

Anssi Nevalainen

SAHAKUIVAAMON ENERGIATEHOKKUUDEN KEHITYSMÄHDOLLISUUDET

Opinnäytetyö
Prosessi- ja materiaalitekniikka

2019



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Anssi Nevalainen	Insinööri (AMK)	Huhtikuu 2019
Opinnäytetyön nimi		
Sahakuivaamon energiatehokkuuden kehitysmahdollisuudet		49 sivua 13 liitesivua
Toimeksiantaja		
Elomatic Oy		
Ohjaaja		
Ritva Käyhkö (Xamk), Jussi Jääskeläinen (Elomatic Oy)		
Tiivistelmä		
<p>Työn tavoitteena oli tutkia Stora Enson [REDACTED] sahan kuivaamokanavien energiankäyttöä ja energiatehokkuutta mittauksia ja analysointia hyödyntäen. Sahatavaran kuivauksen tehostamisessa ehdotuksia ei voida tehdä pelkän energiatehokkuuden näkökulmasta, sillä kuivauksen olosuhteiden muuttuminen voi vaikuttaa lopputuotteen laatuun. Työn teoreettisessa osuudessa on tutkittu eri kuivaamotyyppejä ja erityisesti kuivauksen aikana syntyviä kuivausvikoja. Käytännön osuuden pohjustukseksi työssä tutkittiin myös lämmönvaihtimien ja lämpöpumppujen teoriaa sekä sähkömoottorien käynnistysmenetelmiä ja vikaantumiseen johtavia ilmiöitä.</p> <p>Työn ensisijainen tavoite oli selvittää takaisinmaksuaika kuivauskanavien lämmöntalteenotokennojen uusimiselle. LTO-kennojen uusimiselle pyrittiin laskemaan takaisinmaksuaika mittauksien perusteella ja kennon takaisinmaksuaika asetui noin 6,6–9,5 vuoteen. Mittauksessa havaittiin myös, että pitkän TMA:n lisäksi, LTO-kennon ohitus ei olisi mielekäs vaihtoehto, sillä LTO-kennon rakenteen vuoksi myös tuloilman esilämmityspatteri putoaisi pois pelistä. LTO-kennojen uusimispaineen ja pitkän takaisinmaksuajan takia työssä tutkittiin vaihtoehtoja lyhentää investoinnin TMA:ta sekä vaihtoehtoisia lämmitysmuotoja kuten sähkökattilaa tai lämpöpumppua.</p> <p>LTO:n uusimistarpeen lisäksi tiedettiin, että kuivauskanavien kiertoilma- ja poistoilmakoneiden moottoreita vikaantui runsaasti. Moottoreiden sähkövirrat mitattiin ja niiden käyttöaikoja analysoitiin kuivaamon ohjausjärjestelmästä. Mittauksissa havaittiin, että koneet ottavat suuren käynnistysvirran, jota voisi pehmittää vaihtoehtoisilla käynnistysmenetelmillä. Analyysissä havaittiin myös, että poistoilmakoneilla voisi olla hyötyä säädettävyydestä pehmeän käynnistyksen lisäksi ja taajuusmuuttajalla saavutettaisiin kustannussäästöjä.</p> <p>Projektin lopuksi esitettiin lopullinen investointilaskelma, jossa huomioitiin energiatuen, käyttöreservin ja polttoaineen myynnin vaikutukset hinnanmuodostukseen. Taajuusmuuttajien asentamisen lisäksi investointi kattaisi lämpöpumppulla toteutetun esilämmityksen tai LTO-kennojen uusimisen. Nykyisellä sähkön hinnalla lämpöpumppu toteutukselle saatiin TMA:ksi 3,2–10,4 vuotta ja kennojen uusimiselle 6,1–8,8 vuotta riippuen hyödynnettävistä hinnan muodostuksen mekanismeista.</p>		
Asiasanat		
sahatavaran kuivaus, energiatehokkuus, lämmöntalteenotto, lämpöpumppu		

Author (authors)	Degree	Time
Anssi Nevalainen	Bachelor of Science	April 2019
Thesis Title		
Possibilities of development in energy efficiency of sawmill kiln		49 pages 13 pages of appendices
Commissioned by		
Oy Elomatic Ab		
Supervisor		
Ritva Käyhkö (Xamk), Jussi Jääskeläinen (Elomatic Oy)		
Abstract		
<p>The goal of the work was to review energy usage and energy efficiency of channel kilns by measurements and analysis at Stora Enso's saw mill in the city of ██████. Improvements on drying of saw timber cannot be made solely from the standpoint of energy efficiency as the changes in drying circumstances may have an effect on the quality of the final product. Theoretical part of this work covered types of drying processes and commonly existing drying defects to lighten up the effects of drying circumstances. To prepare the reader for practical study in this work, research was also done on start-up methods of electric motors, common reasons for failures in electric motors and the theory of heat exchangers and heat pumps.</p>		
<p>The main goal of the project was to determine a payback period for renewal of the heat recovery units in drying kilns. Payback period for HRU was calculated, which lead us to the conclusion of 6,6 – 9,5 years. It was also noticed, that bypassing of the HRUs would be unfavorable, because that would also lead to bypassing of the pre-heating unit in the HRU. Since HRUs had to be repaired or renewed and the PP was long, research was done on options to shorten the PP as well as alternative methods of pre-heating the incoming air, with electric boiler or heat pump.</p>		
<p>It was also known that electric motors of air circulation and air exchange fans were breaking up fairly often. Amperage of the motors was measured, and the running times were analyzed from the control system of the drying plant. It was noticed from the measurements, that the motors were taking high amperage on startups and that could be helped with alternative methods of startups. It was also noticed from the analysis, that the air exchange motor could benefit from more control, as well as soft start up, so variable frequency drive (VDF) would be appropriate for the use, as it would also save electricity.</p>		
<p>Final investment proposal was made for the project, which considered of effects of Energy Aid, Frequency Containment Reserves and sales of biomass fuel. Final Investment would contain VFD installation as well as heat pump or renewal of HRU. With present electricity price and depending on the used price mechanics the PP of heat pump would be around 3,2–10,4 years and for the HRU 6,1 – 8,8 years.</p>		
Keywords		
timber wood drying, energy efficiency, heat recovery, heat pump		

SISÄLLYS

LYHENTEET.....	6
1 JOHDANTO.....	7
2 YRITYSESITTELY.....	8
3 SAHATAVARAN KUIVAAMINEN.....	8
3.1 Sahatavaran kuivaus.....	8
3.2 Kuivausviat.....	9
3.3 Sahakuivaimet.....	12
3.4 Puhaltimien moottorikäytöt.....	14
3.5 Sähkömoottorien vikaantuminen.....	16
3.6 Lämmönvaihdin.....	19
3.7 Lämpöpumppu.....	19
4 HÄIRIÖ- JA KÄYTTÖRESERVI.....	20
5 ENERGIATUKI.....	22
6 TUTKIMUKSEN TOTEUTTAMINEN.....	22
6.1 Mittausjärjestelyt.....	23
6.2 Kuivauskanavan lämmitystehon määrittäminen.....	24
6.3 LTO-kennon tehon määrittäminen.....	25
6.4 Sähkövirtamittaukset.....	27
7 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU.....	28
7.1 Kanavan lämpöteho ja LTO-kennon teho.....	28
7.2 Puhaltimet.....	31
8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA TOIMENPIDE-EHDOTUKSET.....	32
8.1 LTO-kennojen korjaus ja takaisinmaksuaika.....	32
8.2 Puhaltimien sähkökäytöt.....	33
8.3 Tilakatselmus.....	35
9 VAIHTOEHTOISET TARKASTELU.....	36
9.1 LTO:n toteutus lämpöpumpulla.....	38

9.2	Lämpöpumpun käyttö puun kuivauksessa.....	39
9.3	Lämmitys sähkökattilalla.....	40
9.4	Lämmitystapojen vertailu	41
9.5	Yhteenveto investointimahdollisuuksista ja niiden kannattavuuksista.....	43
10	YHTEENVETO	44
	LÄHTEET.....	46

KUVALUETTELO

TAULUKKOLUETTELO

LIITTEET

Liite 1. Stora Enso, kuivauksen vaikutus puun muodonmuutoksiin

Liite 2. ABB pehmokäynnistimien tarjous

Liite 3. ABB taajuusmuuttajien tarjous

Liite 4. Calefa Lämpöpumpun tarjous

Liite 5. Lämpöpumpun TMA ja vuosikustannuksien säästö [€/a] eri sähkön hinnoilla ja toteutuksilla, 80 °C lämpötilan tuotolla.

Liite 6. Sähkökattilan säästöpotentiaali [€/a] eri skenaarioissa.

Liite 7. Lämmitystapojen säästöpotentiaalin [€/a] vertailu eri skenaarioissa

LYHENTEET

COP	Coefficient of Performance
EMC	Electromagnetic Compatibility
LTO	Lämmöntalteenotto
OTC	Optimized Two-Stage Continuous dryer
PSK	Puunsolujen kyllästymispiste
TMA	Takaisinmaksuaika

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Elomatic Oy:n alaisuudessa Stora Enso:n ■■■■■ sahan toimeksiannosta. Opinnäytetyön aihe on jatkumoa kesän 2018 aikana toteutetulle sahu kuivainten energiatehokkuuskatselmoinnille, jossa havaittiin muutamia tehostuskohteita ja ongelmia sahan ohjauksessa.

Opinnäytetyön keskeisenä tavoitteena oli tarkastella sahu kuivaamon energiatehokkuuden kehittämismahdollisuuksia sekä vähentää kuivaamon energiankulutusta ja moottoririkkoja. Pääasialliset tarkastelut kohdentuivat kanavakuivaimien lämmöntalteenoton toimintaan ja niiden uusintamahdollisuuksiin sekä puhaltimien moottoreiden toimivuuteen. Lisäksi lämmöntalteenoton ohitusta tarkasteltiin yhtenä vaihtoehtona heikkokuntoisen kuivaimen korjaukselle. Tarkemmat mittaukset ja tarkastelu tehtiin kahdesta kanavasta ja saatuja tuloksia voidaan soveltaa muihin kanavakuivaimiin, joita sahalla on yhteensä 10 kappaletta, hieman eri variaatioissa.

Kuivausta ei voida kehittää kuitenkaan pelkästä energiatehokkuuden näkökulmasta, sillä kuivauksen olosuhteilla on suuri merkitys lopputuotteen laatuun. Teoriaosuudessa käsitellänkin kuivauksen olosuhteiden vaikutuksia puun arvoa pudottaviin laadun muutoksiin. Lisäksi teoriaosuus käsittelee kuivauskanavan keskeisimmät laitteet, joihin otetaan kantaa työn puitteissa.

Nopeasti ajateltuna sahu teollisuudessa energiankulutuksen vähentämiseen tähtäävät investoinnit ovat haastavia, ellei jopa kannattamattomia toteuttaa, sillä lämmitysenergia on halpaa, etenkin sähkön hintaan verrattuna, ja investointien takaisinmaksuajat venyvät usein hyvinkin pitkiksi. Takaisinmaksuaikaa voidaan kuitenkin lyhentää erilaisin keinoin ja tämä työ pyrkii selvittämään eri skenaarioiden vaikutukset investoinnin kannattavuuteen.

Lopuksi työn aikana havaitut, energiatehokkuuteen ja toimintavarmuuteen vaikuttavat osakokonaisuudet on tuotu esille ja niputettu edelleen yhdeksi isommaksi investointiprojektisuunnitelmaksi, jolle on esitetty kannattavuuslaskelmia eri skenaarioissa.

2 YRITYSESITTELY

Elomatic Oy

Elomatic Oy ”tarjoaa konsultointi- suunnittelu-, tuotekehitys- ja projektinhallintapalveluita sekä tuotteita ja kokonaisratkaisuja teollisuusyrityksille sekä julkisen sektorin organisaatioille”. Elomatic Oy:n pääkonttori sijaitsee Turussa ja yrityksellä on Suomessa n. 850 työntekijää Turussa, Jyväskylässä, Helsingissä ja Tampereella sijaitsevissa toimipisteissä. Elomaticilla on Suomen lisäksi toimistoja useissa maissa, kuten Venäjällä, Kiinassa ja Puolassa (Elomatic 2018).

Stora Enso Oy

Stora Enso Oy toimii yli 30 maassa, joissa se työllistää yhteensä noin 26 000 työntekijää. Vuonna 2017 yrityksen liikevaihto oli 10 miljardia euroa ja yritys on listautunut Helsingin sekä Tukholman pörssiin. Yrityksellä on pitkä historia metsäteollisuudessa, jonka ansiosta nykyinen tuoteportfolio kattaa bio- ja metsäteollisuuden tuotteita laaja-alaisesti aina rakennusmateriaaleista ruuan- tuotannon hyödykkeisiin (Stora Enso 2018a).

Stora Enson [REDACTED] sahalla valmistetaan rakennusteollisuudelle puutavaraa pääasiassa kuusesta. Kuivaus tapahtuu jatkuvatoimisena prosessina kanavakuivaamoissa. [REDACTED] sahalla on 7 perinteistä kanavakuivainta ja 3 Optimized Two-stage Continuous-kuivainta (OTC).

3 SAHATAVARAN KUIVAAMINEN

3.1 Sahatavaran kuivaus

Puun kuivauksen tavoitteena on sahatavaran säilyvyyden, ominaisuuksien ja käytettävyyden parantaminen. Puun säilyvyys paranee alle 20 % kosteudessa, sillä esimerkiksi home- ja sinistäjäsiemien kasvu on tällöin estynyt. Kosteus vaikuttaa myös, ennen kaikkea puun lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin,

sekä työstettävyyteen, liimattavuuteen, pintakäsittelyominaisuuksiin, kyllästettävyyteen ja sähkönjohtokykyyn. (Sipi 2002.)

Puun kuivauksessa puunsolusta poistetaan ensin vapaa vesi. Vapaa vesi kulkee puun solusta toiseen kapillaari-ilmiön vaikutuksella nopeasti. Sitä puun kosteustilaa, jossa kaikki vapaa vesi on poistunut puun soluista, sanotaan puunsolujen kyllästymispisteeksi eli PSK:ksi. Tämä kosteus on noin 28-32 % riippuen lämpötilasta ja puulajista. (Sipi 2002.)

PSK-ajan alapuolella nopea kapillaarinen kuivuminen alkaa muuttua diffuusionopeudeksi, jolloin sidottu vesi poistuu hitaasti soluseinämistä. PSK:n alapuolella puu alkaa kutistua suoraviivaisesti siten, että tietty kosteuden muutos aiheuttaa tietyn kutistuman. Vastaavasti puu turpoaa PSK:n alapuolella, kun se imee ilmasta kosteutta. PSK laskee lämpötilan funktiona. (Sipi 2002.)

Puun kuivumista voidaan nopeuttaa nostamalla kuivausilman lämpötilaa ja alentamalla ilman suhteellista kosteutta. Ilman kyky sitoa itseensä vettä kasvaa nopeasti lämpötilaa nostettaessa, jolloin kuivausilman suhteellinen kosteus kasvaa. (Sipi 2002.)

Lämpötilaa ei tulisi kuitenkaan nostaa liiaksi, sillä haihtumisnopeuden puun pinnalta tulisi olla yhtä suuri kuin veden liikenopeus puun sisältä pintaa kohti. Jos haihtumisnopeus puun pinnalta on suurempi kuin kosteuden siirtymisnopeus puun pinnalle, pääsee puun pinta kuivumaan liiaksi. Tämän seurauksena kosteuden haihtuminen hidastuu tai jopa estyy. (Sipi 2002.)

Kuivauksessa pyritäänkin noudattamaan niin kutsuttua kuivauskaavaa, jolla saavutettaisiin paras kompromissi lämmönkulutuksen, kuivausajan pituuden ja kuivausvikojen esiintyvyyden suhteen. Eri puulajit ja puutavaran dimensiot määrittelevät suositeltavan kuivauskaavan. (Sipi 2002.)

3.2 Kuivausviat

Kuivausviat voivat tulla esiin heti kuivauksen jälkeen tai vasta jatkokäsittelyssä, kuten esimerkiksi halkaisussa tai höyläyksessä. Kuivausviat aiheuttavat

lopputuotteen arvon alenemista, joten kuivauksen energiakustannuksien lisäksi kuivausviat ovat merkittävä kuluerä. (Sipi 2002.)

Halkeilu ja pintakovuus

Pahin, ja Marketta Sipin 2002 mukaan, yleisin kuivausvika ovat halkeamat, jotka aiheuttavat suurimmat sahatavaran arvon ja laadun alenemat. Pintahalkeamat syntyvät, kun puun pinta kuivuu liian nopeasti ja pyrkii kutistumaan, jota puun märkä sisäosa vastustaa. Liian nopea kuivuminen aiheuttaa puun pintaan vetojännitystä ja kappaleen sisälle puristusjännitystä, jolloin puun pinnanlujuus ylittyy ja pinta repeää. Sama mekanismi aiheuttaa myös puun pintakovuutta, jolloin puun pinta venyy ja ylittää kimmoisuusrajan ja pintaan syntyy palautumattomia muodonmuutoksia. (Sipi 2002.)

Pintakovuuteen ja halkeamien muodostumisessa keskeisessä asemassa ovat liian nopea ilmannoisuus ja alhainen ilman suhteellinen kosteus, jotka aiheuttavat pinnan nopean kuivumisen. Kuivauksen loppupuolella aiheutuva pinnankovuus voi aiheuttaa puuhun sisähalkeamia, jolloin pinnassa esiintyy puristusjännitystä ja sisäosissa vetojännitystä. Sisähalkeamat aiheuttavat reklamaatioita, sillä vika selviää vasta jatkojalostuksessa. (Sipi 2002.)

Puun loppukosteus

Puun loppukosteus ja kosteusjakauma ovat iso tekijä laadun ja hinnan määrittämisessä, sillä lopputuotteen on oltava tasalaatuista. Erityisesti epätasaista kosteusjakamaa voi esiintyä kappaleen pituussuunnassa tai sen sisä- ja ulko-osien välillä sekä kuivattavan erän eri kappaleiden välillä. Loppukosteuteen ja kosteusjakaumaan vaikuttavat kuorman rakenne, ilman tasainen virtaama sekä alkukosteuden tasaisuus. Kuivauksen jälkeisessä laaduntarkkailussa kuormasta mitataan loppukosteus ja kosteusjakauma, jolloin määritellään puun laatuluokka. Liian suuri kosteusjakauma voi alentaa koko kuorman laatuluokkaa ja hintaa. (Sipi 2002.)

Muodonmuutosviat

Muodonmuutosviat johtuvat puun rakenneominaisuuksista. Vinosyisyys ja lylly aiheuttavat puussa kutistumaeroja kappaleen pituussuunnassa ja siten kappaleen kieroontumista ja vääntymistä. Muodonmuutosvikoja esiintyy sitä useammin ja sitä voimakkaammin, mitä alhaisempaan loppukosteuteen puu kuivataan. (Sipi 2002). Tämä ilmenee hyvin myös Stora Enson kirjanpidosta saadusta materiaalista, jossa avg bow, -crook ja -twist, eli keskimääräinen kaarevuus, -vääntymisen ja -kieroontuminen, kasvavat puun kuivuesssa. (Liite 1) Muodonmuutosvikojen syntymiseen ei vaikuteta niinkään kuivausolosuhteiden muutoksilla vaan huolellisella kuivauskuorman teolla. Muodonmuutosvikojen minimoimiseksi on kiinnitettävä huomiota alustan suoruuteen, säännölliseen kuormaan ja välirimojen on oltava riittävän tiheässä. (Sipi 2002.)

Pihkan sulaminen ja väriviat

Pihkan sulamista ja värivikoja esiintyy usein kuivauksen alussa. Pihkan sulamista tapahtuu erityisesti mäntysahatavaralla. Se alkaa, kun puun kosteus on suuri ja lämpötila yli 40 °C, kiihtyen edelleen, kun lämpötilaa nostetaan. Pihkan sulamista esiintyy yleensä enemmän, kun märkälämpötilaa nostetaan, jolloin korkea ilman kosteus edistää sulamista entisestään. Pihkan sulaminen voidaan estää pitämällä märkälämpötilaa $\leq 34 - 37$ °C asteessa ja kuivalämpötilaa $\leq 48-52$ °C asteessa. (Sipi 2002.)

Väriviat syntyvät hyvin samanlaisissa olosuhteissa kuin pihkan sulaminen. Eräänä värivikojen aiheuttajana on pidetty puun uuteaineiden rikastumista sahatavaran pintaan. Uuteaineiden rikastuminen kiihtyy, kun kuivauslämpötilaa nostetaan. Männyllä ja kuusella kuivauslämpötilaa on pidetty merkittävimpana värimuutostenaiheuttajana. Värimuutoksia esiintyy herkemmin pintalaudoissa kuin sydäntavarassa. (Sipi 2002.)

Värivikoja aiheutuu myös sinistymistä ja homehtumista. Näitä vikoja aiheutuu, jos puuta joudutaan seisottamaan kuivaamon märässä päässä 30 – 40 °C lämpötilassa, ja ilmastossa, jossa vallitsee korkea suhteellinen kosteus sekä ilman kierto on huonoa. Sinistymistä ja homehtumista voidaan estää kuivaa-

malla sahatavara välittömästi sahauksen jälkeen, nostamalla kuivauksen lämpötilaa, tehostamalla ilmankiertoa, alentamalla kiertoilman kosteutta tai suoja-kastelemalla sahatavara ennen kuivausta. (Sipi 2002.)

3.3 Sahakuivaimet

Sahatavaran kuivauksessa yleisin kuivausmenetelmä oli lautatarhakuivaus vielä 1960-luvulle saakka, kunnes kuivauksessa alettiin siirtyä yhä enemmän keinokuivaukseen. Keinokuivauksen etuina ovat nopea läpimenoaika sekä helpommin säädeltävä loppukosteus. Nykyisin keinokuivausmenetelmiä käytetään noin 90 %:sti sahatavaran kuivauksessa juuri edellä mainituista syistä. (Sipi 2002.)

Yleisin keinokuivausmenetelmä Suomessa on lämminilmakuivaus. Lämminilmakuivaamot jaotellaan kuivaamon täyttö ja tyhjennys menetelmien perusteella panostoimisiin kamarikuivaamoihin ja jatkuvatoimisiin kanavakuivaamoihin. (Sipi 2002.)

Keinokuivauksessa yhteisiä piirteitä ovat kuivalämpötilan ja märkälämpötilan seuranta, joiden perusteella säädellään tulo- ja poistoilman määrää sekä lämmityspatteriston lämpötilaa. Automaattiohjauksessa suhteellisen kosteuden noustessa tiettyyn pisteeseen, poistoilmapelti aukeaa, jolloin kostea ilma poistuu kanavasta ja uutta ilmaa virtaa tulokanavasta kuivaimeen. Samoin kuivalämpötilaa säädellään automaattiventtiileillä, jotka seuraavat kuivalämpötilan anturia takaisinkytkentänä. (Sipi 2002.)

Kamarikuivain

Kamarikuivaamo toimii panosprosessina, jossa kuivattava tavara täytetään ja tyhjennetään erä kerrallaan. Ilmankierto on yleensä poikittainen, kuorman nähden pituussuuntainen. Kiertopuhallin on vaihtosuuntainen ja kuorman tasisaisen kuivumisen vuoksi kiertopuhallinta käännetään 2-4 tunnin välein. (Sipi 2002.)

Kamarikuivaimissa ei yleensä ole poistoilman lämmöntalteenottoa, sillä poistettavan jäteilmän vesisisältö kuivauksen lopussa on niin pieni, ettei lämmöntalteenottoa pidetä kannattavana (Sipi 2002).

Kanavakuivain

Kanavakuivaamo soveltuu jatkuvatoimisena parhaiten suurien määrien kuivaukseen. Se on myös energiatehokkaampi ratkaisu kuin kamarikuivain, koska kanava kykenee varaamaan lämpöä vaihtojen aikana ja korvausilma esilämmitetään jäteilmalla ristivirtalämmönvaihtimella. Energiankulutus on noin 30 – 40 % pienempi kuin kamarikuivaamossa, koska tuloilmaa lämmitetään lämmöntalteenotto-kennolla (LTO-kennolla), eikä kanava ehdi jäähtymään nopeasti tapahtuvassa kuorman lisäyksessä. (Sipi 2002.)

Kanavakuivaamot jaetaan pitkittäisellä ja poikittaisella ilmankierrolla toimiviin kuivaimiin. Vaikka poikittaisella ilmavirralla toimiva kanavakuivain mahdollistaisi paremman kuivausolosuhteiden säädettävyyden, on pitkittäinen kuivaamo yleistynyt pienemmän vikaherkkyuden ja helpomman ohjauksen ansiosta. Näinpä pitkittäiseen ilmankiertoon perustuvia kuivaamoja rakennetaan yhä eikä poikittaisella kierrolla toimiva kuivaamoja ole rakennettu juurikaan viime vuosikymmeninä. (Sipi 2002.)

Pitkittäisessä kanavassa kuormat ovat kanavaan nähden pitkittäin ja ilma kiertää pitkittäin kohtisuoraa kuormien pituussuuntaa vasten. Kuorma siirretään, märästä päästä kuivaan päähän, ja ilmaa virtaa vastakkaisesti kuivasta päästä märkään päähän. (Sipi 2002.)

OTC-kuivain

OTC-kanavakuivaamo (Optimized Two-Stage Continuous dryer) on suurien, jatkuvatoimisten kuivaamojen uusien sovellus. OTC-kuivaamo koostuu kahdesta perättäisestä kuivausvyöhykkeestä, joissa on erilaiset kuivausolosuhteet. Ensimmäisessä märkävyöhykkeessä kuormiin puhalletaan kuumaa ilmaa suurella nopeudella, märästä päästä kuivaan päähän, jolloin kuormat kuivuvat ja lämpiävät nopeasti. (Sipi 2002.)

Toiseen vaiheeseen, niin kutsuttuun kuivavyöhykkeeseen, siirrytään saavutettaessa puun syiden kyllästymispiste, jolloin puu alkaa kutistua. Kuivavyöhykkeessä ilma virtaa kuivasta päästä märkään päähän. Poistoilmanvaihto on toteutettu poistopuhaltimella kuivausvaiheiden rajalla. (Sipi 2002.)

3.4 Puhaltimien moottorikäytöt

Kuivauskanavien moottorikäytöt voivat olla erilaisia. Käyttökohteesta riippuen sähkömoottoreita voidaan käynnistää suoraikäynnisteisesti, tähti-kolmiokäynnistimellä, taajuusmuuttajalla ja pehmokäynnistimellä. Käynnistysmenetelmien erot on esitetty kattavasti taulukossa 1.

Taulukko 1. Käynnistysmenetelmien vertailu (ABB 2011)

Ongelman tyyppi	Käynnistysmenetelmän tyyppi			
	Suora käynnistys	Tähtikolmiokäynnistys	Taajuusmuuttaja	Pehmokäynnistin
Vetohihnojen luistaminen ja katkeaminen, laakerien nopea kuluminen	Kyllä	Keskitasoinen	Ei	Ei
Korkea käynnistysvirta	Kyllä	Ei	Ei	Ei
Vaihteiston voimakas kuluminen	Kyllä	Kyllä (käynnistys kuormalla)	Ei	Ei
Tavaroiden/tuotteiden särkyminen pysäytyksessä	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei
Käytönaikainen nopeuden säätö	Ei	Ei	Kyllä	Ei
Paineiskut putkissa pysäytettäessä	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei (poistuu momentinsäädöllä, pienenee jänniterampilla)
Voimansiirtohuiput	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei
Arvioidut keskimääräiset asennuskustannukset	1	3	> 12	6

Suorakäynnistys

Suorakäynnistys on moottoreiden yleisin käynnistystapa. Käynnistyslaitteisiin sisältyy vain pääkontaktori sekä lämpörele tai elektroninen ylikuormitusrele, jotka suojaavat moottoria. Menetelmä on helppokäyttöinen ja kustannustehokas sekä rakenteeltaan pienikokoinen toteuttaa, jolloin se mahtuu ahtaaseen sähkökeskukseen. Menetelmä soveltuu varsinkin pienitehoisille moottoreille. Menetelmän haittana on se, että käynnistysvirta on suurin mahdollinen. Normaali käynnistysvirta on 6–8-kertainen moottorin nimellisvirtaan nähden, mutta virta voi nousta jopa 14-kertaiseksi. Suoraa käynnistystä käyttäessä moottorin pysäytys tapahtuu myös suoraan eikä pyörimisnopeutta voida säätää. (ABB 2011.)

Tähti-kolmiökäynnistys

Tähti-kolmiökäynnistin koostuu kolmesta kontaktorista, ylikuormitusreleestä sekä ajastimesta. Tähti-kolmiökäynnistimen toimintaperiaate on, että kiihdytyksen alussa moottorin käämitykset ovat tähtikytkennässä ja tuottavat pienempää virtaa. Toisessa vaiheessa, ennalta määritetyn ajan jälkeen, ajastin muuttaa kytkennän kolmiokytkennäksi, jolloin moottori ottaa täyden virran ja tuottaa täyden momentin. Käynnistystapa edellyttää, että moottori on jatkuvan käytön aikana kolmiokytkennässä. (ABB 2011.)

Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja koostuu tasasuuntaajasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. Taajuusmuuttajakäyttö mahdollistaa moottorin portaattoman käynnistyksen ja pysäytyksen. Käynnistyksessä taajuusmuuttaja nostaa taajuutta portaattomasti nolasta hertsistä verkon taajuuteen (50 - 60 Hz), jolloin moottorin pyörimisnopeus kasvaa. Kun taajuutta suurennetaan kiihdytyksessä asteittain, moottori käy nimellisuopeudella kaikilla taajuuksilla. Koska moottori käy nimellisuopeudella, niin myös moottorin nimellismomentti on käytettävissä heti käynnistyksen alusta lähtien, ja virta on noin nimellisvirran suuruinen. (ABB 2011.)

Taajuusmuuttajat vaativat toimiakseen EMC eli ”Electromagnetic Compatibility”-suojatun kaapelin ja -turvakytkimen taajuusmuuttajalta moottorille. EMC-suojauksella estetään sähkömagneettisäteilyn aiheuttamat häiriöt, joille taajuusmuuttajalla toteutettu järjestelmä altistuu. (Danfoss 2011.)

Usein taajuusmuuttajia käytetään myös pelkästään moottorin pehmeään käynnistämiseen ja pysäyttämiseen, vaikka jatkuvaan säätämiseen ei ole tarvetta. Tällöin taajuusmuuttaja on kuitenkin melko kallis ratkaisu pehmokäynnistimeen verrattuna. (Hieta-Wilkaman 1997.)

Pehmokäynnistin

Pehmokäynnistin ei muuta taajuutta tai nopeutta taajuusmuuttajan tapaan. Pehmokäynnistin kasvattaa moottorille syötetyn jännitteen lähtöjännitteestä täydeksi jännitteeksi. Käynnistyksen alussa moottorille syötetään vain sen verran jännitettä, että vaihteiston rattaat tai vetohihnat kiristyvät. Tämän jälkeen jännite ja momentti kasvavat vähitellen ja koneisto alkaa kiihtyä eikä käynnistyksessä esiinny tarpeettomia nytkähdyksiä. Käynnistystavan etuna on momentin säätömahdollisuus tarpeen mukaan riippumatta siitä, onko moottorilla kuormaa. (ABB 2011.)

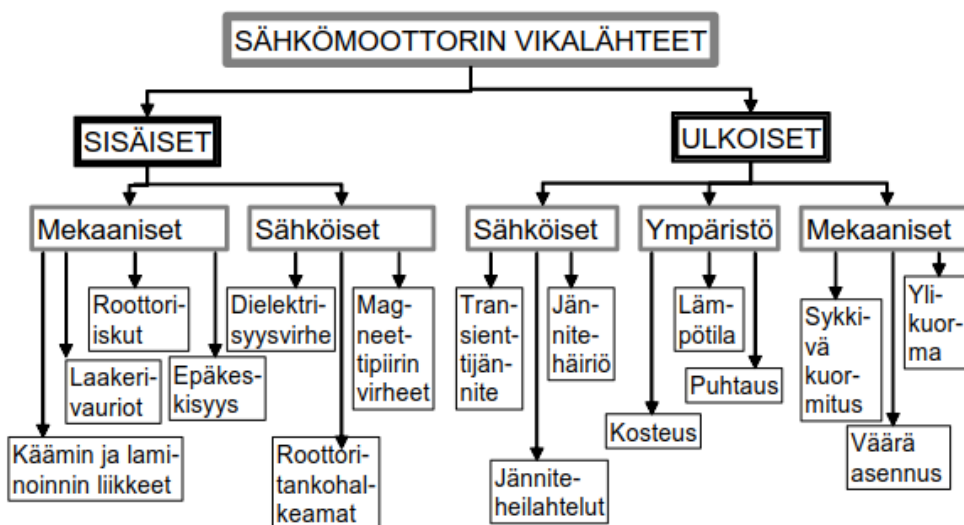
Pehmokäynnistimen käyttö vähentää käynnistysvirtaa, jolloin vältetään käynnistyksen aiheuttamat jännitteenalenemat verkossa. Pehmeän käynnistyksen myötä menetelmä vähentää myös laitteeseen kohdistuvaa mekaanista rasitusta, jolloin huollon ja ylläpidon tarve vähenee. (ABB 2011.)

Pehmokäynnistimellä voidaan taajuusmuuttajan tapaan suorittaa pehmeä pysäytys. Pehmokäynnistin on helppo asentaa vanhaan järjestelmään, sillä sen kanssa voidaan käyttää tavallisia moottoreita, ilman vahvennettua (EMC) eristystä tai erikoislaakerointia. (ABB 2011.)

3.5 Sähkömoottorien vikaantuminen

Sähkömoottoreiden vikaantuminen voi johtua mekaanisista, sähköisistä tai ulkoisista syistä. Yleisimmät vikaantumiseen johtavat syyt johtuvat laakereiden vioista, jotka juontavat juurensa muun muassa ylikuumenemisesta, värinästä

ja akselin ylikuormituksesta. Seuraavina esiintyvät staattorin viat kuten käämien oikosulut, ja roottorin viat, jotka johtuvat pitkälti samoista syistä kuin laakeriviat (Halme 2006). ABB:n (2015) mukaan ulkoiset tekijät ovat yleisempiä vian aiheuttajia kuin roottorin viat. Vikojen synnyn yhdistävänä tekijänä ilmevät usein ylikuormitus, korkea lämpötila ja rasiustekijät kuten värinä, iskut ja ympäristön olosuhteet (ABB 2015). Kuvaan 1 Halme, J on koonnut kattavasti sähkömoottorien vikalähteet selkeällä tavalla moottorin ulkoisiin ja sisäisiin vikalähteisiin.



Kuva 1. Sähkömoottorien vikalähteet (Halme 2005)

Kuivauskanavan puhallinkäytössä toimiessaan sähkömoottori voi altistua lähes kaikille kuvassa 1 esitetyille sähkömoottorien vikalähteille. Kanavassa on korkea lämpötila ja ilmankosteus jotka voivat johtaa laakerivaurioihin, eristevaurioihin ja vaiheoikosulkuun. Lisäksi puhallin voi aiheuttaa mekaanisia ongelmia moottorilla aiheuttaen mekaanista rasitusta ja laakerien kulumista jotta ennen pitkään moottorin hajoamiseen.

Lisäksi samasta lähteestä löydettyistä taulukoista nähdään sähkömoottorien sisäisten vikatyyppeiden aiheuttajat, jotka voidaan jakaa roottorille ja staattorille kuluviksi, vian alkuperän ja syntypaikan mukaisesti, seuraavalla tavalla (taulukot 2,3):

Taulukko 2. Sähkömoottorien roottorivauriotyypit ja niiden syyt (Halme 2005)

Vikatyyppi	Vian mahdollinen aiheuttaja
Laakerivika	Puutteellinen eristys, virheellinen kuormitus, magneettisen voiman epäsuhteellisuus, ylikuumentuminen, puutteellinen voitelu, likainen voiteluaine
Rikkoutunut roottori tanko	Lämpösyklit magneettisen voiman epäsuhteellisuus, suuret transienttiset liikkeet, negatiivinen syöttösykli
Roottorirungon vauriot	Virheellinen roottorin liike tai valmistus, lämpösyklit, ylikuormat
Laakereiden linjausvirheet	Puutteellinen tai väärä kytkentä, suuret laakerivälykset, ylikuormat, virheellinen asennus
Roottorin linjausvirhe	Virheellinen asennus, laakerivaurio, magneettisen voiman epäsuhteellisuus
Laakerin puutteellinen voitelu	Ylikuumentuminen, tiivistevauriot, likainen voiteluaine
Roottorin mekaaninen tai lämpötekkinen epätasapaino	Päätyrenkaan liike, epäsymmetrinen "Blocking"

Taulukko 3. Sähkömoottorien staattorivauriotyypit ja niiden syyt (Halme 2005)

Vikatyyppi	Vian mahdollinen aiheuttaja
Runkovärähtelyt	Magneettisen voiman epäsuhteellisuus, käänin liikkuminen urassa, syöttöjännitehäiriöt, ylikuormitus, virheellinen eristys, roottori-iskut
Staattorin maavirhe	Runko-oikosulku, eristehankauma, lämpösyklit, puutteellinen laminointi, löysät urakiilat, sähköshokki
Eristevaurio	Huollon tai asennuksen aikainen vaurio, liialliset käynnistykset, korkea tai matala ilman kosteus ja lämpötila

Staattorin kierrosoikosulku	Liiallinen lämpeneminen, äkillisesti nouseva syöttö, korkea kosteuspitoisuus, värähtely, epäpuhtaudet voitelussa
Staattorin vaiheoikosulku	Eristevaurio, korkea lämpötila, syöttöjännitehäiriöt, käämien löysä kiinnitys
Johteen siirtymä	Virheistä johtuvat sähkökuormitukset, toistuvat käynnistykset, käämien päiden värähtely
Sähköiset kytkentävauriot	Löysät liitokset, epäpuhtaudet, liiallinen värähtely

3.6 Lämmönvaihdin

Lämmönvaihtimella eli lämmönsiirtimellä voidaan siirtää lämpöenergiaa eri lämpötiloissa olevien aineiden välillä. Useimmiten lämmönvaihtimessa virtaavat aineet on erotettu toisistaan lämmönsiirtopinnoilla, siten että aineet eivät ole kosketuksessa toisiinsa. (Thulukkanam 2014.)

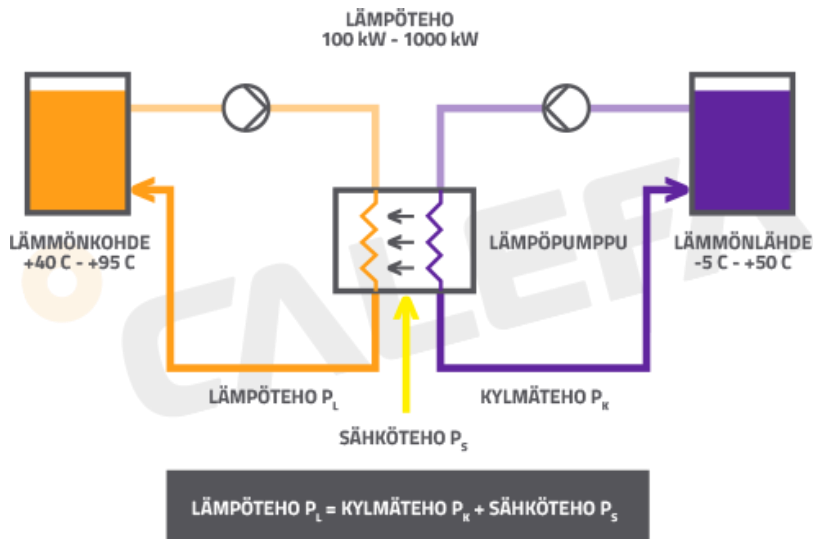
Yleisesti lämmönvaihtimet jaetaan rakenteen, prosessin tyyppin, virtaamatyyppin tai virtaavien aineiden faasien mukaan. Teollisuudessa lämmönvaihtimien valintaan vaikuttavat erityisesti toimintapiste, eli aineiden lämpötila, virtaaman määrä ja virtaavien aineiden faasi, mutta myös aineiden likaisuus, syövyttävyys, ja näiden vaikutus vaihtimen rakenteeseen ja hintaan. (Thulukkanam 2014.)

Lämmönvaihdinta valittaessa onkin huomioitava, että vaihdin on rakennettu vastaamaan prosessin olosuhteita, jotta lämmönvaihtimesta saadaan kaikki hyöty irti. Onnistuneella valinnalla pyritään saavuttamaan hyvät lämmönsiirto ominaisuudet, pieni virtausvastus ja hyvä kustannustehokkuus. (Thulukkanam 2014.)

3.7 Lämpöpumppu

Lämpöpumppu koostuu kahdesta lämmönvaihtimesta eli höyrystä ja lauhduttimesta sekä kompressorista ja paisuntaventtiilistä. (Kuva 2) Lämpö-

pumpulla voidaan siirtää lämpöä kylmemmästä tilasta lämpimään tilaan perustuen järjestelmässä kiertävän kylmäaineen faasimuutokseen eli höyrystymiseen ja lauhtumiseen. (Kuisma s.a.)



Kuva 2. Lämpöpumpun rakenne (Calefa 2019)

Lämpöpumpppuolosessissa järjestelmässä kiertävä kylmäaine höyrystyy kaasuksi höyrystimessä sitoen itseensä lämpöä. Höyry johdetaan kompressoriin, jossa kaasun paine ja lämpötila kasvavat entisestään. Korkeapaineinen höyry johdetaan lauhtuttimeen, jossa höyry tiivistyy ja luovuttaa lämpönsä ympäristöön. Lauhtuttimessa tiivistynyt neste johdetaan paisuntaventtiilin läpi, takasin höyrystimelle, jolloin kierto alkaa alusta. Prosessi vaatii toimiakseen sähköenergiaa, jota käytetään kompressorin pyörittämiseen. (Kuisma s.a.)

Lämpöpumpun tehokkuus ilmoitetaan COP-luvulla, (Coefficient of Performance), joka kertoo järjestelmän tuottaman lämmön määrän suhteessa kulutettuun sähköön. Esimerkiksi jos COP on 4, niin 1 kW sähkötehoa kohden saadaan 4 kW lämpötehoa. (Kuisma s.a.)

4 HÄIRIÖ- JA KÄYTTÖRESERVI

Uudenlaisen häiriö- ja käyttöreservin tarve lisääntyy jatkuvasti, kun sähkön tuotantorakenne muuttuu lauhdelaitoksista uusiutuvaan aurinko- ja tuulivoimaan. Ennen sähkötarpeen kasvuun on kyetty vastaamaan nopeasti lisäämällä tehoja lauhdevoimalassa, mutta tuulivoimaa ja aurinkoenergiaa ei pystytä säätämään tehokkaammaksi. Ratkaisua on pyritty hakemaan kulutukseen perustuvasta häiriö- ja käyttöreservistä. (Fingrid 2018a.)

Sähkön tuotannon on vastattava hetkellistä sähkön kulutusta joka hetki. Tuotannon ja kulutuksen, eli sähköverkon tasapainosta kertoo verkon taajuus, joka on tasapainotilassa 50 Hz. Sähkömarkkinaosapuolet suunnittelevat etukäteen kulutuksensa ja tuotantonsa tasapainoon, mutta käytön aikaisiin poikkeamiin tarvitaan reservejä, joita Fingrid hankkii ylläpitämiltään markkinoilta. (Fingrid 2018a)

Häiriö- ja käyttöreservin vuosimarkkinan mukainen hinta perustuu kilpailutuksen seurauksena määräytyvään hintaan. Kilpailutus järjestetään aina edellisen vuoden syksyllä vapaana avoimena tarjouskilpailuna. Jos käytössä on tuntimarkkinasopimus, niin maksettava korvaus muuttuu kysynnän ja tarjonnan mukaan. Jätetyt tarjoukset käytetään hintajärjestyksessä ja korvaus määräytyy, tuntikohtaisesti, kalleimman tilatun tarjouksen mukaan siten, että maksettava korvaus on kaikille reservinhaltijoille sama. Reservimarkkinoille osallistukseen reservinhaltijan tulee allekirjoittaa vuosi- tai tuntimarkkinasopimus Fingridin kanssa. (Fingrid 2018b).

Häiriö- ja käyttöreservissä on neljä pääansaintamallia:

Taajuusohjattua käyttöreserviä voidaan käyttää kohteessa, jota voidaan säätää molempiin suuntiin useita kertoja tunnissa. Esimerkiksi 1 MW käyttöreservi vuosimarkkinoilla 7 000 h pysyvyydellä, vuonna 2018 mahdollistaisi seuraavan korvauksen:

$$1 \text{ MW} * 14,0 \text{ €/MW,h} * 7 \text{ 000 h/vuosi} = 98 \text{ 000 €/vuosi}$$

Jos käyttöreserviä toteutetaan tuntimarkkinasopimuksella, olisi vuonna 2017 ja 4 000 h pysyvyydellä, korvaus ollut:

$$1 \text{ MW} * 27,4 \text{ €/MW,h} * 4 \text{ 000 h/vuosi} = 109 \text{ 600 €/vuosi}$$

Jos kohdetta on mahdollista säätää nopeasti taajuuden laskiessa alle 49,9 Hz. Esimerkiksi vuonna 2018, 1 MW häiriöreservi vuosimarkkinoilla ja 7 000 h pysyvyydellä, olisi korvaus reservin ylläpidosta ollut:

$$1 \text{ MW} * 2,7 \text{ €/MW,h} * 7 \text{ 000 h/vuosi} = 18 \text{ 900 €/vuosi}$$

Vastaavasti, jos 1 MW taajuusohjattua häiriöreserviä sovelletaan tuntimarkkinoilla, olisi korvaus vuoden 2017 tuntimarkkinatoteutulla ja 1 000 h pysyvyydellä ollut:

$$1 \text{ MW} * 17,3 \text{ €/MW,h} * 1 \text{ 000 h/vuosi} = 17 \text{ 300 €/vuosi}$$

Käytännössä kulutus pohjaiseen häiriö- ja käyttöreserviin liittynyt osakas sää-
tää tai sammuttaa kulutuskohteitaan häiriön sattuessa. Usein nämä häiriöt
ovat luonteeltaan arvaamattomia ja lyhytkestoisia eikä laitteiston sammutus ai-
heuta riskiä itse kohteessa ja prosessissa. Häiriöreserveissä aktivointeja ta-
pahtuu harvemmin kuin taajuusohjatun käyttöreservin tapauksessa. (Fingrid
2018c)

5 ENERGIATUKI

Energiatukea haetaan Business Finlandin sähköisen asiointipalvelun kautta.
Tukea voivat saada kaiken kokoiset yritykset. Suuryrityksien enimmäistukitaso
on 30 % ja tuen lopullinen taso selviää tukipäätöksestä. Ennen tuen hake-
mista yrityksen täytyy allekirjoittaa energiatehokkuussopimus, johon liittyneet
yritykset asettavat itselleen määrällisen energiankäytön tehostamistavoitteen
ja toteuttavat toimenpiteitä niiden saavuttamiseksi. (Työ- ja elinkeinoministeriö
2018.)

Energiatukea voidaan myöntää sellaisiin investointi- tai selvityshankkeisiin,
jotka edistävät:

- Uusiutuvan energian tuotantoa tai käyttöä.
- Energiansäästöä tai energian tuotannon tai käytön tehostamista.
- Muutoin energiajärjestelmän muuttumista vähähiiliseksi.

Tukea saa vain hankkeisiin, joita ei toteutettaisi ilman tukea. Lisäksi tukea voi-
daan myöntää aikaisintaan rahoituspäätöspäivästä alkaen aiheutuviin kustan-
nuksiin. Käytännössä tämä tarkoittaa, että hankkeelle ei saa olla tehtynä sito-
vaa investointipäätöstä tai muuta sitoumusta, jonka jälkeen hankkeen perumi-
nen ei ole mahdollista ilman merkittävää taloudellista menetystä. (Business
Finland 2018.)

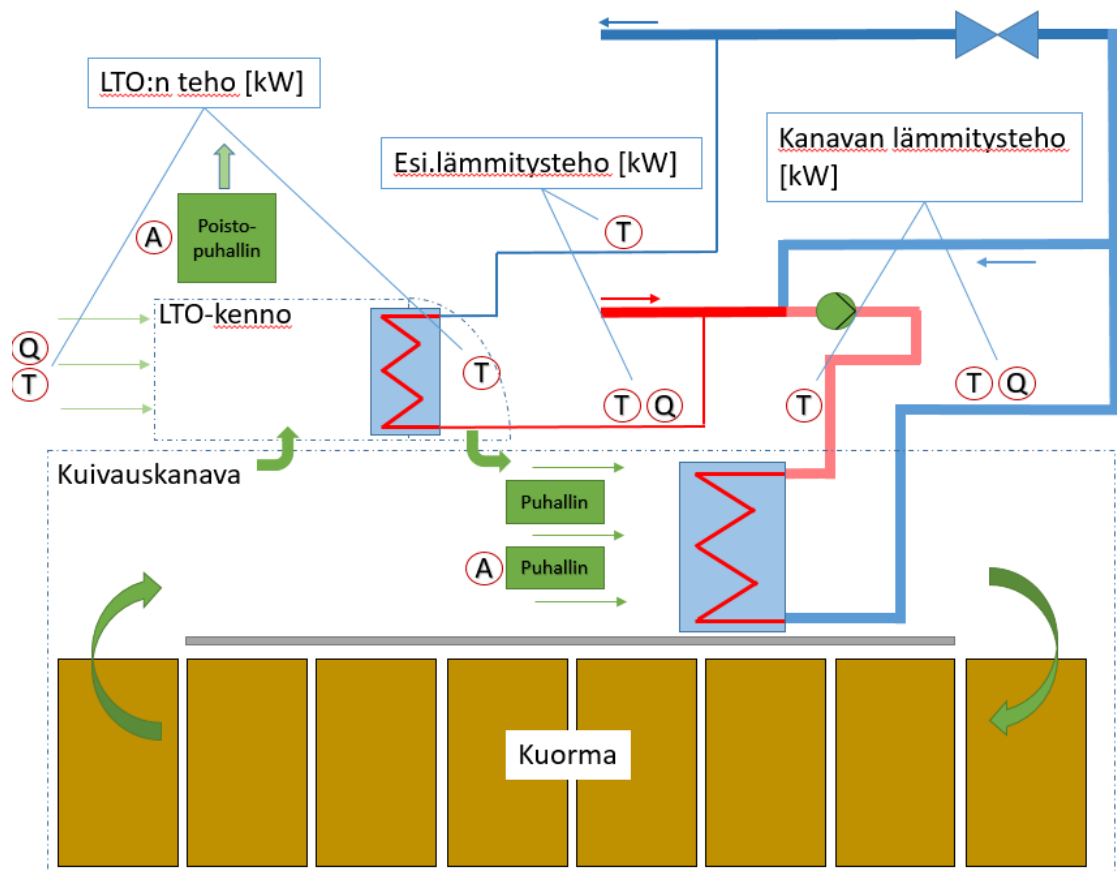
6 TUTKIMUKSEN TOTEUTTAMINEN

Tarkastelu tehtiin kanavakuivaimiin 2 ja 3, joita käytetään XXXXXXXXXX sahalla
suurempien dimensioiden lankun kuivaamiseen. Kanavien ilmanvaihto tapah-
tuu huuvin kautta, jossa raitisilmaa lämmitetään LTO-kennolla ja esilämmön-
vaihtimella. LTO-kenno on rakenteeltaan ristivirtakenno, jossa jäteilma luovut-
taa lämpöä kanavaan virtaavaan tuloilmaan. Tämän jälkeen kanavassa on

kaksi vesikiertoista lämmönvaihdinta (patteria), jotka ottavat lämmitysveden samasta lämminvesipiiristä. LTO-kennon jälkeen tuloilmaa lämmitetään esilämmönvaihtimella. Tämän lisäksi kanavan kiertoilmaa lämmitetään päälämmönvaihtimella. Patterien lämmitysvesi lämmitetään puun kuorimolta ylijäävällä puuaineksella.

6.1 Mittausjärjestelyt

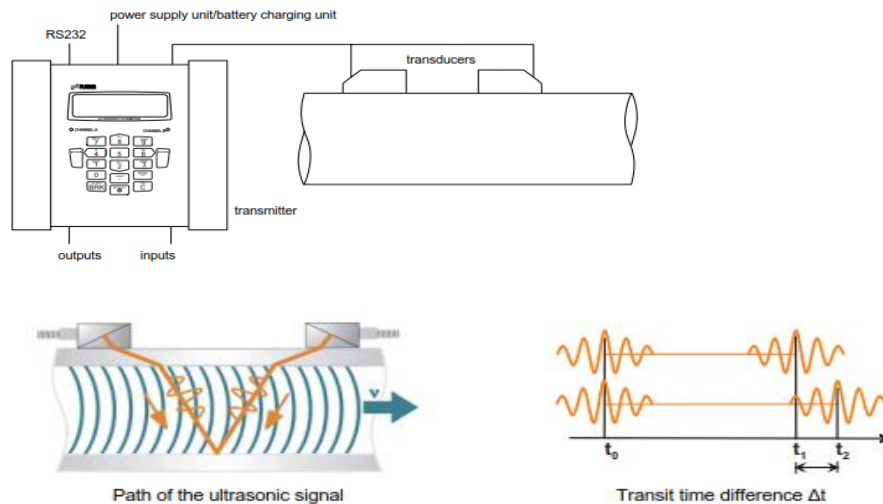
Kanavan vesikiertoisten lämmönvaihtimien lämmitysteho [kW] laskettiin vaihtimien lämmityspiireistä mitatuista virtaamista [Q] ja lämpötiloista [T]. Lämmöntalteenoton tehokkuuden määrittämiseksi kanavasta mitattiin tuloilman virtaama [Q] sekä märkä- ja kuivalämpötilat LTO-kennon molemmilta puolilta [T]. Lisäksi puhaltimien sähkömoottoreilta mitattiin sähkövirrat noin vuorokauden ajalta. Tämän perusteella voitiin havaita käynnistysvirrat sekä määrittää moottorien ottamat sähkötehot seurantajakson aikana. (Kuva 3)



Kuva 3. Kanavan rakenne ja mittausjärjestelyt

6.2 Kuivauskanavan lämmitystehon määrittäminen

Virtausmittauksessa käytettiin Flexim Fluxus F601 ultraääni virtausmittaria. (kuva 4) Mittariin määritetään putken koko ja seinämäpaksuus sekä putken materiaali, joista mittalaite määrittää virtausmekaanisen korjauskertoimen ja kalibrointikerroimen. (Flexim 2016.)



Kuva 4. Flexim Fluxus F601 mittausjärjestely ja -periaate (Flexim 2016)

Laite mittaa edestakaisella mittauksella ultraäänisignaalin matkan aikaa ja määrittää tästä erotuksesta virtausnopeuden kaavalla 1 (Flexim 2016).

$$v = K_{re} \cdot K_a \cdot \frac{\Delta t}{2 \cdot t_y} \quad (1)$$

jossa	v	virtausnopeus	[m/s]
	K_{Re}	virtausmekaaninen korjauskerroin	[-]
	K_a	akustinen kalibrointikerroin	[-]
	Δt	edestakaisen signaalin erotus	[s]
	t_y	meno signaali nesteessä	[s]

Virtausnopeudesta mittari laskee asetettujen parametrien mukaan tilavuusvirran kaavalla 2 (Flexim 2016). Samalla tilavuusvirran kaavalla voidaan laskea myös ilman virtaama ilmastointikanavassa, kun tiedetään kanavan pinta-ala ja virtausnopeus.

$$Q = v \cdot A \quad (2)$$

jossa	Q	tilavuusvirta	[m ³ /s]
	v	virtausnopeus	[m/s]
	A	putken pinta-ala	[m ²]

Lämpötilojen mittauksessa käytettiin Hobo Single Channel Thermocouple data loggereita, joilla lämpötilat mitattiin putken pinnasta. (Kuva 5)



Kuva 5. Hobo Single Channel Thermocouple loggeri (Onset 2015)

Lämmönvaihtimen siirtämä lämpöteho voidaan laskea, kun tiedetään virtaama ja lämpötilaero lämmönvaihtimen yli, kaavalla 3 (Motiva 2016).

$$\phi = Q \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

jossa	ϕ	lämmönvaihtimen teho	[kW]
	Q	tilavuusvirta	[l/s]
	ρ	virtaavan aineen tiheys	[kg/l]
	c_p	aineen ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
	ΔT	lämpötilaero lämmönvaihtimen yli	[K]

6.3 LTO-kennon tehon määrittäminen

LTO-kennon lämmitysteho laskettiin LTO-kennon läpivirtaavan tuloilman entalpiamuutoksen avulla, kaavalla 4

$$\Delta H = H_{loppu} - H_{alku} \quad (4)$$

jossa	ΔH	entalpioiden erotus	[kJ/kg]
	H_{loppu}	tuloilman entalpia patterin jälkeen	[kJ/kg]
	H_{alku}	tuloilman entalpia	[kJ/kg]

Kun entalpioiden erotus kerrotaan ilman virtaamalla ja tiheydellä, saadaan huvan kautta tuloilmaan siirtyvä lämpöteho, kaavalla 5.

$$\phi_{tuloilma} = Q \cdot \rho \cdot \Delta H \quad (5)$$

jossa	$\Phi_{tuloilma}$	tuloilman lämpöteho	[kW]
	Q	tilavuusvirta	[m ³ /s]
	ρ	ilman tiheys	[kg/m ³]
	ΔH	entalpioiden erotus	[kJ/kg]

LTO:n lämpöteho lasketaan tulevan ilman lämpötehon (kaava 5) ja esilämmityspatterin lämpötehon erotuksesta (kaava 3). Kun tämä kerrotaan vielä ilmanvaihdon toiminta-ajalla, saadaan LTO-kennon lämmitysteho kilowattitunneissa kaavalla 6.

$$\phi_{LTO} = (\phi_{tuloilma} - \phi_{esilammitys}) \cdot t \quad (6)$$

jossa	Φ_{LTO}	LTO-kennon teho	[kWh]
	$\Phi_{tuloilma}$	esilämmityspatterin teho	[kW]
	$\Phi_{esilammitys}$	tuloilman lämpöteho	[kW]
	t	ilmanvaihdon toiminta-aika vuodessa	[h]

Jotta kuivaamon toimintaa pystyttiin arvioimaan vuositasolla, tarvittiin ilman virtaamatiedot pidemmältä ajalta. Kuivaamon ohjausjärjestelmään tallentuivat tiedot poistopellin asentotiedosta, joten tästä voitiin laskea asentotietoa vastaava ilman virtaama, koko poistopellin liikeradalla, kulmakertoimen kaavalla 7.

$$k = \frac{y^2 - y_1}{x^2 - x_1} \quad (7)$$

jossa	k	Ilman virtaaman muutoksen kulmakerroin	[-]
	x	Tuloilman virtaama	[m ³ /s]
	y	Poistopellin asentotieto	[%]

6.4 Sähkövirtamittaukset

Kanavan puhaltimien moottorien sähkövirrat mitattiin Fluke a3001 FC virtalenkillä (kuva 6). Laite mittaa ja tallentaa virtalengin läpi kulkevan sähkövirran suuruutta, josta voidaan laskea moottorin ottama teho, kun tiedetään jännite ja tehokerroin (kaava 8).



Kuva 6. Fluke a3001 FC virtalenkki (Fluke 2018)

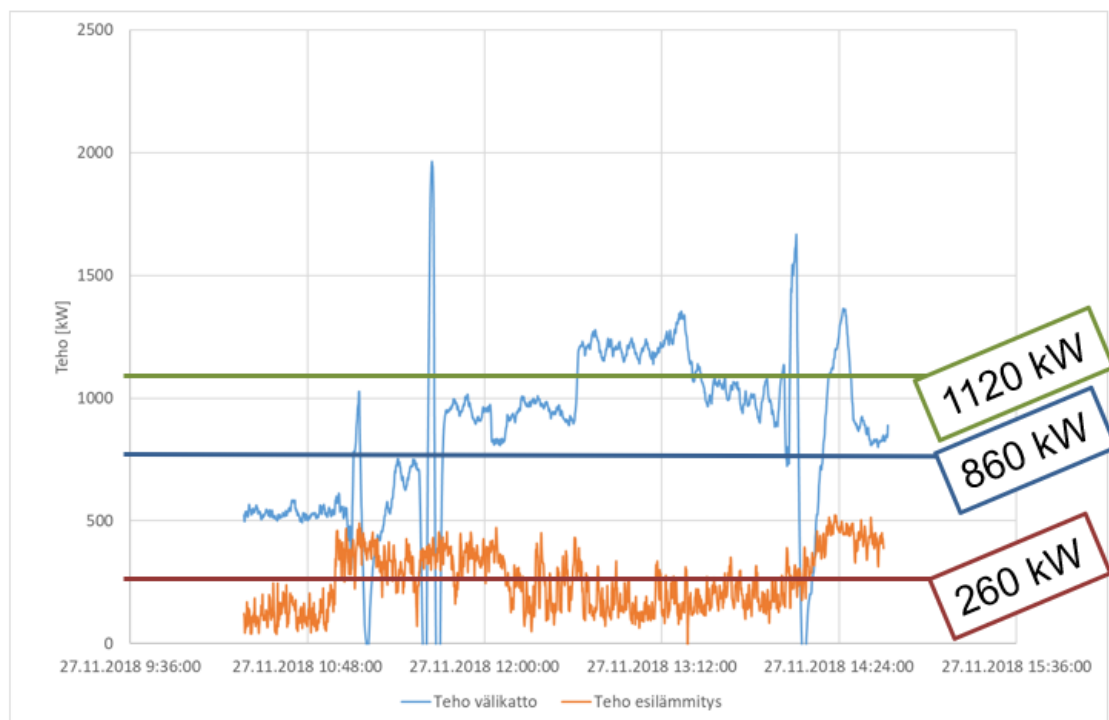
$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (8)$$

jossa	P	moottorin teho	[W]
	U	jännite	[V]
	I	virta	[A]
	$\cos \varphi$	tehokerroin	[-]

7 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELO

7.1 Kanavan lämpöteho ja LTO-kennon teho

Mittauksessa kanavan 2 esilämmityspatterin keskimääräinen lämmitysteho oli noin 260 kW ja kanavan patterin lämmitysteho noin 860 kW, jolloin keskimääräiseksi kokonaislämmitystekoksi saatiin noin 1 120 kW. Huomioitavaa on että, tehonpiikit ajoittuvat kuormanvaihtoihin, jolloin uuden kuorman lisäksi kanavaan virtaa runsaasti raitista ilmaa LTO-kennon läpi (kuva 7).



Kuva 7. Kanavan 2 patterien lämmitysteho

Alkuperäisen suunnitelman mukaan LTO-kenno olisi ohitettu ja mittaukset olisi tehty ennen ohitusta sekä sen jälkeen. Tällöin LTO:n teho olisi voitu osoittaa absoluuttisen tarkasti. Kennon ohitus osoittautui kuitenkin mahdottomaksi ilman huoltoseisakkia. Huomioitavaa on, että ohituksen yhteydessä myös esilämmityspatteri putoaisi pois pelistä, mikä voisi aiheuttaa ongelmia erityisesti kylmillä keleillä, pidentäen kuivausaikaa.

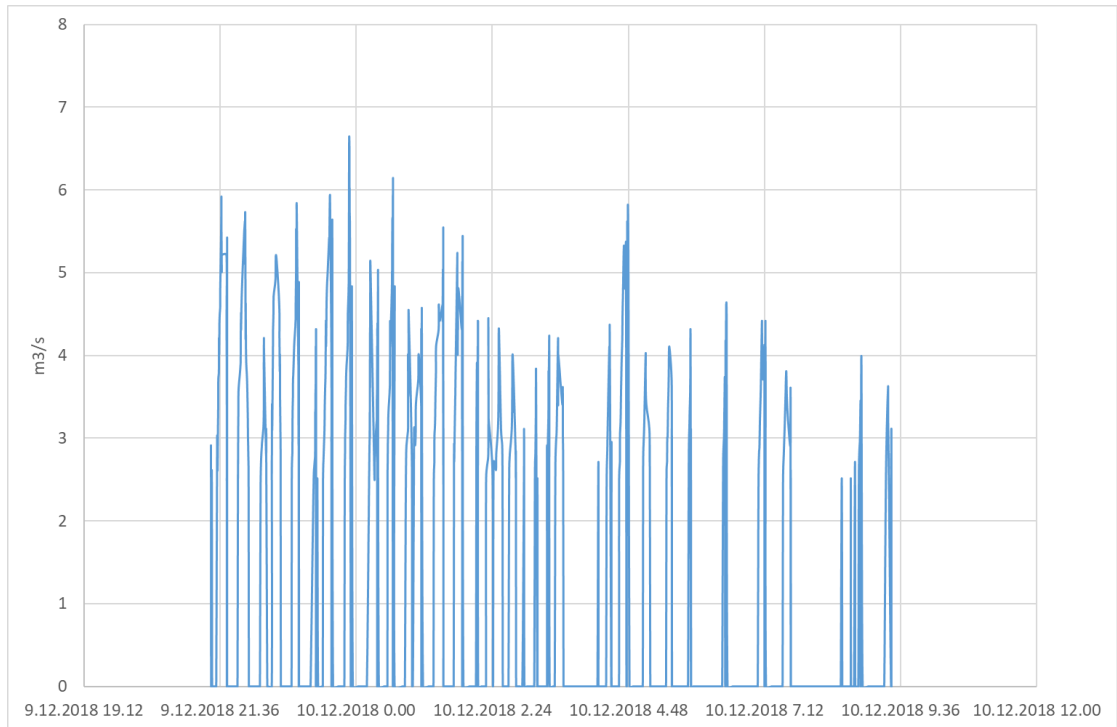
Jotta LTO-kennon lämpöteho voitiin laskea, tarvittiin ilman virtaama ja entalpiaero LTO-kennon yli (kaava 4). Tuloilmasta mitattiin kuiva- ja märkälämpötilat LTO-kennon ja esilämmönvaihtimen yli, josta laskettiin entalpiaero kostean ilman entalpia -laskurilla (taulukko 4).

Taulukko 4. Tuloilman parametrit

	Lämpötila [°C]	Abs. Kosteus [g/kg]	Entalpia [kJ/kg]	Suhteellinen kosteus [%]
Tuloilma	20	7,28	38,59	50
Tuloilma + esi- lämmityspatteri	105	7,28	120,40	1,15

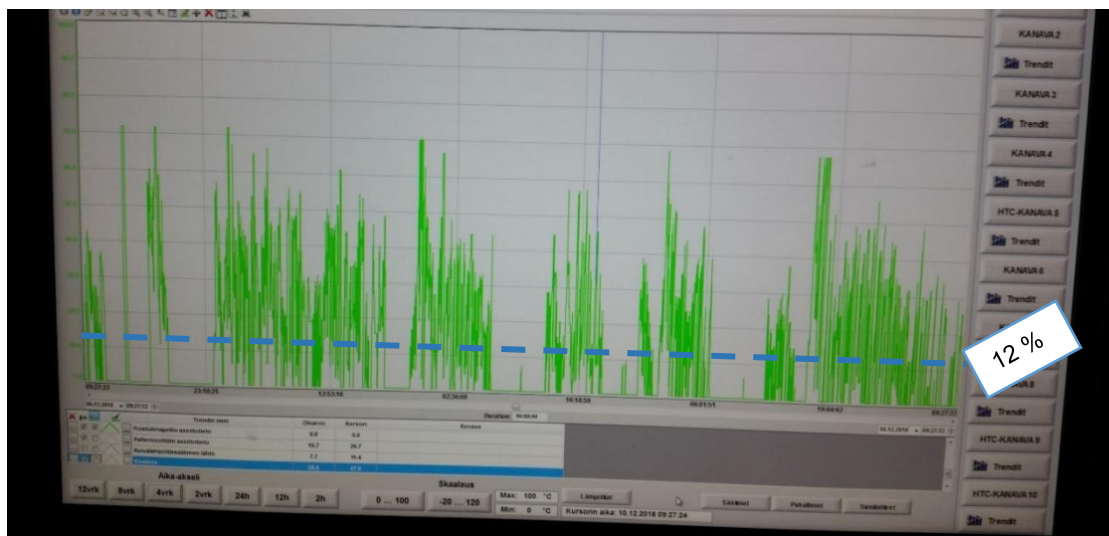
Samalla mitattiin ilman virtaama, jolloin saatiin LTO-kennon ja esilämmityspatterin yhdistetty hetkellinen lämpöteho (kaava 5). LTO-kennon lämpötehoksi saatiin noin 100 kW, kun yhdistetystä lämpötehosta vähennettiin esilämmityspatterin lämpöteho kaavalla 6. Kun lämpöteho kerrottiin vielä ilmanvaihdon käyttötunneilla, saatiin LTO-kennon lämpöteho kilowattitunneissa, vuositasolla.

Kanavan ilmanvaihdosta saatiin vain poistopellin asentotieto valokuvana. Kuvaan tehtiin mittauspisteet WebPlotDigitizer-ohjelmalla, jolla poistopellin asentotieto saatiin tuotua Exceliin. Kun tilavuusvirta mitattiin pistemittauksilla poistopellin asennoilla 20 % ja 30 %, niin vastaaviksi virtaamiksi saatiin 3,31 m³/s ja 4,32 m³/s. Tuloksesta lasketun kulmakertoimen (kaava 7) avulla saatiin ilman virtaama poistopellin asennosta riippuen (kuva 8). Kulmakertoimeksi saatiin noin 0,0995, mikä tarkoitti, että pellin asennon muuttuessa 1 %:n, muuttui ilmavirtaama noin 0,0995 m³/s.



Kuva 8. Ilman virtaama [m³/s] poistopellin asentotiedosta (12 h jakso)

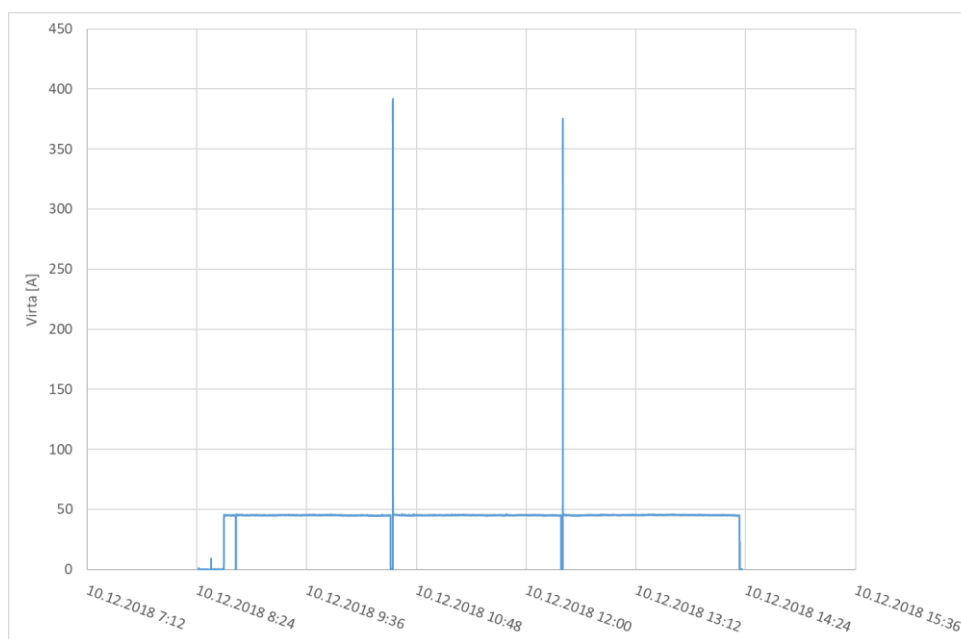
Ilmanvaihdon toimintaa analysoitiin, pidemmästä 96 tunnin trendistä, sillä tämä vastasi paremmin kanavan normaalia toimintaa pitkällä aikavälillä (kuva 9). Koska poistopuhallin käynnistyy vasta poistopellin ylittäessä 12 %, kuvasta suodatettiin pois hetket, jolloin pelti oli alle 12 %. 96 tunnin tarkkailujaksolla kanavan poistopuhaltimen kumulatiivinen toiminta-aika oli noin 45 tuntia. Vuositasolla tämä tarkoittaa noin 3 900 tuntia, kun ympärivuotisesta käytöstä vähennetään huoltoseisakit, vikatilanteet ja epätasainen kuormitus.



Kuva 9. Poistopellin asentotieto [%], 96 tunnin ajanjaksolla.

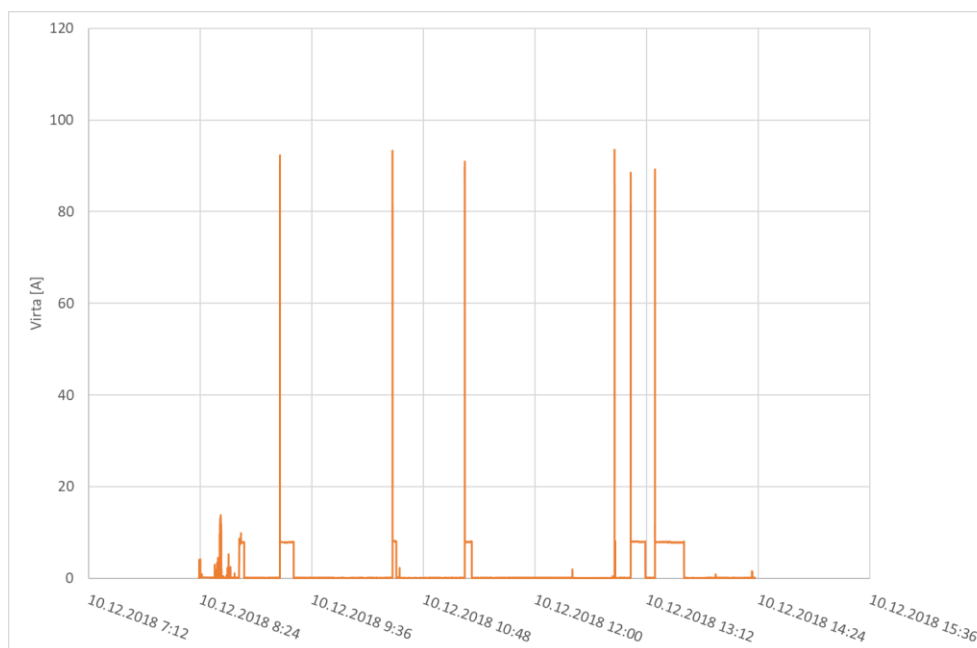
7.2 Puhaltimet

Stora Enson kirjanpidosta nähdään, että poistopuhaltimien moottoreita on hajonnut viimeisen vuoden [REDACTED] (Stora Enso 2018b). Moottorit altistuvat koville olosuhteille, sillä ne sijaitsevat suoraan puhaltimien yhteydessä. Tällöin kanavan moottorit altistuvat yli 70 °C lämpötiloille ja kostealle ilmastolle. Poistopuhaltimien moottorit sijaitsevat poistoilmakanavassa, jossa lämmin ja kostea ilma alkaa tiivistyä pisaroiksi. Erityisesti moottoreita on vikaantunut pitkien pysähdyksien jälkeen. Mittauksissa havaittiin, että kiertoilmapuhallin ottaa noin 8 kertaisen käynnistysvirran moottorin nimellisvirtaan verrattuna (kuva 10).



Kuva 10. Kanavan 2 kiertoilmapuhaltimen moottorin sähkövirtamittaus [A]

Odotetusti myös poistopuhallin otti suuren käynnistysvirran ja mittauksissa havaittiin noin 12 kertainen virta verrattuna moottorin nimellisvirtaan. Lisäksi mittauksessa havaittiin ennakkotiedoista poikkeava puhallinmoottorin koko, joka oli teholtaan noin 3 kertaa pienempi kuin mitä sahan laitedokumentit antoivat ymmärtää. Moottorin tehoksi laskettiin noin 5,9 kW (kaava 8), kun laitedokumentti näytti 20 kW (Kuva 11). Tästä pääteltiin, että moottori on vikaantumisen jälkeen vaihdettu pienemmäksi tai laitedokumentti on virheellinen.



Kuva 11. Kanavan 2 poistopuhaltimen moottorin sähkövirtamittaus [A]

Huomioitavaa kuvassa 11 on se, että käytön olosuhteet eivät vastanneet normaalia käyttöä, eikä mittauksesta voinut tehdä johtopäätöksiä poistomoottorin todellisesta käyntiajasta. Virtamittauksessa oleellisinta on juurikin käynnistysvirran ja moottorin koon toteaminen.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA TOIMENPIDE-EHDOTUKSET

8.1 LTO-kennojen korjaus ja takaisinmaksuaika

Kanavien 1-4 LTO-kennot todettiin mekaanisesti huonokuntoisiksi. Huono kunto ilmeni runsaana höyryvuotona kuivaamon välikattotilassa, minkä arvioitiin olevan riskitekijä katon kantaville rakenteille. LTO-kennon uusimiselle Stora Enso on saanut noin ████████ € pakettitarjouksen käsittäen kanavat 1-4, jotka ovat lähes identtisiä keskenään (Stora Enso 2018b). Kanavalle tulee hintaa siis ████████ €/kanava. Halvempi vaihtoehto uusimiselle olisi LTO-kennon ohitus, jolloin höyryvuodot vähenisivät merkittävästi, mutta poistuvan ilman energia menisi hukkaan. Käytännössä ohitus voitaisiin tehdä tehtaan huoltohenkilökunnan toimesta.

Taulukon 4 mukaisilla parametreilla ja keskiarvovirtaamalla LTO-kennon lämpötehoksi saatiin noin 100 kW. Mittausdatan perusteella kuivaamon lämmöntalteenoton käyttötunneiksi arvioitiin 3 900 h/a. Kuivaamo ostaa lämmityshöyryn ■ €/MWh hintaan. Takaisinmaksuajaksi (TMA) tulee siis:

Piilotettu julkaistavasta versiosta.

TMA = 9,5 vuotta

Jos investointiin saadaan vielä energiatuki, niin TMA on:

Piilotettu julkaistavasta versiosta.

TMA = 6,6 vuotta

Lämmöntalteenoton uusintainvestoinnin takaisinmaksuaikaa arvioitaessa on huomioitava, että mitattu LTO-kenno on valmiiksi huonossa kunnossa, joten sitä ei voida verrata täysin uudenveroisen kennon tehoon. LTO-kennon ohitus jättäisi myös esilämmityspatterin pois käytöstä, joten talvikuukausina tämä voisi vaikuttaa merkittävästi kuivausaikoihin, kun hetkellisestä lämpötehosta putoaa pois noin 20–30 %. Tämän takia LTO-kennon ohittaminen ei ole mielekäs vaihtoehto kennojen uusimisen sijaan.

8.2 Puhaltimien sähkökäytöt

Kuten kappaleessa 7.2 mainittiin, moottoreita vikaantuu verrattain runsaasti. Ongelma selittyvät varmasti suurelta osin haasteellisilla käytön olosuhteilla, sillä korkea lämpötila ja kosteus ovat merkittäviä moottoririkkojen aiheuttajia. Myös raskas suorakäynnistys yhdistettynä tiheään käynnistysväliin aiheuttavat moottorin lämpiämistä ja mekaanista kulumista. (ABB 2015.)

Lisäselvitystä voisi tehdä puhaltimien siipien tasapainotuksen osalta, mikä voisi vähentää värinästä johtuvaa rasitusta moottoreilla. Pyörivän kuorman epätasainen liikerata aiheuttaa mm. laakerivaurioita ja johtaa lopulta moottorin vikaantumiseen.

Kiertoilmapuhaltimien virtapiikkiä ja mahdollisesti käynnistymisen aikana ilmeväää tärinää voisi ehkäistä pehmokäynnistimillä, sillä puhaltimien säädettävyys ei ole tässä tapauksessa mielekäästä. Lisäksi kiertoilman säädöstä aiheutuvien muutoksien vaikutukset voisivat näkyä lopputuotteessa negatiivisesti.

Kiertoilmapuhaltimien pehmokäynnistimistä tehtiin tarjouskysely ABB:lle (liite 2) ja yhden kanavan pehmokäynnistimille hintaa tulisi noin [REDACTED]. Asennukseen kuuluisi pehmokäynnistimien asennus keskushuoneeseen tai välikatolle puhallinmoottorien turvakytkinten viereen sekä johdotus, ja syöttökaapelin (max. 5 m välikatolla) uusiminen osittain. Välikatolla pehmokäynnistimille täytyisi tehdä asennusteline ja mahdollisesti kotelointi, jos olosuhteet niin vaativat (kuva 12). Hyödyt tulisivat esiin vasta pidemmän ajan kuluttua pidentyneiden moottorivaihtovälien kautta saatavana kustannussäästönä.



Kuva 12. Pehmokäynnistimille sopiva asennuspaikka olisi turvakytkimien vieressä välikatolla

Poistoilmapuhallin käynnistyy, kun kanavan pellin avautuma on yli 12 %. Tämä aiheuttaa poistopuhaltimilla suhteellisen tiheän käynnistysvälin (kts. kuva 9), jolloin puhallin ottaa suuren käynnistysvirran. Huomioitavaa on myös

se, että jos puhaltimien moottoreita on vaihdettu pienempi tehoisiin, kuin puhaltimen suositeltava akseliteho vaatisi, aiheutuu moottorille kuluttavaa kuormaa entistä enemmän.

Poistoilmapuhaltimella voisi olla hyötyä säädettävyydestä, joten niistä kysyttiin tarjousta ABB:ltä 20 kW ja 7,5 kW taajuusmuuttajista, joista jälkimmäinen on esitetty liitteessä 3. Mikäli kaikki poistoilmakoneet halutaan taajuusmuuttajan taakse, täytyy moottorien koot tarkastaa, päivittää laiteluetteloon ja uusia tarjouskysely.

Takaisinmaksuaika 6 kW poistopuhaltimen taajuusmuuttajalle voidaan arvioida poiston käyttötunneista ja poistopellin asennosta, sillä oletuksella, että kun pelti ei ole täysin auki, moottorin pyörimisnopeutta voidaan rajoittaa taajuusmuuttajalla samassa suhteessa. Kuvasta 9 nähdään, että käyntiaikana pellinasento on keskiarvoisesti 50 % luokkaa. Työn osuus olisi taajuusmuuttajan asennus ja häiriösuojatun kaapelin vetäminen taajuusmuuttajan jälkeen. Näin ollen takaisinmaksuaika voidaan laskea seuraavasti:

Piilotettu julkaistavasta versiosta.

TMA = 2,2 vuotta

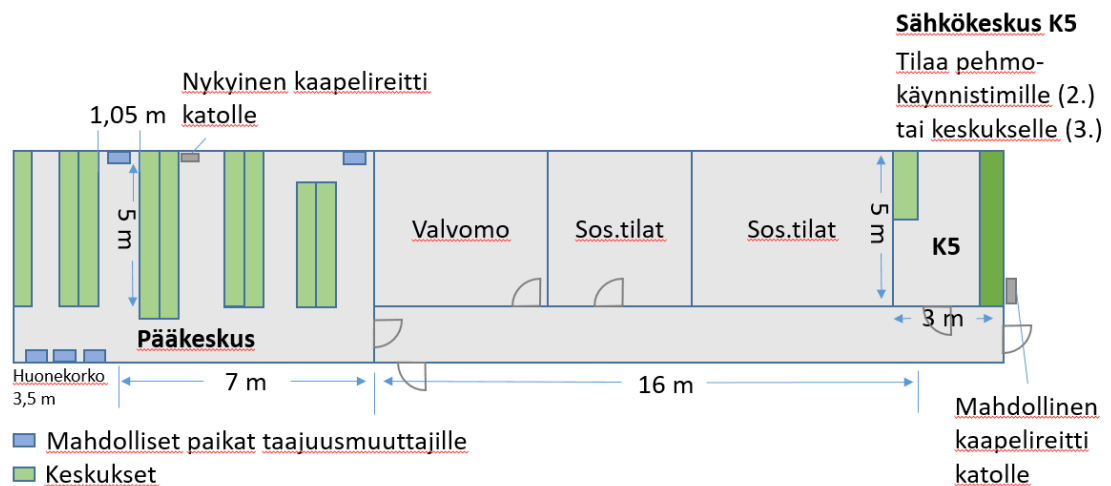
Lisäksi poistoilmakoneiden moottoreiden vaihtovälit voisivat kasvaa pehmeään käynnistyksen myötä. Yhden moottorin uusiminen maksaa noin [REDACTED] (Stora Enso 2018b).

8.3 Tilakatselmus

Toteutuksessa haasteensa asettaa vanhan sähkökeskustilan ahtaus. Mittojen puolesta poistojen taajuusmuuttajat mahtuisivat keskushuoneeseen päällekkäin asennettuna (kuva 13). Kiertoilmakoneiden pehmokäynnistimet eivät

mahdu keskushuoneeseen, joten toteutukselle voidaan esittää seuraavat 3 vaihtoehtoa:

1. Asennetaan pehmokäynnistimet välikatolle turvakytkimien viereen, jolloin on varmistettava, että pehmokäynnistimet voidaan asentaa välikaton olosuhteisiin (kts. kuva 12).
2. Asennetaan pehmokäynnistimet kuivauskanavan 5 keskushuoneeseen, jolloin moottorien syöttökaapelit pitäisi vetää keskukselta K5 keskukselle ja takaisin moottorille. Tällöin kaapelireitit käyvät ahtaaksi ja kustannukset nousevat pitkien kaapelivetojen takia.
3. Siirretään/uusitaan yhden kuivauskanavan keskus, K5 keskuksen viereen tai vastapäätä, jolloin tilaa vapautuu keskushuoneesta. Tästäkin koituu suuret kustannukset.



Kuva 13. Kuivaamon valvomon lay-out ja taajuusmuuttajien mahdolliset sijoituspaikat

9 VAIHTOEHTOISET TARKASTELU

Kuivauskanavien esilämmitykselle ja lämmöntalteenotolle tehtiin vaihtoehtoisia tarkasteluja, koska LTO-kennojen uusimisen takaisinmaksuaika asettui suhteellisen kauas.

██████ saha on lisäämässä kanavien kiertoilmapuhaltimet häiriöreservin piiriin, jolloin häiriön sattuessa puhaltimet sammuisivat kokonaan. Tästä kehitytti ajatus tuoda myös kanavien 1-4 esilämmityspatterit käyttöreservin piiriin. Käyttöreservissä säätöä tapahtuu molempiin suuntiin sen mukaan, miten sähköntuotantoa voidaan säätää vastaamaan hetkellistä kulutusta.

Toteutuksessa tutkittiin kahta vaihtoehtoa: esilämmitysveden lämmittäminen sähkökattilalla tai lämmöntalteenottoa lämpöpumpulla, josta saatu lämpö käytettäisiin myös esilämmityspatterien lämmitykseen. Kummassakin toteutuksessa voisi hyödyntää Fingridin ylläpitämää häiriö- ja säätöreserviä. Energiatukea voisi hakea vain lämpöpumpputoteutukselle.

Vaikka lämmitysenergiasta ei ole tällä hetkellä pulaa, voidaan tulevaisuudessa lämmityspolttoaineen hyödyntämiselle löytää vaihtoehtoisia käyttökohteita bioteollisuudessa. Tämä johtaisi polttoaineen hinnan kasvuun ja edellytykset polttoaineen ulosmyynnille parantuisivat entisestään. Myös sähkön hinnanmuutokset vaikuttavat sähkönkäytön kannattavuuteen. Kuivaamon sähkön hinta on noussut syksyn 2018 aikana, mutta tulevaisuudessa hinta voi muuttua esimerkiksi uuden sähköntuotannon myötä sekä päästökaupan seurauksena. Kuten voidaan todeta sähkön spot-hinta kehityksestäkin (Kuva 14), pohjoismaisen sähkön hintaan vaikuttavat vahvasti kuivan kesän (2018) vaikutukset ja erityisesti Norjan vesitilanne, sekä lisäksi hiilen ja päästöoikeuksien hintojen kohoaminen (Tuominen M 2018). Tulevaisuudessa Olkiluoto 3 ydinvoimalan on arvioitu laskevan sähkön hintaa 10–30 %. (Sjöblom T 2014)



Kuva 14. Sähkön Spot-hinnan kehitys 2017 – 2018, [€/MWh] (Nordpool 2018)

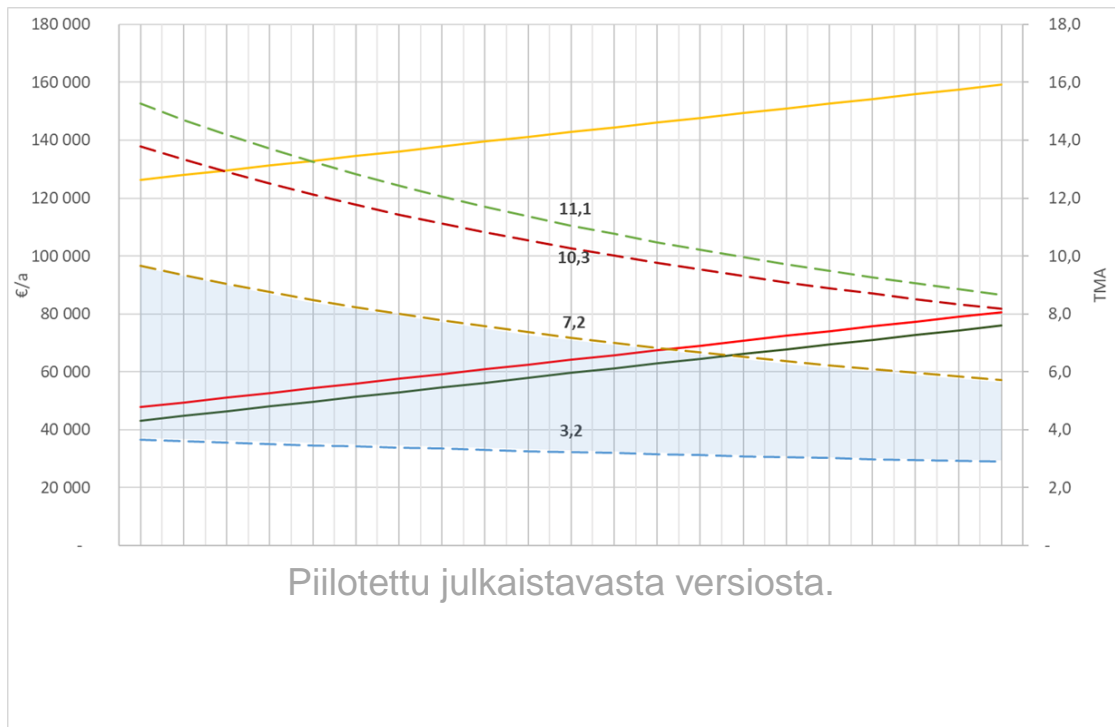
Säästötoimet ja erityisesti sähkölämmityksen kannattavuus ovat sahateollisuudessa monen tekijän summa. Koska omalla höyrykattilalla tuotettu lämpö on huomattavasti halvempaa, kuin sähköllä lämmittäminen, on takaisinmaksuaikakin pidempi kuin monilla muilla teollisuuden aloilla, joissa käytetään esimerkiksi kaukolämpöä. Tarkastelussa täytyy huomioida energijakeiden kustannukset, energiatuki, säätöreservistä maksettava korvaus ja polttoaineen ulosmyynnistä saatava tuotto.

9.1 LTO:n toteutus lämpöpumpulla

Lämpöpumppuinvestointiin saatiin tarjouslaskenta Calefa lämpöpumppujen sivuilta (liite 4). Jos lämpöpumppujärjestelmä tuottaisi 421 kW sähköteholla 1 440 kW lämpötehon, vastaavasti, 3 900 vuosittaisella käyttöajalla tämä tarkoittaa 1 643 MWh:n edestä sähköä, jolla tuotetaan 5 615 MWh:n edestä lämpöä vuodessa. (liite 4) Ajatuksena olisi, että poistoilma keskitettäisiin useammasta kanavasta lämpöpumpulle, jolloin lämpöpumppu korvaisi LTO-kennoston ja tuottaisi lämpöä esilämmityspattereille.

Nykyisin patterit toimivat 100–115 °C lämpötilassa. Lämpöpumpulla tuotettu lämpö jäisi 80 °C, joten lämpöpatterit täytyisi uusia vastaamaan uutta toimintapistettä. Tätä ei ole huomioitu Calefan tarjouslaskennassa (Liite 4), joten ylimääräisiä kustannuksia tulisi patterien uusimisesta ja säätöpiirin toteutuksesta. Myös itse kanaville täytyisi tehdä rakenteellisia muutoksia siten, että useamman kanavan poistoilma johdettaisiin pumpulle. Muutos kattaisi koko poistoilmanvaihdon rakenteet ja tälle arviottiin hinnaksi 200 000 €, perustuen alkuperäiseen tarjoukseen kanavien uusimisesta, sillä erotuksella, että itse LTO-kenno jäisi pois toteutuksesta. – Lämpöpumpulla saisi veden aina 95 °C lämpötilaan asti, mutta investoinnin hinta nousisi kannattamattomaksi.

Kuvassa 15 esitetyssä analyysissä on esitetty katkoviivoilla lämpöpumppuinvestoinnin TMA, ja vuosittainen säästö eri hinnan määräytymisen mekanismien toteutuessa. Kuten kuvassa esitetystä analyysistä nähdään, säätöreserviä ja energiatukea hyödyntämällä takaisinmaksuaika asettuu 7,2 vuoteen. Jos laskennassa huomioidaan vielä polttoaineen ulosmyynnistä saatava hinta, niin takaisinmaksuajassa voidaan päästä jo maltilliseen 3,2 vuoteen.



Kuva 15. Lämpöpumpun TMA ja vuosikustannuksien säästö [€/a] eri sähkön hinnoilla ja toteuksilla, 80 °C lämpötilan tuotolla.

9.2 Lämpöpumpun käyttö puun kuivauksessa

Kirjallisuudesta löytyy menetelmiä, joissa lämpöpumpulla käytetään sahatavaran kuivauksessa. Näitä menetelmiä on kehitelty lähinnä Ruotsissa ja Englannissa. Lämpöpumpppukuivauksessa kuivataan ilmaa siten, että kosteus kondensoituu pumpunhöyrystimellä ja uudelleen lämmitys tapahtuu lauhduttimella. Lämpöpumpppukuivaus vaatii tilan, jossa on hyvä kosteuden- ja lämmöneristys, sillä kuivaamossa on suljettu ilmankierto eikä ilmanvaihtoa tarvita. (Usenius A 1991.)

Ruotsista löytyy myös pari esimerkkiä, joissa järjestelmä on asennettu kanavakuivaimen yhteyteen. Esimerkiksi kahden sahalaitoksen kanavakuivaimoissa on käytetty Valmet lämpöjumbo-lämpöpumppuja, jotka on sijoitettu kanavan sisälle. Kyseisissä kohteissa pumpun hyötykertoimeksi on laskettu 3,5. (Usenius A 1991.)

SCA:n sahalla Tunadalissa on ruotsalaisen Fläkt Ab:n toimittama epäsuorasti toimiva lämpöpumpppukuivaamo. Järjestelmässä höyrystin ja lauhdutin eivät ole suoraan kuivaamossa vaan niillä jäähdytetään ja lämmitetään suljettuja vesipiirejä, joiden avulla kuivaamo kondenssipatterit toimivat. Tällä tekniikalla

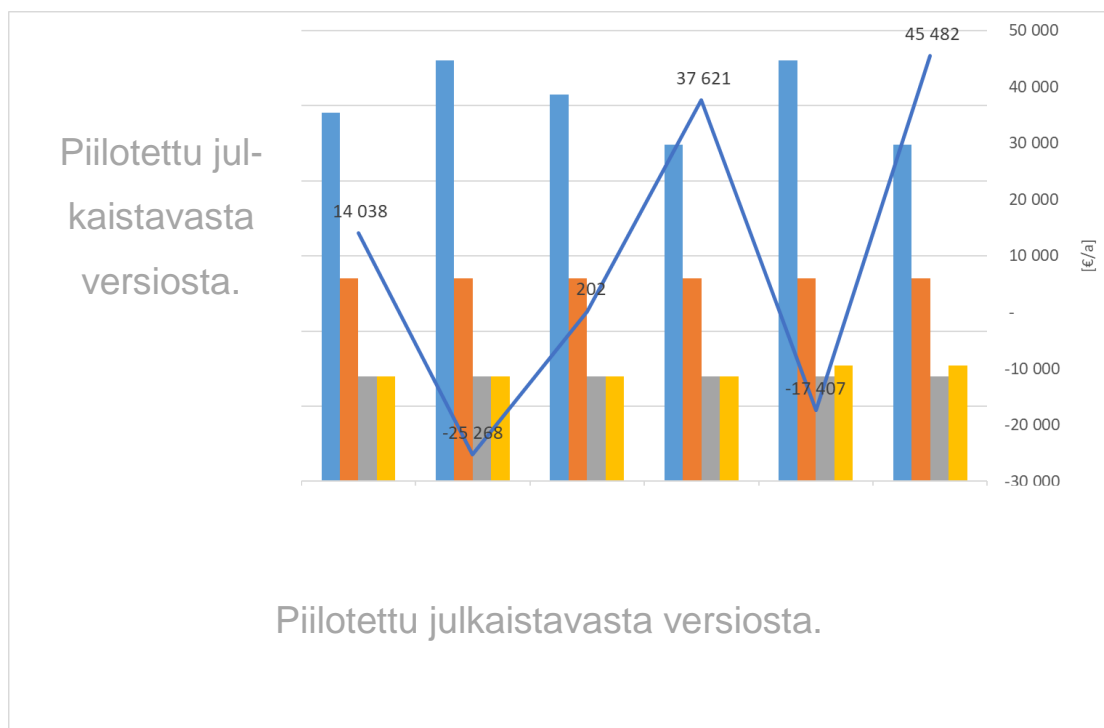
on päästy 2,5 tehokertoimeen ja noin 3,5 vuoden takaisinmaksuaikaan. (Usenius A 1991.)

Edellä mainituissa esimerkeissä kuivauslämpötilat ovat olleet noin 25 – 45 °C, eli huomattavasti pienemmät kuin nykypäivänä (Usenius A 1991). Huomioitavaa kuitenkin on, että tekniikka on kehittynyt lämpöpumppujen osalta ja nykyään päästään huomattavasti korkeampiin lämpötiloihin, pienemmillä kustannuksilla.

9.3 Lämmitys sähkökattilalla

Toisena vaihtoehtona tuloilman esilämmitykselle olisi vesikierron lämmittäminen sähkökattilalla, jolloin LTO-kenno voitaisiin ohittaa. Kannattavuus analyysissä Stora Enson kuorimon polttoaineen hinnaksi on arvioitu 14 €/MWh Alakangas E, 2018, Metsäbiomassan energiakäyttö -esityksen mukaan. Laskelmissa on huomioitu myös, että myytävän polttoaineen hinta voi nousta, jos purulle ja kuorelle tulee vaihtoehtoisia käyttökohteita esimerkiksi raaka-aineena biojalostamoiden tuotannossa. Käyttöreservin keskihinta vuonna 2018 oli 14 €/MW,h (Fingrid 2018b) , josta 1,4 MW sähkökattila saisi noin 0,75 kertaisen korvauksen.

Laskelmassa esilämmityksen käyttöaikana on pidetty 3 900 h/a tuloilman toiminta-aikojen mukaisesti. Laskelmasta huomattiin, että kevään 2018 sähkön hinnalla ja 0,75 MW,h käyttöreservillä investoinnista olisi saatu noin 14 000 € säästö vuodessa, mutta nykyhinnalla tulos olisi noin 25 000 €/a negatiivinen (kuva 16). Jos Sähkön hinta putoaa vaikkapa 20 % nykyhetkestä, tulisi säästöä noin 37 000 €/a. Nykyisen sähkön hinnan pitäisi laskea noin 8 %, jotta investointi tuottaisi säästöä (Kuva 16). Kattilatoimittajilta ei saatu tarjousta työhön varatun ajan puitteissa, joten takaisinmaksuaikaa ei voitu laskea.



Kuva 16. Sähkökattilan säästöpotentiaali [€/a] eri skenaarioissa

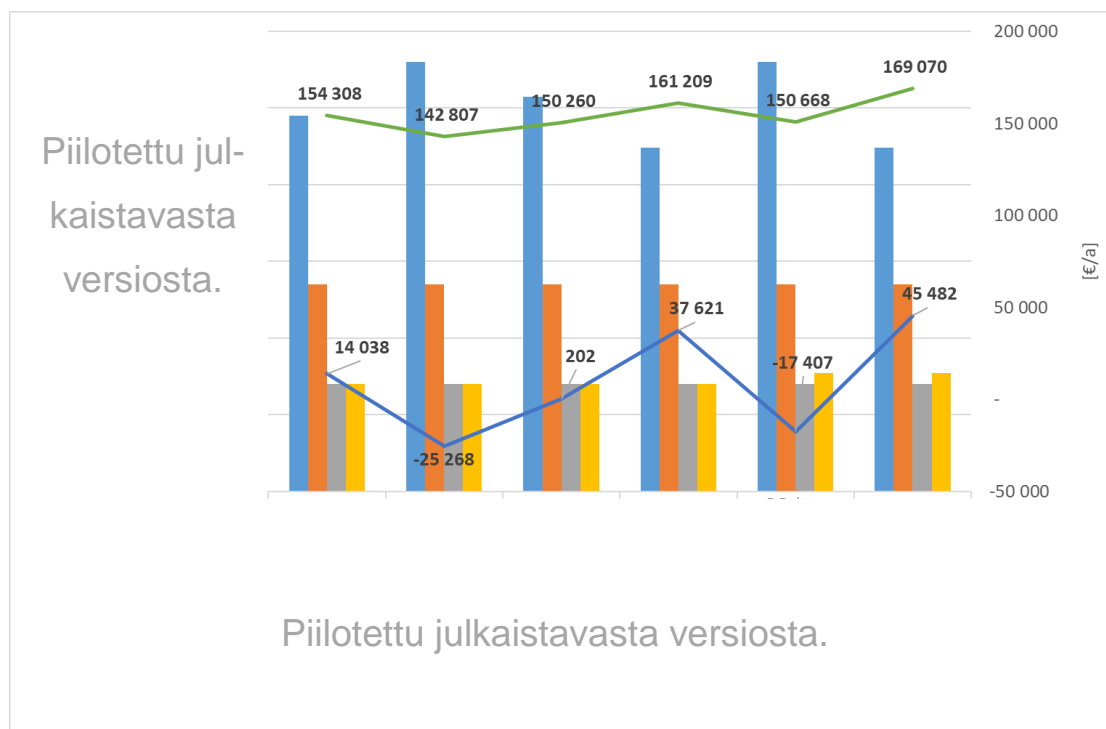
9.4 Lämmitystapojen vertailu

Koska sähkökattilasta ei työn puitteissa saatu tarjouslaskelmaa, voidaan lämpöpumppua ja sähkökattilaa vertailla vain syntyvän säästön osalta. Vertaillessa lämmitystapoja keskenään voidaan havaita, että sähkön hinnan ollessa nykyisellä tasolla sähkökattilan säästöpotentiaali on negatiivinen, kun taas lämpöpumpulla päästään reiluihin säästöihin. Lämpöpumpulla säästöt kasvavat huomattavasti suuremmiksi kuin sähkökattila vaihtoehdossa (Kuva 17). Lisäksi lämpöpumpulle voidaan saada energiatukea, tätä mahdollisuutta ei sähkökattilalla luultavasti ole.

Kuten kuvassa 15, s.39 nähtiin, lämpöpumpun TMA asettuisi nykyisellä sähkön hinnalla, säätöreservillä ja energiatuella noin 7,2 vuoteen. Samasta kuvasta nähdään, että jos lämpöpumpulla toteutuu energiatuki ja säätöreservi sekä huomioidaan polttoaineen ulosmyynnistä saatu myyntivoitto – asettuu TMA noin 3,2 vuoteen.

Sähkökattila toteutuksella etuina olisi pienemmät investoinnin kustannukset, sillä pattereita ei tarvitsisi uusia ja tekniikka on tutumpaa. Koska patterin ottama sähköteho on noin kolme kertaa enemmän kuin lämpöpumpun, myös

säästöreservistä maksettava korvaus olisi vastaavasti suurempi. Tästä huolimatta eri lämmitysmuotojen säästöpotentiaalia vertailemalla, on luultavaa, että lämpöpumppu on huomattavasti kannattavampi investointi.



Kuva 17. Lämmitystapojen säästöpotentiaalin [€/a] vertailu eri skenaarioissa

Lämpöpumpputoteutuksessa patterien vaihdon lisäksi ongelmana olisi myös poistoilman riittävyyden varmistaminen, sillä hetkellä, kun lämpöä tarvitaan pumpulta. Koska lämpöpumppu tuottaa lämpöä vain, kun sitä on tarjolla, olisi varmistettava, että poistettavan ilman kapasiteetti riittää lämmöntuotantoon samalla hetkellä.

Lisäselvitystä tulisi tehdä myös vaihtoehtoisista lämpönieluista, jos kanavien esilämmitykset eivät pystykään vastaanottamaan lämpöä. Yksi vaihtoehto olisi kiinteistön lämmittäminen tai esilämmityksien lisääminen muihin kanaviin, mutta nämäkin ratkaisut tarvitsevat lisäselvitystä.

Jos lisäselvitykset tehdään ja lämpöpumpulla saatu hyöty voidaan todentaa, lämpöpumppu on erittäin varteenotettava ratkaisu verrattuna sähkökattilaan tai nykyiseen lämmitysratkaisuun.

9.5 Yhteenveto investointimahdollisuuksista ja niiden kannattavuuksista

Investoinnin toteutukselle löydettiin kaksi toteuttamiskelpoista vaihtoehtoa: LTO:n toteutus lämpöpumpulla tai nykyisten LTO-kennojen uusiminen. Vaihtoehtojen investointien kustannuslaskelmien tulokset on koottu taulukkoon 5.

Selkeä etenemismalli projektille olisi asentaa pehmokäynnistimet yhden kanavan kiertoilmakoneille pilottikokeena. Periaatteessa pehmokäynnistimillekin voisi hakea energiatukea, sillä olettamuksella, että pehmokäynnistimillä voisi alentaa sahan tehomaksua. Tätä vaihtoehtoa ei kuitenkaan sisällytetty taulukossa 5 esitettyihin laskelmiin. Samalla voisi olla järkevää tarkastaa kanavan puhaltimien siipien tasapainotus, jos sitä ei ole koskaan tehty.

Itse energiatehokkuusinvestointiin sisältyisi kanavien poistojen taajuusmuuntajien asennus, ja lämpöpumpun asennus tai vaihtoehtoisesti LTO-kennojen uusiminen. Lämpöpumpputoteutukseen on laskennassa lisätty 50 000 € patterien ja säätöpiirien uusimiseen. Lisäksi kanaviin pitäisi luultavasti tehdä kunnostustöitä ja/tai muutostöitä, johon arvioitiin kuluvan 200 000 €. Näihin on mahdollista hakea energiatukea, mikä kattaisi osan investointikustannuksista jopa 30 %:iin asti. Lisäksi takaisinmaksuaikaa voidaan lyhentää, jos laskennassa huomioidaan säätöreservin ja polttoaineen ulosmyynnin vaikutukset, joita voidaan hyödyntää vaihtoehdossa 1. Laskelmassa ei ole huomioitu moottoririkkojen vähentymisestä tulevaa säästöä (Taulukko 5).

Lämpöpumpulla toteutetun investoinnin takaisinmaksuajaksi saatiin 3,2 – 10,4 vuotta ja LTO-kennojen uusimiselle TMA asettui 6,1 – 8,8 vuoteen toteutuvista hinnanmuodostuksen mekanismeista riippuen.

Taulukko 5. Energiatoteutuksen investoinnin TMA nykyisellä sähkön hinnalla

Investointi	Kustannus	Säästö	TMA
	€	€/a	a
Vaihtoehto 1	Piilotettu julkaistavasta versiosta.		
Poistojen taajuusmuuttajat kaikkiin kanavakuivauksiin (7 kanavaa)			2,2
Lämpöpumppu			6,9
Patterien uusiminen			-
Säätöpiirit			-
Kanavien muutokset			-
Vaihtoehto 1 yhteensä			10,4
Vaihtoehto 1 yhteensä (käyttöreservi)			9,7
Vaihtoehto 1 yhteensä (käyttöreservi, -30 % energiatuki)			6,8
Vaihtoehto 1 yhteensä (käyttöreservi, -30 % energiatuki, polttoaineen myynti)			3,2
Vaihtoehto 2			
Poistojen taajuusmuuttajat kaikkiin kanavakuivauksiin (7 kanavaa)			2,2
LTO-kennojen uusiminen	9,5		
Vaihtoehto 2 yhteensä	8,8		
Vaihtoehto 2 yhteensä (-30 % energiatuki)	6,1		

10 YHTEENVETO

Tässä työssä selvitettiin kokonaisvaltaisesti sahan kanavakuivaimen toimintaa erityisesti lämmöntalteenoton ja toimintavarmuuden näkökulmista. Itse koin työn mielenkiintoiseksi. Metsäteollisuudessa kustannussäästöjen hakeminen on usein haasteellista halvan lämmitysenergian takia. Oli kuitenkin mielenkiintoista huomata, että vaikka lämpöpumppu on investointina kallis, niin lämmöntalteenotto sahan poistoilmasta voidaan toteuttaa lämpöpumpulla hyvinkin kilpailukykyisesti verrattuna ristivirtakennoon.

Lämmöntalteenotolle ja lämmöntuotolle tehtiin lisäselvitystä lämpöpumppuun ja sähkökattilaan perustuvista toteutuksista. Lämpöpumpulla toteutettu lämmöntalteenotto havaittiin potentiaaliseksi vaihtoehdoksi, kanavissa 1-4, joissa lämpöä voitaisiin käyttää tuoreilman esilämmityksessä. Investoinnille haettava energiatuki laskisi investoinnin kustannuksia merkittävästi. Jos takaisinmaksuajassa huomioidaan vielä mahdollisuus liittyä Fingridin toteuttamaan säätöreserviin ja polttoaineen myynnistä saatu tuotto, voidaan takaisinmaksuajassa päästä maltilliseen, noin 3,2 – 6,8 vuoteen nykyisellä sähkön hinnalla.

Ongelmia lämpöpumpputoteutuksessa tuo lämpöpumpun alhainen lämpötila verrattuna esilämmityspatterien mitoitustehoihin, jolloin patterit joudutaan luultavasti vaihtamaan uutta toimintapistettä vastaaviksi. Myös säätöpiiri tulisi olemaan laajempi kuin alkuperäisessä tarjouksessa ja näistä aiheutuisi hieman lisäkustannuksia. Lisäksi nykyisiin ilmanvaihtokanaviin pitäisi tehdä muutoksia.

Kierto- ja poistoilmapuhaltimien sähkömoottorien hajoamiset aiheuttavat kuivaamalla kustannuksia ja kuivauksen toimintavarmuus heikkenee. Puhaltimien sähkömoottorit altistuvat kuivaamon kostealle ja lämpimälle ilmalle, mikä edistää moottorien hajoamista. Olosuhteiden lisäksi mittauksissa haivattiin suorakäynnisteisiltä puhallinmoottoreiden ottamat korkeat käynnistysvirrat, mikä voi osaltaan aiheuttaa moottorien ennenaikaista hajoamista. Käynnistystä voisi helpottaa pehmokäynnistimillä ja taajuusmuuttajilla. Erityisesti poistoilmakoneiden kohdalla voitaisiin hyödyntää taajuusmuuttajia, joilla saavutettaisiin säädettävyyttä ja kustannussäästöjä. Lisäselvitystä moottorien käyttöiän pidentämiseksi voitaisiin tehdä puhaltimien tasapainotuksen suhteen, sekä miettiä mahdollisuuksia toteuttaa vesijäähdytystä kanavan puhaltimille.

Koska mittauksissa havaittiin, että mitattu poistoilmapuhaltimen moottori oli vaihdettu pienempään kuin laitedokumenteissa, täytyisi kaikkien koneiden tiedot tarkastaa ennen toimenpiteitä. Moottoreita vaihtaessa on myös hyvä huomioda, että jos uuden moottorin tuottama akseliteho on pienempi kuin mitä puhallin vaatii, aiheutuu moottorille kulumista entistä enemmän.

Kuivaamon toiminnan tehostamiseksi ehdotettiin energiatehokkuusinvestointia, jossa poistopuhaltimille asennetaan taajuusmuuttajat ja LTO-kennot uusitaan tai korvataan lämpöpumppujärjestelmällä. Lisäksi asennettaisiin pehmokäynnistimet yhden kanavan kiertoilmakoneille. Toteutusmalli riippuu kuivaamon tarpeista. Lämpöpumpulle saatiin analyysissä hieman lyhyempi takaisinmaksuaika, mutta toteutus olisi hankalampi, kuin LTO-kennojen uusiminen.

Parhaimmillaan lämpöpumppujärjestelmällä toteutettuna saatiin takaisinmaksuajaksi noin 3,2 vuotta ja LTO-kennojen uusimiselle TMA asettui 6,1 vuoteen riippuen toteutuvista hinnanmuodostuksen mekanismeista.

LÄHTEET

- ABB Oy. 2011. Pienjännitetuotteet. Pehmokäynnistinopas. ABB Oy Kotimaan myynti. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/d11f99611045fef8c125796e00473a8a/OPAS%20Pehmokaynnistys%20FI12_01.pdf [Viitattu 11.12.2018]
- ABB Oy. 2015. Motors don't just fail ... do they? – A guide to prevent failure. Saatavissa: https://new.abb.com/docs/librariesprovider53/about-downloads/motors_ebook.pdf?sfvrsn=4 [Viitattu 11.12.2018]
- Alakangas, E. 2018. Metsäbiomassan energiakäyttö. VTT Oy. Saatavissa: https://www.jamk.fi/globalassets/tapahtumakalenteri--events/teknologian-tapahtumat/tiedetreffit-17.4.2018/alakangas_tiedetreffit_17042018_korjattu.pdf [Viitattu 17.12.2018]
- Business Finland. 2018. Energiatuki. Saatavilla: <https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/pk-ja-midcap-yritys/energiatuki/> [Viitattu: 28.12.2018]
- Calefa. 2018. Kannattavuuslaskuri. Saatavilla: <http://www.calefa.fi/fi/kannattavuuslaskuri/> [Viitattu 18.12.2018]
- Danfoss. 2011. Vinkkejä Danfoss VLT taajuusmuuttajan käyttöön. Saatavissa: <https://docplayer.fi/2413737-Vinkkeja-danfoss-vlt-taajuusmuuttajan-kayttoon.html> [Viitattu 11.12.2018]
- Elomatic. 2018. Elomatic lyhyesti. Saatavissa: <https://www.elomatic.com/fi/yritys/elomatic-lyhyesti.html> [Viitattu 1.10.2018]
- Fingrid. 2018a. Reservit ja säätösähkö. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/> [Viitattu 17.12.2018]
- Fingrid. 2018b. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-N ja FCR-D). vuosimarkkinahinta ja toteutuneet tuntikaupat. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/reservimarkkinainformaatio/Taajuusohjattu-kaytto-ja-hairioreservi-vuosimarkkinahankinta-ja-toteutuneet-tuntikaupat/> [Viitattu 17.12.2018]
- Fingrid. 2018c. Kuinka osallistua reservimarkkinoille. *Ansaintamallit*. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/ansaintamallit/> [Viitattu 17.12.2018]
- Flexim. 2016. Fluxus Operational Instructions.
- Fluke. 2014. Fluke 3000 FC Wireless Multimeter – käyttöohje.
- Halme, J. Parikka, R. 2005. AC-servomoottori – rakenne, vikaantuminen ja havainnointimenetelmät. VTT. Saatavissa: http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/servomoottori_rakenne_vikaantuminen&havainnointi.pdf [Viitattu 13.7.2018]

Hieta-Wilkman S. 1997. Taajuusmuuttajat. Espoo: Suomen sähkö- ja teleura-koitsijaliitto Ry.

Kuisma, P., Väisänen, L., Sormunen, J., Dutka, A., Sorensen, B & Riise, R. s.a. Heat Pump Introduction. Lapland University of Applied Science.

Motiva. 2016. Energiatehokas lämmönsiirto. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/11106/Energiatehokas_lammonsiirto.pdf [Viitattu 13.12.2018]

Nordpool. 2018. ELSPOT Day-ahead prices Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/> [Viitattu 17.12.2018]

Siimes, H. 1986. Sahatavarakuivaamon poistoilman lämpösisällön hyödyntäminen. Espoo: VTT.

Sipi, M. 2002. Puutuoteteollisuus 5. Sahatavaratuotanto. Helsinki: Opetushallitus.

Sjöblom, T. 2014. Laskelma: Olkiluoto 3 laskee valmistuessaan merkittävästi Suomen sähkön hintaa suhteessa muihin pohjoismaihin. Enegia Group Oy. Saatavissa: <https://mb.cision.com/Main/12257/9751880/364032.pdf> [Viitattu 17.12.2018]

Stora Enso. 2018a. About Stora Enso. Saatavissa: <https://www.storaenso.com/en/about-stora-enso> [Viitattu 1.10.2018]

Stora Enso. 2018b. Haastattelut

Thulukkanam, K. 2014. Heat Exchanger Design Handbook – Second Edition. Boca Raton: CRC Press. Saatavissa: <https://www.slideshare.net/vijayabhaskar83/heat-exchanger-design-handbook-42097614> [Viitattu 3.1.2019]

Tuominen, M. 2018. Sähkönhinta hurjassa nousussa – syynä kuivuus ja päästöoikeudet. Helsinki: Maaseudun tulevaisuus. Saatavilla: <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/talous/artikkeli-1.276009> [Viitattu 17.12.2018]

Usenius, A. Siimes, H. 1991. Tulevaisuuden puunkuivausmenetelmät. Espoo: VTT.

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2018. Energiatuki. Saatavilla: <https://tem.fi/energiatuki> [Viitattu: 28.12.2018]

Kuvaluettelo

Kuva 1. Sähkömoottorien vikälähteet. Halme, J. Parikka, R. 2005. AC-servo-moottori – rakenne, vikaantuminen ja havainnointimenetelmät. VTT. Saatavissa: http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/servomoottori_rakenne_vikaantuminen&havainnointi.pdf [Viitattu 13.7.2018]

Kuva 2. Lämpöpumppu. Calefa. 2018. Saatavissa: <http://www.calefa.fi/fi/palvelut/teknologiat/lampopumput/>

Kuva 3. Mittausjärjestelyt kanavissa 2 ja 3.

Kuva 4. Flexim Fluxus F601 mittausjärjestely ja –periaate. Flexim. 2016. Fluxus Operational Instructions. 11.12.2018

Kuva 5. Hobo Single Channel Thermocouple logger.

Kuva 6. Fluke a3001 FC virtalenkki. Fluke. 2014. Fluke 3000 FC Wireless Multimeter – käyttöohje. 11.12.2018

Kuva 7. Kanavan 2 teho.

Kuva 8. Ilmamäärä (12h jakso).

Kuva 9. Poistopellin asento 96 tunnin ajanjaksolla.

Kuva 10. Kanavan 2 kiertoilmapuhaltimen virtamittaus.

Kuva 11. Kanavan 2 poistopuhaltimen virta.

Kuva 12. Pehmokäynnistimet voisi tuoda välikatolle, turvakytkimien viereen.

Kuva 13. Kuivaamon valvomon lay-out.

Kuva 14. Spot hinnan kehitys 2017 – 2018. Nordpool. 2018. ELSPOT Day-ahead prices Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/> [Viitattu 17.12.2018]

Kuva 15. Lämpöpumpun TMA eri sähkön hinnoilla ja toteutuksilla, 80 °C tuolla.

Kuva 16. Sähkökattilan säästöpotentiaali.

Kuva 17. Lämmitystapojen vertailu.

Taulukkoluetelo

Taulukko 1. Käynnistysmenetelmien vertailu. ABB Oy. 2011. Pienjännitetuotteet. Pehmokäynnistinopas. ABB Oy Kotimaan myynti. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/d11f99611045fef8c125796e00473a8a/OPAS%20Pehmokaynnistys%20FI12_01.pdf [Viitattu 11.12.2018]

Taulukko 2. Sähkömoottorien roottorivauriotyypit ja niiden syyt Halme, J. Parikka, R. 2005. AC-servomoottori – rakenne, vikaantuminen ja havainnointimenetelmät. VTT. Saatavissa: http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/servomoottori_rakenne_vikaantuminen&havainnointi.pdf [Viitattu 13.7.2018]

Taulukko 3. Sähkömoottorien staattorivauriotyypit ja niiden syyt Halme, J. Parikka, R. 2005. AC-servomoottori – rakenne, vikaantuminen ja havainnointimenetelmät. VTT. Saatavissa: http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/servomoottori_rakenne_vikaantuminen&havainnointi.pdf [Viitattu 13.7.2018]

Taulukko 4. Tuloilman parametrit

Taulukko 5. Energiatohokkuusinvestoinnin TMA nykyisellä sähkön hinnalla

Pilotettu julkaistavasta versiosta.

Pilotettu julkaistavasta versiosta.

Pilotettu julkaistavasta versiosta.

Pilotettu julkaistavasta versiosta.

Piilotettu julkaistavasta versiosta.

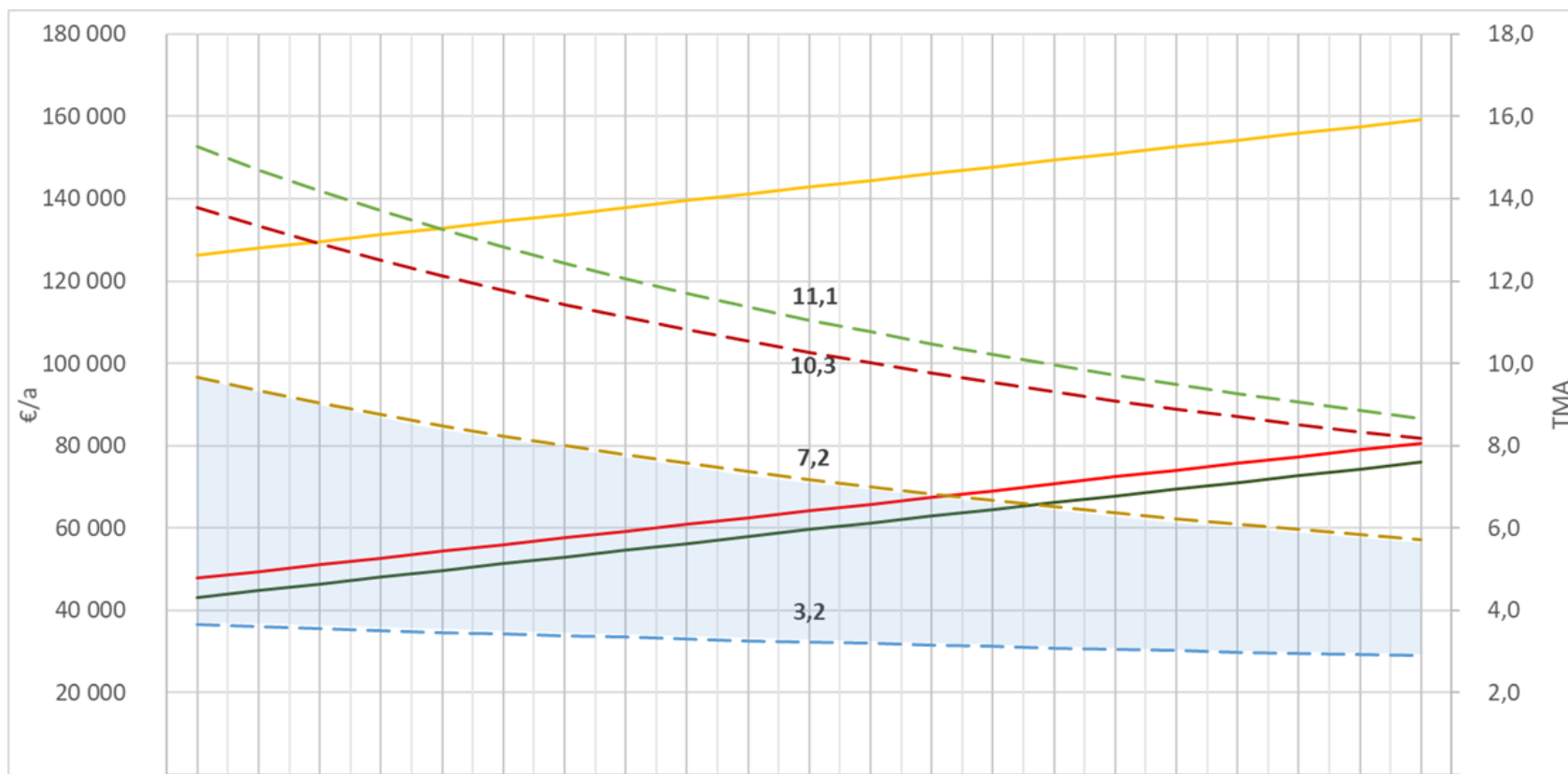
Piilotettu julkaistavasta versiosta.

Pilotettu julkaistavasta versiosta.

Pilotettu julkaistavasta versiosta.

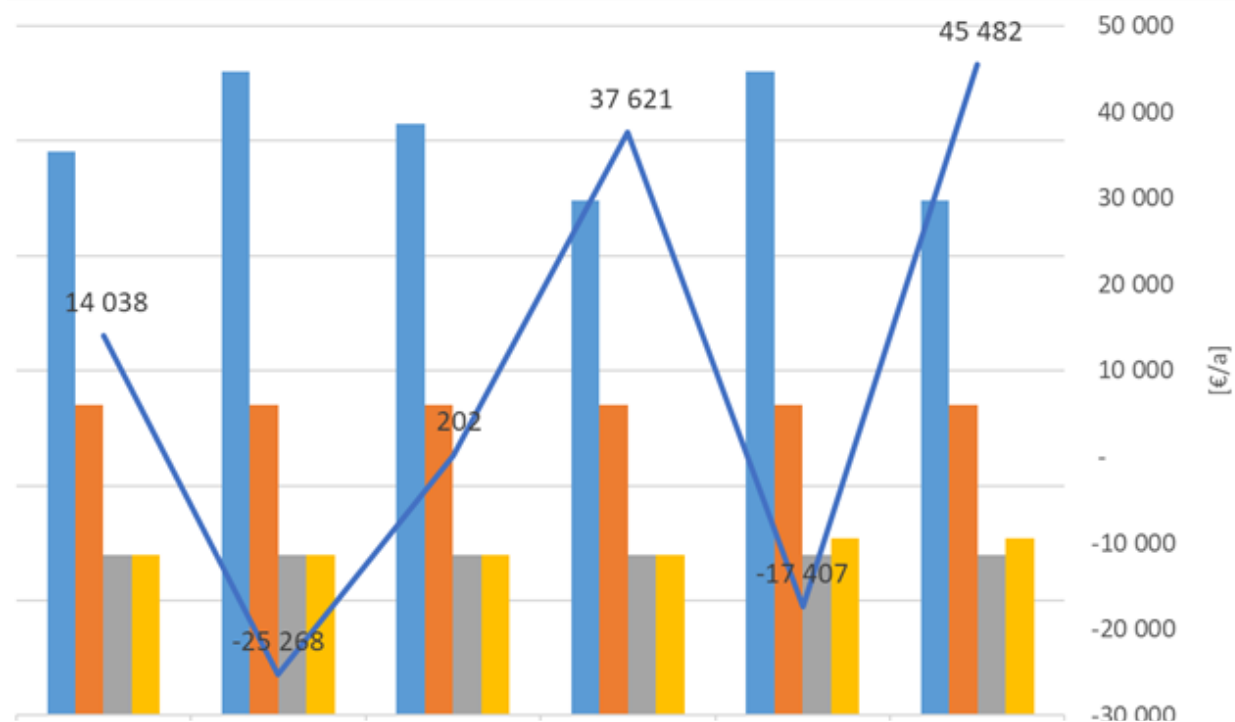
Piilotettu julkaistavasta versiosta.

Piilotettu julkaistavasta versiosta.



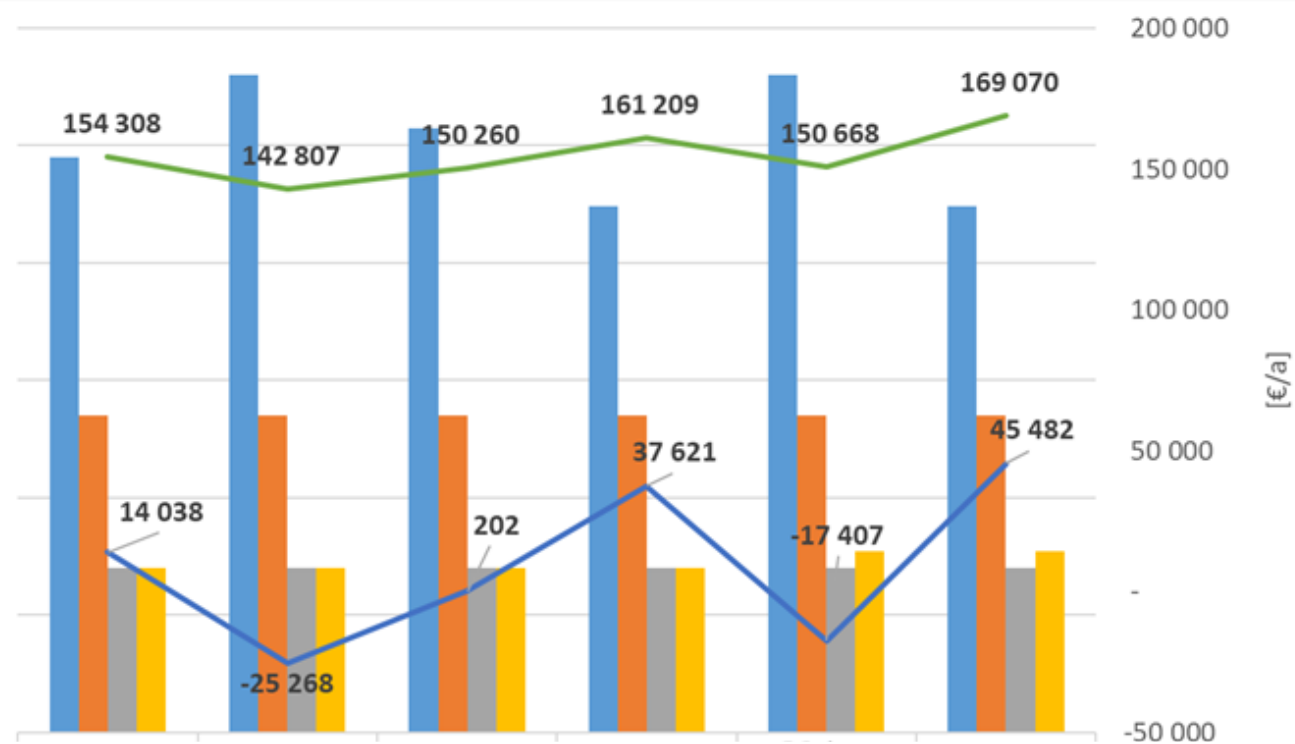
Pilotettu julkaistavasta versiosta.

Pilotettu jul-
kaistavasta
versiosta.



Pilotettu julkaistavasta versiosta.

Pilotettu jul-
kaistavasta
versiosta.



Pilotettu julkaistavasta versiosta.