

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2024

Lauri Haapanen

Kasvihuoneen energiatehokkuuden mallintaminen ja kehittäminen



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikka

2024 | 51 sivua

Lauri Haapanen

Kasvihuoneen energiatehokkuuden mallintaminen ja kehittäminen

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia keinoja parantaa kasvihuoneen energiatehokkuutta hyödyntämällä energiankierrätystä ja erilaisia lämmöntuotantotapoja. Työ perustuu tietomallinnukseen ja simulointeihin, joiden avulla arvioidaan eri energiaratkaisujen vaikutuksia.

Tulokset osoittavat, että energiankierrätyspotentiaali on rajallinen, mutta sähkökattilan integroiminen osaksi lämmitysjärjestelmää ja vanhojen öljysäiliöiden muuttaminen puskurivarastoiksi ovat tehokkaita keinoja parantaa lämmitysjärjestelmän tehokkuutta ja joustavuutta.

Työ esittää kehitysehdotuksia energiatehokkuuden parantamiseksi tutkitussa kasvihuoneympäristössä. Yksi keskeinen huomio on seurannan hyödyntäminen, minkä avulla mahdollistuu energiatehokkuustoimien vaikutusten seurannan tarjoten arvokasta tietoa järjestelmän tehokkuudesta.

Tulokset tarjoavat arvokasta tietoa ja käytännön työkaluja tutkitun kasvihuoneen energiatehokkuuden parantamiseksi. Kattavien selvitysten avulla voidaan suunnitella ja toteuttaa toisiaan tukevia energiatehokkuushankkeita, jotka yhdessä parantavat kasvihuoneviljelyn pitkän aikavälin kestävyttä ja kannattavuutta.

Asiasanat:

kasvihuoneviljely, energiatehokkuus, energiankierrätys, lämmitysjärjestelmät, sähkökattila, öljysäiliöt, simulointi

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and Environmental Engineering

2024 | 51 pages

Lauri Haapanen

Modelling and development of greenhouse energy efficiency

The purpose of the thesis was to investigate ways to improve the energy efficiency of the greenhouse by utilizing energy recycling and various heat production methods. The thesis is based on data modelling and simulations, which assess the impact of different energy solutions. The results indicate that the potential for energy recycling is limited, but integrating an electric boiler into the system and converting old oil tanks into buffer storage are effective ways to improve system efficiency and flexibility.

The thesis presents development suggestions for enhancing energy efficiency in the greenhouse environment. One key observation is the significance of monitoring, which enables tracking the impact of energy efficiency measures, providing valuable insights into system efficiency.

The findings offer valuable information and practical tools for improving the energy efficiency of the greenhouse. Through comprehensive studies, complementary energy efficiency projects can be planned and implemented, collectively enhancing the long-term sustainability and profitability of greenhouse cultivation.

Keywords:

Greenhouse cultivation, Energy efficiency, Energy recycling, Heating systems, Electric boiler, Oil tanks, Simulation.

Sisältö

1 Johdanto	7
2 Lähtötilanne	8
2.1 Yritys	8
2.2 Operatiivinen ympäristö	8
3 Menetelmät	11
3.1 Tietomallinnus	11
3.1.1 Käytetyt parametrit	12
3.1.2 Simulaation yksityiskohdat	14
3.2 Ohjelmistot	15
3.2.1 Revit	15
3.2.2 IDA-ICE	16
3.2.3 Excel ja Power BI	17
3.3 Aineistot	17
4 Tulokset	19
4.1 Tietomallin sovelletut ominaisuudet	19
4.1.1 Rakennuksen sijainti, ympäristö ja ilmasto	19
4.1.2 Kasvihuoneen ominaisuudet	21
4.1.3 Sisäiset kuormat	25
4.1.4 Tietomallin optimointi	26
4.2 Variaatiot	27
4.3 Simulaation tulokset	28
4.3.1 Lämpöteho	29
4.3.2 Jäähdytysteho	30
4.4 Energiankierrätyspotentiaalin selvitys	34
4.4.1 Excel-työkalu	34
4.4.2 Energiankierrätys	35
4.4.3 Sähkökattilan potentiaali	37
4.5 Mallin validointi	38

5 Johtopäätökset	42
5.1 Päätulokset	42
5.2 Kehitysehdotukset ja jatkotutkimus	43
5.2.1 Lämmönkulutuksen seuranta	44
5.2.2 Sähkömarkkinoilla toimiminen	44
5.2.3 Sähkökattila ja vuorokausivarasto	44
5.2.4 Puutarhan kylmän tarve	45
5.2.5 Viilennyksen toteutus	45
5.2.6 Energian kausivarastointi	46

Lähteet	47
----------------	-----------

Liitteet

Liite 1. Synteettinen säämalli

Liite 2. Tietomallin variaatioiden tunnuspiirteet

Kuvat

Kuva 1. Piltin puutarhan maalajit (Geologian tutkimuskeskus 2015).	9
Kuva 2. Kasvihuoneen tietomallin lasikaton lasituksen rakenne.	15
Kuva 3. 3D-havainnekuva kasvihuoneen tietomallista.	19
Kuva 4. Rakennuksen sijoittuminen maastoon (Google Earth Pro, 2023).	21
Kuva 5. Kennolevyn erilaisia kennorakenteita (Makrolon 2017, 19).	22
Kuva 6. Kennolevyn mallinnetut ominaisuudet.	23
Kuva 7. Tuuletusluukkuja ohjaava PI-säädin.	24
Kuva 8. Energiankierrätyslaskennan työkalu.	35

Kuviot

Kuvio 1. Keskimääräinen lämmitystehontarve suhteessa ulkolämpötilaan.	29
Kuvio 2. Lämmitystehon energiakuvaaja.	30
Kuvio 3. Keskimääräisen jäähdytystehon tarve.	31
Kuvio 4. Jäähdytystehon tarpeen energiakuvaaja.	32
Kuvio 5. Sisäilman lämpötila eri jäähdytystehoilla.	33
Kuvio 6. Sisälämpötila eri jäähdytystehoilla.	33
Kuvio 7. Jäähdytyksen tehot.	36
Kuvio 8. Lämmitys- ja jäähdytysenergiat.	37
Kuvio 9. Lämpöakun käyttö kahden vuorokauden ajanjaksoina.	38
Kuvio 10. Simulointien ja mittausdatan vertailua.	39
Kuvio 11. Sisä- ja ulkolämpötilojen vertailu.	40
Kuvio 12. Synteettisen ilmaston ulkolämpötilojen jakautuminen tunneittain simulointivuonna.	41

Taulukot

Taulukko 1. Kasvihuonemallinnuksen mitat.	20
Taulukko 2. Kennolevyjen ominaisuuksien keskiarvoja.	22
Taulukko 3. Käytettyjen lasien ominaisuudet.	23

1 Johdanto

Kaupalliset kasvihuoneet ovat tärkeä osa Suomen maataloutta. Niiden kyky tuottaa satoa ympäri vuoden sääolosuhteista riippumatta korostaa kasvihuoneiden arvoa suomalaisessa yhteiskunnassa. Ilmastonmuutoksen aiheuttamat uhat sekä maailmanpoliittiset muutokset ovat viime vuosina tuoneet esiin pitkien toimitusketjujen haavoittuvuuden korostaen samalla kotimaisen tuotannon ja omavaraisuuden merkitystä. Lisäksi kuluttajien kasvava tietoisuus ruoan alkuperästä ja sen kestävä tuotannon merkityksestä vahvistaa entisestään tarvetta kehittää kaupallisten kasvihuoneiden toimintaa Suomessa.

Tämä opinnäytetyö keskittyy kasvihuoneiden energiankäyttöön ja energiatehokkuuden parantamiseen. Energiatehokkaiden ja ekologisesti kestävien ratkaisujen merkitys korostuu, kun maatalouden toimijat pyrkivät vastaamaan energiamurroksen ja vihreän siirtymän haasteisiin ja vaatimuksiin. Työn tutkimuskysymykset ovat:

1. Mikä on kaupallisen kasvihuoneen energiantarve, kuinka suuri on sen energiankierrätyspotentiaali?
2. Millä keinoin kasvihuone voi parantaa energiatehokkuuttaan ja osallistua energiamurroksen haasteiden ratkaisemiseen?

Tavoitteena on vastata näihin kysymyksiin luomalla tietomalli kaupallisesta kasvihuoneesta ja simuloida sen avulla vuotuista lämmityksen sekä jäähdytyksen tarvetta.

Tämä opinnäytetyö toteutetaan Piltti Oy Kauppapuutarhan toimeksiantona. Työ tarjoaa uutta tietoa kasvihuoneen lämmitys- ja jäähdytystarpeista sekä niihin vaikuttavista tekijöistä. Lisäksi työ tukee Kauppapuutarhan muiden energiatehokkuushankkeiden suunnittelua tarjoten myös konkreettisia toimenpide-ehdotuksia ja avaten jatkotutkimusmahdollisuuksia.

2 Lähtötilanne

2.1 Yritys

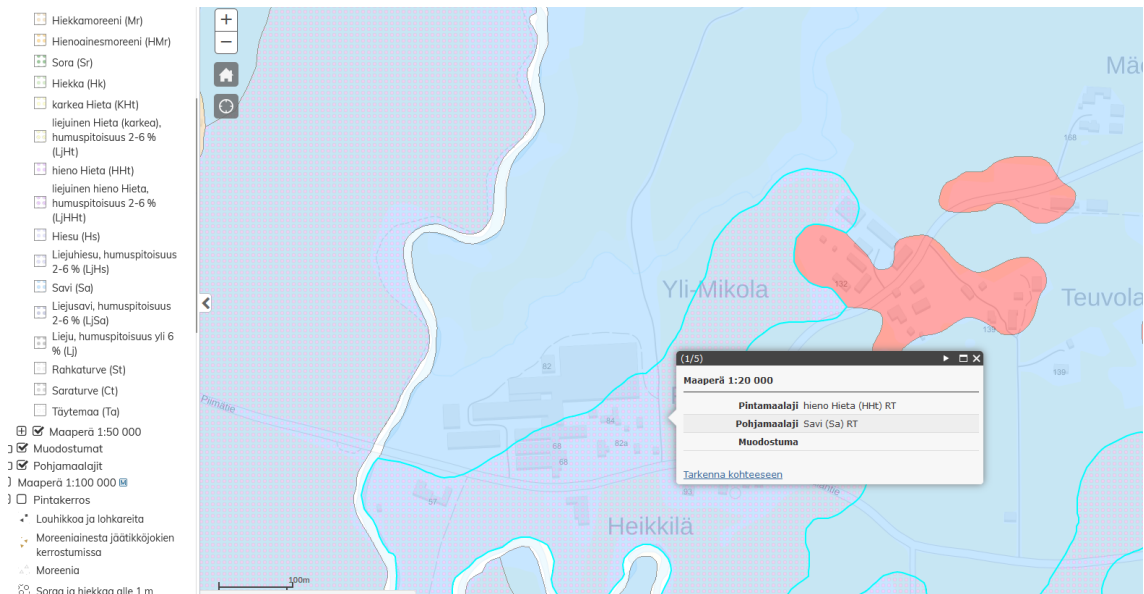
Piltti Oy Kauppapuutarha on perinteikäs suomalainen perheyritys, jonka historia ulottuu 1950-luvulle. Yritys on kehittynyt kolmannen sukupolven johdolla innovatiiviseksi ja vastuullisuutta korostavaksi kasvihuoneviljelyyn erikoistuneeksi toimijaksi.

Vuodesta 2013 puutarha on keskittynyt baby-pinaatin ympärivuotiseen viljelyyn, mikä myös on yrityksen päätuote. Lisäksi monenlaiset sesonkikukat, kuten hyasintit, ruukkunarsissit sekä leikkoliljat ovat säilyttäneet merkittävän roolin tuotannossa.

Ympäristöystävällisyys on kiinteä osa Piltin puutarhan toimintafilosofiaa. Yritys panostaa vahvasti biologiseen kasvinsuojeluun sekä vastuullisten viljelymenetelmien käyttöön, mikä heijastuu tuotteiden erinomaiseen laatuun. Energiankulutukseen kiinnitetään erityistä huomiota, ja kasvihuoneen lämpö tuotetaan täysin bioenergialla. Yritys on myös sitoutunut energiatehokkuuden parantamiseen esimerkiksi päivittämällä kasvihuonevalaisimiaan LED-valaisimiin.

2.2 Operatiivinen ympäristö

Piltin Kauppapuutarha sijaitsee Varsinais-Suomessa, Riihikoskella, Aurajoen varrella. Alueen pintamaana on osittain hieno hieta, jota kuvataan kuvassa 1 vaalean violetilla pisteytetyllä alueella, kun taas pohjamaalajina on koko alueella savi (Geologian tutkimuskeskus 2015).



Kuva 1. Piltin puutarhan maalajit (Geologian tutkimuskeskus 2015).

Ilmanvaihtojärjestelmä koostuu kasvihuoneen katonrajaan sijoitetuista ilmaa sekoittavista kanavapuhaltimista, jotka pitävät sisäilman tasaisena ja estävät ilmakerrostumien muodostumisen. Yksi puhaltimista on integroitu tuloilmakanavaan, joka talvikaudella myös kierrättää sisäilmaa. Tähän kanavaan lisätään kasvihuoneen tarvitsema hiilidioksidi. Jäähdytyskaudella yllilämmönpoisto tapahtuu katolla olevien avattavien tuuletusluukkujen kautta. Lasikaton käsittely varjostusmaalilla alkukesäisin vähentää kasvihuoneeseen tulevan lämpösäteilyn määrää mahdollistaen samalla valon tehokkaan pääsyn kasvihuoneeseen.

Lämmityksestä vastaa oma lämpölaitos, jossa on kaksi yhden megawatin tehoista biopolttoainekattilaa. Lämmitysjärjestelmä on uusittu hiljattain (Lutfi ym. 2020, 37). Aiemmin käytössä olleen öljylämmityksen jäljiltä alueella on vielä käytöstä poistetut kaksi viidenkymmenen kuution vetoista öljysäiliötä. Lämmönjako toimii lämmitysputkiston kautta, joka on jaettu kolmeen eri ohjauspiiriin: katonrajaan, kasvihuoneen alaosaan ja maassa kulkevaan piiriin.

Kasvihuone hyödyntää lämpöverhoa, joka on suunniteltu vähentämään lämpöhäviöitä kasvihuoneessa. Verhoa käytetään silloin, kun se ei haittaa

kasvien valonsaantia. Lämpöverho toimii moottorikäyttöisesti, ja sitä ohjataan manuaalisesti.

Automaatiojärjestelmä ylläpitää kasvihuoneessa optimaalisia olosuhteita ohjaten lämmitystä. Järjestelmän olosuhdemittaus tallentaa minuuttikohtaiset tiedot huonelämpötilasta, sisäilmankosteudesta, lämmityspiirien menoveden lämpötiloista, valon voimakkuudesta, kasvuvalon päälläolosta sekä tuuletusluukkujen aukioloasteesta.

Puutarhalla on myös kohtalainen kylmätilojen tarve. Pinaatin kylmäsäilytyksen lisäksi hyasinttien sekä ruukkunarsissien tuotantoon liittyen tarvitaan pitkäaikaista kylmäsäilytystä. Kylmätilat on toteutettu erillisillä koneikoilla, joista osa on saavuttamassa elinkaarensa loppua. Lisäksi puutarha osallistuu valaistuksellaan häiriöreservimarkkinoille.

3 Menetelmät

Kasvihuoneesta luotava tietomalli on keskeinen osa opinnäytetyötä. Se muodostaa perustan kaikille työssä käytetyille analyyseille ja simulaatioille. Tietomalli toimii digitaalisena representaationa kasvihuoneen rakenteesta ja ominaisuuksista mahdollistaen näin monipuolisen tarkastelun ilman pitkäaikaisia ja resursseja kuluttavaa käytännön testausta.

Tietomallin rakentamisessa, simuloinnissa sekä aineiston käsittelyssä käytetään apuna tässä luvussa esiteltyjä ohjelmistoja. Nämä ohjelmistot mahdollistavat mallin luomisen, ominaisuuksien määrittelyn sekä simulaatioiden toteuttamisen. Ne tarjoavat myös työkalut tilastolliseen analysointiin, tulosten havainnollistamiseen sekä niiden tulkintaan. Lisäksi tässä luvussa esitetään tutkimuksen pohjana käytettyjä aineistoja.

3.1 Tietomallinnus

Rakennuksen tietomalli (Building Information Model, BIM) edustaa digitaalisessa muodossa olevaa suunnittelu-, rakentamis- ja käyttöprosessitietojen kolmiulotteista kokonaisuutta. Mallissa useiden eri erityisalueiden osa-alueet yhdistyvät yhdeksi kokonaisuudeksi. 3D-ominaisuuksiensa lisäksi se mahdollistaa myös dynaamisen, yhtenäisen ja kokonaisvaltaisen projektinhallinnan. (MagiCAD: BIM, Building Information Modelling, 2023.) Rakennuksen koko elinkaarta voidaan pyrkiä hallinnoimaan mallin avulla sen ylläpidosta ja parantamistoimista aina purkamiseen asti (Väylävirasto: Mikä on tietomalli, 2020).

Tavoitteiden ja painopistealueiden asettaminen mallille ja mallinnukselle on tärkeää, sillä ne ohjaavat mallin kehitystä ja varmistavat, että se palvelee sille asetettua tarkoitustaan (RT 10-11066, 2012). Energia-analyysi mahdollistaa energiatehokkuuden arvioinnin sekä suunnittelun systemaattisemmalla ja läpinäkyvämmällä tavalla kuin perinteiset menetelmät. Sitä voidaan soveltaa koko rakennukseen, sen talotekniseen järjestelmään tai vain tiettyihin edellä

mainittuihin osa-alueisiin. Sekä energiatehokkuuslaskelmat että rakennuksen tilojensisäolosuhdelaskelmat katsotaan osaksi energia-analyysijä. (RT 10-11075, 2012.)

Projektin alkuvaiheessa on olennaista esitellä erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja, valita niistä parhaiten tarkoitukseen soveltuva mallivaihtoehto, jalostaa valittua mallia edelleen sekä varmistaa sen toimivuus (RT 10-11074, 2012).

3.1.1 Käytetyt parametrit

Tähän opinnäytetyöhön liittyvän tietomallin luomisprosessissa avainkomponentteja ovat kasvihuonetta kuvaavat parametrit.

Tarkoituksenmukaisesti valitut ja määritellyt parametrit mahdollistavat kasvihuoneen ominaisuuksien oikeellisen digitaalisen edustamisen ja siten toimivan tietomallin. Kokonaisenergiankulutuksen selvittämiseksi avainasemassa ovat tavoitellut sisäolosuhteet, sillä suurin osa energiankäytöstä kohdentuu juuri haluttujen sisäolosuhteiden luomiseen ja ylläpitämiseen (RT 10-11075, 2012).

Kasvihuoneen lämpötehon tarpeen mallinnuksessa on huomioitu soveltuvien osien Ympäristöministeriön asetuksen uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017 kohdassa 2:8 vaatimuksia laskentamenetelmille E-luvun laskennassa. Tietomalli huomioi rakenneosien ja niiden liitosten lämpöominaisuudet, sisäilman lämpötilan, rakennuksen ilmanpitävyyden sekä lämpökuormat henkilöistä, valaistuksesta ja auringosta. Tietomallissa ei huomioida lämpimästä käyttövedestä syntyvää energiantarvetta. Myöskään ilmanvaihdosta syntyvää energiantarvetta ei huomioida.

Alapohjaan rajautuvat ja rakennusta ympäröivät maakerrokset on määritelty ISO 13370-standardin mukaan. Tietomalli sisällyttää eristyskerroksen oletusarvoisesti alapohjan alapuolisiin kerroksiin, jolloin ISO-mallin mukaan kaikki maanpinnan alapuolella olevat rakennuksen osat otetaan huomioon

laskennassa. Maan lämpötila lasketaan automaattisesti valitun ilmastomallin mukaan. (IDA-ICE, 2020.)

Simulaatioissa käytetään synteettistä säämallia, joka perustuu IDA-ICE-ohjelmiston analyysiin. Synteettisen ilmastomallin luomisessa käytetään lähinnä kohdetta sijaitsevan säähavaintoaseman mittausdataa.

Korjauskertoimien avulla havaintojen avulla pystytään luomaan tarkka ja luotettava malli, joka heijastaa todellisia sääolosuhteita. (IDA-ICE, 2020.)

Menetelmän avulla voidaan simuloida suoran valon ja hajavalon intensiteettejä sekä muita tärkeitä ilmastotekijöitä, kuten lämpötilaa ja kosteutta, jotka vaikuttavat merkittävästi kasvihuoneen energiankulutukseen.

Tuulen vaikutusta rakennuksen ulkoseiniin ja kattoon arvioidaan käyttämällä painekertoimia. Niiden avulla voidaan määrittää tuulen nopeuden aiheuttamat ilmanpaineen muutokset erityisesti katoilla. Kun painekertoimiksi annetaan nollasta poikkeavia arvoja, tuuli vaikuttaa simulaatiossa ilmavirtaukseen rakennuksen läpi. (IDA-ICE, 2020.) Tuulen paine oletetaan pinnalla yhteneväksi, ja se lasketaan IDA-ICE -ohjelmassa kaavalla

$$p = \frac{c \times \rho \times v^2}{2} \quad (1)$$

jossa

p on pintaan vaikuttava tuulen paine

ρ on ilman tiheys (kg/m^3) tarkasteltavassa kuormitustapauksessa

c on pinnan painekerroin tarkasteltavassa kuormitustapauksessa

v on tuulen nopeus rakennuksen katon korkeudella tarkasteltavassa kuormitustapauksessa.

Auringon tuottaman lämpökuorman simulointi on yksi työn keskeisiä elementtejä kasvihuoneen suuren ikkunapinta-alan johdosta. Tietomallinnus sopii tähän tarkoitukseen erinomaisesti, sillä Sandbergin (2014, 387) mukaan rakennussimuloinnissa eli rakennuksen tietomallinnuksessa on panostettu

erityisesti aurinkokuorman ja lämmönsiirron simulointiin huomioiden seinäpintojen, ikkunoiden sekä ympäristön, kuten varjostuksien piirteiden vaikutukset.

3.1.2 Simulaation yksityiskohdat

Tietomallinnuksen avulla voidaan luoda helposti erilaisia skenaarioita. Näin on mahdollista tutkia tehokkaasti jopa yksittäisten tekijöiden ja muuttujien vaikutuksia kokonaisuuteen. E-luvun laskennasta poiketen tässä työssä ei selvitetä tarvittavan ostoenergian määrää, vaan selvitetään kasvihuoneen energiatase eli tarvittava lämmitys- ja jäähdytysenergian määrä.

E-luvun laskennassa yhden käyttötarkoituksen rakennus voidaan laskea yhtenä vyöhykkeenä (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 2017/1010, 2:13). Oleellista on, että jokaiselle vyöhykkeelle voidaan määritellä tarkoituksenmukainen ja koko vyöhykettä kuvaava käyttötarkoitus ja -aika. Myös Sandbergin (2014, 387) mukaan tilassa olevat lämmitys-, jäähdytys- ja suodatuslaitteet käsitellään rakennussimuloinnissa yleensä yhdessä vyöhykkeessä. Mallinnuksessa käytetään jäähdytyksen ja lämmön lähteenä ideaalilaitteita ja kasvihuone käsitellään yhtenä vyöhykkeenä.

Simulaatio toteutetaan simuloimalla yhden vuoden energiatase tunnin tarkkuudella. Simuloinnissa käytettävästä synteettisestä säämallista on kerrottu tarkemmin IDA-ICE ohjelmistoa käsittelevässä luvussa.

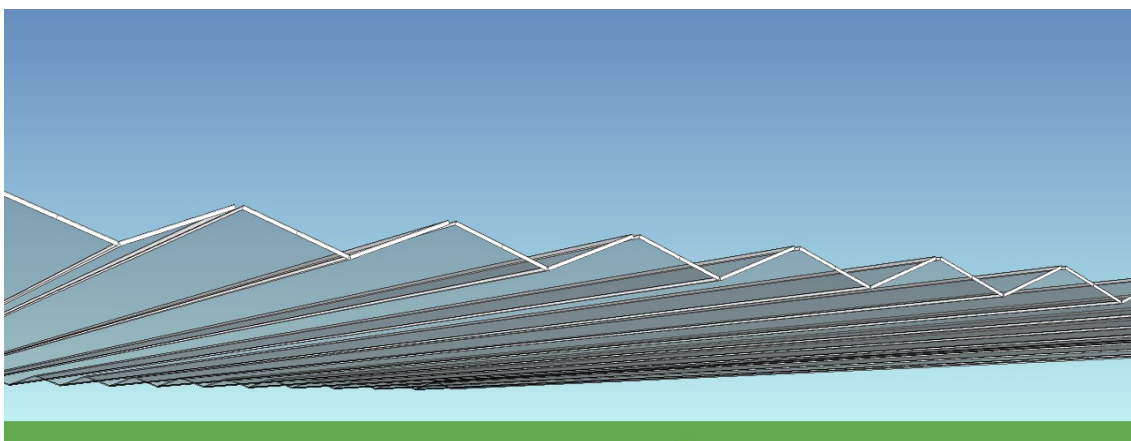
Tämänhetkinen jäähdytysjärjestelmä toimii pääasiassa avattujen kattoikkunoiden kautta tapahtuvan yllämmön poiston avulla. Opinnäytetyön keskeisenä tavoitteena on selvittää nykyisen jäähdytysjärjestelmän poistaman energian määrä osana kokonaisenergian kierrätyspotentiaalia. Tästä syystä ilmanvaihtojärjestelmää ei sisällytetä tietomalliin.

3.2 Ohjelmistot

3.2.1 Revit

Revit on integroitujen tietomallien luomiseen ja hallintaan tarkoitettu 3D-suunnitteluohjelmisto. Se mahdollistaa tietomallin monipuolisen ja tarkan geometrisen rakentamisen ja komponenttien määritykset. Ohjelmisto tukee myös avoimia standardeja, kuten IFC-formaattia. Tämä mahdollistaa rakennetun mallin jakamisen mm. IDA-ICE:n kanssa. (Autodesk: Autodesk Revitin tärkeimmät ominaisuudet, 2023.)

Ratkaiseva valintakriteeri Revitin käyttöön tässä työssä on sen kyky mallintaa monimutkaisia katon rakenteita, kuten usearivistä harjakattoa. Tämän ominaisuuden ansiosta kasvihuoneen katon jokainen lape voidaan mallintaa yksityiskohtaisesti. IDA-ICE:llä tai muilla mallinnusohjelmilla, kuten MagiCAD:illa ei ole mahdollista luoda usearivistä harjakattoa, jonka jokainen lape toimii tarvittaessa erikseen määriteltävänä laskentamoduulina. Revitin avulla voidaan siis rakentaa kasvihuoneen tietomalli, jonka kuvan 2 mukaiset katon muodon laskentamoduulit toimivat IDA-ICE:ssa.



Kuva 2. Kasvihuoneen tietomallin lasikaton lasituksen rakenne.

3.2.2 IDA-ICE

IDA-ICE (Indoor Climate and Energy) on monipuolinen ohjelmistotyökalu, joka mahdollistaa rakennuksen ja sen järjestelmien tarkan energiatehokkuuden ja sisäilmaston mallintamisen sekä analysoinnin (EQUA: IDA Indoor Climate and Energy, 2023). Ohjelmisto on rakennettu Kunglika Tekniska Högskolanin ja Teknillisen korkeakoulun LVI-laboratorioiden komponenttimallien pohjalta vastaamaan tehokkaasti talotekniikka-alan vaatimukseen (Sandberg 2014, 457). Simulaatio toteutetaan ohjelmassa dynaamisena laskentamenetelmänä, jolloin lämmönsiirron laskennassa otetaan huomioon myös rakenteiden lämmönvarausominaisuudet ajan funktiona (Motiva, 2023).

Ohjelma sisältää kattavat ja monipuoliset tietokannat lähes kaikille mallinnuksessa käytettäville muuttujille. Tietokannoista löytyy esiasetettuna muun muassa Suomen rakennusmääräysten, lainsäädännön sekä asetusten mukaisia valmiita käyttö- ja kuormitusprofiileja, joita myös käyttäjä voi muokata mallinnuksen tarkoitukseen sopivaksi. (EQUA 2018, 1) Tämän työn mallinnuksessa käytetään tietokannoista löytyviä profiileja: Ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017 kohdassa 2:4 määriteltyjä käyttötarkoituseriä ja kohdassa 2:11 määriteltyä rakennuksen vakioitua käyttöä.

Osana rakennussimulaatiota IDA-ICE luo synteettisen ilmastomallin kohteen maantieteellisen sijainnin perusteella. Malli perustuu ASHRAE:n (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) tilastoituun säädataan, joka on tarkemmin dokumentoitu ASHRAE 2013 Fundamentals - julkaisussa. Synteettisen ilmastomallin avulla voidaan simuloida kohteen normaalit sääolosuhteet huomioiden vallitsevat sääolot tunneittain. (IDA-ICE, 2020.)

IDA-ICE:n käyttö mahdollistaa energiatehokkuuden mallintamisen antaen mahdollisuuden simuloida erilaisia energiansäästötoimenpiteitä ja niiden vaikutuksia kasvihuoneeseen.

3.2.3 Excel ja Power BI

Microsoftin kehittämät laskentaohjelmat Excel sekä Power BI ovat tärkeitä työkaluja tutkimuksen tuottaman datan käsittelyssä ja analysoinnissa.

Taulukkolaskentaohjelma Excel tarjoaa monipuoliset työkalut datan alustavaan syöttämiseen, järjestelyyn ja analysointiin (Microsoft: Microsoft Excel, 2023).

Esimerkiksi tässä työssä lämpöakun käyttö simuloidaan sitä varten rakennetun Excel-työkalun avulla, joka tekee myös alustavat energiatehokkuuslaskelmat.

Vaikka Excel on monipuolinen ja tehokas työkalu, se ei ole paras vaihtoehto mallinnuksiin, simulointeihin tai laajan tietokannan visuaaliseen esittämiseen.

Kuten Sakari (2019, 25–26) opinnäytetyönsä yhteenvedossaan toteaa, simulaatiomallien luominen on hankalaa ja työlästä ohjelman perusrakenteen takia.

Power BI taas tarjoaa monipuolisia ominaisuuksia datan visualisointiin ja raportointiin. Se toimii erinomaisena työkaluna datan kokoamisessa eri lähteistä ja sen muokkaamisessa selkeiksi ja interaktiivisiksi visualisoinneiksi. Ohjelman edistyneet analytiikkatyökalut mahdollistavat lisäksi datan dynaamisen suodattamisen ja segmentoinnin. (Microsoft: Shape the future of energy using real-time data in Power BI, 2023.). Tässä työssä Power BI:tä hyödynnetään visualisoimaan kasvihuoneen energiankulutuksen trendejä ja mallinnustuloksia.

Lisäksi Power BI yhdistää vaivattomasti dataa eri lähteistä ja tarjoaa mahdollisuuden monipuoliseen lähdeaineistoon perustuvien kattavien analyysien luomiseen. Tämän ansiosta voidaan yhdistää tietomallista saadut tiedot mittausdatan kanssa ja tuottaa syvällisempiä analyyseja tietomallin toiminnasta sekä ominaisuuksien vaikutuksista tietomallin toimintaan.

3.3 Aineistot

Työn perustana käytetyt aineistot koostuvat monipuolisesti erilaisista lähteistä ja muodostavat yhdessä kattavan aineiston. Keskeiset tiedot rakennuksen koosta ja rakenteista perustuvat toimeksiantajan tarjoamiin kasvihuoneen

rakennepiirrokseen ja pohjapiirustukseen sekä toimeksiantajan niihin tekemiin korjauksiin ja täsmennyksiin. Piirustukset ja piirrokset ovat alkuperäisten paperiversioiden digitaalikopioita. Lisäksi kohteen ominaisuuksia kartoitettiin kohdekäynnillä, joka dokumentointiin muistiinpanoilla sekä valokuvilla.

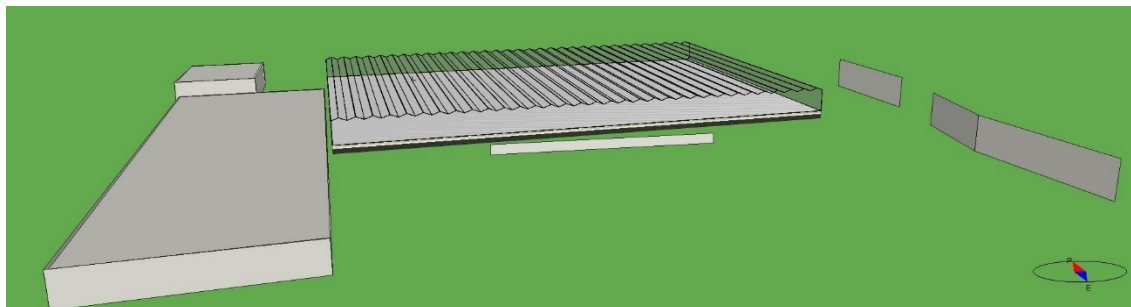
Minuuttikohtaiset mittaustiedot kasvihuoneen sisäolosuhteista, tuuletusluukkujen aukiolosta, kasvuvälön tilasta sekä lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötiloista saadaan suoran kasvihuoneen ohjausjärjestelmästä. Tiedot on tallennettu .csv -tiedostomuotoon.

Tarkat sijaintitiedot sekä rakennuksen sijoittuminen maastoon on vahvistettu Google Earth -satelliittikuvien perusteella kuvan 4 mukaisesti. Maaperän ominaisuuksien määrittelyssä käytetään kuvassa 1 esitettyä Geologian tutkimuskeskuksen Maaperä 1:20 000/1:50 000-aineistoa.

Ilmatieteenlaitoksen Jokioisten havaintoaseman mittausdata toimii paitsi vuoden 2022 vertailu-ulkolämpötilatietojen lähteenä, myös synteettisen säämallin perustana. Ulkolämpötila on haettu ilmatieteenlaitoksen havaintojen latausverkkopalvelusta tuntikohtaisena datana. Säämallin luomiseen simulointiohjelma hakee tarvittavat tiedot suoraan tietokannasta.

4 Tulokset

Tämä luku käsittelee opinnäytetyön tuloksia. Aluksi keskitytään työn perustana olevan tietomallin keskeisiin ominaisuuksiin. Tietomallin 3D-havainnekuva on esitetty kuvassa 3. Tämän jälkeen tarkastellaan varsinaisia simulaatiotuloksia, joiden avulla valotetaan tietomallin käytännön sovellutuksia.



Kuva 3. 3D-havainnekuva kasvihuoneen tietomallista.

4.1 Tietomallin sovelletut ominaisuudet

Tietomalliin syötettiin erilaisia ominaisuuksia liittyen rakennuksen sijaintiin, rakennuksen sijaintiympäristöön, ilmastoon, kasvihuoneen ominaisuuksiin ja kasvihuoneen sisäisiin kuormiin. Tämän jälkeen ominaisuuksia optimoitiin mahdollisimman hyvin todellisuutta vastaaviksi. Tässä aluvussa esitellään sovelletut ominaisuudet sekä optimointityö.

4.1.1 Rakennuksen sijainti, ympäristö ja ilmasto

Kasvihuone on mallinnettu käytettävissä olevien piirustusten ja tehtyjen korjausten pohjalta. Mallin mitat esitetään taulukossa 1. Rakennuksen sijainti maastossa ja suuntaus on tarkastettu Google Earth Pro -työkalun avulla. Maaperän ominaisuudeksi on määritelty Geologian tutkimuskeskuksen ”Maaperä 1:20 000/1:50 000” -aineiston perusteella ”savi tai siltti”.

Taulukko 1. Kasvihuonemallinnuksen mitat.

Kasvihuonemallinnuksen mitat	
Leveys	105,2 m
Pituus	73,2 m
Korkeus	5,47 m
Sisäpinta-ala	7701 m ²

Kuvassa 4 esitetyn mittauksen mukaan rakennuksen eteläisen seinän suuntakulma on 83 astetta. Rakennuksen suunta tietomallissa on määriteltä tämän mittauksen mukaan. Kohteen sijainti on tietomallissa oleellinen ilmastomallin luomisen kannalta. Simulointiohjelmassa säämallin pohjana toimiville säätiedoille lähin valittavissa oleva sääasema sijaitsee Forssassa, Jokioisilla (60,82 P°; 23,5 I°). Tuuliolosuhteiden mallintamisessa tuuliprofiilina käytetään maaseudun tuulimallia.

Kuvasta 3 käy ilmi, miten tietomalli sisältää myös lähellä sijaitsevat rakennukset ja varjostavat objektit. Objektien sijainti, koko sekä muut fyysiset ominaisuudet, kuten valon läpäisevyys, pinnan heijastavuus ja väri vaikuttavat kasvihuoneeseen tulevan valon ja lämpösäteilyn määrään. Varjostavien objektien ominaisuudet eivät kuitenkaan ole nähtävillä tietomallin 3D-havainnekuvassa.



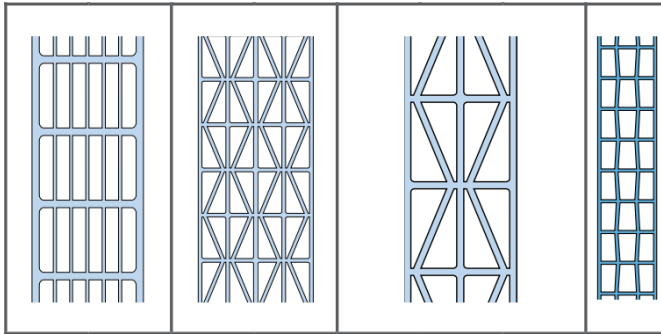
Kuva 4. Rakennuksen sijoittuminen maastoon (Google Earth Pro, 2023).

Malli kattaa kasvihuoneen länsipuolella olevat tuotantotilat ja maatilän lämpökeskuksen. Lisäksi etelä- ja kaakkoislaidalla sijaitseva varjostava kasvillisuus sisältyy tietomalliin. Rakennukset on määritelty valoa läpäisemättömiksi. Seinien väriksi on määritelty punainen, tuotantorakennuksen katon väriksi vaalea matta vihreä sekä lämpövoimalan katon väriksi tumma harmaa. Kasvillisuus on määritetty mattavihreäksi ja niiden valonläpäisevyydeksi on arvioitu 15 %. Kasvillisuuden sijainti ja kaakkoislaidalla olevan kuusiaidan korkeus on arvioitu silmämääräisesti kohdekäynnillä sekä Google Earth Pro -työkalun avulla.

4.1.2 Kasvihuoneen ominaisuudet

Kasvihuoneen ulkoseinät on valmistettu 16 millimetrin paksuisista polykarbonaattikennolevyistä. Kennolevyjä on markkinoilla useita erilaisia ja niiden eristyskykyyn vaikuttaa merkittävästi levyn rakenne, kuten kennon ilmataskujen lukumäärä ja niiden muotoilu (Makrolon 2017, 28). Levyn lämmöneristysaineena käytetään ilmaa. Mitä enemmän levyssä on kuvassa 5

näkyviä eristäviä ilmataskuja, saavutetaan sitä paremmat lämmöneristysominaisuudet, eli pienempi U-arvo.



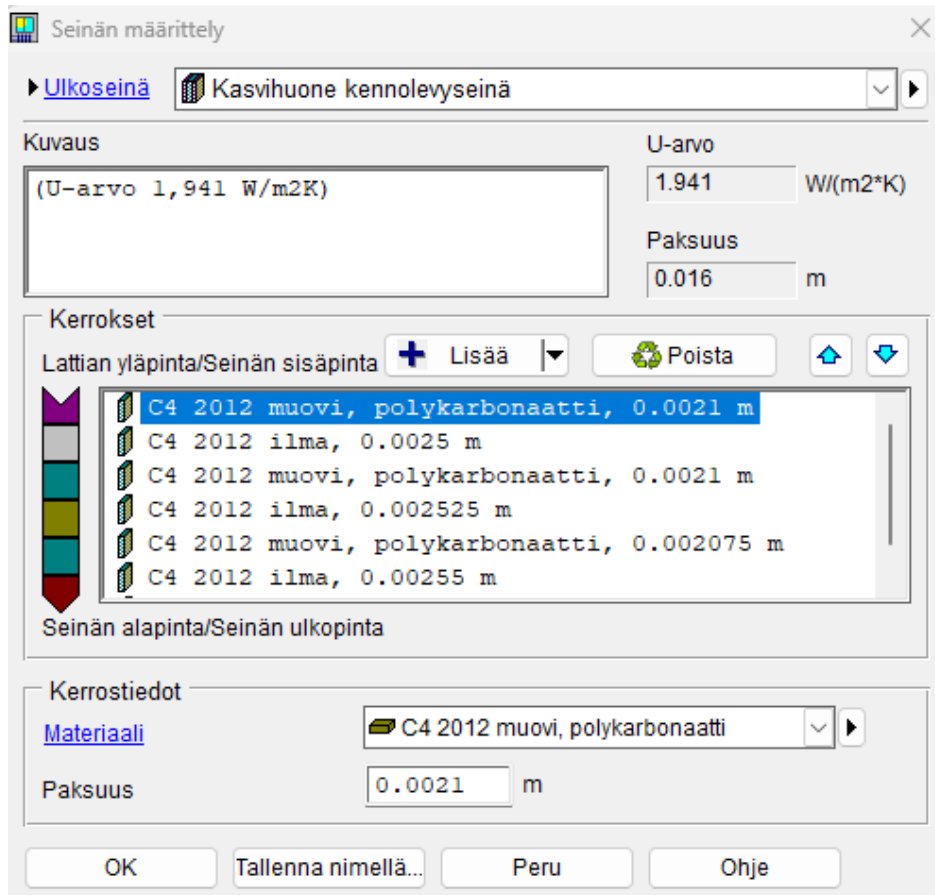
Kuva 5. Kennolevyn erilaisia kennorakenteita (Makrolon 2017, 19).

Markkinoilta löytyy useita tuotteita, joiden U-arvot ovat korkeimmillaan $2,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$ (Keraplast, 2023) ja matalimmillaan $1,81 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$ (Makrolon 2017, 19). Mallinnuksessa käytetään kolmen valmistajan kennolevyjen U-arvoista muodostuvaa keskiarvoa taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2. Kennolevyjen ominaisuuksien keskiarvoja.

Kennolevyjen ominaisuuksia		
Valmistaja	U-Arvo [$\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$]	valonläpäisykyky
Prof	2,00	66 %
Makrolon	1,72	77 %
Keraplast	2,10	60 %
KA	1,94	68 %

Koska simulointiohjelman tietokannassa ei ole saatavilla sellaisenaan kuvan 5 kaltaisia seinärakenteita tai kennolevyjä, on kyseinen materiaali mallinnettu kuvan 6 mukaisesti. Näin saavutetaan vastaava U-arvo, ja rakenne on myös fyysisiltä ominaisuuksiltaan mahdollisimman lähellä todellista seinärakennetta.



Kuva 6. Kennolevyn mallinnetut ominaisuudet.

Katon rakenne on mallinnettu 3 millimetriä paksuna teräsrakenteena. Siihen on sijoitettu liitos- ja saumakohtia lukuun ottamatta koko kattolapteen kokoiset ikkunat, jotka ovat 4 millimetriä paksua lasia. Ikkunoiden U-arvoksi on määritetty $5,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (Sandberg 2014, 434). Näin saadaan varmasti mallinnettua sekä termiset että valonläpäisyominaisuudet tarkoituksenmukaisesti.

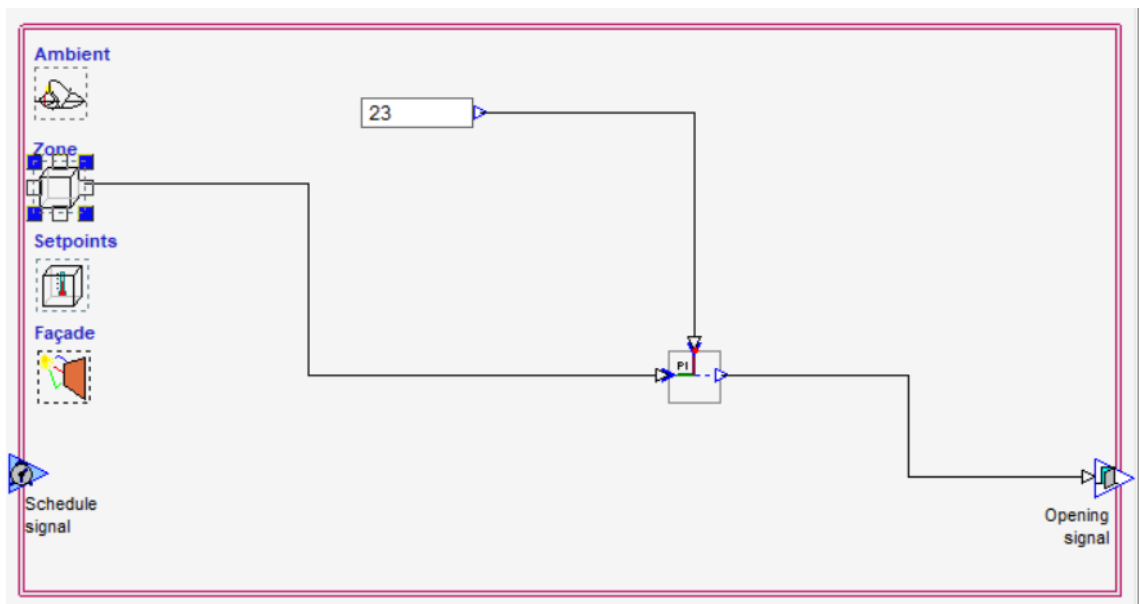
Taulukko 3. Käytettyjen lasien ominaisuudet.

	T, Auringonsäteilyn suoräläpäisykerroin	U-arvo	Sisäpuolinen emissiivisyys	Ulkopuolinen emissiivisyys
Ulkoseinät	0,66	1,94	0,66	0,66
Kattolasit	0,83	5,80	0,837	0,837

Myös kasvihuonemallin ulkoseiniin on sijoitettava ikkunat, jotta ulkoseinien valonläpäisyominaisuudet saadaan toistettua tietomallissa todenmukaisesti. Taulukossa 3 esitetään, kuinka ulkoseiniin sijoitettujen ikkunoiden ominaisuudet on muokattu vastaamaan seinämateriaalina käytetyn polykarbonaattikennolevyn ominaisuuksia.

Lämpöverhon käyttö on mallinnettu katon ikkunoihin integroituna sisäpuolisena suojauksena, jonka ominaisuudet on määriteltä vastaamaan käytössä olevaa lämpöverhoa. Käyttöaikataulu on määritetty kuukausittain syyskuusta huhtikuulle kuukauden keskimääräisen pimeän ajan mukaan.

Lämmitys ja jäähdytys toteutetaan mallissa ideaalilaitteilla, jolloin tuoton hyötysuhde ja lämmönsiirto simuloidaan häviöttömästi. Ideaalilaitteen käyttäminen mahdollistaa lämmityksen ja jäähdytyksen tarpeen tarkan arvioinnin ja soveltuu näin mallin käyttötarkoitukseen parhaiten. Sekä lämmitystä että jäähdytystä ohjataan PI-säätimillä.



Kuva 7. Tuuletusluukkuja ohjaava PI-säädin.

Tuuletusluukkujen avautumista säädellään kuvassa 7 esitetyllä PI-säätimellä, joka ohjaa niiden avautumista sisälämpötilan ja määritellyn asetusarvon perusteella. Varjostusmaalin käyttö on toteutettu asettamalla kattoikkunoille

ulkopuoliseksi suojaukseksi ominaisuuksiltaan varjostusmaalia vastaava markiisi. Ohjelmiston tarjoamat mahdollisuudet varjomaalin mallintamiselle ovat markiisin ohjaamisen osalta rajalliset. Ohjaus on toteutettu säätimellä, joka avaa markiisin, kun sisälämpötila nousee yli +20°C:n.

4.1.3 Sisäiset kuormat

Mallinnuksessa käytettävät sisäiset kuormat muodostuvat kasvihuoneessa olevista lämpökuormaa tuottavista elementeistä, kuten valaistuksesta, henkilöstöstä sekä työkoneista. Työntekijöiden, laitteiden sekä valaistuksen kuormituksen osilta käytetään Ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 kohdissa 2:4 ja 2:22 määriteltyä käyttöluokkaa 3, toimistorakennus, sillä sen vakioitu käyttö ajoittuu viidelle vuorokaudelle viikossa kello 7:00-18:00 välille (YMa 1010/2017, 2:11). Tämä vastaa hyvin kasvihuoneessa työskentelyn aikataulua.

Mallissa oletetaan kolmen henkilön työskentelevän kasvihuoneessa. Mallinnusprofiilin parametreinä käytetään kevyttä tehdastyötä ja raskasta työvaatetusta. Lämpökuormaa tuottavana laitteena otetaan huomioon kasvihuoneessa viljelemiseen käytettävä traktori, jonka lämpökuormaksi on arvioitu 38 kilowattia.

Valaistuksen mallinnus toteutetaan muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta käyttäen ohjelman oletusarvoista tehoa $10^{\text{W}}/\text{m}^2$ käyttöasteella 80 %. Tämä perustuu oletukseen, että kasvihuoneen valaistuksesta aiheutuva lämpökuorma tulee muuttumaan merkittävästi led-päivityksen myötä. Käytetty oletusarvo on hyvä suuntaa antava kuorma, joka mallintaa tulevaa valaistuksen lämpökuormaa riittävällä tarkkuudella. Valaistusta ohjataan kahta poikkeusta lukuun ottamatta käyttöaikataulun sekä Ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 asetusarvon mukaan. Tällöin valot ovat päällä kello 7:00 ja 18:00 välisenä aikana, mikäli ulkoa tulevan valon määrä ei ylitä asetusarvoa. Toisessa poikkeavista varianteista valoja ohjataan pelkästään käyttöaikataulun mukaan ja toisessa simulaatio toteutetaan kokonaan ilman valaistusta.

4.1.4 Tietomallin optimointi

Tietomallin testaus ja suorituskyvyn arviointi on tärkeä osa mallin rakentamista ja jalostamista. Koesimulaatioiden avulla keskeneräisen mallin toimivuudesta ja mahdollisista kehityskohteista saadaan tärkeää tietoa. Arviointiin käytettiin vuoden 2022 mittausdatasta lämmityspiirien menolämpötiloja sekä yllilämmönpoistoon käytettävien kattoikkunoiden aukioloastetta. Saatavilla olevasta kulutusdatasta ei ollut mahdollista laskea suoraan kasvihuoneen tehontarvetta. Voitiin kuitenkin jo varhain havaita, että lämmitysjärjestelmän menolämpötilan muutokset korreloivat lämmöntarpeen muutosten kanssa.

Ensimmäisen version simulaatiot suoritettiin ilman varjostuksia, sisäisiä kuormia tai lämpöverhoa. Tässä versiossa ulkoseiniin ei ole määritelty erikseen ikkunoita. Sisälämpötila vaihteluväli on $+21^{\circ}\text{C}$ ja $+23^{\circ}\text{C}$ välillä. Lämmityslaitte on asetettu lämmittämään ja ylläpitämään sisälämpötilaa $+21^{\circ}\text{C}$:ssa ja jäähdytyslaitte puolestaan jäähdyttämään $+23^{\circ}\text{C}$:seen asti. Vertaamalla saatuja tuloksia olemassa olevaan kulutusdataan, voidaan todeta tietomallin lämmityksen ja jäähdytyksen tarpeiden olevan oikean suuntaisia ja mukailevan vertailuarvoja.

Mallin seuraavissa versioissa on varioitu jäähdytyksen ja lämmityksen asetusrvoja, lisätty ympäröivät varjostukset, sisäiset kuormat ja otettu käyttöön lämpöverho. Jokaisen ominaisuuden lisääminen vaikutti odotetusti simulaatioiden tuloksiin. Lopulliseksi tietomalliksi valikoitui viides versio, jossa kasvihuoneen ulkoseiniin oli vielä lisätty ominaisuuksiltaan kennolevyä vastaavat ikkunat, minkä ansiosta versio huomioi myös seinien kautta tulevan auringon säteilyn.

Lopullinen tietomalli koostuu 19:sta rinnakkaisesta simulaatiosta. Tiedot varianttien tarkemmista eroista on kuvattu liitteen 2 taulukkoon. Niissä muunnellaan lämmityksen ja jäähdytyksen asetusrvojen lämpötiloja, käytettävissä olevaa jäähdytystehoa, tuuletusluukkujen ohjausta, varjostusaineen käyttöä, rakennuksen painekertoimia ja valaistuksen lämpökuormaa. Varianttien avulla saavutetaan kattavampi käsitys todellisista

lämmityksen ja jäähdytyksen tarpeista. Lähestymistapa mahdollistaa tarkan analyysin eri asetusten vaikutuksista kasvihuoneen energiankulutukseen. Simulaatioilla saadut tulokset tarjoavat arvokasta tietoa optimaalisten asetusten määrittämiseksi.

4.2 Variaatiot

Tässä luvussa syvennytään viidennen version varianttien tärkeimpiin varioituihin ominaisuuksiin. Version sisälämpötilalle on annettu liikkumavaraa, jolloin malli vastaa paremmin mitattuja sisälämpötilan muutoksia. Mittausdatan perusteella vuoden ensimmäisen ja viimeisen vuosineljänneksen sisälämpötila on keskimäärin $+17,3^{\circ}\text{C}$, joten mallin lämmityslaitteen asetusarvoksi on määritetty $+17^{\circ}\text{C}$. Jäähdytyslaitteen asetusarvoksi on asetettu $+21^{\circ}\text{C}$. Asetus optimoi sisäolosuhteiden ylläpitoa ja tukee energiankierrätyspotentiaalia samalla, kun se säilyttää jäähdytystehon tarpeen realistisena. Jäähdytyksen asetusarvon avulla voidaan kontrolloida tarvittavan jäähdytyksen määrää. Sopivalla asetusarvolla saadaan luotua jäähdytyksen tarvetta edesauttamaan energian kierrätystä keväällä ja syksyllä kuitenkin siten, että kesällä tarvittava energiamäärä ei kasva liiaksi.

Tietomallin perusversioissa ei rajoiteta lämmitys- ja jäähdytyslaitteiden tehoa. Tavoitteena on saada selville tarvittavat kokonaisenergiat. Osassa variaatioita rajoitetaan jäähdytystehon määrää ja tutkitaan tehon rajoittamisen vaikutusta sisälämpötilan muutoksiin.

Mittausdatan vastaavuuden vertailua varten kaksi variaatiota toteutetaan ilman jäähdytyslaitetta. Toinen näistä variaatioista sisältää kasvihuoneen nykyiset yllilämmöntorjuntakeinot, tuuletusluukut sekä varjomaalin. Toinen variaatio puolestaan jättää varjomaalin käytön pois, ja demonstroi varjomaalin merkitystä yllilämmön torjunnassa.

Suurin lämmityslaitteen tarvitsemaan tehoon vaikuttava yksittäinen tekijä on valaistuksen sähköteho. Sen tuottaman lämpökuorman merkitystä havainnoidaan neljässä eri simulaatiovariantissa, joissa tutkitaan kasvihuoneen

lämmitys- ja jäähdytystehontarpeen muutosta nykyisellä 1,76 megawatin sähköteholla sekä yhdessä kokonaan ilman valoja. Näitä variantteja lukuun ottamatta valaistuksessa käytetään luvussa 4.1.3 mainittua nimellistehoa $10^{\text{W}}/\text{m}^2$, jolloin kasvihuoneen valaistuksen sähköteho on 70 kilowattia.

Tuuletusluukkujen käyttämisen asetusarvona käytetään $+23^{\circ}\text{C}$ tai $+21^{\circ}\text{C}$. Toimivaksi ohjauksen asetusarvoksi osoittautui $+23^{\circ}\text{C}$. Näissä skenaarioissa tuuletusluukut avautuvat vain, jos simulaation jäähdytyslaitteen, jonka asetusarvo on $+21^{\circ}\text{C}$, teho ei riitä ylläpitämään sisälämpötilaa riittävän alhaisena. Variaatioissa, jotka eivät sisällä jäähdytyslaitetta, asetusarvona käytetään $+21^{\circ}\text{C}$. Tällöin mallinnetaan nykytilannetta, jossa tuuletusluukkujen avulla poistetaan kasvihuoneesta yllämpöä.

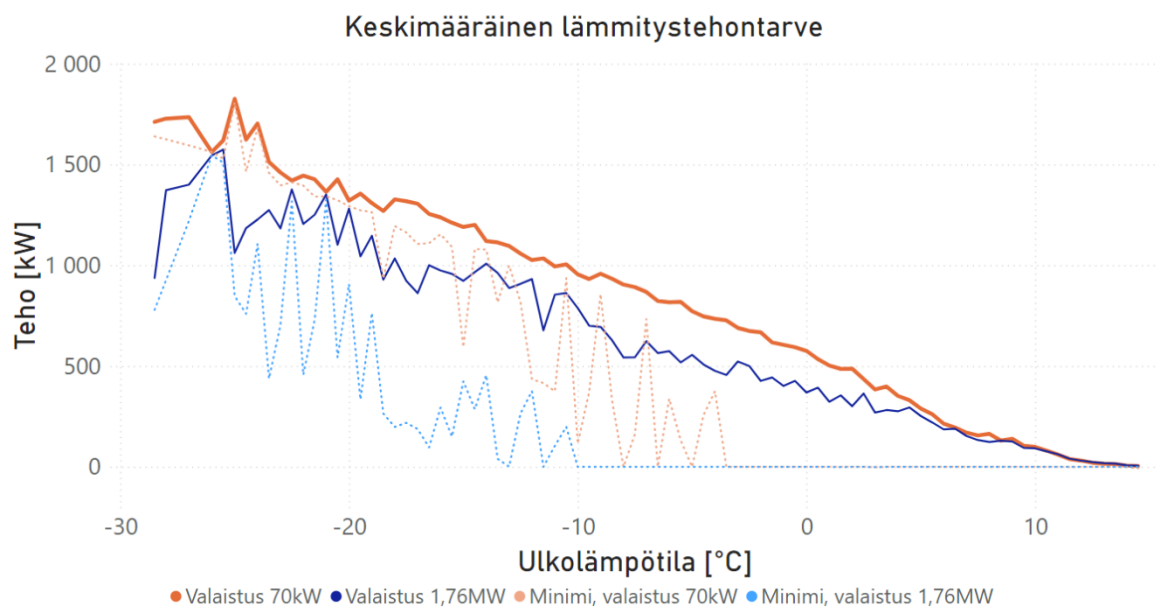
Rakennuksen painekertoimien vaikutus tietomallin tuloksiin selvitettiin kolmella variantilla. Näissä käytetään ohjelmiston esivalinnalla ”suojaamaton” automaattisesti täydentäviä arvoja, kun taas kaikissa muissa versioissa esivalinnalla ”suojattu” täydentyviä arvoja. Painekertoimien vaikutus tietomalliin jää vähäiseksi. ”Suojaamaton” –valinnan varianttien lämmitysenergiantarve on vain noin 3–4 % verrokkejaan suurempi.

4.3 Simulaation tulokset

Tässä luvussa esitellään tietomallin ominaisuuksia simulaatiotulosten kautta. Tarkastelemalla simulaatiovarianttien tuloksia ja vertaamalla niitä keskenään sekä vuoden 2022 mittausdataan, pystytään tutustumaan monipuolisesti energiankulutuksen hallinnan kannalta keskeisiin parametreihin. Aluksi tarkastellaan lämmityksen sekä jäähdytyksen tarpeita, minkä jälkeen perehdytään energiankierrätyspotentiaalin selvittämiseen. Luvun päätteeksi arvioidaan vielä tietomallin validiteettia.

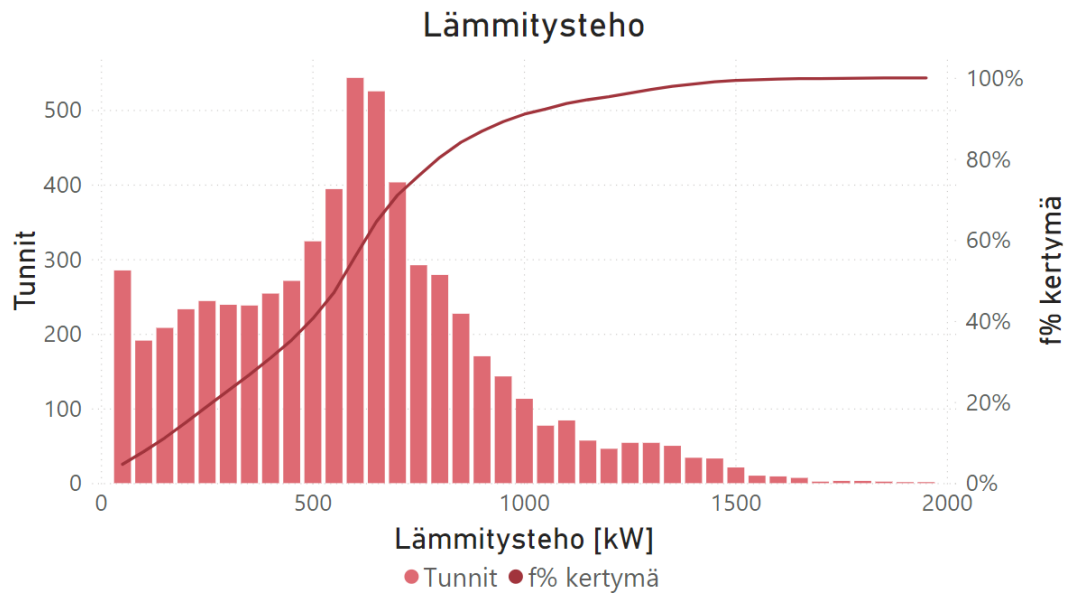
4.3.1 Lämpöteho

Kasvihuoneen tehontarve suhteessa ulkolämpötilaan seuraa kuviossa 1 esitettyä linjaa kaikissa variaatioissa. Varianttien lämmöntarve säilyy käytännössä vakiona, mutta lämmön tuotto jakaantuu tuotantomuotojen ja lämpökuormien kesken vaihtelevissa suhteissa. Valaistuksen tuottama lämpökuorma 70 kilowatin sähköteholla kattaa kasvihuoneen vuotuisesta lämmöntarpeesta vain noin 2 %, kun taas nykyinen valaistus 1,76 megawatin sähköteholla kattaa tietomallin mukaan noin 28 % lämmöntarpeesta.



Kuvio 1. Keskimääräinen lämmitystehontarve suhteessa ulkolämpötilaan.

Valaistuksen tuottaman lämpökuorman suuruudella on suurin vaikutus pienimpään tarvittavaan lämmitystehoon. Korkeammassa ulkolämpötilassa ero keskimääräisen- ja minimitehon välillä on suurempi. Tämä osoittaa valaistuksen kattavan suuremman osan lämmityksen tarpeesta, kun ulkolämpötila nousee. Ulkolämpötilan laskiessa erot sekä keskimääräisissä että pienimmissä tehontarpeissa myös supistuvat.



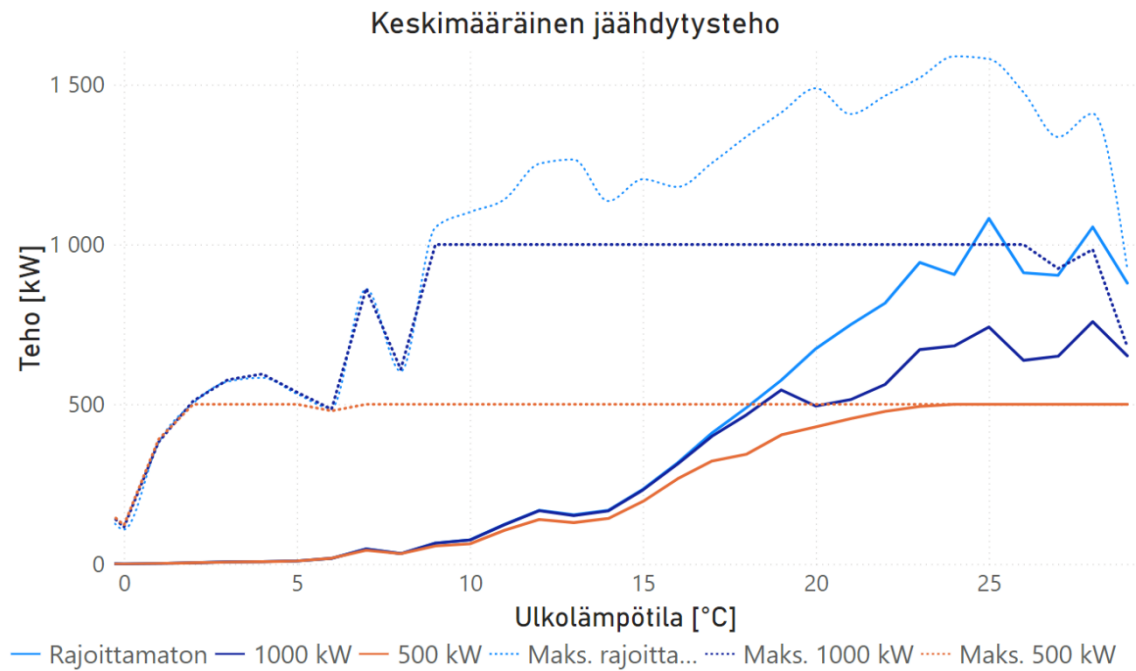
Kuvio 2. Lämmitystehon energiakuvaaja.

Kuviossa 2 esitetyn lämmitystehon energiakuvaajan tarkastelu osoittaa, että suurimman osan ajasta lämmitystehon tarve pysyy alle 500 kilowatin.

Tehontarve keskittyy pääasiassa noin 500 kilowatin tehoalueelle. Satunnaisesti tarvitaan suurempiakin tehoja, mutta yli 1700 kilowatin tehontarpeita esiintyy vain muutamia tunteja vuodessa. Kertymäfunktion kuvaaja vahvistaa havainnot: jyrkin nousu tapahtuu 500 kilowatin kohdalla, ja kuvaaja tasoittuu merkittävästi tehoarvojen kasvaessa. Suurin osa lämmitystarpeesta voidaan kattaa siis alle 1000 kilowatin teholla.

4.3.2 Jäähdytysteho

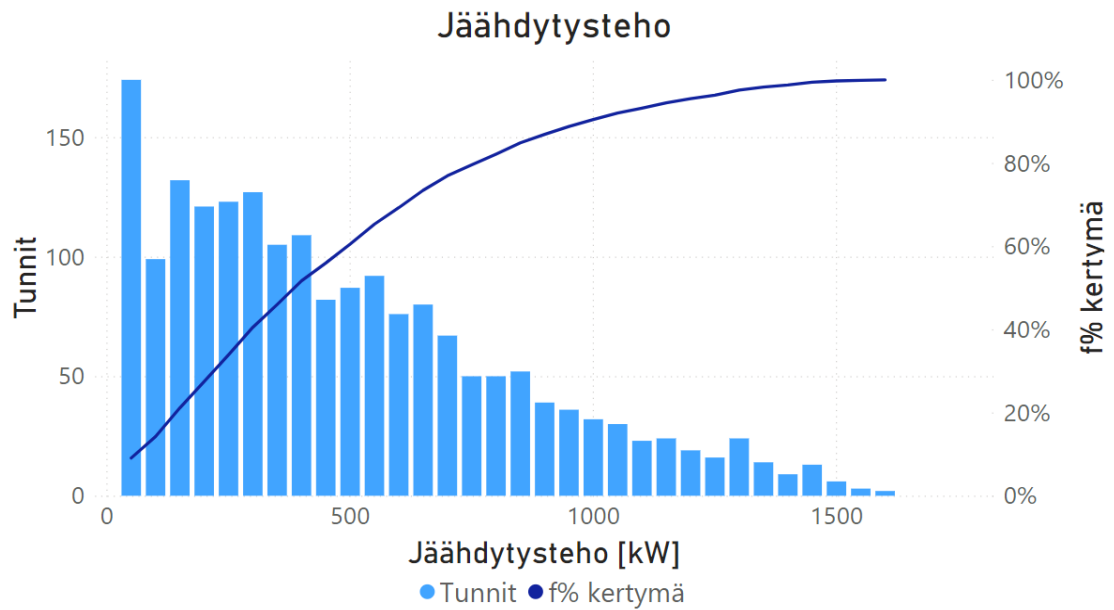
Kuvio 3 antaa ymmärtää, että kasvihuoneeseen kohdistuvat auringon säteilyn aiheuttamat lämpökuormat voivat ilmetä hetkellisinä suurinakin piikkeinä, sillä suurimmat jäähdytystehot ovat keskimääräisiä tehoja huomattavasti suuremmat. Vaikka 500 kilowatin jäähdytysteho riittää keskimäärin $+20^{\circ}\text{C}$:seen, jo $+5^{\circ}\text{C}$:ssa esiintyy yli 500 kilowatin lämpökuormapiikkejä.



Kuvio 3. Keskimääräisen jäähdytystehon tarve.

Jäähdytystehon tarpeen energiakuvaajan (Kuvio 4) avulla voidaan havaita, että useimmin tarvittava jäähdytysteho on noin 200–300 kilowattia. Tuntimäärä pienenee jyrkästi yli 500 kilowatin tehoalueen yläpuolella. Noin 80 % jäähdytystehon tarpeesta voidaan kattaa alle 750 kilowatin teholla, ja suurin tarvittava jäähdytysteho on noin 1600 kilowattia. Huipputehon tarve on siis huomattavan suuri.

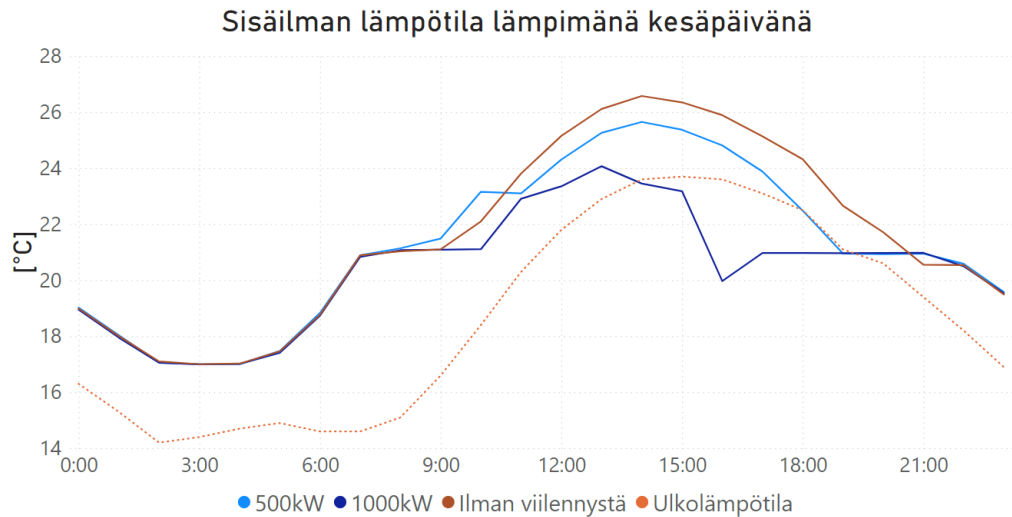
Sisälämpötila reagoi jäähdytystehon rajoittamiseen kuviossa 5 esitetyllä tavalla. Jäähdytyksen käyttö tasoittaa ja pitää alhaisempaa sisäilman lämpötilaa, etenkin suuremmilla jäähdytystehoilla. Pienemmällä jäähdytysteholla sisälämpötila nousee nopeammin kohti keskipäivää ja pysyy korkeampana pidempään ennen kuin se iltaa kohti laskee.



Kuvio 4. Jäähdytystehon tarpeen energiakuvaaja.

Kuviosta 5 ilmenee myös havainnollisesti, miten tuuletusluukkujen avaaminen tehostaa kasvihuoneen viilennystä. Sekä 500 että 1000 kilowatin jäähdytysteholla sisälämpötilan nousu hidastuu merkittävästi, kun tuuletusluukut avautuvat sisälämpötilan saavuttaessa $+23^{\circ}\text{C}$.

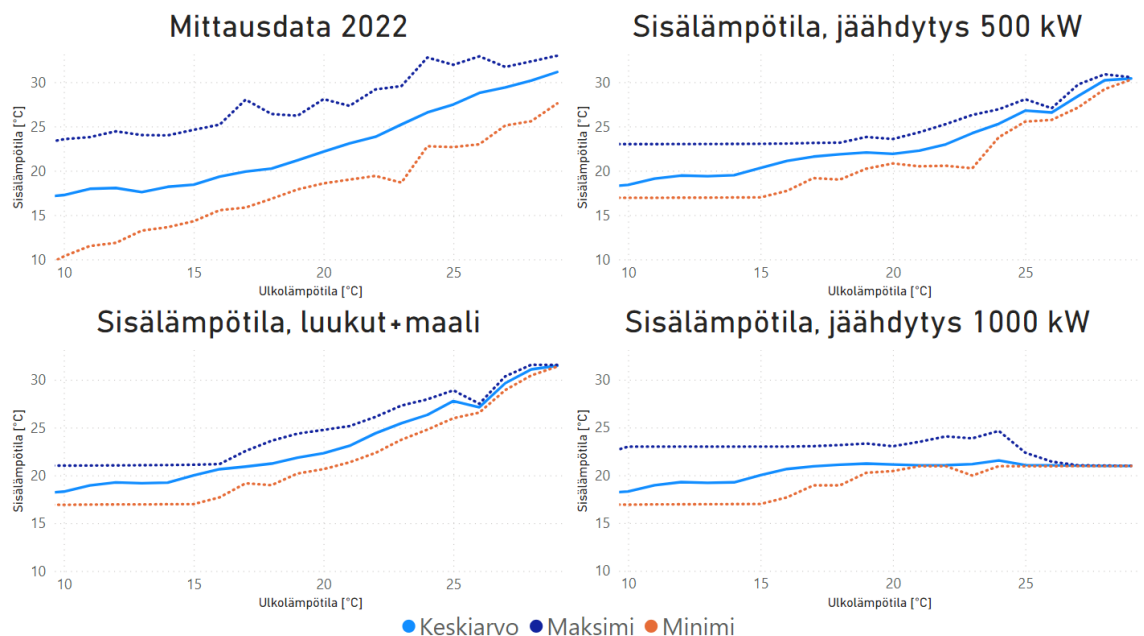
Suuresti muuttuvat lämpökuormat heijastuvat myös sisälämpötilaan. Kuviossa 6 havainnoidaan sisälämpötilan käyttäytymistä eri jäähdytystehoilla. 500 kilowatin jäähdytysteholla ei ole merkittävää vaikutusta keskimääräiseen sisälämpötilaan. Yli $+20^{\circ}\text{C}$:n ulkolämpötiloissa 500 kilowatin jäähdytys madaltaa sekä suurinta että keskimääräistä lämpötilaa noin asteella.



Ilman viilennystä tuuletusluukut aukeavat 21 °C:ssa. Kun viilennys on käytössä, ne aukeavat 23°C:ssa

Kuvio 5. Sisäilman lämpötila eri jäähdytystehoilla.

Yli 1000 kilowatin jäähdytystehoja tarvitaan jo +10°C:n ulkolämpötilassa, jolloin tällä jäähdytysteholla tarvitaan tuuletusluukkujen apua satunnaisesti. Minimi- ja keskilämpötilojen lähentyminen toisiaan indikoi sitä, että tuuletusluukut riittävät tasaamaan sisälämpötilaa lämpökuormapiikeissä.



Kuvio 6. Sisälämpötila eri jäähdytystehoilla.

Lämpökuorman suuruudella on huomattavasti pienempi merkitys jäähdytystarpeeseen kuin lämmöntarpeeseen. Suuremmalla valoteholla simuloidun variantin jäähdytystarpeen kuvaaja mukailee hyvin tarkasti muiden simulaatioiden vastaavia kuvaajia. Merkittävin ero sen sijaan voidaan havaita niissä vuoden aikana esiintyvissä tunneissa, joissa ei esiinny lämmityksen eikä jäähdytyksen tarvetta. Siinä missä muissa simulaatioissa näitä tunteja esiintyy 600–800, on vastaava tuntimäärä suuren valotehon simulaatioissa noin 1300. Tänä aikana kasvihuoneen sisälämpötila on ohjauksen salliman hystereesin sisällä, eli +17°C:n ja +21°C:n välillä. Tämä näkyy myös kuvion 1 minimilämmitystehojen kuvaajissa.

4.4 Energiankierrätyspotentiaalin selvitys

Energiankierrätyspotentiaali selvitettiin rakentamalla Excel-työkalu mallintamaan energiankierrätystä sekä sähkökattilan käyttöpotentiaalia.

4.4.1 Excel-työkalu

Edellisessä luvussa esiteltyjen lämmitys- ja jäähdytystehon tarpeiden perusteella voidaan arvioida kasvihuoneen energiankierrätyspotentiaalia. Arvioinnin tueksi rakennettiin Excel-työkalu, johon käyttäjä voi määrittää lähtöarvoja, kuten lämpövaraston tilavuus sekä suurin ja pienin käytettävä veden lämpötila. Näiden arvojen perusteella työkalu laskee lämpövaraston kapasiteetin termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan seuraavasti:

$$\Delta U = m \times c_p \times \Delta T,$$

jossa

ΔU on sisäenergian muutos (w)

m on massa (kg)

c_p on ominaislämpökapasiteetti (kJ/(kg×°C))

ΔT on lämpötilan muutos (°C).

Yhdessä tarkasteltavan simulaation tehontarpeiden kanssa työkalun avulla voidaan määrittää energiankierrätyspotentiaali simulaation jokaiselle tunnille. Kuvassa 8 esitellyn työkalun avulla on mahdollista seurata lämpövaraston latausta, lataustasoa ja purkua sekä jäähdytyksen lauhdutuksen tarvetta sekä lisälämmityksen tarvetta. Käyttäjän on myös mahdollista tarkastella sekä lämmitykseen että jäähdytykseen tarvittavia huipputehoja, yläkvartiilia sekä omavalintaista tehopistettä.

		Päiväys	Aika	Kuivalam- potila, Deg-C	Jäähdytys	Lämmitys	Ilman lämpötila huoneen keski	Jäähdytys- energia akkuun	Akun varaus (vain LTO)	Akun purku lämmityk- seen	Lauhdutu- ksen tarve	Lisälämm- ityksen tarve
		1.1.2023	0:00	-1,7	0,0	675,7	17,005	0,0	0,0	0,0	0,0	675,7
LÄMPÖVARASTO		1.1.2023	1:00	-1,7	0,0	672,7	17	0,0	0,0	0,0	0,0	672,7
Lämpövaraston tilavuus [m3]	50	1.1.2023	2:00	-1,4	0,0	666,0	17	0,0	0,0	0,0	0,0	666,0
jäähdytyspatterin lämpötila	9	1.1.2023	3:00	-1	0,0	647,2	17,001	0,0	0,0	0,0	0,0	647,2
akun max. lämpötila	60	1.1.2023	4:00	0	0,0	619,2	17,001	0,0	0,0	0,0	0,0	619,2
lämpötilaero	51	1.1.2023	5:00	0,9	0,0	590,1	17,001	0,0	0,0	0,0	0,0	590,1
kapasiteetti (kWh)	2967,917	1.1.2023	6:00	1,6	0,0	559,6	17,001	0,0	0,0	0,0	0,0	559,6
		1.1.2023	7:00	2,2	0,0	533,5	17,001	0,0	0,0	0,0	0,0	533,5
ENERGIANKIERRÄTYSPOTENTIAALI		1.1.2023	8:00	2,7	0,0	550,5	17	0,0	0,0	0,0	0,0	550,5
Lämpöakun osuus lämmityksestä	6 %	1.1.2023	9:00	3,1	0,0	590,8	16,999	0,0	0,0	0,0	0,0	590,8
Jäähdytyksen talteenotto	28 %	1.1.2023	10:00	3,20	0,0	595,7	17	0,0	0,0	0,0	0,0	595,7
Energiankierrätyspotentiaali	23 %	1.1.2023	11:00	3	0,0	596,5	17	0,0	0,0	0,0	0,0	596,5
		1.1.2023	12:00	2,2	0,0	602,5	17	0,0	0,0	0,0	0,0	602,5

Kuva 8. Energiankierrätyslaskennan työkalu.

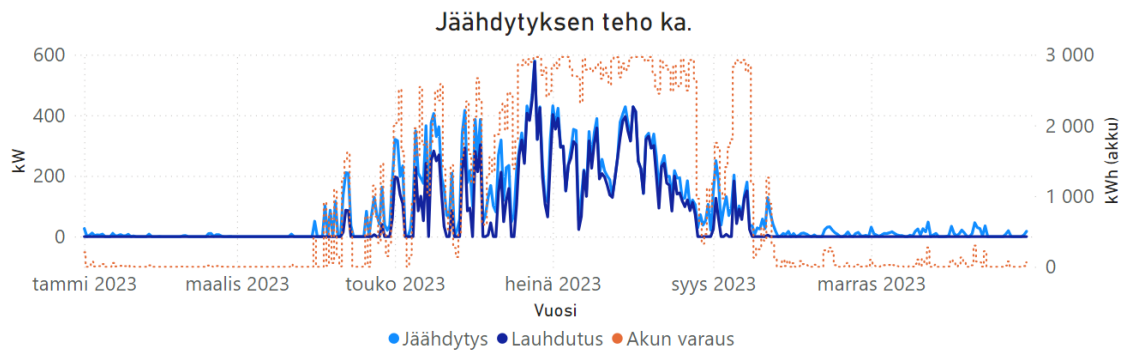
Lisäksi työkalulla on mahdollista simuloida lämpövaraston yhteyteen liitettävän sähkökattilan vaikutusta energiataseeseen. Käyttäjän on mahdollista määrittää käytettävän kattilan teho, pienin latausteho, simulointiprioriteetti sekä rajoittaa sähkökattilan vuorokausikohtaisia käyttötunteja.

Työkalu määrittää vuorokauden lämmöntarpeen. Tämän jälkeen se pyrkii asetetun prioriteetin mukaan kattamaan tarpeen ensisijaisesti joko jäähdytyksestä talteen otettavalla energialla tai sähkökattilan käytöllä. Loput lämmityksen tarpeesta ilmoitetaan lisälämmityksen tarpeena.

4.4.2 Energiankierrätys

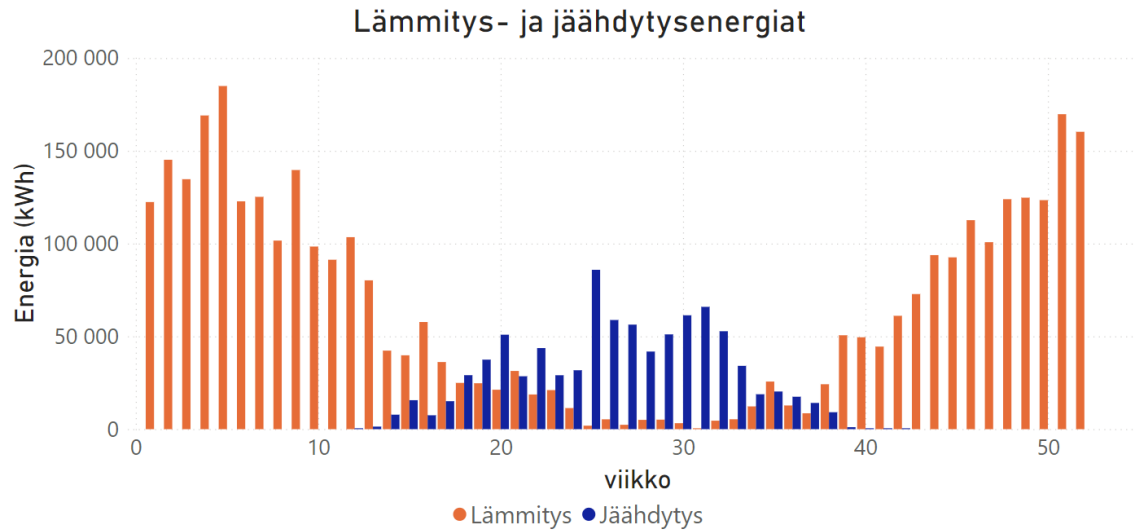
Tarkastelu keskittyy energian vuorokausikierrätyksen näkökulmasta kaupapuutarhassa käyttämättömänä olevien vanhojen öljysäiliöiden hyödyntämisen kannattavuuteen. Kaikki simuloinnit tuottavat eri asetuksistaan

riippumatta hyvin samansuuntaisia tuloksia. Vaikka vuotuinen jäähdytyksen määrä on 20–30 % lämmityksen tarpeesta, lämpövaraston avulla kierrätettävä lämpöenergia kattaa siitä vain 5–10 %. Tulosten perusteella myöskään lämpövaraston kapasiteettia kasvattamalla ei saavuteta juurikaan hyötyjä. Kapasiteetin kasvattaminen viidestäkymmenestä kuutiosta sataan kuutioon nostaa kierrätysastetta vain noin prosenttiyksikön.



Kuvio 7. Jäähdytyksen tehot.

Selittävä tekijä alhaiselle lämmönkierrätysasteelle on hyvin pieni lämmön tarve jäähdytyskautena. Tästä syystä suurinta osaa jäähdytysenergiaa ei ole mahdollista kierrättää vuorokausitasolla. Kuvio 7 havainnollistaa, miten kesäkuun lopusta syyskuun alkuun lähes koko jäähdytyksen tarve on lauhdutettava, koska lämpövaraston varaustaso pysyy korkealla. Toisaalta lämpövarasto jää lähes kokonaan hyödyntämättä loka- ja huhtikuun välisenä aikana.

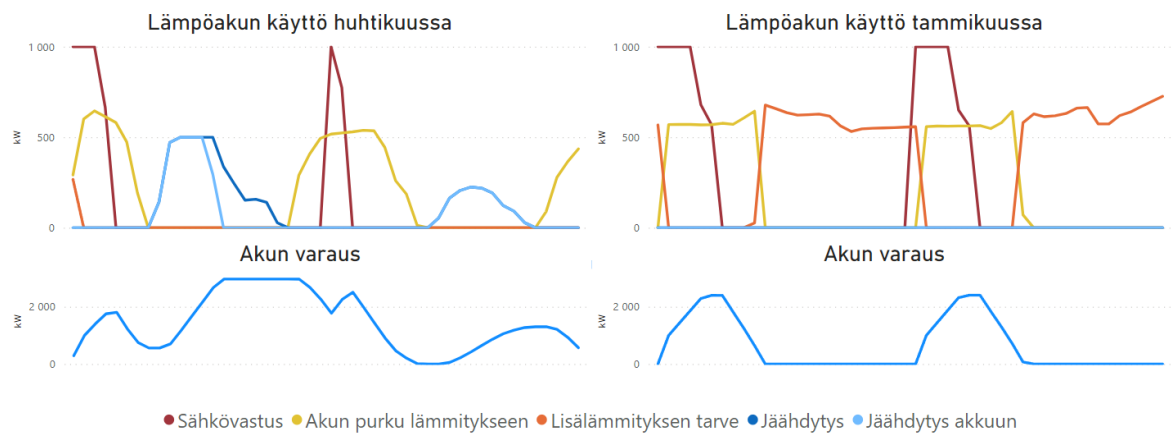


Kuvio 8. Lämmitys- ja jäähdytysenergiat.

Vaikka talteen otettavalla jäähdytysenergialla voitaisiin kattaa noin 35 % vuotuisesta energiantarpeesta, käytännössä vuorokausivarastoinnissa osuus tulisi kuitenkin jäämään alle 10 %:iin. Kuviossa 8 kiteytyy energian vuorokausikierrätyksen problematiikka: kun kierrätettävää energiaa on saatavilla, sille ei ole juurikaan tarvetta.

4.4.3 Sähkökattilan potentiaali

Sähkökattilaa voidaan käyttää kattamaan lämmityksen tarve joko osittain tai kokonaan. Tässä työssä on määritelty luvun 4.3 perusteella sähkökattilan tehoksi yksi megawatti, pienimmäksi käyttötehoksi 500 kilowattia sekä käyttötunnit on rajoitettu maksimissaan kuuteen tuntiin vuorokaudessa. Näillä asetuksilla voidaan työkalun mukaan kattaa 36 % vuotuisesta lämmöntarpeesta. Kokonaisuus mahdollistaa lämmön vuorokausivarastoinnin, lämmön talteenoton jäähdytysenergiasta sekä sähkökattilan tehokkaan käytön esimerkiksi sähkön ollessa edullista.



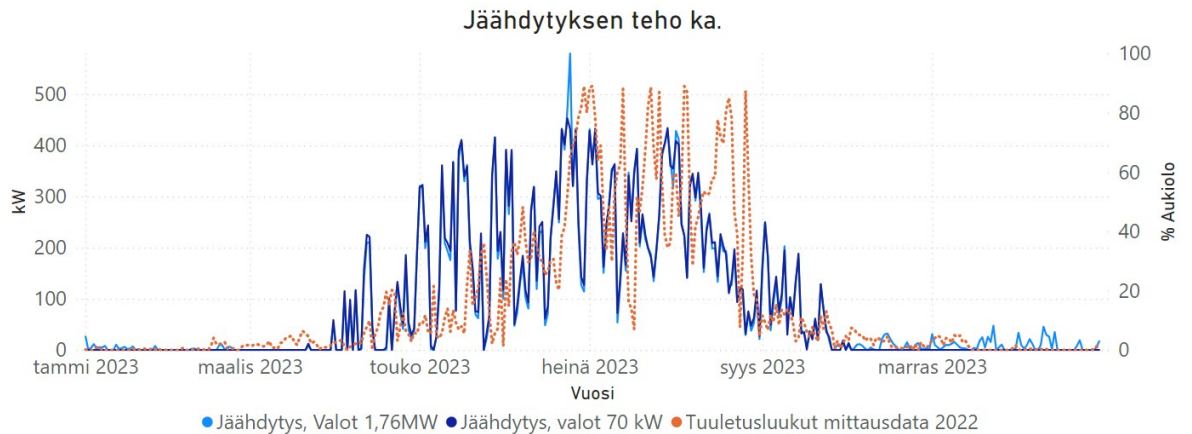
Kuvio 9. Lämpöakun käyttö kahden vuorokauden ajanjaksoina.

Sähkökattilasta saadaan suurin hyöty lämmityskaudella. Kuviossa 9 esitetään kahden vuorokauden ajanjaksolta lämmöntalteenoton, energiavaraston ja sähkökattilan toimintaa keväällä ja talvella. Vasemmanpuolisista huhtikuun kuvaajista voidaan havaita, miten jäähdytyksestä saatavalla lämpöenergialla ladataan lämpövarasto täyteen, minkä jälkeen loppu lämpö lauhdutetaan. Sähkökattila täydentää lämpöakun latausta, jolloin vuorokauden lämmöntarve katetaan kokonaan energiavarastosta saatavalla lämmöllä.

Oikeanpuolisista kuvaajista nähdään, kuinka lämpövaraston ansiosta sähkökattilaa voidaan käyttää lämmöntarvetta suuremmalla teholla. Tällöin lämpövarasto toimii puskurina ja jakaa lämmön pidemmälle aikavälille.

4.5 Mallin validointi

Tietomallin lämmöntarve vastaa hyvin sekä kasvihuoneen 2022 mittausdataa, että Hukaton-hankkeessa (Lutfi ym. 2020, 37) esitettyä lämmönkulutusarviota. Kuvioista 10 voidaan havaita, miten esitetyt simulointien jäähdytyksentarpeiden sekä vuoden 2022 mittausdatan tuuletusluukkujen aukiolon kuvaajien trendit ovat hyvin yhtenevät eri vuodenaikoina.



Kuvio 10. Simulointien ja mittausdatan vertailua.

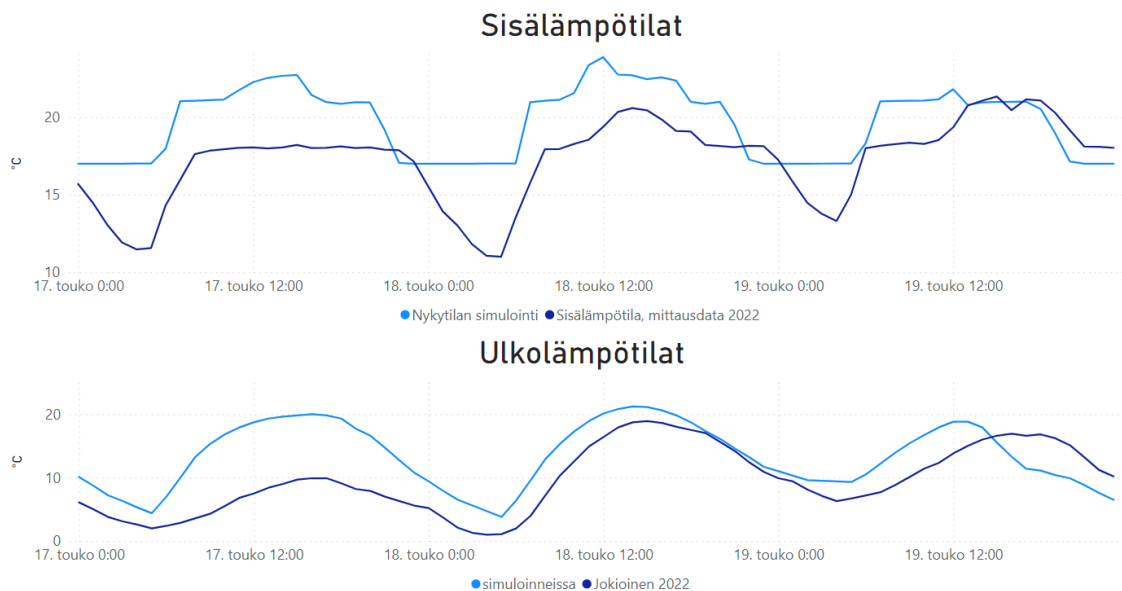
Kasvihuone osallistuu sähkön ylös- ja allassätömarkkinoille valaistuksen ohjauksella. Tästä syystä tietomalli ei anna varauksettoman luotettavaa kuvaa valaistuksen osuudesta kasvihuoneen lämmityksessä. Koska Piltin kauppapuutarha suunnittelee nykyisen valaistuksen korvaamista hyötysuhteeltaan huomattavasti paremmalla led-valaistuksella, tässä tietomallissa on tarkoituksenmukaista vakioida valaistuksen tuottama lämpökuorma huomattavasti pienemmäksi. Näin saadaan todenmukainen kuva kokonaisenergiantarpeesta, jonka avulla voidaan helposti arvioida muuttuvien lämpökuormien merkitystä tulevissa kasvihuoneen energiatehokkuutta kehittämissä hankkeissa.

Hukaton-hankkeen mukaan (Lutfi ym. 2020, 37) Piltin vuotuinen lämpöenergian kulutus on 6300 megawattituntia, jolloin simuloidun kasvihuoneen osuus pinta-alojen mukaan ositettuna on noin 3200 megawattituntia. Lukema on hyvin yhtenevä tietomallin tulosten kanssa. Hukaton-hankkeessa arvioitu vuotuinen jäähdytysenergian määrä on 8100 megawattituntia (Lutfi ym. 2020, 37), mikä puolestaan ei vastaa tietomallin tuloksia. Pinta-alojen mukaan ositettuna mallinnetun kasvihuoneen jäähdytysenergian osuus olisi noin 4000 megawattituntia. Suurin jäähdytyksen tarve saavutetaan variantissa, jossa valotehona on nykyinen 1,76 megawattia ja valaistuksen ohjaus pitää valot päällä, vaikka valoisuuden puolesta ei ole tarvetta. Tässäkin tapauksessa jäähdytyksen tarve jää noin 2600 megawattituntiin. Hukaton-hankkeen

raportista ei käy tarkemmin ilmi, mitä tekijöitä arvon muodostamisessa oli otettu huomioon.

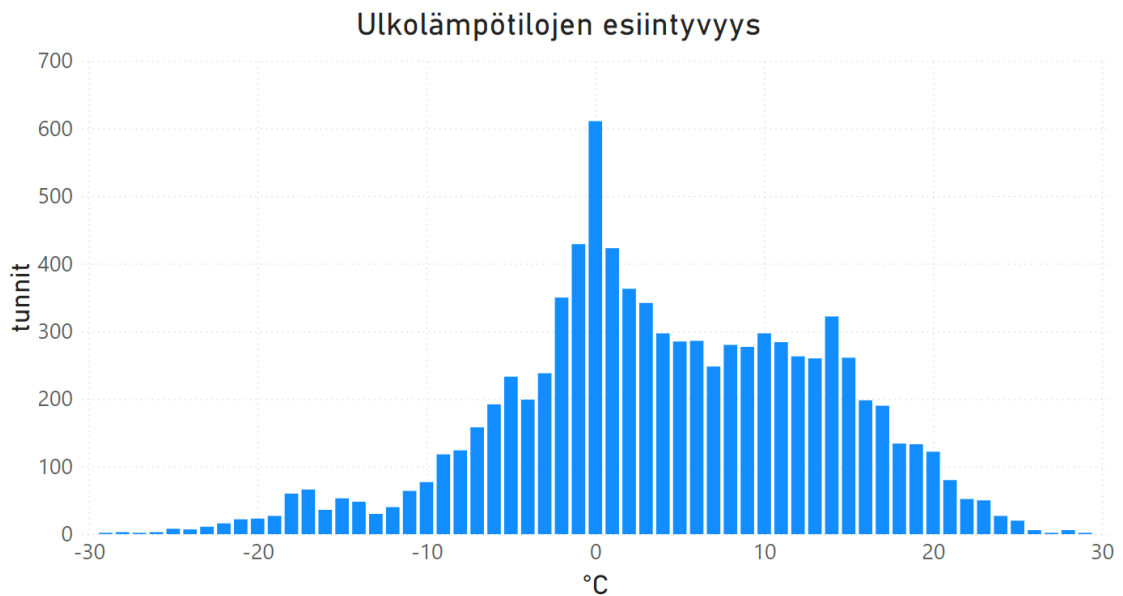
Sisälämpötilan käyttäytyminen on tietomallissa hyvin yhtenevä vuoden 2022 mittausdatan kanssa. Kuviossa 11 esitetään toukokuista ajanjaksoa, jolloin simuloinnissa käytetyn säämällin ja vuoden 2022 mittausdatan ulkolämpötilojen arvot ovat hyvin lähellä toisiaan usean vuorokauden ajan. Voidaan havaita, että nykytilaa vastaavan simuloinnin sekä mittausdatan sisälämpötilojen arvot ovat suhteellisen lähellä toisiaan ja ne myös reagoivat ulkolämpötilan muutoksiin yhtenevästi.

Tietomalli siis kykenee toistamaan todellisia olosuhteita kohtuullisen tarkasti. Mittausdatassa näkyvä yöllinen lämpötilan lasku johtuu siitä, ettei kasvihuonetta lämmitetty yöllä, kun taas simulaatiossa lämmityksen ohjaus pitää sisälämpötilan $+17^{\circ}\text{C}$:ssa. Myös kuviossa 6 esitetty vertailu sisälämpötilan käyttäytymisestä osoittaa tietomallin reagoivan ulkoisiin olosuhteisiin hyvin yhtenevästi kasvihuoneen mittausdatan kanssa.



Kuvio 11. Sisä- ja ulkolämpötilojen vertailu.

Tietomallissa käytetään ideaalilaitteita sekä kasvihuoneen että energiankierrätyksen simuloinneissa. Niissä ei ole huomioitu häviöitä tai teknisien ratkaisuiden mahdollisia rajoitteita, joten tulokset eivät sellaisenaan sovellu esimerkiksi tehontarpeiden mitoituksiin. Lähtöarvojen ja parametrien määrittelyssä on kuitenkin pyritty soveltuvien osin ottamaan huomioon vallitsevat olosuhteet ja markkinoilla olevan teknologian suorituskyky. Esimerkkeinä simuloinneissa käytetty lämpövaraston tilavuus vastaa kaupapuutarhassa käyttämättömänä olevaa vanhaa öljysäiliötä sekä varaston suurimmaksi lämpötilaksi on valittu $+60^{\circ}\text{C}$, joka kuuluu yleisesti teollisten lämpöpumppujen tehoalueelle.



Kuvio 12. Synteettisen ilmaston ulkolämpötilojen jakautuminen tunneittain simulointivuonna.

Synteettisessä säämallissa esiintyy simulointivuoden aikana hyvin kylmiä (alle -20°C) ja hyvin lämpimiä lämpötiloja (yli $+20^{\circ}\text{C}$) vain muutamia tunteja.

Ulkolämpötilan jakautuminen esitetään kuviossa 12. Kuvioden 1 ja 3 ääripäissä esiintyvä suuri vaihtelu selittyy osaltaan simulaatiopisteiden pienellä määrällä.

5 Johtopäätökset

5.1 Päätulokset

Tämän opinnäytetyön tulokset suhteutuvat tavoitteisiin hyvin, ja ne mallintavat onnistuneesti Piltin kauppapuutarhan kasvihuoneen energiatehokkuuden nykytasoa. Tietomallin avulla selvitettiin tarkasti kasvihuoneen energiantarve samalla luoden pohjaa kokonaisvaltaiselle energiatehokkuusvisiolle. Tulokset tarjoavat kauppapuutarhalle uutta ja tärkeää tietoa kasvihuoneen energiatehokkuudesta sekä työkaluja tulevien energiatehokkuushankkeiden suunnitteluun. Tuloksista käy myös ilmi, että kasvihuoneen energiankierrätyspotentiaali on rajallinen.

Energiavaraston simuloinnissa järjestelmään lisätty sähkökattila ja sen potentiaali osana lämmitystä ja sähkön tasemarkkinadynamiikkaa on huomattavasti suurempi kuin energiankierrätyspotentiaali vuorokausitasolla. Simulointien perusteella tasemarkkinoille osallistuva sähkökattila voisi tuottaa noin kolmasosan kasvihuoneen vuotuisesta lämmöntarpeesta. Lisäksi 1000 kilowatin sähkökattilalla pystyttäisiin kuvion 2 mukaan kattamaan 90 % vuotuisesta lämmöntarpeesta.

Sähkökattila lisäisi merkittävästi lämmöntuotannon joustavuutta ja tukisi muita energiatehokkuushankkeita, kuten esimerkiksi valaistuksen päivitystä. Valaistuksen tuottama lämpökuorma ei ole optimaalinen tapa tuottaa lämpöä, koska valaisinten lämmöntuotanto on sidoksissa valon tarpeeseen, eikä lämmön tarpeeseen. Kuumat valaisimet myös tuottavat lämpöä kasvihuoneen lämmityksen kannalta väärään paikkaan, kasvihuoneen yläosaan. Kuviossa 8 esitetty huhtikuinen ajanjakso osoittaa, miten sähkökattilan avulla voidaan tuottaa tehokkaasti vuorokauden aikana tarvittava lämpö muutamassa tunnissa.

Sisälämpötilan hallinnan kannalta simulointi osoittaa, että 500 kilowatin jäähdytysteholla saavutetaan kuvion 6 mukaisesti noin asteen viileämpi sisätila

verrattuna jäähdyttämättömään tilanteeseen. Sisälämpötilan pitäminen vakaana vaatii jäähdytykseltä kykyä vastata suuriinkin lämpökuormapiikkeihin.

Kuvion 3 rajoittamattoman jäähdytystehon keskiarvon kuvaajan avulla voidaan arvioida jäähdytykseen tarvittavaa tehoa: 1000:n kilowatin teholla pystytään kattamaan noin 90 % jäähdytyksen tarpeesta ja pitämään sisälämpötila stabiilina kaikissa simulaation olosuhteissa. Sisälämpötilan keskiarvo pysyy vakaana vielä yli 20°C:n ulkolämpötiloissa ja sisätilan huippulämpötilat pysyvät alle 25°C:ssa.

Työn mahdolliset rajoitukset liittyvät tietomallin yksityiskohtiin sekä käytettyjen oletusten tarkkuuteen. Lisäksi simulointi ei kata kaikkia mahdollisia vaihtoehtoja ja skenaarioita. Tiettyjen ulkoisten tekijöiden, kuten markkinaolosuhteiden muutoksia tai laitteistojen häviöitä ei ole otettu huomioon. Tietomallin tuottamaan tietoon äärisäätiloissa, kuten yli +20°C ja alle -20°C lämpötiloissa pitää suhtautua varauksella. Simulaatioissa kertyi näillä alueilla vain muutamia tunteja mittausaineistoa.

5.2 Kehitysehdotukset ja jatkotutkimus

Piltin puutarhan energiatehokkuuden kehittämisen kannalta olisi hyvä luoda kokonaiskuva koko puutarhan nykyisestä energiankäytöstä, eli tehdä koko puutarhan kattava energiaselvitys. Projektien kumuloitumisen kannalta olisi tärkeää muodostaa kokonaiskuvan perusteella kokonaisvaltainen suunnitelma energiatehokkuuden kehittämiseksi.

Useat toimet, kuten kasvihuoneen jäähdytys, lämmön kausivarastointi tai kylmäntarpeen tuottava hiilidioksidilaitos saattavat yksittäisinä projekteina näyttäytyä energiatehokkuuden kannalta tai taloudellisesti kannattamattomina. Kuitenkin oikeassa järjestyksessä toteutettuna ne voisivat jopa kääntyä kannattaviksi osiksi kokonaisuutta. Esimerkiksi hiilidioksidilaitoksen tuottama hukkalämpö voitaisiin helposti ohjata kasvihuoneiden lämmitykseen, mikäli se olisi otettu huomioon energiankierrätysjärjestelmän suunnittelussa ja mitoituksessa.

5.2.1 Lämmönkulutuksen seuranta

Nykyisen automaatiojärjestelmän keräämän tiedon lisäksi olisi tärkeää saada tietoa myös lämmityspiirien paluueden lämpötiloista sekä piirien virtaamista. Näillä tiedoilla voitaisiin helposti ja luotettavasti selvittää lämmityspiirien tehot. Virtaamien mittausmahdollisuus onnistuisi yksinkertaisimmillaan linjasäätöventtiilien asentamisella. Virtaaman ja lämpötilaerojen mittaaminen edesauttaisi energiatehokkuusratkaisujen suunnittelua. Menoveden lämpötila on merkittävä tekijä lämmöntuotannon suunnittelussa, esimerkiksi yli 60°C lämpimän veden tuottaminen vaikuttaa merkittävästi tarvittavan lämpöpumpun ominaisuuksiin. Kattavalla kulutuksen seurannalla voitaisiin myös todentaa energiatehokkuustoimien vaikuttavuus.

Lämpötila-anturien lisääminen, linjasäätöventtiilien tai virtausmittarien lisääminen sekä mittausdatan kerääminen omaan tietokantaan uusista mittareista sekä tarvittavat tiedot nykyisestä automaatiojärjestelmästä voisi olla ensimmäinen projektikonaisuus.

5.2.2 Sähkömarkkinoilla toimiminen

Sähkömarkkinat ovat murroksessa ja etenkin pohjoismaiset reservimarkkinat kehittyvät nopeasti (Fingrid 2024). Erityisen kannattavaa onkin selvittää mahdollisuudet osallistua eri sähkömarkkinoille, kuten reservi- ja intraday-markkinoille. Jatkotutkimuksessa tulisi selvittää tuottoisin tapa käyttää sähkökattilaa sekä kartoittaa sähkökattiloiden kokoluokkien tarkoituksenmukaisuutta sähkömarkkinoiden hyödyntämisen näkökulmasta.

5.2.3 Sähkökattila ja vuorokausivarasto

Sähkökattilan lisääminen osaksi nykyistä lämmitysjärjestelmää sekä vanhojen öljysäiliöiden muuntaminen järjestelmän puskurivarastoiksi parantaisivat lämmitysjärjestelmän tehokkuutta ja joustavuutta. Lisäksi monipuolisempi

osallistuminen sähkömarkkinoille mahdollistuisi. Mitoituksessa tulee ottaa huomioon kohdan 5.2.2 mahdolliset huomiot eri sähkömarkkinoiden vaatimuksista.

Hukaton-hankeen tuloswebinaarissa Juuso Pesälä (2020) toteaa, etteivät porareikävarastot tai yleisemmällä tasolla lämmön varastoiminen maahan sovi vuorokausivarastointiin, vaan vesisäiliö soveltuu tarkoitukseen paljon paremmin. Käyttämättömien öljysäiliöiden soveltuvuus lämpövarastoksi tulee varmistaa, sekä selvittää parhaiten toimivat tavat lämpövarastojen käyttämiseen. Mahdollisuuksien mukaan veden kerrostumista ja varaston käyttäytymistä voisi mallintaa. Selvityksessä kannattaisi myös huomioida toimivuus osana kehitysvision mukaista kokonaisuutta.

5.2.4 Puutarhan kylmän tarve

Jäähdytyksen toteutuksen osalta koko puutarhan nykyinen kylmätarve tulisi kartoittaa ja tutkia mahdollisia kokonaisvaltaisia ratkaisuja, kuten keskitettyä kylmälaitosta, joka toimittaisi kylmän paitsi nykyisiin kylmätiloihin, myös mahdolliseen kasvihuoneen viilennykseen. Kartoitukseen kannattaisi sisällyttää selvitys lauhdutustilanteen kierrätysmahdollisuuksista ja jäähdytykseen liittyvistä tekijöistä, jotka edesauttavat energiatehokkuuden parantamista.

5.2.5 Viilennyksen toteutus

Viilennyksen taloudellisen kannattavuuden kannalta sen toteutustapa on varmasti yksi merkittävin tekijä, samalla kun viilennyksen käytännön toteutuksen mahdollisuudet ovat hyvin laajat. Keskeisiä tutkittavia asioita ovat, miten paljon jo olemassa olevaa lämmönjakojärjestelmää pystytään hyödyntämään. Lisäksi voisi kartoittaa muita mahdollisia viilennystapoja, kuten kasvihuoneeseen sijoitettuja lämmönsiirtimiä tai ilmanvaihtokanaviston rakentamista, jolloin jäähdytys toteutettaisiin muutamassa suuremmissa iv-koneissa.

5.2.6 Energian kausivarastointi

Edeltävien kohtien tutkimustulosten avulla voitaisiin tutkia tarkemmin energian kausivarastoinnin potentiaalia, soveltuvuutta sekä parhaiten soveltuvaa varastotyyppiä kohteeseen. Tutkimuksessa olisi hyvä kartoittaa kattavasti myös kausivarastointia mahdollisesti rajoittavat tekijät.

Lähteet

Autodesk 2023. Autodesk Revitin tärkeimmät ominaisuudet. Viitattu 1.12.2023

[Revit-ominaisuudet | Revit BIM -ohjelmiston ominaisuudet | Autodesk](#)

EQUA 2023. IDA Indoor Climate and Energy. Viitattu 1.12.2023. [IDA ICE -](#)

[Simulation Software | EQUA](#)

EQUA Simulation AB 2018. IDA indoor Climate and Energy Basic Course.

Power demand for multiple zones. Ohje.

Geologian tutkimuskeskus 2015. Maaperä 1:20 000/1:50 000 tietoaineisto.

Viitattu 15.11.2023 https://tupa.gtk.fi/paikkatieto/meta/maapera_20_50k.htm

Google Earth Pro 7.3.6.9750. 2023. Google LLC. Viitattu 15.11.2023

https://www.google.com/intl/fi_ALL/earth/about/

Hukaton-tuloswebinaarin tallenne 2020. Green Net Finland. Viitattu 5.3.2024.

<https://www.youtube.com/watch?v=f2SCpckIWj4>

IDA-ICE Indoor Climate and Energy 4.8 SP2. 2020. EQUA Simulation AB.

Viitattu 25.1.2024. <https://www.equa.se/fi/>

Keraplast 2023. PC-kennolevyt. Hinnasto. Orimattila: Kera Group Oy.

Viitattu 15.11.2023. <https://keraplast.fi/wp-content/uploads/2021/08/Hinnasto-PC-kennolevyt-1.2.2022-alv-24-ID-12852.pdf>.

Lutfi, E. ym. 2020. Hukkalämpökuormien hyödyntäminen, varastointi ja

kysyntäjouaston tehostaminen, Hukaton-hankkeen loppuraportti. Helsinki: Green

Net Finland. Viitattu 8.2.2024. [https://gnf.fi/wp-](https://gnf.fi/wp-content/uploads/2020/12/Hukaton_loppuraportti_Web.pdf)

[content/uploads/2020/12/Hukaton_loppuraportti_Web.pdf](https://gnf.fi/wp-content/uploads/2020/12/Hukaton_loppuraportti_Web.pdf)

MagiCAD 2023. BIM, Building Information Modelling. Viitattu 1.12.2023.

<https://www.magicad.com/fi/bim/>.

Makrolon 2017, Technical Manual, Makrolon multi UV. Tekninen esite.

Leverkusen: Convestro Deutschland AG.

Microsoft 2023. Shape the future of energy using real-time data in Power BI.

Viitattu 1.12.2023 [Energy Insights and Reporting | Microsoft Power BI](#)

Microsoft 2023. Microsoft Excel. Viitattu 1.12.2023 [Microsoft Excel Spreadsheet Software | Microsoft 365](#)

Motiva 2023. Kuka energiatodistuksen laatuu. Viitattu 25.1.2024 https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiatodistusneuvonta/mika_on_energiatodistus/kuka_energiatodistuksen_laatii

RT 10-11066. 2012 Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 1. Yleinen osuus. Ohjekortti. Helsinki: Rakennustieto Oy.

RT 10-11074. 2012 Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 9. Mallien käyttö taloteknisissä analyyseissä. Ohjekortti. Helsinki: Rakennustieto Oy.

RT 10-11075. 2012 Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 10. Energia-analyysit. Ohjekortti. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Sakari, T. 2021. Excel-pohjaisten työkalujen kehittäminen pumpuille ja kompressoreille. Insinööriyö (AMK). Konetekniikka. Helsinki : Metropolia Ammattikorkeakoulu. Viitattu 1.12.2023. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/169026/Sakari_Tomas.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Sandberg, E. 2014. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Ilmastointitekniikka osa 2. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Väylävirasto 2020. Mikä on tietomalli. Viitattu 1.12.2023. [Mikä on tietomalli? - Väylävirasto \(vayla.fi\)](#).

Wind and solar in the Nordic reserve markets- webinaarin tallenne 2024. Fingrid. Viitattu 16.2.2024. https://www.youtube.com/watch?v=LvDP73o_OSE

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 20.12.2017/1010

Synteettinen säämalli

Page 1 of 1

Säätiedosto

Indoor Climate and Energy 4.802 Käyttöoikeus: ICE40X:ICE40XL:ED192/J1N1G (Opetuslisenssi)

Objekti: Säätiedosto

Kuvaus:

Pvm.: 2023-01-01 - 2023-12-31

Tallennettu: 14.11.2023 8.18.52

	Muuttujat						
	Kuivalämpötila, Deg-C	Ilman suhteellinen kosteus, %	Suora säteily (normaalin suuntainen), W/m2	Hajasäteily vaakasuoralle pinnalle, W/m2	Tuulen nopeus, x-komponentti, m/s	Tuulen nopeus, y-komponentti, m/s	Pilvisuus, %
Tammikuu	-5.4	88.9	26.4	8.3	0.0	1.4	85.8
Helmikuu	-4.7	84.0	58.6	24.2	1.1	1.0	76.4
Maaliskuu	-3.1	80.7	95.9	51.8	0.7	1.7	72.6
Huhtikuu	3.5	72.0	139.8	86.3	0.1	0.7	65.0
Toukokuu	9.3	67.4	189.5	112.7	0.9	-0.3	61.1
Kesäkuu	13.3	71.0	182.0	132.3	-0.6	-0.3	61.4
Heinäkuu	16.2	74.0	189.5	122.5	1.1	0.6	60.1
Elokuu	15.1	79.2	136.0	101.2	0.5	-0.8	64.8
Syyskuu	10.5	84.1	119.9	63.6	-0.2	0.6	63.9
Lokakuu	4.8	88.2	78.9	32.2	-0.1	0.8	70.5
Marraskuu	-0.4	91.5	38.8	12.4	0.0	0.5	83.6
Joulukuu	-5.1	91.1	26.0	5.0	-0.7	0.3	75.1
keskiarvo	4.5	81.0	107.0	62.9	0.2	0.5	70.0
keskiarvo*8760.0 h	39857.8	709576.0	937417.0	551164.0	1992.7	4492.5	613040.0
min	-5.4	67.4	26.0	5.0	-0.7	-0.8	60.1
maks	16.2	91.5	189.5	132.3	1.1	1.7	85.8

Tietomallin variaatioiden tunnuspiirteet

Variantti	Tiedostoviite	Jäähdytysraja [°C]	Lämmitysraja [°C]	Lämmitysteho	Jäähdytysteho	Tuuletusluukut	Varjostusmaali / markiisi	Markiisin lämpötilaraja	Valaistuksen sähköteho	Painekertoimien esiasetus
1	0	23	21	rajaton	rajaton	-	-		70 kW	AIVC "Suojattu"
2	1	23	17	rajaton	rajaton	-	-		70 kW	AIVC "Suojattu"
3	2	18	17	rajaton	rajaton	-	-		70 kW	AIVC "Suojattu"
4	3	17	16	rajaton	rajaton	-	-		70 kW	AIVC "Suojattu"
5	4	21	17	rajaton	rajaton	-	-		70 kW	AIVC "Suojattu"
5.1	4.1	21	17	rajaton	500kW	-	-		70 kW	AIVC "Suojattu"
5.2	4.2	21	17	rajaton	500kW	PI säätö raja +23	-		70 kW	AIVC "Suojattu"
5.2.1	4.2.1	21	17	rajaton	500kW	PI säätö raja +23	kyllä	20	70 kW	AIVC "Suojattu"
5.3	4.6	21	17	rajaton	1000kW	PI säätö raja +23	kyllä	20	70 kW	AIVC "Suojattu"
5.3.1.1	4.6.012	21	17	rajaton	rajaton	PI säätö raja +23	kyllä	20	1,76 MW	AIVC "Suojattu"
5.3.1	4.6.015	21	17	rajaton	1000kW	PI säätö raja +23	kyllä	20	1,76 MW	AIVC "Suojattu"
5.3.2	4.6.02	21	17	rajaton	1000kW	PI säätö raja +23	kyllä	20	1,76 MW	AIVC "Suojaamaton"
5.3.2.1	4.6.025	21	17	rajaton	rajaton	PI säätö raja +23	kyllä		1,76 MW	AIVC "Suojaamaton"
5.3.3	4.6.50	21	17	rajaton	1000kW	PI säätö raja +23	kyllä	20	70 kW	AIVC "Suojaamaton"
5.4	4.7	21	17	rajaton	600kW	PI säätö raja +23	kyllä	20	70 kW	AIVC "Suojattu"
5.5	4.8	21	17	rajaton	rajaton	-	-		0 W	AIVC "Suojattu"
5.5.1	4.81	21	17	rajaton	rajaton	-	-		70 kW	AIVC "Suojattu"
5.6	4.99	21	17	rajaton	-	PI säätö raja +21	-		70 kW	AIVC "Suojattu"
5.6.1	4.99.1		17	rajaton	-	PI säätö raja +21	kyllä	20	70 kW	AIVC "Suojattu"

Variantti	Muuta	Lämmityksen tarve [MWh/a]	Jäähdytyksen tarve [MWh/a]	Ei lämmityksen tai jäähdytyksen tarvetta [h]	Lämpöökun käyttö (vain LTO) [MWh/a]	Lämpöökun käyttö (LTO + sähkö) [MWh/a]	Sähkövastuksen käyttö [MWh/a]
1		4029,6	897,9	327	284,6	277,3	1373,6
2		3444,2	759,1	986	189	184,7	1266,5
3		3472,9	1094,6	203	269,4	264,1	1227,3
4		3207,2	1161,3	260	253,7	249,5	1159,2
5		3454,2	887,6	720	217	212,5	1250,6
5.1		3441,4	660,3	743	211,9	207,2	1273,6
5.2		3441,7	650,9	734	217	212,3	1245,3
5.2.1		3445,4	637	723	219,6	212,1	1246,2
5.3		3448,4	790,9	714	221,2	216	1247,5
5.3.1.1	Vain käyttöaikataulu valaistuksen ohjauksessa	1948,2	2623,2	969	569,3	539,3	950
5.3.1		2428,2	786	1310	242,8	232,2	1227,4
5.3.2	Käyttöaikataulu ja asetusarvo	2526,9	793,6	1263	239,3	230,4	1245,2
5.3.2.1		2526,6	785,5	1322	238,4	229	1247
5.3.3		3564	797,5	724	221,6	216	1268,7
5.4		3446,3	697,6	723	220,7	215,5	1246,1
5.5		3515,5	855	699	214,1	209,3	1258,1
5.5.1	Kylmäsilat	3446,8	884,7	713	218,6	213,5	1246,9
5.6		3441,1	0	2646	0	0	1451,4
5.6.1		3444,7	0	2626	0	0	1454,7