



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Elviira Tuomi

Vertikaaliviljelyhallin energiatehokkuuskatsaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

5.5.2021

Tekijä Otsikko	Elviira Tuomi Vertikaaliviljelyhallin energiatehokkuuskatsaus
Sivumäärä Aika	30 sivua + 2 liitettä 05.05.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine	ympäristötekniikka
Ohjaajat	projektiasiantuntija, Jenni Merjankari
<p>Opinnäytetyön tilasi kaupunkiviljely-yritys Pinoa Foods Oy, joka vertikaaliviljelee mikroversoja. Projektin tavoite oli lisätä tuotantohallin energiatehokkuutta ja luoda yritykselle kustannussäästöjä vähentämällä ostoenergiatarvetta. Kustannus- ja energiatehokkuuden lisäksi pyrittiin varmistamaan mikroversojen optimaaliset kasvuolosuhteet. Projektin tavoitteisiin pääsemiseksi oli kartoitettava ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmän nykytila ja selvitettävä kiinteistön lisäeristysmahdollisuudet. Tämän pohjalta voitiin luoda ehdotus keinoista, joilla saavutettaisiin energia- ja kustannustehokkuusparannukset.</p> <p>Energiatehokkuus, eli energian tehokas käyttö voidaan suoraan verrannollistaa kustannustehokkuuteen. Teollisuuskiinteistön energiatehokkuutta voidaan lisätä monella tapaa. Ilmanvaihtolaitteiston tehokkuuden lisäksi kiinteistön eristyksen laatu ja määrä ovat keskeisiä tekijöitä ostoenergiatarpeen minimoimisessa.</p> <p>Projektin aikana laskettiin tuotantohallin lämmitysenergian nettotarve, jotta voitiin arvioida yrityksen lämmityksen vuosikustannukset. Lämmitysenergian nettotarve muodostuu kiinteistön tilojen, lämpimän käyttöveden ja ilmanvaihdon lämmityksen tarpeista. Kiinteistön tilojen lämmitysenergiatarve lasketaan johtumislämpöhäviöistä. Lämmitysenergian määrittämisessä selvisi, että yli 50 % lämmitystarpeesta muodostuu ilmanvaihdosta. Suuri luku johtuu Suomen pohjoisesta sijainnista ja on tavanomainen luku teollisuuskiinteistölle. Pinoa Foodsin ilmanvaihtolaitteet ovat hiljattain huolletut ja niissä on lämmöntalteenottojärjestelmä, mikä varmistaa hukkalämmön synnyn minimoimisen.</p> <p>Noin 14 % koko lämmitystarpeesta muodostuu ikkunoiden ja ovien läpi johtuvasta lämpöhäviöstä. Lisäeristys selvityksessä kävi ilmi, että jo pienillä investoinneilla voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä. Tämä johtaa suoraan ostoenergiatarpeen pienenemiseen ja lämmitysjärjestelmän kuormituksen kevenemiseen. Projektin aikana selvisi, ettei tämän hetkinen lämmitysjärjestelmän kokonaislämmitysteho ole riittävä nykyisen käyttötarkoituksen näkökulmasta.</p>	
Avainsanat	vertikaaliviljely, energiatehokkuus, eristys, lämmitysenergian nettotarve, ilmalämpöpumppu, kustannustehokkuus

Author Title	Elviira Tuomi Energy Efficiency in Vertical Production hall
Number of Pages Date	30 pages + 2 appendices 5 May 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Program	Energy and Environmental Engineering
Professional Major	Environmental Engineering
Instructors	Jenni Merjankari, Project Specialist
<p>The thesis was commissioned by the urban farming company Pinoa Foods Oy, which vertically cultivates micro greens. The aim of the project was to increase the energy efficiency of the production hall and create cost savings for the company by reducing the need for purchased energy. In addition to cost and energy efficiency, the aim was to ensure optimal growth conditions for the micro greens. To achieve the goals of the project, the current state of the ventilation and heating system was studied and the possibilities of additional insulation of the property was determined. On this basis, a proposal could have been made for ways to achieve energy and cost efficiency improvements.</p> <p>Energy efficiency, i.e., the efficient use of energy, can be directly compared to cost efficiency. The energy efficiency of an industrial property can be increased in many ways. In addition to the efficiency of ventilation equipment, the quality and quantity of insulation in a property are key factors in minimizing the need for purchased energy.</p> <p>During the project, the net heating energy demand of the production hall was calculated to estimate the annual heating costs of the company. The net need for heating energy consists of the heating needs of the premises, domestic hot water, and ventilation. The heating energy demand of the premises of the property is calculated from the conduction heat losses. In determining the heating energy, it was found that more than 50% of the heating demand consists of ventilation. The large number is due to Finland's northern location and is a standard figure for industrial property. Pinoa Foods' ventilation units have been recently repaired and have a heat recovery system to ensure that waste heat is minimized.</p> <p>About 14% of the total heating demand consists of heat loss through windows and doors. The additional insulation study showed that even with small investments, significant savings can be achieved. This directly leads to a reduction in the need for purchased energy and a reduction in the load on the heating system. During the project, it became clear that the current total heating capacity of the heating system is not sufficient for the current usage of the property.</p>	
Keywords	Vertical Cultivation, Energy Efficiency, Insulation, Net Heating Energy Demand, Heat Pump, Cost Efficiency

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kartoitus ja lähtötilanne	3
2.1	Teollisuuskiinteistöjen energiatehokkuus	5
2.2	Rakennuksen ilmanvaihto	6
2.3	Rakennuksen lämmitys	7
2.4	Nykyinen sähkönkulutus ja lämmitystarve	8
3	Lämmitystarpeen mitoittaminen	8
3.1	Johtumishäviöiden laskenta	9
3.2	Vuotoilman laskenta	12
3.3	Ilmanvaihdon energiantarve	13
3.4	Tulo- ja korvausilman lämpöhäviö	15
3.5	Lämpimän käyttöveden lämpöhäviön laskeminen	17
4	Kiinteistön lämpökuormat	18
4.1	Ihmisten aiheuttama lämpökuorma	18
4.2	Auringon säteilyenergia	18
4.3	Lämpökuorma sähkölaitteista	19
5	Lämmitysenergian nettotarve	20
6	Vaihtoehtoiset lämmitysmuodot	21
6.1	Tuloilmaventtiilit	21
6.2	Ilmalämpöpumppu	22
6.3	Maalämpö	23
6.4	Aurinkopaneelit	24
7	Lisäeristys selvitys	25
7.1	Ikkunoiden peittäminen eristelevyillä	26
7.2	Nosto-oven lisäeristys	27

8	Pohdintaa ja johtopäätökset	28
	Lähteet	30
	Liitteet	
	Liite 1. Eistemateriaalit, kustannukset	
	Liite 2. Eristyksen kustannussäästöt (Excel)	

Lyhenteet

ILP	Ilmalämpöpumppu
LTO	Lämmöntalteenotto
RakMK	Rakentamismääräyskokoelma

1 Johdanto

Opinnäytetyö tehdään vertikaaliviljely-yritys Pinoa Foodsille. Pinoa Foods on vuonna 2018 perustettu start-up yritys, joka vertikaaliviljelee mikroversoja ja syötäviä kukkia kuluttajille ja ravintoloille. Vallitsevan pandemian pakottamana yritys on keskittynyt kuluttajamarkkina-alueen kasvattamiseen. Pinoa Foods viljelee tällä hetkellä kolmea eri versoa, jotka ovat herne, auringonkukka ja retiisi.

Pinoa Foods kehittää omaa vertikaalikasvatusyksikköään, jossa kasvatusalustat liikkuvat hisseillä ja kastelu ja valonsäätely on automatisoitu ja etäohjattava. Toistaiseksi kasvatusalustoja siirrellään ja käsitellään manuaalisesti.

Projektin tavoitteena on luoda yritykselle kustannussäästöjä ja lisätä tuotantohallin energiatehokkuutta. Ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmä on tarkoitus suunnitella niin, että se luo hyvät kasvuolosuhteet versoille. Versot tarvitsevat stabiilin kasvulämpötilan, -kosteuden ja ilmavirtaa saavuttaakseen optimaalisen kasvun.

Projektin alussa selvitetään tuotantohallin lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmän tämän hetkinen tila. Tutkimusvaiheessa otetaan selvää nykyisestä lämmityksen sähkönkulutuksesta ja hukkalämpövirroista. Projektin aikana selvitetään ilmanvaihtokoneiden toimivuus ja katsotaan, että lämmöntalteenottoa käytetään oikein. Tutkimuksen pohjalta on tarkoitus luoda ehdotus uudesta, energiatehokkaammasta lämmitysjärjestelmästä. Energiatehokkuus kulkee käsi kädessä kustannustehokkuuden kanssa ja projektin tarkoitus on esittää kustannussäästöarvioita, joita mahdollisesti syntyy lämmitysjärjestelmän uusimisen johdosta.

Projektin alussa kartoitetaan tuotantohallin rakennusmateriaalit ja nykyinen eristyksen taso. Tarkoituksena on selvittää lisäeristysmahdollisuudet hukkalämmön torjumiseksi. Mahdollisia suuria hukkalämpövirtojen lähteitä ovat tuotantohallin ikkunat ja kaksi suurta nosto-ovea. Tässä osuudessa selvitetään, voiko lisäeristyksen avulla luoda kustannussäästöjä lämmityskuluihin.

Mikroversojen viljely vaatii oikeanlaiset kasvuolosuhteet. Optimaalinen lämpötila niiden kasvulle on 23 °C. Ilmankosteuden on hyvä pysyä lähellä 60 %. Normaali sisäilmankosteus on luokkaa 40 %. Verson tie siemenestä valmiiksi tuotteeksi kestää lajikkeesta riippuen noin kymmenen päivää. Prosessi alkaa siementen liotuksesta ja kylvöstä. Kosteaa hammppukuitumatto asetetaan kasvualustalle. Maton kosteusaste vaihtelee versokohtaisesti. Siemenet kylvetään suoraan matoille ja niiden päälle asetetaan kansi ja paino. Kasvualustat siirretään niin sanottuun uuniin itämisvaiheen ajaksi, joka kestää noin kuusi päivää.

Itäneet versot siirretään kasvuyksiköihin syklin loppuajaksi. Tässä vaiheessa ilmankosteus, lämpötila ja ilmavirta ovat oleellisia tekijöitä, joita tulee monitoroida ja pitää tasaisina. Tällä hetkellä Pinoan kasvatusyksikkö on seitsemänkerroksinen, mutta tulevaisuudessa tähdätään lisäämään kerroksia automaation avulla. Toistaiseksi kasvatusalustoja siirrellään ja käsitellään manuaalisesti.

Koska yritys on toiminut nykyisissä tiloissa projektin alkaessa vasta muutaman kuukauden, lämmityskustannusdataa ei ole tarjolla kattavasti. Tästä syystä lämmityksen nettotarve selvitetään laskennallisesti. Tähän tarvitaan tiedot kiinteistön rakennetyypistä, rakennuksen pohjapiirustukset ja leikkaus- ja julkisivukuvat. Lämmitysenergian nettotarvelaskuissa käytetään referenssinä vuoden 2013 Ilmatieteen laitoksen keskilämpötiladataa.

Vertikaaliviljely mahdollistaa viljelyn siirtämisen lähemmäs kuluttajaa, koska kerrosviljelmät säästävät pinta-alaa perinteiseen peltoviljelyyn verrattuna. Kaupunkiviljelyksi nimetty viljelymuoto on lisääntynyt 2000-luvulla myös Suomessa. Kaupunkiviljely mahdollistaa ruoantuotannon ilmastosta ja kasvukauden pituudesta riippumatta, koska tuotanto tapahtuu sisätiloissa. Kontrolloidussa sisätiloissa tapahtuvasta viljelystä ei vapaudu kemikaaleja ympäristöön.

Ruuantuotannolla on merkittävä vaikutus ilmastonmuutokseen. Se on globaalisti toiseksi suurin lähde kasvihuonekaasuille energiasektorin jälkeen, muodostaen 11 % koko maapallon kasvihuonepäästöistä (1).

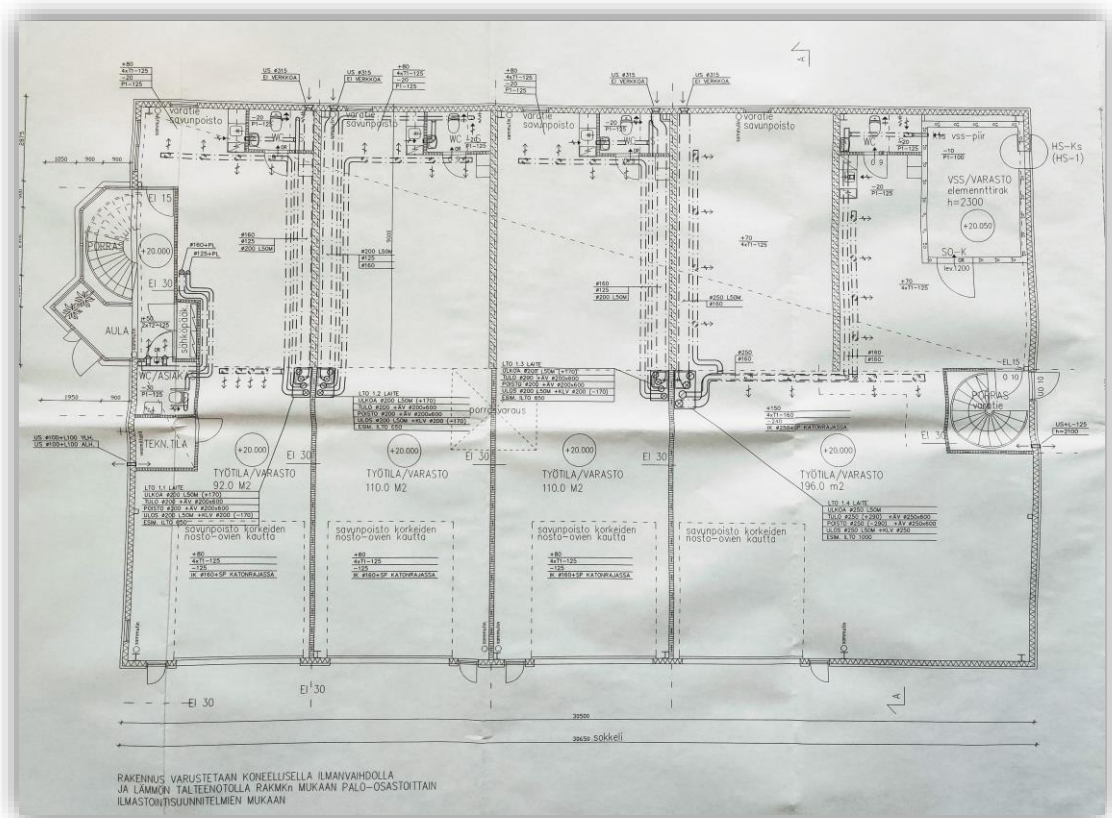
Vertikaaliviljely on askel kohti puhtaampaa ruoantuotantoa. Vertikaaliviljelyn ansiosta vapaaksi jäänyt pinta-ala voidaan hyödyntää muussa toiminnassa ja viljelyn siirtyessä kaupunkieihin lähelle kuluttajaa, logistiikan aiheuttamat päästöt vähenevät huomattavasti.

Kaupunkiviljely on viljelymenetelmä, joka luo uusia kiertotalousratkaisuja uusien tuotantoteknologioiden avulla (2).

2 Kartoitus ja lähtötilanne

Rakennus, jossa Pinoa Foods toimii (kuva 1.), on rakennettu vuonna 2006 ja siinä on kaksi erillistä tuotantotilaa, joista Pinoa Foods toimii toisessa. Tästä eteenpäin puhuttaessa tuotantohallista, tarkoitetaan Pinoa Foodsin vuokraamaa rakennuksen puolikasta. Näin ollen tuotantohallin neljästä seinästä kolme on kylmiä ulkoseiniä ja yksi lämmin väliseinä. Alakerran pinta-ala on 352 m² ja tämä tila toimii tuotantotilana. Yläkerrassa on erillinen toimistotila, joka rajataan projektin ulkopuolelle.

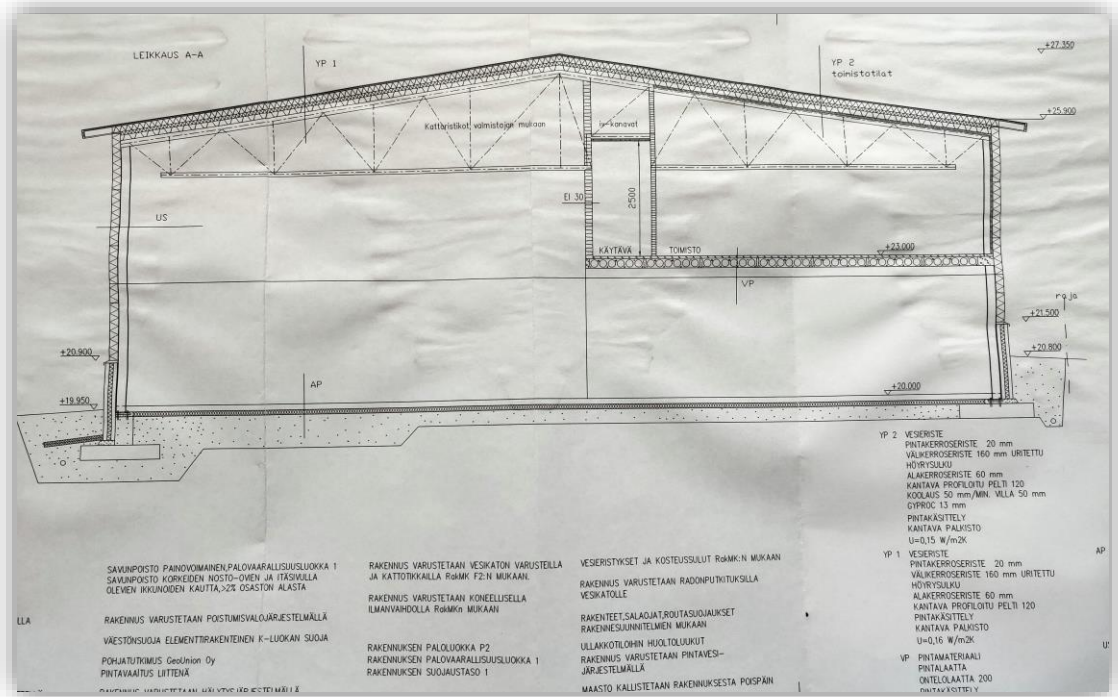
Tuotantohallissa on kaksi isoa nosto-ovea, joiden yhteenlaskettu pinta-ala on 41,28 m². Nosto-oven U-arvo on $1,51 \frac{W}{m^2K}$. Lisäksi tilassa on kolmetoista ikkunaa, joiden pinta-ala on yhteensä 13,1 m² ($U= 1,4 \frac{W}{m^2K}$) ja kolme ulko-ovea, joilla on sama U-arvo kuin ikkunoilla.



Kuva 1. Rakennuksen pohjapiirustus

Rakennuksen A-leikkauksessa (kuva 2.) esitetään rakennuksen rakennusmateriaalit. Ulkoseinät ovat teräsrunkoista Paroc-panel-rakennuselementtiä, jonka paksuus on 175 mm ja U-arvo on $0,25 \frac{W}{m^2K}$. Paroc-rakennuselementit ovat kivivillaytimisiä kevytsandwichelementtejä. Elementin pinnat ovat teräsohutlevyä Paroc-structural-kivivillaa. (8).

Katon rakenne selviää rakennuksen A-leikkauksesta (kuva 2.). Katon lisäeristystutkimusta ei sisällytetä opinnäytetyöhön. Rakennuksen katolla (kuva 6.) on Fortumin lahjoittamat aurinkopaneelit, jotka tuottavat Pinoa Foodsille noin 15 MWh sähköä vuodessa.



Kuva 2. Rakennuksen A-leikkaus

2.1 Teollisuuskiinteistöjen energiatehokkuus

Energiatehokkuudesta puhuttaessa tarkoitetaan energian tehokasta käyttöä ilmastomuutosta kiihdyttäviä päästöjä vähentäen. Energiatehokkuus myös lisää kustannustehokkuutta. (3). Keskeisiä asioita ovat myös energian riittävydestä huolehtiminen ja energiaomavaraisuus. Energiasäästöillä voidaan edistää uusiutuvien energiamuotojen käyttöä. (4).

Pohjoisen sijaintinsa takia yli neljännes Suomen lämpöenergiankulutuksesta syntyy teollisuuskiinteistöjen lämmityksestä. Tämän johdosta energiatehokkuuden parantamiseen tulisi kiinnittää huomiota ja sen edistämiseksi kannattaisi tehdä investointeja. (5).

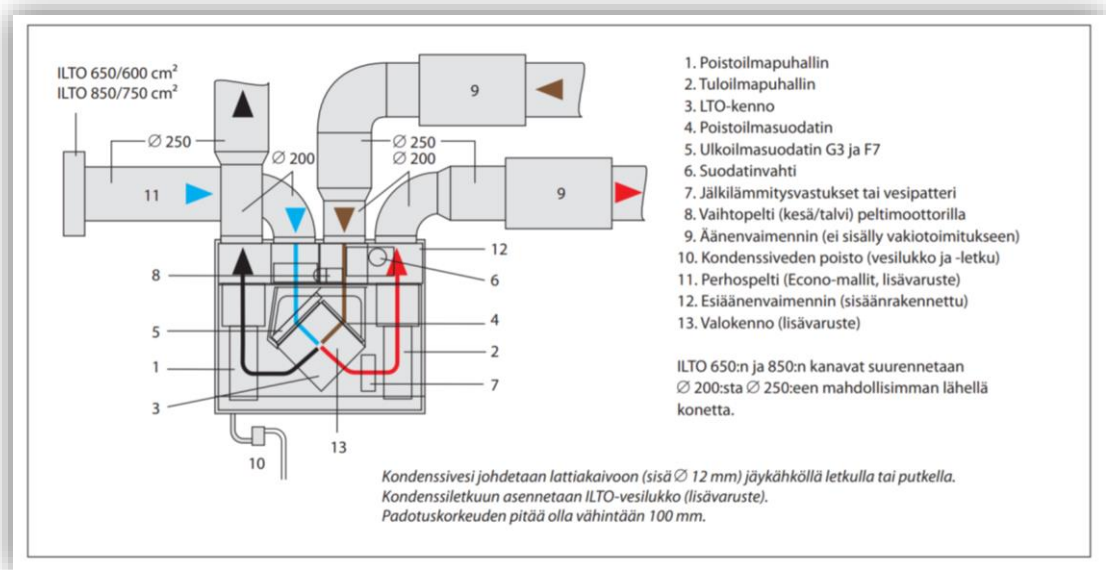
Teollisuuskiinteistöjen uusia ratkaisuja suunniteltaessa on tärkeää noudattaa rakennusmääräyksiä ja -suosituksia. Rakennusmääräyksiä parannellaan jatkuvasti, jotta tulevaisuuden rakentaminen olisi energiatehokkaampaa. Keskeistä tavoitteeseen

pääsemiseksi on vähentää ostoenergian tarvetta. Tähän suuntaan ohjaavat esimerkiksi suoran sähkölämmityksen korvaaminen tehokkaammilla ratkaisuilla ja hukkalämpövirtojen kartoitus ja minimointi lisäeristämällä. Energiatehokkuutta voidaan lisätä ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmien tarpeenmukaisesti ajoitetulla käytöllä.

2.2 Rakennuksen ilmanvaihto

Illmanvaihtojärjestelmä tuo kiinteistöön raikasta ulkoilmaa. Samalla poistettaessa kiinteistöstä jäteilmaa, ilmanvaihdosta aiheutuu lämpöhäviötä. Ilmanvaihdon lämmöntalteenoton eli LTO:n tarkoitus on ottaa osa poistoilman mukana kulkeutuvasta lämpöenergiasta talteen, esilämmittämällä kiinteistöön tuotavaa ulkoilmaa.

Pinoa Foodsin tuotantohallissa on kaksi ilmanvaihtolaitetta, joissa molemmissa on lämmöntalteenottojärjestelmä. Kuvassa 4 on esitetty ILTO 650-ilmanvaihtolaitteen rakenne ja ominaisuudet. Laite sijaitsee alakerran kukkahuoneen peräseinällä.



Kuva 3. ILTO 650 (16).

Tuotantohallin toinen ilmanvaihtolaite Enervent LTR-7 sijaitsee pakkaushuoneen peräseinällä. Sen maksimiteho on $389 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}} / 200 \text{ Pa}$ ja puhallinteho 545 W.

Ilmanvaihto toimii hyvin ja on rakennusmääräysten mukainen. Molemmat ilmanvaihtokoneet on huollettu äskettäin. Tästä johtuen ilmanvaihdon uusimiselle ei ole tarvetta ja se rajataan ulos projektista. Opinnäytetyössä keskitytään lämmitysjärjestelmän suunnitteluun ja lisäeristysmahdollisuuksien selvittämiseen.

2.3 Rakennuksen lämmitys

Hallin lämmitys tapahtuu tällä hetkellä kahdella ilmalämpöpumpulla, kahdella lämpöpuhaltimella, joista toinen todettiin myöhemmin rikkiäiseksi ja muutamalla liikuteltavalla sähköpatterilla. Lisäksi käytössä on yksi ilmastointilaite kukkahuoneen satunnaiseen viilennykseen.

Suoran sähkölämmityksen kustannukset ovat kalliita, mutta alkuinvestointina se on edullinen. Suora sähkölämmityksen etuna on sen tehokkuus ja nopea reagointi säätömuutoksiin. Sähkölämmitys on hyvä vara- tai lisälämmitysjärjestelmä. Itsenäisenä lämmitysjärjestelmänä se voi tulla yllättävän kalliiksi. (5)

Tuotantohallin lämmittämiseen käytetään tällä hetkellä viittä liikuteltavaa sähköpatteria, jotka ovat teholtaan 2 000 W. Toimivan DEVITemp-lämpöpuhaltimen teho on 9 000 W. Pinoa Foodsin ilmalämpöpumput ovat Mitsubishin valmistamia mallin MSZ-SF35VE ilmalämpöpumppuja. Tarkemmat tekniset tiedot ilmalämpöpumpuista löytyvät kuvasta 4.

TEKNISET OMINAISUUDET			
Malli		MSZ-SF25VEH	MSZ-SF35VEH
Sisäyksikkö Ulkoyksikkö		MSZ-SF25VE MUZ-SF25VEH	MSZ-SF35VE MUZ-SF35VEH
Lämmitysteho, nimellis (kW)	(min.–maks.)	3,2 (1,0 - 4,1)	4,0 (1,3 - 4,6)
Jäähdytysteho, nimellis (kW)	(min.–maks.)	2,5 (0,9 - 3,4)	3,5 (1,1 - 3,8)
SCOP		4,3	4,3
SEER		7,6	7,2
Energiatohokkuusluokka, lämm./jäähd.		A+ / A++	A+ / A++
Ilmavirta (m ³ /h)		210 - 246 - 402 - 492 - 618	210 - 246 - 402 - 498 - 660
Äänenpaine sisäyksikkö dB(A)	matala - korkea	21 - 24 - 34 - 39 - 45	21 - 24 - 34 - 39 - 46
Äänenpaine ulkoyksikkö dB(A) maks.	jäähd. - lämm.	47 - 48	49 - 50
Ympäristöystävällinen ja energiatehokas kylmäaine		R410A	R410A

Kuva 4. Ilmalämpöpumppujen tekniset ominaisuudet (17).

2.4 Nykyinen sähkönkulutus ja lämmitystarve

Pinoa Foods on toiminut nykyisissä tuotantotiloissa maaliskuusta 2020 alkaen, joten sähkönkulutusdataa on kertynyt vasta muutamalta kuukaudelta. Huhti-, touko- ja kesäkuun sähkönkulutus on sähkölaskun mukaan 17 700 kWh. On kuitenkin otettava huomioon, että kevät- ja kesäkuukausina lämmitystarve on pienempi ja toisaalta talvikuukausina lämmitystarve voi kohota. Koska vuotuista sähkönkulutusdataa ei ole saatavilla, se selvitetään laskemalla. Lämmitysenergian nettotarpeen laskeminen esitetään luvuissa 3 ja 4. Tulos on suuntaa antava laskennallinen arvo, jonka avulla voidaan laskea kustannussäästöskenaarioita vaihtoehtoisille lämmitysjärjestelmille.

3 Lämmitystarpeen mitoittaminen

Lämmitysenergian nettotarve muodostuu kiinteistön tilojen, lämpimän käyttöveden ja ilmanvaihdon lämmityksen tarpeista. Kiinteistön tilojen lämmitysenergiatarve lasketaan johtumislämpöhäviöistä. Luvussa 3.1 esitetään lämpöhäviöiden laskeminen, joihin

vaikuttaa rakennusvaipan osien pinta-alat, materiaalien U-arvot, rakennuksen kylmäsillat ja vuotoilmavirta. (6).

Huomattavaa on, ettei koko lämmitysenergian tarvetta täydy tuottaa lämmityslaitteistolla. Osa lämmitysenergian kulutuksesta saadaan muiden laitteiden häviöenergiasta ja mm. auringon säteilystä, mutta siihen palataan kappaleessa 4. (7).

Rakenteen lämmöneristyskyvystä kertoo sen U-arvo eli lämmönläpäisykerroin. Sen yksikkö $\frac{W}{m^2K}$ kertoo, kuinka paljon lämpötehoa siirtyy materiaalin läpi neliometriä kohti, kun materiaalin yli on 1 K:n lämpötilaero. (5).

3.1 Johtumishäviöiden laskenta

Tuotantohallin lämmityksen tarve lasketaan rakennusvaipan johtumishäviöiden avulla. Rakennusvaipan rakenteista johtuu lämpöä ulos ja siitä käytetään myös termiä lämpöhäviö. Rakennusvaipalla tarkoitetaan rakennuksen niitä rakenneosia, jotka erottavat rakennuksen lämpöeristetyt tilat maaperästä, ulkoilmasta ja kylmistä tiloista. Näitä rakenneosia ovat ulkoseinät ja katto, ovet, ikkunat ja lattiat sekä kylmäsillat. Kylmäsillat ovat rakennuksen nurkkaliitoskohtia.

Rakennusvaipan lämpöhäviö lasketaan kaavalla 1:

$$Q_{\text{joht}} = Q_{\text{ulkoseinä}} + Q_{\text{yläpohja}} + Q_{\text{alapohja}} + Q_{\text{kylmäsillat}} + Q_{\text{ikkuna}} + Q_{\text{ovi}} + Q_{\text{muu}} \quad (1)$$

jossa,

Q_{joht} on rakennusvaipan lämpöhäviö [kWh], $Q_{\text{ulkoseinä}}$ on ulkoseinän lämpöhäviö [kWh], $Q_{\text{yläpohja}}$ on yläpohjan lämpöhäviöt [kWh], Q_{alapohja} on alapohjan lämpöhäviö [kWh], $Q_{\text{kylmäsillat}}$ on lämpöhäviö kylmäsilloista [kWh], Q_{ikkuna} on ikkunoiden lämpöhäviö [kWh], Q_{ovi} on ovien lämpöhäviö [kWh] ja Q_{muu} on lämpöhäviö poikkeavaan tilaan [kWh].

Tuotantohallissa on kolme ulkoseinää ja yksi jaettu väliseinä. Tehdään oletus, että naapurikiinteistössä on sama sisälämpötila ja jätetään Q_{muu} pois yhtälöstä.

Rakennusvaipan tietyn rakennuksen osan lämpöhäviö lasketaan kaavalla 2:

$$Q_{rak.osa} = \frac{UA(T_s - T_u)\Delta t}{1\,000} \quad (2)$$

jossa,

$Q_{rak.osa}$ on rakennusosan lämpöhäviö [kWh], U on rakennusosan U -arvo [W/m^2K], A on rakennusosan pinta-ala [m^2], T_s on lämpötila sisällä [K], T_u on lämpötila ulkona [K] ja Δt on ajanjakson pituus [h].

Edelleen lämpöhäviö kylmäsilloista lasketaan kaavalla 3:

$$Q_{kylmäsillat} = \frac{\sum l_k \lambda_k (T_s - T_u) \Delta t}{1\,000} \quad (3)$$

jossa,

$Q_{kylmäsillat}$ on kylmäsiltojen lämpöhäviö [kWh], l_k on kylmäsilan viivamainen pituus [m], λ_k on kylmäsilan lisäkonduktanssi [$W/(mK)$], T_s on lämpötila sisällä [K], T_u on lämpötila ulkona [K] ja Δt on ajanjakson pituus [h].

Ulkoseinien lämpöhäviö $Q_{ulkoseinät}$ koostuu kolmen ulkoseinän lämpöhäviöiden summasta. Annetaan takaseinälle nimeksi seinä 1, päädylle nimeksi seinä 2 ja etuseinälle nimeksi seinä 3. Seinän 1 pinta-alaa kuvaa symboli A_1 ja niin edelleen. Seinän U -arvo on $0,25 W/m^2K$. Seinien pinta-alasta poisluetetaan ikkunoiden ja ovien pinta-alat. Laskuissa käytetään ilmatieteenlaitoksen Helsinki-Vantaan lentoaseman mittauspisteen vuoden 2013 keskilämpötiloja, koska se on tuotantohallia lähin mittauspiste.

Lämpöhäviö lasketaan jokaiselle kuukaudelle erikseen ja näiden summasta saadaan vuoden kokonaislämpöhäviö.

Esimerkiksi maaliskuussa 2013 lämpöhäviö seinästä 1 lasketaan kaavalla 2 ja sille saadaan arvo 412 kWh. Vuotuinen lämpöhäviö seinälle 1 saadaan laskemalla vuoden jokaisen kuukauden lämpöhäviöiden summa ja se on 2700 kWh. Kun sama laskutoimitus suoritetaan kaikille kolmelle ulkoseinälle, saadaan ulkoseinien vuotuiseksi kokonaislämpöhäviöksi 7 220 kWh.

Yläpohjan lämpöhäviöllä tarkoitetaan katon läpi johtuvaa lämpöä. Katon U-arvo on 0,16 W/m²K ja pinta-ala A on 352 m². Lämpöhäviö lasketaan jokaiselle kuukaudelle erikseen ja näiden summasta saadaan vuoden kokonaislämpöhäviö, aivan kuten seinienkin kohdalla.

Esimerkiksi maaliskuun lämpöhäviö yläpohjasta saadaan laskettua kaavalla 2 ja se on 1240 kWh. Vuoden kokonaislämpöhäviöksi yläpohjalle saadaan 8 121 kWh.

Alapohjan eli lattian lämpöhäviötä laskiessa tulee ottaa huomioon maaperän vuotuinen keskilämpötila (kaava 5) ja se lasketaan kaavalla 4.

$$Q_{alapohja} = \frac{UA(T_s - T_{maa2013})\Delta t}{1\,000} \quad (4)$$

jossa,

$$T_{maa2013} = T_{u2013} - \Delta T_{maa2013} \quad (5)$$

ja jossa,

$T_{maa2013}$ on maaperän vuotuinen keskilämpötila [K], T_{u2013} on ulkoilmaston vuoden keskilämpötila [K] ja $\Delta T_{maa2013}$ on maaperän ja ulkoilman keskilämpötilaero [K].

Maaperän ja ulkoilmalämpötilan keskilämpötilan erona voidaan käyttää arvoa 5 °C (12). Alapohjan vuotuiseksi lämpöhäviöksi saadaan 8 865 kWh.

Seuraavaksi lasketaan $Q_{\text{kylmäsillat}}$ yläpohjan ja ulkoseinän, alapohjan ja ulkoseinän, rakennuksen nurkkien ja ikkunoiden ja ovien liitosten summasta. Lämpöhäviö lasketaan erikseen jokaiselle liitokselle ja jokaiselle kuukaudelle ja näiden summasta saadaan vuotuinen kokonaislämpöhäviö kylmäsilloille.

Laskuissa käytetään liitosten ohjearvoja lisäkonduktanssille RakMK:n D5: 2015-ohjeen mukaisesti.

Yläpohjan ja ulkoseinän liitosten lämpöhäviö maaliskuussa lasketaan kaavalla 3 ja sille saadaan arvoksi 370 kWh. Samaa yhtälöä käyttäen saadaan yläpohjan ja ulkoseinän liitosten lämpöhäviöksi 2 422 kWh. Sama lasketaan edelleen kaikille kylmäsilloille ja niiden summaksi saadaan yhteensä 8 863 kWh.

Nosto-ovien ja ulko-ovien yhteenlaskettu pinta-ala on 45,89 m² ja lämmönläpäisykerroin $U = 1,51 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ovien lämpöhäviö lasketaan jokaiselle kuukaudelle erikseen ja näiden summasta saadaan vuoden kokonaislämpöhäviö.

Esimerkiksi maaliskuussa lämpöhäviö ovista on 1 526 kWh ja se lasketaan kaavalla 2. Vuotuinen lämpöhäviö ovista on yhteensä 9 991 kWh.

Ikkunoiden yhteenlaskettu pinta-ala on 13,1 m² ja U-arvo on 1,4 W/m²K. Tehdään sama tarkastelu tuotantohallin ikkunoille ja saadaan niiden vuotuiseksi lämpöhäviöksi 2 644 kWh.

Edellä lasketuista rakennuksen osien lämpöhäviöiden summasta saadaan rakennusvaipan vuotuinen kokonaislämpöhäviö, joka on yhteensä 46 MWh.

3.2 Vuotoilman laskenta

Kiinteistöjen rakenteissa on aina joitain epätiiviyksiä, joista johtuvan vuotoilman lämmitykseen tarvittava energiamäärä lasketaan kaavalla 6.

$$Q_{\text{vuotoilma}} = \frac{\rho_i c_{pi} q_{v,\text{vuotoilma}} (T_s - T_u) \Delta t}{1\,000} \quad (6)$$

jossa,

$Q_{\text{vuotoilma}}$ on vuotoilman lämmitysenergia [kWh], ρ_i on ilman tiheys [kg/m^3], c_{pi} on ilman ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kgK})$], $q_{v,\text{vuotoilma}}$ on vuotoilmavirta [m^3/s], T_s on lämpötila sisällä [K], T_u on lämpötila ulkona [K] ja Δt on ajanjakson pituus [h].

Yhtälössä oleva vuotoilmavirta lasketaan kaavalla 7.

$$q_{v,\text{vuotoilma}} = \frac{q_{50}}{3600x} A_{\text{vaippa}} \quad (7)$$

jossa,

$q_{v,\text{vuotoilma}}$ on vuotoilmavirta [m^3/s], q_{50} on ilmanvuotoluku rakennusvaipasta [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$], 3600 on laatumuunnoksen kerroin m^3/s :ksi [-], x on rakennuksen kerroslukukerroin (2 kerrosta=24) [-] ja A_{vaippa} on rakennusvaipan pinta-ala [m^2].

Ilmanvuotoluku rakennusvaipasta q_{50} arvona voidaan käyttää 4 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$, jos ilmanpitävyyttä ei tiedetä. (12).

Ensin lasketaan vuotoilmavirta kaavalla 7 ja sen arvoksi saadaan 0,0446 m^3/s . Tämän jälkeen voidaan laskea vuotoilman lämmitysenergia kaavalla 6 jokaiselle kuukaudelle erikseen. Esimerkiksi maaliskuussa vuotoilman lämmitykseen tarvitaan 1 265 kWh energiaa. Vuotuinen vuotoilman lämmitysenergia on yhteensä 8 283 kWh.

3.3 Ilmanvaihdon energiantarve

Ilmanvaihtokoneessa lämmitettävän tuloilman tarvitsema energiantarve eli ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarve lasketaan jokaiselle ilmanvaihtokoneelle erikseen. Tämä lasketaan kaavalla 8.

$$Q_{iv,n} = \frac{t_d t_v \rho_i c_{pi} q_{v,tulo} \left((T_{sp} - \Delta T_{\text{puhallin}}) - T_{lto} \right) \Delta t}{1000} \quad (8)$$

jossa,

$Q_{iv,n}$ on lämmitysenergian nettotarve [kWh], t_d on ilmanvaihdon käyntiaikasuhde, vrk [h/24h], t_v on ilmanvaihdon käyntiaikasuhde, vk [vrk/7vrk], ρ_i on ilman tiheys [kg/m^3], c_{pi} on ilman ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kgK})$], $q_{v,tulo}$ on tuloilmavirta [m^3/s], T_{sp} on sisäänpuhalluslämpötila [K], $\Delta T_{puhallin}$ on lämmön nousu puhaltimessa [K], T_{lto} on LTO:n jälkeinen lämpötila [K] ja Δt on ajanjakson pituus [h].

Suurissa ilmanvaihtokoneissa lämmön nousua puhaltimissa voidaan oletusarvona käyttää 0,5 °C. Ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarpeen laskemiseksi täytyy selvittää LTO:n jälkeinen lämpötila ja se lasketaan kaavalla 9.

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

jossa,

T_{lto} on LTO:n jälkeinen lämpötila [K], T_u on lämpötila ulkona [K], φ_{lto} on talteenotettu teho LTO:lla [W], t_d on Ilmanvaihdon käyntiaikasuhde, vrk [h/24h], t_v on ilmanvaihdon käyntiaikasuhde, vk [vrk/7vrk], ρ_i on ilman tiheys [kg/m^3], c_{pi} on ilman ominaislämpökapasiteetti [J/kgK] ja $q_{v,tulo}$ on tuloilmavirta [m^3/s].

LTO:n jälkeisen lämpötilan laskemiseksi täytyy ensin selvittää talteenotettu teho LTO:lla ja se lasketaan kaavalla 10.

$$\varphi_{lto} = \eta_{a,lto} t_d t_v \rho_i c_{pi} q_{v,poisto} (T_s - T_u) \quad (10)$$

jossa,

φ_{lto} on talteenotettu teho LTO:lla [W], $\eta_{a,lto}$ on LTO:n vuosihyötysuhde [-], t_d on ilmanvaihdon käyntiaikasuhde, vrk [h/24h], t_v on ilmanvaihdon käyntiaikasuhde, vk

[vrk/7vrk], ρ_i on ilman tiheys [kg/m^3], c_{pi} on ilman ominaislämpökapasiteetti [J/kgK], $q_{v,poisto}$ on poistoilmavirta [m^3/s], T_s on lämpötila sisällä [K] ja T_u on lämpötila ulkona [K].

Ilmanvaihtokoneissa lämmitettävän tuloilman tarvitsema energiantarve on yhteensä 6603 kWh.

3.4 Tulo- ja korvausilman lämpöhäviö

Ilmanvaihtolaitteen tuloilman lämmitykseen vaadittava energiamäärä lasketaan kaavalla 11.

$$Q_{iv,tuloilma} = \frac{t_d t_v \rho_i c_{pi} q_{v,tulo} (T_s - T_{sp}) \Delta t}{1\,000} \quad (11)$$

jossa,

$Q_{iv,tuloilma}$ on lämmitysenergian tarve, tuloilma [kWh], t_d on ilmanvaihdon käyntiaikasuhde, vrk [h/24h], t_v on ilmanvaihdon käyntiaikasuhde, vk [vrk/7vrk], ρ_i on ilman tiheys [kg/m^3], c_{pi} on ilman ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kgK})$], $q_{v,tulo}$ on tuloilmavirta [m^3/s], T_s on lämpötila sisällä [K], T_{sp} on sisäänpuhalluslämpötila [K] ja Δt on ajanjakson pituus [h].

Ilmanvaihtokoneen korvausilman lämmitykseen vaadittava energiamäärä lasketaan kaavalla 12.

$$Q_{iv,korvausilma} = \frac{\rho_i c_{pi} q_{v,korvaus} (T_s - T_u) \Delta t}{1\,000} \quad (12)$$

jossa,

$Q_{iv,korvausilma}$ on lämmitysenergian tarve, tuloilma [kWh], ρ_i on ilman tiheys [kg/m^3], c_{pi} on ilman ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kgK})$], $q_{v,korvaus}$ on korvausilmavirta [m^3/s], T_s on lämpötila sisällä [K], T_u on lämpötila ulkona [K] ja Δt on ajanjakson pituus [h].

Korvausilman ilmavirta lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$q_{v,korvaus} = t_d t_v q_{v,poisto} - t_d t_v q_{v,tulo} \quad (13)$$

jossa,

$q_{v,korvaus}$ on korvausilmavirta [m^3/s], t_d on ilmanvaihdon käyntiaikasuhde, vrk [h/24h], t_v on ilmanvaihdon käyntiaikasuhde, vk [vrk/7vrk], $q_{v,poisto}$ on poistoilmavirta [m^3/s] ja $q_{v,tulo}$ on tuloilmavirta [m^3/s]

Tulo- ja korvausilman lämpöhäviöt lasketaan erikseen molemmille ilmanvaihtolaitteille. Enervent LTR-7 tuloilman lämmitykseen vaadittava energiamäärä saadaan kaavalla 11 ja se on 6 771 kWh. Vastaavasti ILTO 650 tuloilman lämmitykseen vaadittava energiamäärä on 2 934 kWh.

Korvausilman ilmavirta Enervent LTR-7:lle on:

$$q_{v,korvaus} = 1 * 1 * 0,389 \frac{m^3}{s} - 1 * 1 * 0,300 \frac{m^3}{s} = 0,089 \frac{m^3}{s}$$

Korvausilman ilmavirta ILTO 650:lle on:

$$q_{v,korvaus} = 1 * 1 * 0,200 \frac{m^3}{s} - 1 * 1 * 0,130 \frac{m^3}{s} = 0,07 \frac{m^3}{s}$$

Lopuksi lasketaan korvausilman lämmitykseen vaadittava energiamäärä kaavalla 12. Sen suuruus Enervent LTR-7:lle on 16 651 kWh ja ILTO 650:lle se on 13 033 kWh. Tulo- ja korvausilman kokonaislämpöhäviöksi saadaan edellisten summasta 29 604 kWh.

3.5 Lämpimän käyttöveden lämpöhäviön laskeminen

Lämpimän käyttöveden lämmitykseen kulutetun energiamäärän nettotarve sisältää lämpimän käyttöveden lämmittämisen kylmästä vedestä lämpimään, jossa ei oteta huomioon mahdollisia varaajan, lämmityslaitteen tai putkiston häviöitä. Lämpimän ja kylmän käyttöveden lämpötilaerona voidaan käyttää arvoa 50 °C, ellei muiden arvojen käyttöön ole perusteellista syytä. Lämpimän käyttöveden määrä on 40 % veden kokonaiskulutuksesta asuinrakennuksissa ja 30 % muissa rakennuksissa, jos sitä ei ole erikseen mitattu (5).

Käyttöveden lämpöhäviö lasketaan kaavalla 14.

$$Q_{lkv,netto} = \frac{\rho_v c_{pv} V_{lkv} (T_{lkv} - T_{kv})}{3\,600} - Q_{lkv,lto} \quad (14)$$

jossa,

$Q_{lkv,netto}$ on lämmityksen tarvitsema energia [kWh], ρ_v on veden tiheys [kg/m³], c_{pv} on veden ominaislämpökapasiteetti [kJ/(kgK)], V_{lkv} on kulutus, lämminkäyttövesi [m³], T_{lkv} on lämpötila, lämmin käyttövesi [K], T_{kv} on lämpötila, kylmä käyttövesi [K], 3 600 on muunnoskerroin kWh:ksi [-] ja $Q_{lkv,lto}$ on hyödynnetty jäteveden lämpöenergia [kWh].

Tulokseksi saadaan 930 kWh.

$$Q_{lkv,netto} = \frac{1\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * 16 \text{ m}^3 * (50 \text{ }^\circ\text{C})}{3\,600} = 930 \text{ kWh}$$

4 Kiinteistön lämpökuormat

Kiinteistön lämpökuormat muodostuu auringosta tulevan säteilyenergian, ihmisten tuottaman lämpöenergian sekä sähkölaitteiden ja valaistuksen tuottaman lämpöenergian summasta.

4.1 Ihmisten aiheuttama lämpökuorma

Ihmisen luovuttamana lämpötehona voidaan käyttää arvoa 85 W (12). Ihmisistä johtuva lämpökuorma lasketaan seuraavasti:

$$Q_{ihmiset} = \frac{kn\varphi_{ihminen}\Delta t_{oleskelu}}{1\,000} \quad (15)$$

jossa,

$Q_{ihminen}$ on ihmisen luovuttama lämpöenergia [kWh], k on kiinteistön käyttöaste (0/1) [-], n on ihmisten lukumäärä [-], $\varphi_{ihminen}$ on yhden ihmisen lämpöteho [W] ja $\Delta t_{oleskelu}$ on kiinteistössäoleskeluaika [h].

Esimerkiksi viiden täysipäiväisen työntekijän lämpökuorma vuodessa kiinteistöön on 816 kWh.

4.2 Auringon säteilyenergia

Auringosta johtuvaa lämpökuormaa eli ikkunoiden läpi tulevaa säteilyenergiaa laskiessa täytyy ensin määrittellä ulkoseinien ilmansuunnat ja seinillä olevien ikkunoiden pinta-ala karmeineen. Nimetään takaseinä seinäksi 1, päätyseinä seinäksi 2 ja etuseinä seinäksi 3. Auringon säteilyenergia lasketaan kaavalla 16.

$$Q_{aurinko} = G_{säteily.v}F_{suunta}F_{löpäisy}A_{ig} + G_{säteily.p}F_{löpäisy}A_{ig} \quad (16)$$

jossa,

$Q_{aurinko}$ on sisään tulevan säteilyenergia [kWh], $G_{säteily,v}$ on vaakapinnalle tuleva säteilyenergia pinta-alaa kohti [kWh/m²], $G_{säteily,p}$ on pystypinnalle tuleva säteilyenergia pinta-alaa kohti [kWh/m²], F_{suunta} on kerroin, jolla vaakapinnalle tuleva säteilyenergia muunnetaan pystypinnalle tulevaksi [-], $F_{läpäisy}$ on kokonaiskorjauskerroin, säteily [-], A_i on ikkunan pinta-ala [m²] ja g on läpäisykerroin [-].

$$g = 0,9g_{kohtisuora} \quad (17)$$

$$F_{läpäisy} = \text{kehäkerroin} * \text{verhokerroin} * \text{varjostuskerroin} \quad (18)$$

Yhtälössä 16 kaikki muut arvot, paitsi ikkunoiden pinta-ala A_i , ovat taulukoista luettavia arvoja, jotka riippuvat ilmansuunnasta ja muista tekijöistä. Taulukot, joista arvot saadaan, löytyy aineistosta RakMK D5: 2015. Säteilyenergia lasketaan jokaiselle seinälle erikseen, ja näiden summasta saadaan kiinteistön kokonaissäteilyenergia.

Säteilyenergia ikkunoista seinälle 1 on 3644v kWh.

$$Q_{aurinko,1} = \left(975 \frac{kWh}{m^2} * 0,833 * (0,75 * 1 * 0,75) * 6,36 m^2 * (0,9 * 0,7) \right) + \left(811,9 \frac{kWh}{m^2} * (0,75 * 1 * 0,75) * 6,36 m^2 * (0,9 * 0,7) \right) = 3\ 644 kWh$$

Kolmen seinän kokonaissäteilyenergiaksi saadaan 6 819 kWh.

4.3 Lämpökuorma sähkölaitteista

Tässä projektissa sähkölaitteiden tuottama lämpökuorma arvioidaan käyttämällä Vattenfallin suuntaa antavia taulukkoarvoja sähkölaitteiden kulutuksesta (10). Tulokseksi saadaan 2 645 kWh vuodessa.

5 Lämmitysenergian nettotarve

Luvussa 3 esitetään laskutoimitukset tuotantohallin lämpöhäviöistä. Lämpöhäviöiden summaksi saadaan 91 757 kWh vuodessa. Tulos on suuntaa antava, koska laskuissa on käytetty vuoden 2013 lämpötiladataa, mutta todellisuudessa vuodet voivat poiketa toisistaan huomattavasti. Lisäksi joissain yhtälöissä käytetään ohjearvoja, jos todellisia arvoja ei ole saatavilla.

Luvussa 4 esitetyt lämpökuormat puolestaan tuovat halliin lämpöenergiaa. Lämpökuormiin lasketaan mukaan aurinkopaneelien tuottama energiamäärä 15 MWh. Summaksi saadaan 25 289 kWh vuodessa. Kun luvussa 3 lasketusta lämpöhäviöiden summasta vähennetään luvussa 4 esitetty lämpökuormien summa, saadaan tulokseksi lämmitysenergian nettotarve.

Lämmitysenergian nettotarve on energian määrä, joka täytyy tuoda kohteeseen, jotta lämpötila pysyy halutulla tasolla. Tässä työssä suoritettujen laskujen perusteella Pinoa Foodsin tuotantohallin nettotarve lämmitysenergialle on noin 75 000 kWh vuodessa. Tämä tarkoittaa, että yritys maksaa tulevaisuudessa lämmityksestä noin 6 700 € vuodessa.

Taulukko 1. Lämmitysenergian nettotarve

Lämpöhäviö	kWh	Lämpökuorma	kWh
Ilmanvaihto	53987	Aurinkopaneelit	15000
Seinät	7220	Ihmiset	816
Yläpohja	8120	Aurinko	6819
Alapohja	8865	Sähkölaitteet	2645
Kylmäsiilat	8862		
Ovet	8862		
Ikkunat	2644		
Viemäri	930		
Yhteensä	91757	Yhteensä	25289

Kiinteistön lämmitystarpeesta yli puolet koostuu ilmanvaihdosta. Ilmanvaihdosta koituviin kustannuksiin ei voida vaikuttaa ilman merkittäviä investointeja. Tästä syystä voidaan sanoa, että ilmanvaihdon ajantasaisuudesta huolehtiminen ja säännöllinen huoltaminen ovat erittäin tärkeitä asioita lämmityskustannusten näkökulmasta.

Sen sijaan kiinteistön johtumishäviöiden määrään voidaan vaikuttaa jo pienillä investoinneilla. Lisäeristys on hyvä keino pienentää ostoenergian tarvetta ja luoda kustannussäästöjä. Noin 14 % lämmitysenergian nettotarpeesta koostuu ovien ja ikkunoiden aiheuttamiasta lämpöhäviöstä. Luvussa 7 käsitellään ikkunoiden ja nosto-ovien lisäeristystä ja siitä syntyviä kustannussäästöjä.

6 Vaihtoehtoiset lämmitysmuodot

Tässä kappaleessa esitellään vaihtoehtoisia ja energiatehokkaampia lämmitysmuotoja ja ratkaisuja nykyiselle lämmitysjärjestelmälle ja energiatehokkuuden lisäämiselle. Luvuissa 3 ja 4 lasketun lämmitysenergian nettotarpeen avulla voidaan laskea suuntaa antavia kustannussäästöjä eri lämmitysmuodoille ja vertailla niitä nykyisen lämmitysmuodon vuosikustannuksiin.

Energiatehokkaiden lämmitysmuotojen esittelyn lisäksi projektin tavoitteena oli varmistaa mikroversojen optimaaliset kasvuolosuhteet tulevaisuudessa. Kappaleessa 6.1 käsitellään mahdollisuutta tuloilmaventtiilien uudelleensijoittamiselle, jolla voitaisiin luoda versoille otollista ilmavirtaa.

6.1 Tuloilmaventtiilit

Ilmavirta on oleellinen tekijä mikroversoja vertikaaliviljelijässä. Uudelleensijoittamalla ilmanvaihdon tuloilmaventtiilit, voidaan saavuttaa haluttua ilmavirtaa. Tuloilmaventtiilejä voidaan siirtää nykyistä alemmas ja useampi kappale ilmavirran jakamiseksi tasaisesti.

6.2 Ilmalämpöpumppu

Ilmalämpöpumpulla on sisä- ja ulkoyksikkö. Ulkoyksikön pääkomponentit ovat kompressori ja lämmönvaihdin, kun sisäyksikössä ne ovat lämmönvaihdin ja ohjauselektronikka. Ilmalämpöpumpun kylmäteknikkaan perustuva toiminta siirtää ulkoilmassa olevaa lämpöenergiaa kiinteistöön tai toisin päin samalla tehostaen sisäilman kiertoa. Ilmalämpöpumppu ohjaa tuloilman tasaisesti koko kiinteistöön ja puhdistaa sisäilmaa.

Ilmalämpöpumppua valittaessa kannattaa kiinnittää erityistä huomioita sille annettuun COP-arvoon, joks kertoo laitteen tehohyötysuhteen. Esimerkiksi merkintä COP 5 tarkoittaa, että 1 kW sähköenergiaa tuottaa 5 kW lämpöenergiaa. SCOP-arvo, lyhennetty sanoista Seasonal Coefficient of Performance, kertoo laitteen vuosihyötysuhteen (13).

Tilavuuteen perustuvan ILP:n mitoituksen ohjearvo on 25 W jokaista kuutiometriä kohden (11). Pinoa Foodsin hallin pinta-ala on 352 m² ja huonekorkeus arviolta 4,4 m. Tämä antaa tilavuudeksi 1 548 m³. Näihin arvoihin perustuen voidaan sanoa, että halli vaatii ilmalämpöpumpuilta noin 39 kW verran lämmitystehoä. (15).

$$1\,548\,m^3 * 25 \frac{W}{m^3} = 38\,720\,W$$

Tuotantohallin nykyisen lämmitysjärjestelmän kokonaislämmitysteho on noin 25 000 W ja selvästi alimitoitettu sen käyttötarkoituksen näkökulmasta. Tämä voi johtaa siihen, että varsinkin talvella tuotantohallin lämpötilaa voi olla vaikea pitää tarvittavalla tasolla. Suuriin kiinteistöihin tarkoitettujen ilmalämpöpumppujen hinnat liikkuvat muutamassa tuhannessa eurossa riippuen mallista ja jälleenmyyjästä.

Tällä hetkellä lämmitysenergia tuotetaan suurimmalta osalta sähkövastuksilla, joiden hyötysuhde on 1. Tämä tarkoittaa, että yhdellä kilowatilla sähköä tuotetaan yksi kilowatti lämpöenergiaa. Luvuissa 3 ja 4 lasketun lämmitystarpeen perusteella voidaan sanoa, että lämmitykseen kuluu vuodessa noin 6700 €. Jos sähkövastukset korvattaisiin ilmalämpöpumpuilla, joiden SCOP-arvo olisi esimerkiksi 4, voitaisiin saada jopa 5 000 €:n vuotuinen kustannussäästö.

6.3 Maalämpö

Maaperään varastoitunutta auringosta peräisin olevaa lämpöenergiaa ja maan omaa geotermistä energiaa kutsutaan maalämmöksi. Maalämpö on uusiutuvaa ja täysin puhdasta energiaa. Lämpöpumpputekniikan avulla maalämpöä voidaan hyödyntää rakennusten ja käyttöveden lämmitykseen. Samalla tavalla kuin ilmalämpöpumppua, myös maalämpöpumppua voidaan käyttää kiinteistön viilentämiseen.

Maahan asennettava lämmönkeruuputkisto kaivetaan joko vaakasuoraan lähelle maanpintaa, upotetaan vesistöön tai upotetaan kallioon porattuun reikään. Kallioon porattua reikää kutsutaan maalämpökaivoksi ja se on lämmönkeruuputkiston toteutustavoista yleisin. Lämpökaivo sopii pienellekin tontille ja se on energiatehokkaampi kuin vaakasuorat keruupiirit.

Maalämpöpumpun pääkomponentit ovat kaksi lämmönvaihdinta eli höyrystin ja lauhdutin, kompressori, paisuntaventtiili sekä kylmäaine. Lämpöpumpputekniikka perustuu kylmäaineen olomuodonmuutoksiin.

Lämmönkeruuputkistossa kiertää maaliuos, joka on jäätymätön ja ympäristölle ystävällinen aine. Maaperään varastoitunut lämpö sitoutuu tähän nesteeseen ja se ohjataan maalämpöpumpun höyrystimeen. Höyrystimessä maaliuos kohtaa jääkylmän kylmäaineen, joka sitten höyrystyy maaliuksen lämmöstä. Maalämpöpumpun höyrystimessä lämpöä saadaan talteen noin kolmen asteen verran.

Kaasuuntunut kylmäainehöyry ajetaan kompressoriin, jonka tehtävä on puristaa se korkeaan paineeseen lämmittäen kaasua edelleen. Lämmitetty kaasu ohjataan lauhduttimeen, toiseen maalämpöpumpun lämmönvaihtimista, jossa lämmitettävä kiertovesi jäädyttää kylmäaineen vapauttaen lämmön kiinteistön lämmitysjärjestelmän käyttöön. Sen jälkeen kylmäaine johdetaan paisuntaventtiiliin, jossa sen paine laskee. Paineen laskiessa kylmäaine muuttuu taas nestemäiseksi. Lopulta lämpöenergia jaetaan kiinteistöön esimerkiksi lattialämmityksen kautta. (14).

Pinoa Foodsin kiinteistössä ei ole vesikiertoista lämmitysjärjestelmää, joten se täytyisi rakentaa. Maalämpökaivon poraus on myös kallis investointi, jonka hinta asennus-

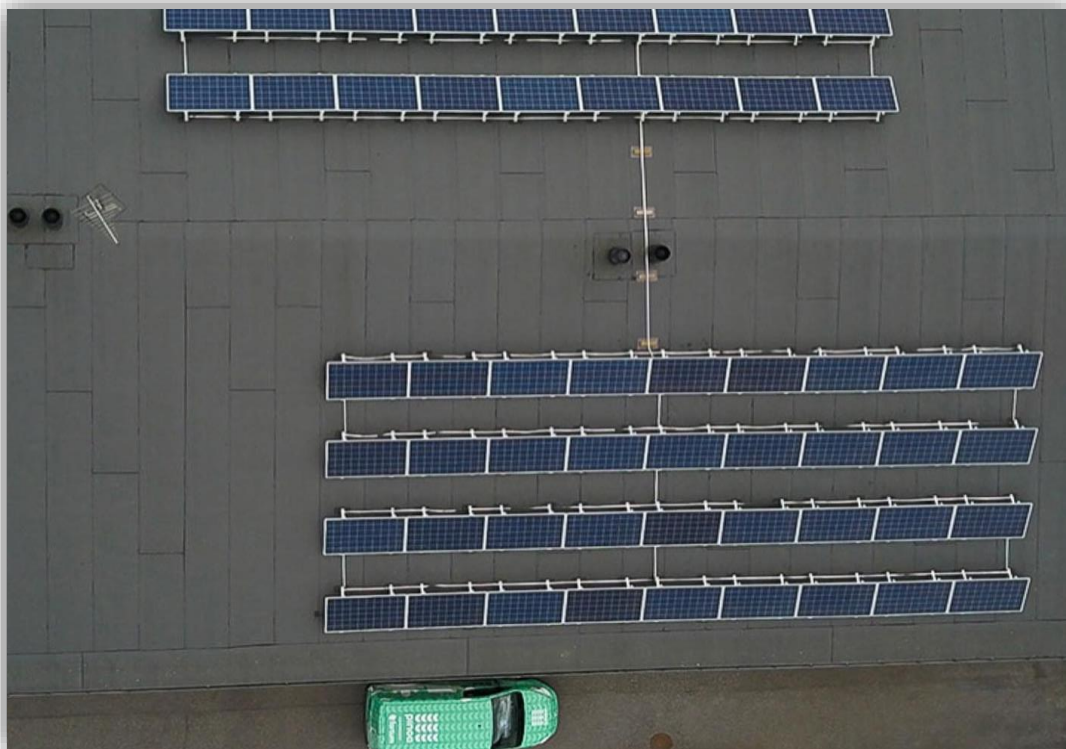
huoltokustannukset huomioiden on noin 15 000-25 000 euroa. Investointina se on kallis, eikä siksi sovi kaikille ja sen takaisinmaksuaikakin on noin kymmenen vuotta. Pinoa Foodsin lyhyen vuokrasopimuksen takia tämä vaihtoehto ei ole järkevä tässä vaiheessa yrityksen elinkaarta. Maalämpö on hyvä pitää mielessä, kun Pinoa Foods etsii suurempia tuotantotiloja ja yrityksellä on mahdollisesti varaa sijoittaa energiatehokkuuteen.

6.4 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneelit toimivat parhaiten yhdistelmänä toisen lämmitysmuodon, kuten ilmalämpöpumppujen rinnalla. Ongelma on se, että aurinkopaneelit tuottavat sähköä vain silloin, kun auringon säteilyenergiaa on tarjolla. Tämä tarkoittaa Suomen olosuhteissa käytännössä sitä, että puolet vuodesta niistä ei saa energiaa ollenkaan.

Kiinteistön katon pinta-ala on täytetty lähes kokonaan aurinkopaneeleilla, joten niiden lisääminen ei ole järkevää tai edes mahdollista, eikä se toisi merkittävää hyötyä tai maksaisi itseään takaisin ennen vuokrasopimuksen päättymistä.

Aurinkopaneelit ovat alkuinvestointeina suhteellisen kalliita, mutta sen jälkeen ne tuottavat energiaa ilman lisäkustannuksia. Pinoa Foodsin nykyiset aurinkopaneelit (kuva 5) on lahjoittanut yhteistyökumppani Fortum. Tulevaisuudessa yrityksen muuttaessa suurempiin tuotantotiloihin, investointi aurinkopaneeleihin on varteen otettava hankintakohde.



Kuva 5. Pinoan aurinkopaneelit.

7 Lisäeristys selvitys

Projektin aikana selvitettiin rakennuksen nosto-ovien ja ikkunoiden eristämisen ja tiivistämisen mahdollisuus. Luvussa kolme on laskettu ovien, nosto-ovien ja ikkunoiden johtumishäviöt, joista selviää kuinka paljon hukkalämpöä johtuu niiden kautta ulos. Johtumishäviölaskujen tuloksia hyödyntäen voidaan laskea karkaavan hukkalämmön rahallinen arvo ilman eristystä, ja verrata tätä eristyksen jälkeiseen tilanteeseen.

Erilaisia eristysmateriaaleja on lukuisia, mutta tässä projektissa valittiin tarkasteluun eristelevyt niiden keveyden ja helpon käsiteltävyytensä takia. Eristelevyjä voidaan liimata erilaisilla rakennusliimoilla ja käsitellä tavallisilla puutyökaluilla.

Seuraavissa kappaleissa 7.1 ja 7.2 perehdytään Finnfoamin valmistamiin XPS- ja FF-PIR-levyihin, ja ne valittiin tarkasteluun koska ne ovat kotimaisia tuotteita ja niiden

saatavuus on hyvä sekä hinta vertailukelpoinen. Molempia eristelevytyyppejä on helppo leikata ja ne voidaan asentaa itse (9).

Valmistajan mukaan Finnfoam-tuotteet eivät vapauta terveydelle haitallisia hiukkasia eivätkä lahoa tai mätäne. Se on veden- ja epäorgaanisten aineiden kestävä.

Osaksi lisäeristys selvitystä on luotu Excel-eristetyökalu, jolla voidaan suoraan tarkastella eri eristelevyvaihtoehtoja syntyviä nettosäästöjä ajan funktiona (vuosina).

7.1 Ikkunoiden peittäminen eristelevyillä

Tuotantohallissa on 13 ikkunaa. Kaikkien ikkunoiden yhteenlaskettu pinta-ala on 13,1 m². Ikkunat olisi hyvä peittää ja eristää kahdesta syystä. Ensinnäkin isot ikkunat päästävät läpi hukkalämpöä. Toisekseen vertikaaliviljelyssä kasvit kasvavat LED-valojen avulla. Auringonvalo olisi hyvä poistaa yhtälöstä, jotta valon määrää voidaan säädellä halutulla, optimaalisella tavalla. Ikkunoiden U-arvo on vuoden 2003 rakennusmääräysten mukaan $1,4 \frac{W}{m^2K}$ ja lämmönjohtumislaskuissa on käytetty tätä arvoa.

XPS-lämmöneriste on suulakepuristettua polystyreeniä, jonka eristyskyky on hyvä. Siinä on suljettu ja yhtenäinen solurakenne, joka takaa hyvän eristävyden ja tiiviiden. Se on homehtumaton materiaali. XPS-eristeen lämmönjohtavuus on $0,037 \frac{W}{mK}$. (11).

Polyuretaanista (PU) valmistettujen FF-PIR-lämmöneristeiden lämmönjohtavuus on $0,022 \frac{W}{mK}$ eli hieman pienempi kuin XPS-eristeellä. Pienempi lämmönjohtavuus tarkoittaa parempaa eristävyttä (11). Energiatohokkuusvaatimusten tiukentuessa kosteusteknisesti turvallisille ja tehokkaille lämmöneristemateriaaleille on lisääntynyt tarve.

Ikkunoiden lisäeristyskustannus muodostuu eristelevytyypin valinnasta ja halutusta levypaksuudesta. Levyn paksuus vaikuttaa sen eristävyteen ja U-arvoon. Valitsemalla paksumpi levy, saadaan pienempi U-arvo ja täten parempi lämmöneristävyys. Sitä kautta

energiankulutustarve laskee. Materiaalikustannusesimerkkejä ikkunoiden eristykselle löytyy liitteestä 1.

7.2 Nosto-oven lisäeristys

Hallissa on kaksi nosto-ovea, joista vain toinen on käytössä. Yhden nosto-oven pinta-ala on $20,64 \text{ m}^2$. Nosto-ovien alatiivisteet olisi syytä uusida, koska tiivisteiden ja lattian väliin jää huomattava, noin 0.01 m:n rako, josta lämmin ilma karkaa ulos. Nosto-oven tämänhetkinen U-arvo on $1,51 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$.

Toinen nosto-ovi, jota ei käytetä, voidaan lisäeristää kiinteällä ratkaisulla sisäpuolelta. Jotta eristelevyjä ei tarvitse kiinnittää suoraan oveen, voidaan rakentaa puu- tai metallirunkoinen väliseinä, jonka väliin asetetaan joko XPS- tai FF-PIR-eristelevyt. Väliseinärunгон ja eristelevyjen väliin voidaan jättää molempiin reunoihin noin yhden senttimetrin suuruiset raot, jolloin levyt saadaan kiinnitettyä runkoon uretaanivaahdolla.

Nosto-ovi, jota joudutaan avaamaan ajoittain, voidaan lisäeristää ohuella eristelevykerroksella ainakin ikkunoiden kohdalta. Levyt voidaan kiinnittää suoraa nosto-oveen.

Nosto-oven eristämistä varten on rakennettava väliseinärunko. Yrityksellä on käytössään erilaisia rakennusmateriaaleja, joten tästä ei synny lisäkustannuksia. Esimerkkejä kustannuksista nosto-oven eristykselle löytyy liitteestä 1.

Excel-eristetyökalun (liite 2) avulla nähdään, että esimerkiksi valitsemalla 100 millimetriä paksu XPS-eristelevy ikkunoiden ja nosto-oven eristämiseen, saadaan noin neljän tuhannen euron nettosäästö viidessä vuodessa. Eristys maksaa itsensä takaisin alle vuodessa ja siitä eteenpäin se tuottaa yritykselle noin tuhat euroa säästöä vuodessa.

8 Pohdintaa ja johtopäätökset

Projektin onnistumisen kannalta haasteita ilmeni jo alkuvaiheessa. Alun perin projektin suunnitteluvaiheessa ajateltiin, että kiinteistön sähkönkulutusdata olisi saatavilla vuokranantajalta edellisten vuokralaisten ajalta. Tätä sähkönkulutusdataa hyödyntämällä olisi voitu arvioida nykyistä kiinteistön sähkönkulutusta. Pian kuitenkin todettiin, ettei dataa ole saatavilla ja suunnitelmaa muutettiin niin, että lämmitysenergian nettotarve määriteltiin laskennallisesti.

Osassa lämmitysenergian nettotarpeen määrittämisen laskuissa käytettiin viitearvoja todellisten arvojen sijaan, koska todellisia arvoja ei pystytty selvittämään tai sen selvittäminen olisi ollut erittäin työlästä. Tämän johdosta ja siitä syystä, että laskuissa käytetään yhden vuoden keskilämpötiloja, tulosta voidaan pitää vain suuntaa antavana. Lämmitysenergian mitoittaminen vei enemmän työaikaa kuin pelkän valmiin datan käsittely ja tulkinta olisi vienyt.

Tieto siitä, että yritys aikoo siirtyä vuokrasopimuksen päätyttyä uusiin tuotantotiloihin herätti ajatuksia siitä kannattaako mitään suurempia investointeja tehdä ennen muuttoa. Lisäeristys selvityksessä kuitenkin selvisi, että ja pienillä investoinneilla voidaan saavuttaa tuhansien eurojen säästöjä investoinnin takaisinmaksuajan ollessa alle vuoden. Kun kiinteistön sähkönkulutus vähenee, yrityksen hiilijalanjälki pienenee. Tämä edes auttaa tavoitteessa kohti energiatehokkaampaa yritystoimintaa.

Kun Pinoa Foods muuttaa uusiin tuotantotiloihin, voivat he käyttää tämän projektin aikana kehitettyä Excel-eristystyökalua arvioimaan uuden tuotantohallin lisäeristyksen tarvetta ja laskea skenaarioita kustannussäästöille.

Projektin aikana selvisi, että nykyisen lämmitysjärjestelmän mitoitus ei ole riittävä tämän hetkisen toiminnan eli vertikaaliviljelyn näkökulmasta. Kiinteistön lämpötila voi olla vaikea pitää tasaisena ympäri vuoden, ellei esimerkiksi lisäeristystä rakenneta. Kustannussäästöjen lisäksi lisäeristyksen rakentaminen helpottaisi kiinteistön lämpötilan ylläpitämistä tasaisena. Lisäeristys yhdessä sopivaksi mitoitettun lämmitysjärjestelmän kanssa varmistaa energiatehokkaan ja stabiilin kasvu ympäristön mikroversoille.

Kiinteistön lämmitystehoa olisi syytä lisätä ainakin 15 kilowatin verran varmistamaan kiinteistön lämmitystarpeen täytyminen ympäri vuoden. Ikkunoiden ja nosto-ovien lisäeristäminen olisi järkevää, koska se vähentäisi ostoenergian tarvetta ja lisäisi tuotantohallin energiatehokkuutta. Lisäeristäminen toisi yritykselle myös haluttuja kustannussäästöjä jo ensimmäisen vuoden aikana. Lämmitysjärjestelmän uusiminen ei välttämättä ole tarpeellista, jos yritys muuttaa uusiin tiloihin vuokrasopimuksen päätyttyä. Jokin lisälämmityslaite on kuitenkin hankittava paikkaamaan alimitoitettua lämmitystehoa. Jos Pinoa Foods päätyy jatkamaan nykyisissä tiloissa, silloin nykyinen sähkövastuksilla järjestetty lämmitys on syytä korvata jollakin muulla lämmitysvaihtoehdolla. Paras ratkaisu tähän kiinteistöön olisi teollisuuskiinteistöihin tarkoitettut ilmalämpöpumput, joiden kokonaislämmitysteho on noin 40 kW. Vuotuinen bruttosäästö voi nousta jopa 5 000 euroon nykyiseen järjestelmään verrattuna.

Lähteet

- 1 Maailman kasvihuonepäästöt kasvavat yhä. Verkkoaineisto. SYKE.
<<https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/42433dde-827f-485e-9fa9-45b49fbfa317/maailman-kasvihuonekaasupaastot-kasvavat-yha.html>>. Luettu 23.3.2021.
- 2 Sinervo, Riku. 2019. Urban Farm Lab. Verkkoaineisto.
<<https://www.sitra.fi/en/projects/urban-farm-lab/#what-was-it-about>>. Luettu 16.9.2020.
- 3 Energiatehokkuus. 2019. Verkkoaineisto. Energiavirasto.
<<https://www.energiavirasto.fi/energiatehokkuus>>. Luettu 11.2.2021.
- 4 Energiatehokkuus. 2019. Verkkoaineisto. Työ- ja elinkeinoministeriö.
<<https://tem.fi/energiatehokkuus>>. Luettu 13.4.2021.
- 5 Energiatehokas koti. 2017. Verkkoaineisto. Motiva.
<https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan_suunnittelu/lammitys/sahkolammitys>. Luettu 1.3.2021.
- 6 Kurnitski, Jarek. 2012. Energiamääräykset 2012. 2 painos. Helsinki: Suomen rakennusmedia Oy.
- 7 Sähkölämmityksen mitoitus. 2008. ST 55.01. Sähkötieto Ry.
- 8 Paroc-kivivilla – luonnollisen kestävä eriste. 2021. Verkkoaineisto. Paroc.
<www.paroc.fi/miksi-kivivilla>. Luettu 30.3.2021.
- 9 Lisälämmöneristys Finnfoam-eristeellä. Verkkoaineisto. Finnfoam Oy.
<<https://www.finnfoam.fi/kaytokohteet/lisalammoneristys/lisalammoneristys-finnfoam-eristeilla>>. Luettu 22.2.2021.
- 10 Sähkölaitteiden keskimääräinen sähkönkulutus. 2011. Verkkoaineisto. Vattenfall.
<<https://www.vattenfall.fi/energianeuvonta/sahkonkulutus/sahkolaitteiden-energiansaanti>>. Luettu 2.1.2021.
- 11 Rakennuksen energiansaannin ja lämmitysteknisten tarpeiden laskenta. 2017. Verkkoaineisto. Suomen rakentamismääräyskokoelma.
<https://www.edilex.fi/data/rakentamismääräykset/Ohje_Rakennuksen_energiansaannin_ja_lammitusteknisten_tarpeiden_laskenta_20122017_vain_korostukset.pdf>. Luettu 13.4.2021.

- 12 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehotarpeen laskenta. 2015. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 13 Ilmalämpöpumpun toiminta. Verkkoaineisto. Ilmalämpöpumppu.fi. <ilmalampopumppu.fi/tietoa>. Luettu 19.1.2021.
- 14 Maalämmön toimintaperiaate. Verkkoaineisto. Gebwell. <<https://gebwell.fi/maalampo/maalammon-toimintaperiaate/>>. Luettu 28.10.2020.
- 15 Hinnat ja ehdot. 2020. Verkkoaineisto. Helen Sähköverkko Oy. <<https://www.helensahkoverkko.fi/palvelut/hinnastot>>. Luettu 10.10.2020.
- 16 Ilto 650 ja 850. Verkkoaineisto. Swegon Ilto. <https://www.netrauta.fi/attachments/esitteita/ilto/ilto_650_850_esite.pdf>. Luettu 20.9.2020.
- 17 Scanoffice ilman muuta. Verkkoaineisto. Ref Group. <http://www.refgroup.fi/files/mitsubishi%20msz-sf_esite%20log.pdf>. Luettu 20.9.2020.

Esimerkkihintoja ikkunoiden eristämiseen. Hinnat luettu 25.10.2020.

Alla esitetään ikkunoiden eristämisen kustannukset eri eristemateriaaleille. Lisäksi on laskettu U-arvo näille eristeille.

Eriste: Finnfoam XPS, paksuus: 40 mm, suora, hinta $5,74 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$

$$13,1 \text{ m}^2 * 5,74 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 75,2 \text{ €}$$

$$U_{1xps} = \frac{\lambda}{d} = \frac{0,037 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{0,04 \text{ m}} = 0,925 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Kaikkien ikkunoiden eristäminen tällä eristelevyllä maksaisi noin 75 euroa.

Finnfoam XPS 100 mm, suora, $13,31 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$

$$13,1 \text{ m}^2 * 13,31 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 174,4 \text{ €}$$

$$U_{2xps} = \frac{\lambda}{d} = \frac{0,037 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{0,1 \text{ m}} = 0,37 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

FF-PIR 30 mm $9,1 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$

$$13,1 \text{ m}^2 * 9,1 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 119,2 \text{ €}$$

$$U_{1ff} = \frac{\lambda}{d} = \frac{0,022 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{0,03 \text{ m}} = 0,733 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

FF-PIR 100 mm $20,66 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$

$$13,1 \text{ m}^2 * 20,66 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 270,5 \text{ €}$$

$$U_{2ff} = \frac{\lambda}{d} = \frac{0,022 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{0,1 \text{ m}} = 0,22 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Projektin tilaajan toiveesta veetailuun otettiin yksi eristevaihtoehto Suomen ulkopuolelta. Tuotteen voi saada edullisemmin, mutta on huomioitava, että tuotteesta on maksettava tuontivero.

Quinn Therm QF PIR 50 mm $8,14 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$ (veroton hinta)

$$13,1 \text{ m}^2 * 8,14 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 106,6 \text{ €}$$

$$U_{qfpir} = \frac{\lambda}{d} = \frac{0,022 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{0,05 \text{ m}} = 0,44 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Esimerkkihintoja nosto-oven eristämiseen. Hinnat luettu 25.10.2020

Finnfoam XPS 40 mm, suora, $5,74 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$

$$20,64 \text{ m}^2 * 5,74 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 118,5 \text{ €}$$

$$U_{1xps} = \frac{\lambda}{d} = \frac{0,037 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{0,04 \text{ m}} = 0,925 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Finnfoam XPS 100 mm, suora, $13,31 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$

$$20,64 \text{ m}^2 * 13,31 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 274,7 \text{ €}$$

$$U_{2xps} = \frac{\lambda}{d} = \frac{0,037 \frac{W}{mK}}{0,1 m} = 0,37 \frac{W}{m^2K}$$

FF-PIR 30 mm 9,1 $\frac{\text{€}}{m^2}$

$$20,64 m^2 * 9,1 \frac{\text{€}}{m^2} = 187,8 \text{ €}$$

$$U_{1ff} = \frac{\lambda}{d} = \frac{0,022 \frac{W}{mK}}{0,03 m} = 0,733 \frac{W}{m^2K}$$

FF-PIR 100 mm 20,66 $\frac{\text{€}}{m^2}$

$$20,64 m^2 * 20,66 \frac{\text{€}}{m^2} = 426,4 \text{ €}$$

$$U_{2ff} = \frac{\lambda}{d} = \frac{0,022 \frac{W}{mK}}{0,1 m} = 0,22 \frac{W}{m^2K}$$

Quinn Therm QF PIR 50 mm 8,14 $\frac{\text{€}}{m^2}$ (veroton hinta)

$$20,64 m^2 * 8,14 \frac{\text{€}}{m^2} = 168,0 \text{ €}$$

$$U_{qfpir} = \frac{\lambda}{d} = \frac{0,022 \frac{W}{mK}}{0,05 m} = 0,44 \frac{W}{m^2K}$$

Kuten tässä liitteessä olevista laskuista nähdään, lisäeristemateriaalit ovat edullinen investointi. Liitteessä kaksi voi tarkastella kustannussäästöjä eri materiaalivalinnoille.