EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Mart Saun

LOONA KUIVATI ENERGIATÕHUSUSE PARENDAMISE KAVA

ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT PLAN FOR LOONA GRAIN DRYER

Bakalaureusetöö
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendajad: lektor Külli Hovi

lektor Mart Hovi

Tartu 2020

LÜHIKOKKUVÕTE

<table>
<tr><td colspan="2">Eesti Maaülikool

F. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006</td><td colspan="2">Bakalaureusetöö lühikokkuvõte</td></tr>
<tr><td colspan="2">Autor: Mart Saun</td><td colspan="2">Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia</td></tr>
<tr><td colspan="4">Pealkiri: Loona kuivati energiatõhususe parendamise kava</td></tr>
<tr><td>Lehekülgi: 42</td><td>Jooniseid: 4</td><td>Tabeleid: 15</td><td>Lisasid: 6</td></tr>
<tr><td colspan="4">Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika
4.17. Energeetikaalased uuringud
T140 Energeetika
Juhendaja(d): lektor Külli Hovi, lektor Mart Hovi
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2020</td></tr>
<tr><td colspan="4">Antud bakalaureusetöö uurib võimalusi kuidas on võimalik vähendada teraviljakuivatusega seotud kulusid. Töö jaotatud kolmeks osaks. Esimeses osas vaadatakse kui suur on teraviljakuivatamisele kuluv energiakogus Eestis. Teises osas on teraviljakuivatusega seotud kulude vähendamise meetodite tutvustus. Kolmanda osa moodustab energiatõhususe kava, kus säästumeetmete võimalused on läbi arvutatud Loona kuivati andmeid arvestades.

Töö kokkuvõtteks on koostatud tabel, kus on välja arvutatud kui suur on iga energiasäästu meetodi rakendamisel saavutatud majanduslik kokkuhoid kuivatusportsjoni kohta ja antakse soovitused kuivati omanikule.</td></tr>
<tr><td colspan="4">Märksõnad: energiatõhusus, energiakasutus, energiasääst, teraviljakuivati</td></tr>
</table>

ABSTRACT

www.emu.ee

Eesti Maaülikool

Estonian University of Life Sciences

Estonian University of Life Sciences F. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Mart Saun		Curriculum: Engineering	
Title: Energy Efficiency Improvement Plan for Loona Grain Dryer			
Pages: 42	Figures: 4	Tables: 15	Appendixes: 6
Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering 4.17. Energetic Research T140 Energy research Supervisors: Lector Külli Hovi, Lector Mart Hovi Place and date: Tartu 2020			
This Bachelor's Thesis investigates possibilities to improve grain dryer's energy efficiency. First part of thesis investigates how much energy is used for grain drying in Estonia. Second part of thesis introduces methods that can be applied to reduce energy cost for grain drying. Third part of the thesis is a energy improvement plan for existing grain dryer. In that improvement plan energy-saving costs are calculated for each method that can be used for that drier. *To summarize the work, a table has been compiled, where the economic savings per drying batch of each energy-saving method have been calculated and recommendations are given to drier owner.*			
Keywords: energy efficiency, energy application, grain dryer			

SISUKORD

LÜHIKOKKUVÕTE ... 2
ABSTRACT ... 3
SISSEJUHATUS ... 6
1. TERAVILJA KASVUPIND NING ENERGIAKASUTUS ... 7
1.1 Teraviljakasvatus Eestis ... 7
1.2 Kasvuhoonegaaside vähendamise kohustus Eestis ... 8
2. VÕIMALIKUD ENERGIASÄÄSTU VÕIMALUSED ... 10
2.1 Teravilja kuivatuse protsess ... 10
2.2 Kuivatuse protsessiga seotud energiasäästu võimalused ... 11
2.2.1 Kuivatusõhu temperatuuri tõstmine ... 11
2.2.2 Kuivatusõhu hulga reguleerimine ... 12
2.2.3 Kuivatusõhu osaline retsirkulatsioon ... 12
2.2.4 Kuivatile soojusisolatsiooni paigaldamine ... 13
2.2.5 Soojusvaheti paigaldamine ... 13
2.3 Protsessijuhtimisega seotud energiasäästumeetmed ... 14
2.3.1 Teravilja ettevalmistamine kuivatamiseks ... 14
2.3.2 Teravilja mitme astmeline kuivatamine ... 14
2.4 Juhtimisealased energiasäästumeetmed ... 16
2.4.1 Kuivati korrektne hooldus ja põleti seadistamine ... 16
2.4.2 Soodsama kütusega kütteallika valimine ... 17
2.4.3 Ettepanekud energiasäästuks ... 17
3. ENERGIASÄÄSTU KAVA ... 19
3.1 Eesmärkide püstitamine ... 19
3.1.1 Kuivati andmed ... 19
3.1.2 Energiakoguste arvutused ... 20
3.2 Meetmete hindamine ... 22
3.3 Meetmete analüüs ja arvutused ... 23
3.3.1 Kuivatuse temperatuuri tõstmine ... 24
3.3.2 Õhukulu juhtimine ... 25
3.3.3 Soojusisolatsiooni paigaldus kuivatile ... 27
3.3.4 Kuivati hoolduse jälgimine ... 28
3.3.5 Viljaringlemise kiiruse reguleerimine ... 29
3.3.6 Mitme astmeline kuivatamine. Lõõgastusaeg ja jahutuspunkris jahutamine. 29
3.3.7 Koristusaja valimine ... 32
3.3.8 Niiskuse täpsem määramine ... 33
3.3.9 Kuivatusaja jälgimine ... 34
3.3.10 Kütuseliigi ümbervahetamine ... 35
3.4 Kokkuvõttev tabel ... 36
3.5 Rakendusplaan ... 38
KOKKUVÕTE ... 39
SUMMARY ... 40
KASUTATUD KIRJANDUS ... 41
LISAD ... 43
Lisa 1. Kuivatusõhu taaskasutamise skeem ... 44
Lisa 2. Soojusvaheti niiske väljapuhke õhu soojustagastuseks ... 45

Lisa 3. Loona kuivati andmed arvutusteks 46
Lisa 4. Elektrienergia kulu teraviljakuivatuse erinevatel režiimidel 47
Lisa 5. Fotod Loona kuivatist 48
Lisa 6. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta 51

SISSEJUHATUS

Teravilja kasvatus on muutunud Eestis järjepidevalt populaarsemaks ning viljasaak on suurenenud. Et püsida konkurentsis teiste euroopa tootjatega on ka Eestis kasutusele võetud moodsat põlluharimistehnoloogiad ning kasutatakse oskuslikult taimekaitsevahendeid. Tänu sellele on suurenenud teravilja kasvupind ning kasvanud on ka saadava vilja kogus. Seoses sellega kasvab ka selle kuivatamiseks kuluva energiakogus ning kasvab ka nõudlus kuivatusvõimsuse järgi. Käesolev uurimistöö proovib leida vastust küsimusele kui palju on võimalik teraviljakasvatust efektiivsemaks saada teravilja kuivatuse protsessi energiasäästlikumalt läbi viies.

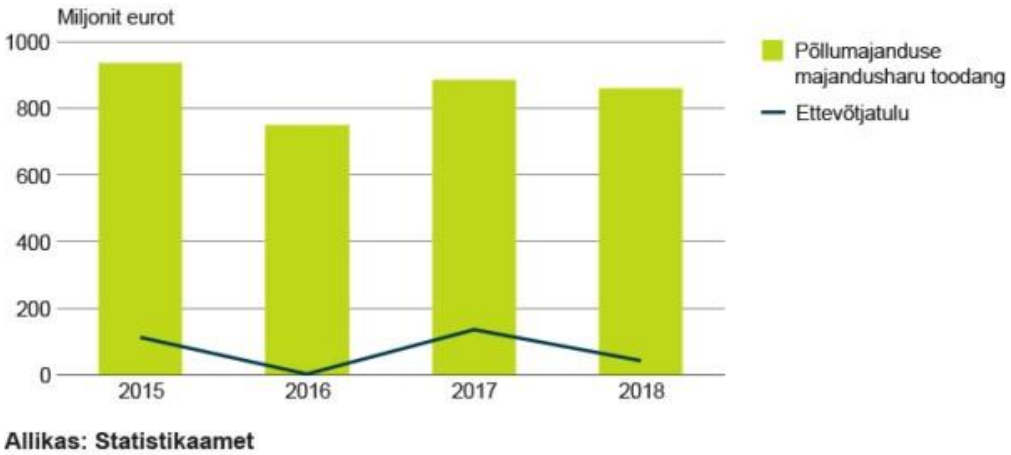
Et selgeks saada, kui oluline antud teema on vaatame 1. peatükkis kui suured kulud kuivatamisega seoses on Eestis on. 2. peatükkis uurin võimalike energiasäästu meetmeid, mida teravilja kuivatuse puhul rakendada saab ning 3. peatükkis koostan energiasäästu kava ühe kuivati jaoks, kus hindan nende meetmete rakendamisest saadavat kasu ning milliseid meetmeid antud kuivati juures rakendada on võimalik.

1. TERAVILJA KASVUPIND NING ENERGIAKASUTUS

1.1 Teraviljakasvatus Eestis

Eestis on teravilja kasvatus muutunud järjest populaarsemaks põllumajanduse haruks. Mõned sellele kaasa aitavad tegurid on olnud kõrge mehhaniseerimise ja automatiseerimise võimalikus, tugev riigipoolne toetus ning oskuslik tugi ja müügitegevus taimekaitsevahendite edasimüüjate poolt. Tänu millele on teravilja kasvupind kasvanud pidevalt suuremaks ning sellelt pinnalt saadav saak on ka kasvanud[1]. Osatakse täpselt hinnata põllumajandus masinate kasutamisel tekkinud kulusid mõne euro täpsusega nagu töömasinate kütusekulu, amortisatsioon, rehvirõhud ja töökiirused.[2] Teraviljakasvatuse taimekasvatuse pool teatakse detailselt sortide eripärasid ning teatakse mis nende kasvuks vaja läheb, täpsed mullaproovid ning selle järgi koostatud põllukaardid, mille järgi teatakse täpselt anda mullale juurde keemilisi komponente, mis taimekasvuks puudu on. Osatakse õigel ajal anda taimedele leheväetiseid, teostada taimehaiguste- ja putukatõrjeid[3]. Need muudatused on muutnud Eesti põllumehe Euroopas konkurentsivõimeliseks.

Konkurentsis püsimiseks tuleb aga tootmist pidevalt efektiivsemaks muuta, sest viljakultuuride kasvatamiseks vajalike sisendite nagu väetiste, taimekaitsevahendite, kütuste ning seemnete hinnad tõusevad. Suurenevad ka püsikulud ja muutuvkulud nagu põllutöömasinate hinnad, põllumaa rendi- ja ostuhinnad, palgakulu, kütuste hind.[2] Joonisel 1.1 on kirjeldatud põllumajandustoodang ning ettevõtjatulu 2015, 2016, 2017 ja 2018 aasta kohta.



Joonis 1.1. Põllumajandustoodang ja ettevõtjatulu[4].

Kõrge efektiivsuse tase põllumajanduse tõstatab küsimuse kas oleks võimalik detailsemalt lahti võtta ka teraviljakuivatuse protsess ning proovida optimeerida erinevaid kuivatuse etappe, et saada kiirem ja väiksemate kuludega kuivatuse ning leida energiasäästu võimalusi.

Aastatel 2012 – 2016 on keskmine teravilja, kaunvilja ja rapsiseemne kokkuostu müüdud vilja kogus 1118892 tonni[5]. Kui arvestada et need viljad olid enne kuivaks saamist niisked ning kilogrammist viljast eemaldati 0,06 kg vett ning kuivatis kulus keskmiselt 6MJ energiat 1 kg vee aurustamiseks. Siis kokku kulub selle koguse kuivatamiseks 402801241 MJ energiat ning kui see kogus arvutada ümber diislikütusesse siis seda kulub kokku 10968935 liitrit.

1.2 Kasvuhoonegaaside vähendamise kohustus Eestis

Energiakoguseid erinevate protsesside juures tuleb jälgida, sest lisaks sellele et suur energiakulu on majanduslikult kahjulik on Eesti Vabariik võtnud endale mitmeid kohustusi koos teiste Euroopa Liidu liikmesriikidega. 2018. aastal jõustusid kaks põllumajandust puudutavad kliimapoliitika õigusakti: jagatud kohustuse määrus (JKM) ja LULUCF määrus. JKM seab EL liikmesriikidele eesmärgi vähendada KHG heitkoguseid 2030. aastaks 30% võrra võrreldes 2005. aasta tasemega sektorites, mis ei kuulu heitkogustega kauplemise süsteemi. Lisaks kasvuhoonegaaside heitele on EL-is kokku lepitud ka õhusaasteainete heitkoguste piiramine. Lisaks põllumajandusele kuuluvad määruse reguleerimisalasse veel transport, jäätmekäitlus ning tööstuslikud protsessid ja väikesemahuline energiatootmine.

Eestile on pandud kohustus vähendada nimetatud sektorites KHG heidet 13% ning välja töötada parimad meetmed selle saavutamiseks. Metsanduse ja maakasutuse sektorites ei tohi koguheide ületada süsiniku kogust, mis seotakse muldades ja biomassis.[6]

Koostatud on Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030 ning selles on määratletu neli olulist punkti:

- Eesti kasvuhoonegaaside heite vähendamine 80% aastaks 2050 (sh 70% aastaks 2030):
- Jagatud kohustuse määrusega kaetud sektorites (transport, väikeenergeetika, põllumajandus, jäätmemajandus, metsamajandus, tööstus) vähendada aastaks 2030 võrreldes 2005. aastaga kasvuhoonegaaside heidet 13%:
- Taastuvenergia osakaal energia summaarsest lõpptarbimisest peab aastal 2030 olema vähemalt 42%:
- Energia lõpptarbimine peab aastani 2030 püsima tasemel 32-33 TWh/a:

Eesti majandus on kasvav ning seetõttu vajab juba tarbimise samal tasemel hoidmine olulisi meetmeid. Kumulatiivne energiasääst 14,7 TWh perioodil 2020-2030 võimaldaks hoida energia lõpptarbimist samal tasemel. Energiatarbe vähendamine saab toimuda primaarenergia tarbimise tõhusamaks muutmise läbi.[7]

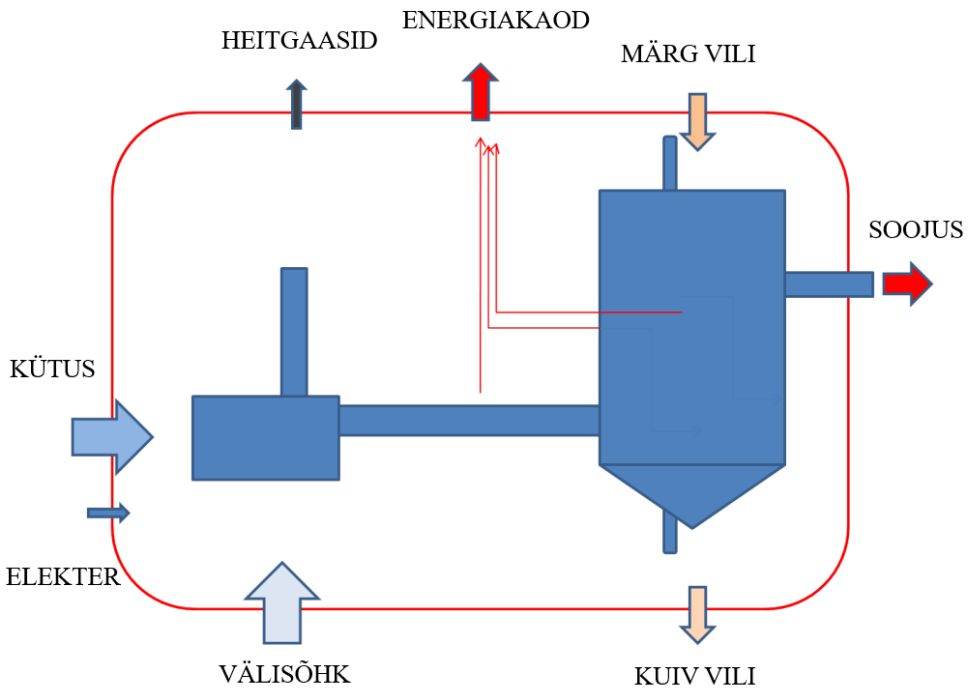
Konkreetsed meetmed on veel väljatöötamisel, kuid olulised meetmed on taastuvatest energiaallikatest toodetud kütuste kasutamine ning kasutatava energia tõhus kasutamine.

2. VÕIMALIKUD ENERGIASÄÄSTU VÕIMALUSED

2.1 Teravilja kuivatuse protsess

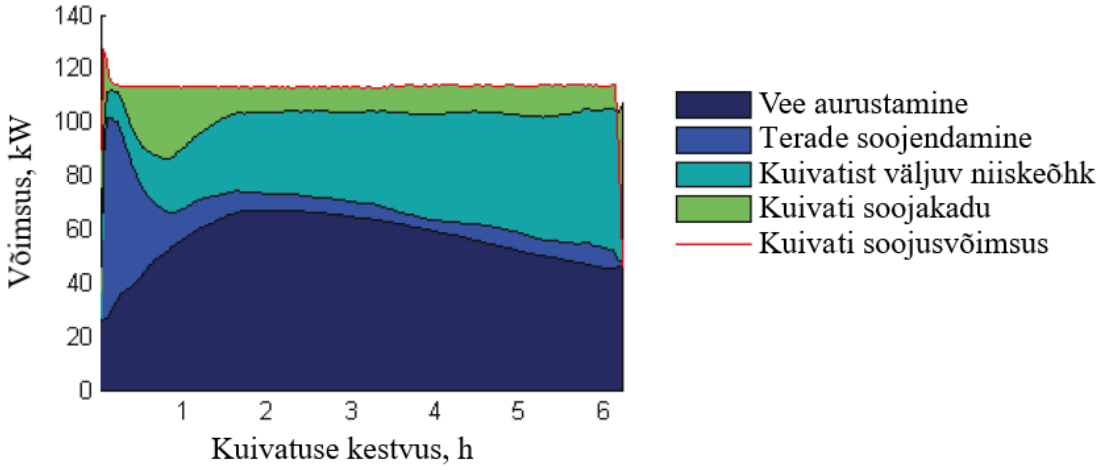
Niiskuse eraldamise materjali pinnalt ja tema seesmistest kihtidest võib lugeda üheks levinumaks tehnoloogiliseks protsessiks nii tööstuses kui ka põllumajanduses. Kuivatusprotsess on energiamahukamaid tehnoloogilisi protsesse, selle optimaalne realiseerimine annab märgatava säästu. [8: 9]

Soeõhkkuivati põhimõtteskeem on joonisel 2.1. Välisõhu soojendamiseks on vaja kütust ja elektrit. Kuivatiahjus soojeneb välisõhk ning väljuvad heitgaasid ning soe õhk kuivatisse. Kuivatisse siseneb niiske vili ning väljub kuiv vili. Vili kuivab sooja õhu mõjul, mis seob teraviljas oleva vee ning niiske soe õhk väljub kuivatist. Kogu protsessil on erinevad energiakaod.



Joonis 2.1. Teraviljakuivati põhimõtteskeem[9: 21].

Läbiviidud katsekuivatamise andmete järgi kulub keskmisel viljakuivatamise protsessis ligi pool antavast energiast veeaurustamiseks. Ülejäänud poolest energiat läheb osa kaduma viljast läbipuhutava õhuga ning ülejäänud energia läheb kaotsi teravilja soojendamise ning kadudena läbi kuivati struktuuri.[10: 29]. Joonisel 2.2 on kirjeldatud energiakulude jaotus teraviljakuivatuse protsessis.



Joonis 2.2. Energiakadude jaotus teraviljakuivatuse protsessis[10: 29].

Kuivatuse lõpus kulub alla poole kasulikust energiast vee aurustamise peale.

2.2 Kuivatuse protsessiga seotud energiasäästu võimalused

2.2.1 Kuivatusõhu temperatuuri tõstmine

Kui suurendada kuivatisse sisenevat temperatuuri on võimalik saavutada kuni 30% energiasäästu[9: 63]. Temperatuuri tõstmine annab energiasäästu kuna õhu võime vett siduda sõltub temperatuurist. Kasutades kõrgeid kuivatus temperatuure väheneb terade idanevus ning ka teravilja küpsetusomadused saavad kahjustada[11]. Kui soovitakse kuivatatavat vilja kasutada toiduks või seemneviljana siis kõrgemaid kuivatuse temperatuure ei või kasutada.

Kasutatakse lihtsat rusikareeglit „90 miinus kuivatatava vilja niiskus“ on sobilik kuivatusahjust väljuva õhu temperatuur seemne- ja toiduvilja ning õlleodra kuivatamisel.

Oluline on selle juures jälgida ka et kuivatis oleva vilja temperatuur ei tõuseks liiga kõrgele. Selle temperatuuri ülempiiriks on „70 miinus vilja niiskus“, ehk tera temperatuur ei või olla üle 51°C.[12] Portsjonkuivati puhul peab selle jälgimiseks seadistama vilja ringlemiskiiruse korrektseks. Söödavilja kuivatamisel otsest ohtu vilja ära rikkuda ei ole ning seda võib kõrgemate temperatuuridega kuivatada.

2.2.2 Kuivatusõhu hulga reguleerimine

Kuivati kuivatusõhu soojendamiseks on vaja kulutada energiat ning selle kogus sõltub kui suur on kuivatit läbiv õhu kogus ja mis on selle temperatuur. Kui kuivatuse protsessi alguses eraldub teradest niiskus kiiresti ning see kantakse sooja kuivatusõhu poolt välja. Siis protsessi hilisemas järgus, kui terad on osaliselt juba kuivanud, niiskus terade seest enam nii kiiresti ei eraldu ning osa sooja õhku väljub kuivatist niiskust kaasa võtmata. Õhuvoolu kontrolliga antakse sooja õhku väiksemas koguses aga et sellel hetkel maksimaalselt teradest eralduv niiskus kantakse kuivatist välja. [13]

Kuivatuse õhu koguse reguleerimisel on lisaks teine positiivne mõju kuivatuse energiatõhususele. Õhukoguse vähendamisega tõuseb temperatuur kuivati sees ning siis paraneb teradest niiskuse eraldumise võime. Suurim kasu saadakse kui rakendatakse õhuvoolu otsest *PID*- regulaatoritega juhtimist, kus mõõdetakse kuivatist väljuvat suhtelist niiskust või temperatuurivahet kuivatisse mineva õhuga. Regulaator juhiks omakorda elektrilist õhusiibrit või kuivati ventilaatori käitamise jaoks kasutatavat sagedusmuundurit. Lihtsam ja olemasolevate kuivatite puhul sobib õhukoguse juhtimiseks ka õhu sissevõtuava osaline piiramine.[12]

2.2.3 Kuivatusõhu osaline retsirkulatsioon

Väljuvat õhku saab taaskasutada, kui kasutatav kuivati on pidevatoimeline ning kuivati koosneb mitmest sektsioonist, millest osad on kuivatussektsioonid ning teised on jahutussektsioonid. Pidevvoolu kuivati tööpõhimõte seisneb selles, et kuivati ühest otsast siseneb niiske vili, mis liigub aeglase kiirusega kuivati teise ossa. Liikumise ajal puhutakse teravilja sisenemise osas viljast läbi kuivatiahjus soojendatud õhku ning enne kuivatist

väljumist puhutakse soojenenud ja kuivanud viljakihist läbi välisõhku, mis jahutab teravilja säilitamiseks sobiva temperatuurini. Pidevvoolu kuivatist väljuva õhu taaskasutamine kuivatamiseks on võimalik, sest vilja kuivamise lõpufaasis on väljuva õhu suhteline niiskus madal ning sellel õhul on niiskesse vilja uuesti sisse juhtimisel võime terades olevat niiskust siduda.[14] Lisas 1 on kujutatud kuivatusõhu taaskasutamise põhimõtteskeem[28].

2.2.4 Kuivatile soojusisolatsiooni paigaldamine

Kuivati isoleerimise eesmärk seisneb selles, et tsingitud teras, millest üldjuhul on kuivati korpus ehitatud on suure soojusjuhtivusega ning selle isoleerimine tagab, et kuivatisse sisenev soojus jääks kuivati sisse. Eelkõige on oluline isoleerida vahetult põletist kuivatisse minev soojaõhu kanal, sest seal on kuivatuse õhk kõige kõrgema temperatuuriga ning soojuse eraldumine väliskeskkonda on samuti suurim. Oluline on isoleerida teraviljakuivati kuivatisektsiooni osa, sest suures osas ainult seal toimub kasuliku energia kadu läbi kuivati seinte. Kuivati väljatõmbe poolel ei ole kuivati seinte isoleerimisega enam võimalik energiat säästa. Kogu kuivati isoleerimisel on aga see suur positiivne mõju, et külmadele vahepunkri pindadele ei teki siis enam kondensatsioonivett ning kuivati püsib seest puhas[12].

Kuivati isoleerimisega saadav energiasääst või võimsusekasv on 10-15%. Sealjuures ei tule energiasääst vaid kuivati isoleerimisest, vaid kuivati isoleerimisega tõuseb kuivatis oleva vilja temperatuur, mis suurendab kiirust millega niiskus teradest eraldub. Soojusisolatsioon on lihtne ja kuluefektiivne meetod šaht teraviljakuivatite soojusliku efektiivsuse parandamiseks ning võimaldab märkimisväärset energiasäästu. Lisaks soojuskao vähendamisele parandab soojusisolatsioon ka kuivati üldist soojuslikku kasutegurit. Oluline on kuivati isoleerimine väli tingimustes, sest väljas on tuule mõjul kuivati kestalt soojuse eraldumine palju kiirem.[15]

2.2.5 Soojusvaheti paigaldamine

On võimalik ise ehitada kuivati ümber suur soojusvaheti kuivatusõhu jääksoojuse püüdmiseks, mis vähendab energiakulu kuni 30%. Soojusvahetite ehitamist kuivatite juurde on käsitletud mitmes materjalis. Katseobjekti tulemused on saada Helsingi tehnikaülikooli

praktilisest testist[10]. Üks juhend soojusvaheti ehitamiseks on lisas 2. Juhend on pärit artiklist *Reducing Energy Use in Grain Dryers*[18]. Energiasäästu võimaluste uurimine ja rakendamine Põhja-Ameerikas on oluline, sest seal kasvavate kultuuride koristusaeg on hiline ning põllult tulev kultuur on suure niiskusesisaldusega. Koristatavate maisi ning sojaubade niiskusesisaldus võib olla kuni 30 %.[18]

2.3 Protsessijuhtimisega seotud energiasäästumeetmed

2.3.1 Teravilja ettevalmistamine kuivatamiseks

Kuivatatav teravili tuleb võimalusel eelnevalt teravilja sorteeriga puhastada. Puhastamisel eemaldatakse jäätmed ja väikesed terad, mida ei ole vaja kuivatada ning eemaldatakse sellised jäätmed mis vähendavad vilja poorsust. Väga suur on kuivatuskulude kokkuhoid kui kuivatatav vili sisaldab tooreid umbrohuseemneid. Eelsorteerimine on oluline kui kasutatakse punkerkuivatamist vähese õhukogusega või pidevatoimelise soeõhkkuivati korral kui puudub kuivatile integreeritud teravilja puhasti.

Teraviljale on iseloomulik isesorteeruvus. See tähendab seda et viljapunkrite täitmisel jaotuvad teravilja raskemad terad ja väike sodi punkri keskele ja kergemad terad liiguvad punkri servadesse.[16: 9] Punkrite tühjendamisel tühjeneb esiteks punkri keskosa ning alles peale selle tühjenemist hakkab väljuma vili punkri külgede pealt. Sellepärast on prügise vilja korral mõistlik peale punkri täitmist tühjendada punkri keskosa ning see kas eraldi puhastada, müüa looma söödaks või vahepunkrit kasutades teisaldada sama punkri peale. Otse ei või sama teraviljapunkri peale tühjendada, sest sellisel viisil teisaldatav teravili vaid ringleks ning pahise teravilja kogus punkri keskel jääb samaks.[17] See on oluline meetod, sest teraviljas sisalduv väike sodi takistab oluliselt õhu liikumist vilja sees. Kui punkri keskel ja all on takistus ees, siis õhk liigub vaid punkri servi pidi ja punkri tippu õhk ei jõua. Inglise keelses kirjanduses on antud meetodil ka nimetus, *coring the bin*.

2.3.2 Teravilja mitme astmeline kuivatamine

Teravilja eelkuivatamine kõrgel temperatuuril ning lõppkuivatamine ventileeritavas punkris annab peamiselt juurde kuivatamise võimsusele, sest 1-2 viimast teraviljaniiskuse protsenti saab teraviljast välja kuivatada vaid jahutamisega ning kütusepõleteid saab kasutada uue portsjoni eelkuivatamiseks. Teravilja jahutamine ventileeritavas punkris on tõhusam kui selle jahutamine kuivati sees. Enamiku pidevatoimelise kuivateid saab seadistada töötama ainult kuivatamise režiimis (*st*. ilma jahutamiseta). Eraldiseisva jahutamise rakendamiseks on vajalik suure ventilaatoriga teraviljapunkreid, kuna tavaline õhutusventilaator ei pruugi olla piisava võimsusega.[18]

Teravilja mitme astmeliseks kuivatamiseks on kaks strateegiat. Ventileeritavas teraviljapunkris jahutamine:

1) Kuivatage tera kuni 1–2% soovitud niiskuse tasemest kõrgemale.
2) Transportige soe teravili teraviljapunkrisse.
3) Tera jahutamiseks ja niiskuse viimaste protsendipunktide eemaldamiseks tuleb ventilaator viivitamatult tööle panna
4) Peale jahutamist ja niiskuse eemaldamist võib teravili jääda sellesse teraviljapunkrisse hoiustamisele.

Selliselt käitudes on kütusesääst kuni 15% ja kuivati läbilaskevõime suurendamine on võimalik kuni 30%.

Kuivatusjärgse lõõgastusaja pikendamine jahutuspunkris, inglise keeles *dryeration*:

1) Kuivatage teravili kuni see on 2–3% soovitud niiskuse tasemest kõrgemal.
2) Transportige soe teravili vahepealsesse jahutuspunkrisse ja laske sellel 4–12 tundi ilma õhuvooluta seista.
3) Pärast teravilja lõõgastusaega lülitage teravilja jahutusventilaator sisse ja eemaldage viimased niiskuse protsendipunktid.
4) Kuiv teravili tuleb teisaldada teise viljapunkrisse. Kui teravilja ei liiguta, põhjustab lõõgastusaja käigus tekkinud kondensaat selle riknemise.

Sellisel viisil toimides on kütuse kokkuhoid kuni 30% ja kuivati läbilaskevõime võib tõusta kuni 50%.[18] Lõõgastusaega on kirjeldatud ka Kuivatusõpetuse õppe- ja käsiraamatus[26: 30].

Teravilja jahutamisel tuleb jälgida välisõhu suhtelist õhuniiskust, sest sellest sõltub vilja tasakaaluniiskus. Tasakaaluniiskus näitab seda niiskust, mille vili mõne aja jooksul

saavutab, kui ta on vastava suhtelise niiskusega õhu käes. Tasakaaluniiskuse teadmisel on võimalik hinnata, millal on mõistlik saaki välisõhuga ventileerida. Tabel 2.1 näitab teravilja seemnete niiskuse sõltuvust suhtelisest õhuniiskusest.

Tabel 1.1. Teravilja tasakaaluniiskuse sõltuvus suhtelisest niiskusest [16: 6]

Õhu suhteline niiskus, %	30	40	50	65	70	80	90	95
Seemnete niiskused, %								
- teravili ja heinaseeme	8	11	12	14	15	17	20	25
- rapsiseeme			6,5	8	9	10,5	16	18

Teravilja tasakaaluniiskuse tabelid on leitavad ka internetilehekülgedelt.

2.4 Juhtimisealased energiasäästumeetmed

2.4.1 Kuivati korrektne hooldus ja põleti seadistamine

Kuivatusahju põletit ja kütuse põlemisprotsessi tuleb kontrollida, sest kui põleti on halvasti reguleeritud siis ahju kasutegur on madal.

Kuivati hooldamisel tuleb jälgida:

- Põletitel saab pihusteid reguleerida ning sellega saab põleti sobivale võimsusele seadistada.
- Pihusteid tuleb vahetada 1-2 aasta tagant. Kontrollida tuleb et pihusti filtrid ei ole saasteainetest ummistunud.
- Puhastada kuivatiahju soojusvaheti suitsutorud. Tahma kogunemisel soojusvaheti seintele väheneb selle soojusvahetusvõime.
- Kuivatiahju õhu sisse võtuavad peavad olema puhastatud.
- Vaadata kas temperatuuriandurid ei ole saastunud.
- Kontrollida kas kuivati on õhutihe ning sellest ei leki sooja õhku või kusagilt ei imbu sisse soojendamata õhku.
- Kontrollida kas põleti on õigesti seadistatud. Põleti reguleerimise täpsus on otseses sõltuvuses põleti kasuteguriga.

Tabel 2.2. Suitsugaaside näitajate hindamine[19]

Hinnang analüüsi näitajatele

Heitgaaside temperatuur °C	CO_2 sisaldus heitgaasides, %	Soojuskadu lahkuvate gaasidega, %
Hea: 120…200	Hea: 12…14	Alla 10
Rahuldav: 200…250	Rahuldav: 10…12	10…15
Kõrge: üle 250	Halb: üle 10	Üle 15

Põleti reguleerimiseks on vaja mitmeid mõõteseadmeid[19]. Olulisem on suitsugaaside analüsaator.

2.4.2 Soodsama kütusega kütteallika valimine

Bioenergia kasutamine terade kuivatamisel ei vähenda tavaliselt energiatarbimist, vaid hoopis suurendab seda, kuna biokütuseahjud on kütteõliga võrreldes mõnevõrra madalama kasuteguriga ahjud. Biokütuse kasutamine võib kasvuhoonegaaside teoreetilist kogust vähendada. Soome tingimustes kõige sobivam ja tavalisem teravilja kuivatamiseks kasutatav biokütus on küttepuit hakkpuidu kujul. Küttepuudena klassifitseeritakse süsiniku suhtes neutraalse energiaallikana. Hakkpuidu kasutamine kütusena välistab praktiliselt teravilja otsesed CO_2 heitkogused kuivatamisel.[10]

Puiduhakke kasutamine energiaallikana võib märkimisväärselt säästa teravilja kuivatamise majanduslikke kulusid. Põllumeestel on endal olemas metsad ja madal turuväärtusega puitu, mida peetakse metsanduse kõrvalsaaduseks ja mis tuleb niikuinii metsast puhastada, selle kasutamine pakub säästlikku energiaallikat. Hakkepuidu põletamise tehnoloogia on aga tavapäraste kütteõlil töötavate ahjude ja investeeringutega võrreldes kallim ja ning nende kasutamine on töömahukam. Alternatiivid kergekütteõli põletitele on üleminek gaasküttele või põlevkiviõliküttele.

2.4.3 Ettepanekud energiasäästuks

Kuivatatavaid kultuure ei tohi liiga kuivaks kuivatada. Niiske vilja kuivatamisel väheneb niiskuse sisaldus alguses kiiresti, kui aga terade niiskusesisaldus hakkab vähenema muutub teraviljast eralduva niiskuse kättesaamine energiamahukamaks. Niiskusesisalduse

vähendamiseks 14%-lt 12%-ni on tarvis sama palju energiat kui 19%-lt 14%-ni [12]. On oluline jälgida et kuivatatakse võimalikult täpselt nõutud vilja niiskuseni. Selleks peab kasutatav niiskusemääraja olema kõrge kvaliteediga ning taadeldud. Mõistlik on võrrelda niiskusemääraja tulemust hilisema kokkuostja niiskusemääraja näiduga. Siis on väiksem risk et teravilja kuivatatakse liiga vähe või kuivatatakse liigselt.

- Vilja liigsel kuivatamisel kulutatakse palju energiat ning väheneb ka kokkuostu viidava vilja mass.
- Ühtlaste mõõtmistulemuste saamiseks peab kuivatistesse siseneva vilja niiskus olema võimalikult ühtlane. Ühtlase niiskuse taseme saamiseks peab vili vastuvõtupunkrites seisma ning seda tuleb vaikselt ventileerida.
- Teravilja ringluse kiirus arvutamine. Vili peaks portsjonkuivatis ringlema 2 kuni 2,5 korda. Kõrgematel temperatuuridel rohkem[9]
- Jälgida kuivatamise aega ning vähendada öist kuivatamist. Öösel kuivatamisel kulub soojusenergiat rohkem kui päevasel kuivatamisel.
- Jälgida, et põldudelt ei koristataks liiga niisket teravilja. Niiske teravilja kuivatamisel suurenevad energiakulud.

3. ENERGIASÄÄSTU KAVA

3.1 Eesmärkide püstitamine

Igakord ei ole läbiviidaval säästumeetmel väga suurt majandusliku kasu aga kui säästliku mõtteviisiga saab säästa energiat ja sealhulgas ka raha väikseski koguses on igal juhul tegemist mõistliku tegevusega. Säästliku mõtteviisi tekkimiseks on oluline aru saada, millised on tegurid mis mõjutavad energiakulu ning kui suures osas nad kuivatusekulusid määravad.

Meetodeid kuivatuse ökonoomsemaks saamiseks on päris mitmeid. Täpsemalt uurides selgub et mõne meetodi rakendamisel ei ole mõni teine kasutatav ning mõne üksiku meetodi rakendamisel kaasneb teisigi positiivseid energiasäästu alased mõjud. Selleks et kava koostamine oleks antud kuivati korral kõige mõistlikum, tuleb välja selgitada mis lõpptulemust soovitakse saada ning millised on kuivati eripärad.

Enamik rakendatavad meetmed on seotud mõne kuluga. Investeeringud seadmetesse või nende täiendamisse maksab. Maksab ka tööaeg kui kuivatuseprotsessi jooksvale reguleerimisele kulub rohkem aega. Ainult mõni meede on rakendatav ilma otseste kuludeta, kuid kaudsed kulutused võivad tekkida näiteks kui rikutakse vilja kvaliteet või ei kuivatata vilja piisavalt. Oluline on aru saada, et soeõhkkuivatiga saab kuivatada kiirelt ja energiakulukalt või aeglasemalt ning energiasäästlikult.

3.1.1 Kuivati andmed

Loona kuivati on mobiilne portsjon kuivati Preco MD2x2[20]. Kuivati koosneb kuivatussektsioonist ja puhversektsioonist. Kuivatuse ajal ringleb kuivatatav teravili kuivati sees mitu korda. Kuivati on alarõhuline ning õhk imetakse kuivatamise ajal läbi viljakihi. Kuivatusõhu soojendamiseks on kasutusel diislikütusel töötav kuivatiahi võimsusega 550 kW. Iseloomulikuks näitajaks on muudetava kiirusega kuivatusõhu ventilaatorid, millega on

võimalik sujuvalt õhukogust määrata. Kuivati korpus on tsingitud terasest ning on isoleerimata. Kuivati juurde kuulub ka kaks ventileeritavat teraviljapunkrit. Täpsed kuivati tehnilised andmed on kirjas lisas 3.

Elektrienergia tarve erinevate teraviljakuivatite režiimide korral on leitav lisast 4. Tabelis nimetatud andmed on elektrimootorite nimiandmed. Kuivati tarbib erinevatel režiimidel erineva koguse elektrienergiat kuna igal režiimi korral töötab vaid osa elektrimootoreid.

3.1.2 Energiakoguste arvutused

Energiasäästu arvutused on tehtud kuivati ühe portsjoni kohta. Sellisel viisil on võimalik detailsemalt hinnata mingi meetme mõju, sest osad meetodid on ajas muutumatud aga osa sõltuvad sellest, kuidas portsjoni kuivatuse protsess läbi viiakse. Samuti on siis ikka ülevaade hetke energiakulutustest, kui mõni meetod jääb rakendamata või ilmastikuolud ei ole soodsad või kuivatatav vili on suure niiskusega.. Arvutused on tehtud eeldusel, et keskmine kuivatuse kuivatamise protsess võtab aega neli tundi ning selle jooksul kulub 2200 kWh energiat. See energiakogus on saadud kuivatiahjupõleti nimivõimsuse korrutamisel nelja tunniga. Sellise energiakuluga kuivatatakse aastas 30 portsjonit 19% niiskusesisaldusega teravilja niiskusesisalduseni 14%. 19% niiskusesisaldusega vilja kuivatiportsjoni mass on 21235 kg.

Teraviljast vee aurustamiseks arvutamiseks kasutatakse väärtust 6 MJ soojusenergiat 1 kg vee aurustamiseks. See on kirjandusest leitud väärtus, mis sisaldab ka energiakadusid[10]. Tegelik kasulik energiakulu ühest kilogrammist vee aurustamiseks 70 °C juures on 2,8 MJ. Antud väärtused on kooskõlas ka töö alguses näidatud joonisel olevate energiakulude jaotusega. Tegelik energiakulu võib olla olenevalt kuivatatavast viljast, kuivatist või õhu omadustest erinev.

Kuivatis on kütusena kasutusel diislikütus. Diislikütus on kuivatis kasutusel, kuna selle kütuse korral on kuivatiahju töökindlus väga suur ning hooldusevajadus on väike. Kasutatava kütusekogus on väike ning sellega on mugav töötada kuna sama kütusega töötavad ka ettevõtte töömasinad. Teraviljakuivatites võib kasutada erimärgistatud kütust ning sellele kütuseaktsiise ei rakendata[19]. See teeb diislikütuse odavamaks võrreldes

kütusetanklatega ning selle hind on 0,7 EUR/kg. Soojusenergia maksumus portsjoni kohta on arvutatav valemiga.

$$R = \frac{Q_p \times 3{,}6}{Q_{a,}} \times R_{k,} \tag{3.1}$$

kus R on portsjoni soojusenergia maksumus EUR;

Q_p – soojusenergiakulu portsjoni kohta kW;

Q_a - diislikütuse kütteväärtus MJ/kg;

R_k- diislikütuse maksumus EUR/kg.

Diislikütuse kütteväärtus on Q_a = 42,7 MJ/kg[25].

Võimaliku energiasäästu arvutamine kirjandusest leitud säästu väärtuste järgi.

$$R_s = s \times Q_{p,} \tag{3.2}$$

kus R_s on energiasääst portsjoni kohta säästumeetme rakendamisel kW;

s – säästumeetme suurus kirjanduse alusel %;

Q_p – soojusenergiakulu portsjoni kohta kW.

Õhukoguse soojendamiseks kuluv energia on arvutatud valemiga[9].

$$Q_{\tilde{o}} = V \times \rho_{\tilde{o}} \times c_{\tilde{o}} \times (T_k - T_v), \tag{3.3}$$

kus $Q_{\tilde{o}}$ on õhu soojendamiseks vajalik kuivatiahju võimsus kW;

V – kuivatusõhukulu m^3/h;

$\rho_{\tilde{o}}$ – õhu tihedus 20°C juures kg/m^3;

$c_{\tilde{o}}$- õhuerisoojus kJ/(kg × °C);

T_k- kuivatusõhu temperatuur EUR/kg;

T_v- välisõhu temperatuur EUR/kg.

Õhutihedus $\rho_{\tilde{o}}$ = 1,2 kg/m^3. Õhu erisoojus $c_{\tilde{o}}$ = 1,0 kJ/(kg × °C).[9]

Temperatuuri tõusuga väheneva vee arustamiseks kuluv energia arvutuste juures on kasutatud valemit[11].

$$E = \frac{Q_E}{\Delta d} = \frac{H_1 - H_0}{d_1 - d_0}, \tag{3.4}$$

kus E on ühest kilogrammist veest aurustumiseks kuluv energia MJ;

Q_E – õhutemperatuuri tõstmiseks kuluv energia kJ/kg;

Δd – õhu kuivamise käigus eralduv vesi g/kg;

H_1- soojendatud õhu entalpia kJ/kg;

H_0- välisõhu entalpia kJ/kg;

d_1- soojendatud õhu tehnilineniiskus kJ/kg;

d_0- välisõhu tehnilineniiskus kJ/kg.

Energiasäästu investeeringu otsustuse tegemise jaoks arvutatakse tasuvusaeg T. Tasuvusaja leidmiseks kasutatakse lihttasuvusaega ehk arvutamisel ei arvestata inflatsiooni ning intressimäära. Tasuvusaeg T on arvutatud valemiga:

$$T = \frac{W_I}{W_S}, \tag{3.5}$$

kus T on lihttasuvusaeg aastat;

W_I - energiasäästu investeeringu maksumus EUR;

W_S – kokku hoitava energiakulu maksumus EUR.

3.2 Meetmete hindamine

Kuna teraviljakuivatamisel rakendatavaid säästumeetmeid on päris mitmeid, on otstarbekas teha meetmete lihthindamine. Lihthindamisega saab välistada need meetodid mida ei ole otstarbekas rakendada ning aitab valida analüüsimiseks põhjalikumalt neid, mida on võimalik reaalselt ellu viia. Tabeli kujul lihthindamine on tabelis 3.1.

Tabel 3.1. Meetmete lihthindamine

Lahendusvariandid	Vastab ülesandele	Täidab nõudeid	Hästi teostatav	Kulud mõõdukad	Vastab ohutusnõuetele	Sobib oma alale	Muud	Tähelepanekuid Juhtnööre Põhjendusi	Otsus
Kuivatustemperatuuri tõstmine	+	+	+	+	-	+		Oht vilja kvaliteet rikkuda	+
Õhukulu juhtimine	+	+	+	+	+	+		Tööjõu mahukas	+
Jahutuspunkris jahutamine	+	+	+	+	+	+			+
Isolatsiooni paigaldus kuivatile	+	+	-	-	-	+		Tasuvus arvutada	+/ -
Hoolduspäeviku jälgimine	+	+	+	+	+	+		Kulukas	+
Viljaringluse reguleerimine	+	+	+	+	+	+		Vähene kasulikus	+
Soojusvaheti	+	+	-	-	-	+			-
Eelpuhasti reguleerimine	+	+	-	+	+	+			-
Teravilja eelpuhastamine	+	+	-	-	+	+			-
Lõõmutamine	+	+	+	+	+	+		Piiratud säilitusvõimekus	+
Kuivatusõhu retsirkulatsioon	+	+	-	-	-	+			-
Koristusaja valimine	+	+	+	+	+	+		Vähesel määral rakendatav	+
Biokütusele üleminek	+	+	-	-	+	+			-
Soodsamale kütusele üleminek	+	+	+	+	+	+			+
Niiskuse täpsem määramine	+	+	+	+	+	+		Tööjõumahukas	+

Lihthindamise teel on võimalik saada ülevaade meetodite negatiivsetest ja positiivsetest mõjudest.

3.3 Meetmete analüüs ja arvutused

Lihthindamise teel saab välistada mõned eespool nimetatud energia kokkuhoidmise viisid.

Soojusvaheti ehitamist edasi uurima ei hakka, kuna selle paigaldamiseks ei ole antud kuivati juures ruumi.

Teravilja eelpuhastust selle kuivati juures eraldi ei ole vaja rakendada. Koristatav vili on suure puhtusega, puudub võimalus eelpuhastatud teravilja hoiustada ning kuivati elevaatorile on integreeritud eelpuhasti ventilaatoriga, mis eemaldab teravilja seest peenseemned, tolmu, väiksed kõrretükid, viljakestad ja kõlujad seemned.

Taastuvenergiakütuse kasutamist ei ole selle kuivati juures kasutada. Kuivati ümbruses on väga vähe vaba ruumi ning põletit ja biokütusehoidlat ei ole võimalik selle kuivati juurde paigaldada. Lisaks on aastane kuivatuse maht liiga väike ning väikese võimsusega biokatelde majanduslik tasuvus on madal ja nendega kuivatamine nõuab lisa tööaega.

Kuivatusõhu retsirkulisatsiooni ei ole võimalik rakendada, kuna kuivatil ei ole pidevatoimivuse funktsionaalsust. Kui on plaan kasutada vilja jahutamist jahutuspunkrites, siis antud meetodit ei ole otstarbekas rakendada.

3.3.1 Kuivatuse temperatuuri tõstmine

Hetkel kasutatakse teraviljade kuivatusel 70°C kuivatustemperatuuri. Temperatuuri tõstmisel kõrgemate kuivatustemperatuuride juurde on võimalik energiat säästa. Erinevate õhu olekuparameetrite juures on vastava kuivatusõhu temperatuuri juures kuluv energiatarve vee aurustamiseks erinev. Andmed on leitavad tabelist 3.2. Arvutustes on kasutatud valemit (3.4).

Tabel 3.2. Temperatuuri tõstmisega vähenev aurustumissoojuse energiakulu

Kuivatuseõhu temperatuur, °C	Õhutemperatuur, °C / Suhteline õhuniiskus, %	Tehniline niiskus Δd, g/kg	Entalpia ΔH, kJ/kg	Energiatarve, MJ/kg vee aurustamiseks	Energiasääst 70°C suhtes
70 °C	10 / 100	14,32	61,1	4,3	0,0
90 °C	10 / 100	20,49	81,5	4,0	6,8
110 °C	10 / 100	26,9	101,9	3,8	11,2
130 °C	10 / 100	33,45	122,2	3,7	14,4
70 °C	15 / 80	14,12	56,1	4,0	0,0
90 °C	15 / 80	20,32	76,5	3,8	5,2
110 °C	15 / 80	26,78	97	3,6	8,8
130 °C	15 / 80	33,39	117,4	3,5	11,5
70 °C	20 / 60	14,08	51	3,6	0,0
90 °C	20 / 60	20,29	71,4	3,5	2,8
110 °C	20 / 60	26,73	91,8	3,4	5,2
130 °C	20 / 60	33,14	112,2	3,4	6,5

Kuivatusetemperatuuri tõstmisega kaasneb risk et teravilja kvaliteet alaneb. Teraviljade kokkuostuhinnad on jagatud kvaliteedi järgi kategooriatesse ning kvaliteedi langusega toiduvilja kategooriast söödaviljakategooriasse on rahaline kaotus märkimisväärne. Tabelis 3.3 on ühe teravilja kokkuostu ühitu hinnad aprillis 2020. Kõrgemat kuivatustemperatuuri

on mõistlik kasutada vaid juhtudel kui vilja madal kategooria on teada. Sellisel juhul saab kasutada kõrgemaid temperatuure, kuni 120 °C. Lisaks energiasäästule saab temperatuuri tõstmisega ka kiirema kuivatuse protsessi. Sellega seoses suureneb kuivati läbilaskevõime ning vähenevad muud kulud, kui kogu kuivatuse protsessi saab kiiremini läbi viia.

Tabel 3.3. Teravilja hindade sõltuvus vilja kvaliteedist[21]

Viljahinnad EUR/t (kehtivad 01.04.2020 kuni kell 16.00)

KEVILI hinnad	DAP Roodevälja	DAP Rõngu	DAP Muuga
Toidunisu I	169	163	176
Toidunisu II	165	179	172
Toidunisu III	161	155	168
Toidunisu IV	157	151	164
Söödanisu	150	145	154

Madalama kategooria toidunisu ja söödanisu hinnavahe on keskmiselt 7 eurot. Suurte teravilja koguste korral on rahaline kaotus kvaliteedi alanemisest suur.

3.3.2 Õhukulu juhtimine

Kuna antud kuvati kuivatusõhu liigutamiseks mõeldud ventilaatoritel on ees sagedusmuundurid, on kuivatusõhu reguleerimine lihtsasti teostatav. Kuivatusõhku saab reguleerida vahemikus 10000 kuni 30000 m^3/h. Ventilaatoriajami iseloomulikuks tunnuseks on see, et mootori püsitalitluse koormusmoment sõltub ventilaatori tootlikkusest mootori pöörlemiskiiruse ruuduga võrdeliselt.[22] Kui arvestada, et ventilaatori tootlikkus on võrdeline mootori pöörlemiskiirusega $Q \approx \omega$ ja mootori moment pöörlemiskiiruse ruuduga $T \approx \omega^2$, siis on ventilaatori võimsus võrdeline pöörlemiskiiruse $P \approx \omega^3$ kuubiga. Võimsuse erinevatel kiirustel saab leida valemiga [27: 71].

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3, \tag{3.6}$$

kus P_1 on ventilaatori algne võimsus kW;

P_2 - ventilaatori võimsus pöörlemise kiiruse vähenemisel kW;

n_1 - ventilaatori algne pöörlemise kiirus min^{-1};

n_2 - ventilaatori vähendatud pöörlemise kiirus min^{-1}.

Õhukulu vähendamisega väheneb oluliselt ka soojusenergia vajadus. Selle tõttu väheneb ka kuivati võimsus. Kui suurel määral õhukulu kogust on mõistlik vähendada, tuleb välja selgitada katsetuste abil. Õhukulu vähendamise vajadus on väga oluline kuivatusprotsessi lõpus ning selle rakendamine eeldab kuivatuseprotsessi pidevat jälgimist. Õhukulu on vaja vähendada ka juhul kui kuivatiahjus ei saavutata soovitud kuivatusõhu temperatuuri. Tabelis 3.4 on arvutustulemused, kui palju väheneb soojusenergiavajadus portsjoni kohta, kui õhukogust vähendada. Samuti on välja arvutatud elektrienergia vajadus erinevatel ventilaatori pöörlemiskiirustel.

Tabel 3.4. Arvutustabel õhukulu juhtimisel tekkivast energiasäästust

Ventilaatori pöörlemiskiirus, min^{-1}	**Ventilaatori toodetav õhukogus, m^3/h**	**Ventilaatori tarbitav võimsus, kW**	**Tarbitav energia tunnis, kWh**	**Tarbitav energia tunnis 100% kiiruse korral, kWh**
1500	30000	15	15	15
1250	25000	8,7	8,7	-
1000	20000	7,7	7,7	-
750	15000	6,3	6,3	-
Elektrienergia tarve õhukoguse muutmisega, kWh			37,7	-
Elektrienergia tarve konstantse õhukiirusega, kWh			-	60
Elektrienergia hind, EUR/kWh			0,1	0,1
Elektrienergiahind portsjoni kohta (20t), EUR			3,8	6
Kuivatusportsjonite kogus hooajal, tk			30	30
Elektrienergia kulu ventilaatoritele ühel hooajal, EUR			113,1	180
Säästetav elektrienergia kiiruse juhtimise korral, EUR			**66,9**	-
Ventilaatori pöörlemiskiirus, min^{-1}	**Ventilaatori toodetav õhukogus, m^3/h**	**Õhukoguse soojendamiseks kuluv võimsus, kW**	**Tarbitav energia tunnis, kWh**	**Tarbitav energia tunnis 100% kiiruse korral, kWh**
1500	30000	550	550	2200
1250	25000	458,0	458	-
1000	20000	367,0	367	-
750	15000	275,0	275	-
Soojusenergia tarve õhukoguse muutmisega, kWh			1650	-
Soojusenergia tarve konstantse õhukiirusega, kWh			-	2200
Diislikütuse hind, EUR/kg			0,7	0,7
Soojusenergiakulu portsjoni kohta (20t), EUR			97,4	129,8
Kuivatusportsjonite kogus hooajal, tk			30	30
Kuivati soojusenergiakulu, EUR			2921,3	3895,1
Säästetav soojusenergia, kiiruse juhtimise korral, EUR			**973,8**	-

Kui meil oleks tegemist traditsioonilise portsjonkuivatiga, kus õhk puhutakse läbi viljamassi, siis elektrimootorilt eralduv soojus lisandub kuivatiahju soojusele. Kuna tegemist

on alarõhk kuivatiga, siis elektrimootoritel eralduv soojus ei lisandu küttevõimsusele vaid läheb kaotsi.

3.3.3 Soojusisolatsiooni paigaldus kuivatile

Kuivati isoleerimine annab arvestusliku energiasäästu kuni 20%. Selle kuivati puhul nii suur energiasäästu ei ole võimalik saavutada, kuna sellel kuivatil on soojakanal ning kuivatiahi juba isoleeritud. Kõige suurem soojakadu on nende pindade kaudu, kus temperatuurierinevused on kõige suuremad. Need piirkonnad on seal kus soe õhk siseneb viljakihi sisse. Kuivatuse protsessi efektiivsuse seisukohalt ei ole oluline isoleerida õhu väljatõmbekanali osa, sest kui soe õhk on viljakihist läbi läinud on ta juba maksimaalselt oma niiskuse sidumisevõime kasutanud ning sealt alates võib õhu temperatuur juba langema hakata.

Kuna antud kuivati asub õues on kuivati isoleerimisel suur mõju energia säästmiseks. Sellepärast on mõistlik kaaluda kuivatile tuleks ümber ehitada hoone, mis tuulehoogude piiramisega vähendab kuivati korpuselt eralduvat sooja. Lisaks tuleb arvestada et ilma kuivatit piirava hooneta on kuivati isoleerimiseks keeruline isolatsioonimaterjale leida. Isolatsioon peab olema ilmastikukindel ning see tähendab et kasutatav isolatsioon tuleb katta katetega.

Kasutatav isolatsioon peab taluma kõrgeid temperatuure. Kui seada teravilja kuivatustemperatuuriks l20°C, siis võib kuivati korpuse temperatuur tõusta üle 100°C ning sellise temperatuuri korral sobivad isolatsiooniks vaid spetsiaalsed polüuretaanist isolatsioon materjalid ja EPDM vahtkummist materjalid. Laialt levinud kivivilla isolatsiooniplaadid sobivad samuti aga need vajavad välisel paigaldamisel eraldi kaitset päikese ja niiskuse eest. Kui kuivati on hoone sees on kivivillast isolatsioon sobilik. Arvutustabel soojusisolatsiooni kulude ja saadava energiasäästu kohta on tabelis 3.5.

Tabel 3.5. Kuivati soojusisolatsiooniga katmise variantide maksumused.

	1. Kuivatile ümber hoone ehitamine	Maksumus, EUR	**2. Kuivatile soojus-isolatsioon i lisamine**	Maksumus, EUR	**3. Kuivatile isolatsioon-plaatide paigaldamine**	Maksumus, EUR
Materjalikulu	Metallkarkass	5000	Kivivilla-plaadid	300	EPDM vahtkumm	600
	Katteplekk	2000	PAROC Hvac Fire Slab EI45 AluCoat LT	20 m^2 - 15 EUR/m^2	K-FLEX STAD ALU 25mm, self-adhesive	20 m^2 - 15 EUR/m^2
	Muud kulud	500				
Paigalduse kulu	Transport + kraana	600	Isolatsiooni paigaldus	300	Paigaldustööd	300
	Paigaldustööd	1500				
Investeeringu maksumus		9600		600		900
Soojusvoo vähenemine piiretest, portsjoni soojusenergiakulu on 2200 kW						
Hinnanguline soojusvoo vähenemine	4	%	10	%	10	%
Soojusenergia kulu	88	kW	220	kW	220	kW
Sääst portsjoni kohta	5,0	EUR	13,0	EUR	13,0	EUR
Tasuvusaeg	63,8	aastat	1,5	aastat	2,3	aastat

Kui on soov soojusisolatsiooni lisada, siis on see mõistlik tellida kuivati valmistaja poolt.

3.3.4 Kuivati hoolduse jälgimine

Kuivati ahju kolle on pöördleegiga, mis tähendab et küttekoldes teevad suitsugaasid tagasipöörde ning väljuva kolde ees osas avatud horisontaaltorude kaudu korstnasse. See tähendab et suitsugaasid on pikka aega küttekoldes ning suitsugaasidel on piisav aeg endas olev energia loovutada. Põlemiskamber ja suitsutorud on tehtud roostevabast terasest ning selle pärast on hooldusvajadus väike ja nende puhastamine on kerge. Puhastamata jätmisel võib aja jooksul põlemisgaaside jäägid ladestuda kolde seintele ning suitsutorudesse, mille tõttu halveneb soojuse ülekanne. Puhastamata jätmisel väheneb kuivati võimsus, kui põleti on maksimaalsele töökoormusele seadistatud ning suureneb energiakadu suitsugaaside väljuva energia arvelt. Oluline on põleti reguleerimine, sest reguleerimata põletil võib suitsugaasides olla liigselt põlemata kütust või liigõhu korral liiguvad suitsugaasid kiirelt läbi kolde. Korraliselt hooldusest saadav energiasäästu arvutus on leitav tabelist 3.6.

Tabel 3.6. Kuivatiahju reguleerimisest paranev energiatõhusus

Põleti seadistus	Soojuskadu lahkuvate gaasidega, %	Soojusenergia kulu portsjoni kohta, MJ	Soojuskao rahaline väärtus, EUR	Sääst põleti paremast seadistusest, EUR	Energiasääst aastas, EUR
Hea	Alla 10	792	13,0	-	-
Rahuldav	10…15	990	16,2	3,2	97,4
Halb	Üle 15	1188	19,5	6,5	194,8

Kuivatusahju põletit ja põlemisprotsessi reguleerimise maksumus sõltub hooldusfirmast.

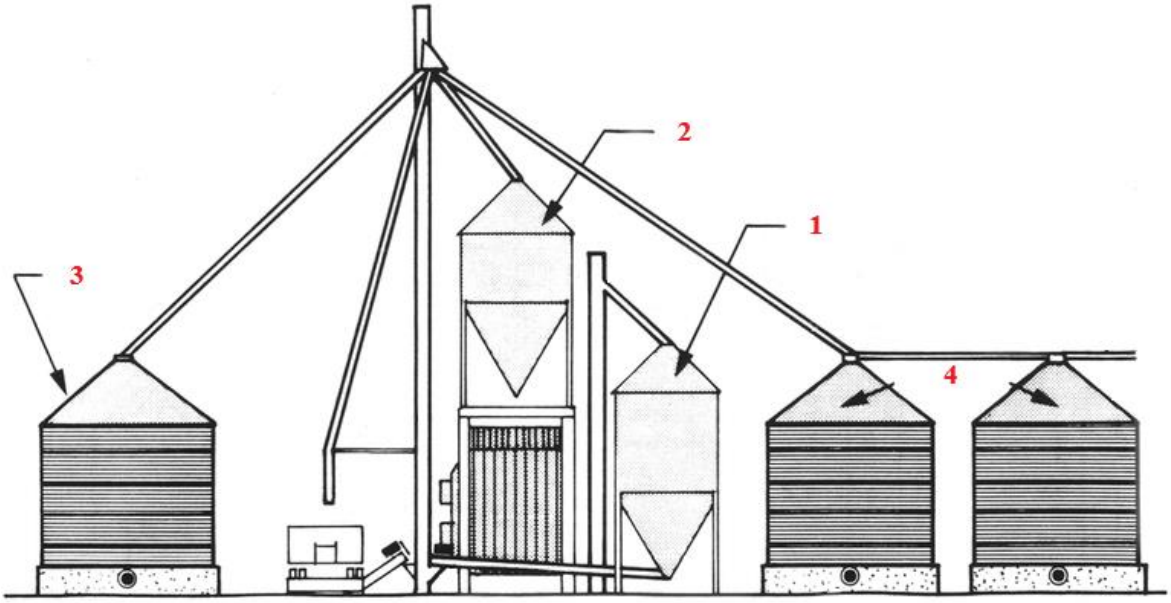
3.3.5 Viljaringlemise kiiruse reguleerimine

Optimaalse ringlemiskiiruse jälgimisega saab hoida kokku energiat ning välistada üksikute terade temperatuuri liiga kõrgele tõusmist. Kui ringlemisekiirus on liiga aeglane, jäävad terad liiga kauaks puhvertsooni ning nad jahtuvad maha. Samuti on risk terade temperatuur kuivatustsoonis liiga kõrgele tõsta. Seda juhul kui kasutatakse kõrgeimaid kuivatusetemperatuure.

Kuivati tuleb seadistada selliselt, et vili kuivatis ringleb korra tunnis. Optimaalse viljaringluse kiiruse korral saavutab kuivatatav vili kuivatuseportsjoni kohta ühtlase niiskusesisalduse.[9] Kõige täpsemalt saab kontrollida ühe ringi tegemiseks kuluvat aega siis, kui kuivati tühjendatakse ringlemise kiirusega ja mõõdetakse selleks kuluv aeg[12].

3.3.6 Mitme astmeline kuivatamine. Lõõgastusaeg ja jahutuspunkris jahutamine.

Lõõgastusaja meetodit saab vähesel määral kasutada ning mitte täielikult rakendada. Piiravaks asjaoluks on see, et jahutuseks sobivaid punkreid ei ole piisavalt ning lisa punkri juurde ehitamiseks ei ole piisavalt ruumi.. Kui võtta eelduseks et maksimaalne kütusesääst on 30% ja olemasoleva kuivati läbilaskevõimet on võimalik suurendada 50%. Siis selle meetodi puhul on tegemist väga atraktiivse võimalusega tootmise efektiivsuse suurendamiseks. Energiasääst tuleb selle arvelt, et kuivatamiseks kasutatakse vaid osaliselt soojendatud õhku ning viimase 1-2 protsendi kuivatamiseks kasutatakse välisõhku. Joonisel 3.1 on võimalik vaadata mitme astmelise teraviljakuivatuse järgnevust.



Joonis 3.1 Teravilja liikumine kuivatuse käigus. Tavaprotsess: (1) Vastuvõtt; (2) Kuivatus/Jahutus; (3) Säilitus. Eraldi jahutamisega protsess: (1) Vastuvõtt; (2) Kuivatus; (4) Jahutus/Säilitus. Lõõgastamisega protsess: (1) Vastuvõtt; (2) Kuivatus; (4) Lõõgastus/Jahutus; (3) Säilitus.

Jahutuspunkris jahutamine on ventileeritava punkri olemasolul, lihtsal rakendatav meetod energiasäästmiseks. Energiat saab säästa seoses sellega, et kuivatatav soe vili transporditakse enne vilja lõpliku kuivamist, ventileeritavasse punkrisse jahutusse, kus koos jahutusega eemaldatakse ka viimased üleliigsed niiskuseprotsendid.[18] Jahutuse edukaks toimimiseks peab õhu suhteline niiskus olema madal. Sellisel viisil jahutades on võimalik kuivati kuivatusvõimsust juurde saada, sest varem kuivatis jahutamisele kuluval ajal saab uut teravilja portsjonit sooja õhuga kuivatada. Õhukulu hulk peab jahutamisel olema vähemalt 20 m3/h ühe m3 vilja kohta[23]. Selle meetodi miinus on selles et niiskusemäära raske hinnata ning on risk vili liiga kuivaks kuivatada või liiga vähe kuivatada. Tabelis 3.7 välja toodud tavaprotsessi ning mitme astmelise protsessi elektrienergia võimsuse vajadus, režiimi kestvus ja energiakulu.

Tabel 3.7. Energiakulude võrdlus tavaprotsessi ja mitme astmelise vahel

		Võimsus, kw	Režiimi kestvus, h	Energiakulu, kWh
Tavaprotsessi energiakulu	**Täitmiserežiim:**	8,5	0,5	4,3
	Kuivatamiserežiim:	27,25	4	109,0
	Jahutuserežiim:	26,45	1	26,5

	Tühjendamiserežiim:	13,25	0,5	6,6
		Elektrienergia kulu kokku		146,3
	Soojusenergiakulu:	550	4	2200,0
Eraldi jahutamisega protsessi energiakulu		Võimsus, kw	Režiimi kestvus, h	Energiakulu, kWh
	Täitmiserežiim:	8,5	0,5	4,3
	Kuivatamiserežiim:	27,25	3,5	95,4
	Teraviljapunkrites jahutamise režiim:	4	4	16,0
	Tühjendamiserežiim:	13,25	0,5	6,6
		Elektrienergia kulu kokku		122,3
	Soojusenergiakulu:	550	3,5	1925,0
Lõõgastamisega protsessi energiakulu		Võimsus, kw	Režiimi kestvus, h	Energiakulu, kWh
	Täitmiserežiim:	8,5	0,5	4,3
	Kuivatamiserežiim:	27,25	3	81,8
	Teraviljapunkrites jahutamise režiim:	4	6	24,0
	Tühjendamiserežiim:	13,25	0,5	6,6
		Elektrienergia kulu kokku		116,6
	Soojusenergiakulu:	550	3	1650,0

Tabelis 3.8 on arvutatud tavaprotsessi ja mitme astmelise protsessi energiakulu portsjoni kohta.

Tabel 3.8. Arvutustabel erinevate protsesside energiakasutuse kohta

	Tavaprotsessi energiakulu	**Eraldi jahutamisega protsessi energiakulu**	**Lõõgastamisega protsessi energiakulu**
Elektrienergia kulu, kWh	146,3	122,3	116,6
Soojusenergia kulu, kWh	2200,0	1925,0	1650,0
Elektrienergia maksumus (0,1 EUR/kWh), EUR	14,6	12,2	11,7
Soojusenergia maksumus (kütus 0,7 EUR/kg), EUR	129,8	113,6	97,4
Portsjoni kuivatusekulud kokku, EUR	144,5	125,8	109,0
Portsjoni kuivatuskulude erinevus, %	0,00	0,13	0,25

Lisaks energia kokkuhoiule on mitme astmelise kuivatuse korral võimalik suurendada soeõhkkuivati tootlikust.

3.3.7 Koristusaja valimine

Koristatava vilja niiskusest sõltub kuivatuse energiavajadus väga suurel määral. Oluline on jälgida ka seda, et niiskema vilja koristamisel suureneb oluliselt kuivatamiseks kuluv aeg. Tabelis 3.9 on arvutatud kui suur on energiakulu erinevate algniiskuste juures. Lisaks on samas tabelis välja arvutatud kuivatamiseks kuluv aeg.

Koristusaja valimine tähendab seda, et teraviljakoristust alustatakse tööpäeval hiljem ning tööd lõpetatakse varem. Sarnaselt alustatakse koristustööd hiljem kui vili on ilmastikuolude tõttu niiske. Hilissuvel kui teravilja koristatakse on tavapärane, et päevane õhutemperatuur erineb märgatavalt öisest temperatuurist. Sellisel temperatuuri muutustel muutuvad oluliselt ka õhu olekuparameetrid ja võimekus siduda endaga vett. Kui päevasel ajal on temperatuuril 20°C ja 60% suhtelise niiskusega õhk sobiv teravilja koristuseks ja kuivatamiseks, siis temperatuuril 12°C on see sama õhk suhtelise niiskusega 100% ning õhus olev vesi hakkab kondenseeruma pindadele ja teraviljale. See muudab teravilja koristamiseks selleks hetkeks niiskeks.

Tabel 3.9. Arvutustabel niiske vilja suurematest kuivatuskuludest

Niiskema vilja suurem kuivatuskulu							
Niiskus %	Kuiv vili (14%)	Vee sisaldus kuivas viljas, kg	Vilja kuivaine mass, kg	Põllukaal, kg	Eraldunud vesi, kg	Kuivatamiseks vajalik diislikütus kogus, kg	Kütuse maksumus portsjoni kohta, EUR
16	20000	2800	17200	20476	476	66,9	46,8
19	20000	2800	17200	21235	1235	173,5	121,4
22	20000	2800	17200	22051	2051	288,2	201,8
25	20000	2800	17200	22933	2933	412,2	288,5
Niiskus %	Soojusenergia kulu, MJ	Elektrienergia kulu					
		Kuivatuse režiimi kestvus P=550kW, h	Kuivatamise režiimi energiakulu, kWh	Täitmise režiimi kestvus, h	Täitmise režiimi energiakulu, kWh	Jahutamise režiimi kestvus, h	Jahutamise režiimi energia kulu, kWh
16	2857	1,4	39	0,5	4,3	1,0	26,2
19	7407	3,7	102	0,5	4,3	1,0	26,2
22	12308	6,2	169	0,5	4,3	1,0	26,2
25	17600	8,9	242	0,5	4,3	1,0	26,2

	Elektrienergia kulu				Portsjoni elektri-energia maksumus, EUR	Portsjoni kogu maksumus, EUR	Energia-kulude muutus (19% niiskuse suhtes)
Niiskus %	Tühjendamise režiimi kestvus, h	Tühjendamise režiimi energiakulu, kWh	Portsjoni kuivatamise kestvus, h	Portsjoni elektrienergiakulu, kWh			
16	0,5	6,6	3,4	76,4	7,6	54,5	0,4
19	0,5	6,6	5,7	139,1	13,9	135,3	-
22	0,5	6,6	8,2	206,5	20,7	222,4	1,6
25	0,5	6,6	10,9	279,3	27,9	316,5	2,3

Teravilja niiskuse sisalduse tõustes suureneb energiavajadus ja kuivatamiseks kulub rohkem aega.

3.3.8 Niiskuse täpsem määramine

Teravilja viimisel kokkuostu peab see olema kuivatatud kindla niiskuseni. Üldjuhul on selleks niiskuseks teraviljade puhul maksimaalselt 14% ja rapsi puhul 9%. On oluline jälgida, et kuivatatava vilja lõppniiskus oleks nendele niiskusemääradest väiksem aga neile lähedase väärtusega. Liigse kuivatamisega kulutatakse asjatult kuivati ressursi ja kasutatakse liigselt energiat. Lisaks kaotatakse teradest massi, mille arvelt oleks võimalik kokkuostust raha saada. Tabelis 3.10 on arvutatud kui palju suurenevad energiakulud, kui teravilja kuivatatakse üle vajaliku niiskusemäära. Lisaks on samas tabelis arvutatud liigse kuivatamisega tekkiv massi kaotus.

Tabel 3.10. Arvutustabel liig kuivatamise mõjust energiakulule ja vilja massile

	* %	* %	* %	* %	* %
Kuiva vilja niiskus, %	**14**	**13,5**	**13**	**12,5**	**12**
21235 kg 19 % teravilja kuivatamisel * %, kg	20000	19885	19771	19658	19546
Massi kaotus 19% maha arvestades, kg	1235	1350	1464	1577	1689
Massi kaotus võrreldes 14%, kg	-	115,6	229,9	342,9	454,6
Liigne energiakulu (6 MJ/kg vee eraldamiseks), MJ	-	693,7	1379,3	2057,2	2727,3
Energiakulud on suuremad, %	-	**9,4**	**18,6**	**27,8**	**36,8**
Liigne diislikütuse kulu, kg	-	16,24	32,30	48,18	63,87
Liigse kütuse maksumus (0,7 EUR/kg), EUR	-	11,37	22,61	33,72	44,71
Kuivatatud vilja maksumus 165 EUR/t, EUR	3300,1	3281,0	3262,1	3243,5	3225,1
Kaotus massi vähenemisest, kg	-	19,08	37,93	56,57	75,00

Kaotus liigsest kuivatamisest aastas (30 tk), EUR	-	341	678	1012	1341
Kaotus massi vähenemisest aastas (30 tk), EUR	-	572	1138	1697	2250
Majanduslik kaotus aastas (30 tk), EUR	-	**913**	**1816**	**2709**	**3591**

Ventileeritavatesse punkritesse on võimalik paigaldada niiskuse ja temperatuuriandurid. Nende olemasolul on võimalik teada täpselt, millal vilja ventileerimine lõpetada.

3.3.9 Kuivatusaja jälgimine

Energiasäästlik on kuivatada siis kui õhu olekuparameetrid on selleks sobivad. Sobivad parameetrid on siis kui õhutemperatuur on kõrge. Suhtelise õhuniiskuse ja vihma mõju soeõhkkuivati efektiivsusele on väike.

Õhukoguse soojendamiseks kuluv energia on arvutatud valemiga[9].

$$Q_{\tilde{o}} = \Delta H \times m_{\tilde{o}}, \tag{3.7}$$

kus $Q_{\tilde{o}}$ on õhu soojendamiseks vajalik kuivatiahju võimsus kW;
ΔH – kuivatusõhu ja kuivatist väljuva õhu entalpia muut kJ/kg;
$m_{\tilde{o}}$ – kuivatusõhu massi vool kg/s.

Tabelis 3.11 olevate õhuparameetrite leidmiseks on kasutatud programmi Mollier Sketcher 2.1b[24]

Tabel 3.11. Arvutustabel soojusvõimsuse vajaduse kohta erinevate õhu parameetrite korral

Nimetus	Päeval 60%	Öösel 100%	Päeval 70%	Vihmaga 100%
Õhu temperatuur T_0, °C	20	5	15	15
Kuivatus temperatuur T_1, °C	75	75	75	75
Väljuva õhu temperatuur T_2, °C	40	40	40	40
Suhteline õhuniiskus, %	60	100	70	100
Tehniline niiskus d_0, g/kg	8,73	5,4	7,14	10,64
Tehniline niiskus d_1, g/kg	8,73	5,4	7,14	10,64
Tehniline niiskus d_2, g/kg	22,61	19,19	21,25	24,56
Tehniline niiskus Δd, g/kg	13,88	13,79	14,11	13,92
Entalpia H_0, kJ/kg	42,3	18,6	33,8	42

Entalpia H_1, kJ/kg	98,4	89,6	94,9	103,4
Entalpia H_2, kJ/kg	98,4	89,6	94,9	103,4
Entalpia ΔH, kJ/kg	56,1	71	61,1	61,4
Õhu kulu, m^3/h	30000	30000	30000	30000
Kuivatusõhu kulu $m_õ$, kg/s	10,0	10,0	10,0	10,0
Kuivatusahju vajalik soojusvõimsus $Q_õ$, kW	561	710	611	614
Soojusvõimsuste vahe $\Delta Q_õ$, kW	0	149	50	53
Antud õhu olekuparameetritega energiakulu erinevus, %	0	26,6	8,9	9,4
Võimsusevajadus kuivatiahju (P=550 kW) suhtes	1,02	1,29	1,11	1,12
Portsjoni energiakulu suurenemine arvutuste alusest (2200 kWh), kWh	2244	2840	2444	2456
Soojusenergia kulu portsjoni kohta, EUR	132,4	167,6	144,2	144,9

Soojusenergia vajadus välisõhu soojendamiseks sõltub algtemperatuurist ning õhuniiskuse mõju on väike.

3.3.10 Kütuseliigi ümbervahetamine

Kuna kuivatamisel moodustab väga suure osa kütusekulu, siis on mõistlik kaaluda kuivatuse kulusid erinevate kütuseliikidega. See oluline otsus tuleb teha kuivatit valides, sest hilisem ümberehitamine teisele kütteliigile on kulukas. Antud kuivati puhul on võimalik olemasolev kerge kütteõli põleti vahetada põlevkiviõlil töötava põleti vastu. Kütuseliigi ümbervahetusest saadav majanduslik sääst on tabelis 3.12. Põlevkiviõli kütusele üleminekul vajamineva kütuse kogus suureneb.

Tabel 3.12. Arvutustabel kütuseliigi ümbervahetamisega tekkivast kokkuhoiust

	Erimärgistatud diislikütus	**Põlevkiviõli**
Hind, EUR/t	700	500
Kütteväärtus Q_a , MJ/kg	42,7	37,6
Hind EUR/MJ	0,016	0,013
Tarbitav soojusenergia MJ	213500	213500
Kütuse maksumus, EUR	3500	2839
Kogus, tonni	5,00	5,68
Portsjoni maksumus, EUR	129,8	105,3
Majanduslik kokkuhoid kütusetüübi vahetusest, EUR aastas	-	**660,9**
Ümberehituse maksumus	-	1500
Hoolduse vajadus, kordne	1	1,2
Tasuvusaeg, aasta	-	**2,3**

Põleti ümberehituse maksumus sõltub konkreetsest põleti mudelist. Loona kuivatis olevat mudelit on keeruline ümber ehitada ning sellest kõrge maksumus. Mitmetel teistel põleti mudelitel on vahetus soodsam.

3.4 Kokkuvõttev tabel

Analüüsitud meetmetest on koostatud tabel 3.13. Tabelis on välja toodud selle meetme rakendamisel tekkiv majanduslik kasu ühe kuivatusportsjoni kohta. Iga meetme kohta on tabelis on ühes tulbas energiakulu, kui meetodit ei ole rakendatud. Energiakulu on sellisel juhul kava alguses nimetatud väärtus. Kõrval tulbas on meetme rakendamisel saavutatav energiasääst.

Tabel 2.13 Kokkuvõttev tabel rakendatavatest meetmetest

Kuivatustemperatuuri tõstmine	Temperatuuril 15°C / Suhteline niiskus 80%			
	Kuivatustemperatuur	70 °C	90 °C	110 °C
	Sääst (70°C), %	-	5,2	8,8
	Energiasääst, EUR	-	6,8	11,5
	Energiasääst portsjoni kohta			
Õhukulu juhtimine			**Tava**	**Protsess**
	Elektrienergia, EUR		6	3,8
	Soojusenergia, EUR		129,8	97,4
	Meetme rakendamisel sääst 34,6 eurot portsjoni kohta			
Isolatsiooni paigaldus kuivatile				
	Variant	**1.**	**2.**	**3.**
	Energiasääst, EUR	5	13	13
	Tasuvusaeg, a	63,8	1,5	2,3
	Koos teiste meetmete rakendamisel saab, sealsest võimalikust energiakogusest arvutada maha vastavalt kas 5, 10 ja 10 protsenti			
Kuivatiahju hoolduse jälgimine				
	Seisukord	**Hea**	**Rahuldav**	**Halb**
	Energiasääst, EUR	-	3,2	6,5
	Iga aasta tuleb läbi viia kuivati põleti hooldus. Kuivatiahi oli alguses uus ning arvatavasti heasse seisukorda reguleeritud. Korraline ahju ülevaatus vähendab tuleohuriski ning väldib seisakuid kuivatusperioodil			
Viljaringlemise reguleerimine				
	Oluline viljaniiskuse ühtlustumise pärast			
Teravilja lõõgastamine			**Tava**	**Protsess**
	Elektrienergia, EUR		14,6	11,7
	Soojusenergia, EUR		129,8	97,4
	Meetme rakendamisel sääst 35,3 eurot portsjoni kohta			
	Soeõhkkuivati vabanev kuivatusvõimsus 2,0 h			

Jahutuspunkris jahutamine			**Tava**	**Protsess**
	Elektrienergia, EUR		14,6	12,2
	Soojusenergia, EUR		129,8	113,6
	Meetme rakendamisel sääst 18,6 eurot portsjoni kohta			
	Soeõhkkuivati vabanev kuivatusvõimsus 1,5 h			
Koristusaja valimine				
	Vilja niiskus	**19%**	**22%**	**25%**
	Elektrienergia, EUR	13,9	20,7	27,9
	Soojusenergia, EUR	121,4	201,8	288,5
	Kulutuste kasv portsjoni kohta		80,4	167,1
	Kuivamise aeg, h	5,7	8,2	10,9
	Kuivatuskulud kasvavad vilja niiskuse suurenedes väga oluliselt.			
Niiskuse täpsem määramine				
	Teravilja niiskus	**14%**	**13%**	**12%**
	Energiakulu, EUR	-	22,61	44,71
	Massi kaotus, EUR	-	37,93	75
	Liigsel kuivatamisel on väga suur mõju kuivatuskuludele. Täpsemaks määramiseks tuleb mõõtmisi sooritada sagedasti			
Kuivatusaja jälgimine				
	Kuivatuse aeg	**Päeval**	**Öösel**	**Vihmaga**
	Soojusenergia, EUR	132,4	167,6	144,9
	Energiakulu erinevus	-	26,60%	9,40%
	Suurem kulu, EUR	-	35,2	12,5
Kütuseliigi ümbervahetamine				
	Kütus		**Diislikütus**	**Põlevkiviõli**
	Soojusenergia, EUR		129,8	105,3
	Tasuvusaeg, a		-	2,3
	Investeering küttesüsteemi vahetusse tasub ära, energiatõhususe seisukohalt ei ole mõistlik otsus, sest kütuse kogus suureneb			

Tabelis olevad arvutused on tehtud iga meetodi kohta eraldi. Mitme säästumeetodi koos rakendamisel on saavutatav kokkuhoid väiksem.

3.5 Rakendusplaan

Uuritud meetmetest on saab teha järeldused

- Mõistlik on tõsta kuivatamisel nende teraviljakultuuride kuivatustemperatuuri, mille kvaliteet ei ole oluline.
- Õhukoguse reguleerimiseks peab võtma midagi aluseks. Kas leida mõni aeg, millest alates hakata vähendama ventilaatorite kiirust või sooritada mõõtmisi kuivati väljapuhke torustiku juures, et saada teada suhtelist õhuniiskust ning selle langedes alla 80%, saab hakata vähendama ventilaatorite kiirust. Õhukulu vähendamise mõju kuivatuse ajale ei ole antud kuivati puhul päris selge ning vajab katsekuivatust.
- Antud kuivatile ei ole mõistlik ainult soojusisolatsiooni lisada. Soojusisolatsiooni lisamine eeldab kuivatile hoone ümber ehitamist, sest ilma ilma eest kaitseta ei kesta isolatsioonimaterjalid väga kaua. Soojusisolatsiooni on vaja kaitsta ka lindude eest ning neid leidub kuivati juures rohkelt.
- Kuivatiahju hooldus tuleb läbi viia vähemalt iga kahe aasta tagant. Arvutustes on näha, et reguleerimata põleti korral suureneb energiakasutus märkimisväärselt.
- Kõrgete kuivatustemperatuuride korral peab viljaringluse kiirus olema suur. Kui vili ringleb liiga aeglaselt tõuseb tera temperatuur liiga kõrgele ning tera kvaliteet kahaneb.
- Lõõgastamise meetodiga saab teravilja ainult siis kuivatada, kui on vaba ruumi ventileeritavates teraviljapunkrites ning ilmad on kuivad.
- Ventileeritavates punkrites teravilja jahutamist saab edukalt rakendada. Arvestama peab seda ,et kuiva vilja niiskust on sellisel viisil keeruline kindlaks teha ning risk on vilja liigselt kuivatada või liiga vähe kuivatada. Sellega kaasnevad kulud
- Niiske vilja kuivatamisel suurenevad kuivatuse kulud oluliselt. Oluliselt suureneb ka kuivatamiseks kuluv aeg.
- Õigele niiskustasemele kuivatatud vilja korral hoitakse kokku energiakuludelt ning saadakse suurim kogus kuiva vilja.
- Kuivati kuivatusaega ei ole üldjuhul vaja jälgida. Soojendatud õhuga kuivati efektiivsus sõltub suures osas vaid temperatuurist ning vihma ning suhtelise niiskuse mõju on väike.
- Lähteandmetes antud diislikütuse hinna (0,7 EUR/kg) ning põlevkiviõli hinna (0,5 EUR/kg) korral tasub kütteliigi vahetus ära.

KOKKUVÕTE

Antud töö kasvas välja soovist saada teada rohkem kuivatamisest ning soovist teada saada mis meetmeid on võimalik rakendada kuivatuseprotsessi energiatõhusamaks muutmiseks. Enne lõputöö kirjutama asumist ei teadnud ma eriti kuivatamise protsessist ning avastasin, et eesti keeles ei ole väga häid kokkuvõtvaid tekste kuivatamise efektiivsemaks muutmise kohta. Sellepärast sai uuritud välismaist kirjandust, peamiselt Soome välja antud õpikut ning teadustöid ja Põhja-Ameerika internetilehekülgi.

Sellepärast et eestikeeles on teraviljakuivatite energiasäästmise alaseid tekste on vähe koostatud. On antud energiatõhususe parendamise kava ette lisatud ka säästumeetmeid lahti seletav teooriaosa. Seda sellepärast et kava lugeja saaks aru, mis põhjusel mõni meetod põhineb.

Energiasäästukava koosneb suures osas teoreetilistest arvutustest. Loona kuivatist on võetud kuivati tehnilised andmed ning kuivatis läbikäidava vilja kogus. Samuti kui palju kulub aastas kütust. Kavas arvutatud tulemused on teisendatud teraviljakuivati portsjoni kohta. Seda sellepärast, et osa energiatõhususe meetodeid on seotud kuivatuse protsessi muutmisega ning sealt saadav kasu on seotud ka ajaga. Parema võrdluse jaoks on sellepärast kõik säästumeetmed teisendatud säästuks portsjoni kohta.

Arvutused näitavad et kuivatuse protsessile on mõistlik detailsemalt läheneda, sest kuivatuse protsessi saab mitme meetme abil oluliselt energiatõhusamaks muuta. Olulisemate tulemustena saab välja tuua kuivatuse temperatuuri tõstmise, kuivatusõhu koguse täpsemat juhtimist, kuivatuse mitme astmeline läbiviimine ning vilja lõppniiskuse täpsem määramine.

SUMMARY

This work grew out of a desire to learn more about drying and a desire to know what measures can be taken to make the drying process more energy efficient. Before I started writing my dissertation, I didn't know much about the drying process. And I discovered that there are no very good summary texts in Estonian about making drying more efficient. That is why foreign literature was studied, mainly the textbook and research published in Finland and the websites of North America. Because there are no texts in Estonian on energy saving for grain dryers a theoretical part explaining the energy-saving measures has also been included in this energy efficiency improvement plan. This is because the reader of the plan needs to understand the reason why something is being done.

The energy-saving plan largely consists of theoretical calculations. The technical data of the dryer have been taken from the Loona dryer and the amount of grain passing through the dryer. Also, how much fuel is used per year. The results calculated in the plan have been converted per portion of the grain dryer. This is because some energy efficiency methods involve changing the drying process and the benefits are time related. For a better comparison, therefore, all savings measures have been converted to savings per portion.

Calculations show that it makes sense to approach the drying process in more detail, as the drying process can be made significantly more energy efficient through several measures. The most important results are raising the drying temperature, more precise control of the amount of drying air, several stages of drying, and more precise determination of the final moisture of the grain.

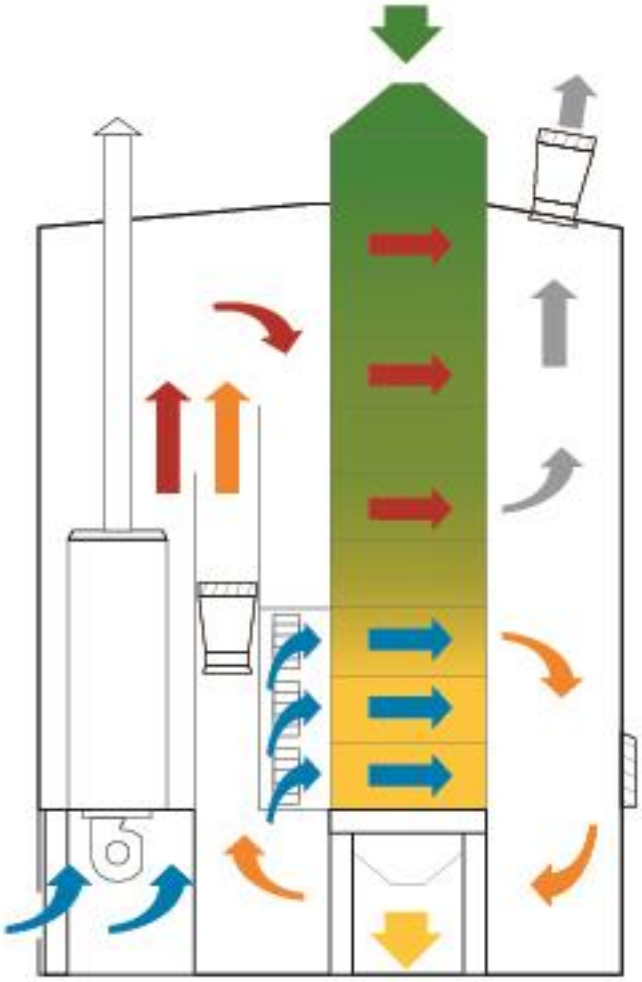
KASUTATUD KIRJANDUS

1. Tänavune teraviljasaak lööb rekordeid. Kättesaadav: https://blog.stat.ee/2019/10/02/tanavune-teraviljasaak-loob-rekordeid/. (10.05.2020)
2. Kuidas Profi testib?. Kättesaadav: https://www.profieesti.ee/testcenter. (10.05.2020)
3. AGRONOOMIA 2019. Kättesaadav: https://www.etki.ee/taim/public/pdf/Trukised/Agronoomia2019.pdf. (10.05.2020)
4. Kui suurt tulu teenis põllumees?. Kättesaadav: https://blog.stat.ee/2019/10/08/kui-suurt-tulu-teenis-pollumees/. (10.05.2020)
5. PM063: Tera- ja kaunvilja ning rapsiseemne kokkuost (1996-2016). Kättesaadav: http://andmebaas.stat.ee/Index.aspx?lang=et&DataSetCode=PM063. (10.05.2020)
6. Põllumajanduse, kalanduse ja toiduainetööstuse ülevaade 2018. Kättesaadav: https://www.agri.ee/sites/default/files/content/ylevaated/ulevaade-pokat-2018.pdf. (10.05.2020)
7. Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030. Kättesaadav: https://www.mkm.ee/et/eesmargid-tegevused/energeetika/eesti-riiklik-energia-ja-kliimakava-aastani-2030. (10.05.2020)
8. **Poobus, A., Tiikma, T.** (2002). Kuivatustehnika. Tallinn: TTÜ kirjastus. 138 lk.
9. **Ahokas, J., Hautala, M.** Maatilakuivurit. (2012). Kättesaadav: https://enpos.weebly.com/uploads/3/6/7/2/3672459/maatilakuivurit.pdf (10.05.2020)
10. **Jokiniemi, T**. (2016). Energy efficiency in grain preservation. (Doktoritöö). University of Helsinki Department of Agricultural Sciences. Helsinki
11. **Tiusanen, M.J., Jokiniemi, H.T., Hautala, M.I.** (2013). Grain dryer temperature optimisation with simulation and a test dryer. 4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post Harvest Industry. August 27-30, 2013. Espoo, Finland
12. Paigaldus- ja kasutusjuhend (408111 (et)). Kättesaadav: https://antti-teollisuus.fi/wp-content/uploads/408111-Vacboost-Vaunukuivuri-M13_et_01-2019.pdf. (20.03.2020)
13. **Jokiniemi, T., Oksanen, T. and Ahokas, J.** (2015). Continuous airflow rate control in a recirculating batch grain dryer. Agronomy Research 13(1), 89–94.
14. Drying Systems for grain and oil seeds. Kättesaadav: https://former.buhlergroup.com/southamerica/pt/downloads/GL_EB_Drying_Systems_EN_14003_02.pdf (10.05.2020)
15. **Jokiniemi, T., Ahokas, J.** (2014). Effect of heat insulation on the energy consumption of recirculating mixed-flow batch grain dryer. Agric Eng Int: CIGR Journal, 16(3): 205－213.

16. **Kallas, A.** (1996). Soeõhkkuivatid. Saku. Eesti Põllumajanduse Mehhaniseerimise Instituut. 72 lk.
17. **Cardoso, L., de la Torre, D., Bartosik, R.** (2018). Bin coring: a simple practice for improving aeration performance and saving energy. 12th International Working Conference on Stored Product Protection (IWCSPP) in Berlin, Germany, October 7-11, 2018
18. Reducing Energy Use in Grain Dryers. Kättesaadav: http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/17-001.pdf. (10.05.2020)
19. Vedelkütuse erimärgistamise seadus. Kättesaadav: https://www.riigiteataja.ee/akt/VKEMS. (10.05.2020)
20. Preco mobile dryer. Kättesaadav: https://www.preco.lv/uploads/products_items/files/file_1_11_7.pdf. (10.05.2020)
21. Kevili viljahinnad. Kättesaadav: https://www.kevili.ee/viljahinnad#2020 (01.04.2020)
22. **Lehtla, T.** (2004). Elektriajamid. Üldkursus. TTÜ elektriajamite ja jõuelektroonika instituut. Tallinn. 201 lk.
23. Schmelzer. Agricultural equipment. kataloog. Kättesaadav: https://www.a-schmelzer.com/schmelzer/Downloads/German/Agrartechnik/GERENG_AGRAR_Agrartechnik_Katalog.pdf. (10.05.2020)
24. Mollier Sketcher. Arvutiprogramm. Kättesaadav: https://www.ivprodukt.com/software/mollier-sketcher. (10.05.2020)
25. **Paist, A., Poobus, A,.** (2009). Soojusgeneraatorid. Tallinn: TTÜ kirjastus. 148 lk.
26. **Treier, V, Hovi.M**. (1997). Kuivatusõpetus. Tartu: Eesti Põllumajandusülikool. 64 lk.
27. **Lahtmets, R**. (2008). Tehnoloogia ja ajamid. 2. trükk. TTÜ elektriajamite ja jõuelektroonika instituut. Tallinn. 99 lk.
28. Continuous Flow Dryer DWU. Veebileht. Kättesaadav: http://www.petkus.com/products/-/info/drying/continuous-flow-dryer/continuous-flow-dryer-wu. (10.05.2020)

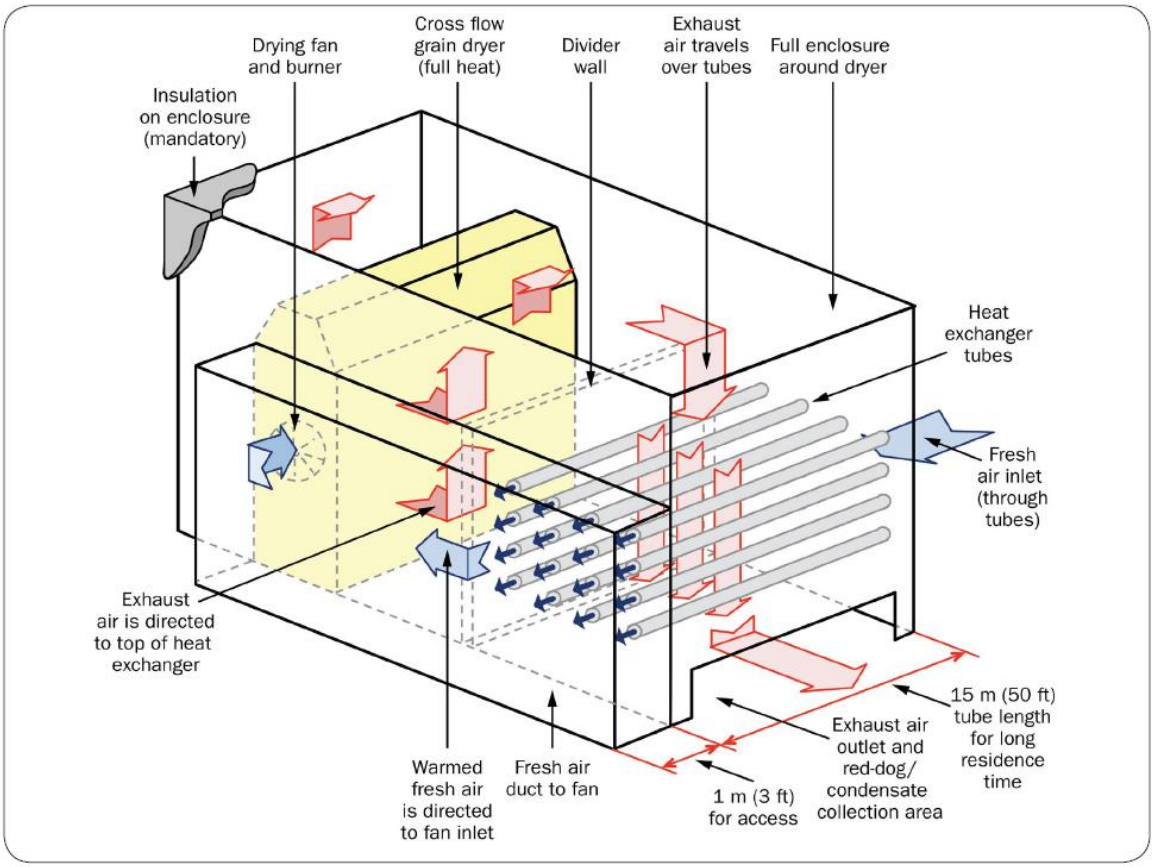
LISAD

Lisa 1. Kuivatusõhu taaskasutamise skeem



Kuivatusõhu taaskasutamine pidevatoimelises teraviljakuivatis PETKUS DWU[28].

Lisa 2. Soojusvaheti niiske väljapuhke õhu soojustagastuseks



Soojusvaheti artiklist *Reducing Energy Use in Grain Dryers*[18].

Lisa 3. Loona kuivati andmed arvutusteks

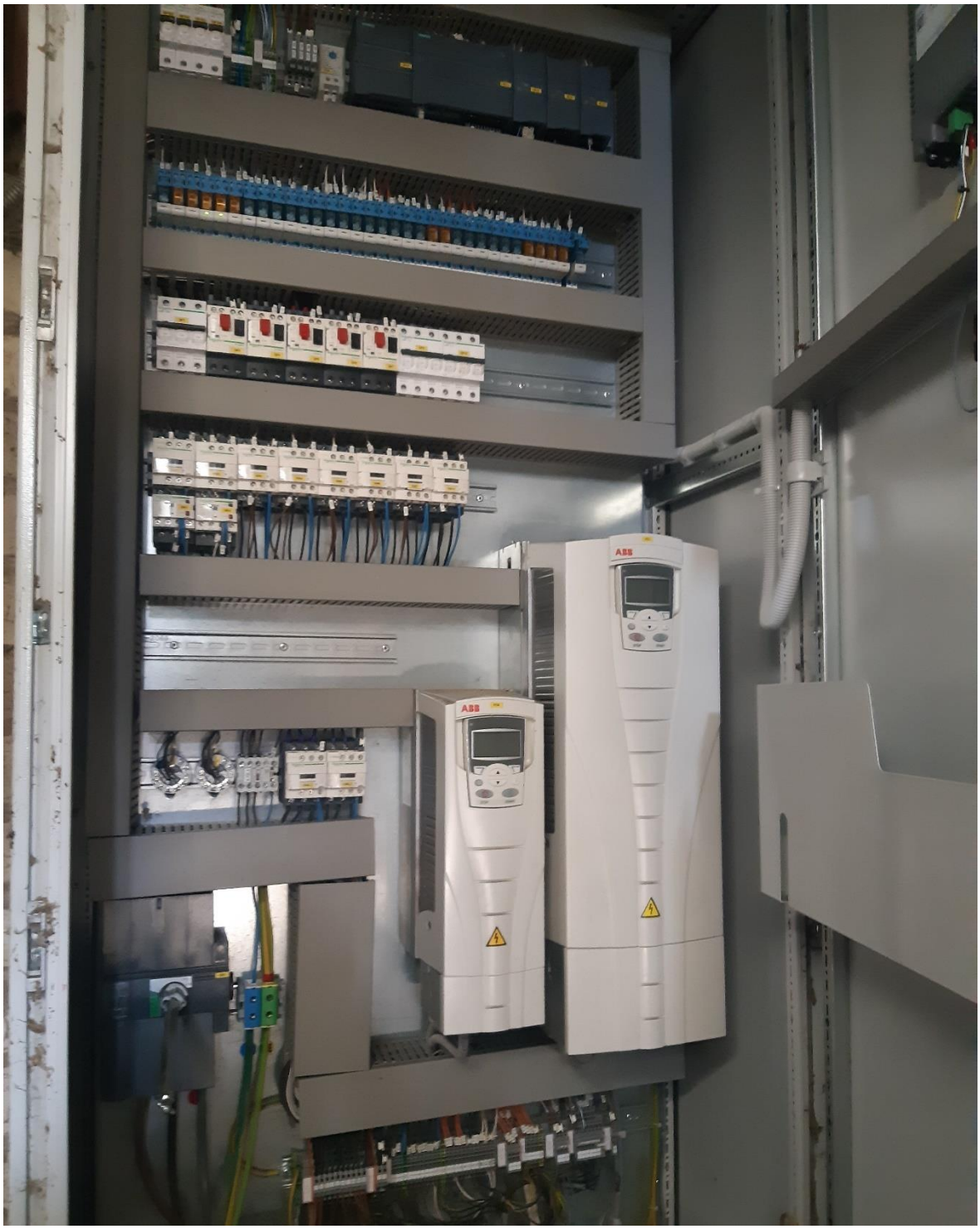
Kuivati andmed			
Üld gabariidid:	pikkus	4,2	m
	laius	3,2	m
	kõrgus	11,5	m
Kuivatus- ja puhversektsiooni:	pikkus	4,12	m
	laius	2,06	m
	kõrgus	3,6	m
	välisseinte pindala	44,5	m^2
Sooja õhu jaotuse/väljatõmbe sektsioon:	soojakanali pindala	10	m^2
	välisseinte pindala	20	m^2
Vilja kogus kuivatis:	kuivatussektsioon	15	m^3
	puhversektsioon	13,5	m^3
	kokku	27,5	m^3
	Nisu	20,9	T
	Oder	17,6	T
Kuivati ahi:	võimsus	kuni 580	kW
	kütuse tüüp	diislikütus	
	põleti elektrikulu	0,8	kW
	kütusekulu	12,5 - 50	L/h
Kuivati ventilaatorid:	ventilaatori tüüp	aksiaalventilaator	
	el.mootori võimsus	2x7,5	kW
	õhukogus	2x18000	m^3/h
Koppelevaator:	tootlikus	60	T/h
	el.mootori võimsus	5,5	kW
Eelpuhasti:	ventilaatori tüüp	radiaalventilaator	
	el.mootori võimsus	2,2	kW
Sisselaske kraapkonveier:	tootlikus	60	T/h
	el.mootori võimsus	1,5	kW
Väljalaske kraapkonveier:	tootlikus	60	T/h
	el.mootori võimsus	1,5	kW
Tühjendus siibrite käitamine:	el.mootori võimsus	0,75	kW
Vastuvõtu kraapkonveier:	tootlikus	60	T/h
	el.mootori võimsus	1,5	kW
Ventileeritavad teraviljapunkrid			
Teraviljapunkrite koppelevaator:	tootlikus	60	T/h
	el.mootori võimsus	5,5	kW
Tühjendustigutransportöör (2tk):	tootlikus	60	T/h
	el.mootori võimsus	4	kW
Teraviljapunker (2tk):	maht	110	m^3
	viljamass nisuga	90	T
	viljamass odraga	80	T
Jahutusventilaator:	el.mootori võimsus	4,4	kW

Lisa 4. Elektrienergia kulu teraviljakuivatuse erinevatel režiimidel

Täitmiserežiim:	Vastuvõtukraap	1,50	kW
	Kuivati koppelevaator	5,50	kW
	Sisselaske kraapkonveier	1,50	kW
	Kokku	**8,50**	**kW**
Kuivatamiserežiim:	Kuivati koppelevaator	5,50	kW
	Sisselaske kraapkonveier	1,50	kW
	Väljalaske kraapkonveier	1,50	kW
	Tühjendus siibrite käitamine	0,75	kW
	Eelpuhasti	2,20	kW
	Kuivati ventilaatorid	15,00	kW
	Põleti elektrikulu	0,80	kW
	Kokku	**27,25**	**kw**
Jahutuserežiim:	Kuivati koppelevaator	5,50	kW
	Sisselaske kraapkonveier	1,50	kW
	Väljalaske kraapkonveier	1,50	kW
	Tühjendus siibrite käitamine	0,75	kW
	Eelpuhasti	2,20	kW
	Kuivati ventilaatorid	15,00	kW
	Kokku	**26,45**	**kw**
Kuivati tühjendamiserežiim:	Kuivati koppelevaator	5,50	kW
	Väljalaske kraapkonveier	1,50	kW
	Teraviljapunkrite koppelevaator	5,50	kW
	Tühjendus siibrite käitamine	0,75	kW
	Kokku	**13,25**	**kW**
Teraviljapunkrites jahutamise režiim:	Jahutusventilaator	4,00	kW
	Kokku	**4,00**	**kW**
Teraviljapunkrite tühjendusrežiim:	Väljalaske kraapkonveier	5,50	kW
	Tigutransportöör	4,00	kW
	Kokku	**9,50**	**kW**
Elektrimootorite kogu paigaldusvõimsus:		**46,25**	**kW**

Lisa 5. Fotod Loona kuivatist

Portsjonkuivati Preco MD2x2 ja kaks ventileeritavat teraviljapunkrit.



Kuivati juhtimiskilp.

Kuivatiahi õlipõletiga Riello RL50/M.

Lisa 6. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Mart Saun,
(*autori nimi*)

sünniaeg 15.02.1984,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö
2. Loona kuivati energiatõhususe parendamise kava,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on lektor Külli Hovi, lektor Mart Hovi,
(*juhendaja(te) nimi*)

2.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
2.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
2.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

3. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor Mart Saun (allkirjastatud digitaalselt)
(*allkiri*)

Tartu, digiümbrikus
(*kuupäev*)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Külli Hovi (allkirjastatud digitaalselt) digiümbrikus
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)

Mart Hovi (allkirjastatud digitaalselt) digiümbrikus
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)