



VAKOLA

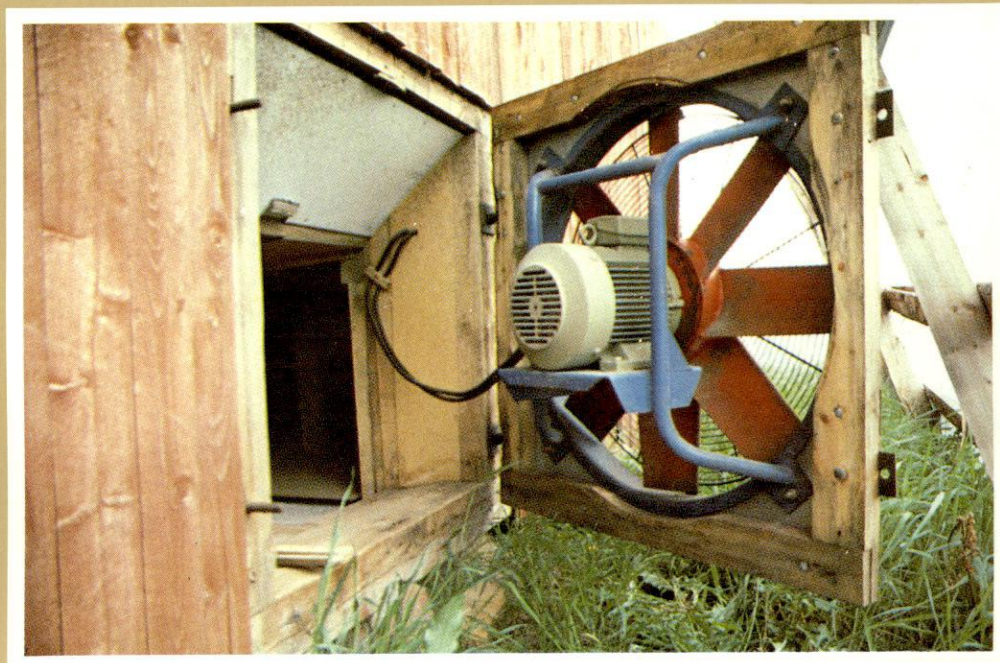
JUHA SARIOLA LAURI TUUNANEN

JARMO PAAVOLA JUKKA AHOKAS



KYLMÄILMAKUIVURIN MITOITUS JA KÄYTTÖ

DIMENSIONING AND USE OF NEAR-AMBIENT DRIER



TUTKIMUSSELOSTUS 57

VIHTI 1990



VAKOLA

VALTION MAATALOUSTEKNOLOGIAN TUTKIMUSLAITOS
STATE RESEARCH INSTITUTE OF ENGINEERING IN AGRICULTURE AND FORESTRY

Osoite: PPA 1, 03400 VIHTI

Puhelin: (90) 224 6211

Telefax: (90) 224 6210

JUHA SARIOLA LAURI TUUNANEN

JARMO PAAVOLA JUKKA AHOKAS

KYLMÄILMAKUIVURIN MITOITUS JA KÄYTTÖ

DIMENSIONING AND USE OF NEAR-AMBIENT DRIER

TUTKIMUSSELOSTUS 57

VIHTI 1990

Julkaisija (nimi ja osoite)
Valtion maatalousteknologian
tutkimuslaitos (VAKOLA)
PPA 1
03400 VIHTI

Julkaisun sarjan nimi ja tunnus

Vakolan tutkimusselostus n:o 57

Julkaisu-aika
10.4.1990

Tekijä(t) Sariola Juha Tuunanen Lauri Paavola Jarmo Ahokas Jukka		Tutkimuksen nimi ja KTM:n tunnusnumero Kylmäilmakuivauksen tehostaminen 126/881/85	
		Toimeksiantaja(t) Kauppa- ja teollisuusministeriö	
Julkaisun nimi ke Kylmäilmakuivurin mitoitus ja käyttö Dimensionering och användning av kallufttork			
Tiivistelmä (noin 25 riviä, enintään 2 000 merkkiä) <p>Tutkimuksessa selvitettiin tekijöitä, jotka vaikuttavat viljan kuivumiseen kylmäilmakuivurissa. Näiden tekijöiden pohjalta on esitetty erilaisia kylmäilmakuivurin mitoitusvaihtoehtoja sekä käyttöstrategioita. Näihin liittyen tutkittiin myös lisälämmön käyttöä kuivauksessa, kuivauspuhaltimeen automaattisia ohjauslaitteita sekä kylmäilmakuivurin sopivuutta lämminilmakuivurin puskurikuivuriksi.</p> <p>50 cm:n paksuinen viljakerros aiheutti 550 m³/hm² ja 700 m³/hm² ilmamäärillä keskimäärin 310 Pa:n ja 483 Pa:n vastapaineet. Kerrospaksuuden kasvattaminen 0,5 metristä 1,5 metriin lisäsi vastapainetta edellä mainittuja ilmamääriä käytettäessä keskimäärin 620 Pa/m ja 923 Pa/m. Mittausten mukaan ilmamäärällä ja vastapaineella on alueella 450-700 m³/hm² yhtälön $p = a\dot{V}^2 + b\dot{V} + c$ mukainen riippuvuus. Yhtälössä p = viljakerroksen vastapaine (Pa), \dot{V} = ilmamäärä laarineliötä kohti tunnissa (m³/hm²) ja a,b,c vakiokertoimia, joiden arvot vaihtelevat kerrospaksuuden ja viljalajin mukaan. Vesipitoisuudeltaan 30 %:n viljan aiheuttama vastapaine ei poikennut merkittävästi noin 20 %:n viljan aiheuttamasta vastapaineesta. Varastokuivan (14 %) viljan aiheuttama vastapaine oli kaikilla viljalajeilla selvästi suurempi kuin kostealla viljalla. Esipuhdistetun viljan aiheuttama vastapaine oli noin 100 Pa pienempi kuin esipuhdistamattoman viljan. Lajittelulla esipuhdistuksen jälkeen ei ollut merkittävää vaikutusta vastapaineeseen.</p> <p>Kokeiden perusteella kuivumisaika puolittuu käytettäessä 5 °C lisälämpöä. Lisäksi päästään helposti 14-15 %:n loppukosteuteen. Kun lämmönlisäys on yli 10 °C, pohja- ja pintakerroksen kosteusero jää liian suureksi. Käytettäessä 750 m³/hm² ilmamäärää veden haihtumisnopeus oli kaksinkertainen 325 m³/hm² ilmamäärään verrattuna. Myös kuivumisvyöhykkeen nousunopeus oli suuremmalla ilmamäärällä nelinkertainen pienempään verrattuna. Puhaltimet kannattaa mieluummin mitoittaa liian suuriksi kuin liian pieniksi. Alle 550 m³/hm² ilmamäärää ei tulisi käyttää. Suuri ilmamäärä on kuivauksen kannalta edullista. Jos viljan vesipitoisuus on suurempi kuin 30 %, saa viljakerros olla korkeintaan 40 cm paksu.</p>			
Avainsanat (asiasanat suomeksi ja englanniksi) Viljan kuivaus, kylmäilmakuivaus, kylmäilmakuivuri grain drying, near-ambient drying, near-ambient drier		Luokitus ja/tai indeksointi (KTM:n energiatutkimusrekisterin luokka) 133	
ISSN ja avainnimeke 0782-0054		ISBN	
Kokonaissivumäärä 90 + liitteet	Kieli suomi, tiiv. engl., ruotsi	Hinta 25 mk	Luottamuksellisuus julkinen
Jakaja (nimi ja osoite) VAKOLA PPA 1 03400 VIHTI		Lisätietoja	

State Research Institute of Engineering
in Agriculture and Forestry (VAKOLA)

PPA 1

03400 VIHTI

Study report n:o 57

Date

10.4.1990

Authors Sariola Juha Tuunanen Lauri Paavola Jarmo Ahokas Jukka		Name of project and number (KTM) Making near-ambient drying more effective 126/881/85
		Commissioned by Ministry of Trade and Industry
Title Dimensioning and use of near-ambient drier		
Abstract <p>Factors affecting near-ambient drying of grain were examined and the results were used to determine drier size and drying strategies including use of supplemental heat and possibilities of combined use of near-ambient drier and heated-air drier. A test of devices for automatic control of drier fans was also part of the study.</p> <p>At 550 m³/hm² and 700 m³/hm² airflow and 0,5 m bed depth static pressure averaged 310 Pa and 483 Pa respectively. As bed depth was increased from 0,5 m to 1,5 m, the static pressure increased by 620 Pa/m and 923 Pa/m respectively. The relationship between airflow ratio and static pressure was found to agree with the equation $p = a\dot{V}^2 + b\dot{V} + c$ when airflow was between 450 and 700 m³/hm². p = static pressure (Pa), \dot{V} = airflow per hour and floor area (m³/hm²) and a,b,c constants which depend on bed depth and kind of cereal. There was no significant difference in static pressure between grain with initially 20 % m.c. and 30 % m.c. Dry (14 %) grain, however, required 100 - 250 Pa higher static pressure than wet (20 % and 30 %) grain. The static pressure decreased by 100 Pa after the grain was pre-cleaned. Cleaning after pre-cleaning did not significantly reduce static pressure.</p> <p>When 5 °C supplemental heat was applied, drying time was reduced by half and 14-15 % target m.c. was easily reached. When the air was heated more than 10 °C, the difference in m.c. between the bottom and top layer of the grain became too wide. When the airflow was increased from 325 m³/hm² to 750 m³/hm², evaporation rate was doubled and the drying zone reached the top layer in just one fourth of the time required with 325 m³/hm² airflow. Airflow rate seemed to have a greater effect on the advance of the drying zone up through the bed than temperature and relative humidity. The fans should be dimensioned to produce at least 550 m³/hm² airflow. Too large fans are better than too small ones because high airflow rate is advantageous for the drying process. If the initial m.c. is over 30 %, the maximum bed depth is 40 cm.</p>		
Key words grain drying, near-ambient drying, near-ambient drier		Classification 133
ISSN and series title 0782-0054		ISBN
Pages 90 + appendices	Language finnish, su: engl.,swe.	Price 25 FMK
Sold by (name and address) VAKOLA PPA 1 03400 VIHTI		Note

SISÄLLYSLUETTELO

Alkusanat	11
Tiivistelmä	13
Sammanfattning	16
Summary	19
1. Yleistä	23
1.1. Viljan vesipitoisuus	24
1.2. Kuivauksen perusteet	25
1.2.1. Kuivauksen teoriaa	27
1.2.2. Kuivauksen simulointi	28
1.2.3. Kuivuminen todellisessa kuivurissa	30
2. Viljan kuivumiseen kylmäilmakuivurissa vaikuttavat tekijät	32
2.1. Kuivausilman virtausvastus	35
2.1.1. Viljan kerrospaksuuden vaikutus	34
2.1.2. Ilmamäärän vaikutus	35
2.1.3. Viljan vesipitoisuuden vaikutus	37
2.1.4. Roskaisuuden vaikutus	37
2.2. Viljan kuivumisnopeus	39
2.2.1. Koejärjestelyt	39
2.2.1.1. Mittauslaitteet	39
2.2.1.2. Mittaukset	40
2.2.2. Huomioita koekuivurin toiminnasta	41
2.2.3. Kuivumisnopeus koekuivurissa	42
2.2.4. Kuivumisvyöhykkeen nousunopeus	42
2.2.5. Kuivausilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaikutus kuivaustulokseen	46
2.2.6. Ilmamäärän vaikutus kuivaustulokseen	47
3. Kylmäilmakuivurin mitoitus ja apulaitteet	49
3.1. Lisälämpö kylmäilmakuivauksessa	48
3.2. Automaattiset ohjauslaitteet	50
3.2.1. Kuivausilmapuhaltimien käyntiaikojen valinta	50
3.2.2. Puhaltimien ohjaustavat	50
3.2.2.1. Hygrostaattiohjaus	50
3.2.2.2. Suhteellisen kosteuden eroon perustuva ohjaus	51
3.2.2.3. Lämpötilaeroon perustuva ohjaus	52
3.2.2.4. Absoluuttiseen kosteuteen perustuva ohjaus	53
3.2.3. Automaattisten ohjauslaitteiden koetus	53
3.2.3.1. Laitteiden toimintaperiaatteet	53
3.2.3.2. Ohjauslaitteiden toimintaperiaatteiden vertailut	55
3.2.4. Automaattiselle ohjauslaitteelle asetettavat vaatimukset	55
3.2.5. Automaattiohjauksen edut	56
3.3. Kylmäilmakuivurin mitoitus	57
3.3.1. Tarvittava laariala	57
3.3.2. Rakennuksen vaikutus mitoitukseen	58
3.3.3. Puhaltimen ja muiden tekijöiden vaikutus mitoitukseen	59

4.	Kylmäilmakuivuri lämminilmakuivurin puskurina	59
4.1.	Puskurikuivuri	60
4.2.	Puskurikuivurityypit	60
4.2.1.	Perinteinen kylmäilmakuivuri	61
4.2.2.	Korkeat varastokuivurit	63
4.2.3.	Pystykuivuri	65
4.2.4.	Tuuletettavat siilot	66
4.2.5.	Siirrettävät kuivurit	67
4.3.	Lämminilmakuivurin hukka- lämmön hyödyntäminen kylmäilma- kuivurin lisälämpönä	69
4.3.1.	Lämmönsiirtimelle asetettavat vaatimukset	70
4.3.2.	Kokeet omatekoisella lämmönsiirtimellä	70
4.3.2.1.	Mittaustulokset	72
4.3.2.2.	Johtopäätöksiä	73
5.	Pystykuivuri	74
5.1.	Pystykuivurin rakenne ja toimintaperiaate	74
5.2.	Koekuiluri	76
5.2.1.	Koekuilurin rakenne	76
5.2.2.	Syksyllä 1987 tehdyt mittaukset ja tulokset	77
5.2.3.	Syksyllä 1988 tehdyt pystykuivurikokeet	79
6.	Kylmäilmakuivurin käyttöstrategia	79
6.1.	Yleistä	79
6.2.	Kuivausstrategiaan vaikuttavat tekijät	80
6.2.1.	Kuivurin laariala suuri suhteessa kuivattavaan viljamää- rään	80
6.2.2.	Kaikki vilja samanlaista	81
6.2.3.	Kuivataan monenlaista viljaa	81
6.2.4.	Kuivurin laariala pieni suhteessa kuivattavaan viljamää- rään	81
6.3.	Lisälämmön käyttöstrategia	82
6.3.1.	Lisälämmön määrä ja käyttö	82
6.3.2.	Lisälämmön energiatalous ja kuivumisnopeus	83
6.4.	Viljan kuivumisnopeus eri tilanteissa	86
	Kirjallisuusluettelo	89

Liitteet

ALKULAUSE

Vuonna 1986 käynnistyi VAKOLAssa kauppaja teollisuusministeriön rahoittama tutkimus "Esiselvitys kylmäilmakuivauksen tehostamismahdollisuuksista", joka myöhemmin jatkui nimellä "Kylmäilmakuivauksen tehostaminen".

Tutkimuksen tehtävänä on ollut selvittää kylmäilmakuivurin mitoittamiseen liittyviä suureita ja kuivauksen energiataloutta. Kuivauskokeita tehtiin koekuivureilla, jotka olivat jonkin verran normaalikokoista kuivuria pienempiä. Tutkimukseen liittyvät kuivauskokeet on tehty VAKOLAssa vuosien 1986-88 aikana.

Vuonna 1986, jolloin tutkittiin ilmamääriä, vastapaineita, automaattisten ohjauslaitteiden toimintaa, kuivaustapahtumaa ja kuivauksen energiataloutta työhön osallistuvat Lauri Tuunanen ja Jarmo Paavola. Vuosina 1987-1989 tutkittiin kuivaustapahtumaa, lisälämmön vaikutusta kuivaustapahtumaan sekä erilaisia kuivuriratkaisuja. Tutkijoina olivat Lauri Tuunanen ja Juha Sariola, joka on pääosin myös kirjoittanut tutkimusraportin. Jukka Ahokas on ohjannut tutkimusta ja laatinut mittauksissa käytetyt tietokoneohjelmistot.

Tutkimusta ohjaamassa on ollut valvojaryhmä, johon on kuulunut KTM:n edustajina Mikko Ylhäisi ja Martti Korkiakoski, Helsingin yliopiston maatalousteknologian laitokselta prof. Aarne Pehkonen, Työtehoseurasta Antti Peltola, Maatalouskeskusten liitosta Pertti Savela ja Jaakko-tehtailta Auvo Kaukonen, Esa Manninen ja Timo Juhola. Lisäksi tutkimuksella oli asiantuntijaryhmä johon kuului prof. Pehkonen, Markku Järvenpää Työtehoseurasta ja Esa Manninen.

Tutkimukseen osallistui komponenttitoimittajina Jaakko-Tehtaat Oy, Maa-miehen Sähkö Oy, T. Tuomi Ky, Reikälevy Oy, Ovitor Oy, Oy Trancels Ab ja Neste Oy. Santeri Muhonen ja Henri Stoor Neste Oy:stä ovat auttaneet sopivien yhteistyökumppanien hankinnassa. Lisäksi saatiin käytännön tietoja

Pentti ja Kaarina Sutelan sekä Markku Lietzenin kylmäilmakuivureiden toiminnasta.

Osana tutkimuksen raportointia on ilmestynyt Kylmäilmakuivurien automaattisten ohjauslaitteiden koetusselostus nro 1253. Lisäksi aiheesta on julkaistu kirjoituksia muun muassa Koneviesti -lehdessä.

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa selvitettiin tekijöitä, jotka vaikuttavat viljan kuivumiseen kylmäilmakuivurissa. Näiden tekijöiden pohjalta on esitetty erilaisia kylmäilmakuivurin mitoitusvaihtoehtoja sekä käyttöstrategioita. Näihin liittyen tutkittiin myös lisälämmön käyttöä kuivauksessa, kuivauspuhaltimen automaattisia ohjauslaitteita sekä kylmäilmakuivurin sopivuutta lämminilmakuivurin puskurikuivuriksi.

Viljan kuivumiseen kylmäilmakuivurissa vaikuttavat mm. kuivausilman määrä, sen lämpötila ja suhteellinen kosteus, viljan kerrospaksuus, viljan vesipitoisuus sekä viljan roskaisuus.

Kerrospaksuuden vaikutusta vastapaineeseen tutkittiin laarikuivurissa kahta ilmamäärää ja kolmea viljalajia käyttäen. 50 cm:n paksuinen viljakerros aiheutti 550 m³/hm² ja 700 m³/hm² ilmamäärillä keskimäärin 310 Pa:n ja 483 Pa:n vastapaineet. Kerrospaksuuden kasvattaminen 0,5 metristä 1,5 metriin lisäsi vastapainetta em. ilmamääriä käytettäessä keskimäärin 620 Pa/m ja 923 Pa/m. Tämä merkitsee sitä, että käytettäessä tavallisia maatalouskäyttöön tarkoitettuja potkuripuhaltimia kerrospaksuuden tulee olla 0,5 - 1,0 m silloin kun halutaan päästä vähintään nykyisten suositusten mukaiseen ilmamäärään 550 m³/hm².

Ilmamäärän vaikutusta vastapaineeseen mitattiin 0,7 m:n ja 1,5 m:n kerrospaksuutta käyttäen. Mittausten mukaan ilmamäärällä ja vastapaineella on alueella 450-700 m³/hm² yhtälön $p = a\dot{V}^2 + b\dot{V} + c$ mukainen riippuvuus. Yhtälössä p = viljakerroksen vastapaine (Pa), \dot{V} = ilmamäärä laarineliötä kohti tunnissa (m³/hm²) ja a,b,c vakiokertoimia, joiden arvot vaihtelevat kerrospaksuuden ja viljalajin mukaan.

Viljan vesipitoisuuden vaikutusta vastapaineeseen tutkittiin mittaamalla eri viljalajien vastapaine kolmella vesipitoisuustasolla, joista yksi oli varastokuiva vilja ja kaksi muuta kuivauksen alku tai keskivaihetta vastaavia vesipitoisuuksia. Käytetyt vesipitoisuudet olivat 14 %, 20 % ja 30 %. Vesipitoisuudeltaan 30 %:n viljan aiheuttama vastapaine ei poikennut merkittävästi noin 20 %:n viljan aiheuttamasta vastapaineesta. Varastokuivan (14 %) viljan aiheuttama vastapaine oli kaikilla viljalajeilla selvästi suurempi kuin kostealla viljalla. Varastokuivan viljan vastapaine oli 100-250 Pa suurempi ilmamäärän

ollessa $550 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ja ilmamäärällä $700 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ $150\text{-}300 \text{ Pa}$ suurempi kuin vesipitoisuuden ollessa $20\text{-}30 \%$. Todellisessa kuivaustilanteessa kuivurissa vastapaine yleensä pienenee viljan kuivuessa. Tämä johtuu lähinnä jyvien tilavuuden pienenemisestä ja viljakerroksen ohenemisesta kuivumisen aikana. Viljan vesipitoisuus vaikuttaa vastapaineeseen eniten siten, että se suurentaa viljan kuorettumisriskiä.

Roskaisuuden vaikutusta vastapaineeseen tutkittaessa käytettiin $0,7 \text{ m:n}$ ja $2,0 \text{ m:n}$ kerrospaksuuksia. Koesarjan tulosten mukaan esipuhdistetun viljan aiheuttama vastapaine oli noin 100 Pa pienempi kuin esipuhdistamattoman viljan. Lajittelulla esipuhdistuksen jälkeen ei ollut merkittävää vaikutusta vastapaineeseen.

Kuivausilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja ilmamäärän vaikutusta kuivaustulokseen sekä kuivumisvyöhykkeen nousunopeutta pyrittiin selvittämään tekemällä koesarja vakio-oloissa ainostaan yhtä tekijää kerrallaan muuttaen. Kokeet tehtiin keinokostutetulla ohralla. Kokeiden perusteella kuivumisaika puolittuu käytettäessä $5 \text{ }^\circ\text{C}$ lisälämpöä. Lisäksi päästään helposti $14\text{-}15 \%$:n loppukosteuteen. Kun lämmönlisäys on yli $10 \text{ }^\circ\text{C}$, pohja- ja pinta-kerroksen kosteusero jää liian suureksi. Lisälämpö lyhentää kuivausaikaa lähinnä siksi, että ilman suhteellinen kosteus pienenee. Lämpötilan nousulla sinänsä ei ole niin suurta merkitystä. Käytettäessä $750 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ilmamäärää veden haihtumisnopeus oli kaksinkertainen $325 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ilmamäärään verrattuna. Myös kuivumisvyöhykkeen nousunopeus oli suuremmalla ilmamäärällä nelinkertainen pienempään verrattuna. Ilmamäärä näyttääkin vaikuttavan kuivausilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta enemmän kuivausvyöhykkeen nousunopeuteen. Kokeiden perusteella näyttää siltä, että puhaltimet kannattaa mieluummin mitoittaa liian suuriksi kuin liian pieniksi. Alle $550 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ilmamäärää ei tulisi käyttää. Suuri ilmamäärä on kuivauksen kannalta edullista. Jos viljan vesipitoisuus on suurempi kuin 30% , saa viljakerros olla korkeintaan 40 cm paksu. Tällöinkin viljakerroksen pinnalle muodostuu usein kostea, kova kuori. Kuori on heti rikottava viljaa sekoittamalla.

Varastokuivurin tilavuus määritetään viljapinta-alan ja hehtaarisadon mukaan. Jos hehtaarisato on $3500 - 4000 \text{ kg}$, tilaa tarvitaan noin $6,5 \text{ m}^3/\text{ha}$. Hyvä kerrospaksuuden mitoitusarvo on 1 m . Jos tilan koko viljasadon on mahdollista kuivuriin, kuivurin laariala (m^2) on siis $6,5 (\text{m}^2/\text{ha})$ kertaa viljapinta-ala (ha). Jos viljellään eri aikaan tuleentuvia viljalajikkeita laarialaa voidaan

pienentää, koska vilja voidaan kuivata useassa erässä. Kahdessa tai kolmessa samansuuruisessa erässä kuivattaessa voidaan käyttää mitoitusta: laari-ala (m²) = 2,5...4,5 (m²/ha) * viljapinta-ala (ha). Pienemmän pään mitoitusta voidaan soveltaa lisälämpöä käytettäessä.

Kuivurin käyttötapa on lähes aina kompromissi energiatalouden ja viljan laadun säilyttämisen välillä. Pitkä kuivausaika lisää pilaantumisriskiä, mutta parantaa usein energiataloutta. Energiataloutta ajateltaessa kylmäilmakuivuria kannattaa pitää käynnissä vain hyvällä säällä. Viljan laadun säilymistä ja kuivauskapasiteettia ajateltaessa kuivausajan on oltava lyhyt. Pyrittäessä parhaaseen tulokseen kuivuria käytetään niin, että energiankulutus pysyy kohtuullisena, mutta viljan laatu säilyy riittävän hyvänä.

Osana tutkimusta oli kolmen erilaisella periaatteella toimivan kuivausilmapuhaltimen automaattisen ohjauslaitteen koetus. Automaattisten ohjauslaitteiden tärkein etu käsiohjaukseen nähden on vähentynyt valvontatyön osuus. Laite huolehtii kuivauspuhaltimen käynnistyksestä ja pysäytyksestä, jolloin kuivurilla ei välttämättä tarvitse käydä joka päivä. Toinen saavutettava etu on se, että kuivaukselle soveliaat sääjaksot tulevat tarkemmin käytetyiksi: automaatiohjausta käytettäessä puhaltimen käyntiaika yleensä lisääntyy käsiohjaukseen verrattuna. Ohjauslaitteiden todettiin soveltuvan hyvin käytettäväksi kylmäilmakuivauksessa. Lisälämmön ohjaukseen tällä hetkellä markkinoilla olevat laitteet eivät sensijaan kovin hyvin sovellu.

Hyvien puintisäiden jatkuessa pitempään mutta jouduttaessa puimaan hyvin kosteaa viljaa syntyy lämminilmakuivurille usein ruuhkaa. Ei ole kuitenkaan taloudellisesti kannattavaa mitoitaa kuivuria kaikkein epäedullisimpien puintiolojen mukaan. Kuivauskapasiteettia voidaan lisätä kuivuria suurentamatta rakentamalla lämminilmakuivurin yhteyteen kylmäilmakuivuri puskurivarastoksi. Puskurikuivurin tilavuuden tulee olla vähintään 1 - 3 kertaa lämminilmakuivurin tilavuus. Parempi on, jos siihen sopii parin hyvän puintipäivän vilja. Puskurikuivuri voi olla tavallinen lavakylmäilmakuivuri tai ns. ruotsalaismallinen korkeakerroksinen kylmäilmakuivuri. Puskurivarastona voidaan käyttää myös erilaisia tuuletettavia siloja tai perävaunuun sijoitettavia kylmäilmakuivureita.

SAMMANFATTNING

DIMENSIONERING OCH ANVÄNDNING AV KALLUFTTORK

I undersökningen studerades faktorer som inverkar på spannmålets torkning i kallufttork. Utgående från dessa faktorer presenteras olika dimensioneringssalternativ och driftsstrategier för kallufttork. Dessutom undersöktes bruk av tillsatsvärme i kallufttorkningen, automatisk styrning av torkfläktarna samt kallufttorkens lämplighet som bufferttork för varmlufttork.

Faktorer som inverkar på spannmålets torkning i kallufttork är bl.a. torkluftmängden, dess temperatur och relativa fuktighet, spannmålslagrets tjocklek (lagringshöjd) samt spannmålets vattenhalt och skräpinnehåll.

Lagringshöjdens inverkan på mottrycket mättes i en plantork med två luftmängder och tre sädesslag. Ett 50 cm tjockt spannmålslager orsakade med luftmängderna $550 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ och $700 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ i medeltal ett mottryck på 310 Pa respektive 483 Pa. Ökning av lagringshöjden från 0,5 m till 1,5 m ökade mottrycket med i medeltal 620 Pa/m respektive 923 Pa/m vid nämnda luftmängder. Detta betyder, att när man använder vanliga för lantbruket avsedda propellerfläktar, bör lagringshöjden vara 0,5 - 1,0 m om man vill uppnå åtminstone den nuvarande luftmängdsrekommendationen $550 \text{ m}^3/\text{hm}^2$.

Luftmängdens inverkan på mottrycket mättes vid 0,7 m och 1,5 m lagringshöjd. Enligt mätresultaten råder mellan luftmängden och mottrycket sambandet $p = a\dot{V}^2 + b\dot{V} + c$ inom området $450 - 700 \text{ m}^3/\text{hm}^2$. I ekvationen är $p =$ mottryck (Pa), $\dot{V} =$ luftmängd per tid och lårarea (m^3/hm^2) och a, b, c konstanter, vilkas värde beror på lagringshöjden och sädesslaget.

Inverkan av spannmålets vattenhalt på mottrycket studerades genom att mäta olika sädesslags mottryck vid tre olika vattenhalter: 30 %, 20 % och 14 %. Det var ingen nämnvärd skillnad i mottryck mellan spannmål med 30 % vattenhalt och 20 % vattenhalt. Däremot orsakade lagringstorr (14 %) spannmål för alla sädesslag klart större mottryck än fuktig spannmål. Lagringstorr spannmål orsakade 100 - 250 Pa större mottryck vid luftmängden $550 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ och 150 - 300 Pa större mottryck vid luftmängden $700 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ än spannmål med 20 - 30 % vattenhalt. Dessa tryck uppmättes omedelbart efter

att torken fyllts och med/like lagringshöjd för alla vattenhalter. I praktisk torkning minskar dock mottrycket vanligen när spannmålen torkar. Detta beror närmast på att kärnornas volym och spannmålslagrets tjocklek minskar under torkningen. Spannmålens vattenhalt påverkar mottrycket mest på så sätt att hög vattenhalt ökar skorpbildningsrisken.

Skräppinnehållets inverkan på mottrycket mättes vid 0,7 m och 2,0 m lagringshöjd. Spannmål som grovrensats orsakade ca 100 Pa mindre mottryck än orensad spannmål. Sortering efter grovrensning hade ingen nämnvärd inverkan på mottrycket.

Inverkan av torkluftens temperatur, relativa fuktighet och mängd på torkresultatet och torkfrontens stigningshastighet studerades på korn som konstfuktats till 22 % vattenhalt. Torktiden halverades med 5 °C tillsatsvärme. Tillsatsvärmens gör det dessutom lätt att nå tillräckligt låg, 14 - 15 % slutvattenhalt. Är värmetillsatsen över 10 °C, blir vattenhaltsskillnaden mellan botten- och ytskiktet för stor. Tillsatsvärmens förkortar torktiden närmast därför att den minskar luftens relativa fuktighet; temperaturhöjningen i sig själv har inte så stor betydelse. Vid luftmängden 750 m³/hm² var vattenavdunstningen dubbelt så snabb som vid luftmängden 325 m³/hm². Torkfrontens stigningshastighet var fyrafaldig vid den större luftmängden jämfört med vid den lägre. Så synes också luftmängden ha större betydelse för torkfrontens stigningshastighet än luftens temperatur och relativa fuktighet. Av försöken att döma lönar det sig att hellre dimensionera fläktarna för stora än för små. Stor luftmängd är fördelaktig för torkningen, och mindre luftmängd än 550 m³/hm² bör man inte använda. Om spannmålens vattenhalt är över 30 %, får inläggningshöjden vara högst 40 cm. Även då bildas ofta en fuktig, hård skorpa i ytskiktet. Alltid när skorpa bildas måste denna söndras genom omblandning av spannmålen.

En plantorks volym dimensioneras enligt gårdens spannmålsareal och hektarskör. Om hektarskörden är 3500 - 4000 kg, behövs det ca 6,5 m³ torkvolym/ha. Lämpligt kalkyleringsvärde för lagringshöjden är 1,0 m. Om hela spannmålsskörden skall rymmas i torken, skall lårarean alltså vara 6,5 m²/ha spannmålsareal. Om man odlar sädesslag och sorter som mognar olika tidigt kan man minska på lårarean, eftersom skörden då kan torkas i flera satser.

Om man torkar i två eller tre lika stora satser, kan man dimensionera lårarean enligt 2,5 - 4,5 m²/ha spannmålsareal. Värdena i undre ändan kan tillämpas när man använder tillsatsvärme.

Torkens driftssätt är nästan alltid en kompromiss mellan energihushållning och säkerställande av spannmålskvaliteten. Lång torktid ökar förskämningens risk, men minskar ofta energiförbrukningen. Med tanke på energiförbrukningen lönar det sig att köra kalllufttorken bara vid gott väder. Med tanke på torkningskapaciteten och säkerställandet av spannmålskvaliteten bör torktiden däremot vara kort. När man eftersträvar bästa totalresultat körs torken så, att energiförbrukningen hålls på en rimlig nivå, men spannmålskvaliteten blir tillräckligt bra.

Som en del av undersökningen provades tre anordningar med olika funktionsprincip för automatisk styrning, dvs. på- och avkoppling, av torkfläkten. Den viktigaste fördelen med automatisk styrning jämfört med manuell är mindre behov av övervakning. Styrningsanordningen ombesörjer start och stopp av fläktarna, varför man inte nödvändigtvis behöver se till torken varje dag. En annan fördel är, att perioder med tjänligt torkväder utnyttjas bättre: med automatisk styrning förlängs i allmänhet driftstiden jämfört med när fläktarna kopplas på och av manuellt. Dessa styrningsanordningar konstaterades lämpa sig väl för kalllufttorkning. De anordningar som nu finns på marknaden för automatisk styrning av tillsatsvärme var däremot inte särdeles lämpliga för sitt ändamål.

Varmlufttorkars kapacitet blir ofta otillräcklig när man under långa perioder oavbrutet tvingas tröska särdeles fuktig säd. Det är emellertid inte ekonomiskt lönsamt att dimensionera varmlufttorken för de allra ofördelaktigaste förhållandena. Varmlufttorkens kapacitet kan höjas utan att förstora den genom att i anslutning till den bygga en kalllufttork som buffertlager. Bufferttorkens volym bör vara 1 - 3 gånger varmlufttorkens volym. Bäst är om den rymmer så mycket som man hinner tröska under ett par tjänliga tröskningsdagar. Bufferttorken kan vara en vanlig plantork eller av hög s.k. svensk modell. Som buffertlager kan också användas olika slags luftningssilor eller vagnstorkar. De senare avser små enkla kalllufttorkar för montering i vanlig släpvagn.

SUMMARY

Factors affecting near-ambient drying of grain were examined and the results were used to determine drier size and drying strategies including use of supplemental heat and possibilities of combined use of near-ambient drier and heated-air drier. A test of devices for automatic control of drier fans was also part of the study.

The drying process in a near-ambient drier is affected among other factors by airflow rate, air temperature and relative humidity, grain bed depth and initial moisture content and purity of grain.

The relationship between bed depth and static pressure was studied using two airflow ratios and three kinds of cereal. At 550 m³/hm² and 700 m³/hm² airflow and 0,5 m bed depth static pressure averaged 310 Pa and 483 Pa respectively. As bed depth was increased from 0,5 m to 1,5 m, the static pressure increased by 620 Pa/m and 923 Pa/m respectively. When using normal axial fans bed depth should be between 0,5 and 1,0 m so that at least the recommended 550 m³/hm² airflow can be produced.

The relationship between airflow ratio and static pressure was found to agree with the equation $p = a\dot{V}^2 + b\dot{V} + c$ when airflow was between 450 and 700 m³/hm². p = static pressure (Pa), \dot{V} = airflow per hour and floor area (m³/hm²) and a,b,c constants which depend on bed depth and kind of cereal. Bed depths used were 0,7 m and 1,5 m.

There was no significant difference in static pressure between grain with initially 20 % m.c. and 30 % m.c. Dry (14 %) grain, however, required 100 - 250 Pa higher static pressure than wet (20 % and 30 %) grain when the desired 550 m³/hm² airflow was maintained. When airflow was increased to 700 m³/hm², dry grain required 150 - 300 Pa higher static pressure than wet grain. These pressures were measured immediately after the drier was filled and with equal bed depth for the different m.c. levels. In practical drying, however, the static pressure usually diminishes when the grain dries, chiefly due to shrinking of the kernels and decrease of bed depth. High initial m.c. also increases the risk of crust formation thus increasing static pressure.

The effect of purity of grain on the static pressure was tested using 0,7 m and 2,0 m bed depths. The static pressure decreased by 100 Pa after the grain was pre-cleaned. Cleaning after pre-cleaning did not significantly reduce static pressure.

The effect of air temperature and relative humidity as well as airflow on drying rate was studied in controlled environment. The grain used was barley re-wetted to 22 % w.b. When 5 °C supplemental heat was applied, drying time was reduced by half and 14-15 % target m.c. was easily reached. When the air was heated more than 10 °C, the difference in m.c. between the bottom and top layer of the grain became too wide. Supplemental heat reduces the drying time primarily because it reduces the relative humidity of the air; the rise of temperature itself is of less importance. When the airflow was increased from 325 m³/hm² to 750 m³/hm², evaporation rate was doubled and the drying zone reached the top layer in just one fourth of the time required with 325 m³/hm² airflow. Airflow rate seemed to have a greater effect on the advance of the drying zone up through the bed than temperature and relative humidity. The fans should be dimensioned to produce at least 550 m³/hm² airflow. Too large fans are better than too small ones because high airflow rate is advantageous for the drying process. If the initial m.c. is over 30 %, the maximum bed depth is 40 cm. Even then formation of crust is probable. Crust should be broken by mixing the grain immediately when noticed.

The size of a near-ambient drier can be determined according to acreage and yield. If the yield is 3500 - 4000 kg/ha, 6,5 m³ drier/storage volume/ha is needed. A practical value for bed depth is 1 m. If the whole harvest is to be stored in the drier, the floor area (m²) needed is 6,5 (m²/ha) * acreage (ha). Smaller floor area is sufficient when grain can be dried in more than one batch. In the case of two or three batches of equal size, the floor area (m²) can be calculated as 2,5...4,5 (m²/ha) * acreage (ha). The smaller coefficients are applicable when supplemental heat is used.

Applicable drying strategy is usually a compromise between energy economy and preservation of grain quality. The risk of deterioration is greater when drying times are long, but energy consumption is then often lower. When

good energy economy is attempted, fans should be operating only in good weather, but when good quality of grain is attempted, drying time should be as short as possible.

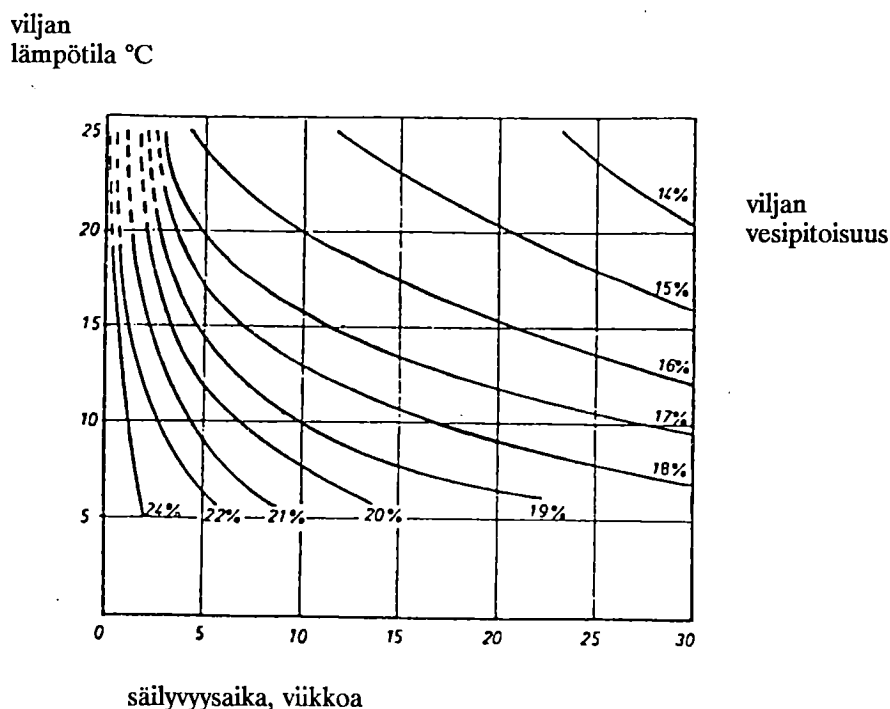
A test of three different automatic control devices for drier fans was part of the study. The main advantage achieved when letting these devices control the operating of fans is the small amount of watching over needed. When the fans are switched on and off automatically, one does not necessarily have to visit the drier every day. Another advantage is that the periods with weather favourable for drying will be more accurately utilized: with automatic control the fans tend to operate longer at a time than when manually controlled. The tested devices were found to be suitable for controlling drier fans, but not so suitable for controlling the usage of supplemental heat.

When the initial m.c. of grain in the field is high but the grain still must be harvested because of a rare favourable weather period, the capacity of heated-air driers often gets too small. However, it is not economical to dimension the heated-air drier according to extreme weather conditions. Drying capacity can be increased by building a near-ambient drier as buffer drier. The volume of the buffer drier should be at least one to three times the volume of the heated-air drier but it would be better if two days' harvest can be stored in the buffer drier. The buffer drier can be a regular, floor type near-ambient drier or a so called swedish-type deep bed drier. Various types of ventilated silos or driers which are fitted in trailers will also do.

1. Yleistä

Puitavan viljan vesipitoisuus on Suomessa lähes aina niin suuri, ettei viljaa voida varastoida käsittelemättä. Suuri vesipitoisuus heikentää nopeasti puidun viljan laatua, varsinkin jos jyvissä on kasvukosteutta. Jyvän elintoiminnot eivät tällöin vielä ole hidastuneet vaan jyvät hengittävät voimakkaasti ja vilja lämpenee. Lämmin ja kostea jyvämassa on erinomainen kasvualusta erilaisille mikro-organismeille, kuten homeitiöille. Täysin tuleentunutkin vilja säilyy vain rajoitetun ajan, jos se varastoidaan ilman minkäänlaista käsittelyä. Jyvien hengityksen hillitsemiseksi ja mikro-organismien kasvun estämiseksi vilja tavallisesti kuivataan. Muita säilömismenetelmiä ovat kaasutiivis varastointi ja hapottaminen. Kuivaus on ainut käytännön menetelmä, jolla saadaan sekä siemen- että leipävilja varastointikelpoiseksi.

Kuivaus 14 % vesipitoisuuteen on käytännössä riittävä viljan säilyvyyden varmistamiseksi. Jos varastointiaika on lyhyt, vähäisempikin kuivaus on täysin riittävä. Varastointilämpötila vaikuttaa selvästi viljan säilymisaikaan. Talvella viljan lämpötila on varsin alhainen. Kuvassa 1 on esitetty viljan säilyvyyden riippuvuus vesipitoisuudesta ja lämpötilasta. Kuvan mukaan talven yli kestä-



Kuva 1. Viljan säilyvyys varastossa /1/.

vään varastointiin (viljan lämpötila alle 5 °C) riittää, että viljan vesipitoisuus on alle 20 %. Kuvan 1 käyrät ovat kuitenkin vain suuntaa-antavia. Säilyvyyteen vaikuttaa vesipitoisuuden ja lämpötilan lisäksi viljan puhtaus ja "historia" eli se, mitä viljalle tapahtuu pellolla, kuljetuksessa ja kuivauksessa ennen varastointia. Jos vilja on roskaista ja se sisältää runsaasti homeitiöitä ja muita mikro-organismeja voi pilaantuminen alkaa ennemmin kuin ennuste edellyttää.

1.1. Viljan vesipitoisuus

Viljan vesipitoisuus, josta käytetään usein myös nimitystä viljan kosteus, on veden prosentuaalinen osuus kostean viljan massasta ja siitä käytetään ulkomaisessa kirjallisuudessa lisämääritettä wb, wet base, (yhtälö 1).

$$x = m_v/m_{ma} * 100 \% \quad (1)$$

jossa x viljan vesipitoisuus, %
 m_v veden massa, kg
 m_{ma} kostean viljan massa, kg

Ulkomaisessa kirjallisuudessa käytetään viljan vesipitoisuudelle myös sellaista määrittelyä, jossa veden määrä lasketaan suhteessa kuivan viljan massa. Vesipitoisuuden lisämääreenä on silloin selvyuden vuoksi db, dry base, (yhtälö 2).

$$x_{db} = m_v/m_{ka} \quad (2)$$

jossa x_{db} vesipitoisuusaste
 m_v veden massa, kg
 m_{ka} kuivan viljan massa, kg

Vesimäärä, joka viljasta poistetaan vesipitoisuuden muuttuessa x_a :sta x_1 :ään, voidaan laskea yhtälöiden (1) ja (2) merkintöjä käyttäen yhtälöiden (3) ja (4) mukaisesti

$$m = m_{ma} (x_a - x_1)/(100 - x_1) \quad (3)$$

$$m = m_{ka} (x_a - x_1)/(100 - x_a) \quad (4)$$

jossa m poistettava vesi, kg
 x_a vesipitoisuus alussa, %
 x_1 vesipitoisuus lopussa, %

Veden poistaminen viljanjyvistä vaatii energiaa. Tarvittava energiamäärä riippuu siitä, millä tavoin vesi on sitoutunut viljanjyvään. Jyvän ja vesimolekyylien väliset sidokset voidaan sitoutumisenergian perusteella jakaa kolmeen lajiin.

Kemiallisesti sitoutuneen veden (hydraatti- tai kidevesi) poistaminen vaatii eniten energiaa. Kuivauksen kannalta kemiallisesti sitoutuneella vedellä ei ole merkitystä, koska sitä ei kuivauksen aikana yritetäkään poistaa viljasta /2/.

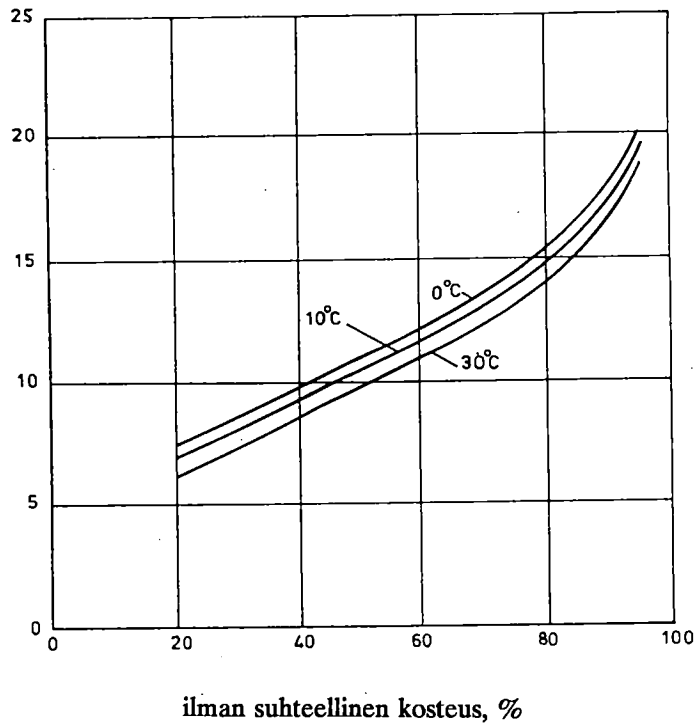
Fysikaalis-kemiallisesti sitoutuneella vedellä tarkoitetaan kolloidista paisunta-vettä. Veden sitoutuessa kiinteään aineeseen neste-kiinteä -systeemin yhteistilavuus pienenee. Kiinteän aineen osuus kasvaa jyvän turvotessa, mutta yhteistilavuus pienenee. Sitoutumisessa vapautuu lämpöenergia, joka on verrannollinen jyvän tilavuuden muutokseen /2/. Tämä energiamäärä, joka voi olla lähes yhtä suuri kuin veden höyrystymislämpö, on tuotava kuivattaessa jyvään höyrystymislämmön lisäksi.

Fysikaalis-mekaanisesti sitoutunutta vettä on jyvien kapillaareissa ja jyvien pinnalla. Jyvien pinnalta ja makrokapillaareista (kapillaarin säde > 100 nm) vesi haihtuu kuten vapaasta vesipinnasta, mutta mikrokapillaareissa vesihöyryn osapaine on pienempi kuin vapaassa vesipinnassa.

1.2. Kuivauksen perusteet

Hygrooskooppiselle aineelle, kuten viljalle on tunnusomaista se, että joutuaan kosketukseen kostean ilman kanssa se voi sitoa tai luovuttaa vettä vain tiettyyn tasapainotilaan asti. Niin kauan kuin viljaan sitoutuneen veden höyrynpaine on suurempi kuin ympäröivässä ilmassa olevan vesihöyryn osapaine, viljanjyvä luovuttaa vesihöyryä ilmaan ja kuivuu. Vettä siirtyy, kunnes höyrynpaine-erot ovat tasoittuneet ja on syntynyt tasapainotila, jota kutsutaan tasapainokosteudeksi. Tasapainokosteuskäyrät esittävät viljan vesipitoisuuden ja ilman suhteellisen kosteuden välillä, tietyssä lämpötilassa, vallitsevan yhteyden. Tasapainokosteuteen vaikuttavista tekijöistä tärkeimpiä ovat ilman lämpötila ja viljalaji.

viljan vesipitoisuus, % (wb)



Kuva 2. Ohran tasapainokosteuskäyrä /3/.

1.2.1. Kuivauksen teoriaa

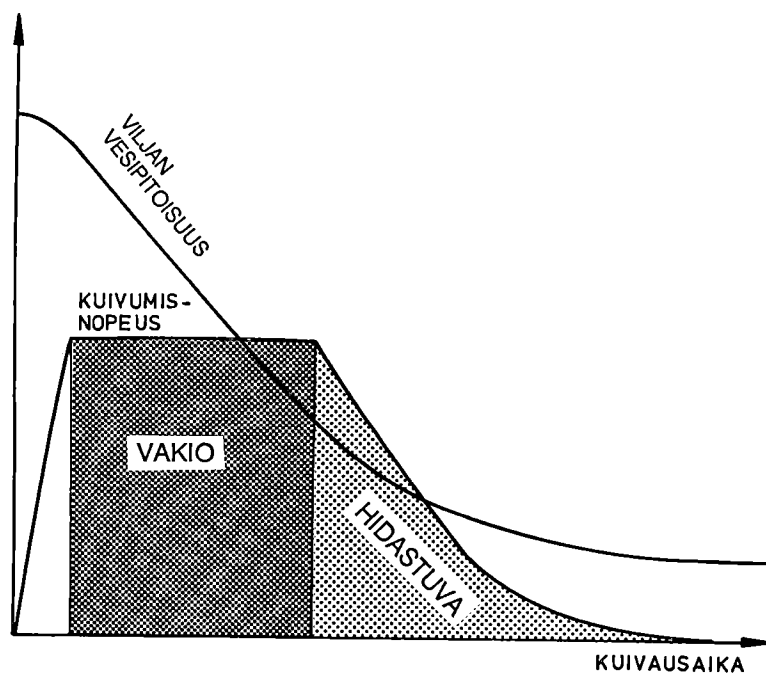
Viljankuivauksen kokeellinen tutkiminen on hankalaa ja kallista, koska kokeet ovat hitaita ja niissä joudutaan käsittelemään suuria viljamääriä. Myös vakio-olojen aikaansaaminen on erittäin vaikeaa, usein jopa mahdotonta. Monet tutkijat ovat kehittäneet kuivausteorioita ja laatineet niiden perusteella matemaattisia malleja kuivauksen tutkimisen helpottamiseksi.

Kuivauksen matemaattiset mallit perustuvat usein kokeisiin, joissa kuivattava viljakerros on ohut. Matemaattisia malleja on kolme: ohuen viljakerroksen malli, diffuusiomalli ja empiirinen malli /4/.

Ohuen viljakerroksen mallissa viljaa ajatellaan kuivattavan vakio-oloissa ja niin ohuessa kerroksessa, että kuivausilman lämpötila ja suhteellinen kosteus voidaan olettaa vakioiksi ilman kulkiessa viljakerroksen läpi. Kuivumista tarkastellaan ajan suhteen yksittäisten viljanjyvien muodostamalle kerrokselle. Kokeiden tuloksena saadaan käyrä, jossa kuivumisnopeus jakautuu kahteen

tai useampaan alueeseen: vakiokuivumisnopeuden alue, jossa veden haihtumisnopeus on vakio ja yksi tai useampia hidastuvan kuivumisen alueita, jossa veden haihtumisnopeus pienenee kokeen aikana. Vakiokuivumisnopeuden alueella vesi haihtuu viljasta kuten vapaan veden pinnalta. Normaalisti viljan vesipitoisuus on niin alhainen, että haihtumisnopeus on hidastuvan kuivumisen alueella.

Kylmäilmakuivurissa tapahtuvaa kuivausta voidaan tarkastella ohuen kerroksen mallin tavoin. Käytännössä kuivumisnopeus pysyy kuitenkin vakiona paljon alempaan viljan vesipitoisuuteen, kuin ohuen kerroksen mallissa. Tämä johtuu siitä, että kuivumisnopeus alkaa hidastua vasta, kun kuivumisvyöhyke läpäisee viljakerroksen pinnan. Kuivaustapahtuman periaate on esitetty kuvassa 3. Kuivumisnopeuden nouseva osa johtuu kuivauksen käynnistymisestä.



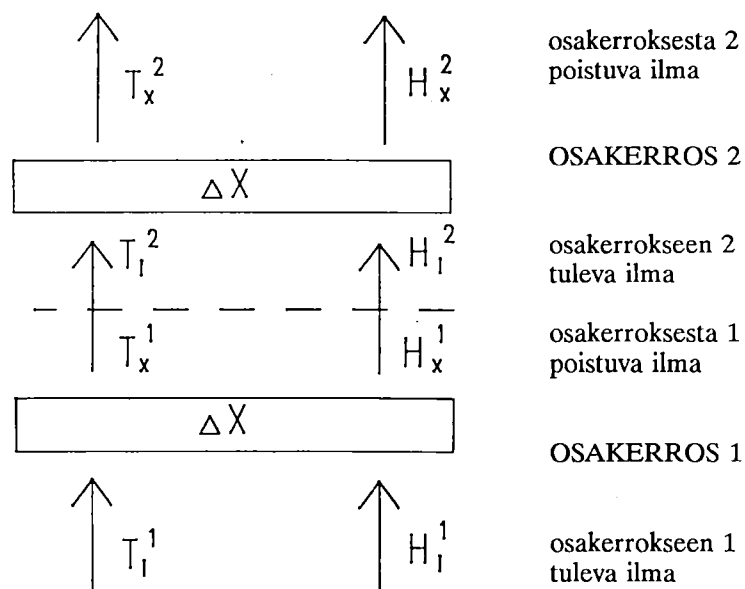
Kuva 3. Kuivaustapahtuman periaate.

Diffuusiomalleissa yksittäisen jyvän kosteusjakautumalle laaditaan matemaattinen malli. Mallin käsittely on matemaattisesti vaikeaa ja siinä on tekijöitä, joiden käyttäytymistä ei tunneta riittävän hyvin. Diffuusiomallia ja ohuen kerroksen teoriaa voidaan yhdessä käyttää todellisen kuivurin tarkasteluun: diffuusiomalli tarkastelee yksittäisen jyvän ja ohuen kerroksen teoria koko viljaerän kuivumista.

Empiirisissä malleissa diffuusiomallin laskennallisesti vaikea kosteusjakautumayhtälö korvataan yksinkertaisemmilla kokemusperäiseen tietoon perustuvilla yhtälöillä. Empiiristen mallien ongelmana on niiden pätevyysalueen suppeus.

1.2.2. Kuivauksen simulointi

Osana tutkimuksesta testattiin simulointimallien soveltuvuutta kuivurin mitoituksen apuvälineeksi. Simulointimallina käytettiin ohuen kerroksen teoriaan sekä massan ja energian siirtymiseen perustuvaa mallia [4,5]. Siinä kuivurissa oleva viljakerros jaetaan kuvan 4 mukaisesti useihin ohuisiin kerroksiin, joista numeerisesti integroimalla saadaan lasketuksi koko viljakerroksessa tapahtuva muutos. Jako ohuisiin kerroksiin tehdään, jotta kuivuria voidaan tarkastella ohuen kerroksen mallin mukaan.



Kuva 4. Simulointimallin toimintaperiaate.
 T = ilman lämpötila, °C
 H = ilman absoluuttinen kosteus, kg/kg
 Δx = osakerroksen paksuus, m

Laskenta aloitetaan alimmasta kerroksesta. Siihen tulevan ilman lämpötila ja kosteus on sama kuin puhallusilmalla. Alimman kerroksen poistoilman lämpötila ja kosteus voidaan laskea kaavojen (4) ja (5) avulla ja saatuja arvoja käytetään tuloarvoina toiseksi alimmassa kerroksessa (kuva 4). Samalla tavalla jatketaan ylöspäin kerrokseen saakka. Kun ensimmäinen laskentakierros on käyty läpi, tiedetään, mitä kuivurissa on tapahtunut yhden aikajakson kuluessa. Seuraavaksi laskeminen aloitetaan jälleen pohjalta. Osakerosten paksuudet sekä aikajakson pituus täytyy valita käytettävissä olevan laskentakapasiteetin mukaan. Tuloilman lämpötilan ja kosteuden ei tarvitse olla vakioita, vaan ne voidaan muuttaa aikajakson välein. Laskentayhtälöt ovat muotoa:

$$c_a T_x + (\lambda + c_v T_x) H_x = c_a T_i + (\lambda + c_v T_i) H_i \quad (4)$$

$$(H_x - H_i) = (M_o - M)/(G t) \quad x \quad (5)$$

joissa

c_a	kuivan ilman ominaislämpö, J/kg°C	H_i	osakerrokseen tulevan ilman absoluuttinen kosteus, kg/kg
c_v	vesihöyryn ominaislämpö, J/kg°C	M_o	viljan vesipitoisuus alussa, db (desimaaliluku)
λ	ilman ominaislämpö, J/kg°C	M	viljan vesipitoisuus ajan Δt jälkeen
T_x	osakerroksesta poistuvan ilman lämpötila, °C	G	ilmamäärä, kg/hm ²
T_i	osakerrokseen tulevan ilman lämpötila, °C	Δt	aikajakso, h
H_x	osakerroksesta poistuvan ilman absoluuttinen kosteus, kg/kg	ρ	kuivausilman tiheys, kg/m ³
		Δx	osakerroksen paksuus, m

Laskennassa tarvitaan lisäksi yhtälöitä (6) ja (7), joiden avulla lasketaan viljan vesipitoisuus ja tasapainokosteutta vastaava vesipitoisuus:

$$M = (M_o - M_e) e^{-k\Delta t} + M_e \quad (6)$$

$$M_e = (\ln(1 - \phi)/(-K(\theta + C)))^{1/N}/100 \quad (7)$$

joissa

M_e	viljan tasapainokosteus, db	k	kuivauskerroin
θ	viljan lämpötila, °C	ϕ	ilman suhteellinen kosteus
N	2,0123	K	$2,2919 \cdot 10^{-5}$
C	195,267 (vakiot N, K, C ohralle /3/)		

Kuivauskerroin k saadaan kaavasta:

$$\ln k = 20,95 - 6942/(\theta + 272,15) \quad (8)$$

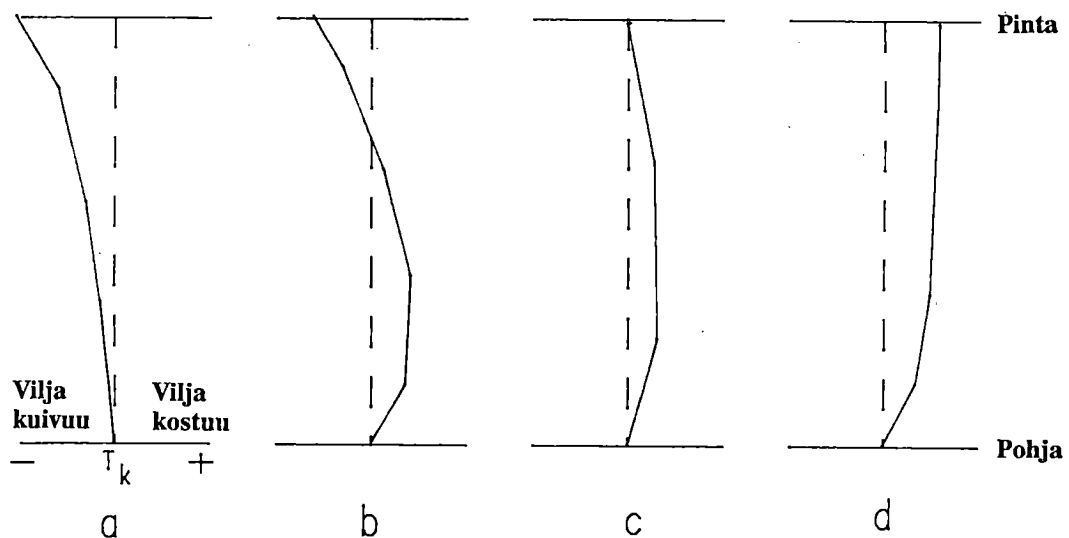
Laskutoimitusten tuloksena saadaan kuivausilman lämpötilat ja kosteudet viljakerroksen sisällä, viljan vesipitoisuusjakautuma viljakerroksessa ja viljan kuivumisnopeus.

1.2.3. Kuivuminen todellisessa kuivurissa

Todellisessa kuivurissa viljakerroksen paksuus on suuri verrattuna ohuen viljakerroksen teorian oletuksiin. Lisäksi viljan vesipitoisuus, tilavuuspaino jne. vaihtelevat viljakerroksen eri osissa, joten vakio-olosuhteet eivät vastaa käytäntöä. Käytännön kuivaustilanteessa tiedetään ainoastaan viljakerrokseen menevän ja sen läpi kulkeneen ilman tila.

Tarkastellaan aluksi tilannetta kuivauksen alussa. Viljan vesipitoisuus on sama koko viljakerroksessa. Kuivausilman lämpötila ja suhteellinen kosteus pysyy vakiona. Kun kuivausilma kohtaa viljakerroksen pohjalla ensimmäiset jyvät, se alkaa heti sitoa itseensä vettä. Kuivausilman suhteellinen kosteus alkaa kasvaa, mutta se ei heti saavuta tasapainokosteutta, koska kosteuden siirtyminen viljasta ilmaan vaatii määrätyn ajan, joka riippuu viljan vesipitoisuudesta, lämpötilasta ja viljalajista. Sitoessaan vettä ilma jäähtyy, koska haihtuminen sitoo energiaa. Ilman virratessa ylöspäin, sen suhteellinen kosteus kasvaa ja se saavuttaa tasapainokosteutta vastaavan vesipitoisuuden ns. kuivumisvyöhykkeen yläosassa. Tästä ylöspäin vilja ei enää kuivu. Vilja kuivuu pohjalta lähtien. Ohuen kerroksen mallin mukaan veden haihtumisnopeus hidastuu, kun vilja kuivuu. Koska viljakerros on niin paksu, että ilman suhteellinen kosteus ehtii saavuttaa tasapainokosteuden ennen viljakerroksen pintaa, kuivumisnopeus pysyy vakiona. Kuivumisvyöhyke siirtyy koko ajan ylöspäin. Jossakin vaiheessa kuivuminen läpäisee viljakerroksen pinnan, jolloin viimeisetkin jyvät alkavat kuivua (kuva 11 s. 43). Tästä eteenpäin kuivumisnopeus alenee, koska viljan vesipitoisuus ei enää vastaa alkuperäistä tasapainokosteutta. Se, kuinka nopeasti ilma kussakin tilanteessa saavuttaa tasapainokosteuden, riippuu ilman virtausnopeudesta ja siitä, kuinka nopeasti jyvät pystyvät luovuttamaan vettä.

Käytännössä kuivurin tuloilman lämpötila ja suhteellinen kosteus vaihtelevat ja tilanne on toinen. Kuivumisnopeus pysyy likimain vakiona niin kauan, kuin viljan vesipitoisuus on niin suuri, että se kuivuu kuivausilman laadusta riippumatta; kuivumisnopeus ja kuivumisvyöhykkeen paikka vain hieman vaihtelevat kuivausilman suhteellisen kosteuden vaihdellessa. Eniten kuivausprosessin luonne poikkeaa yksinkertaistetussa esimerkissä kuvatusta tilanteesta kuivauksen loppuvaiheessa. Kun viljan vesipitoisuus on riittävän pieni, ulkoilman suhteellinen kosteus voi ylittää tasapainokosteuden. Tällöin kuivuminen voidaan jakaa neljään vaiheeseen. Kuvassa 5 on esitetty kuivausilman lämpötilan muutos ilman liikkuessä ylöspäin viljakerroksessa. Ilman lämpötilan muutos merkitsee sitä, että viljan vesipitoisuus muuttuu kuivumisen eri vaiheissa seuraavasti (kuva 5).



Kuva 5. Kuivausilman lämpötilajakautuma viljakerroksessa loppukuivauksen aikana neljällä eri tuloilman suhteellisella kosteudella. T_k = tuloilman lämpötila.

- | | |
|--|--|
| a. Tuloilman suhteellinen kosteus pieni, koko viljakerros kuivuu. Alhaalla kuivuminen on hidasta. | c. Tuloilman suhteellinen kosteus suurempi kuin kohdassa b. Vilja kuivuu pinnassa yhtä paljon kuin se kastuu pohjassa. |
| b. Tuloilman suhteellinen kosteus on sellainen, että pohjakerros kastuu, mutta pintakerros kuivuu. | d. Tuloilman suhteellinen kosteus on niin suuri, että vilja kastuu lähes |

Ilman suhteellisesta kosteudesta ja viljan vesipitoisuudesta riippuen kuivumisvyöhykkeen paikka voi muuttua tai kuivumisvyöhyke voi muuttua kastumisvyöhykkeeksi. Tällaisten tilanteiden varalta kuivurin toimintaa on voitava ohjata.

2. Viljan kuivumiseen kylmäilmakuivurissa vaikuttavat tekijät

Viljan kuivumisnopeus kylmäilmakuivurissa on riippuvainen kuivausilman suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta, viljan vesipitoisuudesta sekä kuivausilman tilavuusvirran ja viljan massan suhteesta.

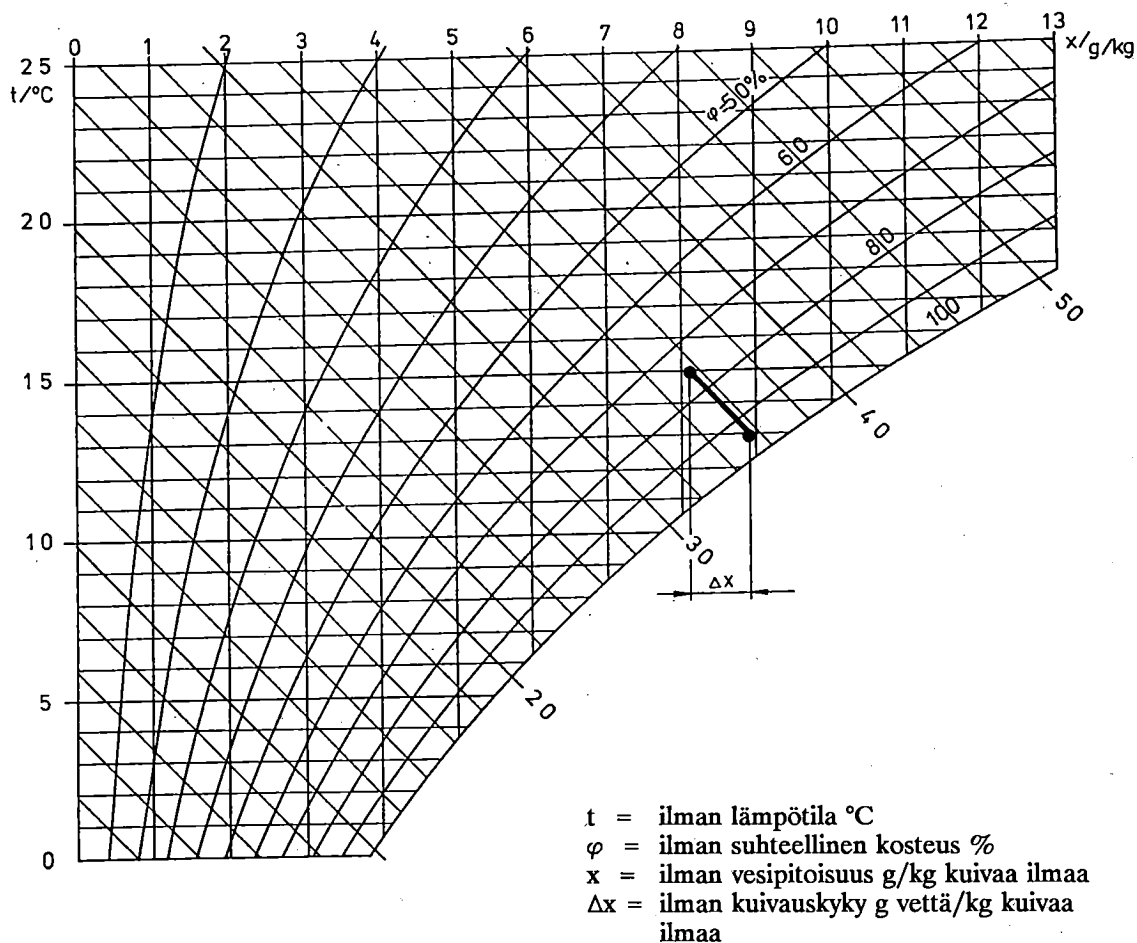
Viljan kuivumisnopeutta laskettaessa tarvitaan tiedot kuivausilman tilavuusvirrasta, viljakerrokseen tulevan ilman lämpötilasta sekä kuivausilman suhteellisen kosteuden muutoksesta ilman kulkiessa viljakerroksen läpi.

Kuivausnopeus voidaan arvioida etukäteen tasapainokosteuskäyrää ja Mollier -diagrammia apuna käyttäen, kun tiedetään suunnilleen kuivausajan säätiedot ja viljan puintikosteus. Ilman vesipitoisuus voidaan määrittää Mollier -diagrammista, kun tiedetään lämpötila ja suhteellinen kosteus. Tulevan ilman vesipitoisuus saadaan Mollier -diagrammista, kun tunnetaan kuivausilman lämpötila ja suhteellinen kosteus ja poistoilman vesipitoisuus viljan tasapainokosteuskäyrältä. Tasapainokosteus määräytyy viljan pintakerroksen vesipitoisuuden mukaan. Poistuvan veden määrä voidaan laskea kaavalla (9).

$$m = \rho \dot{V} (x_0 - x_1) \quad (9)$$

jossa	m	poistuvan veden massavirta, g/h
	ρ	kuivausilman tiheys, kg/m ³
	\dot{V}	kuivausilman tilavuusvirta, m ³ /h
	x_0	poistuvan ilman vesipitoisuus, g/kg
	x_1	tulevan ilman vesipitoisuus, g/kg

Esimerkkinä voidaan laskea poistuvan veden määrä, kun kuivuripuhaltimen tuottaman ilman tilavuusvirta on 25000 m³/h (noin 7,5 kW puhallin). Oletetaan viljan alkukosteudeksi 25 % ja kuivausilman lämpötilaksi 15 °C ja suhteelliseksi kosteudeksi 75 %. Ilman tiheys on 1,2 kg/m³. Koska viljan vesipi-



Kuva 6. Mollier -diagrammi.

toisuus on suuri voidaan poistokosteudeksi olettaa 95 %. Yhtälön (9) termejä käyttäen saadaan

$$m = 1,2 * 25000 (8,9 - 8,1) / 1000 = 24 \text{ kg/h} \quad (10)$$

Tämä luku tarkoittaa kuivurissa, jossa on viljaa 400 kg/m^2 ja jonka ilmamäärä on $550 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, noin prosenttiyksikön laskua viljan vesipitoisuudessa kymmenessä tunnissa.

Kylmäilmakuivurin toimintaan vaikuttavien tekijöiden selvittämiseksi tehtiin VAKOLAssa vuosien 1986-87 aikana ilmamäärä-, vastapaine ja kuivumisnopeusmittauksia.

2.1. Kuivausilman virtausvastus

2.1.1. Viljan kerrospaksuuden vaikutus

Kerrospaksuuden vaikutusta vastapaineeseen tutkittiin laarikuivurissa kahta ilmamäärää ja kolmea viljalajia käyttäen. Ohuiden kerrospaksuuksien laariala oli 8 m² ja paksujen kerrosten 4 m². Laarin pohjamateriaalina oli reikälevy. Reikälevyn vastus oli niin pieni, että sitä ei ole otettu huomioon laskelmissa. Kuivuri täytettiin vaiheittain 0,5 m:stä 3 m:iin ja viljan aiheuttama vastapaine mitattiin joka vaiheessa. Ilmamäärää pidettiin vakiona säätämällä kuivausilmapuhaltimen nopeutta. Laari täytettiin imu-painelietsolla mahdollisimman tasaiseksi kerrokseksi. Lopuksi viljan pinta tasoitettiin kolalla. Täyttötapa ei poikkea normaalista suurimpia kerrospaksuuksia lukuunottamatta. Sen vaikutusta vastapaineeseen ei tutkittu. Kokeissa käytetty vilja oli puhtaudeltaan tavallista esipuhdistamatonta viljaa. Roskaisuuden vaikutusta ei näissä mitauksissa otettu huomioon. Seuraavassa esitettävät arvot kerrospaksuuden vaikutuksesta vastaavat normaaliolosuhteissa kuivuriin tulevan viljan tilannetta.

50 cm paksuinen viljakerros aiheutti seuraavan suuruiset vastapaineet ilmamäärien ollessa 550 m³/hm² ja 700 m³/hm²:

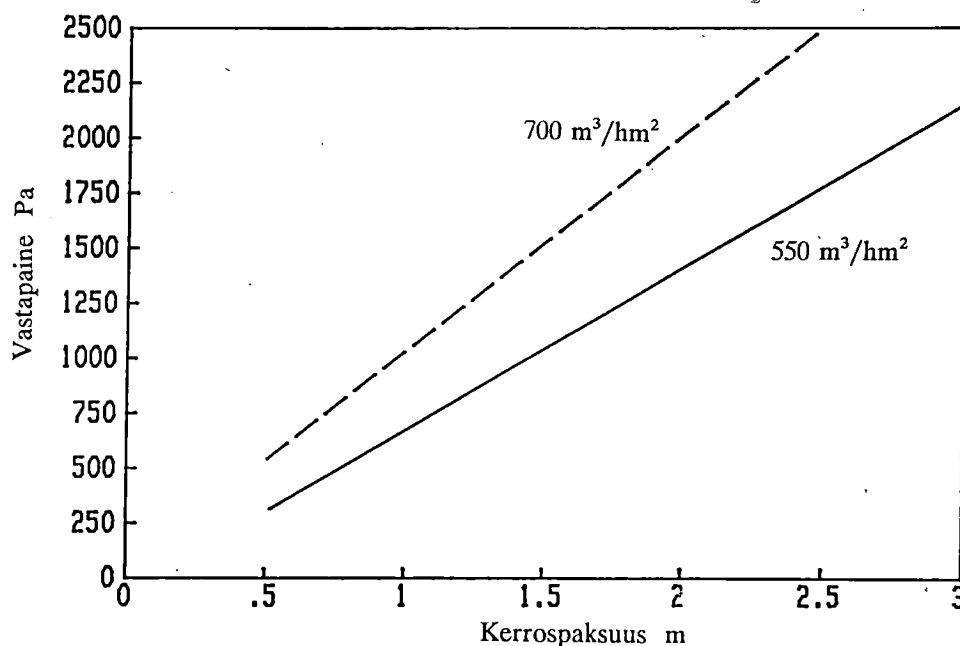
	550 m ³ /hm ²	700 m ³ /hm ²
Kaura	340 Pa	530 Pa
Ohra	300 Pa	490 Pa
Vehnä	290 Pa	430 Pa

Alueella 0,5-1,5 m kerrospaksuuden muutos vaikuttaa yllämainittuja ilmamääriä käytettäessä eri viljalajien vastapaineeseen seuraavasti:

Kaura	690 Pa/m, ilmamäärä	550 m ³ /hm ²
	1050 - " -	700 - " -
Ohra	650 Pa/m, ilmamäärä	550 m ³ /hm ²
	970 - " -	700 - " -
Vehnä	520 Pa/m, ilmamäärä	550 m ³ /hm ²
	750 - " -	700 - " -

Kun esimerkiksi kauralla kerrospaksuutta muutetaan 70 cm:stä 120 cm:iin vastapaine lisääntyy $(1,20-0,70) \cdot 690 \text{ Pa} = 345 \text{ Pa}$ ilmamäärän ollessa $550 \text{ m}^3/\text{hm}^2$.

Lukuja tarkasteltaessa voidaan selvästi tehdä se johtopäätös, että käytettäessä tavallisia maatalouskäyttöön myytäviä potkuripuhaltimia kerrospaksuuden tulee olla 0,5 - 1,0 m silloin kun halutaan päästä vähintään nykyisten suosittujen mukaiseen $550 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ilmamäärään.



Kuva 7. Viljakerroksen paksuuden vaikutus vastapaineeseen kahta eri ilmamäärää käytettäessä.

2.1.2. Ilmamäärän vaikutus

Ilmamäärän vaikutusta vastapaineeseen mitattiin kahta viljan kerrospaksuutta käyttäen. Mittausmenetelmä oli sama kuin kerrospaksuuden vaikutusta tutkittaessa. Mittauksissa käytetyt kerrospaksuudet olivat 0,7 m, joka oletettiin sopivaksi kuivattaessa normaaliolosuhteissa puitua, vesipitoisuudeltaan 20 - 30 %:sta viljaa, ja 1,5 m, joka on mahdollista silloin, kun vilja kuivataan sitä kuivuriin monessa erässä lisäten.

Puhallinta valittaessa kerrospaksuus ja ilmamäärä ovat ratkaisevassa asemassa. Koska kuivuripuhallinta mitoitettaessa on helpompi tarkastella puhaltimen

tuottamaa ilmamäärää laarialan, kuin laariin laitettavan viljan massan mukaan, käytetään tulosten esittämisessä laatuna m^3/hm^2 .

Mittausten mukaan ilmamäärällä ja vastapaineella on alueella 450-700 m^3/hm^2 kuvan 8 mukainen riippuvuus, joka voidaan esittää yhtälöllä (11):

$$p = a\dot{V}^2 + b\dot{V} + c \quad (11)$$

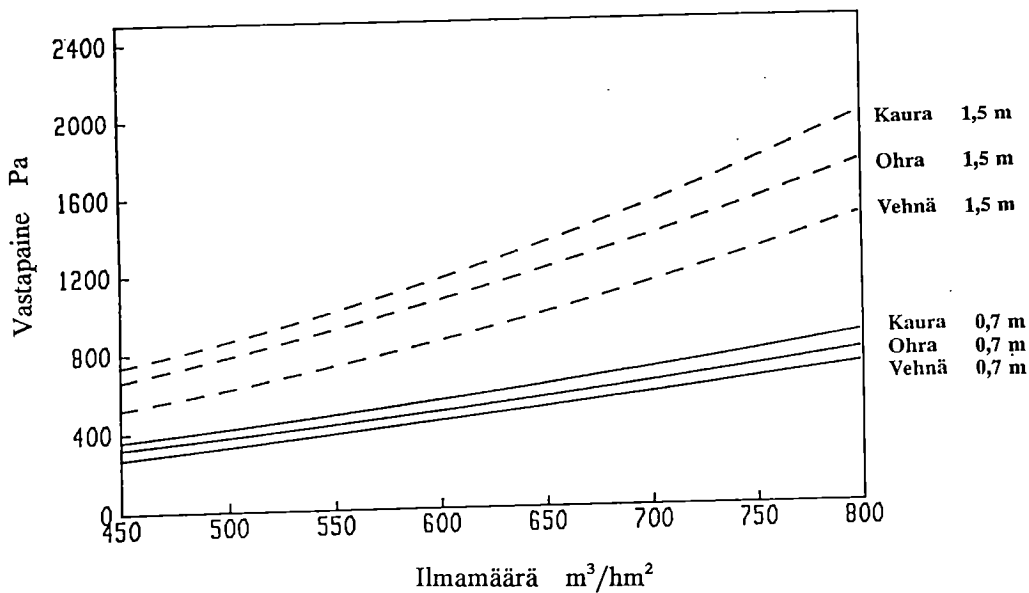
jossa p viljakerroksen vastapaine, Pa
 \dot{V} ilmamäärä laarialalle tunnissa, m^3/hm^2
 a, b, c vakiokertoimia

Vakiokertoimien a , b ja c arvot 70 cm viljakerrokselle ovat:

kaura	$a = 0,001$	$b = 0,197$	$c = 68$
ohra	$a = 0,0009$	$b = 0,18$	$c = 58$
vehnä	$a = 0,00043$	$b = 0,71$	$c = -138$

Vakiokertoimien a , b ja c arvot 1,5 m viljakerrokselle ovat:

kaura	$a = 0,0036$	$b = -0,88$	$c = 400$
ohra	$a = 0,0023$	$b = 0,25$	$c = 80$
vehnä	$a = 0,0027$	$b = -0,63$	$c = 255$



Kuva 8. Ilmamäärän vaikutus vastapaineeseen 0,7 m ja 1,5 m viljakerroksilla.

2.1.3. Viljan vesipitoisuuden vaikutus

Viljan vesipitoisuuden vaikutusta vastapaineeseen tutkittiin mittaamalla eri viljalajien vastapaine kolmella vesipitoisuustasolla, joista yksi oli varastokuiva vilja ja kaksi muuta kuivauksen alku tai keskivaihetta vastaavia vesipitoisuuksia. Käytetyt vesipitoisuudet olivat: 14 %, 20 % ja 30 %. Kuivan viljan mittauksissa käytettiin lämminilmakuivurilla kuivattua viljaa. 20%:n ja 30%:n kokeet tehtiin käyttäen koko ajan samaa viljaa. Ensin mitattiin 30 %:n viljan vastapaine, sen jälkeen vilja kuivattiin 20 %:iin lämminilmakuivurilla, jonka esipuhdistin oli kytketty pois käytöstä ja tehtiin vastaavat mittaukset. Täyttötapa oli aina samanlainen.

Vesipitoisuudeltaan 30 %:n viljan aiheuttama vastapaine ei poikennut merkittävästi noin 20 %:n viljan aiheuttamasta vastapaineesta. Varastokuivan viljan aiheuttama vastapaine oli kaikilla viljalajeilla selvästi suurempi kuin kostealla viljalla. Varastokuivan viljan vastapaine oli ilmamäärän ollessa $550 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 100-250 Pa suurempi ja ilmamäärällä $700 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 150-300 Pa suurempi, kuin vesipitoisuuden ollessa 20 tai 30 %.

Vastapaineen muutos todellisessa kuivaustilanteessa kuivurissa on erilainen: siellä vastapaine pienenee viljan kuivuessa, mikä johtuu lähinnä jyvien tilavuuden pienenemisestä ja viljakerroksen ohenemisesta kuivumisen aikana. Viljan vesipitoisuus vaikuttaa vastapaineeseen eniten siten, että se suurentaa viljan kuorettumisriskiä. Kuorettumisella tarkoitetaan sitä, että vesi, vilja, roskat, yms. muodostavat kovan, ilmaa huonosti läpäisevän kerroksen. Kun vilja kuorettuu ilmamäärä pienenee usein murto-osaan alkuperäisestä.

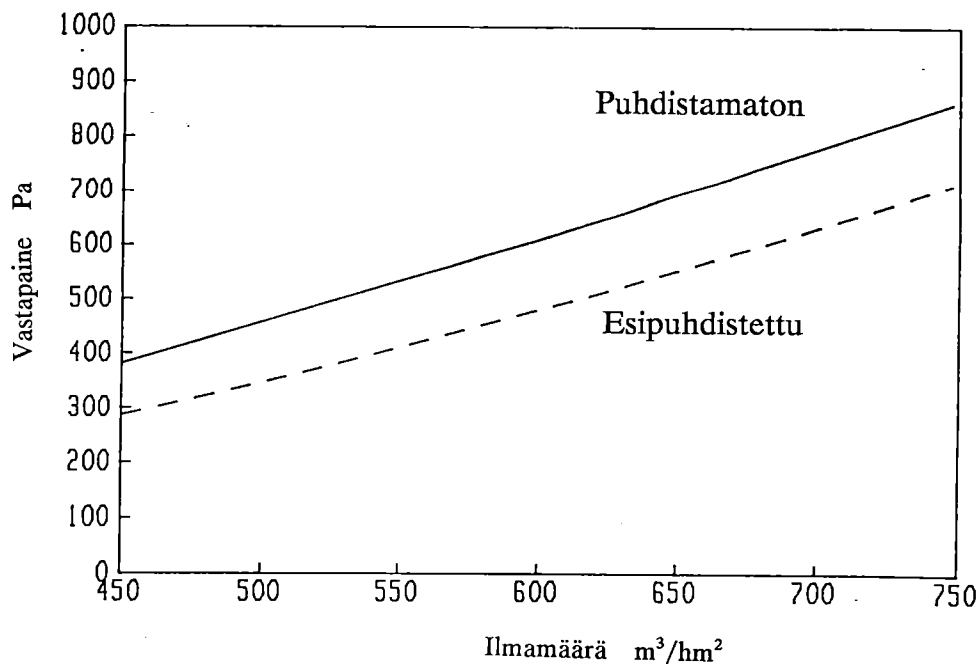
2.1.4. Roskaisuuden vaikutus

Roskaisuuden vaikutusta tutkittaessa käytettiin kahta viljan kerrospaksuutta, 0,7 m ja 2,0 m. Koesarja alkoi siten, että kuivuri täytettiin ensin 0,7 m:n, sitten 2,0 m:n kerrospaksuuteen roskaisella viljalla ja mitattiin vastapaine. Sitten kuivuri tyhjennettiin ja siinä ollut vilja puhdistettiin tavallisella esipuhdistimella. Tämän jälkeen kuivuri täytettiin uudelleen kuten edellä ja mitat-

tiin vastapaine. Lopuksi kuivuri tyhjennettiin, vilja lajiteltiin, kuivuri täytettiin lajitellulla viljalla ja mitattiin vastapaine.

Koesarjan tulosten mukaan esipuhdistetun viljan aiheuttama vastapaine oli noin 100 Pa pienempi kuin esipuhdistamattoman viljan. Lajittelulla esipuhdistuksen jälkeen ei ollut merkittävää vaikutusta vastapaineeseen. Koe tehtiin yhdelle viljaerälle, joten laajakantoisia johtopäätöksiä ei voida tehdä. Koe tukee kuitenkin sitä teoriaa, jonka mukaan pienet roskat täyttävät jyvien väleihin jääviä huokosia ja aiheuttavat virtausvastuksen kasvamisen.

Viljan roskaisuus vaikuttaa myös viljan käsittelyn miellyttävyyteen ja pilaantumisherkkyyteen. Roskat eivät tavallisesti jakaannu tasaisesti koko laarialalle. Kuivuria täytettäessä vilja valutetaan joihinkin kohtiin kuivuria, joista se sitten levitetään tasaiseksi kerrokseksi. Täyttökohtiin kasaantuu tällöin enemmän pienikokoisia roskia kuin muualle. Täyttökohdissa ilma myös läpäisee viljakerroksen huonommin kuin muualla, joten kuivuminen näissä kohdissa hidastuu. Roskaisuus lisää pilaantumisriskiä, koska roskien vesipitoisuus on suurempi. Kosteat roskat ovat pilaantumisytimiä, joista homeet saavat hyvän kasvualustan.



Kuva 9. Roskaisuuden vaikutus viljakerroksen vastapaineeseen.

Vaikka puhtaus on kuivauksessa eduksi, ei viljan puhtauteen puitaessa pidä kiinnittää ylenmääräistä huomiota. Se saattaa silloin pienentää kohtuuttomasti puintikapasiteettia. Hyvien puintisäiden mahdollisimman tehokas hyödyntäminen on edullisempaa kuin mahdollisimman puhdas vilja.

2.2. Viljan kuivumisnopeus

Kylmäilmakuivurissa (lavakuivuri) viljan pysyy paikallaan koko kuivumisen ajan. Kuivuminen alkaa viljakerroksen pohjalta ja etenee kuivumisvyöhykkeenä kohti pintaa /6/. Vilja ei kuivu kuivumisvyöhykkeen yläpuolella, koska kuivausilma on jo saavuttanut tasapainokosteutta vastaavan arvon. Jotta viljakerroksen yläosa ei pilaantuisi on tärkeää, että kuivumisvyöhyke saavuttaa viljan pinnan nopeasti.

Kuivumisvyöhykkeen nousunopeuteen vaikuttavat kuivausilman suhteellinen kosteus ja lämpötila, viljakerroksen paksuus, viljan vesipitoisuus ja puhallusilman määrä. Lisäksi vaikuttavat viljalaji, viljan tuleentumisaste yms. tekijät.

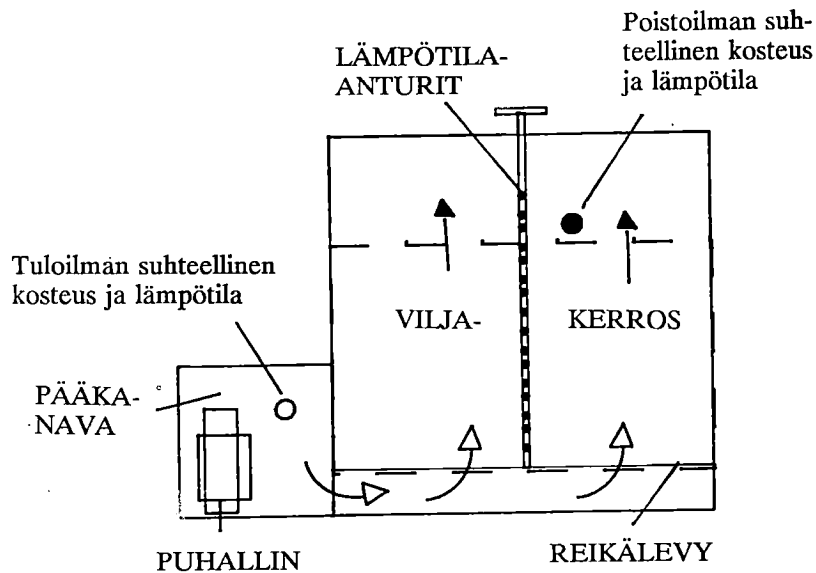
1987 tehdyissä kuivauskokeissa selvitettiin puhallusilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja ilman tilavuusvirran vaikutusta kuivumisvyöhykkeen nousunopeuteen. Muut vaikuttavat tekijät pyrittiin pitämään vakioina. Koeaineistolla testattiin myös edellä esitetyn simulaatiomallin toimivuutta.

2.2.1. Koejärjestelyt

2.2.1.1. Mittauslaitteet

Kokeet tehtiin kylmäilmakuivurissa, jonka laariala oli 1,2 m². Siihen oli kytketty keskipakoispuhallin, jonka pyörimisnopeutta voitiin säätää portaattomasti. Pääosa kokeista tehtiin säähuoneessa, jossa ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta voidaan säätää. Kuivumisvyöhykkeen määrittämiseksi mitattiin kuivausilman lämpötila viljakerroksessa korkeussuunnassa 5 cm välein. Tuloilman lämpötila ja suhteellinen kosteus mitattiin kanavaan puhall-

timen jälkeen sijoitetulla psykrometrianturilla. Poistoilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin viljan päälle sijoitetulla anturilla. Tilavuusvirta mitattiin kuivurin imukanavasta mittasiivellä. Koekuivurin rakenne on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Koekuivurin rakenne.

Viljan vesipitoisuutta seurattiin ottamalla kuivurista näytteenottokairalla viljanäytteitä. Kaira oli jaettu 10 cm:n pituisiin osiin, jotta viljan vesipitoisuus voitiin määrittää eri korkeuksilta. Näytteistä määritettiin vesipitoisuus pitämällä niitä tunnin ajan 130 °C:ssa lämpökaapissa. Mittaustiedot talletettiin tilavuusvirran ja viljan vesipitoisuuden mittausta lukuunottamatta tiedonkeruulaitteella tietokoneen massamuistiin.

2.2.1.2. Mittaukset

Mittaukset tehtiin kesällä 1987. Vertailukelpoisten tulosten saamiseksi kaikissa mittauksissa käytettiin keinokostutettua ohraa. Vilja pyrittiin kostuttamaan 25 % vesipitoisuuteen. Tähän ei kuitenkaan aina päästy, vaan viljan vesipitoisuus vaihteli 23 - 25 %. Viljakerros vaihteli 70 - 80 cm:iin.

Säähuoneessa tehdyissä kokeissa ilmamäärä oli $550 \text{ m}^3/\text{hm}^2$. Puhallusilman lämpötila ja suhteellinen kosteus vastasivat osassa kokeista (erät 5 ja 6) kuivaamista ilman lisälämpöä ja osassa (erät 1-4) kuivaamista lisälämmöllä (taulukko 1). Erien kuivaamista jatkettiin kunnes kuivumista ei enää havaittu, tai kunnes saavutettiin n. 15 %:n vesipitoisuus. Puhallin kävi jatkuvasti.

Säähuoneessa ilman suhteellisen kosteuden vaihtelu oli enimmillään $\pm 5\%$ -yksikköä ja lämpötila $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ asetusarvosta. Vaihtelu johtui ilmastointikoneen jaksoittaisesta käynnistä. Kokeissa, joissa ilman suhteellisen kosteuden asetusarvo oli 80 %, suhteellisen kosteuden vaihtelu vaikeutti koetulosten tulkintaa. Kuivumisvyöhykkeen paikkaa ei voitu luotettavasti todeta, koska kuivausilman kosteuden vaihtelu lähellä tasapainokosteutta johti viljan jaksoittaiseen kuivumiseen ja kostumiseen.

Mittaukset $750 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ja $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ilmamäärillä tehtiin hallissa, jossa kuivausilman lämpötilan ja kosteuden vaihtelu oli pienempi.

Kuivauseristä otettiin päivittäin näytteenottokairalla useita kosteusnäytteitä. Ilmamäärää ja vastapainetta seurattiin päivittäin. Lisäksi tehtiin havaintoja viljakerroksen paksuuden muutoksista.

2.2.2. Huomioita koekuivurin toiminnasta

Kuivauksen aikana eri kuivauserien viljakerros oheni 10 - 13 %. Oheneminen oli voimakkainta kuivauksen alussa, kun kuivumisvyöhyke ei vielä ollut läpäissyt viljakerrosta. Viljakerroksen oheneminen johtuu osittain viljan kuivumisesta, jolloin viljamassan tilavuus pienenee. Erityisesti kuivauksen alussa viljamassan läpi puhallettava ilma "järjestelee" jyviä, jolloin vilja pakkautuu tiukemmin laariin /7/.

Eri kuivauserien vastapaine koekuivurissa oli keskimäärin 500 Pa. Kuivauksen aikana vastapaine pieneni samassa suhteessa kuin viljakerros oheni. Vastapaineen muutos ei vaikuttanut kuivausilman määrään, koska keskipoispuhallin on tunteeeton pienille vastapaineen muutoksille.

Kuivurin täyttötavalla näytti olevan suurehko vaikutus vastapaineeseen: valutettaessa vilja varovasti kuivurin reunan yli vastapaine oli n. 10 % pienempi verrattuna normaaliin täyttöön esimerkiksi viljansiirtoruuvilla.

Taulukko 1. Keskimääräiset veden haihtumisnopeudet koekuivurissa. Haihtumisnopeudet on laskettu kuivuserien alku- ja loppuvesipitoisuuksista (A) sekä puhallus- ja poistoilman vesipitoisuuksista (B). Viimeisessä sarakkeessa ovat simulaatiomallin avulla saadut haihtumisnopeudet (C).

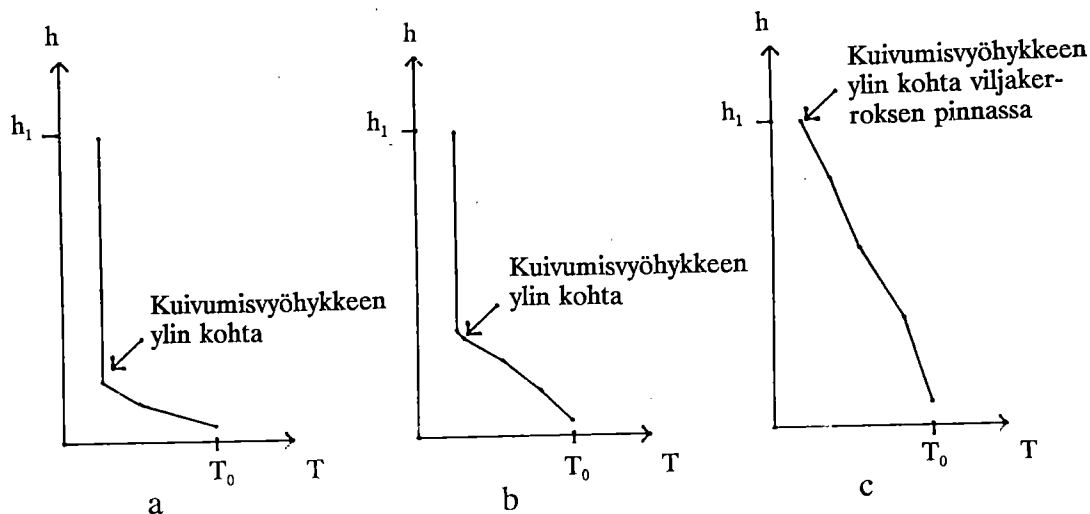
Koe-erä	Puhallusilman			Vesipitoisuus		Haihtumisnopeus		
	määrä	lämpötila	suhteellinen kosteus	alussa	lopussa	A	B	C
	m ³ /hm ²	°C	%	%	%	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²
1.	550	29,7	38	24,9	15,0	2,0	1,9	2,5
2.	550	24,5	47	23,9	15,4	1,5	1,7	1,9
3.	550	20,1	54	26,6	14,1	1,4	1,3	1,5
4.	550	15,3	62	23,3	15,2	0,8	0,7	0,9
5.	550	15,6	75	22,1	16,6	0,4	0,5	0,6
6.	550	10,7	77	24,6	17,5	0,4	0,4	0,5
7.	750	16,6	39	23,7	14,6	1,8	2,0	2,0
8.	325	18,6	31	24,6	15,0	1,2	1,1	1,3

2.2.3. Kuivumisnopeus koekuivurissa

Mittausaineistosta laskettiin puhallusilman ja poistoilman vesipitoisuudet. Haihtumisnopeus on laskettu kg/h vettä laarineliometriä kohden. Kun näitä arvoja verrataan viljan vesipitoisuuden muutoksen mukaan laskettuihin ja simulaatiomallilla saatuihin haihtumisnopeuksiin, nopeudet korreloivat keskenään erittäin hyvin, vaikka simulaatiomalli näyttääkin antavan hieman suurempia haihtumisnopeuksia (taulukko 1).

2.2.4. Kuivumisvyöhykkeen nousunopeus

Kuivumisvyöhykkeen etenemistä viljakerroksessa tarkasteltiin kuivausilman lämpötilaprofiilien avulla. Lämpötilaprofiilit piirrettiin mittausaineiston



Kuva 11. Kuivausilman lämpötilaprofiili viljakerroksessa, periaatepiirros:

- a = tilanne kuivauksen alussa
- b = kuivumisvyöhyke on lähtenyt etenemään
- c = kuivumisvyöhyke on saavuttanut viljakerroksen pinnan
- h = korkeus
- h_1 = viljakerroksen pinta
- T = lämpötila
- T_0 = puhallusilman lämpötila

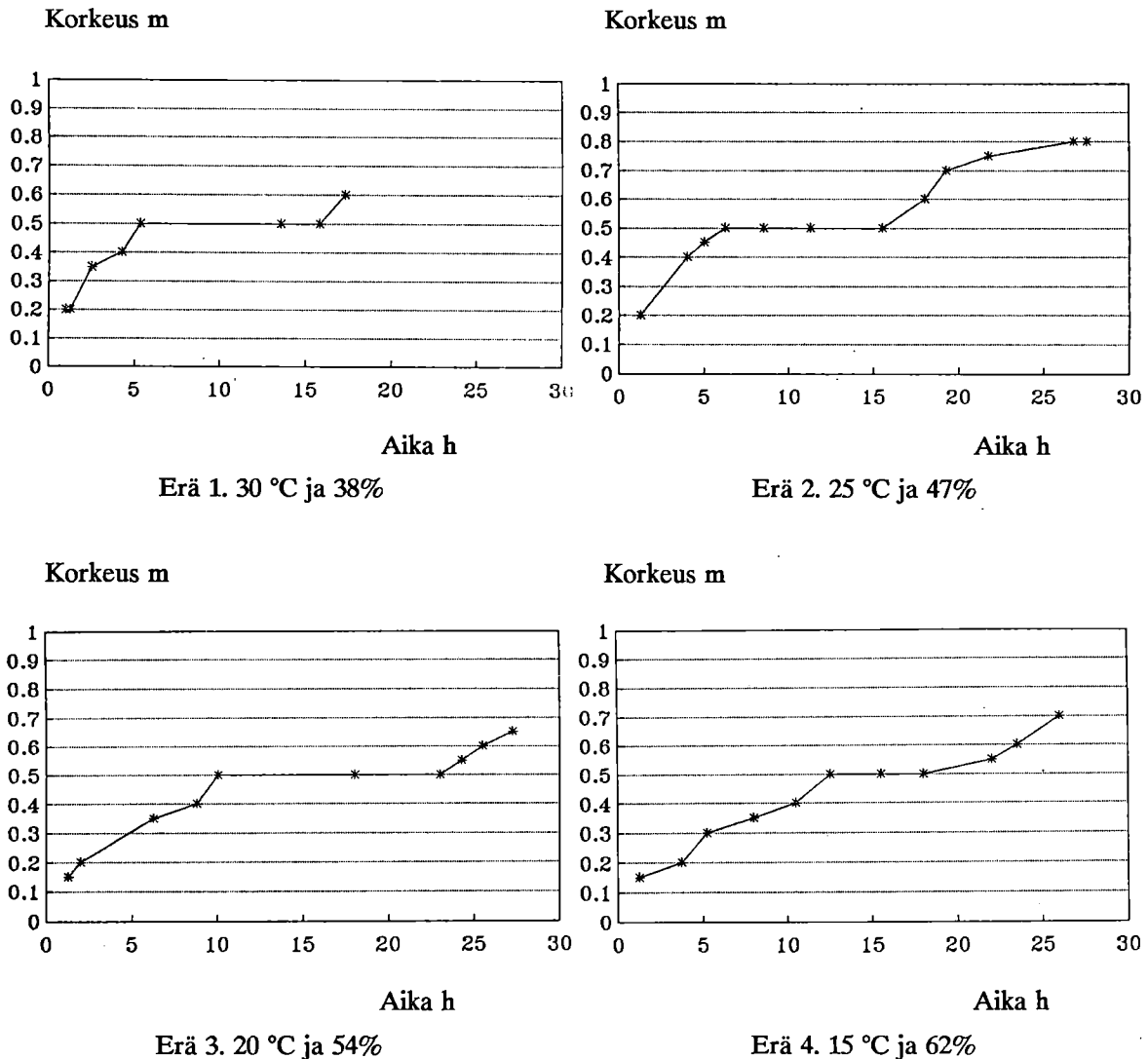
mukaan (liite 1). Kuvioista näkyy kuivausilman lämpötilan muutos viljakerroksessa puhallusilman lämpötilan ollessa vakio T_0 (kuva 11).

Näytteenottokairalla otettujen viljanäytteiden vesipitoisuuksien mukaan piirrettiin vastaavat viljan vesipitoisuusprofiilit (liite 1). Hetki, jolloin kuivumisvyöhyke lävisti viljakerroksen, määritettiin lämpötilaprofiileista tai ajankohdasta, jolloin poistoilman suhteellinen kosteus alkoi laskea.

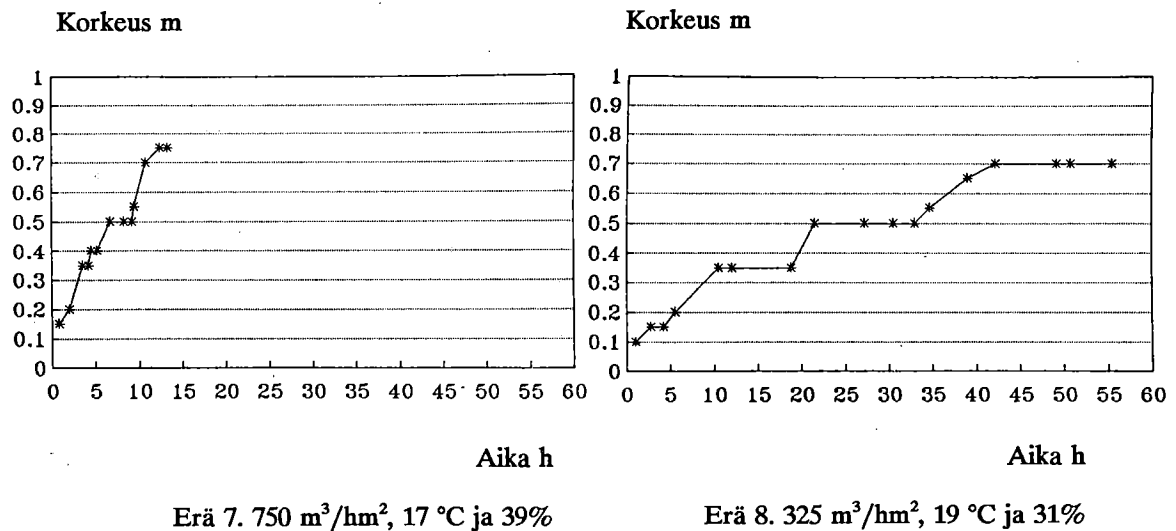
Kuivumisvyöhykkeen ylärajan lämpötilaprofiiliin tekemä polveke näkyi hyvin kokeissa, joissa kuivausilman suhteellinen kosteus oli alle 70 %. Kuivausilman ollessa kosteampaa vilja vuoroin kuivui ja kostui johtuen säähuoneen säätölaitteiston huojunnasta asetusarvon molemmiin puolin. Kosteusprofiilit noudattivat lämpötilaprofiileja hyvin ja tukivat lämpötilamittauksilla saatuja tuloksia. Poistoilman suhteellinen kosteus pysyi yli 90 %:n kunnes kuivumis-

vyöhyke läpäisi viljakerroksen, minkä jälkeen poistoilman suhteellinen kosteus alkoi tasaisesti laskea.

Mittaustulosten mukaan kuivumisvyöhykkeen eteneminen viljakerroksen läpi on vaiheittaista. Kokeissa käytetyissä viljakerroksissa (n. 80 cm) niihin muodostui yksi tai kaksi korkeustasoa, joihin kuivausvyöhykkeen eteneminen pysähtyi useamman tunnin ajaksi (kuva 12). Selvimmin vaihteellisuus ilmeni käytettäessä pientä ilmamäärää kuivausilman ollessa lämmintä ja kuivaa (kuva 13). Tulos tukee osaltaan ohuiden viljakerroksien käyttöä erityisesti lisälämmöllä kuivattaessa. Kuivausvyöhykkeen saavutettua viljakerroksen pinnan alkoi viljakerros kuivua koko paksuudeltaan.



Kuva 12. Kuivumisvyöhykkeen nousu koe-erissä 1-4. Ilmamäärä $550 \text{ m}^3/\text{hm}^2$.



Kuva 13. Kuivumisvyöhykkeen nousu koe-erissä 7 ja 8. Ilmamäärät 750 ja 325 m³/hm².

Kuivausvyöhykkeelle laskettiin nousunopeudet cm/h, taulukko 2. Verrattaessa mitattuja nousunopeuksia simulaatiomallin antamiin havaittiin, että simulaatiomalli ei kaikissa tapauksissa pystynyt ennustamaan nousunopeutta täysin tarkasti. Kuitenkin, vaikka mallilla ei saadakaan lasketuksi absoluuttisen

Taulukko 2.

Keskimääräiset kuivumisvyöhykkeen nousunopeudet. Nousunopeus 50 cm:n korkeuteen on laskettu viljan lämpötilaprofiileja hyväksikäyttäen. Kuivumisvyöhykkeen katsottiin nousseen viljakerroksen pinnalle, kun poistoilman suhteellinen kosteus alkoi laskea.

Koe-erä	Puhallusilman			Koe-erän		Kuivumisvyöhykkeen nousunopeus		
	määrä m ³ /hm ²	lämpötila °C	suhteellinen kosteus %	alku- vesipi- toisuus %	kerros- paksuus cm	50 cm:n korkeu- teen cm/h	Koko kerrok- sen läpi cm/h	Simuloitu, koko ker- roksen läpi cm/h
1.	550	29,7	38	24,9	70	9,1	3,8	3,6
2.	550	24,5	47	23,9	85	8,1	3,4	3,3
3.	550	20,1	54	26,6	73	5,0	2,8	2,1
4.	550	15,3	62	23,3	77	4,0	2,6	4,2
5.	550	15,6	75	22,1	90	-	1,9	2,9
6.	550	10,7	77	24,6	77	-	1,4	1,3
7.	750	16,6	39	23,7	80	7,7	6,2	16,0
8.	325	18,6	31	24,6	81	2,4	1,6	1,8

tarkkoja tuloksia, sitä voidaan käyttää ennustettaessa mihin suuntaan jokin olosuhteissa tapahtuva muutos vaikuttaa.

2.2.5. Kuivausilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaikutus kuivaustulokseen

Kokeet 1 - 6 tehtiin säähuoneessa. Koejäsenet valittiin siten, että kokeissa 5 ja 6 käytetty kuivausilma vastaa ulkoilmaa normaalina kuivausaikana, ja neljä muuta tilannetta, jossa käytetään lisälämpöä parantamaan ilman kuivauskykyä. Lisälämmön ilman kuivauskykyä parantava vaikutus perustuu lähinnä suhteellisen kosteuden pienenemiseen eikä niinkään itse lämpötilan nousuun, vaikka lämpötilan nousulla onkin vaikutusta ilman kuivauskykyyn (kts. kuva 15 sivu 49). Kokeissa 1 ja 2 lisälämpö oli 10 - 15 °C ja kokeissa 3 ja 4 lisälämpö oli 5 °C. Taulukossa 3 on esitetty erien vesipitoisuus kokeen lopussa, sekä viljan vesipitoisuus viljakerroksen pinnalla ja pohjalla.

Taulukko 3. Kuivausilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja ilmamäärän vaikutus viljan vesipitoisuuteen kerroksen pinnalla ja pohjalla pyrittäessä 15 % keskimääräiseen loppuvesipitoisuuteen.

Koe-erä	Puhallusilman			Vesipitoisuus			Kuivausaika h	Lopullinen vesipitoisuus	
	määrä	lämpötila	suhteellinen kosteus	alussa	lopussa	lopussa simuloitu		pinta	pohja
	m ³ /hm ²	°C	%	%	%	%		%	%
1.	550	29,7	38	24,9	15,0	15,1	26	20,0	11,1
2.	550	24,5	47	23,9	15,4	15,0	37	17,1	13,1
3.	550	20,1	54	26,6	14,1	16,0	50	14,7	13,1
4.	550	15,3	62	23,3	15,2	15,6	59	15,7	14,4
5.	550	15,6	75	22,1	16,6	15,8	90	16,8	16,3
6.	550	10,7	77	24,6	17,5	17,5	102	17,7	17,1
7.	750	16,6	39	23,7	14,6	16,3	28	15,7	12,0
8.	325	18,6	31	24,6	15,0	15,9	53	19,2	10,0

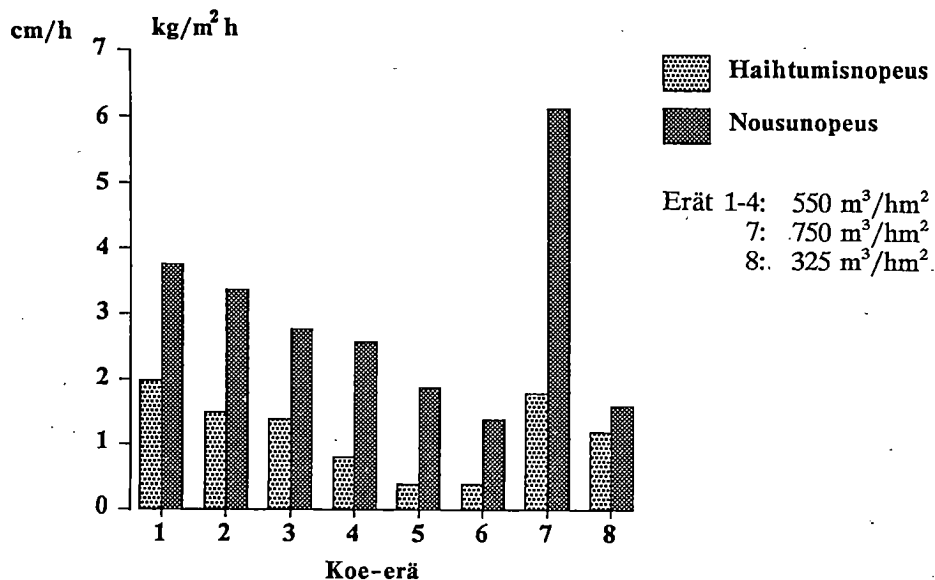
Taulukosta nähdään, että 5 °C lisälämmöllä kuivumisaika puolittuu. Lisäksi päästään helposti 14-15 %:n loppukosteuteen. Kun lämmönlisäys on yli 10 °C, pohjakerros kuivuu liikaa ja pintakerros jää liian kosteaksi, jos keskimääräinen vesipitoisuus halutaan pitää 14-15 %:na.

Olot säähuoneessa eivät täysin vastanneet lisälämmön vaikutusta, koska koko kuivuri oli lämpimän ilman ympäröimänä, kun taas normaalissa kuivauksessa lämmitetään vain puhallusilmaa. Tästä syystä ei koe-erissä ilmennyt suurimmillakaan lisälämmöillä kuorettumista eikä veden tiivistymistä viljan pinnalle. Kuorettumisilmiön toteamiseksi kuivattiin koekuivurilla erä viljaa kylmässä hallissa. Lisälämpöä oli noin 20 °C. Vettä alkoi tiivistyä viljan pinnalle muutaman tunnin kuluttua puhaltimen käynnistämisestä ja vuorokauden kuluttua oli vilja kuorettunut ja kuivurin pinnalla oli selvästi havaittavissa hometta. Viljan pintakerros pysyi märkänä aivan kuivauksen loppuvaiheisiin asti.

2.2.6. Ilmamäärän vaikutus kuivaustulokseen

Koe-erät 7 ja 8 kuivattiin lämpimässä sisähallissa, jossa ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus vaihteli hyvin vähän kuivauksen aikana. Tällöin ilmamäärän vaikutus erien kuivumiseen voitiin erottaa muista tekijöistä. Erässä 7 ilmamäärä on valittu suuremmaksi kuin nykyiset suositukset edellyttävät. Vastaavasti erässä 8 on käytetty normaalia pienempää ilmamäärää. Veden haihtumisnopeus erässä 7 oli kaksinkertainen erään 8 verrattuna. Kuivumisvyöhykkeen nousunopeus erässä 7 oli noin neljä kertaa suurempi kuin erässä 8 (kuva 14). Ilmamäärä näyttääkin vaikuttavan kuivausilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta enemmän kuivausvyöhykkeen nousunopeuteen. Ilmamäärän ollessa pienempi kuivumisvyöhyke eteni viljakerroksen läpi selvästi vaiheittain, kun taas suuremmalla ilmamäärällä kuivumisvyöhyke eteni melko tasaisesti koko viljakerroksen läpi (kuva 13 s. 45). Ilmamäärän ollessa suurempi viljakerroksen pinnan ja pohjan välinen vesipitoisuuksien ero jäi selvästi pienemmäksi (taulukko 3).

Edellä mainitun perusteella näyttää siltä, että puhaltimet kannattaa mieluummin mitoittaa liian suuriksi kuin liian pieniksi. Alle 550 m³/hm³ ei tulisi



Kuva 14. Kuivumisvyöhykkeen nousunopeudet (cm/h) ja veden haihtumisnopeudet (kg/m²h) koe-erittäin.

käyttää. Suuri ilmamäärä on kuivauksen kannalta edullista. Jos viljan vesipitoisuus on suurempi kuin 30 %, saa viljakerros olla korkeintaan 40 cm paksu. Tällöinkin viljakerroksen pinnalle muodostuu usein kostea, kova kuori. Kuori on rikottava viljaa sekoittamalla aina kun sellainen muodostuu.

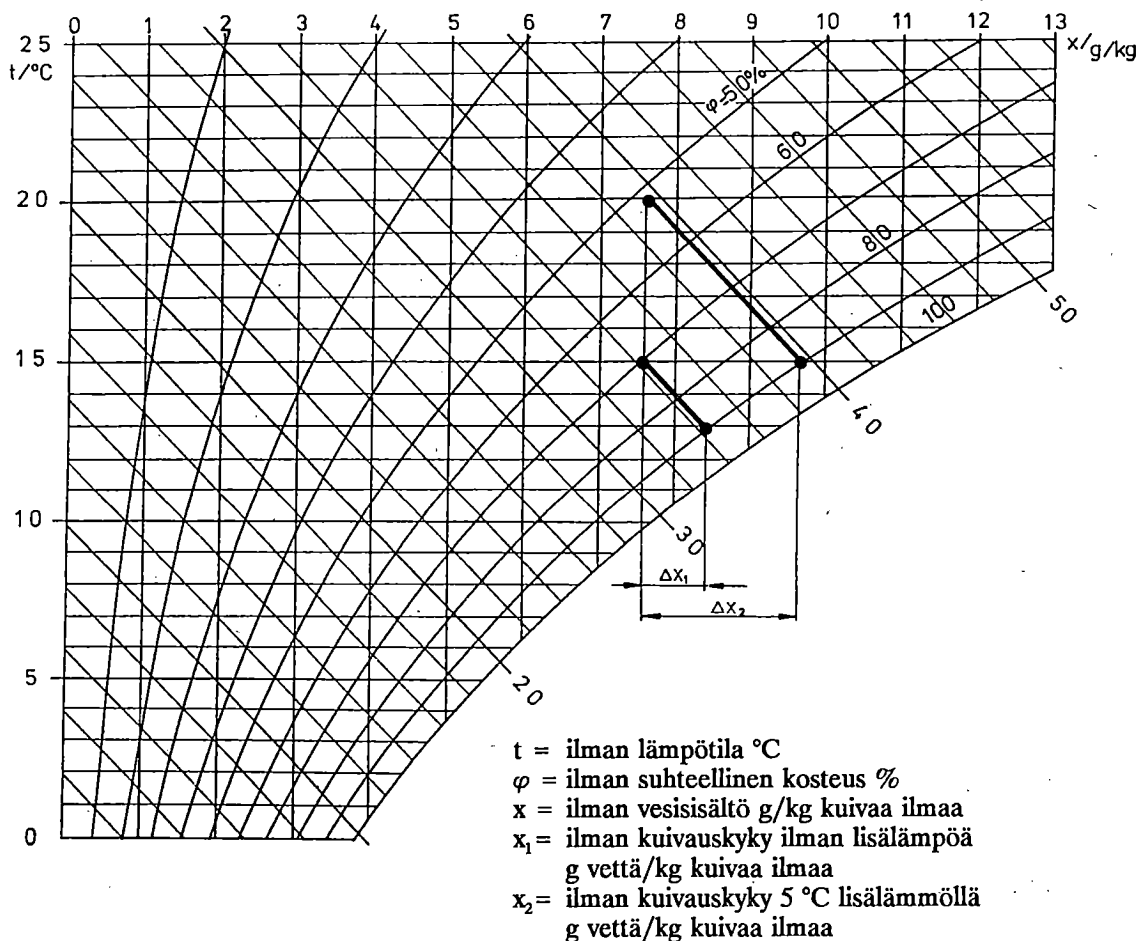
3. Kylmäilmakuivurin mitoitus ja apulaitteet

Kylmäilmakuivuria suunniteltaessa on otettava huomioon monia kuivurin toimintaan vaikuttavia seikkoja kuten kuivattava viljamäärä, haluttu kerrospaksuus, puhaltimien ominaisuudet, automatiikka ja lisälämmön käyttö.

3.1. Lisälämpö kylmäilmakuivauksessa

Lisälämmön vaikutus kuivausilman ominaisuuksiin ja kuivumisnopeuteen voidaan esittää Mollier -diagrammilla. Kun ilmaa lämmitetään sen absoluuttinen kosteus pysyy vakiona, mutta suhteellinen kosteus laskee, koska ilmaa lämmitettäessä sen vedensitomiskyky kasvaa. Mollier -diagrammissa nousee silloin suoraan ylöspäin niin monta astetta kuin lämmön nousu edellyttää. Poistoilman suhteellinen kosteus voidaan yleensä olettaa yli 90 %:ksi kuivauksen loppuvaiheisiin asti. Ilman kuivauskyky lasketaan vähentämällä tuloilman absoluuttisesta kosteudesta poistoilman absoluuttinen kosteus.

Tarkastellaan esimerkkiä, jossa tuloilman suhteellinen kosteus on 70 % ja lämpötila 15 °C. Jos poistoilman suhteellinen kosteus on 90 % saadaan jokaista ilmakiloa kohti poistumaan 0,87 g vettä. Kun ilmaa lämmitetään 5 °C nousee lämpötila 20 °C:een ja suhteellinen kosteus laskee noin 51 %:iin. Tällöin jokaista ilmakiloa kohti poistuu 2,1 g vettä. Kuivauskyky paranee siis $2,1/0,87 \cdot 100 \% = 240 \%$. Lisälämmönvaikutus ilman kuivauskykyyn on sitä suurempi, mitä lähempänä viljan tasapainokosteutta ollaan. Kuvassa 15 on esitetty vastaava tilanne Mollier -diagrammilla. Kuvasta 15 nähdään myös toinen huomion arvoinen seikka. Esimerkkitapauksessa 5 °C lisälämpö nostaa poistoilman lämpötilan lähelle ulkoilman lämpötilaa. Jos poistoilman lämpötila nousee suuremmaksi kuin rakennuksen sisällä olevan ilman lämpötila, voi osa poistoilman sitomasta vedestä tiivistyä uudelleen viljakerroksen pintaan ja vilja voi kuorettua. Tämä on mahdollista silloin, kun viljan vesipitoisuus on yli 20 %, ja johtuu siitä, että viljakerroksen läpi tulevan ilman



Kuva 15. Lisälämmön vaikutus ilman kuivauskykyyn.

lämpötila laskee nopeasti sisäilman lämpötilan suuruiseksi. Koska ilman suhteellinen kosteus on riippuvainen ilman absoluuttisesta kosteudesta ja lämpötilasta, nopea lämpötilan lasku johtaa veden tiivistymiseen.

3.2. Automaattiset ohjauslaitteet

3.2.1. Kuivausilmapuhaltimien käyntiaikojen valinta

Suomessa viljankorjuuaikana säät ovat sellaisia, että vilja ei kuivurissa kuivu koko ajan. Mitä myöhäisempään syksyyn tai mitä pohjoisemmaksi mennään, sitä huonommaksi sää tulee. Kuivausilmapuhaltimen käyntijaksot on valittava niin, että puhaltimet käyvät vain edullisten sääjaksojen aikana. Puhaltimia ei kannata käyttää silloin, kun viljan kuivumiseen ei ole edellytyksiä.

3.2.2. Puhaltimien ohjaustavat

Puhaltimien käyntiä voidaan ohjata joko käsin tai automaattisesti. Käsiohjauksessa käyttäjä tekee päätöksen puhaltimien käynnissäolosta. Menetelmä vaatii säännöllistä kuivurin toiminnan seurantaan, koska etenkin loppukuivauksessa vilja kuivuu vain osalla kokonaisajasta. Käsiohjauksessa edullisia sääjaksoja jää helposti käyttämättä.

Automaattisessa ohjauksessa anturi tunnustelee jatkuvasti kuivausilman laatua ja ohjaa mittausarvon perusteella puhaltimien käyntiä. Automaattiohjauslaite seuraa kuivurin toimintaa mittaamalla 1) kuivausilman suhteellista kosteutta, 2) kuivausilman suhteellista kosteutta tulo- ja poistoilmasta, 3) kuivausilman tulo- ja poistolämpötilaa tai 4) kuivausilman absoluuttista kosteutta tulo- ja poistoilmasta.

3.2.2.1. Hygrostaattiohjaus

Kun mitataan pelkästään kuivausilman suhteellista kosteutta, on kuivurin käyttäjän tiedettävä viljan vesipitoisuus. Ohjauslaite toimii rajakatkaisijana, joka pysäyttää puhaltimet silloin, kun ilman suhteellinen kosteus nousee liian

suureksi, ja käynnistää puhaltimet, kun sää on parantunut. Kuivurin käyttäjän on tiedettävä, mikä kulloinkin on sopiva suhteellisen kosteuden raja-arvo. Tämän raja-arvon tietäminen edellyttää viljan vesipitoisuuden mittaamista, joka on käsityötä. Ohjaus tapahtuu periaatteessa seuraavasti:

- mitataan viljan vesipitoisuus laarin pinnalla (vähintään 10 cm kerros)
- katsotaan tasapainokosteuskäyrältä tätä vesipitoisuutta vastaava ilman suhteellinen kosteus ja asetetaan se ohjauslaitteen asetusarvoksi
- mitataan viljan vesipitoisuus uudelleen sopivan ajan kuluttua ja toistetaan em. toimenpiteet

Asetusarvon muuttamisväli riippuu viljan kuivumisnopeudesta. Jos sää on hyvä, kuivuminen on nopeaa ja asetusarvoa on muutettava usein. Jos sää on huono, kuivuminen on hidasta ja voi kulua pitkäkin aika ennenkuin asetusarvoa tarvitsee muuttaa.

Tällaisen ohjausmenetelmän ongelmana on mittaustuloksen ja todellisen tilanteen välisen yhtäpitävyyden varmistaminen, koska mittaustiedon ja viljan kuivumisen välillä ei ole riippuvuussuhdetta. Ohjaukseen soveltuu esimerkiksi hygrostaatti, mutta ongelmana on anturin kalibrointi. Tarkempien mittalaitteiden haittana on korkea hinta. Toinen ongelma on se, että laarista on vaikea saada edustavaa viljan vesipitoisuusnäytettä, koska vilja voi kuivua laarissa hyvinkin epätasaisesti. Keskimääräisen vesipitoisuuden mukaan tehty hygrostaatin asetus voi jossakin tapauksessa johtaa siihen, että sopivaa kuivausaikaa jää käyttämättä (vertaa kuva 5b s. 31).

3.2.2.2. Suhteellisen kosteuden eroon perustuva ohjaus

Mittaamalla kuivausilman suhteellinen kosteus ennen ja jälkeen viljakerrosta saadaan selville kuivausilman kosteuden muutos sen kulkiessa viljan läpi. Vilja kuivuu, kun poistoilman suhteellinen kosteus on suurempi kuin tuloilman suhteellinen kosteus. Tällöin oletetaan, että viljan ja ilman välillä tapahtuva lämmön siirtyminen on merkityksetöntä. Viljan kuivumisen ja kuivausilman suhteellisessa kosteudessa tapahtuvan muutoksen välillä on suora yhteys. Yhteyttä viljan vesipitoisuuteen ei ole, mutta se ei ole edes tarpeen, koska

vesipitoisuudella ei ole merkitystä ohjauslaitteen toimintaan. Ilman suhteellisen kosteuden mittauksessa tulo- ja poistoilma-antureiden absoluuttinen tarkkuus ei ole tärkeä, kunhan ne näyttävät keskenään samalla tavalla. Automatisointi on helppoa, koska ei tarvita käsin tehtäviä mittauksia. Haittapuolena on varsin kallis anturitekniikka ja se, että toiminta vaatii kokeilujaksoja. Kun vilja ei kuivu, puhaltimet ovat pysähdyksissä kokeilujaksoja lukuunottamatta. Kokeilujakson alussa ohjauslaite käynnistää puhaltimet niin pitkäksi ajaksi, että tulo- ja poistoilman suhteellinen kosteus voidaan mitata. Laitteiston toimintaa voisi parantaa muisti, johon tallentuu puhaltimien pysäytysthetken tuloilman kosteus. Tällöin kokeilujaksot voitaisiin poistaa kokonaan tai karsia ne vain aikoihin, jolloin ilman suhteellinen kosteus on lähellä muistissa olevaa arvoa tai sitä alempi. Koska tuloilma-anturi on kuivurin ilmakehässä, tarvittaisiin lisäksi ulkoilman suhteellista kosteutta seuraava anturi. Tarkkuutta voidaan parantaa, jos siirrytään mittaamaan suhteellisen kosteuden sijasta absoluuttista kosteutta.

3.2.2.3. Lämpötilaeroon perustuva ohjaus

Kun mitataan kuivausilman lämpötila laarin pohjalla ja pinnassa saadaan selville, miten kuivausilman lämpötila muuttuu ilman kulkiessa viljan läpi. Kun oletetaan lämmön siirtyminen viljan ja ilman välillä merkityksettömäksi, täytyy lämpötilan muutoksen johtua siitä, että ilma sitoo viljasta vettä. Sitoessaan vettä ilma jäähtyy, koska veden höyrystyminen vaatii energiaa. Tällä perusteella kuivausilman lämpötilan muutoksella ja viljan kuivumisella on suora yhteys. Menetelmän etuna on suhteellisen varma ja halpa anturitekniikka ja automatisoinnin helppous. Haittapuolena on se, että lämpötilaerojen mittaamiseen vaaditaan suurta tarkkuutta. Lämpötilaeroon perustuvassa ohjauksessa tarvitaan hieman pitemmät kokeilujaksot kuin suhteellisten kosteuksien eroon perustuvassa ohjauksessa, koska viljamassan lämpötilan tasaantuminen kestää jonkin aikaa.

3.2.2.4. Absoluuttiseen kosteuteen perustuva ohjaus

Mittaamalla kuivausilman absoluuttinen kosteus ennen ja jälkeen viljakerrosta saadaan selville kuivausilman sisältämän vesimäärän muutos ilman kulkiessa viljan läpi. Vilja kuivuu aina, kun poistoilman absoluuttinen kosteus on suurempi kuin tuloilman. Yhteyttä viljan vesipitoisuuteen ei ole, mutta se ei ole edes tarpeen, koska vesipitoisuudella ei ole merkitystä ohjauslaitteen toimintaan. Mittaukseen tarvitaan anturit, jotka mittaavat sekä ilman lämpötilaa että suhteellista kosteutta kuivurin tulo- ja poistoilmasta. Antureiden absoluuttinen tarkkuus ei ole tärkeä, kunhan ne näyttävät keskenään samalla tavalla. Automatisointi on helppoa, koska ei tarvita käsin tehtäviä mittauksia. Absoluuttiseen kosteuteen perustuvia ohjauslaitteita ei ole myynnissä, joten kokemuksia niiden toimivuudesta ei ole. Periaatteessa etuna muihin ohjausperiaatteisiin nähden on hieman parempi ohjaustarkkuus, joka johtuu siitä, että kuivausilman lämpötilan vuorokausivaihtelu ei vaikuta haitallisesti. Toiminta vaatii kokeilujaksoja.

3.2.3. Automaattisten ohjauslaitteiden koetus

Osana tutkimusta oli kolmen erilaisella periaatteella toimivan kuivausilmapuhaltimen automaattisen ohjauslaitteen koetus. Koetuksessa olleet laitteet olivat Hygromat Midi 40, Ilmastori ja Kylmä-Ilmari.

3.2.3.1. Laitteiden toimintaperiaatteet

Automaattisten ohjauslaitteiden tärkein tehtävä on valikoida ne sääjaksot, jolloin kuivausilmapuhaltimia kannattaa käyttää. Ohjauslaitteilla voidaan ohjata myös lisälämpölaitteiden toimintaa. Høyn /8/ mukaan lisälämmön automaattiohjauksella saavutetaan merkittävää säästöä lämmitysenergian kulutuksessa verrattuna lisälämmön jatkuvaan käyttöön.

Hygromat Midi 40 -nimisen laitteen toiminta perustuu hygrostaatin käyttöön. Hygrostaatti tunnustelee ulkoilman suhteellista kosteutta ja käynnistää puhaltimen, kun suhteellinen kosteus alittaa asetusarvon.

Ilmastorissa on kaksi kuivausilman suhteellista kosteutta mittaavaa anturia. Toinen mittaa kuivausilman kosteutta pääilmakanavassa ja toinen viljakerroksen pinnalla. Automatiikan toiminta perustuu em. kosteuksien eroon. Niin kauan kuin pinta-anturin mittaama kosteus on suurempi kuin pääkanavassa olevan anturin mittaama arvo, puhaltimet saavat käydä. Lisäksi laitteessa on kokeiluautomatiikka, joka säännöllisin välein käynnistää puhaltimet kokeilujakson ajaksi, jotta kosteusero voidaan mitata.

Kylmä-Ilmarissa on kaksi lämpötila-anturia, joista toinen mittaa lämpötilaa laarin pohjalla ja toinen pinnalla. Automatiikan toiminta perustuu lämpötilaeroon. Kun ilman lämpötila pohjalla on korkeampi kuin pinnalla, puhaltimet saavat käydä. Laitteessa on myös samanlainen kokeiluautomatiikka kuin Ilmastorissa.

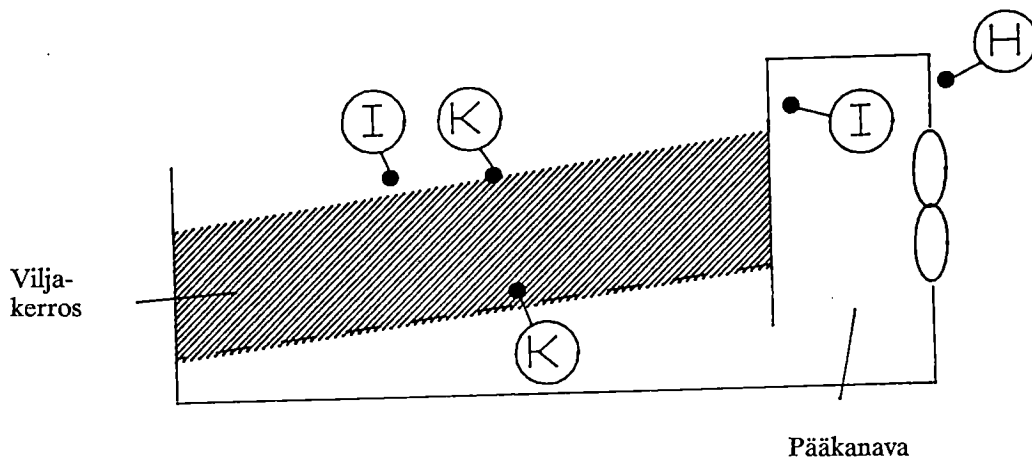
3.2.3.2. Ohjauslaitteiden toimintaperiaatteiden vertailut

Hygrostaatin käyttöön perustuvassa ohjauksessa vain osa ohjaustoimenpiteistä tapahtuu automaattisesti. Kuivauksen alkuvaiheessa on käytettävä suurta asetusarvoa jos halutaan käyttää koko kuivausaika hyväksi. Viljan kuivumisen edistyessä hygrostaatin asetusarvoa on muutettava pienemmäksi.

Viljan kuivumisella ja hygrostaatin toiminnan välillä ei ole yhteyttä, koska hygrostaatti mittaa suhteellista kosteutta vain tuloilmasta. Koska hygrostaatin kalibroiminen on vaikeaa ja viljan vesipitoisuuden mittaaminen epätarkkaa, on oikean toimintapisteen valinta sattumanvaraista. Toisaalta sateen sattuessa hygrostaatti pysäyttää kuivauspuhaltimen melko nopeasti.

Kun mitataan kuivausilman lämpötilan tai kosteuden muutosta saadaan epäsuora yhteys kuivumisen ja puhaltimien käynnin välille. Vaikka viljan vesipitoisuuden muutosta ei tiedetäkään, tiedetään ainakin kuivausilman laadussa tapahtunut muutos. Jos viljakerros on ohut, olosuhteiden muutoksesta aiheutuva lämpöenergian siirtyminen viljasta ilmaan tai päinvastoin on merkityksetöntä puhaltimien ohjauksen kannalta. Kun mitataan lämpötila- tai kosteuseroa ei antureiden absoluuttinen tarkkuus ole merkityksellinen, kun-

H = Hygromat
 I = Ilmastori
 K = Kylmä-Ilmari



Kuva 16. Ohjauslaitteiden anturien sijainti kuivurissa.

han niiden suhteellinen tarkkuus on hyvä. Säännöllistä seuranta ei tarvita. Riittää, kun satunnaisesti käydään mittaamassa viljan kosteus ja katsomassa, että kaikki on kunnossa.

3.2.4. Automaattiselle ohjauslaitteelle asetettavat vaatimukset

Kokeiden aikana havaittiin, että ohjauslaitteille tulee asettaa joitakin toiminnallisia ja käyttöön liittyviä vaatimuksia. Seuraavassa on esitetty niistä tärkeimmät:

- automaatti ja käsikäytön valintakytkin
- toiminta perustuu viljan vesipitoisuuden muutokseen joko suoraan tai välillisesti siten, että laite seuraa ilman suhteellisen kosteuden tai lämpötilan muutosta
- mitattavan suureen osoitus: jos esimerkiksi mitataan lämpötilaeroa, tarvitaan lämpötilaeron tai tulo- ja poistoilman lämpötilan osoitus
- selkeä toimintatilan osoitus: merkkivalo, joka ilmoittaa mitä kulloinkin tapahtuu
- helppokäyttöinen toiminta-arvojen muuttamismahdollisuus, esimerkiksi kytkin, jolla voidaan valita kuivaustapa:
 - erittäin taloudellinen silloin, kun kuivausolosuhteet ovat hyvät (puhaltimet käyvät vain kuivumisen ollessa voimakasta)

- taloudellinen silloin, kun olosuhteet ovat normaalit
- kaikki kuivaukseen suinkin soveltuvat jaksot hyväksi käyttävä (esim. myöhään syksyllä)
- vuorokausikello sitä varten, että voidaan pysäyttää puhaltimet esimerkiksi yön ajaksi.
- ohjaus lisälämpölaitteelle

3.2.5. Automaattiohjauksen edut

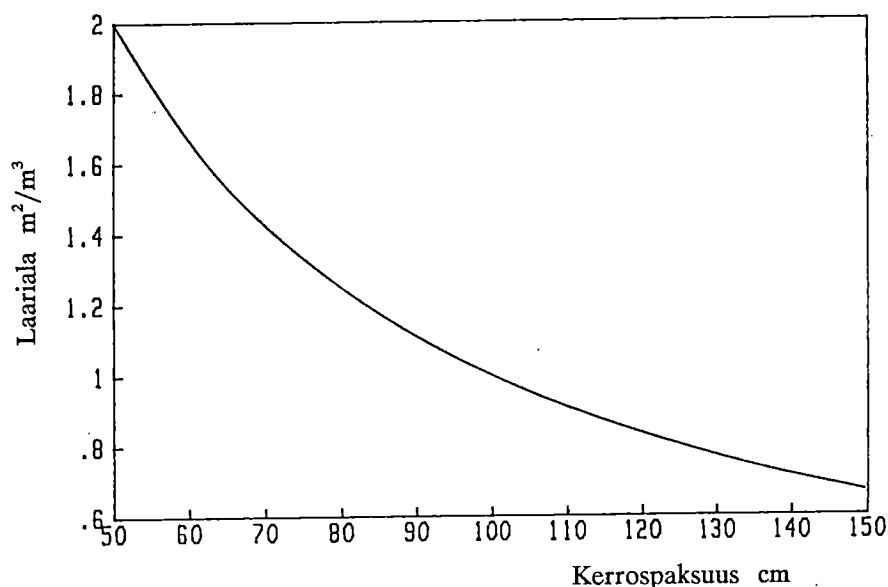
Automaattisten ohjauslaitteiden tärkein etu käsiohjaukseen nähden on vähentynyt valvontatyön osuus. Laite huolehtii kuivauspuhaltimen käynnistyksestä ja pysäytyksestä, jolloin kuivurilla ei välttämättä tarvitse käydä joka päivä. Hygromatia käytettäessä on kuitenkin laitteen asetusarvoa käytävä muuttamassa tarpeen mukaan. Toinen saavutettava etu on se, että kuivaukselle soveliaat sääjaksot tulevat tarkemmin käytetyiksi: automaattiohjausta käytettäessä puhaltimen käyntiaika yleensä lisääntyy. Ohjauslaitteet soveltuvat hyvin käytettäväksi kylmäilmakuivauksessa.

Koetuksessa olleita ohjauslaitteita ei ole varsinaisesti suunniteltu ohjaamaan lisälämpölaitetta, vaikka sellainen niihin voidaankin yleensä kytkeä. Lisälämpölaitteen kunnolliseen ohjaukseen tarvitaan kaksi tuloilma-anturia, joista toinen ohjaa lisälämpölaitetta ja toinen sekä lisälämpölaitetta että puhallinta. Ohjaus voitaisiin toteuttaa esimerkiksi kahta hygrostaattia käyttäen seuraavasti. Ensimmäisellä hygrostaatilla hoidetaan lisälämpölaitteen käynnistys ja pysäytys. Toinen hygrostaatti kytketään siten, että se ohjaa sekä puhallinta että lisälämpölaitetta. Tällöin voidaan ilman suhteelliselle kosteudelle asettaa kaksi raja-arvoa, joista alemman (1. hygrostaatti) ylittyessä lisälämpölaitte käynnistyy ja ylempään (2. hygrostaatti) ylittyessä sekä puhallin että lisälämpölaitte pysähtyvät. Raja-arvot asetetaan viljan vesipitoisuuden mukaan. Esimerkiksi loppukuivauksessa kuivaus lisälämmöllä öisin on epätaloudellista ja usein hyvin tehotonta. Tällöin voitaisiin ylempi raja-arvo asettaa niin, että kuivuri pysähtyy yön ajaksi.

3.3. Kylmäilmakuivurin mitoitus

3.3.1. Tarvittava laariala

Varastokuivurin tilavuus määritetään viljapinta-alan ja hehtaarisadon mukaan. Jos hehtaarisato on 3500 - 4000 kg, tilaa tarvitaan noin 6,5 m³/ha. Jos tilan koko viljasadon on mahdollista kuivuriin, kuivurin tilavuus (m³) on siis 6,5 (m³/ha) kertaa viljapinta-ala (ha). Toisaalta kuivurin tilavuus on laariala kertaa viljan kerrospaksuus, eli $V = A \cdot h$ (m³). Viljatilavuus suurenee kerrospaksuutta kasvatettaessa (kuva 17), mutta kuivurin toiminnan kannalta on edullista käyttää ohuita viljakerroksia. Kerrospaksuuden kasvaessa viljan pilaantumisriski kasvaa ja kuivurin kuivausnopeus pienenee, koska vastapaineen kasvaessa kuivausilmamäärä pienenee.



Kuva 17. Kerrospaksuuden vaikutus yhden viljakuution tarvitsemaan laarialaan.

Laariala on mitoittettava normaalia vaikeamman syksyn mukaan, koska kuivausaika ja käyttökelpoinen viljan kerrospaksuus vaihtelevat vuosittain. Sopiva kerrospaksuuden mitoitusarvo on noin 1 m. Mikäli kuivuriin on sovittava tilan koko viljamäärä, mutta sitä ei täytetä kerralla saadaan laarialaksi:

$$A = 6,5 \cdot A_p$$

jossa	A	kuivurin ala, m ²
	A _p	viljapinta-ala, ha
	6,5	kerroin, m ² /ha

Jos kuivuri täytetään kerralla on kerrospaksuuden oltava pienempi kuin 1 m. Sopiva kerrospaksuus on tällöin, viljan vesipitoisuudesta riippuen, 40-80 cm. Tällöin laarialan on oltava:

$$A = 8...16 * A_p$$

Pienemmän pään mitoitusta voidaan käyttää, jos hyvin vaikeina vuosina osa viljasta voidaan kuivata toisella kuivurilla tai vilja säilöä jollakin muulla menetelmällä.

Jos viljellään eri aikaan tuleentuvia viljalajikkeita on mahdollista, että laarialaa voidaan pienentää, koska vilja voidaan kuivata useassa erässä. Tällöin ainoastaan viimeksi kuivattu erä voidaan varastoida kuivurissa. Aikaisemmin kuivattua viljaa varten on oltava varastosiihot. Kahdessa tai kolmessa samansuuruisessa erässä kuivattaessa voidaan käyttää mitoitusta:

$$A = 2,5...4,5 * A_p$$

Pienemmän pään mitoitusta voidaan soveltaa lisälämpöä käytettäessä. On kuitenkin muistettava, että laarialan pienentäminen samalla huonontaa kuivurin vastaanottokapasiteettia. Ilman lisälämpöä ei voida normaalisti kuivata kahta erää enempää; huonoina vuosina tämäkin edellyttää lisälämmön käyttöä. Kolmen erän kuivaaminen syksyssä edellyttää yleensä aina lisälämmön käyttöä. Jos kuivauserät eivät ole samansuuruisia, mitoitus on arvioitava olosuhteiden mukaan. Lisälämpöä käytettäessä kuivausajan pituus pystytään arvioimaan melko tarkasti. Liiallista optimismia kuivausnopeuden suhteen on kuitenkin vältettävä. Kuivausnopeuden arviointia käsitellään lähemmin luvussa 6 sivulla 79.

3.3.2. Rakennuksen vaikutus mitoitukseen

Jos kuivuri rakennetaan vanhoihin tiloihin, määrää rakennus tavallisesti kuivurin koon. Vaikka kuivurin koosta ja viljan käsittelyn helppoudesta joudutaan tällöin usein tinkimään, jäävät kuivurin rakentamiskustannukset usein kuitenkin niin paljon alhaisemmiksi, ettei uuden rakennuksen tekemiseen ole aihetta. Jos laariala tällöin jää tarvetta pienemmäksi on selvitettävä, mitä tehdään sille viljalle, joka ei mahdu kuivuriin.

3.3.3. Puhaltimen ja muiden tekijöiden vaikutus mitoitukseen

Potkuripuhaltimilla ei juuri päästä yli 1000 Pa vastapaineisiin. Puhaltimien hyötysuhde on parhaimmillaan vastapainealueella 300-600 Pa. Suuremmilla vastapaineilla puhaltimien tuottama ilmamäärä laskee nopeasti. Yleisesti käytetyllä mitoitusilmamäärällä 550 m³/hm² tarkoittaa vastapaine-alue 300-600 Pa sitä, että kerrospaksuudeksi tulee 40-100 cm.

Puhaltimen liityntäteho asettaa joskus rajan kuivurin koolle. Puhaltimen moottorin sähköverkosta ottama teho on monasti selvästi suurempi kuin moottorin nimellisteho. Maaseudulla sähkölinjojen kestokyky voi tulla rajoittavaksi jo varsin pienillä liityntätehoilla ja linjojen vahvistaminen voi olla kohtuuttoman kallista. Suurissa kuivuriyksiköissä käytetään monesti dieselmoottoreita. Dieselistä saadaan mekaanisen tehon lisäksi lämpöä, joka tehostaa kuivausta merkittävästi.

4. Kylmäilmakuivuri lämminilmakuivurin puskurina

Puintisäät ovat usein epäsuotuisat. Harvat puintipäivät ja lyhyet poutajaksot on pystyttävä käyttämään tarkoin hyväksi. Tällöin ei puinti, varasto- tai kuivauskapasiteetin pienuus saisi olla viljakorjuuta rajoittavana tekijänä. Puintikapasiteetti ei yleensä muodostu ongelmaksi, vaan sadonkorjuun pulonkaula on useimmiten kuivaus.

Hyvien puintisäiden jatkuessa pitempään mutta jouduttaessa puimaan hyvin kosteaa viljaa syntyy lämminilmakuivurille hyvin usein ruuhkaa. Ei ole kuitenkaan taloudellisesti kannattavaa mitoittaa kuivuria kaikkein epädullisimpien puintiolojen mukaan. Kuivauskapasiteettia voidaan lisätä kuivuria suurentamatta rakentamalla lämminilmakuivurin yhteyteen kylmäilmakuivuri puskurivarastoksi. Tällöin on myös mahdollista jossakin määrin hyödyntää lämminilmakuivurin hukkalämpöä kylmäilmakuivurin lisälämpönä.

4.1. Puskurikuivuri

Puskurikuivurilla tarkoitetaan kylmäilmakuivuria tai tuuletettavaa varastoa, johon lyhytaikaisesti voidaan varastoida kosteaa viljaa odottamaan kuivausta lämminilmakuivurissa. Puskurikuivurina toimivassa kylmäilmakuivurissa voidaan myös kuivata viljaa, kun taas tuuletettavan varaston tarkoitus on pelkästään saada vilja säilymään siihen asti, että se ehditään kuivata lämminilmakuivurissa. Puskurikuivurin tilavuuden tulee olla vähintään 1 - 3 kertaa lämminilmakuivurin tilavuus. Parempi on, jos siihen sopii parin hyvän puintipäivän vilja.

Puskurikuivurin mitoitus on tilakohtainen ratkaisu. Siihen vaikuttavat tilan erityispiirteet, tuotantosuunta, viljalajit jne. Suurella viljatilalla, jolla viljellään paljon samaa viljalajia, tarvitaan suurempi puskurivarasto kuin karjatilalla, jonka tuotanto on monipuolista ja puinnit ajoittuvat pitemmälle ajalle. Viljatilalla kuivaukselle asetettavat vaatimukset ovat usein myös suuret.

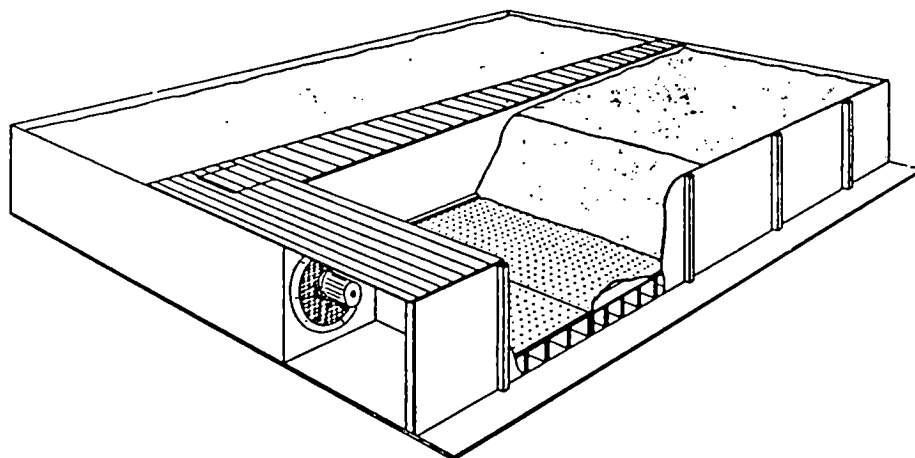
4.2. Puskurikuivurityypit

Puskurikuivurin tulisi olla lämminilmakuivurin yhteydessä siten, että lämminilmakuivurin elevaattoria ja kaatokuilua voidaan käyttää myös puskurikuivurin täyttöön ja tyhjennykseen. Parhaiten toimivaan ratkaisuun päästään, kun puskurikuivurin rakentaminen otetaan huomioon jo lämminilmakuivaamon suunnitteluvaiheessa. Valmiin pakettikuivaamon yhteyteen on vaikeaa jälkeinpäin rakentaa joustavasti toimivaa puskurivarastoa. Jos tilalle rakennetaan lämminilmakuivaamo ja sen yhteyteen puskurikuivuri, kannattaa hankkia kaksi elevaattoria. Lämminilmakuivuri voidaan täyttää ja tyhjentää nopeasti kahdella elevaattorilla. Puskurikuivuri voidaan täyttää yhdellä elevaattorilla, jolloin lämminilmakuivurin käyttöön jää toinen elevaattori, eikä sitä tarvitse pysäyttää puskurikuivurin täytön ajaksi.

Puskurivarasto on myös mahdollista sijoittaa lämminilmakuivaamon sisälle. Sopivia tyyppejä ovat tuuletussiilot, tuuletettava kaatosuppilo ja siilomallinen kylmäilmakuivuri. Lavakylmäilmakuivuria on vaikea sijoittaa lämminilmakuivaamon sisälle, koska se vaatii suuren lattiapinta-alan.

4.2.1. Perinteinen kylmäilmakuivuri

Tavallinen lavakylmäilmakuivuri (kuva 18) on erittäin käyttökelpoinen puskurivarastona. Puskurikäytössä voidaan käyttää suurempia kerrospaksuuksia kuin muuten on suositeltavaa. Suuria kerrospaksuuksia varten kuivuripuhallin on ylimitoitettava, jotta saadaan paksunkin viljakerroksen läpi menemään riittävän suuri ilmamäärä. Sopiva mitoitusvastapaine aksiaalipuhaltimelle on noin 750 Pa ja keskipakoispuhaltimelle noin 1000 Pa. Kerrospaksuuden ollessa 1,5 m 30 %:n vilja säilyy kuivurissa muutamia päiviä pilaantumatta. Tällöin esimerkiksi 30 m² puskurivarastoon mahtuu 150 hl:n lämminilma-kuivurin kolme kuivauserää.

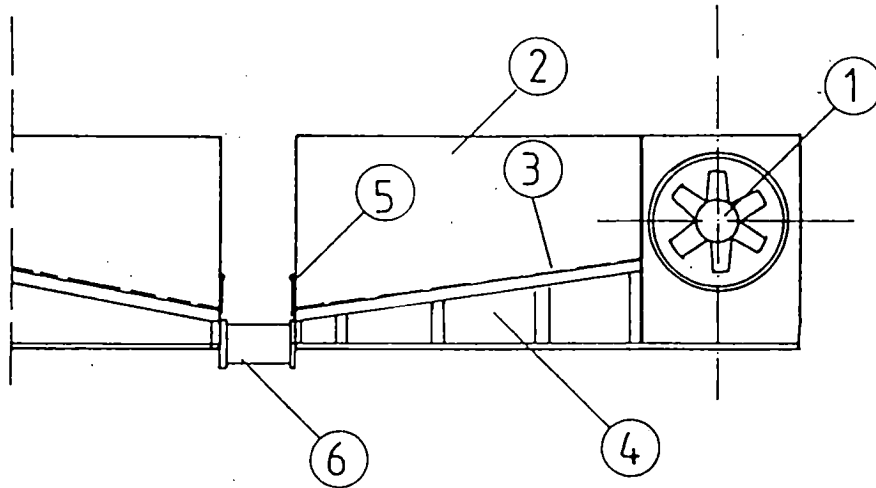


Kuva 18. Perinteinen kylmäilmakuivuri.

Mikäli kosteaa viljaa säilytetään kuivurissa useita päiviä, viljan kuntoa on seurattava jatkuvasti. Kuorettuma, jos sellaista on päässyt muodostumaan, on rikottava ja viljaa on sekoitettava tarvittaessa. Sekoittaminen käy esimerkiksi pitkäpiikkisellä haravalla, talikolla tai porakoneeseen kytkettävällä sekoitusruuvilla.

Lavakylmäilmakuivurin tyhjennys on helpoin koneellistaa tekemällä lavoihin kaltevat pohjat suomulevystä. Kuivuri tyhjennetään osasto kerrallaan käyttämällä kuivausilmapuhallinta. Voimakas, osittain vaakasuora ilmavirta kuljettaa viljan vaakakuljettimelle, joka kuljettaa viljan lämminilma-kuivurin kaatosuppiloon (kuva 19). Puhallustyhjennys on halpa toteuttaa, koska se ei välttämättä vaadi kalliita kuljettimia. Lisäksi se on nopea, varmatoiminen ja

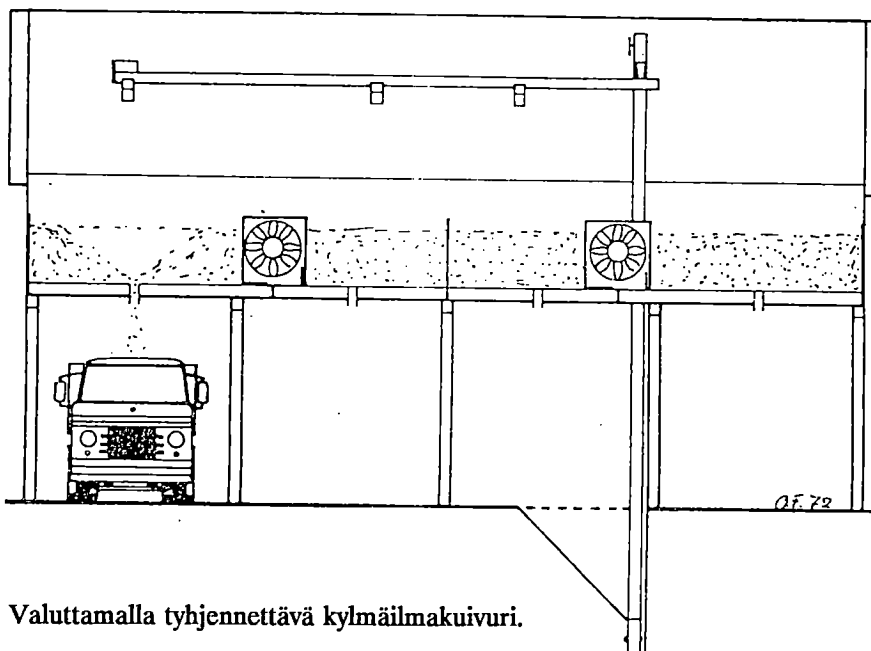
siinä on vähän käsityötä. Puhallustyhjennyksen haittana on ilmavirran aiheuttama voimakas pölyäminen. Kuivuri olisikin suunniteltava siten, ettei siellä tyhjennyksen aikana tarvitse olla.



1 = puhallin, 2 = kuivauslaari, 3 = suomulevy, 4 = ilmatila, 5 = tyhjennysluukku, 6 = viljankuljetin.

Kuva 19. Puhaltamalla tyhjennettävä kylmäilmakuivuri.

Mikäli lavojen alle pääsee ajamaan, voidaan lavojen pohjiin tehdä tyhjennysreikiä, joista vilja valutetaan esimerkiksi perävaunuun (kuva 20). Menetelmän haittana on se, että viljan siirto puskurikuivurista lämminilmakuivuriin on monivaiheinen ja hidas.

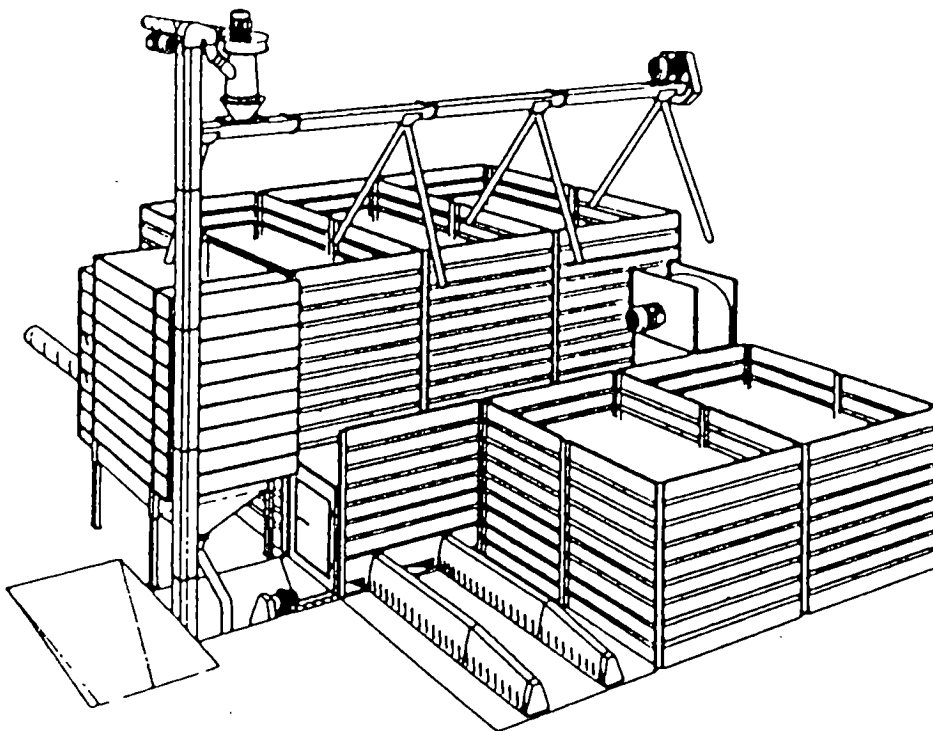


Kuva 20. Valuttamalla tyhjennettävä kylmäilmakuivuri.

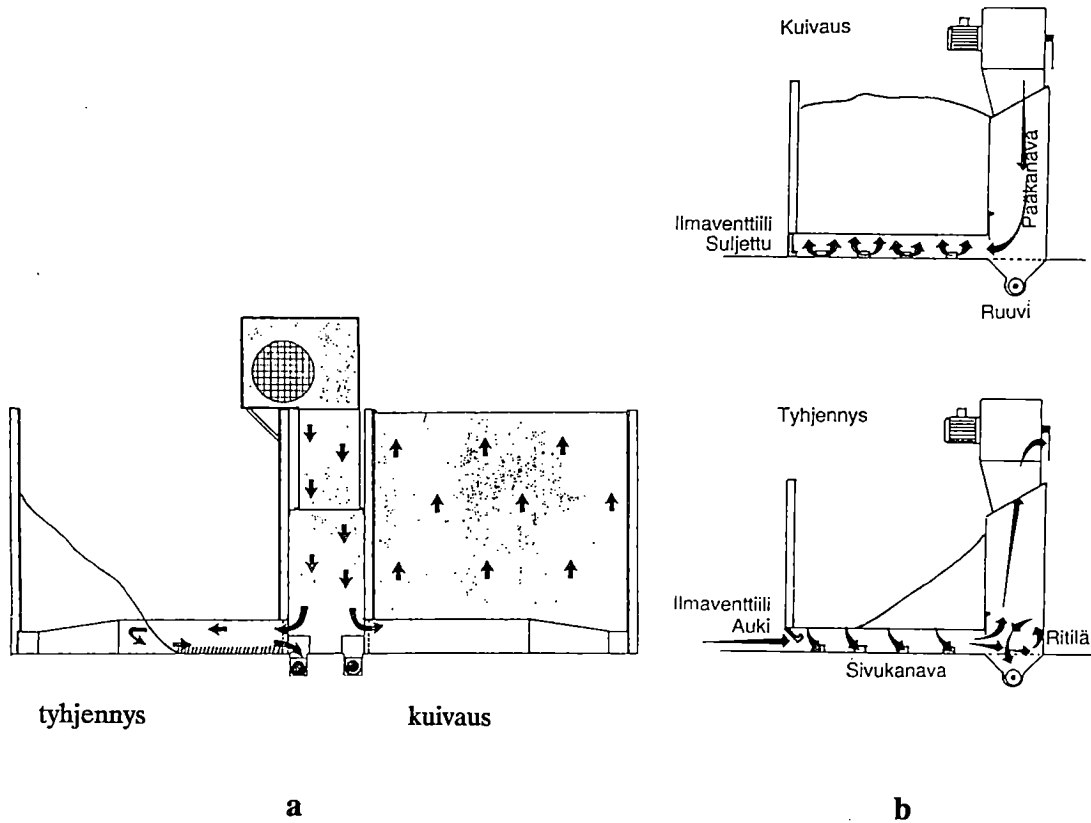
Tyhjennykseen voidaan käyttää myös imu-painelietsoa, jonka pölyhaitat ovat edellä mainittuja pienemmät. Lietso on suhteellisen hidas ja se sitoo yhden henkilön imupään käyttöön. Etuna on se, että lietso on suhteellisen helppo siirtää paikasta toiseen.

4.2.2. Korkeat varastokuivurit

Ns. ruotsalaismalliset kylmäilmakuivurit ovat elementtirakenteisia varastokuivureita, joissa viljakerroksen paksuus vaihtelee 1,5 - 4 m:iin. Paksun viljakerroksen ansiosta saadaan pienelle alalle sopimaan paljon viljaa. Suuren kerrospaksuuden takia kuivureissa käytetään keskipakopuhaltimia. Kuivureissa on kaatosuppilo, josta elevaattori nostaa viljan vaakakuljettimelle, joka jakaa viljan siiloihin (kuva 21). Kuivuri tyhjennetään joko puhaltamalla tai imemällä vilja pääkanavassa olevalle kuljettimelle (kuva 22). Imulla tapahtuvan tyhjennyksen etuna on vähäinen pölyäminen. Kun kuivuri on lämminilmakuivurin yhteydessä, erillistä kaatosuppiloa ja elevaattoria ei tarvita.



Kuva 21. Eräs markkinoilla oleva ruotsalaismallinen varastokuivuri.



Kuva 22. Varastokuivurin tyhjennys: a) puhaltamalla b) imemällä.

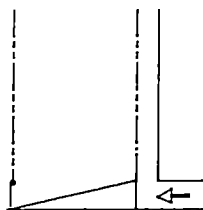
Kuivaus tapahtuu kuten tavallisessa lavakuivurissa. Suuresta kerrospaksuudesta johtuen viljaa on sekoitettava kierrättämällä sitä silosta toiseen. Kierrättämistä varten kuivurissa on oltava yksi tyhjä silo. Kierrättämisen tarkoituksena on tasoittaa vesipitoisuuseroja ja estää kuorettuminen. Viljan kosteuden ollessa n. 30 % on viljaa kierrätettävä vähintään kerran vuorokaudessa. Mikäli vilja on tätäkin kosteampaa, kierrättäminen vaikeutuu viljan huonon juoksevuuden takia.

Lämminilmakuivurissa kuivatun viljan voi jäähdyttää varastokuivurissa, mikä lisää lämminilmakuivurin kapasiteettia. Näin menetellen voidaan myös viljan loppukosteus lämminilmakuivurissa jättää korkeammaksi, sillä vilja säilyy

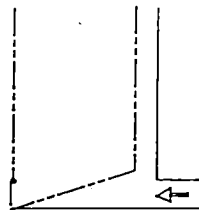
varastokuivurissa pitkiäkin aikoja, kunhan puhaltimia käytetään aina sään ollessa hyvä. Loppukuivaus voidaan tehdä puintien jälkeen lämminilmakuivurilla tai seuraavana keväänä kylmäilmakuivurilla.

4.2.3. Pystykuivuri

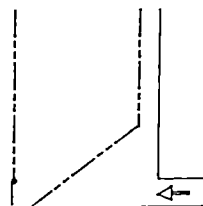
Pystykuivuri (luku 5, s. 74) vaatii vähän lattiapinta-alaa, joten se voidaan rakentaa myös lämminilmakuivaamon sisälle. Tämä mahdollisuus kannattaa ottaa huomioon lämminilmakuivaamon suunnittelussa. Siilot voi täyttää lämminilmakuivurin elevaattorilla. Tyhjennystä varten voi siilossa olla esimerkiksi kalteva pohja, tai siilo voidaan nostaa irti maasta (kuva 23). Siilosta vilja valutetaan joko suoraan kaatosuppiloon tai siirretään sinne vaakakuljettimella.



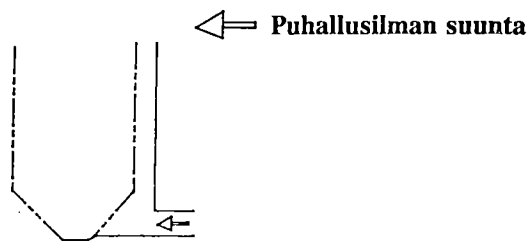
1) Kalteva pohja. 10-20° kallistus helpottaa huomattavasti tyhjennystä.



2) Puhallustyhjennys. Kuivauspuhallin tyhjentää kuivurin.



3) Vinoa pohja. Vilja valuu ulos omalla painollaan. Nopea ja helppo tyhjennys. Siilon tilavuus pienenee jonkin verran.



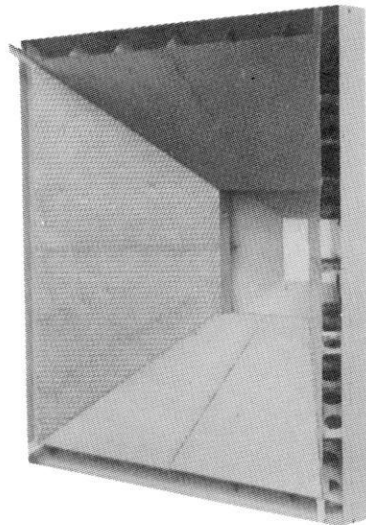
4) Kartiopohja. Muuten kuin edellinen kohta.

Kuva 23. Erilaisia pystykuivurin pohjaratkaisuja.

Pystykuivuri on sitä halvempi mitä suurempia ja korkeampia siloja käytetään. Viljan vesipitoisuus kuitenkin rajoittaa sekä siilon läpimittaa että korkeutta. Läpimitalla tarkoitetaan tässä siilon sivuseinän etäisyyttä ilmakehänavasta. Siilon läpimitaan pätevät samat säännöt kuin perinteisessä kylmäilmakuivurissa kerrospaksuuteen, mikä merkitsee puskurikäytössä vähän yli metrin läpimittaa. Pyöreän siilon tapauksessa halkaisija on tällöin n. 3 m, kun siilon keskellä olevan ilmakehän läpimitta on 0,5 m. Sopiva siilon korkeus Suomen oloissa on 4 - 6 m. Pystykuivurin ongelmana on viljan epätasainen kuivuminen. Jotta vilja pystykuivurissa kuivuisi tasaisesti on sitä kierrätettävä. Kierrätys vähentää myös viljan kuorettumista ja määrän viljan takertumista kuivurin seinämiin.

4.2.4. Tuuletettavat silot

Tuuletussiilolla tarkoitetaan matalaa, yleensä kaatosuppilon yläpuolelle sijoitettua, varastosiiiloa, jossa on kuvan 24 mukainen ilmapohja. Siilon tilavuus on tavallisesti yksi kuivauserä. Tuuletussiilo sopii hyvin viljan hitaaseen jäädyttämiseen, koska tällöin voidaan käyttää suurta kerrospaksuutta ja pienitehoista puhallinta. Kun vilja jäädytetään kuivurin sijasta tuuletussiilossa, voidaan lämminilmakuivurissa kuivata jo seuraavaa viljaerää. Kuivauskapasiteetti lisääntyy keskimäärin 10 %. Valvontatyö ja viljan siirtotyöt lisääntyvät jonkin verran. Mikäli tuuletussiiloa käytetään kostean viljan säilytykseen tarvitaan noin 5 kW keskipakoispuhallin, jotta viljan lämpeneminen saataisiin estettyä. Vaikka puhallin olisi tehokas ei tuuletussiilossa tulisi säilyttää vesipitoisuudeltaan yli 30 % viljaa homehtumisvaaran takia yli vuorokautta. Jos viljaa halutaan säilyttää pitempi aika tuuletussiilossa, on kerrospaksuuden oltava alle 1,5 m tai viljaa on sekoitettava kierrättämällä sitä elevaattorilla. Jos viljaa ei välillä kierrätetä, voi kostea vilja helposti holvautua siiloon. Jos kerrospaksuus on 1,5 m, tarvitaan keskikokoisessa lämminilmakuivurissa yhtä kuivauserää kohti kaksi tuuletussiiloa.



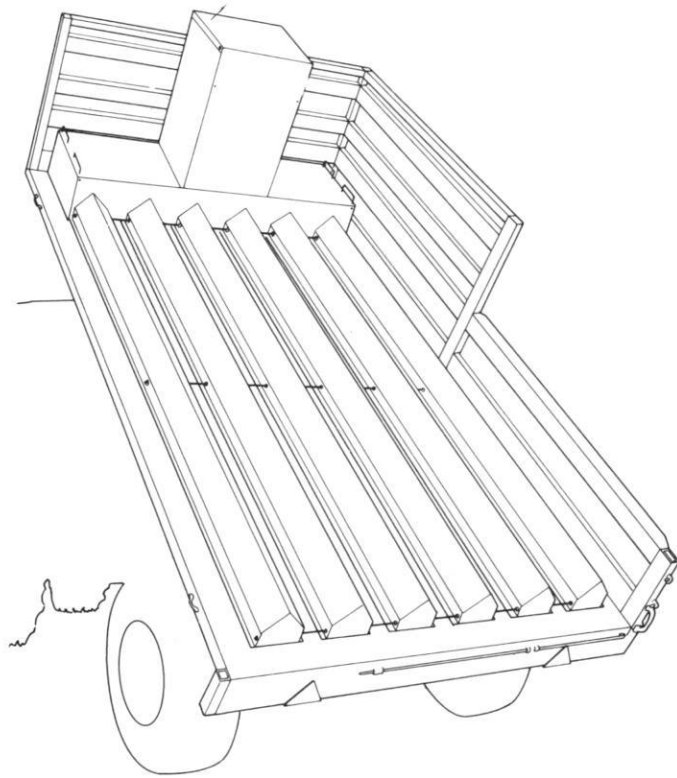
Kuva 24. Eräs tuuletussiloissa käytettävä ilmapohja.

Kaatosuppilosta saadaan "tuuletussiilo" tekemällä ilmanakanat kaatosuppilon pohjaan. Tuuletus ei toimi parhaalla mahdollisella tavalla, koska ilman jakautuminen on huono, mutta vilja säilyy kuitenkin paremmin kuin ilman tuuletusta.

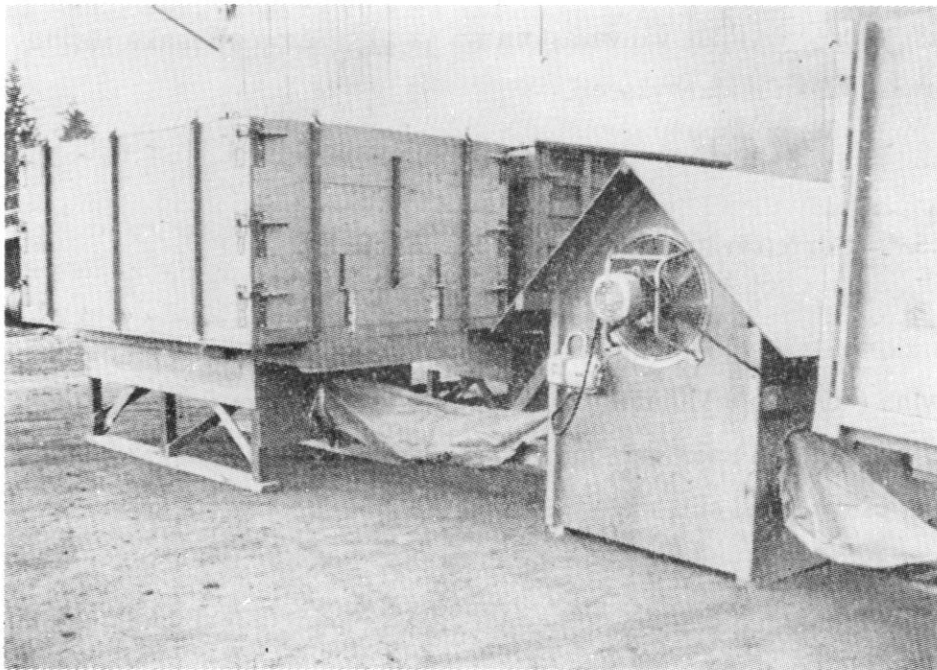
Tuuletussiloja voi olla samassa lämminilma-kuivaamossa useita, esimerkiksi kaksi tuoreen viljan välivarastointiin ja yksi lämminilma-kuivurilta tulevan kuuman viljan jäähdytykseen.

4.2.5. Siirrettävät kuivurit

Markkinoilla on jo jonkin aikaa ollut perävaunuun sijoitettava kylmäilma-kuivuri (kuva 25). Tällainen kuivuri soveltuu hyvin puskurivarastoksi varsinkin, jos tilalla on enemmän kuin yksi perävaunu. Vastaavanlaisen kuivurin voi tehdä esimerkiksi siirtolavoille kuten kuvassa 26.



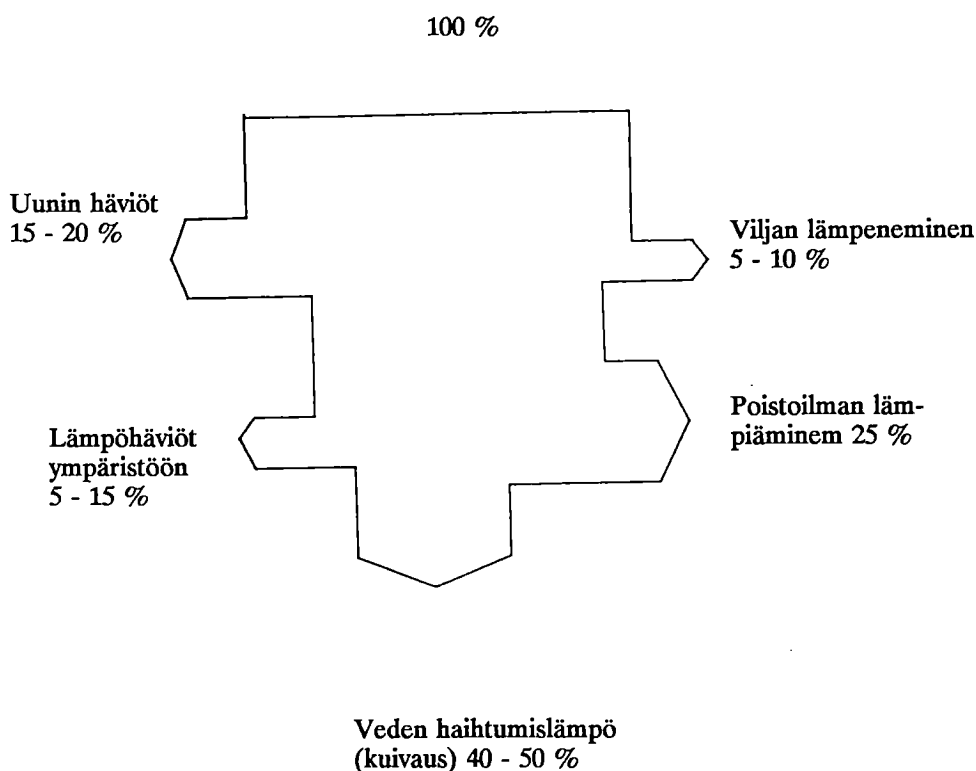
Kuva 25. Peräkärryn lavalle sopiva puskurikuivuri.



Kuva 26. Siirtolavoista tehty puskurikuivuri /9/.

4.3. Lämminilmakuivurin hukkalämmön hyödyntäminen kylmäilmakuivurin lisälämpönä

Kylmäilmakuivurin kuivauskykyä voidaan parantaa käyttämällä lisälämpöä. Lämminilmakuivurin uunin tehosta menetetään aina osa erilaisina lämpöhäviöinä. Lämminilmakuivurin tyypilliset lämpöhäviöt on esitetty kuvassa 27. Lämmin- ja kylmäilmakuivurin yhteiskäytössä voidaan poistoilman energiasisältöä ja lämpöhäviöitä ympäristöön ts. kuivurirakennuksen sisälle hyödyntää kylmäilmakuivurin lisälämpönä.



Kuva 27. Lämminilmakuivurin sankeydiagrammi /10/.

Lämminilmakuivurin poistoilman energiaa voidaan hyödyntää poistoilmakanavaan liitettävällä lämmönsiirtimellä. Se siirtää lämpöä lämminilmakuivurin poistoilmasta kylmäilmakuivurin puhallusilmaan. Kylmäilmakuivurin puhallusilman keskimääräinen lämpötila on alhainen verrattuna lämminilmakuivurin poistoilmaan. Siksi yksinkertaisellakin lämmönsiirtimellä pitäisi päästä hyviin tuloksiin.

Lämminilmakuivurin lämpöhäviöitä voidaan hyödyntää myös ottamalla kylmäilmakuivurin puhallusilma lämminilmakuivaamon sisältä, mieluummin rakennuksen yläosista. Peltikattoinen lämminilmakuivuri toimii tällöin myös auringonkeräimenä.

4.3.1. Lämmönsiirtimelle asetettavat vaatimukset

Lämminilmakuivurin poistoilman kosteus ja pölyisyys muodostavat merkittävän ongelman lämmönsiirtimen toiminnassa. Lämmönsiirtimen ohuet ilmakehanavat tukkeutuvat tällaisissa olosuhteissa nopeasti. Siirtimen eteen voidaan asentaa pölynsuodatin, mutta käytäntö on osoittanut myös suodattimet helposti tukkeutuviksi. Kaupalliset, hyvän hyötysuhteen omaavat lämmönsiirtimet ovat lisäksi usein niin kalliita, että niistä saatava hyöty peittyy vaihtimen hintaan.

Lämmönsiirtimen rakenteen tulee olla niin yksinkertainen, että se voidaan rakentaa tilalla omatoimisesti. Lämmönsiirrin ei saa olla arka tukkeutumaan ja sen täytyy olla helposti puhdistettavissa. Tästä seuraa, että lämmönsiirtimen ilmakehanavat eivät saa olla kapeita. Nämä vaatimukset huomioon ottaen ei kovin korkeata hyötysuhdetta voida saavuttaa, mutta se ei ole tässä tapauksessa tarpeenkaan.

4.3.2. Kokeet omatekoisella lämmönsiirtimellä

Omatekoisen lämmönsiirtimen toimintaa sekä ilmanottoa lämminilmakuivaamon sisältä kokeiltiin VAKOLAssa syksyllä 1987.

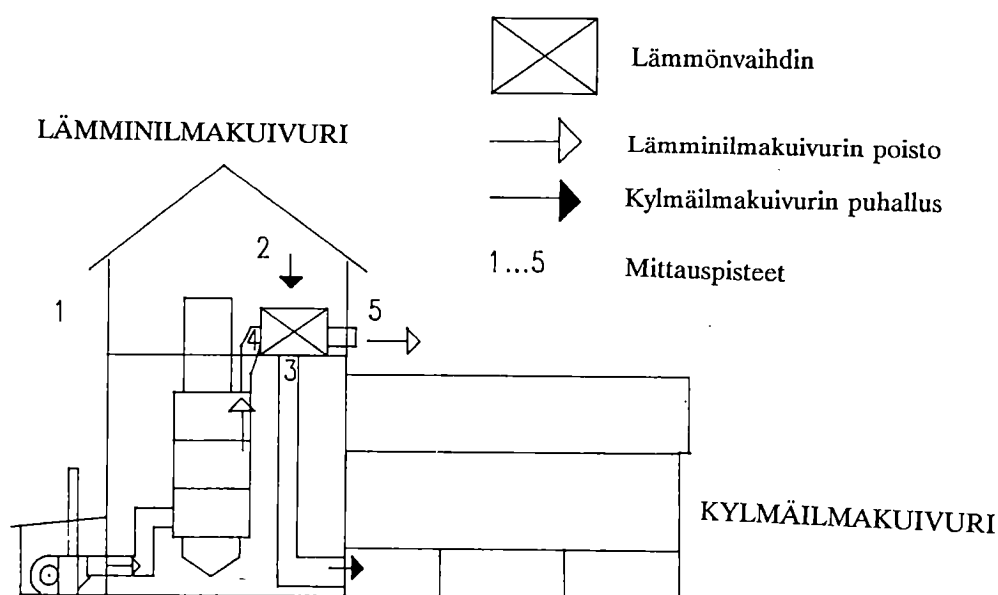
VAKOLAssa on 210 hl:n lämminilmakuivuri yhdistettynä noin 100 m²:n kylmäilmakuivuriin. Kylmäilmakuivuria käytetään lämminilmakuivurin puskurikuivurina.

Kokeita varten rakennettiin lämminilmakuivaamon yläosaan yksinkertainen putkilämmönsiirrin. Tavoitteena oli halpa ja yksinkertainen rakenne. Lämmönsiirrin tehtiin tavallisista kierresaumaputkista (ϕ 100 mm) ja filmivanerista. Lämminilmakuivurin poistoilma johdettiin siirtimen putkia pitkin suoraan

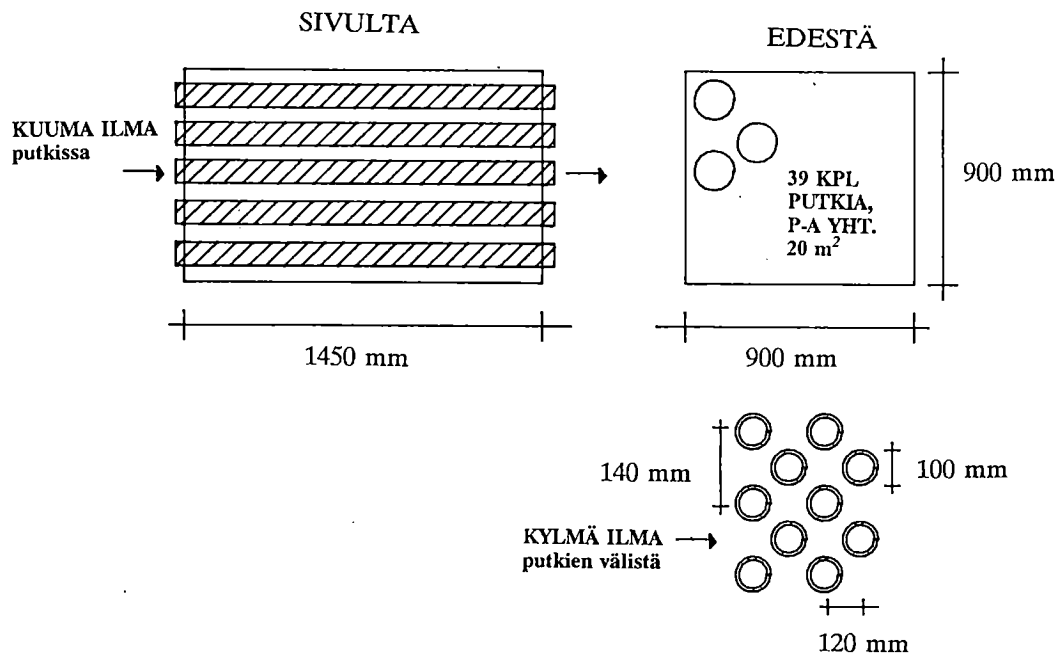
ulos. Kylmäilmakuivurin tuloilma otettiin lämminilmakuivaamon yläkerrasta, imettiin siirtimen putkien välistä ja johdettiin ϕ 0,6 m kierresaumaputkella kylmäilmakuivuriin rakennettuun 12 m² koelavaan. Mitta-anturien tarkastusta ja vaihtimen putkien puhdistusta varten lämminilmakuivurin poistoilmakanaavaan lisättiin sulkupellit, joiden avulla kuivurin poistoilma voitiin tarvittaessa ohjata suoraan ulos. Kuvassa 28 on esitetty lämmönsiirtimen sijoitus ja kuvassa 29 vaihtimen rakenne. Lämmönsiirtimen rakentamiseen käytetyt putket ja levyt maksoivat n. 1500 mk.

Lämmönsiirtimen toimintaa seurattiin lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksin. Mittausantureina käytettiin termoelementtejä ja mittauslaitteena tiedonkeruulaitteistoa, joka talletti mittausarvot levykkeille. Joka kuudes minuutti mitattiin seuraavat arvot (mittauspisteet kuvassa 28):

1. Ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus
2. Lämminilmakuivaamon sisäilman lämpötila ja suhteellinen kosteus
3. Kylmäilmakuivurin tuloilman lämpötila
4. Lämminilmakuivurin poistoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus ennen vaihdinta
5. Lämminilmakuivurin poistoilman lämpötila vaihtimen jälkeen.



Kuva 28. Lämmönsiirtimen sijoitus kuivurien väliin ja mittauspisteet.



Kuva 29. Lämmönsiirtimen rakenne.

4.3.2.1. Mittaustulokset

Kuivuriuunin teho oli noin 300 kW ja puhaltimen ilmamäärä 14000 m³/h. Kylmäilmakuivuriin puhallettiin 6500 m³/h ilmaa eli 540 m³/hm². Puhallin oli käynnissä jatkuvasti. Kokeen aikana lämminilmakuivurin poistoilman lämpötila oli keskimäärin 28 °C. Keskimääräinen ulkoilman lämpötila oli 9 °C ja suhteellinen kosteus 85 %. Luvut ovat vuorokausikeskiarvoja. Lämminilmakuivurin ollessa käynnissä lämpötila kuivaamorakennuksen sisällä oli keskimäärin 16 °C ja suhteellinen kosteus 55 %. Ilma lämminilmakuivaamon sisällä oli siis keskimäärin 7 astetta lämpimämpää ja 30 %-yksikköä kuivempaa kuin ulkoilma. Lämmönsiirtimessä ilman lämpötila nousi 1,5 - 2 astetta ja suhteellinen kosteus pieneni 5 %-yksikköä. Kylmäilmakuivurin tuloilman lämmön nousu oli siis parhaimmillaan 7+2 °C eli 9 °C.

Lämmönsiirtimen energiahyötysuhteeksi muodostui näissä olosuhteissa 1 - 2 %. Ulko- ja sisälämpötilan ero oli suurimmillaan ja lämmönsiirtimen hyötysuhde parhaimmillaan öisin, jolloin ulkolämpötila laski lähelle 0 °C. Läm-

minilmakuivurin täytön tai tyhjennyksen aikana kuivaamon sisälämpötila laski nopeasti lähelle ulkolämpötilaa nousten kuitenkin uudestaan heti kuivurin käynnistämisen jälkeen. Ilmanotto lämminilmakuivurin sisältä antoi hyötyä noin 15 kW, kun lämmönsiirtimestä saatiin 3 - 4 kW.

Lämmönsiirtimessä ei ollut pölysuodatinta. Siirrin ei kuitenkaan tukkeutunut vaikka sitä käytettiin yhtäjaksoisesti 2 viikkoa. Putkistoon kerääntyi kuitenkin pölyä, joten siirrintä oli säännöllisesti puhdistettava. Siirtimen rakenteen on oltava sellainen, että putket voidaan helposti puhdistaa. Puhdistus voidaan tehdä esimerkiksi nuohousharjalla.

Kylmäilmakuivurin lavassa kuivattiin ruista, ohraa ja kauraa. Puintivesipitoisuus oli keskimäärin 35 %. Käytetty kerrospaksuus oli rukiilla 0,5 m ja ohralla sekä kauralla noin yksi metri. Metrin viljakerros aiheutti keskimäärin 640 Pa vastapaineen. Viljaa kuivattiin lavalla 4 - 5 päivää, minkä jälkeen loppukuivaus tehtiin lämminilmakuivurissa. Ruiserä kuivui neljässä päivässä 16 % vesipitoisuuteen. Kosteusero lavan pohjan ja pinnan välillä oli tällöin pienempi kuin yksi %-yksikkö. Vastaavassa ajassa ohra- ja kauraerät kuivuivat n. 25 % vesipitoisuuteen, jolloin vilja kosteus lavan pohjalla oli 13 % kun taas vilja lavan pinnalla oli vielä puintikostea.

Varsinkin paksummat viljakerrokset kuorettuivat. Kauraerään muodostui parin päivän kuivauksen jälkeen tiivis kuori, joka lisäsi vastapainetta 10 % ja pienensi puhaltimen ilmamäärää tässä tapauksessa 30 %. Tilanne korjaantui normaaliksi, kun viljaa sekoitettiin sekoituskairalla. Kylmäilmakuivurin peltikattoon tiivistyi vettä, joka sitten "satoi" takaisin lavaan. Hometta ei havaittu.

4.3.2.2. Johtopäätöksiä

Lämmönsiirtimen hyötysuhde jäi tässä kokeessa pieneksi. Tämä johtui osittain lämminilmakuivurin poistoilman lämpötilan alhaisuudesta ja lämminilmakuivaamon sisäilman lämpimyydestä. Kylmäilmakuivurin tuloilman lämmön nousu lämmönsiirtimessä jäi suhteellisen pieneksi. Suurempi lämpötilaero olisi todennäköisesti parantanut hyötysuhdetta. Tilannetta olisi myös

parantanut ohuemman putken tai alumiiniputken käyttö siirtimessä. Tämä luonnollisesti lisäisi vaihtimen hintaa.

Kylmäilmakuivurin kuivausilman otto lämminilmakuivurin sisältä on yksi viljankuivauksen energiansäästövaihtoehto. Tässä kokeessa käytetty ilmamäärä oli kuitenkin melko pieni. Jos ilmamäärä on suurempi lämmön nousu jää pienemmäksi. Tällöinkin ilma on kuivauksen kannalta selvästi parempaa kuin ulkoilma. Lämminilmakuivauksen loppu- ja varsinkin jäähdytysvaiheessa voitaisiin lämminilmakuivurin poistoilmaa johtaa suoraan kylmäilmakuivuriin.

Jos tilalle rakennetaan sekä lämmin- että kylmäilmakuivuri, olisi jo suunnitteluvaiheessa otettava huomioon mahdollinen lämminilmakuivurin häviöiden hyödyntäminen. Lämmönvaihtimen ja ilmaputkien sijoitus kuivurien väliin on jälkikäteen vaikeaa. Jos kuivurit ovat vierekkäin, ilmaputkiston sijoitus onnistuu ja kustannukset jäävät kohtuullisiksi, saavutetaan joka tapauksessa hyötyä. Kustannukset on suhteutettava saatavaan hyötyyn, joka tässä kokeessa oli 15-19 kW lisälämpöä kylmäilmakuivuriin.

5. Pystykuivuri

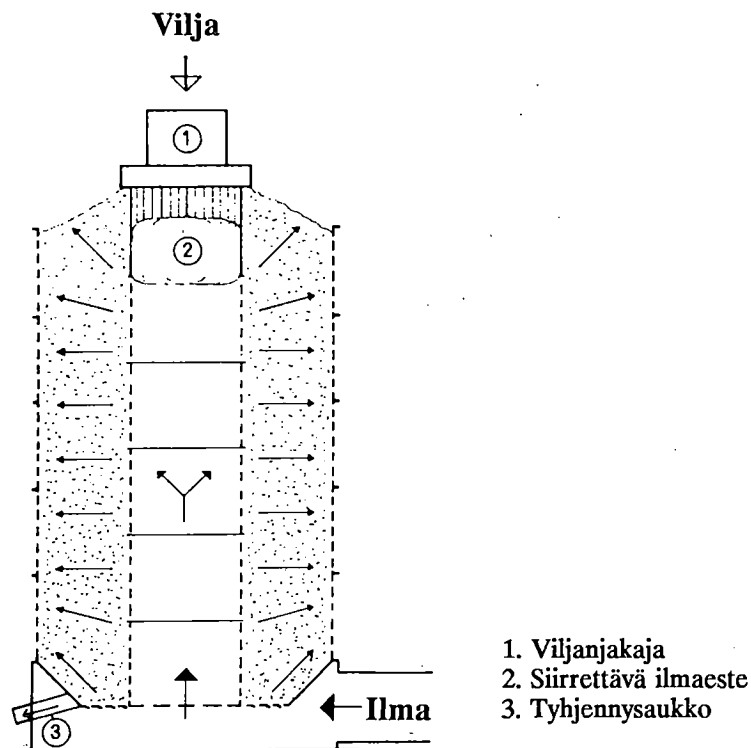
Yleisin kylmäilmakuivurityyppi Suomessa on lavakuivuri. Sen etuja ovat joustavuus ja edullisuus. Haittapuolina voidaan pitää suurta lattiapinta-alan tarvetta ja viljan siirron hankaluutta. Eräs ratkaisu tähän ongelmaan voisi olla siilomallinen kylmäilmakuivuri eli pystykuivuri.

5.1. Pystykuivurin rakenne ja toimintaperiaate

Pystykuivuri on joko pyöreä tai nelikulmainen siilo, jonka korkeus vaihtelee kolmesta kuuteen tai jopa kymmeneen metriin. Siilon halkaisija on yleensä vähintään kolme metriä. Pystykuivurin ulkoseinät tehdään ilmaa läpäisevästä materiaalista, esimerkiksi reikälevystä. Siilon keskellä on reikälevystä tehty ilmanava. Ilmanavan yläpäässä on ilman karkaamista estämässä siirrettävä este (kuva 30).

Pystykuivuria voidaan ajatella pystyyn nostettuna lavakuivurina. Pystykuivurissa viljakerroksen paksuus ei riipu silon korkeudesta vaan sen halkaisijasta. Näin voidaan tehdä korkeita siloja, joissa on "ohut viljakerros". Verrattuna perinteiseen kylmäilmakuivuriin pystykuivuri vaatii vähän lattiapinta-alaa ja sen täyttö ja tyhjennys on helpompi koneellistaa. Monimutkaisemmasta rakenteesta johtuen pystykuivuri on jonkin verran perinteistä lavakuivuria kalliimpi.

Ulkomailla käytössä olevat pystykuivurityypit eivät kuitenkaan sellaisenaan sovellu Suomen oloihin. Korkeassa silossa viljaan kohdistuva paine kasvaa alaspäin mentäessä. Tämä aiheuttaa suuremman vastapaineen silon alaosaan, josta tällöin menee vähemmän ilmaa läpi kuin silon yläosasta /11/. Mitä kostempaa vilja on sitä tiukempaan se pakkautuu kuivurissa. Yli 25 % kostean viljan kuivaaminen korkeassa pystykuivurissa on ongelmallista. Koste-an viljan kuivaaminen onnistuu paremmin käyttämällä matalahkoja, kolmesta viiteen metriä korkeita siloja, joissa lisäksi viljan "kerrospaksuus" on pieni, 50-80 cm.



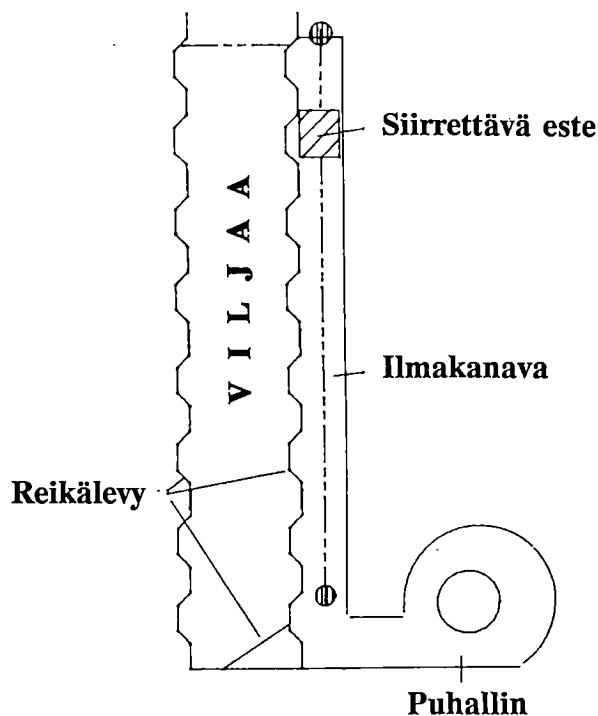
Kuva 30. Ilmatyhjennyspohjalla varustettu pyöreä pystykuivuri. Keskusputki ja ulkoseinät ovat reikälevyä.

5.2. Koekuivuri

Edellä esitetyn kaltaisen pienehkön pystykuivurin soveltuvuutta Suomen oloihin selvitettiin alustavasti VAKOLAssa syksyllä 1987 ja 1988 tehdyissä kokeissa.

5.2.1. Koekuivurin rakenne

Kokeita varten rakennettiin neljä metriä korkea pystykuivuri. Ilmaa läpäisevän sivun leveys oli 2 m. Viljakerroksen paksuutta voitiin säätää 0,5 - 0,8 m. Kuivurin ilmakanava ja päädyt tehtiin filmivanerista. Kuivurin ilmaa läpäisevät sivut tehtiin 0,6 mm reikälevystä, joka rakenteen tukevoittamiseksi ja viljan pakkautumisen vähentämiseksi profiloitiin (kuva 31). Ilmakanavaan tehtiin siirrettävä ilmaeste. Kuivuriin asennettiin keskipakopuhallin, jonka nopeutta voitiin säätää.



Kuva 31. Vuoden 1987 kokeissa käytetyn pystykuivurin rakenne.

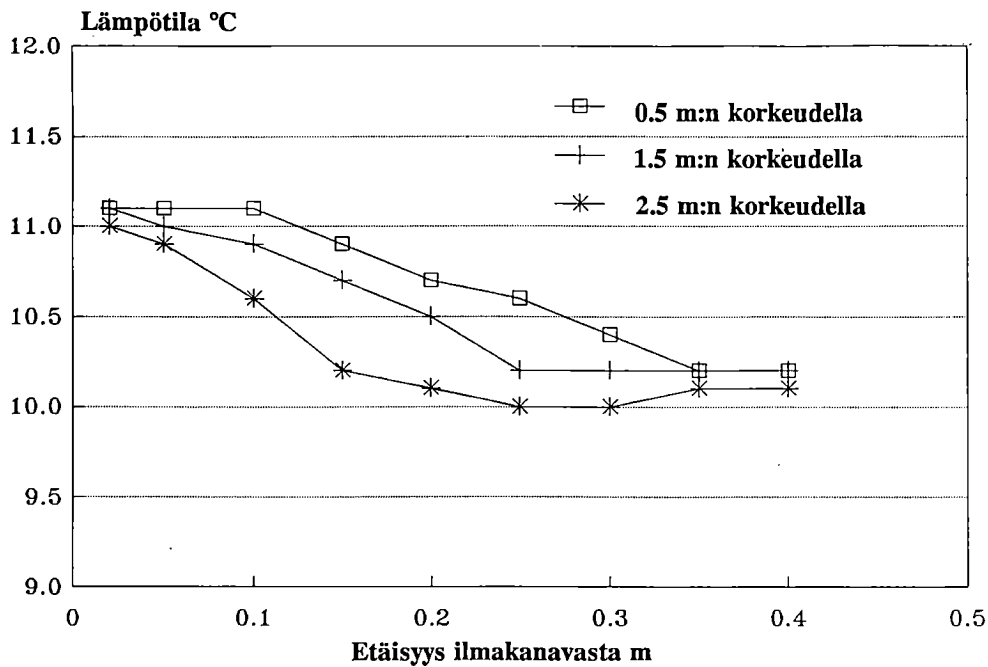
5.2.2. Syksyllä 1987 tehdyt mittaukset ja tulokset

Viljan kuivumisen tasaisuutta selvitettiin paine-, lämpötila- ja kosteusmittauksin. Sopivan kerrospaksuuden (ilman virtaussuunnassa) määrittämiseksi mittauksia oli tarkoitus tehdä kerrospaksuuksilla 0,5 - 0,8 m. Kuivurissa käytetty 0,6 mm reikälevy osoittautui kuitenkin heti liian heikoksi kestämään viljan aiheuttamaa kuormitusta. Tästä syystä mittauksia tehtiin ainoastaan 0,5 m kerrospaksuutta käyttäen. Kokeissa käytettiin pintikosteaa, vesipitoisuusdeltaan vähintään 30 % viljaa. Viljaa ei kierrätetty kokeiden aikana.

Viljan pakkautumisesta aiheutuvaa vastapaineen nousua kuivurin alaosassa mitattiin seuraavasti: siirrettävä este asetettiin noin 1 m korkeuteen, minkä jälkeen kuivuri täytettiin vaiheittain 30 % rukiilla ensin 1,3 m korkeuteen ja sen jälkeen metrin välein 4 m lopulliseen täyttökorkeuteen asti. Ilmamäärä säädettiin samansuuruiseksi kuin vastaavankokoisessa lavakuivurissa ($550 \text{ m}^3/\text{hm}^2$). Puhallusilman määrä pidettiin vakiona ja vastapaine mitattiin ilmakehän jokaisessa täyttövaiheessa. Täyttökorkeusalueella 1,3 - 3 m ei vastapaineessa ja eikä puhaltimen ilmamäärässä havaittu merkittäviä muutoksia. Neljän metrin täyttökorkeus lisäsi vastapainetta 17 %.

Kuivumisvyöhykkeen etenemistä seurattiin mittaamalla kuivausilman lämpötilaprofiilit 0,5 m, 1,5 m ja 2,5 m:n korkeudelta. Kultakin eri korkeudelta lämpötilat mitattiin vaaka- eli ilman virtaussuunnassa 5 cm välein. Sauvaan kiinnitetty termoelementti työnnettiin viljakerrokseen, mittarin lukeman annettiin tasoittua ja luettiin lämpötilan arvo ko. mittapisteessä. Lämpötilaprofiileita tarkasteltaessa havaittiin, että kuivumisvyöhyke etenee kuivurin yläosassa selvästi nopeammin kuin alaosassa (kuva 32).

Viljan kuivumisen tasaisuutta kuivurissa pyrittiin selvittämään ottamalla vesipitoisuusnäytteitä eri puolilta kuivuria. Pystykuivurin rakenteen takia edustavien viljanäytteiden saaminen oli vaikeaa. Näytteiden perusteella kuitenkin havaittiin, että vilja kuivui kuivurin alaosassa jonkin verran hitaammin kuin yläosassa. Tätä havaintoa tukevat myös mitatut kuivausilman lämpötilaprofiilit. Ilmaesteen yläpuolella oleva vilja kuivui erittäin huonosti. Tämä saattoi johtua ilman karkaamisesta esteen yläpuolelta takaisin ilmakehään.



Kuva 32. Pystykuivurista kolmelta korkeudelta mitattu kuivausilman lämpötilaprofiili. Kuivurissa kuivattiin alkuperäiseltä vesipitoisuudeltaan 30 %:sta kauraa noin kaksi vuorokautta.

Kuivuri tyhjennettiin imu-painelietsolla kuivurin kyljessä olevasta tyhjennysaukosta. Tyhjennyksen aikana havaittiin varsinkin kuivurin alaosissa ja alakulmissa alueita, joissa vilja oli kosteaa ja paakkuuntunutta. Viljan holvaantumista esiintyi jonkin verran. Kuivurin tyhjentämisessä ei kuitenkaan ollut erityisiä ongelmia.

Kosteaa viljaa ei kuivunut tasaisesti koekuivurissa. Tämä johtui viljan pakkautumisesta kuivurin alaosissa ja normaalista kostean viljan kuorettumisesta. Kosteaa viljaa olisikin kierrätettävä päivittäin tasaisen kuivumisen varmistamiseksi. Kuivurin täytön ja tyhjentämisen tulisikin kierrättämistä silmälläpitäen olla mahdollisimman helppoa.

Ilmanavassa olevan siirrettävän esteen tulisi olla rakenteeltaan sellainen, ettei ilmaa pääse karkaamaan sen yläpuolelta takaisin ilmanavaan. Toinen vaihtoehto on, että käytetään kiinteää ilmaestettä. Tällöin kuivuri on aina täytettävä kokonaan.

5.2.3. Syksyllä 1988 tehdyt pystykuivurikokeet

Koekuivurin toiminnassa esiintyneitä puutteita pyrittiin poistamaan vahvistamalla kuivuria ja rakentamalla se osittain uudestaan. Rakennetta muutettiin siten, että viljan kierrätys tuli mahdolliseksi. Tätä varten kuivuriin tehtiin suomulevystä vino pohja, jolloin kuivuri voitiin tyhjentää kuivauspuhaltimen avulla kaatosuppiloon. Myös siirrettävä ilmaeste korvattiin kiinteällä esteellä. Viljan kerrospaksuutta kasvatettiin 50 cm:stä 70 cm:iin.

Korjatussa pystykuivurissa kuivattiin ruista ja ohraa, joiden vesipitoisuus oli 30 %. Viljaa kierrätettiin päivittäin kunnes se oli kuivunut alle 25 %:iin. Tämän jälkeen kierrätys tehtiin vain pari kertaa viikossa. Kierrätys tehtiin tyhjentämällä kuivurin sisältö kaatosuppiloon, josta kuivuri täytettiin uudestaan. Kuivurin tyhjennys oli jonkin verran pölyinen mutta muuten ongelmaton toimenpide. Viljan kierrätyksestä oli selvästi etua: kosteakaan vilja ei holvautunut vaan kuivui tasaisesti, vaikka viljan kerrospaksuus ilman virtaus-suunnassa oli 70 cm.

Kuivumisen edistyessä viljan pinta kuivurissa laski eräissä tapauksissa jopa 1 metrin. Tämä aiheutti sen, että kiinteä ilmaeste ei enää estänyt kuivausilman karkaamista kuivurin yläosasta. Näyttääkin siltä, että tämän tyyppisessä kuivurissa tulisi olla siirrettävä ilmaeste tai sitten kuivausilman pääsyä kuivurin yläosiin pitäisi pystyä säätämään esimerkiksi sulkulevyjen avulla.

6. Kylmäilmakuivurin käyttöstrategia

6.1. Yleistä

Kylmäilmakuivurin käyttö ei ole yksinkertaista, koska kuivauksen onnistuminen riippuu niin monesta tekijästä. Kuivurin käyttötapa on lähes aina kompromissi energiatalouden ja viljan laadun säilyttämisen välillä. Pitkä kuivausaika lisää pilaantumisriskiä, mutta parantaa usein energiataloutta. Tärkeimmät tekijät, joihin kuivauksessa ei voida vaikuttaa, ovat viljan vesipitoisuus ja vallitseva sää.

6.2. Kuivausstrategiaan vaikuttavat tekijät

Energiataloutta ajateltaessa kylmäilmakuivuria kannattaa pitää käynnissä vain hyvällä säällä. Viljan laadun säilymistä ja kuivauskapasiteettia ajateltaessa kuivausajan on oltava lyhyt. Pyrittäessä parhaaseen tulokseen kuivuria käytetään niin, että energiankulutus pysyy kohtuullisena, mutta viljan laatu säilyy riittävän hyvänä. Tätä menettelyä kutsutaan kuivausstrategiaksi. Oikea strategia riippuu tilakohtaisista tekijöistä.

Kuivurin koon ja kuivattavan viljamäärän suhde on tärkeimpiä kuivausstrategiaan vaikuttavia tekijöitä. Pienessä kuivurissa säästetään investoinneissa, mutta tingitään energiataloudesta ja kuivauksen joustavuudesta. Suuressa kuivurissa koko viljasato voi mahtua kuivuriin. Tällöin viljankorjuu on joustavaa ja kuivauksessa voidaan paremmin käyttää hyväksi edullisia kuivausjaksoja, mutta investointikustannuksetkin ovat suuret.

Riippumatta kuivausstrategiasta ja kuivurin koosta kuivuria on aina käytettävä yhtäjaksoisesti niin kauan, että viljan vesipitoisuus laskee laarin pinnassakin alle 25 %:n. Vasta tämän jälkeen kuivuria kannattaa käyttää vain hyvissä olosuhteissa.

Loppukuivauksessa ei useinkaan ole edullista käyttää kuivuria yöllä, koska ilman kuivauskyky on huono alhaisen lämpötilan ja korkean suhteellisen kosteuden takia. Jos kuivauksella ei ole kiirettä, puhaltimet kannattaa pysäyttää yön tai huonon sääjakson ajaksi.

6.2.1. Kuivurin laariala suuri suhteessa kuivattavaan viljamäärään

Koko laariala kannattaa ottaa käyttöön heti kuivauksen alusta, vaikka alkuun kerrospaksuun olisi vain 30 - 40 cm. Kuivuminen on tehokkainta ohuissa kerroksissa. Vain silloin, kun eri viljaerät syystä tai toisesta halutaan pitää erillään, osa kuivurista kannattaa jättää tyhjäksi. Ohuissa kerroksissa kuivaaminen lisää valitettavasti myös viljan siirtotyötä. Kun laareissa on eri viljoja ja viljalajikkeita sekä kerrospaksuudet vaihtelevat, on muistettava, että myös

viljan kuivuminen on eri laareissa erilaista. Myös eri viljoille ja lajikkeille asetettavat laatuvaatimukset vaihtelevat.

6.2.2. Kaikki vilja samanlaista

Kun kaikissa laareissa on samanlaista viljaa, tehokkaan kuivausstrategian toteuttaminen on yksinkertaista. Automaattiset ohjauslaitteetkin toimivat tällöin parhaiten, koska poistoilma-antureita on vain yksi. Jos kuivuria ei täytetä kerralla, laitetaan uusi erä vanhan päälle, ja jos mahdollista vilja sekoitetaan silloin, kun uuden erän vesipitoisuus on suuri. Sekoittaminen tasoittaa vesipitoisuuksia ja vähentää kuorettumisriskiä.

6.2.3. Kuivataan monenlaista viljaa

Kun kuivurissa on yhtäaikaan monenlaista viljaa, on oikean kuivausstrategian noudattaminen huomattavasti työläämpää. Jokaista laaria on kohdeltava yksilöllisesti, koska osassa laareista on hyvin märkää viljaa ja osassa vilja on lähes kuivaa. Huonolla säällä voidaan kuivata vain märintä viljaa. On myös muistettava, että eri laareissa ilmamäärät ovat erilaisia mm. erilaisten kerros-paksuuksien takia. Parasta onkin tehdä kuivuri niin, että sen pääilmakanava voidaan jakaa toisistaan eristettyihin osiin. Kun joka osassa on oma puhallin, laareja tai laariryhmiä voidaan käsitellä yksilöllisesti ilman ilmamääräongelmia. Jos kuivurissa on yksi suuri puhallin, vaikeutena on usein pienien erien kuivaus. Useamman puhaltimen käytöstä aiheutuva kustannusero on pieni, koska alle 4 kW puhaltimet eivät tarvitse tähti-kolmio -käynnistintä.

6.2.4. Kuivurin laariala pieni suhteessa kuivattavaan viljamäärään

Kun kuivurin laariala on pieni suhteessa kuivattavaan viljamäärään, on vilja kuivattava useassa erässä. Tällöin kuivaukseen käytettävissä oleva aika on rajoitettu, koska kuivurista on poistettava viljaa kuivauskauden aikana. Normaaleissakin sääolosuhteissa lisälämmön käyttö on lähes välttämätöntä.

Pienelläkin laarialalla on edullista käyttää alusta asti kaikkia laareja. Pyrittäessä parhaaseen mahdolliseen energiatalouteen lisälämpöä kannattaa käyttää vasta loppukuivauksessa. Jos kuivauksella ei ole erityistä kiirettä, on vältettävä kuivurin käyttöä yöllä (loppukuivaus).

6.3. Lisälämmön käyttöstrategia

Lisälämmön käyttö on viime vuosina tullut yhä tavallisemmaksi. Lisälämmön avulla kuivaus nopeutuu ja varmistuu, koska kuivumista tapahtuu huonollakin säällä. Lisälämmön harkitsematon käyttö voi johtaa kasvaviin kustannuksiin tai viljan laadun heikkenemiseen. Oikeaoppinen lisälämmön käyttö edellyttää tietoa lisälämmön vaikutuksesta kuivurin toimintaan.

6.3.1. Lisälämmön määrä ja käyttö

Lisälämpöä käytetään kuivumisen nopeuttamiseksi ja viljan vesipitoisuuden saamiseksi riittävän alhaiseksi. Käyttötarkoitus vaikuttaa jonkin verran lisälämmön määrään ja käyttöstrategian valintaan. Lisälämmön määrä voidaan ilmoittaa kuivausilman lämpötilan muutoksena tai lämpötehona laarineliometriä kohti. Lämpötilan muutoksen ja lämpötehon välistä suhdetta voidaan säädellä ilmamäärällä. Lämpötilan muutoksessa ovat rajoittavina tekijöinä pinnan kuorettuminen ja pohjakerroksen liiallinen kuivuminen. Sopiva lämpötilan nousu on 0 °C ja 10 °C välillä ja se riippuu ulkoilman suhteellisesta kosteudesta.

Lisälämpöä käytettäessä on edullista nostaa lämpötilaa aluksi vain vähän ja käyttää suurta ilmamäärää. Sopiva lämpötilan nousu kuivauksen alussa on 0 - 5 °C. Jos lämpötilaa nostetaan kuivauksen alkuvaiheessa liikaa, pohjakerros kuivuu liikaa, jolloin vesi voi tiivistyä viljakerroksen pinnalle ja aiheuttaa kuorettumista. Kuivauksen edistyessä lämpötilaa voidaan nostaa, jos kuivumista halutaan nopeuttaa. Käytännössä tämä tapahtuu joko lämpölaitteen tehoa kasvattamalla tai ilmamäärää pienentämällä. Tällöin on muistettava se, että vilja kuivuu laarin pohjalla helposti liian kuivaksi, vrt. taulukko 3 sivu 46. Kun kuivausvyöhyke on edennyt pintaan saakka ei kuivuria kannata käyttää enää yöaikaan. Mitä paksumpi viljakerros on, sitä varovaisemmin lisälämpöä

tulee käyttää. Viljaa sekoittamalla voidaan vähentää viljan kosteuseroja ja kuorettumisriskiä.

Kun lisälämpöä käytetään ainoastaan loppukuivauksessa, kannattaa kuivuria ja lisälämpöä käyttää vain hyvällä säällä. Sopiva lisälämmön määrä valitaan sen mukaan, kuinka hyvä sää on ja kuinka kuivaksi vilja halutaan saada. Sopiva määrä on 5 °C vaiheilla. Lisälämpömäärä kannattaa valita niin, että kuivausilman suhteellinen kosteus on 5-15 % alempi kuin haluttua loppukosteutta vastaava ilman tasapainokosteus.

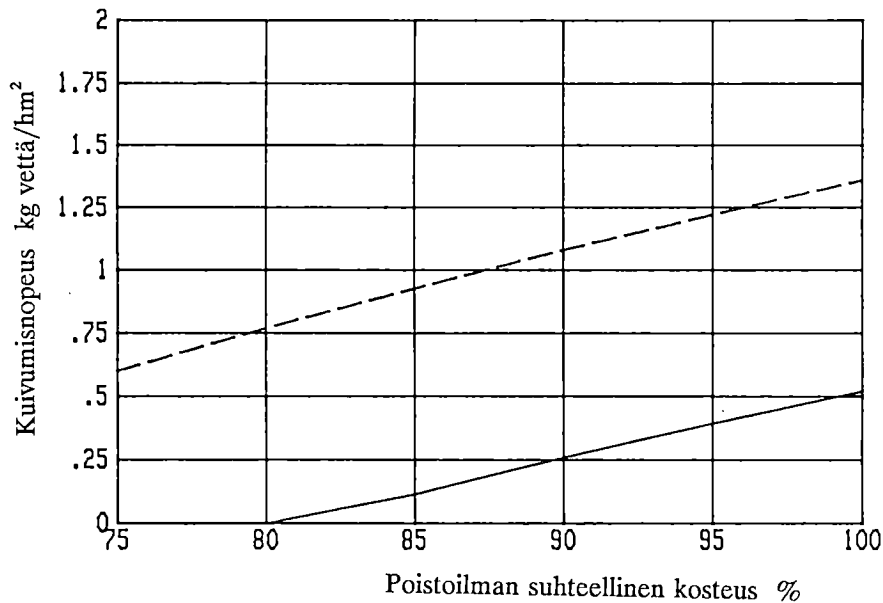
6.3.2. Lisälämmön energiatalous ja kuivumisnopeus

Viljankuivauksen ominaisenergiakulutus lasketaan tavallisesti käytettynä energiana poistettua vesimäärää kohden. Kuivauskustannus suhteutetaan tavallisesti kuivattuun viljamäärään. Kylmäilmakuivauksen kuivauskustannukset määräytyvät viljasta poistettavan vesimäärän, kuivausilman kuivauskyvyn, puhaltimien hyötysuhteen ja käytettävän lisälämmön määrän mukaan.

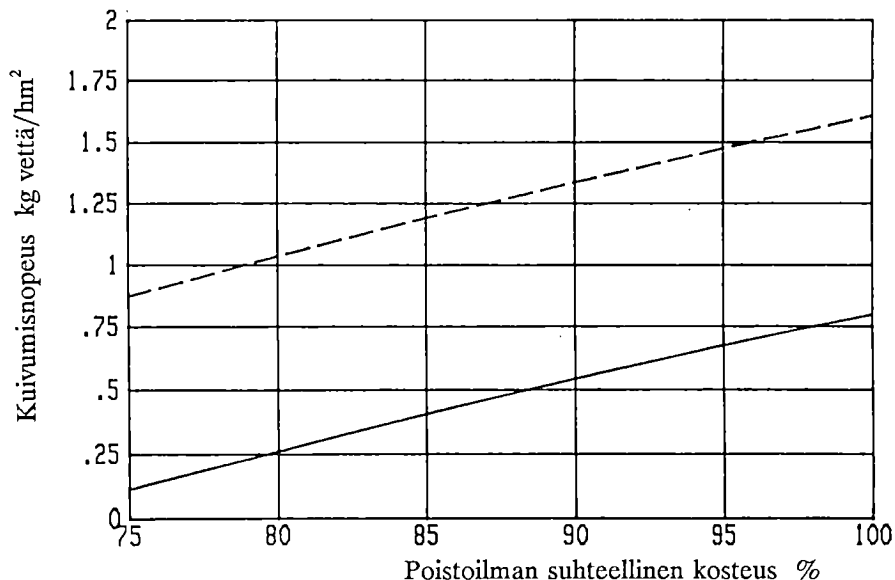
Potkuripuhaltimen hyötysuhteeksi voidaan olettaa 50 % toimittaessa vastapainealueella 300 - 600 Pa. Käytettäessä mitoitusarvona ilmamäärää 550 m³/hm² tarvitaan noin 92 - 183 W/m²:n sähköteho puhaltimen pyörittämiseen. Vastaavasti puhallettava ilma lämpiää puhaltimen lämpöhäviöiden ansiosta 0,5 - 1,0 °C ja alentaa puhallettavan ilman suhteellista kosteutta 2,5 - 5 %. Kevytöljyllä toimivan lisälämpölaitteen hyötysuhteeksi voidaan olettaa noin 90 % ja jopa enemmän. Tämä tarkoittaa sitä, että lisälämmön polttoaineteho on em. mitoitusilmamäärällä noin 200 W/m² °C.

Lisälämmön käytön kannattavuus riippuu ratkaisevasti lisälämmön ja puhaltimen käyttöön tarvittavan energian hinnasta. Energiakatsaus 1.1988 mukaan 1.4.1988 sähkön keskihinta maataloilla oli 35,5 p/kWh ja kevyen polttoöljyn hinta 9,1 p/kWh. Jos kapasiteetin pienuudesta tai viljan pilaantumisvaarasta johtuvaa kiirettä ei ole, kuivuria kannattaa käyttää vain hyvällä säällä ilman lisälämpöä. Jos viljan vesipitoisuus on suuri, kannattaa kuivumista huonolla säällä nopeuttaa käyttämällä lisälämpöä. Loppukuivauksessa poistoilman suhteellinen kosteus alkaa laskea ja ilman kuivauskyky heiketä, jos lisälämpöä ei

käytetään. Viljan vesipitoisuuden ollessa alle 20 % voi kuivuminen pysähtyä kokonaan ja vilja jopa sitoa vettä ilmasta. Selvimmin kuivauskyvyn huonontuminen näkyy kuivumisnopeuden hidastumisena. Kuvissa 33a ja 33b on esitetty ilman kuivauskyky poistoilman suhteellisesta kosteudesta riippuvana. Kuvassa 33a ulkoilman suhteellinen kosteus on 85 % ja kuvassa 33b 75 %. Kuvissa yhtenäinen viiva kuvaa kuivumisnopeutta ilman lisälämpöä ja katkoviiva silloin, kun lisälämpö on 5 °C (1 kW/m²). Kuvista nähdään, että kuivumisnopeus muuttuu lähes lineaarisesti poistoilman suhteellisen kosteuden funktiona.

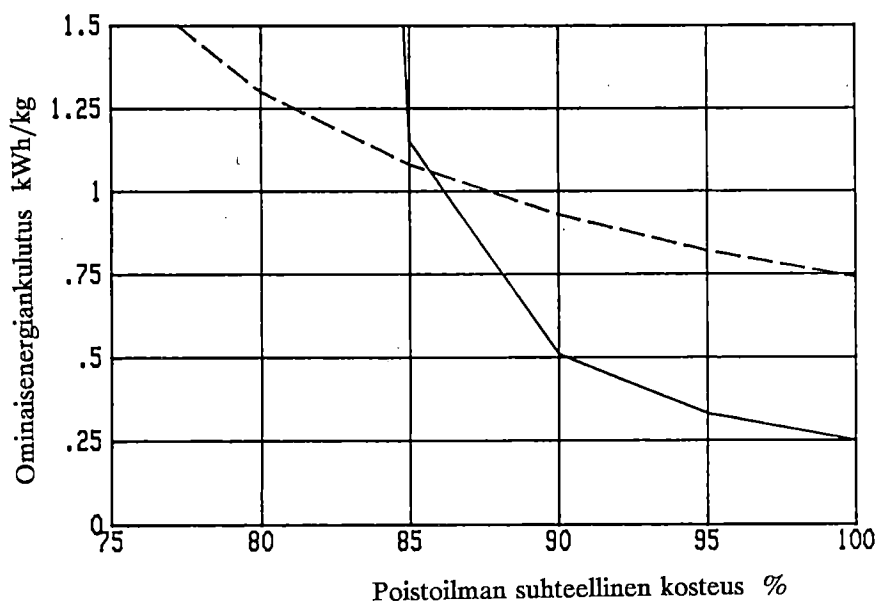


Kuva 33a. Ilman kuivauskyky poistoilman suhteellisen kosteuden funktiona 5 °C lisälämmöllä (katkoviiva) ja ilman lisälämpöä (yhtenäinen viiva). Tuloilma 85 % ja 15 °C. Ilmamäärä 550 m³/hm².

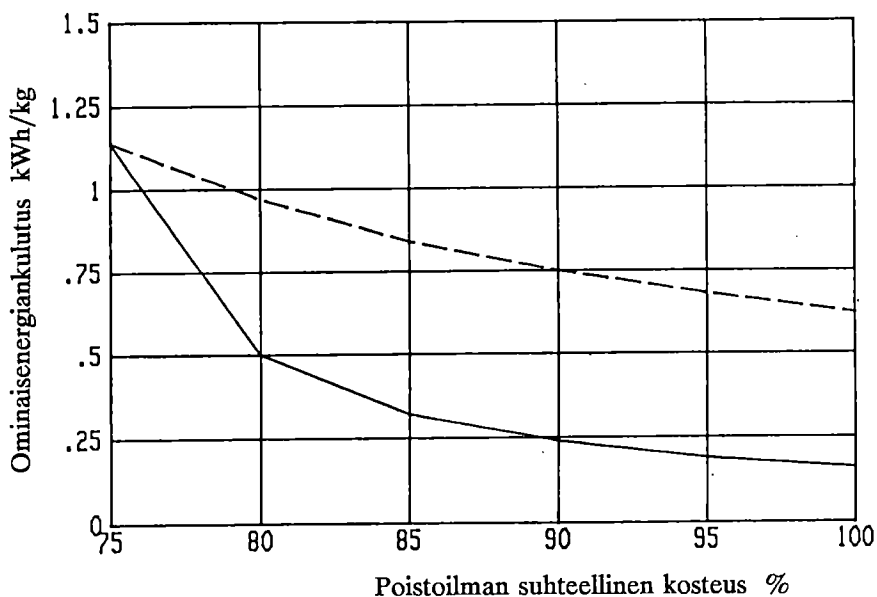


Kuva 33b. Ilman kuivauskyky poistoilman suhteellisen kosteuden funktiona 5 °C lisälämmöllä (katkoviiva) ja ilman lisälämpöä (yhtenäinen viiva). Tuloilma 75 % ja 15 °C. Ilmamäärä 550 m³/hm².

Kun lisälämpöä ei käytetä, puhaltimen moottori on ainut energiaa kuluttava laite. Sähköteho on koko ajan vakio, mutta sään muuttuessa kuivumisnopeus muuttuu. Ominaisenergiankulutus kasvaa kuivausolosuhteiden huonontuessa kiihtyvällä nopeudella. Kuvissa 34a ja 34b on esitetty ominaisenergiankulutus kuvia 33a ja 33b vastaavissa oloissa. Nähdään, että lisälämpöä käytettäessä energiankulutus on suurempi kuivauksen alkuvaiheessa, mutta ero pienenee kuivauksen edistyessä. Kun otetaan huomioon lisälämmön alempi energian hinta, energiakustannuksissa oleva ero pienenee jonkin verran.

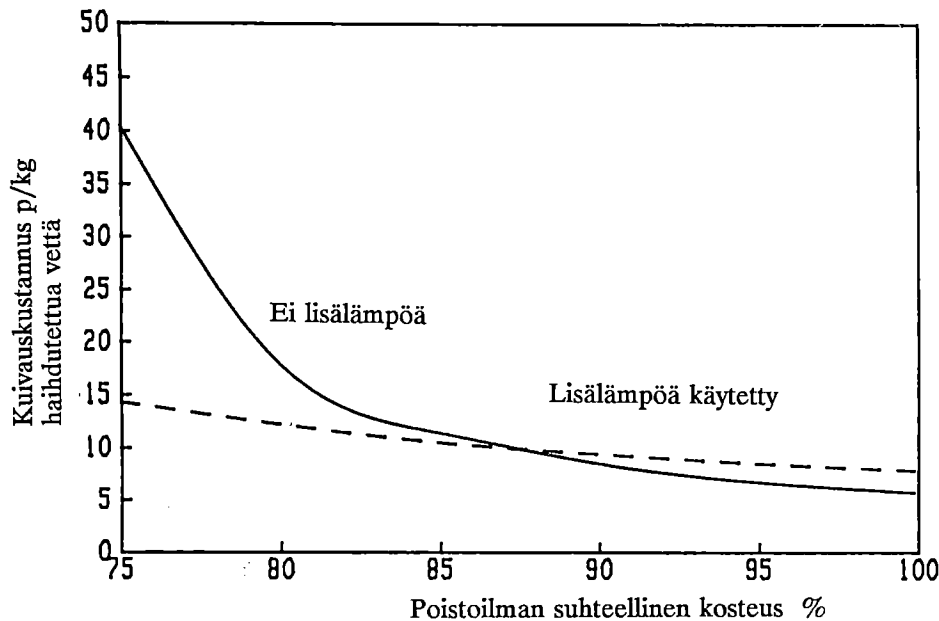


Kuva 34a. Ominaisenergiankulutus poistoilman suhteellisen kosteuden funktiona 5 °C lisälämmöllä (katkoviiva) ja ilman (yhtenäinen viiva). Tuloilma 85 %, 15 °C.



Kuva 34b. Ominaisenergiankulutus poistoilman suhteellisen kosteuden funktiona 5 °C lisälämmöllä (katkoviiva) ja ilman (yhtenäinen viiva). Tuloilma 75 %, 15 °C.

Kuvassa 35 on esitetty kuivauskustannus (energiakustannukset) kuvien 33b ja 34b oloissa. Kuvasta nähdään, että vaikka energiankulutus on lisälämpöä käytettäessä suurempi, ero energiakustannuksissa on pieni. Tulo- ja poistoilman kosteuden erotuksen ollessa pieni kustannukset lisälämpöä käytettäessä ovat jopa alemmat kuin ilman lisälämpöä.

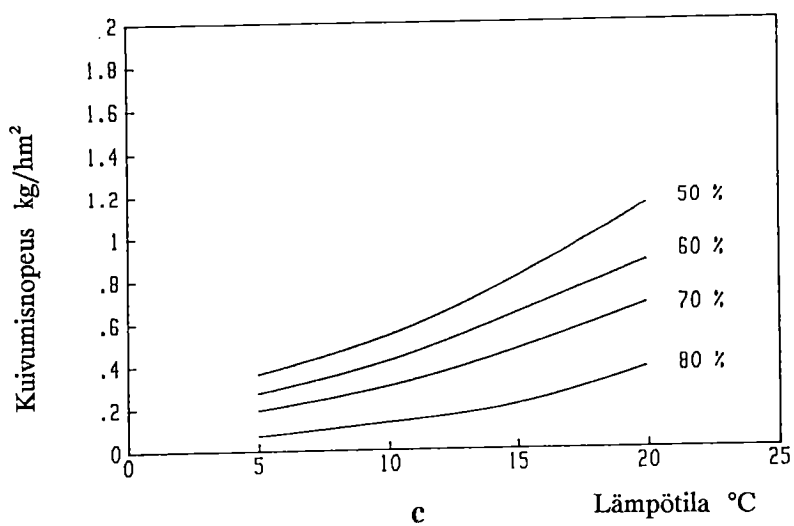
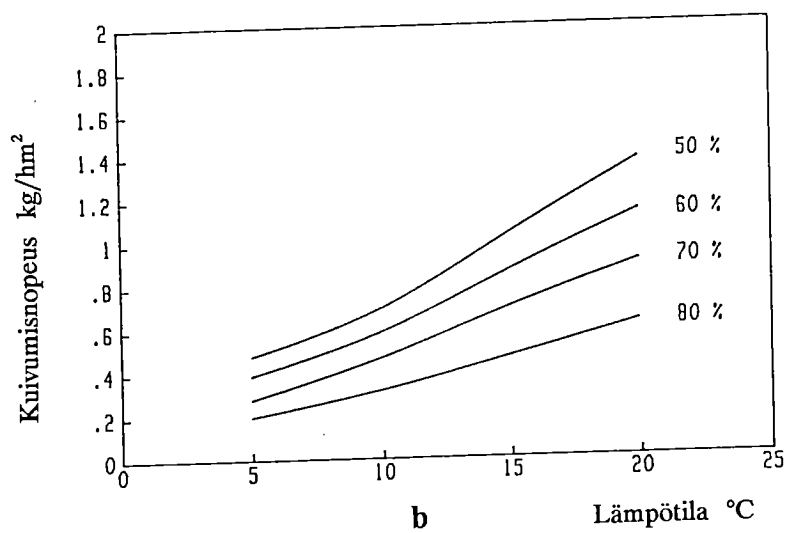
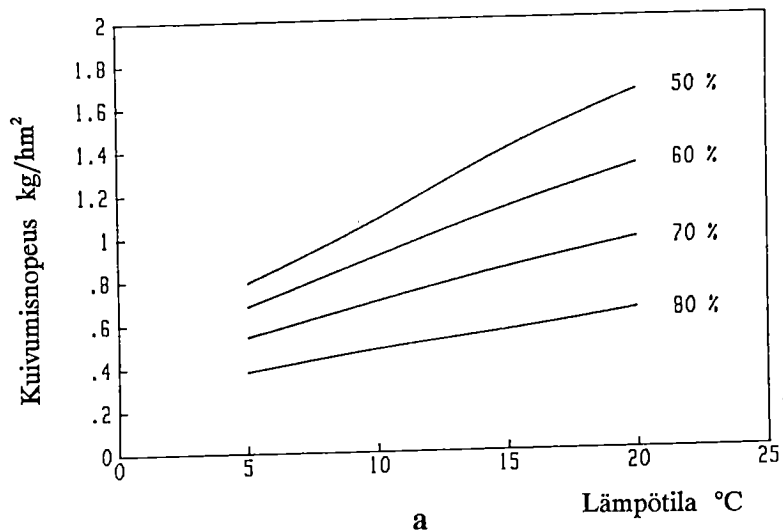


Kuva 35. Kuivauksen energiakustannus poistoilman suhteellisen kosteuden funktiona. Tuloilma 75 % ja 15 %. Lisälämmön määrä 5 °C.

6.4. Viljan kuivumisnopeus eri tilanteissa

Viljan kuivumisnopeus riippuu kuivausilman laadun lisäksi viljan sen hetkestä vesipitoisuudesta. Myös viljalajilla on vaikutusta kuivumisnopeuteen. Tässä luvussa esitetyt teoreettiset kuivumisnopeudet on laskettu ohralle käyttäen luvussa yksi mainittua simulointimallia.

Kuvassa 36 on esitetty veden keskimääräinen haihtumisnopeus kg/hm^2 ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona, kun viljaa kuivataan 30 %:sta 20 %:iin (kuva 36a), 20 %:sta 18 %:iin (kuva 36b) tai 18 %:sta 16 %:iin (kuva 36c). Kuvista nähdään, että veden haihtumisnopeus laskee selvästi viljan vesipitoisuuden laskiessa vaikka kuivausilman lämpötila ja suhteellisen kosteus pysyvät samoina. Tämä johtuu siitä, että viljan kuivuessa lähestytään koko ajan viljan vesipitoisuuden ja ilman kosteuden välistä tasapainokäyrää.



Kuva 36. Kuivumisnopeus tuloilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona kuivattaessa 30 %:sta 16 %:iin.

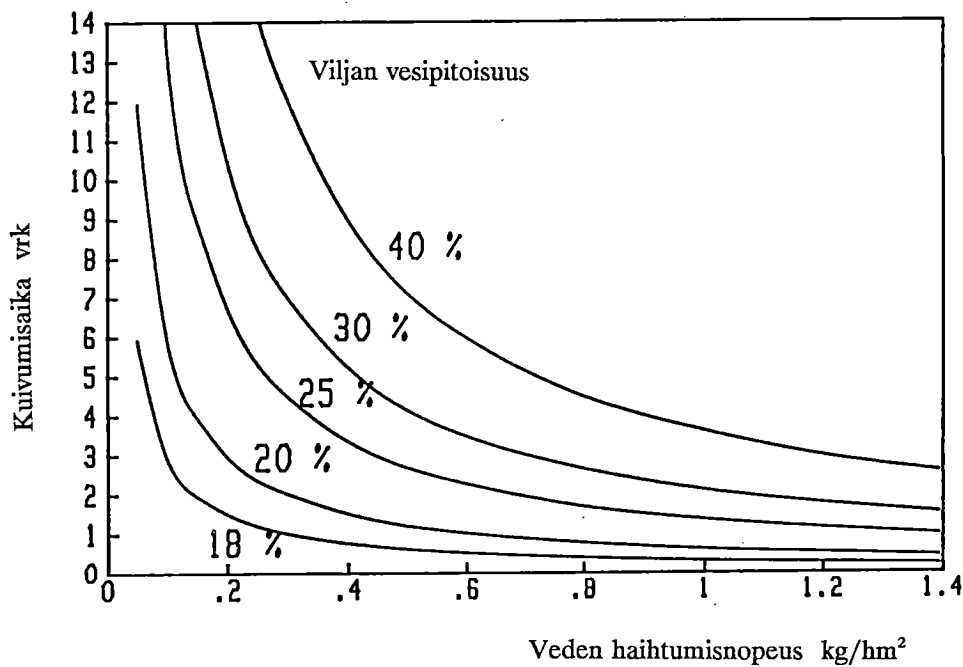
a = kuivumisnopeus välillä 30 - 20 %.

b = kuivumisnopeus välillä 20 - 18 %.

c = kuivumisnopeus välillä 18 - 16 %.

Haihtumisnopeutta arviotaessa on otettava huomioon huonojen säiden ja öiden vaikutus. Yli 15 °C lämpötiloihin ja 50 - 60 % suhteellisiin kosteuksiin ei kovin usein ilman lisälämpöä päästä. Keskimääräiset arvot päivisin liikkuvat 0,3 - 0,6 kg/hm² välillä.

Kuvasta 37 voidaan karkeasti arvioida viljan kuivumiseen 16 %:n loppukosteuteen kuluva aika, kun haihtumisnopeus tiedetään. Kuvassa on oletettu, että viljan kerrospaksuus on 0,5 m ja hehtolitraino 60 kg. Jos kerrospaksuus olisi esimerkiksi 1 m, kuvasta saatava kuivausaika on kerrottava kahdella. Kuvaa käytetään siten, että katsotaan vaaka-akselilta arvioitu haihtumisnopeus, siirrytään suoraan ylöspäin kunnes saavutetaan kuivattavan viljaerän alkuvesipitoisuus, minkä jälkeen voidaan kuivumisaika arvioida pystyakselilta.



Kuva 37. Viljan kuivumisaian arviointi 16 %:n vesipitoisuuteen haihtumisnopeuden ja alkuvesipitoisuuden avulla. Kerrospaksuus 0,5 m ja hl-paino 60 kg.

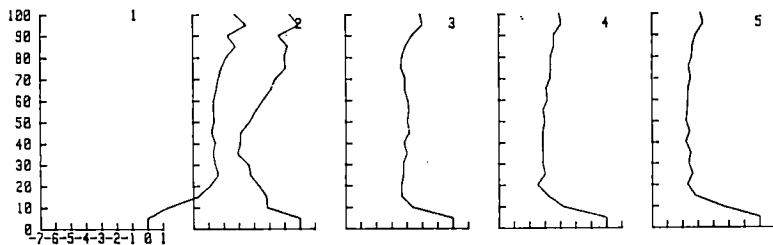
KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Johnsen Høy, J. Beluftning af korn. NJF-seminar 9 - 11.2.1982, Norge.
2. Maltry, W., Pötke, E., Schneider, B. Landwirtschaftliche Trocknungstechnik, 2. painos. VEB Verlag Technik. Berlin 1975.
3. ASAE Standards 1985. American Society of Agricultural Engineers.
4. Sharp, J.R. A Review of Low Temperature Drying Simulation Models. J. agric. Engng Res. (1982) 27, 169-190.
5. Bowden, P.J., Lamond, W.J., Smith, E.A. Simulation of Near-ambient Grain Drying. I. Comparison of Simulations with Experimental Results. J. agric. Engng Res. (1983) 28, 279-300.
6. Wenner, H.L. Die Voraussetzungen für die Lagerung und Belüftung von feucht geerntetem Getreide. Berichte über Landtechnik 45 (1955).
7. Spour, S. Pressure drops due to unidimensional air flow through grain masses, consequences in aeration. In: Preservation and storage of grains, seeds and their by-products. Cereals, oilseeds, pulses and animal feed. (Ed. Multon, J.L.). P. 170-188. Technique et Documentation - Lavoisier, Paris 1988.
8. Johnsen Høy, J. Metoder til styring af blæsær og varmekilde ved korntørring i lagertørringsanlæg. Statens jordbrugstekniske forsøg, beretning nr. 29 (1987).
9. Fladstad, O. Tørke- og lageranlegg for korn på gårdene. Landbruksteknisk institutt, orientering nr. 35 (1973).

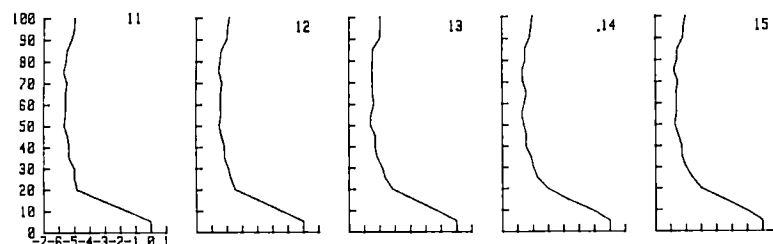
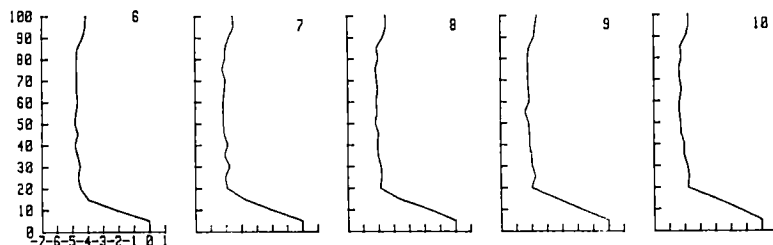
10. Ahokas, J., Koivisto, K. Energiansäästö viljankuivauksessa. VAKOLA, tutkimusselostus No 31 (1983).
11. Ekström, N., Norén, O. Studier över kallluftstorkning av spannmål. Jordbrukstekniska institutet, specialmeddelande 23 (1974).

Liite 1a.

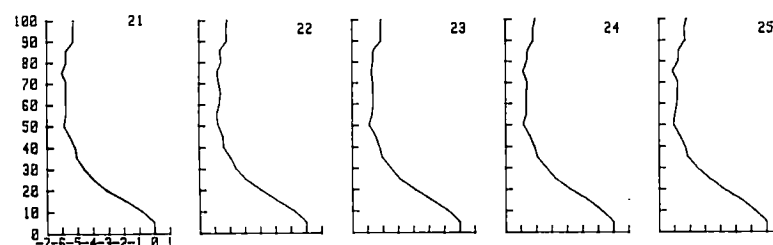
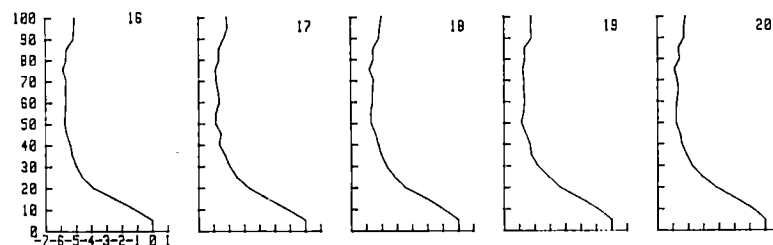
Kuivumisvyöhyke kuivausilman lämpötilan mukaan



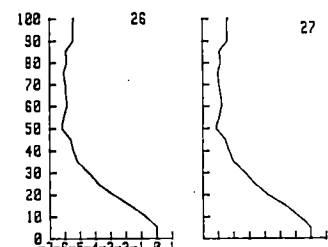
OHRRA 25/40/27:06:16:05:40/15 min "ERH23"



OHRRA 25/40/27:06:16:05:40/15 min "ERH23"



OHRRA 25/40/27:06:16:05:40/15 min "ERH23"



Erä 2. Puhallusilma 24,5 °C ja 47 %.

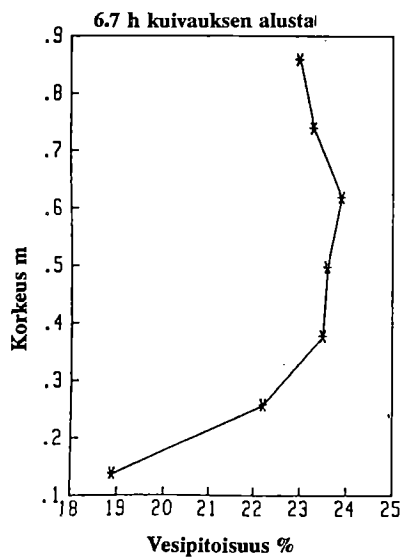
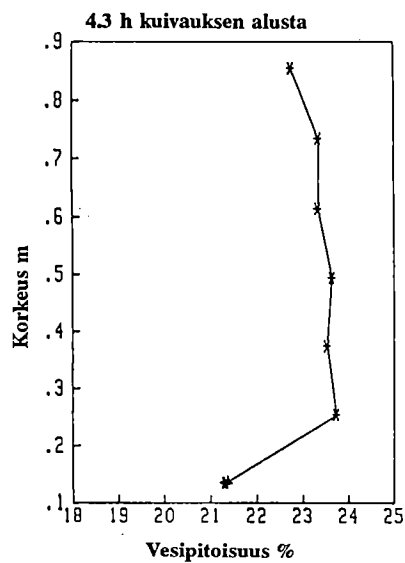
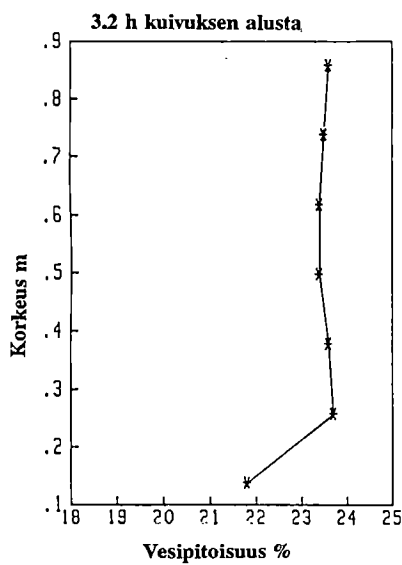
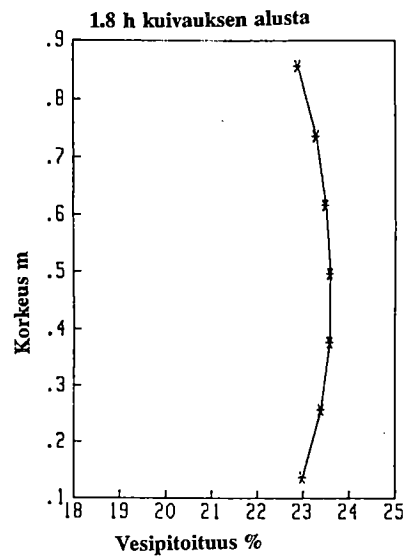
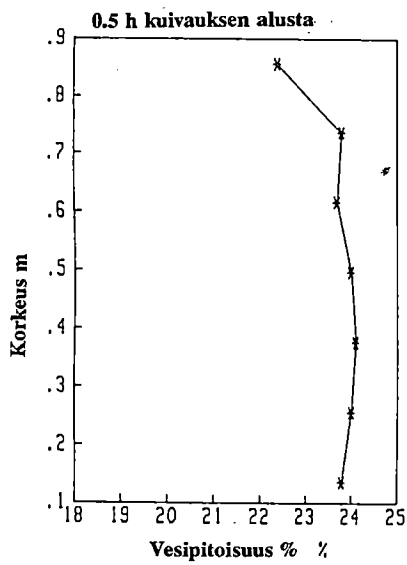
Mittausväli 15 min, kuvio 1 on kuivauksen alku,

kuvio 2 on 15 min alusta jne.

Ø = kuivausilman lämpötila viljakerroksen pohjalla.

LIITE 1b.

Kuivumisvyöhyke viljan vesipitoisuusnäytteiden mukaan



Erä 2. Puhallusilma 24,5 °C ja 47 %.

VAKOLAN TUTKIMUSSELOSTUKSIA

- | No | Nimi |
|-----|---|
| 46. | Sarin, H., Castrén, H., Pyykkönen, M., Käyttökokemuksia 80-luvulla rakennetuista kalustevajoista, varastokuivureista ja pihatoista. 1987. |
| 47. | Mäkelä, J., Mikkola, H., Lannoitteenlevityksen tasaisuus. 1987. |
| 48. | Puumala, M., Karhunen, J., Louhelainen, K., Vilhunen, P., Jauhatuksen tilantarve ja Pölyhaittojen vähentäminen. 1987. |
| 49. | Schäfer, W., Ahokas, J., Maatalouskoneiden tietokanta. 1988. |
| 50. | Karhunen, J., Aarnio, K., Mykkänen, U., Lannanpoistolaitteiden toiminta ja kestävyys. 1988. |
| 51. | Kapuinen, P., Karhunen, J., Pienten pihatoiden ilmanvaihdon erityisvaatimukset. 1988. |
| 52. | Puumala, M., Manni, J., Sarin, H., Tuotantorakennusten suunnittelu ja rakentaminen käytännössä. 1988 |
| 53. | Mattila, T., Virolainen, V., Hellävarainen perunankorjuu. 1989. |
| 54. | Mikkola, H., Syyskyntöä korvaavien muokkausmenetelmien vaikutus kevätvehnän satoon 1975-1988. 1989.
Pitkänen, J., Pitkäaikaisen aurattoman viljelyn vaikutukset hiesusaven rakenteeseen ja viljavuuteen. 1989. |
| 56. | Kapuinen, P., Karhunen, J., Kosteiden pintojen kosteudentuotanto navetoissa. 1989. |
| 57. | Sariola, J., Tuunanen, L., Paavola, J., Ahokas, J., Kylmäilmakuivurin mitoitus ja käyttö |
| 58. | Mäkelä, J., Laurola, H., Leikkuupuimurin kulkukyky vaikeissa olosuhteissa. 1990. |

