



VAKOLA

03450 OLKKALA
913-46211

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

TUTKIMUSSELOSTUS No 31

JUKKA AHOKAS - KIMMO KOIVISTO

ENERGIANSÄÄSTÖ VILJANKUIVAUKSESSA

ENERGY SAVING IN GRAIN DRYING

VIHTI 1983

TUTKIMUSSELOSTUS No 31

JUKKA AHOKAS - KIMMO KOIVISTO

ENERGIANSÄÄSTÖ VILJANKUIVAUKSESSA

ENERGY SAVING IN GRAIN DRYING

VIHTI 1983

ISSN 0506-3841

ESIPUHE

Kauppa- ja teollisuusministeriön energiavarojen turvin käynnistettiin vuonna 1980 tutkimus "Energian tuotanto maatilatalouden omista energialähteistä".

Tutkimus käsitti sekä viljankuivauksen energiaselvityksen että oljen lämmityskäytön ja polttotekniikan selvityksen. Muut tämän tutkimuksen julkaisut ovat: "Käyttökokemuksia olkikattiloista" Työtehoseuran julkaisuja 238, "Olkipuristeet polttoaineeksi" Työtehoseuran maatalous- ja rakennusosaston monisteita 2/1981, "Olki polttoaineena" VAKOLAN tutkimusselostus n:o 30, "Kotimainen polttoaine viljankuivauksessa" VAKOLAN tutkimusselostus n:o 32, "Energian tuotanto maatilatalouden omista energialähteistä", VAKOLAN tutkimusselostus n:o 33.

Päävastuu tutkimuksesta on ollut Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitoksella (VAKOLA). Tutkimukseen osallistivat lisäksi Työtehoseura ry, Antti Teollisuus Oy, Cool-Temp Oy, Turun Muna Oy - Jaakko Tehtaat, Kollan Teräsra-
kenne Oy, Lapferro Oy, OT-Tehdas Oy, T:mi Topi Pämppi ja Viishanke Ky. Johtoryhmän puheenjohtajana on ollut ylitar-
kastaja Keijo Sahrman kauppa- ja teollisuusministeriön energiaosastolta ja jäsenenä osastopäällikkö Jarmo Kallio
maa- ja metsätalousministeriö, toimitusjohtaja Gunnar Wickström Svenska Lantbrukssällskapetens Förbund, toimitus-
johtaja Erkki H. Oksanen Työtehoseura, agronomi Raimo Tammilehto Maataloustuottajain keskusliitto sekä prof.
Alpo Reinikainen ja prof. Osmo Kara VAKOLA.

Vinti 6.1.1983

Jukka Ahokas

ENERGIANSÄÄSTÖ VILJANKUIVAUKSESSA

SISÄLLYSLUETTELO

Sivu

ESISANAT

TIIVISTELMÄ

SAMMANFATTNING

SUMMARY

1.	JOHDANTO	1
2.	VILJAN KUIVAUKSEN TEORIA	2
2.1	Viljan kosteus	2
2.2	Kosteuden ilmoittaminen	3
2.3	Kosteustasapaino	4
2.4	Viljan säilymisaika	7
2.5	Viljan lämpötilaherkkyys	10
2.6	Ilma kuivausaineena	14
2.7	Kuivaustapahtuman havainnollistaminen kostean ilman diagrammilla	19
2.7.1	Kostean ilman diagrammi	19
2.7.2	Ilman tilanmuutokset kostean ilman diagrammissa	20
2.8	Viljan kuivaustavat	23
2.8.1	Höyrystys- 1. tyhjökuivaus	24
2.8.2	Haihdotuskuivaus	24
2.8.2.1	Kylmäilmakuivaus	24
2.8.2.2	Lämminilmakuivaus	33
3.	VILJAN KORJUUKAUSI	36
3.1	Viljan korjuun ja kuivauksen ajoittuminen	36
3.2	Ilmasto-olot Suomessa korjuukaudella	37

4.	KOTIMAISEN SADON KÄYTTÖ	41
4.1	Sadon määrä ja käyttö eri tarkoituksiin	41
4.2	Kotimaisen viljan kauppaantulo	41
5.	ENERGIAN KÄYTTÖ KUIVAUKSESSA	43
5.1	Lämmينilmakuivuri	44
5.1.1	Energiankulutus	44
5.1.2	Energiankulutukseen vaikuttavat tekijät	47
5.1.2.1	Viljan kosteus	47
5.1.2.2	Kuivausajan sää	49
5.1.2.3	Kuivausilman lämpötila	50
5.1.2.4	Ilmamäärä ja poistoilman suhteellinen kosteus	53
5.1.2.5	Kuivuriuunien kunto ja polttimon säädöt	53
5.1.3	Energian säästökeinot lämmينilma-kuivauksessa	53
5.3.1.1	Kuivauksen optimointi	53
5.3.1.2	Kuivuriuunin tai öljy- polttimen uusiminen	55
5.3.1.3	Kuivurin tiivistäminen	57
5.3.1.4	Kuivurin eristäminen	57
5.3.1.5	Lämmön talteenotto poistoilmasta lämmön- vaihtimen avulla	58
5.3.1.6	Lämpöpumpun käyttö kennokuivurin lämmön- lähteenä	59
5.2	Kylmäilmakuivaus	61
5.2.1	Energiankulutus	61
5.2.2	Energiankulutukseen vaikuttavat tekijät	61
5.2.2.1	Viljan kosteus	61
5.2.2.2	Kuivausajan sää	62

	5.2.2.3	Kuivausilman lämpötila ja lisälämmön käyttö	65
	5.2.2.4	Ilmamäärä ja poistoilman suhteellinen kosteus	66
5.2.3		Energian säästömahdollisuudet kylmäilmakuivauksessa	66
	5.2.3.1	Puhaltimen käyttöjaksojen valinta	67
	5.2.3.2	Lisälämmön käyttö	67
	5.2.3.3	Automatisointi	68
	5.2.3.4	Lämmön talteenotto poisto- ilmasta	69
	5.2.3.5	Lämpöpumpun käyttö poisto- ilman lämmön talteenotossa	69
5.3		Lämminilma - kylmäilmakuivurin yhteiskäyttö	70
	5.3.1	Periaate	70
	5.3.2	Energiankulutus	70
	5.3.3	Energian säästömahdollisuudet	71
5.4		Viljan kuivauskustannukset	75
	5.4.1	Kuivauskustannuksiin vaikuttavat tekijät	75
	5.4.1.1	Kuivurin mitoitus	76
	5.4.1.2	Rakennuskustannukset	79
	5.4.1.3	Laitteistokustannukset	80
	5.4.1.4	Energiakustannukset	82
	5.4.1.5	Työkustannukset	82
	5.4.2	Energian säästötoimenpiteiden kannattavuus	82
6.		YHTEENVETO	85
7.		KIRJALLISUUSLUETTELO	87

LIITE

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa on selvitetty energiansäästömahdollisuuksia viljankuivauksessa, eri tekijöiden vaikutusta energiakustannuksiin ja energiansäästöinvestointien kannattavuutta. Kiinteät kustannukset muodostavat kuivauksen kokonaiskustannuksista 80 % ja energiakustannukset 20 % ilman työn arvoa. Tilastojen mukaan laskien lämminilmakuivurissa kuivataan maassamme keskimäärin vain 15 erää vuodessa. Oikean kuivurityypin ja kuivauskapasiteetin valinnalla on suuri vaikutus kuivauskustannuksiin. Lisäksi energian säästämiseksi tehdyn investoinnin kannattavuus paranee usein merkittävästi, kun kuivuria käytetään tehokkaasti. Kylmäilmakuivaus soveltuu parhaiten pienille ja keski-suurille tiloille ja lämminilmakuivaus suuremmille tiloille. Lämminilma- ja kylmäilmakuivurin yhteiskäyttö on joustava ja energiaa säästävä kuivaamoratkaistu. Kuivureiden mitoitus yhteiskäytössä ja kokonaiskustannusten arviointi edellyttävät kuitenkin jatkotutkimuksia. Tällöin olisi tarpeellista tutkia myös lämminilmakuivurin poistoilman lämmön hyödyntämisen kannattavuutta kylmäilmakuivurissa.

Energiankulutusta voidaan pienentää ilman suuria investointeja mm. seuraavilla tavoilla

- huoltamalla kuivuriuuni säännöllisesti, säästö 5...10 %
- välttämällä liikakuivaamista, säästö 10...20 %
- välttämällä yöllä kuivaamista, säästö 5...10 %.

Kuivaaminen mahdollisimman korkeassa lämpötilassa ei eristämättömässä kuivurissa vähennä energiankulutusta, mutta on suositeltavaa, koska kuivauskapasiteetti kasvaa. Lämpöhäviöitä ympäristöön kannattaa vähentää

- kuivaamalla vain täysinä erinä
- eristämällä kuivuri ja tuloilmakanava
- tiivistämällä kuivuri
- varustamalla kuivuri tiiviillä kannella.

Yhdessä nämä toimenpiteet alentavat energiankulutusta 15...20 %. Eristämisen vaikutus yksinään on 10 %.

Kuivurin poistoilman mukana menee ulkoilmaan 65...70 % polttoaineen energiasta. Lämmittämällä poistoilmalla kuivurin tuloilmaa voidaan tästä lämmöstä hyödyntää 25...35 %. Energiainsäästö on 15...25 %. Poistoilman lämmönvaihtimien käytön kannattavuus riippuu kuivurin käytön tehokkuudesta. Käyttämällä lämpöpumpua kuivurin lämmönlähteenä voidaan säästää energiaa 60...70 % ja markkamääräisenä 30...35 %. Sen käytön tekee toistaiseksi kannattamattomaksi korkea hinta/tehosuhde ja suuri verkkoonliittytäteho.

Kylmäilmakuivauksessa puhaltimen käyntijaksot kannattaa automatisoida ilman suhteellisen kosteuden vaihtelujen mukaan, koska energiankulutus pienenee jopa kolmanneksen. Lisälämmön käyttöä suositellaan, koska sähkönkulutus vähenee tällöin puoleen. Kokonaiskuivauskustannukset ovat lähes samansuuruiset kuin kuivauksessa ilman lisälämpöä. Sen sijaan lisälämmityksen automatisointi ei ole kannattavaa. Energian säästäminen viljan kuivauksessa edellyttää kuivurin toiminnan seuraamista. Tähän ei maataloilla ole aikaa eikä mittalaitteita. Käytännön olosuhteissa tehtyjen mittausten perusteella voitaisiin nykyistä paremmin antaa energian säästämiseen liittyvää neuvontaa.

SAMMANFATTNING

Genom undersökningen har utretts möjligheter att spara energi vid spannmålstorkning, olika faktorerers inverkan på energikostnaderna och lönsamheten av investeringar i energisparning. Totalkostnaden för torkning utgörs 80-procentigt av fasta kostnader och av energikostnader uppgående till 20 % utan arbetskostnad. Beräkningarna i enlighet med statistiskt material torkas på varmluftstork i vårt land i medeltal endast 15 satser per år. Valet av rätt torktyp och torkkapacitet påverkar torkningskostnaden i hög grad. Dessutom blir energisparningsinvesteringen ofta avsevärt lönsammare då när torken används effektivt.

Kallluftstorkning lämpar sig bäst för små och medelstora gårdar och varmluftstorkning för större gårdar. Varmlufts- och kallluftstorkens kombinerade användning är en flexibel och energisparande torklösning. Torkarnas dimensionering vid kombinerad användning samt värdering av totalkostnaden förutsätter ändå fortsatta studier. Då skulle det vara nödvändigt att granska också exploateringslönsamheten av varmluftstorkens frånluftsvärme i kallluftstorken.

Energiförbrukningen kan minskas utan några större investeringar genom bl a

- regelbundet underhåll av varmluftspannan - inbesparing 5...10 %
- att undvika övertorkning - inbesparing 10...20 %
- att undvika torkning under natten - inbesparing 5...10 %

Torkningen med så hög temperatur som möjligt i en isolerad tork minskar inte energiförbrukningen, men den rekommenderas, eftersom torkkapaciteten ökas. Det lönar sig att reducera värmeförluster till omgivningen genom att

- torka endast hela satser
- isolera torken och inloppsluftskanalen
- tätta torken
- förse torken med ett tättslutande lock

Dessa åtgärder gemensamt med varandra minskar energiförbrukningen 15...20 %. Isoleringen allena inverkar 10 %.

Med torkens frånluft följer 65...70 % av bränsleenergin till uteluften. Genom att med frånluft uppvärma torkens inloppsluft kan av denna värme exploateras 25...35 %. Energiinbesparingen är 15...25 %. Hur lönsamt det är att använda frånluftsvärmeväxlare, beror på torkens drift-effektivitet. Genom att använda varmluftspanna som värme-källa för torken kan energi sparas 60...70 % eller beräknat i mark 30...35 % av energikostnaderna. Dess användande är tillsvidare olönsamt på grund av det höga förhållandet pris/effekt samt den höga kostnaden för elbehovet vid nätanslutning.

Vid kallluftstorkning lönar det sig att automatisera fläk- tens driftscykler enligt förändringarna i luftens rela- tiva fuktighet, eftersom energiförbrukningen sjunker t o m. en tredjedel. Utnyttjande av tillsatsvärme rekommenderas därför, att elförbrukningen blir då hälften mindre. Sammanlagda kostnaden för torkning är nästan lika hög som den vid torkning utan tillsatsvärme. Däremot är det oeko- nomiskt att automatisera tillsatsuppvärmningen. Energi- sparning vid spannmålstorkning förutsätter uppföljning av torkens fungerande. För detta har man inte tid på gårdar- na, inte heller står där några mätinstrument för detta ändamål till förfogande. Baserande på mätningarna i praktiska förhållanden skulle man kunna ge med energi- sparning förknippade råd i större omfattning än idag.

SUMMARY

The study clarifies the possibilities for saving energy in grain drying, the effect of different factors upon the cost of energy as well as the profitableness of investments in saving energy. The total drying costs are made up of the fixed costs amounting to 80 per cent and the costs for energy 20 per cent without any cost for labour. By calculating on the basis of the statistics, only 15 batches on an average are dried in one hot-air drier in our country yearly. The choice of an appropriate type of drier and that of the drying capacity affects the drying costs greatly. In addition to this, the profitableness of the investment in saving energy often increases to a noticeable degree, when the drier is used effectively.

Cold-air drying is best suited for small and middle-sized farms and hot-air drying for larger ones. The combined utilization of hot-air and cold-air driers is a flexible and energy-saving drying method. The dimensioning of the driers when being used as a combination as well as the estimation of the total cost require, however, additional studies. Further, it would also be necessary to examine the advantages of the exploitation of the hot-air drier's exhaust air heat in the cold-air drier.

The energy consumption can be reduced without any greater investments among other things by

- taking care of regular maintenance of the air furnace - return 5...10 %
- avoiding excessive drying - return 10...20 %
- avoiding drying at nighttime - return 5...10 %.

The drying at the highest possible temperature in an uninsulated drier does not lower the energy consumption, but it is recommended, since the drying capacity increases. It is advantageous to decrease heat losses in the surroundings by

- drying solely full batches
- insulating the drier and the inlet air duct
- packing the drier
- furnishing the drier with a tight lid

These measures will together cut down the energy consumption by 15...20 %. The influence of the insulation alone is 10 %.

Along with the drier's exhaust air 65...70 % of the fuel energy is discharged to the open air. By heating with the exhaust air, the inlet air of the drier, it is possible to exploit 25...35 % of this heat. The energy saving is of 15...20 %. The profitableness of using exhaust air heat exchangers depends on the efficiency of the drier's use. By utilizing a heat pump as a heat source for the drier, the energy saving may be 60... 70 %, figured in Finnish marks 30...35 %. So far this measure is unprofitable, due to the high ratio of price to efficiency as well as the high expense for the electricity required by the main circuit connection.

In cold-air drying it is advisable to automate the fan operating cycles, according to the relative humidity fluctuations of the air, because the energy consumption decreases even one third. It is recommended to use surplus heat, since the electricity consumption thus reduces to half. The total drying costs are almost equal to those for drying without any surplus heat.

On the contrary, the automation of surplus heating is not advantageous. The saving of energy in drying is subject to keeping pace with the function of the drier. For such a measure there is neither time nor measuring equipment on farms. Basing on the determinations performed under practical circumstances, instructions concerning saving energy could be given to a larger extent than today.

1. JOHDANTO

Maassamme käytetään vuosittain viljan kuivaamiseen energiaa noin 125 milj. markan arvosta. Noin 80 % tästä kuluu 48 000 lämminilmakuivurissa, joiden pääasiallinen polttoaine on kevyt polttoöljy. Sähköä käytetään kuivaukseen n. 90 GWh ja lämpöä n. 660 GWh vuosittain. Siirtyminen kotimaisen energian käyttöön ja energian säästö ovat Suomen energiapoliittisen ohjelman tavoitteita. Viljan kuivauksessa energian käyttö liittyy olennaisesti kuivaamon tehoon ja kuivauskustannuksiin. Tästä syystä energian-säästötoimenpiteitä harkittaessa on pyrittävä arvioimaan niiden vaikutus kokonaiskuivauskustannuksiin ja kuivaustyöhön yleensä.

Tässä tutkimuksessa, joka on pääosin kirjallisuustutkimus, on käsitelty eräitä mahdollisuuksia säästää energiaa viljankuivauksessa. Viljankuivauksen teoriaosa ja viljankuivauskustannusten laskenta on otettu mukaan, koska esitys muutoin olisi jäänyt liian irralliseksi.

2. VILJANKUIVAUKSEN TEORIA

Puitava vilja on yleensä niin kosteaa, ettei sitä voida varastoida. Liian kosteana varastoidun viljan laatu heikkenee nopeasti varsinkin, jos jyvät sisältävät runsaasti sisäistä ns. kasvukosteutta. Jyvien elintoiminnot eivät tällöin ole vielä hidastuneet - vilja hengittää tehokkaasti, jolloin se lämpenee nopeasti. Täysin tuleentunut, sateista kostunut vilja, ei lämpene yhtä nopeasti, mutta sekin on vain rajoitetun ajan varastointikelpoinen. Puitavan viljan kosteus vaihtelee meillä n. 15 %:sta yli 40 %:iin. Mikro-organismit saattavat suotuisassa lämpötilassa ja kosteudessa nopeuttaa viljan pilaantumista. Viljan hengityksen hillitsemiseksi vilja yleensä kuivataan ennen varastointia tai sen yhteydessä. Kuivaamalla vilja 14 % kosteuteen saavutetaan käytännössä riittävä säilyvyys.

2.1 Viljan kosteus

Kuivaustapahtuma alkaa kosteuden ja jyvän rakenneosien välisten sidosvoimien irrottamisella. Tätä varten kuivatetaan viljaan on tuotava tietty määrä energiaa. Kosteuden sitoutumislajit voidaan jakaa kolmeen ryhmään niiden sitoutumisenergioiden suuruuden perusteella.

Kemiallisesti sitoutunut vesi

Kemiallisesti sitoutunut vesi (hydraatti- ja kidevesi) on kaikkein vaikeimmin poistettavissa. Se ei poistu vaikka vilja lämmitetään veden kiehumispistettä vastaamaan lämpötilaan, joten käytännön kuivauksessa sillä ei ole merkitystä, Maltry /1/.

Fysikaalis-kemiallisesti sitoutunut vesi

Fysikaalis-kemiallisesti sitoutuneella vedellä ymmärretään kolloidista paisuntavettä. Veden absorboituessa kiinteään aineeseen kiinteä-neste-systeemi kutistuu kokoon. Kiinteän aineen tilavuus kasvaa - jyvä turpoaa, mutta yhteistilavuus pienenee. Sitoutumisessa kehittyy lämpöä, jonka määrä on suoraan verrannollinen kokoon kutistumiseen, Maltry /1/. Mitattu paisuntalämpö on ensiksi sitoutuneella vedellä jopa 1800 kJ/kg. Tämä lämpöenergia on tuotava kuivattavaan viljaan paisunta-veden poistamiseksi höyrystymislämmön (n. 2500 kJ/kg) lisäksi.

Fysikaalis-mekaanisesti sitoutunut vesi

Fysikaalis-mekaanisesti sitoutunut vesi on jyvien kapillaareissa ja jyvien pinnalla kostutusvetenä. Kostutusvesi ja makrokapillaareihin (kapillaarin säde > 100 nm) sitoutunut vesi haihtuu kuten vapaasta vesipinnasta. Sen sijaan mikrokapillaareihin sitoutuneen veden höyrönpaine on pienempi kuin vapaan nestepinnan kyläisen höyrönpaine vastaavassa lämpötilassa.

2.2 Kosteuden ilmoittaminen

Viljan kosteus määritetään veden massan osuutena kuivan viljan tai kostean viljan massasta. Käytännössä käytetään jälkimmäistä tapaa, jolloin kosteus on tapana ilmoittaa prosenteissa yhtälön (1) mukaan

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

jossa x on viljan kosteus

m_v on veden massa

m_{ma} on kostean (kuivaamattoman) viljan massa

Ulkomaisessa kirjallisuudessa ja tieteellisissä julkaisuissa kosteus on useimmiten ilmoitettu yhtälön (2) mukaisesti veden ja kuivan viljan massojen suhteena.

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

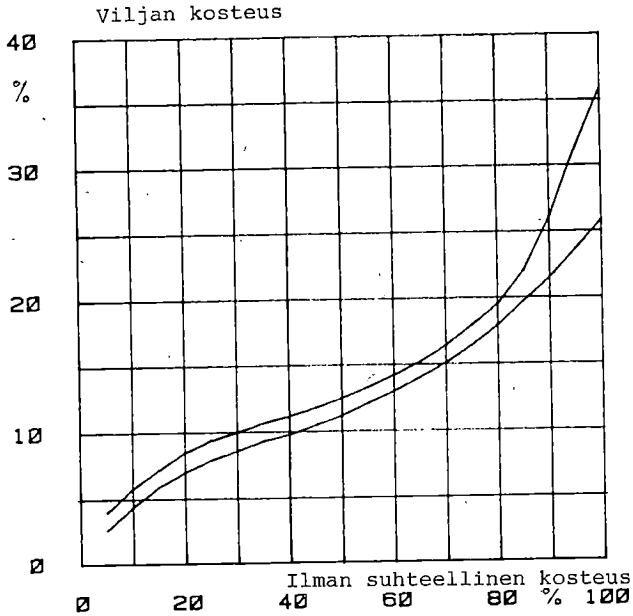
jossa x on kosteusaste (desimaali- tai prosenttiluku)
 m_{ka} on kuivan viljan massa

Kuivan viljan massa määritetään standardimenetelmän mukaisesti kuivaamalla vilja 105 °C:ssa täysin kuivaksi. Veden massa on tällöin viljasta haihtuneen vapaan veden massa ts kostean viljan ja kuivan viljan massojen erotus.

2.3 Kosteustasapaino

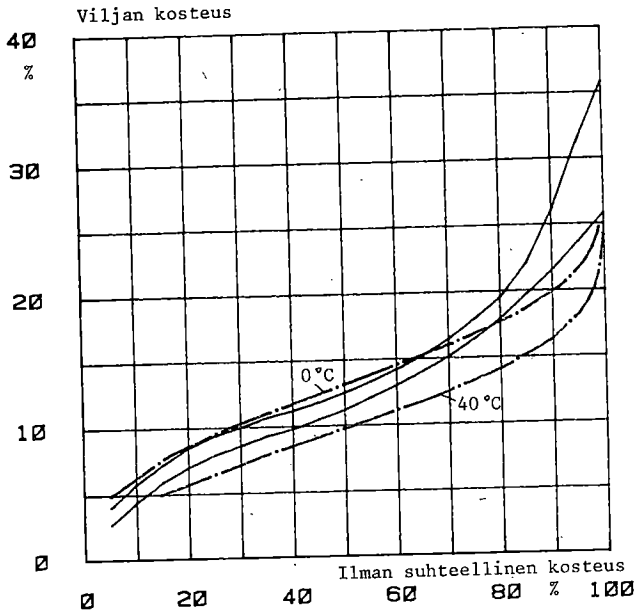
Eri kosteuslajien osuutta viljassa ei voida tarkasti määrittää. Sitoutumisen voimakkuus muuttuu kosteuspiitoisuuden muuttuessa ja se ilmenee höyrynpaineen alenemisena verrattuna vapaan nestepinnan kylläisen höyryn paineeseen samassa lämpötilassa. Kosteuden poistamiseen tarvittava energia kasvaa voimakkaasti alle 15 % kosteuksilla. Hygroskooppisen aineen kuten viljanjyvän joutuessa kosketukseen kostean ilman kanssa se voi sitoa tai luovuttaa vettä tiettyyn itsestään asettuvaan tasapainotilaan asti. Niin kauan kun sitoutuneen veden höyrynpaine on suurempi kuin ympäröivän ilman vesihöyryn osapaine, viljanjyvä luovuttaa vesihöyryä ilmaan ja kuivuu. Veden siirtymistä tapahtuu kunnes höyrynpaine-erot ovat tasoittuneet, jolloin kosteustasapaino on syntynyt. Tätä kosteustasapainoa kuvaavat kosteustasapainokäyrät. Ne esittävät viljan kosteuden ja vastaavan tietyssä lämpötilassa tasapainotilassa vallitsevan ilman kosteuden välisen yhteyden. Tällöin on samantekevää missä muodossa kosteus on sitoutunut. Tasapainokäyrät määritetään yleensä kokeellisesti ja ilmoitetaan 20 °C lämpötilassa. Ne riippuvat kuitenkin jonkin verran lämpötilasta.

Kosteustasapainokäyristä nähdään mihin kosteuteen vilja voidaan kuivata ilmalla, jonka kosteus tiedetään. Kuvasta (1) voidaan todeta, että ilma, jonka suhteellinen kosteus on 80 %, kuivaa viljan n. 18 % kosteuteen.



Kuva 1. Viljan ja ilman välinen kosteustasapainoalue n. 20 °C lämpötilassa eri mittausten mukaan, Maltry /1/.

Kosteustasapainokäyrät vaihtelevat hiukan eri viljalajeilla. Teoreettisesti on johdettu yhtälöitä, joista viljan kosteustasapainokäyrä voidaan laskea. Kuvassa (2) on esitetty kaksi vehnälle laskettua kosteustasapainokäyrää eri lämpötiloissa, Fortes et al /2/. Kuvassa olevat käyrät poikkeavat kokeellisesti mitatuista arvoista, sitä enemmän mitä korkeampi on ilman suhteellinen kosteus. Tosin kokeelliset tuloksetkin poikkeavat tällöin paljon toisistaan. Esim. ilman ollessa kylläistä viljan kosteus voi vaihdella 26:sta 36 %:iin.

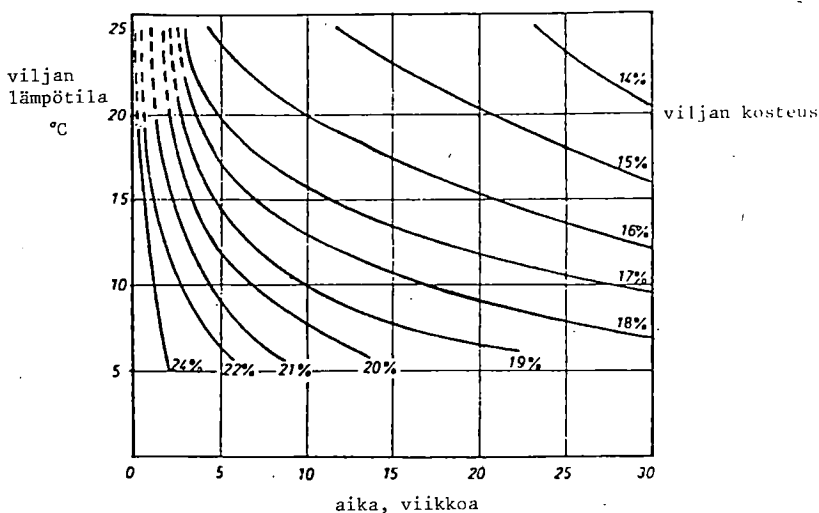


Kuva 2. Vehnän laskemalla saatuja kosteustasapainokäyriä (pistekatkovilvat) ja kokeellisesti saatu viljan kosteustasapainoalue (yhtenäiset viivat).

2.4 Viljan säilymisaika

Kuinka kauan vilja säilyy ennen kuivausta ja sen jälkeen varastossa riippuu hyvin monesta tekijästä, mm. jyvien kosteudesta, tuleentumisasteesta ja varastointilämpötilasta, eikä varmoja säilymisaikoja siksi voida antaa. Liian kosteana varastoidun viljan hengitys on runsasta, mikä erityisesti silloin, kun jyvät sisältävät vielä kasvukosteutta, johtaa voimakkaaseen itselämpenemiseen ja suureen kuiva-ainehävikkiin. Kun kuiva-aineesta hajoaa 0,1 % lisääntyy kosteus 0,06 %-yksikköä ja lämpötila nousee 8,6 °C, kun viljan ominaislämpö on 1,9 kJ/kg °C.

Jyvien lämpötilan noususta johtuvaa pilaantumista kiihdyttävät näissä olosuhteissa nopeasti kehittyvät mikro-organismit (homesienet ja bakteerit). Tuleentumaton vilja, jonka kasvukosteus on vielä 22 %, saavuttaa jo muutamassa tunnissa 45 °C lämpötilan ja pilaantuu 2...3 päivässä. Täysin tuleentunut, mutta yhtä kostea vilja, säilyy varastossa useita päiviä pilaantumatta. Kuvassa (3) on esitetty karkeasti viljan säilyvyys varastossa eri lämpötiloissa, sen kosteuden vaihdellessa. Esim. kosteuden ollessa n. 16 % ja lämpötilan 20 °C vilja voidaan säilyttää varastossa ilman mainittavaa laadun heikkenemistä n. kaksi kuukautta. Mikäli viljan lämpötila saadaan pysymään esimerkiksi välillä tuulettamalla alle + 15 °C, varastointiaika pitenee yli kaksinkertaiseksi. Meidän oloissamme ulkoilman lämpötilat kuivauskauden jälkeen ovat niin matalia, ettei viljan jäädytysongelmia esiinny.



Kuva 3. Viljan säilyvyys varastossa sen kosteuden ja lämpötilan vaihdellessa, Johnsen /3/.

Mitä kosteampana viljaa säilytetään, sitä huolellisemmin sen lämpötilaa on tarkkailtava lämpenemisvaaran takia. Kuvassa (3) oleva käyrästä on suuntaa antava.

Ennen kuivausta ja sen aikana vilja tulisi aina puhdistaa, koska säilymiseen vaikuttaa myös viljan puhtaus. Viljassa olevat oljenpätkät ja ruumenet edistävät homeiden kehittymistä, jolloin sinänsä varastoimiskelpoinen vilja voi pilaantua.

Viljan säilyvyys ennen kuivausta kaatosuppilossa, traktorin perävaunussa tai tuulettamattomassa laarissa riippuu ennen kaikkea sen kosteudesta. Taulukossa (1) on esitetty Suomessa tehdyn viljan itselämpenemistä ja siitä aiheutuvaa viljan pilaantumista koskevan tutkimuksen tuloksia. Käytännössä on meneteltävä suunnilleen seuraavasti; viljan kosteuden ollessa yli 30 % kuivaaminen on aloitettava 12 h kuluessa ja sen ollessa n. 25 % 24 h kuluessa. Kuivemman n. 20 % kostean viljan kuivaaminen pitäisi aloittaa viimeistään 48 h kuluessa.

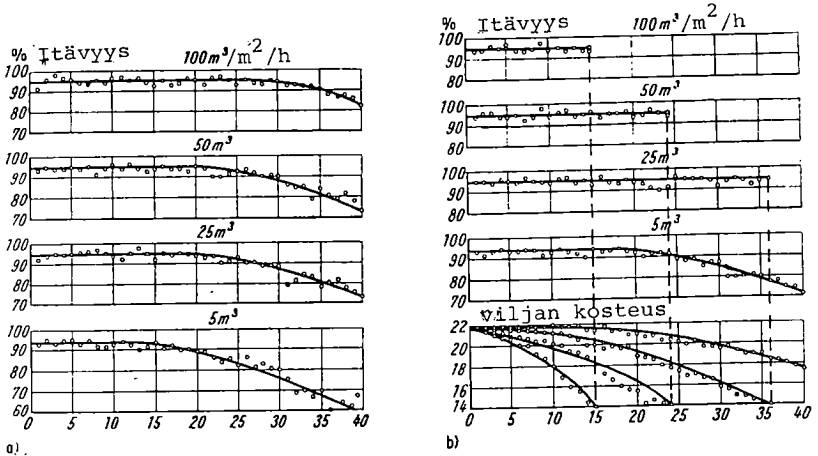
Taulukko 1. Lämpenemisen aiheuttama kostean viljan laatuominaisuuksien muuttuminen sillovarastointiolosuhteissa, Westermarck-Rosendahl /4/.

Kosteus	Pilaantuminen alkaa	Teknisen ominaisuuksien muuttuminen alkaa
yli 30 %	1 vrk	1...2 vrk
20...30 %	3...5 vrk	2...3 vrk

Viljan laatu pyritään säilyttämään hyvänä hillitsemällä jyvien hengitystä. Koska jyvien hengitys liittyy kosteuden, hapen ja lämmön läsnäoloon, voidaan kuivauksella, hapenpoistolla ja jäähdytyksellä saada vilja säilymään. Näillä toimenpiteillä heikennetään samalla sienien ja bakteerien toimintaa. Pelkkä jäähdytys ja hapenpoisto yksinään vain hidastavat viljan pilaantumista, mutta eivät estä sitä kokonaan.

Tärkeä ja suhteellisen helposti mitattava viljan laatuominaisuus on sen itävyys. Se huononee jo ennen kuin muut laatuominaisuudet kuten esimerkiksi leipoutumisominaisuudet ja maku huononevat.

Kuva (4) esittää kauran (kosteus 22 %) itävyyden muuttamista, kun jyviä tuuletetaan erisuuruuisilla määrillä kuivaavaa ja kuivaamatonta ilmaa. Kohdassa a ilman suhteellinen kosteus on 95 % ja tuuletuksella on siten vain jäähdyttävä vaikutus. Kohdassa b suhteellinen kosteus on 63 %, jolloin vilja myös kuivuu. Havaitaan, ettei suhteellisen suurikaan ilmamäärä - $100 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ - pysty ajan mittaan säilyttämään viljan itävyyttä, mikäli kuivumista ei tapahdu. Vasta kun ilma poistaa ylimääräkkösteuden, saavutetaan hyvä säilyvyys. Käytettäessä kuivaavaa ilmaa alle $5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ kuivuminen on niin hidasta, että laatuvahtinokkoja syntyy ennen kuin vilja saavuttaa 14 % kosteuden.



Kuva 4. Ilmamäärän vaikutus kosteana varastoidun kauran itävyyteen tuuletettaessa sitä kuivaavalla ja kuivaamattomalla ilmalla. Kerroskorkeus 0,5 m, Maltry /1/.

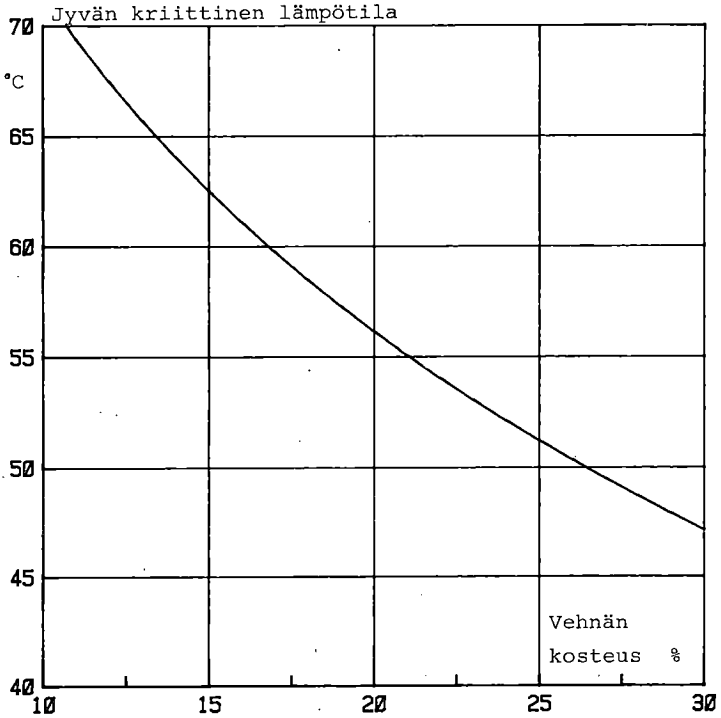
- a) ilman suhteellinen kosteus 95 %
- b) ilman suhteellinen kosteus 63 %

Kostea vilja voidaan myös säilöä rehuksi kaasutiiviisiin säiliöihin. Tällöin jyvien hengitys kuluttaa läsnäolevan hapen nopeasti ja varsinaiset pilaantumisprosessit estyvät.

2.5 Viljan lämpötilaherkkyys

Suurten kuivausnopeuksien ja hyvän lämmönhyödyntämisen saavuttamiseksi olisi pyrittävä mahdollisimman korkeisiin ilman lämpötiloihin. Tämän estää kuitenkin viljan laadun huononeminen tiettyjen lämpötilojen ylittyessä. Esim. vehnänjyvien valkuaisaine koaguloituu jo 40...60 °C lämpötilassa. Tällöin leipoutusominaisuudet ja itävyys huononevat. Liian nopea korkeassa lämpötilassa kuivaaminen aiheuttaa ulkoisen jyväpinnan voimakkaan kutistumisen ja halkeamisen, sekä alkion irtoamisen jyvän ulkokuoresta. Eri viljalajit ovat eri tavoin lämpötilaherkkiä.

Jyvien kosteuden lisääntyessä niiden lämpötilaherkkyys suurenee, kuva (10).



Kuva 5. Vehnän jyvän ytimen kriittinen lämpötila eri kosteuksissa, Lindberg ja Sörensson /5/.

Siemenviljan sallittu kuivauslämpötila on 10...12 astetta matalampi kuin leipäviljan.

Kuvan (5) käyrällä esitetyt lämpötilat eri kosteuksissa vilja sietää itävyyden alentumatta merkittävästi. Ilman lämpötilat läpivirtauskuivurissa saavat olla 10...20 astetta korkeampia kuin kuvan (5) kriittiset lämpötilat, koska vilja poistuu lämminilmavirtauksesta ennen kuin jyvien lämpötila ylittää sallitun lämpötilan. Viljan ollessa erittäin kosteaa suositellaan sen kuivaamista kahdessa vaiheessa. Tällöin vältetään jyvien ulkokerrosten liiallinen lämpeneminen. Kuivausjaksojen välillä jäännöskosteus jakautuu tasaisemmin viljassa, jolloin kosteuden poisto helpottuu seuraavan kuivausjakson aikana.

Kaikissa viljan lämpötilaherkkyttä koskevissa tutkimuksissa esitetään yhdenmukaisesti, että mitä kuivempaa vilja on, sitä korkeampaa lämpötilaa se kestää vahingoittumatta. Samoin tiedetään, että lämpötila-alue, jolla vahingoittuminen alkaa on kapea. Lämpötilalla on paljon merkittävämpi vaikutus kuin ajalla, jonka jyvät ovat korkeassa lämpötilassa. Yhtälö (3) esittää vehnän kriittistä lämpötilaa, jossa sen itävyys alkaa merkittävästi huonota

$$t_{kr,1} = 122,5 - 51 \log x \quad (3)$$

jossa x on viljan kosteus prosenteissa, Lindberg & Sörensson /5/.

$t_{kr,1}$ on kriittinen lämpötila, kun kriteerinä on itävyyden muutos

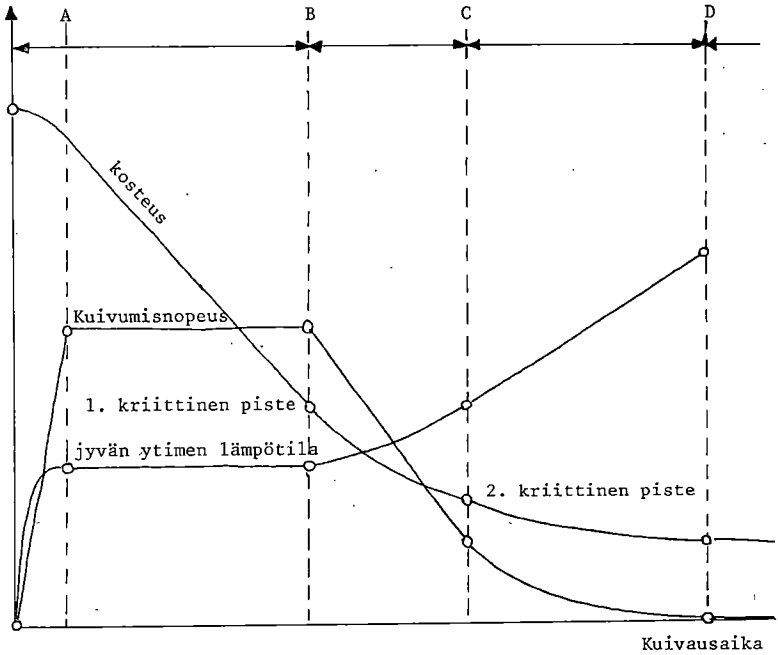
Hutchinson et al /6/ esittävät yhtälössään myös aikatekijän kriittistä lämpötilaa arvioitaessa

$$t_{kr} = 122 - 5 \log t - 44 \log x \quad (4)$$

jossa t on aika minuuteissa, jonka jyvät ovat kriittisessä lämpötilassa.

t_{kr} on kriittinen lämpötila, kun kriteerinä on gluteelinin denaturoituminen

Käytännössä kuivurissa olevan viljan lämpötila ja kuivausilman lämpötila vaihtelevat kuivurityypin mukaan, joten tarkkaa ohjetta kuivausilman lämpötilalle ei voida antaa. Kokemuksesta tiedetään, että se saa olla 60...70 °C välillä, kuivauksen alussa matala ja lopussa korkeampi.



Kuva 6. Kuivaustapahtuman periaatteellinen kulku, Olered /7/.

A - B vakio kuivumisnopeus

B - C jyvän pinta vain osin kostunut

C - D veden diffuusio ytimestä jyvän pintaan määräävä.

Kuvassa (6) on esitetty kuivaustapahtuma periaatteellisesti, mikäli kuivaus tapahtuu jatkuvasti ilman välilivaita. Aluksi jyvien lämpötila nousee tasolle, joka riippuu mm. kuivausilman lämpötilasta ja ilman virtausnopeudesta.

Jyvän ytimen lämpötilan nousua rajoittaa jyvän pinnalta haihtuva vesi, jota myös diffundoituu jyvän sisäosista pintaan. Kun jyvän kosteus näin alenee, tullaan vaiheeseen, jossa veden diffuusionopeus jyvän sisäosista alkaa vaikuttaa haihtumisnopeuteen, 1. kriittinen piste. Haihtumisen vähentyessä jyvän pinnasta sen lämpötila alkaa nousta samoin ytimen lämpötila. Kuivuminen hidastuu tasaisesti. Kun diffuusio yksin määrää haihtumisnopeuden, kuivuminen alkaa kiihtyvästi hidastua, 2. kriittinen piste.

Jyvät sekoittuvat ja pyöriävät kiertäessään kuivurissa. Siksi ne eivät joudu kaiken aikaa kosketukseen kuuman tuloilman kanssa. Toisaalta sitoessaan kosteutta kuivausilma jäähtyy ja ne jyvät, jotka liikkuvat lähinnä poistoilmakanavia joutuvat kaikkein pienimmälle lämpörasitukselle alttiiksi. Lisäksi jyvien pinnasta haihtuva vesi jäädyttää jyviä, joten kuivausilman lämpötila saa olla huomattavasti korkeampi kuin jyvän ytimen kriittinen lämpötila.

Kuivausilman lämpötilan säätö viljan kosteuden mukaan edellyttäisi viljan kosteuden jatkuvaa mittaamista. Tätä vaikeuttaa tällä hetkellä puute sopivista mitta-antureista. Toistaiseksi on tyydytty pitämään lämpötila riittävän alhaisena ja vakiona kuivauksen aikana.

2.6 Ilma kuivausaineena

Normaali ulkoilma on seos kuivaa ilmaa ja vesihöyryä. Tämän kaasun ja höyryseoksen kokonaispaine on Daltonin lain mukaan kuivan ilman osapaineen ja vesihöyryn osapaineen summa

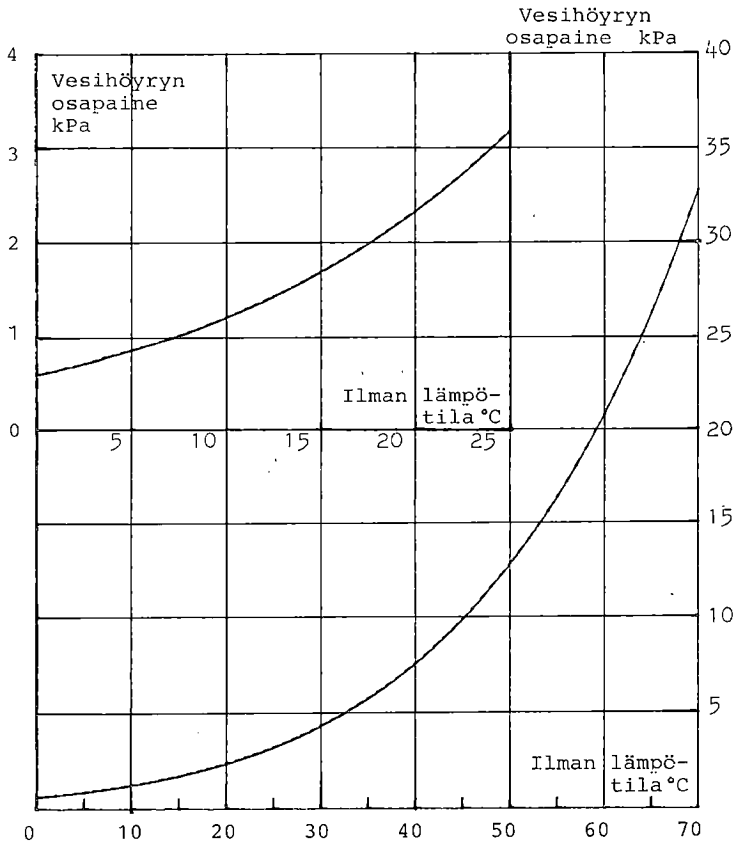
$$p = p_1 + p_h \quad (5)$$

jossa p on kostean ilman paine
 p_1 on kuivan ilman osapaine
 p_h on vesihöyryn osapaine

Kostean ulkoilman paineena voidaan pitää 101,3 kPa.

Puhtaasta kaasuseoksesta kostea ilma eroaa siten, että vesihöyryn osuus ei voi olla mielivaltaisen suuri, vaan sen raja on kyllästyspaine. Vesihöyryn osapaine voi olla vain pienempi tai yhtä suuri kuin lämpötilasta riippuva kyllästyspaine. Jos ilmaan tuodaan yli kyllästyspainetta vastaava määrä vesihöyryä, ylimäärä tiivistyy vedeksi ja ilma tulee kastetilaan.

Kuvassa (7) on esitetty ilman vesihöyryn osapaine eri lämpötiloissa ilman ollessa täysin kylläistä, Riedel /8/.



Kuva 7. Kylläisen ilman vesihöyryn osapaine eri lämpötiloissa.

Ilman vesihöyrypitoisuus ilmoitetaan yleensä veden massana kuivaa ilmakiloa kohden ja sitä kutsutaan kosteudeksi.

$$w = m_h / m_1 \quad (6)$$

jossa w on ilman kosteus
 m_h on vesihöyryn massa () kg
 m_1 on kuivan ilman massa () kg

Ideaalikaasuyhtälön mukaan voidaan kosteus ilmoittaa myös osapaineiden avulla

$$w = \mu \cdot p_h / p_1 = \mu \cdot p_h / p - p_h \quad (7)$$

jossa μ on veden molekyylipainon ja ilman keskimääräisen molekyylipainon suhde

$$\mu = 18.015 \text{ kg/kmol} / 28.964 \text{ kg/kmol} = 0,6220 \quad (8)$$

Jos ilma sisältää suurimman mahdollisen määrän vesihöyryä, jonka se tietyssä lämpötilassa ja paineessa kykenee sitomaan, sanotaan sen olevan kylläistä. Erotusta

$$\Delta w = w_k - w \quad (9)$$

jossa w_k on ilman kosteus sen ollessa kylläistä
 w on ilman mitattu kosteus

kutsutaan kylläisyysvajaukseksi ja se ilmoittaa, kuinka monta kiloa vettä kuivaa ilmakiloa kohden ilma kykenee vielä sitomaan lämpötilan pysyessä vakiona. Käytännössä ilmaan voi sitoutua 50-70 % kylläisyysvajauksen Δw ilmoittamasta määrästä, koska ilma kostuessaan jäähtyy.

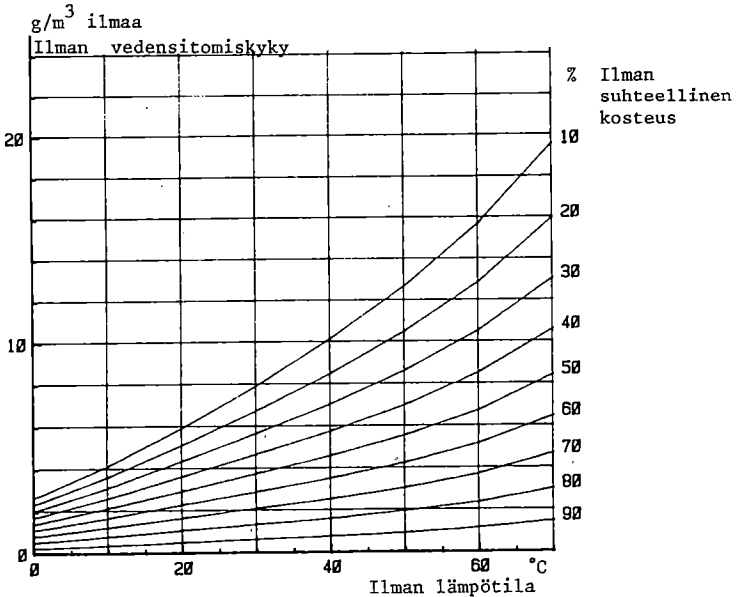
Maataloudessa käytetään ilman kylläisyystilan osoittamiseen yleensä suhteellista kosteutta φ . Se on meteorologiasta lainattu suure, joka ilmoittaa yhden tilavuusyksikön suuruisen ilmamäärän sisältämän vesimäärän ja suurimman mahdollisen vesimäärän suhteen annetussa lämpötilassa ja paineessa.

φ on tapana ilmoittaa prosentteina:

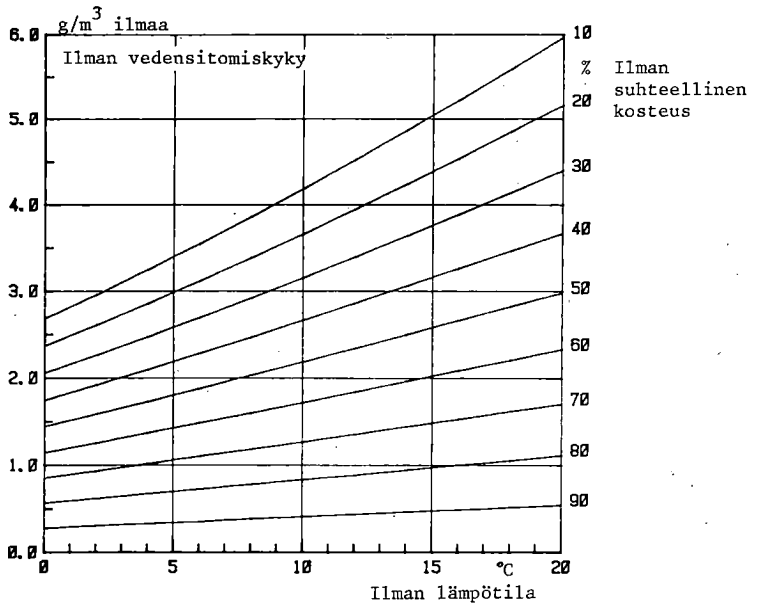
$$\varphi = w' / w'_k \cdot 100 \% \quad (10)$$

jossa φ on ilman suhteellinen kosteus
 w' on ilman sisältämän veden massa tilavuusyksikköä (1 m^3) kohden määrättyssä lämpötilassa ja paineessa
 w'_k on suurin mahdollinen veden määrä, jonka ilma voi sisältää tilavuusyksikköä kohden ko. lämpötilassa ja paineessa.

Kuvista (8 a ja 8 b) nähdään kuinka paljon vettä voi enintään sitoutua kuutiometriin ilmaa, kun tiedetään ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila. Ilman paine on $101,3 \text{ kPa}$ ja ilman odotetaan kostuvan täysin kylläiseksi. Kuvissa on huomioitu ilman jäähtyminen (vrt.2.7.2.1).



Kuva 8 a. Ilman potentiaalinen vedensitomiskyky sen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muuttuessa.



Kuva 8 b. Ilman potentiaalinen vedensitomiskyky sen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muuttuessa

Ilman suhteellinen kosteus voidaan ilmoittaa myös osapaineiden avulla

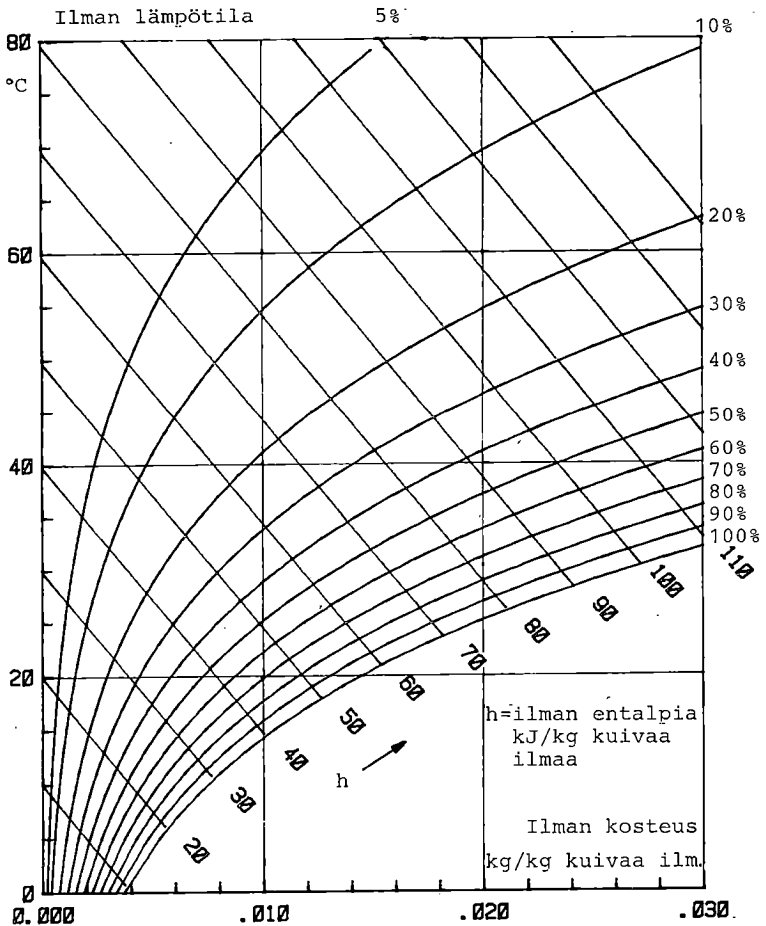
$$\varphi = p_h / p_{hk} \cdot 100 \% \quad (11)$$

jossa p_{hk} on vesihöyryn osapaine ilman ollessa täysin kylläistä.

2.7 Kuivaustapahtuman havainnollistaminen kostean ilman diagrammilla

2.7.1 Kostean ilman diagrammi

Kuivauksen termodynaamisia tapahtumia voidaan seurata havainnollisesti kostean ilman diagrammin avulla. Kuvan (9) diagrammissa vaaka-akselina on ilman kosteus ja pystyakselina ilman lämpötila.



Kuva 9. Kostean ilman diagrammi ilmanpaineelle 101,3 kPa.

Ilman entalpia saadaan vinosti alaspäin oikealle kulkevilta suorilta. Se voidaan laskea yhtälön (12) mukaisesti

$$h = (c_i + w \cdot c_h) \cdot t + w \cdot l_o \quad (12)$$

jossa viljankuivauksessa kyseeseen tulevalla lämpötila-alueella c_i , c_h ja l_o voidaan pitää vakioina;

c_i on kuivan ilman ominaislämpökapasiteetti =
1,008 kJ/kg °C

c_h on vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti =
1,87 kJ/kg °C

l_o on veden höyrystymislämpö = 2501 kJ/kg

Oikealle ylöspäin kaartuvat käyrät ilmoittavat ilman suhteellisen kosteuden. Diagrammi on piirretty ilmanpaineelle 101,3 kPa. Käyrän $\varphi = 100\%$ alapuolella osa ilman kosteudesta on tiivistynyt vedeksi (sumualue).

2.7.2 Ilman tilanmuutokset kostean ilman diagrammissa

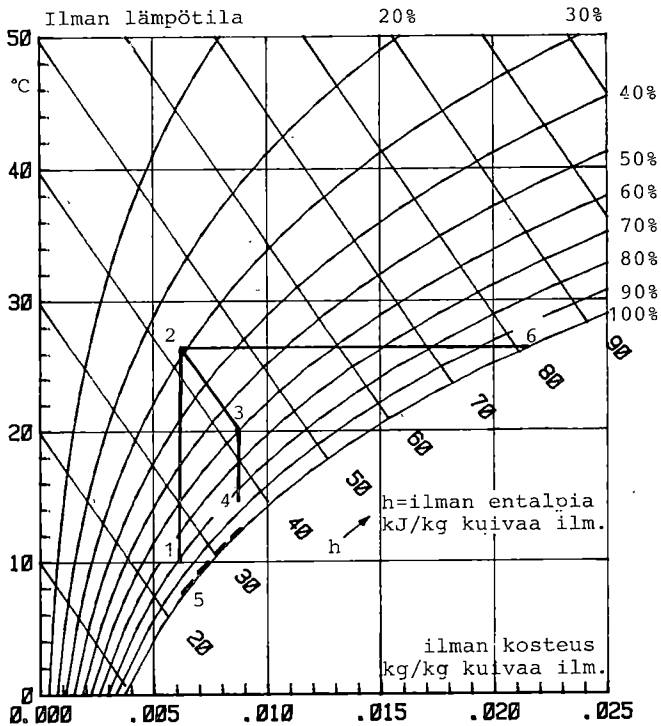
Käytännön kuivauksessa ovat seuraavat ilman tilanmuutokset yleisiä:

- veden sitoutuminen kuivauksessa
- ilman lämmitys
- kosteuden poisto ilmasta
- ilman jäädytys

2.7.2.1 Veden sitoutuminen kuivauksessa

Veden sitoutuminen kuivauksessa noudattaa diagrammissa vakioentalpian käyrää, sillä kuivaustapahtuma on käytännössä adiabaattinen, mikäli kuivuvan viljan lämpötila ei paljon poikkea kuivausilman lämpötilasta.

Veden haihduttamiseen tarvittava lämpöenergia kuluu tosin ilman omasta lämpösisällöstä niin, että ilman lämpötila laskee t_1 :stä t_3 :een, kuva (6). Lämpöenergia jää kuitenkin latenttina lämpönä (höyrystymislämpö) ilman sitomaan vesihöyryyn. Kostean ilman kokonaislämpösisältöä voidaan siksi pitää vakiona. Veden sitoutumisen johdosta nousevat ilman suhteellinen kosteus φ_1 :stä φ_3 :een ja kosteus w_1 :stä w_3 :een. Ilman kylläisyysvajausta vastaava vesimäärä $w_6 - w_1$ olisi täysin poistettavissa, jos ilman lämpötila pysyisi vakiona. Tämä edellyttäisi lisälämmön tuontia.



Kuva 10. Ilman tilanmuutokset kostean ilman diagrammissa

- 1 - 2 ilman lämmitys
- 2 - 3 veden sitominen
- 3 - 4 ilman jäähdytys
- 4 - 5 kosteuden poisto ilmasta
- 2 - 6 veden sitoutuminen ilman lämpötilan pysyessä vakiona

Käytännössä ei myöskään saavuteta ilman kyllästymistä arvoon $\varphi = 100\%$ asti. Toisaalta kuivausaika ei yleensä ole riittävä kosteuden siirtymiseen viljasta ilmaan ja toisaalta voi syntyä vain tietty tasapaino viljan kosteuden ja ilman kosteuden välille, kuva (1).

2.7.2.2 Ilman lämmitys

Ilmaa lämmitettäessä tilanmuutos noudattaa käyrää, jossa ilman kosteus säilyy vakiona, kuva (10). Kun lämpötila nousee t_1 :stä t_2 :een ilman suhteellinen kosteus alenee φ_1 :stä φ_2 :een, mikä merkitsee ilman kuivaamiskyvyn paranemista.

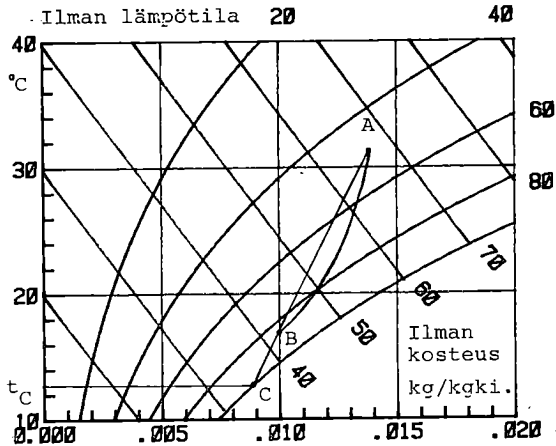
2.7.2.3 Kosteuden poisto ilmasta

Kosteutta voidaan poistaa ilmasta saattamalla se kosketuksiin voimakkaasti hygroskooppisten aineiden kanssa, jotka sitovat osan kosteudesta itseensä. Kostean ilman diagrammissa tällainen ilman tilan muutos noudattaa vakioentalpian käyrää. Poistettaessa kosteutta ilmasta alenevat sen absoluuttinen ja suhteellinen kosteus lämpötilan noustessa. Ilman loppulämpötila on kuitenkin alhaisempi kuin taupauksessa, jossa suhteellinen kosteus alennetaan samansuuriseksi pelkästään lämmittämällä - ilman kosteuden poistoa.

2.7.2.4 Ilman jäädytys

Ilman jäähtyessä tilanmuutos noudattaa suoraa $w = \text{vakio}$. Ilman suhteellinen kosteus nousee φ_3 :sta φ_4 :ään lämpötilan laskiessa t_3 :sta t_4 :ään. Näin tapahtuu, jos ilma jäädytetään esim. kylmällä patterilla, jonka pintalämpötila on korkeampi kuin ilman kastepistelämpötila. Kun ilman lämpötila laskee riittävästi saavutetaan kylläisyystila, jonka jälkeen lämpötilan edelleen aletessa kosteus alkaa tiivistyä ja tilanmuutos seuraa kyllästyskäyrää alaspäin.

Käytännössä jäähtytystavasta riippuen tilanmuutos noudattaa käyrää AB tai suoraa AC kuvassa (11).



Kuva 11. Ilman jäähtytys kylmällä patterilla, jonka pintalämpötila on matalampi kuin ilman kastepistelämpötila. Piste A; ilman tila ennen jäähtytystä, piste B; ilman tila jäähtytyksen jälkeen. t_c on jäähtytinpatterin pintalämpötila. Tilan muutos tapahtuu suoraa AC noudattaen, jos patterin pintalämpötila pysyy vakiona, ja käyrää AB pitkin, jos pintalämpötila muuttuu /9/.

2.8 Viljan kuivaustavat

Viljan kuivauksessa sovelletaan nykyään yksinomaan lämpömenetelmiä. Lämmöllä tapahtuvassa kuivauksessa viljan kosteus poistetaan höyrystämällä tai haihduttamalla tuomalla kuivattavaan viljaan lisälämpöä ja vesi johdetaan suoraan höyrynä tai ilman avulla pois.

2.8.1 Höyrystys- eli tyhjökuivaus

Tyhjökuivauksessa vilja lämmitetään kuivurissa vallitsevaa painetta vastaavaan veden kiehumispisteeseen, jolloin vesihöyryn paine on sama kuin kuivurin paine. Alentamalla kuivaustilan paine esim. 4 kPa:iin saadaan vesi kiehumaan vain n. 29 °C:ssa.

Tyhjökuivurit ovat hankintakustannuksiltaan kalliita ja siksi taloudellisia vain kuivattaessa hyvin suuria viljajeriä.

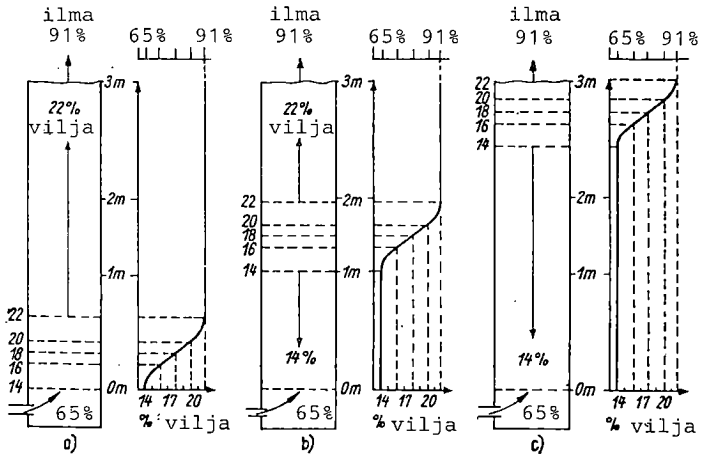
2.8.2 Haihdutuskuivaus

Maatilojen käyttöön soveltuvat kuivurit toimivat yksinomaan haihdutusperiaatteen mukaan. Haihdutuksessa veden siirtymisen ajavana voimana on viljassa olevan veden höyrynpaineen ja ilman vesihöyryn osapaineen ero.

2.8.2.1 Kylmäilmakuivaus

Kylmäilmakuivauksessa viljaa kuivataan suoraan ulkoilmalla tai ilmalla, jota on lämmitetty korkeintaan 5...7 °C. Siilokuivurissa ilma kulkee säteittäisesti keskeltä siiloa viljakerroksen läpi ja poistuu verkkomaisten tai rei'itettyjen seinien läpi. Suomessa on yleisempi siilokuivurityyppi, jossa ilma tulee ja poistuu harjakennojen kautta kuten lämminilmakuivurissa. Lava- tai laarikuivurissa ilma kulkee viljakerroksen läpi alhaalta ylöspäin. Siilo- ja lavakuivurille on yhteistä se, että ilma virtaa levossa olevan jyvämässan läpi, jolloin viljassa olevan veden höyrynpaineen ja ilman vesihöyryn osapaineen eron takia kosteus siirtyy ilmaan. Kuivaus tapahtuu erä kerrallaan, mistä johtuu nimitys eräkuivuri.

Kylmäilmakuivurissa vesi poistuu ensin kerroksista, joiden läpi ilma tulee viljaan. Ilma sitoo niissä kosteutta, kunnes kosteustasapaino on likimain saavutettu. Virratessaan edelleen viljakerrosten läpi ilma ei voi enää sitoa lisää kosteutta. Vasta kun kerrokset ilman sisääntulokohdassa ovat kuivuneet tuloilman tilaa vastaavaan kosteuteen, siirtyy kuivumisvyöhyke vähitellen eteenpäin. Kerrokset ilman ulostulopäässä kuivuvat viimeiseksi ja ovat siten eniten vaarassa pilaantua. Kun kuivausilma on lämpimämpää kuin vilja ja jo ennen kuivuria kosteaa, saattaa kyllästyneen ilman vesihöyry tiivistyä uudelleen ilman kulkiessa kylmän viljan läpi. Tällöin vilja kostuu ilman ulostulopäässä lisää, mistä on seurauksena kuorettuminen ja paakkuuntuminen. Kuvassa (12) on esitetty kaavamaisesti kuivumisen edistymisen viljakerroksessa.



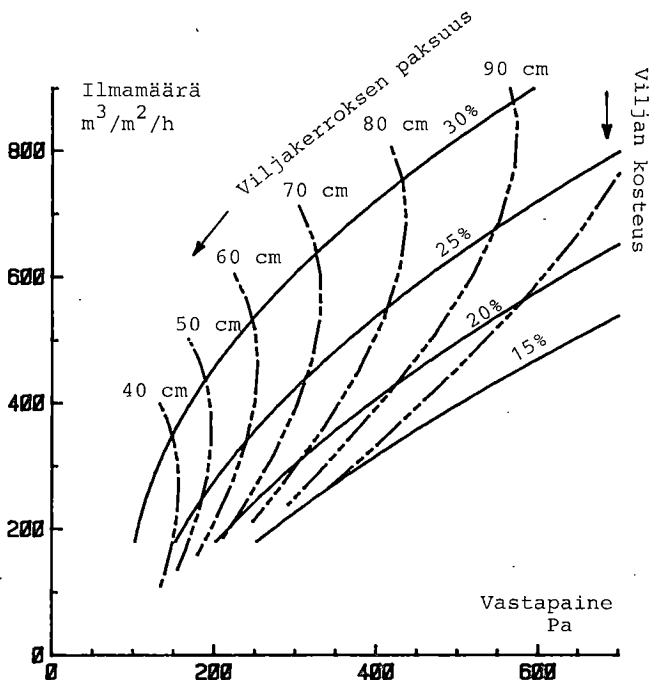
Kuva 12. Kuivumisen edistymisen viljan (kosteus 22 %) kylmäilmakuivauksessa, Heyde /10/.

- Alimmat viljakerrokset kuivuvat kapeana vyöhykkeenä. Kun ilma on kostunut 91 %:iin, ylemmät kerrokset eivät enää kuivu.
- Kuivuminen on edennyt keskikerroksiin.
- Ylimmät kerrokset kuivuvat ja poistoilman kosteus alkaa aleta.

Ilman kuivaamiskyky, ilmamäärä ja viljakerroksen paksuus on sovittava toisiinsa niin, että myös kerrokset ilman ulostulopuolella kuivuvat niin nopeasti, ettei vilja pääse pilaantumaan.

Kylmäilmakuivauksessa yhteen kuutiometriin ilmaa voi sitoutua oloissamme vain 0,5...2 g vettä. Siksi tarvitaan huomattavia ilmamääriä. Riittävänä ilmamääränä pidetään tasokylmäilmakuivurissa 550 m³/h kuivurin pohjapinta-alan neliometriä kohden. Kerrospaksuutta muuttamalla voidaan ilmamäärää viljatonnia kohden säätää. Viljan kosteuden ollessa 20 % viljakerroksen paksuus saa olla n. 90 cm. Vehnän aiheuttama vastapaine kuivurissa on tällöin n. 500...600 Pa. Tällöin potkuripuhaltimien antama ilmamäärä on oltava n. 800 m³/t/h, joka vastaa vaadittua 550 m³/h/m² ilmamäärää. Viljan kosteuden ollessa yli 30 % tarvitaan n. 1700 m³/t/h ilmamäärä, johon päästään kerrospaksuutta pienentämällä. Tasokylmäilmakuivurissa tarvittava ilmamäärä saadaan kertomalla luku 550 m³/h kuivurin laaripinta-alalla. Puhallin (tai puhaltimet) valitaan niin, että se antaa tuon ilmamäärän vastapaineen ollessa n. 500...600 Pa. Kuvasta (13) saadaan vehnän aiheuttama vastapaine sen kosteuden ja kerrospaksuuden vaihdellessa. Kuvaa voidaan myös käyttää apuna määrittäessä sopivaa viljakerroksen paksuutta, kun tunnetaan puhaltimen antama ilmamäärä tietyllä vastapaineella. Rukiilla kerroksen pitää olla 10 cm, ja ohralla 5 cm ohuempi kuin vehnällä. Kauralla se saa olla 10 cm paksumpi kuin vehnällä.

Tasokylmäilmakuivureissa, joissa metrin kerroskorkeuksia ei yleensä ylitetä, ovat potkuripuhaltimet yleisiä hyvän hyötysuhteensa takia pienillä vastapaineilla. Jos vastapaine on korkea, käytetään keskipakopuhaltimia.

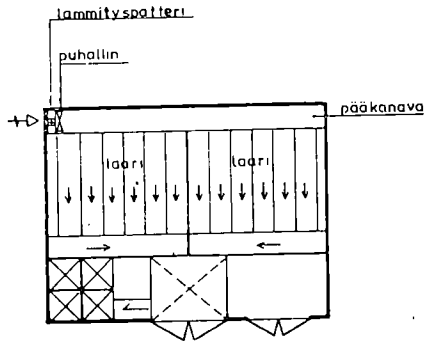


Kuva 13. Vehnän aiheuttama vastapaine sen kosteuden ja kerrospaksuuden vaihdellessa. Olkoon esimerkiksi viljan kosteus 25 %. Kun kerrospaksuus on 80 cm, kuivurin aiheuttama vastapaine on n. 400 Pa. Puhaltimen ilmamäärän tulee olla tällöin n. 550 m^3/h x kuivurin pohjapinta-ala. Jos kerrospaksuus on 90 cm, vastapaine on n. 570 Pa ja puhaltimen täytyy tällä vastapaineella antaa ilmamäärä 670 m^3/h x kuivurin pohjapinta-ala, jotta ilmamäärä olisi riittävä viljatonnaa kohden tunnissa. Kun tunnetaan puhaltimen antama ilmamäärä vastapaineen muuttuessa, voidaan viljan kosteuden perusteella määrätä sopiva kerrospaksuus. Tyhjän kuivurin vastapaineeksi on oletettu 100 Pa. Vehnän aiheuttama vastapaine; Hague et al /11/.

Jos kylmäilmakuivuria käytetään epäedullisissa olosuhteissa, voidaan ilman kuivauskykyä parantaa lämmittämällä. Yhden asteen lämpötilan nousua kohden suhteellinen ilman kosteus alenee n. 5 %-yksikköä. Sen alentamiseksi 85 %:sta 65 %:iin täytyy ilmaa siten lämmittää neljä astetta. Käytännössä kolmekin astetta riittää, sillä ilma lämpenee jo puhaltimessa asteen verran. Kylmäilmakuivauksessa ei ole syytä lämmittää ilmaa enempää kuin vaaditaan sen suhteellisen kosteuden alentamiseksi n. 60..65 % tasolle. Kun ilman suhteellinen kosteus laskee tämän alapuolelle, kuivuvat alimmat kerrokset jo liikaa. Toisaalta, jos kylmää viljaa kuivataan kylmäilmakuivurissa huomattavasti ympäristöä lämpimämmällä ilmalla, kostuvat ylimmät viljakerrokset herkästi ilman jäähtymisen ja vesihöyryn uudelleen tiivistymisen takia.

Tasokylmäilmakuivurissa kuivausilma johdetaan verkko- tai suomulevypohjan tai pohjalla olevien kanavien läpi jyvämassaan.

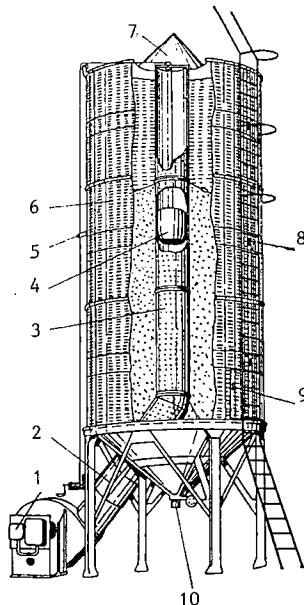
Ilmahäviöiden välttämiseksi on ilman tulokanaviston oltava ilmatiivis ja kerroskorkeuksien kaikkialla likimain yhtä suuret. Puhaltimen ilmanottopää on sijoitettava sellaiseen paikkaan, ettei kostea poistoilma pääse uudelleen kuivuriin. Poistoilma poistuu yleensä vapaasti ikkunoiden ja muiden aukkojen kautta ulkoilmaan.



Kuva 14. Tyypillinen kylmäilmakuivaamo lisälämmityksellä varustettuna.

Kuvassa (14) on esitetty tyypillinen tasokylmäilmakuivuri. Tasokylmäilmakuivureilla voidaan kuivata hyvinkin kosteaa viljaa viljakerroksen paksuuden ollessa riittävän pieni.

Kuva 15. Siilomallinen kylmäilmakuivuru, jossa lisälämpölaite, Heyde /10/.



1. lisälämpölaite
2. tuloilmakanava
3. keskusputki
4. keskusputken suljin
5. sulkimen sijainnin osoitin
6. siilon vaippa
7. kartio
8. näytteenottoaukko
9. huoltoluukku
10. tyhjennysputki

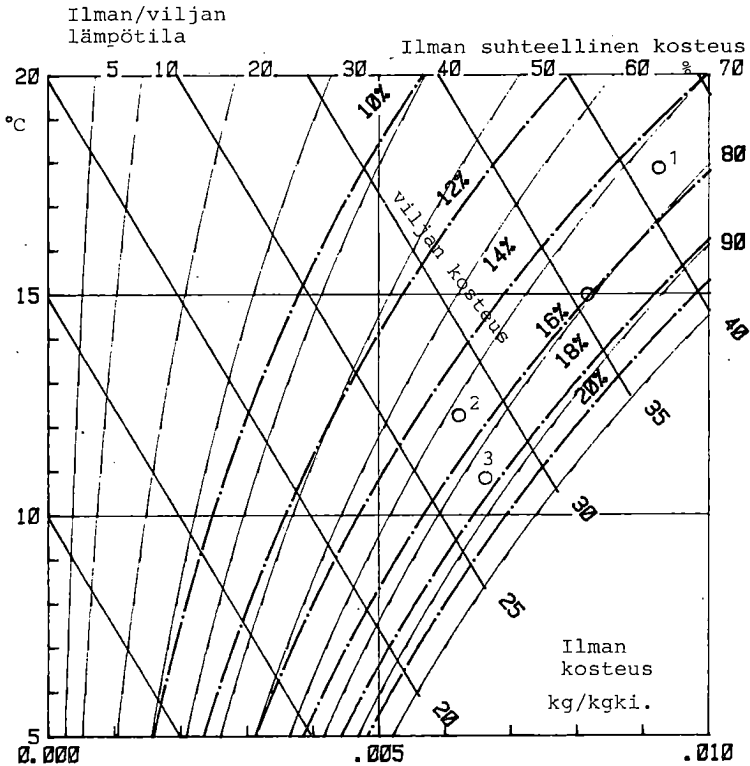
Siilomallisten kylmäilmakuivureiden halkaisijat ovat yleensä n. 3 m ja korkeudet n. 4...6 m. Kuva (15) esittää siilokylmäilmakuivurin periaatetta. Kuivurin vaippa on sälekaihtimen kaltainen tai rei'itetty, jolloin aukot on nuotoiltu siten, että pienetkin jyvät pysyvät kuivurissa. Säiliön keskustassa on reiällinen putki, jonka kautta kuivausilma johdetaan kuivuriin. Keskusputki voidaan sulkea halutulta korkeudelta kuivattavan viljaerän suuruuden mukaan. Lisälämmönlähde on joko puhaltimen ja keskusputken välissä tai puhaltimen imuaukon etupuolella.

Puhaltimen puhallusilma virtaa keskusputkesta säteittäisesti ulos. Tällöin sen virtausnopeus laskee, koska virtauspoikkipinta-ala kasvaa. Virtausnopeus ja painehäviö ovat suurimmillaan lähinnä keskusputkea. Sen halkaisijan tulisi siksi olla mahdollisimman suuri. Kuivurin halkaisijan ollessa 3 m keskusputken halkaisija on yleensä n. 0,6 m.

Siilokylmäilmakuivurit tyhjennetään valuttamalla. Niitä voidaan käyttää myös varastoina. Siilokylmäilmakuivureita ei yleensä käytetä Suomessa viljan kosteuden ollessa yli 25 % paakkuuntumisvaaran takia.

Puhaltimen käyntijaksojen valinta kylmäilmakuivauksessa

Puhaltimen käyttöajat kylmäilmakuivauksessa valitaan ensisijassa viljan kosteuden ja ilman suhteellisen kosteuden perusteella. Viljan kosteuden ollessa yli 20 % tuuletaaan sitä jatkuvasti sääoloista riippumatta ympäri vuorokauden. Alle 20 % kosteuksilla puhallinta pitäisi käyttää vain silloin, kun voidaan olettaa viljan kuivuvan.



Kuva 16. Viljan kuivuminen tai kostuminen kylmäilma-kuivauksessa. Pistekatkoviivoin piirretyt kosteustasapainokäyrät; Fortes /2/.

Kuvassa (16) vehnän kosteustasapainokäyrät on piirretty katkonaisin viivoin kostean ilman diagrammiin. Tarkastelussa oletetaan kussakin tapauksessa viljan lämpötilaksi 15 °C ja kosteudeksi 16 % kuivausta aloitettaessa. Jotta vilja kuivuisi, täytyy viljassa olevan veden höyrönpaineen olla korkeampi kuin ilman vesihöyrön osapaineen. Kuvassa (16) täytyy siis kuivausilman absoluuttisen kosteuden olla pienempi kuin viljan lämpötilaa ja kosteutta vastaavan ilman absoluuttinen kosteus tasapainotilassa. Jos kuivausilman ja viljan lämpötila on suunnilleen sama ei ole vaikeuksia päätellä kuivuuko vilja.

Jos ilman lämpötila on aluksi korkeampi kuin viljan lämpötila, kuivumista alkaa tapahtua vasta kun vilja on niin paljon lämmennyt, että siinä olevan veden höyrynpaine ylittää kuivausilman vesihöyryn paineen. Koska vilja lämpenee alhaalta ylöspäin, alimmat kerrokset alkavat kuivua välittömästi ennen kuin ylimmät kerrokset ehtivät lämmetä. Tällöin on vaara, että ilman lämpötila alittaa kastepistelämpötilan ja vesi tiivistyy ylimmissä kerroksissa. Näin voi käydä, kun ilmaa, jonka suhteellinen kosteus on lähellä 100 %, lämmitetään liikaa (enemmän kuin 5-7 °C). Kun kuivausta jatketaan useita tunteja, myös ylimmät kerrokset lämpiävät ja alkavat kuivua.

Pitempään kuivattaessa kuivumisen edellytyksenä on siis, että ilman tilapiste on tasapainokäyrän yläpuolella (esimerkiksi piste 1). Jos viljaa kuivataan ilmalla, jonka lämpötila on aluksi matalampi kuin viljan lämpötila, pätee tässäkin kuivumiselle sääntö, että ilman tilapisteen on sijaittava tasapainokäyrän yläpuolella (esimerkiksi piste 2).

Jos kuivausilma on kylmempää kuin vilja ja sen tilapiste on tasapainokäyrän alapuolella, (esimerkiksi piste 3) kuivuminen tapahtuu aluksi viljan oman lämpöenergian turvin, mutta kuivausta pitempään jatkettaessa, vilja alkaa uudelleen kostua. Esimerkkitapauksessa kuivausta ei kannata jatkaa 1-2 h pitempää, sillä tässä ajassa vilja jäähtyy kuivausilman lämpötilaan. Viljan jäädyttäminen on suotavaa ja toisaalta viljan uudelleen kostuminen vaatii jonkin verran kosteampaa ilmaa kuin tasapainokäyrän mukainen ilma on.

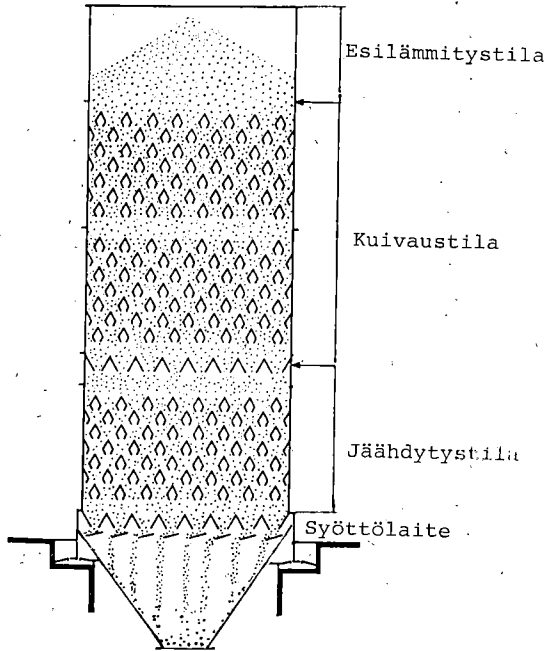
Edellä oleva tarkastelu kuvan (16) mukaan on suuntaa antava, koska viljan itselämpenemistä ei ole huomioitu. Jäähdytys onkin tärkeämpi kuin kuivaus, jos viljan lämpötila on yli + 20 °C. Lisäksi tasapainokäyrät vaihtelevat eri viljalaaduilla. Kuvan (16) käyrät pätevät vehnälle hyvin, kun sen kosteus on alle 18 % ja lämpötila 5-15 °C.

2.8.2.2 Lämminilmakuivaus

Lämminilmakuivauksen perustana ovat samankaltaiset fysi-
kaaliset tapahtumat kuin kylmäilmakuivauksessa. Ilman kui-
vausominaisuuksien parantamiseksi se lämmitetään niin kuu-
maksi, kuin vilja kestää. Lämmitetty ilma voi sitoa
olennaisesti suurempia vesimääriä kuin lämmittämätön.
70 °C lämpötilassa 1 m³ ulkoilmaa voi sitoa 15 g vettä.
Lämmityksellä aikaansaatu suhteellisen ilman kosteuden
jyrkkä aleneminen johtaa lisäksi huomattavaan eroon
viljassa olevan veden höyrynpaineen ja ilman vesihöyryn
osapaineen välillä. Tämän suuren paine-eron takia
kosteuden siirtyminen nopeutuu. Jos esimerkiksi ilma läm-
mitetään tilasta t = 10 °C ja $\varphi = 80\%$ 70 °C:een, niin
sen suhteellinen kosteus alenee n. 6 %:iin. Tällainen
ilma on tasapainossa viljan kanssa, jonka kosteus on vain
5 %. Ylikuivumisen välttämiseksi kuivaus on lopetettava
jo ennen kuin viljan kosteus on alentunut 14 %:iin. Jääh-
dytyksessä viljan kosteus alenee vielä 1...2 %-yksikköä.

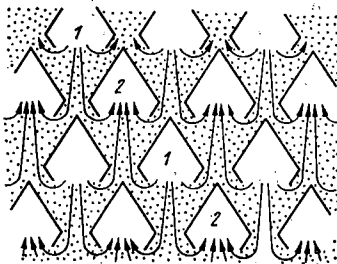
Lämminilmakuivurit ovat joko eräkuivureita tai jatkuvatoi-
misia kuivureita. Molemmissa kuivurityypeissä vilja on
liikkeessä valuen kuivurin läpi. Jatkuvatoimisessa kuivu-
rissa, kuva (17), viljan loppukosteus saavutetaan yhdellä
läpisyötöllä ja kuivuriin tulee jatkuvasti uutta viljaa.

Kuivurin alaosa on jäädytysosa. Kun vilja on kulkenut
kuivurin läpi se voidaan varastoida. Eräkuivureissa, joka
on Suomessa yleisin kuivurityyppi, viljaerää kierrätetään
kuivurissa elevaattorin avulla kunnes haluttu loppukos-
teus on saavutettu. Tämän jälkeen vilja jäädytetään ja
poistetaan kuivurista varastoon.

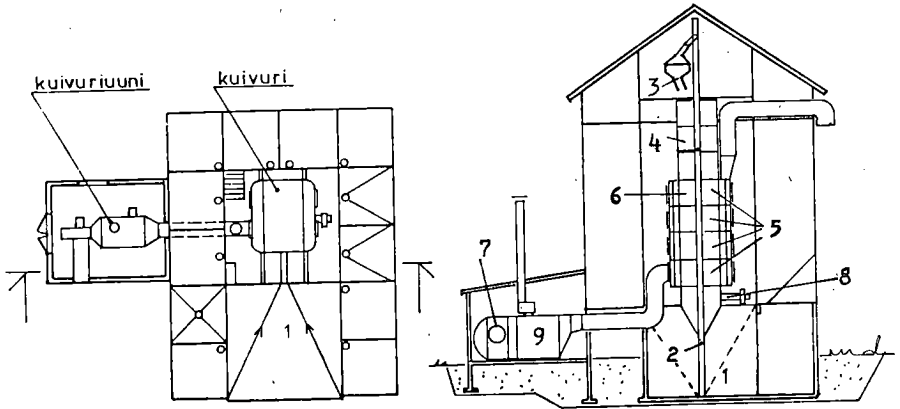


Kuva 17. Jatkuvatoiminen lämminilmakuivuri, periaatepiirros, Heyde /10/.

Kuva 18. Ilman kulku kuivauskennoissa, kennon poikkileikkaus.



1. tuloilmakanava
2. poistoilmakanava



Kuva 19. Tyypillinen lämminilmakuivaamo

1. kaatosuppilo, 2. elevaattori, 3. esipuhdistin, 4. varastotila, 5. kuivaustila, 6. kuivauskenno, 7. tuloilmanotto ja puhallin, 8. syöttölaite, 9. kuivuriuuni.

Yleisin lämminilmakuivuri Suomessa on kennokuivuri, kuva (19). Siinä jyvät valuessaan kuivaustilan läpi kääntyilevät ja sekoittuvat hyvin, kuva (18) ja ilman lämpötila saa olla 15... 20 astetta sallittua viljan lämpötilaa korkeampi. Vilja valuu kuivurin läpi ylhäältä alaspäin. Kennokuivurissa lämmin ilma tulee harjallisten tuloilmankanavien alta jyvakerroksiin, sitoo niissä kosteutta ja poistuu poistoilmakanavien kautta. Kuivurin alapäässä on syöttölaitteisto, jolla jyvien kierrätysnopeus voidaan säätää halutuksi. Kuivausilmaa lämmitetään ilmauunilla tai radiaattorilla. Ilma-savukaasuseoksella Suomessa ei saa kuivata viljaa.

3. VILJAN KORJUUKAUSI

3.1 Viljan korjuun ja kuivauksen ajoittuminen

Vilja korjataan Suomessa yleensä elo-syyskuussa. Epäedullisten ilmasto-olosuhteiden takia joudutaan usein puimaan viljan ollessa melko kosteaa jopa yli 40 %. Viljan aktiivinen kuivuminen päättyy n. 35 % kosteudessa. Tämän jälkeen kuivumista tapahtuu vain jos sää pysyy suotuisana. Mitä kuivempana ja tuleentuneempana vilja voidaan puida, sitä vähemmän sen laatu heikkenee puinnin yhteydessä. Kaura voidaan puida hiukan kosteampana kuin muut viljalajit. Leipäviljan varastoimiskosteus on n. 14 %. Alle 10 % kosteudessa viljan katsotaan olevan ylikuivaa ja esim. leipäviljäksi kelpaamatonta. Puintipäivien vähälukisuus ja poutajaksojen lyhyys pakottavat puimaan yleensä aina kun on mahdollista. Varasto- tai kuivauskapasiteetin plenuus ei saisi olla puintia hidastava tekijä.

Vilja pyritään kuivaamaan varastointikosteuteen sitä mukaa kun sitä korjataan. Kylmäilmakuivurilla joudutaan kuivaamaan lokakuussakin ja usein vielä kevään kuivilla ilmoilla, mikäli vilja on jäänyt kosteaksi.

3.2 Ilmasto-olot Suomessa korjuukaudella Ilman lämpötila

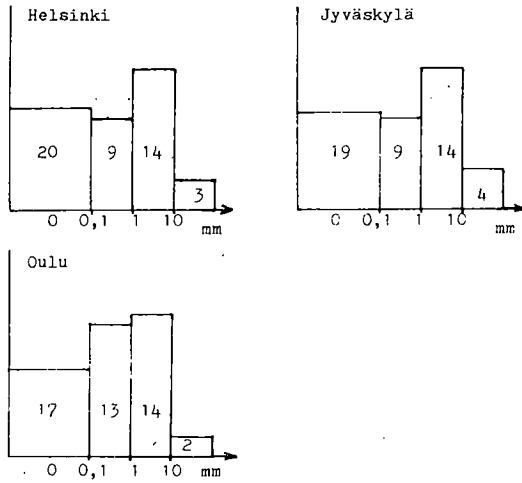
Taulukossa (2) on esitetty kuukausikeskilämpötilat kaudella 1961...1975 Helsingin, Jyväskylän ja Oulun seudulla. Jos vilja ajatellaan kuivattavan elokuun puolenvälin ja lokakuun puolenvälin välisenä aikana, voidaan ilman keskilämpötilana tuona aikana pitää syyskuun keskilämpötilaa.

Taulukko 2. Kuukausikeskilämpötilat kaudella 1961...1975, Heino /12/.

		elokuu				
	klo	02	08	14	20	\bar{T}
Helsinki		12,3	14,3	18,6	16,2	15,3
Jyväskylä		10,5	12,9	17,3	14,8	15,3
Oulu		11,5	12,8	16,8	15,1	14,0
		syyskuu				
	klo	02	08	14	20	\bar{T}
Helsinki		8,5	9,1	13,4	10,5	10,5
Jyväskylä		6,5	7,5	11,6	8,9	8,6
Oulu		6,9	7,1	11,2	9,0	8,6
		lokakuu				
	klo	02	08	14	20	\bar{T}
Helsinki		4,4	4,2	7,5	5,3	5,4
Jyväskylä		2,8	2,5	5,5	3,6	3,6
Oulu		2,3	2,1	4,5	3,2	3,1

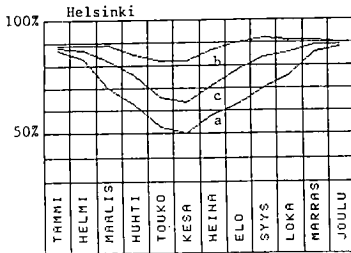
Sadepäivien luku ja ilman suhteellinen kosteus

Kuvassa (20) on esitetty keskimääräinen sadepäivien luku 15.8...30.9. välisenä aikana Helsingissä, Jyväskylässä ja Oulussa vuosina 1961...1975. Todellisista poutapäivistä ei ole pidetty koko maan käsittävää tilastoa. Ne on tässä laskettu ryhmään sademäärä < 0,1 mm. Vähäsateisia päiviä ja poutapäiviä on Helsingin seudulla keskimäärin 20, Jyväskylässä 19 ja Oulussa 17. Käytännössä puintipäivien lukumäärä vaihtelee eri tiloilla ollen pienimmillään n. 10 ja suurimmilla jopa 20. Tässä tutkimuksessa on lähdetty siitä, että puintiin soveltuvia päiviä on keskimäärin 15.

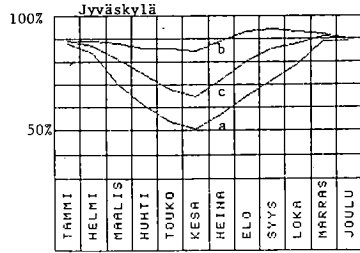


Kuva 20. Keskimääräinen sadepäivien lukumäärä korjuukaudella (46 vrk) vuosina 1961...1975, Heino /12/.

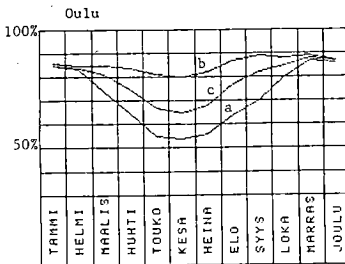
Kuvissa (21)a, b, c ja taulukossa (3) on esitetty suhteellisen ilmankosteuden keskiarvoja vuosilta 1961...1975 Helsingin, Jyväskylän ja Oulun seudulla. Syksyn kuivauskauden keskimääräisenä ilman suhteellisena kosteutena voidaan pitää syyskuun keskiarvoa, joka Keski- ja Etelä-Suomessa on noin 85 %. Mikäli vilja on syksyllä jäänyt kosteaksi tai kostunut varastossa, se voidaan kuivata maaliskuussa uudelleen käyttäen puhallinta päiväsaikaan. Kuvista (21)a, b, c voidaan todeta, että jo maaliskuu on keskimäärin edullisempi kuivausajankohta kuin syyskuu. Ja vastaavasti huhtikuu edullisempi kuin elokuu.



Kuva 21 a



Kuva 21 b



Kuva 21 c

Kuva 21. Suhteellisen ilmankosteuden keskimääräinen vaihtelu vuosina 1961...1975, Heino /12/.

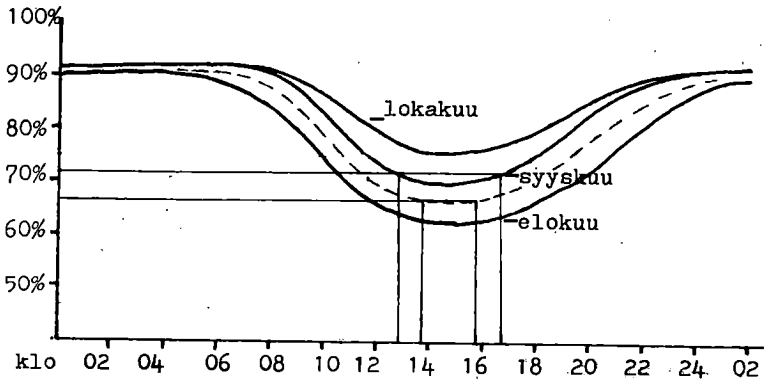
- a keskim. minimi (päivällä klo 14.00)
- b keskim. maksimi (yöllä klo 02.00)
- c vuorokautinen keskiarvo

Taulukko 3. Suhteellisen ilmankosteuden kuukausikeskiarvot korjuukaudella /12/

Elokuu	klo	02	08	14	20	
Helsinki		90	84	63	73	78
Jyväskylä		93	86	65	77	80
Oulu		87	83	64	74	77
Syyskuu	klo	02	08	14	20	
Helsinki		92	91	70	84	84
Jyväskylä		94	92	72	87	86
Oulu		89	88	70	82	82
Lokakuu	klo	02	08	14	20	
Helsinki		91	91	76	86	86
Jyväskylä		92	93	79	89	88
Oulu		88	88	80	86	85

Puintiin käytettävissä oleva aika

Puintipäivän pituuden rajoittavat sateettomina kausina aamu- ja iltakaste. Kuvassa (22) on taulukon (3) perusteella hahmoteltu käyrästä, joka esittää suhteellisen ilmankosteuden keskimääräistä vuorokautista vaihtelua Helsingin seudulla. Keskimääräinen puintipäivän pituus on n. 6...7 tuntia. Sen tehollinen pituus jäänee 5...6 tuntiin. Kun puintipäivien lukumääränä pidetään 15, on puintiin käytettävissä vuosittain tehokasta aikaa 75...90 h. Kun puintiajan pituus on keskimäärin 1,5 kuukautta, riippumatta siitä milloin puinti voidaan aloittaa, on keskimääräinen puintiaika päivässä $90 \text{ h}/45 \text{ vrk} = 2 \text{ h/vrk}$.



Kuva 22. Suhteellisen ilmankosteuden keskimääräinen vuorokautinen vaihtelu korjuukaudella Helsingin seudulla.

Kuvan (22) mukaan ilman suhteellisen kosteuden pitää olla reilusti alle 70 %, ennen kuin voidaan puida. Jos huomioidaan esimerkiksi syyskuun kaikki päivät ja ajatellaan jokaisena päivänä voitavan puida 3 tuntia, saadaan suhteellisen ilman kosteuden rajaksi yli 70 %. Käytännössä puidaan ilman suhteellisen kosteuden ollessa tätäkin korkeampi. Ilman suhteellinen kosteus ei aina määrää sitä, milloin puinti voidaan aloittaa, vaan esim. pouta- ja sadejaksojen pituus vaikuttavat siihen.

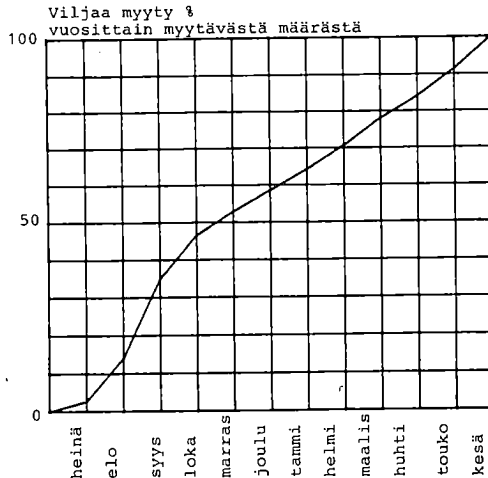
4. KOTIMAISEN SADON KÄYTTÖ

4.1 Sadon määrä ja käyttö eri tarkoituksiin

Keskimääräinen vuotuinen viljasato Suomessa on ollut vuosina 1970...1977 n. 3000 milj.kg. Vehnän ja rukiin osuus on ollut 20 % ja ohran ja kauran osuus 80 %. Vuosittain käytössä olevan viljan määrä on ollut keskimäärin 3800 milj.kg, joten ostoviljan ja ylivuotisen viljan osuus on n. 20 % koko käytettävissä olevasta viljamäärästä. Vuosien 1970...1977 uudesta sadosta myytiin leipäviljasta keskimäärin 64 %, varastoitiin 28 % ja käytettiin omaan tarpeeseen 8 %. Rehuviljasta 54 % käytettiin tiloilla, 17 % varastoitiin ja 29 % myytiin.

4.2 Kotimaisen viljan kauppaantulo

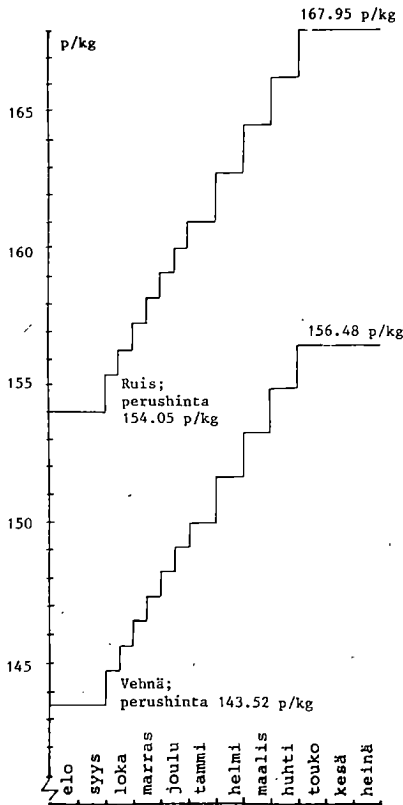
Kotimaisen viljan kauppaantuloa keskimäärin vuosina 1973...1980 esittää kuva (23). Tiedot on saatu Valtion Viljavaraston kuukausikatsauksista.



Kuva 23. Kotimaisen viljan kauppaantulo

Suurimpien keräilyliikkeiden (E-liike, Hankkija, Kesko, SOK, Tuko) arviointien perusteella, kuva (23), esittää hyvin myös viljan siirtymistä maanviljelijöiltä keräilyliikkeille. Karkeasti arvioiden maanviljelijät myyvät 50 % viljasta lokakuun loppuun mennessä, 70 % vuoden loppuun mennessä ja loput keväällä tasaisesti.

Valtio on pyrkinyt tasoittamaan viljakauppaa ja edistämään varastointia maataloilla. Kuvassa (24) on esitetty viljasta saatava hinta kaudella 80/81 myyntiajankohdan vaihdellessa. Verotus vaikuttaa viljan myyntiajankohtaan. Myymällä osan viljasta vuoden vaihteen jälkeen viljelijä voi jakaa tulojaan eri vuosille. Totunnaista myyntiajankohtaa on vaikea muuttaa, koska rahaa tarvitaan syksyllä.



Kuva 24. Leipäviljan hinta kaudella 80/81

ENERGIAN KÄYTTÖ KUIVAUKSESSA

Lämminilmakuivureita on meillä n. 48 000 kpl ja kylmäilmakuivureita 16 800 kpl vuoden 1980 tilaston mukaan. Keskimääräiset kuivurikoot ovat : lämminilmakuivuri tilavuus 5,8 m³ ja kylmäilmakuivuri laaripinta-ala 58 m². Keskimääräinen viljapinta-ala on vuosina 1970...1978 ollut 1,24 milj. ha ja keskimääräinen hehtaarisato (vehnä, ruis, ohra ja kaura) 2480 kg, taulukko (4).

TAULUKKO 4 Keskimääräiset viljanviljelyalat ja hehtaarisadot vuosina 1970...1978.

		1000 ha	kg/ha
Vehnä	syys- kevät	47,7	2740
Ruis		132,2	2580
Ohra		55,3	2110
Kaura		482,4	2500
		520,0	2460
yht.		1237, 0	keskim. 2482

Edellä olevia tilastotietoja käyttäen on tehty seuraavat laskelmat.

	Kylmäilmakuivaus	Lämminilmakuivaus
Vuositt. kuivattu viljamäärä milj. kg	970	2100
Kosteuden poisto milj.kg	188	408
Energian kulutus *		
lämpönä GJ	207	2160
t kPÖ	5000	50600
sähkönä MWh	56000	33000
Energian hinta		
milj. mk	26 milj.mk	99 milj.mk

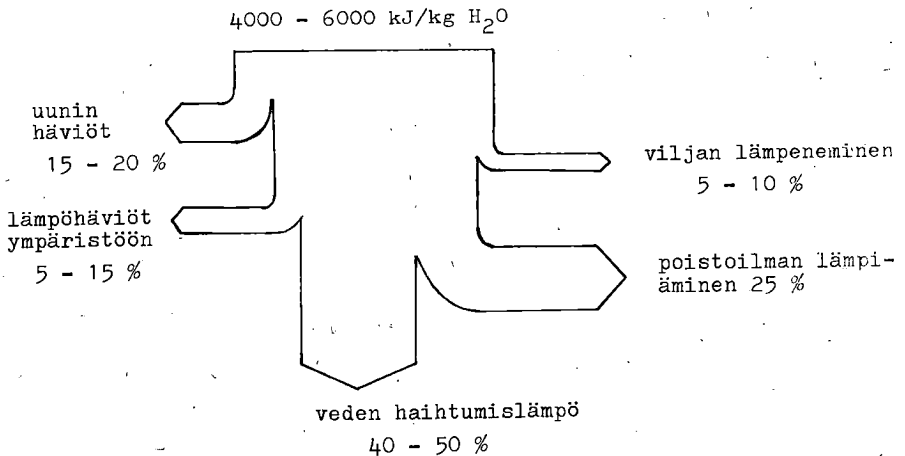
Viljan alkukosteutena on pidetty 28 % ja loppukosteutena 14 %.

* Arvio, kun puolet kylmäilmakuivureissa kuivattavasta viljasta kuivataan lisälämmöllä.

5.1. Lämminilmakuivuri

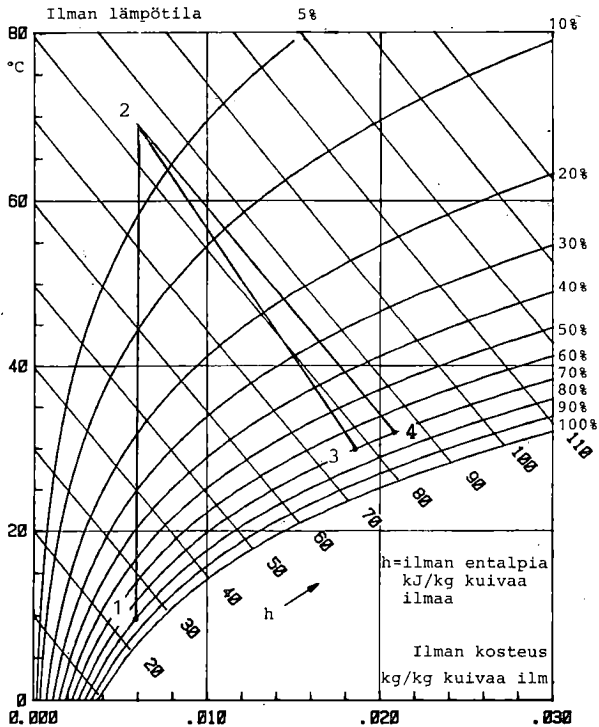
5.1.1 Energiankulutus

Nykyiset lämminilmakuivurit ovat pitkälle kehitettyjä. Polttoaineen energiasta 15...20 % kuluu häviöihin ennen varsinaista kuivuria. Kuivuriin menevästä energiasta 30 % kuluu lämpöhäviöihin ja 70 % poistuu ulkoilmaan poistoilman energiasisältönä. Poistoilmaan energia on sitoutuneena sen mukana tulevassa kosteudessa haihtumislämpönä sekä ilman lämpönä. Osa energiasta kuluu viljan lämpiämiseen (laskettu kuivurin häviöihin). Jäähdytysvaiheen aikana lämmitysenergiasta osa saadaan hyödynnettyä sen sitoutuessa haihtumislämpönä jäähdytysilmaan. Hukkaan menevä osa ilmenee jäähdytysilman lämpenemisenä. Kuvassa (25) on tyypillinen lämminilmakuivurin energian käytön jakautuma. Käytännössä lämminilmakuivuri kuluttaa vesikilon haihduttamiseen 4000...6000 kJ lämpöä ja 0,07...0,09 kWh sähköä.



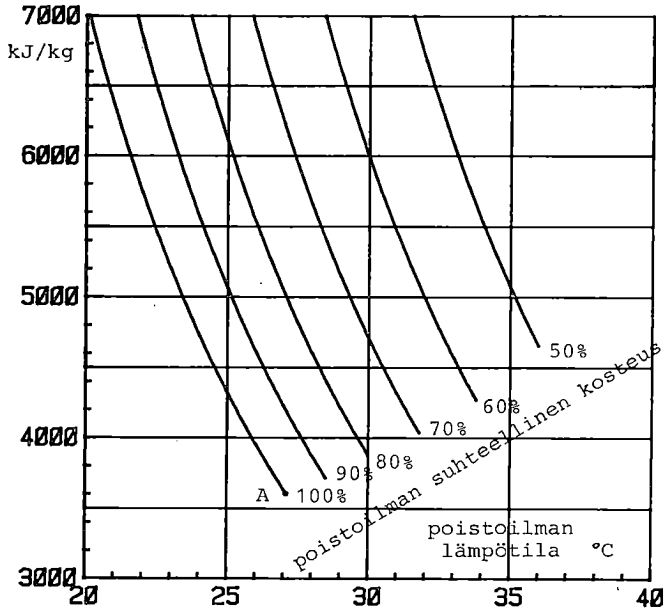
Kuva 25. Lämminilmakuivurin Sankey-piirros.

Kuvan (26) kostean ilman diagrammi selvittää kuivaustapahtumaa lämminilmakuivurissa. Ulkoilma, jonka lämpötila on 10 °C ja suhteellinen kosteus 80 %, piste 1, lämmitetään 70 °C:een, piste 2. Sitoessaan kosteutta ilma samalla jäähtyy ja päädytään pisteeseen 3, joka on poistoilman tila välittömästi kuivurin jälkeen. Mikäli kaikki ilman jäähtymistä vastaava vapautuva lämpö kuluisi veden haihtumiseen, noudattaisi prosessi tarkasti vakioentalpian käyrää ja päädyttäisiin pisteeseen 4. Osa lämmöstä hukkaantuu kuitenkin kuivurin lämpöhäviöihin ja viljan lämpiämiseen. Kosteustasapainon takia ilma ei kyllästy 100 %:iin asti.



Kuva 26. Kuivaustapahtuma koston ilman diagrammissa
1. ulkoilman tila, 2. kuivausilman tila,
3. poistoilman tila.

Kuivurin energiankulutus
haihdutettua vesikiloa kohden



Kuva 27. Lämminilmakuivurin energiankulutus haihdutettua vesikiloa kohden poistoilman tilan muuttuessa. Ulkoilma $t = 10^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 80\%$
Kuivausilma $t = 70^{\circ}\text{C}$.

Kuvasta (27) saadaan suoraan kuivurin energian kulutus haihdutettua vesikiloa kohden, kun tunnetaan poistoilman suhteellinen kosteus ja lämpötila. Käyrästä on piirretty edellyttäen, että kuivausilman lämpötila on 70°C ja ulkoilman lämpötila 10°C ja suhteellinen kosteus 80% . Jos poistoilman lämpötila on esimerkiksi 30°C ja suhteellinen kosteus 72% , kuivuri käyttää vesikilon haihduttamiseen $4\,500\text{ kJ}$. Uunin ja ennen kuivuria olevan ilmakanaviston yhteishyötysuhteen ollessa $0,85$, energiaa kuluu vesikilon haihduttamiseen n. $5\,300\text{ kJ}$, joka vastaa 124 g kevyttä polttoöljyä. Itse kuivurin hyötysuhde voidaan laskea pisteen A avulla, joka on häviöttömän kuivurin minimienergiankulutuksen piste ko. olosuhteissa. Tässä tapauksessa hyötysuhteeksi saataisiin

$$\eta_K = 3600/4500 = 0,80$$

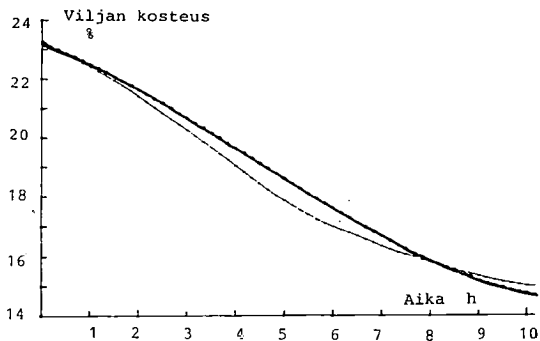
Näin laskien on selvää, että kuivurin hyötysuhteeseen on laskettu tekijöitä, joihin ei rakenteellisilla ratkaisuilta voida vaikuttaa. Kuivurin kokonaishyötysuhde olisi tällöin

$$\eta_T = 3600/5300 = 0,68$$

5.1.2 Energian kulutukseen vaikuttavat tekijät

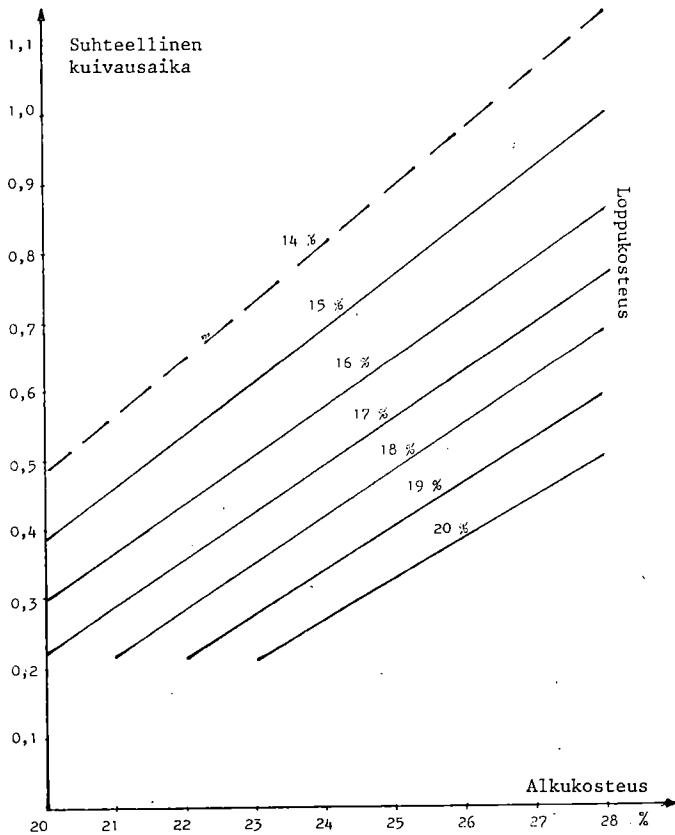
5.1.2.1 Viljan kosteus

Viljan alkukosteus määrää hahdutettavan vesimäärän ja kuivauksen keston. Kuivauksen loppua kohden vesikilon poistamiseen tarvitaan runsaammin energiaa kuin alkuvaiheessa. Jos kuivumisen edistymistä seurataan määrittämällä viljan kosteus tasaisin väliajoin, saadaan kuvan (28) kaltainen käyrä, josta nähdään, että viljan kosteus alenee lopussa hidastuen. Olosuhteista riippuen käyrä saattaa olla lopussa suora tai jopa alaspäin kaartuva, mikäli kuivausilman lämpötila nousee ulkoilman lämmitessä.



Kuva 28. Viljan kosteuden aleneminen kuivauksessa. Kuvan paksumpi käyrä on saatu viljan kosteusmittausten perusteella ja ohuempi käyrä laskemalla ilman mukana poistuvan veden määrä, Koivisto /13/.

Kuvan (29) käyrästä apuna käyttäen voidaan etukäteen arvioida erän kuivausaika, kun tiedetään kuivumiseen kulunut aika esimerkkitapauksessa samassa lämpötilassa. Käyrästä perustuu Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitoksessa liikkumattomalla viljalla suoritettuihin kuivauskokeisiin. Vakiolämpötilassa kestää esim. kuivuminen 25 %:sta 15 %:iin n. 1,12 kertaisen ajan verrattuna kuivumiseen 28 %:sta 18 %:iin, vaikka haihdutettu vesimäärä jälkimmäisessä tapauksessa on suurempi.



Kuva 29. Erän kuivaamiseen lämminilmakuivurissa kuluvan ajan arviointi, /14/.

Esimerkiksi erä viljaa on kuivattu 24 %:sta 15 %:iin, jolloin kuivaus kesti 6 tuntia. Käyrästä nähdään, että suhteellinen kuivausaika on tällöin 0,69. Kun viljan alkukosteus on esim. 28 % ja se kuivataan 15 %:iin (ennen jäähdytystä) on suhteellinen kuivausaika 1,0.

Kuivaus kestää tällöin

$$1,0 / 0,69 \cdot 6 \text{ h} = 8,7 \text{ h}$$

On huomattava, että erien pitää olla likimain yhtä suuret ja kuivauslämpötilan sama. Liikakuivaaminen esim. 15 % asemesta 14 %:iin (ennen jäähdytystä) pidentää kuivausaikaa 14 % eli kuivurista riippuen 1,0...1,5 h, kun viljan alkukosteus on 28 %. Polttoaineen kulutus lisääntyy samassa suhteessa. Jotta vilja ei kuivuisi liikaa, kuivurit varustetaan nykyään yleensä automatiikalla, joka keskeyttää polttoaineen syötön kuivuriuuniin, kun vilja on riittävän kuivaa. Niiden haittapuolena on epäsuora toimintatapa, joka perustuu joko poistoilman lämpötilaan tai suhteelliseen kosteuteen. Luotettavia ja halpoja mittantureita, joilla viljan kosteus pystyttäisiin mittaamaan jatkuvasti ja automaattisesti, ei tällä hetkellä ole myynnissä.

5.1.2.2 Kuivausajan sää

Säällä ei lämminilmakuivauksessa ole niin ratkaisevaa merkitystä kuin kylmäilmakuivauksessa, mutta kuivurin energiakulutukseen se vaikuttaa. Kuivaamalla mahdollisimman paljon päiväsaikaan ja lämpimänä aikana säästetään energiaa. Tämä mahdollisuus on syytä pitää mielessä, etenkin tiloilla, joilla on esimerkiksi kylmäilmakuivuri puskuri-kuivurina. Jo viiden asteen nousu ulkoilman lämpötilassa johtaa n. 9 % säästöön. Lisäksi lämpöhäviöt ovat pienemmät ulkoilman lämpötilan ollessa korkeampi.

Esim.

Ulkoilma päivällä		yöllä
keskim. t = 15 °C		keskim. t = 10 °C
φ = 65 %		φ = 90 %

Kuivausilman lämpötila 65 °C

Ilman entalpia päivällä	33 kJ/kg	kuivaa ilmaa
Ilman entalpia yöllä	28 kJ/kg	kuivaa ilmaa
Kuivausilman entalpia	84 kJ/kg	kuivaa ilmaa

(suunnilleen sama päivällä ja yöllä)

$$\text{Säästö} = (33 - 28)/(84 - 28) \cdot 100 = 8,9 \%$$

Kuivumisnopeuteen säällä ei juuri ole merkitystä, kun käytetään tasaista lämpötilaa. Aikaiset viljalajit ja lajikkeet säästävät kuivausenergiaa, sillä ne voidaan silloin kuivata keskimäärin edullisemmissä olosuhteissa.

5.1.2.3 Kuivausilman lämpötila

Kuivausilman lämpötilan kohottaminen nopeuttaa kuivausta ja lisää kuivurin kapasiteettia. On kuitenkin tarkkaan harkittava miten ja milloin kuivausilman lämpötilaa voidaan nostaa.

Taulukko 5. Kuivausilman lämpötilan vaikutus energian-
kulutukseen /14/.

Ilman nopeus m/s**)	Kuivaus- lämpötila °C	Kuivaus- teho W	Kuivaus- aika min	Käytetty energia MJ	Haihdutettu vesimäärä g	Energian kulutus MJ/kg H ₂ O
0,28	67	908	59	3,21	770*)	4,17
0,32	54	908	67,5	3,68	738	4,98
0,38	45	908	93	5,07	725	6,99
0,49	39	908	132	7,19	760	9,46

*) kosteus on kaikissa kokeissa alentunut 27,7 %:sta
15 %:iin.

**) Ilman vapaa virtauspoikkipinta-ala on vakio, joten
ilman nopeudet kuvaavat suoraan ilmamääriä.

Taulukossa (5) on Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitoksessa liikkumattomalla viljalla suoritettujen kuivauskokeiden tuloksia. Lämmönlähde on kaikissa tapauksissa toiminut samalla teholla. Saman tutkimuksen mukaan lämpötilan vaikutus kuivumisnopeuteen on merkittävämpi kuin ilmamäärän vaikutus. Kuivumista kannattaa nopeuttaa mieluummin lämpötilaa nostamalla kuin ilmamäärää lisäämällä. Käytettäessä korkeaa kuivausilman lämpötilaa ja pientä ilmamäärää energian kulutus on ollut pienempi kuin matalassa lämpötilassa ja suurella ilmamäärällä kuivattaessa.

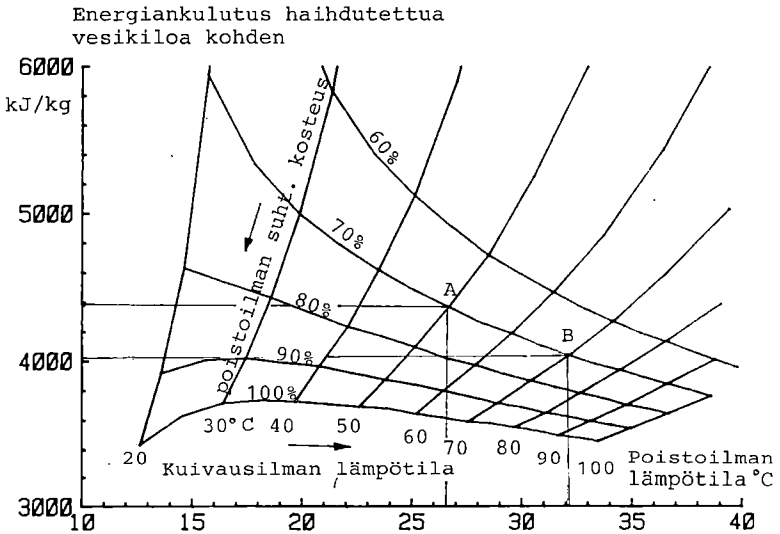
Kuivauksessa käytettiin suhteellisen suuria (5-10 kertaisia) ilmamääriä esim. nykyisiin lämminilmakuivureihin verrattuna, joten on ilmeistä, ettei suuri kuivausilman määrä ole ehtinyt läheskään kostua tarpeeksi virratessaan jyvien läpi. Mikäli kuivaus olisi suoritettu samalla ilmamäärällä niin, että kuivausilman lämpötilaa olisi pudotettu tehoa laskemalla voisi tilanne olla päinvastainenkin. Kuivumisnopeuksien ero olisi tällöin kuitenkin entisestään kasvanut. Kuvassa (30) on esitetty teoreettinen kuivausilman lämpötilan vaikutus energiankulutukseen.

Mikäli kuivurin poistoilman keskimääräinen suhteellinen kosteus kuivauksen aikana saadaan pysymään korkeana esim. ilmamäärää pienentämällä, kuivaus korkeammassa lämpötilassa kuluttaa vähemmän energiaa vesikiloa kohden.

Esimerkki kuvaan (30).

Oletetaan, että kuivurissa A kuivataan viljaa ilmalla, jonka lämpötila on 50 °C. Mikäli poistoilman suhteellinen kosteus on 70 %, sen lämpötila lämpöhäviöttömässä kuivurissa on n. 26,5 °C ja kuivuri käyttää vesikilon haihduttamiseen n. 4400 kJ lämpöä. Kuivurin B kuivausilman lämpötila on 70 °C. Jos poistoilman suhteellinen kosteus on edelleen 70 %, kuluttaa ideaalinen kuivuri n. 4000 kJ lämpöä vesikilon haihduttamiseen. Viljan kosteustasapainokäyrästä perusteella (kuva 2) poistoilman suhteellinen

kosteus voi olla korkeassa lämpötilassa kuivattaessa keskimäärin jopa korkeampi kuin matalassa lämpötilassa kuivattaessa. Kun kuivausilman lämpötilaa nostetaan ilmamäärää pienentämällä, hidastuu ilman kulku kuivurissa, ja kosteudella on enemmän aikaa siirtyä viljasta kuivausilmaan.



Kuva 30. Kuivausilman lämpötila ja teoreettinen energiankulutus ideaalisessa lämminilmakuivurissa (lämpöhäviöt = 0). Käyrästä on piirretty ulkoilman lämpötilalle 10°C ja 80 % suhteelliselle kosteudelle

Kuvassa (30) ei ole huomioitu kuivurin lämpöhäviöitä. Käytännössä 5...10 °C kuivausilman lämpötilan noston vaikutusta energiankulutukseen haihdutettua vesikiloa kohden ei voitu todeta, Piltti /15/. Hyvin eristetyssä kuivurissa tilanne voisi olla kuvan (30) kaltainen, jossa energiansäästöksi saadaan n. 5 % polttoaineen kulutuksesta, kun kuivausilman lämpötilaa nostetaan 10 °C.

5.1.2.2 Ilmamäärä ja poistoilman suhteellinen kosteus

Taulukossa (6) on esitetty vuosina 1980-1981 markkinoilla olleiden eräkuivureiden keskimääräiset ilmamäärät eri kokoluokissa. Valmistajat ovat päätyneet näihin ilmamääriin pitkällisen kokemuksen ja käytännön mittausten perusteella. Ilmamääriä ei yleensä ole syytä muuttaa esim. puhallinkokoa vaihtamalla. Poistoilman suhteellinen kosteus voitaisiin pitää mahdollisimman korkeana ilmamäärää säätämällä. Tällöin lämpötilan säätö toteutettaisiin ensi vaiheessa kaksiliekkipoltinperiaatteella.

Taulukko 6. Eräkuivureiden keskimääräisiä arvoja. Kokoluokat alle 50, 50...100, 100...200, 200...300, 300...400 ja yli 400 hl. Kuivausaika on arvioitu lämpötehon perusteella.

Kuivuri- koko m ³	Ilma- määrä m ³ /h	Lämpö- teho kW	Sähkö- teho kW	Erän kuivaus- aika h
4,5	6800	115	7,2	5,4
7,5	8500	144	8,6	7,2
14,6	12800	217	11	9,6
24,0	20500	348	16,2	9,6
33,2	23700	403	18,2	11,4
42,6	26600	452	19,5	12,9

Mikäli poistoilman keskimääräinen suhteellinen kosteus saadaan nousemaan esimerkiksi 70 %:sta 75 %:iin energian kulutus pienenee n. 6...7 %, kuva (30).

5.1.2.3 Kuivuriuunin kunto ja polttimen säädöt

Kuivuriuunin kuntoon ja polttimen säätöihin on syytä kiinnittää huomiota. Syksyllä 1981 Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitoksessa suoritettiin viljan kuivauskokeita yli kymmenen vuotta vanhalla kennokuivurilla. Kuivurin uunia oli käytetty useita vuosia ilman huoltoa.

Kokeissa pienin energiankulutus oli 5 000 kJ ja suurin 5 850 kJ haihdutettua vesikiloa kohden. Viljan kosteus ja ulkoilman tila olivat samaa luokkaa näissä kokeissa, joissa ainoastaan polttimen suutinta vaihdeltiin, joten ulkoisten tekijöiden vaikutus lopputuloksiin oli vähäinen. Likaisessa uunissa ja polttimen ollessa väärin säädetty energiankulutus on helposti 20...30 % suurempi kuin hyvin huolletussa ja oikein säädettyssä uunissa. Kannattaa laskea mitä kuivuri kuluttaa vesikilon poistamiseen ja mitä esim. 20 % säästö polttoainekustannuksissa vuodessa merkitsee.

5.1.3 Energian säästökeinoit lämminilmakuivauksessa

5.1.3.1 Kuivauksen optimointi

Kuivauksen optimoinnilla tarkoitetaan edellä käsiteltyjen tekijöiden huomioimista seuraamalla kuivurin energiankulutusta. Käytännössä olisi pystyttävä mittaamaan kuivatun erän polttoöljynkulutus ja viljaerän paino. Öljynkulutuksen mittarit ovat melko kalliita, mutta säästävät aikaa ja antavat tarkan tuloksen. Haihdutettu vesimäärä saadaan laskettua seuraavasta yhtälöstä

$$m_h = (v_1 - v_2) / (100 - v_2) \cdot m_m = (v_1 - v_2) / (100 - v_1) \cdot m_k \quad (13)$$

jossa v_1 on viljan alkukosteus
 v_2 on viljan loppukosteus
 m_k on kuivan viljaerän paino
 m_m on märän viljaerän paino

Mikäli vesikilon haihduttamiseen kuluu kevyttä polttoöljyä runsaasti enemmän kuin 120 g, ei kaikki ole kohdallaan ja on ilmeistä, että energiankulutusta voidaan pienentää. 120 g kevyttä polttoöljyä vastaa tilavuusmitassa n. 1,4 desilitraa.

5.1.3.2 Kuivuriuunin tai öljypolttimen uusiminen

Jos kuivuri kuluttaa selvästi enemmän kuin 1,5 desilitraa kevyttä polttoöljyä vesikilon haihduttamiseen, on syytä tutkia ensin kuivuriuunin hyötysuhde.

Hyötysuhteeseen vaikuttavat tässä tapauksessa savukaasu- ja säteilyhäviöt. Säädöllä voidaan vaikuttaa savukaasuhäviöihin l. palamishyötysuhteeseen. Palamishyötysuhteen määrittämiseksi on suoritettava savukaasuanalyysi, johon sisältyy kolme mittausta:

- nokiluku
- hiilidioksidi (CO₂) - pitoisuus
- savukaasujen lämpötila

Poltettaessa kevyttä polttoöljyä nokiluku saisi olla korkeintaan yksi. Jos se on suurempi ilmamäärää tulee suurentaa. CO₂-pitoisuuden tulisi olla yli 10 %. Mikäli ei ole mahdollista saavuttaa samanaikaisesti alhaista nokilukua ja korkeaa (> 10 %) CO₂-pitoisuutta, on syytä haettava virheellisestä tai kuluneesta öljysuuttimesta. Epätäydellinen palaminen voi johtua myös liian suuresta polttoaineen syötöstä palamistilaan.

Kun nokiluku ja CO₂-pitoisuus ovat halutun suuruiset, mitataan savukaasujen lämpötila. Sen tulee olla mahdollisimman matala - kuitenkin vähintään 170 °C. Mikäli se on korkea, yli 250 °C, on tutkittava onko uuni likainen. Jos savukaasujen lämpötila ei uunin puhdistuksen jälkeenkään laske, öljysuutin on luultavasti liian suuri.

Savukaasuanalyysin suorittamiseksi tarvittavia mittalaitteita ja opaskirjasia saa alan huoltoliikkeistä. Aiheesta on julkaistu myös kirjallisuutta.

Jos energiankulutus uunin säädön jälkeen on edelleen suuri, on syytä siihen etsittävä itse kuivurista. Tällöin syy saattaa löytyä seuraavista tekijöistä.

- liian suuri ilmamäärä käytettyyn kuivausilman lämpötilaan nähden
- vuotoilmahäviöt (vajaatyttö)
- uunin ja kuivurin säteilyhäviöt.

Onko ilmamäärä liian suuri vai kuivurin lämpöhäviöt suuret, se voidaan päätellä kostean ilman diagrammista. Asian selvittämiseksi täytyy nähdä hiukan vaivaa ja suorittaa mittauksia. On tunnettava keskimääräiset ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus, kuivausilman lämpötila sekä poistoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus kuivauksen aikana. Kuivauksen aikana e.o. arvot mitataan tasaisin aikaväleisin n. 6...10 kertaa ja lasketaan niiden keskiarvot.

Kuvan (26) mukaisesti piirretään kuivaustapahtuma kostean ilman diagrammiin. Lämpöhäviöt saisivat olla korkeintaan 15 %, jos kuivuria ei ole eristetty eli

$$(h_2 - h_3) / (h_2 - h_1) \times 100 \leq 15$$

jossa h_1 on ulkoilman entalpia
 h_2 on kuivausilman entalpia
 h_3 on poistoilman entalpia

Entalpiat saadaan suoraan kostean ilman diagrammista (sivu 45) tai laskemalla yhtälön (12) mukaan. Tällöin ilman absoluuttinen kosteus saadaan parhaiten kuvasta (7) ja yhtälön (7) mukaan laskemalla, kun tunnetaan ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila.

Mikäli lämpöhäviöt ovat alle 15 % on ilmeistä, että ilmamäärä on liian suuri. Alhainen poistoilman keskimääräinen suhteellinen kosteus (alle 60 %) on osoitus liian suuresta ilmamäärästä.

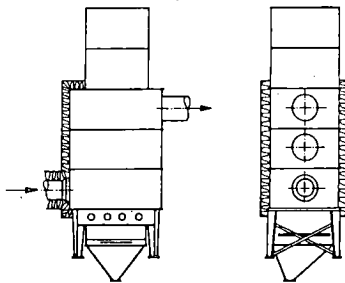
Vertaamalla esim. lukuun 120 g kPÖ/kg haihdutettua vettä voidaan karkeasti arvioida sivulla (84) olevan käyrästä perusteella, mitä uusista laitteista tai uunin korjauksesta kannattaa maksaa.

5.1.3.3 Kuivurin tiivistäminen

Kuivurin ja tuloilmaputkiston tiivistäminen sekä varastotilan varustaminen tiiviillä kannella kannattaa usein, jos kuivuri on vanha. Tiivistäminen on myös siinä mielessä tärkeätä, että kuivaamo pysyy puhtaampana ja enin pöly kerääntyy esim. pölykaappiin. Vanhassa kuivurissa, jonka luokkujen tiivisteet ovat kuluneet, poistoilman määrä voi olla vain 2/3 tai tämänkin alle uunin läpi kulkevasta ilmamäärästä, Koivisto /13/. Paitsi kuivurin rakojen kautta lämmintä kuivausilmaa pääsee myös varasto-osan kautta ulkoilmaan, jos kuivurissa on pieni täytös. Kuivauksen loppuvaiheessa suuri osa ilmasta saattaa kulkeutua sitä kautta kostumatta juuri ollenkaan. Erien tulisi siksi olla mahdollisimman suuria. Tiivistämisen merkitys kasvaa, jos kuivurin poistoilman lämpöä käytetään hyödyksi.

5.1.3.4 Kuivurin eristäminen

Lämpöhäviöitä voidaan vähentää myös eristämällä kuivuri. Viiden sentin eristyksellä, jossa oli pelti päällä, saavutettiin n. 10 % säästö polttoaineen kulutuksessa. Kuvasta (31) käy ilmi eristämistapa. Uunin ja kuivurin välinen ilmakehänava kannattaa eristää, sillä kuivausilman lämpötila saattaa laskea tällä välillä 5...10 °C kanavan pituudesta ja ympäristön lämpötilasta riippuen.



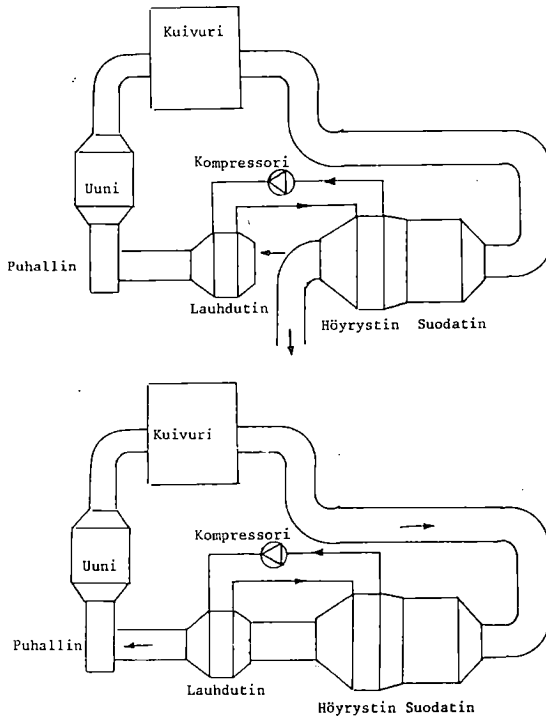
Kuva 31. Kennokuivurin eristäminen, Piltti /15/.

5.1.3.5 Lämmön talteenotto poistoilmasta
lämmönvaihtimen avulla

Noin 60 % polttoaineen energiasta kulkeutuu poistoilman mukana ilman lämpönä ja veden höyrystymislämpönä ulkoilmaan. Poistoilmakanavaan asennetulla lämmönvaihtimella osa tästä energiasta voidaan käyttää uudelleen hyödyksi lämmittämään kuivurin tuloilmaa. Kuivurin tiivistämisellä ja eristämällä saavutetaan lisähyöty, jos lisäksi käytetään poistoilman lämmönvaihdinta. Yksinkertaisella aaltopellistä tehdyllä ilma-ilma-levy-lämmönvaihtimella on päästy 15...25 % säästöön energian kulutuksessa. Koska lämmönvaihtimella talteen saatava teho riippuu poistoilman ja ulkoilman lämpötilaerosta, on säästö kylmällä ilmalla suurempi. Poistoilman lämmönvaihdin likaantuu ja jopa tukkeutuu viljapölystä, joten esipuhdistin kuivurissa ja pölynpoistolaitteisto ennen lämmönvaihdinta ovat välttämättömiä. Pölynpoistoon voidaan käyttää joko pyörre-erotinta tai suodatinta. Kehitteillä on myös lämmönvaihtimia, joissa pöly huuhtoutuisi vaihtimesta poistoilmasta tiivistyvän veden mukana. Nähtäväksi jää kyetäähkö pölynpoisto ratkaisemaan käytännössä riittävän hyvin, niin ettei lämmönvaihtimen puhtaanapito aiheuta kohtuuttomasti lisätyötä. Ongelmia saattaa lisäksi aiheuttaa vaihtimen asennus jo olemassa oleviin kuivureihin, joissa tuloilmakanava ja poistoilmakanava ovat kaukana toisistaan.

.3.6 Lämpöpumpun käyttö kennokuivurin lämmön lähteenä

Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitoksessa suoritettiin syksyllä 1981 viljan kuivauskokeita 7 m³ kennokuivurilla, jonka lämmön lähteenä oli sähköteholtaan 10 kW lämpöpumppu. Lämpöpumppua voidaan käyttää kuivaukseen joko avoimessa tai suljetussa kierrossa. Näiden periaatteelliset kytkennät on esitetty kuvassa (32).



Kuva 32. Lämpöpumpun periaatteelliset kytkentätavat kuivuriin; yllä avoin kierto, alla suljettu kierto. Kuivuriuuni ei ole välttämätön.

Kuivausilman lämpötila oli kokeissa keskimäärin n. 30 °C ja kuivausilman lämpötilan nousu 14 °C. Puhaltimessa ilma lämpeäni vielä n. 1,5 astetta.

Koekuivurin energiankulutus oli 34 % polttoöljyllä suoritettujen kuivauskokeiden energian kulutuksesta. Energiamääräykset olivat vastaavasti 32 % pienemmät.

Kuivausilman lämpötila 30 °C on liian matala, koska kuivurin teho pienenee puoleen. Sen tulisi olla vähintään 45...50 °C, jotta lämpöpumppu olisi mielekäs vaihtoehto perinteiseen kuivaukseen verrattuna. Tällöin kuitenkin lämpöpumpun sähkötehon tarve rajoittaa sen käytön pieniin 4...6 m³ kuivureihin. Nykyisellä tekniikalla ja laitteiden hinnoilla lämpöpumpulla kuivaaminen on selvästi kalliimpaa kuin kevyellä polttoöljyllä kuivaaminen. Lämpöpumpukuvauksen kilpailukykyä perinteiseen kuivaukseen verrattuna voisivat parantaa uusi kuivurityyppi ja polttomootorin käyttö kompressorin voiman lähteenä.

Saksan Liittotasavallassa rakennetussa kuivurissa, Kutzbach /16/, lämpöpumppukäyttöisen kuivurin energiankulutus oli runsas kolmannes perinteisen kevyellä polttoöljyllä tapahtuvan kuivauksen energiankulutuksesta. Koska lämpöpumppu käyttää sähköä, ovat energiakustannukset markkamääräisinä kuitenkin vain noin kolmanneksen pienemmät.

Koekuivuri on meidän oloihimme mitoiltaan sopiva n. 10 m³, mutta malliltaan poikkeava eräkuivuri, jossa viljaa ei kierrätetä. Viljan ollessa hyvin kosteaa, se saattaa kuoretua ja paakkuuntua. Tässäkin tutkimuksessa todettiin laitteiden hinnan muodostuvan liian korkeaksi kuivurin tehoon nähden.

5.2 Kylmäilmakuivaus

5.2.1 Energiankulutus

Kylmäilmakuivauksessa energiaa kuluu ainoastaan ilman puhallukseen ja useimmiten viljan siirtoon. Sähkön kulutus on tasokylmäilmakuivurissa käytännössä 0,3...0,4 kWh/haihdutettu vesikilo. Myös lisälämmityksen energiantarve on pieni.

Käytännössä lisälämmityksen käyttö ei paljon lisää energiakustannuksia, sillä kokonaiskuivausajan lyhetyssä puhallukseen tarvittava sähköenergiantarve pienenee, mm. Mühlbauer /17/.

Jos tarkastellaan pelkästään energiankulutusta, tasokylmäilmakuivurin käyttö on edullisempaa kuin siilomallisen kylmäilmakuivurin, sillä siilomallisen kylmäilmakuivurin on todettu kuluttavan noin 1,0...1,4 kWh vesikilon haihduttamiseen. Suurempi energiankulutus aiheutuu siilomallisen kylmäilmakuivurin korkeammasta vastapaineesta tasokylmäilmakuivuriin verrattuna. Potkuripuhaltimen hyvästä hyötysuhteesta pienillä vastapaineilla ei tällöin ole hyötyä. Ilmamäärät jäävät pienemmiksi ja ilman lämpeneminen kuluttaa enemmän energiaa. Siilomallinen kylmäilmakuivuri saattaa kuitenkin olla kokonaiskustannuksiltaan edullisempi vaihtoehto kuin tasokylmäilmakuivaamo.

5.2.2 Energian kulutukseen vaikuttavat tekijät

5.2.2.1 Viljan kosteus

Viljan alkukosteus ja loppukosteus määräävät haihdutettavan vesimäärän ja kuivauksen kestoajan samalla tavalla, kuin lämminilmakuivauksessa. Viljan ollessa hyvin kostea, yli 30 %, saattaa ilman vesihöyry tiivistyä uudelleen ylimmissä kerroksissa, jotka kostuvat ja paakkuuntuvat. Tällöin kuivurin vastapaine kasvaa ja kuivausilma etsii tiensä viljakerroksen läpi kohdistu, joissa kerrokset ovat matalimmat ja paakkuntuminen vähäisintä.

Kuivuriin saattaa tällöin jäädä kohtia, joissa ilma ei liiku juuri ollenkaan. Epätasaisen ilman kulun ja paakkuuntumisen välttämiseksi viljaa on sekoitettava mahdollisimman syvältä.

5.2.2.2 Kuivausajan sää

Kuivausajan sääillä on energiankulutukseen kylmäilmakuivauksessa paljon suurempi merkitys kuin lämminilmakuivauksessa. Kylmäilmakuivauksessa viljan kuivaamiseen käytetään ulkoilman luonnollista kuivauskykyä. Jos esim. kuivausilman keskimääräinen lämpötila on 15 °C ja suhteellinen kosteus 75 %, voidaan kuivauksen alkuvaiheessa aina noin 20 % kosteuteen asti olettaa yhteen ilmakuutiometriin sitoutuvan keskimäärin 1,2 g vettä. Jos ilman lämpötila on viisi astetta matalampi ja ilman suhteellinen kosteus 80 %, sitoutuu kuutiometriin ilmaa vain n. 0,7 g vettä. Kuivausaika tällöin lähes kaksinkertaistuu ja mikäli sää pysyy epäedullisena, vilja jää n. 16...16,5 % kosteuteen.

Taulukossa (7) on laskettu ilman suhteellisen kosteuden vaikutus kuivausaikaan, kun kuivausilman keskimääräinen lämpötila on 20 °C ja ilman suhteellinen kosteus keskimäärin 75, 80 tai 85 %. Laskelmissa on oletettu viljan kuivuvan tasaisesti koko kerroksen paksuudelta. Näin laskien kuivaus kestää todellista kauemmin. Kuivausilman sitoma kosteus Δx (g vettä/m³ ilmaa) on arvioitu Mollierin diagrammin ja vehnän kosteustasapainokäyrän avulla, ottaen huomioon, että ilma kostuessaan jäähtyy eikä kyllästy 100 % asti.

Teoreettisella vedensitomiskyvyllä ymmärretään ilman kykyä sitoa vettä sen lämpötilan pysyessä vakiona. Yksinkertaisuuden vuoksi ilmamäärä on pidetty vakiona 1700 m³/tn h. Kun viljan kosteus on alentunut 30 %:sta 20...23 %:iin, on siirrytty puhaltimen päiväkyttöön keskimäärin 10 h/pv ja kosteuden aletessa 16...19 prosenttiin entistä valikoidumpaan käyttöön keskimäärin 6 h/pv.

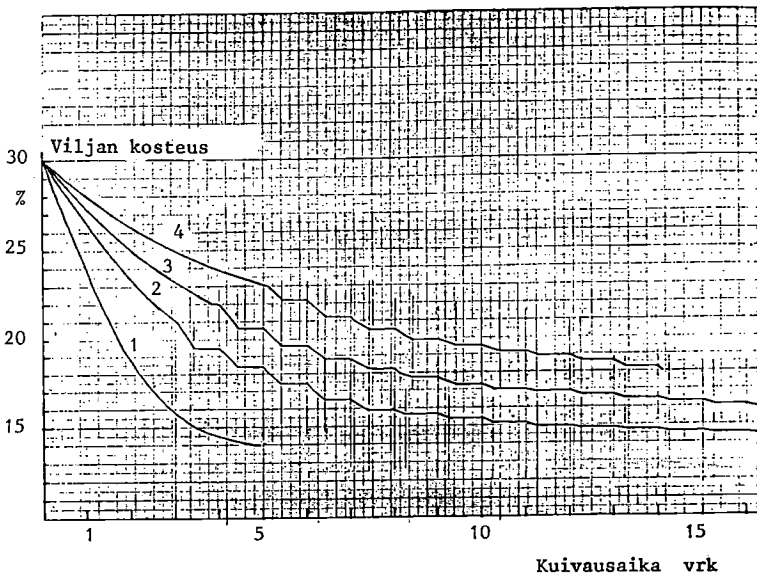
Lisäksi on samalla periaatteella laskettu kuivausaika käytettäessä 5 °C lisälämmitystä.

Taulukko 7.

Suhteellisen ilmankosteuden vaikutus kuivausaikaan kylmäilmakuivauksessa kuivausilman keskimääräisen lämpötilan ollessa 20°C.

	Lisälämmitys		Ilman lisälämmitystä					
	ilman suhteellinen kosteus							
	1) 60 %	2) 75 %	3) 80 %	4) 85 %	ilmamäärä			
Viljan kosteus	1700 m ³ /t /h		1700	1700	1700			
%	Δx_3 g/m ³	aika h	Δx_3 g/m ³	aika h	Δx_3 g/m ³	aika h		
30	2,7	3,8	1,5	6,8	1,2	8,5	0,9	11,3
29	2,6	3,8	1,5	6,6	1,1	9,0	0,8	12,4
28	2,5	3,9	1,4	6,9	1,0	9,6	0,7	13,8
27	2,4	3,9	1,3	7,2	0,9	10,4	0,6	15,6
26	2,3	4,0	1,2	7,6	0,8	11,4	0,5	18,2
25	2,2	4,0	1,1	8,1	0,7	12,7	0,4	22,2
24	2,1	4,1	1,0	8,6	0,6	14,4	0,3	28,8
23	2,0	4,2	0,9	9,4	0,5	16,8	0,9	9,4
22	1,8	4,6	0,7	11,4	1,1	7,5	0,7	11,7
21	1,6	5,0	1,3	6,2	0,9	8,9	0,5	16,0
20	1,4	5,6	1,1	7,1	0,7	11,2	0,3	26,0
19	1,2	6,3	0,9	8,5	0,5	15,2	0,5	15,2
18	1,0	7,4	0,7	10,6	0,3	24,8	0,3	24,8
17	0,8	9,1	0,5	14,5	0,3	24,2	0,1	72,6
16	0,5	14,2	0,3	23,6	0,1	70,9	-	-
15	0,2	34,6	0,1	69,2	-	-	-	-
14								
Puhaltimen käyttö yht. h	118,4		212,5		255,4		298,0	
Kuivausaika vrk	5		20		30,5		41,2	
Loppukosteus %	14		14		15		16	

Kuivauksen edistymistä eri tapauksissa esittää kuva (33). Taulukosta (7) ja kuvasta (33) voidaan todeta ilman suhteellisen kosteuden merkittävä vaikutus kuivausaikaan. Todellista kuivausaikaa nämä laskelmat eivät anna, eivät-kä ne kerro ovatko myös ylimmät viljakerrokset riittävän kuivia viiden päivän kuluttua. Ainoastaan lisälämmityksellä kuivattaessa voidaan asiasta olla varmoja, sillä kuivaus kestää todellisuudessa alle viisi päivää.



Kuva 33. Kuivumisen edistyminen kylmäilmakuivauksessa kuivausilman tilan vaihdellessa.

- 1) $\varphi = 60\%$, 2) $\varphi = 75\%$, 3) $\varphi = 80\%$,
- 4) $\varphi = 85\%$.

5.2.2.3 Kuivausilman lämpötila ja lisälämmön käyttö

Edellisessä kappaleessa olevista laskelmista käy ilmi, että kuivausta voidaan huomattavasti tehostaa nostamalla vain hiukan kuivausilman lämpötilaa. Taulukosta (7) voidaan karkeasti arvioida, että puhaltimen käyttöaika jää vain puoleen, kun kuivausilmaa lämmitetään 3...4 °C. Lisäksi kokonaiskuivausaika lyhenee huomattavasti, kun ei tarvitse valikoida puhaltimen käyttöaikoja. Käytännössä kylmäilmakuivurissa vilja saadaan melko nopeasti 20...22 prosentin kosteuteen, kun noudatetaan kylmäilmakuivurin mitoitusohjeita. Siirtymällä puhaltimen päiväkäyttöön saadaan viljan kosteus alenemaan 16...18 prosenttiin. Sen sijaan 14 % kosteuteen pääsy on usein vaikeaa, etenkin syyslokakuussa. Lisälämpöä käyttäen tämä voidaan varmistaa.

Kuivausilman lämmitys voidaan toteuttaa eri tavoin. Tällöin ratkaisevat lämmityksestä aiheutuvat kiinteät kustannukset, kannattaako lisälämmön käyttö vai ei. Eri lisälämmitysmahdollisuuksia ovat

- sähkölämmitys
- aurinkolämmitys
- radiaattori + tilakattila
- erillinen ilmauuni
- puhaltimen voimakoneen hukkalämpö
- lämpöpumppu

Lämmönlähteen valintaan ja kustannuksiin vaikuttavat tilakohtaiset tekijät. Tässä tutkimuksessa on liitteessä 1 otettu yksi ratkaisuvaihtoehto kustannusvertailuun. Pieni energiankulutus ei kuitenkaan aina ole paras ratkaisu vaan kokonaistaloudellisuus.

5.2.2.4 Ilmamäärä ja poistoilman suhteellinen kosteus

Kylmäilmakuivauksessa kuivausaika on pitkäkkö, joten kuivauksen onnistumisen tärkeimpänä tekijänä on viljan laadun säilyminen. Riittävän kuivumisnopeuden varmistamiseksi on käytettävä runsaasti ilmaa. Käytännössä vilja olisi saatava noin viidessä päivässä 20 prosentin kosteuteen.

Poistoilman suhteellinen kosteus pysyy kylmäilmakuivauksessa pitkään korkeana. Vasta kun se alkaa aleta, voidaan päätellä kuivumisvyöhykkeen edenneen koko viljakerroksen läpi ja voidaan karkeasti määrittää viljan keskimääräinen kosteus.

Ilmamäärät vaikuttavat kuivumisnopeuteen suoraan viljan ollessa yli 20 % kosteata. Kun 20 % kosteus on saavutettu voidaan viljakerroksen paksuutta lisätä niin, että sen vastapaine on kuvan (13) mukaan sopivan suuruinen. Nyt on vain tunnettava puhaltimen antama ilmamäärä eri vastapaineilla. Kylmäilmakuivurin mitoitukselta on julkaissut ohjeita mm. Kares /18/.

5.2.3 Energian säästömahdollisuudet kylmäilmakuivauksessa

Kylmäilmakuivauksessa mahdollisuudet säästää energiakustannuksissa ovat pienemmät kuin lämminilmakuivauksessa. Kylmäilmakuivauksessa käytetty energia on pääasiassa sähköenergiaa, joten kannattaa myös verrata lämminilma- ja kylmäilmakuivauksen energiakustannuksia markkamääräisinä.

	lämminilma- kuivuri	kylmäilma- kuivuri
käytetty energia		
sähkö kWh/kg	0,08	0,4
lämpö kWh/kg	1,4	
energiakustannukset		
p/kg	23,4	12,0

Oikealla käytöllä ja lisälämmityksellä sähköenergian tarve voidaan pudottaa jopa puoleen. Tämä mahdollisuus on syytä pitää mielessä, varsinkin jos lisälämmön käyttöön on tilalla jo edellytykset. Tällöin lämpöä kuluu lisäksi, joten markkamääräisesti ei saavuteta suuria säästöjä.

5.2.3.1 Puhaltimen käyttöjaksojen valinta

Saksan Liittotasavallassa suoritettussa kylmäilmakuivausta koskevassa tutkimuksessa Mühlbauer et al /17/ vertailtiin erilaisia kylmäilmakuivurin käyttötapoja

Puhaltimen ollessa jatkuvasti käynnissä kului energiaa vesikilon haihduttamiseen 0,412 kWh. Kun puhallinta käytettiin vain silloin, kun ulkoilman suhteellinen kosteus oli alle 70 %, energiankulutus oli 0,29 kWh. Kuivausaika piteni tällöin 24 % ja energiankulutus pieneni n. 30 %.

5.2.3.2 Lisälämmön käyttö

Samassa tutkimuksessa tutkittiin myös lisälämmityksen vaikutusta kuivaukseen. Lämmitettäessä ilmaa n. 4 °C sähkönkulutus oli vain 0,2 kWh/kg jatkuvassa käytössä. Tällöin lämpöä kului 0,369 kWh/kg ja kuivausaika oli vain 48 % verrattuna kuivaukseen ilman lisälämpöä. Lämmitykseen käytettiin sähkövastuksia, joten hyötysuhteen vaikutus on huomioitava, mikäli käytetään muuta tapaa.

Jos verrataan energiankulutusta sivulla (62) olleen esimerkin pohjalta ilman lisälämmitystä ja lisälämmityksellä tapahtuvassa kuivauksessa, saadaan taulukon (8) mukainen tulos.

Taulukko 8.

Energiakustannukset kylmäilmakuivauksessa. Laskelma perustuu esimerkkiin sivulla 58.

Ulkoilman	1	2	3	4
-lämpötila °C	20	20	20	20
-suht. kosteus %	85	75	80	85
lisälämmitys °C	5	-	-	-
kuivausilman				
-lämpötila °C	25	20	20	20
-suht. kosteus %	60	75	80	85
Puhaltimen käyttöaika h	118	212	255	298
Ilmamäärä m ³ /t/h	1000	1000	1000	1000
Tehontarve kW/1000 m ³ /h	0,25	0,25	0,25	0,25
Kuivausaika vrk	5	20	30	41
Alkukosteus %	30	30	30	30
Loppukosteus %	14	14	15	16
Haihdutettu vesimäärä				
kg/t kuivaa viljaa	228	228	214	200
Sähkönkulutus kWh/kg H ₂ O	0,129	0,232	0,298	0,373
Lämmönkulutus kWh/kg H ₂ O (kPö, 80 % hyötysuhde)	0,863	-	-	-
Energiakustannus p/kg H ₂ O	12,5	7,1	9,2	11,5

Energiakustannusten lisälämmitystä hyväksikäyttävässä kuivauksessa voidaan siten arvioida olevan samaa luokkaa kuin ilman lisälämmitystä tapahtuvassa kuivauksessa. Kun kuivaus painottuu elokuulle ja syyskuun alkuun on kuivaus ilman lisälämpöä keskimäärin edullisempaa edellyttäen, että puhaltimen käyttöajat valitaan viljan kosteuden ja sään mukaan.

5.2.3.3 Automatisointi

Puhaltimen ja lisälämmön jaksottainen käyttö edellyttää kuivurin automatisointia ulkoilman suhteellisen kosteuden mukaan. Mühlbauerin /17/ tekemissä kokeissa, jossa lisälämpölähde kytkettiin päälle vain silloin, kun ulkoilman suhteellinen kosteus nousi yli 70 %, sähkönkulutus oli 0,329 kWh/kg ja lämmönkulutus 0,192 kWh/kg.

Muu kuin sähkölisälämmitys on vaikeampi toteuttaa, mutta ei kuitenkaan mahdoton. Esim. radiaattorilämmitys voidaan automatisoida siten, että kiertovesipumppu kytkeytyy suhteellisen ilmankosteuden mukaan. Tällöin kattilajärjestelmän ei välttämättä tarvitse olla varaava käyttökäytöksen ollessa suhteellisen pitkiä. Tutkimuksen mukaan kylmäilmakuivurin automatisoinnilla saavutettava energiansäästö on kuitenkin niin pieni, ettei se korvaa automatisoinnista aiheutuvia kustannuksia.

5.2.3.4 Lämmön talteenotto poistoilmasta

Poistoilman lämpöä ei voida hyödyntää pelkän lämmönvaihtimen avulla, vaikkakin poistoilma on erittäin kosteaa ja sen energiasisältö höyrystymislämmön muodossa suurehko. Poistoilman lämpötila on matalampi kuin ulkoilman lämpötila silloin, kun vilja kuivuu, joten lämpöä ei suoraan saada siirtymään poistoilmasta tuloilmaan.

5.2.3.5 Lämpöpumpun käyttö poistoilman lämmön talteenotossa

Lämpöpumpulla voitaisiin poistoilman lämpöä ottaa talteen ja siirtää tuloilmaan. Ratkaisu on kuitenkin vaikea toteuttaa, koska poistoilma tasokylmäilmakuivureissa yleensä poistuu vapaasti kuivaamon ikkunoiden ja tuuletusaukkojen kautta ulkoilmaan. Lisäksi lämpötilat ovat meidän oloissamme verraten matalia. Lämpöpumpun höyrystimen jäätymisen ehkäisemiseksi tarvitaan automatiikkaa, mikä nostaa laitteiston hintaa. Kun kylmäilmakuivauksen energiantarve on pienehkö ja kuivaamon käyttöaika vuodessa lyhyt, laitteet ovat tällä hetkellä liian kalliit. Yhdysvalloissa suoritettussa tutkimuksessa Hogan et al /19/ siilomallisen kylmäilmakuivurin lämpöpumpulla toimivan lisälämmityksen energiankulutus oli vain 60 % sähköllä toimivan lisälämmityksen energiankulutuksesta.

K.o. koekuivurit olivat kuitenkin meidän oloihimme suuria, tilavuudeltaan n. 200 m³. Lisäksi ilmasto-olosuhteet ja viljan alkukosteus poikkeavat liiaksi suomalaisista, jotta tuloksia voitaisiin soveltaa sellaisenaan meidän oloissamme.

5.3 Lämminilma- ja kylmäilmakuivurin yhteiskäyttö

5.3.1 Periaate

Kylmäilmakuivuria voidaan käyttää lämminilmakuivurin puskurikuivurina tasaamaan pintihuippuja. Järjestelmän etuna voidaan pitää sitä, että se mahdollistaa viljan jatkuvan puinnin ja sato saadaan varmemmin talteen. Tällaista kuivuriyhdistelmää mitoitettaessa on lähdettävä siitä, että niiden yhteinen kuivauskapasiteetti riittää kuivamaan keskimäärin päivittäin puitavan viljamäärän ja koko sato voidaan korjata yhtäjaksoisesti ilman kuivauskapasiteetin puutteen aiheuttamia välipäiviä. Kylmäilmakuivuria käytetään silloin, kun lämminilmakuivuriin ei sovi viljaa tai kun vilja on hyvin kosteaa. Hyvin kosteaa viljaa kuivattaessa kylmäilmakuivuria käytetään kunnes viljan kosteus on noin 20 %. Varastointikosteuteen vilja kulvataan lämminilmakuivurissa. Viimeiset viljaerät voidaan jättää varastoon kylmäilmakuivuriin.

5.3.2 Energiankulutus

Sivulla (58) olevan esimerkin ja taulukon (7) perusteella voidaan arvioida kylmäilma-lämminilmakuivurin yhteiskäytön energiankulutus. Jos viljan alkukosteudeksi oletetaan 28 %, välikosteudeksi ennen lämminilmakuivuria 20 % ja loppukosteudeksi jäädytyksen jälkeen 14 %, saadaan eri tapauksissa taulukon (9) mukainen tulos.

Energiakustannukset esim. pelkällä lämminilmakuivurilla kuivaamiseen verrattuna ovat n. 25 % pienemmät, mikäli käytetään lisälämpöä. Keskimääräisissä olosuhteissa voidaan puskurikuivuria käyttäen vähentää energiakustannuksia 20...30 %, hyvissä oloissa jopa 40 %.

Taulukko 9.

Energiakustannukset kylmäilmakuivurin ja lämminilmakuivurin yhteiskäytössä. Numerot 1, 2, 3 ja 4 viittaavat sivun 58 esimerkkiin.

	1	2	3	4
Kylmäilmakuivuri				
Kuivausilman lämpötila °C	25	20	20	20
suhteellinen kosteus %	60	75	80	85
Alkukosteus %	28	28	28	28
Välikosteus %	20	20	21	22
Puhaltimen käyttöaika h	33	66	85	108
Keskimääräinen ilmamäärä m ³ /t/h	1200	1200	1200	1200
Haihdutettu vesimäärä kg/t viljaa	111	111	97	83
Sähkönkulutus kWh/kg H ₂ O	0,07	0,15	0,22	0,33
Lämmönkulutus kWh/kg H ₂ O	0,59	-	-	-
Lämminilmakuivuri				
Sähkönkulutus kWh/kg H ₂ O	0,09	0,09	0,087	0,087
Lämmönkulutus kWh/kg H ₂ O	1,60	1,60	1,55	1,54
Loppukosteus %	14	14	14	14
Haihdutettu vesimäärä kg	75,0	75,0	88,6	102,6
Energiakustannukset p/kg H ₂ O	17,0	13,3	15,6	18,4

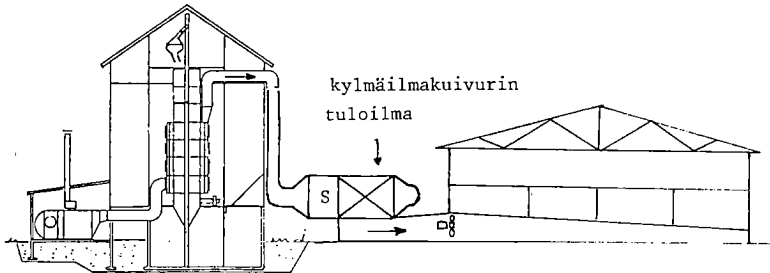
5.3.3 Energiänsäästömahdollisuudet

Lämminilma- ja kylmäilmakuivurin yhteiskäytössä kylmäilmakuivurin ensisijainen tehtävä on varmistaa puinnin jatkuvuus ja säilyttää viljan laatu hyvänä siksi, kunnes se voidaan kuivata lämminilmakuivurissa loppukosteuteen. Koska kuivaaminen kylmäilmakuivurissa on edullista, sitä kannattaa jatkaa ainakin siihen asti, kun vilja on vielä niin kostea, ettei puhaltimen käyntiaikoja tarvitse valita.

Kuivaamon kapasiteetti vaikuttaa voimakkaasti kuivauskustannuksiin, joten oikein mitoitettussa yhteiskäytössä lämminilmakuivuria käytetään jatkuvasti puinnin välipäivistä huolimatta.

Aikaisemmin esitetyt energiänsäästötoimenpiteet voidaan toteuttaa myös kuivurien yhteiskäytössä. Kun kylmäilmakuivurissa vilja kuivataan noin 20 % kosteuteen, ei sen puhaltimen käyttöjaksojen valinta aiheuta lisätyötä.

Uutena mahdollisuutena tulee lisäksi poistoilman lämmönvaihtimen käyttö kuivureiden välissä. Lämminilmakuivurin poistoilmalla voidaan lämmittää kylmäilmakuivurin kuivausilmaa. Koska kylmäilmakuivurin kuivausilmaa lämmitetään vain muutamia asteita ja sen keskimääräinen lämpötila on siten melko alhainen lämminilmakuivurin poistoilman lämpötilaan verrattuna, voidaan yksinkertaisillakin lämmönvaihtimilla päästä hyvin tuloksiin. Kuva (34) esittää kytkentää, jossa vastavirtalämmönvaihdin on sijoitettu kylmäilmakuivurin tuloilmakanavaan.



Kuva 34. Lämminilmakuivurin poistoilman lämmönvaihdin lämmittämässä kylmäilmakuivurin tuloilmaa. S on suodatin tai muu pölynpoistolaitteisto.

Vastavirtalämmönvaihtimen lämpöteho on suoraan verrannollinen lämpövirtojen logaritmiseen lämpötilaeroon

$$\dot{Q} = G \cdot \theta_{1n}$$

jossa \dot{Q} on lämpöteho

G on konduktanssi

θ_{1n} on logaritminen lämpötilaero

Esimerkki

θ_{1n} määritellään /20/

$$\theta_{1n} = (\theta_1 - \theta_2) / \ln (\theta_1 / \theta_2)$$

jossa kuvan (35) mukaisesti

$$T_1 = 30^{\circ}\text{C}$$

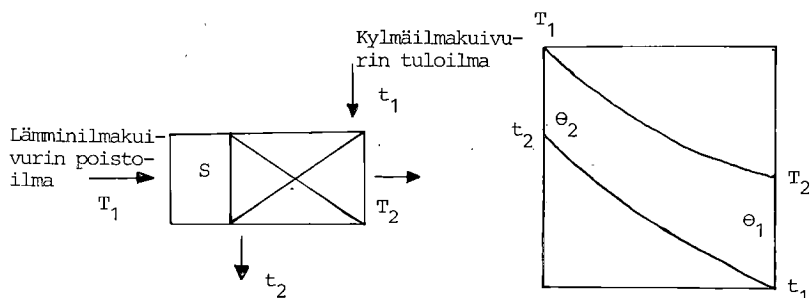
$$T_2 = 21^{\circ}\text{C}$$

$$t_1 = 10^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 22^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_1 = T_2 - t_1$$

$$\theta_2 = T_1 - t_2$$



Kuva 35. Vastavirtalämmönvaihtimen lämpötilat.

Logaritminen keskilämpötilaero on lämmönvaihtimen keskimääräinen lämpötilaero.

Seuraava esimerkki osoittaa miksi lämmönvaihdin on edullista sijoittaa kuivureiden väliin eikä lämmittämään lämminilmakuivurin tuloilmaa.

Jos poistoilman lämmönvaihtimella halutaan saada 20 % säästö polttoaineenkulutuksessa täytyy lämminilmakuivurin tuloilman lämmentä n. 12 astetta lämmönvaihtimessa.

Oletetaan, että kuivauksen aikana ilman keskimääräiset arvot ovat seuraavat:

ulkoilma

$$t = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\varphi = 80 \%$$

kuivausilma

$$t = 65 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

poistoilma

$$t = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\varphi = 65 \%$$

Jotta tuloilma lämpenisi $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$, täytyy poistoilman viiletä n. 9 astetta.

Keskim. logaritminen lämpötilaero on siten

$$\theta_{ln} = (11 - 8) / \ln(11/8) = 9,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$ja \quad G = \emptyset / 9,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Lämminilmakuivuri + kylmäilmakuivuri

Vastaavasti oletetaan yhteiskäytössä seuraavat alkuarvot:

ulkoilma

$$t = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\varphi = 80 \%$$

kuivausilma

$$t = 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

poistoilma

$$t = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\varphi = 65 \%$$

Jos lämmönvaihtimella lämmitetään kylmäilmakuivurin tuloilmaa ja poistoilmasta otetaan lämpöä talteen vain sen verran, että poistoilman lämpötila laskee 9 °C, saadaan logaritmisiksi lämpötilaeroksi

$$\theta_{1n} = (11 - 16) / \ln (11/16) = 13,3$$

Saman lämpötehon siirtämiseksi tarvitaan siten lämmönvaihdin,

$$k \cdot A_1 \cdot 9,4 = k \cdot A_2 \cdot 13,3$$

$$A_2 = 0,71 \cdot A_1$$

jonka lämmönsiirtopinta on 30 % pienempi.

Myös viljaan sitoutunut lämpöenergia saadaan jäädytyksessä hyödynnettyä. Tämän osuus kuivaukseen käytetystä energiasta on n. 8 %. Lämmönvaihdin on myös helpompi asentaa kuivureiden väliin kuin lämminilmakuivurin tuloilma- ja poistoilmaputkien väliin.

5.4 Viljan kuivauskustannukset

5.4.1 Kuivauskustannuksiin vaikuttavat tekijät

Perinteisessä, kevyttä polttoöljyä käyttävässä lämminilma-kuivaamossa energian osuus kustannuksista on yksi viidesosa. Loput 4/5 ovat kiinteitä kustannuksia. Tämän lisäksi tulevat vielä työkustannukset. Kokonaiskuivauskustannukset ilman työn arvoa ovat kuivattua viljakiloa kohden 20...30 p. Koska kiinteiden kustannusten osuus on näin suuri, kuivaamon tehokas käyttö ja oikea mitoitus alentavat tehokkaammin kuivauskustannuksia kuin energiansäästötoimenpiteet. Energiaa säästävät parannukset eivät saisi missään tapauksessa vähentää kuivaamon tehoa. Tämä pätee erityisesti lämminilmakuivaamoihin.

Kylmäilmakuivaamon energiakustannukset ovat vain kymmenesosa kokonaiskuivauskustannuksista. Kustannuksia voidaan tehokkaimmin alentaa pyrkimällä kuivaamaan suurempia viljamääriä esim. lisälämmityksen avulla.

Käytettäessä kuivaamaa tehokkaasti energiakustannusten osuus kasvaa ja energian säästäminen on järkevämpää.

Kuivauskustannuksiin vaikuttavat tekijät on laskettu seuraavan jaottelun mukaisesti

1. kuivurin mitoitus
2. rakennuskustannukset
3. laitteistokustannukset
4. energiakustannukset
5. muut käyttökustannukset ja vakuutus

Työkustannuksia ei ole otettu mukaan lopulliseen kustannusvertailuun.

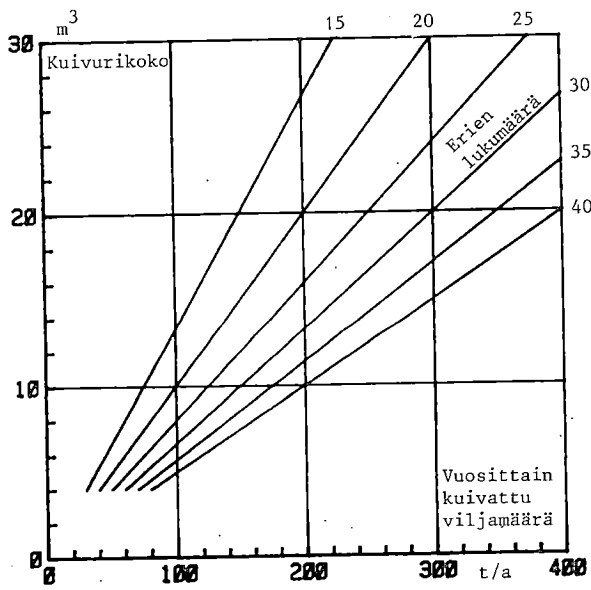
5.4.1.1 Kuivurin mitoitus

Lämminilmakuivuri

Kuivurikoon valitseminen on käytännössä aina tilakohtaista. Nyrkkisääntönä voitaisiin pitää sitä, että kuivurin koko hehtolitroina saadaan kertomalla tilan viljapinta-ala 3...3,5:llä Esko Mänty /21/. Ohje pitänee hyvin paikkansa pienille ja keskikokoisille tiloille kuivuria hankittaessa. Tämä merkitsee sitä, että hehtaarisadon ollessa 3000 kg kuivurilla kuivataan n. 20 täyttä erää vuodessa. Maan keskimääräisen hehtaarisadon mukaan erää on n. 15 vuodessa.

Kuivurin täyden viljaerän paino kiloina on keskimäärin noin 50 x kuivurin tilavuus hehtolitroina.

Tässä tutkimuksessa kuivauskustannukset on laskettu siten, että kuivurilla kuivataan vuodessa 30 erää. Kun puintipäiviä on viisitoista, tulee vuorokautta kohden keskimäärin kaksi kuivauserää. Teoriassa on selvää, että pienille tiloille kuivuri joudutaan ylimitoittamaan, jotta nykyisten puimurien päivittäiset puintimäärät pystytään myös kuivaamaan. Kuvassa (36) on esitetty lämminilmakuivurin koko vuosittain kuivattavan viljamäärän ja kuivauserien lukumäärän vaihdellessa. Mitä vähemmän kuivauseriä, sen varmemmin sato saadaan talteen. Toisaalta, mitä enemmän kuivauseriä, sitä halvemmaksi kuivaaminen tulee.



Kuva 36. Lämminilmakuivurin koko sadon määrän (kuivaa viljaa) ja kuivauserien lukumäärän vaihdellessa.

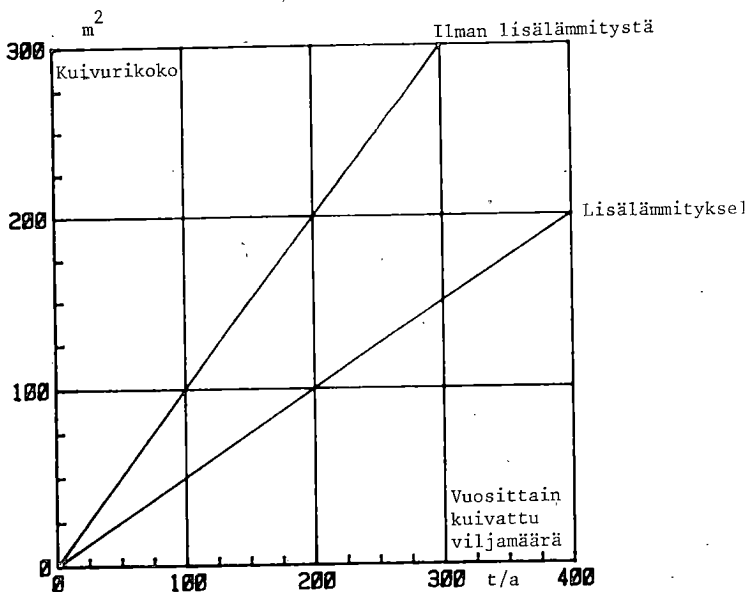
Kylmäilmakuivuri

Kylmäilmakuivurin mitoittamiseen liittyy aina sääoloista aiheutuvia riskejä. Kun käytetään lisälämpöä, kuivausaika on helpompi arvioida. Ilman lisälämpöä toimivassa kylmäilmakuivurissakin pitäisi pyrkiä kuivaamaan enemmän kuin kuivuriin kerrallaan kuivattavaksi sopii.

Käytännössä kuivurin lopullinen varastotila on n. 1,5 kertaa kuivauserän tilavuus, ts. kuivurin tilavuus vastaa noin 60...70 % sadosta. Kuivurin jakaminen vähintään kahteen elementtiin helpottaa kuivaamista. Näistä kumpaakin voidaan käyttää joko erikseen tai yhdessä.

Lisälämpöä käyttäen voidaan kylmäilmakuivurissa kuivata kolmekin erää erän kuivausajan ollessa noin viisi päivää.

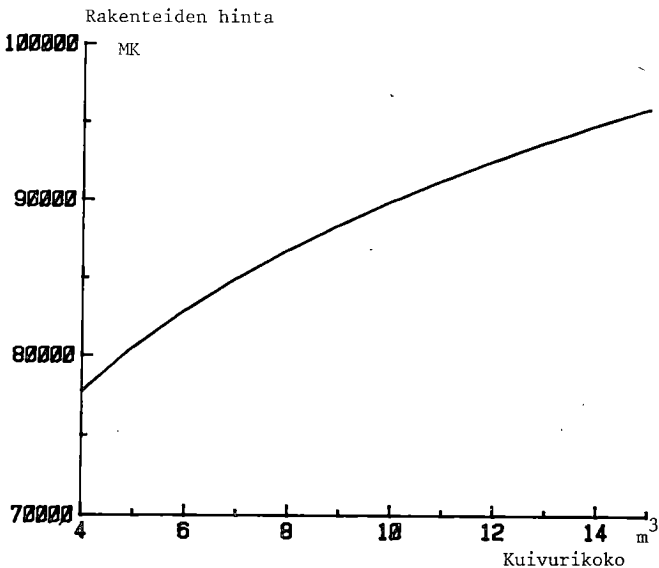
Ilman lisälämmitystä voidaan olettaa viljan kuivuvan riittävän kuivaksi kymmenessä päivässä, jonka jälkeen kuivurin toinen puoli voidaan varata tuuletettavaksi varastotilaksi ja toista puolta käyttää kostean viljan kuivaamiseen. Kuvassa (37) on esitetty kylmäilmakuivurin koko vuosittain kuivattavan viljamäärän vaihdellessa. Käytettäessä lisälämpöä kuivuri voidaan mitoittaa puolta pienemmäksi.



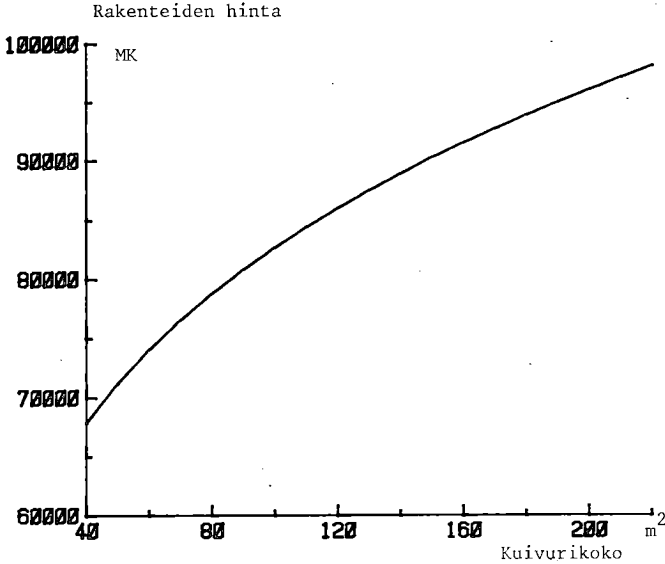
Kuva 37. Kylmäilmakuivuri koko sadon määrän (kuivaa viljaa) vaihdellessa.

5.4.1.2 Rakennuskustannukset

Rakennuskustannukset on arvioitu Työtehoseuran julkaisemien viljankuivauskustannuslaskelmien perusteella /22/. Kylmäilmakuivaamon rakennuskustannukset on arvioitu kuivaattavan sadon määrän mukaan samansuuruisiksi kuin vastaavan kokoisen pakettikuivaamon rakennuskustannukset. Esimerkiksi 100 t sadon kuivaamiseksi ja varastoimiseksi tarvittavat rakenteet maksavat yhtä paljon oli kyseessä kylmäilma- tai lämminilmakuivuri. Apuna on käytetty myös Esko Männyn työtä /21/. Kylmäilmakuivaamon rakennuskustannuksia kohottaa työn osuus, joka on huomattavasti suurempi kuin pakettikuivaamoissa. Rakennusten osalta poistoajana on pidetty 20 vuotta ja korkona 5 %. Kuvassa (38) on esitetty lämminilmakuivaamon ja kuvassa (39) kylmäilmakuivaamon rakennuskustannuskäyriä.



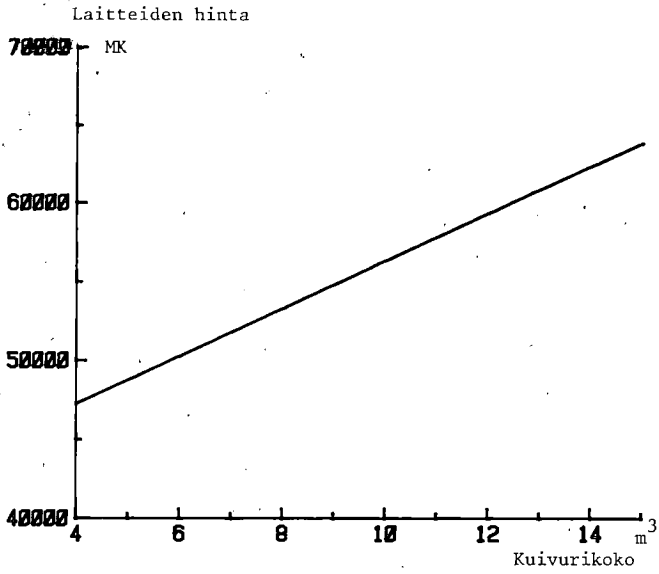
Kuva 38. Lämminilmakuivaamon rakennuskustannukset.



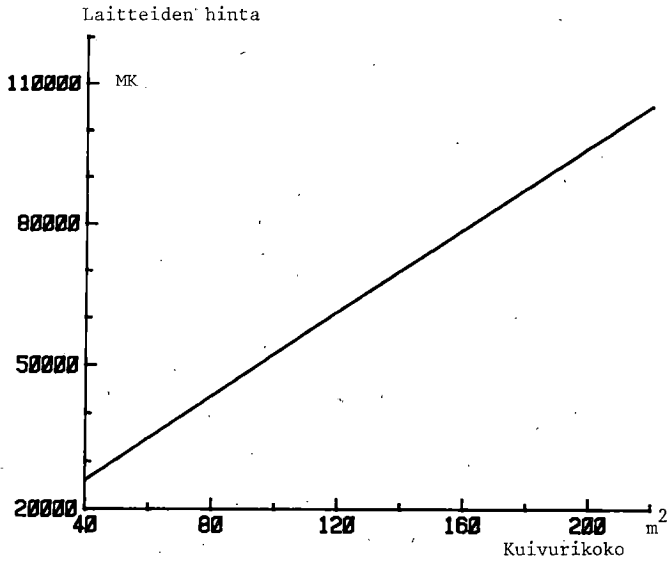
Kuva 39. Kylmäilmakuivaamon rakennuskustannukset.

5.4.1.3 Laitteistokustannukset

Laitteistokustannukset on laskettu valmistajien hintatietojen perusteella ja kustannukset vastaavat kauden 1981-1982 tasoa. Kustannuksiin on laskettu liitteen (1) mukaiset komponentit, joiden lisäksi on arvioitu lämminilmakuivurille n. 20 % ja kylmäilmakuivurille n. 10 % yleiskustannuslisä. Kylmäilmakuivaamon laitteisiin on lisäksi laskettu valmiit elementtityyppiset viljalaarit. Liitteessä (1) olevien eri kokoisten kuivaamojen esimerkkilaskelmien perusteella on laadittu kylmäilma- ja lämminilmakuivaamon laitteistokustannusfunktiot, jotka on esitetty kuvissa (40) ja (41). Erityisratkaisuisissa, esim. käytettäessä lisälämpöä kylmäilmakuivurissa, on lisäksi arvioitu lisäinvestointien arvo. Laitteiden osalta pois-toaikana on pidetty 10 vuotta ja korkona 10 %.



Kuva 40. Lämminilmakuivaamon laitteistokustannukset.



Kuva 41. Kylmäilmakuivaamon laitteistokustannukset.

5.4.1.4 Energiakustannukset

Taulukkoon (10) on koottu yhteenvetona tässä tutkimuksessa käsiteltyjen eri ratkaisuvaihtoehtojen energiakulutukset ja -kustannukset sekä toimenpiteiden säästövaikutus prosenteissa energiankulutuksesta. Taulukossa on pyritty kylmäilmakuivauksen osalta myös arvioimaan kuivaukseen käytetty aika eri ratkaisuisissa.

5.4.1.5 Työkustannukset

Työkustannuksia eri vaihtoehtoissa ei ole arvioitu, sillä työmenekki vaihtelee eri tapauksissa riippuen kuivaamon rakenteellisista ratkaisuista.

5.4.2 Energiansäästötoimenpiteiden kannattavuus

Kuvasta (42) voidaan karkeasti arvioida paljonko yksittäisestä energiansäästöön tähtäävästä toimenpiteestä kannattaa maksaa vuosittain kulutetun öljymäärän vaihdellessa. Investoinnin poistoaajaksi on otettu viisi vuotta ja korkokannaksi 10 %.

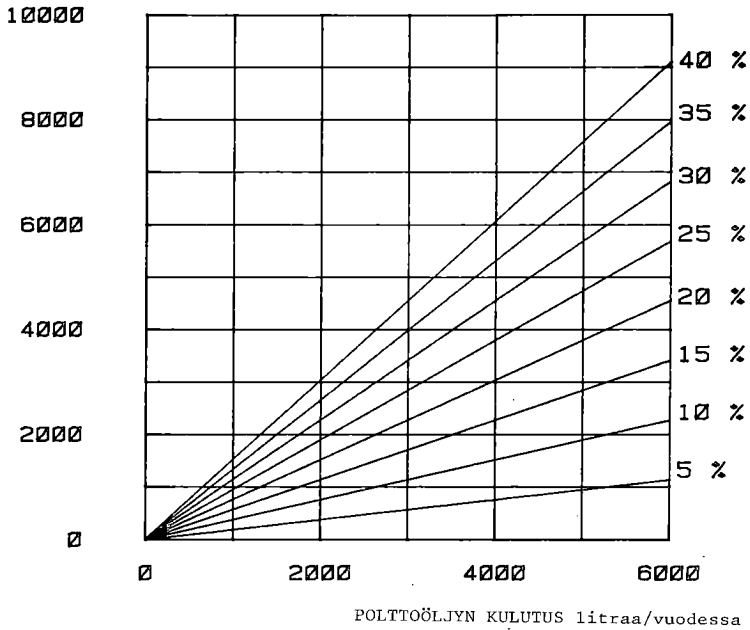
Taulukko 10. Energiankulutus ja -kustannukset hahdotettua vesikieloa kohden eri ratkaisussa sekä sähkötoimienpitäiden vaikutus energiankustannuksiin prosentteissa

	Lämminilmakuivuri			Kylmäilmakuivuri			Lämminilmakuivuri + kylmäilmakuivuri		
	Sähkö kWh/kg	Lämpö kWh/kg	Kustannus p/kg	Sähkö kWh/kg	Lämpö kWh/kg	Kustannus p/kg	Sähkö kWh/kg	Lämpö kWh/kg	Kustannus p/kg
Vertailuenergian kulutus ja kustannus S23; lämpötila suht. koosteus	0,08 0,08(1)	1,4 1,26	23,4 21,3	-	-	12,0	-	-	18,8
Kuivausilman lämpötila Poistoilman kestitä. suht. koosteus	0,08(2) 0,08(3)	1,33 1,30	22,4 21,9	0,4 0,32	-	9,6	20(7)	-	-
Uunin huolto ja polttilman sähkö	0,08(4)	1,4	23,4	0-30	-	-	-	-	-
Kuivurin tiivis- kämäinen	0,08(5) 0,08	1,4 1,26	23,4 21,3	0-10 5-15	-	-	-	-	-
Kuivurin eristämäinen Poistoilman lämsävahtiin	0,08	1,05	18,2	20-25	-	-	-	-	-
Lämpöpumpun käyttö - yksin	0,53(6)	-	15,9	30-40	0,42(9)	12,6	-5	-	-
- lämpöpölkiteenä Lisälämmitin käyttö	0,33(6)	0,65	19,7	25-30	0,20	0,62(8)	-27	-	-
Pubaltilsen automa- tiosointi (< 70 °C)	-	-	-	-	0,29	-	8,7	30	17,4
Lisälämmittyksen automatisointi	-	-	-	-	0,33	0,32(8)	14,7	-23	-

- 1) 10 % sähköstä vastaa suunnilleen päivällä ja yöllä kuivaamiseen eroa, kun lämpöohjeitä ei huomioida. Lämpöohjeite ovat: päivästä pienemmät, joren sähkö on suurempi.
- 2) Sähkö arvioitu 10 °C lämpötilan nousu kohden.
- 3) Sähkö, kun poistoilman suhteellisista kosteutta alennetaan keskim. 5 %-yksikköä.
- 4) Sähkö riippuu uunin aikaisammasta kunnosta arvio 0...30 %.
- 5) Sähkö riippuu kuivurin kunnosta, arvio 0...10 %.
- 6) Koivisto /13/.
- 7) Sähkö, kun suhteellinen ilmastokosteus alenee 85 %:sta 80 %:iin.
- 8) Lisälämmittyksen hyötysuhte 0,6, Mühlbauer /17/.
- 9) Hogan /19/.
- Sähkö hinta 0,30 mk/kWh
- Lämpö hinta 0,15 mk/kWh

INVESTOINNIN HINTA

Litraa kevyttä polttoöljyä



Kuva 42. Energiansäästötoimenpiteiden kannattavuus. Esim. vuotuinen öljynkulutus on 4000 l. Poistoilman lämmönvaihdin säästää polttoainekustannuksia n. 25 %. Kuvan mukaan siihen kannattaa investoida enintään hinta, jonka 3800 l kevyttä polttoöljyä maksaa (vuonna 1982 n. 5700 mk). Tällöin lämmönvaihdin maksaa itsensä takaisin viidessä vuodessa ja rahoille saa 10 % koron.

6. YHTEENVETO

Tärkein ja luonnollisin toimenpide energian säästämiseksi viljan kuivauksessa on pitää kuivuriuuni kunnossa. Välttämällä ylikuivaamista ja vajaatäyttöä sekä pyrkimällä kuivaamaan päiväsaikaan säästetään energiaa. Tällä hetkellä kuivurin eristäminen ja tiivistäminen ovat kannattavia toimenpiteitä, jos työt tehdään itse.

Poistoilman lämmönvaihdin on kustannuksiltaan ja säästövaikutuksiltaan mielenkiintoisin lähiajan ratkaisuvaihtoehto.

Korkea hinta/tehosuhde sekä suurehko sähkötehon tarve tekevät tällä hetkellä lämpöpumpun käytön kuivurin lämmönlähteenä kannattamattomaksi. Kuivurityyppi, joka olisi lämminilma- ja kylmäilmakuivurin välimuoto, sekä polttomoottorin käyttö kompressorin voimanlähteenä saattavat tulevaisuudessa tehdä sen kannattavaksi vaihtoehdoksi.

Kylmäilmakuivauksessa puhaltimen käyntijaksojen automaattisointi ilman suhteellisen kosteuden vaihtelujen mukaan pienentää eniten energiakustannuksia. Kuivausajan piteneemisellä neljänneksellä ei ole merkitystä. Lisälämmön käyttöä voidaan suositella, sillä kokonaiskuivauskustannukset ovat tällöin samaa luokkaa kuin kuivauksessa ilman lisälämpöä. Tällöin varmistetaan varastointikosteuden saavuttaminen.

Lämminilma- ja kylmäilmakuivurin yhteiskäyttö tulee kyseen suurenkoilla tiloilla, joilla lämminilmakuivurin teho ei riitä kuivaamaan päivittäin puitua viljamäärää. Käyttämällä lämminilmakuivurin poistoilman lämpöä lämmitetään energiakustannuksia vähentää lähes puoleen siitä, mitä ne ovat pelkällä lämminilmakuivurilla kuivattaessa.

Yhteiskäyttö mitoituksineen ja kustannuksineen vaatisi lisätutkimuksia. Yhtenäisiä lämminilmakuivurin mitoitusohjeita ei tällä hetkellä ole. Keskimääräisistä ilmastolosuhteista ja viljan kuivaustarpeesta sekä kuivureiden tehosta lähtemällä voidaan kuivuri laskennallisesti mitoittoa. Tällöin päädytään kuitenkin helposti liian pienen kuivuriin. Keskimääräinen lämminilmakuivurin vuotuinen kuivauserien lukumäärä on vain n. 15 erää vuodessa, kun se voisi olla jopa 30 erää vuodessa. Kiinteät kustannukset lämminilma kuivauksessa ovat 70...80 % kokonaiskuivauskustannuksista.

Mitoittamalla kuivuri kuivaamaan vuosittain esimerkiksi 20 erää 15 erän sijasta, saadaan kuivauskustannuksia alenetuksi enemmän kuin millään energiansäästötoimenpiteellä. Kuivaamon koko riippuu mm. varastotilasta, joten kiinteät kustannukset eivät alene aivan samassa suhteessa kuin erien lukumäärä kasvaa. Kun kuivuria käytetään tehokkaasti energian säästön merkitys kasvaa.

Energian säästäminen viljankuivauksessa edellyttää kuivurin toiminnan seuraamista. Käytännössä mittauksen tekoon ei ole syksyllä aikaa eikä tiloilla mittalaitteita, siksi olisi tutkittava käytännön olosuhteissa kuivureittemme toimintaa. Selvityksen perusteella voitaisiin nykyistä paremmin antaa kuivaamiseen ja energian säästämiseen liittyvää neuvontaa. Tämä tutkimus ei anna kuvaa siitä, mitkä tekijät käytännössä aiheuttavat keskimääräistä suuremman energiankulutuksen.

Viljan korjuu vaikuttaa suoranaisesti kuivauskustannuksiin, joten tarvittaisiin myös selvitys koko korjuuketjusta.

7. KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Maltry, W., Pötke, El, Schneider, B., Landwirtschaftliche Trocknungstechnik, 2. painos, VEB Verlag Technik, Berlin, 1975, 69...153, 423.
2. Fortes, M., Okos, M.R., Barret, J.R. Jr., Heat and mass transfer analysis of intra-kernel wheat drying and rewetting, J. agric. Engng. Res., 26, (1981), 109...125.
3. Johnsen, J., Beluftning of korn, NJF-seminar 9.-11.2.1982, Norge.
4. Westermarck-Rosendahl, C., Spontaneous heating in newly harvested wheat and rye, Acta Agriculturae Scandinavica, 28, 1978, 151...168.
5. Lindberg, J.E., Sörensson, I., Upphetning- och torkningsförsök med spanmål företrädesvis vete, Kungl. Skogs- och lantbruksakademiens tidskrift, Supplement 1, Stockholm, 1959.
6. Hutchinson, J.B., Greer, E.N. and Thomas, P.T., 1946. Heat damage in cereal seeds, Nature 158: 120...125.
7. Olered, R., Torkningskador och makningsförmåga hos vete, NJF-seminar 9.-11.2.1982, Norge.
8. Tekniikan käsikirja, 8. p., II osa, s. 638...640, 675.
9. Tekniikan käsikirja, 8. p., V osa, ss. 667...669.
10. Heyde, H., u.a., Landmaschinenlehre, Band II, VEB Verlag Technik, Berlin, 1965, 308...338.
11. Hague, E., Ahmed, Y.N., Deyoe, C.W., Static Pressure drop in a fixed bed of grain as affected by grain moisture content, Transactions of the ASAE, 1982, ss. 1095...1098.

12. Heino, R., Taulukoita Suomen ilmasto-olosuhteista kaudelta 1961-1975, Liite Suomen meteorologiseen vuosikirjaan nide 75 osa 1a - 1975, Ilmatieteen laitos, Valtion painatuskeskus, Helsinki, 1976, ss. 10, 11, 24, 25, 34, 35.
13. Koivisto, K., Lämpöpumpun käyttö viljan kuivauksessa, diplomityö, LTKK, 1982.
14. Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos, Liikkumattoman viljan kuivauksesta lämmitetyllä ilmalla, Tutkimusselostus 2, Valtioneuvoston kirjapaino, Helsinki, 1960.
15. Piltti, M., Energian tarpeen vähentämisestä ja kotimaisen energian käytöstä viljan kuivauksessa, VAKOLA, tutkimusselostus no 19, Helsinki, 1979.
16. Kutzbach, H.D., Einsatz von Wärmepumpen bei der Körnerfruchttrocknung, Die Mühle und Mischfuttertechnik, 115. Jahrgang, Heft 38, September (1978), ss. 553, 554, 557.
17. Mühlbauer, W., Hofacker, W., Müller, H-M., Thaler, M., Die Kaltlufttrocknung von Weizen unter energetischem und mikrobiologischem Aspekt, Grundlagen der Landtechnik, Bd. 31, (1981), 5, ss. 145...154.
18. Kares, M., Viljankuivauksen perusteet I-V, Koneviesti, n:ot 8...12, 1978.
19. Hogan, M.R., Muller, R.E. Jr., Foster, G.H., Ayers, D.L., Development and testing of a heat pump grain dryer, American Society of Agricultural Engineers, Technical paper, 79-3527, 1979, ss. 53.
20. Tekniikan käsikirja, 8. p., IV osa, ss. 596...597.

21. Mänty, E., Pakettikuivaamo teknisenä ja taloudellisenä ratkaisuna, Pro gradu-työ Maatalouden työtekniikan laitokselle, 1972.
22. Leikkuupuinnin ja viljan kuivauksen työtunnin hintalaskelmat, Työtehoseuran maataloustiedotus 5-1981, Koneviesti, 13, (1981), ss. 16...17.
23. Maatalous, Suomen virallinen tilasto, II 1980, Valtion painatuskeskus, Helsinki, 1982.
24. Wassermann, L. und Mühlbauer, W. 1979 und 1980. Einfluss der Trocknung auf die Qualität von Weizen. - Getreide, Mehl und Brot 7: ss. 176...1982 und 9: ss. 225...230.
25. Henderson, S.M., A basic concept of equilibrium moisture, Agricultural Engineering, 33, (1952), ss. 29...31.
26. Ghung, D.S., Mauer, S.G., Milliken, G.A., Pfost, H.B., Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains, ASAE, paper No. 76-3520, 1976.
27. Day, D.L., Nelson, G.L., Desorption isotherms for wheat, Trans. Am. Soc. agric. Engrs., 10, (1967), ss. 558...560.

LÄMMINILMAKUIVURI; öljyuuni

			hinta mk		hinta mk
Kuivurin koko	m ³	7,5	18 480	14,6	25 100
Vuositt. kuivattu viljamäärä kuivaa viljaa (30 erää)	t	112,5		219	
Polttoöljyn kulutus vuodessa	kg	2625		5110	
	l	3088		6012	
Kuivuriuuni lämpöteho	kW	144	22 550	217	24 200
Sähköteho	kW	8,6		11	
Elevaattori tehontarve	kW	3	9 240	4	9 700
Esipuhdistin			1 650		1 650
Laitteiden hinta			51 920		60 650
Rakenteiden hinta			87 000		97 000
Varastosillot 2 kpl + asennus	m ³	170	25 000	340	40 000
Kuivausaika (28-14 %)	h	7,2		9,6	
Täyttö + tyhj. + jäähdytysaika	h	0,5		1	
	h	1,0		1	
Yht.	h	8,7		11,6	
Kuivausaika yht. (30 erää)	h	261		348	
Kuivausaika *	vrk	15		15	
Sähkönkulutus	kWh	2 160		2 894	
Öljynkulutus	l	3 088		6 012	

Tarkoittaa minimiaikaa, jonka puitteissa sato on saatu varastointikelpoiseksi.

KYLMÄILMAKUIVURI; ilman lisälämmitystä

			hinta mk		hinta mk
Kuivuri	m ²	110	41 000	220	80 000
Vuosittain kuivattu viljamäärä kuivaa viljaa	t	112,5		219	
Puhaltimet, tehontarve	kW	15	6 000	2x15	12 000
Viljan siirto ruuvi, tehontarve	kW	3	4 000	4	5 000
Rakenteiden hinta			85 000		98 000
Laitteiden hinta			51 000		97 000
Puhaltimen käyttöaika	h	510		510	
Täyttö, siirtely	kWh	60		110	
Puhallus	kWh	7650			15 300
Sähkönkulutus	kW	7710		15 410	
	kWh/kg	0,352		0,362	

KYLMÄILMAKUIVURI LISÄLÄMMITYKSELLÄ

			hinta mk		hinta mk
Kuivurin koko	m ²	55	24 000	110	41 000
Vuosittain kuivattu viljamäärä kuivaa viljaa	t	112,5		219	
Puhallinteho	kW	7,5			
Puhaltimet	kW	7,5	4 800	15	6 000
Viljan siirto ruuvi	kW	2,2	3 500	3	4 000
Lämmitin	kW	40	12 000	80	16 000
+ asennus			5 000		6 000
Laitteiden hinta			49 300		73 000
Rakenteiden hinta			72 000		85 000
+ uunihuone hinta			3 000		4 000
Varastosillot, tilavuus + asennus	m ³	80	13 400	160	24 800
Puhaltimen käyttöaika	h	354		354	
Sähkönkulutus Täyttö + siirto	kWh	30		60	
Puhallus	kWh	2 655		5 310	
	kWh/kgH ₂ O	0,121		0,121	
Lämmönkulutus (ilman hyötysuhdetta)	kWh	14 160		28 320	
Kuivausaika	h	354		354	
Kuivausaika	vrk	15		15	
Sähkönkulutus	kWh	2 685		5 370	
Lämmönkulutus öljy (= 0,80)	kWh/kgH ₂ O	0,809		0,809	
	kWh	17 700		35 400	

	Lämminilmakuivuri		Kylmäilmakuivuri		Kylmäilma- kuivuri + lisälämmitys	
Sähkönkulutus kWh/kg H ₂ O	7,5 m ³ 0,093	14,6 m ³ 0,062	110 m ² 0,352	220 m ² 0,362	55 m ² 0,123	110 m ² 0,126
Lämmönkulutus kWh/kg H ₂ O	1,42	1,42			0,809	0,831
Energia- kustannukset	24,1	23,2	10,6	10,9	15,8	16,2
Rakennukset	mk 87000	97000	85000	97000	75000	89000
Laitteet	mk 62300	72800	56100	106700	54230	80300
Yht.	mk 149300	169800	141100	203700	129230	169300
Varastosiiilot	25000	40000			13400	24800
Kiinteät kustannukset						
Rakennukset	mk 8982	10987	6817	7779	7090	9127
Laitteet	mk 10136	11845	9130	17365	8826	13068
Kunnossapito + vakuutus	mk 3486	4196	1410	2037	2853	3882
Yht.	mk 22604	27028	17357	27181	18769	26077
p/kg H ₂ O	103,3	63,5	79,3	63,8	85,8	61,2
Haihd.vesim. (28 % 14 %)	kg 21875	42583	21875	42583	21875	42583
Kustannukset yhteensä p/kg H ₂ O	127,4	86,7	89,8	74,7	101,6	77,4

Laskentaperusteet:

1. Rakennukset 20 v, 5 % korko
2. Laitteet 10 v, 10 % korko
Vakuutus ja kunnossapito 1...2 % hankkeen hinnasta
Sähkön hinta 30,0 p/kWh maatilataloudessa
Lämmön hinta 15 p/kWh

Lämminilmakuivurin laitteistolle on laskettu 20 % kustannuslisä.
Kylmäilmakuivurin laitteistolle on laskettu 10 % kustannuslisä.

VAKOLAN TUTKIMUSSELOSTUKSIA

- | No | Nimi |
|----|--|
| 11 | Turtiainen, K., Chain saw operator's opinions of chain saw vibration. 1974. |
| 12 | Turtiainen, K., Chain saw vibration and vibration measurements. 1974. |
| 13 | Turtiainen, K., Preliminary survey of the back complains of men who have driven tractors in forest work. 1974. |
| 14 | Ahokas, J., Altonen, M., Tutkimus maataloustraktorin veto-voimasta. 1975. |
| 15 | Hahlman, A., Ahokas, J., Tutkimus maataloustraktorin täri-nästä ja heilunnasta. 1978. |
| 16 | Hyvärinen, H.; Ahokas, J., Runko-ohjattavien metsäkonei-den stabilisuus. 1978. |
| 17 | Turtiainen, K., Kyselytutkimus monitoimikoneen kuljetta-jien työn rasittavuudesta ja työviihtyvyydestä. 1978. |
| 18 | Turtiainen, K., Vertailututkimus metsurin työhousojen viiltosuojainten kestävyystutkimuksissa käytetyistä tut-kimusmenetelmistä. 1979. |
| 19 | Piltti, M., Energian säästö ja kotimaisten polttoaineiden käyttö viljan kuivauksessa. 1979. |
| 20 | Kara, O., Räisänen, L., Maanmuokkauksen minimointi ja kyl-vö- ja lannoitusvantaiden soveltuvuus kyntämättömään maa-han. 1979. |

- 21 Ketola, T., Kotimaiset polttoaineet, kattilat ja kattiloiden koetusmenetelmä. 1979.
- 22 Parmala, S-P., Puukaasu moottoriajoneuvojen polttoaineena. 1980.
- 23 Kiviniemi, J., Pokki, J., Oksanen, E.H., Turkkila, K., Nurmisäilörehun valmistuksen ja käsittelyn tekniikka. 1980.
- 24 Parmala, S-P., Polttomoottorien varustaminen kotimaisten polttoaineiden käyttöön soveltuviksi. 1980.
- 25 Kara, O., Heikkilä, H., Itujen vaurioituminen idätetyn perunan koneellisessa istutuksessa. 1982.
- 26 Ahokas, J., Salminen, R., Agricultural Tractor Hitch-hook loading and location. 1981.
- 27 Salminen, R., Turtiainen, K., Metsätraktorin heilunnan mittaamenetelmän kehittäminen. 1982.
- 28 Haber, P., Näkyvyys traktorista. 1982.
- 29 Olkinuora, P., Esala, J., Aurasalaojituksen käyttömahdollisuudet. 1982.
- 30 Ståhlber, P., Olki polttoaineena. 1983.
- 31 Koivisto, K., Energiansäästö viljankuivauksessa. 1983.
- 32 Mäkelä, O., Ahokas, J., Suurinkeroinen, J., Kotimainen polttoaine viljankuivauksessa. 1983.
- Ahokas, J., Energiantuotanto maatilatalouden omista energialähteistä. 1983.

