

Jussi Havulinna

# **ENERGIATEHOKKUUDEN PARANNUS SUOMALAISESSA KONEPAJATEOLLI- SUUDEN KONSERNISSA**

Luonnontieteet  
Diplomityö  
Helmikuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Jussi Havulinna: Energiatehokkuuden parannus suomalaisessa konepajateollisuuden  
konsernissa  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Ympäristö- ja energiatekniikan DI-tutkinto-ohjelma  
Helmikuu 2020

---

Tämän tutkimuksen aiheena oli kotimaisen konepajateollisuuden konsernin energiankulutuksen analysointi ja energiatehokkuuden parantaminen. Konserni tilasi tutkimuksen osana tavoitettaan ottaa käyttöönsä ETJ+ -järjestelmä ja vapautua energiakatselmusten tekovelvoitteesta. Tutkimuksen pääasiallinen tavoite oli tutkia yhden konsernin suuren toimipisteen energiankulutusta ja tuottaa parannusehdotuksia kyseisen toimipisteen energiatehokkuuden parantamiseksi. Kyseisen toimipisteen valittiin tarkemman analysoinnin kohteeksi johtuen sen poikkeuksellisen suuresta lämmönkulutuksesta. Lisäksi tavoitteina oli analysoida konsernin energiankulutusta ja siitä koituneita kustannuksia vuosien 2016-2018 aikana sekä tuottaa uusi energiankulutuksen seuranta- ja raportointia helpottava Excel-pohjainen työkalu. Konsernin energiankulutuksen analysoinnin vertailuvuotena käytettiin vuotta 2014.

Yksittäisen toimipisteen analysointia varten muodostettiin Excelin avulla lämpö-, sähkö-, vesi-, ja liikennepolttoainetaseet. Taseiden muodostuksessa käytettiin pääasiassa Ympäristöministeriön antamia laskentaohjeita rakennuksen energiankulutuksen määrittämiseksi. Taseiden muodostamista varten tietoa kohteesta hankittiin tekemällä mittauksia sekä haastatteleamalla yksikön henkilökuntaa. Tarkkojen tietojen puutteessa käytettiin kirjallisuusviitteitä. Konsernin energiankulutuksen analysointia varten tiedot hankittiin pääasiassa yrityksen laskutuksen kautta. Energiankulutukseen ja niistä aiheutuneisiin kustannuksiin liittyvät tiedot koottiin Excel-taulukon siten, että tietojen analysointiin voitiin käyttää Excelin Pivot -työkalua.

Yksittäisen toimipisteen analysoinnin osalta tutkimuksen tuloksena todettiin, että yksikön korkea lämpöenergian kulutus liittyy pääasiassa toimipisteen suureen tuloilman määrään ja lämmöntalteenoton huonoon hyötysuhteeseen. Tutkimuksen perusteella tultiin siihen lopputulokseen, että teollisuushallissa, jossa on paljon lämpökuormaa aiheuttavia työkohteita ja laitteita, lämpöenergian kulutus muodostuu lähes täysin ilmanvaihtokoneiden tuloilman lämmityksestä. Tämän takia ilmanlaadun hallintaperiaate muodostuu erittäin tärkeäksi Suomen ilmasto-olosuhteissa olevan konepajan energiatehokkuuden kannalta. Ylipäätään todettiin, että analysoidussa yksikössä kiinteistöenergiasta säästäminen on kannattavin energiansäästökohde. Toimipisteelle onnistuttiin tuottamaan energiatehokkuuden parantamishdotuksia, joiden avulla toimipisteen teoreettista lämpöenergiankulusta voisi laskea noin 47-65 %:a, sähköenergiankulutusta noin 5-8 %:a ja veden kulutusta noin 11 %:a. Konsernin energiankulutuksen analysoinnin perusteella todettiin konsernin energiankulutuksen kasvaneen ja energiatalouden parantuneen vuodesta 2014 vuoteen 2018 mennessä. Energiankulutuksen kasvu liittyy lähinnä tässä tutkimuksessa tarkemmin tarkastellun toimipisteen vaikutuksesta koko konsernin energiankulutukseen.

# ABSTRACT

Jussi Havulinna: Improving the energy efficiency of a Finnish mechanical manufacturing corporation

Master's Thesis

Tampere University

Environmental and energy technology, Master's program

January 2020

---

The subject of this study was to analyze the energy consumption and improve the energy efficiency of a Finnish mechanical manufacturing corporation. The corporation commissioned the study as part of their objective to get an energy efficiency certificate for their operation. The main goal of the study was to investigate the energy consumption of a selected unit and to produce propositions to improve its energy efficiency. The thermal energy consumption of the selected unit was exceptionally high, which was the main reason it was selected for a detailed inspection. Additional goals were to analyze the energy consumption and energy costs of the entire corporation between the years 2016-2018 and to produce an Excel based application to help monitor and report the corporation's energy consumption data. The results of the corporation's energy consumption were compared to the year 2014.

The analyzation of the selected unit was done by formulating balances using Excel for heat, electricity, water and fuels respectively. The equations used in the balances were mainly derived from Ympäristöministeriö's guidelines related to calculating the energy consumption of a building. The data needed to formulate the balances was collected by conducting measurements in the selected unit and by interviewing the staff working there. In the absence of precise data literature references were used. The information needed to analyze the energy consumption of the entire corporation was collected mainly from utility bills. The energy consumption data of the entire corporation was collected in to Excel in a way, that allowed for the use of Excel's Pivot feature for the analyzation of the data.

The results of the analyzation of the selected unit indicated that the main reason for the high amounts of thermal energy used in the unit was due to large amounts of supply air and poor efficiency of the ventilation's heat recovery systems. It was concluded that in a building, where there are lots of heat load present, the thermal energy need consists mainly from the energy needed to heat the supply air. Based on this observation it was further concluded that that the method used to control the air quality is of paramount importance when considering the thermal energy consumption and entire energy efficiency of a machine shop operating in Finnish climate conditions. Overall it was concluded that the energy efficiency improvements of the unit should primarily be implemented to the units HVAC systems. The suggested energy efficiency improvements for the selected unit provided in this study would lower the unit's theoretical thermal energy need by 47-65 %, the electricity need by 5-8 % and the water consumption by 11 %. Analyzing the entire corporation's energy consumption data showed that between the years 2014-2018 the energy consumption of the corporation increased, and the energy economics improved. The primary reason for the change in the energy consumption of the corporation was due the effect of the unit which was analyzed in this study.

# ALKUSANAT

Tämän työn teko oli pitkä ja työläs prosessi, joka alkoi maaliskuussa 2019. Työn aihepiiri oli itselleni täysin uusi ja tutkimuksen aikana opin hyvin paljon uutta. Työn teko oli minulle ennestään tuntemattomasta aihepiiristä johtuen erittäin haasteellista, mutta loppujen lopuksi haasteellisuus teki siitä hyvin palkitsevaa.

Haluaisin kiittää diplomityöni ohjaajaa Henrik Tolvasta. Tolvasen antamat neuvot ja inspiraatio auttoivat työn loppuun asti saattamisessa. Erityiskiitokset myös yhteistyö tekevän konsernin työntekijöille Kimmo Naukkariselle ja Janne Ollikaiselle. Erityisesti Janne Ollikainen, joka työskentelee tässä tutkimuksessa analysoidussa yksikössä kiinteistön hoitajana, auttoi työn teossa merkittävästi. Ilman Jannen tietämystä tämän tutkimuksen teko ei olisi ollut mahdollista. Haluaisin myös kiittää Teiskon Oy konsernia kokonaisuudessaan siitä, että he antoivat minulle mahdollisuuden tehdä diplomityöni ja saada tutkintoni suoritettua loppuun.

Tampere 15.2.2020

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	ENERGIAKULUTUKSEN VÄHENTÄMINEN ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMISELLA .....	4
2.1	Päästövähennyksien saavuttaminen energiatehokkuuden avulla .....	4
2.2	Suomen energiatehokkuuspolitiikka .....	5
2.2.1	Energiakatselmustoiminta Suomessa .....	5
2.2.2	Energiatehokkuussopimukset Suomessa .....	6
2.3	Energiatehokkuuden parantaminen konepajateollisuudessa .....	7
3.	ENERGIANKULUTUS KONEPAJATEOLLISUUDESSA .....	12
3.1	Suomen konepajateollisuuden energiankulutus .....	12
3.2	Kiinteistöenergian kulutuskohteet .....	14
3.2.1	Ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutuksen määrittäminen .....	15
3.2.2	Lämmitysjärjestelmän energiankulutuksen määrittäminen .....	18
3.2.3	Lämmitystehon laskenta .....	23
3.2.4	Valaistusjärjestelmät .....	23
3.3	Työkoneiden ja laitteiden energiankulutus .....	24
3.4	Muut energiankulutuskohteet .....	26
4.	AINEISTO JA MENETELMÄT .....	28
4.1	Energiankulutuksen analysointi .....	28
4.2	Yksittäisen toimipisteen tarkempi analysointi .....	30
4.2.1	Analysoinnin tavoitteet .....	30
4.2.2	Tarkasteltava kiinteistö .....	31
4.3	Energiataseiden muodostamista varten hankittu tieto .....	32
4.4	Tarkasteltavan kohteen energiankulutus ja energiankäytön kohteet .....	35
4.4.1	Sähköjärjestelmät .....	36
4.4.2	Henkilöstö .....	36
4.4.3	Kiinteistöenergian kulutuskohteet .....	36
4.4.4	Työkoneet ja laitteet .....	47
4.4.5	Muut energiankulutuksen kohteet .....	48
4.4.6	Sisä- ja ulkolämpötilat .....	50
4.5	Energiataseiden muodostusmetodologiat .....	51
5.	TULOKSET JA ANALYSOINTI .....	55
5.1	Konsernin energiankulutus ja energiakustannukset .....	55
5.2	Yksittäisen toimipisteen analyysin tulokset .....	64
5.3	Energiatehokkuuden parantamishdotukset .....	79
5.3.1	Kiinteistöenergian energiatehokkuuden parannus .....	79
5.3.2	Työkoneiden ja laitteiden energiatehokkuuden parannus .....	84
5.4	Konsernin energiankulutuksen seurannan ja raportoinnin kehitysehdotukset .....	86
5.5	Tuloksien herkkyystarkastelu .....	87
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	91

LÄHTEET.....	94
LIITE 1: TILAN LÄMMITYSTARPEEN LASKENTAKAAVAT .....	99
LIITE 2 LÄMPÖKUORMIEN LASKENTAKAAVAT .....	102
LIITE 3 LÄMMÖNTALTEENOTOLLA SAATAVAN TEHON MÄÄRITYS .....	104
LIITE 4 LÄMPIMÄN KÄYTTÖVEDEN LÄMMITYSTARPEEN LASKENTAKAAVAT .	106
LIITE 5 LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN SÄHKÖTEHON TARPEEN LASKENTAKAAVAT 107	
LIITE 6 TUOTANTOTILAN POHJAPIIRROS .....	110
LIITE 7 TUOTANTOTILAN RAKENNEOSIEN U-ARVOJEN JA PINTA-ALOJEN MÄÄRITYS.....	111
LIITE 8 TOIMISTORAKENNUKSEN RAKENNEOSIEN U-ARVOJEN JA PINTA-ALOJEN MÄÄRITYS.....	114
LIITE 9 SÄHKÖTEHON MITTAUSPÖYTÄKIRJA .....	117
LIITE 10 ILMANVAIHTOKONEIDEN TIETOJA.....	118
LIITE 11 LÄMPÖKAMERALLA OTETTU KUVA TUOTANTOTILAN VARASTO- OSASTA .....	120
LIITE 12 KUUKAUDEN KESKIMÄÄRÄISET ULKOLÄMPÖTILAT, KUUKAUSIEN RAKENNE JA KESKIMÄÄRÄINEN AURINGON SÄTEILYENERGIA.....	121

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$\Delta T_{\text{puhallin}}$	<i>lämpötilan nousu puhaltimessa</i>
$\eta_{\text{lämpö}}$	<i>lämpökuormien kuukausittainen hyödyntämistä</i>
$A_{\text{huone}}$	<i>valaistavan tilan huonepinta-ala</i>
$A_i$	<i>rakenneosan i pinta-ala</i>
$A_{\text{ikk}}$	<i>ikkuna-aukon pinta-ala</i>
$A_{\text{vaippa}}$	<i>rakennusvaiipan pinta-ala</i>
$COP_{\text{hp}}$	<i>Lämpöpumpun hyötysuhteen maksimiarvo</i>
$C_{\text{rak}}$	<i>rakennuksen sisäpuolinen tehollinen lämpökapasiteetti</i>
$E_0$	<i>tehtaan sähköenergiankulutus riippumatta tuotantomäärästä</i>
$F_{\text{läpäisy}}$	<i>säteilyn läpäisyn kokonaiskorjauskerroin</i>
$F_{\text{suunta}}$	<i>muuntokerroin, jolla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan ilmansuunnittain pystypinnalle tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi</i>
$G_{\text{säteily,pystypinta}}$	<i>pystypinnalle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia</i>
$G_{\text{säteily,vaakapinta}}$	<i>vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia</i>
$H_{\text{tila}}$	<i>rakennuksen tilojen ominaislämpöhäviö</i>
$l_k$	<i>viivamaisen kylmäsilan pituus</i>
$L_{\text{lkv}}$	<i>lämpimän käyttöveden kiertojohtojen pituus</i>
$P_{\text{apu,tuotto,avg}}$	<i>lämmöntuottolaitteiston apulaitteiden keskimääräinen sähköteho</i>
$P_{\text{apu,lämmönjakelu,avg}}$	<i>lämmönjakelujärjestelmän apulaitteiden keskimääräinen sähköteho</i>
$P_{\text{lkv,pumppu}}$	<i>lämpimän käyttöveden kiertojohtojen pumpun sähkömoottorin ottoteho</i>
$P_{\text{muu}}$	<i>muiden ilmanvaihtojärjestelmien kuin puhaltimien ja puhaltimien tehonsäätölaitteiden sähköteho</i>
$P_{\text{puh}}$	<i>puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen sähköteho tehonsäätölaitteineen</i>
$P_{\text{spec}}$	<i>kompressorin ominaissähköteho</i>
$P_{\text{valaistus}}$	<i>valaistavan tilan valaistuksen kokonaissähköteho huonepinta-ala kohti</i>
$Q_{\text{henk}}$	<i>henkilöiden luovuttama lämpöenergia</i>
$Q_{\text{alapohja}}$	<i>johtumislämpöhäviö alapohjien läpi</i>
$Q_{\text{aur}}$	<i>ikkunoiden kautta rakennukseen tuleva auringon säteilyenergia</i>
$Q_{\text{aurinko,lkv}}$	<i>aurinkokeräimillä tuotettu energia lämpimään käyttöveteen</i>
$Q_{\text{ikkuna}}$	<i>ikkuna-aukon pinta-ala</i>
$Q_{\text{iv,korvausilma}}$	<i>korvausilman lämpenemisen lämpöenergian tarve</i>
$Q_{\text{iv,netto}}$	<i>ilmanvaihtokoneen lämpöenergian nettotarve</i>
$Q_{\text{iv,tuloilma}}$	<i>tilassa tapahtuvan tuloilman lämpenemisen lämpöenergian tarve</i>
$Q_{\text{jakelu,ulos}}$	<i>lämmön jakelujärjestelmän lämpöhäviö lämmittämättömään tilaan</i>
$Q_{\text{joht}}$	<i>johtumislämpöhäviöt rakennusvaiipan läpi</i>
$Q_{\text{kylmäsilat}}$	<i>johtumislämpöhäviöt kylmäsiltojen läpi</i>
$Q_{\text{lämmitys,iv}}$	<i>ilmanvaihtojärjestelmän lämmityksen lämpöenergian tarve</i>
$Q_{\text{lämmitys,tilat,netto}}$	<i>tilojen lämmitysenergian nettotarve</i>
$Q_{\text{lämmitys,lkv}}$	<i>lämpimän käyttöveden lämmityksen lämpöenergian tarve</i>
$Q_{\text{lämmitys,tilat}}$	<i>tilojen lämmityksen lämpöenergian tarve, joka katetaan laskettavalla lämmön jakelujärjestelmällä</i>
$Q_{\text{lämmitys}}$	<i>lämmitysjärjestelmän lämpöenergian kulutus</i>
$Q_{\text{lisälämmitys,lkv}}$	<i>lämpimän käyttöveden lisälämmityksen tarve</i>
$Q_{\text{lisälämmitys,tilat}}$	<i>on tilan lisälämmityksen tarve</i>

$Q_{lkv,varastointi,kuorma}$	<i>lämmivesivaraajassa tapahtuvien lämpöhäviöiden lämpökuormaksi muuttuva osuus</i>
$Q_{lkv,kierto,kuorma}$	<i>lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviöiden lämpökuormaksi muuttuva osuus</i>
$Q_{lkv,kierto}$	<i>lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviöt</i>
$Q_{lkv,netto}$	<i>lämpimän käyttöveden lämpöenergian nettotarve</i>
$Q_{lkv,varastoinnit}$	<i>lämmivesivaraajassa tapahtuvat lämpöhäviöt</i>
$Q_{lp}$	<i>lämpöpumpulla tuotettu lämpömäärä</i>
$Q_{muu\ tuotto}$	<i>muilla mahdollisilla tuottojärjestelmillä tuotettu energia</i>
$Q_{ovi}$	<i>johtumislämpöhäviö ulko-ovien läpi</i>
$Q_{rak.osa}$	<i>johtumislämpöhäviö rakennusosan läpi</i>
$Q_{sähk}$	<i>valaistuksesta ja sähkölaitteista rakennuksen sisälle tuleva lämpökuorma</i>
$Q_{sis.lämpö}$	<i>lämpökuormat, joka hyödynnetään lämmityksessä</i>
$Q_{tila}$	<i>tilojen lämmitysenergian tarve</i>
$Q_{ulkoseinä}$	<i>johtumislämpöhäviö ulkoseinien läpi</i>
$Q_{varastointi,ulos}$	<i>laskettavan lämmön jakelujärjestelmän varastoinnin lämpöhäviö</i>
$Q_{vuotoilma}$	<i>vuotoilman lämpenemisen lämpöenergian tarve</i>
$Q_{yläpohja}$	<i>johtumislämpöhäviö yläpohjien läpi</i>
$RAK_Q$	<i>rakennuksen lämpöenergian kulutus</i>
$SPF_{lkv}$	<i>on lämpöpumpun SPF-luku tilojen lämmityksessä</i>
$SPF_{tilat}$	<i>lämpöpumpun SPF-luku käyttöveden lämmityksessä</i>
$T_h$	<i>lämmitettävän tilan haluttu lämpötila</i>
$T_c$	<i>käytettävissä olevan lämmönlähteen lämpötila</i>
$T_j$	<i>jäteilman lämpötila</i>
$T_{kv}$	<i>kylmän käyttöveden lämpötila</i>
$T_{lkv}$	<i>lämpimöän käyttöveden lämpötila</i>
$T_{lto}$	<i>lämmöntalteenottolaitteen jälkeinen lämpötila</i>
$T_s$	<i>sisälämpötila</i>
$T_{sp}$	<i>sisäänpuhalluslämpötila</i>
$T_{u,mit}$	<i>mitoitettava ulkoilman lämpötila</i>
$T_u$	<i>ulkoilman lämpötila</i>
$U_i$	<i>rakennososan i lämmönläpäisykerroin</i>
$V_i$	<i>tuotteen i tuotantomäärä</i>
$V_{lkv}$	<i>lämpimän käyttöveden kulutus</i>
$W_{LP,lämmitys}$	<i>lämpöpumppujärjestelmän sähköenergian kulutus</i>
$W_{aurinko,pumput}$	<i>aurinkolämpöjärjestelmän pumppujen sähköenergian kulutus</i>
$W_{ilmanvaihto}$	<i>ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergian kulutus</i>
$W_{iv,muu}$	<i>muiden ilmanvaihtojärjestelmien kuin puhaltimien ja puhaltimien tehonsäätölaitteiden sähköteho</i>
$W_{kuluttajalaitteet}$	<i>sähkölaitteiden sähköenergian kulutus</i>
$W_{lämmitys}$	<i>lämmitysjärjestelmän sähköenergian kulutus</i>
$W_{lkv,pumppu}$	<i>lämpimän käyttöveden kiertopumpun sähköenergian kulutus</i>
$W_{tilat}$	<i>lämmönjakojärjestelmän apulaitteiden sähköenergian kulutus</i>
$W_{tuotto,apu}$	<i>lämmöntuottojärjestelmän apulaitteiden sähköenergian kulutus</i>
$W_{valaistus}$	<i>valaistusjärjestelmän sähköenergian kulutus</i>
$c_{pi}$	<i>ilman ominaislämpökapasiteetti</i>
$c_{pv}$	<i>veden ominaislämpökapasiteetti</i>
$n_{lämmityslaitte}$	<i>lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteiden lukumäärä</i>
$q_{50}$	<i>rakennusvaipan ilmanvuotoluku</i>



$Q_{jakeluhäviö,ulos}$	<i>on lämmön jakelujärjestelmän ominaislämpöhäviö lämmittämättömään tilaan</i>
$Q_{p,LTO}$	<i>lämmöntalteenoton läpi kulkeva poistoilma</i>
$Q_{t,LTO}$	<i>lämmöntalteenoton läpi kulkeva tuloilma</i>
$Q_{v,lkv}$	<i>lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaama</i>
$Q_{v,korvausilma}$	<i>korvausilmavirta</i>
$Q_{v,tulo,avg}$	<i>tuloilmavirran keskimääräinen arvo tarkastelujaksolla</i>
$Q_{v,vuotoilma}$	<i>vuotoilmavirta</i>
$t_{lkv,pumppu}$	<i>lämpimän käyttöveden kiertojohdon pumpun käyttöaika</i>
$\Psi_k$	<i>viivamaisen kylmäsillan lisäkonduktanssi</i>
$\alpha_i$	<i>tuotteen i regressiokerroin</i>
$\eta_{lämmitys,iv}$	<i>on ilmanvaihtokoneen lämmityspatterille lämpöä kuljettavan lämmönjako- ja luovutusjärjestelmän hyötysuhde</i>
$\eta_{lämmitys,tilat}$	<i>laskettavan lämmön jakelujärjestelmän hyötysuhde</i>
$\eta_{lkv,siirto}$	<i>lämpimän käyttöveden siirron hyötysuhde</i>
$\eta_p$	<i>poistoilman lämpötilahyötysuhde</i>
$\eta_t$	<i>tuloilman lämpötilahyötysuhde</i>
$\eta_{tuotto}$	<i>lämmitysenergian tuoton hyötösuhde tilojen, ilmanvaihdon ja lämpimän käyttöveden lämmityksessä</i>
$\rho_i$	<i>ilman tiheys</i>
$\rho_v$	<i>veden tiheys</i>
$\varphi_{pn}$	<i>lämpöpumpun nimellislämpöteho</i>
$\varphi_{tila}$	<i>tilan laskettu lämpötehon tarve</i>
$\phi_{henk}$	<i>yhden henkilön luovuttama keskimääräinen lämpöteho</i>
$\phi_i$	<i>johtumislämpöteho rakenneseosan i läpi</i>
$\phi_{lkv,kiertohäviö,omin}$	<i>lämpimän käyttöveden kiertojohdon ominaislämpöhäviöteho</i>
$\phi_{lkv,kiertohäviö}$	<i>lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviöteho</i>
$\phi_{lkv,lämmitys,omin}$	<i>lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteiden ominaisteho</i>
$\phi_{lkv}$	<i>lämpimän käyttöveden lämmityksen tehontarve</i>
$\phi_{lto}$	<i>lämmöntalteenottolaitteistosta saatava teho</i>
$\Delta t_{oleskelu}$	<i>oleskeluaika</i>
$\Delta t$	<i>ajanjakson pituus</i>
$COP$	<i>coefficient of performance</i>
$ETJ$	<i>energiatehokkuusjärjestelmä</i>
$EU$	<i>Euroopan Unioni</i>
$IEA$	<i>International Energy Agency</i>
$LVI$	<i>Lämpö-, vesi- ja ilmastointijärjestelmät</i>
$SPF$	<i>Seasonal performance factor</i>
$TEM$	<i>Työ- ja elinkeinoministeriö</i>
$VTT$	<i>Valtion Teknologian Tutkimuskeskus</i>
$YM$	<i>Ympäristöministeriö</i>
$E$	<i>tehtaan sähköenergiankulutus</i>
$L$	<i>lämmön jakelujärjestelmän meno- ja paluuputkien yhteenlaskettu pituus lämmittämättömässä tilassa</i>
$R$	<i>lämmöntalteenoton läpi kulkevan tuloilman suhde poistoilmaan</i>
$a$	<i>numeerinen parametri</i>
$f$	<i>valaistuksen ohjaustavasta riippuva ohjauskerroin</i>
$g$	<i>ikkunan valoaukon auringon kokonaissäteilyn läpäisykerroin</i>
$\gamma$	<i>lämpökuorman suhde lämpöhäviöön</i>
$\tau$	<i>rakennuksen aikavako</i>

# 1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos on edelleen yksi suurimmista, globaaleista, ihmiskunnan kohtaamista ongelmista. Ongelman ytimeksi on tunnistettu erilaisten energianmuotojen kulutuksen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt ja niiden ilmastoa lämmittävä vaikutus. Ongelman ratkaisemiseksi laadittiin vuonna 2015 YK:n uusi Pariisin ilmastopöytäkirja, johon osallistuvien maiden tavoitteena on rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu alle kahteen asteeseen verrattuna esiteolliseen aikaan. Euroopan Unioni (EU) ratifioi sopimuksen 4.11.2016 ja Suomi hyväksyi sen 14.11.2016 [1]. Sopimuksen tavoitteiden saavuttamiseksi odotetaan siihen osallistuvien maiden vähentävän kasvihuonepäästöjään, investoivan vähähiiliseen teknologiaan ja muutenkin osoittamaan sitoutumisensa kunnianhimoisten ja alati kiristyvien toimien tekoon ilmastomuutoksen hillitsemiseksi [1]. Yksi näistä päästöjä vähentävistä toiminnoista on energiatehokkuuden parantaminen eri sektoreilla. Energiatehokkuuden parantaminen teollisuussektorilla on erityisen tärkeää, sillä teollisuus on merkittävin yksittäinen energiaa kuluttava sektori. Suomessa teollisuus kuluttaa noin 46 %:a kaikesta energiasta [2].

Konepajateollisuudessa energiankulutuksen ja siitä aiheutuvien kustannusten merkitys on ollut alalla perinteisesti pieni. Esimerkiksi konepajojen valmistusprosesseja käsittelevässä vanhassa kirjallisuudessa laitteiden energiankulutusta ei ole käsitelty lainkaan [3]. Konepajayrityksien suppea kiinnostus energiankäyttöön kohtaan on ollut ymmärrettävää, sillä alan yritysten kilpailukykyyn merkittävimmin vaikuttavat tekijät ovat perinteisesti olleet materiaali- ja tuotantotehokkuus sekä tuotteiden hinta-laatusuhde [3]. Lisäksi energiakustannukset muodostavat edelleenkin tyypillisesti vain 1-3 %:a konepajateollisuuden toimijoiden kokonaiskustannuksista [4,5], jolloin kynnyksen panostaa energiankulutuksen tehostamiseen kustannusmielessä on suuri. Energian pienestä merkityksestä johtuen on tavallista, että erityisesti pienet konepajateollisuuden yritykset eivät ole toiminnassaan huomioineet edes helpoimmin saavutettavia energiansäästökohteita [6]. Energiatehokkuuteen panostamisesta on kuitenkin viime vuosikymmenten aikana muodostunut yksi alan kasvavista trendeistä, vaikkakin konepajojen tärkeimmät kilpailukykyyn vaikuttavat tekijät ovat pysyneet pääasiassa ennallaan [7,8,9]. Vaikuttavia tekijöitä ajattelumaailman muuttumiseen ovat olleet muun muassa energiatehokkuuden ja elinkaariajattelun merkityksen kasvu politiikassa sekä erilaisten raakamateriaalien hinnan nousu ja perinteisten halpatyövoimamaiden elintason kasvu [10]. Energian merkityksen kasvusta huoli-

matta energiatehokkuuden parantaminen nähdään alalla tällä hetkellä pääasiassa keinona vähentää energian hankinnasta koituvia kustannuksia ja siten parantaa yrityksen liikevaihtoa [11].

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tutkia energiankulutusta ja energiatehokkuuden parantamista kotimaisessa konepajateollisuudessa. Tutkimus tehdään yhteistyössä erään suomalaisen konepajateollisuuden yrityksen kanssa, jonka tavoitteena on kehittää energiatehokkuuttaan ja ottaa käyttöön energiatehokkuusjohtamisjärjestelmä(ETJ+). Yhteistyötä tekeväille yritykselle tuotetaan hyödyllisesti jaoteltua tietoa yrityksen energiankäytöstä sekä yksittäisen toimipisteen osalta tarkempi energiankäytön jakauma. Tuloksien pohjalta esitetään energiansäästötoimenpiteitä tarkemmin analysoidulle toimipisteelle sekä luodaan pohja koko konsernin energiatehokkuustavoitteille ja energiatehokkuuspolitiikalle. Osana työtä tehdään konsernille uusi energiankäytön seuranta- ja dokumentointityökalu, jonka tarkoituksena on helpottaa ja nopeuttaa yrityksen energiankulutuksen tarkastelua. Laajasta kokonaisuudesta johtuen tutkimus pidetään yksinkertaisena ja syvällisiä teoreettisia pohdintoja vältetään. Kokonaisuudessaan tutkimuksen tavoitteena on vastata seuraaviin kysymyksiin:

- Mihin energiaa kuluu konepajateollisuudessa?
- Mitkä ovat parhaita keinoja parantaa energiatehokkuutta konepajateollisuudessa?
- Miten tutkia konepajateollisuuden konsernin energiankulutusta ja energiatehokkuutta koko konsernin tasolla?
- Miten tutkia ja parantaa konepajateollisuuden konsernin energiatehokkuutta yksittäisessä toimipisteessä?

Tutkimuksen ensimmäisessä osassa käydään lyhyesti läpi energiatehokkuuden roolia osana suurempaa tavoitetta vähentää päästöjä maailmanlaajuisesti sekä sitä millaisilla keinolla Suomi pyrkii tällä hetkellä parantamaan Suomessa toimivien yritysten energiatehokkuutta. Lisäksi tuotetaan lyhyt kirjallisuuskatsaus energiatehokkuuden parantamisesta konepajateollisuuden kaltaisessa toimintaympäristössä. Toisessa osassa tarkastellaan energian käyttöä konepajateollisuudessa ja laskentametodeja yksittäisen konepajateollisuuden toimipisteen energiataseiden muodostamiseksi. Kolmannessa osiossa esitellään tiedot, jota hankittiin yhteistyötä tekevältä yritykseltä sekä metodologia, jolla datasta muodostettiin hyödyllisiä tuloksia. Neljännessä osiossa käydään läpi varsinaiset tutkimustulokset ja tulosten analysointi.

Ensimmäistä osiota varten tietoa etsitään erilaisista energiatehokkuutta yleisellä tasolla analysoivista raporteista ja tutkimuksista, Suomen lakiteksteistä sekä Suomessa energiankäyttöä ja energiatehokkuutta tutkivien tahojen (esimerkiksi Motiva ja energiavirasto) nettisivuilta. Lisäksi etsitään kirjallisuutta ja julkaisuja liittyen energiatehokkuuden parantamiseen konepajateollisuudessa. Konepajateollisuuden energiankäytön analysointia varten hankitaan tietoa tilastokeskuksen sivuilta, kirjallisuudesta ja aiheesta tehdyistä tutkimuksista. Yksittäisen toimipisteen energiankulutuksen mallinnus perustuu hyvin vahvasti Ympäristöministeriön (YM) antamiin ohjeisiin koskien rakennusten energiankulutuksen laskemista, sillä tarkoituksena on luoda yksinkertaiset periaatteet konepajateollisuuden yrityksen energiankulutuksen tilastointia varten ja yksittäisen toimipisteen energijakauman muodostamiseksi.

## 2. ENERGIAKULUTUKSEN VÄHENTÄMINEN ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMISELLA

### 2.1 Päästövähennyksien saavuttaminen energiatehokkuuden avulla

Kansainvälisellä tasolla energian käyttöä tutkiva organisaatio International Energy Agency (IEA) määrittelee energiatehokkuuden toimintana, jonka tarkoituksena on vähentää tuotteiden tai palveluiden energian tarvetta tai tuottaa saman laatuinen ja määräinen hyödyllinen työ pienemmällä kulutetulla energiamäärällä [10]. Tuotannon tehostaminen ei sinänsä ole uusi käsite, mutta ilmastonmuutoksen yhteydessä aiheen merkitys on noussut ja energiatehokkuuden parantaminen on tunnistettu yhdeksi tehokkaaksi keinoksi vähentää globaalia primaarisen energian käyttöä ja hillitä ilmastonmuutosta. Pelkästään energiatehokkuuden parantamisella olisi IEA:n vuonna 2018 tekemän selvityksen mukaan mahdollista saavuttaa vuoteen 2040 mennessä pienemmät globaalit päästöt kuin tällä hetkellä, vaikka globaali bruttokansantuote tuplaantuisi. Tämä vastaisi noin 40 prosenttia Pariisin ilmastopimuksen asettamista päästövähennystavoitteista. Energiatehokkuuden huomioimisella poliittisessa päätöksenteossa on energiankulutuksen pienentämisen lisäksi todettu olevan mahdollista saavuttaa muitakin ympäristöhyötyjä sekä yhteiskunnallisia ja taloudellisia etuja.[10]

Energiankäytön tehostaminen on erityisen tärkeää teollisuudessa, sillä teollisuus kuluttaa 57 %:a maailman energiasta ja pelkästään tuotantoteollisuuden on arvioitu kuluttavan noin kolmanneksen kaikesta energiasta [12]. Energiatehokkuuden merkityksen teollisuudessa voi lisäksi olettaa kasvavan samalla kun globaalit energian, työvoiman ja raaka-aineiden hinnat nousevat [13]. Erilaisten tuotantokustannuksien nousu teollisuudessa on myös lisännyt energiatehokkuuden merkitystä teollisuuden aloilla, joissa energiankulutus on perinteisesti edustanut vain pientä osaa kustannuksista [10]. Keinoja edistää energiatehokkuuden parantamista kutsutaan energiapolitiikaksi.

Maailmalla on saavutettu erilaisten energiapolitiittisten keinojen, kuten energiatukien ja energiatehokkuusstandardien, asettamisella suuria konkreettisia energiansäästöjä esimerkiksi rakennusten, sähkömoottoreiden ja liikenteen osalta [10]. Erityisesti standardien asettaminen on tarpeellista, sillä ilman vertailuarvoa on mahdotonta määritellä, onko jokin energiankulutuksen mittausarvo hyvä vai huono. Haasteelliseksi erilaisten energiankulutukseen liittyvien indikaattorien laadinnassa on kuitenkin osoittautunut luotettavan datan keräys sekä luotettavien energiatehokkuutta kuvaavien indeksi arvojen

muodostus [14]. Epäluotettavista tunnusluvuista huolimatta energiatehokkuuden parantamisella on vielä valtavat määrät saavutettavaa säästöpotentiaalia. Uusien standardien asettamista ja energiatehokkuusajattelun leviämistä yhä useammille sektoreille tukee energiatehokkuusinvestointien taloudellinen kannattavuus; energiatehokkuusinvestoinneilla saatavat energiasäästöt maksavat itsensä takaisin jopa kolminkertaisesti [10]. Energiapolitiikan vaikutusalueen levittäminen sekä uusien energiatehokkuusstandardien ja uusien energiatehokkuuden parantamista suosivien kannusteiden lisääminen ovat olennainen osa energiatehokkuusajattelulla saatavan energiansäästöpotentiaalinsa saavuttamista [10].

## **2.2 Suomen energiatehokkuuspolitiikka**

Suomen energiatehokkuuspolitiikan taustalla on EU:n energiatehokkuusdirektiivi 27/2012/EU, joka puolestaan on osa EU:n kansainvälistä energia- ja ilmastostrategiaa vuodelle 2020. Direktiivin tarkoitus on tehostaa jäsenmaiden energiankäyttöä ja direktiivin Suomelle asettama kumulatiivinen energiansäästötavoite vuosille 2014-2020 on 48,99 TWh [1]. Vertailukohtana Suomen kokonaisenergiankulutus vuonna 2017 oli noin 376 TW [2].

Suomessa toimivien teollisuuden yrityksiä osalta olennaisina käytännön keinoina energiatehokkuustavoitteiden saavuttamiseksi ovat energiatehokkuuslaki 1429/2014, ja yrityksille vapaaehtoiset energiatehokkuussopimukset. Energiatehokkuuslaki velvoittaa suuret yritykset tekemään energiakatselmuksia säännöllisin väliajoin ja energiatehokkuussopimusten avulla pyritään kannustamaan yrityksiä huomioimaan energiatehokkuus osana yrityksen toimintaa [15,16]. Energiatehokkuuden kehittämistä kannustaa myös työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) myöntämät energiatuet. Energiatukia voi hakea hankkeisiin, jotka edistävät uusiutuvan energian käyttöä, energiansäästöä tai energia tuotannon tai käytön tehostamista tai energijärjestelmän muuttamista vähähiiliseksi [17].

### **2.2.1 Energiakatselmuksien toiminta Suomessa**

Energiakatselmusten teko on Suomessa ainoa energiatehokkuuden parantamiseen liittyvä laillinen velvoite, joka on kohdistettavissa kaikkiin toimialoihin. Velvoite energiakatselmusten tekoon pätee kuitenkin vain lämpöä, jäähdytystä, polttoainetta ja sähköä myyviin yrityksiin sekä isoihin yrityksiin eli yrityksiin, joissa on yli 250 työntekijää, tai joiden liikevaihto on yli 50 miljoonaa euroa ja taseen loppusumma yli 43 miljoonaa euroa. Lain

vaikutuspiiriin kuuluvien yritysten on tehtävä energiakatselmus ja raportoitava sen tulokset neljän vuoden välein. Laki ei varsinaisesti pakota yrityksiä tai konserneja tekemään muuta kuin analysoimaan ja raportoimaan yrityksen tai konsernin energiankulutusta ja sen jakautumista sekä kartoittamaan energiansäästökohteita ja energiansäästöpotentiaalia. Varsinaisia toimenpiteitä laki ei kuitenkaan pakota tekemään. Katselmusten yksityiskohtaisuus ja laajuus riippuu yrityksen toimialasta ja energiakustannuksien suuruusluokasta.[15]

Lain mukaan yrityksen energiakatselmukseen on sisällytettävä kohdekatselmuksia, joiden energian käytön määrä vastaa vähintään kymmentä prosenttia yrityksen kokonaisenergiankäytöstä [15]. Kohdekatselmuksien vähimmäisvaatimuksista, sisällöstä ja raportoinnista on asetettu lait 20/2015 ja 41/2015 [18,19]. Energiakatselmukseen on lisäksi sisällytettävä suunnitelma seuraavan energiakatselmuksen kohdekatselmuksien teosta [15]. Varsinaisen katselmuksen saavat toteuttaa vain Motivan hyväksymät katselmoijat [19]. Motiva on myös julkaissut yleisohjeet katselmuksien tekemiselle [20]. Yleisesti energiakatselmuksen tavoitteina on vähentää katseltavan kohteen energiankäyttöä, energian käytöstä aiheutuvia kustannuksia sekä CO<sub>2</sub> päästöjä.

## 2.2.2 Energiatehokkuussopimukset Suomessa

Suomessa toimiva yritys tai konserni voi myös vapautua energiakatselmusten teko velvoitteesta, mikäli yrityksellä tai konsernilla on [21]:

1. Voimassa oleva energiaterhokkuussopimus ja käytössä oleva energiaterhokkuus johtamisjärjestelmä EJT+ tai
2. Sertifioitu ISO 50001 –standardin mukainen johtamisjärjestelmä tai
3. Sertifioitu ISO 14001 ja sertifioitu EJT+

Yrityksille, jotka ovat päättäneet liittyä Suomen energiaterhokkuussopimuksen toimenpiteohjelmiin, vaaditaan energiaterhokkuusjärjestelmän eli ETJ:n käyttöönottoa. ETJ on järjestelmä, joka pitää sisällään vähimmäisvaatimukset yrityksen energiaterhokkuuden parantamisen toteutumiseksi. ETJ pitää sisällään muun muassa yrityksen energiaterhokkuustavoitteet, energiaterhokkuustyön organisoinnin, energiaterhokkuuden huomioonoton investointipäätöksiä tehdessä sekä energiankulutuksen seurannan ja raportoinnin. ETJ noudattaa energiahallintastandardin ISO 50001 rakennetta, mutta yrityksen ja sen toiminnan tarkastelu tehdään yleisemmällä tasolla. ISO 50001 -standardi on maailmanlaajuinen standardi energiaterhokkuuden hallintaan yrityksissä tai konserneissa [22].

Suomessa toimiva yritys voi myös ottaa käyttöönsä EJT+ järjestelmän, joka pitää sisällään ISO 50001 -standardin mukaiset, yksityiskohtaisemmat vaatimukset ja velvoitteet yrityksen energiatehokkuuden parantamiseksi. EJT+:n asettamat vaatimukset ovat vaativampia ja yksityiskohtaisempia kuin pelkän EJT:n. Eroavaisuuksia eri hallintajärjestelmien välillä ovat ainakin [23]:

- EJT+ vaatii organisaation energiatehokkuustoiminnan vastuiden, resurssien ja roolien tarkempaa jakoa verrattuna EJT:hen
- EJT+ vaatii yritykseltä aktiivista, erillistä energiapolitiikkaa tai esimerkiksi ympäristöpolitiikkaan liitettyä energiapolitiikkaa, kun taas EJT:ssä riittää energiatehokkuuden huomioiminen yrityksen voimassa olevassa politiikassa
- EJT+ vaatii energiatehokkuuspolitiikan viestintäsuunnitelman ja viestinnän toteutuksen yrityksen sisällä
- EJT+ vaatii energiamittausjärjestelmän säännöllistä kehitystä ja seuranta

EJT+ voidaan integroida osaksi yrityksessä jo voimassa olevaan johtamisjärjestelmään kuten ISO 14001 -järjestelmään tai sitä voidaan käyttää omana järjestelmänä osana yrityksen muuta päätöksentekoa. EJT+:n voi myös sertifioida ISO 14001 tai ISO 50001 sertifiointiin kelpaavan tahon toimesta.[23]

### **2.3 Energiatehokkuuden parantaminen konepajateollisuudessa**

Lähtökohtaisesti voi olla realistista olettaa, että yritykset eivät investoi energiatehokkuuden tutkimiseen tai parantamiseen vain oman hiilijalanjälkensä pienentämiseksi, vaan investointipäätöksiensä taustalla on oltava jokin tutkittu taloudellinen kannuste tai vaihtoehtoisesti laillinen pakote. Lailliset pakotteet ovat varmasti tehokkain keino konepajojen energiatehokkuuden parantamiseksi. Esimerkiksi Suomessa toimivat konepajateollisuuden yritykset ovat energiatehokkuuslain alaista toimintaa, joten niillä on energiakatselmusvelvoite tai vaihtoehtoisesti mahdollisuus liittyä energiatehokkuussopimukseen. Konepajojen on kuitenkin haasteellista määrittää, kuinka paljon rahaa ne voisivat säästää energiatehokkuuttaan parantamalla. Esimerkiksi konepajateollisuuden tuotantotiloille ei ole määritelty samanlaisia energiankäytön raja-arvoja kuin esimerkiksi toimistorakennuksille [24]. Raja-arvojen puuttuminen teollisuusrakennusten tapauksessa on ymmärrettävää, sillä energiankulutukset lasketaan yleensä jakamalla rakennuksen kokonaisenergian kulutus sen pinta-alalla [24]. Tällä tavalla laskettaessa erilaisten teollisuuden alojen prosessilaitteiden vaatima energia ja laitteiden tuottaman hukkalämmön hyödyntäminen vääristävät tuloksia niin paljon, että yleispätevien raja-arvojen luonti ei ole mielekäästä. Raja-arvojen ja standardien puute kuitenkin tarkoittaa, että on lähes mahdotonta tietää,



onko yksittäisen konepajan energiankulutus hyvällä vai huonolla tasolla. Vertailuarvojen puutteen takia erilaisten teollisuushallien energiankulutukseen tai energiatehokkuuteen ei juurikaan kiinnitetä huomiota. Standardien puutteen takia tulisi konepajayritykselle löytää motivaatio panostaa omaan energiatehokkuuteensa muuta kautta, kuin vertailemalla omaa toimintaansa yleisesti hyväksi todettuihin arvoihin.

Huomattavaa on, että kone- ja metallituoteteollisuus tuottaa Suomessa kaikista teollisuuden aloista eniten arvonlisäystä käytettyyn energiaan nähden [25,26]. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että ala käyttää raaka-aineena jo valmiiksi korkean jalostusarvon tuotteita eli metalleja. Metallien tuottamisen vaatima suuri energiamäärä ei näy kone- ja metallituoteteollisuuden energiankäytössä ja yleisesti voidaan todeta, että konepajateollisuus ei ole järin energiaintensiivinen. Tämän takia kiinnostus parantaa jo valmiiksi suhteellisen pientä energiankulutusta voi olla pienempi verrattuna suuren energiaintensiteetin aloihin, kuten sellu- ja paperiteollisuuteen. Toisaalta Suomessa toimivalle konepajalle voi merkittäväksi säästökohteeksi muodostua energiakatselmusvelvollisuudesta irti pääseminen, jolloin ei muodostu menoerää katselmuksien tekemisestä. On kuitenkin syytä tutkia ainakin energiakustannuksien vaikutusta konepajateollisuuden kokonaiskustannuksiin, energiatehokkaaksi sertifioidun toiminnan tuomaa lisäarvoa ja sitä miten energiatehokkuutta voidaan alalla parantaa.

Konepajateollisuuden kustannukset on mahdollista jakaa monella eri tavalla, mutta ne muodostuvat aina kiinteistä ja muuttuvista kustannuksista. Energiakustannukset on helppoin omaksua muuttuviksi kustannuksiksi, vaikka osa konepajateollisuuden energiankulutuksen kohteista, kuten kiinteistöjen valaistus, eivät välttämättä ole riippuvaisia toimipisteiden tuotantovolyymistä. Suurin osa konepajojen energiasta kuluu kuitenkin tuotantoprosessien ja tuotantotilan kelvollisten työolosuhteiden aikaansaamiseksi, jotka molemmat ovat riippuvaisia tuotantovolyymistä. Taulukossa 1 on esitetty karkea tapa jakaa konepajateollisuuden kustannukset.

**Taulukko 1: Konepajateollisuuden kustannusten muodostuminen[4]**

Kiinteät kustannukset	Muuttuvat kustannukset
Pääomakustannukset Vuokrat Palkat ja sosiaalikulut Hallinto- ja markkinointi	Materiaalit Muut tarvikkeet Koneiden ja laitteiden kuluminen Energia

Energiakustannukset muodostavat tyypillisesti vain noin 1-3 %:a, konepajateollisuuden toimipisteen kustannuksista [4,5]. Suurin osa toimialan kustannuksista muodostuu materiaaleista [4]. Huomioitavaa on, että on olemassa myös konepajateollisuudeksi luokiteltavia toimipisteitä, joissa energiakustannukset voi muodostaa jopa 15 %:a tuotteiden

hinnasta [11]. Konepajayrityksien energiankulutuksen suuret vaihtelevuudet selittyvät toimialakohtaisilla eroilla; toimipisteissä voi olla paljon energiaa kuluttavia tuotantolaitteita, kuten sulatusuuneja, tai toimipisteessä voi olla vain vähän energiaa kuluttavaa tuotantoa, kuten kokoonpanoa. Tuotantoprosessit vaikuttavat lisäksi toimipisteiden kiinteistöenergiankulutukseen, esimerkiksi lämpökuormiin ja ilmanlaatuun liittyvien mekanismien avulla. Vaihtelevuudesta huolimatta energia muodostaa toimialalla sellaisen osan kustannuksista, että energiakustannuksista saatavat säästöt voivat itsessään olla validi syy energiatehokkuuden tutkimiselle ja parantamiselle. Konepajateollisuuden motivaation energiakustannuksien pienentämiseksi voisi myös olettaa nousevan yhdessä nousevien energian hintojen kanssa. Energiatehokkuuden merkityksen kasvua alalla tukee myös aiheesta tehdyt tutkimukset ja yrityshaastattelut [11,27,28]. Yritykset tuntuvat kuitenkin pitävän nimenomaan energiakustannuksia pääasiallisena motivaattorina energiatehokkuuden parantamiseksi [11]. Metallituotteita valmistavat yritykset ovat tunnistaneeet myös energiatehokkuus- ja elinkaariajattelun tuomat imagohyödyt, kestävän kehityksen merkityksen sekä oman roolinsa ja vastuunsa globaalista primääriseen energian käytöstä, mutta niitä ei pidetä vielä merkittävinä toimintaa ohjaavina tekijöinä [11].

Energiatehokkuuden vaikutusta konepajateollisuusyrityksen muihin osa-alueisiin kuin energiakustannuksiin, on huomattavasti vaikeampi arvioida. Esimerkiksi tunnetun ison ja globaalin konepajatoimijaksi luokiteltavan yrityksen, kuten KONEen, saattaa olla hyvinkin kannattavaa investoida paljon rahaa energia- ja ympäristöystävällisen brändin tuottamiseen. Konepajateollisuus sisältää kuitenkin myös paljon yrityksiä, jotka vain valmistavat tiettyjä komponentteja isommille yrityksille. Tällaisten pienten yritysten nimi ei välttämättä tule koskaan näkyviin mihinkään tuotteisiin ja siten motivaatio investoida energia- ja ympäristöystävälliseen brändiin voi olla hyvinkin pieni. Toisaalta suuri alihankintayrityksen asiakas saattaa ilmoittaa, että koko sen toimitusketju tulee sertifioida yhteistyön jatkamiseksi. Tällöin pienenkin toimijan on kannattavaa hankkia energiatehokkuussertifikaatti.

Tärkein arvioitava asia yrityksen kannalta on loppujen lopuksi tietysti se, kuinka paljon yrityksen tulos voi parantua investoimalla energiatehokkuuden parantamiseen. Ongelman voisi olettaa olevan koko yrityksen tasolla analoginen esimerkiksi lämpöputken eristämisen kanssa: on tietty eristepaksuus, jolloin investoinnin ja siitä saatavien energiasäästöjen suhde on paras mahdollinen. Konepajateollisuuden yrityksille helpoimmin lähestyttäviä energiansäästökohteita löytyy erityisesti kiinteistöenergian osalta, kuten valaistuksesta ja ilmanvaihdosta [29,30]. Kiinteistöenergiasta säästäminen on erityisen kannattavaa, sillä aiheeseen erikoistunut talotekniikka on jo vakiintunut tieteenala, josta löytyy paljon ammattitaitoa ja kirjallisuutta. Lisäksi konepajojen kaltaisissa toimipisteissä

on yleensä runsaasti säästöpotentiaalia erilaisissa kiinteistöenergian kulutuksen kohteissa [6,29]. Energiatehokkuuden rajaaminen vain talotekniikkaan liittyviin kohteisiin luo kuitenkin melko suppean kokonaiskuvan energiatehokkuudesta konepajateollisuudessa, erityisesti koska merkittävien energiaa kuluttava kohde alalla ovat erilaiset tuotantoprosessit [4,5].

Energiatehokkuuden soveltamista metalli- ja konetuoteteollisuuden tuotantoprosesseihin kuitenkin vaikeuttaa universaalien standardien puute, jollaisia on olemassa esimerkiksi ilmanvaihtokoneille ja kulkuneuvoille [8]. Esimerkiksi ISO 14955-1:2017 ja 14955-2:2018 standardit antavat ohjeet erilaisten työstökoneiden ekologiselle suunnittelulle ja niiden energiankulutuksen laskemiselle, mutta niissä ei anneta ohje- tai vertailuarvoja, joiden avulla tuloksia voisi analysoida [31,32]. Standardien puuttuminen johtuu pääasiassa siitä, että toimialan eri yritykset ja niiden valmistamat tuotteet poikkeavat hyvin paljon toisistaan [7,9]. Tutkimusta aiheesta on erityisesti erilaisten kone- ja prosessityyppien energiankulutuksesta sekä niiden energiankulutuksen mallintamisesta perustuen erilaisiin prosessiparametreihin [33,34,35]. Erilaisille tuotantokoneille ja laitteille on myös kehitelty samankaltaista energialuokitussysteemiä kuin esimerkiksi rakennuksille, mutta tutkimus on vielä konseptuaalisella tasolla [8,9]. Vakiintuneiden tuotantoprosessien energiankulutukseen liittyvien standardien puute tarkoittaa, että konepajatoimijat eivät voi tietää kuinka paljon säästöpotentiaalia laitteiden osalta on olemassa. Lisäksi konkreettisen ja ennakoitavissa olevan säästöpotentiaalipuutteen vuoksi on vaikea määrittellä, kuinka paljon resursseja yksittäisen konepajan kannattaa allokoida tuotantoprosessien energiankulutuksen optimoimiseksi. Tuotantoprosessien energiatehokkuuden parantamisen lisäksi kasvava tutkimussuunta on kokonaisvaltaiset tehtaan tason energiatehokkuusviitekehukset, joissa pyritään ottamaan huomioon energian koko käytöketju ja tuotantokoneiden ja niillä valmistettujen tuotteiden koko elinkaari sekä integroimaan energia osaksi päätöksentekoprosesseja [5,36,37]. Lukuisista tutkimuksista huolimatta on kokonaisvaltainen työkoneiden ja laitteiden energiatehokkuus konepajateollisuudessa edelleen paljon lisätutkimusta vaativa aihepiiri ennen kuin hyödyllisiä energiatehokkuusstandardeja alalle voidaan tuottaa [5].

Loppujen lopuksi energiankulutuksen huomioiminen ja energiatehokkuuden parantaminen eivät ole vielä saavuttaneet vakiintunutta asemaa konepajateollisuudessa. Energian pienen merkityksen takia myös niin sanottujen pehmeiden energiatehokkuutta parantavien investointien, kuten kiinteistöjen energiatehokkuuden parantaminen tai parempien sähkötariffien sopiminen, tekeminen saattaa jäädä tekemättä [37]. Tämä on erityisen totta pienissä konepajayrityksissä, joissa ei ole välttämättä tarvittavaa osaamista ja tietoa energiatehokkuuden parantamiseksi [37]. Työkoneiden ja laitteiden energiatehokkuuden

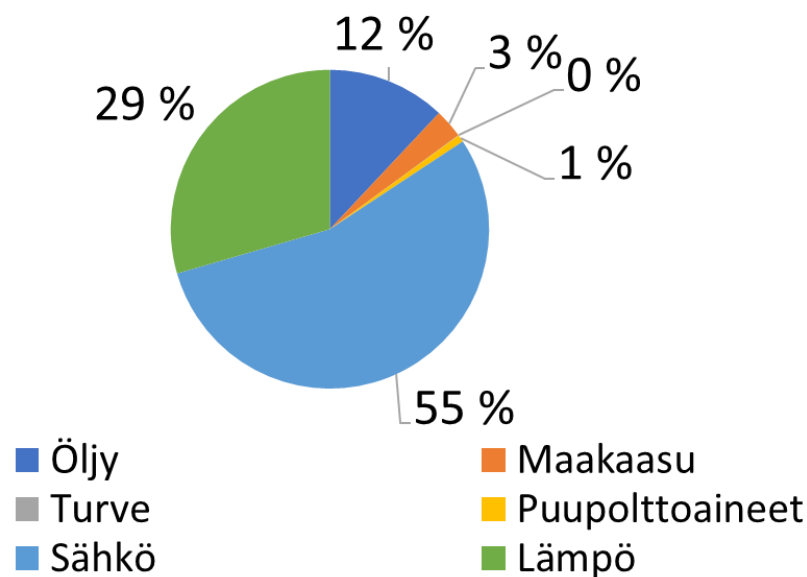
standardien puuttumisen ja aiheen monimutkaisuuden takia, on konepajateollisuuden toimijan todennäköisesti kannattavinta keskittää energiatehokkuutta parantavat toimenpiteet ensisijaisesti kiinteistöenergian kohteisiin. Työkoneiden ja laitteiden energiankulutuksen vähentämisen sijaan voi olla kannattavaa keskittää huomio niistä saatavan hukkalämmön hyödyntämiseen. Hukkalämmön hyödyntäminen on erityisen kannattavaa Suomen kaltaisten maiden ilmasto-olosuhteissa, missä lämmityskustannukset muodostavat merkittävän osan rakennuksien energiankulutuksesta. Huomioitavaa konepajojen energiatehokkuutta parantaessa on, että yleisien standardien ja vertailuarvojen puutteen takia toimialan yksittäisen toimipisteen energiatehokkuuden arvioinnissa saattavat ai-noat vertailukelpoiset kohteet olla toimipisteen oma kulutushistoria tai muut yrityksen yksiköt.

## 3. ENERGIANKULUTUS KONEPAJATEOLLISUUDESSA

### 3.1 Suomen konepajateollisuuden energiankulutus

Konepajateollisuus on Suomessa tyypillinen pienen ja keskisuuren teollisuuden toimiala, joka tunnetaan myös nimellä kone- ja metallituoteteollisuus. Toimialan määrittely tarkasti on vaikeaa, sillä erilaiset konepajat saattavat poiketa toisistaan huomattavasti. Konepajat voivat esimerkiksi tuottaa raaka-aineista valmiita ja käyttökelpoisia tuotteita tai vaihtoehtoisesti valmistaa koneiden osia, jotka toimitetaan varsinaisesta valmiin tuotteen kokoonpanosta vastaavalle yritykselle. Lisäksi konepajojen käyttämät tuotantoprosessit poikkeavat merkittävästi toisistaan. Suomessa toimiva konepajateollisuus voidaan kuitenkin karkeasti jakaa viiteen eri alatoimialaan: metallituotteiden valmistus, koneiden valmistus, sähkötekniisten tuotteiden valmistus, kulkuneuvojen valmistus, instrumenttien ja muiden hienomekaanisten tuotteiden valmistus. Suomessa suurin näistä alatoimialoista on metallituotteiden valmistus.[4]

Kokonaisuudessaan konepajateollisuus on Suomessa melko pieni energiankuluttaja: kone- ja metallituotteiden vuonna 2017 käyttämä energiamäärä oli 13178 TJ, joka vastaa noin 2,5 prosenttia koko Suomen teollisuuden käyttämästä energiasta [38]. Konepajateollisuuden Suomessa vuonna 2017 käyttämien eri energialähteiden jakauma on esitetty kuvaajassa 1.



**Kuvaaja 1: Kone- ja metallituoteteollisuuden energiankäytön jakauma energialähteen mukaan Suomessa 2017 [38]**

Kuvaajasta 1 nähdään, että sähkö ja lämpö muodostavat suurimman osan konepajateollisuuden energiankäytöstä. Kuvaajassa esiintyvien energialajien lisäksi konepajateollisuus kuluttaa vettä, pääasiassa toimipisteiden talousvetenä, sekä liikennepolttoaineita työkoneita ja logistiikkaa varten. Erilaisten energialajien ja veden käytön jakaumat voi kuitenkin vaihdella huomattavasti alatoimialoittain sekä toimipistekohtaisesti. Yhteistä kaikille alatoimialoille ja toimipisteille kuitenkin on, että niiden energiankulutus muodostuu tilojen lämmityksestä ja jäähdytyksestä, lämpimän veden lämmityksestä, veden käytöstä, ilmastoinnista, valaistuksesta, liikennepolttoaineita kuluttavista koneista sekä varsinaisia tuotantoprosesseja varten tarvittavien koneiden ja laitteiden sähkön ja lämmön kulutuksesta.[4] Toimipisteissä on tuotantotilojen lisäksi vaihteleva määrä erilaisia sosiaalituloja ja toimistorakennuksia, joiden energiankulutus on huomioitava, vaikka niiden osuus koko toimipisteen energiankulutuksesta on pieni. Eri energialajien tyypillisiä käyttökohteita konepajateollisuudessa on esitetty alla olevassa taulukossa.

**Taulukko 2: Konepajateollisuudessa käytettävien energialajien käyttökohteita [4]**

Energialaji	Käyttökohte
Sähköenergia	Valaistus Ilmanvaihtokoneet Sähkölämmittimet Lämmitysjärjestelmän apulaitteet Jäähdytys Työkoneet ja laitteet Paineilmaverkosto Sekalaiset kohteet
(Kauko)lämpö	Tilojen lämmitys Ilmanvaihtokoneiden tuloilman lämmitys
Lämmityspolttoaineet (öljy, pelletti, kaasu)	Tilojen lämmitys Ilmanvaihtokoneiden tuloilman lämmitys Lämpöä tarvitsevat tuotantokoneet ja prosessit (esimerkiksi pintakäsittely, lämpökäsittely, metallien sulatus, hitsaus ja kaasuleikkaus)
Liikennepolttoaineet (moottoripolttoöljy, diesel, moottorikaasu)	Työkoneet (esimerkiksi trukit ja nostimet) Paketti- ja kuorma-autot Henkilöautot

Sähköenergian osalta työkoneiden ja laitteiden osuus sähkönkulutuksesta on yleensä merkittävin ja se voi olla luokkaa 50-75 %:a toimipisteen käyttämästä sähköstä [5,7]. Tuotantokoneiden ja laitteiden lisäksi merkittäviä sähköenergiankulutuksen kohteita ovat valaistus, paineilmaverkosto ja ilmanvaihto [30]. Lämpöenergian osalta tilojen lämmitykseen kuluu yleensä kaikki ostettu lämpö sekä suurin osa lämmityspolttoaineista. Lisäksi erilaiset lämpö- ja pintakäsittelyt sekä sulatusprosessit voivat olla merkittäviä lämmityspolttoaineiden kulutuskohteita [4]. Liikennepolttoaineiden kulutuksen osalta voi olettaa

jokaisen toimipisteen tarvitsevan liikennepolttoaineita erilaisten trukkien ja nostimien ajamiseen. Trukkien ja työkoneiden lisäksi yrityksellä tai konsernissa voi olla myös omistuksessa olevia henkilö-, paketti- ja kuorma-autoja sekä yksityisten ihmisten omistamia henkilöautoja, joiden kuluttamat liikennepolttoaineet laskutetaan yrityksen tai konsernin kautta. Paketti-, henkilö- ja kuorma-autojen liikennepolttoaineiden kulutus voi olla moninkertainen työkoneisiin nähden. Taulukon 2 energialajien lisäksi konepajoissa kuluu vaihteleva määrä vettä. Vettä voi kulua toimipisteissä vain talousvetenä ja lämpimänä käytövetenä tai toimipisteissä voi lisäksi olla paljon vettä vaativia tuotantoprosesseja, kuten vesileikkausta.

Yksittäisen toimipisteen tai koko konsernin tasolla on yleensä melko yksinkertaista saada selvitettyä eri energialajien ja veden kokonaiskulutus esimerkiksi kuukauden tai vuoden tasolla. Energiankulutuksen selvityksessä voidaan käyttää hyväksi jo valmiiksi tehtyjä energiankulutuksen raportteja, henkilökunnan haastatteluja, sekä yrityksen tai konsernin kirjanpitoa, jossa pitäisi olla kirjattuna tiedot myös eri energialajien ja veden ostoista. Kokonaiskulutuksien tarkastelu ei kuitenkaan anna järin hyödyllistä tietoa toimipisteen energian ja veden käytöstä. Hyödyllisempää tietoa varten on toimipisteelle muodostettava mahdollisimman tarkka käytön jakauma eri energialajien ja veden osalta. Jakaumat on mahdollista muodostaa esimerkiksi taselaskennan avulla. Konepajateollisuuden energiankäytön monimuotoisuudesta johtuen, jaetaan konepajateollisuuden toimipisteiden energiankäyttö tässä tutkimuksessa kolmeen helpommin käsiteltävään osa-alueeseen: kiinteistöenergian kulutus, työkoneiden ja laitteiden energiankulutus ja muut energiankulutuskohteet

Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan sitä mihin ja millaista energiaa eri osa-alueissa varsinaisesti kuluu sekä miten eri osa-alueiden energiankulutus on yksinkertaisesti mallinnettavissa niin sanottuna stationäärinä. Osa-alueiden ja niiden energiankulutuksen tarkastelu pyritään pitämään yksinkertaisena. Tarkoituksena on esitellä laskentakaavat tai muut arviointitavat, joiden avulla voi muodostaa konepajateollisuuden toimipisteen energia- ja vesitaseet. Eri osa-alueiden energiankulutuksen mallintamiseen käytetään pääasiassa YM:n julkaisuista löytyviä laskentatapoja.

## **3.2 Kiinteistöenergian kulutuskohteet**

Kiinteistöenergiasta puhuttaessa käytetään yleisesti ilmaisua LVI-järjestelmä ja se pitää sisällään kiinteistön ilmanvaihto-, lämmitys- ja vesijärjestelmät [39]. Vettä voi kuitenkin kulua konepajateollisuuden toimipisteissä kiinteistön lisäksi myös tuotantoprosesseihin, minkä takia veden kulutusta ei ole sisällytetty kiinteistöenergiaksi tässä tutkimuksessa. Kiinteistön talousvesiverkoston tarvitsema sähkö- ja lämpöenergia luokitellaan kuitenkin

kiinteistöenergiaksi. Kiinteistöenergiaksi luokitellaan tässä tutkimuksessa ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmien energiankulutuksen lisäksi myös toimipisteen valaistuksen kuluttama sähköenergia. Konepajateollisuuden toimipisteissä tilojen jäähdytystä oletetaan tässä tutkimuksessa tarvittavan vain erilaisten toimistorakennuksien jäähdyttämiseen, jolloin se muodostaa vain marginaalisen osan koko toimipisteen energiankulutuksesta. Tämän takia tilojen jäähdytys jätetään tässä tutkimuksessa tarkastelematta.

### 3.2.1 Ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutuksen määrittäminen

Ilmanvaihtojärjestelmä pitää sisällään kaikki ne koneet ja laitteet, jotka tarvitaan pitämään tilan ilmanlaatu halutulla tasolla. Teollisuusrakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän rakenteeseen ja energiankulutukseen vaikuttaa oleellisesti rakennuksen koko, käyttötarkoitus ja se, miten rakennuksen ilmanvaihto on toteutettu [39]. Ilmanvaihdon toteutukseen vaikuttaa asetetut laatutavoitteet sekä toimiala ja toimipaikka kohtaiset vaatimukset [39]. Pääperiaatteet teollisuusrakennuksen ilmavirtojen mitoittamiseen ovat [39]:

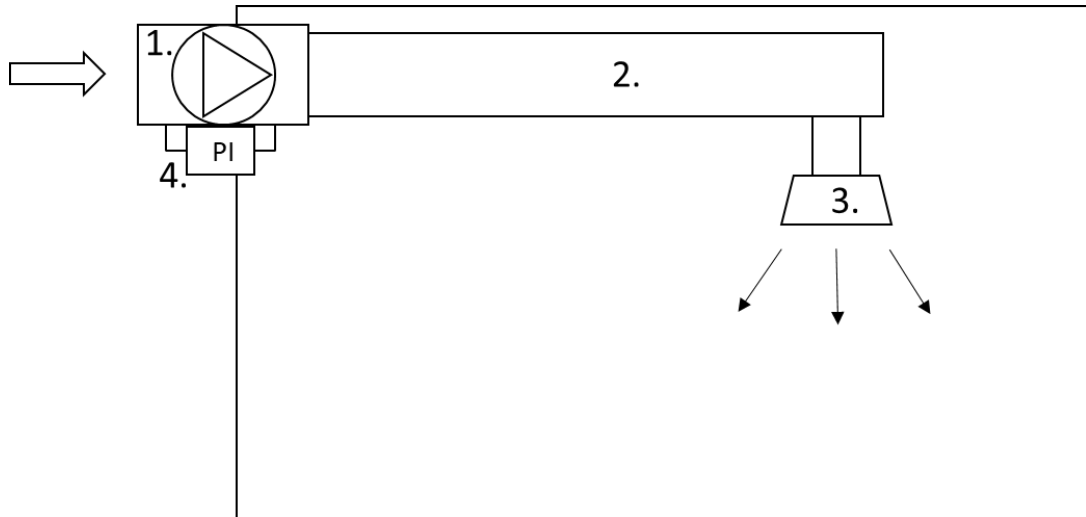
- ilmaa vaihdetaan niin paljon kuin epäpuhtauksien ja kuormitustekijöiden hallitseminen vaatii
- rakennukseen tuodaan yhtä paljon ilmaa kuin poistot ja prosessit sitä vaativat
- ilmaa vaihdetaan niin paljon kuin määräyksen sitä vaativat
- ilmanlaatu on pidettävä tyydyttävänä

Käytännössä teollisuusrakennuksissa on lähes aina käytössä koneellinen ilmanvaihto, mikä tarkoittaa, että järjestelmä tarvitsee mekaanista energiaa ilmanvaihdon aikaansaamiseksi [39,40]. Koneellisen ilmanvaihtojärjestelmän tarvitseman mekaanisen energian tuottoon käytetään lähes poikkeuksetta sähköenergiaa. Ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergian kulutus muodostuu varsinaisista sähköä kuluttavista komponenteista sekä erilaisista muuntajissa syntyneistä häviöistä. Tässä tutkimuksessa muuntohäviöt jätetään kuitenkin huomioimatta. Oleelliseksi ongelmaksi muodostuu se, miten arvioida ilmanvaihtojärjestelmän kuluttaman energian määrää ilman jatkuvaa laitekohtaista tehomitusta.

Ilmanvaihtojärjestelmän energian kulutuksen selvittämisen kannalta pitää tietää millaisia koneita ja laitteita rakennukseen on sijoitettu ja miten niitä ajetaan. Ilmanvaihtojärjestelmän koneet ja laitteet ovat loppujen lopuksi järjestelmän energiaa kuluttavat osat ja niiden mitoitus, hallinta ja säätö ovat suoraan verrannollisia järjestelmän energian kulutukseen. Suurin osa teollisuudessa käytetyistä ilmanvaihtojärjestelmistä voidaan jakaa seu-

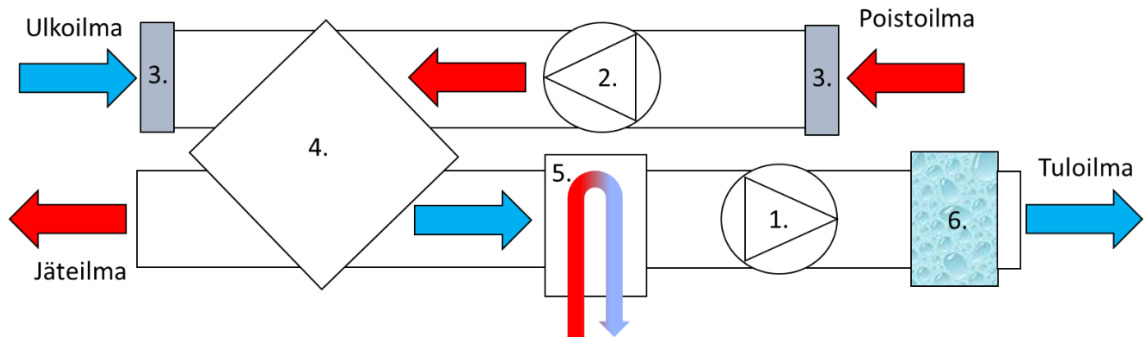


raaviin osiin: ilmanvaihtokoneet (primaariset systeemit), kanaviston (sekundaariset systeemit), ilmanjakolaitteet (päätelaitteet) sekä hallinta- ja säätölaitteet [40]. Järjestelmässä voi lisäksi olla lämmöntalteenottolaitteita, lämmittämiä, pumppuja, suodattimia ja kostuttimia [40]. Alla olevassa kuvassa havainnollistettu yksinkertaistetun ilmanvaihtojärjestelmän osat.



**Kuva 1: Ilmanvaihtojärjestelmän osat. 1. Ilmanvaihtokone 2. Kanavisto 3. Ilmanjakolaite 4. Hallinta- ja säätölaite**

Suurin osa ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutuksesta tapahtuu primaarisessa systeemissä, eli ilmanvaihtokoneissa. Lisäksi hallinta- ja säätölaitteet vaativat pieniä määriä sähköenergiaa tai paineilmaa toimiakseen. Ilmanvaihtojärjestelmän sekundaariset systeemit sekä päätelaitteet eivät itsessään kuluta energiaa, lukuun ottamatta esimerkiksi sähköisiä venttiilejä. Kanavistolla ja päätelaitteilla on silti vaikutus järjestelmän kokonaisenergiankulutukseen, sillä niissä syntyneet painehäviöt joudutaan kompensoimaan ilmanvaihtokoneissa.[40] Systeemin energiankulutuksen laskemisen kannalta on huomio silti kannattavaa kiinnittää pääasiassa ilmanvaihtokoneisiin. Yksinkertaistettu tulo-poisto ilmanvaihtokone ja sen osat on esitelty kuvassa 2. Ilmanvaihtokoneissa ja siten koko ilmanvaihtojärjestelmässä kuluu yleensä sekä lämpö- että sähköenergiaa. Lämpöä kuluu Suomen olosuhteissa tuloilman lämmittämiseen ja sähköenergiaa puhaltimia pyörittävissä sähkömoottoreissa sekä erilaisissa apulaitteissa, kuten lämmöntalteenottolaitteissa ja puhaltimien tehonsäätölaitteissa. Ilman lämmitykseen ilmanvaihtokoneissa vaadittava energia lasketaan kuitenkin YM:n asetuksen mukaan kuuluvaksi osaksi lämmitysjärjestelmän energiankulutusta [41]. Näin laskettuna ilmanvaihtokoneiden ja koko ilmanvaihtojärjestelmän voidaan laskea kuluttavan vain sähköenergiaa.



**Kuva 2: Yksinkertaistettu kuva ilmanvaihtokoneesta. 1. Tuloilmapuhallin 2. Poistoilmapuhallin 3. Suodattimet 4. Lämmöntalteenottolaitteisto 5. Tuloilman lämmitin 6. Tuloilman kostutin**

YM:n ohjeiden mukaan ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergiankulutus voidaan laskea kaavalla:

$$W_{ilmanvaihto} = \sum SFPq_v\Delta t + W_{iv,muu} \quad (1)$$

jossa  $W_{ilmanvaihto}$  on ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergian kulutus [kWh],  $SFP$  on puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho, [kW/(m<sup>3</sup>/s)],  $q_v$  on puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen ilmavirta [m<sup>3</sup>/s],  $\Delta t$  on puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen käyttöaika laskentajaksolla [h] ja  $W_{iv,muu}$  on muu ilmanvaihtojärjestelmän sähkökulutus [kWh]

Kaavassa (2) esiintyvä termi  $SFP$  saadaan laskettua kaavalla:

$$SFP = \frac{P_{puh}}{q_v} \quad (2)$$

jossa  $P_{puh}$  on puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen sähköteho tehonsäätölaitteineen [kW] ja  $q_v$  puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen ilmavirta [m<sup>3</sup>/s].

Kaavassa (2) esiintyvät termi  $W_{iv,muu}$  voidaan laskea kaavalla:

$$W_{iv,muu} = \sum P_{muu}\Delta t/1000 \quad (3)$$

jossa  $P_{muu}$  on muiden ilmanvaihtojärjestelmien kuin puhaltimien ja puhaltimien tehonsäätölaitteiden sähköteho [W],  $\Delta t$  on ajanjakson pituus [h] ja 1000 on kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi.

Teollisen kiinteistön ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutuksen laskemisen kannalta on tärkeä ottaa huomioon, että rakennuksen ilmavirtojen arvot ja järjestelmän energiankulutus voivat vaihdella esimerkiksi vuodenajan, vuorokaudenajan, rakennuksen ilmapaineen ja rakennuksen kuormitustason suhteen [40].

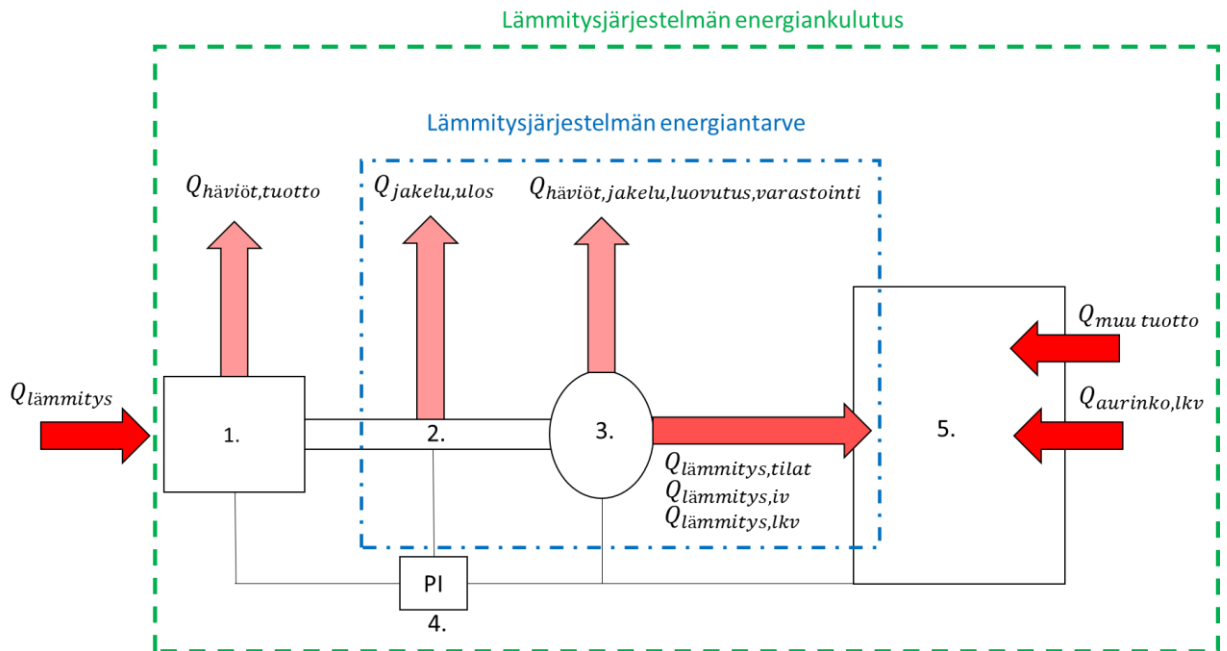
### 3.2.2 Lämmitysjärjestelmän energiankulutuksen määrittäminen

Rakennuksen lämmitysjärjestelmä koostuu niistä koneista ja laitteista, joita tarvitaan tilojen lämmityksessä, ilmanvaihdon lämmityksessä ja lämpimän käyttöveden valmistuksessa [40]. Ilmanvaihtojärjestelmän tavoite, on teollisen kiinteistön lämmitys- ja lämmönjakojärjestelmä mahdollista toteuttaa monella eri tavalla. Rakennuksen lämmitysjärjestelmän rakenteeseen ja energiankulutukseen vaikuttavat ainakin kohteessa vallitsevat ilmasto-olosuhteet, asetetut tavoitearvot, toimialakohtaisten päästöjen ja prosessien vaikutus lämmitys- ja lämmönjakojärjestelmään sekä rakennuksen dimensiot, rakenteet ja materiaalit [39]. Loppujen lopuksi lämmitysjärjestelmän tehtävä on luoda kelvolliset työolosuhteet työntekijöille ja erityisesti tehdashalleissa tällaisten olosuhteiden luominen on hyvin toimipistekohtaista, jolloin lopullinen vastuu kelvollisten olosuhteiden luonnista on jälleen kerran tilan omistajalla [39].

Ilmanvaihtojärjestelmien tavoite on erilaisia lämmitysjärjestelmiä kehitetty aikojen saatossa lukuisia erilaisia. Erilaiset lämmitysjärjestelmät poikkeavat toisistaan huomattavasti sen suhteen millaisella laitteistoilla niissä tuotetaan lämpö, mitä lämpöenergian lähteitä niissä voi käyttää sekä miten tuotettu lämpö siirretään varsinaiseen lämmitettävään tilaan. Kaikkien erilaisten järjestelmien energiankulutus muodostuu kuitenkin aina lämmöntuotosta, lämmönjaosta sekä häviöistä [41].

Lämmitysjärjestelmästä riippuen voi sen energiankulutus muodostua pääasiassa vain sähköenergiasta, vain lämpöenergiasta tai järjestelmä voi kuluttaa merkittäviä määriä sekä sähkö- että lämpöenergiaa. Lämmitysjärjestelmän energiankulutuksen tarkastelua varten voidaan se jakaa osiin samalla tavoin kuin ilmanvaihtojärjestelmä: lämmöntuottolaitteistoon (primaariset systeemit), lämpöverkoston (sekundaariset systeemit), lämmönjakolaitteisiin (päätelaitteet) ja hallinta- ja säätölaitteistoon [40].

YM:n ohjeesta mukailtu lämmitysjärjestelmän energiankulutuksen taselaskentaperiaate on esitetty kuvassa 3.



**Kuva 3: lämmitysjärjestelmän energiankulutuksen laskentaperiaate. 1. lämmön- tuottolaite, 2. lämpöverkosto, 3. päätelaite, 4. hallinta- ja säätölaitteisto 5. lämmitettävä rakennus [41]**

Kuten aiemmin mainittiin, muodostuu lämmitysjärjestelmän energiankulutus sekä sähkö- että lämpöenergian kulutuksesta. Esitellään ensin lämmitysjärjestelmän lämpöenergian kulutuksen laskeminen. Kokonaisuudessaan rakennuksen lämpöenergian tarve voidaan matemaattisesti esittää muodossa:

$$RAK_Q = Q_{\text{lämmitys,tilat}} + Q_{\text{lämmitys,iv}} + Q_{\text{lämmitys,lkv}} \quad (4)$$

jossa  $RAK_Q$  on rakennuksen lämpöenergiankulutus [kWh/a],  $Q_{\text{lämmitys,tilat}}$  on tilojen lämmityksen lämpöenergian tarve [kWh/a],  $Q_{\text{lämmitys,iv}}$  on ilmanvaihdon lämmityksen lämpöenergian tarve [kWh/a] ja  $Q_{\text{lämmitys,lkv}}$  lämpimän käyttöveden lämmityksen lämpöenergian tarve [kWh/a].

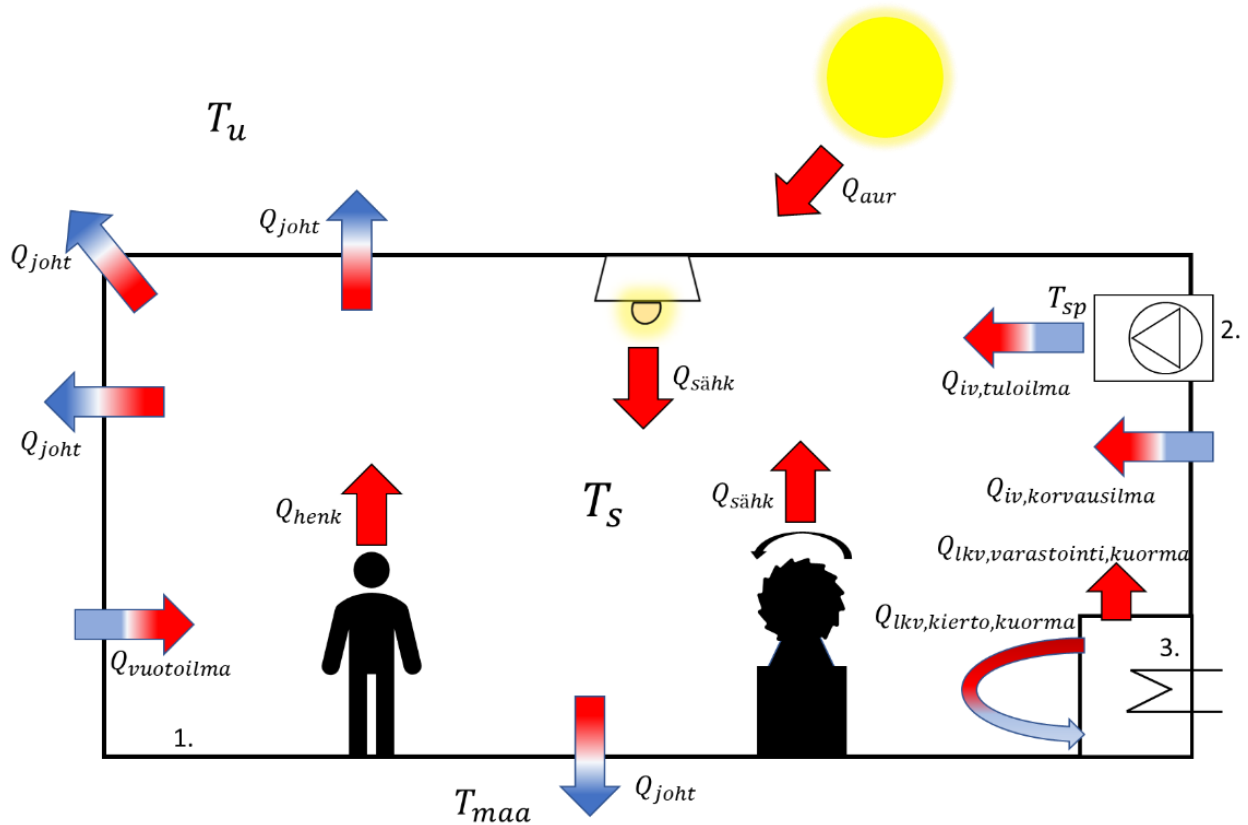
Yhtälön (4) komponentit koostuvat lämmitettävien kohteiden teoreettisesta nettolämpöenergian tarpeesta sekä kohteita lämmittävissä järjestelmissä syntyneistä häviöistä. Esimerkiksi tilan lämmitysenergia  $Q_{\text{lämmitys,tilat}}$  voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{\text{lämmitys,tilat}} = \frac{Q_{\text{lämmitys,tilat,netto}}}{\eta_{\text{lämmitys,tilat}}} + Q_{\text{jakelu,ulos}} + Q_{\text{varastointi,ulos}} \quad (5)$$

jossa  $Q_{\text{lämmitys,tilat}}$  on tilojen lämmityksen lämpöenergian tarve, joka katetaan laskettavalla lämmön jakelujärjestelmällä [kWh/a],  $Q_{\text{lämmitys,tilat,netto}}$  on tilojen lämmitysenergian nettotarve, joka katetaan laskettavalla lämmön jakelujärjestelmällä [kWh/a],  $Q_{\text{jakelu,ulos}}$  on lämmön jakelujärjestelmän lämpöhäviö lämmittämättömään tilaan

[kWh/a],  $Q_{varastointi,ulos}$  on laskettavan lämmön jakelujärjestelmän varastoinnin lämpöhäviö [kWh/a] ja  $\eta_{lämmitys,tilat}$  on laskettavan lämmön jakelujärjestelmän hyötysuhde.

Oleellisin osa yhtälössä (5), on tilan lämmitysenergian nettotarpeen muodostuminen, jonka periaate on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4: Lämmitettävän tilan lämpöenergian nettotarpeen muodostuminen 1. rakennusvaippa 2. Ilmanvaihtokone 3. lämminkäyttövesivaraaja**

Sama voidaan esittää matemaattisesti muodossa:

$$Q_{lämmitys,tilat,netto} = Q_{tila} - Q_{sis.lämpö} \quad (6)$$

jossa  $Q_{lämmitys,tilat,netto}$  on tilojen lämmitysenergian nettotarve [kWh],  $Q_{tila}$  on tilojen lämmitysenergian tarve [kWh] ja  $Q_{sis.lämpö}$  on lämpökuormat, joka hyödynnetään lämmityksessä, [kWh].

Yhtälön (6) termien  $Q_{tila}$  ja  $Q_{sis.lämpö}$  sekä yhtälön (5) termien  $Q_{jakelu,ulos}$  ja  $Q_{varastointi,ulos}$  laskentakaavat ovat liitteessä 1.

Yhtälön (4) termi  $Q_{lämmitys,iv}$  voidaan esittää yhtälön (5) tavoin muodossa:

$$Q_{lämmitys,iv} = \frac{Q_{iv,netto}}{\eta_{lämmitys,iv}} + Q_{jakelu,ulos} + Q_{varastointi,ulos} \quad (7)$$

jossa  $Q_{iv,netto}$  on ilmanvaihtokoneen lämpöenergian nettotarve [kWh] ja  $\eta_{lämmitys,iv}$  on ilmanvaihtokoneen lämmityspatterille lämpöä kuljettavan lämmönjako- ja luovutusjärjestelmän hyötysuhde [42].

Ilmanvaihdon lämpöenergian tarpeella tarkoitetaan sitä lämpöenergian määrää, joka tarvitaan lämmittämään ilmanvaihtokoneiden tuloilmakanavan läpi tuleva ulkoilmaa haluttuun sisäänpuhalluslämpötilaan asti. Ilmanvaihtokoneen lämpöenergian tarve tietyllä tarkastelujaksolla voidaan laskea konekohtaisesti kaavalla:

$$Q_{iv,netto} = \rho_i c_{pi} q_{v,tulo,avg} \left( (T_{sp} - \Delta T_{puhallin}) - T_{lto} \right) \Delta t / 1000 \quad (8)$$

jossa  $\rho_i$  on ilman tiheys [1,2 kg/m<sup>3</sup>],  $c_{pi}$  on ilman ominaislämpökapasiteetti [1000 J/kgk],  $q_{v,tulo,avg}$  on tuloilmavirran keskimääräinen arvo tarkastelujaksolla [m<sup>3</sup>/s],  $T_{sp}$  on sisäänpuhalluslämpötila [°C],  $\Delta T_{puhallin}$  on lämpötilan nousu puhaltimessa [°C],  $T_{lto}$  on lämmöntalteenottolaitteen jälkeinen lämpötila [°C],  $\Delta t$  on ajanjakson pituus [h] ja 1000 on kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi.

Kaavan (8) käytön haasteena on termin  $q_{v,tulo,avg}$  määrittäminen muuttuvailmavirtaisen ilmanvaihtojärjestelmän tapauksessa. Mikäli ilmanvaihtojärjestelmä on aikaohjattu ja varustettu tehonsäätölaitteistolla, tulisi selvittää eri tehoasetusten ilmavirtojen arvot ja niiden käyntiajat. Painesäädettyjen ilmanvaihtojärjestelmien tarkkaan mallintamiseen tulisi käyttää dynaamisia menetelmiä tai tarkoitukseen suunniteltuja ohjelmistoja. Tässä tutkimuksessa joudutaan kuitenkin käyttämään yksinkertaisia menetelmiä tutkimuksen laajuuden rajaamiseksi.

Termille  $\Delta T_{puhallin}$  voidaan käyttää arvoa 0,5 °C. Mikäli ilmanvaihtokoneessa ei ole lämmöntalteenottoa käytetään kaavassa (8) termin  $T_{lto}$  tilalla ulkolämpötilaa. Mikäli ilmanvaihtokoneessa on lämmöntalteenottolaitteisto, saadaan  $T_{lto}$  laskettua kaavalla:

$$T_{lto} = T_u + \frac{\phi_{lto}}{\rho_i c_{pi} q_{v,tulo,avg}} \quad (9)$$

jossa  $T_u$  on ulkoilman lämpötila [°C] ja  $\phi_{lto}$  on lämmöntalteenotolla talteenotettu keskimääräinen teho tarkastelu ajanjaksolla [W].

Tässä tutkimuksessa käytetty ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenottolaitteistolla saatavan tehon laskentatapa on esitelty liitteessä 2.

Kaavan (4) viimeinen määriteltävä termi on  $Q_{lämmitys,lkv}$ , joka voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{lämmitys,lkv} = \frac{Q_{lkv,netto}}{\eta_{lkv,siirto}} + Q_{lkv,varastoinnit} + Q_{lkv,kierto} \quad (10)$$

jossa  $Q_{\text{l\u00e4mmitys, lkv}}$  on l\u00e4mpim\u00e4n k\u00e4ytt\u00f6veden l\u00e4mp\u00f6energian tarve [kWh/a],  $Q_{\text{lkv, netto}}$  on l\u00e4mpim\u00e4n k\u00e4ytt\u00f6veden l\u00e4mp\u00f6energian nettotarve [kWh/a],  $\eta_{\text{lkv, siirto}}$  on l\u00e4mpim\u00e4n k\u00e4ytt\u00f6veden siirron hy\u00f6tysuhde,  $Q_{\text{LKV, h\u00e4vi\u00f6t}}$  on l\u00e4mpim\u00e4n k\u00e4ytt\u00f6vesiverkoston kokonaisl\u00e4mp\u00f6h\u00e4vi\u00f6t [kWh/a],  $Q_{\text{LKV, varastointi}}$  on l\u00e4mminvesivaraajassa tapahtuvat l\u00e4mp\u00f6h\u00e4vi\u00f6t [kWh/a] ja  $Q_{\text{LKV, kierto}}$  on l\u00e4mpim\u00e4n k\u00e4ytt\u00f6veden kiertojohtoon l\u00e4mp\u00f6h\u00e4vi\u00f6t [kWh/a].

Ymp\u00e4rist\u00f6ministeri\u00f6n mukaiset l\u00e4mpim\u00e4n k\u00e4ytt\u00f6veden tarvitseman l\u00e4mp\u00f6energian laskentakaavat ovat liitteess\u00e4 3. Loppujen lopuksi edell\u00e4 mainittujen yht\u00e4l\u00f6iden avulla on mahdollista m\u00e4\u00e4ritt\u00e4\u00e4 rakennuksen l\u00e4mp\u00f6energian tarve  $RAK_Q$ , joka pit\u00e4\u00e4 tuottaa l\u00e4mm\u00f6ntuottolaitteistolla. L\u00e4mm\u00f6ntuottolaitteisto on kiinteist\u00f6n l\u00e4mm\u00f6ntuotantolaitteisto kattila, kaukol\u00e4mm\u00f6nvaihdin, l\u00e4mp\u00f6pumppu, aurinkoker\u00e4in tai muu l\u00e4mm\u00f6ntuotolaite. Muiksi l\u00e4mm\u00f6ntuottolaitteiksi voidaan lukea esimerkiksi kiertoilmal\u00e4mmittimet ja s\u00e4teilyl\u00e4mmittimet. L\u00e4mm\u00f6ntuottolaitteistosta riippumatta l\u00e4mm\u00f6ntuotossa syntyy aina h\u00e4vi\u00f6it\u00e4, jolloin rakennuksen tarvitseman l\u00e4mp\u00f6energian todellinen kokonaistarve voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{\text{l\u00e4mmitys}} = \frac{Q_{\text{l\u00e4mmitys, tilat}} + Q_{\text{l\u00e4mmitys, iv}} + Q_{\text{l\u00e4mmitys, lkv}} - Q_{\text{aurinko, lkv}} - Q_{\text{muu tuotto}}}{\eta_{\text{tuotto}}} \quad (11)$$

jossa  $Q_{\text{l\u00e4mmitys}}$  on l\u00e4mmitysjarjestelm\u00e4n l\u00e4mp\u00f6energian kulutus [kWh/a],  $Q_{\text{aurinko, lkv}}$  aurinkoker\u00e4imill\u00e4 tuotettu energia l\u00e4mpim\u00e4an k\u00e4ytt\u00f6veteen [kWh/a],  $Q_{\text{muu tuotto}}$  on muilla mahdollisilla tuottojarjestelmill\u00e4 tuotettu energia [kWh/a] ja  $\eta_{\text{tuotto}}$  on l\u00e4mmitysenergian tuoton hy\u00f6t\u00f6suhde tilojen, ilmanvaihdon ja l\u00e4mpim\u00e4n k\u00e4ytt\u00f6veden l\u00e4mmityksess\u00e4.

Kaavan (11) termi  $Q_{\text{muu tuotto}}$  pit\u00e4\u00e4 sis\u00e4ll\u00e4\u00e4n ainakin mahdollisella l\u00e4mp\u00f6pumppujarjestelm\u00e4ll\u00e4 tuotetun l\u00e4mp\u00f6energian m\u00e4\u00e4r\u00e4n.

L\u00e4mmitysjarjestelm\u00e4n s\u00e4hk\u00f6energian kulutus voidaan laskea kaavalla:

$$W_{\text{l\u00e4mmitys}} = W_{\text{tilat}} + W_{\text{tuotto, apu}} + W_{\text{lkv, pumppu}} + W_{\text{aurinko, pumput}} + W_{\text{LP, l\u00e4mmitys}} \quad (12)$$

jossa  $W_{\text{l\u00e4mmitys}}$  on l\u00e4mmitysjarjestelm\u00e4n s\u00e4hk\u00f6energian kulutus [kWh/a],  $W_{\text{tilat}}$  on l\u00e4mm\u00f6njakojarjestelm\u00e4n apulaitteiden s\u00e4hk\u00f6energian kulutus [kWh/a],  $W_{\text{tuotto, apu}}$  on l\u00e4mm\u00f6ntuottojarjestelm\u00e4n apulaitteiden s\u00e4hk\u00f6energian kulutus [kWh/a],  $W_{\text{lkv, pumppu}}$  l\u00e4mpim\u00e4n k\u00e4ytt\u00f6veden kiertopumpun s\u00e4hk\u00f6energian kulutus [kWh/a],  $W_{\text{aurinko, pumput}}$  aurinkol\u00e4mp\u00f6jarjestelm\u00e4n pumppujen s\u00e4hk\u00f6energian kulutus [kWh/a] ja  $W_{\text{LP, l\u00e4mmitys}}$  l\u00e4mp\u00f6pumppujarjestelm\u00e4n s\u00e4hk\u00f6energian kulutus [kWh/a].

Kaavassa (12) esiintyvien termien laskentakaavat ovat liitteess\u00e4 5.

### 3.2.3 Lämmitystehon laskenta

Kiinteistön teoreettisen lämmitystehon määrittäminen ei suoranaisesti liity kiinteistön energiankulutuksen laskemiseen, mutta se antaa hyödyllistä tietoa koskien kiinteistön energiatehokkuutta. Lämmitystehon laskennan tarkoituksena on tässä tutkimuksessa antaa viitteitä siitä, onko kiinteistön lämmöntuotantolaitteisto mitoitettu oikein rakennus- tai käyttöönottovaiheessa. Käytännössä laskenta tapahtuu YM:n ohjeiden mukaisesti eli lämmitysjärjestelmän määrittämisen jälkeen lasketaan järjestelmän tarvitsema lämpöteho, jotta saadaan tuotettua halutut oleskeluolosuhteet ulkolämpötilan ollessa  $-32\text{ °C}$ . Tarvittavan lämpötehon laskenta on pääperiaatteiltaan samanlainen kuin lämpöhäviöiden laskenta, ainoastaan käytettävä ulkolämpötila muuttuu ja aikayksikkö puuttuu. Esimerkiksi johtumislämpöteho rakenneosien läpi voidaan laskea kaavalla:

$$\phi_i = \sum U_i A_i (T_s - T_{u,mit}) \quad (13)$$

jossa  $\phi_i$  on johtumislämpöteho rakenneosan  $i$  läpi [W],  $U_i$  on rakenneosan  $i$  lämmönläpäisykerroin [W/(m<sup>2</sup>K)],  $A_i$  on rakenneosan  $i$  pinta-ala [m<sup>2</sup>] ja  $T_{u,mit}$  on mitoittava ulkoilman lämpötila [°C]

Lisäksi on laskettava lämpimän käyttöveden lämmityksen lämpötehon tarve, joka muista lämpötehon tarpeen laskentatavoista poiketen, ei riipu ulkolämpötilasta. Lämpimän käyttöveden lämmityksen tehontarve lasketaan kaavalla:

$$\phi_{lkv} = \rho_v c_{pv} q_{v,klv} (T_{lkv} - T_{kv}) + \phi_{lkv,kiertohäviö} \quad (14)$$

jossa  $\phi_{lkv}$  on lämpimän käyttöveden tehontarve [kW],  $\rho_v$  on veden tiheys [1000 kg/m<sup>3</sup>],  $c_{pv}$  on veden ominaislämpökapasiteetti [4,2 kJ/(kgK)],  $q_{v,klv}$  on lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaama [m<sup>3</sup>/s],  $T_{lkv}$  on lämpimän käyttöveden lämpötila [°C],  $T_{kv}$  on kylmän käyttöveden lämpötila [°C] ja  $\phi_{lkv,kiertohäviö}$  on lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviöteho [kW].

Termille  $q_{v,klv}$  on yksinkertaisinta määrittellä arvio taulukoiden ja kuvaajien avulla, jotka löytyvät YM:n asetuksesta vesi- ja viemärlaitteistosta. Tarkemman tiedon puutteessa lämpimän käyttöveden ja käyttöveden lämpötilan erotukselle,  $(T_{lkv} - T_{kv})$ , voidaan käyttää arvoa  $50\text{ °C}$ . Termille  $\phi_{lkv,kiertohäviö}$  voidaan käyttää taulukoituja arvoja.

### 3.2.4 Valaistusjärjestelmät

Valaistusjärjestelmän tehtävänä toimistoissa ja teollisissa kiinteistöissä on luoda turvaliset ja mukavat työolosuhteet työntekijöille [39]. Konepajateollisuuden toimipisteen va-



laistujärjestelmä koostuu yleensä ulkovalaistuksesta, toimiston valaistuksesta ja tuotantotilan sisävalaistuksesta sekä mahdollisesti erillisistä työvaloista [39]. Valaistusjärjestelmän energiankulutuksen arviointia varten riittää, kun tunnetaan valaistusjärjestelmän sähköteho, ohjaustapa ja käyttöaika. Valaisimien tehon, ohjaustavan ja käyttöajan selvityksen jälkeen voidaan koko järjestelmän energiankulutus laskea yksinkertaisesti kaavalla:

$$W_{valaistus} = \frac{\sum P_{valaistus} A_{huone} \Delta t f}{1000} \quad (15)$$

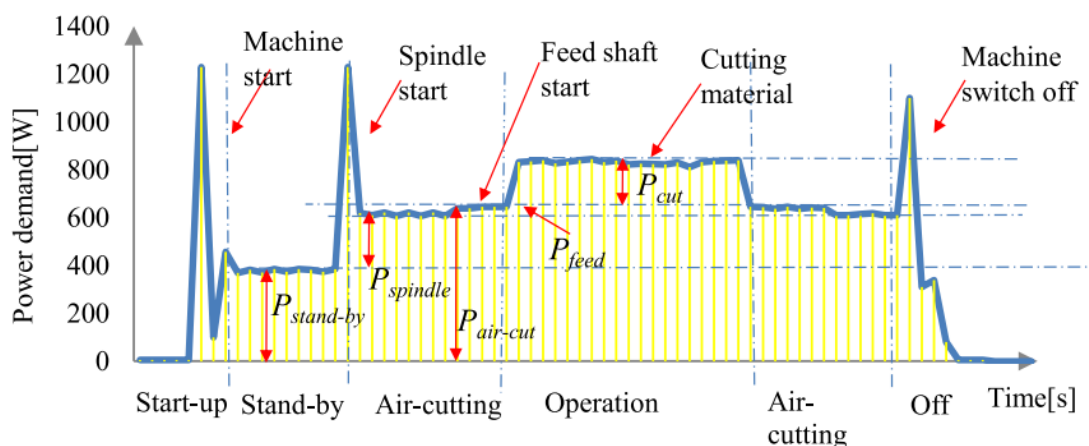
jossa  $W_{valaistus}$  on valaistuksen sähköenergian kulutus [kWh],  $P_{valaistus}$  on valaistavan tilan valaistuksen kokonaissähköteho huonepinta-alaa kohti [W/hum<sup>2</sup>],  $A_{huone}$  on valaistavan tilan huonepinta-ala [hum<sup>2</sup>],  $\Delta t$  on valaistuksen käyttöaika ja  $f$  on valaistuksen ohjaustavasta riippuva ohjauskerroin. [41]

### 3.3 Työkoneiden ja laitteiden energiankulutus

Työkoneilla ja laitteilla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa konepajoissa sijaitsevia laitteita, joiden tarkoituksena on tuottaa raaka-aineista (metalli tai muovi) korkea-arvoisempia tuotteita. Raaka-aineiden prosessointia kallisarvoisemmiksi tuotteiksi kutsutaan myös arvonnäykykseksi. Käytännössä kaikki moderneissa konepajoissa käytössä olevat arvonnäykyksen menetelmät tehdään prosesseilla, joiden toteutus vaatii työntekijän työpanoksen lisäksi ainakin jonkin muun energiamuodon (kemiallinen energia tai mekaaninen energia). Mekaaninen energia on yleensä sähköenergiaa, jota kuluu tuotantokoneissa ja laitteissa hallinta- ja säätölaitteisiin, voimansiirtoon ja varsinaiseen toimilaitteeseen sekä mittaus-elementteihin ja häviöihin. Kemiallisen energian kulutus muodostuu polttoaineista, joiden polttamisella tuotetaan haluttuun kappaleeseen riittävä lämpötila, esimerkiksi valu- tai kuivausprosesseja varten, sekä lämmitysprosessien häviöistä. Erilaisia konepajateollisuudessa esiintyviä tuotantoprosesseja ovat ainakin: valuprosessit, deformaatioprosessit, metallilevyjen muokausprosessit, koneistusprosessit, leikkausprosessit, liitäntäprosessit ja pintakäsittelyprosessit.[3]

Prosessien vaatiman energian voidaan teoriassa ajatella muodostuvan vain siitä energiasta, joka vaadittaisiin halutun muodonmuutoksen aikaansaamiseksi. Tietyn muodonmuutoksen aikaansaamiseksi vaadittavan teoreettisen minienergian määrittäminen on kuitenkin osoittautunut erittäin haasteelliseksi ja käytännössä aiheesta ei ole vielä vakiintunutta tietoa [5]. Selvää on kuitenkin, että kaikki tietyn muodonmuutoksen aikaansaamista varten suunnitellut koneet tai laitteet kuluttavat paljon enemmän energiaa työstettävää kappaletta kohti, kuin mitä työstettävän kappaleen teoreettinen muodonmuutoksen vaatima

minimienergia olisi. Käytännössä tuotantokoneen tai laitteen energiankulutus muodostuu itse muodonmuutoksen aikaansaamisen lisäksi käynnistyksestä, tyhjäkäynnistä, erilaisten apulaitteiden energiankulutuksesta sekä kaikissa näistä osa-alueista tapahtuvista energiahäviöistä [7]. On arvioitu, että tyypillisissä konepajateollisuuden käytössä olevissa koneissa, vain noin 15-25 %:a niiden kuluttamasta energiasta menee varsinaisen muodonmuutoksen aikaansaamiseksi [43,44]. Alla esimerkki todellisen CNC-koneen tehon tarpeesta koneistusprosessin aikana.



**Kuvaaja 2: Esimerkki todellisen CNC-koneen sähkötehon tarpeesta tuotantoprosessin aikana [7]**

Kuvaajasta 2 voidaan todeta, että laitteen todellisesta energiankulutusprofiilista voidaan erottaa lukuisia erilaisia diskreettejä tiloja, joissa laitteen vaatima teho vaihtelee. Energiankulutuksen ja tehon tarpeen määrittäminen on hankaloitettavaa lisäksi se, että erityisesti työstötilan tehontarve ei itsessään ole vakio vaan siihen vaikuttaa monet parametrit, kuten työstettävän kappaleen paksuus ja halutun muodonmuutoksen dimensiot. Lisäksi konepajateollisuudessa on käytössä niin monia erilaisia tuotantolaitteita ja prosesseja, että mikään yksittäinen matemaattinen malli ei riitä kuvaamaan kaikkia laitetyppejä. Aihetta tutkivat tutkimukset painottavat energian kulutukseen liittyvien standardien luomisen tärkeyttä, jotta laitteiden energiatehokkuuden määrittäminen olisi helpompaa. [5,7,8,9]

Yksittäisen tuotteen valmistamiseen tarvittavan energian tai tietyn jatkuvaa prosessia tuottavan laitteen tunnin aikana kuluttaman energian tarkka määrittäminen on käytännössä vain konekohtaisella jatkuvalla mittauksella [5]. Työkoneiden ja laitteiden energiankulutuksen matemaattista mallintamista hankaloittaa energiankulutukseen vaikuttavien parametrien määrityksen haasteellisuus [7]. Tehtyjen energiankulutusta arvioivien mallien käyttökelpoisuutta vähentää lisäksi suuret vaihtelut esimerkiksi työntekijöiden käyttötottumuksissa ja tuotannon aikataulutuksessa sekä läpinäkyvyyden puute erilaisten mallien julkaisuissa [5].

Kaiken kaikkiaan työkoneiden ja laitteiden energiankulutuksen mallinnus on vielä niin kehittyvä tutkimuskohde, että tässä tutkimuksessa ei pyritä käyttämään matemaattisia malleja työkoneiden ja laitteiden energiankulutuksen arvioimiselle. Mikäli jokin konepajateollisuuden toimipiste haluaa tietää tarkasti, kuinka paljon heidän työkoneensa ja laitteensa vaativat energiaa tuotettua tuotetta kohti, on paras tapa tehdä kattava mittaus-suunnitelma. Esimerkiksi sähköä kuluttavien tuotantolaitteiden energiankulutuksen määrittäminen onnistuu parhaiten laitekohtaisella mittauksella, jossa sähköenergiankulutus mitataan laitekohtaisesti suoraan laitteen syötöstä. Mittaukset vaativat kuitenkin paljon aikaa ja suunnittelua, jonka takia niiden tekeminen tietyn toimipisteen kaikille koneille ja niillä valmistetuille tuotteille voi muodostua hyvin työlääksi.

Koko toimipisteen tasolla tuotantolaitteiden energiankulutuksen laskemiseen käytetään tässä työssä taselaskentaan perustuvaa metodia. Käytännössä työkoneiden ja laitteiden energiankulutus arvioidaan laskemalla ensin kiinteistösähkön ja muiden melko vakiona pysyvien, laskutavaltaan vakiintuneempien ja helpommin laskettavien energiaa kuluttavien kohteiden energiankulutus. Tämän jälkeen saatu tulos vähennetään vuoden aikana ostetusta energiasta ja olettaa lopun energian kuluva tuotantolaitteiden pyörittämiseen.

### **3.4 Muut energiankulutuskohteet**

Kiinteistöenergian ja työkoneiden ja laitteiden energiankulutuksen lisäksi konepajateollisuuden energiankulutuskohteiksi on mahdollista erotella omiksi kokonaisuuksikseen ainakin veden kulutus, paineilman tuotto, liikennepolttoaineiden kulutus ja sekalaiset kohteet. Sekalaisilla kohteilla tarkoitetaan esimerkiksi sosiaalityökohteita ja autojen lämmityspaikkoja. Sekalaisiksi kohteiksi mielletään tässä tutkimuksessa myös toimistorakennusten tietokoneet.

Veden kulutuksen konepajateollisuuden toimipisteessä oletetaan muodostuvan lämpimästä käyttövedestä, talousvedestä ja prosessien tarvitsemasta vedestä. Mikäli kiinteistössä ei ole tarkkoja veden kulutusmittareita jokaiselle vettä kuluttavalle kohteelle, on tiedossa yleensä vain vesilaskusta tai vettä myyvältä taholta saatava tieto veden kokonaiskulutuksesta. Lämpimän käyttöveden kulutuksen arviointia varten on olemassa Motivan julkaisemia ohjeita, joiden avulla voi arvioida lämpimän veden kulutusta rakennuksen bruttopinta-alaa kohti. Talousveden ja prosessien vaatiman veden kulutusta ei tässä työssä lasketa tarkemmin, vaan niiden arviointiin käytetään tarkasteltavan kohteen henkilökunnan haastatteluja.

Paine-ilman tuotto on eroteltu omaksi kokonaisuudekseen johtuen siitä, että paineilman käyttökohteita voi olla työkoneiden lisäksi esimerkiksi lämmitysjärjestelmän paineilma-käyttöiset venttiilit. Paineilmajärjestelmän kuluttama energia muodostuu kompressoreiden sekä kuivausyksikön sähköenergian tarpeesta [45]. Taloudellista laskentaa varten voidaan kiinteistön paineilmakompressoreille laskea tyyppikilvistä arvo:

$$P_{spec} = \frac{\text{sähköinen ottoteho}}{\text{tuotto}} \quad (16)$$

jossa  $P_{spec}$  on kompressorin ominaissähköteho [W/(m<sup>3</sup>/min)] [46].

Kiinteistöjen paineilman tarve ei kuitenkaan ole yleensä vakio, jonka takia paineilma-kompressorit saatetaan varustaa taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajalla varustettuja paineilmakompressoreita voi tyypillisesti ajaa osa-tehoilla alueella 15-100 % nimellistehosta, mutta suositeltavaa on käyttö 40-70 % säätöalueella [45,46]. Pienillä osatehoilla sähkömoottoreiden hyötysuhde alenee merkittävästi, jolloin taajuusmuuttajan käytöstä tulee epätaloudellista [46]. Kaavan (16) käyttö taajuusmuuttajalla varustetun paineilma-kompressorin mallinnuksessa ei ole soveliasta, johtuen nimenomaan sen takia, että hyötysuhde muuttuu merkittävästi osakuormilla ajettaessa. Taajuusmuuttajalla varustetun paineilmakompressorin sähkötehon arvioimisessa tulisi tietää kompressorin keskimääräinen kuormitus ja sen vaatima teho osakuormilla tai vaihtoehtoisesti käyttää jatkuvaa tehomittausta mahdollisimman pitkältä ajalta.

Liikennepolttoaineiden kulutus muodostuu taulukossa 1 mainituista käyttökohteista. Liikennepolttoaineiden kokonaiskulutus on yleensä luettavissa laskuista, mutta varsinaisen jakauman muodostamisen haasteellisuus on tapauskohtaista. Mikäli toimipisteessä ei ole esimerkiksi muita polttoöljyn kulutuskohteita kuin trukit, voidaan kaikki polttoöljyn kulutus allokoida trukeille. Toisaalta jos toimipisteessä on esimerkiksi öljykäyttöinen lämmitysjärjestelmä, joka käyttää samaa öljyä kuin trukit, muodostuu jakauman muodostaminen haasteellisemmaksi. Matemaattisia malleja kuvaamaan esimerkiksi trukin keskimääräistä polttoaineen kulutusta teollisessa toimipisteessä ei esitellä tässä tutkimuksessa vaan liikennepolttoaineiden jakauma tuotetaan haastattelujen ja intuitiivisen päätelyn avulla.

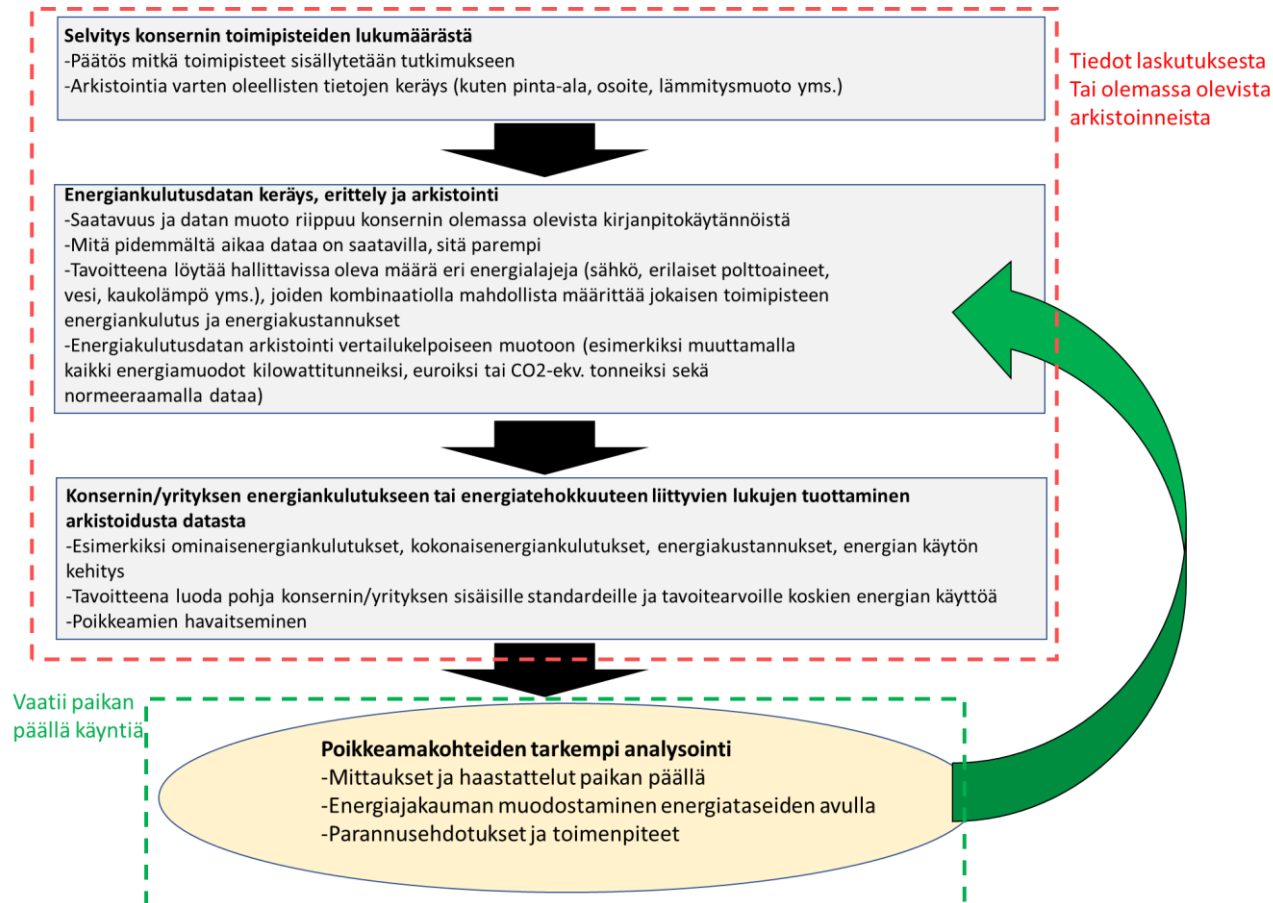
## 4. AINEISTO JA MENETELMÄT

### 4.1 Energiankulutuksen analysointi

Tämän tutkimuksen on tilannut Teiskonen Oy niminen konepajateollisuuden konserni. Työn pääasiallisena tarkoituksena on olla osana konsernin tavoitetta ottaa käyttöön ETJ+ järjestelmä. Teiskonen Oy on monialakonserni, jonka päätoiminta koostuu kone- ja metallituotteiden valmistuksesta. Konserni koostuu hallintoelimestä sekä tytäryhtiöistä. Tytäryhtiöiden toimipisteet ovat yhtä Puolassa sijaitsevaa toimipistettä lukuun ottamatta Suomessa. Puolan yksikköä ei sisällytetä tähän tutkimukseen. Konserniin kuuluvat Suomessa toimivat yritykset ovat metallialan yritys HT Laser Oy, venemoottoreita valmistava Alamarin-Jet Oy, konepajateollisuuden yritys Elekmerk Oy, veneitä valmistava HT Engineering sekä lämpölaitteistoon erikoistunut HT Enerco Oy. Konserniin työllistää yhteensä noin 437 ihmistä (mukaan lukien hallinnon ja Puolan yksikön) ja sen kokonaisliikevaihto oli vuonna 2017 noin 67,7 miljoonaa euroa. Konsernin toimialaksi voidaan kokonaisuudessaan määritellä konepajateollisuus, pitäen kuitenkin mielessä se, että konsernin yritykset eivät vain valmista metallisia komponentteja vaan saattavat tuottaa tuotekehittelyä ja valmiiden tuotteiden kokoonpanoa. HT Laser Oy on koko konsernin ylivoimaisesti suurin yritys ja tutkimuksen pääpaino keskittyykin HT Laserin yksiköiden analysointiin. Alamarin-Jet Oy ja Elekmerk Oy muodostavat myös tärkeän osan Teiskonen Oy:n konsernin liikevaihtoa ja niiden energiankulutukset on huomioitu tutkimuksessa. HT Engineering Oy:n sekä Enerco Oy:n energiankulutuksien tarkastelut jätetään tutkimuksen ulkopuolelle johtuen niiden pienestä merkityksestä koko konsernin tasolla sekä niistä saaduista rajallisista energiankulutukseen liittyvistä tiedoista.

Konsernilla ei tutkimuksen aloitushetkellä ollut nimetty erillisiä henkilöitä energiankulutukseen ja energiakustannuksiin liittyvien tietojen käsittelyyn. Kuukausittaisia tarkkoja kulutustietoja oli olemassa pääasiassa vain sähkön ja kaukolämmön osalta ja muuten energialajien kulutustiedot tiedettiin vain vuoden tasolla tai tietoja ei ollut kirjattu ylös mihinkään. Sähkönkulutuksen osalta oli myös olemassa tuntitehon mittauksia HT Laser Oy:n kiinteistöjen osalta. Vertailukohtana tuloksien analysointia varten on olemassa konsernin teettämä energiakatselmus vuodelta 2015. Energiakatselmuksen teetti Granlund Oy. Granlund Oy:n tekemän katselmuksen tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia, sillä ne perustuvat vuoden 2014 aikaiseen toimintaan, jolloin konsernin toimipisteiden lukumäärä oli erilainen.

Koko konsernin energiankulutuksen analysoimiseksi tutkimuksen tilaajan toiveena oli yksinkertainen Excel-pohjainen energiankulutustietojen arkistointityökalu, jonka avulla voidaan seurata koko konsernin energiankulutusta, sen kehittymistä sekä sen jakautumista eri toimipisteille. Tavoitteena työkalulle on, että se on helposti ymmärrettävä, helposti päivitettävä sekä sen avulla on helposti pääteltävissä energiankulutuksen ja energiatehokkuuden kannalta poikkeukselliset toimipisteet. Arkistointisovelluksen muodostamis-  
metodologia on esitelty kuvassa 5.



**Kuva 5: Tutkimusmetodologia koko konsernin tason energiankulutuksen analysointiin**

Tietoja eri yksiköiden energiankulutuksista ja kustannuksista sekä muista relevanteista suureista pyrittiin hankkimaan mahdollisimman kattavasti vuosilta 2016, 2017 ja 2018. Tietoja koskien erilaisten polttoaineiden lämpöarvoista kerättiin VTT:n julkaisusta Suomalaisen polttoaineiden ominaisuuksia. Tiedot kerättiin Excel-taulukkoon siten, että niiden käsittelyyn voitiin käyttää Excelin Pivot-työkalua. Lisäksi Excel-tiedostoon pyrittiin muodostamaan yksikkö- ja vuosikohtaisia muistiinpanoja, joiden perusteella mahdollisesti epäselvien energiankulutuslukujen muodostuslogiikka käy selväksi. Jotta lukujen muodostuslogiikka pysyisi läpinäkyvänä, alkuperäiset tiedostot, joista tiedot koottiin uuteen kattavaan arkistointitiedostoon, tallennettiin vuosi- ja yksikkökohtaisesti erilliseen

kansioon. Tapauksissa, joissa arkistointisovelluksen jonkin luvun muodostukseen liittyy epäselvyyttä, viitataan datan muodostukseen käytettyyn tiedostoon nimellä, jolla se esiintyy vuosi- ja yksikkökohtaisessa kansiossa. Lisäksi soluihin on lisätty kommentteja niiltä osin kuin se on nähty tarpeelliseksi epäselvyyksien selvittämiseksi.

Konsernin yksiköiden energiankulutus ja energiakustannukset ajateltiin muodostuvan taulukon 3 mukaisesti.

**Taulukko 3: Konsernin energian ja veden kulutuksien ja kustannuksien jakoperiaate**

Pääläji	Osatekijät	Kustannustekijät
Sähkö	Sähköenergia	Sähkön siirto Sähköenergia
Lämpö	Kaukolämpö Pelletti Lämmityspolttoöljy Prosessikaasu	Kaukolämmön tehomaksu Kaukolämmön energiamaksu Pellettien hinta Lämmityspolttoöljyn hinta Prosessikaasun hinta
Liikennepolttoaineet	Diesel (logistiikka ja henkilöautot) Moottorikaasu trukeille Polttoöljy trukeille	Dieselin hinta logistiikalle Dieselin hinta henkilöautoille Moottorikaasun hinta Polttoöljyn hinta trukeille
Vesi	Vesi	Kokonaisvesimaksu (raakavesi+jätevesi)

Taulukon 3 mukaisten arvojen lisäksi arkistointisovellukseen koottiin paljon muitakin tietoja, kuten tietoja työntekijämääristä ja tuotetuista arvonlisäyksistä. Konsernin yksiköiden energiankulutuksen ja energiakustannuksien ajateltiin kokonaisuudessa kuitenkin muodostuvan taulukon 3 mukaisesti.

## 4.2 Yksittäisen toimipisteen tarkempi analysointi

### 4.2.1 Analysoinnin tavoitteet

Tutkimuksen tilaajan toiveena oli, että heidän valitsemastaan yksittäisestä toimipisteestä tehtäisiin tarkempi energiankulutuksen analyysi. Kyseinen yksikkö oli jo ennen tutkimuksen aloittamista todettu lämpöenergiankulutuksen kannalta ongelmalliseksi, minkä takia toimipiste voitiin valita tarkastelun kohteeksi ennen arkistointisovelluksen valmistumista. Tavoitteeksi asetettiin että, tutkittavalle toimipisteelle muodostetaan sähkötase, lämpötase, vesitase sekä liikennepolttoainetase sekä tuotetaan energiankäytön parantamishdotuksia mahdollisimman monen energialajin osalta. Johtuen vain pienestä laskennallisesta vaivasta, arvioidaan lisäksi toimipisteen tarvitsema lämmitysteho. Taseita varten on tiedettävä eri energialajien kokonaiskulutuksen määrä, tunnistettava ja eriteltävä energialajeja kuluttavat osa-alueet sekä arvioita kuinka paljon eri energialajeja kuluu

missäkin osa-alueessa. Pyrkimyksenä on muodostaa taseet, joiden avulla voidaan esittää toimipisteen energijakauma, arvioida eri energiaa kuluttavien komponenttien sekä koko toimipisteen energiankulutusta ja energiatehokkuutta sekä tuottaa energiatehokkuutta parantavia investointiehdotuksia.

#### 4.2.2 Tarkasteltava kiinteistö

Valittu toimipiste on HT Laser Oy:n Keuruun Kolhontie 88:n yksikkö. Yksikkö koostuu tuotantotilasta sekä toimistorakennuksesta.



**Kuva 6: Ht Laser Oy:n Kolhontie 88:n yksikkö**

Toimipisteen rakennukset on alkuperäisesti rakennettu 1970-luvulla, jonka jälkeen niitä on päivitetty moneen otteeseen. Tuotantotilan pinta-ala on noin 9560 m<sup>2</sup> ja tilavuus noin 71720 m<sup>3</sup> ja toimistorakennukselle vastaavasti 490 m<sup>2</sup> ja 1460 m<sup>3</sup>. HT Laser Oy muutti toimipisteeseen 2015 ja ennen sitä kiinteistössä valmistettiin lastulevyä. Lastulevyn valmistus ja konepajateollisuus asettavat kiinteistöille erilaisia vaatimuksia, minkä takia HT Laser Oy joutui remontoimaan ja modernisoimaan kiinteistöä omiin käyttötarkoituksiinsa soveltuvaksi. Päivitettäviä kohteita kiinteistössä oli rakenteissa sekä LVI- ja valaistusjärjestelmissä. Toimipisteessä tuotetaan tällä hetkellä laser- ja vesileikkausta, särmäystä, koneistusta, metallien 3D-printtausta, laser- ja robottihitsausta, pintakäsittelyä, hitsausta, kokoonpanoa sekä tuotekehittelyä. Toimipisteessä ei ole seisokkiviikkoa, vaan tuotantoa on jatkuvasti läpi vuoden.



### 4.3 Energiataseiden muodostamista varten hankittu tieto

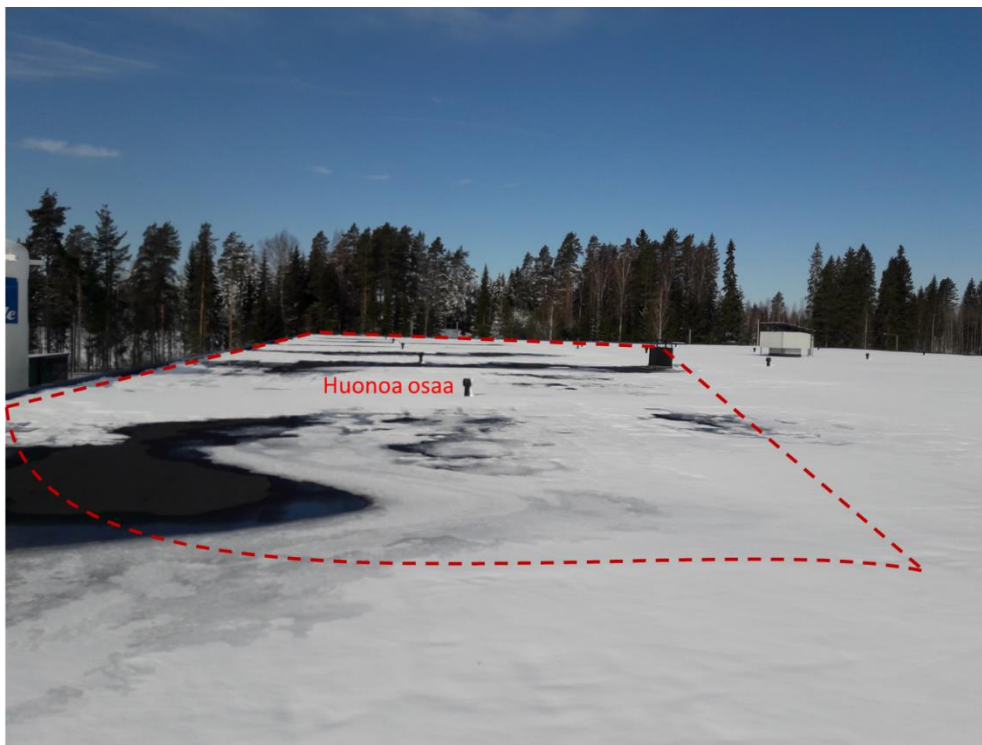
Tässä kappaleessa selostetaan mitä ja miten tietoja hankittiin toimipisteen energiataseiden muodostusta varten. Kappaleessa 2 esitettyjen laskentakaavojen ja metodien käyttö yksittäisten konepajateollisuuden toimipisteen energiataseiden muodostamista varten edellyttää ainakin seuraavien tietojen hankkimista: eri energialajien kokonaiskulutukset tarkastelujaksolla, rakenneosien pinta-alat ja U-arvot, ilmanvaihtokoneiden tehot, ilma-  
virrat, ohjaustavat ja käyntiaikataulut tarkastelujaksolla, vuoto- ja korvausilman määrät, lämmitysjärjestelmän rakenne ja järjestelmän apulaitteiden tarvitsema sähköteho, valais-  
tusrjestelmän sähköteho ja ohjaustapa, paineilmajärjestelmän keskimääräinen teho tarkastelujaksolla, veden kulutuskohteet, liikennepolttoaineiden kulutuskohteet, työntekijöiden määrä toimipisteessä, rakennuksien ominaislämpökapasiteetit ja keskimääräiset sisä- ja ulkolämpötilat sekä keskimääräinen auringon säteilyenergian määrä tarkastelujaksolla. Lisäksi hyödyllistä on kerätä tietoa kohteen sähköjärjestelmistä. Tarkastelujaksona tutkimuksessa toimi vuosi 2018 ja lämpö- ja sähkötaseet tehtiin kuukauden tarkkuudella.

Energialajien kokonaiskulutukset vuoden tasolla saatiin kaikkien energialajien osalta luettua toimipisteen kirjanpidosta. Lisäksi kaukolämmön ja sähkön myyjiltä saatiin kuukausikohtaiset tiedot kulutuksista. Sähkön kulutuksesta oli myös saatavilla sähkön myyjän tarjoamat tuntikohtaiset teho- ja lämpötilamittaukset.

Rakenne-osien pinta-alojen ja U-arvojen määrittämistä varten tietoa hankittiin muutamalla eri tavalla, sillä toimipisteessä ei ollut valmiina olevaa dokumentaatiota koskien rakenteiden pinta-aloja tai suunniteltuja U-arvoja. Toimistorakennuksen osalta päädimensiot perustuvat toimipisteen kiinteistöhoitajan haastatteluun. Toimistorakennuksen ikkunoiden ja ovien pinta-alat mitattiin mittanauhalla, ja niiden lukumäärä arviointiin paikan päällä 11.04.2019 otettujen kuvien perusteella. Ainoastaan toimistorakennuksen yläpohjalle laskettiin U-arvo perustuen kiinteistöhoitajan arvioon yläpohjan rakenteesta. Yläpohjan rakennusmateriaaleja ei tiedetty tarkasti, vaan niitä arviointiin kirjallisuuslähteiden avulla. Muut toimistorakennuksen rakenneosien U-arvot perustuvat kirjallisuuslähteisiin.

Tuotantotilan osalta päädimensiot saatiin, korkeutta lukuun ottamatta, luettua liitteessä 6 olevasta pohjapiirroksista. Rakennuksen korkeus arviointiin kiinteistöhoitajan haastattelun perusteella. Tuotantotilan ikkunoiden ja ovien lukumäärä saatiin laskettua paikan päällä käymällä ja niiden pinta-aloja arviointiin yhdessä kiinteistöhoitajan kanssa. Rakenneosien U-arvoja laskettiin tuotantotilan seinälle sekä yläpohjalle. Seinän rakenne saatiin

mitattua mittanauhalla melko tarkasti kohdasta missä seinässä oli reikä. Seinän rakennusmateriaaleja ei tiedetty, joten ne arvioitiin kirjallisuuslähteiden avulla. Yläpohjan rakenne perustuu kiinteistöhoitajan haastatteluun ja sen materiaalit ovat arvioitu kirjallisuuslähteiden avulla. Yläpohjalle laskettiin kaksi erillistä U-arvoa perustuen tietoon siitä, että arviolta 2/9 katosta oli eristetty huomattavasti huonommalla eristeellä. Huomioitavaa on, että osaksi yläpohjien rakennetta laskettiin tammi-maaliskuun aikana myös lumikerros. Lumikerroksen paksuus määriteltiin mukailemalla Jyväskylän vuoden 2018 keskimääräisiä lumitilastoja. Lumikerroksen laskuihin mukaan ottamista voidaan perustella 11.04.2019 katosta otetuilla kuvilla, joissa on edelleen nähtävissä katolla oleva lumikerros. Kuva katosta on alla. Kaikkien laskennassa käytettyjen rakenteiden U-arvot ja pinta-alat löytyvät liitteistä 7 ja 8.

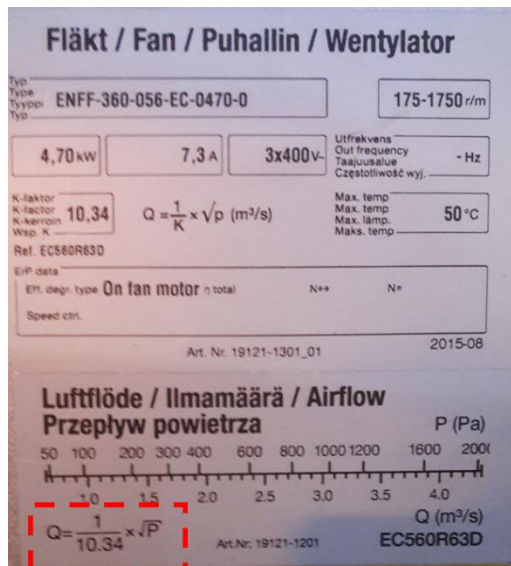


***Kuva 7: 11.00,364.2019 otettu kuva tuotantotilan katosta. Kuvasta nähtävissä lumikerroksen läsnäolo, sekä huonosti eristetyin osan vaikutus lumikerroksen paksuuteen***

Ilmanvaihto-, lämmitys-, valaistus-, sekä paineilmajärjestelmän eri komponenttien sähkötehon arvioinnit perustuvat osin tai täysin 11.5.2019 ja 14.5.2019 tehtyihin kiinteistön sähkötehon mittauksiin, jotka suoritti paikallinen henkilökunta. Kyseisten mittauksen mittauspöytäkirja on esitelty liitteessä 9. Käytännössä mittaus suoritettiin siten, että kiinteistöstä sammutettiin kaikki sähkönkulutuskohteet, jonka jälkeen erilliset kokonaisuudet kytkettiin mittauspöytäkirjassa esiintyvässä järjestyksessä päälle. Kiinteistön sähköteho kirjattiin ylös kunkin kokonaisuuden päälle laittamisen jälkeen. Mittaukset, jotka tehtiin 11.5.2019, tehtiin sellaisena lauantaina, jolloin työkoneet ja laitteet eivät olleet kovassa

käytössä. Työkoneiden ja laitteiden aiheuttama tehontarpeen lisäys näkyi tiistaina 14.5.2019 kello 09:20 tehdyssä kiinteistön sähkötehon mittauksessa. Huomioitavaa on, että mittaushetkellä 11.5.2019 kaikki kiinteistön ilmanvaihtokoneet toimivat maksimitehoasetuksilla.

Ilmanvaihtokoneiden nimellistehot luettiin koneiden tyyppikilvistä tai tieto saatiin kiinteistöhoitajalta. Sähkötehon kulutukset eri tehoasetuksilla luettiin ilmanvaihtokoneissa olevilta näyttöiltä tai niitä arvioitiin puhallinlakia käyttämällä. Ilmavirtojen määrät mitattiin tiettyjen koneiden osalta käyttämällä painemittaria, jonka avulla voitiin mitata ilmanvaihtokoneen puhaltimen tuottama paine-ero. Mitatun paine-eron avulla voitiin laskea ilmanvaihtokoneiden valmistajan ilmoittaman kaavan perusteella puhaltimen tuottama ilmavirta. Esimerkki käytetystä kaavasta on alla olevassa kuvassa.



***Kuva 8: Ilmanvaihtokoneen ilmavirran arvioimiseen käytetty valmistajan antama laskukaava***

Ilmanvaihtokoneista, joista paine-eroa ei pystytty mittamaan, saatiin ilmavirran arvot arvioitua kiinteistöhoitajan haastattelujen tai aikaisempina vuosina tehtyjen ilmavirtamittausten perusteella. Koneiden ohjaustavat ja käyntiaikataulut perustuivat niin ikään kiinteistöhoitajalta saatuihin tietoihin.

Lämmitysjärjestelmän rakenne ja ohjaustapa selvitettiin kiinteistöhoitajaa haastatteleamalla sekä paikan päällä käymällä ja kuvia ottamalla. Lisäksi käytössä oli yksinkertaisia piirikaavioita, joiden avulla järjestelmän toimintaa oli mahdollista hahmottaa. Ilmanvaihtokoneiden ilmavirtojen sisäänpuhalluslämpötilat saatiin luettua ilmanvaihtokoneiden näyttöiltä ja mittareista tai ne kysyttiin kiinteistöhoitajalta. Lämmöntalteenottolaitteistojen hyötysuhteen määrittystä varten kirjattiin 11.4.2019 9:00-10:00 välisenä aikana lämmöntalteenottolaitteistolla varustetuista koneista sen hetken tehoasetus, ulkoilman lämpötila,

tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen, poistoilman lämpötila sekä jäteilman lämpötila. Lämmitysjärjestelmän sähkötehon tarpeen arviointi perustui 11.5.2019 tehtyyn mittauspöytäkirjaan, kiinteistöhoitajan haastatteluun sekä pumppujen ja muiden laitteiden tyyppikilvistä luettuihin arvoihin.

Valaistus- ja paineilmajärjestelmää koskevat tiedot saatiin 11.5.2019 tehdystä mittauspöytäkirjasta sekä kiinteistöhoitajan haastattelujen perusteella. Lisäksi paineilmajärjestelmän analysoinnissa oli käytössä paineilmakompressoreihin sisäänrakennettu käyntitietojen tallennus. Veden ja liikennepolttoaineiden kulutuskohteita selvitettiin haastatellamalla henkilökuntaa sekä paikan päällä käymällä. Työntekijöiden määrä tehtaassa ja toimistorakennuksessa eri vuorokauden aikoina perustuu kiinteistöhoitajan arvioon.

Keskimääräiset sisälämpötilat arviointiin 8.11.2019 tehdyn tehdaskäynnin yhteydessä. Tehdaskäynnin aikana toimistorakennuksen sisälämpötila luettiin toimiston sisäilmaa mittaavasta lämpötila-anturista ja tuotantotilan sisälämpötila määritettiin lämpökameran avulla. Paikallisesta sähkönmyyjältä saatiin tiedot kuukausien keskilämpötiloista sekä tuntikohtaisista lämpötiloista koko vuodelle. Auringon säteilyenergian arvioimiseen käytettiin YM:n ohjeen mukaisia arvoja.

#### 4.4 Tarkasteltavan kohteen energiankulutus ja energiankäytön kohteet

Kolhontie 88:n eri energialajien ja veden kokonaiskustannukset olivat noin 340000 €, joka vastaa noin 30 prosenttia koko konsernin energiakustannuksista. Energialajien ja veden kokonaiskulutus on alla olevassa taulukossa:

**Taulukko 4: Kolhontie 88:n energialajien kulutukset ja kustannukset 2018**

Energialaji	Kulutus [MWh/a]	Kustannus €/a
Sähköenergia	2537	176054
Kaukolämpö	122	18084
Lämmityspolttoaineet	2291	83388
Liikennepolttoaineet	296	37952
Vesi	-	24648
<b>Yhteensä</b>	<b>5231</b>	<b>340127</b>

Sähköenergia kohteeseen hankitaan Keuruun Sähkö Oy:lta, joka on myös paikallisen sähköverkon omistaja. Kaukolämpö hankitaan Keuruun Energialta. Lämmityspolttoaineita vuonna 2018 ostettiin Keurak Oy:lta, VP Global Oy:lta sekä Lämpöpuisto Oy:lta. Liikennepolttoaineita ostettiin Teboil Oy:lta ja Aga Oy Ab:lta sekä toimipisteelle on kohdennettu toimihenkilöiden käyttämien henkilöautojen liikennepolttoaineiden ostoja erinäisistä tankkausasemista. Vesi hankitaan Keuruun kaupungin vesilaitokselta Keuruun

Vedeltä. Toimipisteen sähkö- ja kaukolämpö- ja vesisopimuksien tarkemmat ehdot jätetään diplomityön tilaajan toiveesta esittelemättä.

#### 4.4.1 Sähköjärjestelmät

Kiinteistö on kytketty keskijänniteverkkoon kiinteistön omalla kytkimellä rajoitetulla jakomuuntajalla. Jakomuuntajan avulla keskijänniteverkon jännite muutetaan koko tehtaan käyttämään 400 V jännitetasoon. Virta on rajoitettu 1300 A:han 400 V jännitepuolelta. Kiinteistön loistehon kompensointi on mitoitettu niin hyvin, että loistehomaksuja ei ole jouduttu maksamaan viimeisten vuosien aikana.

#### 4.4.2 Henkilöstö

Toimipisteessä työskentelevien ihmisten määrät eri aikoina on listattu alla oleviin taulukoihin

**Taulukko 5: Arvio tuotantotilassa työskentelevien työntekijöiden määrästä**

Kellonaika	06:00-14:00	14:00-22:00	22:00-06:00
Työntekijöiden määrä arkipäivinä [kpl]	50	30	20
Työntekijöiden määrä viikonloppuna [kpl]	20	10	0

**Taulukko 6: Arvio toimistorakennuksessa työskentelevien työntekijöiden määrästä**

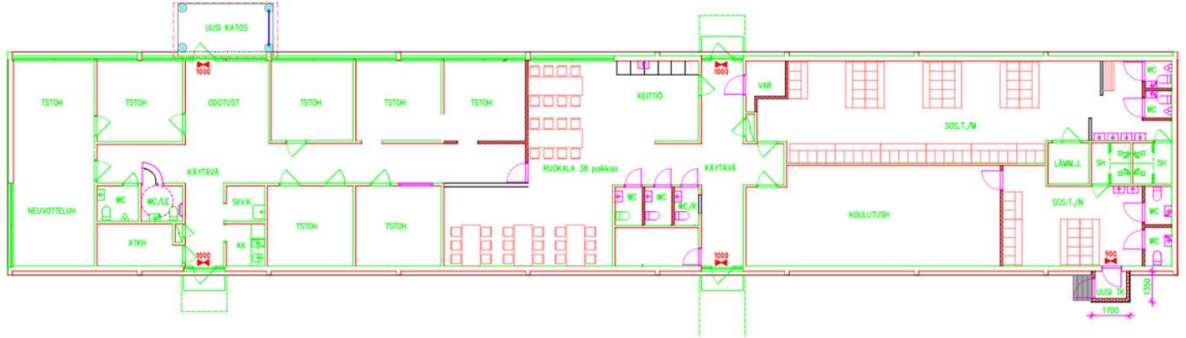
Kellonaika	06:00-18:00	18:00-06:00
Työntekijöiden määrä arkipäivinä [kpl]	20	0
Työntekijöiden määrä viikonloppuisin [kpl]	10	0

Energiataseiden muodostusta varten toimipisteen oletettiin toimivan samalla henkilövahvuudella läpi vuoden. Tehtaassa ei ole seisokkiviikkoa, joten yksinkertaistus on melko realistinen. Kuitenkin esimerkiksi joulukuun lomapäivien vaikutusta ei oteta laskennassa huomioon, vaan niiden vaikutusta tuloksiin arvioidaan vain sanallisesti.

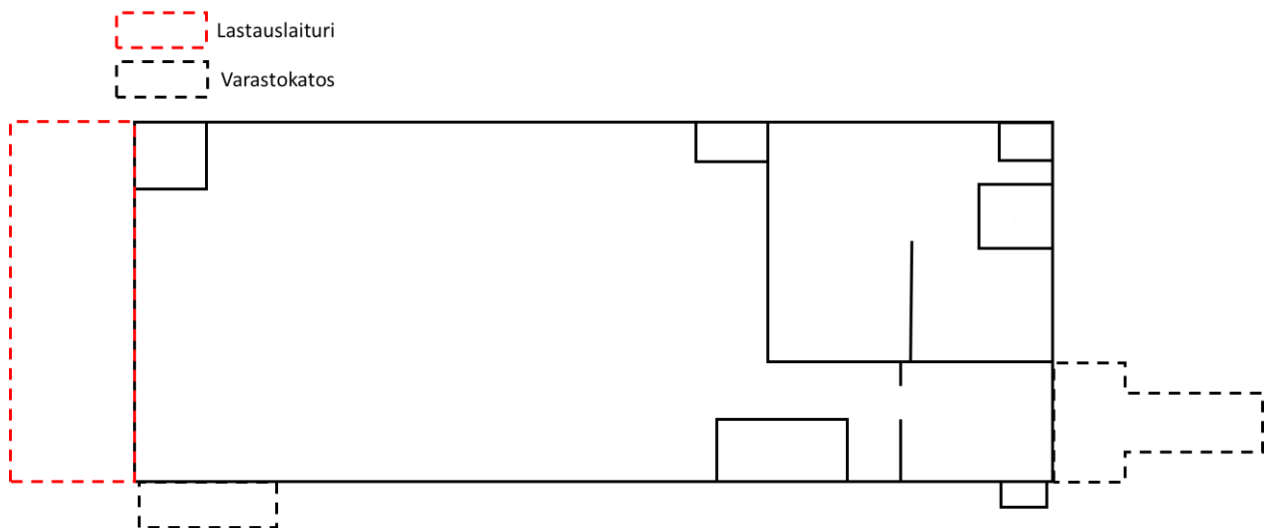
#### 4.4.3 Kiinteistöenergian kulutuskohteet

Kiinteistöenergian kulutuskohteiden havainnoinnin selkeyttämisen takia käytetään hyväksi kiinteistön pohjapiirroksia. Seuraavat pohjapiirrokset ovat hieman päivittyneitä, mutta vastaavat riittävällä tarkkuudella vuoden 2018 tilannetta. Esitetty toimistorakennuksen pohjapiirros on melko tarkka, mutta tuotantotilan pohjapiirroksista on tehty yksinkertaistus johtuen alkuperäisen pohjapiirroksen osittaisesta vanhentumisesta sekä

sen sisältämistä, tämän tutkimuksen kannalta, epäoleellisten yksityiskohtien määrästä. Toimiston pohjapiirros sekä tuotantotilan yksinkertaistettu pohjapiirros ovat esitetty alla olevissa kuvissa.



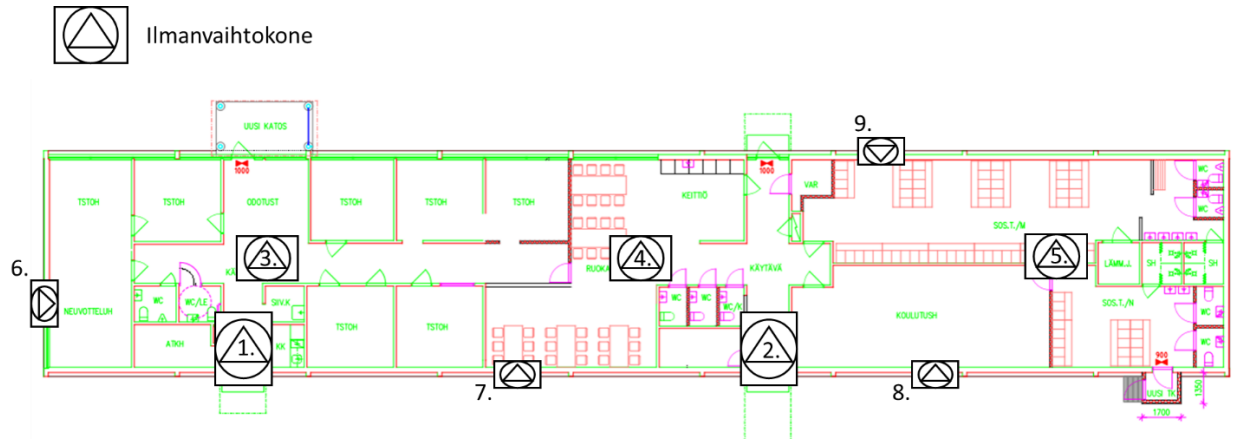
**Kuva 9: Kolhontie 88:n toimistorakennuksen pohjapiirros**



**Kuva 10: Kolhontie 88:n tuotantotilan yksinkertaistettu pohjapiirros**

Yllä olevien pohjapiirrosten avulla on nyt selkeää esitellä erilaisia kiinteistöenergian kulutuskohteita. Tavoitteena on antaa mahdollisimman kattava kuva toimipisteen ilmanvaihto-, lämmitys-, valaistus- ja paineilmajärjestelmistä. Esitellään ensiksi kohteen ilmanvaihtojärjestelmä.

Alla oleviin kuviin ja taulukoihin on havainnollistettu toimistorakennuksen ja tuotantotilan ilmanvaihtojärjestelmien ilmanvaihtokoneiden sijaintia, tyyppiä, kokoja ja käyntiaikatauluja.



**Kuva 11: Toimistorakennuksen ilmanvaihtokoneet. Koneet 3-5 ovat katolla.**

Toimistorakennuksien ilmanvaihtokoneiden nimellistehot ja ilmavirrat ovat alla olevassa taulukossa:

**Taulukko 7: Toimistorakennuksen nimellistehot ja tuotot, \*TM = taajuusmuuttaja**

Kone	Tyyppi	Nimellis Tulo Teho[W]	Nimellis Poisto Teho [W]	Nimellis Tulo ilmavirta [m <sup>3</sup> /s]	Nimellis Poisto ilma- virta [m <sup>3</sup> /s]	Säätö
1	Tulo	1000	-	0,60	-	TM
2	Tulo	1000	-	0,60	-	TM
3	Poisto	-	300	-	0,40	TM
4	Poisto	-	300	-	0,40	TM
5	Poisto	-	300	-	0,40	TM
6	Tulo/Poisto	17	17	0,0029	0,0029	Käsi
7	Tulo/Poisto	17	17	0,0029	0,0029	Käsi
8	Tulo/Poisto	17	17	0,0029	0,0029	Käsi
9	Tulo/Poisto	17	17	0,0029	0,0029	Käsi

Koneet 6-9 ovat keskenään identtisiä Mitsubishiin Lossnay VL-100U5-E ilmanvaihtokoneita, joiden toiminta-arvot saatiin valmistajan tuoteselosteesta. Mitsubishiin koneissa ei ollut lämmitystä, mutta niissä on lämmöntalteenottolaitteisto. Toimiston tulokoneissa ei ole lämmöntalteenottoa.

Koneilla 1-5 oli kaksi erillistä tehoasetusta. Tehoasetukset ja niiden aikaohjaus ovat taulukoissa 8 ja 9.

**Taulukko 8: Toimistorakennuksen taajuusohjattujen ilmanvaihtokoneiden tehoasetukset**

<b>Tehoasetus 1</b>				
Kone #	P tulo [W]	q tulo [m <sup>3</sup> /s]	P poisto [W]	q poisto [m <sup>3</sup> /s]
1	1000	0,60	-	-
2	1000	0,60	-	-
3	-	-	300	0,40
4	-	-	300	0,40
5	-	-	300	0,40
Yhteensä	2000	1,20	1200	1,20
<b>Tehoasetus 2</b>				
Kone #	P tulo [W]	q tulo [m <sup>3</sup> /s]	P poisto [W]	q poisto [m <sup>3</sup> /s]
1	300	0,40	-	-
2	300	0,40	-	-
3	-	-	90	0,27
4	-	-	90	0,27
5	-	-	90	0,27
Yhteensä	600	0,8	270	0,81

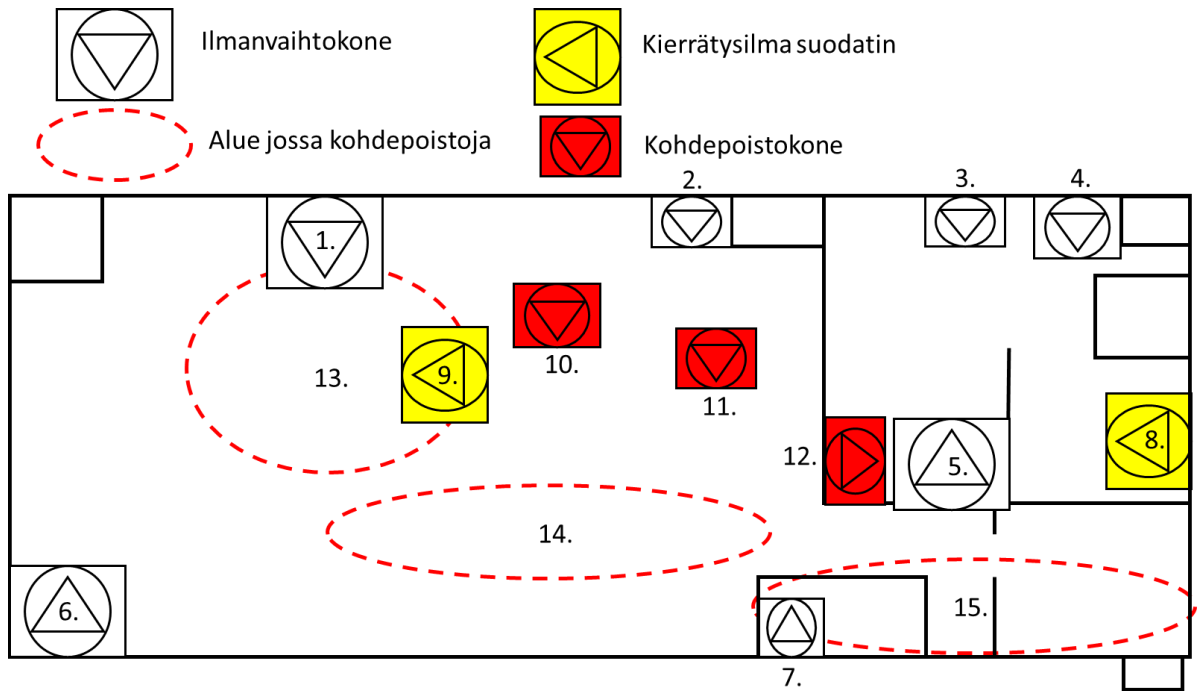
**Taulukko 9: Toimistorakennuksen ilmanvaihtokoneiden käyntiaikataulut**

Kone #	Ma-Pe	La-Su
1	<b>Tehoasetus 1</b> 06:00-18:00 <b>Tehoasetus 2</b> 18:00-06:00	<b>Tehoasetus 1</b> 00:00-00:00
2	<b>Tehoasetus 1</b> 06:00-18:00 <b>Tehoasetus 2</b> 18:00-06:00	<b>Tehoasetus 1</b> 00:00-00:00
3	<b>Tehoasetus 1</b> 06:00-18:00 <b>Tehoasetus 2</b> 18:00-06:00	<b>Tehoasetus 1</b> 00:00-00:00
4	<b>Tehoasetus 1</b> 00:00-00:00 <b>Tehoasetus 2</b> 18:00-06:00	<b>Tehoasetus 1</b> 00:00-00:00
5	<b>Tehoasetus 1</b> 06:00-18:00 <b>Tehoasetus 2</b> 18:00-06:00	<b>Tehoasetus 1</b> 00:00-00:00

Käsiohjattujen pienten Mitsubishin ilmanvaihtokoneiden osalta oletettiin, että kone #7 on jatkuvasti päällä ja muut ovat päällä keskimäärin tunnin päivässä. Mitsubishin koneet olivat käsiohjattuja, jonkat takia niiden todellisia käyntiaikoja on vaikea tietää. Toimiston tulo- ja poistoilmavirrat ovat tasapainossa, joten korvausilmaa ei synny. Toimiston vuotoilmaluvuksi q50 arvioitiin 4 (m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>).

Tuotantotilan ilmanvaihtokoneet ja kohdepoistoalueet ovat kuvassa 12:





**Kuva 12: Tuotantotilan ilmanvaihtokoneet, kiertoilmasuodattimet ja kohdepoistoalueet. Kone 5 on katolla.**

Tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden, kiertoilmasuodattimien ja kohdepoistokoneiden tietoja on koottu taulukoihin 10-16. Kohdepoistoalueet 13, 14. ja 15. viittaavat kyseisellä alueella oleviin tuotantolaitteisiin, jotka vaativat paljon kohdepoistoa toimiessaan. Alueiden 12-15 kohdepoistokoneiden tehoista ja ilmavirroista ei saatu tarkkoja tietoja. Lisäksi niiden ajo riippui kyseisillä alueilla olevien tuotantolaitteista käytöstä, jonka takia niiden keskimääräisistä käyntiajoista ei myöskään saatu tarkkoja tietoja. Kohdepoistokoneet #9, #10 ja #11 liittyvät pääasiassa hitsauksen ja koneistuksen aiheuttamien epäpuhtauksien poistoon. Koneiden #9, #10 ja #11 ilmavirtojen määrää ja käyntiaikoja saatiin arvioitua vanhoista dokumenteista, mutta niiden tehot on arvioitu.

**Taulukko 10: Tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden nimellistehot ja tuotot**

Kone	Tyyppi	Nimellis Tulo Teho[W]	Nimellis Poisto Teho [W]	Nimellis Tulo ilmavirta [m <sup>3</sup> /s]	Nimellis Poisto ilmavirta [m <sup>3</sup> /s]	Säätö
1	Tulo/poisto	11000	11000	6,00	6,00	TM
2	Tulo/poisto	780	780	0,50	0,50	TM
3	Tulo	1500	-	2,00	-	TM
4	Tulo/poisto	4700	4700	3,30	3,30	TM
5	Tulo/poisto	7500	5500	4,30	2,90	Ei säätöä
6	Tulo	5000	-	6,50	-	TM
7	Tulo/Poisto	2500	2500	1,50	1,50	TM
Yhteensä		32980	24480	24,1	14,2	

**Taulukko 11: Kiertoilmasuodattimien tietoja**

Kiertoilmasuodatin #	Nimellisteho [W]	Säätö	Teho käynnin aikana [W]
8.	22000	Taajuusmuuttaja	13200
9.	15000	Taajuusmuuttaja	7000

**Taulukko 12: Kohdepoistojen tehoja ja ilmavirtoja**

\*arvioitu

Kohdepoistokone tai kohdepoistoalue	Poistoteho [W]	Poistoilmavirta [m <sup>3</sup> /s]
10	1200*	1,20
11	1200*	1,20
12	3000*	2,70
13	Ei tietoa	Ei tietoa
14	Ei tietoa	0-6,00
15	Ei tietoa	Ei tietoa
Yhteensä	5400*	5,10-11,10

Tuotantotilan koneista lämmöntalteenottolaitteisto oli kaikissa tulo- ja poistokoneissa. Lämmöntalteenottolaitteistona oli levylämmönsiirrin, lukuun ottamatta konetta #7, jossa oli pyörivä lämmönsiirrin. Tuloilmakoneissa ei ollut lämmöntalteenottoa.

Tuotantotilan ilmanvaihtokoneilla oli pääasiassa kaksi erilaista tehoasetusta, joiden tiedot on koottu taulukkoon 13. Taulukossa on lisäksi tehoasetus, jota saatettiin käyttää poikkeuksellisen lämpiminä päivinä. Tätä hellepäivän tehoasetusta käytettiin arvioimaan ilmanvaihtokoneiden tehoa 11.5.2019 tehdyn sähkötehomittauksen aikana. Kohdepoistokoneet ja kierrätysilmasuodattimet toimivat aina samalla teholla päällä ollessaan. Taulukon 13 käytäntötaulukon lisäksi koneissa #1, #3, #4, #6 ja #7 on pakkasraja. Mikäli ulkoilma on kylmempää kuin pakkasraja toimivat kyseiset koneet tehoasetuksella 2 riippumatta kellonajasta. Pakkasrajat olivat -14 °C, -9 °C, -15,5 °C, -10 °C ja -13 °C. Pakkasrajat otettiin laskennassa huomioon.

**Taulukko 13: Tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden tehoasetukset**

<b>Tehoasetus 1</b>				
Kone #	P tulo [W]	q tulo [m <sup>3</sup> /s]	P poisto [W]	q poisto [m <sup>3</sup> /s]
1	7260	5,10	7810	5,60
2	500	0,37	550	0,37
3	1600	2,00	-	-
4	3200	2,80	2730	2,74
5	7500	4,29	5500	2,90
6	2900	5,42	-	-
7	1430	1,11	1150	0,77
Yhteensä	24380	21,10	17740	14,40
<b>Tehoasetus 2</b>				
Kone #	P tulo [W]	q tulo [m <sup>3</sup> /s]	P poisto [W]	q poisto [m <sup>3</sup> /s]
1	3970	4,16	2220	3,68
2	80	0,17	80	0,17
3	870	1,63	-	-
4	1000	1,90	590	1,65
5	7500	4,29	5500	2,90
6	1160	4,00	-	-
7	390	0,72	700	0,65
Yhteensä	14970	16,86	9090	9,86
<b>Tehoasetus 3</b>				
Kone #	P tulo [W]	q tulo [m <sup>3</sup> /s]	P poisto [W]	q poisto [m <sup>3</sup> /s]
1	8360	5,50	10340	6,01
2	585	0,43	702	0,43
3	1600	2,0	-	-
4	4140	3,05	2730	2,74
5	7500	4,29	5500	2,90
6	5000	6,50	-	-
7	1750	1,25	1325	0,85
Yhteensä	28930	23,05	20600	12,93

**Taulukko 14: Tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden käyntiaikataulut**

Kone #	Ma-Pe	La-Su
1	<b>Tehoasetus 1</b> 01:00-23:00 <b>Tehoasetus 2</b> 23:00-01:00	<b>Tehoasetus 1</b> 06:00-16:00 <b>Tehoasetus 2</b> 16:00-06:00
2	<b>Tehoasetus 1</b> 00:00-00:00	<b>Tehoasetus 1</b> 00:00-00:00
3	<b>Tehoasetus 1</b> 05:00-22:00 <b>Tehoasetus 2</b> 22:00-05:00	<b>Tehoasetus 1</b> 00:00-00:00
4	<b>Tehoasetus 1</b> 05:00-16:00 <b>Tehoasetus 2</b> 16:00-05:00	<b>Tehoasetus 1</b> 05:00-16:00 <b>Tehoasetus 2</b> 16:00-05:00
5	<b>Tehoasetus 1</b> 00:00-00:00	<b>Tehoasetus 1</b> 00:00-00:00
6	<b>Tehoasetus 1</b> 04:00-22:00 <b>Tehoasetus 2</b> 22:00-04:00	<b>Tehoasetus 1</b> 06:00-14:00 <b>Tehoasetus 2</b> 14:00-06:00
7	<b>Tehoasetus 1</b> 06:00-22:00 <b>Tehoasetus 2</b> 22:00-06:00	<b>Tehoasetus 1</b> 00:00-00:00

Kierrätysilmasuodattamien ja kohdepoistojen käyntiaikataulut ovat taulukoissa 15 ja 16.

**Taulukko 15: Kiertoilmasuodattamien käyntiaikataulut**

Kone #	Ma-Pe	La	Su
8	06:00-20:00	06:00-20:00	06:00-20:00
10	05:00-02:00	05:00-02:00	05:00-15:00

**Taulukko 16: Tuotantotilan kohdepoistojen käyntiaikataulut**

Kone #	Ma-Pe	La	Su
9	06:00-22:00	06:00-16:00	06:00-16:00
10	06:00-22:00	06:00-14:00	10:00-12:00
11	06:00-16:00	06:00-16:00	06:00-16:00
12	Käsiohjaus-päällä tarvittessa	Käsiohjaus-päällä tarvittessa	Käsiohjaus-päällä tarvittessa
13	Käsiohjaus-päällä tarvittessa	Käsiohjaus-päällä tarvittessa	Käsiohjaus-päällä tarvittessa
14	Käsiohjaus-päällä tarvittessa	Käsiohjaus-päällä tarvittessa	Käsiohjaus-päällä tarvittessa

Taulukoista 10 ja 12 voidaan todeta, että tuotantotilassa on kohdepoistoilla merkittävä rooli ilmanpaineen tasauksessa. Kohdepoistoista huolimatta tuotantotila todettiin kiinteistössä käymällä sekä kiinteistöhoitajaa haastatteleamalla, että tuotantotila on jatkuvasti hieman ylipaineinen. Ylipaine johtuu pääasiassa tulokoneiden vaikutuksesta tulo- ja poistoilmavirtojen suhteeseen. Ylipaineesta johtuen ei tuotantotilaan ei synny korvausilmaa. Ylipaine vaikuttaa myös vuotoilman määrään, jonka arvioiminen teollisuushalleissa on muutenkin haasteellista yleispätevien ohjearvojen puutteen vuoksi [41]. Tuotantotilan vuotoilmaluvun q50 arviointiin olevan 2 (m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>).

Yllä olevien taulukoiden tietojen perusteella määriteltiin mallinnuksessa käytetyt ilmanvaihtojärjestelmän keskimääräiset sähkötehot ja ilmavirrat sekä kierrätysilmasuodattamien keskimääräiset sähkötehot. Ilmanvaihtokoneille, joissa oli lämmitystä, laskettiin ilmavirrat ja tehot tuntikohtaisesti koko vuodelle. Ilmavirtojen kuukausittaiset keskiarvot sekä ilmanvaihtokoneiden sisäänpuhalluslämpötilojen asetusarvot ovat liitteessä 10. Liitteessä 10 on myös tuotantotilan ja toimiston ilmanvaihtokoneiden lämmöntalteenottolaitteiston lämpötilahyötysuhteiden määrittäminen. Saatujen hyötysuhteiden avulla laskettiin lämmöntalteenotolla saatavat tuntikohtaiset lämpötehot käyttämällä tuntikohtaisia ulkoilman lämpötilatietoja koko vuodelle. Lämmöntalteenoton laskennassa oletettiin, että tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen ei ylitä sisäänpuhalluslämpötilaa ja jäteilman lämpötila ei alita jäteilman rajoitusta. Seuraavaksi esitellään yksikön lämmitysjärjestelmän rakennetta ja toimintaa.

Tarkasteltavan yksikössä on käytössä vesikeskuslämmitys sekä pieni määrä ilmalämpöpumppuja. Vesikeskusjärjestelmän lämmöntuottolaitteistona toimi pellettikattila, öljykattila sekä kaukolämmönvaihdin. Tuotantotila oli muutamaa radiaattoripatteria lukuun ottamatta ilmalämmitteinen ja toimistorakennuksessa oli ilmalämmityksen lisäksi tilaa lämmittäviä radiaattoripattereita. Tuotantotilassa oli ilmanvaihtokoneiden lämmityspatterien lisäksi käytössä 10 kappaletta arviolta noin 10 kW termostaattiohjattuja kiertoilmaläm-

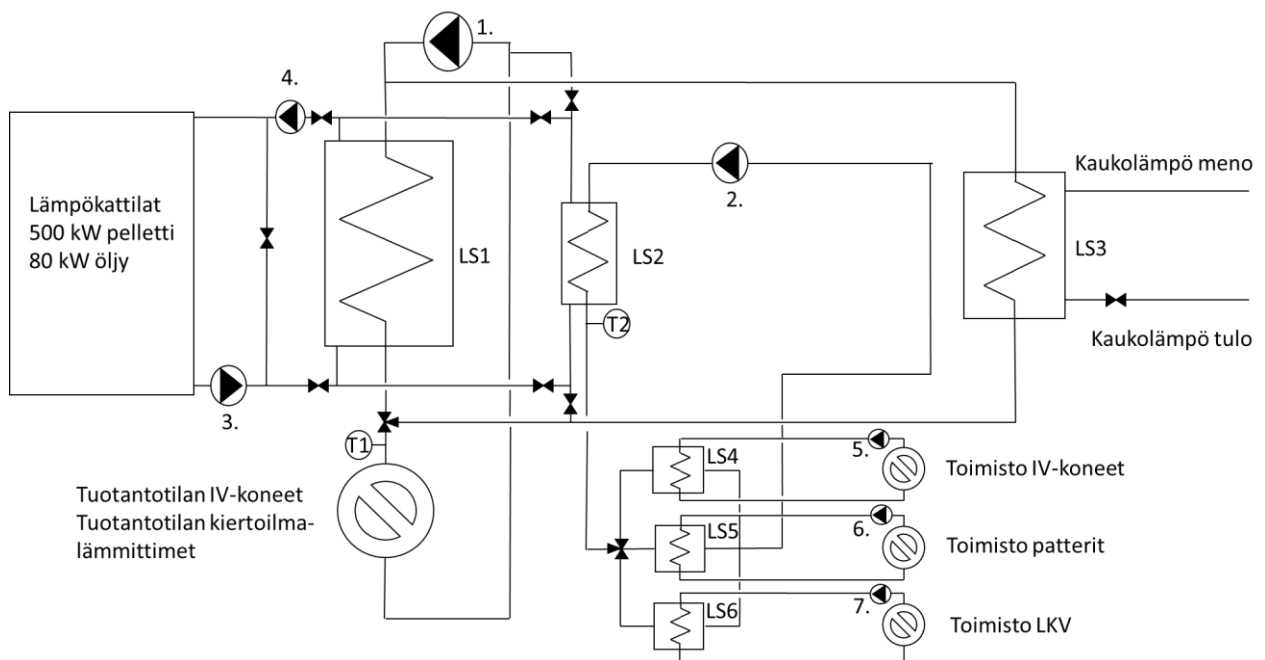
mittimiä. Tarkkoja tietoja kiertoilmalämmittimien varsinaisista käyntiajoista ei saatu. Oletettiin, että käydessään laitteet olivat 1 minuutin päällä ja 10 minuuttia pois päältä. Paremmen tiedon puutteessa mallissa arvioitiin, että kaikki kymmenen kiertoilmalämmitintä ovat päällä 1/11 ajasta joului-, tammi-, helmi-, ja maaliskuun aikana.

Lämpöpumppuja oli tarkasteluhetkellä käytössä 4, joista 3 oli toimistorakennuksessa ja 1 muuntajahuoneessa. Tietoja lämpöpumpuista on koottu alla olevaan taulukkoon. Lämpöpumput olivat kiinteistövastaavan mukaan pääasiassa jäähdytyskäytössä kesäkuukausien aikana. Mallinnusta varten oletettiin yksinkertaisesti, että toimiston lämpöpumput olivat jäähdytyskäytössä päällä 12 tuntia päivässä, puolella teholla. Muuntajahuoneen lämpöpumpusta ei saatu kerättyä tietoja, minkä takia se jätettiin mallinnuksen ulkopuolelle.

**Taulukko 17: Toimistorakennuksen lämpöpumppujen tietoja**

Pumppu	Lämmitys- teho [W]	Sähkäteho lämmityskäytössä [W]	Jäähdytys- teho [W]	Sähkäteho jäähdytyskäytössä [W]	SPF
1	4000	910	3500	860	2,8
2	4000	910	3500	860	2,8
3	5400	1450	5300	1514	2,8

Alla olevaan kuvaan on hahmoteltu kiinteistön vesikeskuslämmitysjärjestelmän rakennetta, tehoa ja toimintaperiaatetta.



**Kuva 13: Kolhontie 88:n vesikeskuslämmitysjärjestelmän yksinkertaistettu piirikaavio**

Tietoja kuvassa 13 esiintyvistä pumpuista ja lämmönsiirtimistä on alla olevissa taulukoissa.

**Taulukko 18: Lämmitysjärjestelmän pumppujen tietoja**

Pumppu #	Maksimiteho [W]	Säätö
1	8000	TM
2	2500	TM
3	1297	TM
4	900	TM
5	95	TM
6	185	TM
7	ei tietoa	ei tietoa
Yhteensä	12977	-

Kuvassa 13 esiintyvien pumppujen lisäksi jokaisessa ilmanvaihtokoneessa oli pieni taajuusmuuntajalla ohjattu pumppu, joka kierrätti vettä ilmanvaihtokoneen lämmityspatterissa. Näiden pumppujen keskimääräinen nimellisteho oli noin 150 W.

**Taulukko 19: Lämmitysjärjestelmän lämmönsiirtimien tietoja**

Lämmönsiirrin	Nimellisteho [kW]
LS1	2000
LS2	200
LS3	850
LS4	45
LS5	30
LS6	60

Toimipisteen lämmöntuottolaitteistoa ajetaan siten, että ensisijaisesti lämpö tuotetaan lämpökattiloilla ja kaukolämpöä käytetään vain silloin kuin kattiloiden kapasiteetti loppuu kesken. Normaalisti järjestelmä toimii siten, että mikäli LS1 piiriin lähtevä vesi (kuvassa T1) laskee merkittävästi alle asetusarvon, avautuvat venttiilit ja osa vedestä kulkee kaukolämmönvaihtimen kautta lämpövajeen täyttämiseksi. Halutessaan voi järjestelmää kuitenkin ajaa myös pelkästään kaukolämmöllä. Lämmitysjärjestelmää ei kiinteistöhoitajan mukaan sammutettu missään vaiheessa, vaan se pidettiin päällä läpi vuoden, johtuen pääasiassa tiettyjen prosessilaitteiden vaatimista sisälämpötilan arvoista.

Kiinteistössä on kuvan 13 esiintyvien komponenttien lisäksi yksi sähköllä toimiva lämminvesivaraaja, joka sijaitsee keskellä tuotantotilaa sekä pieni lämmönvaihdin, jolla tuotetaan osa tuotantotilan wc-tilojen lämpimästä käyttövedestä. Näiden lämpimän veden tuottamista varten käytettävien komponenttien osuus kokonaiskulutuksesta oletettiin kuitenkin niin pieneksi, että ne jätettiin tutkimuksen ulkopuolelle. Pääosa lämpimän käyttöveden kulutuksesta tapahtuu kuitenkin toimistorakennuksessa, jossa on kuvan lämmön-

vaihtimen lisäksi myös sähkövastuksella varustettu lämpimän käyttöveden varaaja. Mallinnusta varten oletettiin kuitenkin, että kaikki lämmin toimistorakennuksen lämpimän veden tuotto tapahtuu lämmitysjärjestelmällä.

Lämmitysjärjestelmän apulaitteiden, kuten kiertovesipumppujen, säätölaitteiden ja lämpökattiloiden apulaitteiden, tarvitsema keskimääräinen sähköteho arvioitiin 11.5.2019 tehtyjen mittausten perusteella sekä tyyppikilvistä lukemalla ja kiinteistöhoitajan haastattelun perusteella. Apulaitteiden teho laskettiin vähentämällä ilmanvaihtokoneiden ja kiertovesipumppujen yhteenlasketusta tehosta ilmanvaihtokoneiden sen hetkinen sähköteho, joka tiedettiin melko hyvällä tarkkuudella. Tuotantotilan ilmanvaihtokoneille ja toimistorakennukselle lämmintä vettä kuljettavien pumppujen ja niiden säätölaitteiden tehoksi saatiin näin laskettuna arvio 10440 W. Kiinteistöhoitajan mukaan lämmitysjärjestelmän pumppuja ei säädetty vuodenajan suhteen, vaan ne toimivat koko vuoden samalla teholla. Lämpökattiloiden pumppujen sekä apu- ja säätölaitteiden yhteenlaskettu teho mittaushetkellä oli noin 2000 W, jonka oletettiin olevan lämpökattiloiden vaatima sähköteho läpi vuoden. Suurin sähkötehon kuluttaja lämpökattiloissa on pellettikattilan savukaasupuhallin, jonka nimellisteho on 1500 W. Arvioitiin lisäksi, että toimipisteessä on noin 50 metriä lämmönjakoputkea lämmittämättömässä tilassa ja putken ominaislämpöhäviöiksi arviointiin YM:n ohjeesta 50 kWh/ma [41]. Toimistorakennuksen ja tuotantotilan ominaislämpökapasiteeteiksi arviointiin YM:n ohjeiden perusteella 110 ja 160 Wh/K [41]. Kohteessa ei ollut lämmön varastointilaitteita lämpimän käyttöveden varaajien lisäksi.

Toimipisteen valaistusjärjestelmä koostuu neljästä eri kokonaisuudesta: hallin valaistus, työvalot, lastauslaiturin valaistus ja toimiston valaistus. Toimistorakennuksessa on käsihjoitettuja valaisimia sekä liiketunnisteella toimivia valoja esimerkiksi wc-tiloissa. Muutoin valaistusta ohjataan keskitetysti yhdestä paikasta, on/off periaatteella. Valaisinryhmien käyttöaikoja arvioitiin kiinteistövastaavaa haastatteleamalla. Eri kokonaisuuksien sähkötehot saatiin 11.5.2019 tehdystä mittauksesta ja ne ovat alla olevassa taulukossa.

**Taulukko 20: Kiinteistön valaisinryhmien sähkötehot ja käyttöajat**

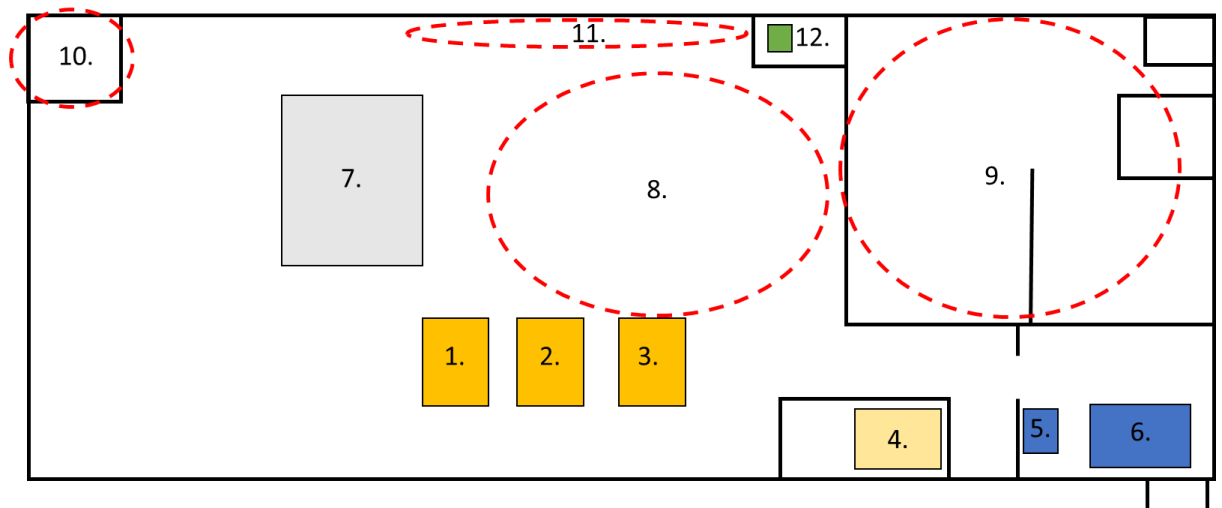
Valaisinryhmä	Sähköteho [kW]	Käyttöaika vuodessa [h]
Halli	47	7509
Työvalot	17	7509
Lastauslaituri	3	7509
Toimisto	4	4380

Taulukossa esiintyvät käyttöajat saattavat poiketa todellisuudesta, sillä toimipisteessä on tuotantoa lähes jatkuvasti läpi vuoden ja esimerkiksi hallin valoja ei välttämättä sammuteta edes sellaisina pyhäpäivinä, kun tehtaassa ei ole tuotantoa. Kuitenkin esimerkiksi

työvalojen ja lastauslaiturin osalta valot saattoivat olla sammuksissa useina päivinä vuodesta, kun tehtaassa ei ole tuotantoa. Valojen käyntiaikoja ei ollut dokumentoituna valmiiksi. Tämän takia päädyttiin käyttämään approksimaatiota, että kaikki tuotantotilaan liittyvät valaisimet ovat päällä 6/7 osaa vuodesta. Toimiston osalta käytettiin arviota, että valot ovat päällä 12 tuntia vuoden jokaisena päivänä. Ulkovalaistuksen osalta ei saatu tietoja ja niiden sähkötehon oletettiin sen takia niin pieneksi verrattuna muihin valaisinryhmiin, että ne jätettiin mallista pois.

#### 4.4.4 Työkoneet ja laitteet

Merkittävimmät energiankuluttajat tuotantotilassa olivat laser- ja vesileikkurit, 3D-metallitulostin, laserhitsauslaite sekä maalaamo. Muita energia kuluttavia työkoneita ja laitteita olivat esimerkiksi erilaiset särmäslaitteet, jyrsimet ja sorvit sekä hitsauslaitteet. Laitteet käyttivät pääasiassa sähköenergiaa, mutta maalaamossa kului myös nestekaasua. Maalaamon asennus valmistui toukokuussa 2018 ja ensimmäiset tuotannot sillä tapahtuivat heinäkuussa 2018. Kuten kappaleessa 3.3 mainittiin, ei työkoneiden ja laitteiden energiankulutusta pyritä matemaattisesti mallintamaan, jonka takia niiden osalta ei suoritettu mittauksia. Erilaisten työkoneiden ja laitteiden sijaintia on kuitenkin hahmoteltu kuvaan 14.



**Kuva 14: Tuotantotilan työkoneiden ja laitteiden sijainti 1-3. laserleikkurit, 4. laserhitsauslaite, 5-6. vesileikkurit, 7. maalaamo, 8. hitsausta ja koneistusta 9. hitsausta ja koneistusta, 10. puhdastyötila 11. koneistusta 12. 3D-metallitulostin**

Kuvassa 14 olevista työkoneista ja laitteista erityisesti laserleikkurit, maalaamo ja hitsaus/koneistus alueet tuottavat suuria määriä lämpökuormaa. Lisäksi työkoneet vaativat kohdepoistoja, jotka on esitetty kuvassa 12. Laserleikkurit tarvitsevat toimiakseen suuria määriä jäähdytysilmaa, joka voidaan johtaa lämpimänä kierrätysilmana tilaan tai vaihto-



ehtoisesti katon kautta ulkoilmaan. Maalaamon tuottamia lämpökuormia johdetaan osittain ilmanvaihtokone #1:n kautta ulos, jolloin osa lämpökuormista hyödynnetään ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenottolaitteistoissa. Kiinteistöhoitajan arvion mukaan 80 %:a maalaamokaasun lämpöenergiasta saadaan hyödynnettyä, mutta parempien arvioiden puutteessa maalaamokaasun lämpökuorman laskettiin vain lisäävän kyseisen ilmanvaihtokoneen keskimääräistä poistoilman lämpötilaa 1,0 celsius asteella läpi vuoden. Muuten mallissa oletettiin että, kaikki tuotantotilan työkoneiden ja laitteiden sähköenergian kulutus muuttuu tilan lämpökuormaksi.

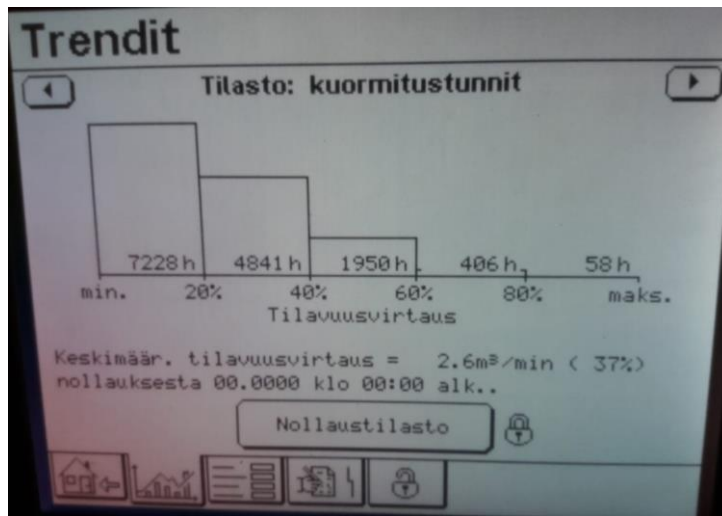
#### 4.4.5 Muut energiankulutuksen kohteet

Toimipisteen toimistorakennuksen sähköä kuluttavien laitteiksi määriteltiin tietokoneet sekä muut sähkö kuluttavat laitteet, kuten tulostimet ja kodinkoneet. Tietokoneiden lukumääräksi arvioitiin 20 kappaletta ja yksittäisen tietokoneen vuotuiseksi sähkönkulutukseksi 430 kWh/a [40]. Muiden sähköä kuluttavien laitteiden kokonaiskulutuksen arvioitiin olevan yhteensä 3000 kWh/a.

Toimipisteen veden kulutuksen kohteet olivat lämmin käyttövesi, talousvesi sekä vesileikkureiden kuluttama vesi. Veden kokonaiskulutus tiedettiin ja se oli vuonna 2018 noin 5281 kuutiota. Tarkempaa tietoa eri osa-alueiden kulutuksesta ei ollut sillä kiinteistössä ei ollut veden kulutusta mittaavia mittareita. Lämpimän käyttöveden lämpötehon laske- mista varten määriteltiin YM:n vesilaitteiston mitoitusohjeen taulukoiden 1 ja 2 avulla lämpimän veden mitoittavaksi vesivirraksi 0,0004 m<sup>3</sup>/s [47]. Kiinteistön lämpimän veden kulutukselle käytettiin ohjearvoa 100 (dm<sup>3</sup>/brm<sup>2</sup>/vuosi) [48]. Lämminvesivaraajan vuotuisesti lämpöhäviöksi määriteltiin 500 kWh/a, lämpimän veden kiertohäviön ominaistehoksi 40 W/m, kiertojohdon ominaispituudeksi 0,06 m/m<sup>2</sup> ja lämpimän käyttöveden pum- pun arvioitiin olevan päällä tunti vuorokaudessa. Kiertojohdon siirron vuosihyötysuh- teena käytettiin arvoa 0,88. Toimistossa ei ollut lämpimään käyttövesiverkkoon liitettyjä lämmityslaitteita. Kiinteistöhoitaja arvioi vesileikkurin kuluttavan noin 85 %:a toimipisteen vedenkulutuksesta.

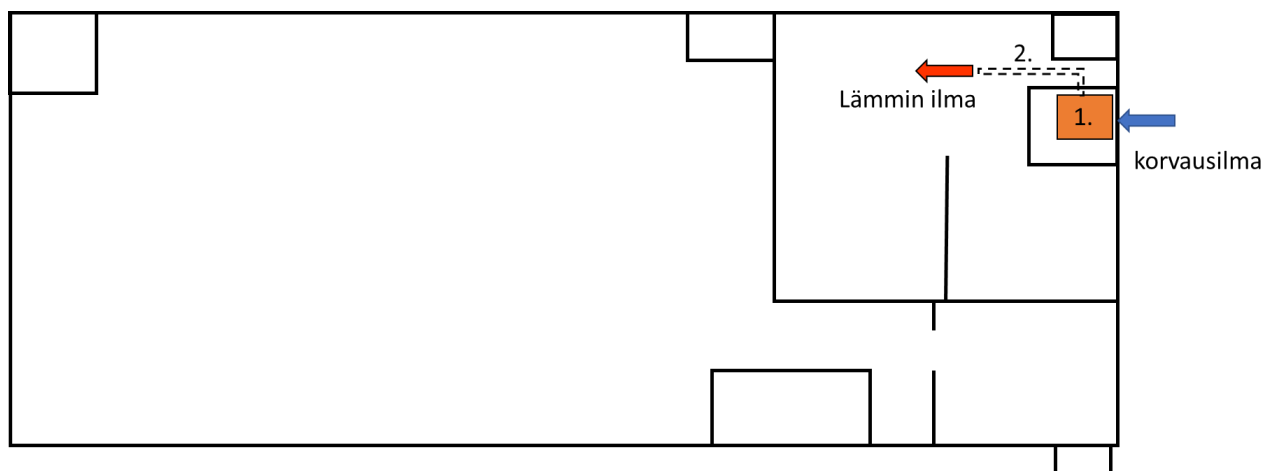
Toimisteen paineilmaverkosto koostui kahdesta kompressorista, kosteudenpoistajasta ja varsinaisesta verkostosta. Kompressorit olivat taajuusmuuntajilla varustettuja ja tehoil- taan 37 kW ja 47 kW. Paineilman tuotto tapahtui pääasiassa 37 kW koneella ja 47 kW konetta ajettiin yleensä vain tunti päivässä arkipäivinä. Kosteudenpoistoyksikön nimel- listeho oli 4,4 kW. Kompressoreiden nimellistuotot ja maksimituottopaineet olivat 37 kW koneelle 6,9 m<sup>3</sup>/min ja 13 bar ja 47 kW koneelle vastaavasti 7,2 m<sup>3</sup>/min ja 7,5 bar. Pai- netasona kiinteistössä käytetään 7,4-7,9 baria.

Kompressoreiden kokoon nähden paineilmajärjestelmän tuotto oli melko pientä: keskimääräinen kulutus oli  $2,6 \text{ m}^3/\text{min}$  eli 37 %:a maksimituotosta. Alla olevassa kuvassa on paineilmakompressorin näytöltä saadut kuormituslukemat.



**Kuva 15: Paineilmakompressorin näytöltä luetut kuormitustunnit**

Paineilmajärjestelmän teho 11.5.2018 tehdyn mittauspöytäkirjan mukaan oli noin 12 kW, mutta mittaushetkellä tuotto oli arviolta vain noin  $1-1,5 \text{ m}^3/\text{min}$  eli noin 15-22 %:a nimellistuotosta. Tarkempaa tietoa kompressorin hyötysuhteen muuttumisesta osakuormilla ei kuitenkaan tiedetty, joten laskentaa varten oletettiin kompressorin tuoton olevan suoraan verrannollinen sen kuluttamaan tehoon. Kosteudenpoistoyksikön keskimääräiseksi tehoksi arvioitiin olevan 2 kW. Näillä oletuksilla koko paineilmajärjestelmän (kompressorin ja kosteudenpoistoyksikön) keskimääräiseksi tehoksi arvioitiin olevan noin 16 kW. Paineilmakompressoreiden tarvitsema korvausilma saatiin säleiköstä ja lämmennyt ilma hyödynnettiin johtamalla se kanavaa pitkiin tuotantotilaan alla olevan kuvan esittämällä tavalla.



**Kuva 16: Paineilmakompressoreiden jäähdytysilman hyödyntämismetodi 1. Paineilmakompressorit 2. Kanava, jota pitkin lämmennyt ilma johdetaan tilaan**

Liikennepolttoaineiden käyttökohteita toimipisteessä olivat trukit, 2 pakettiautoa, 1 kuorma-auto ja 1 henkilöauto. Trukkeja oli kaasu-, sähkö-, ja polttoöljykäyttöisiä. Paketti- ja henkilöautot olivat diesel käyttöisiä. Paketti-, kuorma- ja henkilöautojen liikennepolttoaineiden kulutus saatiin luettua laskuista. Trukkien osalta huomioitavaa oli että, polttoöljykäyttöiset trukit käyttivät samaa polttoöljyä kuin öljykäyttöinen lämpökattila ja maalaamon asentamisen jälkeen kaasukäyttöiset trukit käyttivät samaa kaasua kuin maalaamo. Trukkien osuus polttoöljyn käytöstä perustui kiinteistöhuoltajan arvioon ja kaasukäyttöisten trukkien osuus maalaamokaasun kulutuksesta perustui trukkien keskimääräiseen kulutukseen ennen maalaamon valmistumista. Sähköisten trukkien osuuden sähkönkulutuksesta oletettiin olevan niin pieni, että sen voi jättää huomioimatta taseiden muodostamisessa. Trukkien polttoaineiden kulutuksen oletettiin muodostuvan lämpökuormaksi tuotantotilaan.

#### **4.4.6 Sisä- ja ulkolämpötilat**

Toimipisteen toimistorakennuksen ja tuotantotilan sisälämpötiloille pyrittiin löytämään mahdollisimman hyvin todellisuutta vastaavat sisälämpötilat, joita voisi käyttää mallinnuksessa kuukausien keskimääräisenä sisälämpötilana. Toimistorakennuksen osalta arvon määrittäminen perustui toimistorakennuksessa olevaan sisäilmalämpömittariin, jonka perusteella toimistorakennuksen sisäilman keskimääräiseksi lämpötilaksi määriteltiin 21 °C läpi vuoden. Tuotantotilan sisäilman lämpötilan määrittäminen varten otettiin lämpökameralla kuvia paikan päältä 8.11.2019. Kuvien perusteella huomattiin, että tuotantotilassa on melko vahva lämpötilakerrostuma ja lämpötilat ovat eri osissa hallia huomattavasti erilaisia. Esimerkki lämpötilan kerrostumisesta on liitteessä 11.

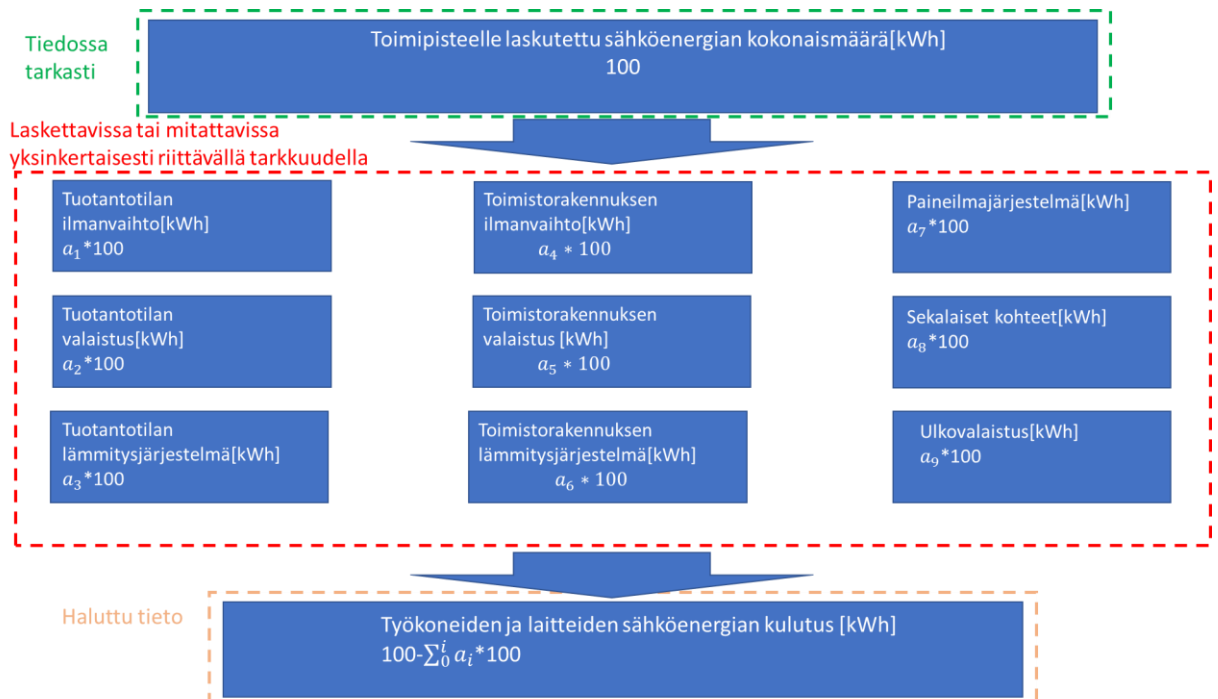
Sisälämpötiloihin eri osissa hallia vaikuttavat esimerkiksi tuotantokoneiden sijainnit, nosto-ovien läheisyys ja yläpohjan rakenne. Sisälämpötilalle ei kuitenkaan tutkimuksen puitteissa alettu määrittämään absoluuttisen tarkkoja arvoja vaan pyrittiin löytämään tarpeeksi tarkat keskiarvolämpötilat, joita voisi käyttää jokaisena kuukautena. Lämpötilakerrostuman vuoksi määriteltiin lämpöhäviöiden mallinnusta varten 3 eri lämpötilaa: alapohjaa vastaavan ilman lämpötila, seiniä vastaava lämpötila ja yläpohjaa vastaava lämpötila. Vastaavat lämpötilat määriteltiin olevan, heinäkuuta lukuunottamatta, alapohjalle 17 °C, seinille 19 °C ja yläpohjalle 21 °C. Lämpöenergian määrän, jota tarvitaan tuloilman lämmittämiseen tilassa, käytettiin näiden lämpötilojen keskiarvoa. Vuoden 2018 heinäkuu oli poikkeuksellisen lämmin, jonka takia heinäkuussa oletettiin koko tuotantotilan olevan 21 asteista.

Lämpöhäviöiden laskennassa käytettiin kuukausikohtaisia keskilämpötiloja ulkoilmalle ja maalle. Tiedot saatiin paikalliselta kaukolämpöverkkoyhtiöltä. Ulkoilman ja maan lämpötilan oletettiin lämpöhäviöiden laskentaa varten pysyvän vakiona koko kuukauden ajan. Kuukausikohtaiset keskimääräiset lämpötilat löytyvät liitteestä 12. Ilmanvaihtokoneiden mallinnusta varten käytettiin tuntikohtaisia arvoja ulkolämpötiloille. Liitteessä 12 ovat myös auringon aiheuttaman lämpökuorman laskemista varten käytettävät lähtötiedot sekä työntekijöiden aiheuttamien lämpökuormien laskentaa varten tehty kuukausikohtainen jako arki- ja viikonloppupäivien suhteen.

## 4.5 Energiataseiden muodostusmetodologiat

Työn laajuuden rajaamiseksi eri energialajien taseet pyritään suorittamaan ilman suuren mittaus suunnitelman laatimista ja tekoa. Oletuksena on, että tarkasteltavassa kiinteistössä ei ole käytössä kattavaa energiankulutuksen seuranta-automaatiikkaa, jolloin tietoa energiankulutuksesta sekä erilaisten energiaa kuluttavien komponenttien toiminnasta on lähtökohtaisesti tarjolla vain rajallisesti. Toimipisteen analysoinnissa pyritään käyttämään mahdollisimman paljon haastatteluja sekä valmiiksi arkistoituja tietoja. Mittauksia tehdään vain siltä osin kuin nähdään tarpeelliseksi. Eri energialajien vertailun helpottamiseksi kaikki energiamuodot muutetaan yksikköön kWh. Eri energialajien taseiden muodostusmetodologiat on selitetty seuraavissa kuvissa.

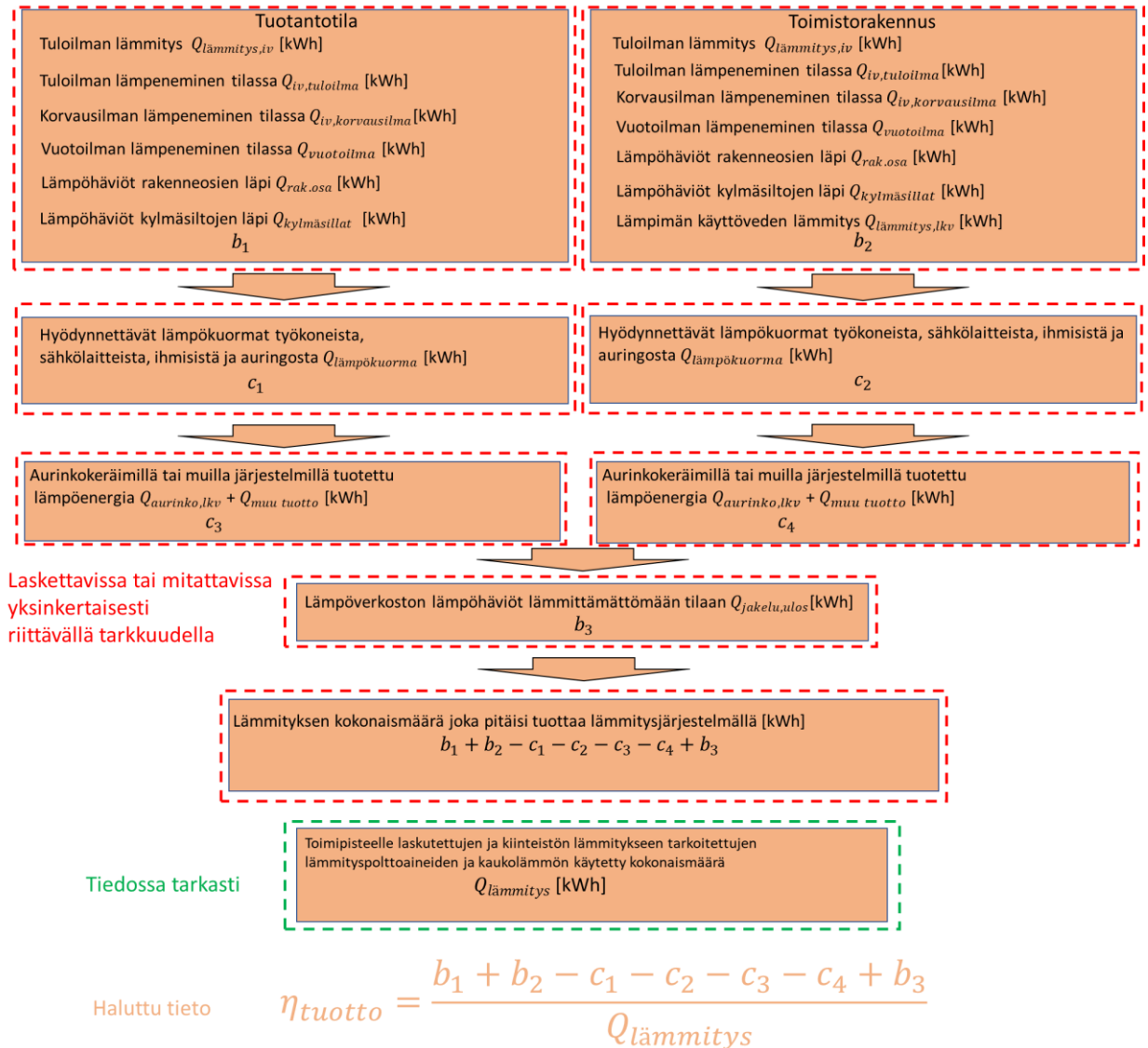
Sähkötaseen muodostus periaate on esitetty kuvassa 17.



**Kuva 17 Tutkimuksessa käytetty sähkötaseen muodostusmenetelmä**

Kuvassa 17 esiintyvät kertoimet  $a_1 \dots a_9$  ovat väliltä  $0 \dots 1$  ja ne kuvaavat kunkin erilliseksi sähkönkulutuksen kohteeksi määritellyn kokonaisuuden osuutta kokonaissähkönkulutuksesta. Tavoitteena on saada määriteltyä työkoneiden ja laitteiden osuus sähköenergian kulutuksesta. Yksittäisten työkoneiden osuutta työkoneiden kokonaiskulutuksesta ei kuitenkaan pyritä määrittelemään tarkemmin.

Lämpötaseen muodostusperiaate on esitetty kuvassa 18.

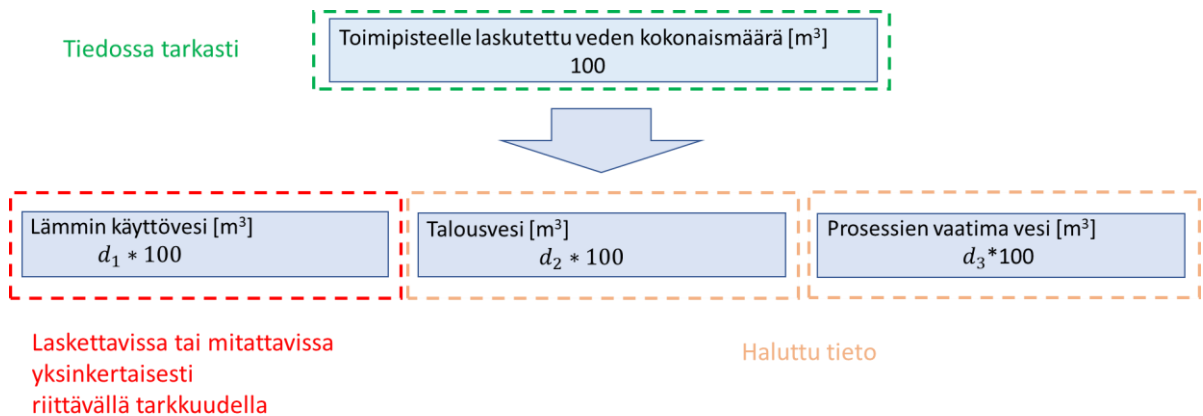


**Kuva 18: Tutkimuksessa käytetty lämpötaseen muodostusmenetelmä**

Kuvassa 18 esitetyn metodologian tarkoituksena on saada laskettua eri osa-alueiden kuluttama osuus lämpöenergiasta sekä ennen kaikkea saada tietoon lämmitysjärjestelmän hyötysuhde. Saadun hyötysuhteen avulla voidaan, kirjallisuuslähteitä hyödyntämällä, arvioida kuinka hyvin muodostettu tasemalli vastaa todellisuutta. Hyötysuhdetta laskettaessa yllä olevalla metodilla on huomioitava taseen antamien tuloksien realisti-

suus. Esimerkiksi jos taselaskenta antaa tulokseksi paljon lämmitysjärjestelmällä katettavaa lämpöenergiaa jollekin tilalle, mutta kyseisessä tilassa ei oikeasti ole lämmitysjärjestelmän päätelaitteita, on malli varmasti väärin. Tällöin on arvioitava mistä taseen virheet voivat johtua. Tärkeintä on varmistua, että laskettua lämmitysjärjestelmällä katettavaa energiaa muodostuu vain kohteisiin, joissa oikeasti on lämmitysjärjestelmän päätelaitteita. Taseen avulla saatuja tuloksia tulisi esitellä kiinteistön henkilökunnalle ja niitä pitäisi verrata kirjallisuudesta löytyviin vertailukelpoisiin arvoihin. Näin voidaan varmistua, että taseen antamat tulokset ovat käyttökelpoisia.

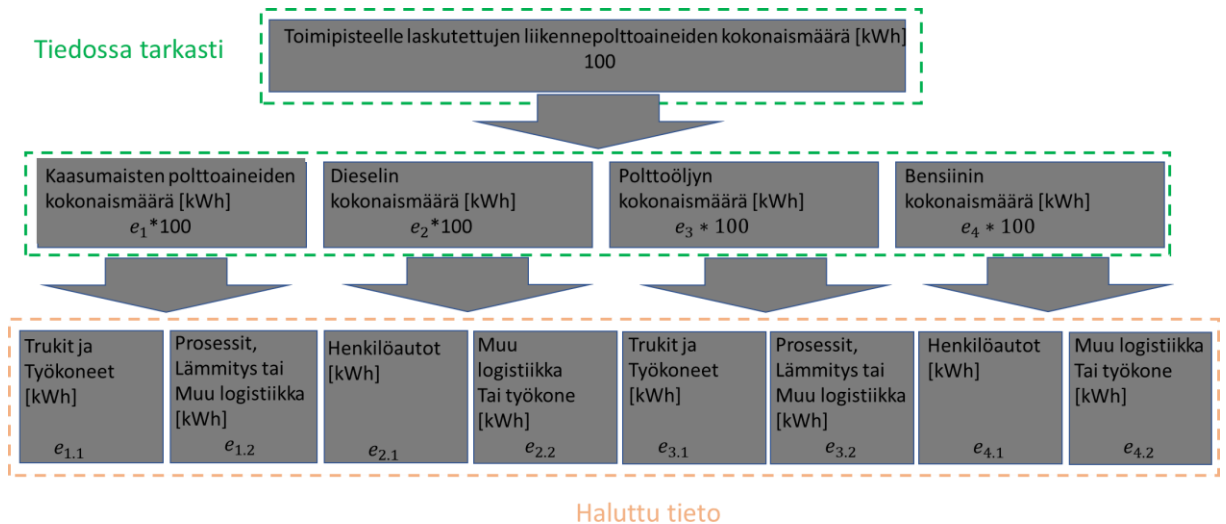
Vesitaseen muodostusperiaate on esitetty kuvassa 19.



**Kuva 19: Tutkimuksessa käytetty vesitaseen muodostusmenetelmä**

Vesitaseen muodostukseen ei tässä tutkimuksessa käytetty yhtä paljon aikaa kuin sähkö- ja lämpötaseen muodostukseen. Kirjallisuudesta löydettiin laskentakaavoja vain lämpimän käyttöveden kulutuksen arviointiin ja muiden kohteiden kulutusten arvioinnit perustuivat kiinteistöhoitajan haastatteluihin. Vesitaseen perusteella haluttiin vain arvioida siitä kuinka paljon vettä eri komponentit kuluttavat.

Liikennepolttoainetaseen muodostusperiaate on esitetty kuvassa 20.



**Kuva 20: Tutkimuksessa käytetty liikennepolttoaineataseen muodostusmenetelmä**

Liikennepolttoaineataseen muodostus oli siinä mielessä yksinkertaisempaa kuin muiden taseiden, että yksittäistä taseen komponenttia saattoi kuluttaa vain yhdenlaiset työkooneet. Lisäksi yrityksen kirjanpito menetelmät tekivät helpoksi käytetyn dieselin jakamisen pakettiautojen ja henkilöautojen kesken. Vaikeammin tarkasteltavien kohteiden, kuten trukkien käyttämän polttoöljyn osuuden, määrittäminen perustui kiinteistöhoitajan haastatteluihin. Liikennepolttoaineiden kulutuskohteita varten ei etsitty mallinnus- tai laskentamenetelmiä kirjallisuudesta. Taseen tarkoituksena oli saada arvio siitä, miten suuren osan eri liikennepolttoaineita kuluttavat kohteet muodostavat liikennepolttoaineiden kokonaiskulutuksesta.

## 5. TULOKSET JA ANALYSOINTI

### 5.1 Konsernin energiankulutus ja energiakustannukset

Konsernin energiankulutuksesta ja niistä aiheutuvista kustannuksista saatiin loppujen lopuksi kerättyä kattavat tiedot vain vuosilta 2017 ja 2018. Vuoden 2016 osalta tiedot eri energialajien ostoista olivat niin puutteelliset, että ne jätetään analysoinnin ulkopuolelle. Vuosien 2017 ja 2018 osalta ilmeni myös muutamia puutteita tiettyjen yksiköiden energiankulutukseen liittyen, mutta näiden puutteiden ei uskottu vaikuttavan merkittävästi kokonaiskuvaan. Loppujen lopuksi tutkimukseen sisällytettiin yhdeksän eri toimipistettä, jotka ovat lueteltu alla olevassa taulukossa.

#### **Taulukko 21: Tutkimukseen valikoidut yksilöt**

*\*Elekmerk Oy:n yksikkö*

*\*\*Yksikössä otettu vuonna 2018 käyttöön uusia tiloja, joista ei ollut vielä saatavissa tilavuus tai pinta-ala tietoja*

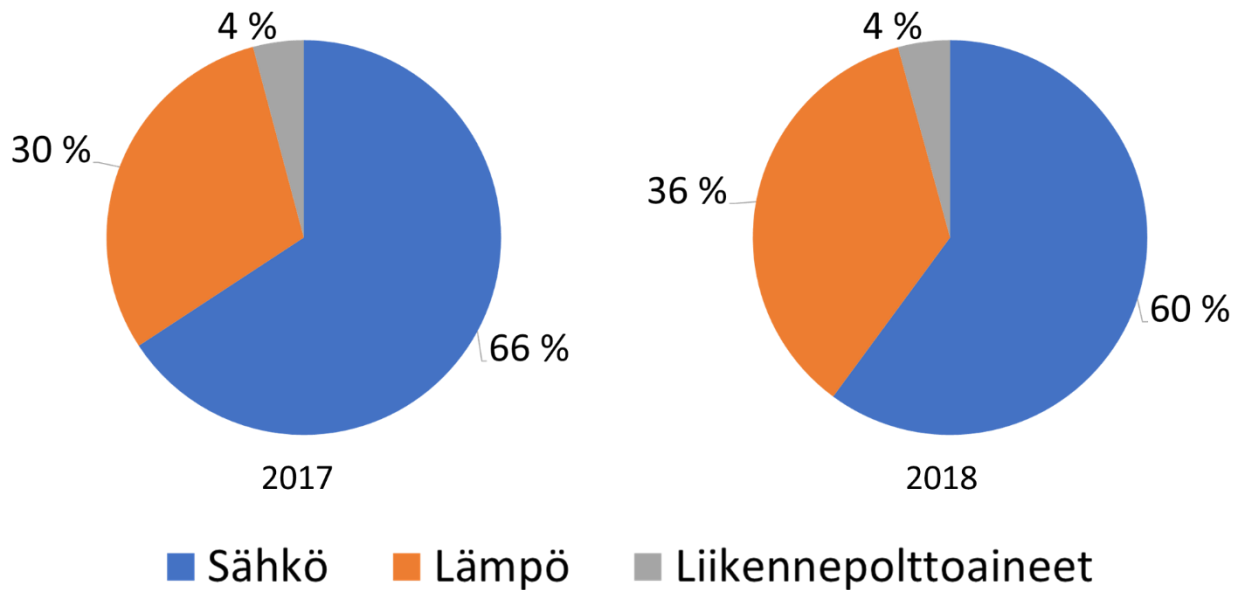
*\*\*\*Alamarin-Jet yksikkö*

Yksikkö #	Kerrosala [m <sup>2</sup> ]	Tilavuus [m <sup>3</sup> ]	Valmistumisvuosi	Käyttötarkoitus
Kolhontie 88	10441	80725	1970-1989	tuotanto, toimisto
2*	2353	15000	2000	tuotanto, toimisto
3*	954	6342	ei tietoa	tuotanto, toimisto
4	5392**	52205**	2006-2010	tuotanto, toimisto
5	2558	17760	1984-1988	tuotanto, toimisto
6	10200	62500	ei tietoa	tuotanto, toimisto
7	1200	11580	2002	tuotanto, toimisto
8	1200	6000	1968	tuotanto, toimisto
9***	2346	17575	1999	tuotanto, toimisto

Tarkoituksena on esitellä ensin konsernin energiankäytön yleiskuva ja sen jälkeen paneutua tarkemmin siihen, miksi Kolhontien yksikkö valittiin tarkemman analysoinnin kohteeksi. Lisäksi analysoidaan konsernin energiatalouden kehitystä. Vertailukohteena käytetään vuotta 2014.

Kokonaisuudessaan konsernin energiankulutuksen jakaumat vuosien 2017 ja 2018 osalta ovat alla olevassa kuvaajassa.





**Kuvaaja 3: Konsernin energiankulutuksen jakauma vuosina 2017 ja 2018.**

Kuvaajasta 3 voidaan todeta, että sähkö muodostaa suurimman osan konsernin energiankulutuksesta. Vertailemalla kuvaajia 1 ja 3 voidaan todeta, että tässä tutkimuksessa tarkastellussa konsernissa sähköenergian osuus energian kokonaiskulutuksesta on hie- man suurempi kuin kone- ja metallituoteteollisuudessa keskimäärin. Huomattavaa ku- vaajasta 3 on lisäksi, että lämmön osuus kasvoi vuodesta 2017 vuoteen 2018 merkittä- västi. Tarkempi kuva konsernin energian- ja vedenkulutuksesta ja niistä aiheutuneista kustannuksista on esitetty alla olevassa taulukossa.

**Taulukko 22: Teiskonen Oy konsernin energiankulutuksen kehittyminen**

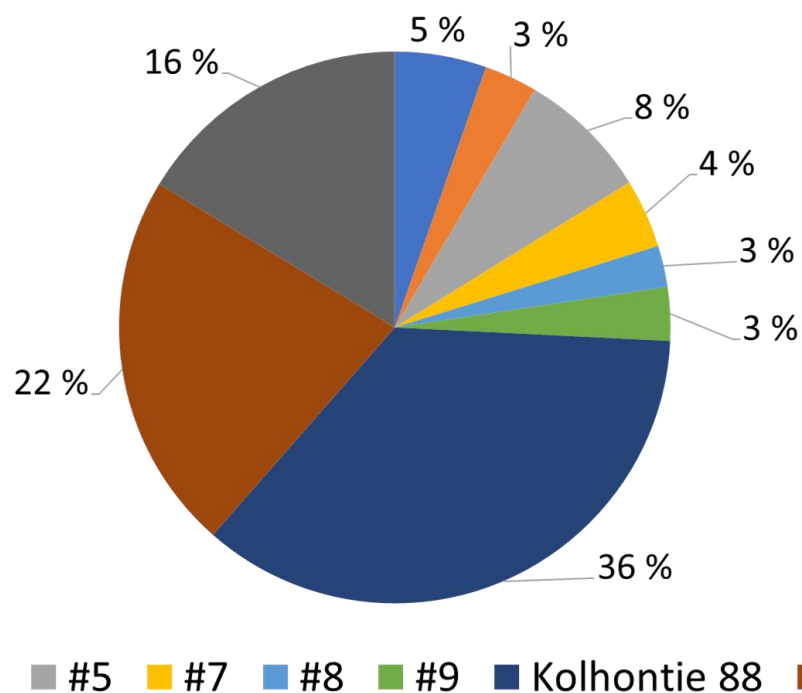
\*Tiedot merkittävästi puutteelliset

Suure	2014	2017	2018
<b>Energiankulutus yhteensä [GWh]</b>	<b>12,00</b>	<b>13,64</b>	<b>14,66</b>
Sähköenergia yhteensä [GWh]	7,92	8,97	8,81
Lämpöenergia yhteensä [GWh]	3,24	4,10	5,23
Liikennepolttoaineet yhteensä [GWh]	0,84	0,57	0,62
<b>Energiakustannukset yhteensä [M€]</b>	<b>1,04</b>	<b>1,02</b>	<b>1,06</b>
Sähköenergia yhteensä [M€]	0,69	0,71	0,70
Lämpöenergian yhteensä [M€]	0,24	0,22	0,27
Liikennepolttoaineet yhteensä [M€]	0,11	0,08	0,09
Veden käyttö [m <sup>3</sup> ]	Ei tietoa	9407*	13083
Vesimaksut [M€]	Ei tietoa	0,05*	0,06
Liikevaihto [M€]	Ei tietoa	56,4	65,2
Tilikauden tulos [M€]	Ei tietoa	3,5	3,1

Taulukosta 22 voidaan todeta, että vuoteen 2014 verrattuna vuonna 2018 konsernin säh- könkulutus on noussut noin 22 %:a, lämpöenergiankulutus on noussut noin 61 %:a ja

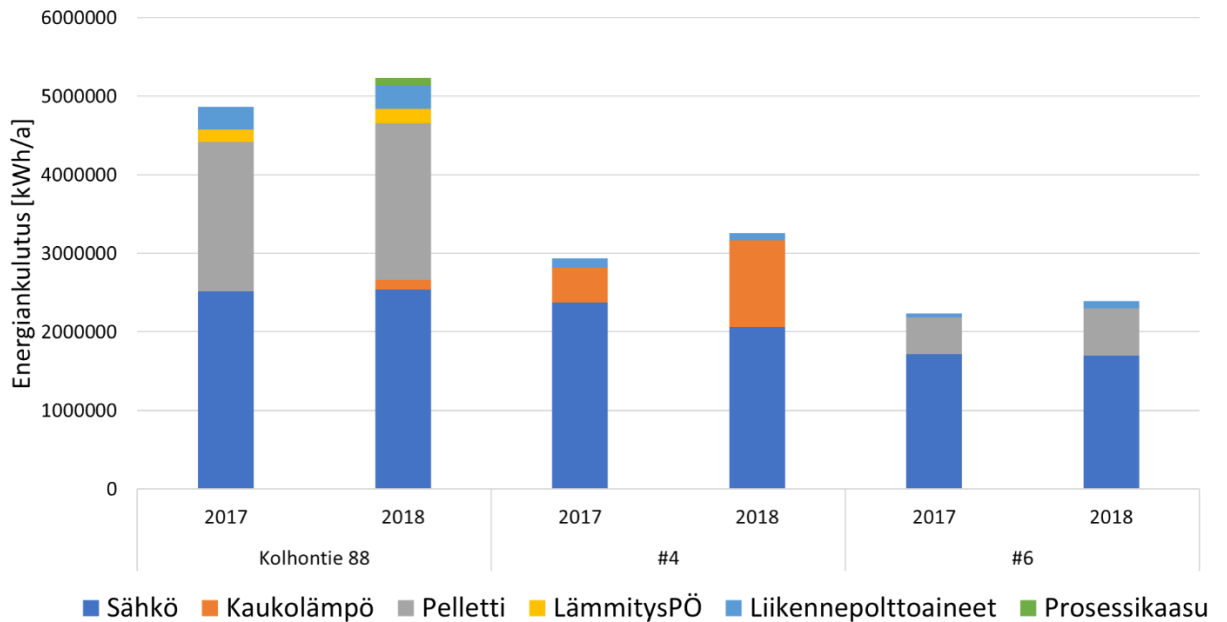
liikennepolttoaineiden kulutus pienentynyt noin 26 %:a. Veden kulutuksesta ei saatu tietoja vuodelta 2014. Vuosien 2017 ja 2018 välillä on eroa pääasiassa lämmönkulutuksen suhteen. Tarkastellaan seuraavaksi mistä energiankulutuksen merkittävä kasvu, erityisesti lämpöenergian suhteen, vuodesta 2014 vuoteen 2018 johtuu.

Energiankulutuksen kasvu vuosien 2014 ja 2018 välillä selittyy pääasiassa Kolhontien yksikön vaikutuksesta. Kolhontien yksikössä ei ollut vuonna 2014 merkittävää määrää tuotantoa, vaan sen sijaan vuonna 2014 oli konsernin käytössä pienempi yksikkö Keuruulla. Vuonna 2018 ei kyseistä Keuruun pienempää yksikköä ollut enää käytössä ja tuotanto oli siirtynyt Kolhontien tiloihin. Kolhontien käyttöönoton suuri vaikutus konsernin energiankulutukseen näkyy kuvaajasta 4.



**Kuvaaja 4: Konsernin energiankulutuksen jakautuminen yksikkökohtaisesti vuonna 2018**

Kuvaajasta 4 voidaan todeta, että Kolhontien yksikkö on suurin energiankulutuksen kohde konsernissa. Huomattavaa on lisäksi se, että suurin osa konsernin kuluttamasta energiasta kuluu kolmessa suurimmassa yksikössä. Kuitenkin vertailemalla suuria yksiköitä toisiinsa, huomataan Kolhontien energiankulutuksen poikkeavan muista suurista yksiköistä. Tämä voidaan havaita kuvaajasta 5.



**Kuvaaja 5: Konsernin suurimpien yksiköiden energiakulutuksen muodostuminen vuosina 2017 ja 2018.**

Kuvaajasta 5 on selvästi nähtävissä, että Kolhontien yksikössä on poikkeavan suuri lämmönkulutus verrattuna muihin isoihin yksiköihin. Suuri lämmönkulutus ei ole selitettävissä yksikön koolla tai sijainnilla. Tämä voidaan todeta vertailemalla yksiköiden normeerattuja ominaislämmönkulutuksia, jotka ovat taulukossa 23.

**Taulukko 23: Jyväskylään normeeratut ominaislämmönkulutukset 2018**

\*Pinta-ala tieto ei päivitetty, todellinen pinta-ala suurempi ja ominaiskulutus pienempi

\*\*Arvio tehty perustuen tilastokeskuksen keskimääräiseen kaukolämmön hintaan

Yksikkö	Tilavuus [m <sup>3</sup> ]	Jyväskylään normeerattu ominaislämmönkulutus 2018 [kWh/m <sup>3</sup> ]
#2	15000,00	19,13
#3	6342,00	26,96
#7	11580,00	5,05
Kolhontie 88	80725,00	31,56
#4	52205,00*	18,37*
#6	62500,00	12,54
#8	Ei tietoa	Ei tietoa
#9	17575,00	11,27**
#5	17760,00	32,11

Taulukosta 23 huomataan, että Kolhontien ominaislämpöenergiakulutus on huomattavan suuri verrattuna yksiköihin #4 ja #6. Kolhontien suuri lämmönkulutus näkyy merkittävästi koko konsernin energiakulutuksessa, sillä se muodostaa yksinään noin 45 %:a konsernin lämmönkulutuksesta ja 37 %:a lämmityskustannuksista. Näin ollen Kolhontien

yksikkö on yksinään suurin selittävä tekijä vuosien 2014 ja 2018 välisille eroille lämmönkulutuksessa. Yksikkö on myös suurin sähköenergiankulutuksen kohde konsernissa, joten myös sähkökulutuksen kasvu on pääasiassa selitettävissä Kolhontien yksikön käyttönotolla. Erot vuoden 2017 ja 2018 lämmönkulutuksessa liittyvät sen sijaan pääasiassa yksikön #4 uusien tilojen käyttöönotolla, mikä on nähtävissä kuvaajasta 5. Lisäksi vuoden 2018 kylmä alkutalvi saattaa näkyä tilastoissa kasvaneena lämmönkulutuksena.

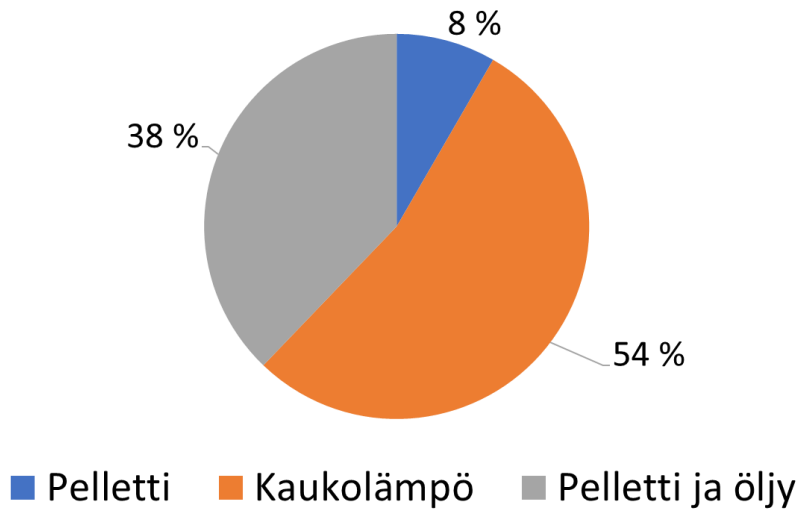
Muita huomionarvoisia asioita taulukosta 22 on, että kasvaneesta energiankulutuksesta huolimatta energia muodosti vain alle 2 %:a konsernin menoista kaikkina tarkasteltuina vuosina. Tästä voisi päätellä, että energiankulutusta ei voida pitää erityisen merkittävä menoeränä konsernille. Voidaan kuitenkin todeta, että konsernin energiatalous on parantunut huomattavasti vuodesta 2014 vuosiin 2017 ja 2018. Kokonaisuudessaan konsernin energiankulutus kasvoi vuodesta 2014 vuoteen 2018 mennessä noin 22 %:a ja samassa ajassa energiakustannukset kasvoivat vain noin 2 %:a. Näennäisesti näyttää siltä, että konserni on löytänyt keinoja hankkia energiaa huomattavasti halvemmallalla vuosina 2017 ja 2018 kuin vuonna 2014. Tämä on nähtävissä myös taulukosta 24, johon on kuvattu eri energiamuotojen hintakehitystä vuodesta 2014 lähtien. Taulukon 24 energian hinnat ovat indeksoitu siten, että vuoden 2014 kunkin energiamuodon hinnat vastaavat arvoa 1,0. Hinnat on indeksoitu diplomityön tilaajan toiveesta.

**Taulukko 24: Konsernin ostamien energiamuotojen hinnan kehitys**

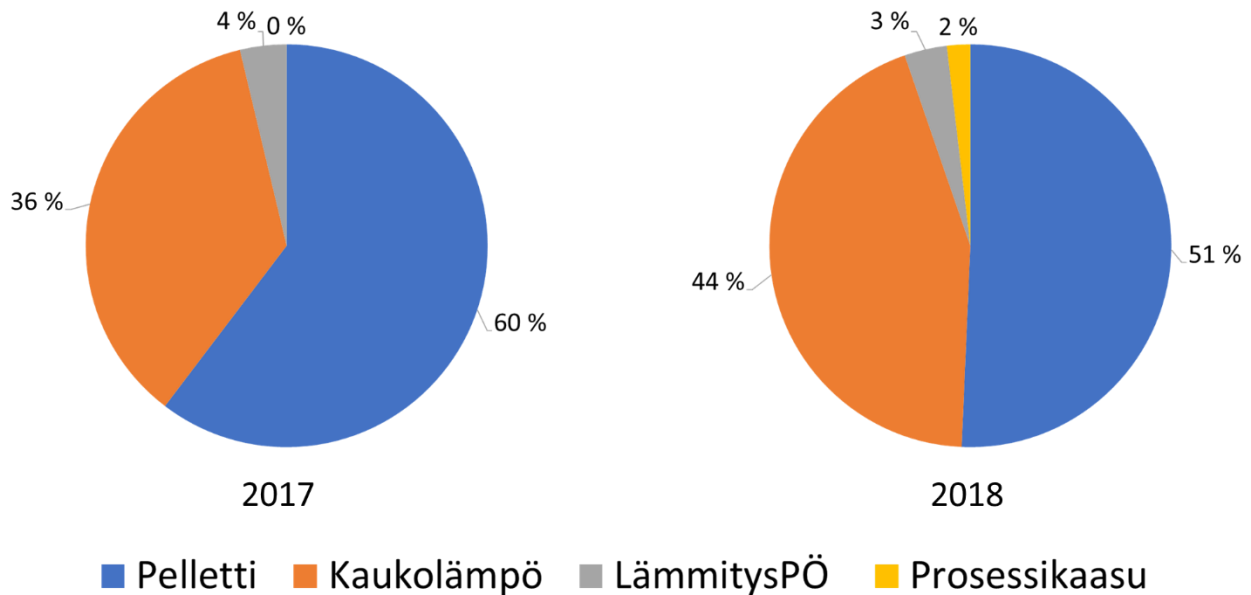
Suure	2014	2017	2018
Sähkön hinta (siirto+energia) [indeksi]	1,0	0,91	0,91
Lämmön hinta [indeksi]	1,0	0,72	0,69
Liikennepolttoaineiden hinta [indeksi]	1,0	1,09	1,09

Hankitun energian hinnan lasku liittyy pääasiassa kahteen syyhyn. Ensinnäkin konserni neuvotteli vuosien 2017 ja 2018 aikana uudet sähkösopimukset yksiköihinsä. Uusien sopimuksien nojalla kaikki yksiköt ostavat sähköenergiansa samalta toimittajalta samaan hintaan, mikä kokonaisuudessaan on laskenut konsernin ostaman sähkön hintaa huomattavasti. Muutokset sähkön hinnassa vaikuttavat erityisen paljon energiasta koituihin kokonaiskustannuksiin, sillä sähkö muodostaa suurimman osan konsernin energiankulutuksesta ja kustannuksista. Sähkönkulutukseen liittyen huomionarvoista on lisäksi se, että konsernin sähkökulutus laski vuodesta 2017 vuoteen 2018, vaikka liikevaihto nousi. Olettamalla, että sähköenergia on pääasiallinen arvonlisäystä tuottavien koneiden ja laitteiden energianlähde, voidaan päätellä konsernin tuotannon tehokkuuden parantuneen. Liikevaihdon kasvuun voi kuitenkin liittyä myös monia syitä, jotka eivät liity energiankulutukseen.

Toinen selittävä tekijä merkittävästi parantuneelle energiataloudelle on konsernin käyttämän lämpöenergian halventuminen. Lämpöenergian halvemmalle hinnalle on muutamia selityksiä. Tarkastelemalla kuvaajia 6 ja 7, voidaan todeta pellettien konsernin lämmönlähteistä kasvaneen ja kaukolämmön vähentyneen.



**Kuvaaja 6: Konsernin lämpöenergian jakauma energialähteen mukaan vuonna 2014**



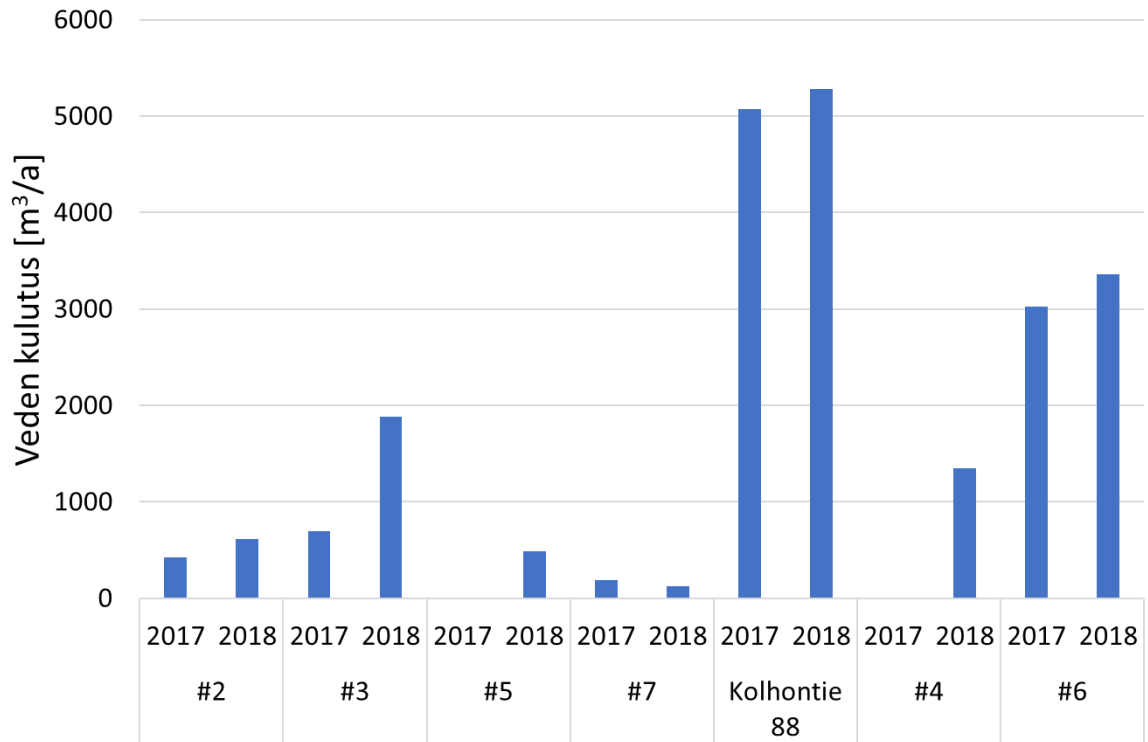
**Kuvaaja 7: Konsernin lämpöenergian jakaumat energialähteen mukaan vuosina 2017 ja 2018.**

Vuoden 2014 tietojen tarkastelua vaikeuttaa epäselvä jako pellettien ja öljyn kulutuksen välillä, mutta siitä huolimatta voidaan eri lämmönlähteiden keskimääräisiä hintoja tarkastelemalla ymmärtää mistä konsernin halventunut lämpöenergian hinta johtuu. Vuosina 2017 ja 2018 pellettien, öljyn ja kaukolämmön keskimääräiset hinnat olivat 31,12 €/MWh,

80,87 €/MWh ja 79,21 €/MWh. Pelletit ovat ostetun lämpöenergian suhteen ylivoimaisesti halvin vaihtoehto. Lämpöenergian kustannusten tilastointi tällä tavalla voi olla hie-man harhaanjohtavaa, sillä vaikka pellettien hinta ostettua energiasisältöä kohti voi olla halvempi kuin kaukolämmön, on kaukolämpövaihtimien hyötysuhde parempi kuin pellettikattiloiden. Lisäksi kaukolämmön hinnan muodostumisesta johtuen on tyypillistä, että kaukolämmön hinta energiasisältöä kohti laskee, mitä enemmän sitä käytetään. Huomioitavaa on myös pellettien käytön vaatima suhteellisen kallis lämmöntuottolaitteisto ja suurempi huollon tarve kuin kaukolämmön käytössä. Ostetun lämpöenergian käytön hyötysuhde ja lämmöntuoton vaatimat työtunnit tulisi ottaa huomioon energiataloutta analysoidessa, mutta tarkkojen tietojen hankkiminen vaatisi jokaisen toimipisteen lämmöntuoton yksityiskohtaista tarkastelua. Varmasti voi kuitenkin todeta sen, että öljy on konsernin käyttämistä lämmönlähteistä ehdottomasti kallein.

Liikennepolttoaineiden kulutus näyttää taulukon 22 mukaan laskeneen vuodesta 2014 vuosiin 2017 ja 2018 mennessä. Huomioitavaa on, että Granlund Oy:n tekemän selvityksen mukaan oli vuonna 2014 trukkien käyttämä polttoöljyn määrä 21960 litraa, kun vuonna 2018 trukkien käyttämän polttoöljyn määrän laskettiin olevan vain 3960 litraa. Varmaa selitystä isolle eroavaisuudelle ei löydetty. Eroavaisuus voi mahdollisesti johtua siitä, että vuoden 2014 luvuissa olisi lämmitykseen käytettyä polttoöljyä allokoitu trukeille, tai vaihtoehtoisesti toisinpäin. Ero voi johtua myös muutoksesta esimerkiksi työkoneiden lukumäärän suhteen tai puutteellisista tiedoista koskien vuoden 2017 ja 2018 tietoja. Erot polttoöljyn käytössä selittävät myös taulukossa 24 esiintyvän liikennepolttoaineista maksetun hinnan erot vuoden 2014 ja vuosien 2017 ja 2018 välillä.

Veden käytöstä ei saatu vuodelta 2014 tietoja, koska veden kulutusta ei oltu otettu huomioon Grandlund Oy:n tekemässä energiakatselmuksessa. Veden käytöstä aiheutuneet kustannukset olivat vuosina 2017 ja 2018 kuitenkin niin merkittävät, että niihin on syytä kiinnittää huomiota. Veden käytön muuttuminen vuodesta 2017 vuoteen 2018 selittyy pääasiassa puutteellisista tilastoista koskien vuoden 2017 veden kulutusta, jotka nähdään kuvaajasta 8.



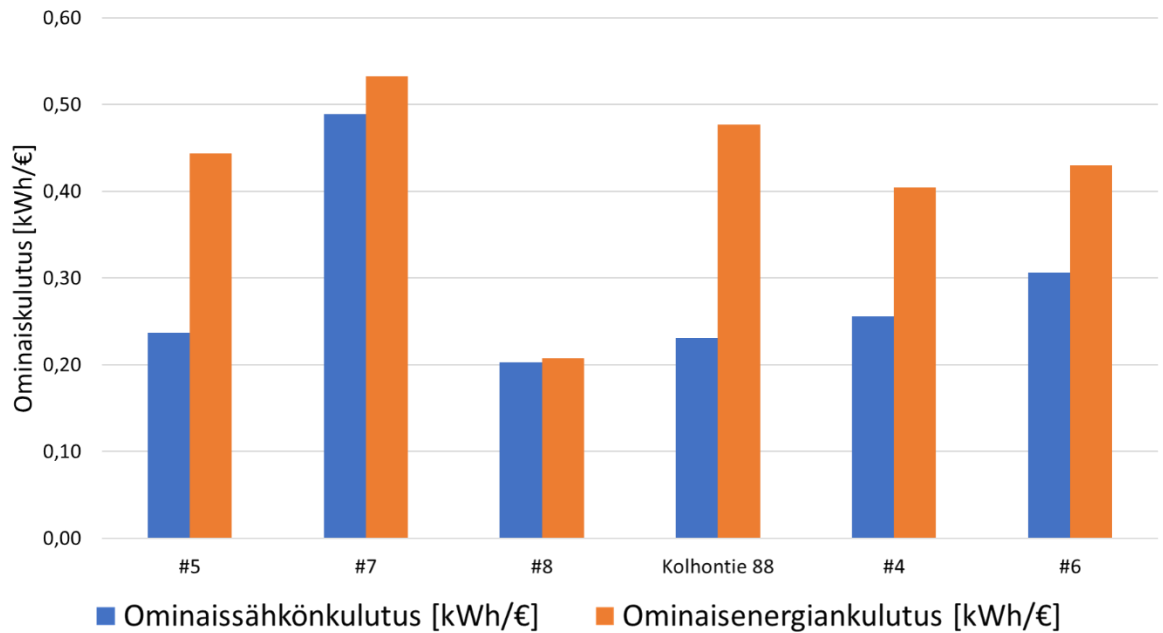
**Kuvaaja 8: Konsernin yksikkökohtainen veden kulutus vuosina 2017 ja 2018**

*\*Yksiköiden #4 ja #5 vuoden 2017 tiedot puuttuvat*

*\*\*yksiköistä #8 ja #9 ei saatu veden kulutukseen liittyviä tietoja*

Veden kulutuksen suhteen ei saatu tietoon miksi yksikkö #3:n kulutus nousi niin paljon vuodesta 2017 vuoteen 2018. Kuvaajasta 8 on selvästi nähtävissä vesileikkureita sisältävät yksiköt, eli Kolhontie ja yksikkö #6. Kokonaisuudessaan vesileikkaus on konsernin merkittävin veden kulutuksen kohde.

Energiankäytön tehokkuuteen liittyvää tietoa saatiin kerättyä vain HT Laserin yksiköiden osalta. Näiden yksiköiden osalta saatiin tietoon tuotettu kuukausittainen arvonlisäys, jota voidaan verrata käytettyyn energian määrään. HT Laserin yksiköiden ominaisenergiakulutuksia on esitelty kuvaajassa 9.



**Kuvaaja 9: HT Laserin yksiköiden energiankulutuksien suhde tuotettuun arvonnisäykseen vuonna 2018**

*\*Yksikön #8 puuttuvat tiedot lämpöenergian käytöstä tekevät yksiköstä kohtuuttoman energiatehokkaan*

Keskimäärin HT Laserin yksiköiden ominais sähkönkulutuksille sekä ominais energiankulutuksille löydettiin vertailuarvot 0,245-0,650 kWh/€ ja 0,35 kWh/€ [25,26]. Näiden arvojen puitteissa HT Laserin yksiköt vastaavat alan keskimääräisiä arvoja. Huomattavaa on, että suuri lämmönkulutus tekee Kolhontien yksiköstä kokonaisuudessaan epäenergiatehokkaan, vaikka se on sähköenergian käytön suhteen yksi konsernin tehokkaimmista yksiköistä. Kolhontien yksikkö on esimerkiksi yksikköä #6 tehokkaampi sähköenergian suhteen, mutta epätehokkaampi energian kokonaiskulutuksen suhteen. Kuvaajasta 9 voidaan yleisesti myös todeta, että yksiköiden välillä on suuria eroja niiden käyttämän energian ja niiden tuottaman arvonnisäyksen suhteen. Erojen selittäminen vaatisi kuitenkin kaikkien yksiköiden yksityiskohtaista analysointia.

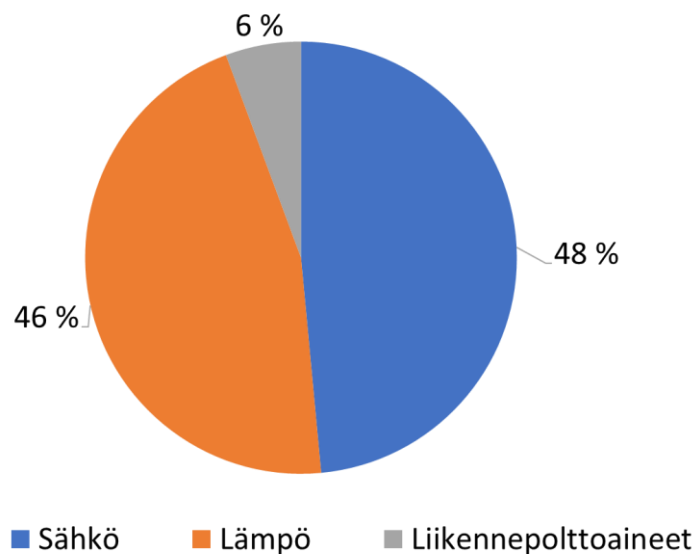
Kaiken kaikkiaan konsernin energiankulutus on kasvanut ja energiatalous parantunut vuodesta 2014 vuosiin 2017 ja 2018 verrattuna. Energiankäytön kasvu selittyy pääasiassa Kolhontien yksikön käyttöönotolla. Parantunut energiatalous selittyy pääasiassa paremmilla sähkösopimuksilla ja pellettien kasvaneesta osuudesta lämmönlähteenä. Sähköenergian suhteen konserni näyttää muuttuneen tehokkaammaksi vuodesta 2017 vuoteen 2018, tuottaen suuremman liikevaihdon pienemmällä sähköenergian kulutuksella. Liikennepolttoaineiden ja veden kulutuksien suhteen ei ole trukkien polttoöljyn kulutusta lukuun ottamatta tapahtunut merkittäviä muutoksia vuosien 2014, 2017 ja 2018 aikana. Lämpöenergian osalta käytetty lämpömäärä on noussut merkittävästi vuodesta



2014 vuosiin 2017 ja 2018, mutta lämpöenergian hintaa on saatu laskettua huomattavasti. Kasvaneeseen lämpöenergian kulutukseen vaikuttaa ennen kaikkea Kolhontien suuri lämmönkulutus, sekä yksikön #4 uudet tilat. Kolhontien yksikön pellettien kulutus yksinään riittää laskemaan konsernin keskimääräistä lämpöenergian hintaa, joten vaikka lämpöenergian hintaa on saatu laskemaan ei konsernin lämpöenergian käytön voi sanoa tehostuneen merkittävästi. Esitellään seuraavaksi Kolhontien yksikön tarkemman analysoinnin antamia selityksiä korkealle lämmönkulutukselle ja muita taselaskennan antamia tuloksia sekä ehdotukset yksikön energiatehokkuuden parantamiseksi.

## 5.2 Yksittäisen toimipisteen analyysin tulokset

Kolhontien yksikön olennaisinta energiankulutuksen liittyvää ongelmaa muihin konsernin yksiköihin verrattuna voidaan yksinkertaisesti havainnollistaa kuvaajan 10 avulla. Kuvaajasta nähdään, että lämpöenergian kulutus muodostaa noin 46 prosenttia koko yksikön energiankulutuksesta. Verrattuna esimerkiksi samaa kokoluokkaa olevaan yksikköön #6, jossa sama luku on 25 %:a, on lämmönkulutuksen osuus Kolhontiellä selvästi suurempi.

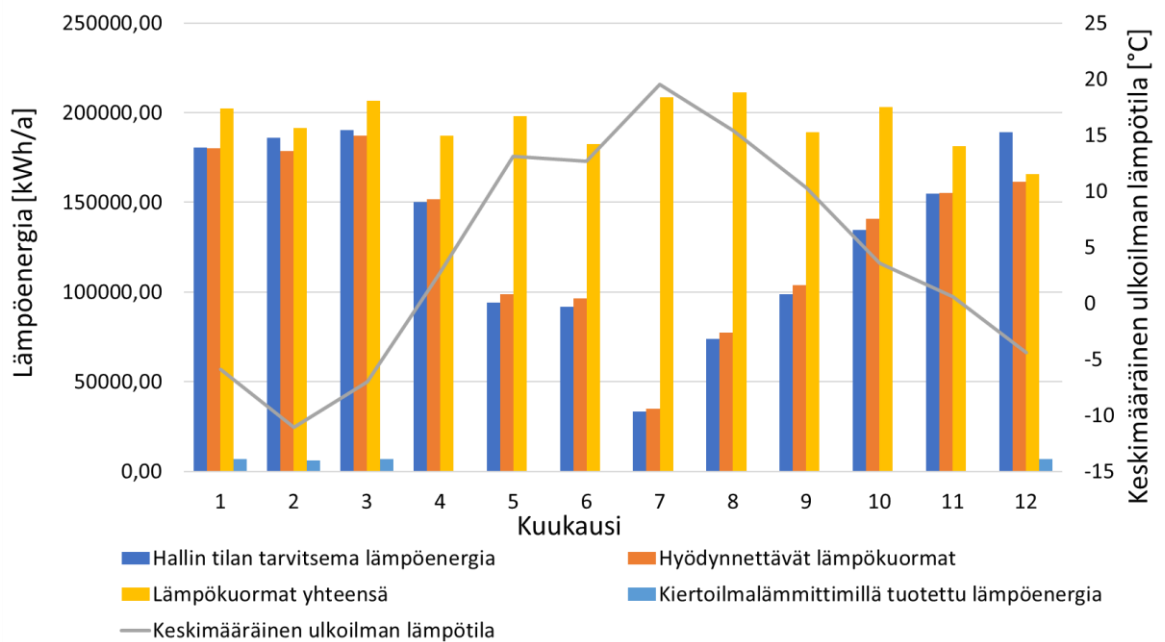


### ***Kuvaaja 10: Kolhontien yksikön energiankulutuksen jakauma vuonna 2018.***

Tärkein tutkittava asia Kolhontien energiankulutuksen osalta on sen suuri lämpöenergian kulutus, joten esitellään ensin Excelin avulla tuotetun lämpötaseen antamia tuloksia. Tarkastellaan ensin yksikön tuotantotilaa, sillä siinä kuluu suurin osa yksikön lämpöenergiasta.

### Tuotantotilan rakenteiden vaikutus lämpöenergian kulutukseen

Lämpötasetta tehdessä merkittäväksi huomioksi nousi se, että yksikön lämmitysenergiankulutuksen tarkastelu tulisi pääasiassa keskittää ilmanvaihtojärjestelmään ja lämmöntuottolaitteistoon eikä lämpöhäviöiden pienentämiseen. Esimerkiksi Kolhontien tapauksessa koko mallinnettu tuotantotilan tilan tarvitsema lämpöenergia on katettavissa tuotantolaitteista aiheutuville lämpökuormilla, vaikka tilaan puhalletaan suhteellisen paljon ulkoilmaa (suuri  $Q_{iv,tuloilma}$ ) ja hallin rakenteiden U-arvot ovat huonot. Tätä on havainnollistettu kuvaajassa 11. Huomattavaa on, että lämpöhäviöiden ja lämpökuormien mallinnuksessa on varmasti jonkin verran virhettä. Kuitenkin tieto siitä, että tuotantotilassa ei todellisuudessa ole merkittävästi lämmitysjärjestelmän päätelaitteita tarkoittaa, että tuotantotilan lämmittämiseen kohteessa ei tarvita erillisiä lämmityslaitteita. Ainoat tuotantotilassa olevat lämmitysjärjestelmän päätelaitteet ovat pienitehoiset kiertoilmalämmittimet, joiden päätarkoitus on tasata lämpötilakerrostumia ja kohdistaa lämpöenergiaa nosto-ovien kohdalle. Kiertoilmalämmittimet eivät reagoi sisäilman lämpötilaan vaan niitä ohjataan ulkoilman lämpötilan mukaan



**Kuvaaja 11: Mallinnettu tuotantotilan tilan lämmitysenergian tarve, hyödynnettävät lämpökuormat ja kiertoilmalämmittimillä tuotettu lämpöenergia**

*\*Joulukuussa pienempi tuotanto näkyy lämpövajeena, tuotantotila mahdollisesti ollut silloin keskimääräistä kylmempi*

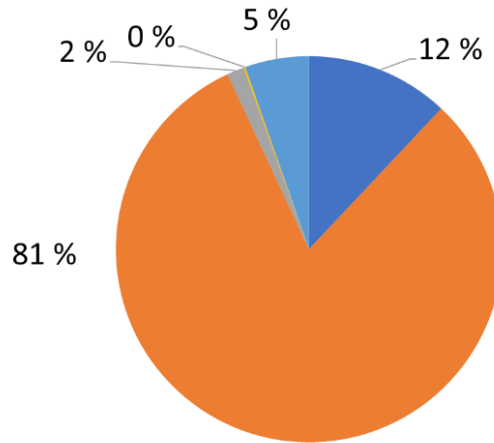
Kuvaajasta 11 nähdään, että mallin perusteella lämpökuormaa muodostuu tuotantotilassa keskimäärin enemmän kuin mitä on laskennallinen lämpöenergian tarve. Mallin perusteella tuotantotilan lämpökuormat riittävät siis pitämään sisälämpötilan siedettä-

vällä tasolla, vaikka rakenneosien eristävyys on huonolla tasolla. Rakennuksen rakenneosien huonolla eristävyydellä on varmasti jonkin verran vaikutusta yksikön lämpöenergiakulutukseen, sillä suuret lämpöhäviöt laskevat sisäilman lämpötilaa ja siten pienentävät lämmöntalteenotolla saatavaa tehoa. Kuitenkin mallin mukaan ilmanvaihtokoneiden poistoilman lämpötilan kasvatus esimerkiksi 2 asteella pienentäisi yksikön teoreettista lämmöntarvetta alle 4 prosenttia. Tämän perusteella yksikön tuotantotilan rakenneosien huonot U-arvot eivät ole selitys korkealle lämmönkulutukselle.

Rakenteiden huonoa tiiveyttä ei myöskään pidetty selittävänä tekijänä. Tämä johtuu siitä, että kyseisen kohteen osalta ylipaineinen tuotantotila pienentää vuotoilmavirran määrää, minkä takia vuotoilman lämmitystarve on suhteellisen pieni. Tuotantotilan nosto-ovien avaaminen ja auki pitäminen lisäävät varmasti tuotantotilan lämpöhäviöitä, joka näkyy laskeneena sisälämpötilana ja siten pienempänä lämmöntalteenotolla saatava tehona. Lisäksi nosto-ovien avaaminen aiheuttaa tilaan painehäviöitä, jotka joudutaan kompensimaan painesäädetyillä ilmanvaihtokoneilla. Tämä kasvattaa hetkellisesti tarvittavan tuloilmavirran määrää ja nostaa siten lämmityskustannuksia. Nosto-ovien tarpeettomaan auki pitämiseen oli kuitenkin jo alettu kiinnittää huomiota ja osaan ovista oli hankittu muovisia verhoa lämpöhäviöiden pienentämiseksi. Tämän perusteella nosto-ovet ja niiden käyttötapa ei riitä selittämään yksikön korkeaa lämmönkulutusta.

### **Tuotantotilan ilmanvaihtojärjestelmän vaikutus lämpöenergian kulutukseen**

Lämpökuormien suuresta määrästä johtuen yksikön tuotantotilan lämpöenergian tarpeen voisi olettaa muodostuvan siis lähes täysin ilmanvaihtokoneiden lämmitystarpeesta ja lämmitysjärjestelmän häviöistä. Näiden tietojen perusteella yksikön tuotantotilan lämpöenergian kulutuksen kannalta tärkeimmiksi tekijöiksi muodostuukin siis sisäänpuhalletun ulkoilmavirran määrä, lämmöntalteenoton hyötysuhde ja lämmöntuoton hyötysuhde. Lämpöenergian kulutuksen keskittymistä tuotantotilan ilmanvaihtojärjestelmään on havainnollistettu kuvaajassa 12, jossa on esitetty kohteen lämpöenergian käytön jakautuminen.



- Toimisto ja LKV
  - Kiertoilmalämmittimet
  - Maalamo
- Tuotantotilan ilmanvaihtokoneet
  - Häviöt lämmittämättömään tilaan

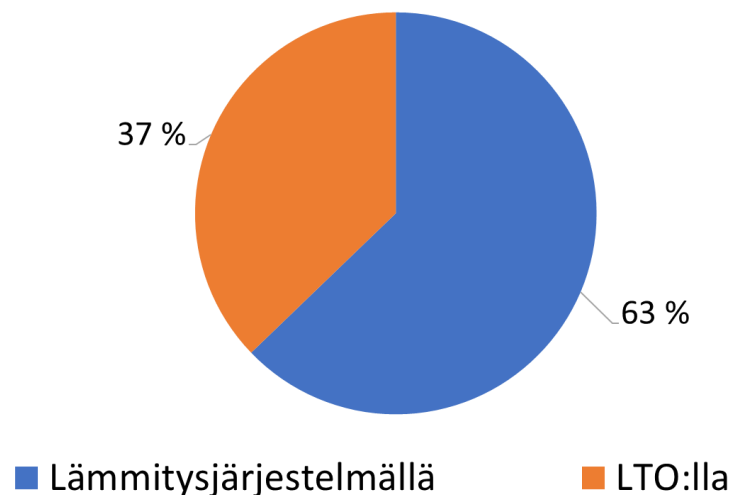
### ***Kuvaaja 12: Kolhontien yksikön lämpöenergian jakautuminen***

Kuvaajasta 12 voidaan todeta, että lämmönkulutuksesta suurin osa tapahtuu tuotantotilan ilmanvaihtokoneissa. Toimiston osuutta lämmönkulutuksesta ei tulisi kuitenkaan sivuuttaa, sillä se muodostaa kohtuuttoman suuren osuuden yksikön lämpöenergian käytöstä. Toimiston tilavuus on vain 2 %:a koko toimipisteen tilavuudesta, mutta siinä kuluu mallin mukaan 12 %:a kohteen käyttämästä lämpöenergiasta. Lämmin käyttövesi ja häviöt sen sijaan muodostavat alle prosentin koko toimipisteen lämmönkulutuksesta ja niihin ei tässä tutkimuksessa kiinnitetä huomiota. Tarkastellaan ensin mistä tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden suuri lämpöenergiankulutus johtuu.

Tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden suuren lämpöenergian tarpeen pääteltiin liittyvät kahden tekijään: tuloilmavirran määrään ja lämmöntalteenoton hyötysuhteeseen. Ilmalämmitteisessä kiinteistössä tuloilmavirran määrä on suoraan kytköksissä lämmitystarpeeseen, joten suuri ulkoilmavirran määrä nostaa lämmityskustannuksia. Tuotantotilaan puhallettiin mallin mukaan vuonna 2018 keskimäärin noin 1,76-2,20 (dm<sup>3</sup>/s)/m<sup>2</sup> ulkoilmaa, keskiarvon ollessa noin 2,02 (dm<sup>3</sup>/s)/m<sup>2</sup>. Uusimpien YM:n julkaisemien säädösten mukainen ohjearvo konepajan kaltaisen työympäristön ulkoilmavirran määrälle on 6 (dm<sup>3</sup>/s)/henkilö + 2,0 (dm<sup>3</sup>/s)/m<sup>2</sup> [49]. Tästä voisi päätellä, että tuotantotilaan puhalletaan ulkoilmaa uusiempien ohjearvojen mukaisesti, joten tilaan puhallettu tuloilmavirran määrä ei keskimäärin ole kohtuuttoman suuri nykyisten standardien mukaan. Huomattavaa on kuitenkin, että yksikön tuloilmavirran määrä oli ajoittain jopa 2,41 (dm<sup>3</sup>/s)/m<sup>2</sup>. Het-

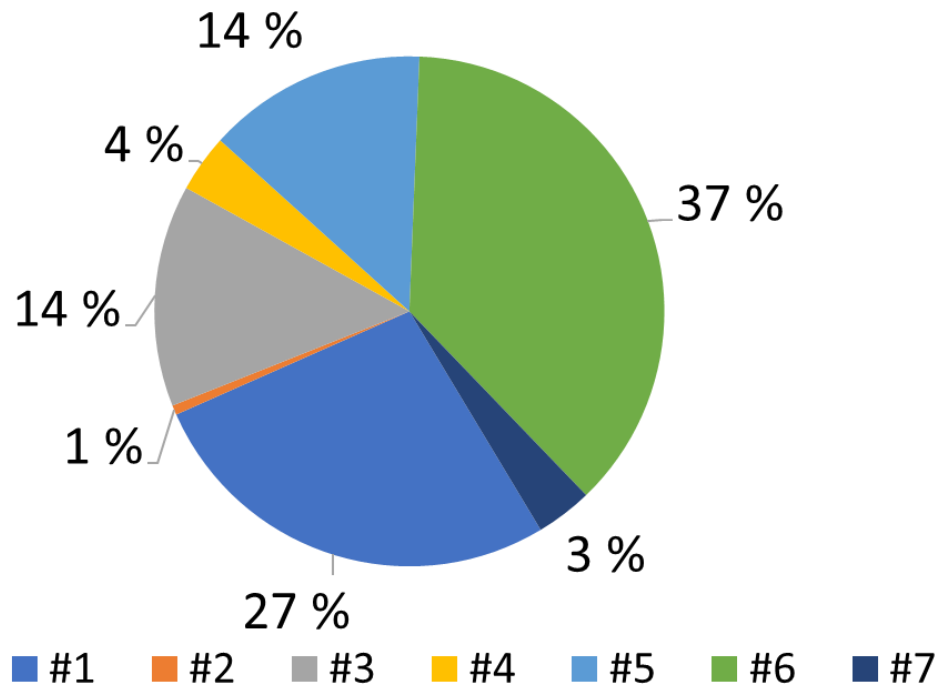
kittäin käytetty poikkeuksellisen suuri tuloilmavirta johtui tuotantotilan työntekijöiden karsimista sisäilmaoireista, joita pyrittiin ratkaisemaan lisäämällä tuloilmavirran määrää. Ulkoilmavirran määrän kasvattaminen ei kuitenkaan ollut poistanut oireilua ja oireilulle ei oltu tutkimuksen teon aikana löydetty selitystä.

Toinen merkittävä Kolhontien tuotantotilan lämmityskustannuksiin vaikuttava tekijä on ilmanvaihtojärjestelmän lämmöntalteenoton hyötysuhde. Kuvaajassa 13 on esitelty tuotantotilan tuloilman lämmityksen muodostuminen.



**Kuvaaja 13: Tuotantotilan tuloilman lämmityksen osuudet**

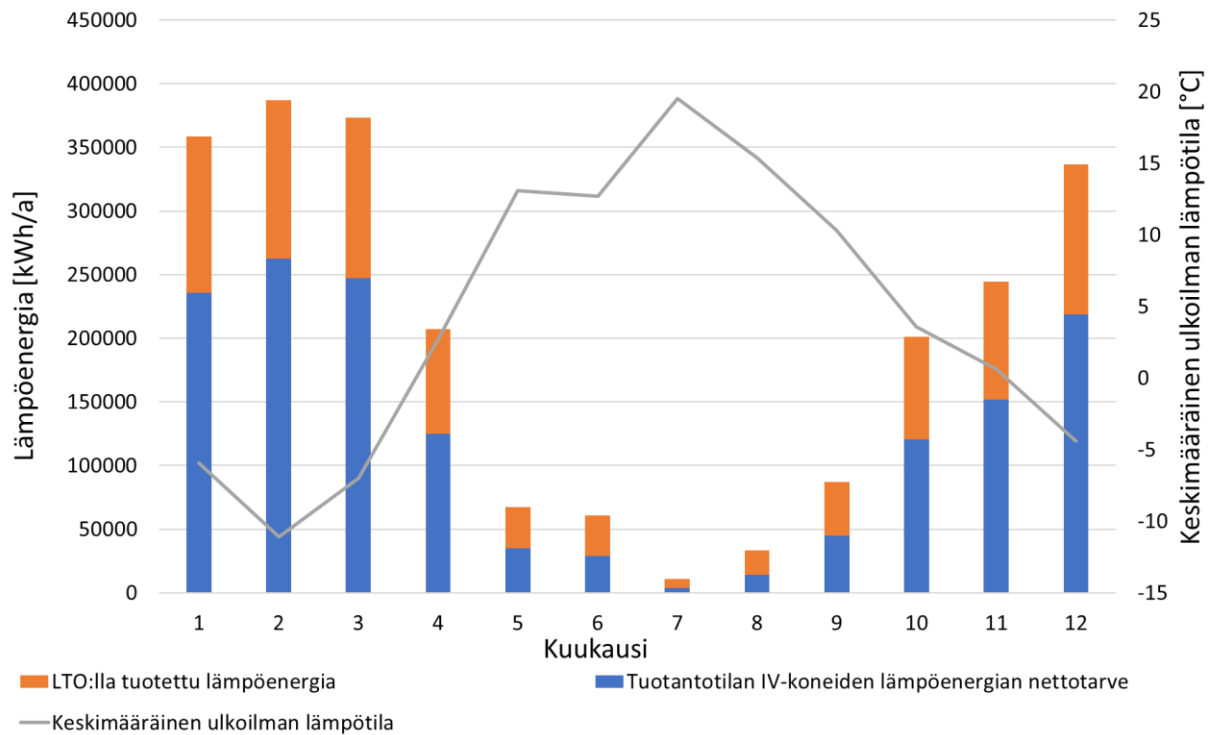
Kuvaajasta 13 voidaan todeta, että vain 37 %:a tuotantotilan tuloilman lämmityksestä tuotetaan lämmöntalteenottolaitteistolla. Arvoa voi verrata esimerkiksi YM:n antamiin uudisrakennuksen vähimmäisvaatimuksiin, joiden mukaan 45 %:a tuloilman lämmitystarpeesta tulisi kattaa lämmöntalteenotolla [24]. Lämmöntalteenoton osuutta lämmityksestä pienentää erityisesti tuotantotilan tuloilmakoneet #3 ja #6, joissa ei ole lämmöntalteenottoa. Lisäksi ilmanvaihtokone #1:n lämmöntalteenoton hyötysuhde on erittäin huono, mikä pienentää lämmöntalteenoton hyödyntämistä koko tuotantotilan tasolla. Tämä on nähtävissä kuvaajasta 14, jossa on esitelty tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden lämmitystarpeen muodostumista konekohtaisesti.



**Kuvaaja 14: Tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden lämmitystarpeen konekohtaiset osuudet tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden kokonaislämmitystarpeesta**

Kuvaajasta 14 huomataan, että ilmanvaihtokoneet #1 ja #6 muodostavat yksinään yli puolet tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden lämmitysenergian tarpeesta. Lisäksi huomiotavaa on että, tuloilmakone #3 kuluttaa saman verran lämpöenergiaa kuin ilmanvaihtokone #5, vaikka kone #5 puhalttaa yli kaksinkertaisesti enemmän tuloilmaa tilaan.

Kokonaisuudessaan voidaan todeta, että tuotantotilan lämmöntalteenoton hyödyntäminen on huonolla tasolla. Lämmöntalteenoton hyödyntämistä huonontaa merkittävästi tuloilmakoneet #3 ja #6, joiden takia kiinteistöön puhalletaan lämmitettävien ilmanvaihtokoneiden kautta enemmän ilmaa kuin mitä niiden kautta poistetaan. Iso osa kiinteistön poistoilmasta tapahtuu kohdepoistojen kautta, jolloin poistoilmassa olevaa lämpöä ei saa hyödynnettyä. Lisäksi kiinteistö on ylipaineinen, jolloin sisäänpuhalletusta ilmasta osa karkaa rakenteiden läpi pihalle. Kokonaisuudessaan huono lämmöntalteenoton hyödyntäminen on varmasti merkittävä selittävä tekijä yksikön suurelle lämmönkulutukselle. Tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden lämmitysenergian kulutusta kasvattaa lisäksi hieman se, että lämmitys on päällä myös kesäisin. Tämä on nähtävistä kuvaajasta 15.

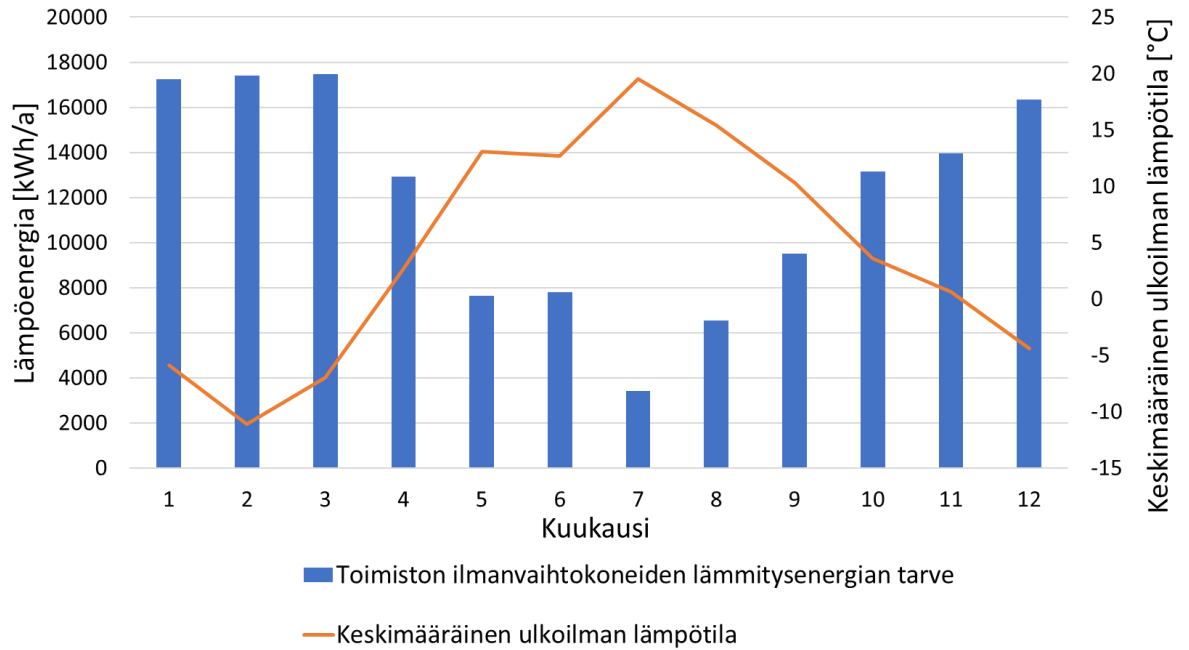


***Kuvaaja 15: Mallinnettu tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden kuukausittainen lämpöenergian tarve***

Kuvaajasta 15 voidaan todeta, että suurin osa lämmityskustannuksista muodostuu talvi-kuukausien aikana. Vaikka lämmitys on yksikössä päällä myös kesäisin, lisää se ilmanvaihtokoneiden lämpöenergian kulutusta vain vähän. Tuotantotilan lämmityksen pitäminen päällä kesäisin ei siis todennäköisesti ole merkittävä selittäjä tekijä suurelle lämmönkulutukselle. Tarkastellaan vielä yksikön toimistorakennuksen lämpöenergian tarvetta ja koko yksikön lämmöntuoton hyötysuhdetta.

**Toimistorakennuksen vaikutus lämpöenergian kulutukseen**

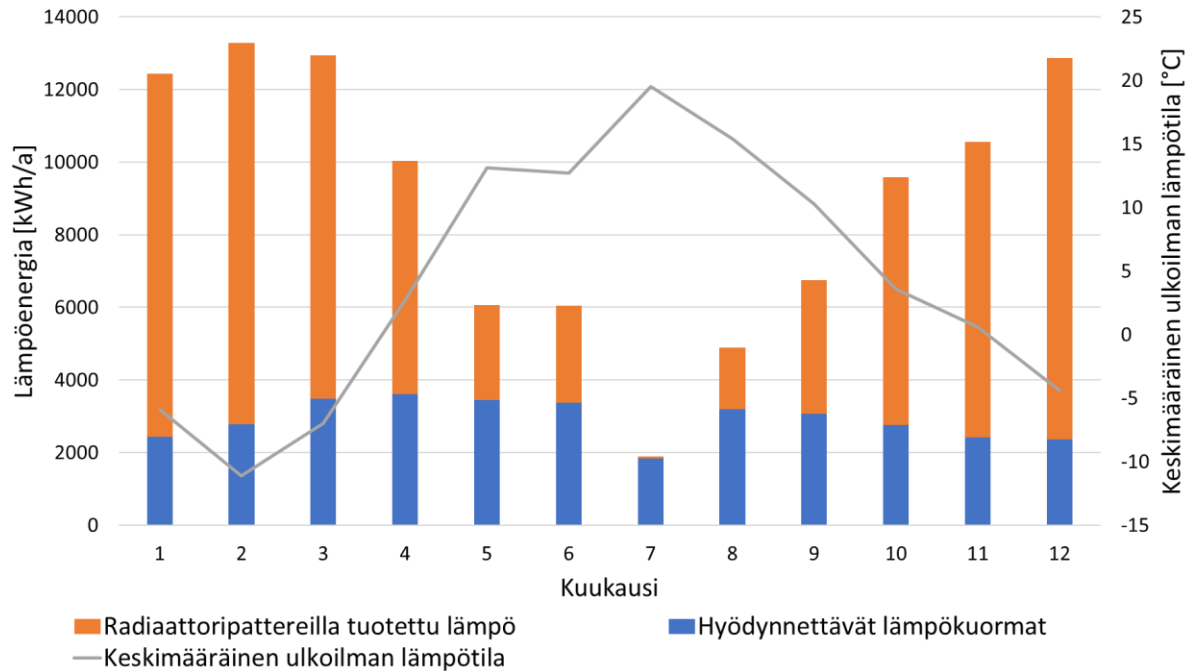
Yksikön toimistorakennuksen ominaislämmönkulutukseksi saatiin mallinnuksen perusteella 149,14 kWh/m<sup>3</sup>. Motivan tilastojen mukaan toimistorakennuksien ominaislämmönkulutuksen mediaani on 34,2 kWh/m<sup>3</sup> [50]. Näiden lukujen perusteella voisi sanoa yksikön toimistorakennuksen kuluttavan hyvin paljon lämpöenergiaa. Mallinnuksen antamalle korkealle lämmönkulutukselle löydettiin ainakin kolme mahdollista selitystä. Merkittävin niistä on toimistorakennuksen tuloilmakoneiden lämmitys, sillä koneissa ei ole lämmöntalteenottoa. Lisäksi koneiden lämmityksen laskettiin olevan päällä koko vuoden, jolloin laskennallista lämmitystarvetta muodostuu merkittävästi myös kesäkuukausien aikana, kuten on nähtävissä kuvaajasta 16.



**Kuvaaja 16: Mallinnettu toimistorakennuksen ilmanvaihtokoneiden kuukausittainen lämpöenergian tarve**

Tuotantorakennuksen mallinnettua lämpöenergian tarvetta kasvattaa lisäksi rakenteiden U-arvot, jotka ovat nykyisiin uudisrakennuksiin verrattuna erittäin huonot. Erityisesti toimiston yläpohjan ja seinien U-arvot (0,32 W/(m<sup>2</sup>K) ja 0,40 W/(m<sup>2</sup>K)) ovat merkittävästi Ympäristöministeriön antamia vertailuarvoja huonommat (0,09 W/(m<sup>2</sup>K) ja 0,17 W/(m<sup>2</sup>K)) [24]. Toisin kuin tuotantotilassa, toimistorakennuksessa ei ole suuria määriä lämpökuormia. Sen sijaan tilaa lämmitetään radiaattoripattereilla. Rakenteiden huonot U-arvot näkyvät mallissa lisääntyneenä pattereiden lämpöenergian tarpeena, erityisesti talvikausina. Toimistorakennuksen tilan lämpöenergian muodostuminen on esitetty kuvajassa 17.





### ***Kuvaaja 17: Toimistorakennuksen tilan lämmitysenergian muodostus***

Viimeisenä tekijänä toimistorakennuksen mallinnettuun korkeaan lämpöenergian kulu-  
tukseen voidaan pitää toimistorakennuksen lämpöpumppujen käyttöä. Kuvaaja 17 muo-  
dostettiin olettamalla että, lämpöpumppuja ei käytetty lämmityskäytössä. Mikäli lämpö-  
pumpuilla olisi tuotettu niiden laskennallinen maksimilämpöenergian määrä, olisi toimis-  
ton pattereiden lämpöenergian tarve laskenut mallin mukaan noin 10-15 %:a.

### **Lämmöntuottolaitteiston vaikutus lämpöenergian kulutukseen**

Mallinnuksen perusteella lämmitysjärjestelmän hyötysuhteeksi saatiin 0,75, joka viittaisi  
siihen, että lämmitysjärjestelmän hyötysuhde ei ole parhaimmasta päästä. Esimerkiksi  
käyttämällä Ympäristöministeriön ohjearvoja, ja painottaen eri lämmönlähteiden läm-  
möntuoton osuuksia, saadaan lämmöntuottolaitteiston vertailuarvoksi 0,85 [41]. Lisäksi  
on otettava huomioon lämmönjaossa ja lämmönluovutuksessa tapahtuvat erilaiset häviöt  
(muut kuin lämpöhäviöt lämmittämättömään tilaan), kuten epätäydellisen säädön ja läm-  
pötilakerrostumien aiheuttamat häviöt. Lämmönjaon ja lämmönluovutuksen kokonais-  
hyötysuhde on yleensä luokkaa 0,90-0,98 [41,43]. Näin laskettuna vertailukelpoinen arvo  
yksikön lämmitysjärjestelmälle olisi luokkaa 0,77-0,83. Mallin avulla saadun hyötysuh-  
teen realistisuutta tukee kiinteistöhoitajaa haastatteleamalla saatu tieto, että pellettikatti-  
laa on hetkittäin ajettu huonolla hyötysuhteella. Hetkellinen huono hyötysuhde johtuu  
siitä, että kattilasta on pyritty saamaan mahdollisimman paljon tehoja irti, jonka takia sa-  
vukaasujen lämpötilat ovat nousseet poikkeuksellisen korkeiksi. Kattilasta ulos saatavan

tehon kasvatus poltintehoa kasvattamalla on ollut mahdollista, koska pellettikattilan polttimen nimellisteho on suurempi kuin kattilan konvektio-osan nimellisteho. Savukaasujen lämpötiloja ei ole mitattu, mutta niiden on arveltu pahimmillaan olevan yli 200 asteisia, viitaten huonoon hyötysuhteeseen. Näillä olettamuksilla voidaan mallinnettua lämmitysjärjestelmän hyötysuhdetta pitää melko realistisena. Saatu hyötysuhde ei kuitenkaan ole merkittävästi huonompi kuin taulukoidut ohjearvot, varsinkin kun ottaa huomioon mallinnuksen epätarkkuuden. Tämän perusteella yksikön suuri lämmönkulutus on osittain selitettävissä lämmöntuoton huonolla hyötysuhteella. Lämmöntuoton huonolla hyötysuhteella ei kuitenkaan ole yhtä suurta vaikutusta yksikön korkeaan lämmönkulutukseen, kuin ilmanvaihtojärjestelmän lämmöntalteenoton huonolla hyötysuhteella.

Yksikön tarvitseman lämpötehon laskettiin mitoitusolosuhteissa olevan noin 846 kW lämmityksen osalta ja noin 85 kW lämpimän käyttöveden osalta. Kokonaisuudessaan yksikön laskennallinen lämmöntuottokapasiteetti oli vuonna 2018 noin 880 kW. Ottaen vielä huomioon sähköisten lämmönvesivaraajien tuoman lisätehon, voidaan todeta yksikön olevan varustettu riittävän suurella lämpöteholla. Väärin mitoitettua lämmityslaitteistoa ei voida siis pitää selittävänä tekijänä yksikön suurelle lämmönkulutukselle.

### **Lämpötaseen yhteenveto**

Kokonaisuudessaan Kolhontien yksikön lämpöenergian kulutuksen analysointi viittaa siihen, että suuri lämpöenergiankulutus liittyy pääasiassa kohteen tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden lämmöntalteenoton huonoon hyödyntämiseen sekä osittain kohteen pellettikattilan huonoon hyötysuhteeseen. Lisäksi kohteen toimistorakennuksen lämpöenergiankulutus on hyvin suuri verrattuna keskimääräisiin toimistorakennuksiin. Toimialakohdaintaisten vertailuarvojen puutoksen takia on haastavaa absoluuttisesti määritellä, kuuluuko koko yksikössä paljon vai vähän lämpöenergiaa.

Kuitenkin verrattuna esimerkiksi konsernin yksikköön #6, kuuluu Kolhontiellä melkein nelinkertainen määrä lämpöenergiaa. Näin suuri ero kulutuksissa ei ole selitettävissä vain edellä mainituilla syillä. Henkilökuntaa haastatteleamalla pyrittiin selvittämään, mistä muista syistä erot voisivat johtua. Yksikön #6 kohdalta kävi ilmi, että kyseisessä yksikössä ilmanlaatua hallitaan suurella määrällä kiertoilmasuodattamia sen sijaan, että tilaan puhallettaisiin paljon ulkoilmaa. Yksikön #6 kiertoilmasuodattimet ovat samankaltaisia kuin Kolhontiellä ja niiden sähkötehon tarve suuri. Kiertoilmasuodattimien suuren sähkötehon takia, niiden runsaan käytön voisi olettaa näkyvän yksikössä #6 suurempana kiinteistösähkön osuutena verrattuna Kolhontiehen ja toisaalta pienempänä lämpöenergiatarpeena. Tätä hypoteesia tukee kuvaaja 9, mutta lopulliset johtopäätökset vaativat yksikön #6 tarkempaa analysointia. On kuitenkin hyvin todennäköistä, että yksikön #6

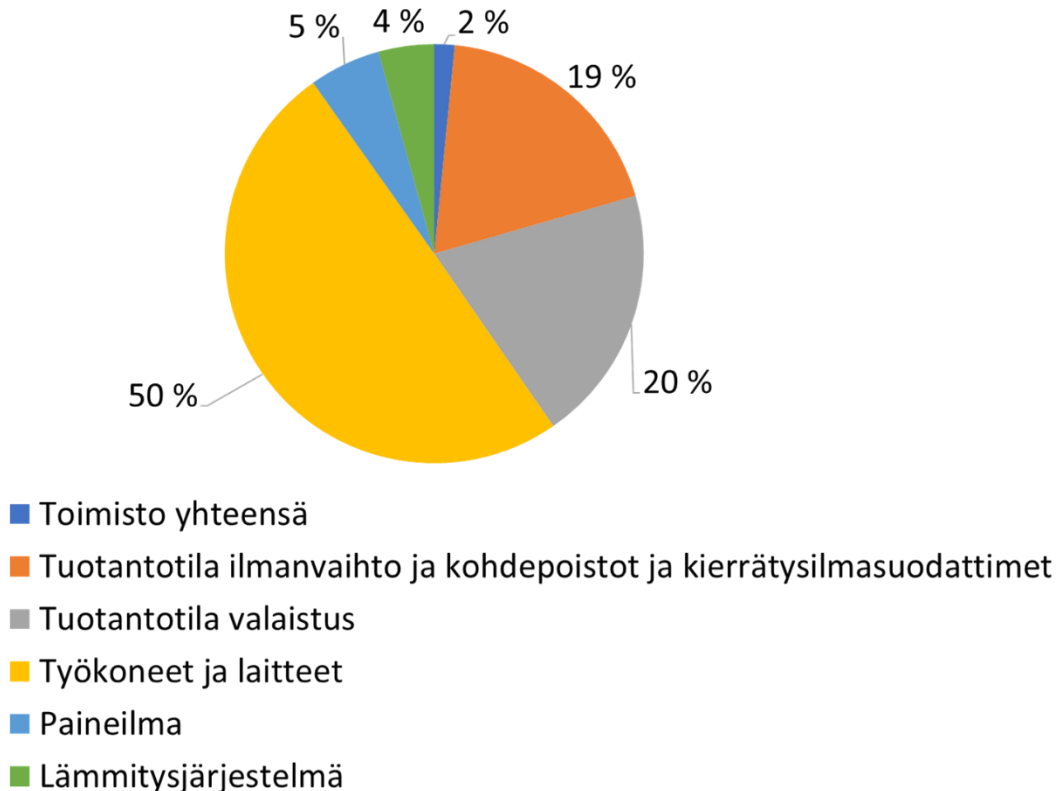
tuotantotilaan puhalletun ulkoilmavirran määrä on huomattavasti pienempi kuin Kolhontien yksikössä. Onkin perusteltua kysyä, puhalletaanko Kolhontien yksikköön liikaa ulkoilmaa vai yksikköön #6 liian vähän. Merkillistä on, että Kolhontien yksikössä on suuresta tuloilmavirran määrästä huolimatta kärsitty sisäilmaoireista ja yksikössä #6 ei. Tämän perusteella kiertoilmasuodattimia voidaan pitää tehokkaampana ratkaisuna ilmanlaadun hallintaan konepajahallissa kuin tuloilmavirran kasvatusta. Lopulliset johtopäätökset ilmanlaadun suhteen vaatisivat kuitenkin molempien yksiköiden ilmanlaadun tarkempaa analysointia.

Osasyys tuloilmavirran suurelle määrälle Kolhontien yksikössä voidaan esittää muutuneet ohjearvot, sillä ulkoilmavirran ohjearvo  $6 \text{ (dm}^3\text{/s)/henkilö} + 2,0 \text{ (dm}^3\text{/s)/m}^2$  tuli voimaan vasta vuonna 2017 ja ennen sitä käytettiin keskiraskaalle tehdastyölle ohjearvoa  $1,5 \text{ (dm}^3\text{/s)/m}^2$  [51]. Kolhontien yksikön rakennus on vanha ja sen LVI-järjestelmiä jouduttiin muokkaamaan huomattavasti, kun se otettiin Teiskon Oy:n käyttöön. Ilmanvaihtojärjestelmän osalta muokkauksia tehtiin vielä vuonna 2017, joten on mahdollista, että yksikössä on ilmanvaihtojärjestelmän suunnittelussa ollut käytössä tiukemmat ulkoilmavirtaa koskevat standardit kuin konsernin vanhemmissa yksiköissä. Tämän hypoteesin perusteella Kolhontien suuri lämpöenergiankulutus verrattuna konsernin muihin yksiköihin selittyy aikaisemmin mainittujen syiden lisäksi myös suuremmalla tuloilmavirran määrällä. On tietysti mahdollista, että Kolhontien yksikkö edustaa tuloilmavirran määrän ja ilmanlaadun suhteen sellaista yksikköä, johon muiden yksiköiden pitäisi pyrkiä. Toisin sanoen on mahdollista, että Kolhontien yksikön tuloilmavirran määrä ja lämmityskustannukset eivät ole liian suuret, vaan muissa yksiköissä ne ovat liian pienet.

Kokonaisuudessaan lämpöenergiankulutus muodostuu Kolhontien yksikössä lähes täysin erilaisista kiinteistöenergian kulutuskohteista. Tilanne olisi erilainen, mikäli yksikössä olisi merkittävästi lämpöenergiaa kuluttavia laitteita. Tämän perusteella voidaan kuitenkin todeta, että erilaiset talotekniset toimenpiteet ovat paras tapa vähentää Kolhontien kaltaisten yksiköiden lämpöenergiankulutusta. Esitellään seuraavaksi mallinnetun sähkötaseen tuloksia.

### Sähkötaseen tulokset

Mallinnuksen avulla luotu sähköenergiankulutuksen jakauma on alla olevassa kuvajassa.



### ***Kuvaaja 18: Kolhontien yksikön sähkökulutuksen käytön jakauma***

Mallin perusteella voidaan todeta, että toimistorakennus muodostaa hyvin pienen osan koko toimipisteen sähkökulutuksesta ja sen sähkökulutuksella ei ole merkittävää vaikutusta koko toimipisteen sähkökulutukseen. Toimipisteen arvonlisäystä tuottavat tuotantolaitteet muodostavat suurimman osan sähkökulutuksesta, mikä on odotettavissa. Granlund Oy teki vuonna 2014 kohdekatselmuksen yksikköön #5, minkä mukaan kyseisen yksikön tuotantolaitteet kuluttivat noin 43 %:a yksikön sähkökulutuksesta. Vertailemalla tämän tutkimuksen tuloksia Granlund Oy:n tutkimukseen voidaan todeta, että Kolhontien yksikön tuotantolaitteet kuluttavat suhteellisesti suuremman osan sähkön kokonaiskulutuksesta. Tämä voi olla osasy selittämään sitä, että Kolhontie tuottaa hieman enemmän arvonlisäystä käytettyä sähköenergiaa kohti kuin yksikkö #5. Yleisesti Kolhontien työkoneiden ja laitteiden osuus yksikön sähkökulutuksesta vastaa kirjallisuudesta löydettyjä toimialakohtaisia arvoja [5,7].

Tuotantotilan valaistuksen osuus sähkökulutuksesta on melko suuri, mutta valaistukselle ei löydetty mitään asetettua energiatehokkuusstandardia koskien tehdashallien va-

laistusta, joten tuotantotilan valaistuksen energiatehokkuudesta ei voida tehdä objektiivisia arvioita. Huomattavaa on kuitenkin se, että toimipisteessä oli mittaushetkellä korvattu noin puolet vanhoista valaisimista LED-valaisimilla ja suunnitelmissa oli korvata loputkin hallin lamput LED-lampuilla. Voisikin siis olettaa, että tulevaisuudessa kohteen valaistuksen sähkönkulutus on pienempi.

Yksikön ilmanvaihtojärjestelmä kuluttaa kokonaisuudessaan noin 29 %:a toimipisteen sähköenergiasta. Ilmanvaihtojärjestelmän sähkönkulutusta kohteessa lisää erityisesti kierrätysilmasuodattimet, jotka vastaavat mallin mukaan noin 31 prosentista ilmanvaihtojärjestelmän sähkönkulutuksesta. Jatkuvasti käytössä olevien tulo- ja poistoilmakoneiden (ei sisällä kohdepoistoja tai kierrätysilmasuodattamia) osalta saatiin YM:n laskentaohjeiden mukaiseksi ominaissähkötehoksi noin 1,8 (kW/m<sup>3</sup>s). YM:n ohjeen mukaan koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä tulisi suunnitella siten, että sen ominaissähkötehon ei tulisi ylittää arvoa 1,8 (kW/m<sup>3</sup>s). Tämän perusteella tuotantotilan ilmanvaihtojärjestelmää voidaan pitää nykyiset energiatehokkuusstandardit täyttävänä [24]. Kohdepoistokoneiden energiatehokkuuteen ei oteta kantaa, johtuen niistä saatujen tietojen epävarmuudesta.

Paineilmajärjestelmästä voidaan todeta, että sen sähkönkulutus on melko pieni osa koko toimipisteen sähkönkulutuksesta. Toisaalta paineilmakompressoreita voidaan pitää hieinan ylimitoitettuna tehtaan tarpeisiin, sillä ne tuottavat suurimman osan ajasta vain alle 20 %:a maksimituotostaan. Pienellä osakuormalla ajo huonontaa taajuusmuuttajalla varustettujen kompressoreiden hyötysuhdetta. Kiinteistöhoitajan haastattelun mukaan kohteen maalaamo saattaa kuitenkin täydellä kapasiteetilla toimiessaan vaatia molempien kompressoreiden hetkellisen maksimituoton, minkä takia pienempien kompressoreiden hankinta ei ole vaihtoehto.

Lämmitysjärjestelmä kuluttaa mallinnuksen mukaan noin 4 %:a koko toimipisteen sähkönkulutuksesta. Tämä pitää sisällään lämmöntuoton ja lämmönjaon sähkönkulutuksen. Osuus on melko suuri, jos verrataan mallinnettua lämmitysjärjestelmän sähkönkulutusta esimerkiksi YM:n ohjearvoihin. YM:n yleisen ohjeen mukaan Kolhontien kokoisen kohteen lämmitysjärjestelmän sähkönkulutus olisi 21403 kWh/a, kun se tämän tutkimuksen mallin mukaan on 91454 kWh/a [41]. Mallin antaman sähkönkulutus on todennäköisesti todellisuutta suurempi, erityisesti lämmöntuottolaitteiston osalta. Lämmönjaon osalta kulutus voi olla realistisempi, sillä kohteessa erilaisia pumppuja ei säädetty lämmitystarpeen mukaan vaan ne toimivat jatkuvasti samalla teholla.

Toimistorakennuksen ominaissähkönkulutukseksi saatiin 28,74 kWh/r-m<sup>3</sup>a. Motivan tekemien energiakatselmusten mukaan toimistorakennuksien ominaissähkönkulutuksen

mediaani on luokkaa 19,8-22,3 kWh/ r-m<sup>3</sup>. Tästä voisi päätellä, että Kolhontie 88:n toimistorakennuksen ominaissähkönkulutus on keskimääräistä suurempi [49]. Huomioitavaa on kuitenkin esimerkiksi se että, Motivan antamien tilastoitujen ominaiskulutuksien vaihteluväli on hyvin suuri (0,1-597 kWh/ r-m<sup>3</sup>) ja että niissä ei ole erikseen omaa luokkaa teollisuuden toimipisteiden ohessa oleville toimistorakennuksille. Motiva myös painottaa että, ominaisarvoja ei pidä käyttää energiankulutuksen tavoitteina, johtuen monista kulutuksiin vaikuttavista tekijöistä [49]. Lisäksi Kolhontien toimisto on pienikokoinen ja kokonsa nähden se sisältää paljon tietokoneita, mikä saattaa näkyä keskiarvoa suurempana ominaissähkönkulutuksena. Toimistorakennuksen sähkönkulutukseen vaikuttaa myös oleellisesti se, miten siinä olevia lämpöpumppuja käytetään. Pumppujen käyttö lämmityskäytössä nostaisi toimiston sähkönkulutusta mallin mukaan jopa 30 %:a. Osasyys toimistorakennuksen suhteellisen korkealle sähkönkulutukselle on lisäksi se, että sen ilmanvaihtokoneet ovat jatkuvasti päällä. Ilmanvaihtokoneet muodostavat mallin mukaan noin 37 %:a toimiston sähkönkulutuksesta. Lisäksi mallin mukaan toimiston valot ovat päällä 4380 tuntia vuodessa, vaikka esimerkiksi YM:n ohjeiden mukaiset tyypillinen valaistuksen käyttöaika toimistorakennukselle on 2500 tuntia [41]. Valaistuksen käyttöaikaa nostaa Kolhontien toimistossa se, että rakennus toimii myös tuotantotilan työntekijöiden sosiaalitalana, jolloin se on jonkin asteisessa käytössä läpi vuorokauden. Korkeasta käyttöasteesta johtuen valaistus muodostaa mallin mukaan noin 38 %:a toimiston sähkönkulutuksesta. Työkoneet ja muut sähkökuluttavat laitteet muodostavat noin 19 %:a toimiston sähkönkulutuksesta.

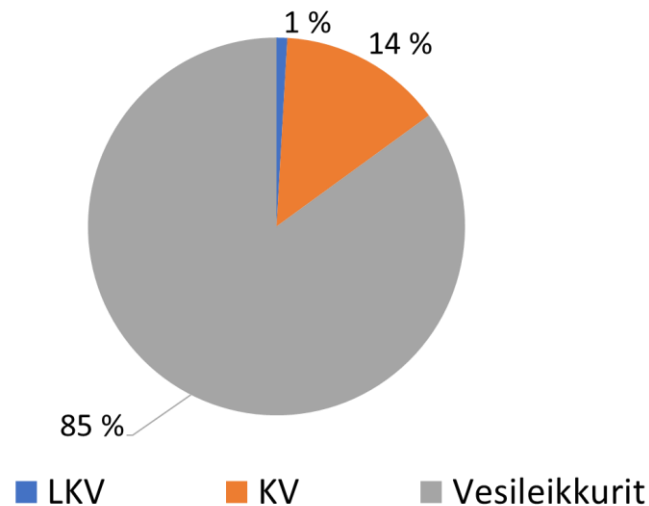
### **Sähkötaseen yhteenveto**

Merkittävin ilmi tullut asia sähkötaseen muodostuksessa oli, että vain noin puolet yksikön kuluttamasta sähköstä kuluu varsinaisten työkoneiden ja laitteiden pyörittämiseen. Eri-laiset kiinteistöenergian kulutuskohteet muodostavat saman kokoisen osuuden sähkönkulutuksesta. Yksikön kiinteistösähkön kulutuskohteista huomionarvoisimpia ovat ilmanvaihto-, lämmitys ja valaistusjärjestelmät. Ilmanvaihtojärjestelmän osalta voidaan todeta, että yksikön suuri tuloilmavirran määrä lisää myös ilmanvaihtojärjestelmän sähkönkulutusta. Lisäksi voidaan todeta, että kiertoilmasuodattamien sähkötehon tarve on erityisen suuri. Lämmitysjärjestelmän sähkönkulutus on verraten suuri, johtuen pääasiassa lämmönjakojärjestelmän suuresta sähkönkulutuksesta. Valaistuksen osuus on myös suuri, johtuen vanhoista valaisintyypeistä ja suuresta käyttöajasta. Paineilmaverkostosta voidaan todeta, että se toimii todennäköisesti melko huonolla hyötysuhteella, mutta se on kokonaisuudessaan melko pieni sähköenergian kulutuskohteeksi. Yksikön toimistorakennuksen sähkönkulutus on koko yksikköön nähden marginaalista. Näiden tietojen perusteella suositellaan, että mikäli yksikkö haluaa parantaa sähkönkulutuksen tehokkuuttaan,

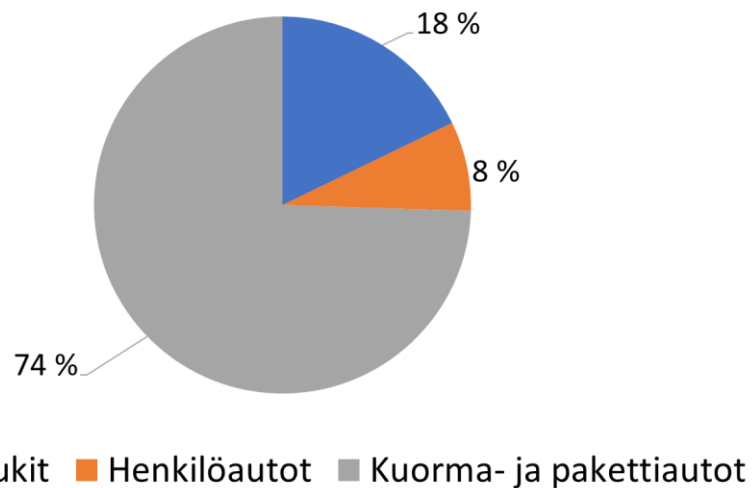
on järkevää tarkastella säästökohteita sekä tuotannon että kiinteistön osalta. Yleisesti voidaan todeta, että kiinteistösähkön säästötoimenpiteet ovat helpommin toteuttavissa, joten niihin tulisi ensisijaisesti kiinnittää huomiota. Esitellään seuraavaksi lyhyesti vesi- ja liikennepolttoainetaseiden antamia tuloksia.

### **Vesi ja liikennepolttoainetaseet**

Tuotetut veden ja liikennepolttoaineiden jakaumat ovat esiteltty alla olevissa kuvaajissa.



***Kuvaaja 19: Yksikön veden kulutuksen jakauma***



***Kuvaaja 20: Yksikön liikennepolttoaineiden kulutuksen jakauma***

Kuvaajan 19 perusteella voidaan todeta, että vesileikkurit muodostavat suurimman osan kohteen vedenkulutuksesta. Vesilasku on kohteessa melko suuri ja mikäli vesilaskua halutaan pienentää, tulisi huomio keskittää nimenomaan vesileikkureiden veden kulutuksen vähentämiseen. Kuvaajan 20 perusteella voidaan todeta, että yksikön käytössä olevat kuorma- ja pakettiautot kuluttavat suurimman osan liikennepolttoaineista. Merkittävä osa muodostuu myös toimihenkilöiden käyttämistä henkilöautoista.

Vesi- ja liikennepolttoainetaseiden perusteella voidaan pääasiassa todeta, että tietyt kulutuskohteet ovat niissä selvästi merkittävimpiä. Veden kulutuksen osalta tämä kohde on vesileikkurit ja liikennepolttoaineiden osalta kuorma- ja pakettiautot. Esitellään seuraavaksi energiatehokkuuden parantamisehdotuksia Kolhontien yksikölle.

## **5.3 Energiatehokkuuden parantamisehdotukset**

### **5.3.1 Kiinteistöenergian energiatehokkuuden parannus**

Ehdotetut kiinteistöenergian energiatehokkuuden parannusehdotukset voidaan jakaa seuraaviin kohteisiin: ilmanvaihtojärjestelmä, valaistusjärjestelmä, lämmitysjärjestelmä, paineilmajärjestelmä, rakenneosat, veden käyttö ja muut toimenpiteet. Liikennepolttoaineiden käytölle ei löydetty säästökohteita.

#### **Ilmanvaihtojärjestelmän parannusehdotukset**

Ilmanvaihtojärjestelmän osalta ehdotetaan että, ilmanvaihtokone #1:n lämmöntalteenottolaite puhdistetaan ja tarkistetaan, jotta se saataisiin toimimaan yhtä hyvällä hyötysuhteella kuin samaan aikaan asennetun ilmanvaihtokone #4:n lämmöntalteenottolaite. Toinen ehdotus on, että tuotantotilan ilmanvaihtokoneet #3 ja #6 korvattaisiin tulo- ja poistokoneilla, joissa on lämmöntalteenotto. Lisäksi toimiston nykyiset ilmanvaihtokoneet suositellaan korvattavan kahdella tulo- ja poistoilmanvaihtokoneella, joissa on lämmöntalteenotto. Näiden ehdotusten avulla saatavat säästöt on esitetty taulukossa 25. Taulukon 25 mukaiset säästöpotentiaalit on laskettu vuoden 2018 säätietoihin perustuen.



**Taulukko 25: Energiatohokkuuden parannusehdotukset ilmanvaihtokoneiden osalta**

\*Olettaen, että lämmöntalteenotolla saadaan tuotettua 45-80%:a lämmitystarpeesta

\*\*Säästö teoreettisesta lämpöenergian tarpeesta (ei otettu lämmöntuoton hyötysuhdetta huomioon)

Säästökohde	Sähköenergian säästö [MWh/a]	Lämpöenergian säästö** [MWh/a]	Kustannussäästö [€/a]	Investointiarvio [€]	Takaisinmaksuaika [a]
Tuotantotilan IV-kone #1	-	306	16 200	4 000	0,25
Tuotantotilan IV-kone #3	-9,6	94-167*	4 300-8 170*	50 000	6,11-11,6
Tuotantotilan IV-kone #4	-20	248-441*	11 800-22 000*	90 000	4,1-7,6*
Toimiston ilmanvaihtokoneet	-5	65-115*	3 000-5 700*	33 400	5,9-11,3*
Yhteensä	-34,6	713-1029	35 300-52 070	177 400	3,4-5,0

**Valaistusjärjestelmän parannusehdotukset**

Yksikön valaistusjärjestelmään oltiin jo asentamassa uusia LED-valaisimia, joten valaisien korvaamista ei tässä tutkimuksessa enää pidetty parannusehdotuksena. Kiinteistöhoitajan kanssa käytiin sijaan keskustelua uuden ohjausjärjestelmän asentamisesta. Arveltiin että, uuden ohjauskeskuksen avulla yö- ja iltavuorossa voisi tuotantotilan valoista 40 %:a olla pois päältä. Tämä toisi arviolta 134 MWh:n eli noin 9 300 €:n säästöt vuodessa. Keskuksen hinnan asennuksineen arviointiin olevan noin 30 000 €, jolloin investoinnin takaisinmaksuaika olisi 3,22 vuotta. Valaistuksen ohjauksella saatavat säästöt pienenevät, kunhan tuotantotilassa korvataan loputkin vanhoista valaisimista LED-valoilla. Investointia voidaan silti pitää kannattavana.

**Lämmitysjärjestelmän parannusehdotukset**

Lämmitysjärjestelmän osalta suositellaan tehtäväksi ainakin pellettikattilalle tarkempi hyötysuhteen määrittäminen. Suositus perustuu mallinnuksen antamaan huonoon hyötysuhteeseen sekä kiinteistöhoitajan haastatteluihin. Voisi myös olla kannattavaa etsiä keinoja kasvattaa pellettikattilan konvektio-osan kokoa, jolloin kattilasta olisi mahdollista saada enemmän tehoja irti ilman hyötysuhteen huonontumista. Ylipäätään, pellettien halvasta

hinnasta johtuen, keinot lisätä pellettien kulutusta verrattuna kaukolämmön ja öljyn kuluksiin olisivat todennäköisesti kannattavia, mikäli pellettien saatavuuden kanssa ei ole ongelmia. Kannattavaa voisi myös olla ajaa lämmitysjärjestelmää kesäkuukausien ajan pelkällä kaukolämmöllä, sillä kesällä kiinteistön lämmöntarve on pieni, minkä takia kattiloita joudutaan ajamaan osakuormilla. Osakuormilla ajo pienentää lämmöntuoton hyötysuhdetta entisestään. Lisäksi säästöjä voisi mahdollisesti tuottaa muuttamalla lämmitysjärjestelmän ajojärjestystä siten, että kun pellettikattilan kapasiteetti loppuu, otetaan ensin käyttöön kaukolämpö ja vasta sitten öljykattila. Ajojärjestyksen muuttaminen olisi todennäköisesti kannattavaa niin kauan kun kaukolämmön sopimusteho ei ylitä, sillä kaukolämmön energiahinta on noin 14 %:a halvempi kuin kaukolämmön. Jos esimerkiksi 50 %:a lämmityskäyttöön kulutetusta öljystä olisi korvattu kaukolämmöllä, olisivat säästöt vuoden 2018 aikana olleet noin 4620 €. Tarkempien kuukausikohtaisten polttoaineiden kulutustietojen puutteet tekevät lämmitysjärjestelmän ajojärjestyksen muuttamisen avulla saatavien potentiaalisten säästöjen kartoituksesta epätarkkaa.

Toimistorakennuksen osalta suositellaan, että lämpöpumppujen käyttöä lämmityskäytössä lisättäisiin. Tässä tutkimuksessa tehtyjen laskelmien mukaan lämpöpumppujen käyttö lämmitys ja jäähdytyskäytössä verrattuna tilanteeseen, jossa ne ovat vain jäähdytyskäytössä, pienentäisi toimistorakennuksen lämmöntarvetta noin 23-33 MWh/a ja lisäisi sähkönkulutusta noin 9-13 MWh/a. Loppujen lopuksi näin saataisiin aikaan 550-821 € säästöt.

Lämmönjakoon liittyvä parannusehdotus lämmitysjärjestelmälle olisi lämmönjakojärjestelmän pumppujen parempi säätö tai mahdollisesti koko lämmitysjärjestelmän sulkeminen lämpiminä kuukausina. Tämä vähentäisi lämpöverkoston pumppujen sähkönkulutusta, joka on yksikössä tällä hetkellä merkittävä sähköenergian kulutuskohde. Lisäksi lämmityksen sulkeminen tietyillä ajanhetkillä saattaisi tuottaa merkittäviä säästöjä lämmityskustannuksissa ilman suurta vaikutusta työolosuhteisiin.

### **Paineilmajärjestelmän parannusehdotukset**

Paineilmajärjestelmän osalta todettiin, että järjestelmälle ei ole tehty vuotokartoitusta. Vuotokartoitus on todettu hyväksi keinoksi saada aikaan säästöjä, varsinkin suurissa paineilmajärjestelmissä. Konepajojen paineilmajärjestelmissä on todettu jopa 40 prosentin vuotoilmamääriä [46]. Vuotokartoituksen ja sen avulla tehtyjen toimenpiteiden avulla saavutetut säästöt järjestelmän sähköenergiankulutuksesta ovat hyvin vaihtelevia, mutta tyypillisesti ne ovat 10 prosentin luokkaa [52]. Kolhontien yksikön paineilman kulutus on

kuitenkin verraten pientä, joten vuotokartoituksella saatavat säästöt eivät välttämättä oikeuta sen teettämistä ulkoisen toimijan avulla. Vuotokartoituksesta saatavia säästöjä on arvioitu alla olevassa taulukossa, mutta hinta-arviota vuotokartoitukselle ei löydetty.

**Taulukko 26: Paineilmajärjestelmän vuotokartoituksella saatavien säästöjen arviointi**

Sähköenergian säästö vuodessa [%]	5	10	15	20	25	30
Rahallinen säästö vuodessa [€/a]	486	972	1 460	1 945	2 431	2 918

### **Rakenneosien parannusehdotukset**

Eristyksien osalta parannusehdotukset keskittyvät toimiston ja tuotantotilan yläpohjien eristysien parantamiseen. Toimistorakennuksen osalta ehdotetaan koko katon saneerausta ja tuotantotilan osalta vain huonosti eristetyin osan saneerausta. Ehdotettujen eristysien parantamisen vaikutuksia on arvioitu alla olevassa taulukossa. Hinta-arviona saneeraukselle käytettiin kiinteistöhoitajan kanssa tehtyä arviota 60 €/m<sup>2</sup>.

**Taulukko 27: Rakenteiden eristysien parantamisella saatavien säästöjen arviointi**

Parannettava osa	Toimiston yläpohja	Tuotantotilan yläpohja
Vanha U-arvo [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,32	0,42
Uusi U-arvo [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,09	0,21
Lämpöenergian säästö vuodessa [MWh/a]	12,8	67
Rahallinen säästö vuodessa [€/a]	663	3550
Investointiarvio [€]	29 000	127 500
Takaisinmaksuaika [a]	43,70	36,0

Eristysien parantamista ei voida pitää erityisen kannattavana, johtuen saneerauksen kustannuksista. Varsinkin tuotantotilassa on paljon lämpökuormia, joiden takia ei muutenkaan ole ollut ongelmia pitää tuotantotilaa lämpimänä. Tuotantotilassa ei lisäksi ole merkittävää määrää tilaa lämmittäviä päätelaitteita. Tämän takia tuotantotilan eristysien parantaminen näkyisi pääasiassa kasvaneena sisälämpötilana, jolloin vaikutus näkyisi vain lämmöntalteenotolla saatavan tehon pienenä kasvuna. Tällä hetkellä tuotantotilan huonosti eristetyssä osassa ei kuitenkaan ole poistoilman ottokohtia, jolloin sitäkään hyötyä tuskin saataisiin. Toimiston osalta yläpohjan saneeraus pienentäisi lämpöhäviöitä noin 22 %:lla, mutta investoinnin takaisinmaksuaika on siitä huolimatta pitkä.

Tuotantotilan lämpöhäviöiden pienentämiseksi huomiota olisi kannattavampi kiinnittää nosto-ovien tarpeettomaan avaamiseen. Nosto-ovien avaaminen kyseisessä kiinteistössä on erityisen paljon lämpöhäviöitä tuottavaa, sillä tuotantotila ylipaineinen. Ylipaineesta johtuen nosto-ovien avaaminen tuottaa suuren lämpövirran tuotantotilasta ulos.

Tämä laskee sisäilman lämpötilaa ja toisaalta myös tuotantotilan painetta. Sisäilman lämpötilan lasku näkyy lämmöntalteenotolla saatavan tehon laskuna ja painesäädettyjen koneiden takia nosto-ovien avaamisella syntynyt painehäviö tarkoittaa hetkellisesti kasvanutta tuloilmavirran määrää. Hetkellisesti kasvanut tuloilmavirran määrä yhdistettynä hetkellisesti huonontuneeseen lämmöntalteenotolla saatavaan tehoon voi aiheuttaa merkittäviä hetkellisiä lämpöenergian kulutuspiikkejä. Painehäviöiden kompensoiminen nostaa myös ilmanvaihtokoneiden tehontarvetta. Nosto-ovien avaamisen aiheuttamia vaikutuksia ilmanvaihtokoneiden toimintaan ei pystytty tarkemmin analysoimaan. Suositus on kuitenkin, että ovia avattaisiin mahdollisimman vähän ja kaikkiin oviin hankittaisiin lämpöhäviöitä pienentävät muoviset verhot.

### **Vedenkulutuksen parannusehdotukset**

Kiinteistöhoitajan kanssa mietittiin keinoja vähentää yksikön vesileikkurien veden kuluusta. Suljetun kierron asentamista ei pidetty kannattavana investointina, sillä veden laadun kanssa ei ole ollut ongelmia ja suljetun vesikierron ylläpitokustannuksien arveltiin olevan suuremmat kuin saadut säästöt vesikustannuksista. Vaihtoehdoksi vähentää vedenkulutusta pohdittiin ratkaisua, jossa kierrätettäisiin vettä, jota käytetään levyjen huuhteluun sekä altaiden täyttöön. Levyjen huuhteluun ja altaiden täyttöön käytetyn veden ei tarvitse olla puhdistettua. Näin ollen ratkaisuksi riittäisi oikein mitoitettu säiliö, johon leikkauksen ja huuhtelun yhteydessä viemäriin valuvaa vettä voitaisiin kerätä. Tällaisesta järjestelmästä ei kuitenkaan löydetty esimerkkejä kirjallisuudesta tai netistä, minkä takia sen investointikustannuksia ei pystytty tarkasti arvioimaan. Kuitenkin pelkästään riittävän kokoisen säiliön (40 m<sup>3</sup>) hankintakustannukset olisivat noin 5000-6000 €. Säästöpotentiaalin määrittämistä varten laskettiin, että huuhteluun kuluu keskimäärin 1 kuutio vettä vuorokaudessa ja altaat tyhjennetään puhdistusta varten noin kolme kertaa vuodessa. Näin laskettuna säästöpotentiaalia olisi noin 570 m<sup>3</sup>/a, jonka on euroiksi muutettuna noin 2660 €/a.

### **Muut toimenpiteet**

Kokonaisuudessaan yksikön kiinteistöenergian kulutusta voisi todennäköisesti myös pienentää asentamalla yksikköön etäluettavia mittareita ja kunnollinen rakennusautomaatiojärjestelmä. Rakennusautomaatiojärjestelmään investointi on sikäli suositeltavaa, että yksikön kiinteistöenergian kulutus on suurta ja LVI-järjestelmien säätöä ei ole tällä hetkellä optimoitu. Esimerkiksi yksikön taajuusmuuttajilla varustetuista pumpuista ei saada täyttä hyötyä, sillä niiden säätö on tehtävä käsin. Etäluettavien mittareiden ja automaatiojärjestelmän avulla olisi myös helpompi analysoida miten rakennuksen kiinteistöener-

gian kulutus muuttuu eri olosuhteissa, jolloin LVI-järjestelmän hallinta ja säätö olisi tehokkaampaa. Paremmalla säädettävyydellä voisi esimerkiksi olla mahdollista optimoida lämmitystarvetta ulkoilman lämpötilan mukaan. Tämän kaltaisella menettelyllä voisi säästää arviolta jopa 10-20 %:n säästöt lämmityskustannuksissa [53]. Lisäksi voisi olla hyödyllistä asettaa konkreettiset tavoitetasot kiinteistöenergiankulutuksen suhteen, joihin pyritään pääsemään tietyssä ajassa. Tavoitteiden saavuttamiseksi voitaisiin järjestää lyhyitä henkilöstön koulutustilaisuuksia, missä arvioidaan yksittäisten työntekijöiden mahdollisuuksia vaikuttaa koko toimipisteen kiinteistöenergiankulutukseen.

### 5.3.2 Työkoneiden ja laitteiden energiatehokkuuden parannus

Työkoneiden ja laitteiden energiatehokkuuden parantamiseksi ei saatu laskettua energiansäästöpotentiaalia tai investointien takaisinmaksuaikoja. Kvantitatiivisten energiatehokkuuden parannusehdotuksien puute johtuu pääasiassa siitä, että työkoneiden ja laitteiden energiatehokkuuden selvittämiseksi vaadittavien mittauksien ja analysoinnin määrä todettiin liian suureksi sisällytettäväksi tähän tutkimukseen. Lisäksi tuotantokoneiden ja laitteiden tuottaman hukkalämmön hyödyntämisen ajateltiin olevan jo hyvällä tasolla, minkä takia laitteiden hukkalämmön hyödyntämistä ei tutkittu tarkemmin. Voidaan kuitenkin kirjallisuuden perusteella pohtia mitä yksikkö voisi tehdä tuotantonsa energiatehokkuuden parantamiseksi.

Perinteisesti konepajateollisuuden kaltaisissa toimintaympäristöissä työkoneiden ja laitteiden käyttöä on pyritty optimoimaan pääasiassa tuotantomäärien kasvattamiseksi ja laadun parantamiseksi. Energia on nähty vain yhtenä lisäkustannuksesta ja tuotantojärjestelmiä ei ole pyritty optimoimaan nimenomaan energiankulutuksen minimoiseksi [43]. Viime vuosikymmenten aikana on kuitenkin tuotettu lukuisia tutkimuksia tuotantojärjestelmien energiankulutuksen analysoinnin ja optimoinnin avulla saatavista energian säästöistä ja taloudellisista hyödyistä [44,52,54,55,56]. Tässä tutkimuksessa esitellään vain muutama löydetty esimerkki, joita voisi soveltaa tässä tutkimuksessa analysoidussa yksikössä.

Yksi potentiaalinen keino tuottaa rahallisia säästöjä työkoneiden ja laitteiden energiankulutuksen analysoinnin avulla olisi määrittellä tehtaan tasolla tärkeimmät työkoneiden ja laitteiden sähköenergiankulutukseen vaikuttavat tekijät regressioanalyysin avulla [54]. Käytännössä mallia varten pitäisi pyrkiä määrittelemään hallittavissa oleva määrä erilaisia tehtaan valmistamia tuotteita, joiden avulla voitaisiin määrittellä koko tehtaan sähköenergiankulutus. Tällöin malli olisi muotoa:

$$E(\Delta t) = E_0 + \alpha_1 V_1(\Delta t) + \alpha_2 V_2(\Delta t) + \dots + \alpha_m V_m(\Delta t) \quad (17)$$

jossa  $E$  on tehtaan sähköenergiankulutus [kWh],  $E_0$  on tehtaan sähköenergiankulutus riippumatta tuotantomäärästä [kWh],  $\alpha_i$  on tuotteen  $i$  regressiokerroin [kWh/yksikkö] ja  $V_i$  on tuotteen  $i$  tuotantomäärä [yksikkö].

Saadun mallin avulla voisi esimerkiksi olla mahdollista ennustaa tehtaan sähköenergiankulutusta tehtyjen tilausten perusteella [54]. Ennustetun sähköenergiankulutuksen avulla voisi sen jälkeen saada aikaan rahallisia säästöjä neuvottelemalla parempia sähkötariffeja [54]. Analyysin avulla olisi myös mahdollista tunnistaa tehtaan eniten sähköenergiaa kuluttavat työkoneet sekä tuottaa tietoa, jonka avulla olisi mahdollista havaita poikkeamia tuotannon sähköenergiankulutuksen suhteen [54]. Mallin pitäisi kuitenkin olla tarkka, jotta sen olisi hyödyllinen. Mallin tarkkuus riippuu oleellisesti kertoimien  $\alpha_i$  tarkkuudesta. Tarkan mallin tuottaminen vaatisi mahdollisimman tarkkaa mitattua sähköenergiankulutustietoa mahdollisimman pitkältä ajalta. Tämän tutkimuksen aikana yritettiin tekemään tällainen analyysi käyttämällä Excelin regressioanalyysi-työkalua. Lähtötietoina olivat kuukausittaiset sähkönkulutukset ja tiedot eri työkoneilla toteutuneista kuukausikohtaisista työtuntien määrästä. Analyysin avulla ei kuitenkaan saatu kattavia tuloksia, johtuen pääasiassa tietojen puutteen ja analyysin käytetyn lyhyen ajan takia. Analyysin avulla saatiin ainoastaan viitteitä siitä, että kohteen maalaamo ja vesileikkurit olisivat merkittävimpiä sähköenergiankulutuksen kohteita yksikössä. Kolhontien yksikölle yhtälön (17) kaltaisen mallin luonnista tekee haasteellisen suuri määrä erilaisia tuotantokoneita ja laaja tuotevalikoima.

Toinen mahdollinen keino saada aikaan merkittäviä taloudellisia säästöjä työkoneiden ja laitteiden energiankulutuksen optimoimisella olisi määritellä ajat, jolloin tietyt työkoneet voisivat olla pois päältä ilman merkittävää vaikutusta tuotantomääriin. Tämän kaltaista lähestymistapaa tutkivat ainakin P. Brundage et al., jotka tuottivat myös samalla periaatteella tehdyn tutkimuksen LVI-järjestelmien ohjaamisen integroimisesta tuotantokoneiden ja laitteiden ajoaikatauluihin [44,55]. Käytännössä P. Brundage et al. olettavat, että tehtaot koostuvat erilaisista tuotantolinjoista, joissa tietyn työkoneen tai laitteen tuotantokapasiteetti on riippuvainen tuotantolinjalla sitä edeltävien ja sen jälkeen tulevien työkoneiden ja laitteiden tuotantokapasiteeteista ja puskureista. Käytännössä tällä tavoin on mahdollista määritellä erilaisia tehtaan tuotannon pullonkauloja, joita ennen ja joiden jälkeen erilaiset koneet voisivat olla pois päältä ilman merkittävää vaikutusta läpimeno määräin [55]. Arviolta näin olisi mahdollista säästää jopa 80 % a tiettyjen laitteiden energiankulutuksesta [44,55]. Lisäksi P. Brundage et al. pyrkivät soveltamaan mallia LVI-järjestelmien ohjaukseen siten, että esimerkiksi tuloilman määrä ja lämmitystarve riippuisi siitä, kuinka paljon työkoneita ja laitteita ajetaan [44]. Tässä tutkimuksessa analysoidun yksikön perusteella voidaan todeta, että tuotantokoneet ja laitteet tuottavat suuria

määriä lämpökuormaa tuotantotilaan, jolloin saattaisi olla mahdollista saavuttaa säästöjä esimerkiksi laskemalla tuloilman sisäänpuhalluslämpötilaa, silloin kuin tuotantoa on paljon. Tällaisten mallien tekeminen on kuitenkin työlästä ja vaatii paljon mittauksen tekemistä, mikä voi pienen tehtaan tapauksessa johtaa siihen, että saadut taloudelliset hyödyt ovat pienemmät kuin tutkimuksen vaatiman työn kustannukset.

Huomioonottamisena arvoista on myös se, että vaikka tässä tutkimuksessa tutkitussa yksikössä ei tuotantokoneiden ja laitteiden ajamista priorisoitu energiankulutuksen minimoiseksi, on yksikön tuotannon energiatehokkuutta parannettu muilla tuotantoa tehostavilla toimenpiteillä. Esimerkiksi mahdollisimman hyvän laadun tuottaminen tarkoittaa pienempiä määriä hylkyyn menevää tavaraa, mikä parantaa energiatehokkuutta merkittävästi sillä hylkyyn menneen tavaran tuottamiseen vaadittavan energian voidaan ajatella menevän täysin hukkaan. Yksikössä pyritään myös pitämään tuotantomäärät mahdollisimman korkeana, mikä käytännössä tarkoittaa, että työkoneilla ja laitteilla pyritään tekemään tuottavaa työtä mahdollisimman suuri osa ajasta. Tällöin laitteiden joutokäynti vähenee ja energiatehokkuus paranee. Lisäksi kohteessa oli jo otettu laitteiden energiankulutuksia huomioon uusien laitteiden hankinnassa, mikä näkyy esimerkiksi hiilidioksidilasereiden korvaamisella energiatehokkaammilla kuitulasereilla [35]. Työkoneiden korvaamista energiatehokkaammilla versioilla ei kuitenkaan suositella, ennen kuin työkone on saavuttanut käyttöikänsä päätöksen. Energiakustannukset tulisi kuitenkin huomioida uusia laiteinvestointeja tehdessä.

Kaiken kaikkiaan tuotantokoneiden ja laitteiden energiankulutuksen optimointi on työläs prosessi ja sen avulla saatavien taloudellisten hyötyjen arviointi on vaikeaa. Lisäksi universaalien energiatehokkuusstandardien puute tekee erilaisten analyysien avulla saatujen tulosten arvioimisesta monimutkaista. Tutkittavan konsernin saattaisi kuitenkin vähintään olla kannattavaa selvittää löytyykö yksiköiden välisille eroille ominaissähkökulutuksissa selittävää tekijää tuotantokoneiden ja laitteiden käytön tai niillä valmistettujen tuotteiden osalta.

#### **5.4 Konsernin energiankulutuksen seurannan ja raportoinnin kehitysehdotukset**

Konsernin energiankulutuksen arkistointisovellusta tehtäessä pyrittiin myös miettimään keinoja kehittää konsernin energiankulutuksen raportointia ja seurantaa. Suositeltavaa olisi ainakin vuosien 2016, 2017 ja 2018 puuttuvien tietojen täyttämisen arkistointisovellukseen, mikäli tiedot ovat saatavilla. Lisäksi tulevaisuutta varten suositellaan, että ener-

giankulutukseen ja niistä syntyviin kustannuksiin liittyviä tietoja päiviteltäisiin arkistointisovellukseen joka kuukausi, ei vain vuoden lopussa. Erityisesti lämmityspolttoaineiden kohdalta kuukausikohtaiset kulutustiedot olisivat hyödyllistä tietoa.

Tulevaisuudessa suositellaan selvitettäväksi mistä taulukossa 23 ja kuvaajassa 9 näkyvät erot ominaisenergiankulutuksissa johtuvat. Erityisesti kiinnostavaa olisi tietää mistä yksiköiden #6 ja #4 sekä Kolhontien väliset erot ominaiskulutuksen suhteen johtuvat. Tässä tutkimuksessa tuotettu hypoteesi esitettiin kappaleessa 5.2 ja sen tutkimista varten suositellaan tehtäväksi ainakin yksikölle #6 tarkempi energia-analyysi sekä ilmanlaadun tutkimus. Kannattavaa olisi jokaisen yksikön tarkempi tutkiminen, jotta vähiten kiinteistöenergiaa kuluttavien yksiköiden ja eniten arvonalisäystä käytettyyn sähköenergiaan nähden tuottavien yksiköiden toimintatapoja voitaisiin mahdollisimman hyvin soveltaa konsernin kaikkiin yksiköihin.

Viimeisenä suositeltuna toimenpiteenä on nimetä vastuuhenkilö tai pieni ryhmä käsittelemään konsernin energiankulutukseen ja siitä aiheutuviin kustannuksiin liittyviä tietoja. Tutkimuksen tekohetkellä energiankulutustietojen käsittelystä vastasi pääasiassa konsernin sihteeri, joka hoiti energiankulutukseen liittyvien tietojen arkistointia muun työnsä ohella. Energiankulutustietojen arkistointia ja analysointia voisi siten tehostaa nimeämällä vastuuhenkilöitä, joille asetettaisiin velvoite tuottaa kattavia raportteja tietyin aikavälein.

## 5.5 Tuloksien herkkyystarkastelu

Konsernin energiankulutuksen analysoinnin tuottamien tuloksen tarkkuuteen vaikuttaa ainakin se, että tiettyjen yksiköiden osalta joitain tietoja ei saatu kerättyä ja joitain tietoja jouduttiin arvioimaan tarkemman tiedon puutteen vuoksi. Virhettä tuloksiin syntyy myös ainakin tiettyjen lämmityspolttoaineiden kulutuksen osalta, koska ei ollut tietoja kuinka paljon yksiköissä oli polttoaineita varastossa ennen ja jälkeen vuoden aikana tehtyjen polttoaineostojen. Käyttäen vertailuna vuoden 2015 aikana tehtyä energiakatselmusta, ovat tässä tutkimuksessa tuotetut vertailukelpoisten yksiköiden tulokset hyvin samankaltaisia.

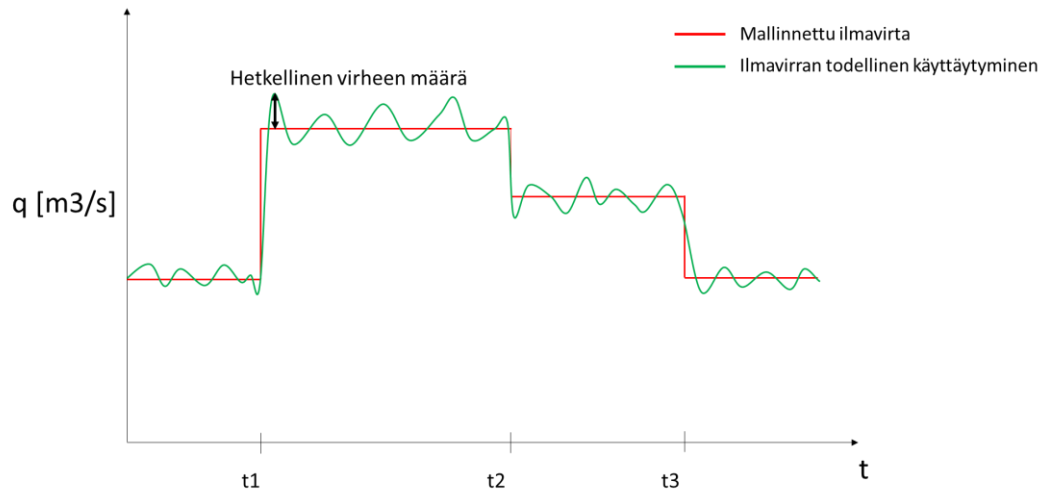
Yksittäisen toimipisteen osalta on tuloksissa paljon epävarmuustekijöitä. Lämpötaseen osalta virhettä tuloksiin luovat ainakin lämmityspolttoaineiden tarkkojen kuukausikohtaisten kulutustietojen puute, ilmanvaihtokoneiden ilmavirtojen laskennan yksinkertaistukset, rakenteiden U-arvojen tarkemman tiedon puute, sisälämpötilan yksinkertaistus, lämmönsiirron mallinnus stationääritilassa ja kuukausien keskilämpötilaa käyttämällä sekä epävarmuustekijät koskien tilassa olevien lämpökuormien määrää. Lisäksi tulokset



perustuvat vuoden 2018 sää tietoihin, jolloin tuloksien soveltaminen muille vuosille tuottaa virhettä.

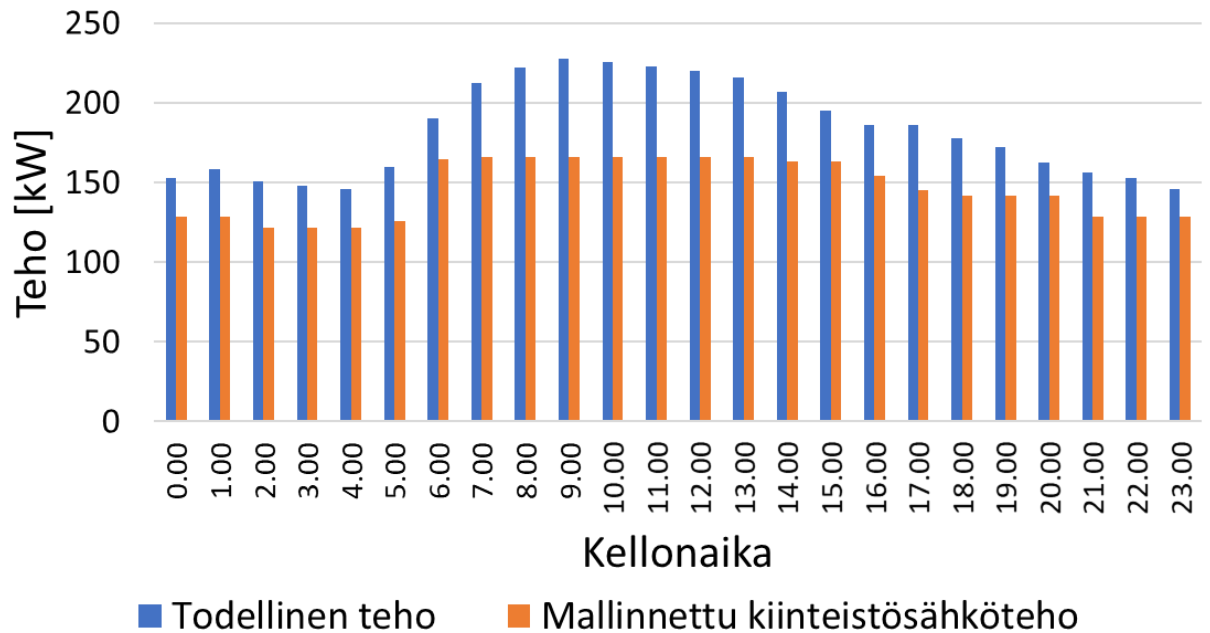
Puutteelliset tiedot koskien kulutettujen lämmityspolttoaineiden määrää sekä ilmanvaihtokoneiden todellisia tuloilmavirtoja, saattavat aiheuttaa erityisen paljon virhettä tuloksien suuruusluokissa. Lämmityspolttoaineiden kulutuksen suhteen virhettä syntyy oletuksesta, että kaikki vuoden aikana ostetut lämmityspolttoaineet on kulutettu saman vuoden aikana sekä tarkan tiedon puutteesta koskien ostetun polttoöljyn käytön todellisesta jakautumasta trukkien ja lämmityksen välillä. Lisäksi pellettien ja öljyn kuukausikohtaisten kulustietojen puute tarkoittaa, että on vaikea arvioida tuotetun lämpötaseen tuloksia kuukausikohtaisesti. Tärkein lämmitysenergian kulutuksen mallinnuksen tarkkuuteen liittyvä tekijä on kuitenkin ilmanvaihtokoneiden tuloilmavirtojen määrän arviointi, sillä tarkasteltu yksikkö on pääasiassa ilmalämmitteinen.

Tässä tutkimuksessa käytetyt menetelmät ilmanvaihtokoneiden tuloilmavirtojen määrien arviointiin ovat huomattavia yksinkertaistuksia. Ensinnäkin tiettyjen koneiden osalta ei suoritettu varsinaisia mittauksia ilmamäärien arviointiin, vaan laskennassa käytettiin aikaisempien mittauksien antamia arvoja, puhallinlakia sekä kiinteistöhoitajan kanssa tehtyjä arvioita ilmamääristä. Lisäksi niiden koneiden osalta, joista mitattiin puhaltimen tuottama paine-ero ja laskettiin sen avulla ilmavirran määrä, ei ole tietoa valmistajan antamien kaavojen virhemarginaaleista. Virhettä syntyy myös ilmanvaihtokoneiden omista antureista, joista luettiin esimerkiksi ilmanvaihtokoneen ilmavirtojen lämpötiloja. Tuotantotilan taajuusmuuttajalla varustetut ilmanvaihtokoneet olivat lisäksi suurimmaksi osaksi painesäädetyjä. Painesäädetyt koneet ilmavirtojen tarkka mallinnus on haastavaa, sillä niiden tuottama ilmavirta tietyllä tehoasetuksella riippuu tilassa sillä hetkellä vallitsevasta ilmanpaineesta, joka puolestaan on riippuvainen monesta tekijästä. Tässä tutkimuksessa ei painesäätöä otettu huomioon, vaan ilmanvaihtokoneiden ilmavirtojen määrän oletettiin olevan vakioita niiden toimiessa tietyllä tehoasetuksella. Ilmavirran mallinnetun ja todellisen käyttäytymisen välistä eroa painesäädetyssä ilmanvaihtokoneessa on hahmoteltu kuvaajan 21 avulla. Lämpötaseen tuloksien epävarmuuksista huolimatta, ovat tutkimuksen pääkohdat silti todennäköisesti paikkaansa pitäviä. Kaikesta päätellen tarkastellun yksikön tuotantotilaan puhalletaan melko paljon ulkoilmaa, lämmöntuoton hyötysuhde ei ole parhaimmasta päästä ja erityisesti tuloilmakoneet, joissa ei ole lämmöntalteenottoa, nostavat lämmityskustannuksia. Tuotantotilan rakenneosien huono lämmöneristävyys ei ole merkittävä tekijä tarkastellun yksikön korkealle lämmönkulutukselle.



**Kuvaaja 21: Tutkimuksessa käytetty painesäädetyin ilmanvaihtokoneen yksinkertaistus ja siitä muodostuva virhe**

Sähkötaseen osalta virhettä muodostuu ainakin valaistuksen todellisten käyntiaikojen tiedon puutteesta, paineilmakompressorien tarkkojen sähkönkulutustietojen puutteesta, erilaisten muuntohäviöiden sivuuttamisesta, ilmanvaihtojärjestelmän ja kiertoilmasuodattamien tehontarpeen yksinkertaistuksista sekä lämmitysjärjestelmän sähkönkulutuksen yksinkertaistuksista. Ilmanvaihtojärjestelmän tehontarpeen arvioinnin osalta virhettä syntyy samasta syystä kuin niiden lämmitystarpeen arvioinnin osalta. Kiertoilmasuodattamien kohdalta virhettä syntyy pääasiassa epävarmuudesta niiden käyntiajoista vuonna 2018. Lämmöntuottojärjestelmän osalta virhettä syntyy erityisesti oletuksesta, että lämmöntuottojärjestelmän sähkönkulutus on vakio vuoden läpi. Kokonaisuudessaan sähkötaseen virheiden määrää on vaikea arvioida, mutta voidaan esimerkiksi vertailla mallin avulla tuotettua kiinteistösähkön lauantai päivän tehoprofiilia yksikön vuoden 2018 keskimääräisen lauuntain sähkötötehoon. Vertailu on tehty kuvaajassa 22.



**Kuvaaja 22: Kolhontien vuoden 2018 lauantapäivien keskiarvo teho ja mallinnettu lauantain kiinteistö sähköteho**

Olettamalla, että viikonloppuöisin on yksikössä hyvin vähän tuotantoa ja sen aikaanainen todellinen tehontarve muodostuu pääasiassa kiinteistöenergian kulutuksesta, voidaan todeta mallinnetun kiinteistö sähkötehon olevan ainakin oikeassa suuruusluokassa. Lisäksi mallinnettu kiinteistö sähköteho näyttää seuraavan todellisesta tehontarvetta kellonaikaan nähden oikealla tavalla. Tiettyinä lauantapäivinä yksikössä on kuitenkin ollut öisinkin huomattava määrä tuotantoa, joka nostaa vuoden todellisia keskiarvotehoja. Lauantapäivinä on lisäksi lähes poikkeuksetta tuotantoa, joka näkyy todellisen tehontarpeen kasvuna erityisesti aikavälillä 6:00-18:00.

Kokonaisuudessaan tutkimuksen antamat tulokset ovat todennäköisesti hieman virheellisiä, mutta tutkimuksen aikana esiin tulleet pääkohdat ovat silti hyvällä varmuudella paikkaansa pitäviä. Ehdotettujen energiatehokkuuden parannusehdotuksien avulla saatujen säästöjen suuruusluokka saattaa kuitenkin olla todellisuudessa erilainen. Konsernin energiankulutuksen seurannan kehittämisehdotuksiin ei vaikuta erilaisissa lasketuissa tuloksissa esiintyvät virheet.

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tilanteen konsernin energiankulutukseen liittyvien tietojen keräämisen, arkistoinnin ja analysoinnin perusteella, voidaan todeta konsernin edustavan tyypillistä keskisuurta konepajateollisuuden toimijaa; energia kokonaisuudessaan muodostaa vain pienen osan konsernin kokonaiskustannuksista ja energia-asioiden käsittelyyn ei oltu nimetty erikseen henkilöstöä. Konsernin kiinnostus sen omaa energiankulutusta ja siitä aiheutuvia kustannuksia kohtaan on kuitenkin viime vuosien aikana noussut, pääasiassa energiakatselmusveloitteesta irti pääsemisen tuottamien taloudellisten hyötyjen seurauksena.

Kokonaisuudessaan konsernin energiankäytön todettiin kasvaneen vuodesta 2014 lähtien vuosiin 2017 ja 2018 mennessä. Energiankulutuksen kasvu selittyi yhden uuden suuren yksikön käyttöönoton myötä. Kyseisen yksikön lämmönkulutuksen todettiin olevan koko konsernin energiankulutukseen eniten vaikuttanut tekijä vuosina 2017 ja 2018, verrattuna vuoteen 2014. Lämpöenergian osuus konsernin energiakustannuksista vuonna 2018 oli merkittävästi suurempi kuin vuonna 2014, mutta sähkönenergia oli silti konsernin eniten käyttämä energiamuoto ja siitä aiheutuvat kustannukset olivat konsernille merkittävin energiakustannus. Konsernin energiatalouden todettiin kehittyneen vuodesta 2014 lähtien, sillä energiaa on onnistuttu hankkimaan edullisemmin. Halvempi energian hinta on selitettävissä uusilla ja paremmilla sähkösopimuksilla sekä pellettien osuuden kasvulla lämmönlähteistä. Energian tehokkaaseen käyttöön liittyen voidaan todeta konsernin energiankäytön suhteen tuotettuun arvonlisäykseen nähden olevan toimialalle keskimääräisellä tasolla. Kokonaisuudessaan konsernin energiankulutuksen ja siitä aiheutuvien kustannuksien analysoinnin perusteella pystyttiin määrittelemään kohtuullinen määrä erilaisia energialajeja, joiden kombinaatiolla pystyy esittämään koko konsernin energiankulutuksen sekä onnistuttiin tunnistamaan konsernin poikkeusyksilöt energiankulutuksen suhteen ja luomaan energiankulutukseen liittyvä perustaso, johon konsernin yksiköitä voidaan tulevaisuudessa verrata. Tulevaisuudessa energiankulutukseen tehokkaampi huomioiminen konsernin toiminnassa edellyttää, että energiankulutuksen arkistointia ja raportointia tehostetaan ja eri yksiköiden energiankulutuksia analysoidaan tarkemmin.

Yksittäisen toimipisteen tarkastelun avulla pyrittiin erityisesti selvittämään mistä yksikön poikkeuksellisen suuri lämpöenergiankulutus johtuu. Tutkimuksen perusteella suuren lämmönkulutuksen arveltiin liittyvän kohteen suurempaan tuloilmavirran määrään kuin

muissa konsernin yksiköissä sekä yksikön lämmöntalteenoton ja lämmöntuoton hyötysuhteisiin. Suuri tuloilmavirran määrä liittyy todennäköisesti uusiin voimaan tulleisiin standardeihin sekä siihen, että yksikön tuotantotilassa työntekijät olivat kärsineet sisäilman laatuun liittyvistä terveyteen vaikuttavista oireista, joita pyrittiin ratkaisemaan lisäämällä tuloilmavirran määrää. Lämmöntalteenoton hyödyntämistä huononsivat pääasiassa kohteen tuloilmakoneet sekä yksi suuri ilmanvaihtokone, jossa lämmöntalteenotto toimi huonolla hyötysuhteella. Lisäksi tarkastellun yksikön korkeaan lämmönkulutukseen vaikuttava tekijä oli kohteen toimistorakennuksen kohtuuttoman suuri lämmönkulutus. Tutkimuksen lämpötaseen muodostuksen perusteella konepajahallien lämpöenergiankulutuksen kannalta tärkeimmiksi tekijöiksi muodostuu tuloilmavirran määrä, lämmöntalteenoton hyödyntäminen ja lämmöntuoton hyötysuhde. Tehdashallissa, jossa on paljon lämpökuormaa aiheuttavaa tuotantoa, ei rakenteiden huonoilla eristyksillä todettu olevan suurta merkitystä kohteen lämpöenergian tarpeeseen. Toimistorakennuksen rakenteiden U-arvot vaikuttavat oleellisesti konepajojen toimistorakennuksen lämmönkulutukseen, mutta niillä on vain pieni vaikutus koko toimipisteiden lämmönkulutukseen.

Yksittäisen toimipisteen sähkönkulutuksen osalta todettiin, että vain noin puolet yksikön sähkönkulutuksesta kuluu varsinaisten työkoneiden ja laitteiden pyörittämiseen. Merkittävimmät kiinteistösähkön kulutuskohteet toimipisteessä olivat valaistus- ja ilmanvaihtojärjestelmät. Valaistuksen sähkönkulutusta nostivat vanhat valaisintyypit sekä säädettävyyden puute. Ilmanvaihtojärjestelmän osalta kulutusta nostivat suuri tuloilmavirran määrä sekä suuritehoiset kierrätysilmasuodattimet. Paineilmajärjestelmä kohteessa oli pieni ja sen takia osuus sähkönkulutuksesta on myös vaatimaton. Yksikön lämmitysjärjestelmän sähkönkulutus oli sen sijaan yllättävän suuri, johtuen pääasiassa huonosta säädöstä ja siitä, että lämmitystä pidettiin jatkuvasti päällä. Toimistorakennuksen sähkönkulutus oli kohteessa vähäistä ja sillä ei ole suurta merkitystä koko yksikön sähkönkulutukseen.

Yksikön liikennepolttoaineiden ja veden kulutuksen tarkastelun perusteella todettiin, että molemmissa on yksi ylivoimaisesti suurin kulutuskohde. Liikennepolttoaineista suurin osa kuluu toimipisteen käytössä olevissa kuorma- ja pakettiautoissa ja vedestä suurin osa kuluu kohteen vesileikkureissa.

Tutkimuksen avulla pystyttiin tarkasteltuun yksikköön tuottamaan erilaisia energiatehokkuuden parannusehdotuksia. Kustannustehokkaiksi ehdotuksiksi nousivat erityisesti parannukset yksikön ilmanvaihto- ja valaistusjärjestelmiin. Ilmanvaihtojärjestelmään energiatehokkuuden parantamisehdotuksien avulla saataisiin yksikön lämpöenergian kulutusta laskettua jopa 40-60 %:a sellaisilla investoinneilla, joissa takaisinmaksuajat pysyvät siedettävänä. Valaistusjärjestelmän osalta säästöehdotukset laskisivat valaistuksesta

aiheutuvia kustannuksia noin 26 %:a. Kohteen lämmitysjärjestelmälle tuotettiin myös parannusehdotuksia, mutta kaikille niistä ei saatu laskettua tarkkaa rahallista säästöpotentiaalia. Todettiin myös, että kohteen tuotantotilan suuren kiinteistöenergian kulutuksen vuoksi voisi olla kannattavaa investoida kattavaan kiinteistöautomaatiojärjestelmään. Paineilmajärjestelmän ja eristyksien parantamisen osalta investoinnit todettiin todennäköisesti kannattamattomiksi. Rakennneosien osalta vain tuotantotilan nosto-ovien käyttöön suositellaan kiinnitettävän huomiota. Lisäksi saatiin tuotettua ehdotus, jolla voitaisiin vähentää vesileikkurin kuluttamaa vettä ja saavuttaa noin 11 %:n säästöt kohteen vesikustannuksissa.

Kokonaisuudessaan yksikön analysoinnin perusteella voidaan todeta, että kyseisen toimipisteen osalta energiaa kuluu enemmän kaikkeen muuhun kuin varsinaisten työkoneiden ja laitteiden pyörittämiseen. Näin ollen voisi olla perusteltua kohdistaa, ainakin kyseisen yksikön kaltaisissa toimipisteissä, energiatehokkuuden parantaminen ensisijaisesti erilaisiin kiinteistöenergian kulutuskohteisiin. Kiinteistöenergian käytön tehostamiseen nähdään myös olevan helpommin toteuttavissa, kuin työkoneiden ja laitteiden energiankulutuksen pienentäminen. Ensisijaisen tärkeäksi kiinteistöenergian kulutuksen kannalta tässä tutkimuksessa todettiin olevan tuotantotilan ilmanlaadun hallinta periaate, sillä tuotantotilan tuloilman lämmitys on pääasiallinen lämpöenergian kulutuskohde tarkastellun yksikön kaltaisissa toimipisteissä. Ilmanlaadun hallinta on myös merkittävä sähköenergian kulutuskohde. Voidaan lisäksi todeta, että mikäli ilmanlaatua hallitaan kiertoilmasuodattimien avulla tuloilmavirran kasvattamisen sijaan, nostaa se todennäköisesti konepajateollisuuden yksikön kiinteistösähköenergiankulutusta ja laskee lämpöenergiankulutusta. Kokonaisuudessaan tutkimus antoi viitteitä siitä, että Suomen ilmasto-olosuhteissa on ilmanvaihtojärjestelmän lämpöenergiankulutus yksi merkittävimmistä konepajojen energiatehokkuuden vaikuttavista tekijöistä.

Tutkimuksen tuloksien herkkyystarkastelussa tunnistettiin monia mahdollisia tekijöitä, jotka vaikuttavat taselaskennan avulla saatujen tulosten laatuun. Kaikesta päätellen tutkimuksessa muodostetut energiataseet kuvaavat todellisuutta sellaisella tarkkuudella, että tasemallien perusteella tehdyt johtopäätökset ovat paikkaansa pitäviä. Loppujen lopuksi analysoidun yksikön sekä konsernin energiankulutukseen liittyvien tuloksien arviointia vaikeuttaa alakohtaiset energiankulutukseen ja energiatehokkuuteen liittyvien standardien ja ohjeiden puutos.

## LÄHTEET

- [1] Laki Pariisin sopimuksen lainsäädännön alaan kuuluvien määräysten voimaansaattamisesta. Ympäristöministeriö, 2016. Saatavissa: Finlex › Hallituksen esitykset › 2016 › HE 200/2016
- [2] Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus. Tilastokeskus, Helsinki. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/ehk/index.html> [viitattu:16.12.2019]
- [3] S. Kalpakjian, Manufacturing Processes for Engineering Materials, 3rd Edition, 1997, s.1-23, 905-924.
- [4] Energian käyttö- ja suunnittelutietoa konepajateollisuudelle. Neste Oy, 1988, s.1-19
- [5] A. Zein, Transition towards energy efficient machine tools, Springer, 2012.
- [6] K.Ojanperä, Teollisuus uinuu energiansäästöissä, Tekniikka ja talous, 2008. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/teollisuus-uinuu-energiansaastossa/ba9ef365-1669-3957-9168-067ad44ec09d> [viitattu 17.12.2019]
- [7] L.Zhou, J.Li, F.Li, Q.Meng, J.Li, X.Xu, Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review, Journal of Cleaner Production 112, 2016, s.3721-3723
- [8] W. Ca, F.Liu, O.Dinolov, J.Xie, P.Liu, J.Tuo Energy benchmarking rules in machining systems, Energy 142, 2018, s.258-263
- [9] W.Ca, C.Li, K.Lai, L.Li, J.Cunha, L.Hu, Energy performance certification in mechanical manufacturing industry: A review and analysis, Energy Conversion and Management 186, 2019, 415-432
- [10] Energy Efficiency 2018 - Analysis and outlooks to 2040, International Energy Agency, Pariisi 2018, s.1-48. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2018>
- [11] Industrial Energy Efficiency Accelerator – Guide to the metalforming sector, Carbon Trust, Saatavissa: <https://www.carbontrust.com/resources/reports/technology/industrial-energy-efficiency/>
- [12] Tracking industry, International Energy Agency, Pariisi, 2019. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2019>
- [13] T.Nikinmaa, Kone- ja metallituoteteollisuuden visio 2025, ETLA raportit no. 28, ETLA, 2014. Saatavissa: <http://pub.etla.fi/ETLA-Raportit-Reports-28.pdf>

- [14] G.Koreneff, Energy efficiency: Can we easily compare countries?, Research Report; No. VTT-R-0700018, VTT, Motiva, Espoo 2018 Saatavissa: <https://cris.vtt.fi/en/publications/energy-efficiency-can-we-easily-compare-countries>
- [15] Suomen kansallinen energiatehokkuuden toimintasuunnitelma NEEAP-4, Motiva, Energiavirasto, 2017. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/12745/Suomen\\_neljas\\_kansallinen\\_energiatehokkuuden\\_toimintasuunnitelma\\_NEEAP-4.pdf](https://www.motiva.fi/files/12745/Suomen_neljas_kansallinen_energiatehokkuuden_toimintasuunnitelma_NEEAP-4.pdf)
- [16] Energiatehokkuuslaki 1429/2014, Työ- ja elinkeinoministeriö, 2015. Saatavissa: Finlex › Lainsäädäntö › Säädosmuutosten hakemisto › 2014 › 1429/2014
- [17] Valtioneuvoston asetus energiantuen myöntämisen yleisistä ehdoista vuosille 2018-2022 1098/2017, Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017. Saatavissa: Finlex › Lainsäädäntö › Säädosmuutosten hakemisto › 2017 › 1098/2017
- [18] Valtioneuvoston asetus energiakatselmuksista 20/2015, Työ- ja elinkeinoministeriö, 2015. Saatavissa: Finlex › Lainsäädäntö › Säädosmuutosten hakemisto › 2015 › 20/2015
- [19] Työ- ja elinkeinoministeriön asetus kohdekatselmusten raportoinnista 41/2015, Työ- ja elinkeinoministeriö, 2015. Saatavissa: Finlex › Lainsäädäntö › Säädosmuutosten hakemisto › 2015 › 41/2015
- [20] Energiakatselmuksitoiminnan yleisohjeet, Työ- ja elinkeinoministeriö. Energiavirasto, Helsinki 2019, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiakatselmuksitoiminta/tem\\_n\\_tukemat\\_energiakatselmukset/tem\\_n\\_ohjeet\\_energiakatselmuksitoiminnalle/tem-energiakatselmuksitoiminnan\\_yleisohjeet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiakatselmuksitoiminta/tem_n_tukemat_energiakatselmukset/tem_n_ohjeet_energiakatselmuksitoiminnalle/tem-energiakatselmuksitoiminnan_yleisohjeet)
- [21] Vapautuminen pakollisista katselmuksista, Motiva, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiakatselmuksitoiminta/pakollinen\\_suuren\\_yrityksen\\_energiakatselmus/vapautuminen\\_pakollisista\\_katselmuksista](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiakatselmuksitoiminta/pakollinen_suuren_yrityksen_energiakatselmus/vapautuminen_pakollisista_katselmuksista) [viitattu 16.12.2019]
- [22] ISO 50001 ja ETJ+ energian hallinta, Bureau Veritas, Saatavissa: <https://www.bureauveritas.fi/palvelumme/sertifiointi/energianhallinta> [viitattu 16.12.2019]
- [23] H.Hyytiä. M.Rautiainen, ETJ+:n lisävaatimukset ETJ:hin verrattuna - käytännön ohjeita vaatimusten täyttämiseksi, Motiva Oy, Helsinki 2016. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/12250/ETJ\\_n\\_lisavaatimukset\\_ETJhin\\_verrattuna\\_-\\_kaytannon\\_ohjeita\\_vaatimusten\\_tayttamiseksi\\_201604.pdf](https://www.motiva.fi/files/12250/ETJ_n_lisavaatimukset_ETJhin_verrattuna_-_kaytannon_ohjeita_vaatimusten_tayttamiseksi_201604.pdf)
- [24] Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017, Ympäristöministeriö, Helsinki 2017. Saatavissa: Finlex › Lainsäädäntö › Säädökset alkuperäisinä › 2017 › 1010/2017



- [25] S.Aho, Teollisuuden ominaisenergiankulutuksia, Saatavissa: <http://www.satamit-tari.fi/energiatehokkuus> [viitattu 16.12.2019]
- [26] Katsaus energian ominaiskulutukseen ja niitä selittäviin tekijöihin, Motiva, 2018. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/15181/Katsaus\\_energian\\_ominaiskulutukseen\\_ja\\_niita\\_selittaviin\\_tekijoihin\\_-\\_Paivitys\\_2016-2017.pdf](https://www.motiva.fi/files/15181/Katsaus_energian_ominaiskulutukseen_ja_niita_selittaviin_tekijoihin_-_Paivitys_2016-2017.pdf)
- [27] J. Heilala, J.Sääski, M.Majuri, J.Pesonen, J.Halme. PFOFFI - Yrityshaastattelujen yhteenveto 2010-2011. VTT, Espoo 2011.
- [28] E.Jääskeläinen, Kone- ja laiteteollisuus, Toimialaraportti 7/2009, Työ- ja elinkeino-ministeriö, Helsinki 2009
- [29] P-E. Sjöholm, H.Itkonen, Esimerkki energiankäytön tehostamisesta konepajateollisuuden tehdashallissa, Tekninen Tiedotus 4/86, MET, Helsinki 1986
- [30] V.V Mattila, Energiatehokas teollisuuskiinteistö -opas, Motiva, Helsinki 2012, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/kaikki\\_julkaisut/energiatehokas\\_teollisuuskiinteisto.9236.shtml](https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/kaikki_julkaisut/energiatehokas_teollisuuskiinteisto.9236.shtml)
- [31] Machine Tools – Environmental evaluation of machine tools – Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools, ISO 14955-1:2017. ISO/TC 39, 2017. Saatavissa: <https://www.iso.org/standard/70035.html> [viitattu 16.12.2019]
- [32] Machine Tools – Environmental evaluation of machine tools – Part 2: Methods for measuring energy supplied to machine tools and machine tools components, ISO 14955-1:2018. ISO/TC 39, 2018. Saatavissa: <https://www.iso.org/standard/66354.html> [viitattu 16.12.2019]
- [33] P. Lj. Jankovic, M.J. Madic, D. Lj. Petkovic, M.R.Radovanovic, Analysis and modeling of the effects of process parameters on specific cutting energy in abrasive water jet cutting, Thermal Science, vol. 22, suppl. 5., 2018, s.1459-1470.
- [34] H-S.Yoon, J-Y.Lee, H-S.Kim, M-S.Kim, E-S.Kim, Y-J.Shin, W-S.Chu, S-H.Ahn, A Comparison of Energy Consumption in Bulk Forming, Subtractive, and Additive Processes: Review and Case Study, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol. 1, No. 3, 2014, s. 261-279
- [35] K. Kellens, G.C.Rodrigues, W.Dewulf, J.R.Duflou, Energy and Resource Efficiency of Laser Cutting Processes, Physics Procedia 56, 2014, s.854-864.
- [36] Y.Seow, S.Rahimifard, A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 4, 2011, s.258-264

- [37] M.Benedetti, V.Cesarotti, V.Introna Improving Energy Efficiency in Manufacturing Systems — Literature Review and Analysis of the Impact on the Energy Network of Consolidated Practices and Upcoming Opportunities, Energy Efficiency Improvements in Smart Grid Components, In-Tech Open, 2015, s.41-60
- [38] Suomen virallinen tilasto (SVT): Teollisuuden energiankäyttö [verkojulkaisu]. ISSN=1798-775X, Tilastokeskus, Helsinki, Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/tene/index.html> [viitattu:16.12.201].
- [39] Teollisuusrakennusten ilmastointi ja lämmitys, Neste Oy, Espoo 1990
- [40] J.F.Kreider, A.Rabl, Heating and Cooling of Buildings, Singapore 1994. s.521-603
- [41] Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehon tarpeen laskenta, ohjeet, Ympäristöministeriö, Helsinki 2017. Saatavissa: [https://www.ymp.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus](https://www.ymp.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus)
- [42] J.Shemeikka, A.Laitinen, K.Klobut, M.Saari, P.Kukkonen, Lämmitysjärjestelmät ja lämmin käyttövesi – laskentaopas, Ympäristöministeriö, 2011.
- [43] T.Peng, X.Xu, Energy-efficient machining systems: A critical review, Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014.
- [44] M.P.Brudange, Q.Chang, Y.Li, G.Xiao, J.Arinez, Energy Efficiency Management of an Integrated Serial Production Line and HVAC System, International Conference on Automation Science (CASE), 2013, s.634-639
- [45] B.Hagner, Energiakatselmoijan käsikirja, Osa 3, Luku 2, Motiva Oy. Saatavissa: <https://www.motiva.fi/extranet/energiakatselmoijat>
- [46] Paineilmeteekniikka Perusteet ja käytännön vinkkejä, Kaeser, Saatavissa <https://fi.kaeser.com/download.ashx?id=tcm:24-5981> Viitattu [16.12.2019]
- [47] D1 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Kiinteistöjen vesi- ja viemärlaitteistot, Määräykset ja ohjeet 2007, Ympäristöministeriö, Helsinki 2007. Saatavissa: [Finlex › Viranomaiset › Viranomaisten määräyskokoelmat › Ympäristöministeriö](#)
- [48] Toimistorakennuksen lämpimän käyttöveden kulutuksen oletus arvo, Motiva, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/kiinteiston\\_energiankaytto/kulutuksen\\_normitus/laskukaavat\\_lammin\\_kayttovesi](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energiankaytto/kulutuksen_normitus/laskukaavat_lammin_kayttovesi) Viitattu [16.12.2019]
- [49] Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa, FINVAC Ry, Helsinki 2017. Saatavissa: <https://www.finvac.org/iv-opaat>

- [50] Palvelusektorin ominaiskulutuksia, Motiva, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiakatselmustoiminta/tem\\_n\\_tukemat\\_energiakatselmukset/tilastotietoa\\_katselmuksista/ominaiskulutukset\\_palvelusektorilla](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiakatselmustoiminta/tem_n_tukemat_energiakatselmukset/tilastotietoa_katselmuksista/ominaiskulutukset_palvelusektorilla) Viitattu [16.12.1019]
- [51] D2 Suomen Rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriön asetus rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta, Ympäristöministeriö, Helsinki 2002, Saatavissa: Finlex › Viranomaiset › Viranomaisten määräyskokoelmat › Ympäristöministeriö
- [52] G.P.Moynihan, F.L.Barringer, Energy Efficiency in Manufacturing Facilities: Assessment, Analysis and Implementation, Energy Efficient Buildings, InTechOpen, 2017, s. 128-148
- [53] K.H.Khan, C.Ryan, E.Abebe, Optimizing HVAC Energy Usage in Industrial Processes by Scheduling Based on Weather Data, IEEE Access, Volume 5, 2017. s.11228-11235
- [54] C. Simona, A.Luca, I.Vito, M.Fabrizio, U.Stefano, Methodology Development for a Comprehensive and Cost-Effective Energy Management in Industrial Plants, Energy Management Systems, InTechOpen, 2011, s. 15-54
- [55] M.P.Brundage, Q.Chang, J.Zou, Y.Li, J.Arinez, G.Xiao, Energy economics in the manufacturing industry: A return of investment strategy, Energy 93, 2015, s.1426-1435
- [56] T.Devoldere, W.Dewulf, W.Deprez, J.R.Duflou, Energy Related Life Cycle Impact and Cost Reduction Opportunities: The Laser Cutting case, 2008. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/237719593\\_Energy\\_Related\\_Life\\_Cycle\\_Impact\\_and\\_Cost\\_Reduction\\_Opportunities\\_in\\_Machine\\_Design\\_The\\_Laser\\_Cutting\\_Case](https://www.researchgate.net/publication/237719593_Energy_Related_Life_Cycle_Impact_and_Cost_Reduction_Opportunities_in_Machine_Design_The_Laser_Cutting_Case)
- [57] Tasauslaskentaopas 2018, Rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittaminen, LIITE 4, Ympäristöministeriö, Helsinki 2017. Saatavissa: [https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus](https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus)
- [58] Lämpöpumppujen energialaskentaopas, Ympäristöministeriö, Helsinki 2012. Saatavissa: [https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus](https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus)

## LIITE 1: TILAN LÄMMITYSTARPEEN LASKENTAKAAVAT

Tilojen lämmitysenergian tarve,  $Q_{tila}$ , saadaan laskettua kaavalla:

$$Q_{tila} = Q_{joht} + Q_{vuotoilma} + Q_{iv,tuloilma} + Q_{iv,korvausilma} \quad (18)$$

jossa  $Q_{joht}$  on johtumislämpöhäviöt rakennusvaipan läpi [kWh],  $Q_{vuotoilma}$  on vuotoilman lämpenemisen lämpöenergian tarve [kWh],  $Q_{iv,tuloilma}$  on tilassa tapahtuvan tuloilman lämpenemisen lämpöenergian tarve [kWh] ja  $Q_{iv,korvausilma}$  on korvausilman lämpenemisen lämpöenergian tarve [kWh]

Kokonaisjohtumislämpöhäviöt rakenneosien läpi voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{joht} = Q_{ulkoseinä} + Q_{yläpohja} + Q_{alapohja} + Q_{ikkuna} + Q_{ovi} + Q_{muu} + Q_{kylmäsillat} \quad (19)$$

jossa  $Q_{joht}$  on johtumislämpöhäviöt rakennusvaipan läpi [kWh],  $Q_{ulkoseinä}$  on johtumislämpöhäviö ulkoseinien läpi [kWh],  $Q_{yläpohja}$  on johtumislämpöhäviö yläpohjien läpi [kWh],  $Q_{alapohja}$  on johtumislämpöhäviö alapohjien läpi [kWh],  $Q_{ikkuna}$  on johtumislämpöhäviö ikkunoiden läpi [kWh],  $Q_{ovi}$  on johtumislämpöhäviö ulko-ovien läpi [kWh],  $Q_{muu}$  on johtumislämpöhäviö tilaan, jonka lämpötila poikkeaa ulkolämpötilasta [kWh] ja  $Q_{kylmäsillat}$  on kylmäsiltojen johtumislämpöhäviö [kWh].

Yksittäisen rakennusosan johtumislämpöhäviö voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{rak.osa} = \sum U_i A_i (T_s - T_u) \Delta t / 1000 \quad (20)$$

jossa  $Q_{rak.osa}$  on johtumislämpöhäviö rakennusosan läpi [kWh],  $U_i$  on rakennusosan i lämmönläpäisykerroin [ $W/(m^2K)$ ] ja  $A_i$  rakennusosan i pinta-ala [ $m^2$ ],  $T_s$  on sisäilman lämpötila laskentajaksolla [ $^{\circ}C$ ] ja  $T_u$  on ulkoilman lämpötila laskentajaksolla [ $^{\circ}C$ ].

Laskettaessa lämpöhäviöitä maanvastaisen ala-pohjan läpi sijoitetaan kaavassa (20) termin  $T_u$  tilalle termi  $T_{maa}$ , joka viittaa maan lämpötilaan laskentajaksolla.

Kylmäsiltojen johtumislämpöhäviö saadaan kaavalla

$$Q_{kylmäsillat} = \sum I_k \Psi_k (T_s - T_u) \Delta t / 1000 \quad (21)$$

jossa  $Q_{kylmäsillat}$  on johtumislämpöhäviö kylmäsiltojen läpi [kWh],  $I_k$  on viivamaisen kylmäsiltojen pituus [m],  $\Psi_k$  on viivamaisen kylmäsiltojen lisäkonduktanssi [ $W/(mK)$ ].

Tuloilman lämpeneminen tilassa viittaa siihen lämpöenergian määrään, joka tarvitaan lämmittämään ilmanvaihtokoneiden kautta sisälle puhallettu ilmamäärä sisäänpuhalluslämpötilasta sisälämpötilaan asti. Se voidaan laskea konekohtaisesti kaavalla:

$$Q_{iv,tuloilma} = \rho_i c_{pi} q_{v,tulo,avg} (T_s - T_{sp}) \Delta t / 1000 \quad (22)$$

jossa  $Q_{iv,tuloilma}$  on tilassa tapahtuvan tuloilman lämpenemisen lämpöenergian tarve [kWh],  $\rho_i$  on ilman tiheys [1,2 kg/m<sup>3</sup>],  $c_{pi}$  on ilman ominaislämpökapasiteetti [1000 J/kgK],  $q_{v,tulo,avg}$  on tuloilmavirran keskimääräinen arvo tarkastelujaksolla [m<sup>3</sup>/s],  $T_s$  sisäilman lämpötila [°C],  $T_{sp}$  on sisäänpuhalluslämpötila [°C] ja  $\Delta t$  tarkasteltava ajanjakso [h].

Mikäli tarkasteltavan tilan poistoilmavirta on suurempi kuin tuloilmavirta, syntyy korvausilmaa. Korvausilman lämpenemisen energiantarve voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{iv,korvausilma} = \rho_i c_{pi} q_{v,korvausilma} (T_s - T_u) \Delta t / 1000 \quad (23)$$

jossa  $Q_{iv,korvausilma}$  korvausilman lämpenemisen lämpöenergian tarve [kWh] ja  $q_{v,korvausilma}$  on korvausilmavirta [m<sup>3</sup>/s].

Vuotoilman lämpeneminen tilassa voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{vuotoilma} = \rho_i c_{pi} q_{v,vuotoilma} (T_s - T_u) \Delta t / 1000 \quad (24)$$

jossa  $Q_{vuotoilma}$  vuotoilman lämpenemisen lämpöenergian tarve [kWh] ja  $q_{v,vuotoilma}$  on vuotoilmavirta [m<sup>3</sup>/s].

Kaavassa (18) esiintyvä termi  $q_{v,vuotoilma}$  voidaan laskea kaavalla:

$$q_{v,vuotoilma} = \frac{q_{50}}{3600x} A_{vaiippa} \quad (25)$$

jossa  $q_{50}$  on rakennusvaipan ilmanvuotoluku [m<sup>3</sup>/(hm<sup>2</sup>)],  $A_{vaiippa}$  on rakennusvaipan pinta-ala (alapohja mukaan luettuna) [m<sup>2</sup>],  $x$  on kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35, kaksikerroksisille 24, kolmi- ja nelikerroksisille 20 ja viisikerroksisille ja sitä korkeimmille rakennuksille 15 kerroskorkeuden ollessa noin 3 m. Vain maapinnan yläpuoliset kerrokset otetaan huomioon ja 3600 on kerroin, joka muuttaa ilmavirran m<sup>3</sup>/h yksiköstä m<sup>3</sup>/s yksikköön.

Yhtälöissä (5) esiintyvä termi  $Q_{jakelu,ulos}$ , voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{jakelu,ulos} = q_{jakeluhäviö,ulos} L \quad (26)$$

jossa  $Q_{jakelu,ulos}$  on lämmön jakelujärjestelmän lämpöhäviö lämmittämättömään tilaan [kWh/a],  $q_{jakeluhäviö,ulos}$  on lämmön jakelujärjestelmän ominaislämpöhäviö lämmittämättömään tilaan [kWh/(m a)] ja  $L$  on lämmön jakelujärjestelmän meno- ja paluuputkien yhteenlaskettu pituus lämmittämättömässä tilassa [m].

Termille  $Q_{varastointi,ulos}$  ei ole Ympäristöministeriön laskentaohjeessa annettu yleispätevää laskentakaavaa.

## LIITE 2 LÄMPÖKUORMIEN LASKENTAKAAVAT

Tilan lämpökuormat kokonaisuudessaan saadaan kaavalla:

$$Q_{\text{lämpökuorma}} = Q_{\text{henk}} + Q_{\text{sähk}} + Q_{\text{aur}} + Q_{\text{lkv,kierto,kuorma}} + Q_{\text{lkv,varastointi,kuorma}} \quad (27)$$

Ihmistä muodostuva lämpökuorma voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{\text{henk}} = \frac{kn\phi_{\text{henk}}\Delta t_{\text{oleskelu}}}{1000} \quad (28)$$

jossa  $Q_{\text{henk}}$  on henkilöiden luovuttama lämpöenergia [kWh],  $k$  on rakennuksen käytön-aikainen käyttöaste, joka kuvaa ihmisten keskimääräistä läsnäoloa rakennuksessa,  $n$  on henkilöiden lukumäärä [kpl],  $\phi_{\text{henk}}$  on yhden henkilön luovuttama keskimääräinen lämpöteho (ei sisällä haihtumislämpöä), W/henkilö,  $\Delta t_{\text{oleskelu}}$  on oleskeluaika [h] ja 1000 on kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi

Sähkölaitteista ja valaistuksesta muodostuva lämpökuorma voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{\text{sähk}} = W_{\text{valaistus}} + W_{\text{kuluttajalaitteet}} \quad (29)$$

jossa  $Q_{\text{sähk}}$  on valaistuksesta ja sähkölaitteista rakennuksen sisälle tuleva lämpökuorma [kWh],  $W_{\text{valaistus}}$  on valaistusjärjestelmän sähköenergian kulutus [kWh] ja  $W_{\text{kuluttajalaitteet}}$  on sähkölaitteiden sähköenergian kulutus [kWh].

Auringon säteilystä muodostuva lämpökuorma voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{\text{aur}} = \sum G_{\text{säteily,vaakapinta}} F_{\text{suunta}} F_{\text{läpäisy}} A_{\text{ikk}} g = \sum G_{\text{säteily,pystypinta}} F_{\text{läpäisy}} A_{\text{ikk}} g \quad (30)$$

jossa  $Q_{\text{aur}}$  on ikkunoiden kautta rakennukseen tuleva auringon säteilyenergia [kWh/kk],  $G_{\text{säteily,vaakapinta}}$  non vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia pinta-alan yksikköä kohti [kWh/(m<sup>2</sup>kk)],  $G_{\text{säteily,pystypinta}}$  on pystypinnalle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia pinta-alan yksikköä kohti [kWh/(m<sup>2</sup>kk)],  $F_{\text{suunta}}$  on muuntokerroin, jolla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan ilmansuunnittain pystypinnalle tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi,  $F_{\text{läpäisy}}$  on säteilyn läpäisyn kokonaiskorjauskerroin,  $A_{\text{ikk}}$  on ikkuna-aukon pinta-ala (kehys- ja karmirakenteineen) [m<sup>2</sup>] ja  $g$  on ikkunan valoaukon auringon kokonaissäteilyn läpäisykerroin.

Auringon säteilyenergioille sekä muuntokertoimille on ympäristöministeriön julkaisemat taulukoidut arvot eri Suomen säävyöhykkeille.

Kaavassa (27) esiintyvät termit  $Q_{\text{lkv,kierto,kuorma}}$  ja  $Q_{\text{lkv,varastointi,kuorma}}$  ovat osuuksia kokonaislämpöhäviöistä, joiden laskenta on liitteessä 4.

Lämpökuormille on ympäristöministeriön ohjeen mukaisesti laskettava myös kuukausittainen hyödyntämisaste, joka riippuu tilan lämpökuormien ja lämmitystarpeen suhteesta sekä rakennuksen aikavakiosta. Kuukausittainen hyödyntämisaste saadaan kaavoilla:

$$\eta_{\text{lämpö}} = \frac{1-\gamma^a}{1-\gamma^{a+1}} \quad (31)$$

$$a = 1 + \frac{\tau}{15} \quad (32)$$

$$\gamma = \frac{Q_{\text{lämpökuorma}}}{Q_{\text{tila}}} \quad (33)$$

joissa  $\eta_{\text{lämpö}}$  on lämpökuormien kuukausittainen hyödyntämisaste,  $\gamma$  on lämpökuorman suhde lämpöhäviöön ja  $a$  on numeerinen parametri.

Kaavassa (49) esiintyvä termi  $\tau$  on rakennuksen aikavakio ja se saadaan laskettua kaavalla:

$$\tau = \frac{C_{\text{rak}}}{H_{\text{tila}}} \quad (34)$$

jossa  $C_{\text{rak}}$  on rakennuksen sisäpuolinen tehollinen lämpökapasiteetti [Wh/K] ja  $H_{\text{tila}}$  on rakennuksen tilojen ominaislämpöhäviö (johtumisen, vuotoilman, korvausilman ja tuloilman tilassa tapahtuvan lämpenemisen yhteenlaskettu ominaishäviö) [W/K].

Rakennuksen tilojen ominaislämpöhäviö lasketaan kaavalla:

$$H_{\text{tila}} = \frac{Q_{\text{tila}}}{(T_s - T_u)\Delta t} 1000 \quad (35)$$

Lämpökuormien hyödyntämisasteen määrittämisen jälkeen on mahdollista muodostaa yhtälössä (28) esiintyvä termi  $Q_{\text{sis.lämpö}}$ , joka voidaan laskea jokaiselle tarkasteltavalle kuukaudelle erikseen kaavalla:

$$Q_{\text{sis.lämpö}} = \eta_{\text{lämpö}} * Q_{\text{lämpökuorma}} \quad (36)$$



## LIITE 3 LÄMMÖNTALTEENOTOLLA SAATAVAN TEHON MÄÄRITYS

Lämmöntalteenotosta saatavan tehon määrittäminen perustuu tässä tutkimuksessa ympäristöministeriön monisteeseen 122: Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden ta-sauslaskennassa (Ympäristöministeriö, 2003)[57].

Ohjeen mukaan kaavassa (9) esiintyvä termi  $\phi_{lto}$  saadaan laskettua kaavalla:

$$\phi_{lto} = \rho_i c_{pi} q_{v,poisto,avg} (T_s - T_j) \quad (37)$$

jossa  $q_{v,poisto,avg}$  on keskimääräinen poistoilmavirta tarkastelujaksolla [ $m^3/s$ ],  $T_s$  on sisälämpötila [ $^{\circ}C$ ] ja  $T_j$  on jäteilmän lämpötila.

Kaavassa (33) esiintyvä termi  $T_j$  viittaa poistoilman lämpötilaan lämmöntalteenottolaitteiston jälkeen. Mikäli tulo- ja poistoilmavirrät, jäteilmän lämpötila, sisälämpötila ja ulkolämpötila tiedetään jossain sellaisessa pisteessä missä lämmöntalteenoton tehoa ei ole rajoitettu, voidaan lämmöntalteenottolaitteistolla saatavan tehon määrittäystä varten laskea poisto- ja tuloilman lämpötilahyötysuhteet kaavoilla:

$$\eta_p = \frac{(T_s - T_j)}{(T_s - T_u)} \quad (38)$$

jossa  $\eta_p$  on poistoilman lämpötilahyötysuhde

$$\eta_t = \frac{(T_{LTO} - T_u)}{(T_s - T_u)} \quad (39)$$

jossa  $\eta_t$  on tuloilman lämpötilahyötysuhde.

Poistoilman lämpötilahyötysuhteen avulla voidaan laskea teoreettinen jäteilmän lämpötila, mikäli tulo- ja poistoilmavirtojen suhde sekä sisälämpötila ja ulkolämpötila tiedetään.

Jos laskettu tuloilman lämpötilahyötysuhde on laskettu tilanteessa, jossa tulo- ja poistoilmavirran poikkeavat toisistaan, saadaan tuloilman lämpötilahyötysuhde määriteltyä tilanteessa, jossa tulo- ja poistoilmavirrät ovat yhtäsuuret yhtälöllä:

$$\eta_{t(R=1)} = \frac{(1+R)}{2} \eta_{t(R)} \quad (40)$$

ja toisinpäin

$$\eta_{t(R)} = \frac{2}{(1+R)} \eta_{t(R=1)} \quad (41)$$

Poistoilman hyötysuhde voidaan laskea tuloilman hyötysuhteesta kaavalla:

$$\eta_p = R \eta_t \quad (42)$$

Yhtälöissä (40)-(42) esiintyvä termi on lämmöntalteenoton läpi kulkevan tuloilman suhde poistoilmaan, joka voidaan laskea kaavalla:

$$R = \frac{q_{t,LTO}}{q_{p,LTO}} \quad (43)$$

jossa R on lämmöntalteenoton läpi kulkevan tuloilman suhde poistoilmaan,  $q_{t,LTO}$  on lämmöntalteenoton läpi kulkeva tuloilma [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] ja  $q_{p,LTO}$  on lämmöntalteenoton läpi kulkeva poistoilma [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Jäteilman lämpötilan avulla voidaan laskea lämmöntalteenottolaitteistolla saatava teho. Huomioitavaa on, että lämmöntalteenottolaitteistoissa on jäätymisen eston takia rajoitettava jäteilman lämpötilaa ja toisaalta lämmöntalteenotolla ei välttämättä haluta lämmittää ilmaa asetettua tuloilman sisäänpuhalluslämpötilaa lämpimämmäksi.

## LIITE 4 LÄMPIMÄN KÄYTTÖVEDEN LÄMMITYSTARPEEN LASKENTAKAAVAT

Lämpimän käyttöveden vaatimat nettolämmitysenergia voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{lkv,netto} = \frac{\rho_v c_{pv} V_{lkv} (T_{lkv} - T_{kv})}{3600} \quad (44)$$

$Q_{lkv,netto}$  on lämpimän käyttöveden nettolämpöenergian tarve [kWh/a],  $\rho_v$  on veden tiheys [1000 kg/m<sup>3</sup>],  $c_{pv}$  veden ominaislämpökapasiteetti [4,2 kJ/(kgK)],  $V_{lkv}$  on lämpimän käyttöveden kulutus[m<sup>3</sup>],  $T_{lkv}$  lämpimän käyttöveden lämpötila [°C],  $T_{kv}$  on kylmän käyttöveden lämpötila [°C] ja 3600 on kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi.

Termille  $Q_{lkv,varastoinnit}$  voidaan käyttää taulukoituja ohjearvoja ja termi  $Q_{lkv,kierto}$  voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{lkv,kierto} = (\phi_{lkv,kiertohäviö,omin} L_{lkv} + \phi_{lkv,lämmitys,omin} n_{lämmityslaitte}) \frac{t_{lkv,pumppu} 365}{1000} \quad (45)$$

jossa  $\phi_{lkv,kiertohäviö,omin}$  on lämpimän käyttöveden kiertojohton lämpöhäviön ominaisteho [W/m],  $L_{lkv}$  on lämpimän käyttöveden kiertojohton pituus[m],  $\phi_{lkv,lämmitys,omin}$  on lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteiden ominaisteho [W/kpl],  $n_{lämmityslaitte}$  on lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteiden lukumäärä ja  $t_{lkv,pumppu}$  lämpimän käyttöveden kiertojohton pumpun käyttöaika h/vrk.

## LIITE 5 LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN SÄHKÖTEHON TARPEEN LASKENTAKAAVAT

Mikäli lämmönjakojärjestelmän tarvitsema sähköteho tunnetaan tarpeeksi hyvin, voidaan järjestelmän sähkönkulutus loogisesti laskea kaavalla:

$$W_{tilat} = P_{apu,lämmönjakelu,avg} \Delta t \quad (46)$$

jossa  $P_{apu,lämmönjakelu}$  on lämmönjakelujärjestelmän apulaitteiden keskimääräinen sähköteho [kW] ja  $\Delta t$  on lämmönjakelujärjestelmän käyttöaika vuodessa [h].

Samalla tavalla voidaan laskea lämmöntuottajärjestelmän apulaitteiden sähköenergian kulutus:

$$W_{tuotto,apu} = P_{apu,tuotto,avg} \Delta t \quad (47)$$

jossa  $P_{apu,tuotto,avg}$  on lämmöntuottolaitteiston apulaitteiden keskimääräinen sähköteho [kW] ja  $\Delta t$  on lämmöntuottolaitteiston käyttöaika vuodessa [h].

Lämpimän käyttövesiverkoston kiertopumpun sähköenergian kulutus voidaan laskea kaavalla:

$$W_{lkv,pumppu} = \frac{P_{lkv,pumppu} t_{lkv,pumppu} 365}{1000} \quad (48)$$

jossa  $P_{lkv,pumppu}$  on lämpimän käyttöveden kiertojohdon pumpun sähkömoottorin otto-teho [W] ja  $t_{lkv,pumppu}$  lämpimän käyttöveden kiertojohdon pumpun käyttöaika [h/vrk]

Lämmityskäytössä olevan lämpöpumpun sähköenergiankulutuksen arviointia varten voidaan käyttää Lari Eskolan et al. laatimaa lämpöpumppujen energialaskentaopasta (Lari Eskola, 2012)[58]. Arviointia varten on ensin määriteltävä sillä lämmitettävän tilan suhteellinen lämpöteho, kaavalla:

$$\frac{\varphi_{pn}}{\varphi_{tila}} \quad (49)$$

jossa  $\varphi_{pn}$  on lämpöpumpun nimellislämpöteho ja  $\varphi_{tila}$  on tilan laskettu lämpötehon tarve.

Tämän jälkeen määritellään vielä tilan tarvitseman lämpöenergian suhde lämpimän käyttöveden lämmittämiseen tarvittavaan energiaan eli:

$$\frac{Q_{lämmitys,tilat}}{Q_{lämmitys,lkv}} \quad (50)$$

jossa  $Q_{lämmitys,tilat}$  on lämmitettävän tilan lämpöenergian tarve ja  $Q_{lämmitys,LKV}$  on lämpimän käyttöveden lämmityksen lämpöenergian tarve

Näiden indeksisuureiden jälkeen voidaan lukea säävyöhyke riippuvainen taulukkoarvo, joka antaa arvion lämpöpumpulla tuotetun lämpöenergian määrän suhteessa tarvittavaan tilojen ja/tai lämpimän käyttöveden lämmitykseen eli:

$$\frac{Q_{lp}}{Q_{lämmitys,tilat,lkv}} \text{ tai } \frac{Q_{lp}}{Q_{lämmitys,tilat}} \quad (51)$$

jossa  $Q_{lp}$  on lämpöpumpulla tuotettu lämpömäärä [kWh].

Ajatuksena on lopulta saada laskennallinen arvio lämpöpumpulla tuotettavasta lämpöenergiasta, mutta sitä varten on ensin määriteltävä lämmitettävän kohteen lisälämmityksen tarve. Eli se lämpöenergian määrä, joka pitää lämmitettävässä kohteessa kattaa muulla kuin lämpöpumpulla. Tilojen ja lämpimän käyttöveden tarvitsemat lisälämmityksen määrä voidaan laskea kaavoilla:

$$Q_{lisälämmitys,tilat} = \left(1 - \frac{Q_{lp}}{Q_{lämmitys,tilat,LKV}}\right) * Q_{lämmitys,tilat} \quad (52)$$

$$Q_{lisälämmitys,LKV} = \left(1 - \frac{Q_{lp}}{Q_{lämmitys,tilat,LKV}}\right) * Q_{lämmitys,lkv} \quad (53)$$

joissa  $Q_{lisälämmitys,tilat}$  on tilan lisälämmityksen tarve [kWh] ja  $Q_{lisälämmitys,lkv}$  on lämpimän käyttöveden lisälämmityksen tarve [kWh].

Kaavojen (12) ja (13) perusteella voidaan lämpöpumpun tuottama tilojen lämmitysenergia laskea:

$$Q_{LP,lämmitys} = Q_{lämmitys,tilat} - Q_{lisälämmitys,tilat} \quad (54)$$

ja vastaavasti lämpimälle käyttövedelle:

$$Q_{LP,LKV} = Q_{lämmitys,LKV} - Q_{lisälämmitys,LKV} \quad (55)$$

Lopulta lämpöpumpun lämpöenergian tuottoa varten tarvittava sähköenergian kulutus saadaan kaavalla:

$$W_{LP,lämmitys} = \frac{Q_{LP,lämmitys}}{SPF_{tilat}} + \frac{Q_{LP,lämmitys,lkv}}{SPF_{lkv}} \quad (56)$$

jossa  $W_{LP,lämmitys}$  on lämpöpumpujärjestelmän sähköenergian kulutus [kWh],  $Q_{LP,lämmitys}$  on lämpöpumpun tuottama tilojen lämmitysenergia [kWh],  $SPF_{tilat}$  on lämpöpumpun SPF-luku tilojen lämmityksessä,  $Q_{LP,lämmitys,lkv}$  on lämpöpumpun tuottama käyttöveden lämmitysenergia[kWh],  $SPF_{lkv}$  on lämpöpumpun SPF-luku käyttöveden lämmityksessä.

Kaavassa (8) esiintyvä termi SPF (seasonal performance factor) kuvaa lämpöpumpun kausisuorituskykyä. Teoriassa lämpöpumpulla tuotetun lämpöenergian suhde sen käyttämään sähköenergiaan voidaan laskea kaavalla:

$$COP_{hp} = \frac{T_h}{T_h - T_c} \quad (57)$$

jossa  $COP_{hp}$  on lämpöpumpun hyötysuhteen teoreettinen maksimiarvo,  $T_h$  on lämmitettävän tilan haluttu lämpötila ja  $T_c$  käytettävissä olevan lämmönlähteen lämpötila.

Käytännössä valmistaja ilmoittaa pumppujensa COP-luvun, joka mitataan tietyillä kansainvälisillä standardiarvoilla. Erityisesti ulkoilmaa lämmönlähteenä käyttävän lämpöpumpun tapauksessa on kuitenkin selvää, että termi  $T_c$  ei ole vakio läpi vuoden eikä lämpöpumppu toimi siten koko vuotta valmistajan ilmoittamalla COP arvolla. Lisäksi lämmitettävän tilan lämpötila voi vaihdella. Tämän takia lämpöpumpun todellista toimintaa kuvataan SPF-luvulla, joka voidaan määritellä seuraavalla kaavalla:

$$SPF = \frac{Q_{LP, \text{lämmitys}}}{W_{LP} + W_{apu}} \quad (58)$$

jossa  $Q_{LP, \text{lämmitys}}$  on lämpöpumpun tuottama vuotuinen lämmitysenergia [kWh],  $W_{LP}$  on lämpöpumpun vuotuinen sähkönkulutus [kWh] ja  $W_{apu}$  lämpöpumpun apulaitteiden vuotuinen sähkönkulutus (Lari Eskola, 2012).

Kaavasta 18 voidaan todeta, että SPF-luvun laskeminen tietylle pumpulle vaatisi lämpöpumpulla tuotetun lämpömäärän tietämistä sekä tiedon siitä paljonko lämpöpumppu ja sen apulaitteet kuluttivat sähköenergiaa kyseisen lämpömäärän tuottamiseksi. Käytännössä SPF-luvun tarkka määrittäminen vaatisi käytössä olevan lämpöpumpun aktiivista mitausta koko sen käyttöaikana. Tässä työssä tarkoituksena on kuitenkin vain määritellä yksinkertainen keino jo käytössä olevan lämpöpumpun energiankulutuksen arviointiin, jonka takia voidaan käyttää taulukoituja ohjearvoja SPF-luvuille, jotka ovat riippuvaisia säävyöhykkeestä ja pumpputyypistä.

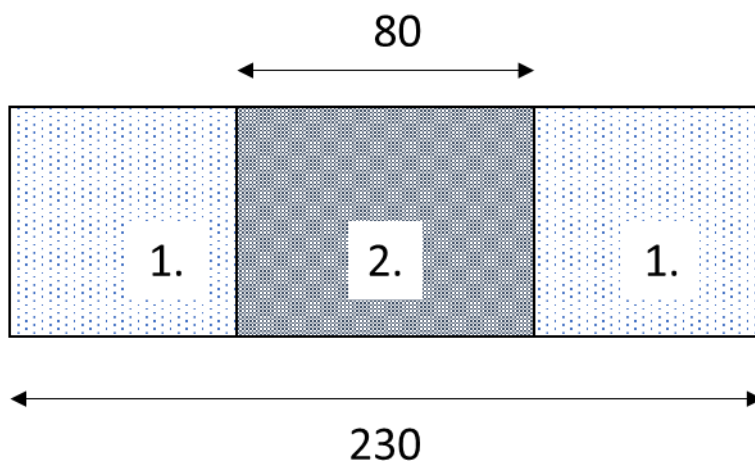
## LIITE 6 TUOTANTOTILAN POHJAPIIRROS



**Kuva 21: Tuotantotilan pohjapiirros**

## LIITE 7 TUOTANTOTILAN RAKENNEOSIEN U-ARVOJEN JA PINTA-ALOJEN MÄÄRITYS

Tuotantotilan seinä: paksuudet mitattu, materiaalit henkilökunnan haastattelun perusteella, aineominaisuudet ja laskentamenetelmät ympäristöministeriön ohjeesta C4.



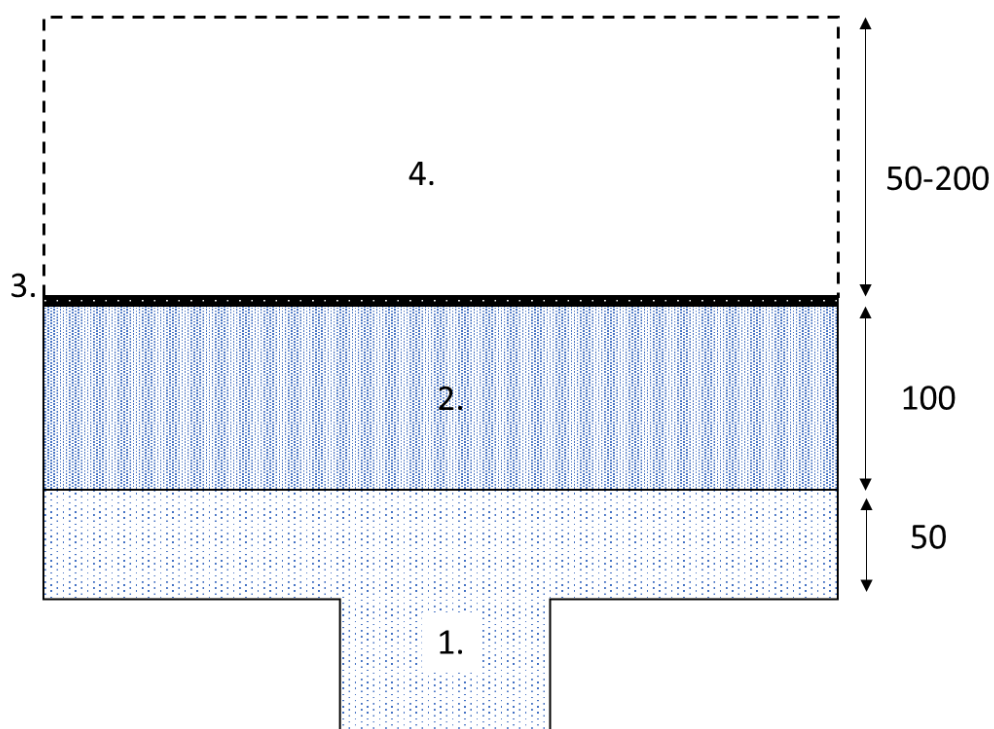
**Kuva 22: Tuotantotilan seinän rakenne**

**Taulukko 28: Tuotantotilan seinän U-arvon määrittäminen**

Osa	Materiaali	Paksuus [mm]	$\lambda$ [W/(mK)]	R [(m <sup>2</sup> K)/W]
1.	Kevytsementti	150	0,22	0,68
2.	Kivivilla	80	0,060	1,33
Sisäpuolinen pintavastus	-	-	-	0,13
Ulkopuolinen pintavastus	-	-	-	0,04
U [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,46			

Tuotantotilan katto: rakenne, paksuudet ja materiaalit henkilökunnan haastattelujen perusteella, aineominaisuudet ja laskentamenetelmät ympäristöministeriön ohjeesta C4





**Kuva 23: Tuotantotilan yläpohjan rakenne**

**Taulukko 29: Tuotantotilan yläpohjan U-arvon määrittäminen**

Osa	Materiaali	Paksuus [mm]	$\lambda$ [W/(mK)]	R [(m <sup>2</sup> K)/W]
1.	Teräsvahvistettu karkaistu kevytsorabetoni (TT-laatta)	50	0,10	0,50
2. Hyvä osa	Moderni eristevilla	100	0,035	2,85
2. Huono osa	Kivivilla	100	0,060	1,67
3.	Huopa (toinen pinta jäykkää alustaa vasten)	20	-	0,02
4.	Lumikerros	50-200	0,12	0,42-1,67
Sisäpuolinen pintavastus	-	-	-	0,10
Ulkopuolinen pintavastus	-	-	-	0,04
U [W/(m <sup>2</sup> K)]	Hyvä osa: 0,28 Huono osa: 0,42			
U <sub>2</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)] (lumikerros)	Hyvä osa: 0,19 Huono osa: 0,36			

Kirjallisuusviitteiden avulla tehtyjä tuotantotilan muiden rakenneosien ja kylmäsiltojen lämmönläpäisykertoimien arvioituja arvoja:

Maanvastainen alapohja: 0,16 W/(m<sup>2</sup>K)

Kaksinkertaiset ikkunat: 1,0 W/(m<sup>2</sup>K)

Ovet ja nosto-ovet: 1,0 W/(m<sup>2</sup>K)

Viivamaisten kylmäsiilan aiheuttamia lisäkonduktanssien arvoja:

Ulkoseinä-yläpohja: 0,06 [W/mK]

Ulkoseinä-alapohja: 0,15 [W/mK]

Ulkonurkka: 0,05 [W/mK]

Ikkuna/ovi-seinä: 0,07 [W/mK]

Rakenneosien pinta-alat:

Seinä: 2416 m<sup>2</sup>

Yläpohja (hyvä osa): 7438 m<sup>2</sup>

Yläpohja (huono osa): 2125 m<sup>2</sup>

Alapohja: 9563 m<sup>2</sup>

Ikkunat pohjoiseen: 343 m<sup>2</sup>

Ikkunat itään: 0 m<sup>2</sup>

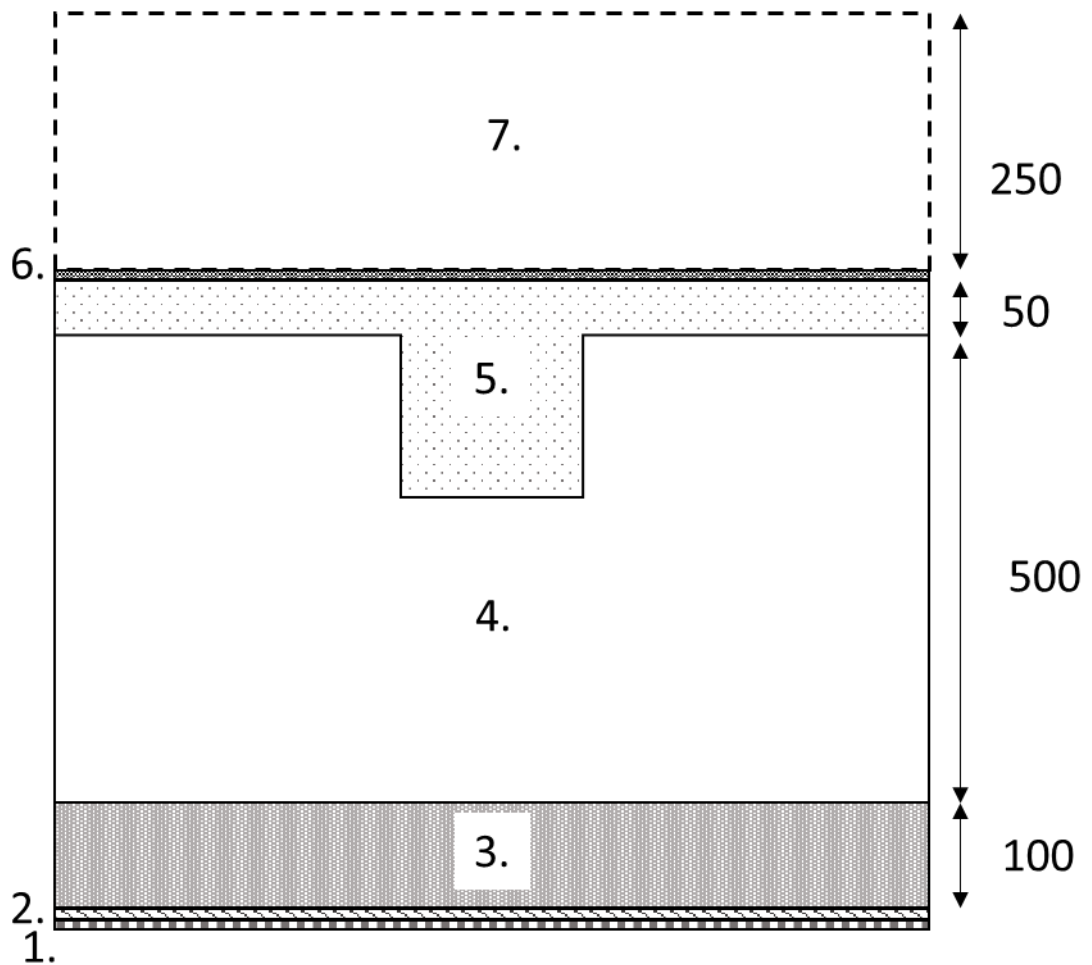
Ikkunat etelään: 343 m<sup>2</sup>

Ikkunat länteen: 0

Ovet: 157 m<sup>2</sup>

## LIITE 8 TOIMISTORAKENNUKSEN RAKENNEOSIEN U-ARVOJEN JA PINTA-ALOJEN MÄÄRITYS

Toimistorakennuksen katto: rakenne, paksuudet ja materiaalit henkilökunnan haastattelujen perusteella. Aineominaisuudet ja laskentamenetelmät Ympäristöministeriön ohjeesta C4



*Kuva 24: Toimistorakennuksen yläpohjan rakenne*

**Taulukko 30: Toimistorakennuksen yläpohjan U-arvon määrittäminen**

Osa	Materiaali	Paksuus [mm]	$\lambda$ [W/(mK)]	R [(m <sup>2</sup> K)/W]
1.	Verhouslevy (oletettu kovaksi puukuitulevyksi)	2,5	0,13	0,02
2.	Lastulevy	1,0	0,14	0,01
3.	Eristevilla	100	0,045	2,22
4.	Ilmatila (kanavisto täällä)	500	-	0,3
5.	Kivivilla	80	0,060	1,33
6.	Kevytsorabetoni (TT-laatta)	50	0,10	0,5
7.	Lumikerros	250	0,12	2,08
Sisäpuolinen pintavastus	-	-	-	0,10
Ulkopuolinen pintavastus	-	-	-	0,04
U [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,32			
U <sub>2</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)] (lumikerros)	0,19			

Muista toimistorakennuksen rakenteista ei saatu tarkkoja tietoja, joten käytettiin seuraavia kirjallisuusviitteistä saatuja taulukko-arvoja:

Seinä: 0,40 [W/(m<sup>2</sup>K)]

Maanvastainen alapohja: 0,16 [W/(m<sup>2</sup>K)]

Kaksinkertaiset ikkunat: 1,0 W/(m<sup>2</sup>K)

Ovet: 1,0 W/(m<sup>2</sup>K)

Viivamaisten kylmäsilan aiheuttamia lisäkonduktanssien arvoja:

Ulkoseinä-yläpohja: 0,06 [W/mK]

Ulkoseinä-alapohja: 0,15 [W/mK]

Ulkonurkka: 0,05 [W/mK]

Ikkuna/ovi-seinä: 0,07 [W/mK]

Rakenneosien pinta-alat:

Seinä: 294 m<sup>2</sup>

Yläpohja: 486 m<sup>2</sup>

Alapohja: 486 m<sup>2</sup>

Ikkunat pohjoiseen: 54 m<sup>2</sup>

Ikkunat itään: 0 m<sup>2</sup>

Ikkunat etelään: 16 m<sup>2</sup>

Ikkunat länteen: 4

Ovet: 10 m<sup>2</sup>

# LIITE 9 SÄHKÖTEHON MITTAUSPÖYTÄKIRJA

**Kuva 25: Sähkötehon mittauspöytäkirja**

<b>MITTAUSARVOT 11.5.2019</b>								
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>		L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	
	I	I	I	I <sub>(L-N)</sub>	P	P	P	P <sub>kok</sub>
<i>IV-koneet + kiertovesipumput</i>	99 A	90 A	90 A	20 A	23 kW	20 kW	20 kW	63 kW
<i>Paineilma</i>	160 A	153 A	157 A	22 A	25 kW	24 kW	25 kW	75 kW
<i>Lämmitys</i>	123 A	108 A	114 A	27 A	27 kW	24 kW	25 kW	77 kW
<i>Valaistus lastauslaituri</i>	131 A	115 A	119 A	24 A	28 kW	26 kW	26 kW	80 kW
<i>Valaistus halli</i>	190 A	176 A	190 A	36 A	43 kW	41 kW	43 kW	127 kW
<i>Valaistus työvalot</i>	222 A	200 A	208 A	41 A	50 kW	45 kW	47 kW	144 kW
<i>Valaistus toimisto</i>	220 A	201 A	208 A	41 A	51 kW	47 kW	48 kW	148 kW
<i>Kärynpoisto</i>	256 A	242 A	240 A	40 A	58 kW	56 kW	55 kW	169 kW
<i>Keskiarvo / Yhteensä</i>		246 A		41 A		56 kW		169 kW
<b>MITTAUSARVOT 14.5.2019</b>								
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>		L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	
	I	I	I	I <sub>(L-N)</sub>	P	P	P	P <sub>kok</sub>
<i>Työkoneet päällä klo 9:20</i>	580 A	570 A	590 A	51 A	181 kW	178 kW	180 kW	525 kW
<i>Keskiarvo</i>		580 A				180 kW		
<b>Lasketut arvot</b>								
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>		L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	
	I	I	I	I <sub>(L-N)</sub>	P	P	P	P <sub>kok</sub>
<i>IV-koneet + kiertovesipumput</i>	99 A	90 A	90 A	20 A	23 kW	20 kW	20 kW	63 kW
<i>Paineilma (Ylläpito 1-1,5 m3)</i>	61 A	63 A	67 A	2 A	2 kW	4 kW	5 kW	12 kW
<i>Lämmitys</i>	24 A	18 A	24 A	7 A	4 kW	4 kW	5 kW	14 kW
<i>Valaistus lastauslaituri</i>	8 A	7 A	5 A	-3 A	1 kW	2 kW	1 kW	3 kW
<i>Valaistus halli</i>	59 A	61 A	71 A	12 A	15 kW	15 kW	17 kW	47 kW
<i>Valaistus työvalot</i>	32 A	24 A	18 A	5 A	7 kW	4 kW	4 kW	17 kW
<i>Valaistus toimisto</i>	-2 A	1 A	0 A	0 A	1 kW	2 kW	1 kW	4 kW
<i>Kärynpoisto</i>	36 A	41 A	32 A	-1 A	7 kW	9 kW	7 kW	21 kW

## LIITE 10 ILMANVAIHTOKONEIDEN TIETOJA

**Taulukko 31: Tuotantotilan lämmitystä vaativien ilmanvaihtokoneiden kuukausittaiset keskimääräiset ilmavirrat**

Kuukausi	Kuukauden keskimääräiset ilmavirrat [m <sup>3</sup> /s]													
	Kone #4		Kone #2		Kone #5		Kone #7		Kone #1		Kone #6		Kone #2	
	Tulo	Poisto	Tulo	Poisto	Tulo	Poisto	Tulo	Poisto	Tulo	Poisto	Tulo	Poisto	Tulo	Poisto
Tammikuu	2,3	2,1268	1,77	0	4,28	2,9	0,9	0,706	4,86	5,091	4,74	0	0,37	0,37
Helmikuu	2,24	2,0613	1,69	0	4,28	2,9	0,85	0,693	4,71	4,785	4,35	0	0,37	0,37
Maaliskuu	2,3	2,1275	1,76	0	4,28	2,9	0,89	0,704	4,83	5,03	4,69	0	0,37	0,37
Huhtikuu	2,31	2,1474	1,81	0	4,28	2,9	0,9	0,708	4,89	5,146	4,88	0	0,37	0,37
Toukokuu	2,31	2,1474	1,83	0	4,28	2,9	0,91	0,711	4,9	5,183	4,91	0	0,37	0,37
Kesäkuu	2,31	2,1474	1,81	0	4,28	2,9	0,9	0,708	4,89	5,138	4,89	0	0,37	0,37
Heinäkuu	2,31	2,1474	1,82	0	4,28	2,9	0,9	0,708	4,89	5,155	4,89	0	0,37	0,37
Elokuu	2,31	2,1474	1,83	0	4,28	2,9	0,91	0,711	4,9	5,183	4,91	0	0,37	0,37
Syyskuu	2,31	2,1474	1,81	0	4,28	2,9	0,89	0,705	4,87	5,108	4,87	0	0,37	0,37
Lokakuu	2,31	2,1467	1,83	0	4,28	2,9	0,91	0,711	4,9	5,181	4,91	0	0,37	0,37
Marrasku	2,31	2,1474	1,82	0	4,28	2,9	0,91	0,71	4,9	5,175	4,91	0	0,37	0,37
Joulukuu	2,31	2,1445	1,79	0	4,28	2,9	0,89	0,705	4,87	5,101	4,78	0	0,37	0,37

**Taulukko 32: Toimistorakennuksen lämmitystä vaativien ilmanvaihtokoneiden kuukausittaiset keskimääräiset ilmavirrat**

Kuukausittainen ilmavirta [m <sup>3</sup> /s]		
	Kone #1	Kone # 2
Kuukausi	Tulo	q
Tammikuu	0,48	0,48
Helmikuu	0,47	0,47
Maaliskuu	0,47	0,47
Huhtikuu	0,47	0,47
Toukokuu	0,48	0,48
Kesäkuu	0,47	0,47
Heinäkuu	0,47	0,47
Elokuu	0,48	0,48
Syyskuu	0,47	0,47
Lokakuu	0,48	0,48
Marrasku	0,47	0,47
Joulukuu	0,47	0,47

**Taulukko 33: Tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden sisäänpuhalluslämpötilojen asetussarvot**

Kone #	Sisäänpuhalluslämpötilan asetussarvo[°C]
1	16,0
2	18,6
3	15,0
4	15,2
5	15,0
6	15,0
7	20,6

**Taulukko 34: Toimistorakennuksen ilmanvaihtokoneiden sisäänpuhalluslämpötilojen asetusarvot**

Kone #	Sisäänpuhalluslämpötilan asetusarvo[°C]
1	17,0
2	18,7

**Taulukko 35: Tuotantotilan ilmanvaihtokoneiden tuloilman lämpötilahyötysuhteen määrittäminen. Lämpötilat luettiin koneiden mittareista 11.04.2019**

Kone #	R[q <sub>v</sub> /q <sub>p</sub> ]	T <sub>u</sub> [°C]	T <sub>s</sub> [°C]	T <sub>s</sub> [°C]	T <sub>lto</sub> [°C]	Jäätymisen esto lämpötila [°C]	n <sub>t</sub>	n <sub>p</sub>
1	0,90	-3,7	22,1	16,3	2,7	0	0,25	0,23
2	1,00	-2,3	19,1	1,7	15,1	-5	0,81	0,81
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	1,02	-3,1	20,4	5,7	11,2	0	0,61	0,62
5	1,47	-2,5	22,6	7	8,0	0	0,42	0,62
6	-	-	-	6	-	-	-	-
7	1,44	-0,6	21,3	1,7	12,8	0	0,612	0,90

**Taulukko 36: Toimistorakennuksen käsikäyttöisten ilmanvaihtokoneiden lämmöntalteenoton hyötysuhteet**

Kone #	Sisäänpuhalluslämpötilan asetusarvo [°C]	LTO:n hyötysuhde valmistajan sivuilta	LTO:n vuosihyötysuhde	Jäätymisen esto lämpötila [°C]
5	-	0,78	0,468	0
6	-	0,78	0,468	0
7	-	0,78	0,468	0
8	-	0,78	0,468	0



## LIITE 11 LÄMPÖKAMERALLA OTETTU KUVA TUOTANTOTILAN VARASTO-OSASTA



*Kuva 26: Lämpökameralla otettu kuva tuotantotilan varasto-osasta. Kuva otettiin 8.11.2019*

# LIITE 12 KUUKAUDEN KESKIMÄÄRÄISET ULKOLÄMPÖTILAT, KUUKAUSIEN RAKENNE JA KESKIMÄÄRÄINEN AURINGON SÄTEILYENERGIA

**Taulukko 37: vuoden 2018 keskimääräinen ulkolämpötila Keuruun alueella**

2018												
Kuukausi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Keskimääräinen ulkoilman lämpötila	-5,9	-11,1	-7	2,7	13,1	12,7	19,5	15,4	10,3	3,6	0,6	-4,4

**Taulukko 38: Vuoden 2018 kuukausien rakenne**

Päiviä	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Arkipäiviä	23	20	22	21	23	21	24	23	20	23	22	21
Viikonloppupä	8	8	9	9	8	9	7	8	10	8	8	10

**Taulukko 39: Auringon säteilyenergia**

Auringon kokonaissäteily pystypinnoill ilmansuunnittain kWh/m <sup>2</sup> kuukaudessa								
	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
1	6	4,5	3,1	6,5	9	6,8	3,3	4,5
2	16,4	12,8	15,6	34,4	46,3	33,5	15,1	12,8
3	38,7	35,2	37,9	55,1	69,8	60,2	42,1	36,1
4	46,1	54,5	73,5	93,6	99,1	89,5	70	53,6
5	68,9	91,3	122,6	132,4	123,4	124,5	115	88,5
6	72,7	87,1	105,4	108	103,3	107,5	103,6	85
7	65,1	81,4	106,2	115	109,4	111,6	104,5	82,6
8	48	57	74,5	91,7	98,3	94,5	77,3	58,1
9	30,6	34,2	51,8	77,7	91,6	76,1	50,1	33,4
10	15,3	13,6	18,5	33,1	42,5	32,1	17,6	13,3
11	6,9	5,3	4,9	10,7	14,6	10,7	4,9	5,3
12	3,3	2,5	1,6	3,3	4,4	3,2	1,6	2,5