

Teemu Huotari

ILMAN KIERÄTYS KONVEKTIIVISESSA KUIVAUKSESSA

ILMAN KIERRÄTYS KONVEKTIIVISESSA KUIVAUKSESSA

Teemu Huotari
Opinnäytetyö
Kevät 2020
Energiatekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä(t): Teemu Huotari

Opinnäytetyön nimi: Ilmankierrätys konvektiivisessa kuivauksessa

Työn ohjaaja: Timo Kiviahde

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi:
Kevät 2020

Sivumäärä: sivut + liitteet
(esim. 26 + 1)

Kuivaus eli kosteuden poistaminen vaatii paljon energiaa ja voi kattaa jopa 70 % tuotteen energiankulutuksesta. Konvektiokuivauksessa poistoilman mukana menetetään runsaasti lämpöä, joka olisi ollut hyödynnettävissä haihdutukseen. Kuivauksen edetessä haihtuminen hidastuu, hukkalämmön määrä kasvaa ja kuivauksen hyötysuhde heikkenee. Osa lämmöstä voidaan hyödyntää kiertämällä poistoilmaa takaisin kuivuriin. Tällöin kuivauksen hetkellinen energiankulutus laskee, mutta samalla myös kuivausaika pitenee. Pidentynyt kuivausaika voi puolestaan lisätä kokonaisenergiankulutusta.

Opinnäytetyön tavoitteena oli kerätä tietoa konvektiokuivauksen energiankulutukseen vaikuttavista tekijöistä ja ilman kierrätyksen optimaalisesta käytöstä. Energiansäästön kannalta kierrätys voidaan aloittaa 30 %:n sekoitussuhteella, kun kuivaussuhde on 0,5, ja sitä voidaan lisätä kuivauksen edetessä aina 90 %:iin asti. Kuivaussuhteen määrittämistä varten täytyy tietää tulo- ja poistoilman lämpötila ja kosteuspitoisuus.

Ilman kierrätystä kokeiltiin myös käytännössä. Tehdasvalmisteiseen kaappikuivuriin rakennettiin ilmastointiputkiosista järjestelmä, jolla saatiin kierrätettyä noin 60 % poistoilmasta. Kuivurilla tehtiin kuivauskokeita ennen muokkauksia ja niiden jälkeen. Kun kierrätys aloitettiin kuivausjakson puolivälissä, saavutettiin 20 %:n säästö kuivauksen kokonaisenergiankulutuksessa.

Kokeet toteutettiin osana More Natural Product Business by Enhanced Quality and Energy Efficiency of Drying -hanketta ja opinnäytetyön toimeksiantajana toimi hankkeen projektipäällikkö Jaana Väisänen.

Opinnäytetyötä voidaan käyttää apuna kuivurin tehokkuuden arvioinnissa ja ilmankierrätyksen suunnittelussa. Kierrätyksen ohjaaminen manuaalisesti on työlästä, joten jatkoselvityksiä ilmankierrätyksen automatisoinnin teknisestä toteuttamisesta tarvitaan.

Asiasanat: kuivurit, kuivaus, konvektiokuivaus, ilman kierrätys, energiatehokkuus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Energy technology

Author(s): Teemu Huotari

Title of thesis: Recirculation of air in convective drying

Supervisor(s): Timo Kiviahde

Term and year when the thesis was submitted:

Spring 2020

Number of pages: 26+1

Drying of plant material is energy-intensive process due to high latent heat of evaporation. Heat losses during drying and excess heat in outlet air decrease the thermal efficiency, which can become as low as 25 %. In agriculture up to 70 % of energy used for the manufacturing of a product can be caused by drying.

Aim of the thesis was to collect information about the process of convective drying, important parameters affecting the energy consumption and effects and optimization of air recirculation in the process. Experiments were carried out with a small-scale cabinet-dryer in which an air recirculation unit was constructed.

As a drying process progresses, instantaneous efficiency decreases increasing the specific energy consumption per kg of moisture removed increases. This is highly due to increase in the excess heat in the outlet air. With air recirculation, some of this heat can be recovered to be used to evaporation. While air recirculation increases efficiency it also prolongs the drying time and might increase the total energy consumption. To optimize the energy savings, air recirculation should be started with recycled air ratio of 30 % when the drying efficiency reaches a value of 0,5 increased linearly up to 90 % towards the end of drying. To define the drying efficiency, air temperature and humidity at the inlet and outlet of the dryer must be known.

With recycled air ratio of 60 % during the second half of drying time, 20 % savings in total energy consumption was achieved. Thesis can be used as a reference to evaluate dryer efficiency and planning of air recirculation. However, manual control of recycled air ratio was found challenging and further investigations of technical issues of automatization of air control should be carried out.

Experimental studies were conducted as part of More Natural Product Business by Enhanced Quality and Efficiency of Drying -project and the thesis was mandated by project manager Jaana Väisänen from Oulu University of Applied Sciences.

Keywords: dryers, convective drying, air recirculation, energy efficiency

SISÄLLYS

| | |
|--|----|
| TIIVISTELMÄ | 3 |
| ABSTRACT..... | 4 |
| SISÄLLYS..... | 5 |
| 1 JOHDANTO..... | 6 |
| 2 KUIVAUS..... | 7 |
| 2.1 Konvektiokuivaus | 7 |
| 2.2 Kuivumiseen kuluva energia..... | 9 |
| 3 ILMAN KIERRÄTYS | 14 |
| 3.1 Kuivumisen kolme vaihetta..... | 14 |
| 3.2 Ilmankierron ajoitus ja säätö..... | 14 |
| 4 TUTKITTAVA KUIVURI | 16 |
| 4.1 Alkuperäinen kuivuri | 16 |
| 4.2 Muokkaukset | 17 |
| 5 KUIVAUSKOKEET | 19 |
| 5.1 Koejärjestely..... | 19 |
| 5.2 Tulokset..... | 20 |
| 6 POHDINTA..... | 25 |
| LÄHTEET..... | 26 |
| LIITTEET | 27 |

1 JOHDANTO

Kuivaus on yleinen ja mahdollisesti myös vanhin elintarvikkeiden säilöntämenetelmä. Erilaisista kuivaustavoista selkeästi käytetyin on konvektio -eli ilmakeuhkuivaus, ja usein siitä käytetäänkin kirjallisuudessa termiä perinteinen kuivaus (conventional drying). Teollisuudessa käytettävistä kuivureista 85 % on konvektiokuivureita. Kuivausprosessi vaatii paljon lämpöenergiaa, ja hukkaenergian määrä voi olla melko suuri. Tavallisesti lämpöhyötysuhde on noin 25 - 50 %. Teollisuuden energiankulutuksesta erilaiset kuivausprosessit voivat kattaa jopa 15 %. (Delgado & Lima 2016, 8.)

Kuivausta säilönnässä käyttävillä maataloilla jopa 70 % tuotteen energiankulutuksesta voi aiheutua kuivauksesta (Energiankulutuksia peltoviljelyssä, 2014). On siis selkeää, että kuivauksen energiatehokkuuden parannuksella voidaan saavuttaa niin yksittäiselle viljelijälle kuin yhteiskunnallekin rahoitustaloudellisia säästöjä.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ilmankierrätyksen vaikutusta kuivausprosessiin ja sen energiankulutukseen. Kirjallisuudesta haettiin tietoa kuivausprosessin vaiheista sekä ilmankierrätyksen optimaalisesta ohjauksesta. Käytännön kokemuksen kartuttamiseksi ilmankierrätyksen toteuttamisesta ja oikeanlaisesta käytöstä rakennettiin tehdasvalmisteiseen pieneen kokoluokan kaappikuivuriin kierrätysjärjestelmä, jonka toimivuutta arvioitiin kuivatuskokeilla.

Tutkimukset toteutettiin osana More Natural Product Business by Enhanced Quality and Energy Efficiency of Drying -hanketta, ja opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Oulun ammattikorkeakoulun osalta hankkeen projektipäällikkö Jaana Väisänen.

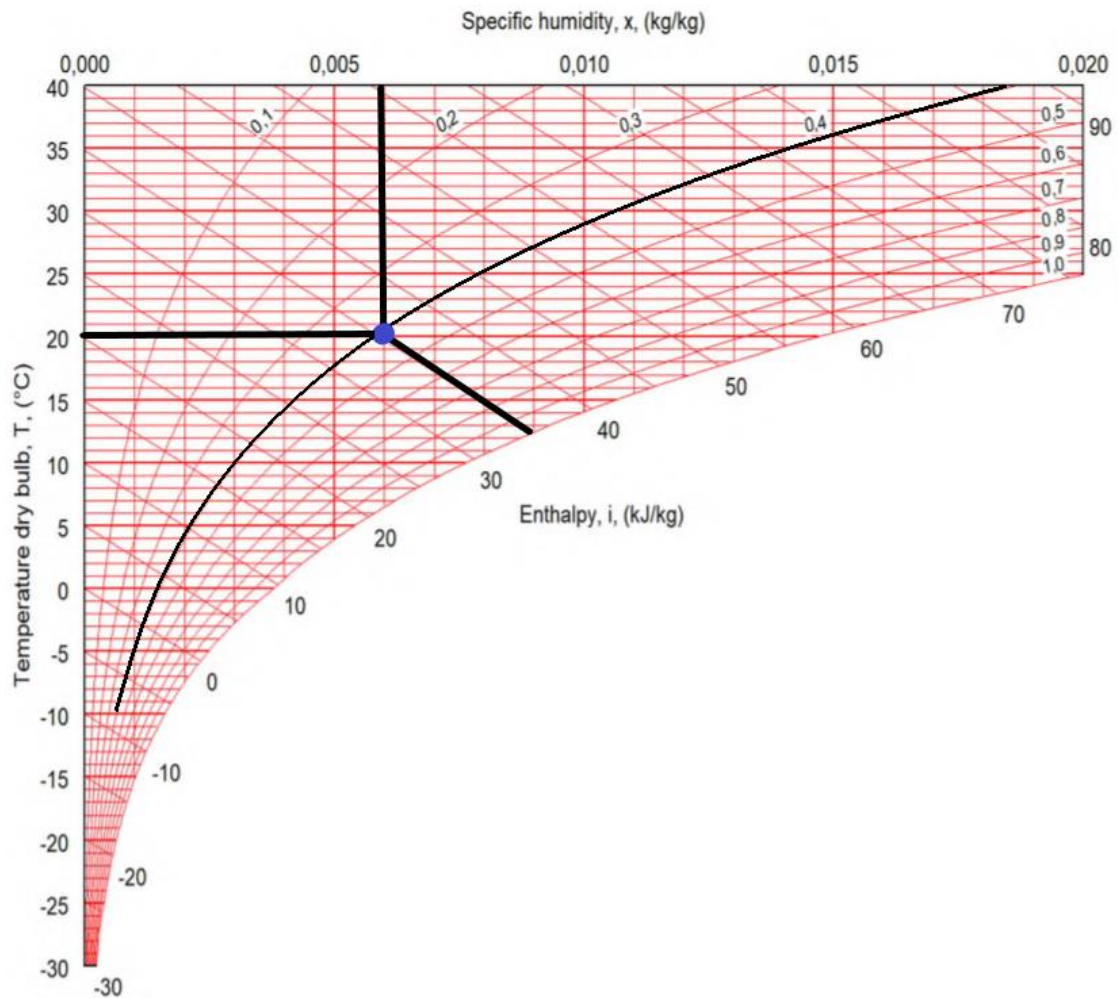
2 KUIVAUS

2.1 Konvektiokuivaus

Kuivaus on kosteuden poistamista kuivatettavasta materiaalista. Konvektioon perustuvassa ilma-kuivauksessa tapahtuu kosteuden- ja lämmönsiirtoa materiaalin ja ilman välillä. Kuivatettavan materiaalin läpi puhalletaan ilmaa, joka kuivaamisen nopeuttamiseksi ja tuotteen laadun parantamiseksi yleensä lämmitetään. Lämmönlähteenä voidaan käyttää esimerkiksi sähkövastuksia, lämpöpumppuja tai puu- tai öljykattilaa. Kuivatusilman mukana tuleva lämpö siirtyy kasvimateriaaliin nopeuttaen kosteuden poistumista. Haihtunut kosteus siirtyy kuivatusilman mukana pois kuivaus-tilasta.

Ilman ominaisuuksista oleellisia kuivausprosessin määrittelyssä ovat lämpötila (T), ominaisentalpia (h) ja kosteuspitoisuus (RH). Ominaisentalpia tarkoittaa lämpösisältöä, ja se ilmaisee energian ilman painoyksikköä kohden, kJ/kg . Kosteuspitoisuus voidaan ilmaista joko absoluuttisena tai suhteellisenä kosteutena. Absoluuttinen kosteus on vesihöyryn määrä kuivan ilman painoyksikköä kohden, kg/kg . Suhteellinen kosteuspitoisuus puolestaan ilmaisee ilmaan sitoutuneen vesihöyryn määrän suhteessa samassa lämpötilassa olevan kylläisen ilman vesihöyryn määrään. Suhteellinen kosteuspitoisuus ilmaistaan joko desimaalilukuna tai prosentteina. Mainittujen suureiden lisäksi ilman ominaisuuksiin vaikuttaa ilman paine. Konvektiokuivauksessa paineenvaihtelu on kuitenkin niin vähäistä, että voidaan riittävällä tarkkuudella käyttää vakioilmanpainetta $101,3 \text{ kPa}$.

Mollier-diagrammi (liite 1) kuvaa ilman lämpötilan, entalpian ja kosteuspitoisuuden suhdetta vakio-paineessa. Diagrammin avulla voidaan havainnollistaa kuivausprosessin kulkua ja kuivatusilman ominaisuuksia. Jos esimerkiksi tiedetään, että ilman lämpötila on $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhteellinen kosteuspi-toisuus $0,4$ (40%), voidaan entalpia ja absoluuttinen kosteus lukea diagrammista kuvion 1 mukaisesti.



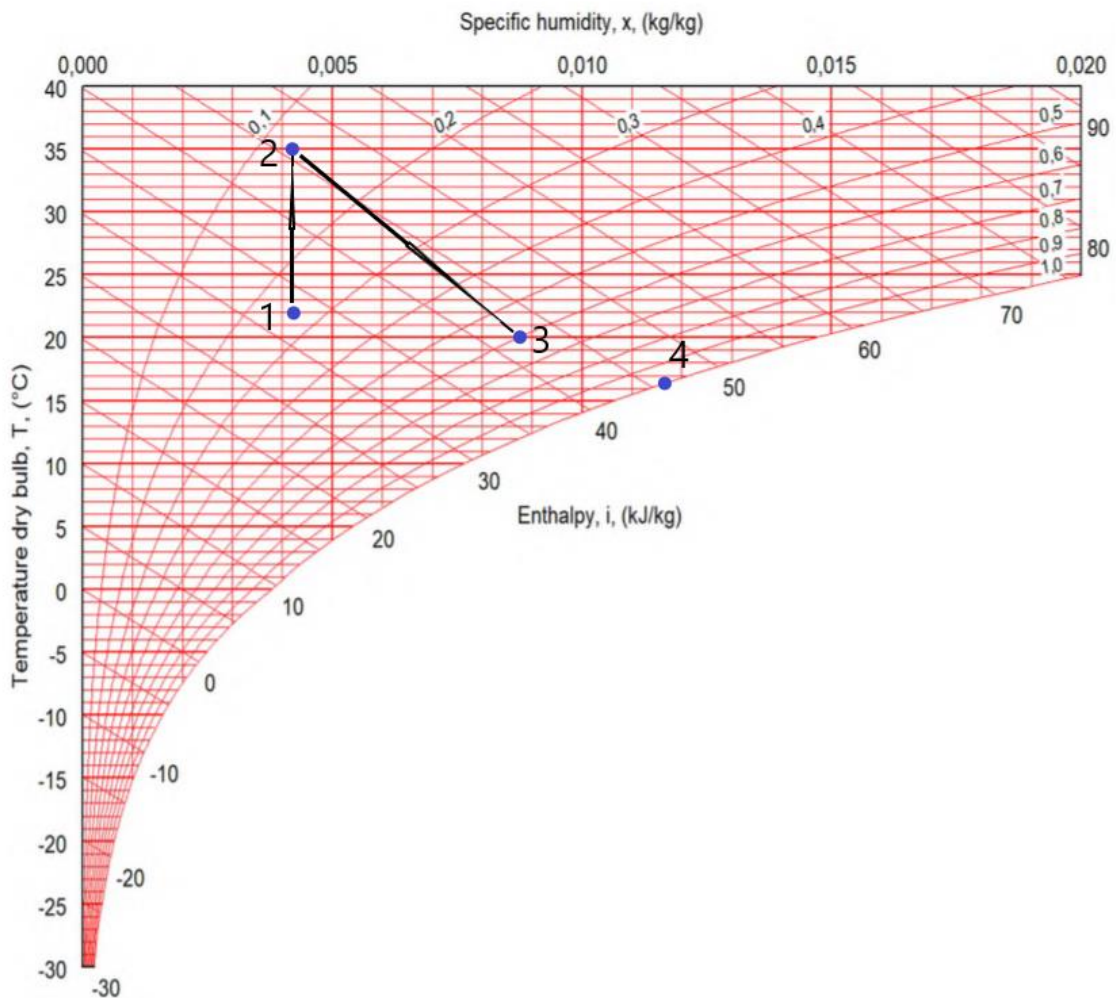
KUVIO 1 Mollier-diagrammin lukuohje

Diagrammiin merkitty piste on sijoitettu kohtaan, jossa 20 $^{\circ}\text{C}$:n lämpötiläkäyrä ja 0,4 suhteellisen kosteuspitoisuuden käyrä leikkaavat toisensa. Absoluuttinen kosteus $X = 0,006$ kg/kg luetaan x-akselilta kohtisuoraan valitun pisteen yläpuolelta. Entalpian arvo $h = 35$ kJ/kg luetaan diagrammissa viistottain kulkevilta viivoilta.

2.2 Kuivumiseen kuluva energia

Energiamäärä, joka veden haihduttamiseen tarvitaan, riippuu vallitsevasta paineesta ja veden lämpötilasta. Yrttien kuivauksessa käytetyissä lämpötiloissa ja normaali-ilmanpaineessa veden haihtumislämpö on noin 2400 kJ/kg. Tämä on siis se energiamäärä, joka kuluu yhden vesikilogramman haihduttamiseen, mikäli vesi on vapaassa muodossa.

Käytännössä energiaa kuluu kuitenkin enemmän. Prosessissa on aina lämpöhäviöitä, ja osa hyödynnettävissä olevasta lämmöstä hukataan poistoilman mukana. Häviöitä voidaan havainnollistaa Mollier-diagrammin avulla. Kuvion 2 diagrammiin on merkitty 29.7.2019 toteutetun kuivauskokeen kuivausilman ominaisuudet puoli tuntia kokeen käynnistämistä.



KUVIO 2 Mollier-diagrammi kuivauskokeen alusta

Ilman lämmitys tapahtuu pisteiden 1 ja 2 välillä. Pisteiden 2 ja 3 välillä ilma kulkee kuivattavan materiaalin läpi ja sitoo kosteutta. Ilman arvot eri pisteissä esitetään taulukossa 1. Lämmittämättömän ilman (piste 1) ja poistoilman (piste 3) lämpötila ja suhteellinen kosteuspitoisuus sekä lämmitetyn ilman (piste 2) lämpötila ovat mitattuja arvoja. Piste 4 kuvaa poistoilman ominaisuuksia kyllästyspisteessä lämmitetyn ilman ominaisentalpialla. Arvot on listattu taulukkoon 1.

TAULUKKO 1 Kuivausilman arvot eri pisteissä

| Piste | T [°C] | RH [%] | h [kJ/kg] | x [g/kg] |
|-------|--------|--------|-----------|----------|
| 1 | 22,2 | 26,2 | 32,9 | 4,3 |
| 2 | 35,0 | 12,4 | 45,7 | 4,3 |
| 3 | 20,0 | 59,8 | 41,4 | 8,7 |
| 4 | 16,6 | 100,0 | 45,7 | 11,8 |

Pisteiden 1 ja 2 välillä ilma lämmitetään. Ominaisentalpioiden välisestä erosta saadaan selville ilmaan siirtynyt ominaislämpö $\Delta h_{1,2} = 12,8 \text{ kJ/kg}$. Kertomalla tulos ilman massavirralla saadaan lämmitystehoksi noin 240 W. Pisteiden 2 ja 3 välillä absoluuttinen kosteuspitoisuus kasvaa $4,4 \text{ g/kg}_{\text{ilma}}$. Tämä on kuivauksessa ilmaan sitoutunut kosteuden määrä ilmakiloa kohden. Haihdutuksen vaatima ominaislämpö voidaan laskea kertomalla vesimäärä veden haihtumislämmöllä 2400 kJ/kg (Kemp 2014, 5 - 7). Tässä tapauksessa käytetty ominaislämpö on $10,5 \text{ kJ/kg}_{\text{ilma}}$. Kuivauksen lämpöhyötösuhde voidaan määrittellä kaavan (1) mukaan (Giner & de Michelis 1988, 14).

$$\eta_{th} = \frac{\text{haihduttamiseen vaadittava lämpö}}{\text{kuivausilmaan siirretty lämpö}} \quad (1)$$

Lämpöhyötösuhde mittaushetkellä on tämän määritelmän mukaan 0,82.

Kuivauksen tehokkuutta voidaan arvioida myös kuivaussuhteella eli vertaamalla haihdutetun kosteuden määrää siihen määrään, joka ilmaan olisi sitoutunut, jos lämpöä ei hukattaisi ja poistoilma olisi nesteen kyllästämää. Kuivaussuhde määritetään kaavalla (2). (Ziegler 2020, 437.)

$$DE = \frac{x_3 - x_2}{x_4 - x_2} = \frac{\Delta x}{\Delta x_{max}} \quad (2),$$

Missä

x_2 = Tuloilman absoluuttinen kosteuspitoisuus

x_3 = Poistoilman absoluuttinen kosteuspitoisuus

x_4 = Ilman absoluuttinen kosteuspitoisuus saturaatiopisteessä tuloilman entalpialla

Tässä tapauksessa $\Delta x_{\max} = 7,5 \text{ g/kg}_{\text{ilma}}$ ja kuivaussuhteeksi saadaan 0,58. Esitellyt hyötysuhteet perustuvat prosessin hetkellisiin arvoihin eivätkä vielä kuvaa prosessin kokonaishyötysuhdetta. Kuivauksen edetessä haihtuminen hidastuu ja hetkellinen hyötysuhde laskee.

Kuivausprosessien ominaisenergiankulutus saadaan jakamalla kuivaukseen käytetty kokonaisenergia kuivauksessa poistuneen kosteuden määrällä (Ziegler & Jubaer & Schütz 2016, 209). Eri muuttujien vaikutusta kuivatuksen ominaisenergiankulutukseen on tutkittu muun muassa Helwan Yliopistossa Kairossa. Tutkimus toteutettiin ilmapumppua lämmönlähteenä hyödyntävällä kuivurilla ja kolmella eri yrtillä: piparminttu, intianjuutti ja persilja. Tutkitut muuttujat olivat kuivaukseen käytetyn ilman virtausnopeus ja lämpötila sekä kuivattavan kasvin palakoko ja määrä kuivauspinta-alaa kohden. Tutkimuksessa käytettyjen muuttujien vaikutukset energiankulutukseen intianjuutin kuivauksessa on koottu kuvioon 3. (Fatouh & Metwally & Helali & Shedid 2006, 2629 - 2641.)

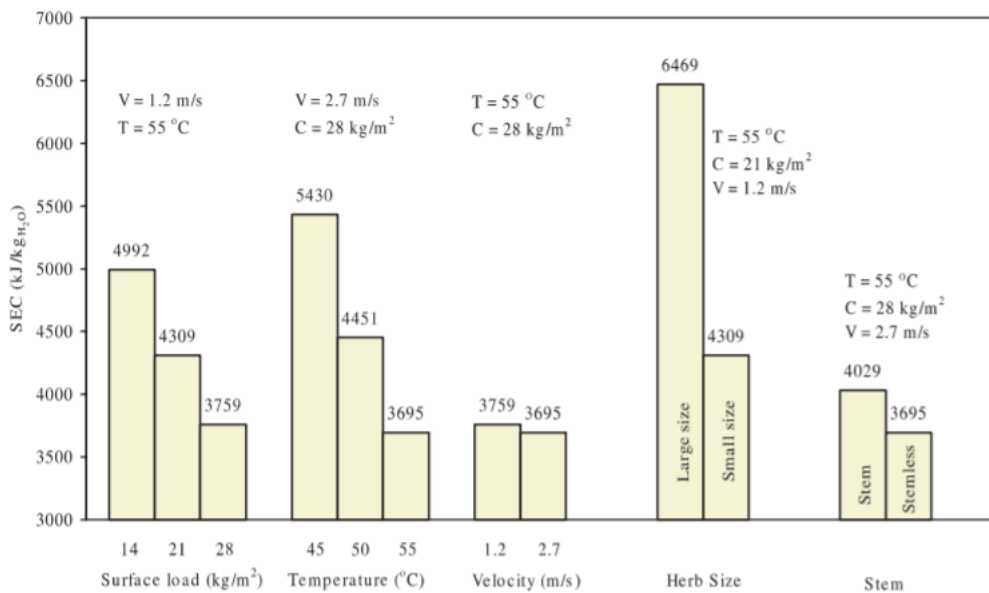


Fig. 14. Effect of drying conditions on the specific energy consumptions (SEC) of Jew's mallow.

KUVIO 3 Kuivausolosuhteiden vaikutus ominaisenergiankulutukseen (Fatouh ym. 2006, 2641)

Näiden tulosten perusteella pienempi palakoko, korkeampi lämpötila ja paksumpi kuivattava kerros vähentävät energiankulutusta eniten, kun taas ilmvirran nopeudella ei ole suurta merkitystä. Kasvimateriaalin ominaisuudet vaikuttivat siten, että olosuhteissa, joissa intianjuutin kuivauksen ominaisenergiankulutus oli 4029 kJ/kg, kului piparmintun kuivaukseen 3982 kJ/kg ja persiljan kuivaukseen 3684 kJ/kg. Lukuja tarkasteltaessa on syytä huomioida, että yrttien kuivauksessa harvemmin

käytetään yli 45 °C:n lämpötilaa, joten yleisemmässä kuivauslämpötilassa ominaiskulutus tutkimuksessa käytetyllä järjestelmällä olisi korkeampi, esimerkiksi intianjuutilla 5430 kJ/kg.

Saksassa on puolestaan kerätty tietoja toiminnassa olevien kuivaamoiden ominaisenergiankulutuksesta lääkeyrttien kuivauksessa. Tutkitut kohteet ovat teollista kokoluokkaa, ja lämmönlähteenä on käytetty polttoöljyä. Vaihteluväliksi ominaisenergiankulutukselle raportoitiin 5000 - 12500 kJ/kg. (Mellmann & Furl 2008, 129 - 130.)

Korkean energiankulutuksen takia kuivaus voi kattaa huomattavan osan lopputuotteen elinkaaren aikana syntyneestä kokonaisenergiankulutuksesta. Helsingin yliopiston Kestävä Tehokkuus -hankkeessa on kerätty tietoja yhdeksän peltoviljelytilan energiankulutuksista vuonna 2013. Tietojen perusteella on arvioitu erikseen viljelyyn ja kuivaukseen käytettyä energiankulutusta tuotettonia kohden. Viljelyyn käytetty kulutus on esitetty taulukossa 2. (Peltoviljelyn energiankulutuksia, 2014.)

TAULUKKO 2 Muu kuin kuivaukseen kulunut energia tiloilla (Energiankulutuksia peltoviljelyssä 2014)

| Kasvintuotanto, ei kuivausta (kWh/tn) | Tila 1 | Tila 2 | Tila 3 | Tila 4 | Tila 5 | Tila 6 | Tila 7 | Tila 8 | Tila 9 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ohra | | 103 | 100 | 100 | 213 | 144 | 117 | 424 | |
| Kaura | 605 | 97 | | 98 | | | 127 | 566 | |
| Vehnä | 401 | 120 | 93 | 115 | 220 | 145 | 110 | | |
| Rypsi ja rapsi | | 203 | 140 | | 977 | | 280 | | |
| Kumina (vain satovuosi) | | | | 230 | | | | | |
| Härkäpapu (siemenet) | | | | | | 259 | | | |
| Sokerijuurikas (ei kuljetuksia) | | | | | | 21 | | | |
| Apilanurmistr. (kuiva-aine)* | | | | | 84 | | 155 | 79 | |
| Herne (rehuksi) | | | | | 342 | | | | |
| *Lannoitus, niittomurskaus, karhotus, korjuu, kuljetus, tiivistys | | | | | | | | | |

Taulukosta 3 selviää kuivaukseen käytetty energiankulutus. Taulukkoja vertaamalla nähdään, että tutkimuksen kohteena olleilla tiloilla kuivaukseen käytetty osuus energiankulutuksesta oli keskimäärin 45 % ja suurimmillaan jopa 70 %. Tilaa, jolla kuivausta ei toteutettu, ei huomioitu näissä laskuissa.

TAULUKKO 3 Kuivaukseen kulunut energia tiloilla (Energiankulutuksia peltoviljelyssä 2014)

| Kuivaus (kWh/tn) | Tila 1 | Tila 2 | Tila 3 | Tila 4 | Tila 5 | Tila 6 | Tila 7 | Tila 8 | Tila 9 |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ohra | | 57 | 223 | 235 | 161 | 226 | 61 | 43 | |
| Kaura | 67 | 80 | | 235 | | | 6 | 49 | |
| Vehnä | 67 | 80 | 218 | 235 | 332 | | 167 | | |
| Rypsi ja rapsi | | 194 | 126 | | | | 58 | | |
| Kumina | | | | 391 | | | | | |
| Härkäpapu (siemenet) | | | | | | 40 | | | |
| Herne (rehuksi) | | | | | 290 | | | | |

3 ILMAN KIERRÄTYS

3.1 Kuivumisen kolme vaihetta

Kosteus on tuoreessa kasvimateriaalissa kahdessa muodossa: vapaana kosteutena kasvin pintakerroksissa sekä sitoutuneena syvemmälle kasvin solurakenteeseen. Vapaa kosteus haihtuu kuivatuksessa ensimmäisenä, kun syvemmälle sitoutunut kosteus poistuu hitaammin ja vaatii siten enemmän energiaa haihtuakseen. Kuivuminen voidaan jakaa kolmeen osaan. Tasaiseen kuivumisen vaiheeseen ja kahteen hidastuvan kuivumisen vaiheeseen.

Tasaisen kuivumisen aikana nestettä poistuu materiaalista vakionopeudella. Vaihe on kestollisesti kuivauksen lyhin, ja sen aikana poistuu nestettä pääosin kasvin pintakerroksista. Mitä lämpimämpää on kuivatusilma, sitä nopeammin saavutetaan kriittinen piste, jossa kuivuminen alkaa hidastua. Ensimmäisessä hidastuvan kuivumisen vaiheessa kasvin pintakerroksissa ei enää ole riittävästi nestettä, jotta kuivuminen voisi tapahtua vakionopeudella. Mitä syvemmältä neste täytyy poistaa, sitä enemmän se vaatii energiaa ja aikaa. Viimeisessä vaiheessa veden siirtyminen kasvipartikkelin pintaan vaikeutuu ja kuivuminen alkaa hidastua entisestään, kunnes lopulta pysähtyy. Veden siirtymistä viimeisessä vaiheessa vaikeuttaa kuivumisen tuloksena tapahtuva kasvin solukkojen sulkeutuminen. (McMinn & Magee 1999, 177 - 180.)

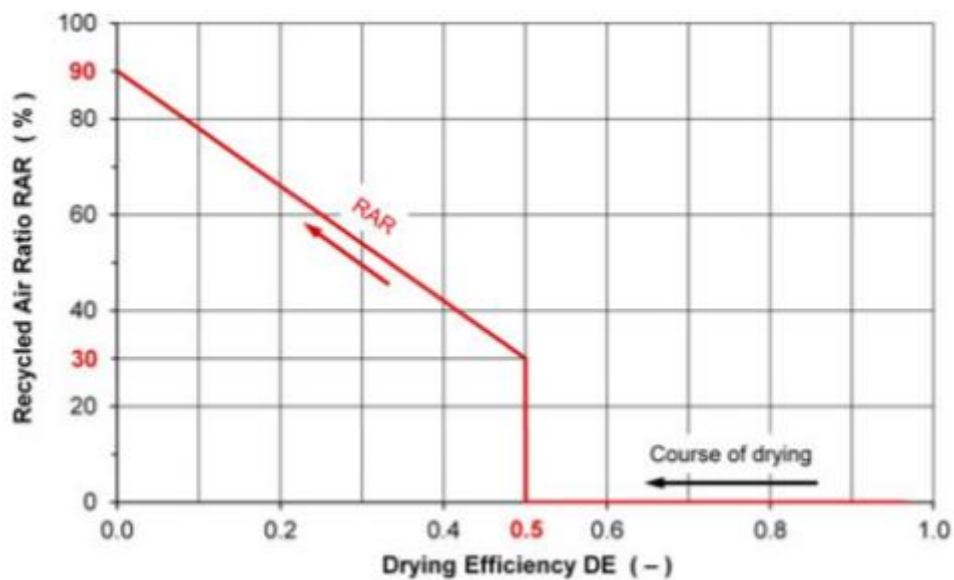
3.2 Ilmankierron ajoitus ja säätö

Kuivumisen hidastuessa ei kuivatusilmaan enää sitoudu niin paljon vettä kuin kuivauksen alussa. Poistoilman kosteuspitoisuus laskee ja lämpötila nousee. Koska ilmassa on vielä tilaa vedelle, voidaan ilmaa kierrättää uudestaan kuivurin läpi. Kun kierrätettävä ilma on lämpimämpää kuin ulkoa tuleva ottoilma, kuluu lämmittämiseen vähemmän energiaa. (Zohrabi & Seiedlou & Aghbashlo Scaar & Mellmann 2020, 523 - 525.)

Mikäli tuloilman tilavuusvirta, lämpötila ja kosteuspitoisuus eivät muutu, alkaa kuivaussuhde DE laskea kuivumisen hidastuessa. Mitä pienemmäksi kuivaussuhde laskee, sitä enemmän käytettävissä olevaa lämpöä hukataan. Periaatteessa koko ilmavirta voidaan kierrättää, kunnes se on nesteen kyllästämää, mutta tällöin kuivausaika pitenee huomattavasti ja voi lisätä energiankulutusta.

Kuivausilman liian korkealla kosteuspitoisuudella on myös heikentävä vaikutus tuotteen laatuun. Ilmankierrätys onkin syytä toteuttaa siten, että vain osa ilmasta kierrätetään ja sekoitetaan se tuoreeseen ilmaan ennen uudelleenlämmitystä. (Zohrabi ym. 2020, 518 - 519; Ziegler 2020, 438.)

Kierrätysilman sekoitussuhde RAR (recycled air ratio) kuvaa kierrätykseen ohjattavan ilman määrää suhteessa kuivausilman kokonaismäärään. 50 %:n sekoitussuhde tarkoittaa siis, että puolet tuloilmasta otetaan kierrätyksestä ja puolet on tuoretta ilmaa. Energiankulutuksen optimoimiseksi suositeltu strategia ilman kierrätyksen ajoittamiseksi on esitetty kuviossa 4. Ilman kierrätys voidaan aloittaa 30 %:n sekoitussuhteella kuivumissuhteen saavuttaessa arvon 0,5. Tämän jälkeen sekoitussuhdetta nostetaan vaiheittaisesti 90 %:iin asti siten, että kuivaussuhde pysyy vakiona. (Ziegler, 2020, 437-438.)



KUVIO 4 Optimaalinen ilmankierrätysuhde kuivaustehokkuuden funktiona (Ziegler, 2020, 438)

4 TUTKITTAVA KUIVURI

4.1 Alkuperäinen kuivuri

PERUS ORAKAS (kuva 1) on Marlemi Oy:n valmistama ja Orakas Tuotteet Oy:n toimittama hyötykasvikuivuri, joka on ominaisuuksiltaan kotitalouskäyttöön soveltuva kaappikuivuri. Kuivurin tekniset tiedot ovat seuraavat (Orakas Tuotteet Oy 2020):

- koko 34*34*69 cm, ulkovaippa teräspeltiä
- kuivatushyllyt 5kpl, alumiinia
- termostaatti n:o 5511
- lämmitysvastus 1100W
- puhallin 30 W.

Kuivuri on avonainen sekä alta että päältä. Puhallin sijaitsee alaosassa, ja ilman kulkusuunta on alhaalta ylöspäin. Puhaltimen ja kuivatustasojen välissä on sähkövastus, jota säätelee termostaatti. Termostaatti sijaitsee niin ikään kaapin alaosassa, ennen kuivaustasojä. Termostaatin toiminta-alue on n. ± 5 °C asetusravosta eli vastus kytkeytyy päälle, kun lämpötila termostaatin kohdalla laskee 5 °C asetusravosta ja kytkeytyy päälle lämpötilan noustessa 5 °C asetusravosta. Kuivatustasojen läpi kuljettuaan ilma poistuu kaapin yläosasta.



KUVA 1 Orakas kaappikuivuri (Orakas Tuotteet Oy 2020)

4.2 Muokkaukset

Ilman kierrätyksen mahdollistamiseksi täytyy poistoilma saada kerättyä talteen ja ohjattua takaisin ottoaukole. Tätä varten asennettiin kuivurin ylä- ja alaosan muuntoyhteet, joiden väliin rakennettiin 160 mm:n ilmastointiputkiosista ja haitariputkesta kuvanmukainen kierrätysjärjestelmä. Muuntoyhteet valmisti mittatilaustyönä Ilmastointi Kotikumpu Oy. Kuvassa 2 ilman kierrätys on kytketty päälle.



KUVA 2 Ilmankierrätysjärjestelmä

Järjestelmän yläosassa oleva t-haara jakaa kuivatusilman poistoon ja kierrätykseen. Kun kierrätys haluttiin käynnistää, haitariputki kytkettiin t-haaraan (oikea puoli). Ilman kierrätystä säädettiin poistopuolelle (vasemmalla) asennetulla säätöpellillä, jolla kuristettiin poistoilmavirtaa. Kuvassa 3 ilman kierrätys ei ole käytössä.



KUVA 3 Ilman kierrätys pois käytöstä

5 KUIVAUSKOKEET

Ilmankierrätysjärjestelmän toimintaa ja sen vaikutusta kuivausprosessiin tutkittiin kuivauskokeilla, jotka toteutettiin Oulun ammattikorkeakoulun LVI-laboratoriossa kesä- ja heinäkuussa 2019.

Kokeissa haluttiin todentaa rakennetun ilmankierrätysjärjestelmän toimivuus sekä tutkia sen vaikutusta kuivurin kokonaisenergiankulutukseen ja ominaisenergiankulutukseen kuivauksen eri vaiheissa.

5.1 Koejärjestely

Kuivattavana materiaalina käytettiin pesusienikurkusta tehtyä Luffa-pesusientä, joka todettiin alustavissa kokeissa nopeaksi kuivata ja kostuttaa. Luffa paloiteltiin noin senttimetrin paksuisiksi paloiksi (kuva 6) ja pienimmät osat pestiin pois liottamalla ja huuhtelemalla. Jokaisessa kokeessa käytettiin samaa materiaalierää. Ennen kokeita huonekosteudessa oleva materiaali punnittiin ja laitettiin veteen likoamaan puolen tunnin ajaksi. Liotuksen jälkeen materiaali puristeltiin, punnittiin ja asetettiin kuivuriin kolmelle kuivaustasolle. Kuivaus käynnistettiin heti punnituksen jälkeen ja sitä jatkettiin neljän tunnin ajan 35 °C:n lämpötila-asetuksella. Muokatussa kuivurissa ilman kierrätys otettiin käyttöön puolessa välissä kuivausta. Kuivauksen aikana materiaali punnittiin aluksi tunnin välein ja viimeisen tunnin aikana kaksi kertaa. Samalla kuivaustasojen järjestystä kuivurissa vaihdettiin kuivumisen tasoittamiseksi.



KUVA 4 Paloiteltua Luffa-pesusientä

Kuivurin sisältä mitattiin lämpötila 6 termoparilla, jotka sijoitettiin kuivaustasojen väleihin sekä ala- ja yläpuolelle. Muokkaamattoman kuivurin tuloilman lämpötila ja kosteuspitoisuus mitattiin huoneilmasta läheltä kuivurin ottosisääntuloaukkoa. Kierrätysilmakokeissa sekä tulo -että poistoilman lämpötila ja kosteuspitoisuus mitattiin kierrätystä varten rakennetuista kanavista. Ilmankierrätyksen aikana mitattiin tuloilman sijaan kierrätettävän ilman arvoja ennen tuoreeseen ilmaan sekoittamista. Kanaviin asennetuilla pitot-putkilla mitattiin tilavuusvirta tulo- ja poistoilmalle.

Mittausvälineet:

- Grant Squirrel 1250, k-tyypin termoparilangat
- VelociCalc 9555P -monitoimimittari
- WSE-energiamittari.

Mittausten perusteella määritettiin energiankulutus haihdutettua vesimäärää kohden [kJ/kg] ja kulutettu kokonaisenergiamäärä [kWh] koko ajalle ja erikseen jokaiselle tunnille. Kierrätyskokeen aikana tehdyistä mittauksista määritettiin myös kuivaussuhde kahden ensimmäisen tunnin ajalta.

5.2 Tulokset

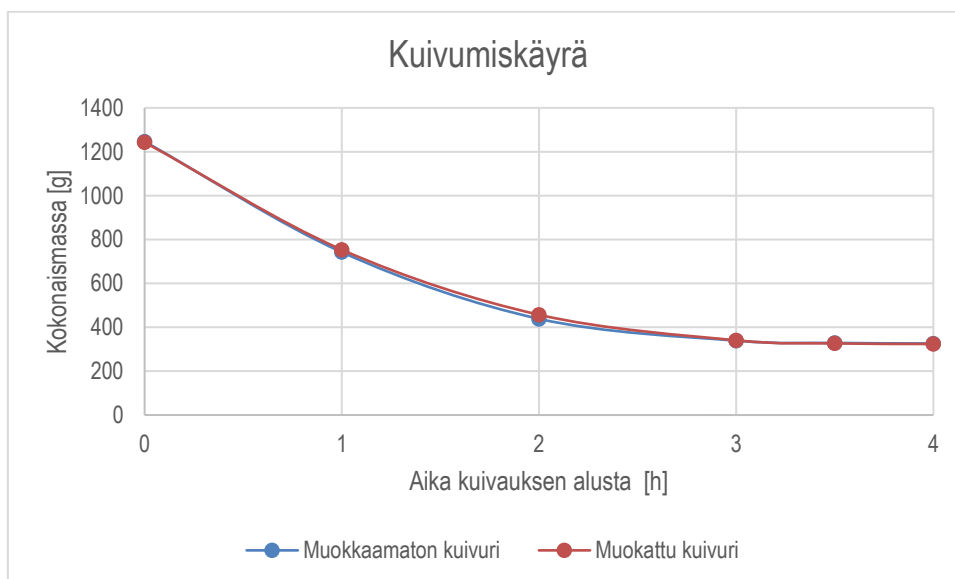
Kuivurin tuloilman lämpötila ja kosteuspitoisuus vaihtelivat koepäivinä, mikä vaikutti energiankulutukseen kokeiden aikana. Imeytyneen nesteen määräkin hieman vaihteli, millä on vaikutusta erityisesti kokonaisenergiankulutukseen. Lopulliseen vertailuun valittiin kaksi koetta, joiden aikana olosuhteet olivat lähimpänä toisiaan ja jotka onnistuivat parhaiten.

Vertailuun valitut kokeet suoritettiin alkuperäisellä kuivurilla 25.6.2019 ja muokatulla kuivurilla 29.7.2019. Kummassakin kokeessa tuloilman keskimääräinen lämpötila oli 22 - 23 °C. Ensimmäisessä kokeessa ilman suhteellinen kosteus oli 30 % ja jälkimmäisessä 26%.

Koska kuivausilman suhteellinen kosteuspitoisuus pysyi ilman kierrätyksen päällä ollessakin alle 50 %:ssa ja kuivattava erä oli pieni, ilmankierrätyksen ei tässä tapauksessa havaittu pidentävän kuivumisaikaa merkittävästi. Neljän tunnin kuivatusajalla saatiin poistettua sama määrä nestettä kummassakin kokeessa. Punnitustulokset on esitetty taulukossa 4 sekä kuviossa 5.

TAULUKKO 3 Kasteltun luffan kokonaismassa kokeiden aikana

| Kuivumisaika [h] | Kokonaismassa [g] | |
|------------------|----------------------|------------------|
| | Alkuperäinen kuivuri | Muokattu kuivuri |
| 0 | 1246,5 | 1243,2 |
| 1 | 742,5 | 753,4 |
| 2 | 438,5 | 457,0 |
| 3 | 339,0 | 340,7 |
| 3,5 | 328,7 | 326,5 |
| 4 | 326,1 | 323,8 |



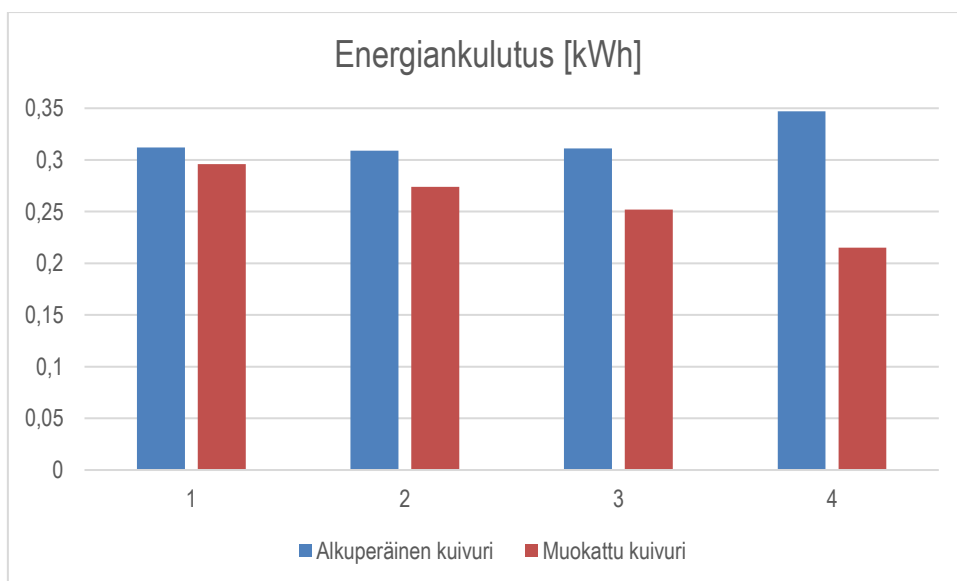
KUVIO 5 Punnitusten perusteella määritellyt kuivumiskäyrät

Kaikkiaan kosteutta poistui kokeissa 920,4 g ja 919,4 g. Sähköenergiaa kului kokeissa mittarin mukaan 1,279 kWh ja 1,037 kWh. Ilmankierrätyksen käyttö siis vähensi energiankulutusta noin 20 %. Muokkaamattoman kuivurin keskimääräinen ominaisenergiankulutus oli 5502 kJ/kg ja ilma kierrätyksellä varustellun 4046 kJ/kg. Energiankulutukset on listattu taulukkoon 5.

TAULUKKO 4 Energiankulutus kuivauskokeissa

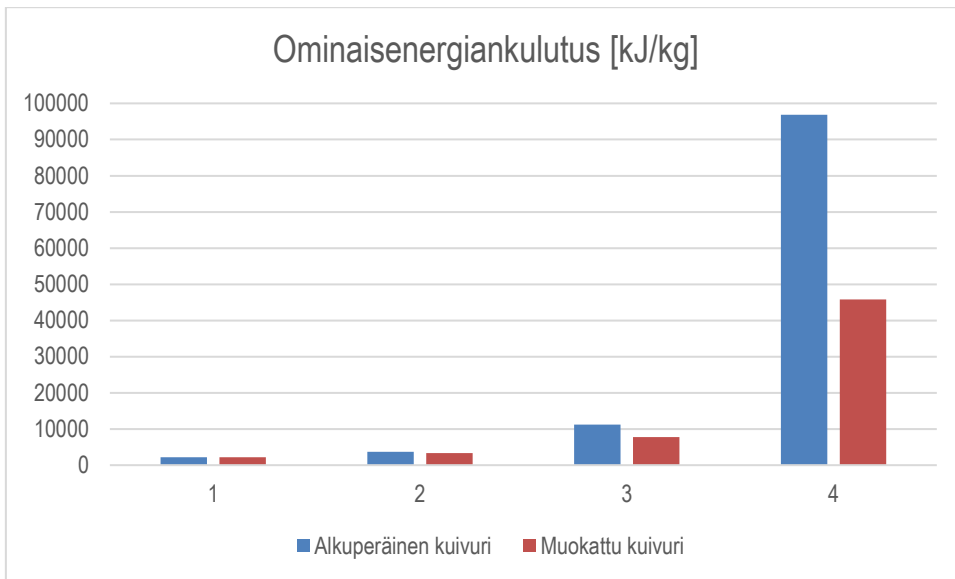
| Kuivuri | Ilmankierrätys | Kosteuden poisto [g] | Energiankulutus [kWh] | Ominaisenergiankulutus [kJ/kg] |
|--------------|----------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Alkuperäinen | - | 920,4 | 1,279 | 5002 |
| Muokattu | 60% | 919,4 | 1,037 | 4060 |

Kuviot 6 ja 7 esittävät kokeiden energiankulutuksen [kWh] ja ominaisenergiankulutuksen [kJ/kg] tunneittain. Kahden ensimmäisen tunnin aikana kummankin kuivurin energiankulutus oli kutakuinkin samansuuruinen, joskin muokattu kuivuri kulutti energiaa jo kuivauksen ensimmäisinä tunteina hieman vähemmän. Tuloilman lämpötilan pienet vaihtelut ja pienemmät laitteen lämpöhäviöt selittävät eroa. Ilmankierrätystä varten tehdyt muokkaukset suojasivat lämpöhäviöiltä erityisesti kuivurin alaosassa.



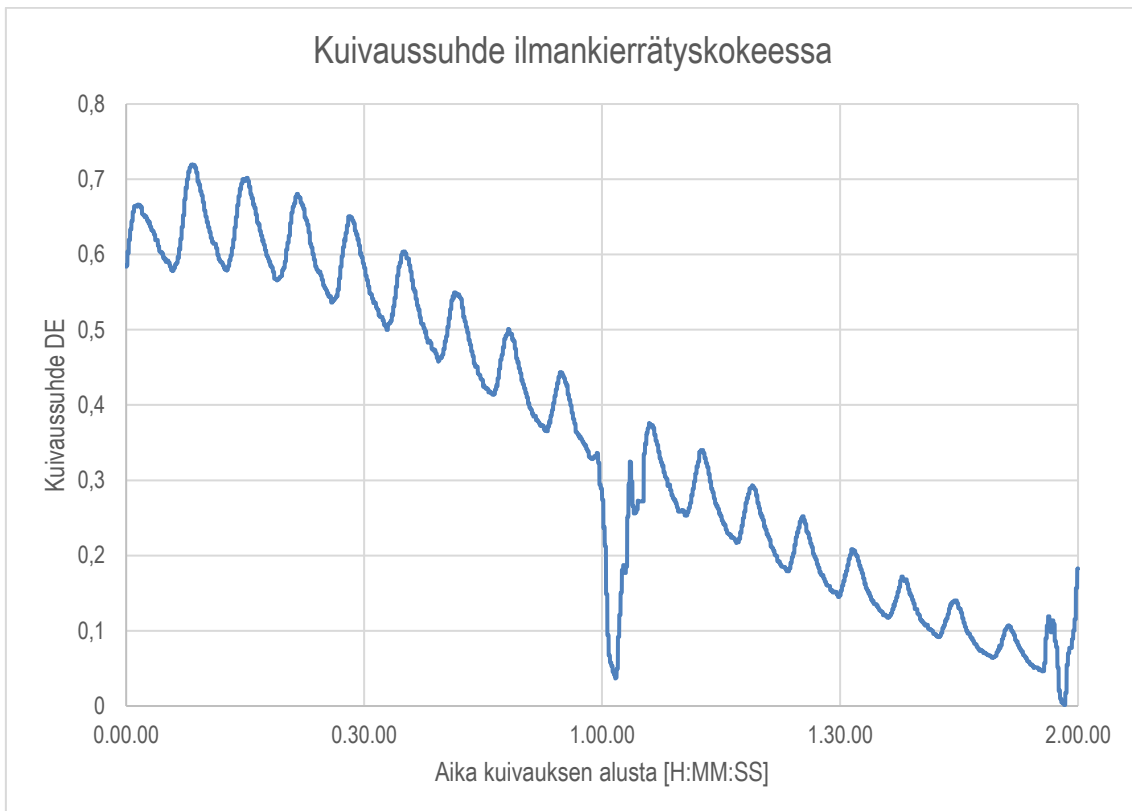
KUVIO 6 Kuivureiden sähköenergiankulutus tunneittain

Kun tarkastellaan energiankulutusta tunneittain, nähdään, että huomattavin osa energiansäästöstä on syntynyt ilmankierrätyksen ollessa käynnissä. Kolmannen tunnin aikana energiaa on kulunut 19 % ja neljännen tunnin aikana miltei 40 % vähemmän. Ominaisenergiankulutus kolmannen tunnin aikana oli 30 % ja neljännen tunnin aikana 50 % pienempi kuin alkuperäisessä kuivurissa.



KUVIO 7 Kuivureiden ominaisenergiankulutus tunneittain

Kierrätysilmakokeen tuloksista laskettiin kuivaussuhde (kuvio 8) kahden ensimmäisen tunnin ajalta. Ilman kierrätyksen aikana ei kuivaussuhdetta voitu määrittää, koska sekoitetun tuloilman arvoja ei mitattu. Tunnin kohdalla näkyvä pudotus kuivaussuhteessa johtuu kuivauksen keskeyttämisestä punnituksen ajaksi.



KUVIO 8 Kuivaussuhde kuivauksen kahden ensimmäisen tunnin aikana

Kuivaussuhteen käyrästä nähdään, että kierrätyksen aloitukselle optimaalinen arvo $DE = 0,5$ saavutettiin jo kuivauksen ensimmäisen tunnin aikana. Kierrätys olisi voitu tällöin aloittaa 30 %:n sekoitussuhteella. Kun verrataan arvoja kaavion 1 esittämään kierrätysstrategiaan, olisi 60 %:n kierrätys voitu aloittaa noin 45 minuuttia aiemmin kuin se kokeessa aloitettiin.

6 POHDINTA

Työn tavoitteena oli selvittää, kuinka kasvikuivurissa voidaan hyödyntää poistoilman uudelleenkierrätystä energiankulutuksen vähentämiseksi. Kirjallisuudesta kerätyn tiedon lisäksi kierrätystä kehitettiin työn aikana rakennetulla ilmankierrätysjärjestelmällä.

Ilman kierrätys on yksinkertainen tapa vähentää kuivauksen energiankulutusta. Järjestelmä ei vaadi monimutkaisia teknisiä ratkaisuja ja voidaan toteuttaa ilmastointiputkiosilla. Tehdyissä kokeissa saavutettiin 20 %:n säästö energiankulutuksessa, kun kierrätys kytkettiin päälle kuivausjakson puolivälissä 60 %:n sekoitussuhteella.

Kierrätysilman määrää ei kokeen aikana säädetty ja kuivumissuhde, jossa kierrätys olisi voitu aloittaa, saavutettiin jo kuivauksen ensimmäisen tunnin aikana. Lisää säästöä olisi siis voitu saada aikaan, jos ilmankierrätyksen aloitus ja määrä olisi optimoitu kuivaussuhteen perusteella. Tätä ei näissä kokeissa voitu tehdä, koska jatkuva kuivaussuhteen määrittäminen ja ilmavirran säätäminen haastavaksi todettiin toteuttaa manuaalisesti. Optimointia varten olisikin syytä asentaa järjestelmään mittaustietojen perusteella sähköisesti ohjautuvat säätöpellit. Kierrätysilman määrä voitaisiin tällöin säätää esimerkiksi siten, että kuivaussuhde pysyy vakiona. Kuivaussuhteen määrittämistä varten tarvitaan mittaustiedot tulo- ja poistoilman lämpötilasta ja kosteuspitoisuudesta.

Kuivauksen ominaisenergiankulutuksen avulla voidaan suuntaa antavasti vertailla kuivureiden tehokkuutta. Vertailua tehtäessä on kuitenkin syytä muistaa, että prosessin muuttujien lisäksi kasvimateriaalin ominaisuudet ja kuivausta edeltävät valmistelut, kuten materiaalin asettelu ja palakoko sekä tuloilman ominaisuudet vaikuttavat huomattavan paljon energiankulutukseen. Jos halutaan tarkastella yhden muuttujan vaikutusta kulutukseen, täytyy muiden muuttujien pysyä muuttumattomina.

Luffa vaikuttaa soveltuvan hyvin kuivauskokeiden toteuttamiseen, koska siihen on helppo imeyttää nestettä ja samaa materiaaliärsä voidaan käyttää uudestaan. Tulosten vertailtavuuden parantamiseksi olisi kuitenkin hyviä tutkia, millä tavalla toistuva kastelu ja kuivaus vaikuttaa materiaalin ominaisuuksiin. On esimerkiksi mahdollista, että uudelleen käytettäessä materiaalin palautuvuus heikkenee eikä imeytetty neste jakaudu samalla tavalla materiaalin eri kerroksiin.

LÄHTEET

Delgado, J. & Lima, A. 2016. Drying and energy technologies. *Advanced Structured Materials* Cham: Springer.

Helsingin yliopisto 2014. Sustainable Intensification – SI. Energiankulutuksia peltoviljelyssä. Viitattu 11.05.2020, <https://blogs.helsinki.fi/sustainableintensification/2014/07/29/energiankulutus/>

Fatouh, M., Metwally, M. N., Helali, A. B. & Shedid, M. H. 2006. Herbs drying using a heat pump dryer. *Energy Conversion and Management* 47(15), 2629-2643.

Giner, S. A. & de Michelis, A. 1988. Evaluation of the thermal efficiency of wheat drying in fluidized beds: Influence of air temperature and heat recovery. *Journal of Agricultural Engineering Research* 41(1), 11-23.

Kemp, I. C. 2014. *Fundamentals of Energy Analysis of Dryers*. Teoksessa Tsotsas, E. & Mujumbar, A. S. *Modern Drying Technology*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1-45.

Mahapatra, A. K. & Nguyen, C. N. 2007. DRYING OF MEDICINAL PLANTS. *Acta Horticulturae* (756), 47-54.

McMinn, W. A. M. & Magee, T. R. A. 1999. Principles, Methods and Applications of the Convective Drying of Foodstuffs. *Food and Bioproducts Processing* 77(3), 175-193.

Mellmann, J. & Furl, C. 2008. Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen – spezifischer Energieverbrauch und Optimierungspotenzial. *Z. Arzn. Gew. Pfl* 13(3), 127-133.

Orakas Tuotteet Oy 2020. Hyötykasvikuivuri kotitalouksille. Viitattu 01.06.2020, <https://www.orakas.fi/hyotykasvikuivuri-kotalouksille>

Ziegler, T. 2020. Primary energy demand and energy costs of fixed-bed drying using the example of chamomile flowers. *Drying Technology* 38(4), 434-447.

Ziegler, T., Jubaer, H. & Schütz, M. 2016. Increasing the Energy Efficiency of Batch-Type Drying with Partial Air Recirculation. *Chemie Ingenieur Technik* 88(1-2), 208-214.

Zohrabi, S., Seiedlou, S., Aghbashlo, M., Scaar, H. & Mellmann, J. 2020. Enhancing the exergetic performance of a pilot-scale convective dryer by exhaust air recirculation. *Drying Technology* 38(4), 518-533.

