



MORENPBIZ.

More Natural Product Business by Enhanced Quality and Energy Efficiency of Drying

Kasvimateriaalin kuivaus ja sovellukset

Teksti: Hampus Lundholm Ljungkvist, LTU

Suomenkielisen version toimitus: Teemu Huotari ja Jaana Väisänen, Oamk

Tiivistelmä

Tämä artikkeli kertoo perusteet kasvimateriaalin kuivaamisen tekniikasta sekä siitä, miten eri muuttujat, kuten tuotteen tai kuivuriin puhallettavan ilman kosteuspitoisuus ja lämpötila vaikuttavat kuivumisprosessiin. Selostamme myös veden haihtumista tuotteista lisäävät kuivausmenetelmät, eli konvektiivisen kuivaamisen sekä säteilyn ja alipaineeseen perustuvat menetelmät ja niiden sovellukset. Artikkelissa nostetaan myös esiin kuivaamisen energiatehokkuuden parantamisen keinot, ja niistä erityisesti ilman kierrätys ja lämpöpumpputekniikka.

Johtopäätöksenä todettakoon, että sopivan kuivaustekniikan valinnassa tarvitaan taloudellista arviointia ja ymmärrystä yrityksen tuotevalikoimasta ja mittakaavasta. Kannattavuuden kannalta olennaista on määritellä kuivaamiskauden ajankohta ja sen kesto, tuotteen laatuvaatimukset ja tuotannon volyymi.

Sisällys

1	Mitä on kuivaaminen?	1
1.1	Kuivattava kasvimateriaali	1
1.2	Ilman ominaisuudet	2
2	Kuivausmenetelmät	5
2.1	Konvektiivinen kuivaus	5
2.1.1	Lavakuivuri	5
2.1.2	Hihnakuivuri	7
2.1.3	Kaappikuivuri.....	8
2.1.4	Leijupetikuivuri.....	9
2.2	Säteilykuivaus.....	9
2.2.1	Aurinkokuivaus.....	9
2.2.2	Mikroaaltokuivaus.....	10
2.3	Tyhjiö- eli vakuumikuivaus.....	11
2.3.1	Pakkaskuivaus	11
2.4	Energiatehokkuuden parantaminen	11
2.4.1	Ilman kierrätys	11
2.4.2	Lämpöpumput.....	12
2.4.3	Lämmittämättömällä ilmalla esikuivaus	14
3	Yhteenveto	14
4	Lähteet.....	16

1 Mitä on kuivaaminen?

Kuivausprosessi on monimutkainen virtausmekaaninen ongelma, jonka aikana veden olomuoto vaihtuu. Prosessin kulkua säätelevät monet eri muuttujat, jotka voidaan jaotella kolmeen eri kategoriaan: kuivausmenetelmä, kuivaavan materiaalin ominaisuudet ja kuivattavan tuotteen ominaisuudet. Avainmuuttujat kuvataan tässä kappaleessa.

1.1 Kuivattava kasvimateriaali

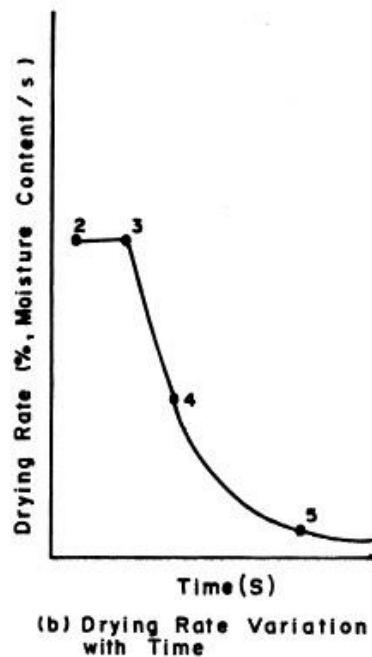
Maataloustuotteiden kosteus ilmaistaan yleensä tuorepainona (1), eli veden paino per tuotteen tuorepainoyksikkö.

$$X_{wb} = \frac{m_w}{m_w + m_d} \quad (1)$$

missä m_w on tuotteessa olevan veden massa ja m_d kuivan tuotteen massa. Jos esimerkiksi tuoreen tuotteen kosteuspitoisuus on 70 % ja halutaan tuottaa 1 kg kuivattua tuotetta, täytyy vettä poistaa 2,2 kg. Kosteus voidaan ilmaista myös kuivapainona, eli veden paino per tuotteen kuivapainoyksikkö, mutta tätä tapaa käytetään melko harvoin.

Tuotteiden varastoinnin kannalta tärkeä suure on tasapainokosteus, joka määritellään "Tuotteen kosteuspitoisuutena, jossa kosteuden vaihdanta ympäröivän ilman kanssa on nolla" [1]. Toisin sanoen kosteuspitoisuus pysyy vakiona. Tuotteen tasapainokosteus vaihtelee ilman kosteuden ja lämpötilan perusteella. Jotta tuotteen tasapainokosteus pysyy muuttumattomana, varastolosuhteet täytyy vakioida. Toinen vaihtoehto on, että tuote varastoidaan ilmatiiviiseen astiaan/säiliöön.

Osa kasvissa olevasta kosteudesta on sidottuna solurakenteisiin ja osa kevyesti sidottuna tai vapaana. Tämä takia kuivuminen etenee kahdessa vaiheessa [2]. Ensimmäisessä vaiheessa kuivuminen etenee vakionopeudella ja toisessa vaiheessa hidastuvalla nopeudella (Kuva 1).



Kuva 1. Kuivumisen kaksi vaihetta. Tasainen kuivuminen 2->3. Hidastuva kuivuminen 3->5 [2].

Ensimmäisessä vaiheessa tuotteen pinta on vapaan veden kyllästämää, vaikka tuotteen pinta tuntuisi kuivalta. Vettä haihtuu tuotteesta tasaisella nopeudella, kunnes diffuusio tai veden siirtyminen syvemmistä osista ei enää pysty ylläpitämään haihtumista vakionopeudella. Tätä kohtaa kutsutaan tuotteen kriittiseksi kosteuspitoisuudeksi, ja tästä käynnistyy hidastuvan kuivumisen vaihe. Ensimmäisen vaiheen kuivumisnopeus määräytyy pääosin ympäristöolosuhteiden perusteella. Toisessa vaiheessa kuivumisnopeus määräytyy tuotteen sisäisen diffuusionopeuden perusteella. Tuotteilla on erilaiset diffuusionopeudet ja kriittiset kosteuspitoisuudet.

1.2 Ilman ominaisuudet

Normaali ulkoilma on kuivan ilman ja vesihöyryn seos, jotka molemmat käyttäytyvät matalissa lämpötiloissa ja normaalissa ilmanpaineessa ns. ideaalikaasun tapaan. Ilma toteuttaa näissä olosuhteissa Daltonin lakia (2), jossa P_a on kuivan ilman osapaine ja P_v on vesihöyryn osapaine. Osapaine tarkoittaa kyseisen kaasun painetta silloin, kun kaasu täyttää saman tilavuuden kuin kaasujen seos samassa lämpötilassa. Kaasujen osapaineiden summa on yhtä kuin seoksen paine.

$$P = P_a + P_v \quad (2)$$

Ideaalikaasun tilanyhtälön (3) mukaan paine on riippuvainen tietyssä tilavuudessa ja tietyssä lämpötilassa olevan kaasun määrästä. Toisin sanoen, jos tilavuus ja lämpötila pysyvät vakioina, nousee kaasun paine sen määrän kasvaessa:

$$PV = nRT \quad (3)$$

Kaavassa V on kaasun tilavuus, n on kaasun määrä, R on yleinen kaasuvakio ja T on kaasun lämpötila. Suurimmillaan vesihöyryn määrä ilmassa on sen osapaineen ollessa yhtä suuri kylläisen höyryn paine. Kyllästymispaine on se paine, jossa kaasu alkaa kondensoitua ja se vaihtelee lämpötilan mukaan. Ilmaa, jossa höyry on kyllästymispaineessa, kutsutaan vesihöyryn kyllästämäksi ilmaksi.

Ilman kosteuspitoisuus voidaan ilmaista joko absoluuttisena tai suhteellisenä kosteutena. Absoluuttinen kosteus tarkoittaa kosteuden määrää kuivan ilman painoon verrattuna:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (4)$$

Missä m_v vesihöyryn paino ja m_a kuivan ilman paino.

Suhteellinen kosteus voidaan ilmaista joko höyryn osapaineen (P_v) ja samassa lämpötilassa olevan höyryn saturaatiopaineen (P_s) suhteena:

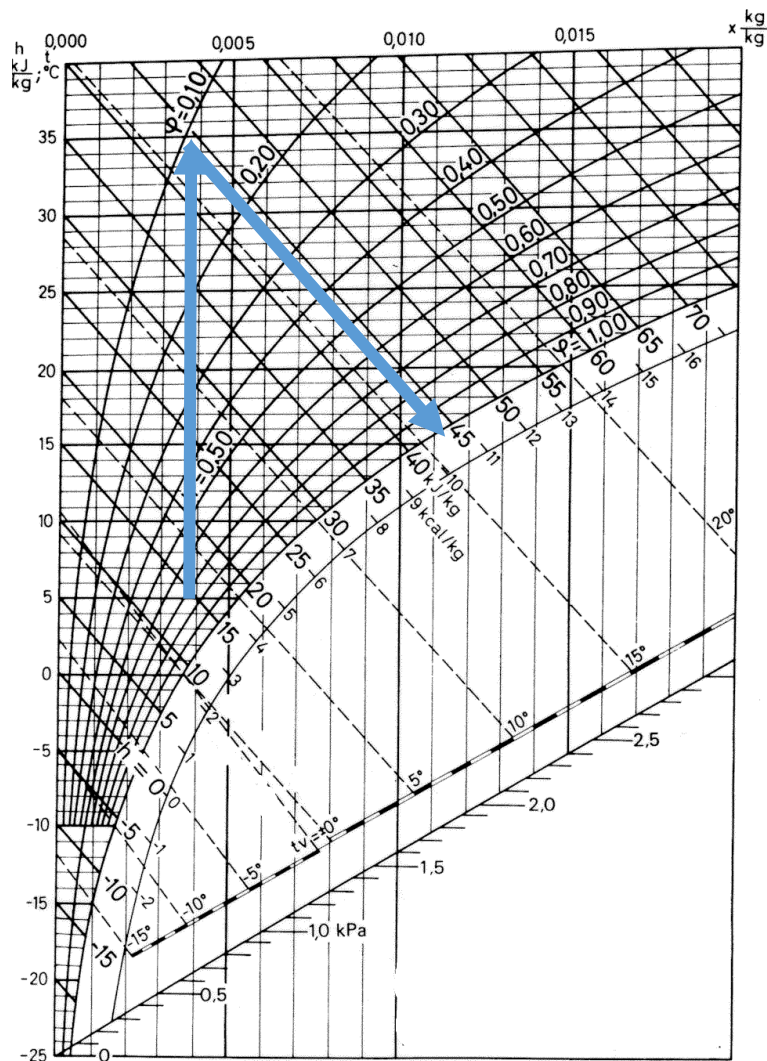
$$\phi = \frac{P_v}{P_s} \quad (5)$$

Tai kosteuden määränä ilman kokonaispainoa kohden

$$\omega = \frac{m_v}{m_v + m_a} \quad (6)$$

Kun ilmaa käytetään tuotteiden kuivaamiseen, sen tila on tärkeä tuntee, jotta kuivumista voidaan kontrolloida. Tarkastellaan esimerkiksi mitä tapahtuu 5-asteiselle ilmalle, jonka RH on 80 %, kun se lämmitetään 35 asteen lämpötilaan kuinka paljon sillä voidaan haihduttaa kosteutta. Käytetään apuna Mollier-diagrammia (kuva 4). Diagrammista voidaan lukea ilman lämpötila, kosteus tai ominaisentalpia, jos kaksi muuta suuretta on tiedossa.

Y-akselilla ovat ilman lämpötilat. Suhteellinen kosteuspitoisuudet kulkevat kaarevasti diagrammin läpi. Ominaisentalpia-arvot saturaatiopisteessä luetaan diagonaalisesti saturaatiokäyrältä. 5 °C lämpötilassa ja 100% suhteellisessa kosteudessa olevan ilman entalpia on noin 15 kJ/kg. Lämmitettäessä ilman absoluuttinen kosteus ei nouse lämmitetyn ilman arvot saadaan kulkemalla pystysuoraan loppulämpötilan 35 °C kohdalle. Tässä pisteessä suhteellinen kosteus on vain hieman yli 10 % ja ominaisentalpia noin 43 kJ/kg. Seuraavaksi tapahtuu kuivaus, jonka aikana ilman lämpötila laskee ja kosteuspitoisuus nousee. Diagrammissa siirrytään entalpiakäyrää pitkin saturaatiokäyrälle. Tässä tapauksessa loppulämpötilaksi saadaan noin 16 °C. Teoreettinen maksimimäärä joka kosteutta voidaan poistaa, saadaan lämmitetyn ilman ja poistoilman absoluuttisen kosteuden erotuksena, eli tässä tapauksessa 6,5 g vettä per kilo ilmaa. Absoluuttinen kosteus luetaan diagrammin yläreunasta.



Kuva 2. Mollier-diagrammi. Siniset viivat kuvaavat ilman ominaisuuksien muutoksia lämmityksessä ja kuivauskammiossa [4].

Mollier-diagrammia ei tule käyttää suoraan kuivausprosessien laskemiseen, vaan pelkästään niiden visualisointiin. Laskennassa käytetään sen sijaan Mollierin taustalla olevia laskukaavoja tai niitä hyödyntäviä laskentaohjelmia.

Kuivaamisen periaate on lämmittää tuotetta, jotta siitä haihtuu kosteutta. Lämpöä voidaan siirtää eri tavoilla: johtamalla, konvektiivisesti väliaineen, kuten ilman avulla, tai säteilyä, kuten mikroaallot tai auringonvalo. Vesihöyryn poistamiseen käytetään yleensä puhallettua ilmaa. Ilma lähinnä kuivattavaa tuotetta kyllästyy vesihöyryllä, mikä nostaa vesihöyryn osapainetta verrattuna sisään puhallettuun kuivempaan ilmaan. Vesihöyry siirtyy sen myötä ympäröivään ilmaan. Suurempi vesihöyryn osapaine-ero aikaansaa nopeamman kosteuden siirtymisen.

2 Kuivausmenetelmät

Tuotteissa oleva kosteus voidaan poistaa monella eri tavalla. Maataloustuotteista kosteus poistetaan yleensä haihduttamalla. Muita keinoja ovat muun muassa linkoaminen (esimerkiksi vaatteet) tai osmoosikuivaus, jossa kosteutta siirretään tuoreista hedelmistä vahvan sokeriliuoksen avulla. Kuivaamisen energiatehokkuutta voidaan parantaa monin tavoin, muun muassa ilman kierrätyksellä tai lämpöpumpuilla.

2.1 Konvektiivinen kuivaus

Konvektiokuivauksessa käytetään lämmitettyä ilmaa kosteuden haihduttamiseen tuotteesta ja sen poistamiseen kuivaustilasta. Kirjallisuudessa tätä tekniikkaa kutsutaan usein perinteiseksi kuivaamiseksi, koska se on kuivausmenetelmistä kaikkein yleisin.

2.1.1 Lavakuivuri

Lavakuivuri on ns. panostoiminen kuivuri, eli sillä kuivataan yksi erä kerrallaan eikä tuotetta voi lisätä ja tyhjentää kuivauksen aikana. Kuivuri koostuu puhaltimesta, lämmittimestä ja kuivaussäiliöstä, jonka korotettu pohjalevy on rei'itetty. Kuivattava materiaali sijoitetaan tälle pohjalevyille. Kuivausilma lämmitetään yleensä 40 – 45 asteeseen joko lämpöpumpun, sähkölämmittimen tai muun lämmönlähteen avulla. Lämmitetty ilma pakotetaan kuivattavan materiaalin läpi ja ulos ympäristöön. Lavakuivaus on helppo ja edullinen toteuttaa ja ylläpitää, mutta sen tilankäyttö on tehotonta. Muut haitat ovat epätasainen kuivuminen ja alhainen energiatehokkuus, työtä vaativa lastaus ja purku sekä prosessin epäjatkuvuus. [7.]

Materiaalin alin kerros kuivuu enemmän kuin pintakerros. Kuivempi ilma tuottaa pohjakerroksessa suuremman kuivumisnopeuden. Materiaalin sekoittamista tarvitaan kuivaamisen aikana, jotta saadaan yhdenmukaisesti kuivaa tuotetta. Kehittyneissä lavakuivureissa voidaan kuivausilman suuntaa vaihtaa, ja näin saadaan yhdenmukaisempi kuivaustulos ilman sekoitustarvetta. Poistuvan ilman lämpö voidaan saada talteen kierrättämällä poistoilmaa uudelleen. Näin saadaan lavakuivurin energiatehokkuutta parannettua.



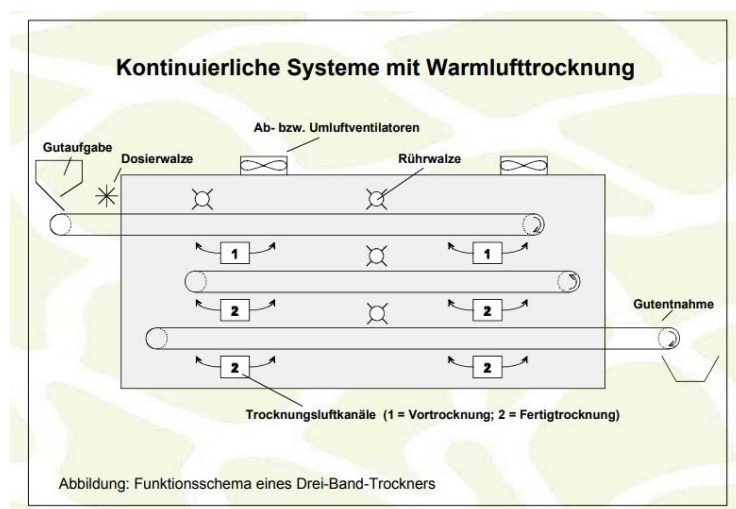
Kuva 3. Filmivanerista ja suomulevystä koottu lavakuivuri. Kuva: Markku Koistinen, RAMK Kätehanke.



Kuva 4. Puhallin, 9 kW:n rakennuslämmitin ja muuntoyhde, jossa lämpötila-anturi lavakuivurin edessä. Kuva: Jaana Väisänen.

2.1.2 Hihnakuivuri

Hihnakuivurissa tuote kulkee yhden tai useamman hihnan päällä ja samalla ilma puhalletaan joko tuotteen läpi tai ylitse. Kuivausprosessi on siis jatkuva eli tuotetta tuotetta voidaan lastata kuivauksen aikana. Jos hihnoja on useita, voidaan prosessia optimoida säätämällä kunkin hihnan ilmavirta ja kuivausilman lämpötila sopivaksi. Esimerkiksi kuivumisen tasaisen vaiheen nopeuttamiseksi voidaan ilman lämpötila säätää korkeammaksi prosessin alkupäässä. Korkeampi lämpötila ei vahingoita vielä kosteaa tuotetta, koska haihtuminen viilentää ilmaa. Kuivausaika hihnakuivurissa on lyhempi kuin lavakuivurissa. Prosessi vaatii vähemmän manuaalista työtä, koska tuote sekoittuu pudotessaan hihnalta toiselle ja sekä lastaaminen että tyhjennys voidaan toteuttaa mekaanisesti. Toisaalta hihnakuivuri vaatii jatkuvaa säätämistä ja ylläpitokulut nousevat korkeammaksi, koska kuivurissa on enemmän liikkuvia osia. Korkeampien kustannusten vuoksi hihnakuivurit eivät sovellu kovin hyvin pientuotantoon.



Kuva 5. Hihnakuivurin toimintaperiaate. Kuivausilmakanavat: 1 = Esikuivaus; 2 = Loppukuivaus.
Kuva: Anna Noetzel & O. Hensel, Kasselin yliopisto, Witzenhausen



Kuva 6. Krassia syöttökuljettimessa nousemassa hihnakuivuriin, yrttitala Ochs Baijerissa. Kuva: Jaana Väisänen

2.1.3 Kaappikuivuri

Kaappikuivuri muistuttaa kotitalouksien kiertoilmauunia. Tuote levitetään kuivaustasoille, jotka asetetaan päällekkäin eristettyyn kuivauskammioon. Kuivausilma voidaan puhaltaa joko kasvimateriaalin läpi alhaalta ylös tai erikseen kullekin kuivaustasolle sivusta. Sivusta puhaltaminen tuottaa tasaisemman kuivumistuloksen, mikäli ilma saadaan jaettua tasaisesti niiden välillä. Ilmavirran tasainen jakaminen voi kuitenkin olla haastavaa. Kaappikuivuri on helppo rakentaa, vie vähemmän tilaa ja sopii hyvin pientuotantoon. Lavakuivurin tapaan kaappikuivuri on panostyyppinen, mikä voi aiheuttaa viivettä tuotantoketjussa. Jatkuvatoiminen kuivurista saadaan, kun kuivaustasot asetetaan rullakkoon, jotka työnnetään kuivauskammion tai tunnelin läpi.



Kuva 7. Kroatialaisen Herbas d.o.o.:n rullakkokuivuri, jossa tuotteet asetetaan rullakoiden hyllyille. Lämpimän ilman puhallus sivulta. Poistoilman kierrätys takaisin kuivuriin käynnistyy, kun poistoilman suhteellinen kosteus on laskenut riittävän alas. Kuva: Herbas d.o.o.



Kuva 8. Orakas Tuotteet Oy:n Iso Orakas, jossa lämmin ilma puhalletaan alhaalta ylös hyllyjen läpi. 6 kW lämpöteho ja kuivauspinta-ala noin 6 m². Kuva: Orakas Tuotteet Oy.

2.1.4 Leijupetikuivuri

Leijupetikuivurissa kuivaukseen käytettävä kaasu puhalletaan tuotteen läpi suurella nopeudella, jolloin tuote saadaan käyttäytymään fluidin tavoin. Menetelmää käytetään maataloudessa pääasiassa rakeisten materiaalien, kuten riisin ja siementen kuivauksessa. Leijutus lisää tuotteen ja kuivauksessa käytettävän väliaineen kosketuspinta-alaa, mikä nostaa prosessin lämpöhyötysuhdetta ja kuivumisnopeutta. Leijupetikuivuri täytyy suunnitella erikseen kullekin tuotteelle, eikä se sovi tuotteille, jotka ovat erityisen kosteita tai tahmeita. [8.]

2.2 Säteilykuivaus

Aurinkokuivaus on säteilykuivausmenetelmä, joka on ollut käytössä muinaisista ajoista saakka. Nykyään osataan käyttää hyödyksi myös muuta säteilyä kuten mikroaaltoja ja infrapunaa, mutta aurinkokuivausta käytetään yhä useiden tuotteiden kuten tomaattien kuivauksessa.



Kuva 9. Venäläisen Promsushka-yrityksen infrapunakuivuri, jossa kuivaushyllyjä 22 kpl. Valmistajan mukaan kuivuri pystyy kuivaamaan 1500 kg päivässä 48 kW teholla. Kuva: Promsushka.

2.2.1 Aurinkokuivaus

Tuote asetetaan ulos laakealle tasolle suoraan auringonpaisteeseen. Usein kuivaustaso voi olla esimerkiksi betonilattia. Kuivattava kerros on ohut ja sitä käännellään useasti kuivumisen aikana, jotta vältetään kosteuspesäkkeiden syntymiseltä. Auringon säteily lämmittää tuotetta ja haihduttaa vettä. Kuivauksessa ei käytetä puhallinta, vaan kostea ilma poistuu luonnollisen konvektion ja tuulen avulla. Konvektio syntyy, kun auringon lähimpänä tuotetta oleva ilma lämpenee ja sen tiheys pienenee. Lämmennyt ilma nousee ylös ja tilalle virtaa tuoretta ilmaa. [9].

Aurinkokuivaus on halpa menetelmä, mutta tuotteen laadun varmistaminen vaikeaa. Auringosta tulevan säteilyn intensiteetti, tuulennopeus ja ilmankosteus eivät ole kontrolloitavissa, joten kuivausolosuhteisiin ei voida vaikuttaa. Monesti tuotteen oma entsyymitoiminta halutaan saada kuivauksessa loppumaan mahdollisimman nopeasti, ja siihen ei hidas aurinkokuivaus sovellu. Pohjoisen Euroopan olosuhteissa aurinkokuivaus onnistuu harvoin, sillä auringonvalon intensiteetti on täällä matala ja ilman suhteellinen kosteus usein korkea. Poikkeuksena mainittakoon kuivalihan valmistus aurinkokuivaamalla. Suolatut lihapalat sijoitetaan kevättalvella roikkumaan aurinkoiselle seinustalle. Kevättalvella ilma on tyypillisesti kuivaa ja aurinkoista.

Moni kuivaaja hyödyntää konvektiokuivauksessa aurinkoa kuivausilman lämmönlähteenä. Ilma lämmitetään esimerkiksi puhaltamalla tummaksi maalatun kanavan kautta tai sitä lämmitetään aurinkokeräimen avulla. Aurinkokeräimessä lämpö saadaan siirrettyä sisäänpuhallettavaan ilmaan lämmönsiirtimen avulla. Tällä esilämmityksellä voidaan merkittävästi vähentää sähkön tai polttoaineen kulutusta lämmityksessä.



Kuva 10. Aurinkokeräimet sisään puhallettavan ilman lämmityksessä. Kuva: Markku Koistinen, RAMK Katehanke.

2.2.2 Mikroaaltokuivaus

Mikroaallot saavat kaksinapaiset molekyylit (kuten vesi) liikkumaan, jolloin vain tuotteessa oleva kosteus lämpenee ja kosteus siirtyy nopeammin kasvin pintaan [10]. Jotta lämpötila ei nousisi liian korkeaksi, käytetään yleensä samalla konvektiokuivausta. Mikroaaltojen käyttö on taloudellisinta hidastuneen kuivumisen aikana, jolloin konvektiokuivauksen kuivausteho on alhainen [1]. Sen käytön on todettu sekä nopeuttavan kuivumista että vähentävän energiankulutusta verrattuna pelkän konvektiokuiva. Veden lisäksi myös kasveissa olevat öljyt voivat olla kaksinapaisia, jolloin nekin haihtuvat mikroaaltokuivauksen yhteydessä [10]. Tämä voi heikentää joidenkin tuotteiden laatua, mutta esimerkiksi oreganon öljyt säilyvät parhaiten, kun käytetään mikroaaltojen ja vakuumikuivurin yhdistelmää [11]. Tuotteen väriin mikroaallot eivät vaikuta [12].

2.3 Tyhjiö- eli vakuumikuivaus

Tyhjiökuivaus toimii sellaisenaan tai se voidaan yhdistää säteily- ja konvektiokuivaukseen. Tyhjiö on myös olennainen osa pakkaskuivausta. Kuivaus tyhjiössä vaatii vähemmän lämpöenergiaa, koska matalassa paineessa neste haihtuu helpommin. Tyhjiökuivurissa voidaan käyttää matalampaa lämpötilaa ja myös happipitoisuus on matala, minkä ansiosta tuotteen väri ja arvoaineet kestävät paremmin kuivausta. Tyhjiökuivauksen käyttökustannukset ovat kuitenkin melko korkeat, joten rahallinen hyöty voi jäädä pieneksi. [13]

2.3.1 Pakkaskuivaus

Pakkaskuivausta pidetään yhtenä parhaista menetelmistä tuottaa korkeatasoisia kuivatuotteita [10], mutta maataloustuotteille sitä käytetään toistaiseksi pääosin laboratoriotarkoituksissa. Kosteus poistuu tuotteesta sublimoitumalla, mikä tarkoittaa aineen olomuodon muutosta suoraan kiinteästä höyryksi ilman nestemäistä välivaihetta [3]. Vesi voi sublimoitua jos osapaine on alle 611 Pa ja lämpötila on 0,01 C°, eli niin sanotussa kolmoispisteessä. Pakkaskuivauksessa tuote jäädytetään, paine lasketaan alle kolmoispisteen ja lisätään sublimaation vaatima lämpö. Pakastekuivattujen tuotteiden palautuvuus on huomattavasti korkeampi kuin ilmakeivattujen, joten ne sopivat hyvin valmisaterioiden valmistukseen. Merkittävin haittapuoli pakkaskuivaukselle laitteiston korkea hinta ja käyttökustannukset. [14]

2.4 Energiatehokkuuden parantaminen

2.4.1 Ilman kierrätys

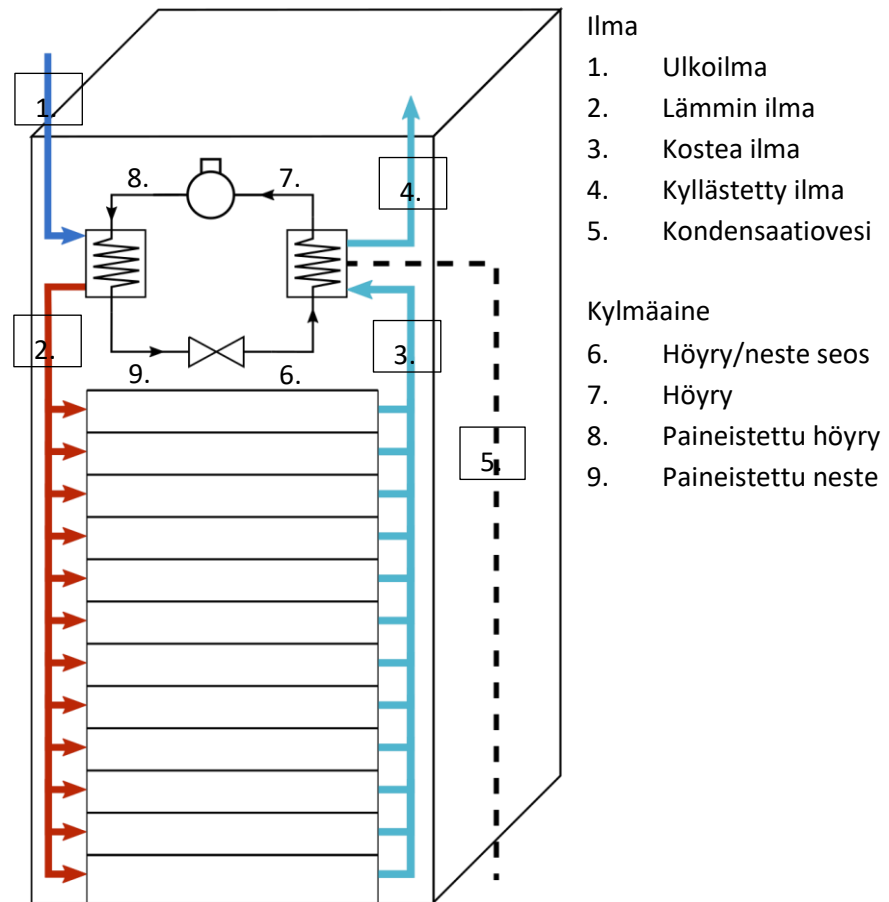
Kun kuivaus saavuttaa kuvassa 1 esitetyn hidastuvan kuivumisen vaiheen, poistoilman kosteuspitoisuus alkaa laskea ja lämpötila nousta. Kuivausilman mukana poistuu lämpöä, joka olisi vielä käytettävissä kuivaukseen. Hukkalämmön syntyä voidaan ehkäistä sekoittamalla osa poistoilmasta tuoreeseen ilmaan ja kierrättämällä se takaisin kuivuriin. Sekoitettun ilman lämmitys vaatii vähemmän lämmitystehoa kuin pelkästään tuoreen ilman lämmitys. Kierrätys kuitenkin pidentää kuivumisaikaa koska kuivausilman korkeampi kosteuspitoisuus hidastaa kuivumista. Väärin toteutetulla ilman kierrätyksellä voidaan säästöjen sijaan lisätä kuivurin energiankulutusta, jos kuivausaika venyy liian pitkäksi. Kuivauksen tarkkaan ohjaamiseen tarvitaan mittaustiedot tulo- ja poistoilmojen lämpötilasta ja kosteuspitoisuudesta. Arvojen perusteella määritetään hetkellinen kuivaussuhde eli kuinka paljon nestettä poistuu suhteessa siihen kuinka paljon nestettä voisi kuivausilmaan enimmillään sitoutua. Kierrätys voidaan aloittaa, kun suhdeluku laskee arvon 0,6 alle, minkä jälkeen kierrätyksen määrää lisätään portaittain kuivumisen loppuun saakka. Tällainen ohjaus vaatii kuitenkin automaation suunnittelua. Jos kosteusmittaus tai kierrätyksen automatisointi ei ole mahdollista, voidaan kuivumisen etenemistä arvioida pelkkien lämpötilatietojen perusteella. Mitä suurempi lämpötilaero tulo- ja poistoilman välillä on, sitä nopeammin kuivuminen tapahtuu. Kuivumisen hidastuessa lämpötilaero kapenee. Olennaista on, että kierrätystä ei aloiteta tasaisen kuivumisen vaiheessa, vaan vasta kun kuivuminen on alkanut hidastua.

2.4.2 Lämpöpumput

Lämpöpumpun toiminta perustuu aineen höyrystymisen vaatimaan suureen lämpö määrään ja sen vapautumiseen kondensoitumisessa. Sen avulla saadaan siirrettyä lämpöenergiaa kylmemmästä aineesta lämpimämpään erilaisten kylmäaineiden välityksellä. Tutkimusten [16] mukaan lämpöpumpulla voidaan vähentää kuivauksen energiankulutusta 20-40% verrattuna sähkövastuksella lämmittämiseen. Lisäksi lämpöpumpuilla saadaan laskettua kuivausilman kosteuspitoisuutta.

Kylmäaine saadaan höyrystymään matalammassa lämpötilassa alentamalla sen painetta. Höyrystyessä aine ottaa lämpöä ympäristöstä, mutta sen lämpötila ei nouse. Tätä puolta lämpöpumpusta voidaan käyttää esimerkiksi jääkaapin viilentämiseen. Kun höyrystyneen kylmäaineen painetta nostetaan, sen kiehumispiste nousee ja aine kondensoituu nesteeksi. Samalla vapautuu höyrystymisessä aineeseen sitoutunutta lämpöä ja nesteen lämpötila nousee. Vapautunut lämpö voidaan hyödyntää lämmityksessä.

Lämpöpumppu koostuu siis neljästä osasta: kahdesta lämmönsiirtimestä (höyrystin ja lauhdutin) sekä kompressorista ja kuristimesta. Höyrystin asennetaan kylmälle ja lauhdutin lämpimälle puolelle. Kylmäaineen kierto on esitetty kuvassa 10 pisteiden 6 – 9 välillä. Höyrystin (6->7) ottaa lämpöenergiaa ympäristöstä kylmäaineen höyrystämiseksi. Höyrystynyt kylmäaine pumpataan kompressorilla (7->8) korkeampaan paineeseen ja se kondensoituu lauhduttimella (8->9). Lauhdutin luovuttaa lämpöä ympäristöön. Kuristimella (9->6) kylmäaineen paine lasketaan takaisin höyrystimen paineeseen ja kierto alkaa alusta.



Kuva 11. Kondenssikuivain

Kuvassa pisteet 1 – 5 esittävät prosessissa käytetyn ilman kulun ja lämpöpumpun hyödyntämisen kondenssikuivurissa. Kondenssikuivaimessa poistoilmasta pumpataan lämpöä kuivurin tulopuolelle, mikä vähentää lämmitykseen tarvittavan energian määrää. Ulkoilma lämmitetään lauhduttimella (1->2) ja puhalletaan kuivaustilan läpi (2->3). Ilman lämpötila laskee ja kosteuspitoisuus kasvaa. Höyrystimellä (3->4) ilmassa jäljellä oleva lämpö otetaan talteen kylmäaineeseen, jolloin ilman lämpötila laskee edelleen. Lämpötilan laskiessa suhteellinen kosteuspitoisuus kasvaa saturaatiopisteeseen ja ylimääräinen kosteus poistuu kondensiovetenä (5), joka ohjataan ulos kuivurista. Samalla ilma kuivuu eli sen absoluuttinen kosteuspitoisuus laskee, mikä parantaa poistoilman käytettävyyttä esimerkiksi ilman kierrätyksessä.



Kuvat 11. ja 12. Lämpöpumpputekniikkaa hyödyntävät kondenssikuvaimet. Vasemmalla VegeDryer 100 (Kuva: Consult Finland Oy), ja oikealla Harter H01 compact (Kuva: Harter GmbH).

2.4.3 Lämmittämättömällä ilmalla esikuivaus

Kasvimateriaalin itselämpenemisen aiheuttamaa laadun heikkenemistä voidaan ehkäistä kuivattamalla materiaalia lämmittämättömällä ulkoilmalla heti korjuun jälkeen. Tämä lämmittämättömän ilman puhallus kasvimateriaali läpi alentaa kuivattavan materiaalin lämpötilaa, jos se pystyy haihduttamaan materiaalista kosteutta. Tämä esikuivaus voi parhaassa tapauksissa vähentää koko kuivausprosessin energiankulutusta. Esikuivauksen kannattavuus ja energiansäästö riippuvat kuitenkin paljon ulkoilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta sekä puhallettavan ilmavirran määrästä.

3 Yhteenveto

Kaikilla kuivurityypeillä on etunsa ja sopivimman kuivurin valinta tehdään tapauskohtaisesti. Jos kuivausmäärät ovat pieniä ja/tai kuivausta tehdään vain osan aikaa vuodesta, voi laitteiston hinta tulla nopeasti vastaan. Kun kalliimmat vaihtoehdot jätetään pois, jää arktisen ja pohjoisen alueen pientuottajalle käytännössä kaksi vaihtoehtoa: kaappi- tai lavakuivuri. Kolmas edullinen vaihtoehto, eli aurinkokuivaus on riskialtista pohjoisilla alueilla. Jos kuivauserät ovat pieniä, ja tuotteen sadonkorjuu voi kestää pitemmän ajanjakson, kaappikuivaus on suositeltava ratkaisu. Iso lavakuivuri on paras vaihtoehto, jos tuotteen sato täytyy laatuominaisuuksien säilymisen takia saada kuivattua lyhyen aikajakson aikana.

Kaappikuivuri on hyvä vaihtoehto, jos halutaan säästää tilaa, mutta vaatii täyttövaiheessa enemmän käsityötä kuin lavakuivurin täyttö. Työn määrä käyttövaiheessa vähenee, jos ilma puhalletaan

kuivaustasoille tasaisesti sivuilta eikä suoraan alhaalta. Lavakuivuri voidaan mitoittaa suuremmille materiaalierille, mutta niissä kuivausaika on yleensä pitempi.

Ilman kierrätyksellä ja lämpöpumpuilla voidaan parantaa kuivurin energiatehokkuutta. Ilman kierrätys on halvempi ratkaisu, mutta vaatii enemmän ohjausta. Lämpöpumppu on toiminnaltaan varmempi ja sillä voidaan säästää energiaa koko kuivauksen ajan. Korkeamman hinnan takia kannattaa kuitenkin varmistaa, että takaisinmaksuaika muodostuu kohtuulliseksi. Mitä enemmän kuivuri on käynnissä, sitä nopeammin lämpöpumppu maksaa itsensä takaisin. Suurin energiansäästö saadaan yhdistämällä tekniikat ilmankierrätyksellä varustelluksi kondenssikuivaimeksi. Tällöin myös ilman kuivuminen lämpöpumpussa tulee hyödynnetyksi.

4 Läheteet

- [1] H. Albert och J. Müller, "Drying of medicinal plants," i *Medicinal and Aromatic Plants*, Stuttgart, Springer, 2006, pp. 237-252.
- [2] O. V. Ekechukwu, "Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory," *Energy Conversion and Management*, vol. 40, nr 6, pp. 593-613, 1999.
- [3] Y. Cengel, *Thermodynamics: An engineering approach*, 7th ed, New York: McGraw-Hill, 2011.
- [4] Engineering ToolBox, "Mollier Diagram," 2003. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/psychrometric-chart-mollier-d_27.html. [Använd 04 12 2019].
- [5] J.-O. Anderson och L. Westerlund, "Improved energy efficiency in sawmill drying system," *Applied Energy*, vol. 113, pp. 891-901, 2014.
- [6] N. V. Hung, R. Martinez, T. V. Tuan och M. Gummert, "Development and verification of a simulation model for paddy drying with different flatbed dryers," *Plant Production Science*, vol. 22, nr 1, pp. 119-130, 2019.
- [7] M. Gummert, "Rice Knowledge Bank," IRRI, 20010. [Online]. Available: <http://www.knowledgebank.irri.org/training/fact-sheets/postharvest-management/dryingfact-sheet-category/item/fixed-bed-batch-dryer-fact-sheet>. [Använd 04 12 2019].
- [8] N. S. Haron, "Recent advances in fluidized bed drying," i *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017.
- [9] V. Belessiotis och E. Delyannis, "Solar Drying," *Solar Energy*, vol. 85, nr 8, pp. 1665-1691, 2011.
- [10] A. G. Heindl och J. Müller, "Microwave drying of medicinal and aromatic plants," *Stewart Postharvest Review*, 2007.
- [11] A. Figel, A. Szumnyb, A. Gutiérrez-Ortizac och Á. A. Carbonell-Barrachina, "Composition of oregano essential oil (*Origanum vulgare*) as affected by drying method," *Journal of Food Engineering*, vol. 98, nr 2, pp. 240-247, 2010.
- [12] S. N. Karaaslan och I. K. Tunçer, "Development of a drying model for combined microwave–fanassisted convection drying of spinach," *Biosystems Engineering*, vol. 100, nr 1, pp. 44-52, 2008.
- [13] I. Alibas, "Microwave, Vacuum, and Air Drying Characteristics of Collard Leaves," *Drying Technology*, vol. 27, nr 11, pp. 1266-1273, 2009.
- [14] X. Duan och M. Zhang, "Trends in Microwave-Assisted Freeze Drying of Foods," *Drying Technology*, vol. 28, nr 4, pp. 444-453, 2010.
- [15] T. Ziegler, H. Jubaer och M. Schutz, "Increasing the Energy Efficiency of Batch-Type Drying with Partial Air Recirculation," *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 88, nr 1-2, 2015.

- [16] V. R. Sagar och P. Suresh Kumar, "Recent advances in drying and dehydration of fruits and," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 41, nr 1, pp. 15-26, 2010.
- [17] T. Ziegler, H. Jubaer och J. Mellman, "Simulation of a Heat Pump Dryer for Medicinal Plants," *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 85, nr 3, pp. 353-363, 2013.