



HELSINGIN YLIOPISTO

## **Simulaattorin hyödyntäminen viljankuivaustietojen arvioinnissa**

Lassi Pöyhönen

Maataloustieteiden maisteriohjelma

Helsingin yliopisto

Maataloustieteiden osasto

Kevät 2025

# TIIVISTELMÄ

HELSINGIN YLIOPISTO  HELSINGFORS UNIVERSITET  UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto <input type="checkbox"/> Fakultet/Sektion <input type="checkbox"/> Faculty		Osasto <input type="checkbox"/> Sektion <input type="checkbox"/> Department			
Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Maataloustieteiden osasto			
Tekijä <input type="checkbox"/> Författare <input type="checkbox"/> Author					
Lassi Pöyhönen					
Työn nimi <input type="checkbox"/> Arbetets titel <input type="checkbox"/> Title					
Simulaattorin hyödyntäminen viljankuivaustietojen arvioinnissa					
Oppiaine <input type="checkbox"/> Läroämne <input type="checkbox"/> Subject					
Agroteknologia					
Työn laji <input type="checkbox"/> Arbetets art <input type="checkbox"/> Level		Aika <input type="checkbox"/> Datum <input type="checkbox"/> Month and year		Sivumäärä <input type="checkbox"/> Sidoantal <input type="checkbox"/> Number of pages	
Maisterintutkielma		Toukokuu 2025		38	
Tiivistelmä – Referent - Abstract					
<p>Viljankuivaus on Suomessa hyvin yleinen viljan säilöntätapa. Suomessa vilja ei säily pitkiä aikoja puintikosteudessa, vaan vilja pitää kuivata, happamoittaa, pakastaa tai säilöä ilmatiiviisti. Viljankuivureita Suomessa on hyvin paljon, mutta suurin osa niistä on pieniä ja vanhoja, jotka ovat poistumassa käytöstä vanhimmasta päästä. Tilakehityksen myötä tilalle rakennetaan yhä suurempia viljankuivauslaitoksia, jotka sisältävät hyvin paljon automatiikkaa ja datan keräystä. Tätä viljankuivauksesta kerättyä dataa voidaan hyödyntää viljankuivaukseen liittyvään tutkimukseen sekä viljankuivauksen arviointiin.</p> <p>Tässä tutkielmassa on tavoitteena tutkia simulaattorin hyödyntämistä viljankuivaustietojen arviointiin. Antti-Teollisuuden Ultima- järjestelmä kerää paljon tietoa viljankuivauksesta. Vuodesta 2018 dataa on kertynyt noin 20000 kuivauserän verran. Ultima- järjestelmän keräämä data on hyvä vertailukohta simulaattorille.</p> <p>Ultima- järjestelmästä kerättiin kuivauserätietoja, joiden mukaan simuloitiin kuivauseriä. Kuivauseriä simuloitiin 223 kpl. Simulaatitulosista huomattiin, että simuloitussa kuivausajassa oli keskimäärin 38 % eroavaisuutta todellisiin kuivauseriin verrattuna. Simuloitu kuivausaika oli pääasiassa lyhyempi kuin todellinen kuivausaika. Kuivatun viljaerän painossa oli kuitenkin vain keskimäärin 3 % eroavaisuutta todelliseen kuivatun viljaerän painon verrattuna. Tästä voidaan päätellä simulaattorin toimivan kuivauksen eli veden poistumisen osalta tarkasti, mutta arvioitu kuivausilman määrä oli simulaatioissa liian suuri ja tämän takia kuivausajoissa on merkittäväkin eroa todellisiin kuivausaikoihin verrattuna.</p> <p>Simulaattori on hyvin käyttökelpoinen tapa arvioida viljankuivaustietoja, viljan kuivauksen parametrejä sekä viljankuivauksen onnistumista. Simulaattorin avulla ei tarvitse huolehtia muuttuvista olosuhteista kuivauksen aikana, vaan viljankuivausparametrejä sekä niiden muutosten vaikutuksia voidaan tutkia vakio-olosuhteissa. Simulaattorille syötettävien parametrien tulee kuitenkin olla tarkkoja hyvän simulointituloksen varmistamiseksi.</p>					
Avainsanat <input type="checkbox"/> Nyckelord <input type="checkbox"/> Keywords					
Viljankuivauksen simulointi, Ultima, Matlab, Antti-Teollisuus Oy, Optimaalinen viljankuivaus					
Säilytyspaikka <input type="checkbox"/> Förvaringsställe <input type="checkbox"/> Where deposited					
Maataloustieteiden maisteriohjelma, maataloustieteiden osasto					
Muita tietoja <input type="checkbox"/> Övriga uppgifter <input type="checkbox"/> Further information					
Tutkielman tekemisen mahdollisti Antti-Teollisuus Oy. Tutkielman ohjaaja: apulaisprofessori Antti Lajunen.					

# ABSTRACT

HELSINGIN YLIOPISTO  HELSINGFORS UNIVERSITET  UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto <input type="checkbox"/> Fakultet/Sektion <input type="checkbox"/> Faculty		Osasto <input type="checkbox"/> Sektion <input type="checkbox"/> Department	
Faculty of Agriculture and Forestry		Department of Agricultural Sciences	
Tekijä <input type="checkbox"/> Författare <input type="checkbox"/> Author			
Lassi Pöyhönen			
Työn nimi <input type="checkbox"/> Arbetets titel <input type="checkbox"/> Title			
Utilizing a Simulator for the Evaluation of Grain Drying Data			
Oppiaine <input type="checkbox"/> Läroämne <input type="checkbox"/> Subject			
Agrotechnology			
Työn laji <input type="checkbox"/> Arbetets art <input type="checkbox"/> Level	Aika <input type="checkbox"/> Datum <input type="checkbox"/> Month and year	Sivumäärä <input type="checkbox"/> Sidoantal <input type="checkbox"/> Number of pages	
Master's Thesis	May 2025	38	
Tiivistelmä <input type="checkbox"/> Referat <input type="checkbox"/> Abstract			
<p>Grain drying is a very common method of grain preservation in Finland. Due to the climate, grain does not keep well for long periods at harvest moisture levels, so it must be dried, acidified, frozen, or stored in an airtight environment. There are many grain dryers in Finland, but most of them are small and old, and many of the oldest units are being phased out. Due to the present farm development, increasingly larger grain drying facilities are being built, which incorporate a high level of automation and data collection. The data gathered from grain drying processes can be utilized for research as well as for evaluating the efficiency of grain drying.</p> <p>The aim of this study is to explore the use of a simulator for evaluating grain drying data. The <i>Ultima</i> system by Antti-Teollisuus collects a large amount of information about grain drying. Since 2018, data from approximately 20,000 drying batches has been accumulated. The data collected by the <i>Ultima</i> system serves as a good reference point for the simulator.</p> <p>Drying batch data was collected from the <i>Ultima</i> system and used to simulate drying batches. A total of 223 drying batches were simulated. The simulation results showed in average 38% difference in drying time compared to the actual drying batches. The simulated drying time was generally shorter than the real drying time. However, there was only in average 3% difference in the weight of the dried grain compared to the actual weight of the dried grain batch. This indicates that the simulator accurately models the drying process in terms of water removal, but the estimated volume of drying air used in the simulations was too high, which caused discrepancies in drying time when compared to real-world data.</p> <p>The simulator is a very useful tool for evaluating grain drying data, drying parameters, and the success of the drying process. With the simulator, there is no need to worry about changing conditions during drying, and the effects of changes in drying parameters can be studied in constant conditions. However, the parameters entered into the simulator must be accurate to ensure reliable simulation results.</p>			
Avainsanat <input type="checkbox"/> Nyckelord <input type="checkbox"/> Keywords			
Grain drying simulation, Ultima, Matlab, Antti-Teollisuus Oy, Optimal grain drying			
Säilytyspaikka <input type="checkbox"/> Förvaringsställe <input type="checkbox"/> Where deposited			
Master's Programme in Agricultural Sciences, Department of Agricultural Sciences			
Muita tietoja <input type="checkbox"/> Övriga uppgifter <input type="checkbox"/> Further information			
This study was made possible by Antti-Teollisuus Oy. Supervisor: Associate Professor Antti Lajunen.			

<b>TIIVISTELMÄ</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>3</b>
<b>1 KÄSITTEET LYHENTEET JA SYMBOLIT</b>	<b>5</b>
<b>2 JOHDANTO</b>	<b>6</b>
<b>3 KIRJALLISUUSKATSAUS</b>	<b>7</b>
3.1 Viljankuivaus	7
3.2 Viljankuivurit	8
3.3 Viljankuivurin kuivaustehoon vaikuttavat tekijät	11
3.4 Simulaattorit	14
3.5 Viljankuivauksen simulointiin liittyvät yksinkertaistukset	16
<b>4 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET</b>	<b>18</b>
<b>5 AINEISTO JA MENETELMÄT</b>	<b>19</b>
5.1 Tutkimuksen esittely	19
5.2 Simulaattori	19
5.3 Datan hankinta ja suodatus	24
<b>6 TULOKSET</b>	<b>25</b>
6.1 Simuloinnin tulokset	25
6.2 Optimaaliset parametrit	27
<b>7 TULOSTEN TARKASTELO</b>	<b>32</b>
7.1 Kerätyn datan tarkkuus	32
7.2 Simuloidun datan tarkkuus	33
7.3 Simulaattorin käytettävyys	34
<b>8 JOHTOPÄÄTÖKSET</b>	<b>35</b>
<b>9 KIITOKSET</b>	<b>36</b>
<b>10 LÄHTEET</b>	<b>36</b>

# 1 KÄSITTEET LYHENTEET JA SYMBOLIT

RH %	Relative humidity, Suhteellinen kosteus %
Entalpia	Lämpösisältö
w.b. %	Märkäperusteinen kosteus prosentti
d.b. %	Kuivaperusteinen kosteus prosentti
HI	Hehtolitraino
RMSE	Root Mean Square Error, keskivirhe
$W_{eq}$	Tasapainokosteus
T	Lämpötila
W	Jyvien kosteus (d. b.).
$W_{new}$	Seuraavan viljakerroksen kosteus
$W_{in}$	Tuleva kosteus
$\Delta t$	Aikaväli
k	Nopeus, jolla kosteus siirtyy viljasta pois

## 2 JOHDANTO

Viljankuivaus on oleellinen osa suomalaista viljanviljelyä. Viljaa kuivataan niin rehuksi, elintarvikkeeksi sekä mallasteollisuuden käyttöön. Viljan kuivaaminen on hyvä tapa varmistaa viljan säilyvyys sekä puhtaus. Suomessa viljan säilöntä sellaisenaan puintikosteudessa ei onnistu pitkiä aikoja. Viljan säilyvyys voidaan varmistaa, eli mikrobitoiminta estää, kuivaamalla, happamoittamalla, pakastamalla tai säilömällä vilja ilmativiisti.

Viljankuivureita on monia erityyppisiä, mutta tässä tutkielmassa keskitytään pääasiassa Suomessa käytettäviin kuivureihin. Erätyyppinen lämminilmakuivuri on yleisin viljankuivaukseen käytettävä menetelmä Suomessa. Nykyaikaiset viljankuivaamot ovat hyvin pitkälle automatisoituja viljankuivauskokonaisuuksia. Niissä viljelijä voi etänä seurata älypuhelimestaan viljankuivauksen edistymistä sekä viljaerien automaattista vaihtumista. Automaattikka tuo monissa tapauksissa myös automaattisen tiedonkeruun, jonka hyödyntämiseen olisi potentiaalia.

Simulointi perustuu matemaattisiin malleihin, jotka arvioivat todellista kuivaustapahtumaa mahdollisimmat tarkasti. Mallit sisältävät olettamuksia, sillä itse kuivaustapahtuma on todellisuudessa hyvin monimutkainen. Olettamukset eivät kuitenkaan vaikuta merkittävästi lopputulokseen. Simulointi voisi antaa edullisen työkalun tutkia viljankuivausta vakio-olosuhteissa, mikäli menetelmä osoittautuu käyttökelpoiseksi.

Viljankuivauksen nopeus riippuu hyvin monista eri muuttujista, eikä kuivausaikaa ole aina helppoa arvioida. Simuloimalla kuivaustapahtumaa saatetaan saada hyvinkin tarkka arvio kuivausajasta. Simulointia voitaisiin hyödyntää viljankuivauksen onnistumisen mittarina eräkohtaisesti. Simulaattori voisi ilmoittaa jo ennen kuivauksen alkua kuivausajan ja kuivauksen jälkeen voisi verrata kuinka hyvin kuivausajassa pysyttiin. Simulaattori voisi ehdottaa tai ainakin sillä voisi olla helppoa etsiä viljankuivaamolle parempia kuivausparametreja, mikäli simuloitua kuivausaikaa ei kuivurilla saavuteta.

Tutkielma toteutettiin yhteistyössä Antti Teollisuus Oy:n kanssa. Antti Teollisuuden Ultima-järjestelmä kerää viljankuivaustietoja noin 200 viljankuivurista. Viljankuivaustietoa on paljon ja sitä voisi enemmänkin hyödyntää tutkimuskäyttöön.

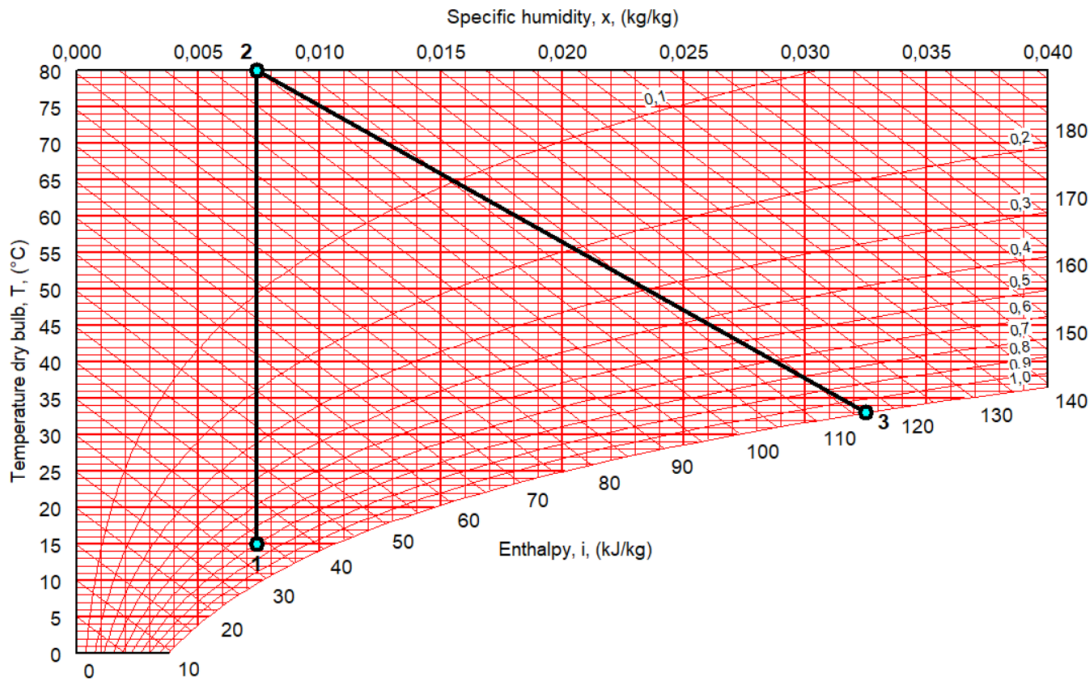
### 3 KIRJALLISUUSKATSAUS

#### 3.1 Viljankuivaus

Viljankuivauksen tavoitteena on estää viljan mikrobitoiminta ja saada vilja säilymään varastoissa pitkiäkin aikoja. Vaikka viljan olisi saavuttanut kypsyyden, jyvissä on silti vielä huomattava määrä kosteutta, joka pitää poistaa jyvistä sen säilymisen varmistamiseksi (Loewer ym. 1994). Varsinkin Suomessa, puintikosteus saattaa olla jopa yli 25 %, on kuivaaminen välttämätöntä säilyvyyden varmistamiseksi. Siementen lepotilaa ohjaa siemenen kosteuspitoisuus ja siemenet säilyvät varastossa vain lepotilassa (Oxley 1948). Tästä syystä kuivaamalla kosteus täytyy saada tarpeeksi alhaiseksi, jotta jyvä säilyy varastoinnin aikanakin lepotilassa.

Kuivaustapahtuma voidaan jakaa kahteen yhtä aikaa tapahtuvaan prosessiin. Kosteuden haihtumiseen kuivattavan viljan pinnalta sekä kosteuden siirtymiseen kuivattavan viljan sisältä viljan pinnalle (Mujumdar 2007 ref. Jokiniemi 2016). Kosteuden siirtyminen aiheutuu vesihöyryn paine-erosta kahden paikan välillä (Loewer ym. 1994). Loewerin ym. mukaan paine-ero jyvän ja kuivausilman välillä riippuu kuivausilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta sekä jyvän lämpötilasta, kosteudesta ja kosteustasapainon ominaisuuksista. Viljaa voidaan kuivata ns. kylmällä ilmalla eli ulkoilmalla ja lämpimällä ilmalla eli jollain tapaa lämmitetyllä ilmalla. Lämminilmakuivureissa kuivausilmaa lämmitetään kaasulla, öljyllä tai biopolttoaineilla kuten hakkeella. Lämpimän kuivausilman käytön hyödyt näkyvät mollierin diagrammissa (Kuva 1). Saksalaisen Richard Mollierin mukaan nimettiin diagrammi, joka esittää veden, vesihöyryn ja kosteuden välistä yhteyttä (Kirkby, N.F. 2011). Diagrammi havainnollistaa hyvin lämminilmakuivauksen kuivaustapahtumaa (Kuva 1). Piste 1 kuvaa kuivaamon tuloilmaa. Tuloilman lämpötila on 15 astetta ja suhteellinen kosteus RH 70 %. Tällöin kilossa ilmaa on 7,41 grammaa vettä ja sen entalpia on 33,8 kJ/kg. Entalpialla tarkoitetaan tässä yhteydessä lämpöenergian määrää kuivausilmassa. Kun kuivausilmaa lämmitetään kuivurin uunissa 80 asteen lämpötilaan (Piste 2), sen RH laskee kahteen ja puoleen prosenttiin, absoluuttisen kosteuden pysyessä edelleen samana, entalpia nousee 100 kJ/kg. Piste 3 kuvaa lämminilmakuivurin poistolämpötilaa. Poistoilman suhteellinen kosteus on 100 %, absoluuttinen 32,50 g/kg ja entalpia 116,4 kJ/kg. Poistoilmaan on siis sitoutunut vettä kuivattavasta viljasta 25 g/kg. Loewerin ym. mukaan viljasta siirtyy kosteutta kuivausilmaan niin kauan kunnes vesihöyryn paine jyvässä ja kuivausilmassa saavuttavat tasapainotilan. Tästä syystä

kylmäilmakuivaus on varsinkin Suomessa hyvin hidasta ja pääasiassa käytetäänkin lämminilmakuivausta.



Kuva 1. Mollier diagrammi lämminilmakuivauksen havainnollistamiseen. Kuva: Lassi Pöyhönen. Mollier Sketcher.

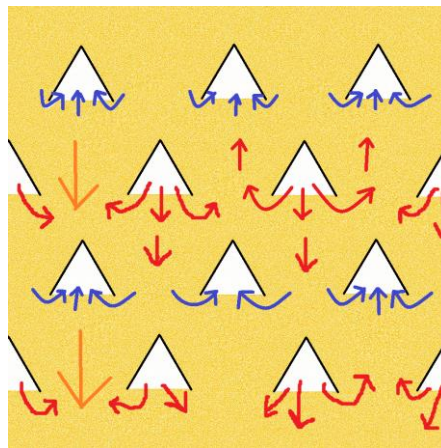
Kuivausilman lämmittäminen lisää ilman vedensiirtokykyä huomattavasti. Energiatehokkuus kasvaa samalla mitä lämpimämpää kuivausilmaa käytetään. On kuitenkin muistettava, että siemenvilja ja leipävilja voivat kärsiä liian kuumasta kuivauslämpötilasta, nopeasti kuivuessaan jyviin voi tulla jännityksiä ja jyvät voivat esimerkiksi halkeilla ja menettää itävyytensä tai elinvoimaisuutensa (Hautala ym. 2013). Rehuviljaa voidaan kuitenkin kuivata niin lämpimällä ilmalla kuin vain on mahdollista saavuttaa. Hautalan ym. (2013) mukaan rehuviljan ominaisuudet voivat jopa parantua maittavuuden ja sulavuuden osalta korkeassa lämpötilassa kuivattaessa.

### 3.2 Viljankuivurit

Viljankuivurit voidaan luokitella monella tapaa, sillä niistä on hyvin monia erilaisia sovellutuksia. Kuivurit voidaan luokitella kuivausilman lämpötilan mukaan kylmä- ja lämminilmakuivureihin. Tämä myös määrittää hyvin pitkälti kuivurin rakenteelliset ratkaisut (Jokiniemi 2016). Loewer ym. (1994) kertovat kylmäilmakuivureista seuraavaa: Kylmäilmakuivureissa vilja kuivataan ympäristön

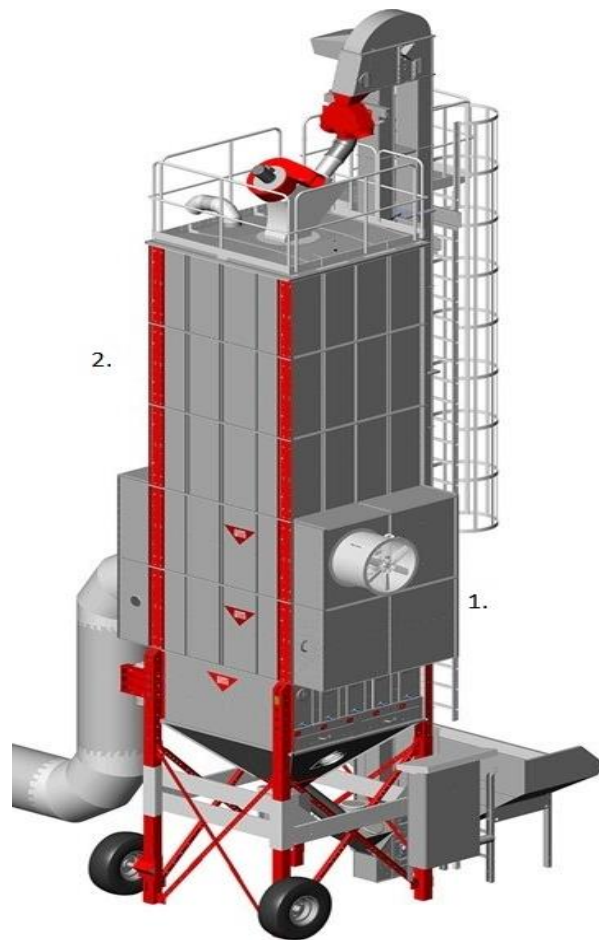
lämpöisellä ilmalla tai hieman lämmitetyllä ilmalla ja varastoidaan useimmiten samassa paikassa. Kylmäilmakuivureissa ilmaa puhalletaan viljamassan läpi rei'itetyn pohjan kautta. Ennen kylmäilmakuivurit olivat käsivoimin täytettäviä ja tyhjennettäviä lavakuivureita, mutta nykyään yleisesti käytössä on suuria pyöreitä siiloja puhalluspohjalla ja sekoitus- ja tyhjennysruuveilla. Tätä kutsutaan myös paksukerroskuivaukseksi.

Lämminilmakuivurit voidaan jakaa viljan virtaustavan sekä viljavirran ja ilmavirran keskinäisen suhteen mukaan (Pabis ym. ref. Jokiniemi 2016). Lämminilmakuivureissa kuivauslämpötila on 50–120 °C riippuen viljankuivaamon lämmönlähteen tehosta, kuivattavasta viljalajista ja sen käyttötarkoituksesta. Lämminilmakuivureita on eräkuivaus ja jatkuvatoimisia kuivureita. Molemmissa tyypeissä peruserämuotona on puskea suuria määriä lämmintä ilmaa verrattain ohuiden viljakerrosten läpi (Loewer ym. 1994). Tätä kutsutaan myös ohutkerroskuivaukseksi.



Kuva 2. Sekavirtaustyyppinen kuivauskenno, ilman liikkuminen punaisella kuivausilma, sinisellä kostunut poistoilma ja ruskea nuoli viljan suunta. Kuva: Lassi Pöyhönen.

Suomessa käytettävät lämminilmakuivurit ovat yleensä sekavirtaustyyppisiä kennorakenteisia eräkuivureita (Kuva 3 Antti Teollisuus Oy). Kuivureissa on kuivauskennoja sekä varastokennoja. Varastokennojen tarkoituksena on toimia viljan varastona, sillä kuivauksen edetessä viljaerän tilavuus pienenee. Varastokennojen avulla kuivauskennot ovat koko kuivauksen ajan täynnä ja täydessä hyötykäytössä. Eräkuivurissa kuivuri täytetään kerran viljalla, se kuivataan kierrättämällä viljaa elevaattorin avulla kuivurissa ja vaihdetaan seuraavaan erään kuivauksen ja jäähtymisen jälkeen. Sekavirtaus tarkoittaa sitä, että ilma kulkee kuivauskennoissa tuloilmaharjan alta poistoilmaharjan alle viljamassassa viljavirtaa vastakkaiseen suuntaan sekä poikittain viljavirtaan nähden (Kuva 2).

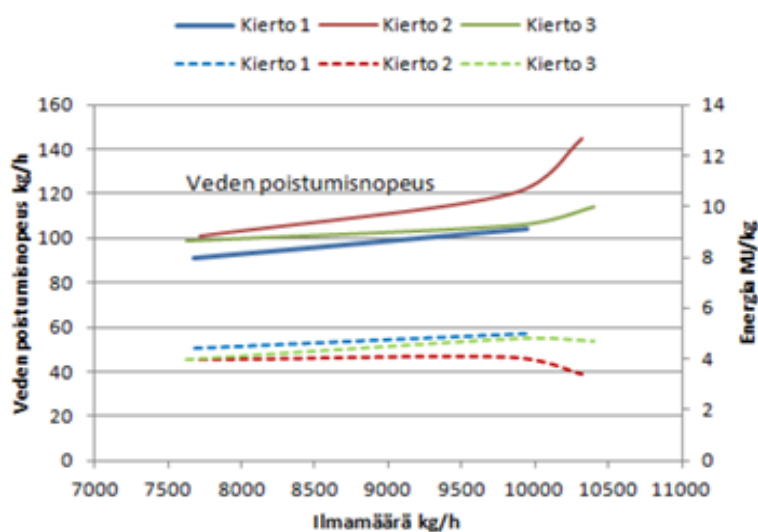


Kuva 3. Sekavirtaustyyppinen eräkuivuri. Kohdassa 1. kuivauskennot 2 kpl, kohdassa 2. varastokennot 3 kpl. Antti-Teollisuus Oy nettisivut viitattu 16.1.2025. Muokannut Lassi Pöyhönen.

Jatkuvatoimisia viljankuivureita on myös käytössä Suomessa. Perinteistä kennotyyppistä eräviljankuivuria voidaan myös käyttää jatkuvatoimisesti. Tällöin viljan kiertonopeutta hidastetaan niin paljon, että viljasta lähtee noin 5 % kosteutta pois yhdellä läpimenolla. Tämän jälkeen vilja voidaan ajaa esimerkiksi puhalluspohjaiseen kuivaavaan siiloon kuivumaan ja jäähtymään varastointikosteuteen. Varsinaiset jatkuvatoimiset viljankuivurit ovat yleensä poikkivirtaustyyppisiä (Loewer ym. 1994). Jatkuvatoimisissa kuivureissa viljapatja liikkuu kuljettimilla, joiden alta kuivaus- ja jäähdytysilmaa puhalletaan viljakerroksen läpi. Tällaisessa jatkuvatoimisessa viljankuivaamossa huomioitavaa on sen energiatehokkuus. Jatkuvatoimisen kuivurin lämmönlähdettä ei tarvitse jäähdyttää erien välillä ja jäähdytysilman sisältämä lämpöenergia saadaan hyötykäyttöön, sillä se johdetaan kuivausilman joukkoon jäähdytyksen jälkeen (Alvan Blanch Group, nettisivut viitattu 4.2.2025).

### 3.3 Viljankuivurin kuivaustehoon vaikuttavat tekijät

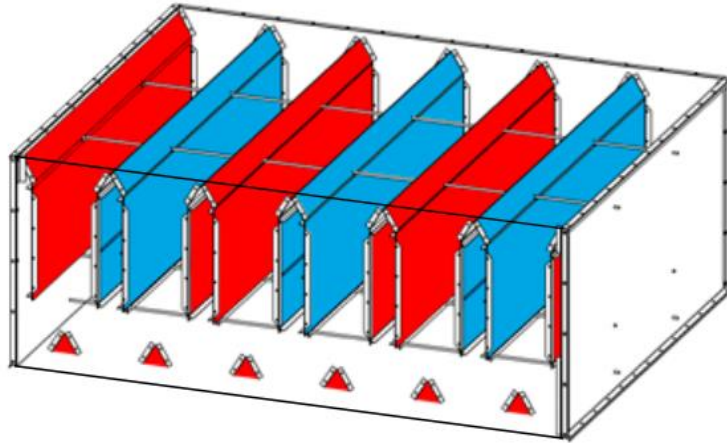
Suomessa yleiset kennorakenteiset eräkuivurit ovat modulaarisia ja helposti räätälöitävissä käyttäjän tarpeiden mukaan. Kuivurivalmistajat tekevät eri kokoisia moduuleja kuivurikoneistoihin, joita sitten kasataan päällekkäin haluttu määrä. Esimerkiksi Antti Teollisuudella (Antti Teollisuus Oy nettisivut, viitattu 16.1.2025) on kolme eri koneistokokoa, joista kaikki viljankuivurit kasataan. Viljankuivuri koostuu alhaalta ylöspäin luettaessa seuraavista osista (Kuva 3). Alimmaisena on syöttölaitteisto. Syöttölaitteisto määrittää viljan kiertonopeuden. Syöttölaitteisto purkaa viljaa elevaattorille, tätä määrää voidaan säätää portaattomasti nykyaikaisissa kuivureissa. Kiertonopeuden vaikutuksesta viljan kuivumisnopeuteen on hyvin vähän tutkimustietoa. Peltolan (Peltola 1997 ref. Hautala ym. 2013) kokeiden mukaan optimaalisin kiertonopeus veden poistumisnopeuden ja energiankulutuksen suhteen olisi 1,5–2 h per kierros (Kuva 4, Peltola 1997). Peltola toteaa päätelmissään kuitenkin, että vaikutus etenkin kostean viljan kuivaukseen on selkeä, kiertonopeuden tulisi olla mahdollisimman suuri. Tällöin viljamassa myös sekoittuu ja puhdistuu eniten.



Kuva 4. Viljan kiertonopeuden vaikutus kuivumiseen, ylemmät käyrät kuvaavat veden poistumisnopeutta ja alemmat energian tarvetta poistettua vesikiloa kohti. Kierto 1 = 3 tuntia kierros, kierto 2 = 1,5- 2 tuntia kierros ja kierto 3 = yksi kierros tunnissa. Optimaalisin kiertonopeus kierto 2. Kuva: Peltola 1997.

Seuraavana eräkuivurin rakenteessa ovat kuivauskennot (Kuva 3 kohta 1.). Kuivauskennoja kasataan päällekkäin niin paljon kuin kuivauskapasiteettia tarvitaan. Kuivauskennojen läpi puhalletaan toisesta päästä lämmintä ilmaa harjarakenteiden alle, josta ilma pääsee viljamassan läpi poistupuolen

ilmaharjan alle. Kuivauskennoja on Suomen markkinoilla kahta eri tyyppiä. On solarakenne (Kuva 5. Arskametalli Oy nettisivut, viitattu 16.1.2025), joka on poikkivirtaustyyppinen kuivauskenno eli kuivausilma virtaa poikittain viljavirtaan nähden sekä harjakennorakenne (Kuva 6). Solarakenteen etuna on se, että vilja ei turpoa kuivuria käynnistettäessä eikä se holvaannu, joten kuivuri voidaan täyttää täyteen viljaa (Arskametalli Oy nettisivut, viitattu 16.1.2025). Poikkivirtaustyyppinen kuivauskenno kuluttaa kuitenkin enemmän energiaa (Brinker ym. 2010).



Kuva 5. Solarakenteinen kuivauskenno. Punainen korostusväri tarkoittaa lämpimän ilman tulo puolen ilmakanavia ja sininen kostean ilman poistupuolta. Arskametalli Oy nettisivut. Viitattu 16.1.2025.

Yleisemmin kuivaamoista löytyy harjakennorakenne (Kuva 6), joka on sekavirtaustyyppinen. Suurempi energiankulutus on havaittu myös sekavirtaustyyppisten kennojen kanssa, mikäli ilmaharjojen etäisyyttä toisistaan ja kokoa kasvatetaan (Cao ym. 2004). Ilman kulkusuunnalla viljaan nähden ei siis ole niin suurta merkitystä kuin ilmaharjojen sijoittelulla ja kuivattavan viljamassan paksuudella, toteavat Cao ym.



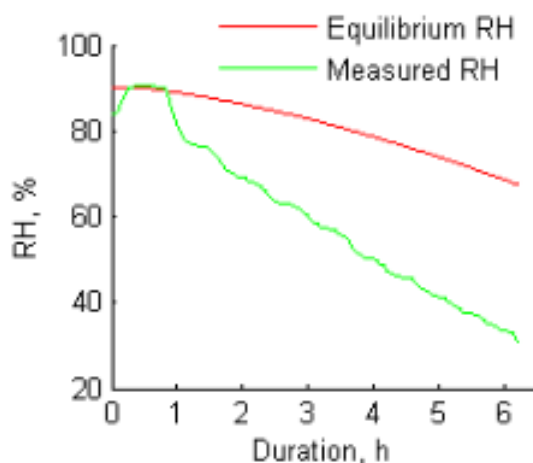
Kuva 6. Harjakennorakenne Kuva: Hautala ym. 2013. Maatilakuivurit. Viitattu 31.3.2025.

Kuivaustehoon vaikuttaa hieman kuivauskennon rakenne, mutta eniten vaikuttaa kennon koko, kennojen määrä, ilmankosteus, kuivaukseen käytettävissä olevan lämpimän ilman määrä ja lämpötila (Inyang ym. 2018). Viljankuivureita on olemassa alipainetekniikalla, ylipainetekniikalla sekä näiden sekoituksena. Alipaineinen viljankuivuri tarkoittaa sitä, että lämminilma imetään kuivurin läpi. Alipaineisen kuivurin etuna on teoriassa pienempi energiankulutus ja tehokkaampi pölynpoisto. Alipaineessa veden höyrystymislämpötila on alempi kuin ylipaineessa, mutta paine-ero yli- ja alipaineisen kuivurin välillä on pieni (Suomi ym. 2003). Alipaineisen kuivausuunin paloturvallisuuteen on myös kiinnitettävä enemmän huomiota sillä pannun repeytyessä palokaasut, ja liekki, imeytyvät kuivausilman mukana viljan joukkoon (Suomi ym. 2003). Ylipaineinen järjestelmä tarkoittaa sitä, että puhallin on ennen lämmitysuunia eli ilma puhalletaan viljamassan läpi. Molempia tekniikoita voidaan myös hyödyntää yhdessä asentamalla poistoilmamuri ylipaineekuivausuunin kanssa.

Kuivauskennojen yläpuolella on varastokennoja (Kuva 3 kohta 2). Varastokennot ovat tarkoitettu viljan varastointiin eikä niissä ole ilmaharjoja, eikä siten myöskään ilmakehä. Varastokennot on tarkoitettu kompensoimaan viljan kutistumaa (Hautala ym. 2013). Mikäli varastokennoja ei olisi, kuivauksen edetessä kuivauskennoja pitäisi sulkea tai kuivausilma karkaisi ylimmästä kennosta pois. Varastokennojen avulla kuivausteho pysyy koko kuivauksen ajan samana, kun kaikki kuivauskennot voidaan pitää käytössä. Varastokennoissa viljan lämpötila myös tasaantuu ja kosteutta siirtyy jyvän sisäosista kohti pintaa. Perinteisesti varastokennojen osuus on ollut noin puolet koko kuivurin tilavuudesta. Tällöin varmistetaan kuivattavan viljan määrä riittäväksi myös hyvin märkää viljaa kuivatessa koko kuivauksen ajan. Nykyään on myös alettu suosia kuivuriratkaisua, jossa vain

kolmannes tai jopa pienempi osa kuivurin kokonaistilavuudesta on varastokennoja. Tällöin käytössä on voi olla automaatiikka, joka sulkee kuivauskennoja, jos vilja ei täytä ylimpiä kuivauskennoja. Suurella kuivauskennojen määrällä haetaan suurta kuivaustehoa. Luonnollisesti uunin kokoa täytyy kasvattaa samassa suhteessa, jotta kuivauskennot saavat riittävästi ilmaa tehokkaaseen toimintaan.

Viljankuivauksen energiatehokkuutta voidaan parantaa kuivauslämpötilan nostamisen lisäksi pienentämällä kuivausilman määrää kuivauksen edetessä. Kuivauksen alussa viljan pinnalla oleva vesi poistuu helposti kuivausilman mukana. Tällöin poistoilman suhteellinen kosteus pysyy korkeana, lähes 100 %. Kun viljan pinnalta helposti irtoava kosteus on poistettu, kuivaus etenee diffuusion avulla veden siirtyessä jyvän ytimeistä pinnalle. Tällöin poistoilman suhteellinen kosteus alkaa laskea kuvan 7 mukaisesti ja ero tasapainokosteuteen kasvaa. Kuten Jokiniemen kuvasta (Kuva 7) nähdään, osa lämpöenergiasta jää hyödyntämättä. Jokiniemen (2016) mukaan tasapainokosteuden tavoittelu ei ole järkevää, sillä kuivaus kestäisi todella kauan, mutta Jokiniemen & Ahokkaan (2014) tutkimusten mukaan energiansäästöt ilmanmäärän sopivalla pienentämisellä olivat 5–14 %.



Kuva 7. Poistoilman tasapainokosteus (Equilibrium RH) ja mitattu poistoilman kosteus (Measured RH) viljankuivauksen edetessä. Kuva: Jokiniemi T. 2016.

### 3.4 Simulaattorit

Viljankuivauksessa muuttujina ovat: kuivauskerroksen paksuus, viljan kosteus, lämpötila, hehtopaino, loppukosteus, massavirta, kuivauslämpö ja -ilmankosteus. Empiirisesti näin montaa muuttujaa ei voida käsitellä, joten on luotu simulaatioita (Giner ym. 1998). Simulaattori on käytännössä matemaattisia malleja hyödyntävä laskentaohjelma, jossa on graafinen käyttöliittymä.

Simuloimiseen voidaan käyttää monia eri matemaattisia malleja, joiden perustana on Giner ym. mukaan differentiaaliyhtälöitä, jotka on derivoitu viljan ja ilman välisistä massa ja energia tasapainoyhtälöistä. Viljan kuivauksen kinetiikkaa voidaan Baidhe ym. (2024) mukaan puoliteoreettisilla matemaattisilla malleilla kuvata paremmin kuin empiirisillä malleilla. Empiiristen mallien ongelmana on, ettei käytännön kuivurissa ole jatkuvasti samanlaiset ilmaolosuhteet kuivauskerroksen sisällä eivätkä tällöin kuvaa kuivaustapahtumaan kovinkaan tarkasti muissa kuin juuri samankaltaisissa olosuhteissa kuin mistä ne on laskettu (Callaghan ym. 1971).

Viljankuivauksen simulointia voidaan hyödyntää moneen eri käyttötarkoitukseen. Simulointi on edullinen tapa tutkia viljankuivausta. Simulaatioiden avulla on tutkittu viljankuivureiden kuivaustehoa, energiatehokkuutta sekä yksikkökustannusta (Miller & Whitfield 1984) sekä kennorakenteen vaikutusta kuivaustehoon (Cao ym. 2004). Reaalimaailman tilanteissa ei pystytä kovin usein saavuttamaan tasaisia olosuhteita.

Simulaattoreita pystytään tekemään monelle eri pohjalle. Esimerkiksi Microsoft Excelin Visual Basic- sovelluksen avulla tehtyjä simulaattoreita ovat tutkineen muun muassa Valente ym. (2012) sekä Ruokonen (2020). Valenten ym. (2012) tutkimuksissa tutkittiin Thompsonin mallia simuloitaessa viljan kuivausta korkeissa lämpötiloissa, sopivan kielen kehittämistä kuivausmalleja varten sekä käyttäjäystävällisen käyttöliittymän kehitystä. Lopputuloksena oli: ”Tutkimusten mukaan, LINSEC (kyseinen tutkimuksen kohteena ollut simulaattori), on käyttökelpoinen työkalu myötävirtakuivurin ja kuivaavan siilon mallinnukseen ja simulointiin. Sen suurin etu on, ettei se vaadi käyttäjältä ohjelmointikielen tuntemusta” sekä ” LINSEC;in käyttö kuivausjärjestelmien mallintamiseen on helppo menettely, joka tarjoaa monelle käyttäjälle mahdollisuuden käyttää simulointia kehitystyössä, kuivausjärjestelmien suunnittelussa, arvioinnissa ja analysoinnissa. Ruokonen (2020) puolestaan tutki simulointityökalun kehittämistä, jolla voitaisiin määrittää sopivan kokoinen kuivuri maatilan tarpeisiin ja olisi käyttäjäystävällinen. Hänen mukaansa simulaattori oli hyvin käyttäjäystävällinen sekä se tuotti toivottuja tuloksia niin kuivurin koon, kuivausajan kuin uunin tehon ja ilmamäärän osalta. Jatkotutkimusta jäätin kuitenkin kaipaamaan simulaattorin tarkkuuden arviointiin, sillä todellisten kuivaustapahtumien dataa ei ollut riittävästi tai se oli epätarkkaa.

Microsoft Excelin lisäksi Matlab- ohjelmistoa on käytetty viljankuivauksen simuloinnin perustana. Wang ja Fon (2004) kehittivät Matlab pohjaisen ohjelman (SAPGD-2004) viljan kuivauksen simuloimiseksi. Simulaattori oli hyvin kattava, sillä siinä voitiin testata monien eri kuivattavien

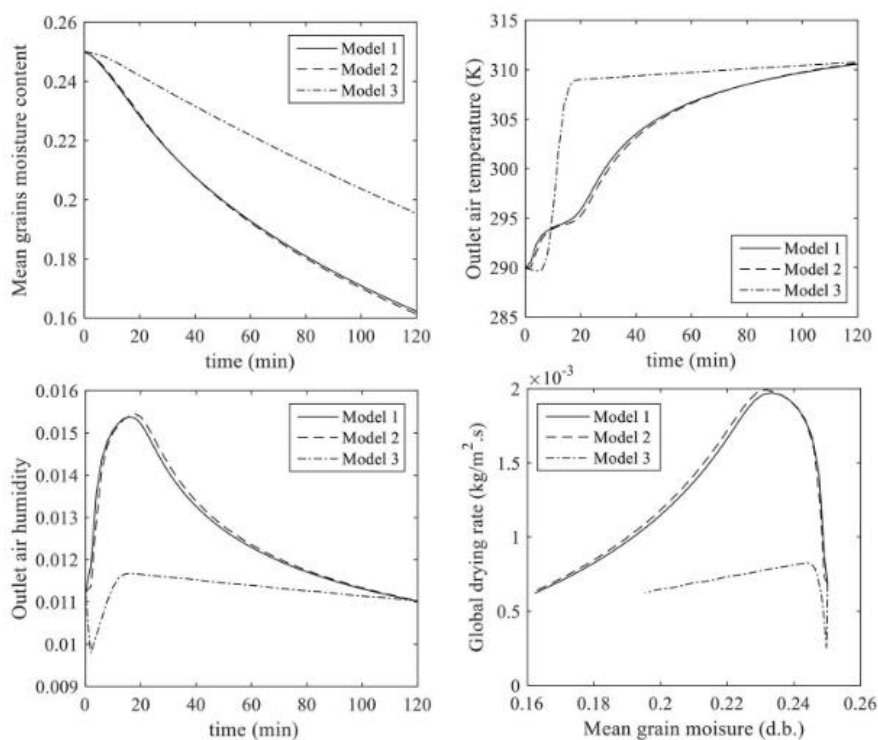
viljojen (39kpl) ilmavirran vastustusta, tasapainokosteuksia (45 viljaa, 97 parametrisarjaa), kuivauskäyriä eri viljalajeille (17 viljalajia, 45 yhtälösarjaa) sekä malleja viljan kuivauksen simulointiin. Wang ja Fon (2004) pitivät simulaattoria onnistuneena etenkin matemaattisten mallien näyttämässä graafisessa muodossa. SAPGD-2004 voi myös toimia visualisointi- ja apuvälineenä tutkijoille, jotta he voivat tarkistaa julkaistuissa lähteissä esitetyt yhtälöt olemassa olevan tiedon perusteella.

### 3.5 Viljankuivauksen simulointiin liittyvät yksinkertaistukset

Simuloitaessa todellista tilannetta matemaattisesti, joudutaan usein tekemään yksinkertaistuksia. Ilman yksinkertaistuksia, laskut olisivat hyvin monimutkaisia ja vaatisivat huomattavasti enemmän aikaa ja laskentatehoa. Yksinkertaistukset tai olettamukset tehdään siten, etteivät ne muuta lopputulosta merkitsevästi. Esimerkiksi Millerin ja Whitfieldin (1984) simulaatioissa tehtiin seuraavanlaisia olettamuksia: kuivausilma virtaa kaikissa kuivauskennoissa viljamassan läpi tasaisesti, ilman ja viljan virtaukset ovat yhtenäisiä, kuivaajan läpi virtaavaan ilmaan ei vaikuta muut parametrit sekä ilman lämmitystavan oletettiin olevan suora öljylämmitys ilman lämmönvaihdinta. Liu & Bakker-Arkema (2001) kehittivät jaetun parametripromessimallin viljan kuivaukseen ja heidän mallissaan oli oletettu seuraavaa: kuivuria käytetään vakio olosuhteissa (ilman lämpötila 20°C ja RH 60 %), suora öljy- tai kaasulämmitys, lämmitetyn kuivausilman kosteuspitoisuus 0,0125 kg/kg ilmaa riippumatta ilman lämpötilasta, kuivausprosessi on ideaalinen ja lämmönkulutus jyvien lämmitykseen on laskettu mukaan haihdutusenergiaan. Kyseisissä tutkimuksissa ei arvioitu yksinkertaistusten vaikutusta, ne oletettiin merkityksettömiksi.

Mattos ym. (2021) tutkivat yksinkertaistusten vaikutusta simulointitulokseen. Heidän tutkimuksessansa käytettiin kolmea eri mallia, joissa oli erilaisia yksinkertaistuksia. Malli 1 sisälsi seuraavanlaisia yksinkertaistuksia: jyvät samankokoisia palloja, jyvien kutistuminen mitätöntä, kuivauskerroksen paksuus ei muutu kuivauksen aikana, kosteuden diffuusio noudattaa jyvien sisällä Fick-n lakia, haihtumista tapahtuu vain jyvän pinnalla, tasapainokosteus olosuhteet vallitsevat kiinteässä rajapinnassa, veden entalpiaan jyvän sisällä ei vaikuta fyysiset tai kemialliset vuorovaikutukset kiinteän aineen ja veden välillä, kokonaispaine kuivauskerroksessa on tasainen. Toista mallia yksinkertaistettiin edellisten yksinkertaistusten lisäksi: Viljan sisällä ei ole lämpötilagradienttia, ulkoinen massansiirtovastus on merkityksetön verrattuna viljan sisäiseen diffuusion sekä viljan ja ilman lämpötila oletetaan samoiksi. Kolmannessa mallissa matemaattista yhtälöä muutetaan siten, että jyvän pintakosteuden oletetaan olevan sama koko ajan. Kuva 8 (Mattos

ym. 2021) kertoo simulointien tuloksia eri mallien osalta. Kuvista huomataan, että mallit 1 ja 2 antavat hyvin samanlaisia tuloksia, kun taas mallin 3 osalta tulos on huomattavan erilainen. Lopputuloksena malli 2 oli 18 % edullisempi laskentakulujen osalta kuin malli 1 kuitenkin vaikuttamatta merkittävästi ennustettuihin arvoihin. Kolmannessa mallissa yhtälön muuttaminen muuttaa tulosta oleellisesti, eikä se enää kuvaa kovin hyvin kuivaustapahtumaa.



Kuva 8. Mattos ym. 2021 Vertailua mallien käyttäytymisestä samoissa kuivausolosuhteissa paksukerroskuivauksessa. Simulointi olosuhteet: viljakerroksen paksuus 0,152 m; ilmamäärä 0,309  $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ; kuivauslämpö 316,5 K; kuivausilman kosteus 0,009  $\text{kg vettä/kg ilmaa}$ ; viljan lämpötila 290 K; viljan kosteus 25 (d.b.) ja adiabaattinen järjestelmä. Kuva: Mattos ym. 2021.

Simulaatioissa kuivattava massa jaetaan hyvin ohuihin kerroksiin. Tätä kutsutaan ohutkerrosmalliksi. Sharonin ym. (2016) mukaan ohutkerrosmallissa jyvillä on samanlainen vuorovaikutus kuivausilman kanssa kyseisessä kerroksessa. Chakravertyn (Chakraverty 1994 ref. Sharon ym. 2016) mukaan alle 20 cm viljakerroksia voidaan pitää ohuina kerroksina ja määritellä ohutkerrosmalleilla. Ohutkerrosmalleja käytettäessä kuivausilman ominaisuudet muuttuvat siirryttäessä kerroksesta toiseen. Ohutkerrosmallien käyttö juontaa juurensa laboratoriotesteihin, joissa kuivaus yhtälöt on luotu tutkimalla ja kuivaamalla laboratoriossa juuri ohutta viljakerrosta (Misra ja Brooker 1980). Ohutkerrosmalleja voidaan käyttää niin erätyyppisten viljankuivureiden mallintamiseen sekä myös

esimerkiksi siilokuivureiden mallintamiseen, joissa viljakerroksen todellinen paksuus voi olla kymmeniä metrejä.

Useimmat mallit ja simulaatiot eivät myöskään huomioi kuivuvan viljan kutistumista ja tilavuuspainon nousua kuivauksen aikana. Ngouem ym (2021) tutki kutistumismuuttujan lisäämistä kuivumisyhtälöihin. Tutkimuksen lopputuloksena oli, että kutistumisen ottaminen huomioon mahdollistaa parempien ja tarkempien tulosten saavuttamisen. Muuttuja on paljolti riippuvainen olosuhteista, joissa muuttujaa on määritelty. Tällöin sen määrittelyssä saattaa tulla tulokseen vaikuttavaa virhettä Ngouem ym. toteavat. Tästä syystä viljan kutistuminen on useimmiten jätetty huomioimatta, kun se ei kuitenkaan niin paljoa lopputulokseen vaikuta.

#### **4 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET**

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia Antti Teollisuuden Ultima – järjestelmän kuivaustapahtumista keräämää dataa vuodelta 2024 ja selvittää voisiko simuloinnin avulla ennustaa kuivaustapahtumaa. Simuloinnista voisi olla monia hyötyjä kuivaamon käyttäjälle. Mikäli simulointi korreloi oikeaa kuivaustapahtumaa, käyttäjälle voitaisiin ennustaa kuivausaika, jolloin olisi tiedossa jo ennen kuivauksen aloitusta, kuinka kauan kuivaustapahtuma kestää. Simulaattorin avulla käyttäjä voisi myös halutessaan muuttaa viljankuivaamon asetuksia siten, että kuivaustapahtuma on halutunlainen. Voidaan optimoida kuivausparametrit, jotta kuivaustapahtuma on mahdollisimman nopea, mahdollisimman hellävarainen tai mahdollisimman energiatehokas.

Tutkimuksen tavoitteena oli:

1. Tutkia simulaattorin ja todellisen viljankuivaamon vastaavuutta kuivausajan suhteen
2. Selvittää voiko kuivattujen erien onnistumista arvioida simuloimalla
3. Voidaanko simulaattorin avulla määrittää parempia kuivausparametrejä

Tuloksien avulla voidaan viljelijälle tuottaa arvokasta tietoa viljankuivauksen tehostamisesta ja simuloinnin hyödyntämisestä.

## 5 AINEISTO JA MENETELMÄT

### 5.1 Tutkimuksen esittely

Tutkimuksessa käytettiin aineistona Antti Teollisuuden Ultima- järjestelmän keräämää dataa. Ultima- järjestelmä kerää kaiken kuivaukseen liittyvän datan pilvipalveluun, jonka kautta data on viljelijän hyödynnettävissä. Kuivauksen aikana tallentuu järjestelmään seuraavat tiedot: kuivurin tiedot, kuivauslämpötila, poistolämpötila, viljankosteus, kiertonopeus, kuivausaika, jäähdytysaika, puhaltimen nopeus, kuivauserän paino, käyttötunnit, automaatioasetukset, virheilmoitukset, kuivattava vilja sekä viljalajike ja kuivurin täyttöaste. Näistä Ultima- järjestelmä koostaa kuivauserittäin lohkotiedot, viljalajin ja -lajikkeen sekä kuivausajan mukaan graafiset kuvaajat viljaerän painosta, viljan kosteuden muutoksesta, poistoilman kosteuden muutoksesta, ulkolämpötilasta, tuloilman määrästä ja kuivausilman lämpötilasta (Antti Teollisuus nettisivut 29.10.2024). Huomioitavaa on kerätyn datan suuri määrä. Vuodesta 2018, vuoden 2024 syyskuun alkuun mennessä kuivauseriä on kertynyt noin 20000 kappaletta. Kuivureita, joista dataa on kerätty, oli noin 200 kappaletta.

Simulaattori on toimiessaan hyvin käytännöllinen tapa ennustaa viljankuivausta ja etsiä optimaalisia asetuksia kuivuriin. Simulaattorilla on helppo kokeilla erilaisia kuivurin säätöjä vakio-olosuhteissa ja sitä voisivat käyttää myös kuivureiden käyttäjät. Sääolosuhteet vaikuttavat suuresti varsinkin nykyään yleistyneiden vaunu- ja stand alone -kuivureiden toimintaa, sillä niissä ei ole pakettikuivurin rakenteita ja siiloja ympärillä eristämässä tuulelta ja vesisateelta. Simulaattorin käyttö on huomattavasti nopeampaa ja edullisempaa kuin oikeilla kuivureilla optimaalisten kuivurin säätöjen etsiminen, koska olosuhteet vaihtelevat ja muutoksien vaikutuksia on tällöin hankala erottaa olosuhteiden muutoksista. Varsinkin tilanteissa, joissa kuivataan hyvin kosteaa viljaa ja erän kuivaamiseen voi kulua jopa 12 h.

### 5.2 Simulaattori

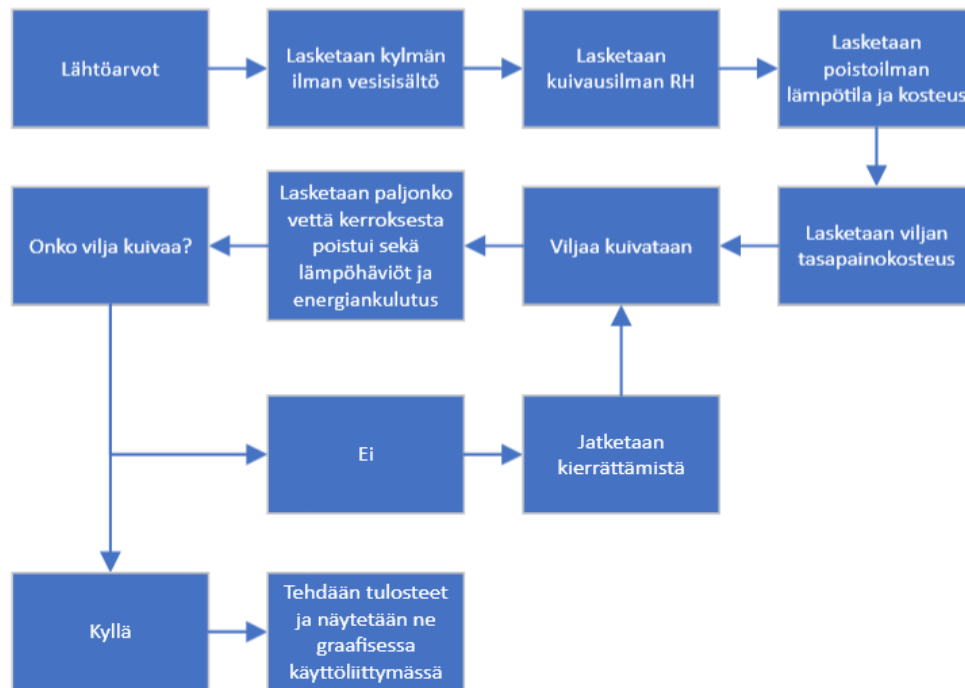
Tässä tutkielmassa käytetyn simulaattorin on alun perin tehnyt MMT Johannes Tiusanen ja sitä on muokattu ja kehitetty vuosien myötä. Simulaattoria on käytetty viljankuivauksen energiatehokkuuden selvittämiseen simuloimalla (Tapani Viita Pro Gradu- tutkielma 2013) sekä kuivauslämpötilan optimointiin (Tiusanen ym. 2013). Simulaattori on tehty MatLab- ohjelmalla. Simulaattoria on

mahdollista käyttää myös kuluttajatasen tietokoneilla yksinkertaistusten takia, tarvitaan vain MatLab-ohjelma. Simulaattoria on aiemminkin käytetty tutkimustarkoituksiin ja energiansäästöhankeeseen, joten simulaattoria voidaan jo pitää sen verran paikkaansa pitävänä, ettei ainakaan suuria muutoksia tarvita. Antti-Teollisuuden dataa on nyt käytettävissä huomattavan paljon, joten nyt voidaan tutkia simulaattorin vastaavuutta suurella määrällä kuivauseriä monelta eri vuodelta ja monelta erilaiselta kuivurilta. Suurella vertailudatalla saamme tutkimukseen aiemmissa tutkimuksissa kaivattua luotettavuutta.

Simulaattorin käytön helpottamiseksi sille on kehitetty graafinen käyttöliittymä (Kuva 8). Käyttöliittymään annetaan kuivaustapahtuman lähtöarvot. Lähtöarvoina simulaattorille pitää antaa seuraavat parametrit: Viljan alkukosteus w.b. (%), viljan tavoitekosteus w.b. (%), kuivattavan viljan keskimääräinen hehtopaino, ulkoilman lämpötila (°C), ulkolämpötilan RH (%), kuivauslämpötila (°C), kiertonopeus, pisin mahdollinen kuivausaika (varotoimi ettei simulaattori jää pyörimään), ilmamäärä ( $m^3/h$ ) sekä kuivauskennon mitat ja määrä. Muuttujien asettamisen lisäksi voidaan valita millaisen graafin käyttöliittymä piirtää. Tämän jälkeen simulaatio voidaan ajaa. Simulaatiossa eri laskennan vaiheet tapahtuvat kuvan 9 mukaisesti. Ensimmäisenä simulaattori laskee kylmän ulkoilman sisältämän vesimäärän. Seuraavaksi simulaattori lämmittää kuivausilman ja laskee lämpimän kuivausilman suhteellisen kosteuden. Tämän jälkeen lasketaan poistoilman lämpötila sekä kosteus ja viljan tasapainokosteus. Seuraavaksi viljaa kuivataan ja lasketaan kuinka paljon kerroksesta poistui vettä sekä lasketaan myös lämpöhäviöt ja energiankulutus. Kun kuivauskierros on lopussa, simulaattori tarkastaa onko vilja kuivunut jo tavoitekosteuteen. Mikäli vilja ei ole kuivunut, palataan takaisin uudelle kierrokselle, jos taas vilja on kuivunut, tulokset näkyvät graafisessa käyttöliittymässä. Simulaatio antaa tulokseksi kuivaukseen tarvittavan keskimääräisen uunin tehon (kW), kuivaajan tilavuuden, varastokennoissa olevan viljapatsaan korkeuden, kuivaajan korkeuden sekä kuivauskerroksen paksuuden ja simuloidun viljaerän painon. Graafeista valittavissa on: ilman vesisisältö, ilman RH, poistoilman ja viljan lämpötila sekä viljan kosteus w.b. ja d.b.

Simulaattorissa viljamassaa käsitellään ohuina kerroksina, joissa kuivausilma siirtyy kerroksesta toiseen. Kerrosten välillä kuivausilman kosteus nousee ja lämpötila laskee samalla kun kerroksessa olevan viljan kosteus pienenee. Laskennassa hyödynnetään ohutkerrosyhtälöä, jossa aikavälillä  $\Delta t$  jyvien kosteuspitoisuus  $w$  (d. b.) ohuessa kerroksessa siirtyy kohti tasapainokosteutta tietyssä ilman lämpötilassa ja suhteellisen kosteuden RH olosuhteissa (Tiusanen ym. 2013). Simulaattori hyödyntää modifioitua Henderssonin yhtälöä tasapainokosteuden  $W_{eq}$  laskemiseksi (Kaava 1). Seuraavan viljakerroksen kosteuden  $W_{new}$  laskemiseksi aikavälin  $\Delta t$  jälkeen käytetään Page mallia (ASAE

S448) (Kaava 2). Viljan kosteuden siirtymisen eli diffuusion nopeus lasketaan k- arvo yhtälöllä (Kaava 3) kaava on vehnälle. Simulaattori ottaa huomioon myös viljan kutistumisen kuivauksen aikana. Aina kun vettä on haihdutettu enemmän kuin yksi 1 cm paksuinen viljakerros painaa, poistetaan yksi kerros päältä ja jaetaan sen vesiosuus jäljelle jääneille kerroksille (Tiusanen ym. 2013).



Kuva 9. Kaavio simulaattorin laskennan eri vaiheista. Kuva: Lassi Pöyhönen.

$$W_{eq} = \frac{1}{100} * \left( \log \left( \frac{1-RH}{100} \right) / (-A * (T + B)) \right)^{\frac{1}{C}}, \quad (1)$$

jossa

$W_{eq}$ = Tasapainokosteus

A, B, C= Vakioita (Muutettu Hendersonin yhtälö)

T= Lämpötila

W=jyvien kosteus (d. b.).

$$W_{new} = W_{eq} + (W_{in} - W_{eq})e^{-k\Delta t}, \quad (2)$$

jossa

$W_{new}$ =Seuraavan viljakerroksen kosteus

$W_{in}$ =Tuleva kosteus

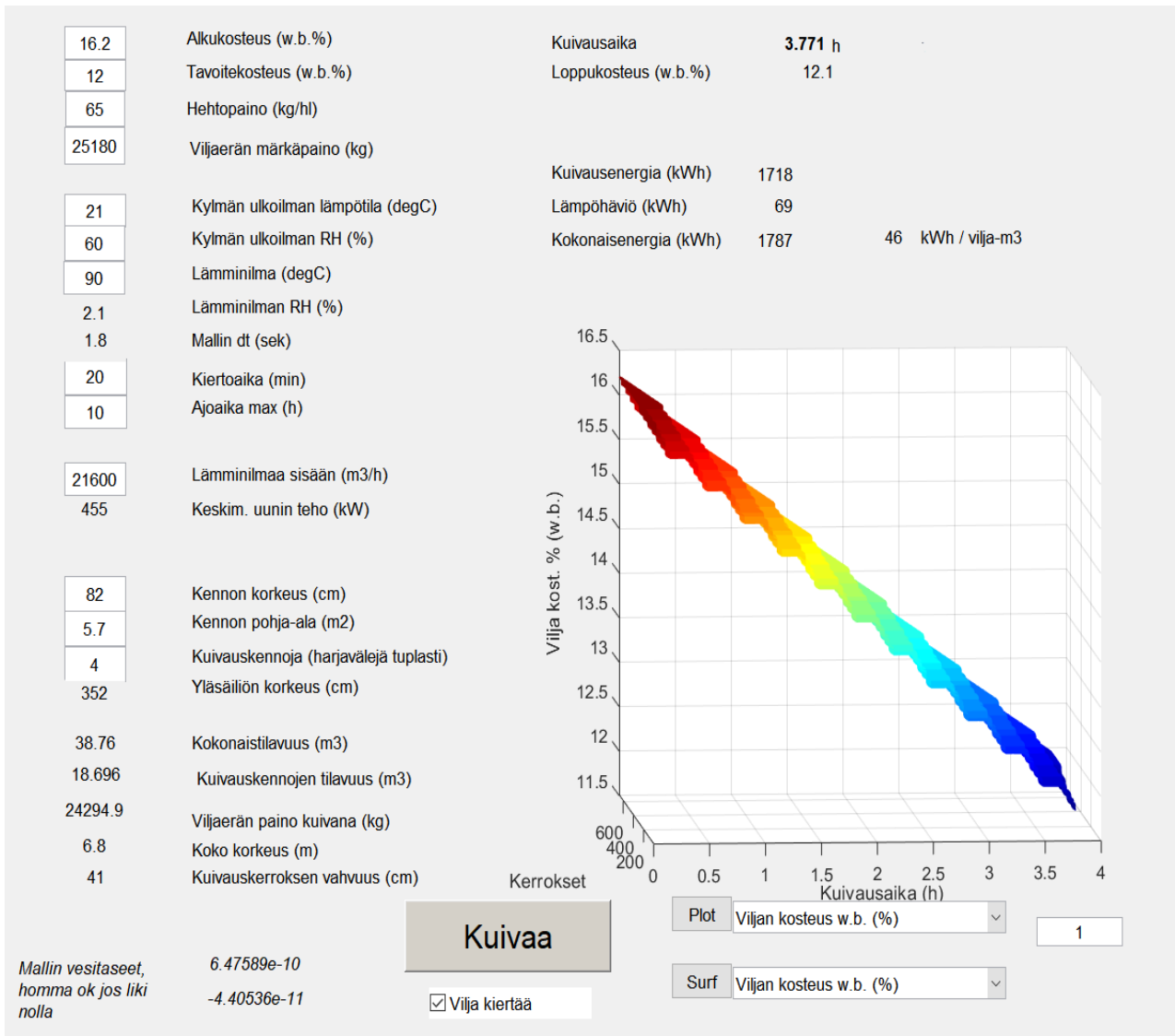
$\Delta t = \text{Aikaväli}$

$$k = 2000 e^{-\frac{5094}{T}}, \quad (3)$$

jossa

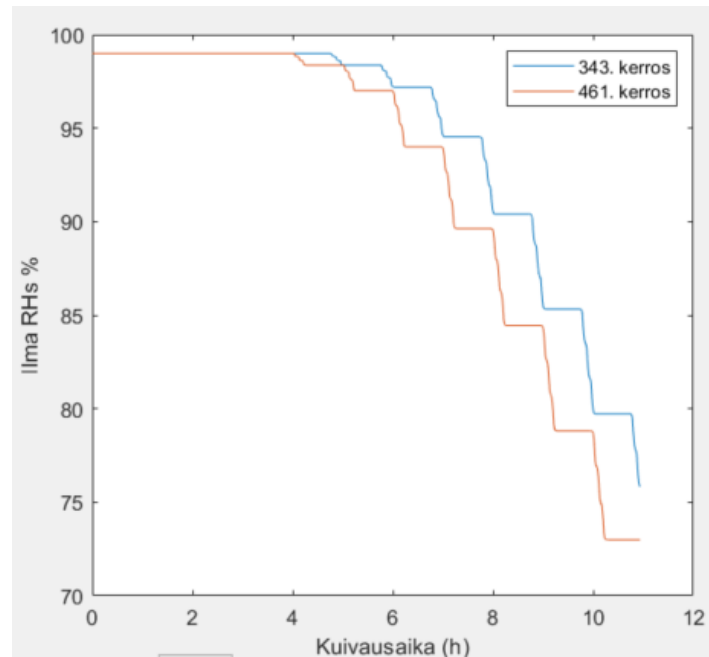
$k = \text{Nopeus}$ , jolla kosteus siirtyy viljasta pois

Simulaattorin käyttöliittymään (Kuva 10) tein tätä tutkimusta varten pieniä muutoksia. Käyttöliittymä on nyt järjestelty paremmin sekä muutettu hieman simulaattorin käyttämiä parametreja. Tässä versiossa simulaattorille annetaan viljan hehtopaino ja viljaerän märkätaino. Näistä tiedoista simulaattori laskee kuivattavan viljan määrän. Aiemmassa versiossa viljan määrä oli laskettu kuivurin täyden tilavuuden mukaan. Simulaattorille annetaan tässäkin versiossa kennojen mitat, mutta varastokennoissa olevan viljamäärän simulaattori laskee kuivattavan viljan määrän mukaan. Toinen muutettu asia oli kuivausilman määrän kertominen simulaattorille. Aiemmin määrä piti kertoa kuutiota ilmaa per viljakuutio, joka tietenkin vaihtui kuivurin koon mukaan. Nyt kuivausilman määrä annetaan simulaattorille triviaalimmin kuutiota ilmaa tunnissa.



Kuva 10. Simulaattorin graafinen käyttöliittymä. Kuva: Lassi Pöyhönen.

Simulaattori jakaa kuivattavan viljamassan 1 cm korkuisiksi levyiksi. Tämän ohuen kerroksen viljamassan voidaan olettaa olevan ominaisuuksiltaan täysin samanlaista. Laskutoimitukset toistetaan aina siirryttäessä kerroksesta seuraavaan. Simulaatiossa ilmassa puhalletaan kerroksesta toiseen ja se kuivattaa viljakerrosta, mikäli tasapainokosteutta ei ole saavutettu. Simulaattorin tuloksia tarkastellessa huomataan kuivauksen alussa poistoilman suhteellisen kosteuden pysyvän 100 %, näin tapahtuu myös oikeassa kuivaustilanteessa, kun kuivauksen alussa pintakosteus irtoaa jyvistä helposti. Poistoilman kosteus alkaa tippua kuivauksen loppua kohden (Kuva 11), kun vesi diffuusioituu jyvän ytimestä kohti pintaa hitaammin kuin ilma pystyisi sitä kuljettamaan pois.



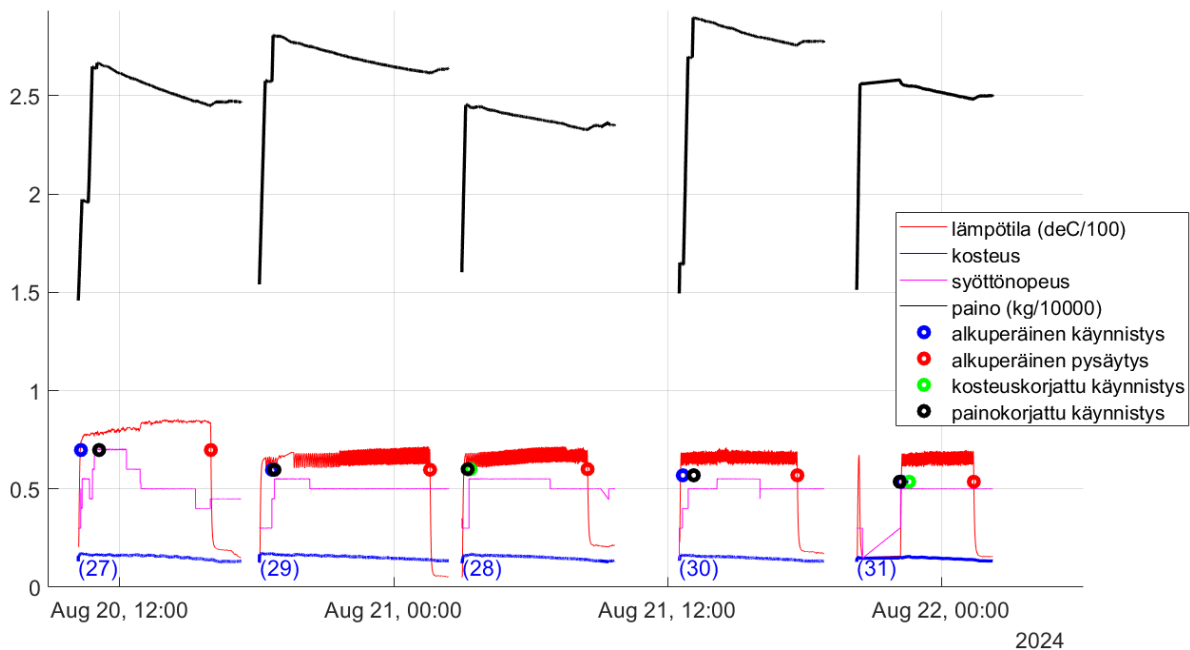
Kuva 11. Simuloidun kuivaustilanteen poistoilman RH%. Kuva: Lassi Pöyhönen.

### 5.3 Datan hankinta ja suodatus

Simulointia varten Antti-Teollisuuden datasta valittiin laadukasta dataa 14 eri viljankuivurista yhteensä 223 kuivauserää. Erissä oli mukana kaikenkokoisia viljankuivureita, pitkiä ja lyhyitä kuivauseriä sekä eri viljalajeja. Kyseisiä eriä voidaan pitää kattavana otoksena vuoden 2024 viljankuivauksista. Syksyn 2024 trendinä kuivauserien suhteen oli pääasiassa lyhyet kuivauserät sillä syksy suosi puintikelejä. Viljankuivurit valittiin järjestyksessä uusimmista 2024 syksyille valmistuneista viljankuivureista lähtien sen mukaan, kun viljankuivausdataa ja tietoa viljankuivurin rakenteesta oli saatavilla. Uusimmissa kuivureissa oletettiin olevan viimeisimmät mittauslaitteet juuri kalibroituina käytössä. Mukaan otettiin myös muutama vanhempi kuivuri, joista tiedettiin saatavan laadukasta viljankuivausdataa. Joistain dataa keräävistä kuivureista emme saaneet yhtään kuivauserää ilmeisesti jonkin mittausvirheen takia ja näitä kuivureita tai sellaisia kuivureita, joista olisi saatu vain yksittäisiä kuivauseriä ei otettu mukaan tutkielmaan.

Aluksi raakadata piti kerätä SQL- tietokannasta. Tietokannassa kaikkien kuivureiden kaikki data ajalta, jolloin kuivuri oli ollut aktiivisena, oli yhdessä tietokannan osiossa. Ultima- laitteisto kerää dataa kuivureista kuuden sekunnin välein kuivurin ollessa aktiivisena. Raakadastaa suodatettiin kuivurikohtaisia kuivaustietoja seuraavilla parametreilla: Asetettu kuivauslämpötila yli 50 astetta, kuivauserän paino yli 2000 kg, syöttölaitteen nopeus yli 0 sekä kuivurin numero. Näillä parametreilla saatiin suodatettua kuivurikohtaisesti sellaista kuivausdataa, joka oli kerätty vain todellisesta

kuivaustapahtumasta, eikä siinä ole mukana esimerkiksi koekäytön aikana kerättyä dataa. Data saatiin näin kuivurikohtaisesti eroteltua, mutta edelleen kaikki kuivauserät olivat samassa ja kuivausdataa oli jopa 120 000 riviä kuivuria kohden. Antti Lajunen kehitti MATLAB skriptin, jolla saatiin eroteltua eri kuivauserät erilleen toisistaan. Skripti yhdisti raakadatasta kuivauserät, kuivausajan, kuivauslämpötilan, aloitus ja lopetuskosteuden sekä kuivatun erän painon kuivauksen alussa sekä lopussa (Kuva 12). Koodi erotteli kuivauserät kuivauksen aloitusajan ja lopetusajan mukaan, jotka löytyivät SQL- tietokannasta erillisestä osiosta.



Kuva 12. MATLAB skriptillä kuivausdatasta eroteltuja kuivauserätietoja. Kuva: Antti Lajunen.

## 6 TULOKSET

### 6.1 Simuloinnin tulokset

Kuivauserät simuloitiin syöttämällä todellisten viljankuivauserien mukaiset parametrit simulaattoriin. Simulaattoriin syötettiin arvioitu kuivauksessa käytetty ilmamäärä, kuivurin koko, kuivauserän alkupaino, kuivauserän alku- ja loppukosteus sekä kuivauslämpötila. Tuloksiksi saatiin simuloitu kuivausaika ja simuloidun kuivauserän paino kuivattuna sekä energiankulutustiedot.

Simuloinnin tuloksia nähdään taulukossa 1. Taulukossa 1 on vain kuivurin 2 kuivauserät esimerkkinä simuloinnin tuloksista. Kuivauseriä simuloitiin yhteensä 223. Kaikkien kuivureiden osalta tuli

samankaltaisia tuloksia. Simulaattorin kuivausaika oli lyhyempi kuin todellinen kuivausaika. Kuivausajat olivat syksyllä 2024 hyvin lyhyitä. Jo keräystä datasta päätettiin poistaa vielä erät, joissa kuivauksen aikana kosteuden muutos oli ollut alle 1 % w.b. Tämä siksi, että joko näissä erissä kosteuden mittausta ei ole onnistunut, tietojen kerääminen datasta on epäonnistunut tai kuivauksen tavoitteena ei ole ollut varsinainen kuivaus vaan esimerkiksi viljan puhdistus. Näissä erissä jo lähtökosteus on ollut hyvin alhainen. Tällaiset erät olivat kuitenkin ihan yksittäisiä, vain yhden kuivurin osalta jätettiin neljä erää pois.

Taulukko 1. Syksyn 2024 kuivuserien simulointituloksia kuivuri 2.

Kuivuserä	Kosteuden muutos	Massan muutos	Kuivausaika	Simuloitu kuivausaika
1	2,8 %	1360 kg	3,59 h	2,40 h
2	2,2 %	620 kg	3,79 h	2,70 h
3	4,8 %	1840 kg	4,83 h	3,97 h
4	2,9 %	440 kg	2,20 h	1,88 h
5	4,0 %	2100 kg	5,34 h	3,51 h
6	1,8 %	200 kg	0,79 h	1,98 h
7	5,4 %	1340 kg	4,15 h	3,42 h
8	5,9 %	2100 kg	6,34 h	5,22 h
9	4,0 %	1780 kg	5,05 h	3,77 h
10	3,4 %	1540 kg	6,02 h	4,11 h
11	4,8 %	1400 kg	5,19 h	4,50 h
12	4,4 %	1780 kg	6,41 h	4,67 h
13	2,2 %	2140 kg	4,90 h	1,95 h
14	2,8 %	1140 kg	5,13 h	3,10 h
15	2,7 %	1900 kg	6,82 h	3,40 h
16	2,3 %	1380 kg	4,54 h	3,20 h
17	1,6 %	640 kg	2,83 h	2,20 h
18	1,9 %	680 kg	3,21 h	2,23 h
19	4,4 %	780 kg	2,11 h	2,24 h
20	4,5 %	780 kg	1,91 h	2,78 h

Todellisen mittaustuloksen ja simuloidun tuloksen eroa eli virhettä analysoitiin laskemalla keskivirhettä (Kaava 4). Keskivirhe laskettiin kuivaajakohteisesti (Kuva 12), jolloin voitiin arvioida simulaattorin vastaavuutta kyseiseen viljankuivaamoon sekä kyseisen viljankuivurin datan

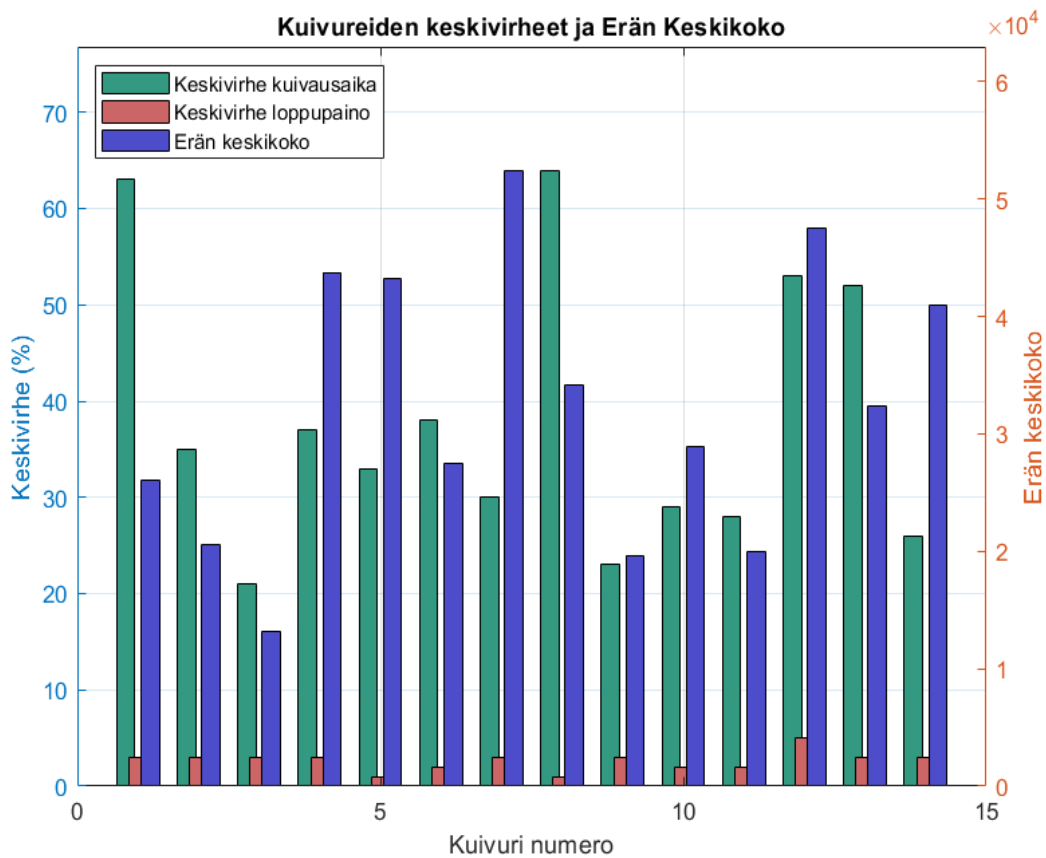
oikeellisuutta. Kuivausajankeskvirhe kertoo simuloitun kuivausajan eroavaisuudesta todelliseen kuivausaikaan. Loppupainon keskvirhe kertoo simuloitun kuivauserän loppupainon ja todellisen kuivausajan erosta. Kuvaajassa myös kuivauserien keskikoko.

$$\frac{T_{sim}-T_{real}}{T_{real}} * 100\%, \quad (4)$$

jossa

$T_{sim}$  = Simuloitu kuivausaika

$T_{real}$  = Todellinen kuivausaika



Kuva 12. Kaikkien simuloitujen kuivureiden keskimääräinen eräkoko, keskvirhe kuivatun viljaerän painon ja kuivausajan suhteen. Kaikkien kuivureiden keskimääräinen virhe oli kuivausajan suhteen 38 % ja kuivatun viljaerän painon suhteen 3 %.

## 6.2 Optimaaliset parametrit

Tavoitteena oli myös arvioida simulaattorin käytettävyyttä kuivurin optimaalisten parametrien löytämiseen. Tätä varten simuloitiin kuivurin 2 kuivauserät uudestaan, siten että muutettiin

kuivauslämpötilaksi 90 astetta (Taulukko 2). Aiemmin todettiin että, kuivauslämpötilan nostaminen parantaa kuivauksen energiatehokkuutta ja lyhentää kuivausaikaa. Kuivurissa 2 oli käytetty kuivauslämpötilana 60–80 °C.

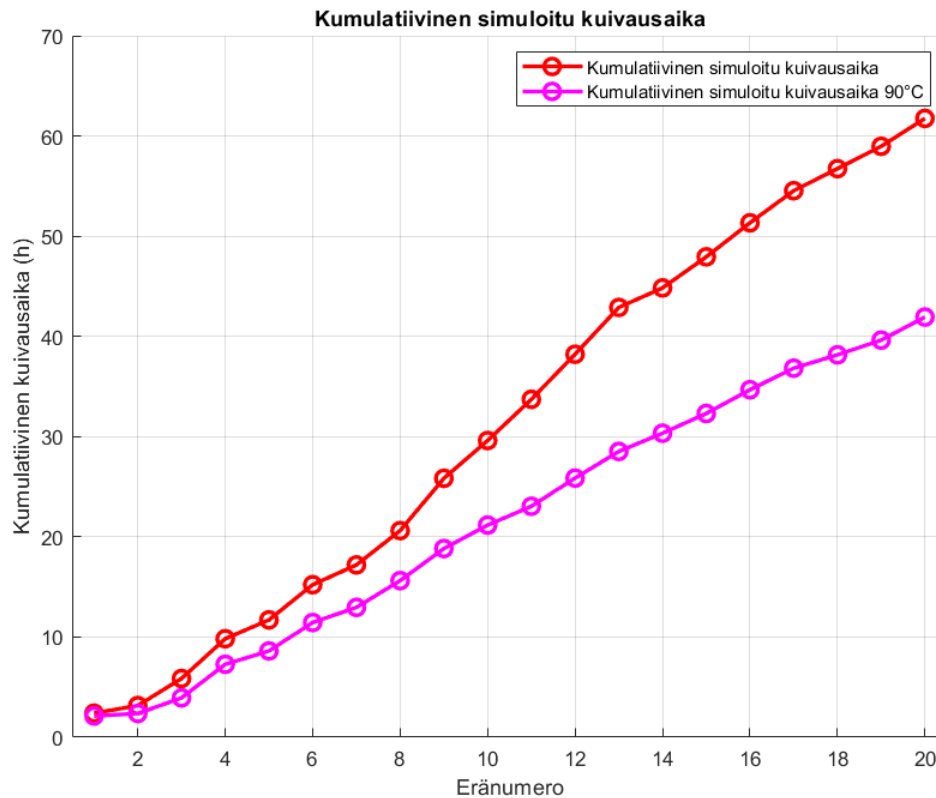
Taulukko 2. Syksyn 2024 kuivuserien simulointituloksia kuivuri 2.

Kuivuserä	Kuivausaika h	Simuloitu kuivausaika 1	Simuloitu kuivausaika 2
1	3,59 h	2,40 h	2,12 h
2	3,79 h	2,70 h	1,56 h
3	4,83 h	3,97 h	3,35 h
4	2,20 h	1,88 h	1,33 h
5	5,34 h	3,51 h	2,84 h
6	0,79 h	1,98 h	1,51 h
7	4,15 h	3,42 h	2,67 h
8	6,34 h	5,22 h	3,20 h
9	5,05 h	3,77 h	2,34 h
10	6,02 h	4,11 h	1,88 h
11	5,19 h	4,50 h	2,81 h
12	6,41 h	4,67 h	2,66 h
13	4,90 h	1,95 h	1,82 h
14	5,13 h	3,10 h	1,97 h
15	6,82 h	3,40 h	2,37 h
16	4,54 h	3,20 h	2,15 h
17	2,83 h	2,20 h	1,33 h
18	3,21 h	2,23 h	1,47 h
19	2,11 h	2,24 h	1,97 h
20	1,91 h	2,78 h	2,30 h
Kokonaisaika	85,17 h	63,23 h	43,65 h

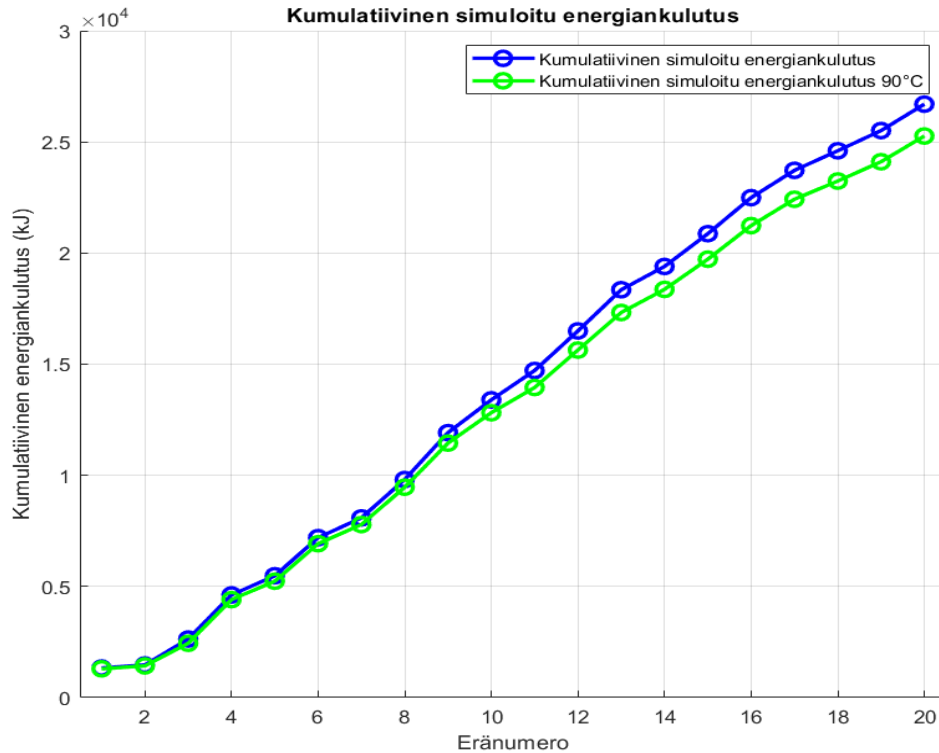
Simuloitu kuivausaika 1 kuivauslämpötila on sama kuin todellisessa tilanteessa ja kuivausaika 2 on simuloitu 90 asteen lämpötilassa.

Taulukosta 2 huomataan kuivausajan lyhentyvän, kun kuivauslämpötila nostettiin simuloinnissa 90 asteeseen. Kuivuserät olivat 31 % lyhyempiä korkeamman kuivauslämpötilan ansiosta. Koko syksynä kuivaajaan olisi kertynyt 20 h vähemmän kuivaustunteja, mikäli olisi voitu käyttää koko syksy 90 asteen kuivauslämpötilaa (Kuva 13). Myös energiankulutuksen muutosta seurattiin ja

simulointien mukaan jokaisesta erästä energian kulutus tippui noin 5 % (Kuva 14). Tämä vastasi noin 200 € säästöä kuivauskustannuksissa. Arvio on suuntaa antava, sillä vaikka simulaattori ottaa huomioon niin kuivauskennoissa ja varastokennoissa tapahtuvan lämpöhäviön, kertoimet lämpöhäviöille olivat vain arvioita.

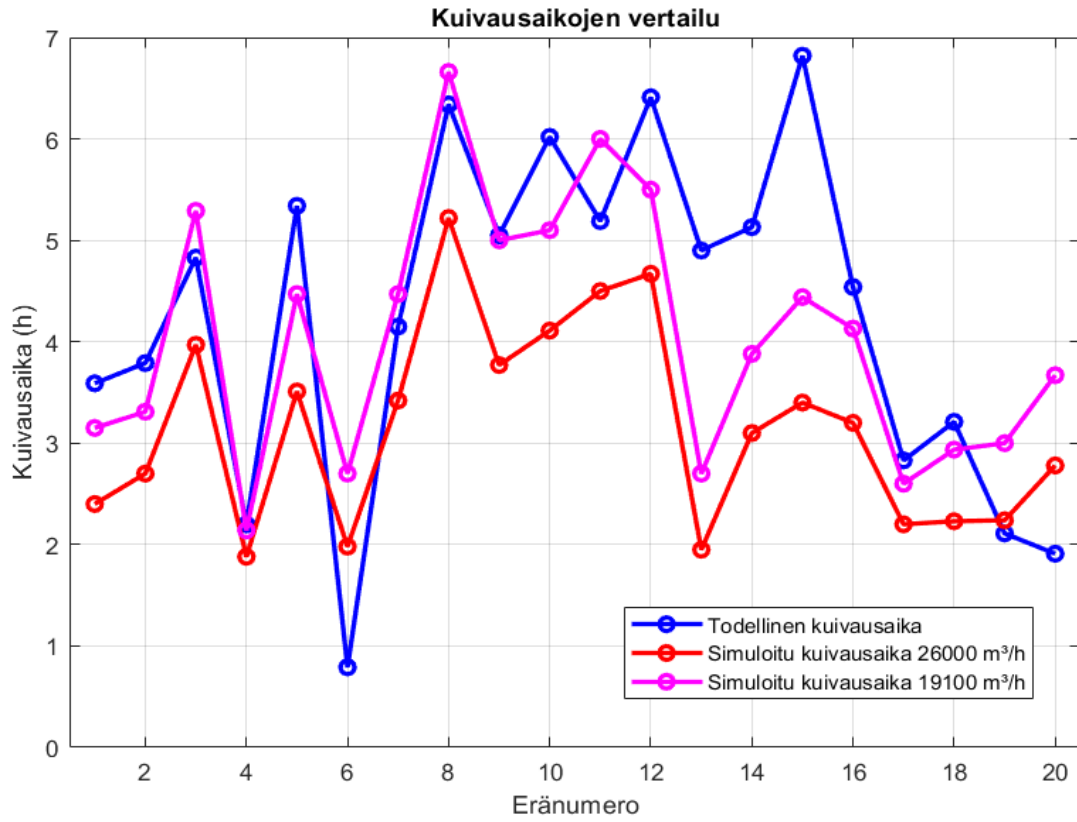


Kuva 13. Kuivurin 2 simuloitua kuivausajata todellisilla kuivauslämpötiloilla sekä 90 asteen lämpötilassa kumulatiivisesti esitettyinä.

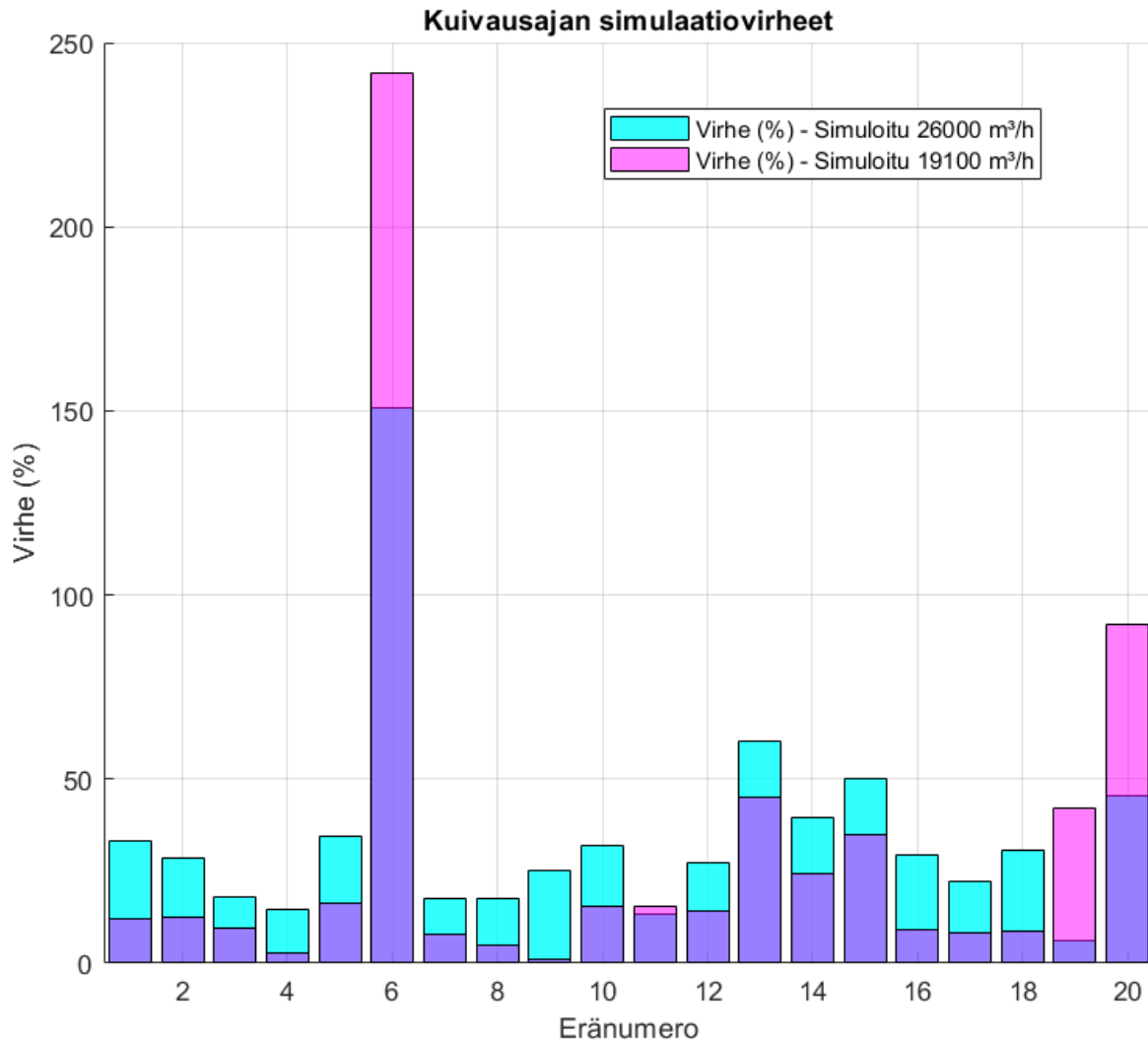


Kuva 14. Kuivaajan 2 kumulatiivinen energiankulutus todellisilla kuivauslämpötiloilla sekä 90 asteen kuivauslämpötilalla.

Kuivausaikaan vaikuttaa merkittävästi kuivausilman määrä. Kuivausilman määrästä, ei ollut mittaustietoa eikä ollut varmuutta, kuinka hyvin taulukoista katsottu ilmamäärä pitäisi paikkaansa, joten tehtiin seuraava testi. Kuivurin 2 simulaatiot toistettiin pienemmällä ilmamäärällä. Pienemmällä siksi, että simuloitua kuivausajaa pidennettyä. Haarukoimalla ilmamääräksi määritettiin 19100m<sup>3</sup>/h. Alun perin taulukoista ilmamääräksi oli arvioitu ilmamääräksi 26000m<sup>3</sup>/h. Kuivurin 2 simulaatiot korjauksen jälkeen olivat kuvan 15 ja 16 mukaiset.



Kuva 15. Kuivurin 2 kuivuserien vertailua kuivausaikojen mukaan.



Kuva 16. Kuivurin 2 kuivauserien simulaatiovirheet suhteessa alkuperäiseen kuivausaikaan.

Kuvan 15 kuvaajasta selviää, että pienemmällä kuivausilman määrällä päästään lähemmäs todellista kuivausaikaa. Kuvasta 15 huomataan selkeästi suurempina virheinä erä 6. Sitä lähemmin tarkasteltaessa lähtötiedoissa on jokin virhe. Painon mukaan erän olisi todellisesti pitänyt olla pidempi. Huomataan myös, että erän 11 jälkeen virheet kasvavat. Tässä luultavasti kuivurin käyttäjä on muuttanut ilmamäärää, jolloin simulaattorinkin ilmamäärää pitäisi taas muuttaa.

## 7 TULOSTEN TARKASTELU

### 7.1 Kerätyn datan tarkkuus

Viljankuivureista kerätyssä datassa voi olla kosteuden mittauksessa virhettä. Virhe voi johtua likaisesta kosteusmittarin anturista tai puutteellisesta kalibroinnista. Luotettavaa jatkuvaa kosteuden mittausta on haastavaa toteuttaa kosteissa, kuumissa ja pölyisissä olosuhteissa. Viljankuivureiden vaakatieta voidaan kuitenkin pitää hyvin luotettavana, sillä kun se kerran kalibroidaan tarkasti, pitää se hyvin paikkaansa eikä siihen vaikuta edellä mainitut olosuhteet. Vaakatiedon avulla pystyttiin jo simulointivaiheessa näkemään, mikäli oletetusti kosteudenmittauksessa oli virhettä. Selkeästi virheelliset erät poistettiin, mutta erät, joissa oli vain kosteudenmittauksessa pientä oletettua virhettä, pidettiin mukana analyyseissä. Selkeästi virheellisissä erissä oli esimerkiksi alkupaino loppupainoa pienempi tai alkukosteus loppukosteutta pienempi.

Yksi selkeä epävarmuustekijä datan keräyksessä oli kuivausilman määrä. Kuivausilman määrästä ei saatu mittaustuloksia viimeisyksyisen datan tallennuksen ongelman vuoksi. Kuivausilmaa mittaamaan on uusimpiin Antti-kuivureihin asennettu ilmanpaine anturointi. Anturointi mittaa paine-eroa ennen ja jälkeen puhaltimen. Ilmanpaineen mittauksen avulla tulevaisuudessa pystyttäisiin tarkemmin kuivausilman määrä määrittelemään. Tässä tutkielmassa päädyttiin arvioimaan kuivausilman määrä puhaltimien taulukkoarvojen ja datasta saatavan puhaltimen taajuusmuuntajan asetuksen perusteella. Tämä oli aika hyvä arvio ilmamäärästä, vaikkei voitukkaan huomioida esimerkiksi erilaisia putkistoratkaisuja ilman tulo tai poistupuolella, jotka voivat vaikuttaa vastapaineeseen ja sitä kautta kuivausilman määrään.

## **7.2 Simuloidun datan tarkkuus**

Simulaattorin tuottamat tulokset olivat systemaattisia eli simulaattori tuottaa yhtä tarkkaa dataa viljankuivauksesta kuin sille syötettävät parametritkin olivat. Simuloinnin tarkkuutta pystyttiin hyvin arvioimaan simuloidun painon suhteessa todelliseen kuivauserän loppupainoon. Ero oli pääasiassa 2–3 % välillä. Vain yksi kuivuri erottui yli 5 % erolla, mutta siinä voidaan olettaa olleen virhettä kosteuden mittauksessa. Kosteuden mittauksen tarkkuus näkyi sen takia heti tuloksissa, koska simulaattoriin syötetään kuivauserän alkukosteus ja loppukosteus todellisista mittauksista ja simulaattori laskee kuivausajan tälle kosteuden poistumalle. Kun tiedetään myös kuivauserän alkupaino ja loppupaino, sekä voidaan olettaa poistuvan painon olevan käytännössä pelkkää vettä, voidaan nähdä, ettei kosteuden mittaus pitänyt aina paikkaansa. Joissain tilanteissa painon erotuksen mukaan kosteuden muutos olisi pitänyt olla suurempi kuin oli mittausten mukaan. Kyseisen viljankuivaamon kuivauserät simuloitiin uudestaan käyttämällä kosteuden muutokseen viljaerän

painon muutosta. Tällöin kyseisen kuivurin simuloitujen tulokset olivat yhtä tarkat tai jopa tarkemmat kuin muilla kuivureilla.

Itse simulaattorin osalta epätarkkuutta saattaa aiheuttaa käytetty  $k$ -arvon kaava 3 on tarkoitettu kuvaamaan kosteuden siirtymistä pois vehnän jyvistä. Modifioituun Henderssonin yhtälöön (Kaava 1) on tasapainokosteuden määrittämiseksi vakiot A, B ja C, jotka on määritetty kirjallisuuden avulla. Luultavasti näissäkin vakioissa on käytetty vehnän arvoja. Simuloitujen kuivauserät sisälsivät kuitenkin niin vehnää, ohraa kuin kauraakin.  $K$ -arvolle sekä Henderssonin yhtälön vakioille löytyy taulukkoarvo myös muille viljalajeille, mutta sitä ei lähdetty muuttamaan, sillä ei ajateltu olevan suurta tai ainakaan suurinta merkitystä tässä tilanteessa. Tiusasen ym. (2013) mukaan eri viljalajien kosteuden siirtymisessä on eroja viljalajien keskeisen eron lisäksi myös vuosikohtaisesti. Mikäli haluttaisiin oikein tarkka arvio  $k$ -arvosta, pitäisi joka syksy määrittää ohutkuivausmenetelmällä jokaiselle viljalajille vuosikohtainen  $k$ -arvo.

### 7.3 Simulaattorin käytettävyys

Simulointi tuottaa hyvin samankaltaista dataa oikeiden kuivaustulosten kanssa. Tulosten mukaan simulointi antaa pääasiassa pienemmän kuivausajan kuin todellisessa kuivaustapahtumassa on ollut, kaikkien kuivureiden keskimääräisen kuivausajan virheen ollessa 38 %. Toisaalta simuloitu kuivatun viljaerän paino antaa hyvin lähelle samoja arvoja kuin todellisuudessa on ollut, kaikkien kuivaajien keskimääräinen virhe kuivatun viljaerän suhteen oli vain 3 %. Simulaattori pystyy siis simuloimaan hyvin kosteuden poistumista viljamassasta. 3 % on niin pieni ero (keskimäärin 965 kg/32000 kg erästä), että se voi selittyä kuivauksen aikana esipuhdistajan kautta poistuvien roskien painosta. Simuloinnin kuivausaikaan vaikuttaa oleellisesti kuivausilman määrä. Kuivausilman määrä oli määritetty taulukkoarvojen avulla arvioiden. Tulosten perusteella voidaan olettaa arvioitu kuivausilman määrä liian suureksi. Huolimatta tämän tutkielman tutkimusten suuresta virheestä kuivausajan suhteen, tällä simulaattorilla voidaan luotettavasti simuloida kuivausaikaa, kunhan simulaattorille syötettävät parametrit ovat tarkkoja ja vastaavat juuri sitä viljankuivuria, jota ollaan simuloimassa.

Simulaattori on hyvin käyttökelpoinen työkalu viljankuivauksen arviointiin ja kuivausparametrien hakemiseen. Simulointi on nopea tapa testilla eri parametrien vaikutusta viljankuivauksen nopeuteen ja energiankulutukseen. Viljankuivausparametrien ollessa tarkkoja, voidaan simulaattorilla myös arvioida kuivauserien onnistumista. Voidaan olettaa simulaattorin toimivan hyvin vertailukohtana,

johon verrata todellisen kuivauserän kuivausaikaa, sillä simulaattori kuivaa viljaerän aina vakio-olosuhteissa, johon esimerkiksi sääolosuhteet eivät vaikuta. Vakio-olosuhteet ovat myös hyödyksi optimaalisten kuivausparametrien etsinnässä. Vakio-olosuhteissa nähdään simulointituloksista vain muutetun parametrin vaikutus kuivaustulokseen.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkielman tavoitteena oli selvittää voiko viljankuivausta simuloida luotettavasti ja voiko sillä arvioida viljankuivauksen onnistumista sekä määrittää optimaalisia viljankuivausparametreja.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että viljankuivausta voidaan luotettavasti simuloida yksittäistä viljankuivuria, mikäli kaikki tarvittavat kuivausparametrit tiedetään. Simulaattori vastaa hyvin todellista kuivaustapahtumaa painon muutoksen eli kosteuden poistumisen ja viljan kuivumisen osalta. Kuivausajan suhteen simulaattori ei ollut niin tarkka. Huomattiin että simulaattorille on annettava tarkempia parametreja. Kuivausajan suuri erotus selittyy luultavasti virheellisestä kuivausilman määrä arvioinnista. Simulaattoria voidaan myös hyödyntää parempien kuivausparametrien löytämiseen. Simulaattorin avulla tulos nähdään nopeasti ja helposti vakio-olosuhteissa. Vastaava testailu vaatisi oikean kuivurin osalta paljon kuivauseriä, jotta kuivausolosuhteiden vaikutus saataisiin poistettua. Simulaattoria voidaan lisäksi käyttää viljankuivauserien onnistumisen arviointiin, kunhan kaikki viljankuivaukseen liittyvät parametrin on tiedossa.

Tarkempien tulosten saamiseksi viljankuivureilta tarvitaan lisää mitattua dataa. Tärkeimpänä tarvitaan mitattu tieto käytetystä kuivausilmanmäärästä. Ilmamäärän lisäksi poistoilman suhteellisen kosteuden mittaus olisi hyvä lisä tulevaisuuden tutkimuksia varten. Pieni merkitys voi olla myös kuivauksen aikana esipuhdistimen kautta poistuvien roskien painolla. Roskien paino saattaa olla merkittävä suurissa viljankuivureissa varsinkin hyvin kostea viljaa kuivattaessa. Joissain viljankuivureissa on myös rikkaseula, joka seuloo kuivauksen aikana rikkakasvien siemeniä sekä pieniä jyviä pois kuivurista. Seulotut siemenet ja rikat voivat muodostaa jo huomattavan massan poistuman kuivurista ja se olisi otettava huomioon. Kun kaikki viljankuivaukseen liittyvät asiat on huomioitu ja mitattu, voitaisiin tulevaisuuden tutkimuksissa vielä tarkemmin tutkia simuloinnin vastaavuutta todelliseen viljankuivausprosessiin.

Kun viljankuivureilta on saatu kattavasti laadukasta dataa, simulaattorin osalta tulisi tutkia laskentakaavoissa käytettyjen vakioiden oikeellisuutta ja vaikutuksia simulointituloksiin. Varsinkin k-vakion eli viljalajikohtaisen kuivumisarvon vaikutusta ja eri viljalajien vakioiden vastaavuutta todellisiin kuivaustuloksiin tulisi tutkia tarkemmin. Simulaattoriin olisi yksinkertaista lisätä valikko, josta valitaan kuivattava viljalaji. Simulaattorin energiankulutuksen oikeellisuutta voisi myös tulevaisuudessa tutkia tarkemmin. Siinä tulisi ottaa huomioon onko kyseessä perinteinen pakettikuivuri vai erillinen vaunu- tai stand alone- kuivuri sekä onko kuivurin koneisto eristetty vai eristämätön. Simulaattorissa on hyvät laskentakaavat ja toiminnot myös energiankulutuksen simulointia varten, mutta vakiot lämpöenergian johtumisen ja konvektion osalta ovat arvioita.

## 9 KIITOKSET

Haluan kiittää kaikkia, jotka olivat edesauttamassa tämän tutkielman valmistumista. Erityiskiitokset ohjaajalle Antti Lajuselle hyvästä ohjauksesta sekä MATLAB skriptin tekemisestä tiedonkeruuta varten. Haluan kiittää myös Antti Teollisuutta sekä Antti Teollisuuden tuotekehityspäällikköä Teemu Tulkkia tutkielmaan käytetystä aineistosta sekä työn ideoimisesta.

## 10 LÄHTEET

- Ahokas, J. & Jokiniemi, T., 2014. Viljankuivaus. Energia-akatemia. Viitattu 17.1.2025  
<https://www.energia.agrotekno.fi/wp-content/uploads/2021/04/viljankuivaus.pdf>
- Alvan Blanch Group. Nettisivut viitattu 4.2.2025.  
<https://www.alvanblanchgroup.com/continuous-double-flow-grain-dryer/>
- Antti Teollisuus Oy. Materiaalipankki. Viitattu 16.1.2025  
<https://antti.fi/palvelut/materiaalipankki/kuivurit/>
- ANSI/ASAE S448.1 JUL2001 (R2006). Approved July 2001; Reaffirmed March 2006 as an American National Standard
- Arskametalli Oy. Nettisivut. Viitattu 16.1.2025.  
<https://www.arskagroup.com/arskametalli/ratkaisu/ominaisuudet/>
- Baidhe, E. & Clementson, C.L. 2024. A review of the application of modeling and simulation to drying systems for improved grain and seed quality. Teoksessa: Computers and Electronics in Agriculture 222. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109094>
- Brinker, L.J. & Johnson, A. 2010. Energy efficiency on two Wisconsin grain drying systems:

- mixed flow and continuous cross flow grain dryers. Teoksessa: ASABE Paper No. 1008958. [10.13031/2013.29774](https://doi.org/10.13031/2013.29774)
- Callaghan, J.R., Menzies, D.J. & Bailey, P.H. 1971. Digital simulation of agricultural drier performance. Teoksessa: Journal of Agricultural Engineering Research 16: 1. s. 223–244. [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(71\)80016-1](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(71)80016-1)
- Cao, C.W. Yang, D.Y. Liu, X.D. Liu, Q. 2004. Research on modeling and simulation of mixed flow grain dryer. Teoksessa: Drying Technology 25. s. 565–572. [10.1080/07373930701290951](https://doi.org/10.1080/07373930701290951)
- Valente, D.S.M. Queiroz, D. M. Silva, L.C. Santos F.L. 2012. LINSEC: the software for modeling and simulation of grain drying systems. Teoksessa: Revista Ciência Agronômica 43: 4. s. 664–673. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000400007>
- Giner, S.A. Bruce, D.M. & Mortimore, S. 1998. Two-Dimensional Simulation Model of Steady-state Mixed-flow Grain Drying, Part 1: The Model. Teoksessa: Journal of Agricultural Engineering Research 71:1. s. 37–50. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0297>
- Hautala, M., Jokiniemi, T. & Ahokas, J. 2013. Maatilakuivurit. Maataloustieteiden laitoksen julkaisusarjan nro 28. Viitattu 10.1.2025 <https://www.energia.agrotekno.fi/julkaisut/>
- Inyang, U.E., Oboh, I.O. & Etuk, B.R. 2018. Kinetic models for drying techniques-Food materials. Teoksessa: Advances in Chemical Engineering and Science 8. s. 27–48. <https://doi.org/10.4236/aces.2018.82003>
- Jokiniemi, T. & Ahokas, J. 2014. Drying process optimization in a mixed-flow batch grain dryer. Teoksessa: Biosystems Engineering 121. s. 209–220. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.01.002>
- Jokiniemi, T. 2016. Energy efficiency on grain preservation. University of Helsinki Department of Agricultural Sciences. <http://hdl.handle.net/10138/166973>
- Kirkby, N.F. 2011. Mollier Diagram. [10.1615/AtoZ.m.mollier\\_diagram](https://doi.org/10.1615/AtoZ.m.mollier_diagram)
- Liu, Q. & Bakker-Arkema F.W. 2001. Postharvest technology: automatic control of crossflow grain dryers, Part 1: development of a process model. Teoksessa: Journal of Agricultural Engineering Research 80: 1. s. 81–86. <https://doi.org/10.1006/jaer.2001.0670>
- Loewer, O.J. Bridges, T.C. & Bucklin, R.A. 1994. On-farm drying and storage systems. Teoksessa: American Society of Agricultural Engineers. s. 73-151
- Mattos, R. Garreiro, J.M. Meghirditchian, G. Ferrari, A. & Zecchi, B. 2022. Effect of modeling simplifications on behavior and computational cost for simulation of fixed bed wheat

drying process. Teoksessa: Drying Technology 40: 7. s. 1338-1355.

<https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1867564>

Miller, P.C.H. & Whitfield, R.D. 1984. The Predicted Performance of a Mixed-Flow Grain Drier. Teoksessa: Journal of Agricultural Engineering Research 30. s. 373–380.

[https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(84\)80038-4](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80038-4)

Misra, M.K. & Brooker, D.B. 1980. Thin-layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. Teoksessa: Transactions of the ASAE 23: 5. s. 1254-1260.

[10.13031/2013.34756](https://doi.org/10.13031/2013.34756)

Mujumdar, A.S. 2006. Teoksessa: Handbook of industrial drying 3.

<https://doi.org/10.1201/9781420017618>

Ngouem, F. J. Edoun, M. Monkam, L. & Tetang, A. 2021. Simulation of Convective Drying with Shrinkage using the Finite Window Method: Application and Validation. Teoksessa: American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences 78: 1. s. 39–49.

Oxley, T.A. 1948. Teoksessa: The scientific principles of grain storage.

Ruokonen, A. 2020. Simulaatiotyökalun kehittäminen viljan kuivauskapasiteetin optimointiin.

<http://hdl.handle.net/10138/322805>

Sharon, M. Priya, E.P. & Subhashini, S. 2016. Thin layer and deep bed drying basic theories and modelling: a review. Teoksessa: Agricultural Engineering International: CIGR Journal 18: 1. s. 314-325.

Suomi, P. Lötjönen, T. Mikkola, H. Kirkkari, A.-M. & Palva, R. 2003. Viljan korjuu ja varastointi laajenevalla viljatilalla. Teoksessa: Maa- ja elintarviketalous 31: 100.

<http://urn.fi/URN:ISBN:951-729-798-X>

Tiusanen, J. Jokiniemi, T. & Hautala, M. 2013. Grain dryer temperature optimization with simulation and a test dryer. Teoksessa: IFAC Proceedings Volumes 46: 18.

<https://doi.org/10.3182/20130828-2-SF-3019.00025>

Viita T. 2013. Viljan kuivauksen energiatehokkuuden selvittäminen simuloimalla.

<http://hdl.handle.net/10138/39461>

Wang, D. & Fon, D. 2005. Applications of MATLAB-based software to drying simulation.

<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:36284449>