt  $0,023 - 0,008 = 0,015$  kg. Veden poistumisnopeus saadaan laskettua yhtälön 5.8 mukaan. Yhtälössä  $q_m$  on ilman massavirtaus ja  $\Delta x$  on ilman sitoma lisävesimäärä.

$$q_{H_2O} = q_m \cdot \Delta x \quad (5.8)$$

Jos esimerkiksi kuvan 5.1 tapauksessa ilman massavirtaus olisi 4,44 kg/s (13 000 m<sup>3</sup>/h), veden poistumisnopeus on  $4,44 \cdot 0,015 = 0,067$  kg/s = 240 kg/h. Kuvassa 5.2 on esimerkki veden poistumisnopeudesta kuivauksen aikana. Kuivauksen alussa veden poistuminen nopeutuu, silloin jyvät lämpenee ja jyvistä lähtee pinnalla oleva helposti irtoava vesi. Kuivauksen loppuvaiheessa poistumisnopeus pienenee, koska veden siirtyminen jyvän sisästä pintaan hidastaa veden irtoamista jyvistä.

### 5.4.4 Kuivauksen energiatehokkuus

Kuivauksen energiatehokkuus voidaan ilmoittaa kahdella eri tavalla. Meillä käytetään yleisesti tapaa, jossa ilmoitetaan kuinka paljon energiaa tarvitaan yhden vesikilon poistamiseen. Tätä kutsutaan ominaisenergian kulutukseksi. Toisena vaihtoehtona on verrata energian kulutusta vastaavassa tilanteessa tarvittavaan veden höyrystymiseen kuluvaan energiaan. Tällöin puhutaan kuivurin hyötysuhteesta. Viljasta poistettu vesimäärä  $M_{vpoisto}$  voidaan laskea yhtälön 5.9 avulla. Siinä  $M_{sato}$  on kuivatun sadon massa,  $w_a$  on viljan alkukosteus ja  $w_l$  on viljan loppukosteus (katso myös kappale 3.4).

$$M_{\text{vpoisto}} = M_{\text{sato}} \frac{w_a - w_l}{1 - w_a} \quad (5.9)$$

Kuivauksen energian ominaiskulutus  $E_{om}$  voidaan laskea yhtälöllä 5.10, jossa  $E_k$  on kulutettu energiamäärä ja  $M_{\text{vpoisto}}$  on sillä haihdutettu vesimäärä.

$$E_{om} = \frac{E_k}{M_{\text{vpoisto}}} \quad (5.10)$$

Veden höyrystymislämpö voidaan laskea yhtälön 5.11 avulla. Siinä  $h_{vh}$  (veden höyrystymislämpö 0 C asteessa) on 2502 kJ/kg ja  $c_v$  (vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti) on 1,87 kJ/(kgC).

$$E_h = (h_{vh} + c_v T_v) M_{\text{vpoisto}} \quad (5.11)$$

Kun verrataan veden höyrystymislämpöä  $E_h$  (minimienergiantarve) kuivaukseen käytettyyn energiamäärään  $E_k$ , saadaan kuivauksen hyötysuhde, yhtälö 5.12. Veden höyrystymislämpö lasketaan yleensä käyttäen lämpötilaa, joka viljalla on kun se syötetään kuivuriin.

$$\eta = \frac{E_h}{E_k} \quad (5.12)$$

Kuivauksen hyötysuhdetta hyvin lähellä on lämpötilahyötysuhde, yhtälö 5.13. Tavallisessa maatalouden kuivauksessa tämä on hyvin lähellä kuivaamishyötysuhdetta.

$$\eta_T = \frac{T_k - T_p}{T_k - T_u} \quad (5.13)$$

$\eta_T$	Lämpötilahyötysuhde
$T_k$	Kuivausilman lämpötila
$T_p$	Poistoilman lämpötila
$T_u$	Uunin imuilman lämpötila

Kuvassa 5.5 on esimerkki kuivauksen hyötysuhteen ja lämpötilahyötysuhteen muuttumisesta kuivauksen aikana. Kuivauksen alussa, jolloin lämpöä tarvitaan sekä kuivurikoneikon että viljan lämmitämiseen lämpötilahyötysuhde antaa selvästi virheellisen tuloksen. Kuivauksen puolivälissä ja loppupuolella hyötysuhteet ovat samaa suuruusluokkaa. Näistä hyötysuhteista energiahyötysuhde on tarkempi, koska se perustuu energian kulutukseen. Lämpötilahyötysuhde soveltuu hyvin kuivurin toiminnan toteamiseen, sillä nähdä missä suuruusluokassa hyötysuhde on. Siitä on muistettava, että kuivauksen alussa se antaa vääriä tuloksia.

**Esimerkki.** Viljaeran kuivattu massa on 9600 kg, alkukosteus oli 22% (wb) ja loppukosteus 14% (wb). Tähän kulutettiin 150 l kevyttä polttoöljyä. Mikä oli kuivauksen ominaisenergian kulutus?

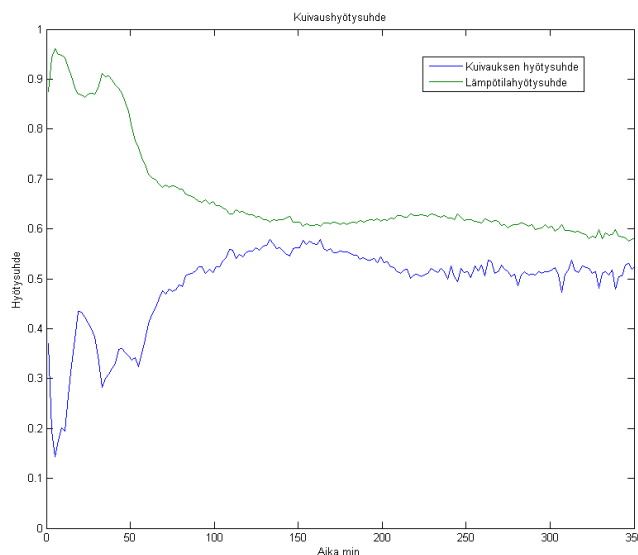
Poistettu vesimäärä on,  $M_{\text{vpois}} = 9600 \frac{0,22-0,14}{1-0,22} = 985$  kg. Jos öljyä tarvittiin 150 l, öljyn tiheys on 0,83 - 0,84 kg/l ja sen lämpöarvo 43 MJ/kg. Tarvittava öljymassa oli siten  $150 \cdot 0,83 = 124,5$  kg ja siinä on energia 5354 MJ (1487 kWh). Yhden vesikilon haihduttamiseen tarvitaan siten  $150/985 = 0,15$  l pö/kg H<sub>2</sub>O,  $5354/985 = 5,4$  MJ/kg H<sub>2</sub>O (1,5 kWh/kg H<sub>2</sub>O).

Mikä on edellisen esimerkin höyrystymislämpöön verrattu hyötysuhde?

Oletetaan viljan lämpötilan olevan +10 C, jolloin veden höyrystymislämpö on  $E_h = (2502+1,87 \cdot 10) \cdot 985 = 2483$  MJ. Höyrystymislämpöön verrattuna käytettiin  $5354-2483 = 2871$  MJ enemmän energiaa ja hyötysuhde on  $\eta = \frac{2483}{5354} = 0,46$ .

#### 5.4.5 Lämpötilan vaikutus kuivaukseen

Lämpötilan vaikutusta käsitelimme jo kappaleessa 4.7. Riippuen kuivattavan materiaalin käyttötarkoituksesta sekä kuivurin rakenteesta vilja voidaan kuivata eri lämpötiloissa. Herkin on siemenvilja, jossa liian korkea kuivauslämpötila aiheuttaa itävyyden heikentymistä. Lähes yhtä herkkä on leipävilja, liian korkea lämpötila heikentää leivontaominaisuuksia. Rehuviljan rehuominaisuudet taasen eivät



Kuva 5.5: Kuivauksen hyötysuhde ja lämpötilahyötysuhde kuivauksen aikana

kärsi korkeasta lämpötilasta. Kuivauslämpötilalle ei voida antaa selkeitä rajoja. Ilman lämpötila laskee nopeasti kun siihen sitoutuu jyvistä vettä. Lisäksi tämä veden siirtyminen jyvissä suojaa niiden liialliselta kuumenemiselta. Jyvän lämpötila riippuu siten myös kuivurin rakenteesta ja kuivausilman kulkusuunnasta.

Kuvassa 5.6 on esimerkki lämpötilan vaikutuksesta kuivaukseen. Kun lämpötila on 60 °C, ilmakilo sitoo n 10 g vettä ja lämpötilan ollessa 80 °C n 16 g vettä. Kuivauskapasiteetti on kasvanut merkittävästi. Suomi et al ([Suomi et al 2003]) mukaan korkean kuivauslämpötilan käytöllä säästettäisiin 16 - 30% energiaa.

Kuvassa 5.7 on teoreettinen laskelma siitä, miten kuivauksen energian kulutus muuttuu kuivausilman lämpötilan ja poistoilman kosteuden muuttuessa. Kuvan mukaan energiatehokkuus paranee aina siirryttäessä korkeiden lämpötilojen käyttöön. Kuivausilman lämpötilan ollessa alle 100 °C poistoilman kosteudella on myös merkittävä vaikutus energiatalouteen. Kuva on teoreettisen laskelman tulos ja siinä ei ole otettu huomioon lämpöhäviöiden lisääntymistä lämpötilan noustessa.

#### 5.4.6 Ilmamäärän vaikutus kuivumiseen

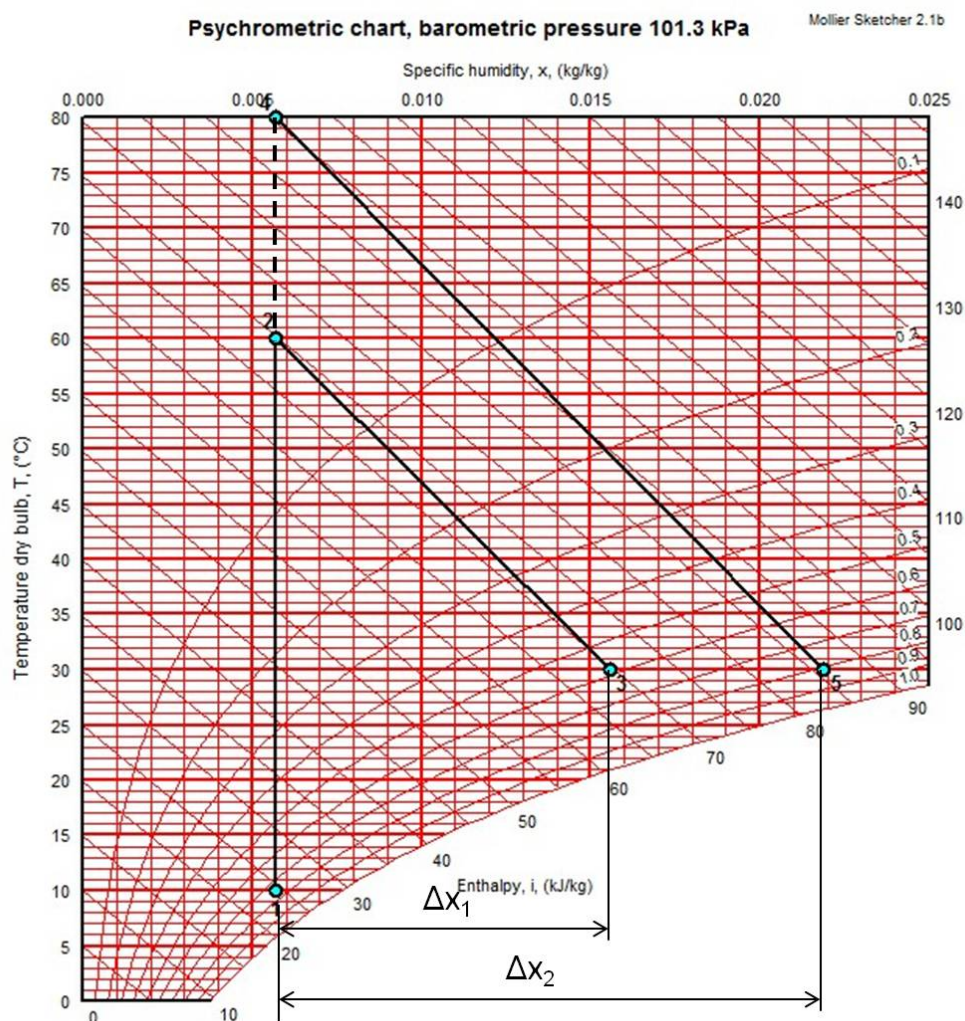
Ilmamäärän pitää olla riittävä, jotta jyvistä lähtevä kosteus voidaan siirtää kuivurista pois. Energiatalouden kannalta ilmamäärä pitäisi pitää lähellä 100%, silloin kuivuminen olisi energiatehokasta. Koska kuivureiden ilmamäärät pysyvät koko kuivauksen aikana samana, kuivumisen hidastuminen näkyy poistoilman kosteuden alenemisena ja lämpötilan nousuna, kuva 5.3. Kuivurin veden poistumisnopeus lisääntyy, kun ilmamäärää lisätään ja ilmamäärän lisääminen nopeuttaa aina kuivumista. Ilmamäärän lisääminen tarkoittaa samalla uunin lämpötehon lisäämistä.

Kuvassa 5.8 on käytetty kahta eri ilmamäärää siten, että ilman virtausnopeus viljassa on ollut 0,3 m/s ja 0,5 m/s. Kuivauslämpötila on ollut 70 °C. Ilmamäärän lisääminen on tehostanut veden poistumista lähes 40% ja energian kulutus on suurempia ilmamääriä käytettäessä ollut korkeampi. Tuloksista on huomattava, että koska kuivausilman lämpötila on ollut sama, uunin teho on silloin kokeissa erisuuri, koska ilmamäärät ovat erilaiset. [Peltola 1997]

#### 5.4.7 Viljan kiertonopeuden vaikutus kuivumiseen

Eräkuivureissa viljan kiertonopeus vaikuttaa siihen, kuinka tehokkaasti vilja sekoittuu ja kuinka pitkän ajan jyvät joutuvat olemaan kuumassa ilmassa. Lisäämällä kiertonopeutta saadaan lämpötilavaurioita hieman vähennettyä. Viljan kierrätyksessä jyvät ovat jonkin aikaa varastosiilossa. Siellä kuivumista





Kuva 5.6: Kuivauslämpötilan vaikutus kuivausprosessiin. Ulkoilma 10 C ja kuivausilma 60 ja 80 C.

ei tapahdu (olettaen ettei kuivausilmaa vuoda varaston kautta) ja jyvässä tapahtuu kosteuden tasautumista ja siirtymistä ytimestä pintaan. Tämän on todettu parantavan kuivauksen energiataloutta. Peltola [Peltola 1997] tutki kuivurin säätöjen ja myös kiertonopeuden vaikutusta kuivaukseen ja totesi päätelmissään, että sen vaikutus etenkin kostean viljan kuivaukseen on selkeä, kierrätysnopeuden pitäisi olla mahdollisimman suuri.

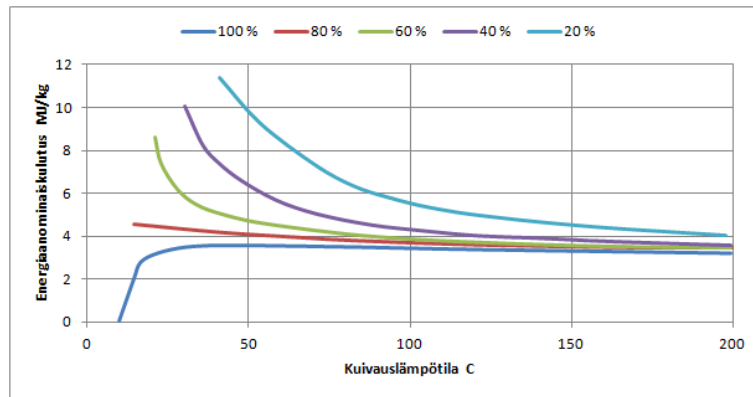
Kuvassa 5.9 on esimerkki Peltolan tekemistä kokeista. Siinä on nähtävissä viljan kiertonopeuden vaikutus veden poistumisnopeuteen ja energian kulutukseen kun kiertonopeutta on muutettu. Kiertonopeudet tarkoittavat kuinka kauan kestää koko siilollisen kiertämiseen kuivurissa. Näissä kokeissa paras veden poistumisnopeus ja pienin energian kulutus on saatu käyttäen kiertonopeutta 2, jolloin siilollisen kiertämiseen kului 1,5 - 2 tuntia.

## 5.5 Viljan jäähdyttäminen

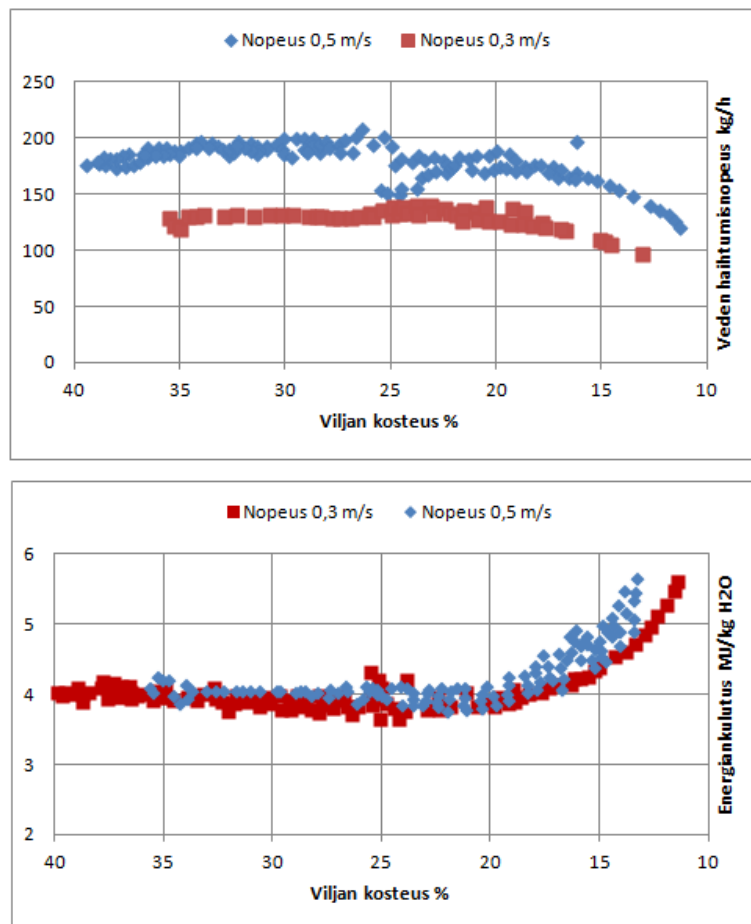
Ennenkuin vilja voidaan poistaa kuivurista, se on säilyvyyden takia jäähdytettävä. Jäähdyttämisessä viljaan sitoutunut lämpö poistuu siitä. Viljan ominaislämpöön vaikuttaa sen kosteus. Ominaislämpö voidaan laskea viljan kuiva-aineen ja veden ominaislämpökapasiteettien avulla yhtälön 5.14 mukaisesti.

$$c = c_k(1 - w) + c_v \cdot w \quad (5.14)$$

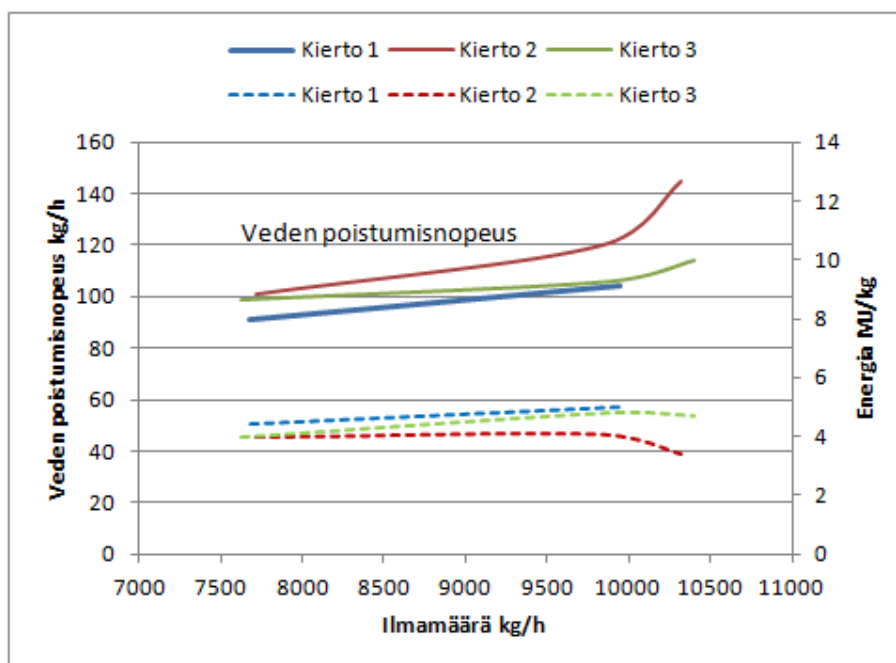
## 5 Kuivumistapahtuma



Kuva 5.7: Kuivauslämpötilän vaikutus energian ominaiskulutukseen poistoilman kosteuden vaihdellessa



Kuva 5.8: Ilmamäärän vaikutus kuivumiseen, kuivauslämpötilä kummassakin tapauksessa 70 °C [Peltola 1997]



Kuva 5.9: Viljan kiertonopeuden vaikutus kuivumiseen, ylemmät käyrät kuvaavat veden poistumisnopeutta ja alemmat energian tarvetta poistettua vesikiloa kohti. Kierto 1 = 3 tuntia kierros, kierto 2 = 1,5 - 2 tuntia kierros ja kierto 3 = yksi kierros tunnissa. [Peltola 1997]

- $c$  kostean viljan ominaislämpökapasiteetti
- $c_k$  viljan kuivan osan ominaislämpökapasiteetti 1,54 kJ/(kgK)
- $c_v$  veden ominaislämpökapasiteetti 4,19 kJ/kgK
- $w$  viljan kosteus

Kun viljaerä jäädytetään, siitä poistettava lämpöenergia saadaan yhtälön 5.15 mukaisesti.

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (5.15)$$

- $\Delta Q$  Lämpöenergia
- $m$  jäädytettävä massa (viljamäärä)
- $\Delta T$  lämpötilan aleneminen

**Esimerkki.** 10000 kg viljaerä jäädytetään 50 C lämpötilasta 15 C lämpötilaan. Kuinka suuri lämpöenergia viljasta vapautuu ?

Kuivatun viljan kosteus on 14%, jolloin saadaan ominaislämpökapasiteetiksi  $c = 1,54 \cdot (1 - 0,14) + 4,19 \cdot 0,14 = 1,91$  kJ/kgK. Vapautunut energiamäärä on  $E = 1,91$  kJ/(kgK)  $\cdot$  10000 kg  $\cdot$  (50-15) K = 668 500 kJ = 185 kWh. Jäähtymisen aikana tapahtuu aina myös hieman kuivumista eli viljan kosteus hieman myös alenee. Jos vapautuvaa energiaa verrataan polttoöljyn lämpösisältöön, niin yksi öljykilo sisältää n 43 MJ/kg eli poistunut lämpömäärä merkitsisi öljykiloina 668 500 kJ/43 MJ/kg = 15,5 kg ja litroina n 19 l.

## 5.6 Viljan kuivauksen simulointi

Tässä luvussa käydään läpi kuivauksen laskennan kannalta oleelliset asiat ja miten laskenta tehdään. Excelissä on VBA:lla (visual basic for applications) tehty macro, josta löydät samat asiat kuin tässä luvussa. Jyvistä höyrystetään vettä kuivurissa. Jos vettä höyrystetään  $m_v$  kiloa, tarvitaan energiaa

$$\Delta Q = m_v \cdot l_h \quad (5.16)$$

## 5 Kuivumistapahtuma

missä  $l_h$  on veden höyrystymislämpö, noin 2500 kJ/kg. Tämä energia saadaan ohi virtaavasta ilmasta. Jos ilman massa on  $m_i$  ja ilman ominaislämpökapasiteetti  $c_i$  ja ilma jäähtyy  $\Delta T$ :n verran, lämpöä vapautuu

$$\Delta Q = m_i \cdot c_i \cdot \Delta T = q_v \cdot \Delta t \cdot \rho_i \cdot c_i \cdot \Delta T \quad (5.17)$$

missä  $q_v$  on ilman tilavuusvirta m<sup>3</sup>/s, ilmaa virtaa ajan  $\Delta t$  ja ilman tiheys on  $\rho_i$ . Kaavat yhdistämällä saadaan simulointia varten kaava

$$T(i, j + 1) = T(i, j) - \Delta T \rightarrow \Delta T = \frac{m_v \cdot l_h}{q_v \cdot \Delta t \cdot \rho_i \cdot c_i} \quad (5.18)$$

Tässä  $j$  tarkoittaa viljakerrosta  $j$ ; koko viljakerros tai harjojen välissä oleva viljakerros jaetaan mo-  
neen osakerrokseen=kerroksia, joiden paksuus on  $dx$ . Niinpä koko viljakerroksen paksuus on pak-  
suus=kerroksia\* $dx$ . Indeksillä  $i$  puolestaan tarkoitetaan ajan hetkeä  $i$ ; simuloinnin koko aika =koko-  
aika, joka jaetaan aikaväleihin  $dt$ . Silloin suurin  $i$ :n arvo simuloinnissa on  $i_{max}$ =koko-  
aika/ $dt$ . Simulointi menee siis näin:

```
for i=1 to imax
for j=1 to kerroksia
lasketaan viljakerroksen j kuivuminen ajassa dt hetkellä i: kellon aika on silloin
next j
next i
```

Kuivumista varten tarvitaan kaava, joka kertoo miten paljon viljan kosteus  $w$  muuttuu ajassa  $dt$ , kun sitä kuivattavan (tai kostuttavan!) ilman kosteus on  $RH$  ja lämpötila  $T$ . Käytämme kaavaa

$$w(t) = w_e + (w_i - w_e) \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (5.19)$$

ja kerroin  $k$  on

$$k = \exp(20.95 - 6942/T_s(K)) \quad (5.20)$$

Tässä  $w_i$  on viljan kosteus hetkellä  $t=0$  ja hetkellä  $t$   $w(t)$  ja  $w_e$  on tasapainokosteus (d.b) vallitsevissa oloissa (ilman  $RH$  ja  $T$ ), ja saadaan kaavasta (modified Henderson)

$$w_e = (\ln(1 - RH/100)/(-D2*(T + D4)))^{(1/D3)}/100 \quad (5.21)$$

missä kerroin  $D2$  on

$$D2 = 0.0000229, D3 = 2.0123 ja D4 = 195.267 \quad (5.22)$$

Viljan kosteuden muutos ajassa  $t$  perustuu yksinkertaiseen (ja varmasti väärään!) oletukseen, että kosteuden muutos aikayksikössä on verrannollinen sen hetkisen kosteuden  $w(t)$  ja tasapainokosteuden  $w_e$  erotukseen. Sen näkee derivoimalla  $w(t)$ :n:

$$\frac{dw}{dt} = (w_i - w_e)(-k)\exp(-kt) = -k \cdot (w(t) - w_e) \quad (5.23)$$

Tämän jälkeen saamme lasketuksi kosteuden muutoksen hetkellä  $i$  kerroksessa  $j$  ajassa  $dt$ :

$$k = \exp(20.95 - 6942 / (T(i - 1, j) + 273))$$

$$w_e = (\ln(1 - RH(i, j) / 100) / (-D2 * (T(i - 1, j) + D4))) ^{(1 / D3)} / 100$$

$$w(i, j) = w(i - 1, j) - dw = w(i - 1, j) - k * (w(i - 1, j) - w_e) * dt$$

Tässä on tehty kyseenalaistettavissa oleva oletus: viljan lämpötilaksi on oletettu sen lämpötila edellisellä ajanhetkellä  $i-1$ . Sitä ympäröivä ilma puolestaan on siinä lämpötilassa ja kosteudessa = $RH(i,j)$ , missä se on tullessaan edellisestä kerroksesta. Voit vapaasti valita lämpötilan toisinkin, jos olet eri mieltä!

Sitten on enää saatava selville, mikä on kerrokseen tulevan ilman RH ja T. Kuivuriin tulevan ilman kosteus on alussa RH ja lämpötila Ts, mutta nehan muuttuvat koko ajan ilman kulkiessa kerrosten läpi. Kosteus nousee ja lämpötila laskee. Kummallakin on kuitenkin rajansa: RH on korkeintaan 100 % ja lämpötila on Tadiab= se lämpötila mihin päädytään kun Mollierissa kuljetaan vakioentalpiasuoraa pitkin lähtötilanteesta (RHalussa, Ts) RH=100 %:n käyrälle. Ensimmäinen asia ohjelmoitavaksi on tämän lämpötilan etsiminen. Ongelma on siinä, että pkyll(T)-käyrän lauseke on sellainen, ettei ratkaisua saada analyttisesti. Olen ratkaissut ongelman niin, että käyn lämpötiloja Tapu aste kerrallaan läpi lähtien lämpötilasta Ts. Lasken kullekin Tapu pkyll(Tapu) ja sitä vastaavan xs=kylläisen vesihöyryn paine, ja katson tuleeko oikea kulmakerroin. Vakioentalpiasuoran kulmakerroin on aika tarkkaan 2500 (näitä asioita on käyty läpi aiemmin):

Etsitään Tadiab ja xadiab, johon ilma päätyy, kun RH=100

```

A = -27405.53
B = 97.5413
C = -0.146244
D = 0.000126 2
E = -0.0000000485
F = 4.34903
G = 0.00394
R = 22105649.25
p0 = 100000# ilmanpaine pascalleina
Tapu = Ts + 273 pitää olla kelvineitä
pkyll = R * Exp((A + B * Tapu + C * Tapu ^2 + D * Tapu ^3 + E * Tapu ^4) / (F * Tapu
xalussa = RHalussa / 100 * 18 / 29 * pkyll / p0
For i = Ts To 0 Step -1
Tapu = i + 273
xs = 18 / 29 * R * Exp((A + B * Tapu + C * Tapu ^2 + D * Tapu ^3 + E * Tapu ^4) / (
apu = (Ts - Tapu + 273) / (xs - xalussa)
If (apu > 2500) Then
Tadiab = Tapu - 273
xadiab = xs
GoTo ulos
End If
Next i
ulos: Cells(1, 1) = Tadiab Cells(2, 1) = xadiab

```

On hyvä tsekata Mollierista, että ohjelma toimii oikein.

Nyt meillä on kaikki tarvittavat palikat kasassa: ilma tulee ensimmäiseen kerrokseen. Siihen tarttuu vettä, kun viljan kosteus muuttuu dw:n verran. Paljonko se on kiloina vettä=dmw? Jos kerroksessa olevan viljan kuivapaino on mkv, on dw=dmw/mkv eli dmw=dw\*mkv. mkv saadaan selville, kun tiedetään kerroksen paksuus ja viljan kuivatiheys. Sitten vielä huomataan, että kaikki voidaan laskea pinta-alayksikköä kohti. Ilmaa tulee x kuutiota sekunnissa neliötä kohti ja viljaa on y kg neliötä kohti. Kun ilmaan tarttuu dmw kiloa vettä neliötä kohti ajassa dt, sen kosteus lisääntyy määrällä dx=dmw/mi, missä mi on kerrokseen ajassa dt tulevan kuivan ilman massa:

$$m_i = q_v \cdot dt \cdot \rho_i \quad (5.24)$$

Sama ohjelmoituna

```
x(i, j) = x(i, j - 1) + dmw / (ilmantiheys * qv * dt)
```

Veden höyrystäminen vaatii energiaa ja ilma jäähtyy. Ohjelmoituna:

```
T(i, j) = T(i, j - 1) - dmw * lh / (ci * qv * dt * ilmantiheys)
```

Vielä pitää tarkistaa, ettei ilman kosteus ole yli xs:

```
If x(i, j) > xadiab Or T(i, j) < Tadiab Then
```

## 5 Kuivumistapahtuma

```
T(i , j) = Tadiab  
x(i , j) = xadiab  
RH(i , j)=100  
End If
```

Mitä tämä aiheuttaa käytännössä? Pitäisi varmaan huolehtia, että viljasta ei lähdekään vettä pois kuin se määrä, joka ilmaan mahtuu. Ja mitä tapahtuu seuraaville kerroksille? Ilmahan on nyt märkää, joten seuraavissa kerroksissa oleva vilja kostuu, joten ilma kuivuu jne. Ei ole siis itsestään selvää, mitä ohjelmaan tässä kohtaa pitäisi kirjoittaa.  $RH(i,j)=100$  on laitettu kommenttiin, kun ohjelma ei tainnut muuten suostua laskemaan. Ohjelma ei siis välttämättä ole virheetön tässä kohtaa(kaan). Toisaalta, kun vilja kuivuu tai kostuu niin se kutistuu tai turpoaa, joten kerroksille pitäisi tehdä jotain. Oikein toimi- van ohjelman teko ei ehkä olekaan ihan triviaalia. Toisaalta on hyvä muistaa, etteivät tasapainokosteutta ja kuivumista kuvaavat kaavatkaan ole täydellisiä. Jyvät ovat eri vuosina erilaisia ja kuivuvat eri tavoin. Niin että eiköhän tämä riitä tällä erää...

# Kirjallisuutta

- [ASAE S448] ASAE S448.1 Thin Layer Drying of Agricultural Crops. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2001
- [Muhlbauer et al 1979] Muhlbauer W., Kuppinger H. & Isaacs G.W. Entwicklung eines Gleichstrom/Gegenstrom-Durchlauf-trockners für Getreide und Mais. Grundlagen Landtechnik Vol 29 (1979) No 4. Ref. Suomala E. Kuivausilman lämpötilan ja kuivurin sisäisten kuumien metallipintojen vaikutus ohran elinvoimaan viljaa kierrättävässä sekavirtaustyyppisessä kuivurissa. Progradu työ, Helsingin yliopisto, Maatalousteknologian laitos 1988.
- [Pabis et al 1998] Pabis S., Jayas D. S. & Cenkowski S. Grain Drying, Theory and Practice. John Wiley & Sons 1998.
- [Peltola 1997] Peltola A., Viljaa kierrättävän lämminilmakuivurin säädöt. Työtehoseuran julkaisuja 355, Helsinki 1997
- [Suomi et al 2003] Suomi et al 2003 . Viljan korjuu ja varastointi laajenevalla viljatilalla. Maa- ja elintarvike 31. 2003

## 6 Kuivurirakenteet

Tässä kappaleessa tutustumme erilaisiin käytännön kuivurirakenteisiin ja niiden koon valintaan. Kuivurit voidaan luokitella monella eri tavalla. Alla on näitä luokituksia:

- Toimintapa
  - Jatkuvatoiminen/Eräkuivuri
  - Lämminilma/Kylmäilma
  - Suora ilmalämmitys/Radiaattorikuivuri
- Rakenne
  - Lavakuivuri/Siilokuivuri/Kennokuivuri
- Kuivausilman suunta
  - Vastavirta/Myötävirta /Poikkivirta/Sekavirta
- Periaate
  - Tyhjökuivuri/Mikroaaltokuivuri /Alipainekuivuri

Meillä kuivurit ovat yleensä lämminilmakuivureita ja kennokuivureita. Kyse on myöskin siitä, mitä kuivurissa kuivataan. Viljan sijasta voimme kuivata heiniä tai haketta. Materiaali myös antaa omat vaatimuksensa kuivurin rakenteelle ja esimerkiksi heinä- ja hakekuivurit ovat lavakuivureita.

### 6.1 Lavakuivurit

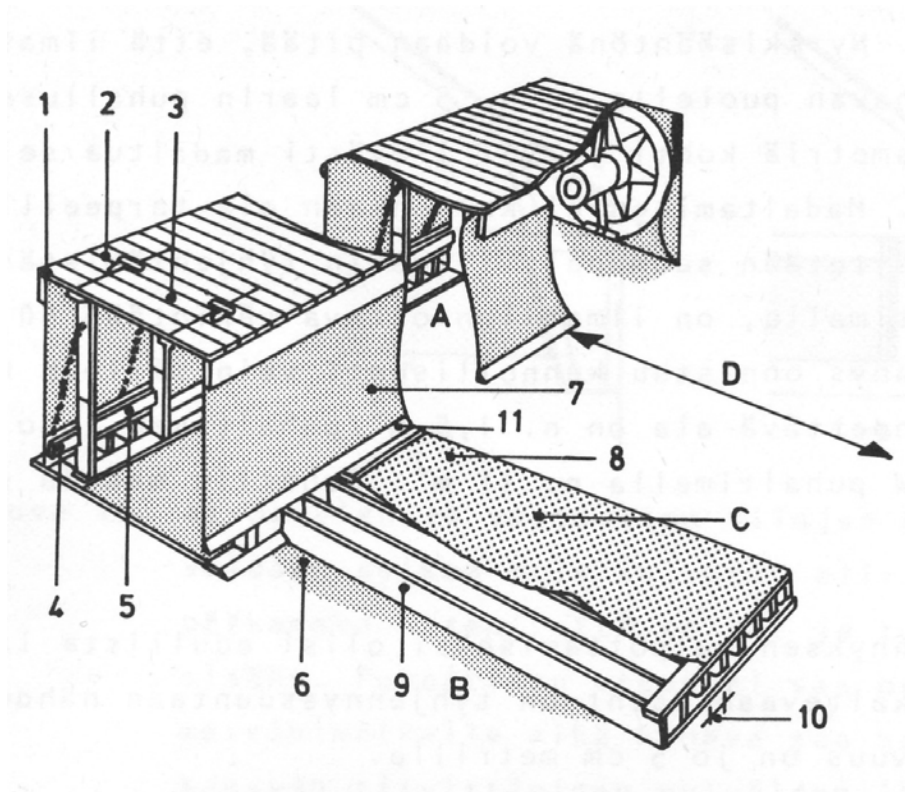
Lavakuivurit on periaatteeltaan yksinkertaisin kuivurimalli, kuva 6.1. Lavakuivureita käytetään nykyisin heinän tai hakkeen kuivaamiseen tai jossakin määrin myös viljan kuivaamiseen. Lavakuivurilla on seuraavat ominaisuudet:

- Helppo rakentaa omatoimisesti ja usein halpa ratkaisu
- Soveltuu hyvin korsitavaran tai hakkeen kuivaamiseen
- Viljan käsittely on hankalaa, etenkin poisto on hankala koneellistaa
- Kuumailmakuivureissa pohjakerros kuivaa liian kuivaksi
- Pintakerros voi kuorettua tai homehtua kylmäilmakuivauksessa ja kun käytetään paksua kerrosta

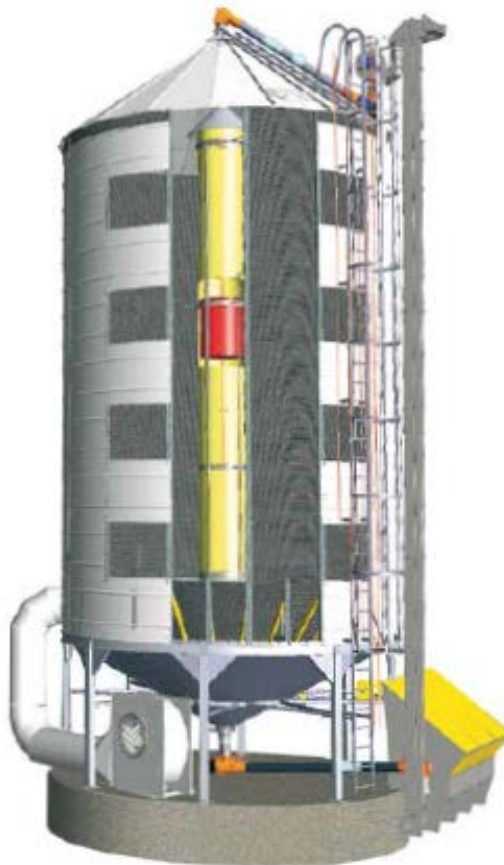
### 6.2 Siilokuivurit

Jotta kuivuminen etenkin kuumailmalavakuivurissa tapahtuisi tasaisesti, viljakerrosta pitäisi jatkuvasti sekoittaa. Tämä vaatimus on johtanut siilomallisten kuivureiden rakentamiseen, kuva 6.2. Niissä siilon keskellä on ilmaputki ja vilja on tämän putken ja ulkokerroksen välillä. Erän suuruuden vaihtelujen ja kuivumisesta johtuvan viljakerroksen laskun takia sisäputkessa on keskusputken suljin (ilmahattu), joka estää ilman karkaamista yläkautta. Tässä mallissa kuivuminen lähtee liikkeelle sisäputken pinnasta ja kuivumisvyöhyke siirtyy vähitellen ulospäin. Pystyrakenteen ansiosta viljan jatkuva tai jaksoittainen kierto on helppo järjestää.





Kuva 6.1: Esimerkki kylmäilmalavakuivurista. Kuivurissa on pääilmakanava A, ilmatila viljan alla B ja reikäpelti C



Kuva 6.2: Esimerkki nykyaikaisesta siilokuivurista



Kuva 6.3: Esimerkki kennokuiivurin rakenteesta

### 6.3 Kennokuiivuri

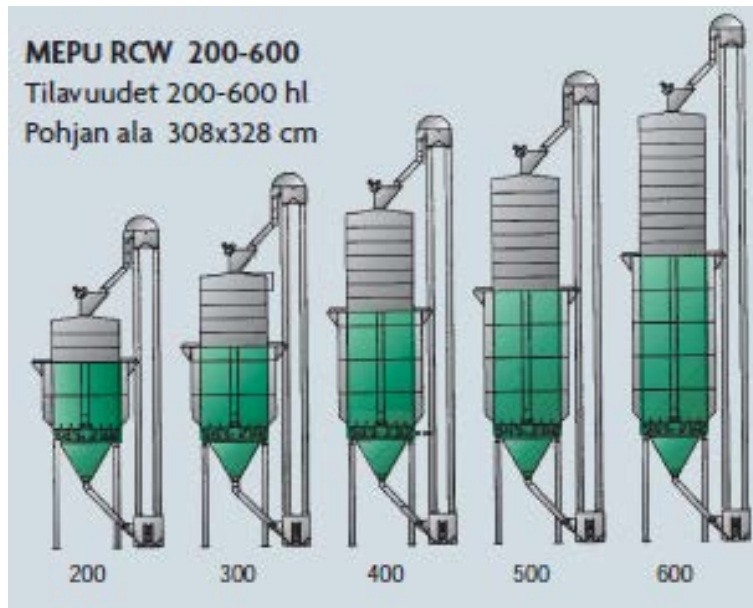
Kennokuiivureita käytetään meillä nykyisin yleisesti kuumailmakuivureina. Kuvassa 6.3 on esimerkki kennokuiivurin rakenteesta. Kuivurin varsinaisessa kuivausosassa on ilmaharjat (kennot). Näistä joka toinen on tulevan kuivausilman kenno ja joka toinen poistoilmakkenno. Kuivausilma siirtyy viljakerroksen läpi tuloilmakennosta poistoilmakennoon. Kuivattava vilja on jatkuvassa liikkeessä. Kuivurin alla oleva syöttölaite huolehtii sopivasta viljan kiertonopeudesta. Eräkuivurissa elevaattori nostaa syöttölaitteen syöttämän viljan kennojen päällä olevaan varastosiiloon. Kennorakenteen ansiosta kuivauksen kerrospaksuus on ohut ja kierron ansiosta kuivattava vilja sekoittuu hyvin. Jakuvatoimisessa kuivurissa syöttölaitteen nopeus säädetään niin, että ylhäältä tuleva kostea vilja kerkeää kuivumaan kun se poistuu alhaalta kuivurista.

Kennokuiivurit ovat moduulirakenteisia eli kokoamalla kennostoja päällekkäin saadaan halutun kokoinen kuivurirakenne, kuva 6.4. Kuivauksen aikana viljan tilavuus muuttuu lähinnä sen takia, että siitä poistetaan kosteutta. Tämän takia ylimmät kennot ovat varastokennoja eli niissä ei ole kuivausilmaharjoja vaan ne tarkoitettu kompensoimaan viljan kutistumaa. Jos näin ei tehtäisi kuivausilma karkaisi yläkautta pois. Sama asia hoidettiin siilokuivureissa ilmahatun avulla.

Kennot jakavat ilman tasaisesti viljan sekaan ja saadaan tasalaatuinen kuivaus. Jatkuvatoimisissa kennokuiivureissa ulostulevan viljan kosteus voi vaihdella huomattavasti johtuen siitä, että kuivausilma- ja poistoilmaharjat ovat päällekkäin ja vilja ei sekoitu samalla lailla kuin eräkuivurin kierrätyksessä [Mellman et al 2011].

### 6.4 Erä- /jatkuvatoiminen kuivuri

Vilja voidaan kuivata joko eränä tai sitten kuivaus tehdään jatkuvana eli vilja syötetään kuivurin läpi siten, että syöttönopeus on sovitettu tulevan viljan kosteuteen niin, että vilja on ulostulleessaan kuivaa. Jatkuvatoiminen kuivuri soveltuu tilanteisiin, joissa on jatkuvasti saatavissa samanlaatuista (sama lajike ja samanlainen kosteus) viljaa. Koska siinä ei ole erillisiä täyttö ja poistovaiheita sen kapasiteetti on eräkuivuria suurempi. Hyvin märkää viljaa kuivattaessa joudutaan toisinaan kuivaamaan vilja kuitenkin kahdessa vaiheessa. Jatkuvatoimisessa kuivurissa on viimeisenä viljan jäähdytys, koska siiloon siirretty lämmin vilja alkaisi pilaantua. Tästä vapautuva lämpö on mahdollista hyödyntää



Kuva 6.4: Moduulirakenteinen kennokuivuri

kuivauksessa ja kuivauksen hyötysuhde paranee hieman.

Kuivaus aloitetaan jatkuvatoimisissa kuivurissa myös eräkuivurin tapaan ja joitakin kuivureita voidaan käyttää joko eräkuivureina tai jatkuvatoimisina.

## 6.5 Ilman virtaussuunta

Sen mukaan miten ilma virtaa viljan läpi kuivurit voidaan jakaa vastavirta-, myötävirta-, poikittaisvirta- ja sekavirtakuivureihin. Kuvassa 6.5 on esimerkki sivuvirta ja myötävirtakuivureista. Kummatkin ovat myös jatkuvatoimisia. Sivuilmakuivururin periaate on sama kuin silokuivurin. Kuivurin keskellä on ilmakammio ja vilja kiertää tätä kammiota. Kuivausilma puhalletaan sivuille olevien viljakerrosten läpi. Periaatteessa sivuvirtakuivurin kuivaustulos on epätasainen, koska siinä sisäkerros kuivaa enemmän kuin ulkokerros. Vasta- ja myötävirtakuivureissa ilman tuloharjat ja poistoharjat ovat omassa rivissä ja sen mukaan miten ilma puhalletaan viljan kulkusuuntaan nähden voidaan puhua vasta- tai myötävirtakuivurista. Niissä kuivuminen on tasaisinta.

Kennokuivuri on tyypiltään sekavirtakuivuri, ilma kulkee viljaan nähden sitä vastaan, sen suuntaisesti ja myös poikittain, kuva 6.6. Kuivauksen tasaisuus on periaatteessa hieman parempi kuin sivuvirtakuivurissa ja huonompi kuin vasta- tai myötävirtakuivurissa. Käytännössä kuivurirakenteiden toteutukset ja ilman virtaukset voivat muuttaa tätä teoreettista asetelmaa.

Virtaus vaikuttaa myös jyvien lämpötilavaurioihin. Sivuvirtakuivuri on herkin jyvien vaurioille, koska siinä paikallaan tai hitaasti liikkuva vilja on pitkään kuumun ilman kanssa kosketuksissa. Tämän kuivurityypin kuivauslämpötila on alhaisempi kuin muilla ja sen seurauksena kuivauskapasiteetti sekä energiatehokkuus on heikko. Myötävirtakuivurissa ilma ja vilja kulkevat samaan suuntaan. Tämän seurauksena kuuma kuivausilma kohtaa aina märän viljan ja ilman lämpötila laskee sen siirtyessä edelleen viljassa. Tämä tyyppi antaa tasaisen kuivaustuloksen ja kuivausilmalämpötila voi olla korkea. Vastavirtakuivurissa kuuma kuivausilma kohtaa kuivan viljan. Kuivauslämpötila ei tämän takia voi olla hyvin korkea ja se vähentää kuivurityypin kuivaustehoa ja energiatehokkuutta. Toisaalta kuivurin poistoilman kosteus on jatkuvasti melko korkea ja tämä parantaa energiatehokkuutta. Sekavirtakuivurin on edellä olleiden virtaustapojen sekoitus. Niissä voidaan käyttää suhteellisen korkeata kuivauslämpötilaa ja energiatalous on myös melko hyvä ja viljan laatu melko tasainen.

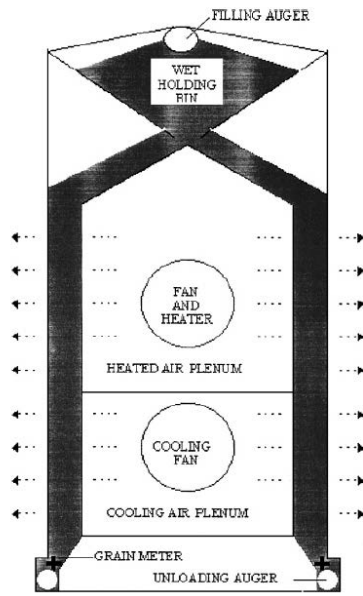


Figure 1.28. Conventional cross-flow dryer with forced-air drying and cooling.

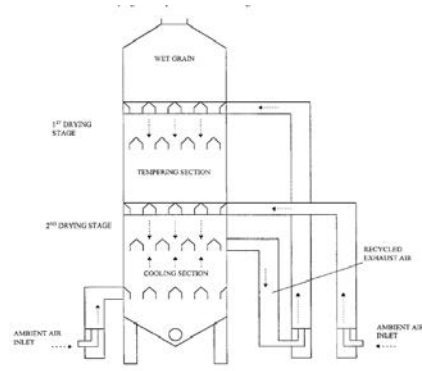
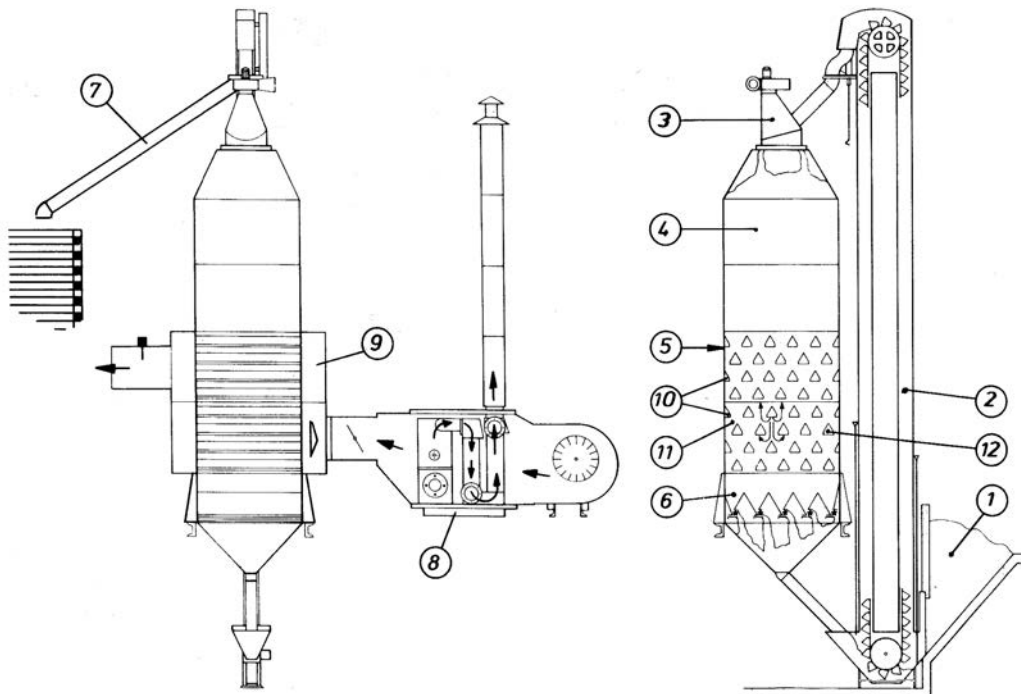
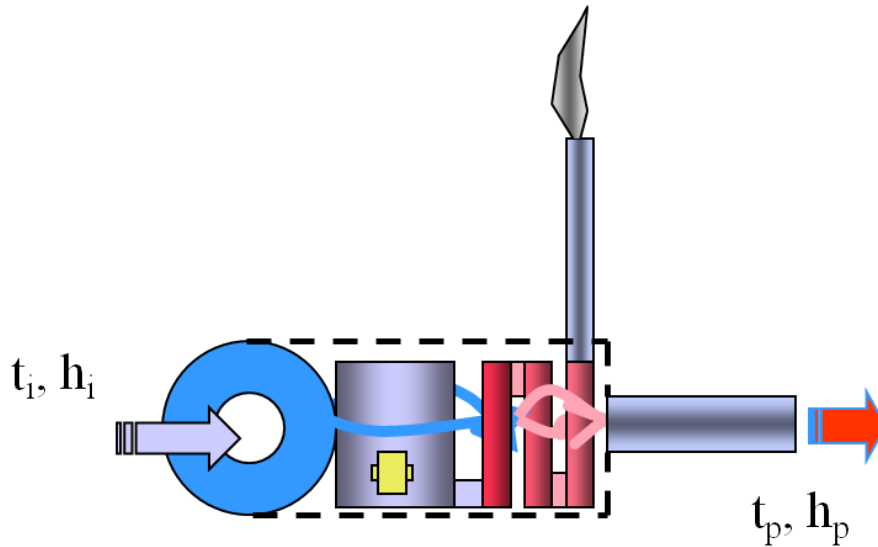


Figure 1.30. Two-stage concurrent-flow dryer with counterflow cooler, tempering section, and recirculation of the cooling air and part of the drying air (12).

Kuva 6.5: Sivuvirta ja myötävirtakuivuri



Kuva 6.6: Ilman kulku kennokuivurissa. 4=varastokenno, 11=kuivauskenno, 10=tuloilmaharjat, 12=poistoilmaharjat



Kuva 6.7: Kuivuriuunin rakenne

## 6.6 Kuivuriuunit

Kuivuriuunit poikkeavat keskuslämmityskattiloista, joissa vesi on välityksaineena. Kuvureissa käytetään meillä 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 6.7. Kuivuripuhaltimen ilma puhalletaan tulipesän ja lämmönvaihtimen kautta kuivuriin. Lämpimät pinnat lämmittävät kuivausilman. Kuivuriuunien hyötysuhteet ovat hyvät, parhaimmillaan ne ovat 85 % luokkaa.

Uunin tehoa voidaan säätää öljypolttimien suuttimien kokoa vaihtamalla tai myös öljynpainetta muuttamalla. Nykyisin uuneissa on usein kaksi suuttinta, jolloin uuni pystyy pitämään kuivauslämpötilan tasaisena vaikka imuilman lämpötila vaihtelee. Uuni voi toimia myös kiinteällä polttoaineella. Tällöin kyseeseen tulee lähinnä syöttimin varustetut hakeuunit (stokerit). Kiinteän polttoaineen käytössä paloturvallisuudesta on tärkeää huolehtia. Esimerkiksi sähkökatkokset pysäyttävät puhaltimen, mutta palaminen voi jatkua vielä hetken pesässä, koska siellä on aina jokin määrä polttoainetta. Kuivuriuunin lämpöteho saadaan puhaltimen ilmamäärän ja ilman sisältämän lämmön (entalpian) avulla. Uunin tehoa on käsitelty tarkemmin kappaleessa 5.2.1. Monasti melko tarkka tulos saadaan yhtälöllä 6.1. Sen mukaisesti uunin teho riippuu puhaltimen ilmamäärästä ja siitä kuinka paljon ilmaa lämmitetään kuivuriuunissa (kuivauslämpötila).

$$P = q_v \rho_i c_i \Delta T \quad (6.1)$$

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

Oletetaan ilman tiheydeksi 1,25 kg/m<sup>3</sup>, 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 kg/s · 1,0 kJ/(kg·K) · 55 K = 286,5 kW. Jos imuilman lämpötila muuttuu, silloin vastaavasti uunin tehon on muututtava, jos kuivausilman lämpötila halutaan pitää samana. Samoin ilmamäärän säätö kuristamalla muuttaa tehon tarvetta.

## 6.7 Kuivurin mitoitus

Kuivurin koolle ja kapasiteetille on hyvin vaikeata antaa selvää valinta- tai kapasiteettiohjetta. Valintaan vaikuttaa viljelyala, lajikkeet, varastointi ja mitoitetaanko kuivurin keskimääräisten vai huonojen olosuhteiden mukaisesti. Mitoitukseen vaikuttaa hyvin voimakkaasti viljan kosteus. Märkkää viljaa ei välttämättä kuivata kahta erää vuorokaudessa. Jos näin käy, silloin kapasiteetti on liian pieni.

Kuumailmakuivurin kapasiteetin voidaan sanoa riippuvan seuraavista seikoista:

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

Yleensä kuivurin kokona käytetään sen tilavuutta. Tämä ei kylläkään kerro kuivurin kuivaustehoa yksinään, vaan se lähinnä kuvaa minkälaisia oheislaitteita (uuni, elevaattori) kuivuriin on valittavissa. Elevaattorin siirtoteho vaikuttaa kuivurin täyttö ja tyhjennysaikoihin. Jos elevaattorin teho on pieni, viljan siirtoajat voivat tulla pitkiksi, jolloin varsinainen kuivurin käyttöaste jää pieneksi. Erilliseen jäähdytysilön käyttö liittyy myös kuivurin käyttöasteen parantamiseen. Ennenkuin vilja voidaan varastoida, se on jäähdytettävä. Tämä jäähdytysvaihe kestää aikansa. Jos vilja voitaisiin siirtää erilliseen jäähdytysilöön, kuivurin käyttöastetta voitaisiin nostaa. Viljan alkukosteus vaikuttaa poistettavaan vesimäärään. Mitä kostempaa vilja on, sitä enemmän vettä on poistettava ja sitä kauemmin kuivauserän kuivaus kestää.

### 6.7.1 Kuivurisiilojen koko

Otetaan kuivurin valintakriteeriksi, että pystytään kuivaamaan päivän aikana kuivattu 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 hehtolitrapainon mukaan tämä tarkoittaa 33 m<sup>3</sup> kuivurisiiloa. Laitetaanpa tämä järkeily yhtälöiden muotoon. Puimurin kapasiteetti voidaan laskea yhtälöstä 6.2.

$$q_A = \frac{v \cdot b}{10} \cdot \eta \quad (6.2)$$

$q_A$	Puimurin puintiteho 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 6.3 mukainen.

$$M_{vrk} = q_A \cdot t_{vrk} \cdot s \quad (6.3)$$

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

Kuivurin koko saadaan sitten sen perusteella kuinka monessa erässä puitu sato halutaan kuivata, yhtälö 6.4.

$$V = \frac{M_{vrk}}{n \cdot \rho} \quad (6.4)$$

$V$	kuivurin tilavuus m <sup>3</sup>
$\rho$	viljan tilavuuspaino kg/m <sup>3</sup>
$n$	vuorokaudessa kuivattavien viljaerin 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  $100 \text{ ha}/1,2 \text{ ha/h} = 83$  h eli reilut 10 vrk. Kriteereistä riippuen syksyisin on Etelä-Suomessa keskimäärin 15 puintikelpoista vuorokautta eli puimurin kapasiteetti on riittävä, jos vain kuljetukset pelloilta kuivurille toimivat hyvin. Kaikkiaan kuivauseriä on  $400\,000 \text{ kg}/600 \text{ kg/m}^3/32 \text{ m}^3 = 21$  kpl.

Lämminilmakuivurin vastaanottokapasiteetti on suhteellisen pieni. Jos useampia puintipäiviä on peräkkäin, tämä alkaa rajoittamaan korjuuta. Kapasiteettia voidaan parantaa puskurivarastolla, joka on joko kylmäilmakuivuri tai tuuletettu siilo. Nämä takaavat viljan säilymisen puskurissa ja tämä puskuria voidaan jälleen purkaa kuumailmakuivurilla. Lisäksi märän viljan alkukuivaus puskurissa nostaa varsinaisen kuivurin kapasiteettia, koska vilja kuivuu siinä jo jonkin verran.

### 6.7.2 Kuivuriuunin koko

Kuivuriuunin koon määrittämistä varten tarvitaan erikoislaskentaa. Periaatteessa ilmvirran pitäisi keuhkujen poistamaan kaikki jyvistä irtoava kosteus niin, että poistoilman kosteus olisi lähellä 100 %. Eri viljalajit luovuttavat kosteutta erilailla ja lisäksi kosteuden luovutusnopeus muuttuu kosteuden ja lämpötilan muuttuessa. Tämä näkyy esimerkiksi kuvassa 4.2. Kuivurissa sama asia näkyy poistoilman tilan muutoksena, kuva 5.3. Lähdetään koon määrittämisessä liikkeelle toisesta päästä eli kuivuriuunista. Lasketaan kuinka paljon uuni pystyy maksimissaan poistamaan vettä viljasta. Otetaan keskimääräinen syksyinen ilma, jolloin ilman lämpötila on 10 C ja kosteus 75%. Luetaan arvoja vaikka kuvan 5.1 diagrammista. Tässä tilassa ilman kosteussuhde on 0,006 kg vettä yhdessä kuivassa ilmakiloissa. Lämmitetään ilma 70 C asteeseen ja oletetaan, että puhaltimen ilmamäärä on 10 000 m<sup>3</sup>/h. Lasketaan uunin lämpöteho yhtälön 6.1 avulla. Ilman tiheys voidaan laskea yhtälöstä 2.3 tai tässä tapauksessa voidaan käyttää likiarvoa 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Oikeastaan meidän pitäisi tietää missä lämpötilassa puhaltimen ilmamäärä on ilmoitettu, jos haluaisimme laskea tarkemmin. Uunin tehoksi saamme yhtälön 6.1 mukaisesti  $P = \frac{10000 \cdot 1,2 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} \cdot 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (70 - 10) \text{ K} = 200$  kW. Kun oletamme adibaattisen kuivurin, tulemme Mollier diagrammissa vakioentalpia suoraa alaspäin. Otetaan vielä kaikkein paras tapaus eli oletetaan poistoilman kosteusprosentiksi 100. Tällöin poistoilmassa on vettä 0,023 kg/kg. Veden poistonopeudeksi saamme yhtälön 5.8 mukaan  $q_{H_2O} = 10000 \cdot 1,2 \cdot (0,023 - 0,006) = 204$  kg/h. Näillä arvoilla kuivuriuuni pystyy siten poistamaan maksimissaan 204 kg/h vettä. Jos käytämme edellisen esimerkin kuivuritulavuutta 32 m<sup>3</sup> ja erän alkukosteus on 22% ja loppukosteus on 14%. Märän viljan tilavuuspaino oli esimerkissä 600 kg/m<sup>3</sup>. Meillä on märkää viljaa  $32 \cdot 600 = 19\,200$  kg. Tässä on vettä  $0,22 \cdot 19\,200 = 4\,224$  kg ja loput on kuiva-ainetta 14 976 kg. Haluttu loppukosteus on 14% (wb). Laskuja helpottaa kun muutamme tämän kuivaperustaiseksi (yhtälö 3.6),  $w_k = \frac{0,14}{1-0,14} = 16,3$  % (db). Nyt voimme laskea helposti kuinka paljon viljassa on vettä kuivauksen jälkeen,  $0,163 \cdot 14\,976 \text{ kg} = 2\,438$  kg. Poistettava vesimäärä on siten  $4\,224 \text{ kg} - 2\,438 \text{ kg} = 1\,786$  kg. Veden poistumisnopeus oli 204 kg/h ja tästä saadaan kuivausajaksi 8,8 h. Todellisuudessa emme pääse 100 % poistokosteuteen ja meillä on lisäksi kuivurissa lämpöhäviöitä ja kuivuminen hidastuu loppuvaiheessa. Jos kuivurilla piti kuivata kaksi erää vuorokaudessa, nähdään, että 22 % viljan kanssa siinä kuluu täysi vuorokausi. Tilannetta voidaan parantaa lisäämällä ilmamäärää ja samalla myös tietysti uunin lämpötehoa on lisättävä. Tämän saman asian esittäminen yhtälöillä onnistuu, mutta käteväintä on tehdä taulukkolaskentaan valmis pohja ja siinä voidaan helposti muuttaa lähtöarvoja ja kokeilla eri vaihtoehtoja.

## 6.8 Kuivurin käyttö

### 6.8.1 Kuumailmakuivurin käyttö

Kuumailmakuivurissa ei ole kovin paljon säätömahdollisuuksia. Yleensä viljan kiertonopeus ja kuivausilman lämpötila ovat säädettävissä. Viljan kiertonopeus vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti vilja joutuu uudelleen kuivumisvyöhykkeeseen. Suosituksena on, että vilja kiertäisi kuivurissa kerran tunnissa. Liian hidaskierto aiheuttaa epätasaisen kuivumisen ja pidentää viljan oloaika kuumassa kuivumisvyöhykkeessä, jolloin vaurioitumisvaara suurenee. Nopean kierron etuna on lyhyt oloaika kuivumisvyöhykkeessä, jolloin vaurioitumisvaara on pienempi. Kuivausilman lämpötilaan voidaan vaikuttaa öljypolttimen suutinkoolla ja öljynpaineen avulla. Lämpötilan kohottaminen suurentaa kuivurin kapasiteettia, mutta korkea lämpötila voi vaurioittaa viljan. Korkea lämpötila vaikuttaa ensimmäiseksi viljan itävyyteen ja leivontaominaisuuksiin. Rehuominaisuudet säilyvät vaikka vilja kuivattaisiin hyvinkin korkeassa lämpötilassa. Lämpötilan lisäksi viljan kosteus ja lämpötilassa oloaika vaikuttavat lämpötilakeston. Kuivurityypit vaikuttavat tällöin myös korkeimpiin kuivauslämpötiloihin. Arin on lavakuivuri, jossa alin kuivunut kerros saavuttaa kuivausilman lämpötilan. Kennokuivurit ovat vastaavasti huolettomimpia. Siemen-, mallas- ja leipäviljoilla voidaan käyttää seuraavia suurimpia kuivausilman lämpötiloja: Kuivausilman määrä ei ole kuivuriuuneissa säädettävissä. Tähän voi vaikuttaa ilmaputkistojen 23 5 Kuivurirakenteet Table 5.1: Kuivauslämpötila Figure 5.4: Kuivauksen kulku lämminilmakuivurissa rakenteet. Jyrkät mutkat ja ahtaat paikat aiheuttavat ylimääräistä virtausvastusta. Puhaltimen vastapaineen kasvaessa sen ilmamäärä pienenee ja se johtaa kuivausilman lämpötilan kasvuun. Kuivurin ja putkiston vastapaine on normaalisti luokkaa 600 Pa (60 mmvp). Jos vastapaine ylittää tämän selvästi, ilmaputkistot ovat liian ahtaat tai tukkeutuneet. Kuivurin kokoon nähden suuri ilmamäärä aiheuttaa jyvien joutumisen poistoilmaan ja pieni ilmamäärä aiheuttaa kosteuden tiivistymistä kuivurin sisään.

### 6.8.2 Kuumailmakuivurin ohjaus

Kuumailmakuivuri on joko käsisäätöinen tai se voidaan varustaa automaattisella pysäytyslaitteella. Automaattikka huolehtii kuivurin pysäytyksestä viljan kuivuttua. Valitettavasti viljan kosteutta ei voida mitata suoraan, vaan kuivurin automaattinen valvonta on tehtävä epäsuorasti. Kuvassa 14 on esimerkki kuumailmakuivauksen kulusta. Parhaiten kuivumisen loppuminen voitaisiin nähdä poistoilman kosteudesta. Hankaluutena on kuitenkin varmojen antureiden puute. Tämän takia kuivausautomaatiikat toimivat usein poistoilman lämpötilan ohjaamina.

### 6.8.3 Kylmäilmakuivurit

Kylmäilmakuivurin laarialan valinta riippuu kuivaustavasta ja kerrospaksuudesta. Jos koko sadon halutaan mahtuvan kuivuriin (varastokuivuri), laariala on:  $A = (8 \dots 16) A_p (17) A$  Laariala  $m^2 A_p$  Viljapinta-ala ha Kuivauksen aikana kerrospaksuus kannattaa pitää 40 - 80 cm luokassa. Varastoitaessa kuivaa viljaa kerrospaksuutta voidaan vastaavasti suurentaa. Jos vilja voidaan kuivata kahdessa tai kolmessa erässä ja varastoitaessa osa viljasta erillisiin silloihin, voidaan käyttää seuraavaa mitoituslaskelmaa: Kerrointa 2,5 voidaan käyttää silloin, kun kuivauksessa käytetään lisälämpöä. Puskurikuivurin mitoituksessa tilavuuden pitäisi olla mieluiten sellainen, että siihen sopisi parin hyvän puintipäivän viljat. Puskurikuivurin kokoon vaikuttaa se, onko se tarkoitettu vain viljan säilymiseen vai halutaanko sillä myös kuivata. Säilyttämiseen tarkoitetuissa tuuletetuissa silloissa voidaan käyttää paksumpia kerroksia, jolloin pinta-alan tarve vähenee. 24 5 Kuivurirakenteet Figure 5.5: Ilmamäärän vaikutus viljan kuivumisnopeuteen

### 6.8.4 Kylmäilmakuivurin puhaltimen valinta

Puhaltimen valintaan vaikuttaa kuivattava viljamäärä ja puhaltimen vastapaine. Viljamäärän mukaan mitoitus tehdään laaripinta-alan mukaan. Suosituksena on, että ilmamäärä olisi vähintään 550  $m^3/hm^2$ . Puhaltimen vastapaine muodostuu kuivurirakenteiden virtausvastuksista ja viljakerroksen aiheuttamasta vastuksesta. Puhallintyyppi valitaan vastapaineen mukaan. Jos vastapaine on yli 800 Pa, kannattaa harkita keskipakoispuhaltimien käyttöä. Alle 800 Pa paineilla potkuripuhaltimet soveltuvat



kuivaukseen. Mitoitusperustana voidaan käyttää 80 cm viljakerroksen aiheuttamaa vastapainetta, joka on 400 - 600 Pa. Kylmäilmakuivurissakin kannattaa käyttää esipuhdistinta. Tämä vähentää viljan ros-kaisuutta ja viljakerroksen aiheuttama vastapaine pienenee. Kuivattaessa viljasta poistuu vettä. Tämä näkyy kerrospaksuudessa, joka kuivauksen edistyessä pienenee. Tämä tietysti vaikuttaa vastapainetta vähentävästi. Viljan kosteus vaikuttaa vastapaineeseen siten, että varastokuivan viljan vastapaine on saman paksuisessa kerroksessa hieman määrän viljan vastapainetta suurempi. Puhallinta valittaessa il-mamäärä pitää nimenomaan valita vastapaineen mukaan. Muutoin valinta johtaa käytössä liian pieniin il-mamääriin. Puhaltimen ilmamäärä vaikuttaa kuivumisnopeuteen ja kuivumisvyöhykkeen siirtymisno-peuteen. Kuvassa 15 on esitetty veden haihtumisnopeuden koetulos. Ilmamäärän kasvaessa arvosta 325 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> arvoon 550 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> veden haihtumisnopeus on kaksinkertaistunut. Ilmamäärän lisääminen 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> ei ole enään lisännyt tässä kokeessa haihtumisnopeutta. Ilmamäärä vaikuttaa haihtumel-komisnopeuden lisäksi nimenomaan kuivumisvyöhykkeen nousunopeuteen. Mitä suurempaa ilmamää-rää käytetään, sitä nopeammin kuivuminen saavuttaa pintakerroksen. Tällöin pinnan pilaantumis- ja kuorettumisvaara on vähäisempi. Esimerkki tästä on kuvassa 16. Siinä kuivuminen on noussut 0,6 m korkeuteen n. 37 h kuluttua ilmamäärän ollessa 325 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, n. 18 h kuluttua ilmamäärän ollessa 550 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> ja n. 10 h kuluttua ilmamäärän ollessa 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>.

### 6.8.5 Kuivurin kerrospaksuus

Edellisten kappaleiden mukaisesti kerrospaksuus vaikuttaa vastapaineeseen ja aikaan, joka kuivumisvy-öhykkeen noususta pintaan kestää. Ratkaisevana näistä on nimenomaan kuivumisvyöhykkeen nousuno-peus. Kun vilja on märkää, kerrospaksuus saa olla vain 50 cm luokkaa. Tällöin pinnan kuivuminen alkaa riittävän nopeasti ja kuorettumista tai pilaantumista ei ehdi välttämättä tapahtua. Kuivalla viljalla voidaan käyttää suurempia kerrospaksuuksia. Paksujen kerrosten (1-3m) käyttö ai- 25 5 Kuivuriraken-teet Figure 5.6: Ilmamäärän vaikutus kuivausvyöhykkeen etenemiseen heuttaa suuren vastapaineen, jolloin on käytettävä keskipakoispuhaltimia. Lisäksi kuivurissa on oltava kierrätys, koska muutoin pin-takerros pilaantuu herkästi. Lisälämmön käyttö Meillä ulkoilman tila on sadonkorjuukaudella usein sellainen, ettei viljan kosteutta saada alle 15 % (ilman kosteus alle 60 %). Jotta kylmäilmakuivaukses-sa päästäisiin säilytyskosteuteen, apuna pitää käyttää lisälämpöä. Kuivumisen varmistamisen lisäksi lisälämpö parantaa kuivurin kapasiteettia. Lisälämpöä voidaan käyttää kuivauksen alkuvaiheessa 0-5 C ja kuivauksen edistyessä aina 10 C asti. Alussa kannattaa käyttää pienempää lisälämpömäärää, jot-ta pinta ei kuorettuisi tai pilaantuisi. Lisälämpöä kannattaisi käyttää siten, että kuivausilman kosteus olisi 5 - 15 % alhaisempi kuin tasapainokosteuden mukainen haluttu loppukosteus. Esimerkiksi alle 15 % kosteuteen pyrittäessä kuivausilman kosteus voisi olla 45-55 %. Jotta saataisiin esim. 5 C lämpötilan nousu, lisälämpöä tarvitaan n. 1 kW/m<sup>2</sup>. Lisälämmön käytössä kannattaa seurata sääoloja. Sen käyttö on edullisinta tietysti silloin, kun ulkoilma on kuivaa. Kylmäilmakuivurin ohjaus Kylmäilmakuivurissa tapahtuu kuivumista lähes aina ulkoilman tilasta riippumatta silloin, kun viljan kosteus yli 20 - 22 %. Tosin tällöinkin sääolot vaikuttavat kuivumisnopeuteen. Tämä johtuu siitä, että puhaltimen ilma otetaan yleensä hieman suojaisesta paikasta ja puhaltimessa sen lämpö nousee 1 C verran. Kylmäil-makuivauksen ongelmana on epätietoisuus siitä, milloin kuivumista voi tapahtua. Tätä varten voidaan käyttää automaattisia ohjauslaitteita, jotka ohjaavat puhallinta. Nämä perustuvat joko kuivausilman kosteuden seurantaan tai kuivauksen seurantaan. Kuivausta voidaan seurata esimerkiksi mittaamalla lämpötilat viljakerroksen pinnalta ja pohjasta tai mittaamalla kosteus ennen ja jälkeen viljakerrosta.

# Kirjallisuutta

- [Mellman et al 2011] Mellmann J., Iroba K.L., Metzger T., Original Research Article Tsotsas E., Mészáros C. & Farkas I. Moisture content and residence time distributions in mixed-flow grain dryers. *Biosystems Engineering*, Volume 109, Issue 4, August 2011, Pages 297-307
- [Laine ] Laine A. Konekapasiteetin mitoitus ja konekustannukset viljan ja nurmirehun tuotannossa. *TTS julkaisuja* 349
- [MEPU Oy] <http://www.mepu.fi/tuotteet/viljankasittely/getfile.php?file=18>
- [Reikälevy Oy] <http://www.reikalevy.fi/kuivaussiilot.html>
- [Viljan varastokuivaus ] Viljan varastokuivaus. *Maatalouden sähkönkäyttö* 3/1979. Suomen sähkölaitosyhdistys ry ja Maatalouskeskusten liitto.

# 7 Puhaltimet ja virtaus

Kuivaava ilma täytyy saada menemään viljan läpi. Siihen tarvitaan puhallinta, joka saa aikaan tarvittavan paine-eron, jotta ilma kulkee putkessa ja vielä viljakerroksessakin. Paine-ero tarvitaan, koska ilmalla on kitkaa eli viskositeettia. Hitaat ja nopeat molekyylit sekaantuvat keskenään aiheuttaen törmäyksiä eli kitkaa. Tässä luvussa selviää, miten putket ja puhaltimet mitoitetaan.

## 7.1 Jatkuvuusyhtälö

Jatkuvuusyhtälöä olemme käsitelleet jo kappaleessa 1.11.1. Kun putkessa tai kanavassa virtaa nestettä tai kaasua (yleisnimi fluidi), virtausmäärä on joko massavirtaa tai tilavuusvirtaa riippuen siitä kummalla tavalla virtaus halutaan ilmaista. Tyypillisesti puhutaan tilavuusvirrasta, puhaltimilla virtaus ilmoitetaan usein yksikkönä  $\text{m}^3/\text{h}$  ja pumpuille yksikkönä  $\text{l}/\text{min}$ . Jos noudatettaisiin perusyksikköjä, silloin tilavuusvirta ilmoitetaan yksikkönä  $\text{m}^3/\text{s}$ . Yksikkö kannattaa esim. taulukkolaskentaohjelmassa muuttaa perusyksiköksi, koska silloin vältetään yksikkömuunnosvirheitä esim. tehon laskennassa. Symboleina käytetään  $q_V$  tilavuusvirta ja  $q_m$  massavirta. Miksi sitten käytetään kahta erilaista virtauksen ilmoitustapaa? Tilavuusvirtauksen avulla on kätevä laskea esim. kuinka monta kertaa tunnissa navetan ilma vaihtuu tai kuinka nopeasti vesisäiliö täyttyy. Ongelmana tilavuusvirtauksessa on lämpötilan vaikutus. Ilman tiheys muuttuu sen lämmitessä, ja jos vaikka mitataan navettaan menevää kylmän ilman määrää ja sieltä poistuvaa lämpimän ilman määrää, saadaan eri luku, koska ilma 'turpoo' lämmitessään.

Kun lasketaan massavirtauksia, massatasapaino pätee aina. Esimerkiksi navettaan tulevan ilman massavirta on sama kuin sieltä poistuva. Kaasujen ja ilman kanssa laskettaessa pitää aina pitää mielessä missä olosuhteissa tulos ilmoitetaan. Tulokset pitää tarkassa laskennassa normittaa tiettyyn tilaan. Tätä tilaan kutsutaan NTP-tilaksi (normal temperature and pressure) ja viimeisimmän sopimuksen mukaan lämpötila on silloin  $0\text{ }^\circ\text{C}$  ( $273,15\text{ K}$ ) ja ilmanpaine on normaali  $1\text{ bar}$  ( $100\ 000\text{ Pa}$ ). Tosin tässäkin on hieman vaihtelua, paine on toisinaan  $1\text{ atm} = 101\ 325\text{ Pa}$  ja lämpötilakin voi olla jotain muuta.

Tilavuusvirta voidaan muuttaa kun virtaavan aineen tiheys  $\rho$  tunnetaan massavirtaukseksi seuraavasti:

$$q_m = \rho \cdot q_V \quad (7.1)$$

Kun tilavuusvirta kulkee putkessa tai kanavassa, sen keskimääräinen virtausnopeus  $v_k$  voidaan laskea poikkipinta-alan  $A$  ja tilavuusvirtauksen  $q_V$  avulla seuraavasti:

$$q_V = v_k \cdot A \Rightarrow v_k = \frac{q_V}{A} \quad (7.2)$$

Kun fluidi virtaa putkessa ja putken halkaisija muuttuu, yhtälön 7.2 mukaan poikkipinta-alan muutos aiheuttaa virtausnopeuden muutoksen. Tätä kutsutaan virtauksen jatkuvuusyhtälöksi ja se voidaan esittää seuraavasti, kun indeksit 1 ja 2 tarkoittavat virtauksen eri poikkileikkauksia.

$$q_V = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (7.3)$$

Jatkuvuusyhtälö perustuu siihen, että tilavuusvirtauksen pitää olla joka kohdassa saman ja jos poikkipinta-ala muuttuu, virtausnopeus muuttuu vastaavasti. Tämä pätee tietysti sillä edellytyksellä, että tiheys pysyy vakiona. Äskenhän opimme, että lämpötila vaikuttaa tiheyteen ja tilavuusvirtauksen määrään.

## 7.2 Turbulentti ja laminaarinen virtaus

Turbulentista virtaus olemme käsitelle kappaleessa 1.11.4. Niin kauan kuin virtaus on laminaaria eli kerroksittaista, nestepalaset liikkuvat pitkin virtausviivoja, jotka ovat putken pituusakselin suuntaisia. Palaset eivät sekoitu keskenään. Turbulentissa virtauksessa esiintyy palasten putken akselin suuntaisen siirtymisen ohella myös poikittaisliikettä, joka johtaa virtauspalasten jatkuvaan sekoittumiseen. Laminaari virtaus näyttää joka hetki samanlaiselta, turbulentti joka hetki erilaiselta. Virtaus muuttuu helpommin pyörteiseksi, jos neste on kovin herkkäliikkeistä eli sillä on pieni viskositeetti kuin vaikkapa tervan virtaus.

Virtaukseen liittyvä dimensioton luku on nimeltään **Reynoldsin luku** keksijänsä mukaan

$$Re = \frac{\rho v_k d}{\mu} = \frac{v_k d}{\nu}, \quad (7.4)$$

Reynolds totesi kokeillaan, että virtaus *putkessa* on laminaaria, jos  $Re < 2100$  ja turbulenttia jos  $Re > 4000$ . Näiden lukujen välillä se voi olla kumpaa vain tai ei oikein kumpaakaan tapauksesta ja historiasta riippuvasti. Sopivin järjestelyin virtaus voi pysyä laminaarina virtausnopeuden kasvaessa, vaikka  $Re \simeq 4000$  ylittyisikin, mutta turbulentin virtauksen saa laminaariksi vasta kun  $Re < 2100$ .

**Esimerkki.** Viljankuivurin putken halkaisija on 630 mm ja puhaltimen antama ilmamäärä on 9800 m<sup>3</sup>/h. Mikä on ilman keskimääräinen virtausnopeus ja onko virtaus laminaarista vai turbulentista?

Virtauspoikkipinta-ala saadaan putken halkaisijasta,  $A = \frac{\pi \cdot 0,63^2}{4} = 0,292 \text{ m}^2$ . Tilavuusvirta perusyksikkönä on,  $q_V = 9800/3600 = 2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ .  $v_k = \frac{2,7}{0,29} = 9,3 \text{ m/s}$  eli n 34 km/h. Kyseessä on ilma, jonka kinemaattinen viskositeetti on 15 cSt (1 cSt = 10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>/s) ja  $Re = \frac{9,3 \cdot 0,61}{15 \cdot 10^{-6}} = 378\,800$  eli virtaus on reilusti turbulentista.

Laminaarissa liikkeessä putken reunoilla olevalla rajakerroksella on ratkaiseva merkitys lämmön siirtymisessä. Laminaarissa virtauksessa putken poikkisuunnassa lämpö pystyy siirtymään vain johtumalla eli molekulaarisen diffuusion avulla. Lämmön johtuminen on hidas prosessi verrattuna virtauksen mukana kuljettumiseen, konvektioon. Turbulentissa virtauksessa on pieniä ja suuria pyörteitä, joissa myös lämpö siirtyy konvektion avulla. Laminaarissa virtauksessa paine- ja energiahäviöt ovat suoraan verrannollisia virtausnopeuteen, turbulentissa suurin piirtein nopeuden toiseen potenssiin.

## 7.3 Bernoullin yhtälö

Bernoullin yhtälöä käsiteltiin jo kappaleessa 1.11.2. Sen mukaan virtaavaan nesteiden tai kaasujen paineiden summa on kitkattomassa ja laminaarisessa virtauksessa vakio.

$$p_{stat} + p_{dyn} + p_p = \text{vakio}$$

$$p_{stat} + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{vakio} \quad (7.5)$$

Paineet voidaan jakaa kolmeen osaan, staattiseen paineeseen  $p_{stat}$ , dynaamiseen paineeseen  $p_{dyn}$  ja potentiaalipaineeseen  $p_p$  (korkeuserosta johtuvaan).

Bernoullin yhtälö pätee kitkattomalle laminaarille virtaukselle. Kitka ja virtauksen luonne johtavat muutoksiin Bernoullin yhtälössä. Reaalielämässä lisävaikeuksia tulee putken mutkista, hanoista, pumpuista ja putken pinnan karheudesta. Sovitaan, että vauhti  $v$  Bernoullin yhtälössä 7.5 tarkoittaa keskivauhtia. Kirjallisuudesta löytyy taulukoita, joissa kerrotaan, mikä  $\Delta p_k$  aiheutuu minkäkinlaisesta putken karheudesta, putken mutkasta ja hanasta.

## 7.4 Virtausvastukset

### 7.4.1 Kitkavastus

Teknisessä laskennassa kitkavastukset ja kertavastukset yhdistetään samaan lausekkeeseen jolloin saadaan putkiston tai kanaviston kokonaisvirtausvastus  $\Delta p$  (yhtälö 7.6). Jos kanaviston tai putkiston koko

Taulukko 7.1: Materiaalien pinnankarheuksia

Materiaali	Karheus k mm
Muoviputki	0,0015 - 0,007
Uusi teräs	0,01 ... 0,05
Ruosteinen teräs	0,15 ... 0,5
Sinkitty teräs	0,1 ... 0,16
Valurauta	0,2 ... 0,6
Kierresaumattu peltikanava	0,15

järjestelmässä vaihtelee, silloin tämä pitää ottaa huomioon niin, että lasketaan kunkin putken osan häviöt ja ne summataan yhteen. Lisäksi koon muutoksista, suppenemisista ja laajenemisista aiheutuu omat kertavastuksensa.

$$\Delta p = \Delta p_{kitka} + \sum p_{kerta}$$

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} + \sum \zeta_i \frac{\rho v^2}{2} \quad (7.6)$$

$\lambda$  kitkavastuskerroin  
 $l$  putken pituus  
 $d$  putken halkaisija  
 $\zeta$  kertavastuskerroin  
 $\rho$  nesteen tiheys

Yhtälön 7.6 kitkavastuskerroin  $\lambda$  korvaa siten Fanningin yhtälön  $f$  kertoimen (yhtälö 1.30). Kitkavastuskerroin riippuu virtauksen luonteesta, Reynoldsin luvusta  $Re$  ja putken pinnan karheudesta. Laminaarisessa virtauksessa kitkavastuskerroin saadaan yhtälöstä 7.7 ja turbulentsisessa virtauksessa sileille putkille se saadaan yhtälöstä 7.8 ( $Re < 100\,000$ ).

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (7.7)$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (7.8)$$

Karheissa putkistoissa pinnan karheus  $k$  pitää ottaa huomioon. Taulukossa 7.1 on tyypillisiä pinnankarheusarvoja. Karheille putkille löytyy kirjallisuudesta useita kitkavastuskertoimen laskentayhtälöitä. Yhtälössä 7.9 [Seppänen 2008] turbulentsiselle ja ei sileälle putkelle annettu laskentayhtälö.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2,0 \cdot \lg \frac{k}{d} \quad (7.9)$$

$$\lambda = \left[ \frac{1}{1,14 - 2,0 \cdot \lg \frac{k}{d}} \right]^2$$

Peltikanaville käytetään usein likiyhtälöä [Seppänen 2008]:

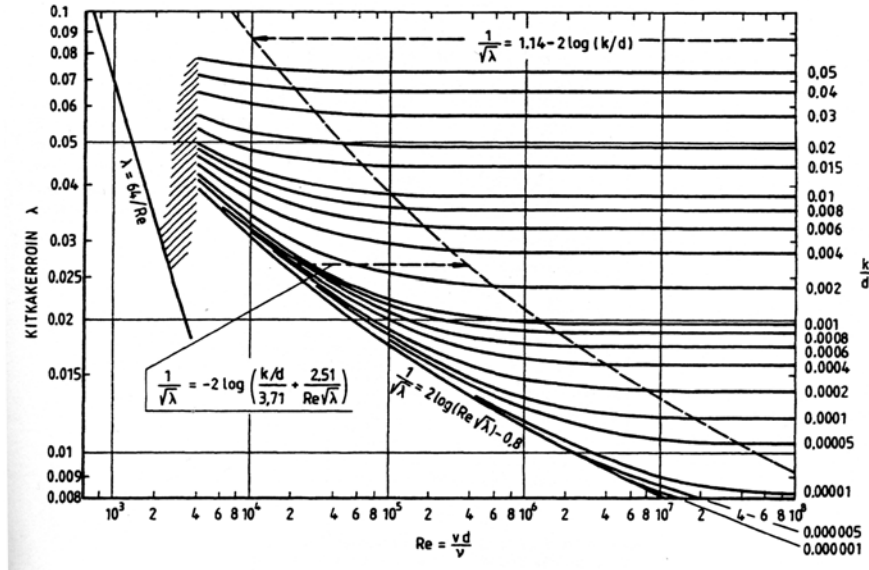
$$\lambda = 0,0072 + \frac{0,61}{Re^{0,35}} \quad (7.10)$$

Jos ilmakeinava ei ole pyöreä vaan suorakulmainen, silloin laskuissa käytetään kanavan hydraulista halkaisijaa:

$$d = \frac{4 \cdot A}{U} \quad (7.11)$$

A Kanavan poikkileikkauksen pinta-ala  
U Kanavan poikkileikkauksen piirin pituus

Kitkavastuskertoimet voidaan lukea myös Moodyn diagrammista, kuva 7.1.



Kuva 7.1: Moodyn diagrammi, kuva julkaisusta [Seppänen 2008]

Taulukko 7.2: Tyypillisiä kertavastuskertoimia ζ

Tyyppi	Kertavastuskerroin
Loiva 90° mutka	0,3
Jyrkkä 90° mutka	1,5
Loiva kanavan suureneminen	0,2
Loiva kanavan pieneminen	0,7
Ilman loiva imuaukko	0,25
Imuilma suoraan putkistoon	0,50 ... 1,0
Ulosvirtaus	0,5

### 7.4.2 Kertavastukset

Virtauksen kertavastukset aiheutuvat seuraavista asioista:

- kanava- tai putkikoon muutos
- virtaus säiliöön/ulos tai säiliöstä/ulkoa
- mutkat, haarautumat ja yhtymiset
- kuristukset, venttiilit yms

Kertavastukset riippuvat niiden dimensioista ja esimerkiksi 90° mutkan vastus riippuu sen säteestä. Taulukossa 7.2 on annettu joitakin tyypillisiä kertavastuskertoimia.

**Esimerkki.** Kuivuriuunin ilmamäärä on 9 800 m<sup>3</sup>/h ja putken halkaisija on 630 mm. Uunilta kuivuriin on putkea 6 m ja siinä on yksi loiva 90° mutka. Kuinka suuren painehäviön putkisto aiheuttaa? Ilman tiheytenä voidaan käyttää 1,2 kg/m<sup>3</sup>.

Edellisessä esimerkissä laskimme jo virtauksen Reynoldsin luvun ja saimme sille 378 800. Virtausnopeus oli 9,3 m/s. Putken oletetaan olevan sinkittyä terästä ja sille voidaan käyttää karheutena vaikka arvoa 0,15 mm. Tällöin saadaan  $\lambda = \left[ \frac{1}{1,14 - 2,0 \cdot \log\left(\frac{0,15}{630}\right)} \right]^2 = 0,014$ . Jos käytetään peltikanavan yhtälöä, saadaan  $\lambda = 0,0072 + \frac{0,61}{378800^{0,35}} = 0,014$  eli käytännössä sama lukema. Pelkän putken aiheuttama painehäviö on siten  $\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} = 0,014 \frac{6}{0,63} \frac{1,2 \cdot 9,3^2}{2} = 7,2$  Pa. Mutkan kertavastuskerroin on 0,3 kun kyseessä

on loivasti tehty mutka (suuri säde). Mutkan aiheuttama vastus on  $\Delta p = \zeta \frac{\rho v^2}{2} = 0,3 \frac{1,2 \cdot 9,3^2}{2} = 15,6$  Pa. Yhteisvastus on  $15,6 + 7,2 = 22,8$  Pa. Ilma puhalletaan kuivurikoneikon etupuolen 'ilmasäiliöön' ja oikeastaan tämän äkkinäisen virtauspoikkipinta-alan muutos aiheuttaa oman kertavastuksensa. Ilma menee myös viljakerroksen läpi ja ulos kuivurista, jolloin tästä syntyy lisävastusta. Kokonaisvastus on siten selvästi suurempi kuin pelkän putkiston vastus.

### 7.4.3 Biomateriaalin aiheuttama vastus

Kuivattava materiaali aiheuttaa oman vastuksensa. Materiaali on enemmän ja vähemmän huokoista, mikä tarkoittaa että esim. jyvien välissä on ilmaonkaloita. Ilma virtaa materiaalin läpi näitä onkaloita pitkin. Materiaalin aiheuttama vastus voidaan laskea seuraavasti [ASAE D272.3]:

$$\Delta p = C \cdot a \frac{h \cdot v^2}{\ln(1 + b \cdot v)} \quad (7.12)$$

v	ilman pintanopeus $\frac{m^3/s}{m^2}$
a ja b	materiaalikertoimia
h	materiaalin paksuus
C	korjauskerroin

Yhtälön 7.12 korjauskerroin C tarvitaan, koska kokeet on tehty puhtaille materiaaleille ja roskat yms lisäävät vastusta. Materiaalikertoimia on esitetty taulukossa 7.3.

Korjauskerroin C saadaan yhtälöstä 7.13, [ASAE D272.3], jossa  $f_m$  on roskien määrä painomäärä desimaaliosana. Roskien lisäksi materiaalin tilavuuspaino vaikuttaa ilman vastukseen siten, että tilavuuspainon lisääntyessä vastus myös lisääntyy. Tämän huomioon ottaminen on esitetty standardissa [ASAE D272.3]. Materiaalin lisäksi se on joko verkkolevyn tai raollisen lattian päällä, jolloin aukoista tapahtuva virtaus aiheuttaa myös oman painehäviön.

$$C = (1 + (14,5566 - 26,418 \cdot v) \cdot f_m) \quad (7.13)$$

**Esimerkki.** Kylmäilmakuivurin pohjana on verkkolevy, jonka reikäala on 32%. Viljaa kuivurissa on 1,0 m kerros, kuivurin pohjapinta-ala on 30 m<sup>2</sup> ja ilmamäärä on 500 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup>. Kuinka suuri on tästä aiheutuva vastapaine?

Lasketaan ensin ilmamäärä,  $q_v = 30m^2 \cdot 500 m^3/h/m^2 = 15000 m^3/h = 4,2 m^3/s$ . Ilman virtausnopeus saadaan suoraan pinta-alaan kohdistuvasta ilmamäärästä. Kun laadut supistetaan,  $v = 500 m/h = 0,14 m/s$ . Taulukosta 7.3 valitaan ohra. Sen kertoimet ovat  $a = 2,14 \cdot 10^4$  ja  $b = 13,2$ . Nähdään myös, että nopeusalue on oikea eli 0,14 m/s on ohran nopeusalueen sisäpuolella. Lasketaan vastapaine 'puhtaalle' materiaalille eli  $C = 1$ .  $\Delta p = 2,14 \cdot 10^4 \frac{1,0 \cdot 0,14^2}{\ln(1 + 13,2 \cdot 0,14)} = 402$  Pa. Ohrakerros aiheuttaa siten 402 Pa/m vastapaineen.

## 7.5 Biomateriaali ilmavirtauksessa

Laskuvarjohyppääjä tulee alas hitaammin laskuvarjon auettua kuin muuten. Höyhen putoaa hitaammin kuin kivi. Kivi putoaa ilmassa nopeammin kuin vedessä. Vedessä tapahtuu sedimentoitumista;

Taulukko 7.3: Materiaalikertoimien arvoja [ASAE D272.3]

Materiaali	a Pa·s <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	b m <sup>2</sup> ·s/m <sup>3</sup>	Nopeusalue m <sup>3</sup> /s/m <sup>2</sup>
Ohra	2,14·10 <sup>4</sup>	13,2	0,0056–0,203
Kaura	2,41·10 <sup>4</sup>	13,9	0,0056–0,203
Vehnä	2,70·10 <sup>4</sup>	8,77	0,0056–0,203
Peruna	2,18·10 <sup>3</sup>	8,24	0,03–0,30

Taulukko 7.4: Biomateriaalien virtausvastuskertoimia ja leijumisnopeuksia

Materiaali	Virtausvastuskerroin $c_w$	Leijumisnopeus m/s
Vehnä	0,2 ... 0,3	9 - 12
Kaura	0,1 ... 0,2	8 - 9
Ruis	0,2	8 - 10
Vehnän olki 0,6 cm	0,84	5,2
Vehnän olki 2,5 cm	0,80	4,3
Vehnän olki 7,5 cm	0,90	3,0
Vehnän olki 25 cm	0,91	2,7
Peruna	0,64	32
Pyöreä kivi		40

hienojakoisempi maa-aines on pinnalla ja karkea sora pohjalla. Putoamisvauhti riippuu väliaineen viskositeetista (vrt. putoaminen ilmassa, vedessä tai hunajassa), eli väliaineen viskositeetti voidaan mitata tarkastelemalla putoamisvauhtia. Tällainen laite on **Höpplerin viskosimetri**. Toisaalta virtausnopeus saadaan selville panemalla pystysuoraan virtaukseen esine, joka pysyy virtauksessa paikallaan. Tällaista virtausnopeusmittaria sanotaan **rotametrik**si.

Annetaan jyvän pudota vapaasti alaspäin. Jyvään vaikuttavat sen paino  $mg$  alaspäin ja ilman aiheuttama noste  $m_o g$  ylöspäin.  $m_o$  on jyvän syrjäyttämän ilman massa. Silloin kun jyvä putoaa vakio-  
vauhdilla  $v_{raja}$ , voimien summan täytyy olla nolla, joten

$$mg - m_o g - f_u \cdot v_{raja} = 0, \quad (7.14)$$

josta **rajanopeus** voidaan laskea. Kun  $v$  kasvaa, putoavan kappaleen ylä- ja alapintojen välille alkaa syntyä paine-ero, joka Bernoullin yhtälön mukaisesti on luokkaa  $\frac{1}{2}\rho v^2$ . Virtausta vastustava voima onkin tapana kirjoittaa muotoon

$$F = C_w \cdot A \cdot \frac{1}{2}\rho v^2. \quad (7.15)$$

$A$  on naaman pinta-ala, esimerkiksi pallolle  $\pi r^2$ . **Virtausvastus**  $C_w$  löytyy taulukosta 7.4 kuin myös leijumisnopeuksia. Leijumisnopeus tarkoittaa nopeutta, jossa kappale lähtee ilmapirran mukana. Ilman aiheuttama noste on silloin suurempi kuin maan vetovoima. Missä sitten me tarvitaan näitä tietoja. Lajittelijoissa ja leikkuupuimurin seulastoilla ilman virtausnopeuden pitää olla sopiva, jotta voidaan esimerkiksi erottaa jyvät akanoista. Samoin viljaa kuljettavien kuljettimien ilman nopeuksien on oltava riittävät, jotta jyvät siirtyvät ilman mukana.

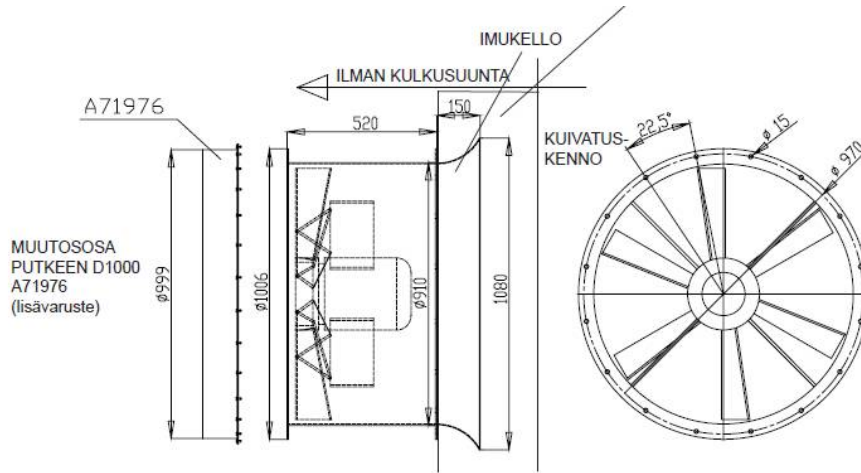
## 7.6 Puhaltimet

### 7.6.1 Puhallintyytit

Puhallin aikaansaa ilman liikkeen kuivureissa tai myöskin ilmanvaihtokoneistossa. Puhaltimia on kolme päätyyppiä:

- Aksiaalipuhallin (axial-flow), ilma liikkuu puhaltimen akselin suunnassa. Näitä kutsutaan myös potkuripuhaltimiksi, koska puhaltimen siipi on samanlainen kuin lentokoneen potkuri, kuva 7.2. Aksiaalipuhaltimet ovat hinnaltaan usein edullisia, mutta ne eivät sovellu korkeisiin vastapaineisiin, suurimmat paineet ovat 1000 Pa luokkaa.
- Keskipakoispuhallin (centrifugal fan), ilma liikkuu siivikon säteissuunnassa ja siksi tätä tyyppiä kutsutaan toisinaan myös säteispuhallimeksi (radial fan), kuva 7.3. Keskipakoispuhallin kestää huomattavasti suurempia paineita (vastapaineita) kuin aksiaalipuhallin ja siksi sitä on syytä käyttää esimerkiksi paksujen viljakerrosten kuivureissa.
- Puoliakksiaalipuhallin, joka on keskipako- ja aksiaalipuhaltimen välimuoto.





Kuva 7.2: Agrosec aksiaalipuhallin [Agrosec]

- Poikittaisvirtauspuhallin (rumpupuhallin, cross-flow), kuva 7.4. Tämä puhallintyyppi on leveä ja antaa tasaisen tilavuusvirran koko leveydeltään. Tätä tyyppiä käytetään paljon esimerkiksi autojen lämmityslaitteissa ja erilaisissa ilmanvaihtolaitteissa.

### 7.6.2 Puhaltimen suoritusarvot

Itse asiassa puhallin tuottaa kahta eri painetta staattista painetta  $p_s$  ja dynaamista painetta  $p_{dyn}$  (virtausta). Puhaltimen kokonaispaine  $p_t$  saadaan näiden summana:

$$p_t = p_s + p_{dyn} = p_s + \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (7.16)$$

Puhaltimen tuottama staattinen paine on sama kuin virtausvastusten (putkisto, mutkat, vilja) aiheuttama vastapaine ja dynaaminen paine on vastaavasti ilman liikkeeseen tarvittava paine. Ilmanvirtauksen teho voidaan laskea paineen ja virtauksen perusteella:

$$P = q_V \cdot p_t \quad (7.17)$$

Tehoissa samoin kuin hyötysuhteissa voidaan erottaa kokonaisteho/kokonaishyötysuhde ja staattinen teho/staattinen hyötysuhde. Jos halutaan laskea staattinen teho, silloin yhtälössä käytetään kokonaispaineen sijaan staattista painetta. Usein dynaaminen paine on pieni staattiseen paineeseen verrattuna ja kumpikin teho ovat melko saman suuruisia. Kun staattinen paine on pieni, silloin tehojen erot ovat suuret.

Puhaltimien kokonaishyötysuhde  $\eta_t$  ja staattinen hyötysuhde  $\eta_s$  voidaan laskea seuraavasti, kun puhaltimeen vietävä akseliteho on  $P_a$ :

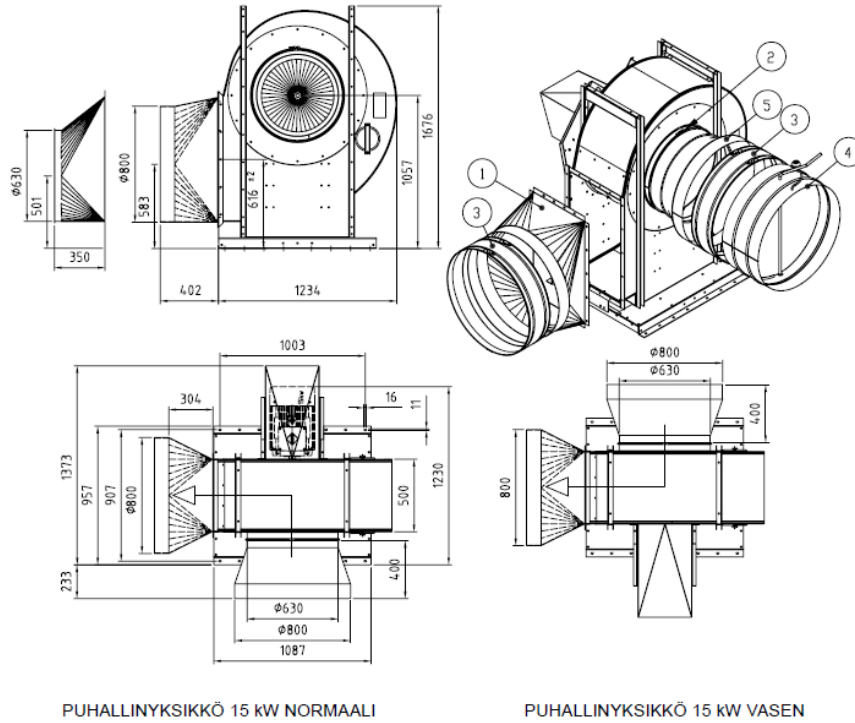
$$\eta_t = \frac{q_V \cdot p_t}{P_a} \quad (7.18)$$

$$\eta_s = \frac{q_V \cdot p_s}{P_a} \quad (7.19)$$

**Esimerkki.** Puhaltimen tilavuusvirtaus on  $9\,800\text{ m}^3/\text{h}$  ja vastapaine (staattinen paine) on  $600\text{ Pa}$ . Putken koko on  $630\text{ mm}$  ja puhallin tarvitsee pyöriäkseen  $3\text{ kW}$  akselitehon. Mikä on puhaltimen hyötysuhde?

Aiemmin olemme jo laskeneet, että ilman virtausnopeus on  $9,3\text{ m/s}$  ja dynaaminen paine on kun ilman tiheys on  $1,2\text{ kg/m}^3$ ,  $p_{dyn} = \frac{1}{2}\rho v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 9,3^2 = 52\text{ Pa}$  ja kokonaispaine on tällöin  $600 + 52 = 652\text{ Pa}$ . Puhaltimen kokonaisteho on  $P_t = q_V \cdot p_t = 2,7 \cdot 652 = 1,8\text{ kW}$ . Kokonaishyötysuhde on  $\eta_t = \frac{1,8}{3} = 0,60$ . Vastaavasti staattinen teho on  $P_s = 1,6\text{ kW}$  ja staattinen hyötysuhde on  $\eta_s = 0,53$ .

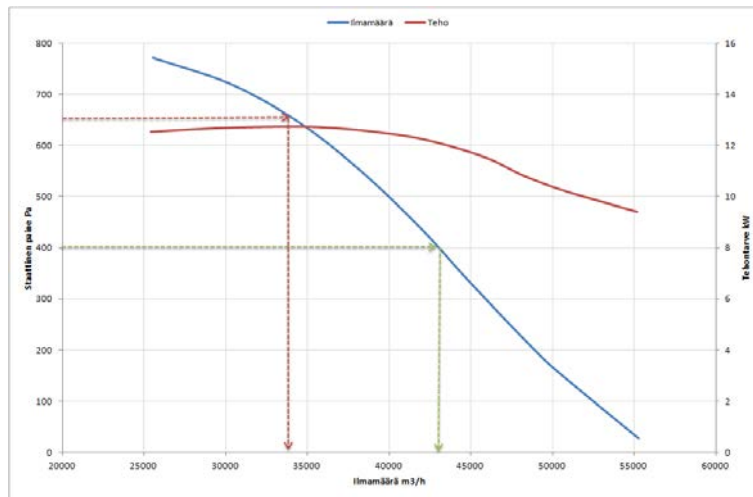
Radiaalipuhaltimet 11 kW ja 15 kW



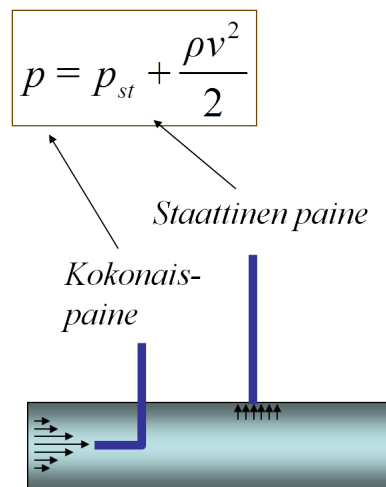
Kuva 7.3: Agrosec keskipakoispuhallin [Agrosec]



Kuva 7.4: Poikittaisvirtauspuhallin [crossflow]



Kuva 7.5: Esimerkki puhallinkäyrästä

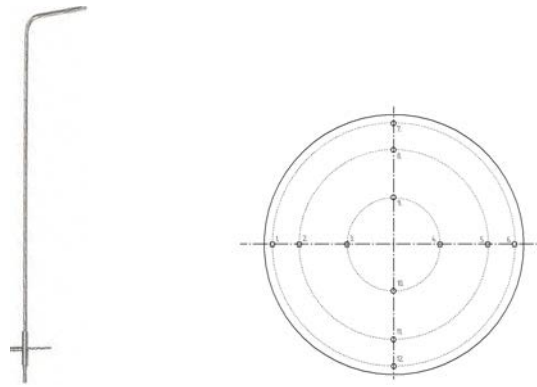


Kuva 7.6: Virtauksen tilavuusvirran ja paineiden mittaaminen

Puhaltimet tuottama tilavuusvirtaus mitataan käyttäen useita eri vastapaineita (staattisia paineita). Tuloksista piirretään käyrästä (kuva 7.5, jossa vähintäänkin on tuotto-paine kuvaaja. Tämän lisäksi käyrästä esitetään usein melu ja puhaltimen hyötysuhde. Kun puhallinta valitaan, silloin pitää tietää sen käytön vastapaine. Tämän vastapaineen avulla valitaan tarvittavan ilmamäärän antava puhallin. Se miksi puhaltimen oikea mitoitus on tärkeää selviää myös kuvasta. Jos esimerkin puhallin toimii 400 Pa staattisella vastapaineella, se tuottaa 43 000 m<sup>3</sup>/h ilmavirran. Jos vastapaine on 650 Pa, ilmavirta on 34 000 m eli n 20 % pienempi.

### 7.6.3 Tilavuusvirran mittaaminen

Virtauksesta on suhteellisen helppo mitata kaksi eri painetta. Kun painemittarin letku on kohtisuoraan putken poratusta reiästä putken reunalla (kuva 7.6, saadaan putkessa vallitseva staattinen paine (vastapaine). Kun letku asetetaan virtaukseen vasten saadaan kokonaispaine. Näiden kahden paineen erotus on dynaaminen paine ja nopeus voidaan nyt laskea,  $v = \sqrt{\frac{2p_{dyn}}{\rho}}$ . Koska virtaus on nopeimmillaan keskellä ja hitaimmillaan reunalla, meidän pitää mitata kokonaispaine useasta kohtaa ja laskea niistä virtauksen keskiarvo. Mittausmenetelmä on standardisoitu, SFS-EN 12599 [SFS-EN 12599] ja kyseisestä standardista saa tarkempia tietoja mittauksesta ja siihen liittyvistä epävarmuuksista. Yhtenä mittaustapana on virtauksen 12 pisteen mittaus. Putken ristikkäisiltä akseleilta mitataan kummaltakin 6 pistettä ja näistä lasketaan keskiarvo, kuva 7.7. Mittapisteen etäisyys putken reunalta on seuraava: 3,2 %, 13,5%, 32,1%, 67,9%, 86,5% ja 96,8% halkaisijasta. Mittapisteen paikat ottavat huomioon vir-



Kuva 7.7: Pitot-putki ja tilavuusvirran mittauspisteet

tauksen nopeusprofiilin ja tulos on suoraan keskimääräinen virtausnopeus. Mittaus edellyttää riittävän pitkiä suorja putken osuuksia, muutoin turbulenssi aiheuttaa vääristymiä tulokseen. Mittauksia varten on kehitetty Pitot-putki, joka mittaa suoraan kokonaispaineen ja staattisen paineen erotuksen.

Talojen ilmastointilaitteita varten on kehitetty keskiarvo pitot putkia ja erilaisia mittaussiivikoita. Nämä soveltuvat paremmin jatkuvaan virtauksen mittaukseen. Kuvan 7.7 pitot-putkella täytyy aina tehdä käsin ja sillä ei voida mitata jatkuvasti.

Kaikissa virtausmittauksissa on oleellista, että se tehdään oikeasta kohdasta. Mutkat, koon muutokset ja toimilaitteet aiheuttavat häiriöitä virtaukseen. Kannattaa aina tutustua tarkoin mittaussmenetelmiin ja mittalaitteen käyttöohjeisiin.

#### 7.6.4 Tilavuusvirran normiointi

Tilavuusvirran ongelmana on, että lämpötila ja myös paine vaikuttavat fluidin tiheyteen. Jos lämpötila tai paine muuttuvat, silloin myös tilavuusvirta muuttuu. Kuivuriuunin läpi mennyt ilma lämpenee ja sen seurauksena sen tiheys pienenee ja tilavuusvirran pitää lisääntyä. Puhaltimien suoritusarvot normioidaan yleensä sovittuun tilaan. Ongelmana on, että näitä sovittuja tiloja on useita. Paineen suhteen ollaan oltu lähes yksimielisiä. Normipaineena käytetään joko 1 bar tai 1 atm painetta. Tästä aiheutuva virhe on melko pieni. Lämpötilan osalta on olemassa ainakin kolme eri normilämpötilaa: 0 °C, 15 °C ja 20 °C. Jos tilavuusvirta voi muuttua lämpötilan tai paineen muutoksen takia, massavirta pysyy aina samana, normiointi perustuukin tähän massataseen pysyvyyteen.

Ilman tiheys voidaan laskea joko lähtien ideaalikaasuyhtälöistä tai sitten lähtien tietyn tilapisteen tunnetuista arvoista, yhtälössä on lähdetty 15 °C kuivan ilman tiheydestä 1,226 kg/dm<sup>3</sup>.

$$\rho = 1,226 \cdot \frac{p}{1013} \frac{288}{T} \quad (7.20)$$

$\rho$	ilman tiheys laskentalämpötilassa
1,226	ilman tiheys 15 °C lämpötilassa
p	ilman paine
1013	normaali-ilmanpaine [mbar]
288	15 °C lämpötila Kelvin asteina
T	ilman lämpötila [K]

**Esimerkki.** Kuivuriuunin virtaus mitattiin kuivauksen aikana (70 °C) uunin jälkeisestä kanavasta. Tulokseksi saatiin 11 300 m<sup>3</sup>/h. Teknisissä tiedoissa virtaukseksi ilmoitetaan 10 000 m<sup>3</sup>/h 15 °C lämpötilassa ja 600 Pa vastapaineessa. Onko puhaltimen ilmamäärä normaalia suurempi?

1013 mbar on 101300 Pa ja vastapaine on muutaman sadan Pa luokkaa. Tällöin paineiden suhde  $\approx 1$ . Lämpötilojen suhde on  $\frac{288}{70+273} = 0,84$  ja ilman tiheys on silloin  $1,226 \cdot 0,84 = 1,029$  kg/m<sup>3</sup>. Massavirta mittaustilassa on  $q_m = \rho \cdot q_V = 1,029 \cdot 11300 = 11628$  kg/h. Ilmoitetun ilmamäärän massavirta on  $1,226 \cdot 10000 = 12260$  kg/h. Massavirrat ovat samaa suuruusluokkaa eli ilmamäärä on oikein. Kuvan

7.5 mukaisesti puhaltimen ilmamäärä riippuu myös vastapaineesta ja ilmoitettu arvo oli annettu 600 Pa vastapaineella. Myös vastapaine pitäisi mitata, koska sillä on suuri vaikutus puhaltimen tuottoon.

## 7.7 Energiansäästö

Kuivurin käytössä puhaltimien hyötysuhteella ja putkistolla ei ole sanottavaa merkitystä, koska häviöteho muuttuu lämmöksi ja osallistuu siten kuivaukseen. Karjasuojien ja rakennusten ilmanvaihdossa tilanne on toinen, ilmanvaihto voi toimia jatkuvasti ja häviötehoa ei välttämättä saada hyödyksi, jos lämpöä joudutaan joka tapauksessa poistamaan rakennuksesta. Tällöin kannattaa laskea tarkkaan mutkien ja putkistojen vastukset ja on pyrittävä minimoimaan painhäviöitä.

# Kirjallisuutta

- [Agrosec] Viitteet <http://www.agrosec.fi/index.php?id=114>
- [ASAE D272.3] ASAE D272.3 MAR1996 (R2007) Resistance to Airflow of Grains, Seeds, Other Agricultural Products, and Perforated Metal Sheets.
- [crossflow] <http://www.crossflow-fan.com/cross-flow-fans-PE60AC.htm>
- [Henderson 1943] Henderson S.M. Resistance of shelled corn and bin walls to airflow. Ref. Henderson S.M., Perry R.L. & Young J.H. Principles of Process Engineering, 4th edition. ASAE 1997
- [SFS-EN 12599] Ilmastointi. Järjestelmien käyttöönottomittaukset, menetelmät ja mittauslaitteet. Metalliteollisuuden Standardisoimiskeskus.
- [Seppänen 2008] Seppänen O. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Solver palvelut Oy, Anjalankoski 2008.

## 8 Kuivauksen energiansäästö

Edellisissä kappaleissa olemme tutustuneet kuivurin, jyvän ja ilman perusteisiin ja niissä on myös käsitelty energia-asioita. Tässä kappaleessa kertaamme vielä niitä ja pohdimme miten muuten voisimme tehostaa kuivurin toimintaa. Kuivauksen energiatehokkuutta olemme jo käsitelleet kappaleessa 5.4.4. Tutustu myös tuohon kappaleeseen.

### 8.1 Kuivurin lämpöhäviöt

Jos kuivaus perustuu veden höyrystämiseen, siihen tarvittu energia on latenttina lämpönä höyryssä. Jos höyry tiivistyy takaisin vedeksi, tämä latenttienergia vapautuu. Kuivaus ei siis periaatteessa tarvitse ulkoista energiaa, jos poistuvan ilman energia otetaan talteen lämmönvaihtimella. Tosiasiassa kuivurissa tapahtuu välttämättä lämpöhäviöitä putkista ja seinämistä. Eristämällä nämäkin häviöt voidaan poistaa. Tässä luvussa opiskellaan, miten lämpöhäviölaskut tehdään.

#### 8.1.1 Lämmön johtuminen monikerrosrakenteessa

Seinä koostuu lastulevy-, vuorivilla-, puu- tai tiilikerroksista. Miten lasketaan johtumisesta aiheutuva kokonaislämmön siirtyminen seinän läpi? Kannattako kuivurin seinille laittaa eristeen? Olkoon  $L$ :n mittainen tanko tehty kahdesta materiaalista, joiden osapituudet ovat  $L_1$  ja  $L_2$ .  $L_1 + L_2 = L$  ja lämmönjohtavuudet ovat  $\lambda_1$  ja  $\lambda_2$ .

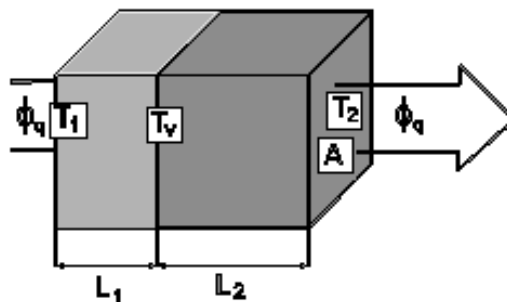
Olkoot tangon päiden lämpötilat  $T_1$  ja  $T_2$  ja olkoon materiaalien välisen rajapinnan lämpötila  $T_v$  (kuva 8.1). Nyt lämpötilagradientti eri materiaaleissa ei ole sama, mutta kummassakin materiaalissa erikseen sen täytyy olla vakio. Olkoon läpi mennyt lämpövirta  $\Phi_q = kA(T_1 - T_2)$ . Kokonaislämmön siirtymiskerroin  $U$  halutaan nyt selvittää. Se samoin kuin rajapinnan lämpötila voidaan ratkaista, koska tiedetään, että jokaisen poikkileikkauksen läpi täytyy mennä sama lämpövirta. Lämpö ei saa kasautua minnekään, koska tilanne oletetaan ajasta riippumattomaksi. Saadaan

$$\Phi_q = kA(T_1 - T_2) = \lambda_1 A \frac{T_1 - T_v}{L_1} = \lambda_2 A \frac{T_v - T_2}{L_2} \quad (8.1)$$

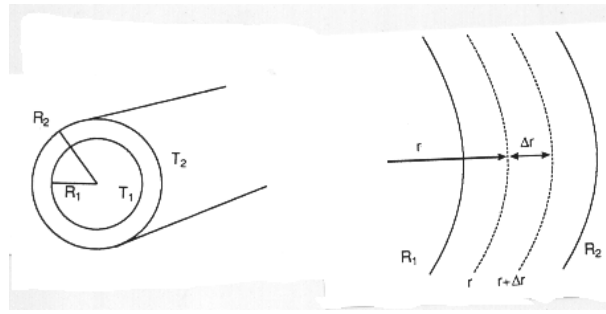
Saatiin kaksi yhtälöä, joissa on kaksi tuntematonta  $k$  ja  $T_v$ . Ne voidaan ratkaista. Saadaan

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} = \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} \quad (8.2)$$

missä on merkitty  $k_i = \lambda_i / L_i$ . Yleinen muoto on ilmeinen yleistys tälle lausekkeelle. Kustakin kerroksesta tulee yksi  $k_i$  lisää. Rakentajat puhuvat tässä yhteydessä lastulevyn tai seinän  $k$ -arvosta



Kuva 8.1: Lämmön johtuminen monikerrosrakenteessa



Kuva 8.2: Lämmön johtuminen putken seinämän läpi

tai lämmönläpäisyluvusta sekä lämpövastuksesta tai lämpöisolanssista, joilla he tarkoittavat suuretta  $\frac{1}{U} = \sum \frac{1}{k_i}$ . Lämpökonduktanssi on puolestaan  $UA$  ja lämpövastus voi olla myös  $\frac{1}{UA}$  analogisesti sähköopin konduktanssin ja resistanssin kanssa. Jos vastukset (eli eristekerrokset) ovat sarjassa (peräkkäin), kokonaisresistanssi on resistanssien summa. Jos puolestaan vastukset (eli vaikkapa ikkunat) ovat rinnakkain, pätee  $\frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i}$ . Tämä kertoo vain, että koko lämpövirta saadaan laskemalla yhteen eri ikkunoiden läpi menevät lämpövirrat.

**Esimerkki.** Kuivurin pelti ei eristä yhtään vaan eristeenä toimii ilmarajakkerros. Jos tätä kuvaava lämmönsiirtymiskerroin  $h=10$  W/mK, pellin ala on  $40$  m<sup>2</sup> ja lämpötilaero on  $30$  K, kuinka suuri on lämpöhäviö?

$$\Phi_q = hA(T_1 - T_v) = 10 \cdot 40 \cdot 30 = 12 \text{ kW}$$

Aika paljon. Jos kuitenkin lisättäisiin vaikkapa  $5$  cm vuorivillaa seiniin:

$$\Phi_q = \lambda_1 A \frac{T_1 - T_v}{L_1} = 0,05 \cdot 40 \frac{30}{0,05} = 1200 \text{ W}$$

Seinien läpi menisi sen jälkeen mitättömän vähän lämpöä. Mutta mitä maksaisi eriste? Toisaalta säästynyt energia olisi käytettävissä veden poistamiseen viljasta ja kuivuminen nopeutuisi.

### 8.1.2 Lämmön johtuminen putken läpi

Uunissa lämmitetty ilma johdetaan kuivuriin putkea pitkin. Kannattaako putki eristää?

Lämpövirran tiheys yksidimensioisessa ( $x$ -suunta) tapauksessa on  $q = \frac{\lambda dT}{dx}$ . Myös putken kuori voidaan ajatella yksidimensioiseksi, ainakin paikallisesti. Nyt etäisyys  $r$  putken keskikohdassa vastaa  $x$ -suuntaa, ks. kuva 8.2. Siispä  $q = \frac{\lambda dT}{dr}$ . Tarkastellaan ajasta riippumatonta tilannetta: putken sisällä on vakiolämpötila  $T_1$  ja ulkopuolella  $T_2$ . Jokaisen  $r$ -säteisen putken vaipan läpi täytyy sen vuoksi mennä joka hetki sama määrä lämpöä, eli lämpövirta on vakio jokaisen vaipan läpi. (Lämpövirran tiheys sen sijaan ei ole vakio, koska vaipan pinta-ala riippuu säteestä). On siis voimassa

$$\text{vakio} = \Phi_q = A(r) \cdot q(r) = 2\pi r L \lambda \frac{dT}{dr}$$

Tästä differentiaaliyhtälöstä  $T(r)$  voidaan ratkaista integraalilaskulla. Tulos on

$$T(r) = \frac{\Phi_q}{2\pi\lambda L} \ln r + C$$

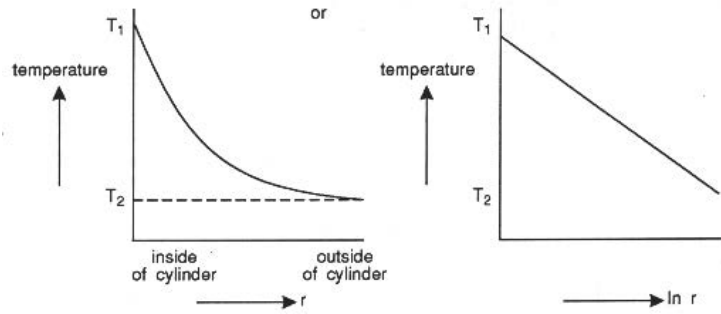
Tuntematon integrointivakio  $C$  samoin kuin lämpövirta saadaan selville reunaehdoista  $T(R_1)=T_1, T(R_2)=T_2$ . Lopputulos on

$$T(r) = \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \ln \frac{r}{R_2} + T_2$$

$$\Phi_q = 2\pi\lambda L \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \quad (8.3)$$

Kuvassa 8.3 on piirrettynä lämpötilajakauma sekä lineaarisella  $r$ -asteikolla että logaritmisella  $r$ -asteikolla ( $\ln r$ ). Huomaa, että tällä puolilogaritmisella asteikolla saat suoran. Aika usein käy niin, että





Kuva 8.3: Lämpötilajakauma putken seinämässä. Vasemmalla lineaarinen etäisyys putken keskipisteestä, oikealla etäisyydestä on otettu logaritmi.

ottamalla joko x- tai y-muuttujasta logaritmi saadaan suora (eli  $y = \ln x$  tai  $y = \exp(x)$  tai  $y = k^x$ ), jossa  $k$  on vakio). Luonnonilmiöissä tällaiset funktionaaliset riippuvuudet ovat varsin yleisiä. Suorassa on se miellyttävä piirre, että mahdolliset anomaliat (eli esimerkiksi ei ihan päde, että  $y = \ln x$ ) on helppo havaita.

Mikäli putki koostuu useammasta kerroksesta, toimitaan kuten monikerroksisen seinän tapauksessa. Lasku perustuu siihen, että jokaisen kerroksen läpi menee sama lämpövirta. Katsotaan kaksikerroksinen tilanne, ja olkoon sisäseinällä vielä lämmönsiirtymiskerroin  $h_s$  ja ulkoreunalla  $h_u$ . Käytetään kaavaa 8.3

$$\Phi_q = h_s 2\pi R_1^2 (T_s - T_1) = 2\pi\lambda_1 L \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \quad (8.4)$$

$$\Phi_q = 2\pi\lambda_2 L \frac{T_2 - T_3}{\ln \frac{R_2}{R_3}} = h_u 2\pi R_3^2 (T_3 - T_u) \quad (8.5)$$

$T_s$  on putkessa virtaavan nesteen lämpötila ja  $T_u$  ulkoilman lämpötila. Ratkaistaan yhtälöistä lämpötilaerot

$$T_s - T_1 = \frac{\Phi_q}{h_s 2\pi R_1^2}$$

$$T_1 - T_2 = \Phi_q \frac{\ln(R_1/R_2)}{2\pi\lambda_1 L}$$

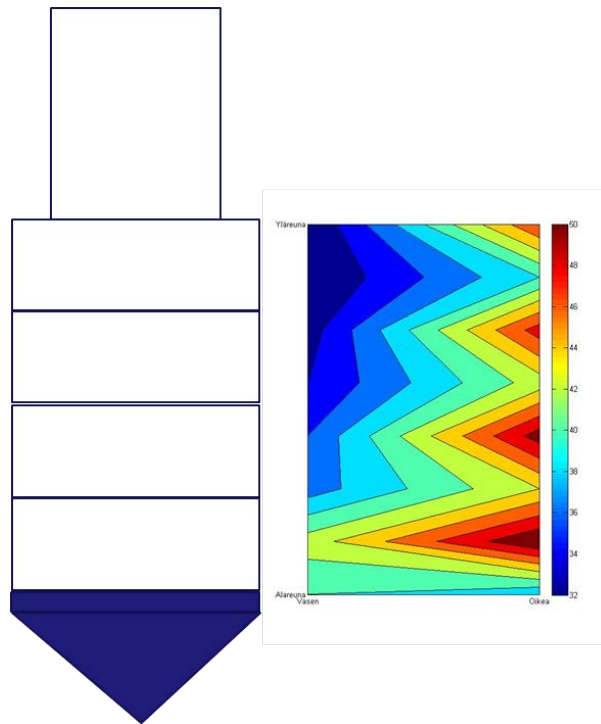
$$T_2 - T_3 = \Phi_q \frac{\ln(R_2/R_3)}{2\pi\lambda_2 L}$$

$$T_3 - T_u = \frac{\Phi_q}{h_u 2\pi R_3^2}$$

Sitten lasketaan yhtälöiden kummatkin puolet yhteen, jolloin saadaan kaikki tuntemattomat lämpötilat häviämään

$$T_s - T_u = \Phi_q \left( \frac{1}{h_s 2\pi R_1^2} + \frac{\ln(R_1/R_2)}{2\pi\lambda_1 L} + \frac{\ln(R_2/R_3)}{2\pi\lambda_2 L} + \frac{1}{h_u 2\pi R_3^2} \right) \quad (8.6)$$

Tästä voidaan ratkaista yleensä tuntematon lämpövirta. Sen jälkeen voidaan aiemmista yhtälöistä ratkaista kaikki välilämpötilat. Lasku menee aina samalla tavalla oli kerroksia miten paljon hyvänsä. Lausekkeita ei saa sievennettyä samaan tapaan kuin seinän tapauksessa, koska pinta-alat muuttuvat kerroksesta toiseen mentäessä.



Kuva 8.4: Kuivurin pintalämpötiloja

### 8.1.3 Kuivurin eristämisen vaikutus

Kuvassa 8.4 on esimerkki Viikin tutkimustilan kuivurin pintalämpötiloista. Kuuma kuivausilma puhalletaan ilmakammioon ja siitä ilma menee kuumailmaharjoihin. Mittausten mukaan kuivurin sivujen pintalämpötilat ovat 30 - 50 °C ja siitä aiheutuva lämpövirta on 200 - 300 W/m<sup>2</sup>. Kuivuriin tulevien ilmaputkien lämpötilat voavat 50 - 60 °C ja näistä aiheutuu 400 - 500 W/m<sup>2</sup> lämpöhäviö.

Viikin tutkimustilalla on kaksi identtistä kuivuriyksikköä. Toinen näistä eristettiin ja yksiköiden energiankulutukset kirjattiin. Eristetty kuivuri kulutti keskimäärin 20% vähemmän energiaa. Tämän tapaisiin tuloksiin ovat päässeet Piltti [Piltti 1979] ja Peltola [Peltola].

## 8.2 Lämmönsiirrin: rajapinnat

Suurin vaikeus lämmönsiirtymislaskuissa ovat rajapinnat. Vaikka fluidin virtaus kaukana seinämästä olisi kuinka turbulenttia tahansa, seinämän lähellä virtausnopeus menee nolnaan ja virtaus muuttuu laminaariksi. Lämpö joutuu johtumaan enemmän tai vähemmän laminaarin vesikerroksen läpi. Laminaarin kerroksen paksuus riippuu virtausnopeudesta. Talvella tuulisella ilmalla on kylmempi kuin tyynellä, niinpä lisäämme keinotekoisesti rajakerroksen paksuutta laittamalla lisää vaatteita päälle. Määritellään ensin lämmönsiirtymiskerroin  $h$  fluidista seinämään

$$\Phi_q = hA(T_n - T_s) \quad (8.7)$$

jossa  $T_n$  ja  $T_s$  ovat seinämästä kaukana olevan fluidin ja seinämän lämpötilat,  $A$  on seinämän pinta-ala ja  $\Phi_q$  rajapinnan läpi fluidista seinämään mennyt lämpövirta. Määritelmä on analoginen aiemman lämmönsiirtymiskertoimen määritelmän kanssa. Lämmönjohtavuuden tapauksessa lämmönsiirtymiskerroin on  $k=\lambda/d$ , jossa  $d$  on seinän paksuus ja  $\Phi_q=kA\Delta T$ . Sitä kutsutaan Newtonin jäähtymislaki. Nytkin kuvitellaan, että läpimennyt lämpövirta on suoraan verrannollinen lämpötilaeroon ja pinnan alaan. Määritelmästä on se ilo, että rajapintoja voidaan tarkastella samaan tapaan kuin seinän kerroksia. Ne antavat vain lisätermejä kokonaislämmön läpäisykertoimen  $k$  lausekseen

$$\frac{1}{k} = \sum \frac{1}{k_i} + \sum \frac{1}{h_j} \quad (8.8)$$

jossa  $h_j$  :t edustavat rajapintoja. Tyypillisesti  $h$  on 1 - 60 W/(m<sup>2</sup>K) kaasuille ja 300 - 600 W/(m<sup>2</sup>K) vedelle vapaassa virtauksessa. Varsinainen fysiikka on upotettu kertoimeen  $h$ . Jos virtaus pinnan ohi on siistiä, laminaaria, rajakerros on paksumpi kuin jos virtaus on turbulenttia.  $h$  riippuu ilmeisen inhotavasti virtausta kuvaavista suureista. Valitettavasti käytännössä usein jokin  $h_i$ :istä määrää, paljonko lämpöä siirtyy, eli kaikki  $1/k_i$ :t ovat paljon pienempiä kuin jokin  $1/h_i$ , eli jokin  $h_i$  on iso. Jos halutaan olla fiksuja ja laskea  $h_i$ :t, sen sijaan että mitattaisiin  $k$ , on turvauduttava dimensioanalyysiin ja puolikokeellisiin lausekkeisiin. Kirjallisuudesta löytyy puolikokeellisia tuloksia erilaisille geometrioille. Esimerkiksi turbulentiin putkivirtaukseen käytetään lauseketta

$$Nu = \frac{hx}{\lambda} = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4} = 0,023 \left( \frac{vx\rho}{\mu} \right)^{0,8} \left( \frac{c\mu}{\lambda} \right)^{0,4} \quad (8.9)$$

jossa  $Nu$  = Nusseltin luku,  $Re$  = Reynoldsin luku ja  $Pr$  = Prandtin luku ovat virtaukseen liittyviä dimensiottomia lukuja. Kertoimet on saatu tekemällä iso joukko kokeita. Eri kirjoista löydät vähän erilaisia kertoimia ja myös erilaisia lausekkeita. Tarkemmat ottavat huomioon esimerkiksi putken pinnan sileyden. Nusseltin luku on todellisen lämmönsiirtymiskertoimen  $h$  suhde vain johtumalla tapahtuvaan lämmönsiirtoon  $\lambda/x$ , jossa  $\lambda$  on nesteen lämmönjohtavuus ja  $x$  putken halkaisija. Tästäkin voit jo arvaata, että lausekkeiden käyttö vaatii harjoittelua. Ei ole ollenkaan itsestään selvää, mitä mikäkin kirjain lausekkeissa tarkoittaa. Kun  $Nu$  on tiedossa,  $h=Nu \cdot \lambda/x$ . Nusseltin luku on kappaleen karakteristisen dimension  $x$  (pallon tai putken halkaisija, etäisyys levyn etureunasta) ja laminaarisen rajakerroksen  $\delta$  suhde, onhan  $h = \lambda/\delta$ . Mitä tuulisempi sää, sitä ohuempi ei-turbulenttikerros, joten sitä isompi  $Nu$  ja  $h$ . Tyynellä säällä ei ole pakotettua konvektiota, jolloin Reynoldsin luku on nolla samoin kuin  $h$ . Silloin samoin kuin heikolla tuulellakin täytyy ottaa huomioon myös vapaan konvektion vaikutus. Ilma virtaa esimerkiksi lämpöpatterin ympäristöstä sen takia, että ilmassa on lämpötilaeroja. Nusseltin luvun sijasta lämmönsiirtymiskertoimen laskussa tarvitaan silloin Grashofin lukua. Yksi lisäongelma aiheutuu siitä, että veden lämpötila putkessa ja mahdollisesti putken ulkopuolellakin muuttuu jatkuvasti. Tällä tavoin toimivat esimerkiksi lämmönvaihtimet. Virtaukset voivat olla joko yhdensuuntaisia tai vastakkaisuuntaisia. Lasku osoittaa, että onnekaasti päästään yksinkertaiseen lopputulokseen. Esimerkiksi jos putken ulkopuolella on sisäpuoleen verrattuna vastakkaisuuntainen virtaus ja virtojen lämpötilaerot putken alussa ja lopussa ovat  $\Delta T_1$  ja  $\Delta T_2$ , saadaan putken pinnan läpi menevälle lämpövirralle  $\Phi_q$

$$\Phi_q = hA\Delta T_{ln}, \Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (8.10)$$

jossa  $h$  on Nusseltin luvusta laskettavissa oleva lämmönsiirtymiskerroin,  $A$  on putken pinta-ala (valitaan sopiva säde, jos on paksu putken seinä) ja  $\Delta T_{ln}$  on nimeltään logaritminen lämpötilaero.

**Esimerkki.** Jäähdytetään kaksiputkilämmönvaihtimessa maitoa 3000 kg/h lämpötilasta 80 °C lämpötilaan 40 °C. Jäähdytysveden lämpötila on sisään mennessään 20 °C, ulos tullessaan se saa olla korkeintaan 35 °C. Mikä pitää olla putkiston pinta-ala? Tässä tarvitaan lämmönsiirtymiskertoimia. Otetaan hatusta: maidosta seinään  $h = 200$  W/(m<sup>2</sup>K), seinästä veteen 500 W/(m<sup>2</sup>K), putken seinämän paksuus on 2 mm ja lämmönjohtavuus  $\lambda=20$  W/(mK). Lämmönsiirtymiskertoimeksi saat 141 W/(m<sup>2</sup>K) ja pinta-alaksi 31 m<sup>2</sup>. Myötävirtauksessa tulos olisi 43 m<sup>2</sup>. Tuuman putkea tarvitaan 380 m!! Ajan mittaan seinämät voivat likaantua ja lämmön siirtyminen huonontua, eli tarvitaan ehkä jokin varmuuskerroin lisäksi.

### 8.3 Lämpösäteily

Kaikki absoluuttisen nolla-asteen yläpuolella olevat kappaleet lähettävät sähkömagneettista (sm-)säteilyä, joka kuljettaa mukanaan energiaa. Näin myös kuivurin seinät säteilevät energiaa. Jos tämä energia absorboituu toiseen kappaleeseen, tähän siirtyy lämpöä. Säteily etenee valon nopeudella  $c$  (valokin on sm-säteilyä), ja se koostuu energiapaketeista, joita sanotaan fotoneiksi. Yhden fotonin energia on  $E_f=h_P f$ , jossa  $h_P$  (yleensä pelkkä  $h$ ) on Planckin vakio  $=6,626 \cdot 10^{-34}$  J s ja  $f$  säteilyn taajuus hertseinä (1 hertzi = Hz = 1/s). Jos säteilyn aallonpituus on  $\lambda$ , pätee  $f\lambda=c$ . Jos säteilyn energia on pieni, säteily

pystyy vain lisäämään molekyylien värähtelyä eli lämmittämään ainetta. Lämpäminen edellyttää fotonin absorptiota, häviämistä. Lämpösäteilyn peruskappale on ns. musta kappale. Se on kappale, joka lähettää ja absorboi maksimaalisen määrän energiaa. Meidän mielestämme mustanvärinen kappale ei useinkaan ole fyysikon tarkoittamassa mielessä musta kappale. Mustanvärinen kappale absorboi kaiken valon (vain) meidän näkemillämme aallonpituuksilla. Aurinko sen sijaan on aika hyvä musta kappale, pintalämpötila muutama tuhat kelviniä. Mustalla kappaleella on tunnetulla tavalla taajuudesta tai aallonpituudesta riippuva säteilyn intensiteettijakauma. Jakauma riippuu vain kappaleen lämpötilasta  $T$ . Jakaumalla on maksimi aallonpituudella

$$\lambda_{max} = \frac{0,0029m}{T(K)} \quad (8.11)$$

eli säteilyn aallonpituus pienenee, kun  $T$  kasvaa. Keltainen valo 500 nm vastaa lämpötilaa 6000 K eli aurinkoa. Kun jätät sähkölevyn päälle, se pikkuhiljaa muuttuu punaisesta siniseksi ennen paloauton tuloa. Jakauman lisäksi kiinnostaa lähtenyt energiavirta pinta-alayksikköä kohti eli energiavirran tiheys  $q$ , yksikkönä  $W/m^2$ . Kokonaisenergiavirran tiheys saadaan Stefanin laista

$$q = \sigma T^4 \quad (8.12)$$

jossa Stefanin vakio  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} J/(sm^2K^4)$ . Säteilyn määrä nousee dramaattisesti lämpötilan mukana. Tässä pitää muistaa merkitä  $T$  kelvineinä.  $1 m^2$ :n ihminen säteilee 530 W:n teholla ilman vaatteita. (vrt. auringon säteily maapallolle on  $1,3 kW/m^2$  !!). Tilanne ei kuitenkaan ole niin paha, koska ihminen absorboi koko ajan ympäristön säteilyä. Jos ympäristön lämpötila on  $20^\circ C$ , ihminen vastaanottaa noin 420 W eli nettöhäviö on vain 100 W eli hehkulamppun verran. Jos olemme kylmän ikkunan lähellä, aistimme kylmää, koska silloin nettöhäviö on isompi. Oleellista on siis meihin osuvan säteilyn määrä, ei niinkään huoneen lämpötila. Sen takia kattolämmitys ja muut säteilylämmittimet ovat niin tehokkaita. Takassa on oleellista, että puussa olevat kaasut palavat. Huonoimmat syttyvät vasta 700-800 celciusasteen lämpötiloissa. Tällöin säteilylämpö siirtyy tehokkaasti seiniin. Niiden pinta-alan olisi syytä olla mahdollisimman iso. Palotilan on siis oltava mahdollisimman iso. Savukaasuista ei energiaa paljon enää siirry. Vanhanaikainen pystyuuni täyttää nämä ehdot parhaiten! Hehkulamppu loistaa, koska siinä olevan langan lämpötila on auringon lämpötilan luokkaa. Hehkulamppu siis lähettää lämpösäteilyä, ja valaistusta ajatellen se ei ole kovin tehokas. Loistelamppu lähettää pääasiassa näkyvän valon fotoneita, joten sen tarvitsema kokonaisteho on pienempi tietylle valaistukselle. Ihmislasku oli yksinkertaistettu sikäli, että oletettiin kaiken säteilyn emittoituvan, eli että emissiokerroin oli 1 ja että kaikki säteily absorboitui eli absorptiokerroin oli 1. Todellisuudessa nämä kertoimet riippuvat aallonpituudesta. Esimerkiksi lumi on monilla aallonpituuksilla mustaa eli absorboi kaiken valon, mutta meidän mielestämme lumi on valkoista, eli se heijastaa kaiken näkyvän valon. Meidän näkemillämme aallonpituuksilla lumi sirottaa valoa ja näemme sen valkoisena. Ihmisen ja ympäristön tapauksessa lämpötilaero oli pieni. Silloin voidaan kirjoittaa

$$q = \sigma T_1^4 - \sigma T_2^4 \approx \sigma 4 T_m^3 \Delta T \approx h_s \Delta T, T_m = (T_1 + T_2)/2 \quad (8.13)$$

jossa  $h_s$  on taas lämmönsiirtymiskerroin säteilylle. Saatiin ihan samanlainen lauseke kuin lämmön johtumiselle ja rajapinnalle, eli säteilyn osuus lämmönsiirrossa voidaan helposti ottaa huomioon.

**Esimerkki.** Viikin kuivurissa uunin ja kuivurin välissä on taas 9 m putkea. Jos emissiokerroin olisi 1, säteilyhäviöt olisivat noin 7 kW eli saman verran kuin johtumalla. Seinistä säteilee 4 kW. Kiiltävä pinta tapaa kuitenkin tarkoittaa, että emissiokerroin on pieni. Ainakin näkyvän valon aallonpituuksilla, koska näemme peilistä kuvamme. Kuvasta näkyy hyvin, miten teippausten kohdalla lämpötila on järkevän kokoinen. Se tarkoittaa vain sitä, että teippausten kohdalla emissiokerroin on noin 1 kuten lämpökameralle on kerrottu.

## 8.4 Lämmönvaihtimet: Lämmön siirtyminen rajapinnalla

Lämmönvaihdinta tarvitaan, jos halutaan poistuvan ilman lämpöenergia ja vesihöyryn latenttienergia talteen. Yksi vaihtoehto lämmönvaihtimen rakenteeksi on kaksi sisäkkäistä putkea. Katsotaan, miten

lämmönsiirto putkien välillä voidaan laskea. Mutkistavana tekijänä lämpötilaeron muuttuminen koko ajan putkien suunnassa. Tähän asti olemme tarkastelleet lämmön siirtymistä yhdessä faasissa ja kiinteistä aineista koostuneissa kerrosrakenteissa ja vain lyhyesti maininneet lämmönsiirtymiskertoimen  $h$  luvussa. Rajapintojen merkitystä lämmönsiirrossa on yleisesti käsitelty luvussa . Nyt opitaan, miten lasketaan lämmön siirtyminen kiinteästä faasista fluidiin. Lämpö joutuu siirtymään enemmän tai vähemmän ohuen paikallaan pysyvän tai laminaaristi liikkuvan fluidirajakerroksen läpi johtumalla. Tähän rajakerrokseen liittyvä lämmönsiirtymiskerroin on  $h$  ja se joko annetaan suoraan tai voidaan laskea Nusseltin luvulla.

### 8.4.1 Nusseltin luku = $Nu$ : rajakerros eri tilanteissa

Jos meillä on laminaarinen virtaus putkessa, lämpö voi siirtyä fluidissa virtausta vastaan kohtisuorassa suunnassa vain johtumalla, koska eri r-säteiset virtaus sylinterit sekoittuvat toisiinsa vain molekyylien satunnaisen liikkeen kautta. Tämä satunnainen liikehän on viskositeetin syy. Jos taas virtaus on turbulenta, lämpöä siirtyy myös makroskooppisen nesteen poikittaisen liikkeen vaikutuksesta eli konvektion avulla. Tällöinkin putken reunamilla on enemmän tai vähemmän ohut laminaarinen rajakerros  $\delta$ , jonka läpi lämpö taas pääsee vain johtumalla. Lämmönsiirtymiskerroin  $h = \lambda/\delta$ . Ilmasta seinämää  $h$  on tyypillisesti  $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , ja ilman  $\lambda$  on  $0,024 \text{ W}/(\text{m K})$ , joten  $\delta$  on pari millimetriä. Nesteestä seinämää  $h$  on  $100 - 1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , ja veden  $\lambda$  on  $0,6 \text{ W}/(\text{m K})$ , joten  $\delta$  on taas muutama millimetri. Kun  $h$  tunnetaan, lämpövirta voidaan laskea ja se on

$$\Phi_q = hA\Delta T = \frac{\lambda}{\delta} A(T_n - T_s) \quad (8.14)$$

jossa  $T_n$  on nesteen lämpötila ja  $T_s$  on seinän lämpötila. Miten  $h$  voidaan laskea? Rajakerroksen paksuus riippuu monimutkaisella tavalla virtausoloista, siis dimensiottomista luvuista. Täsmällinen riippuvuus saadaan usein kokeista. On järkevää määritellä dimensioton Nusseltin luku

$$Nu = \frac{h}{\lambda/x} = \frac{\lambda/\delta}{\lambda/x} = \frac{x}{\delta} \quad (8.15)$$

jossa  $x$  = karakteristinen mitta = virtauksessa olevan levyn tapauksessa etäisyys levyn (esimerkiksi kasvin lehden) reunasta, putkivirtauksen tapauksessa putken halkaisija ja pallon ollessa virtauksessa pallon halkaisija.  $Nu$ -lukuja löytyy kirjoista. Lämmönsiirtymiskerroin saadaan sitten suoraan lausekkeesta

$$h = Nu \frac{\lambda}{x} \quad (8.16)$$

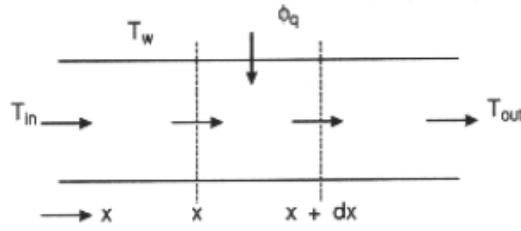
On vain tiedettävä, mitä tarkoitetaan karakteristisella mitalla  $x$ .

**Esimerkki.** Laminaarivirtaus putkessa. Voisi kuvitella, että rajakerros on suurin piirtein  $R/2$ , joten  $Nu = (h/(\lambda/x)) = ((\lambda/R/2)/(\lambda/2R)) = 4$ . Tarkempi tulos on 3,66. Kirjallisuudesta löytyy turbulenssille putkivirtaukselle lauseke

$$Nu = 0,027 Re^{0,8} Pr^{0,33}, \text{ kun } Re > 10^4 \text{ ja } Pr \geq 0,7. Pr \text{ on nimeltään Prandtin luku}$$

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\text{kinem.viskositeetti}}{\text{lämpötilantas.kerroin}}$$

$Pr$  on virtausrajakerroksen ja termisen rajakerroksen suhteen mitta. Ks. kuva . Kaasujen  $Pr$  on 1, koska  $v \approx \alpha$ . Nesteiden  $Pr$  on noin 10 ja hyvin viskoosien nesteiden luokkaa 100. Havaitaan, että mitä suurempi on virtausnopeus eli mitä suurempi  $Re$ , sitä suurempi  $Nu$  ja siis myös  $h$ . Lämmön siirtyminen siis tehostuu virtausnopeuden kasvaessa. Jos virtausta ei ole,  $Re = 0$  ja  $Nu = 0$  ainakin putkivirtauksessa. Annetut lausekkeet pätevätkin vain pakotettuun konvektioon. Lämpöpattereista lämpöä siirtyy vapaan konvektion avulla. Vapaan konvektion aiheutuu siitä, että ilma lämmitessään kevenee ja pyrkii nousemaan gravitaatiokentässä ylöspäin.



Kuva 8.5: Lämmön siirtyminen putken seinämän läpi virtaukseen

## 8.5 Lämmönsiirto putkeen

Tarkastellaan sitten virtauksen mukana kulkevaa lämpöenergiaa. Virtauksen saa aikaan paine-ero. Tarkastellaan kuvan 8.3 putkivirtausta. Neste virtaa  $L$ :n mittaisen putken läpi. Halutaan tietää ulos tulevan virtauksen lämpötila  $T_{out}$ . Ensin täytyy selvittää virtauksen luonne, eli mitä  $Nu$ :n lauseketta voidaan käyttää. Sen jälkeen voidaan laskea lämpövirta putken läpi

$$h = Nu \frac{\lambda}{d}, \Phi_q = hA\Delta T$$

Valitettavasti  $\Delta T$  muuttuu koko ajan, kun putkessa virtaavan nesteen lämpötila muuttuu sen takia, että putken seinämän läpi virtaa lämpöä. Meidän täytyy tarkastella lämmön siirtymistä paikallisesti. Muodostamme lämpöenergiataseen kuvan tapauksessa:  $0 =$  lämpöä virtauksen mukana tarkastelutilavuuteen - lämpöä virtauksen mukana tarkastelutilavuudesta + lämpöä putken seinämän läpi nesteeseen eli

$$\frac{dE}{dt} = 0 = \Phi_{m e_{in}} - \Phi_{m e_{out}} + \Phi_q = \Phi_V \rho c T(x) - \Phi_V \rho c T(x+dx) + h \cdot \pi d \cdot dx \cdot (T_w - T(x))$$

Saadaan

$$\frac{T(x+dx) - T(x)}{dx} = \frac{dT}{dx} = \frac{h\pi d}{\Phi_V \rho c} (T_w - T)$$

Tämä differentiaaliyhtälö on muotoa  $dy/dx = kx$ , ja ratkaisu on

$$\frac{T_w - T(x)}{T_w - T_{in}} = \exp\left(-\frac{h\pi d}{\Phi_V \rho c} x\right)$$

Eksponentissa olevan lausekkeen käänteisluku  $(-\frac{h\pi d}{\Phi_V \rho c})^{-1}$  on suurin piirtein se matka, jonka kuluessa nesteen lämpötila  $T(x)$  tulee seinämien lämpötilaksi  $T_w$ .

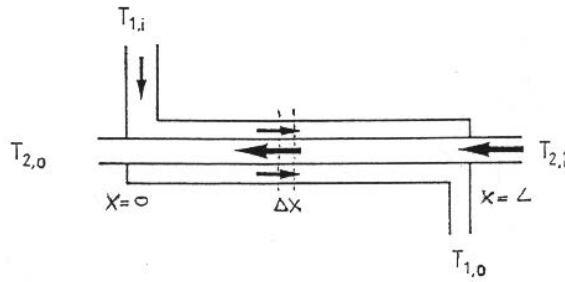
## 8.6 Lämmönvaihtimet

Putkivirtauksen tapauksessa johdettiin tulos

$$\frac{dT}{dx} = \frac{h\pi d}{\Phi_V \rho c} (T_w - T)$$

Nyt seinän lämpötila  $T_w$  ei ole vakio. Ajatellaan, että lämpöä siirtyy vain nesteestä toiseen, ei yhtään ympäristöön. Nesteiden välissä olevan seinämän lämmönjohtavuus on paljon isompi kuin rajakerrosten, joten seinämän vaikutus voidaan unohtaa. Merkitään vielä  $A = \pi dL =$  lämmönvaihtimen kokonaispinta-ala ja  $C_1 = \Phi_{v1} \rho_1 c_1$  (ja vastaavasti  $C_2$  toiselle nesteelle). Nesteiden lämpötiloille saadaan nyt edellisen yhtälön perusteella

$$\frac{DT_1}{dx} = \frac{hA}{C_1 L} (T_2 - T_1)$$



Kuva 8.6: Vastavirtalämmönvaihdin

$$\frac{DT_2}{dx} = \frac{hA}{C_2L}(T_1 - T_2)$$

Vähentämällä yhtälöt toisistaan saadaan taas muotoa  $dy/dx = kx$  oleva differentiaaliyhtälö (jossa  $y = T_2 - T_1$ ). Yhtälön ratkaisu on

$$\ln\left(\frac{T_{1o} - T_{2i}}{T_{1i} - T_{2o}}\right) = hA\left(-\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)$$

Mikä on lämmönvaihtimen teho, eli paljonko lämpöä virtaa nesteestä toiseen? Tarkastellaan lämpöenergiatasetta. Nesteen mukana kulkeva lämpövirta on  $\Phi_m e = \Phi_v \rho c T = CT$ . Lämpöä ilmeisesti tulee vaihtimeen yhtä paljon kuin poistuukin, joten kuvan 8.6 merkinnöillä

$$C_1 T_{1i} + C_2 T_{2i} = C_1 T_{1o} + C_2 T_{2o}.$$

Jonkinmoisella pyörittelyllä päädytään lopulta tulokseen

$$\Phi_q = C_1(T_{1i} - T_{1o}) = C_2(T_{2i} - T_{2o}) = hA(T_1 - T_2)_{ln},$$

jossa määriteltiin logaritminen lämpötilaero vastavirtalämmönvaihtimelle

$$(T_1 - T_2)_{ln} = \frac{(T_{1i} - T_{1o}) + (T_{2i} - T_{2o})}{\ln\left(\frac{T_{1i} - T_{2o}}{T_{1o} - T_{2i}}\right)}$$

sen takia, että lämpövirralle saadaan muodollisesti samanlainen lauseke kuin aiemminkin (eli  $\Phi = hA\Delta T$ ). Myötävirtauksessa logaritminen lämpötilaeron lauseke on

$$(T_1 - T_2)_{ln} = \frac{(T_{1o} - T_{1i}) + (T_{2i} - T_{2o})}{\ln\left(\frac{T_{1o} - T_{2o}}{T_{1i} - T_{2i}}\right)}$$

On helppo nähdä, että vastavirtalämmönvaihdin on tehokkaampi kuin myötävirtalämmönvaihdin. Vaihtimen teho on suoraan verrannollinen pinta-alaan  $A$  sekä virtauksen laadusta riippuvaan kertoimeen  $h$ . Kun tiedämme lämmönvaihtimen tehon ja osaamme suurin piirtein arvioida  $h$ :n, kaavoista voidaan laskea tarvittava  $A$ . Siinä se on koko lämmönvaihtimen idea. On hyvä huomata, että koska  $h$  kasvaa virtausnopeuden kasvaessa, kannattane käyttää pieniä putkia, jotta virtausnopeus kasvaa. Tosin silloin tarvitaan ehkä myös isompi paine-ero, eli pumppu täytyy ottaa optimointilaskelmiin mukaan. Voisi kuvitella, että vesihöyryn tiivistyminen pinnalle olisi tehokas keino siirtää lämpöä putkessa virtaavaan kylmään nesteeseen. Kineettinen kaasuteoria antaa keinon laskea ideaalisen lämpövirran tiheyden. Loncin (s. 137) antaa tulokseksi  $2,2 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2$ , joka on huikea luku, eikä siihen oikeissa laitteissa päästä. Kun höyry tiivistyy pinnalle, muodostuu vesikalvo, joka pikkuhiljaa valuu gravitaation vaikutuksesta seinää pitkin. Tämän vesikalvon läpi lämmön täytyy taas johtua putken seinään. Lisäksi jos vesihöyryssä on joukossa kuivaa ilmaa, tästä ilmasta muodostuu myös kerros putken lähistölle. Loncin (s. 138) antaa lämmönsiirtymiskertoimelle seuraavia arvoja:  $11000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  (puhdas höyry),

3400 (3 % ilmaa mukana), 1100 (6 % ilmaa) ja 6 W/(m<sup>2</sup> K) ilmalle. Jos lämpötilaero on 100 K, saadaan puhtaalle höyrylle lämpövirran tiheydeksi 10<sup>6</sup> W/m<sup>2</sup> eli sadasosa teoreettisesta arvosta. Tässä on selvästi paikka hyvälle ideolle. Myös lämmitettävän nesteen kiehuminen aiheuttaa ongelmia. Neste kiehuu kuuman seinän lähellä, jolloin seinälle muodostuu höyrykalvo. Puhutaan kalvokiehunnasta.

**Esimerkki.** Lasketaan yksinkertainen esimerkki, kuinka paljon lämmönvaihtimella voisi saada energiaa talteen kuivasta ilmasta. Ajatellaan, että rakenne on kuin auton jäähdyn, jolloin lämpötilaero on vakio. Lämmön siirto rajapinnalla noudattaa yhtälöä

$$q = h\Delta T \quad (8.17)$$

Tuulisissa olosuhteissa  $h$  on luokkaa 10 W/(mK). Jos lämpötilaero poistuvan ja sisään tulevan ilman välillä on 20 °C, saadaan energiaa siirretyksi poistuvasta ilmasta tulevaan ilmaan lämmönvaihtimen neliometriä kohti  $q=10 \cdot 20 \text{ W/m}^2=200 \text{ W/m}^2$ .

Jos halutaan 100 kW:n teho, tarvitaan siis  $100000/200=500 \text{ m}^2$ . Tuntuu isolta. Tehdään lämmönvaihdin 2cm:n rautaputkesta. Se johtaa lämpöä niin hyvin, ettei lämmönjohtumista seinässä tarvitse ottaa huomioon. Mikä on tarvittava putken pituus  $L$ ?

$$500 \text{ m}^2 = \pi \cdot 0,02 \text{ m} \cdot L$$

$L$  on siis 8000 m. Jos pätkitään putkia 1m·1m kokoiseen tilaan, kuinka pitkät putken pätkistä tulevat?  $1\text{m}=50 \cdot 0,02 \text{ m}$ , joten putkia on  $50 \cdot 50=2500$ , ja pituudeksi tulee  $8000\text{m}/2500=3\text{m}$ . Ei siis ihan tolkuttoman iso. Isoilla putkilla varmistetaan, että lämmönvaihdin ei tukkeudu tai ainakin sen voi puhdistaa.

Laskun voisi tehdä tietysti myös johdetuilla kaavoilla. Tulos ei oleellisesti muutu. Oleellinen tekijä on myös höyryn tiivistyminen vedeksi lämmönvaihtimen pinnoille. Merkittävä osa energiasta on latenttina lämpönä. Lasketaan vielä se. Opimme, että 100 kW:n lämmönvaihtimen pinta-ala on 5000 m<sup>2</sup>. Lasketaan nyt, paljonko vesihöyryä tiivistyy pinnoille ja paljonko siinä vapautuu energiaa. On hyvä huomata, että jos lämmönvaihtimen sijasta käytettäisiinkin lämpöpumppua, lämpötilaerot olisivat paljon isommat ja laitteen tehokkuus toista luokkaa. Aineen siirto rajapinnalla, jonka paksuus on  $\delta$ , noudattaa yhtälöä

$$q_m' = \frac{D}{\delta} \Delta c = k \Delta c.$$

$k$  on aineensiirtymiskerroin, joka vastaa lämmönjohtumisessa lämmönsiirtymiskerrointa  $h$ . Ilman tapauksessa pitoisuuden sijasta käytetään vesisisältöä  $x$ :

$$c(\text{kg/m}^3) = \rho_i(\text{kg/m}^3) \cdot x(\text{kg/kg})$$

Käytimme lämmönvaihdinlaskussa  $h$ :lle lukua 10 W/mK. Koska  $h=\lambda/dx$ , missä  $dx$  on sen ilmara-jakerroksen paksuus, jonka läpi lämpö johtuu ilmasta lämmönvaihtimeen niin  $dx=0,026/10 \text{ m}=3\text{mm}$ . Käytetään samaa paksuutta diffuusiolle. Niinpä  $k=D/dx=2 \cdot 10^{-5}/2 \cdot 10^{-3}=0,01 \text{ m/s}$ . Kun vielä oletetaan, että  $\Delta x$  on luokkaa 0,01 niin saadaan tiivistyvä vesivirta

$$q_m' = k \Delta c = k \cdot \rho_i \cdot \Delta x = 0,01 \cdot 1,2 \cdot 0,01 = 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}).$$

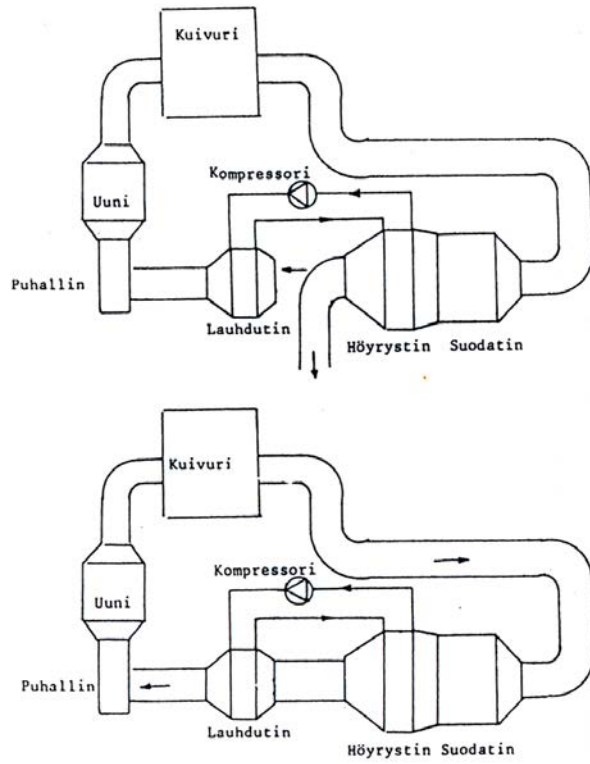
Kun tämä kerrotaan pinta-alalla 500 m<sup>2</sup>, saadaan 0,05 kg/s. Kun tämä kerrotaan höyrystymislämpöillä, saadaan lämmitystekoksi  $0,05 \cdot 2500 \text{ kW}=100 \text{ kW}$ . Vesihöyryn tiivistyessä saadaan siis talteen energia saman verran kuin ilmasta sitä jäähdyttämällä. Yhteensä lämmönvaihtimellamme saataisiin siis talteen 200 kW.

## 8.7 Ilmalämpöpumppu

Entä ilmapumppu? 1957 julkaistussa kokeessa (Agricultural Engineering, s. 592) saatiin keskimääräiseksi tulokseksi, että vesihöyrykilon poistaminen vaatii energian 1200 kJ. Muistamme, että höyrystymislämpö on luokkaa 2500 kJ/kg. Energian tarve siis puolittui. Mollierista nähdään, että energian tarve on luokkaa 4000 kJ. Kolme kertaa enemmän kuin lämpöpumppuversiossa...

Ilmalämpöpumppua kokeiltiin kuivauksessa VAKOLAssa ja parhaimmillaan sillä saatiin 70% energian säästö [Ahokas ja Koivisto 1983], kuva 8.7. Itse asiassa poistoilmassa on lähes sama lämpömäärä kuin kuivausilmassa. Lämpö on poistoilmassa sitoutunut höyrystettyyn veteen. Poistamalla vesi ja siirtämällä sen tiivistämisestä syntyvä lämpö takaisin kuivausilmaan tarvitsemme vain lämpöhäviöihin tarvittavan lisälämmön. Lämpöpumpun ongelmana suljetussa kierrossa on alhainen kuivauslämpötila.





Kuva 8.7: Lämpöpumppu kuivurissa, ylempi kuva avoin ilman kierto, alempi kuva suljettu ilman kierto.

Jos lämpöpumppua halutaan käyttää kuivauksessa, kuivurissa tarvitaan kuvan 8.7 ylemmän osan mukainen ratkaisu, jossa poistoilman lämpösisällöstä osa siirretään kuivuriuunin imuilman lämmitykseen.

## 8.8 Kuivausprosessin parantaminen

Kuivuminen ei pysy samana vaan kuivauksen edistyessä kosteuden irtoaminen jyvistä hidastuu. Kuivureita kuitenkin käytetään koko ajan samoilla säädöillä huolimatta siitä mikä kuivausvaihe on kyseessä. Myös kuivurin perussäädöllä tai uunikoon valinnalla vaikutetaan kuivauksen energian kulutukseen. Näitä asioita on tutkittu melko vähän. Nykyinen säätötekniikka on halventunut jatkuvasti ja kuivausprosessin jatkuva säätäminen alkaa olla teknisesti ja taloudellisestikin mahdollista.

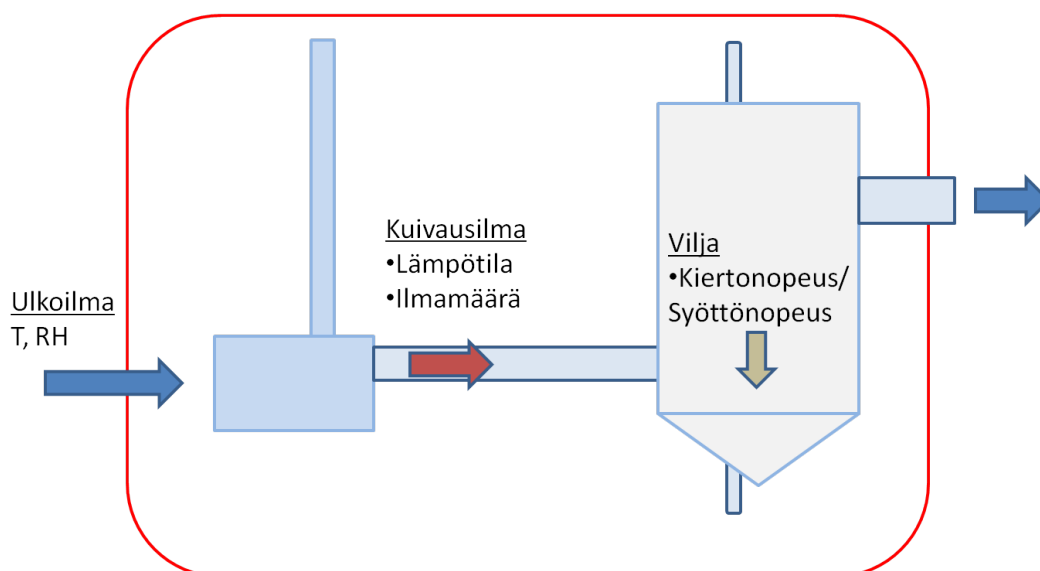
Kuvassa 8.8 on esitetty kaaviollisesti kuivauksen säätömahdollisuuksia. Ulkoilma vaihtelee ja sen seurauksena pitää muuttaa kuivuriuunin tehoa. Tämä tapahtuu nykyään joko öljypolttimen tai biopolttimen kautta. Kuivauslämpötila pidetään kuivauksen ajan samana. Sitä voitaisiin muuttaa sen mukaan halutaanko esimerkiksi rehu- vai siemenviljaa. Myös kuivauksen aikana voitaisiin muuttaa lämpötilaa sen mukaan mikä on viljan kosteus. Tämä vaatisi viljankosteusmittauksen joko suorasti tai epäsuorasti.

Kuivausilman määrää säädetään joissakin ratkaisuissa puhaltimen imuilmaa kuristamalla. Taajuusmuuttajien avulla voitaisiin tehdä laajempia ilmamäärän säätöjä. Tämä tarkoittaisi myös uunin tehon säätämistä, jotta kuivauslämpötila pysyisi haluttuna.

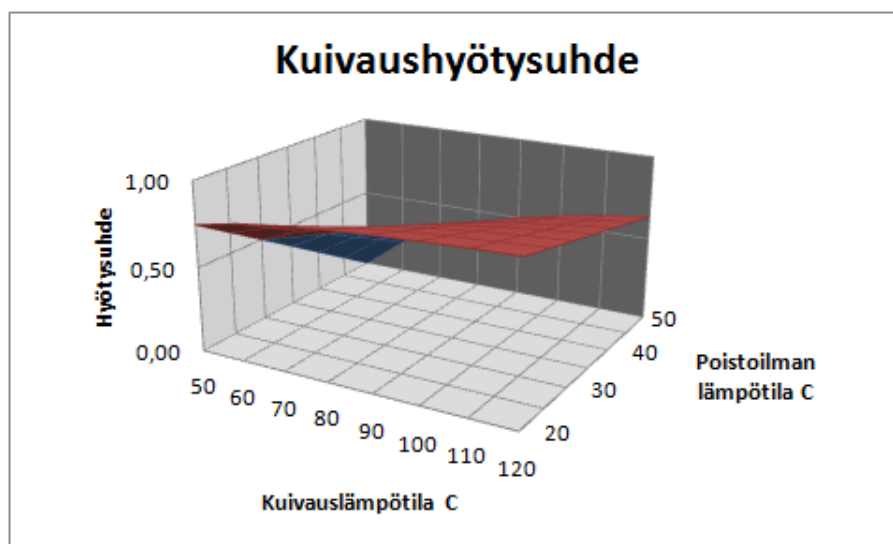
Eräkuivureissa viljan syöttönopeus on säädettävissä ja sillä voidaan vaikuttaa jyvien kuumassa ilmassa oloaikaan ja sitä kautta niiden lämpötilakestävyteen. Jatkuvatoimisissa kuivureissa viljan syöttönopeudella vaikutetaan viljan poistumiskosteuteen.

### 8.8.1 Kuivauslämpötila

Kuivauslämpötila parantaa kuivauskapasiteettia (kappale 5.4.5). Se myös parantaa kuivurin energia- tehokkuutta (kuva 5.7). Kuivauksen lämpötilahyötysuhde voidaan laskea yhtälön 5.13 mukaisesti. Kuvaa 8.9 on laskettu kuinka hyötysuhde muuttuu, kun kuivauslämpötila ja poistoilman lämpötila muuttuvat. Poistoilman lämpötila kohoaa kuivauksen edistyessä ja se heikentää hyötysuhdetta ja etenkin



Kuva 8.8: Kuivauksen säätömahdollisuuksia



Kuva 8.9: Kuivauksen lämpötilahyötysuhteen muutos kuivauslämpötilan ja poistoilman lämpötilan muuttuessa

silloin kun kuivausilman lämpötila on alhainen. Kuvasta on nähtävissä hyötysuhteen paraneminen kuivauslämpötilan noustessa. Kuivausilman kohottaminen lisää käytännössä kuivurin lämpöhäviöitä ja se voi heikentää kuivauslämpötilan vaikutusta etenkin eristämättömissä rakenteissa.

Suomi et al [Suomi et al 2003] tutkivat kuivausilman lämpötilan vaikutusta ja he päätyivät 16 - 30 % energiansäästöön, kun kuivauslämpötila oli tavanomaisen sijasta 119 C.

### 8.8.2 Ilmamäärä

Ilma siirtää kosteuden kuivurista pois. Jos ilmamäärä on liian pieni, kaikkea jyvistä haihtuvaa vettä ei keretä siirtämään. Jos ilmamäärä on liian suuri, lämpöä menee hukkaan, koska poistoilman lämpötila on korkea ja suhteellinen kosteus alhainen. Ilmamäärä vaikuttaa periaatteessa suoraan siihen kuinka nopeasti vesi kuivurista poistuu, yhtälö 5.8. Käytännössä oikeaa ilmamäärää on vaikea määrittää, koska se riippuu jyvien kosteuden luovutuskyvystä. Tähän taas vaikuttaa viljalaji, lämpötila ja jyvän kosteus. Uunien ilmamääriä voidaan säätää kuristamalla virtausta. Jos uunin teho ei muutu, tämä tarkoittaa korkeampaa kuivausilman lämpötilaa.

Kuivurin uunia valittaessa samaan kennostoon voidaan valita useita erikokoisia uuneja. Niissä suurin

uuni antaa suurimman veden poistonopeuden ja kapasiteetin. Kuvassa 5.8 on koetulos ilmamäärän vaikutuksesta kuivumisnopeuteen ja energian kulutukseen. Suurempi ilmamäärä on tässä kokeessa selvästi lisännyt kuivauksen loppuvaiheen energian kulutusta. Tämä johtuu siitä, että jyvät eivät enää pysty samalla nopeudella luovuttamaan vettä kuivauksen loppuvaiheessa ja ilman suhteellinen kosteus kasvaa. Tämä tarkoittaa kuumempaa poistolämpötilaa ja suurempaa lämpöhukkaa.

### 8.8.3 Kiertonopeus

Kuvasta 5.9 on nähtävissä viljan kiertonopeuden vaikutusta energian kulutukseen. Tässä kokeessa suurin ja pienin nopeus olivat energiataloudellisesti hieman huonompia kuin 1,5 - 2 tuntia kestänyt nopeus. Suurta kiertonopeutta tarvitaan käytettäessä korkeaa kuivauslämpötilaa. Tällöin viljan vaurioitumisriski vähenee. Kuivauksen jaksotuksen siten, että jyvät saavat jonkin aikaa olla pois kuivauksesta, on todettu vähentävän energian kulutusta. Voitaneen arvioida, että tämä on voinut olla yhtenä syynä alenuneeseen energian tarpeeseen. Jos viljan kiertoaika on hyvin pitkä, silloin varastosiilon lämpöhäviöt voivat jälleen lähteä lisäämään energian tarvetta viljan keretessä jäähtymään.

### 8.8.4 Ulkoilman lämpötilan ja kosteuden vaikutus

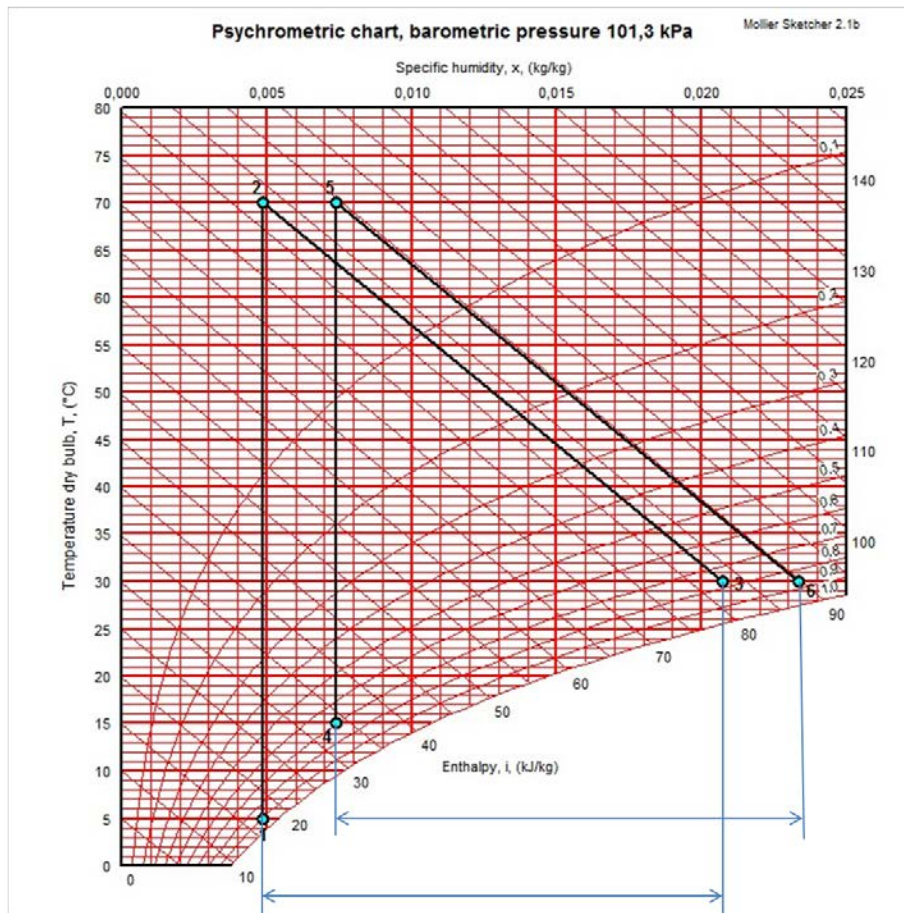
Kuivuriuunin imemän ilman lämpötila ja kosteus vaikuttavat energian kulutukseen. Kuvassa 8.10 on esimerkki siitä, miten ulkoilman tila vaikuttaa kuivaukseen. Kuivuriuunin ilmamäärä on 20000 m<sup>3</sup>/h. Pisteessä 1 ulkoilman lämpötila on 5 °C ja suhteellinen kosteus on 90 %. Tämä lämmitetään 70 °C lämpötilaan, jolloin tarvitaan 440 kW teho. Jos poistoilman tila on pisteessä 3, siinä on vettä n 21 g jokaista kuivaa vesikiloa kohden. Imuilmassa on vettä n 5 g eli ilma sitoo itseensä viljasta vettä 16 g. Pisteessä 4 ulkoilman lämpötila on 15 °C, suhteellinen kosteus on 70% ja kosteussuhde on n 7 g vettä kuivassa ilmakilossa. Tämän ilman lämmittäminen 70 °C lämpötilaan tarvitsee 380 kW tehon eli säästetään n 14 % tehossa ja energiassa. Poistoilman tila on pisteessä 6 ja siinä kosteussuhde on n 23 g ja ilma sitoo kosteutta saman verran vettä, 16 g kuten edellisessäkin tapauksessa. Tämä esimerkki voisi kuvata syksyisen yö- ja päiväkuivauksen eroja.

Sama asia nähdään yksinkertaisemmin yhtälöstä 6.1. Siinä uunin tehon muuttujana on lämpötilaero ja tehon sekä energian tarve kasvaa suoraan tarvittavan lämpötilaeron suhteessa.

Jatketaan tarkastelua imuilman kosteuden vaikutuksesta, kuva 8.11 Siinä on kaksi samanlämpöistä päivää, mutta pisteen 1 suhteellinen kosteus on 60% (poutapäivä) ja pisteen 4 95 % (sadepäivä). Ilman lämmittämiseen tarvitaan sama teho. Katsotaan mikä on tapauksen 1-3 veden poistuminen. Poistoilmassa on vettä n 20 g (piste 3) ja imuilmassa n 5 g, erotus on 15 g. Tapauksessa 4 - 6 poistoilmassa on vettä n 23 g (piste 6) ja imuilmassa n 7 g, erotus on 16 g eli lähes sama kuin poutapäivänä. Etenkin silloin kun ulkoilma on kylmää, sen kosteuden vaikutus kuivauksen energian tarpeeseen on pieni. Tämä pätee tietenkin vain lämminilmakuivuriin. Kylmäilmakuivurissa ilman kosteus vaikuttaa suoraan siihen mihin jyvien kosteus asettuu. Jotta saataisiin säilyvää tavaraa, ilman kosteuden pitäisi olla alle 60%.

### 8.8.5 Prosessin säätäminen kuivauksen edistymisen mukaisesti

Kuivauksen loppuvaiheessa jyvien kosteuden poistumisnopeus hidastuu ja sen seurauksena kuivurin poistoilman suhteellinen kosteus alenee, lämpötila kohoaa ja energiatehokkuus heikkenee. Energiategohokkuutta voitaisiin parantaa vähentämällä kuivurin ilmamäärää. Peltola teki tämän selvittämiseksi kokeita, joissa hän käytti erilaisia säätöstrategioita [Peltola]. Kuvassa 8.12 esitetty koetulos, kuivauksen loppuvaiheessa energian kulutus on ollut pienentyneen ilmamäärä ansiosta alhaisempi kuin normaalissa jatkuvasti samaa ilmamäärää käyttävässä kokeessa. Peltola ei anna koko erän energiansäästölukua, kuvasta voidaan lukea, että esim. 15 % viljan kosteuden kohdalla ilmamäärä vähentäminen on vähentänyt energian kulutusta n 16%.



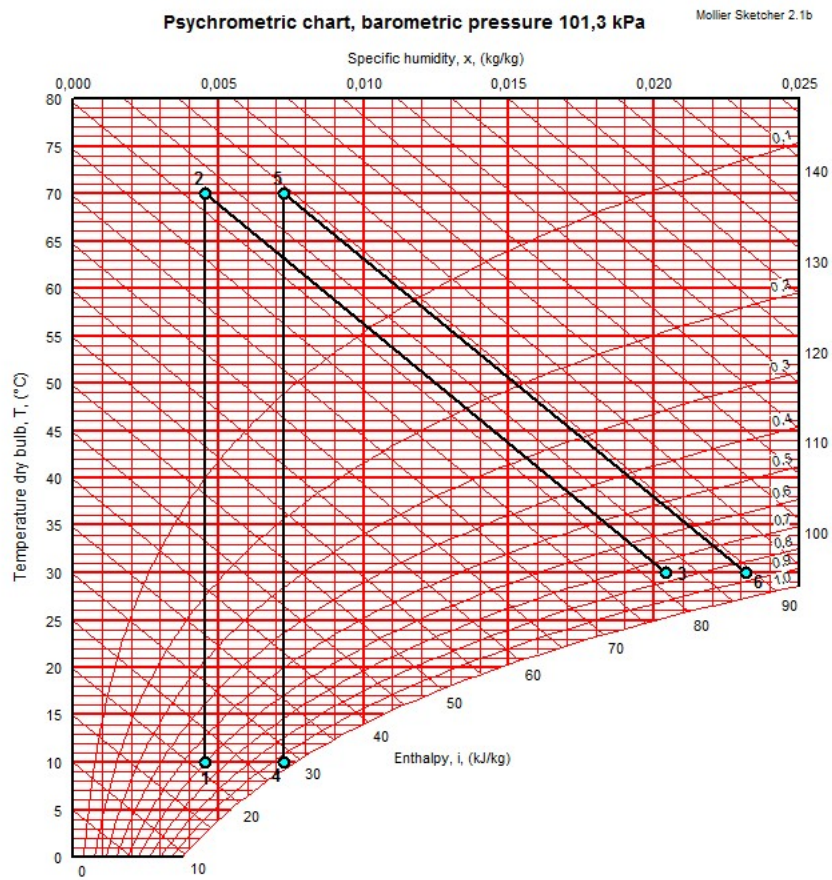
Kuva 8.10: Esimerkki ulkoilman vaikutuksesta kuivausprosessiin

## 8.9 Kotimainen polttoaine

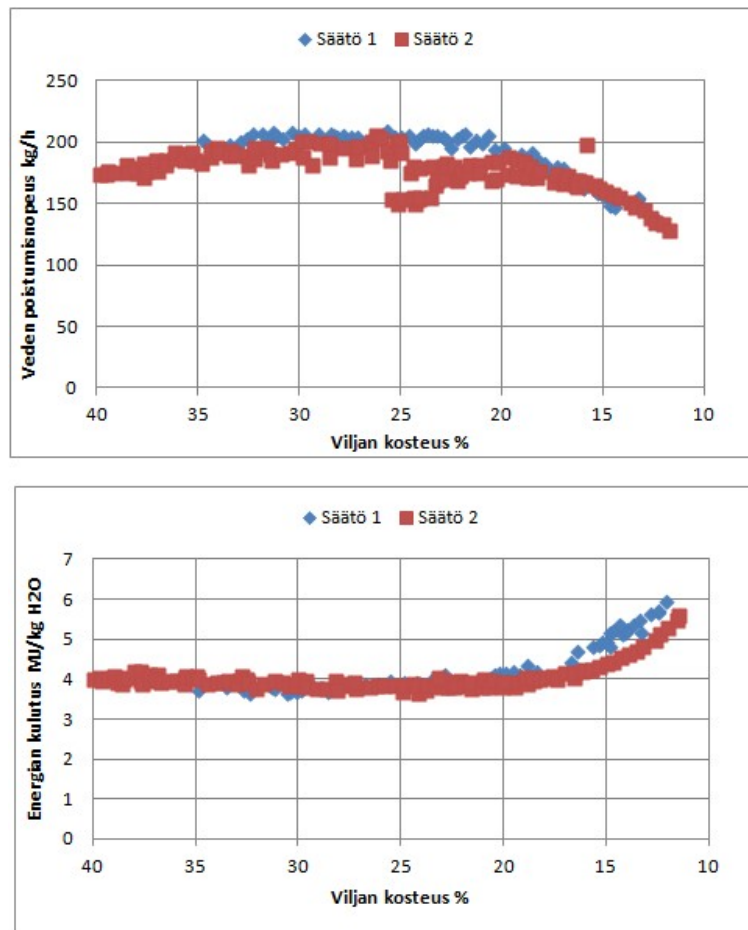
Siirtyminen kotimaiseen polttoaineeseen (hake, turve) ei sinänsä paranna kuivurin energiataloutta, vaan siinä siirrytään fossiilisesta polttoaineesta uusiutuvaan. Turpeen osalta kylläkin kiistellään sen uusiutuvuudesta ja se halutaan usein laskea myös fossiiliseksi. Öljy ja kaasu ovat homogeenisiä polttoaineita, kun taas hake ja turve ovat heterogeenisiä. Usein näiden polttaminen ei tapahdu yhtä täydellisesti ja hyötysuhteet ovat hieman alempia.

Kotimaisiin polttoaineisiin siirtyminen tarkoittaa uuden uunin hankkimista ja polttoainevaraston tekoa. Palamisessa syntyy myös tuhkaa, puussa sitä on alle 1 %, mutta turpeessa sitä voi olla jopa 6 -7 %. Tuhka vaatii usein automaattiset poistolaitteet. Kattilan uusiminen ja polttoainevarastot ja syöttölaitteet vaativat investointeja ja tämän takia tarvitaan taloudellisia laskelmia muutoksen kannattavuudesta.

Kotimaisen polttoaineen käytöstä viljankuivauksessa löytyy tietoa esimerkiksi Koskiniemen toimitamasta oppaasta [1].



Kuva 8.11: Esimerkki ulkoilman kosteuden vaikutuksesta kuivausprosessiin



Kuva 8.12: Kuivauksen säädön vaikutus veden poistumisnopeuteen (ylempi kuva) ja kuivauksen energian kulutukseen (alempi kuva). Säätö 1 = ei säätöä, säätö 2 = ilmamäärän pienentäminen kuivauksen lopussa.

# Kirjallisuutta

- [Ahokas ja Koivisto 1983] Ahokas J. ja Koivisto K. Energiansäästö viljankuivauksessa. Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos. Tutkimusselostus No 31, 1983.
- [Peltola] Peltola A., Viljaa kierrättävän lämminilmakuivurin säädöt. Työtehoseuran julkaisuja 355, Helsinki 1997
- [Piltti 1979] Piltti M., Energian tarpeen vähentämisestä ja kotimaisen energian käytöstä viljan kuivauksessa. Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos, Tutkimusselostus 19, 1979.
- [Suomi et al 2003] . Viljan korjuu ja varastointi laajenevalla viljatilalla. Maa- ja elintarvike 31.
- [1] Koskiniemi E. (toim). Viljankuivaus kotimaisella polttoaineella - opas. <http://www.puulakeus.net/docs/109-Ne6-viljankuivausopas.pdf>