Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Viljakuivurien energiatarkastelu

Pasi Vornanen

Kandidaatintyö
LUT Energia
Sähkötekniikan koulutusohjelma

11.5.2016

TIIVISTELMÄ

Pasi Vornanen
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka
Tarkastaja: Tutkijaopettaja TkT. Antti Kosonen

Viljakuivurien energiatarkastelu

2016

Kandidaatintyö.
25 s.

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan lämminilmaviljakuivurien energiankulututusta ja mahdollisuutta öljyn säästöön ilmalämpöpumppuratkaisulla sekä aurinkosähkön käyttöä osana kuivurin ja maatilan energiantuotantoa. Työn kirjallisuusosassa tutustutaan lyhyesti viljankuivausprosessin fysiikkaan ja nykyaikaisen lämminilmakuivurin toimintaan. Puintikostea vilja tulee kuivattaa varastointia varten. Viljan kuivaukseen käytettävä energia on noin 13 % viljelyyn kuluvasta energian kokonaiskulutuksesta ja näin ollen kuivauksessa saavutettavat säästöt näkyvät suoraan myös viljelykustannuksissa.

Ilmalämpöpumppuratkaisua tarkastellaan teoreettisella tasolla laskennallisesti energiankulutuksen ja taloudellisuuden näkökulmista. Öljyuunin korvaaminen osittain tai kokonaan sähkökäyttöisellä ilmalämpöpumpulla vähentää öljynkulutusta, jolloin myös päästöt vähenevät. Ilmalämpöpumpulla voidaan tuottaa moninkertaisesti lämpöä kulutettuun sähköenergiaan nähden, joten näin ollen myös kokonaisenergiankulutus vähenee. Kuivauskäyttöön mitoitetun ilmalämpöpumpun vaatima verrattain suuri sähköteho kasvattaa tarvittavaa sulakekokoa, joten maatilan sähköliittymä tulisi päivittää suuremmaksi. Taloudellisesti kannattavaksi ilmalämpöpumppuratkaisu tulee erityisesti suurilla kuivausmäärillä.

Auringosta saatavaa energiaa voidaan käyttää sähkönä puhaltimen pyörittämiseen ja valaistukseen tai suoraan lämpönä aurinkokeräinjärjestelmällä. Aurinkovoimalan hankkiminen pelkästään viljankuivauskäyttöön ei ole taloudellisesti kannattavaa, joten voimalaa mitoittaessa tulee ottaa huomioon maatilan kokonaissähkönkulutus.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Degree Programme in Electrical Engineering

Pasi Vornanen
Grain dryer energy review

2016

Bachelor's Thesis.
25 p.

Examiner: Associate professor, D.Sc. Antti Kosonen

This Bachelor's Thesis examines the energy consumption of a warm-air grain dryer and the possibility to reduce oil consumption by using heat pump solutions and solar power as part of the dryer and part of the farm's energy production.

The theoretical part of thesis introduces basic physics of grain drying and main components of modern warm-air grain dryer. Fresh grain must be dried before storing to prevent spoiling. Energy consumption of grain drying is about 13 percent of the whole farming process' energy consumption.

Heat-pump solution is examined on theoretical level, concentrating on energy consumption and economical point of view. Replacing oil oven with an electric heat pump, it is possible to gain reductions on energy and oil consumption. A heat pump that is designed for grain drying, needs rather high electrical power and therefore it is necessary to recheck the fuselage capacity of the whole farm. From economical point of view, if there are enough of drying hour it is possible to cover the high investment costs of the heat pump with the saving gained from the reduction of energy consumption.

Solar power can be used in dryer's electrical components for example as an elevator and blower or also directly as a heat energy that is produced with solar collector. Investing on a solar power plant that is used solely for grain drying is not economical and therefore when planning a plant's dimension one should take into account the whole energy usage of the farm.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet 5
1. Johdanto 6
2. Viljankuivaus 6
2.1 Kuivauksen fysiikka 6
2.2 Ilman lämmitys 7
2.3 Lämminilmakuivurit 8
2.3.1 Erä- ja jatkuvatoiminen kuivuri 9
2.3.2 Kuivurin osat 9
2.3.3 Ilmauunit ja lämmitysenergia 10
2.3.4 Puhallin ja ilmavirran säätö 11
2.3.5 Kuivauskennot 11
2.3.6 Elevaattori 11
3. Energian kulutus 12
4. Lämpöpumppujen hyödyntäminen viljankuivauksessa 13
4.1 Kustannusvertailu 15
4.2 Sähköteho ja pääsulakkeet 16
5. Lämmöntalteenotto 18
5.1 Calefa MAHOTON 18
6. Aurinkoenergia 20
6.1 Aurinkosähkön käyttö viljankuivauksessa 21
7. Yhteenveto / johtopäätökset 22
LÄHTEET 23
LIITTEET 25

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

P_{air}	Ilman lämmitykseen vaadittava teho
C_p	Ominaislämpökapasiteetti
ρ	Ilman tiheys
Q_m	Massavirta
ΔT	Lämpötilaero
kW_p	huipputeho
COP	Coefficient of Performance, lämpökerroin
I_b	Mitoitusvirta
U_p	Pääjännite
cos φ	tehokerroin

1. JOHDANTO

Viljanviljelyn kokonaisenergiankulutus oli vuonna 2010 luonnonvarakeskuksen mukaan noin 2,49 TWh. (SVT-tilasto, 2012) Kuivaukseen kuluvan energian osuus on noin 13 % kokonaisenergiankulutuksesta. Tulevaisuudessa öljyn hinnan nousu tarkoittaa kustannusten nousua viljelyn kaikilla osa-alueilla. Kuivauksessa energia kuluu pääosin ilman lämmitykseen, joten on mahdollista korvata öljy muilla polttoaineilla tai jopa sähköenergialla. Korvaamalla öljynpoltto uusiutuvalla energialla, voidaan vähentää päästöjä.

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan viljakuivurien energiankulututusta ja mahdollisuutta öljyn säästöön ilmalämpöpumppuratkaisulla sekä aurinkosähkön käyttöä osana kuivurin ja maatilan energiantuotantoa. Työssä tutustutaan lyhyesti viljankuivausprosessin fysiikkaan sekä yleisimpiin Suomessa käytettyihin kuivurimalleihin.

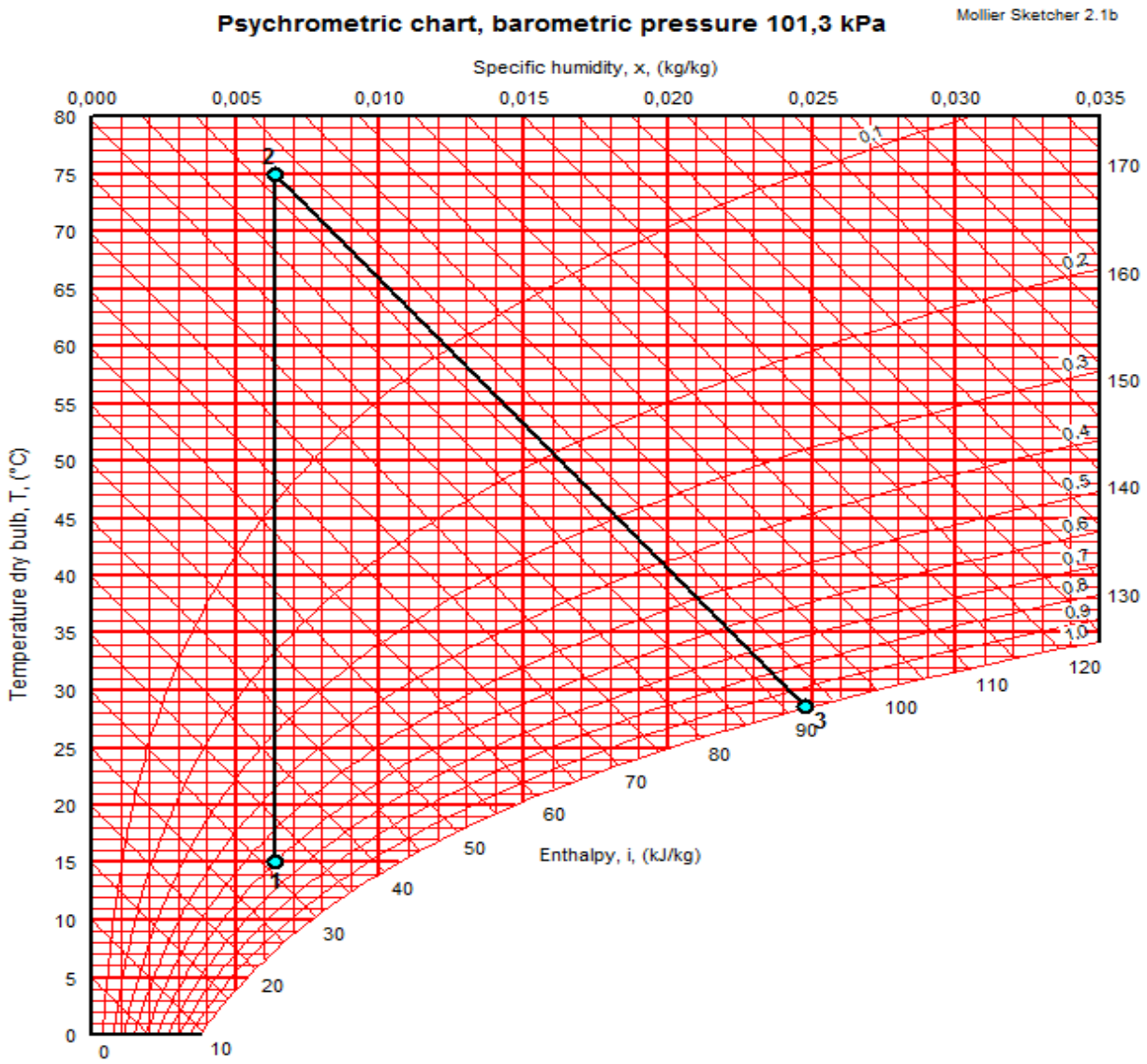
2. VILJANKUIVAUS

Puintikostea vilja on liian kosteaa varastoitavaksi. Viljan puintikosteus on yleensä noin 20 %. Kostea vilja homehtuu ja pilaantuu varastoinnin aikana. Vilja on kuivattava varastointikelpoiseksi ennen kuin se voidaan varastoida siiloihin. Viljan säilyvyyden kannalta varastointikosteus tulee olla alle 14 %. Viljankuivausaika ajoittuu elo- syyskuun ajalle, jolloin puintikelpoisia päiviä on keskimäärin noin 16–20 vuodessa. Kuivurin kapasiteetin olisi hyvä olla puintikapasiteetin suuruinen, jolloin kuivuri ei hidasta korjuuketjua, ja puitu vilja voidaan kuivata välittömästi puinnin jälkeen. Kuivauseriä on kaksi tai kolme päivässä. Kuivuria käytetään yleensä ympäri vuorokauden kuivausaikana. Yhteen kuivauserään kuluu aikaa noin kahdeksasta kahteentoista tuntia, joten kuivurin vuotuinen käyttöaika on noin 300 – 600 h.

2.1 Kuivauksen fysiikka

Viljankuivaus perustuu ilman kykyyn sitoa kosteutta itseensä ilman kulkiessa viljan läpi. Ilman sisältämä energia mahdollistaa veden höyrystymisen kuivausprosessissa. Ilman suhteellinen kosteus nousee sen kulkiessa kuivurin läpi. Ilman suhteellinen kosteus ilmaisee ilmassa olevan vesihöyryn osapaineen suhdetta tietyssä lämpötilassa olevan kylläisen vesihöyryn paineeseen. Kosteusprosentti kertoo kuinka paljon vettä ilma pystyy vielä sitomaan itseensä. Korkeammassa lämpötilassa ilmaan mahtuu enemmän kosteutta. Ilman kosteuden sitomista voidaan tarkastella Mollier- diagrammin avulla. Lämminilmakuivureissa kuivausilmaa lämmitetään kuivuriuunissa kuivauslämpötilaan, jolloin ilman tilavuus ja entalpia kasvaa mutta vesimäärä säilyy samana. Ilman suhteellinen kosteus pienenee ja vedensitomiskapasiteetti kasvaa.

Kuvasta 2.1 nähdään prosessin kulku. Piste 1 kuvaa kuivuriin tulevaa tuloilmaa. Lämpötila 15 °C ja suhteellinen kosteus 60 %. Kuivuriuunissa ilma lämmitetään 75 °C jolloin sen suhteellinen kosteus laskee 2,7 %:iin eli ilmamäärään mahtuu nyt paljon enemmän vettä kuin alussa.



Kuva 2.1 Kuivausprosessin Mollier-diagrammi (Mollier sketcher)

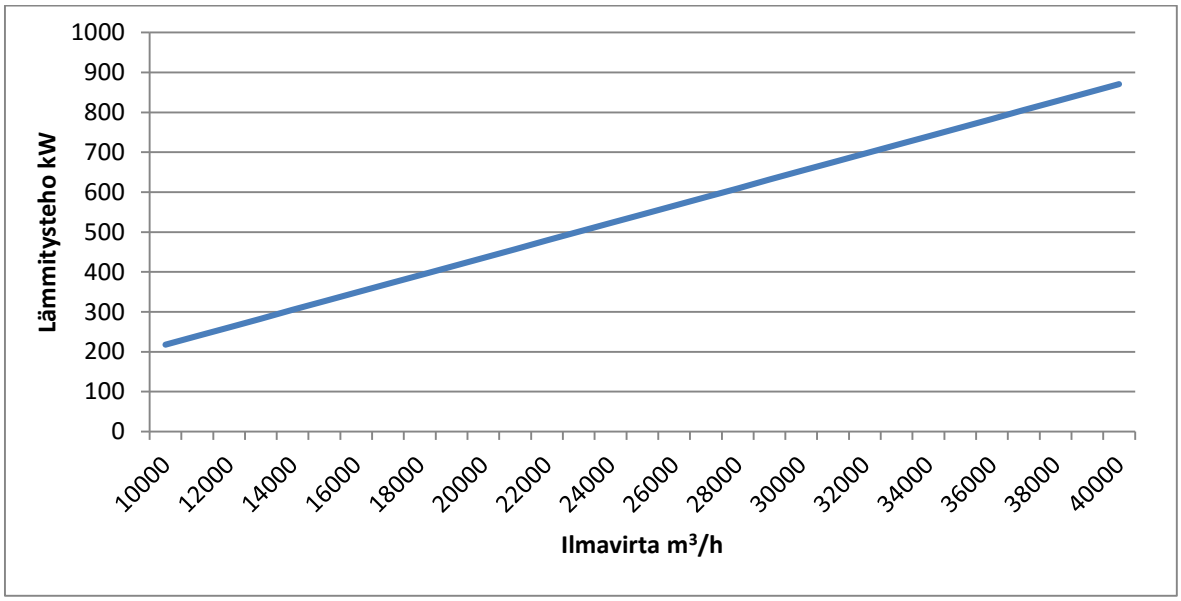
2.2 Ilman lämmitys

Viljakuivurin läpi kulkeva ilmamäärä vaihtelee 10000 m^3/h–40000 m^3/h riippuen kuivurin koosta sekä kuivattavasta viljalajikkeesta. Ilman lämmittämisen vaatima energia riippuu massavirrasta sekä lämpötilaerosta. Viljan kuivausaika on yleensä elokuussa, jolloin ulkoilman lämpötila vaihtelee 12–15 °C välillä. Kuivurin hyötysuhde paranee kuivauslämpötilaa

nostamalla, mutta liian suuri lämpötila tuhoaa jyvien itävyyden. Tutkimusten perusteella hyväksi koettu kuivauslämpötila on noin 70–80 °C. (Ahokas & Hautala, 2013) Kuivurin läpi virtaavan ilmavirran lämmittämiseen vaadittava teho voidaan laskea yhtälöllä

$$P_{\mathrm{air}} = C_{\mathrm{p}} \rho q_{\mathrm{m}} \Delta T \qquad (2.1),$$

jossa C_{p} on ilman ominaislämpökapasiteetti, ρ ilman tiheys, q_{m} massavirta ja ΔT lämpötilan muutos.



Kuva 2.2 Vaadittava lämmitysteho kun ilmaa lämmitetään 15 °**C**:sta 75 °**C**:n

Kuvasta 2.2 nähdään Ilman lämmittämiseen vaadittava lämmitysteho. Vaadittava lämmitysteho voidaan ajatella olevan suoraan verrannollinen kulkevaan ilmamäärään. Käytännössä kuivureissa tapahtuu häviöitä ja kuivuriuunien hyötysuhde on noin 90 %, joten uunin lämmitysteho on mitoitettava suuremmaksi.

2.3 Lämminilmakuivurit

Viljakuivurit voidaan jakaa toimintatavan, sekä rakenteen mukaan erilaisiin kategorioihin. Toimintatavan mukaan kuivurit voidaan jakaa lämminilma ja kylmäilma kuivureihin. Lämminilma kuivureiden teho perustuu lämmitetyn ilman suurempaan vedensitomiskykyyn. Kylmäilma kuivureissa suuri ilmamäärä puhalletaan viljamassan läpi. (Ahokas & Hautala, 2013)

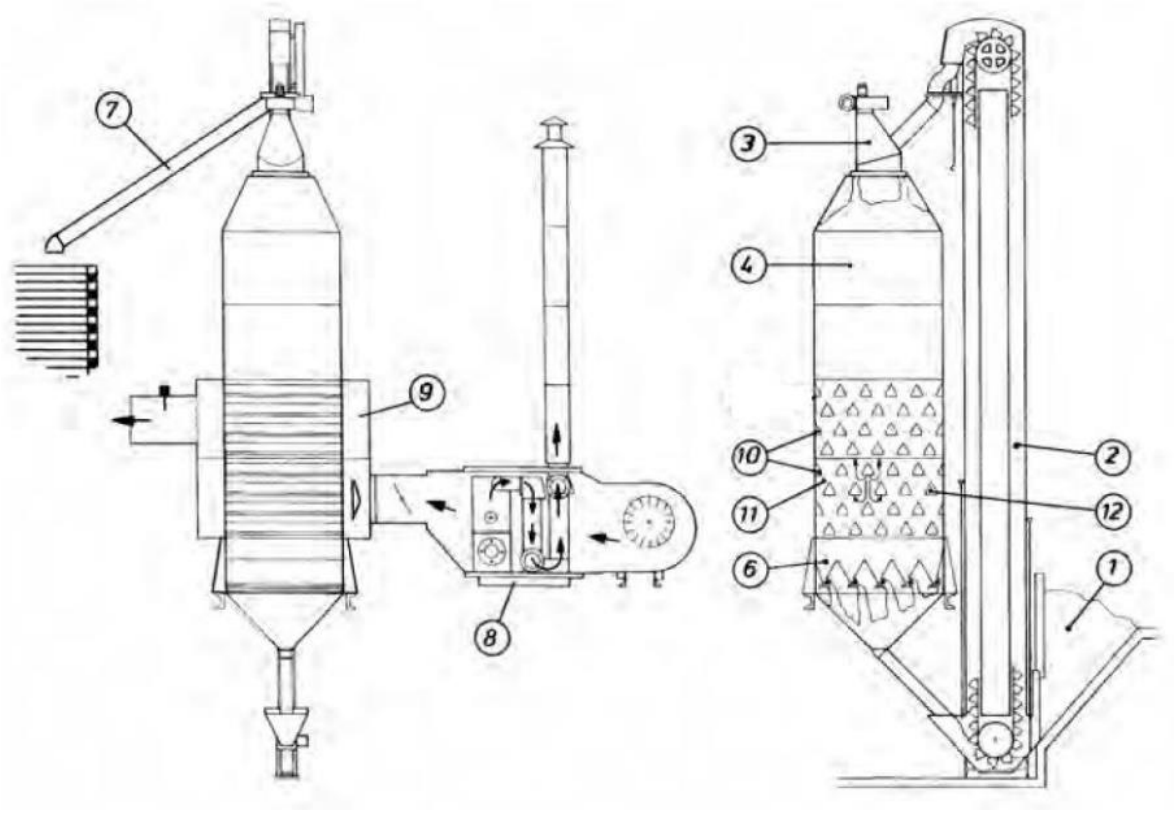
Tässä työssä keskitytään lämminilmakuivureihin, eikä perehdytä kylmäilmakuivaukseen tarkemmin.

2.3.1 Erä- ja jatkuvatoiminen kuivuri

Eräkuivurissa kuivattava viljaerä täytetään kerralla kuivuriin ja kuivataan erä kerrallaan. Viljaa kierrätetään kuivurissa elevaattorin avulla, kunnes se on tarpeeksi kuivaa. Kuivattu vilja on vielä jäähdytettävä ennen varastointia, koska varastosiiloon siirretty lämmin vilja pilaantuu. Jatkuvatoimisessa kuivurissa vilja kiertää vain kerran kuivurin läpi ja siirtyy suoraan varastosiiloon. Viimeinen vaihe on viljan jäähdytys, josta vapautuva lämpö on mahdollista hyödyntää lämpimän ilman tuottamisessa. (Ahokas & Hautala, 2013)

2.3.2 Kuivurin osat

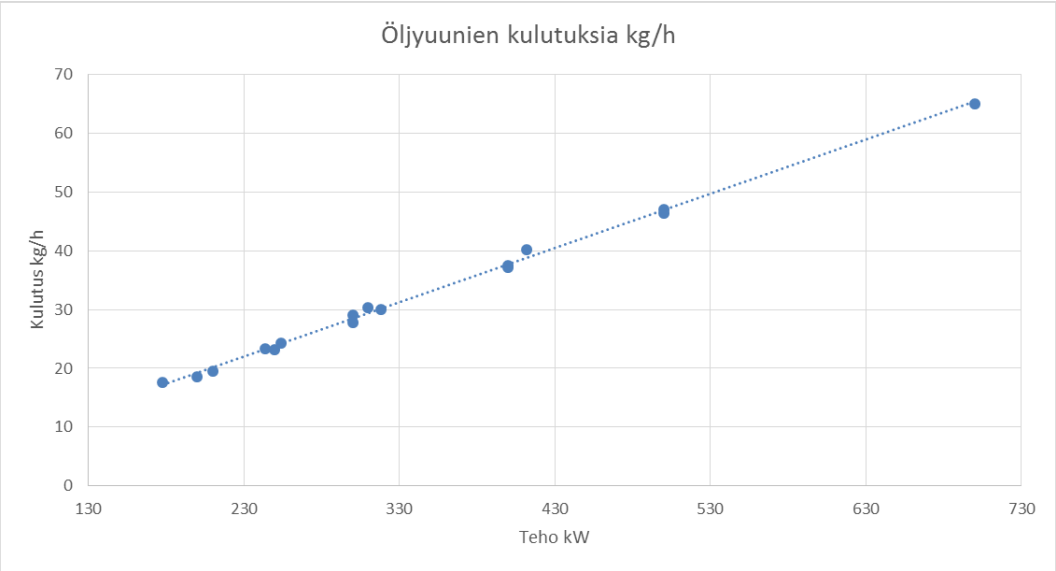
Lämminilmakuivurin pääosat ovat kuivurin uuni, puhallin sekä kuivauskennot sekä elevaattori.



Kuva 2.3 Lämminilmakuivurin pääosat. 1: kaatosuppilo, 2: elevaattori, 3: esipuhdistaja, 4: varastokennot, 6: syöttölaite, 7: purkuputki, 8: uuni, 9: tuloilmakanava, 10: tuloilmakanava, 11: kuivauskennot, 12: poistoilmaharjat (Ahokas, 2013)

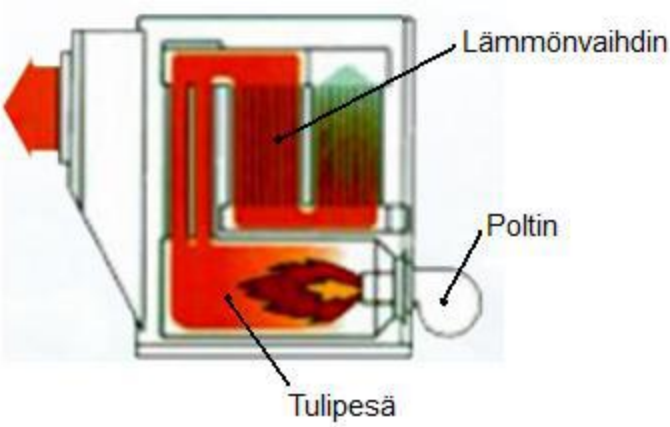
2.3.3 Ilmauunit ja lämmitysenergia

Kuivurin uunilla lämmitetään tuloilma kuivauslämpötilaan. Kuivausilman lämmitys vie suurimman osan viljakuivurin käyttämästä energiasta. Ilman lämmitykseen tarvittava tehon laskenta on esitetty kappaleessa 2.2. Lämmitysenergia tuotetaan yleensä polttamalla polttoainetta. Kuivuriuuneissa yleisimmin käytetty polttoaine on öljy, mutta biopohjaiset polttoaineet kuten puuhake ja pelletti ovat yleistymässä. Hake- ja pellettiuunit ovat työläämpiä käyttää ja polttoaineen varastointi vaatii huomattavasti enemmän tilaa kuin öljy.



Kuva 2.4 Valmistajien ilmoittamia kuivuriuunien öljyn kulutuksia lämmitystehon mukaan (Koneviesti 2009)

Polttoaineiden vaatimaa varastointitilaa ja kulutusta voidaan arvioida karkeasti niiden lämpöarvon sekä tiheyden perusteella. Esimerkiksi 1 MWh lämmitysenergian tuottamiseen tarvitaan noin 100 litraa öljyä, 210 kg pellettejä tai 220 kg puuhaketta, kun öljyn lämpöarvo on 42 MJ/kg, hakkeen 18–20 MJ/kg ja puupelletin 19 MJ/kg.



Kuva 2.5 Ilmauunin periaatekuva. (Ahokas, 2013)

Kuivuriuunissa lämmönvaihtimen ensiöpuolta lämmitetään polttamalla polttoainetta tulipesässä. Kuivausilma kulkee lämmönvaihtimen toision läpi lämmeten samalla kuivauslämpötilaan. Öljypolttimella varustetun kuivuriuunin lämmitystehoa säädetään yleensä polttimon suutinta vaihtamalla. (Ahokas, 2013)

2.3.4 Puhallin ja ilmavirran säätö

Puhaltimella tuotetaan kuivausilman tilavuusvirta. Puhallin sijaitsee kuivuriuunin ohessa tai lämpökanavan poistopuolella kuivurin tyypistä riippuen. Ylipainekuivurissa ilma puhalletaan uunin lämmönvaihtimen ja kuivurin läpi poistoilmakanavaan. Alipainekuivurissa puhallin toimii imurina poistokanavassa muodostaen alipaineen kuivuriin. Ilmavirta kulkee tuloilmakanavasta uunin ja viljamassan läpi poistokanavaan.

Yleisimmin käytetään keskipakoispuhaltimia, joita pyörittää sähkömoottori. Ilmavirtaa voidaan säätää kuristamalla tuloilmakanavaa, puhaltimen toimiessa vakionopeudella tai säätämällä suoraan puhaltimen pyörimisnopeutta taajuusmuuttajalla. Kuristussäätö on halpa toteuttaa, mutta ei kovin energiatehokas. Puhaltimen tehontarve kasvaa kuristusta lisättäessä ja vastapaineen kasvaessa. Taajuusmuuttajakäytöllä voidaan ohjata puhallinta suoraan, jolloin sen ei tarvitse toimia täydellä teholla koko aikaa. (Pumput, puhaltimet, kompressorit)

2.3.5 Kuivauskennot

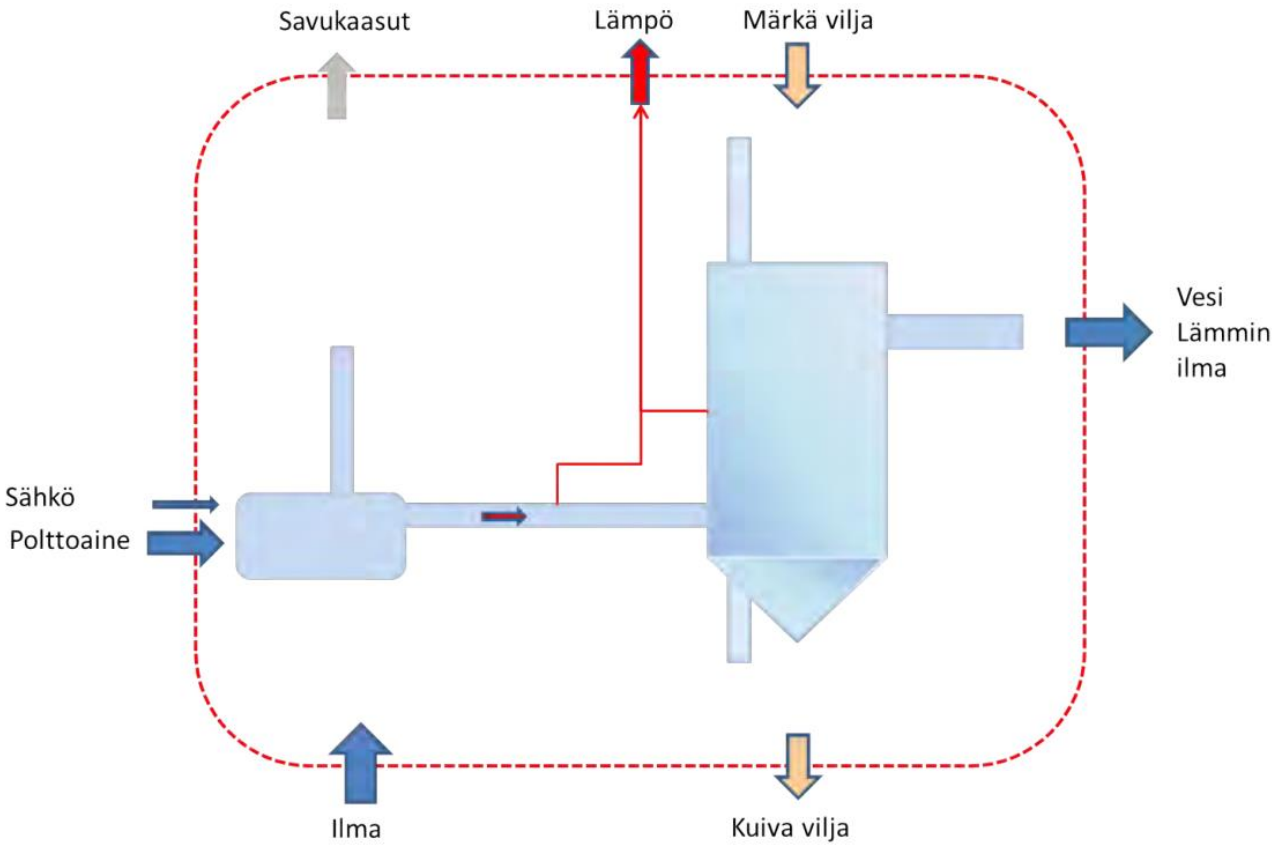
Kennokuivurissa ilma kiertää kennoissa, joista joka toinen on kuivausilmakenno ja joka toinen poistoilmakenno. Kenno-rakenteen ansiosta kuivattava kerrospaksuus on ohut ja kuivuminen on tehokasta, jolloin saadaan tasalaatuinen kuivaustulos. Kennokuivurit ovat moduulirakenteisia, joten kennostoja kokoamalla päällekkäin voidaan rakentaa halutun kokoinen kuivurirakenne. Kuivaus tapahtuu alemmissa kennoissa ja ylimmät kennot ovat varastokennoja eli niissä ei ole kuivausilmaharjoja. Varastokennot kompensoivat viljan kutistumaa, sillä viljan kuivuessa sen tilavuus pienenee veden poistuessa. Kennokuivuri on Suomessa yleisimmin käytetty lämminilmakuivuri. (Ahokas & Hautala, 2013)

2.3.6 Elevaattori

Elevaattorin avulla kostea vilja nostetaan kuivurin yläosaan, josta vilja laskeutuu kuivauskennoston läpi kuivurin alaosaan. Elevaattoria käytetään myös kuivurin täyttämiseen ja tyhjennykseen. Elevaattorin sisällä kulkevaan hihnaan kiinnitetyt kupit kuljettavat viljan ylöspäin jakajalle, jonka avulla vilja voidaan ohjata haluttuun paikkaan. Hihna pyörii kahden hihnapyörän välillä. Hihnan veto tapahtuu tyypillisesti ylempään hihnapyörään kytketyllä sähkömoottorilla. (Pensas, 2014)

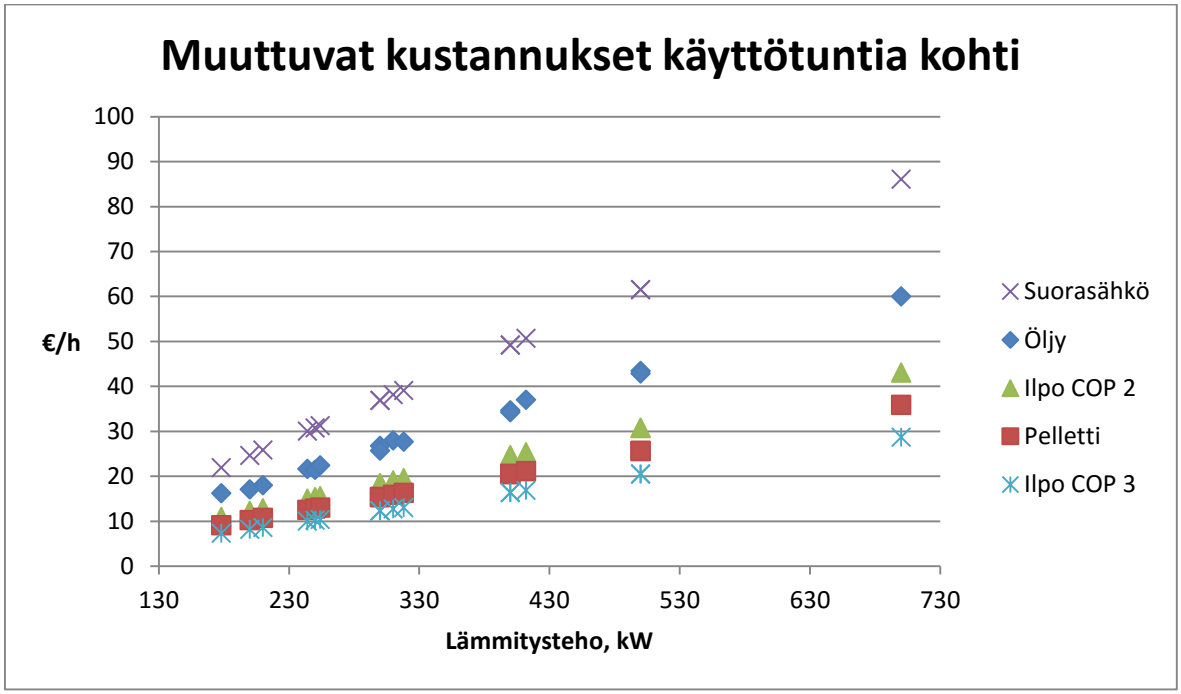
3. ENERGIAN KULUTUS

Nykyaikaisen viljakuivurin energian kulutus koostuu ilman lämmityksestä ja kuivurin sähkön kulutuksesta. Lämpöenergia kuluu ilman lämmittämiseen sekä kosteuden erottamiseen viljasta. Sähkö kuluu lähinnä elevaattorin sekä puhaltimen kuluttamaan sähköenergiaan. Sähkön osuus kokonaisenergiankulutuksesta on noin 5–10 % ja loput on lämpöenergiaa.



Kuva 3.1 Kuivurin massa-ja energiavirrat (Hautala, Jokiniemi, Ahokas, 2013**)**

Kuvassa 3.2 on esitetty eri tehoisien kuivurien käyttökustannuksia eri lämmönlähteillä. Laskelmissa polttoaineiden hinnoiksi on arvioitu öljylle 1,11 €/kg ja pelletille 0,24 €/kg. Sähkön hintana on käytetty 0,123 €/kWh. (Tilasto: Energian hinnat)



Kuva 3.2 Eri tehoisien kuivuriuunien käyttökustannuksia

Kuvion perusteella voidaan todeta, ettei ilman lämmitys suoralla sähkölämmityksellä ole kilpailukykyinen muihin energianlähteisiin verrattuna. Lämpöpumpun avulla voidaan tuottaa lämpöä moninkertaisesti sen kuluttamaan sähköenergiaan nähden, joten sen avulla voidaan säästää lämmityskustannuksissa. Kuviosta nähdään lämpökertoimen vaikutus sähkönkulutukseen. Kaksinkertainen lämpökerroin puolittaa sähkönkulutuksen. Kolminkertaisella lämpökertoimella sähkönkulutus on kolmasosa suoraan sähkölämmitykseen nähden. Suuremmalla lämpökertoimella toimivalla lämpöpumpulla on pienemmät käyttökustannukset.

4. LÄMPÖPUMPPUJEN HYÖDYNTÄMINEN VILJANKUIVAUKSESSA

Öljynkulutusta ilman lämmittämisessä voidaan vähentää nostamalla tuloilman lämpötilaa. Ilmalämpöpumppujen tehoa kuvataan lämpökertoimella tai lyhennettynä COP- kertoimella. COP lyhenne tulee sanoista Coefficient Of Performance. COP- kerroin kertoo, kuinka paljon lämpöenergiaa ilmalämpöpumppu tuottaa kuluttamaansa sähköenergiaan kohden. (Motiva)

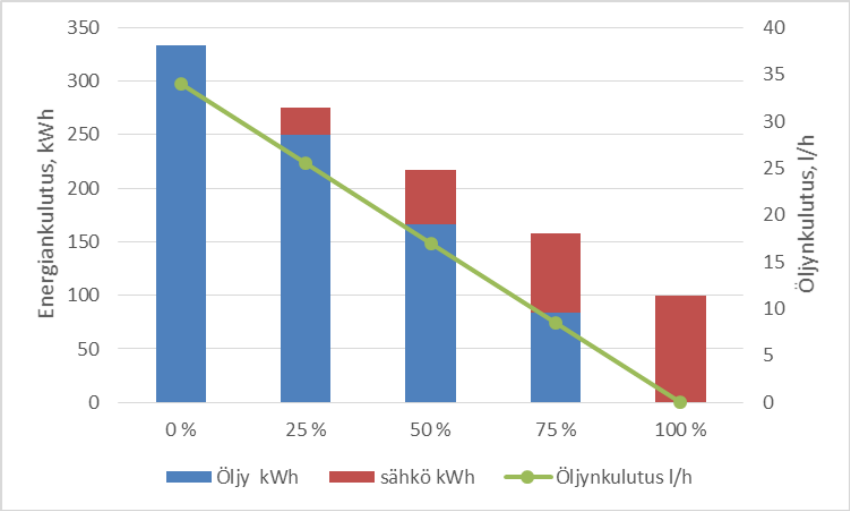
COP-kertoimeen vaikuttavat kiertoaine sekä lämpötilaero. Lämpötilaeron vaikutus COP-kertoimeen määrittää Carnot-kiertoprosessin avulla. Ideaalinen Carnot-lämpökerroin lämmityskäytössä lasketaan yhtälöllä

$$COP_c = \frac{T_h}{T_h - T_c} \tag{4.1}$$

Yhtälöstä voidaan todeta, että pienemmällä lämpötilaerolla lämpökerroin on suurempi kuin suurella lämpötilaerolla. Ilmalämpöpumpun toimiessa esilämmittimenä öljyuunille, tarvittava lämpötilaero jää huomattavasti pienemmäksi kuin kokonaisratkaisussa, joten ilmalämpöpumppu toimii suuremmalla lämpökertoimella.

Lämpöpumppuvalmistajille tehtyjen kyselyjen perusteella valmiita kaupallisia ilmalämpöpumppuratkaisuja viljankuivaukseen löytyi vain Calefa Oy:n kehittämä lämmöntalteenottoon perustuva lämpöpumppujärjestelmä. Lämpöpumppujen investointikustannuksien arviointia varten on kerätty hintatietoja, joiden perusteella on laskettu tehoon suhteutettu investointihinta 409 €/kW Hintatiedot on taulukoitu liitteessä I. Öljyuunien hintatiedot sekä kulutukset on kerätty Koneviestin julkaisemasta hintavertailusta, jonka perusteella keskimääräiseksi tehoon suhteutetuksi investointihinnaksi saatiin 40 €/kW. Keskimääräisiä hintoja on skaalattu tehojen mukaan. Muuttuvien kustannusten laskennassa sähkönkulutukseen on huomioitu kuivurin apulaitteiden sekä ilman lämmitykseen kuluva sähköteho.(Koneviesti, 2009)

Tarkastellaan tilannetta, jossa osa öljyllä tuotetusta lämmitysenergiasta korvataan ilmalämpöpumpulla, jonka lämpökerroin on 3. Järjestelmän öljyuuni pysyy samana ja sen lämmitystehoa säädetään tarpeen mukaan. Öljyuunin oletetaan toimivan 90 % hyötysuhteella. Kokonaislämmitysteho on 300 kW. Ilmalämpöpumppu toimii esilämmittimenä öljyuunille, jolloin uunia voidaan säätää pienemmälle. Kuvassa 4.1 on esitetty yhden käyttötunnin energiankulutus. Ilmalämpöpumppu tuottaa kolminkertaisesti lämpöenergiaa kuluttamaansa sähköenergiaan nähden.

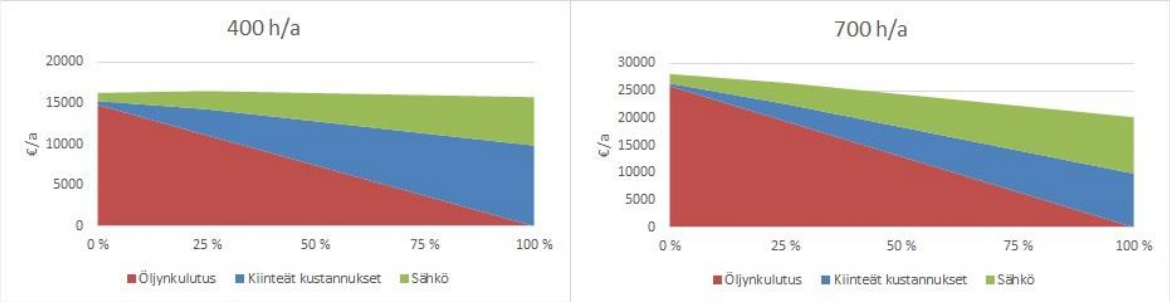


Kuva 4.1 Kokonaisenergian- ja öljynkulutus eri lämmitysosuuksilla

Energiankulutus vähenee huomattavasti ilmalämpöpumpulla tuotetun lämmön korvatessa öljyllä tuotettua energiaa. Öljyn litramääräinen kulutus laskee, kun uunin tehoa voidaan säätää pienemmäksi.

4.1 Kustannusvertailu

Kokonaiskustannukset koostuvat kiinteistä sekä muuttuvista kustannuksista. Kiinteät kustannukset koostuvat laitteiston alkuinvestoinnista sekä huoltokuluista. Muuttuvat kustannukset koostuvat pääasiassa energian hinnasta. Energian kulutus riippuu vuosittaisista kuivausmääristä sekä viljan puintikosteudesta. Kostea vilja sekä sääolosuhteet voivat pidentää kuivausaikaa huomattavasti. Kuvassa 4.2 on esitetty kustannusten jakautuminen pienellä ja suurella vuosittaisella käyttöajalla.

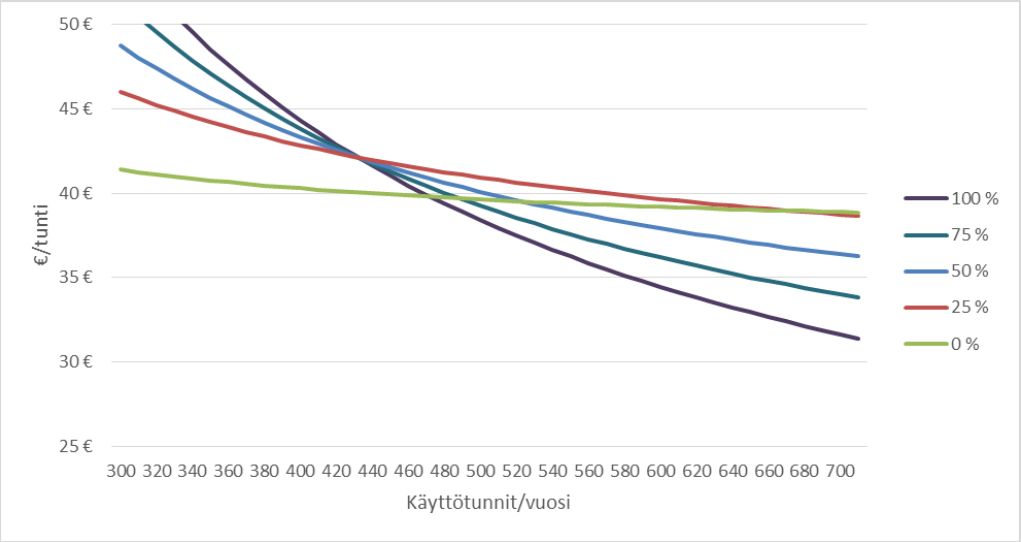


Kuva 4.2 Kustannusten jakautuminen energiankulutuksen ja kiinteiden kulujen suhteen. Pienillä kuivausmäärillä investointikustannusten kasvu syö energiakustannusten säästöt

Kuvioissa prosenttiosuus esittää lämpöpumpulla tuotetun lämmön osuutta kokonaislämpötehosta. Kustannukset on jaettu öljyn- ja sähkönkulutuksesta tuleviin kuluihin ja kiinteisiin kustannuksiin. Sähkönkulutukseen on laskettu mukaan myös kuivurin apulaitteiden kuluttama sähköteho.

Öljynkulutuksen osuus laskee, kun lämpöpumpun osuutta lämmöntuotannossa nostetaan. Pienillä kuivausmäärillä kiinteiden kulujen suhteellinen osuus kasvaa enemmän kuin energiakuluista tulevat kustannussäästöt. Kokonaiskustannukset kasvavat, kun öljynkulutusta korvataan ilmalämpöpumpulla. Suurilla kuivausmäärillä kiinteiden kulujen osuus jää energiakustannuksia huomattavasti pienemmiksi, joten öljyuunin korvaaminen ilmalämpöpumpulla tuo säästöjä.

Ilmalämpöpumppuratkaisun verrattain korkeat investointikustannukset perinteiseen öljyuuniratkaisuun nähden syövät energiankulutuksessa saadut säästöt pienillä kuivausmäärillä. Kuvasta 4.3 nähdään, että kuivurin tuntikohtaiset kokonaiskustannukset pienenevät kuivausmäärien noustessa.



Kuva 4.3 Kuivurin kokonaiskustannukset käyttötuntia kohden eri lämmitysosuuksilla. prosenttiosuus esittää lämpöpumpulla tuotettua lämpötehoa

Tuntikustannusten muutokseen vaikuttaa lämmitysratkaisun investoinnin takaisinmaksun jakautuminen käyttötuntien kesken. Lämpöteholtaan 300 kW kuivuriuunin korvaaminen kokonaisuudessaan lämpöpumppuratkaisulla tulee kannattavaksi, kun kuivausajat ovat yli 460 h/a. Esilämmitykseen käytettävät lämpöpumppuratkaisut alkavat tuottamaan säästöä, kun kuivaustunnit nousevat yli 500 h/a.

4.2 Sähköteho ja pääsulakkeet

Sähköliittymän mitoitus tehdään liittymätehon mukaan. Liittymäteho lasketaan huipputehosta, kun huomioidaan tasauskerroin k_1 ja samanaikaisuuskerroin k_2. Tasauskertoimella arvioidaan, kuinka suuri osa laiteryhmän laitteista on samanaikaisesti käytössä. Samanaikaisuuskertoimella arvioidaan, kuinka paljon tasauskertoimella tasatusta tehosta on käytössä huipputehon aikaan. Kertoimien arvot ovat välillä 0-1. Tasaus- ja samanaikaisuuskertoimet pitää määritellä tapauskohtaisesti riippuen kohteesta. Tässä työssä käytetyissä laskelmissa kuivurin kertoimina käytetään arvoa 1, eli liittymäteho arvioidaan kokonaistehohuipputehon suuruiseksi. (ST13.31, 2001)

Kuivauskausi ajoittuu alkusyksyyn, kun sää on verrattain lämmin, joten maatilan muiden rakennusten huipputeho ei oletettavasti sijoitu samalle ajalle edes sähkölämmitteisissä rakennuksissa. Liittymätehon avulla voidaan laskea mitoitusvirta yhtälöllä

$$I_b = \frac{P}{\sqrt{3} * U_p * \cos\varphi} \tag{4.1}$$

missä I_b on mitoitusvirta, P on pätöteho, U_p on pääjännite ja cosφ on tehokerroin. Laskennassa käytetään tehokertoimena 0,95, sillä kuivurin sähköteho kuluu pääosin pyörivien sähkökoneiden kulutuksessa. Taulukkoon 4.1 on koottu eri pääsulakkeille laskettuja maksimitehoja.

Taulukko 4.1 Pääsulakkeille laskettuja maksimitehoja.

sulake	max teho [kVA]
3x25	17
3x35	24
3x50	35
3x63	43
3x80	55
3x100	69
3x125	86
3x160	104
3x200	115
3x250	138
3*320	176
3*400	221
3*500	271

Taulukon arvoista voidaan todeta, että kuivurin apulaitteiden kuluttamalle noin 10–20 kW sähköteholle riittää pienin sulakekoko, mutta sähkökäyttöisen ilmalämpöpumpun tuoma lisäteho kasvattaa sulakekokovaatimusta. Ryhmäkohtaisen sulakekoon kasvattaminen vaatii koko maatilan sähköliittymän tarkastelua ja mahdollisesti päivittämistä suurempaan liittymään, jos muita kuormia ei voida pienentää kuivauskauden ajaksi. Esimerkiksi lämpötehon tuottaminen kokonaan ilmalämpöpumpulla 300 kW teholla vaatii sähkötehoa noin 100 kW lämpökertoimen ollessa 3. Lämmitystehon sekä apulaitteiden vaatima sähköteho vaatii silloin mahdollisesti sulakekoon kasvattamisen jopa 3x200 ampeerin kokoiseksi. Suuri sähkötehon lisäys tarkoittaa mahdollisesti koko maatilan sähköliittymän koon tarkastelua uudestaan.

Liittymäkoon kasvattaminen nostaa siirtomaksuja sekä joudutaan mahdollisesti vaihtamaan myös liittymiskaapeli suuremmaksi. Ylikokoinen sähköliittymä tuo turhia kustannuksia, jos tilan huipputehot jäävät huomattavasti pienemmiksi kuivauskauden ulkopuolella ja liittymän mahdollistama tehokapasiteetti jää käyttämättä.

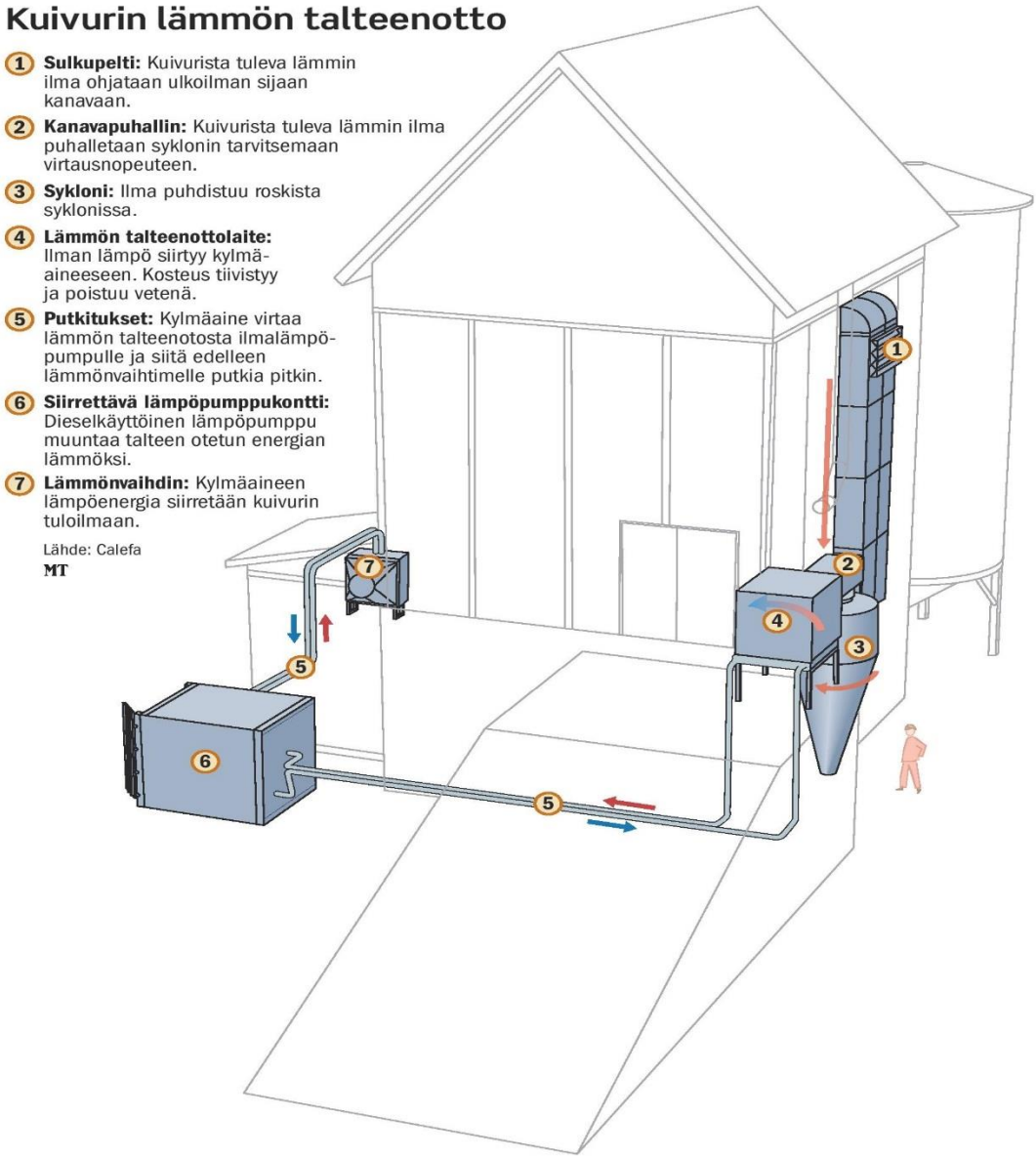
5. LÄMMÖNTALTEENOTTO

Kuivurin poistoilmasta voidaan ottaa lämpöenergiaa lämmönvaihtimella ja lämmittää tuloilmaa. Lämmöntalteenotolla voidaan saavuttaa jopa 50 % säästöt öljyn kulutuksessa. Lämmöntalteenotto voi olla käytännössä teknisesti haastava toteuttaa jo käytössä olevaan kuivuriin, mutta uuden kuivurin suunnittelussa voidaan ottaa huomioon ilman kierrätys. Kuivurin poistoilman kosteuspitoisuus on suuri, joten poistoilmaa ei voi suoraan syöttää takaisin kuivuriin. Ilmasta voidaan ottaa lämpöenergia talteen lämmönvaihtimella ja lämmittää sillä tuloilmaa. Ilmankierrätyksessä ongelmaksi muodostuu käytetyn ilman likaisuus, mikä tukkii lämmönvaihtimen helposti joten poistoilma on puhdistettava ennen lämmönvaihdinta.
(Ahokas, 2012).

5.1 Calefa MAHOTON

Lämpöpumput ovat viljakuivureiden lisälämpöratkaisuina harvinaisia. Calefa MAHOTON on viljankuivaukseen kehitetty lämpöpumppuratkaisu. Tässä ratkaisussa lämpöenergia otetaan talteen poistoilmasta levylämmönvaihtimen avulla ja johdetaan nestekierron avulla lämpöpumpulle. Lämmöntalteenottopatterilla saadaan talteen noin 130 kW lämpötehoa. Lämpöpumpun kompressoria pyöritetään dieselkoneella. Dieselin kokonaislämpöteho on noin 100 kW, josta kompressorin ottama akseliteho on noin 35 kW. Loput lämpötehosta otetaan talteen lohkojäähdytyksestä sekä pakokaasusta syntynyt lämpö. Lämmöntalteenotolla varustetun diesel koneen lämpöhyötysuhde on noin 92 %.

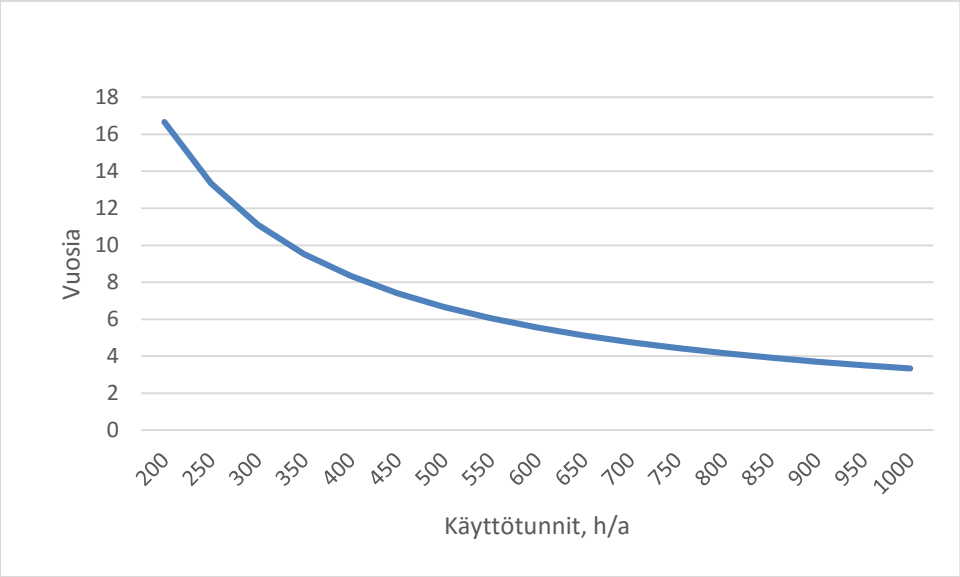
Polttoaineena käytetään tässä sovelluksessa samaa polttoöljyä kuin öljykattilassa. Kompressoria voitaisiin käyttää myös esimerkiksi sähkömoottorilla. Sähkömoottorin käyttö dieselin sijaan vähentää myös saatavaa lämpöenergiaa dieselkoneesta talteen otetun lämpötehon verran. Taulukon 4.1 mukaisesti sähkömoottorin käyttö vaatisi vähintään 3x63 ampeerin sulakkeen, jotta myös kuivurin muille sähkölaitteille riittää kapasiteettia.



Kuva 5.1 Calefa MAHOTON lämmöntalteenottojärjestelmä (Calefa)

Lämpöpumppuratkaisun testaus suoritettiin käyttämällä sitä normaalissa kuivauskäytössä. Likaisen poistoilman esisuodatuksena käytetään syklonia poistamaan suurimmat epäpuhtaudet. Hienosuodatus hoidetaan kuivauserien välissä puhdistettavilla pussisuodattimilla. Suodattimen puhdistukseen kuluu aikaa noin vartin verran. Calefan edustaja pitää poistoilman suodatuksen ratkaisua tämän testilaitteen merkittävimpänä innovaationa. Testien aikana öljyn kulutuksessa päästiin 45 % säästöihin lämpöpumpun käydessä.

Koetilan kuivuriuunin lämmitysteho on noin 350 kW, joten öljyn kulutus normaalisti ajettaessa on noin 40 l/h. Laitteistolla on mahdollista saavuttaa noin 60 % säästöt kanavien lämmöneristyksellä sekä laitteiston säädöllä. 60 % öljyn säästöllä takaisinmaksuajaksi tulee noin 3000 h. Kuivauskauden kestäessä keskimäärin 300–500 h/a, takaisinmaksuaika on kuudesta kymmeneen vuoteen. Pienemmässä kuivurissa ja pienemmillä kuivausmäärillä säästö jää pienemmäksi, joten lämpöpumpulle olisi löydettävä myös muita käyttökohteita kuten tuotantorakennusten lämmitys kuivauskauden ulkopuolella. Kuvassa 5.2 on esitetty yksinkertaistettu takaisinmaksuaika 60 % öljynsäästöllä vuosittaisten käyttötuntien suhteen. Takaisinmaksuajan laskennassa öljyn hintana on käytetty 1 €/l. Investointikustannus on noin 80 000 €.



Kuva 5.2 Lämmöntalteenottojärjestelmän yksinkertaistettu takaisinmaksuaika vuosia/vuotuiset käyttötunnit

6. AURINKOENERGIA

Aurinkoenergian hyödyntäminen viljankuivatuksessa mahdollistaa käytönaikaisen kulujen pienentämisen. Auringosta saatavaa energiaa voidaan käyttää sähkönä puhaltimen pyörittämiseen ja valaistukseen tai suoraan lämpönä aurinkokeräinjärjestelmällä. Aurinkovoimalasta saatavaa energiaa voidaan hyödyntää maatilan muussa kulutuksessa viljankuivauskauden ulkopuolella, mikä lyhentää voimalan takaisinmaksuaikaa huomattavasti. Mitoituksessa onkin hyvä ottaa huomioon maatilan normaali kulutus, jotta investointikustannukset eivät kasva liian isoiksi. Aurinkosähkövoimaloiden investointikustannukset ovat tällä hetkellä asennuksineen noin 1,6–2,5 €/W_p. (Finsolar, 2015)

Aurinkoenergian hinta koostuu lähinnä investoinnin vuosittaisista poistoista ja huoltokuluista. Investointikustannuksiin vaikuttaa käytettävä korkotaso ja voimalan pitoaika. Sähkön tuotantokustannus voidaan laskea jakamalla voimalan elinkaarikustannukset tuotetun energian määrällä. Elinkaarikustannuksiin vaikuttaa voimalan pitoaika ja käytettävä korkotaso. Tuotetun energian määrään vaikuttaa huipunkäyttöaika ja nimellisteho. Homer- ohjelmalla laskettuna, Etelä-Suomeen 15° kulmaan asennettu ja suoraan etelään suunnattu, 30 kW_p voimala tuottaa noin 26 900 kWh vuodessa. Talvella Aurinkovoimalan tuotannon oletetaan olevan lumen ja vähäisen auringonpaisteen takia olematonta. Aurinkopaneelien käyttöikä on tyypillisesti pitkä, noin 30–40 vuotta. Järjestelmään kuuluva invertteri tarvitsee mahdollisesti vaihtaa noin 15 vuoden käytön jälkeen. (Finsolar, 2015)

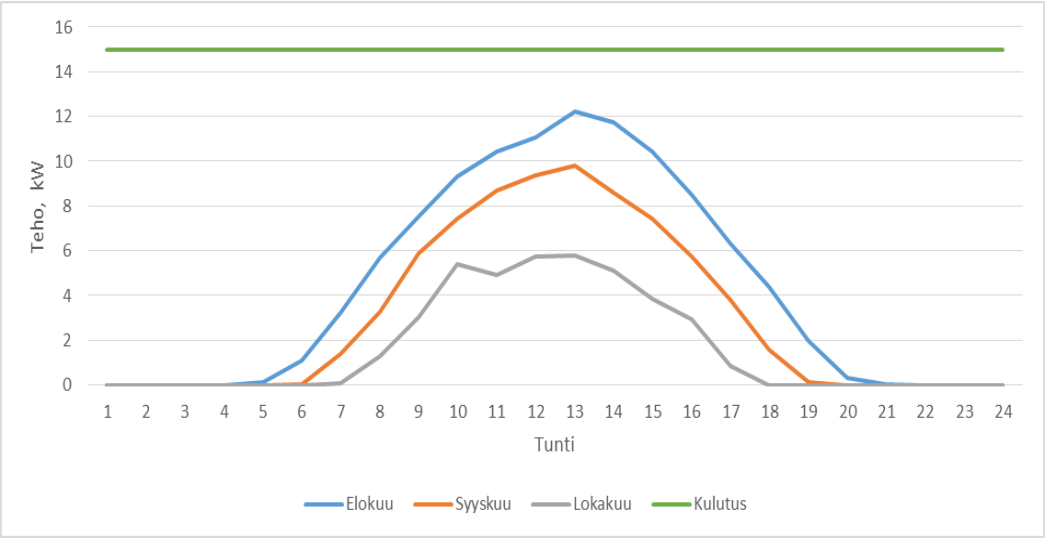
Tämän kokoisen voimalan investointihinta on halvimmillaan 42 000 € asennettuna. Sähkön hinnaksi tulee 5 % korolla laskettuna noin 0,12 €/kWh. Verkosta otetun sähkön hinnan ollessa 0,123 €/kWh, on aurinkosähkö kilpailukykyinen sähkön tuotantomuoto jos kaikki tuotettu sähköenergia voidaan käyttää itse.

Maatilan keskimääräinen vuosittainen sähkönkulutus riippuu maatilan koosta ja tuotantosuunnasta. Viljatiloilla Sähkön kulutus painottuu taloussähköön ja rakennusten lämmitykseen. Karjatiloilla lypsykoneet sekä eläinsuojien lämmitys ja ilmanvaihto ovat suurimpia sähkön kuluttajia. (Ahokas, 2015) Maatilojen sähkönkulutus on keskimäärin 50 000-150 000 kWh vuodessa. Esimerkiksi jos maatilan vuotuinen sähkönkulutus on 100 000 kWh, voidaan 30 kW_p aurinkovoimalalla tuottaa neljäsosa tarvittavasta sähköstä.

6.1 Aurinkosähkön käyttö viljankuivauksessa

Sähkön käyttö kuivausilman lämmitykseen ei ole optimaalisin ratkaisu, mutta kuivurin apulaitteiden sähkön kulutukseen voidaan hyödyntää myös auringosta saatavaa energiaa. Puhaltimet sekä valaistus kuluttavat sähköä noin 10–20 kW riippuen kuivurin koosta ja ilmamääristä. Kuivauskaudella kuivuria ajetaan usein taukoamatta vuorokauden ajasta riippumatta. Katkokset tapahtuvat vain kuivauserien välillä, jolloin kuivunut vilja siirretään varastosiiloihin ja uusi erä kuivuriin. Erien välilläkin valaistus sekä viljaa siirtävä elevaattori kuluttavat sähköä, joten sähköenergian kulutus voidaan ajatella olevan suhteellisen tasaista ympäri vuorokauden. Aurinkoenergian avulla voidaan vähentää verkosta otettavan sähköenergian määrää. Auringosta saatava sähköteho painottuu keskipäivän tienoille muutamaan tuntiin.

Kuvassa 6.1 on esitetty Homer ohjelmistolla simuloitua tuotantoa 30 kW_p tehoiselle voimalalle elokuusta lokakuulle ajoittuvalle kuivauskaudelle. Kuvassa on myös verrattu tuotantoa kuivurin apulaitteiden arvioituun kulutukseen.



Kuva 6.1 30 kW_p tehoisen aurinkovoimalan keskimääräinen tuotanto kuivauskuukausina verrattuna kuivurin arvioituun sähkönkulutukseen.

Kyseisen kokoisella aurinkovoimalalla voidaan tuottaa 10–30 % tarvitusta sähköenergiasta kuivauskaudella. Suurin säästö kuivurin sähkönkulutukseen saadaan kuivauskauden alussa elokuussa.

7. YHTEENVETO / JOHTOPÄÄTÖKSET

Viljakuivurin lämmönlähteenä perinteinen öljyuuni on investointikustannuksiltaan edullinen vaihtoehto, verrattuna lämpöpumppuun. Lämpöpumpun avulla voidaan säästää huomattavasti lämmitysenergiaa ja kuivurin käyttökustannuksia. Lämpöpumppujärjestelmien Suuret investointikustannukset syövät käyttökustannuksissa saadut säästöt pienillä kuivausmäärillä. Suurilla kuivausmäärillä öljyuunin korvaaminen lämpöpumppuratkaisuilla voi olla kannattavaa. Viljankuivaukseen kehitettyjä lämpöpumppuratkaisuja on tutkittu jonkin verran, mutta kaupallisia ratkaisuja ei tutkimusta tehdessä löytynyt esitellyn Calefan järjestelmän lisäksi. Energiansäästöpotentiaali viljankuivauksessa on suuri. Työtä tehdessäni huomasin että energiansäästöä tutkitaan paljon ja erilaisia ratkaisuja on kehitetty kaikille viljelyn osa-alueille kylvöstä kuivaukseen.

LÄHTEET

Suomen virallinen tilasto (SVT): Maatalouden rakennetutkimus/ Maatalouslaskenta 2010-Energia [verkkojulkaisu].
Helsinki: Luonnonvarakeskus [viitattu: 3.3.2016]. Saantitapa: http://stat.luke.fi/maatalouden-rakennetutkimus-maatalouslaskenta-2010-energia_fi

VTT, Ilmalämpöpumppuvertailu [verkkojulkaisu]
http://www.scanoffice.fi/fi/tuotteet/tuoteryhmat/ilmalampopumput/raportit-ja-sertifikaatit/vttn-testiraportit?gclid=CJ7vnf_6uMMCFeEAcwodTrEAaA, viitattu 29.1.2015

Meidän talo.fi 15 ilmalämpöpumppua [verkkojulkaisu]
http://www.meidantalo.fi/lammitys/15-ilmalampopumppua
viitattu 29.1.2015

http://www.motiva.fi/files/7964/Lampoa_ilmassa_Ilmalampopumput.pdf,
viitattu 25.6.2014

Mollier sketcher piirto-ohjelma
Saatavilla: http://www.ivprodukt.se/Pages/Page.aspx?pageId=60

Tilasto: Energian hinnat [verkkojulkaisu].
ISSN=1799-7984. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 1.7.2014].
Saantitapa: http://tilastokeskus.fi/til/ehi/index.html

Kuivurikoneistot, hintavertailu. Viitattu 8.7.2014
Koneviesti 17/2009 ISSN=0355-0729

Motiva, Aurinkokeräimet http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkolampo/aurinkokeraimet. Viitattu 8.7.2014

Lötjönen, T. & Kässi, P. 2010. Energiakustannusten säästö viljankuivauksessa. Suomen Maataloustieteen Seura ry:n verkkosivusto. Viitattu 8.7.2014
http://www.smts.fi/jul2010/poste2010/180.pdf

ST 13.31 Rakennuksen sähköverkon ja liittymän mitoittaminen. 2001. [viitattu 28.1.2016].
Saatavilla: http://kauppa.sahkoinfo.fi/product/group/54

Pensas Marko, Viljankuivaamon sähköasennukset 2014. Insinöörityö Metropolia Ammattikorkeakoulu [Viitattu 17.2016] saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/75811/Viljankuivaamon%20sahkoasennukset.pdf?sequence=1

Hautala, M., Jokiniemi, T. & Ahokas, J. 2013.
Maatilakuivurit. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Helsingin yliopisto maatalous- ja metsätieteellinen tiedekunta. [Viitattu 12.1.2016]. Saatavana: http://www.energiaakatemia.fi/attachments/article/59/Maatilakuivurit.pdf

Energiavirasto: sähkön hintavertailu 2015 [verkkojulkaisu] viitattu 5.2.2016. saatavilla: http://sähkönhinta.fi/summariesandgraphs

Ahokas Jukka, Helsingin yliopisto
Energian säästömahdollisuudet maatiloilla esitysmateriaali: saatavilla: https://etela-suomi.proagria.fi/sites/default/files/attachment/energian_saastomahdollisuus_maatiloilla_ja.pdf viitattu 16.2.2016

Finsolar, Aurinkosähköjärjestelmien hintatasot ja kannattavuus 2015[verkkojulkaisu] viitattu 15.3.2016 saatavilla.
http://www.finsolar.net/?page_id=1363&lang=fi

LIITTEET

Liite I: Ilmalämpöpumppujen hintoja

ilmalämpöpumput	hinta €	lämmitysteho kW	€/kW	lähde
Mitsubishi Electric MSZ-	1455	3,5	416	VTT, lämpöpumppuvertailu
Panasonic CS-NE9MKE	1190	2,4	496	VTT, lämpöpumppuvertailu
Panasonic CS-HE9LKE	1595	3	532	VTT, lämpöpumppuvertailu
	1776	2,5	710	VTT, lämpöpumppuvertailu
Mitsubishi Heavy indust	1195	2,5	478	VTT, lämpöpumppuvertailu
Fujitsu ASYB09LDC	1029	2,8	368	VTT, lämpöpumppuvertailu
Mitsubishi Electric MSZ-	1695	3,5	484	VTT, lämpöpumppuvertailu
Mitsubishi Electric MSZ-	1750	2,8	625	VTT, lämpöpumppuvertailu
Mitsubishi Electric MSZ-	1280	2,9	441	VTT, lämpöpumppuvertailu
Panasonic CS-HE12PKE	1895	3,3	574	VTT, lämpöpumppuvertailu
Sancvarm 12	1180	3,2	369	VTT, lämpöpumppuvertailu
Bosch EHP 6.5	1700	3,2	531	VTT, lämpöpumppuvertailu
hitachi Summit inverter	1090	5	218	meidäntalo.fi
Mitsubishi Heavy SRK 20	1095	4,3	255	meidäntalo.fi
Fujitsu ASY12LE	1239	5,6	221	meidäntalo.fi
LG Nordic Libero 12	1420	6	237	meidäntalo.fi
Onnline Inverter	1090	4,2	260	meidäntalo.fi
Panasonic CE9NKE	1195	5	239	meidäntalo.fi
ultimate 13 Solar 3d inve	2000	4,6	435	ultimatemarket solar
Toshiba Arctic RAS 35G2	1569	3	523	VTT, lämpöpumppuvertailu