



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

TONI LAINE

HYPERMARKETTIEEN LÄMMITYS- JA JÄÄHDYTYSJÄRJESTEL-
MIEN ENERGIATEHOKKUUS

Diplomityö

Tarkastaja: Prof. Timo Kalema
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekunnan tie-
dekuntaneuvoston kokouksessa 7.
toukokuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

LAINE, TONI: Hypermarkettien lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien energiatehokkuus

Diplomityö, 105 sivua

Elokuu 2014

Pääaine: Talotekniikka

Työn tarkastaja: professori Timo Kalema

Avainsanat: Hypermarket, jäähdytys, lämmitys, lämmön talteenotto, lämpöpumppu

Tässä diplomityössä tarkastellaan kahden hypermarketin lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien energiatehokkuutta. Havaintojen pohjalta analysoidaan hypermarkettien energiatehokkuutta myös yleisellä tasolla.

Diplomityön teoriaosuudessa esitellään hypermarketin erilaiset lämmöntuotantotavat ja lämmönluovuttimet. Lisäksi käsitellään jäähdytys- ja kylmäjärjestelmiä. Järjestelmiin olennaisena osana liittyy virtaustekninen toiminta. Teoriaosuuden viimeisessä luvussa pääpaino on verkostojen tasapainotuksella ja kiertovesipumppuilla.

Energiankulutuksen jakaantuminen eri lämmityspiirien kesken selvitettiin liuosvirtaamamittausten, taloautomaation historiatietojen ja aineominaisuuksien avulla. Sähköenergian osalta kulutuksen jakautuminen perustuu sähkön alamittauksista saatuihin tietoihin.

Kulutusjakaumasta havaittiin järjestelmien ongelmakohdat. Energiankulutuksen lisäksi huomio kiinnittyi järjestelmien toiminnallisuuteen. Erilaisten tekijöiden merkitystä energiankulutukseen analysoidaan muun muassa vertailemalla erilaisia tilanteita esimerkein.

Lämpöpumppujen osalta huomion arvoiseksi asioiksi tutkimuksessa nousivat mitoitukset, kytkennät, käyntiajat, lämmitysverkostojen lämpötilat sekä kiertovesipumppujen ohjaus ja säätö.

Kylmälaitoksessa tärkeä tekijä on lauhtumislämpötila eri ulkoilman lämpötiloilla. Lämmityskaudella tarkastellaan lauhdelämmön talteenottoa ja kompressorien sähkönkulutusta. Kesällä puolestaan huomio kiinnittyy nestejäähdyttimien puhaltimien ja kylmälaitoksen kompressorien kokonaissähkönkulutukseen.

Ilmalämmitys on molempien tutkimuksen kohteena olevan hypermarketin päälämmönjakotapa, joten siihen kohdistettiin erityishuomio. Ilmalämmityksen lisäksi käsitellään myös muiden lämmitysverkostojen energiatehokkuutta.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

LAINE, TONI: Energy efficiency of heating and cooling systems in hypermarkets

Master of Science Thesis, 105 pages

August 2014

Major: Building Services Engineering

Examiner: Professor Timo Kalema

Keywords: Hypermarket, cooling, heating, heat recovery, heat pump

The aim of this Master of Science thesis is to study energy efficiency of heating and cooling systems in two different hypermarkets. Based on the observations, energy efficiency is discussed also in general.

The theoretical part of the thesis presents various heating and cooling production systems together with heating and cooling emitters. Fluid dynamics is an important part of heating and cooling systems so the final chapter of the theoretical part emphasizes piping systems.

Energy consumption between different heating circuits was defined by flow rate measurements, data of building automation and material properties. Consumption of electrical energy is based on data collected from electricity meters. Consumption profiles revealed the problem areas in the systems. Along with energy consumption, attention was focused on the functionality of the systems. Importance of different factors was analyzed in example cases.

This study shows that the most important things in heat pump systems were sizing, couplings, running times, temperatures, control and adjustment of circulation pumps. Attention was focused in head pressure in refrigeration systems. Varying condensing temperature in different outdoor temperatures can cause remarkable energy savings in refrigeration systems. During the heating season the level of condensing temperature determines the amount of recovered heat but on the other hand higher condensing temperature increases electricity consumption. In the summer attention is focused on energy efficiency of compressors and dry coolers fans.

End of the thesis focused on heating networks. Forced-air heating is widely used in hypermarkets so the major part of the seventh chapter concerns forced-air systems.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Kiinteistöhallinta Knowtek Oy:lle ja Pirkanmaan Osuuskaupalle. Työn tarkastajana ja ohjaajana toimi professori Timo Kalema

Haluan kiittää Kiinteistöhallinta Knowtek Oy:tä ja Pirkanmaan Osuuskauppaa kiinnostavasta aiheesta ja rahoituksesta.

Diplomityön tekemisessä minua on ollut auttamassa ja neuvomassa suuri joukko eri tahoja. Kiinteistöhallinta Knowtekistä suuret kiitokset Ari Elorinteelle ja Mikko Arolle. Pirkanmaan Osuuskaupalta erityiskiitokset annan Toni Suloselle sekä Harri Arolalle. Kylmätekniistä avusta suuret kiitokset kuuluvat Pertti Hakalle ja Huurre Finland Oy:lle sekä lämpöpumppuasioista Ari Aulalle. Lisäksi kiitokset professori Timo Kalemalle ohjauksesta ja neuvoista. Haluan kiittää myös kaikkia muita minua diplomityön tekemisessä auttaneita henkilöitä.

Tampereella 7.7.2014

Toni Laine

SISÄLLYS

1.	Johdanto	1
2.	Lämmitysjärjestelmät	3
2.1	Lämmöntuotto	3
2.1.1	Kaukolämpö	3
2.1.2	Lämpöpumppu	6
2.1.3	Lauhdelämmön talteenotto.....	12
2.2	Lämmönluovutus	15
2.2.1	Laskennallinen tarkastelu.....	15
2.2.2	Ilmalämmityksen kytkennät	20
3.	Jäähdytys- ja kylmäjärjestelmät	22
3.1	Tilojen jäähdytys	22
3.2	Kylmäkoneikot	24
4.	Järjestelmien virtaustekninen tasapainotus, säätö ja ohjaus.....	27
4.1	Putkiston painehäviöt	27
4.2	Tasapainotuksen perusteet	28
4.3	Tasapainotusmenetelmät	30
4.4	Kiertovesipumput	33
5.	Tutkimuskohteet.....	36
5.1	Prisma Lielähti	36
5.2	Prisma Linnainmaa.....	42
6.	Energia-analyysi.....	46
6.1	Hypermarketin energiatalous	46
6.1.1	Energiataseet	46
6.1.2	Todellinen kulutus.....	50
6.2	Tutkimuskohteiden energia-analyysi	52
6.2.1	Sääolosuhteet ja lähtökohdat.....	52
6.2.2	Lielahden Prismän energia-analyysi	54
6.2.3	Linnainmaan Prismän energia-analyysi	61
7.	Energiatehokkuuden kehittäminen.....	68
7.1	Lämpöpumput	68
7.1.1	Lämpöpumppujen käyntiajat.....	68
7.1.2	Lämmitysverkoston lämpötilan vaikutus lämpökertoimeen	70
7.1.3	Lämpöpumppujärjestelmän kiertovesipumput.....	73
7.1.4	Maalämmön kaivopiiri	76
7.2	Lauhtumislämpötilan optimointi.....	78
7.2.1	Järjestelmien kytkennät	78
7.2.2	Lauhdelämmön talteenoton optimointi	79
7.2.3	Kesäaikaisen lauhtumislämpötilan optimointi	80

7.3	Ilmalämmitys	83
7.3.1	Aikaohjelmat	83
7.3.2	Parkkihallin tuloilman lämmitys	83
7.3.3	Kiertoilman hyödyntäminen.....	86
7.3.4	Kiertovesipumppujen säätötapa	89
7.4	Lämmitysverkostojen lämpötilat.....	92
7.4.1	Lumensulatusverkosto	92
7.4.2	Muut lämmitysverkostot	97
8.	Yhteenveto	100
	Lähteet.....	103

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet

CO	Hiilimonoksidi eli häkä
EC	Elektronisesti kommutoitu (Electronically Commutated)
EER	Kylmäkerroin (Energy Efficiency Ratio)
GWB	Kylmäaineen vaikutuskerroin ilmaston lämpenemiseen (Global Warming Potential)
HFC	Fluorihiihivety
IV	Ilmanvaihto
JJ	Jäähdytysverkosto
KK	Kylmäkalusteiden alapuhallus
KL	Kaukolämpö
KP	Kompressori
KSV	Kattosäteilijäverkosto
LED	Hohtodiodi eli ledi (Light-Emitting Diode)
LL	Luiskalämmitys
LP	Lämpöpumppu
LS	Lämmönsiirrin
LTO	Lämmöntalteenotto
LV	Lämmin käyttövesi
ppm	Pitoisuuden yksikkö (parts per million)
PU	Pumppu
PV	Patteriverkosto
SÄV	Säätöventtiili
TK	Tuloilmakone

Merkinnät

Affiniteettisäännöt	Pumppu – ja puhallintekniikan perusyhtälöt
Asteisuus	Lämpötilaero lämmönsiirtimen päässä
Atseotrooppinen	Kylmäaineseos, jolla ei ole lämpötilaliukumaa
Ensiö	Kaukolämmön puoli verkostosta
Esisäätöarvo	Säätöventtiilien säätöasteikon yksikkö
Iterointi	Työvaiheiden toisto kunnes haluttu tulos on saavutettu
Jäähdytysteho	Vedenjäähdytyskoneisiin liitettyjen laitteiden lämpöenergiaa poistava teho

Jäähtymä	Kaukolämpöveden meno- ja paluuveden lämpötilojen erotus
Jäätymissuoja	Varotoimenpide jäätymisen estämiseksi
Kiinteä lauhdutus	Lauhtumislämpötila pidetään vakiona
Kondensoituminen	Veden tiivistyminen kosteasta ilmasta
Konduktanssi	Lämmönsiirtimen lämpöpinnan ja U-arvon tulo
kv-arvo	Venttiilin virtaama 100 kPa:n paine-erolla
Kylmäteho	Kylmälaitokseen liitettyjen kylmäkalusteiden ja – varastojen lämpöenergiaa poistava teho
Lauhdelämpö	Lauhduttimesta poistettava lämpöenergia
Lauhdelämpöpumppu	Lämpöpumppu, jonka lämmönlähteenä on kylmälaitoksen lämmönpoistosta vapautunut lämpöenergia
Lämpötilan pysyvyys	Lämpötilan ajallinen kesto tiettyä ajanjaksona
Latentti jäähdytys	Veden tiivistymisen osuus jäähdytyksestä
Liukuma	Lämpötilan muutos höyrystymisen tai lauhtumisen aikana
log p,h-tilapiirros	Kuvaaja, jossa on vaakakselilla entalpia ja pystyakselilla logaritminen paine
Maalämpöpumppu	Lämpöpumppu, jonka lämmönlähteenä on maaperä
Mollierin piirros	Kuvaaja, jolla voidaan käsitellä kostean ilman prosesseja
Pakkas (pakaste)	Etuliite, jota käytetään kylmälaitoksen matalamman lämpötilan kylmäkoneikkopiiristä
Plus	Etuliite, jota käytetään kylmälaitoksen korkeamman lämpötilan kylmäkoneikkopiiristä
Puolihermeettinen	Purettavissa oleva rakenne
Toisio	Kiinteistön lämmitysverkoston puoli
Tseotrooppinen	Kylmäaineseos, jolla on lämpötilaliukuma
Tulistus	Höyryn lämpötilan nosto yli kylläisen höyryn paineen edellyttämän lämpötilan
Tuntuva jäähdytys	Ilman lämpötilan muutoksen osuus jäähdytyksestä
Vaihtuva lauhdutus	Lauhtumislämpötila seuraa lämmitysverkoston lämpötilaa
Välisyöttökylkentä	Kaukolämmön kytkentämalli, jossa lämmitysverkoston lämmönsiirtimeltä palaavaa vettä hyödynnetään käyttöveden esilämmitykseen
ε -NTU – menetelmä	Laskentamenetelmä lämmönsiirtimille

Symbolit

\dot{C}_{maks}	Suurempi lämpökapasiteettivirta	W/K
\dot{C}_{min}	Pienempi lämpökapasiteettivirta	W/K
\dot{V}_a	Avoimen virtausaukon ilmavirta	m ³ /s

\dot{V}_{ov}	Virtaus oviaukosta oviverhopuhaltimella	m^3/s
\dot{V}_t	Tuloilmavirta	m^3/s
\dot{m}_i	Ilman massavirta	kg/s
\dot{m}_k	Kylmäaineen massavirta	kg/s
\dot{m}_l	Liuoksen massavirta	kg/s
ΔT_{kv}	Kylmän ja lämpimän veden lämpötilaero	$^{\circ}C$
ΔT_l	Liuoksen lämpötilaero	$^{\circ}C$
h_1	Entalpia ennen jäädytystä	kJ/kg
h_2	Entalpia jäädytyksen lopussa	kJ/kg
h_a	Entalpia tilapisteessä a	kJ/kg
h_b	Entalpia tilapisteessä b	kJ/kg
A_i	Rakenneosan pinta-ala	m^2
A_{ovi}	Oviaukon pinta-ala	m^2
A_v	Rakennuksen vaipan pinta-ala	m^2
$C_{d,A}$	Pinta-alakohtainen purkauskerroin	$m^3/sm^2 Pa^n$
G_0	Konduktanssi vertailutilanteessa	W/K
H_{ks}	Kylmäsiltojen ominaislämpöhäviö	W/K
H_p	Pumpun nostokorkeus (alaindeksillä 0 eri pisteessä)	m
N_{as}	Asuntojen lukumäärä	kpl
P_k	Kompressorin sähköteho	W
P_p	Pumpun sähköteho (alaindeksillä 0 eri pisteessä)	W
Q_a	Auringon lämpökuorma	kWh
Q_{as}	Asiakkaiden lämpökuorma	kWh
Q_{iv}	Ilmanvaihdon lämpöhäviöt	kWh
Q_{joht}	Johtumisen lämpöhäviöt	kWh
$Q_{kalusteet}$	Kylmäkalusteiden aiheuttamat lämpöhäviöt	kWh
$Q_{kylmä}$	Kylmälaitoksen kokonaislämpöhäviöt	kWh
Q_{lait}	Laitteiden lämpökuorma	kWh
$Q_{lkv,häviöt}$	Lämpimän käyttöveden lämpöhäviöt	kWh
Q_{lkv}	Lämpimän käyttöveden energiankulutus	kWh
Q_{sis}	Sisäiset lämpökuormat	kWh
Q_{val}	Valaistuksen lämpökuorma	kWh
$Q_{varastot}$	Kylmävarastojen aiheuttamat lämpöhäviöt	kWh
Q_{vuoto}	Vuotoilman lämpöhäviöt	kWh
T_H	Höyrystymislämpötila	K
T_L	Lauhtumislämpötila	K
T_j	Jäteilman lämpötila	$^{\circ}C$
T_{kierto}	Käyttöveden kierron paluueden lämpötila	$^{\circ}C$
T_{kv}	Lämpimän käyttöveden lämpötila	$^{\circ}C$
$T_{liuos,sisään}$	IV-patteriin menevän liuoksen lämpötila	$^{\circ}C$

$T_{liuos,ulos}$	IV-patterista lähtevän liuoksen lämpötila	$^{\circ}\text{C}$
T_{lkv}	Lämpimän käyttöveden lämpötila	$^{\circ}\text{C}$
T_m	Menoveden lämpötila	$^{\circ}\text{C}$
T_p	Paluueden lämpötila	$^{\circ}\text{C}$
T_s	Sisäilman lämpötila	$^{\circ}\text{C}$
T_t	Tuloilman lämpötila	$^{\circ}\text{C}$
T_u	Ulkoilman lämpötila	$^{\circ}\text{C}$
U_i	Rakenneosan U-arvo	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
V_{lkv}	Lämpimän käyttövedenkulutus	m^3
$W_{k,val}$	Kylmäkalusteiden valaistuksen sähkönkulutus	kWh
$W_{k,komp}$	Kylmälaitoksen kompressorien sähkönkulutus	kWh
$W_{kylmä}$	Kylmälaitoksen kokonaissähkönkulutus	kWh
$W_{lp,komp}$	Lämpöpumpun kompressorien sähkönkulutus	kWh
W_{lvi}	LVI-laitteiston sähkönkulutus	kWh
$W_{k,puhaltimet}$	Puhaltimien sähkönkulutus	kWh
$W_{pumpppu}$	Pumpun sähkönkulutus	kWh
W_{raunal}	Reunalämmityksen sähkönkulutus	kWh
$W_{sulatus}$	Sulatuksen sähkönkulutus	kWh
$c_{p,i}$	Ilman ominaislämpö	J/kgK
$c_{p,l}$	Liuoksen ominaislämpö	J/kgK
$c_{p,v}$	Veden ominaislämpö	J/kgK
d_i	Putken sisähalkaisija	m
k_{vk}	Verkoston virtausvastuskerroin	$\text{m}/(\text{dm}^3/\text{s})^2$
n_p	Pumpun pyörimisnopeus	$1/\text{min}$
n_v	Vuotoilmakerroin	$1/\text{h}$
q_{50}	Rakennuksen ilmanvuotoluku	$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$
q_{N1}	Lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaama	dm^3/s
q_{kierto}	Lämpimän käyttöveden kierron virtaama	dm^3/s
q_p	Pumpun virtaama	dm^3/s
q_v	Venttiilin virtaama	dm^3/s
Δh_i	Ilman entalpiaero	kJ/kg
ΔT_i	Ilman lämpötilaero	$^{\circ}\text{C}$
ΔT_j	Lämpötilaero rakenneosan eripuolilla	$^{\circ}\text{C}$
ΔT_{kv}	Lämpimän ja kylmän veden lämpötilaero	$^{\circ}\text{C}$
η_{ov}	Oviverhopuhaltimen tiiveyssuhde	
η_t	Tuloilman lämpötilasuhde	
θ_1	Lämpötilaero lämmönsiirtimen alkupäässä	$^{\circ}\text{C}$
θ_2	Lämpötilaero lämmönsiirtimen loppupäässä	$^{\circ}\text{C}$
$\theta_{ln,o}$	Logaritminen lämpötilaero vertailupisteessä	$^{\circ}\text{C}$
θ_{ln}	Logaritminen lämpötilaero	$^{\circ}\text{C}$

ρ_i	Ilman tiheys	kg/m^3
ρ_l	Liuoksen tiheys	kg/m^3
ρ_v	Veden tiheys	kg/m^3
φ	Lämpökerroin	
φ_c	Carnot` hyötysuhde	
ϕ_i	Lämmitysverkoston lämmitystehontarve	W
ϕ_{ilma}	Ilman lämmityksen teho	W
$\phi_{ivpatteri}$	Ilmalämmityspatterin teho	W
$\phi_{jäähdytys}$	Jäähdytysteho	W
ϕ_l	Lauhduttimen teho	W
$\phi_{lämmitys}$	Lämmitysteho	W
ϕ_{lp}	Kylmäainekierron tilapisteen muutosteho	W
$\phi_{ls,l}$	Tilojen lämmityksen lämmönsiirtimen teho	W
$\phi_{ls,lkv}$	Käyttöveden lämmönsiirtimen teho	W
ϕ_{ls}	Lämmönsiirtimen teho	W
$\phi_{patteri}$	Lämmityspatterin teho	W
$\phi_{tilausteho,kok}$	Kokonaistilausteho	W
$\phi_{tilausteho,l}$	Tilojen lämmityksen tilausteho	W
$\phi_{tilausteho,lkv}$	Lämpimän käyttöveden tilausteho	W
ϕ_{tk}	Tuulikaapin lämmitysteho	W
A	Lämmönsiirtopinta-ala	m^2
G	Konduktanssi	W/K
L	Putken pituus	m
NTU	Lämmönsiirtimen dimensioton konduktanssi (NTU-luku)	
Re	Reynoldsin luku	
U	Patterin lämmönsiirtokerroin	W/m^2K
V	Ilmatilavuus	m^3
f	Pumpun taajuusohje	Hz
k	Virtauskerroin	
kv	kv-arvo	$m^3/bar^{0,5}h$
n	Lämmönluovutuseksponentti	
t	Aika	h
v	Nopeus	m/s
x	Kerroin, joka huomio kiinteistön korkeuden	
Δp_p	Putkiston painehäviö	Pa
Δp_{tk}	Paine-ero tuulikaapin ja ulkoilman välillä	Pa
Δp_v	Venttiilin paine-ero	Pa
$\Sigma \zeta$	Kertavastusten summa	
ε	Lämmönsiirtimen dimensioton tehokkuus	

ε_k	Kylmäkerroin	
ν	Kinemaattinen viskositeetti	m^2/s
ξ	Kitkakerroin	

1 JOHDANTO

Hypermarketit edustavat suurta osaa päivittäistavarakaupan kiinteistöjen energiankulutuksesta. Suomessa hypermarketeiksi lasketaan S-ryhmän Prismat ja K-ryhmän Citymarketit. Hypermarketeissa energiankulutus koostuu suurimmaksi osaksi LVI – ja kylmätekniisten järjestelmien lämpö – ja sähköenergian käytöstä.

Tämän diplomityön tutkimuskohteena ovat hypermarkettien lämmitys-, jäähdytys- ja kylmätekniiset järjestelmät. Aiheeseen kuuluvat puhaltimien sähkönkulutusta lukuun ottamatta LVI-järjestelmät kokonaisuudessaan. LVI-järjestelmistä energiateknisessä tarkastelussa ovat lämmitysenergia, pumppauksen sähkönkulutus sekä lämpöpumppujen kompressorien sähkönkulutus. Kylmälaitoksessa päähuomio kohdistuu lauhtumislämpötilatason optimointiin eri vuoden aikoina koko kiinteistön energiatehokkuuden näkökulmasta. Kylmälaitoksen höyrystimen puoli on rajattu aihealueesta pois.

Työssä on tarkastelussa kaksi esimerkkikohdetta, joiden nykyistä energiatehokkuutta pyritään kehittämään. Kohteet ovat Pirkanmaan Osuuskaupan kaksi uusinta Prismaa, jotka sijaitsevat Tampereen Lielahdessa ja Linnainmaalla. Kohteiden käytännön kokemusten avulla pyritään myös analyyttisesti pohtimaan, kuinka tietojen pohjalta voidaan myös muiden markettien energiatehokkuutta kehittää, ja miten tietoaineistoa olemassa olevista kohteista voidaan hyödyntää uudiskohteiden suunnittelussa ja toteutuksessa. Järjestelmien kytkentämuutosten vaikutusta ei tässä työssä käsitellä, koska erilaisia toteutusvariaatioita on erittäin paljon. Lisäksi jokainen marketti on erilainen, jolloin muutokset täytyy aina suunnitella tapauskohtaisesti.

Kiinteistön lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien energiatehokkuus muodostuu seuraavista asioista.

- Suunnittelu
- Järjestelmien tasapainotus ja säätö
- Rakennusautomaation parametrien optimointi todellisen käyttötilanteen mukaisesti
- Järjestelmien seuranta

Suunnittelun merkitys on ehdottomasti suurin. Erityisesti järjestelmien kytkennät ja mitoitukset ovat suuressa roolissa marketin energiatehokkuudessa, koska niihin ei voida helposti jälkepäin vaikuttaa. Suunnittelu ei kuitenkaan yksistään takaa energiatehokasta kiinteistöä.

Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien tasapainotus ja säätö vaikuttavat järjestelmien toimintaan ja energiankulutukseen. Järjestelmien tasapainottomuuden ongelmallisuus

piilee epäkohtien havainnoinnissa, koska ainoastaan erittäin paljon suunnitelmista poikkeava toiminta on helposti huomattavissa.

Rakennusautomaation parametrit asetetaan alkuvaiheessa yleensä tavanomaisiin alalla käytettyihin arvoihin. Jokaisella kiinteistöllä on kuitenkin ominaispiirteensä, jolloin parametreja voidaan muuttaa vastaamaan kiinteistön todellista käyttötilannetta. Hypermarkettien järjestelmät ovat erittäin laajoja ja monimutkaisia, joka tarkoittaa myös erittäin suurta energiasäästöpotentiaalia parametrien optimoinnille. Monimutkaisuudesta aiheutuu myös järjestelmien vahva vuorovaikutus toistensa kanssa, jolloin rakennusautomaation parametrien muutosten tekemisessä täytyy tietää muutosten vaikutus kokonaisuuteen.

Tärkeä osa kiinteistön käyttöä on järjestelmien seuranta. Suurissa järjestelmissä on suuri määrä erilaisia komponentteja, jotka voivat vikaantua. Mitä nopeammin nämä vikaantumiset huomataan ja korjataan, sen paremmin järjestelmä toimii.

2 LÄMMITYSJÄRJESTELMÄT

2.1 Lämmöntuotto

2.1.1 Kaukolämpö

Hypermarkettien lämmöntuotto on usein monen lämmitysjärjestelmän hybridijärjestelmä. Hypermarkettiin päälämmitysmuodoksi kuitenkin soveltuvat vain kaukolämpö ja maalämpö. Muilla lämmitysmuodoilla lämmityskustannukset nousevat liian suuriksi.

Suurien kiinteistöjen yleisin lämmitysmuoto on kaukolämpö. Kaukolämmityksessä kiinteistön tilojen ja käyttöveden lämmitys tehdään lämmönsiirtimen avulla. Yleisin lämmönsiirrin tyyppi on levylämmönsiirrin. Kaukolämmön mitoittamista ja kytkentää ohjeistaa Energiateollisuus ry, joka on luonut koko Suomen kattavan standardoidun järjestelmän. Julkaisu on nimeltään Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet, jonka uusin julkaisu on astunut voimaan 1.9.2013, ja sitä sovelletaan 1.1.2014 lähtien. Ohjeistuksen noudattamisvelvollisuus määräytyy lämmöntuottajan kanssa tehtävän sopimuksen mukana. [1]

Uudessa ohjeistuksessa kaukolämmön mitoituslämpötiloja on hieman alennettu edellisiin ohjearvoihin nähden. Taulukossa 2.1 on esitettyä uudisrakennusten lämmityksen lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat [1, s.8].

Taulukko 2.1 Kaukolämmön mitoituslämpötilat [1, s.8]

	Ensiö		Toisio	
	Tulo(°C)	Paluu(°C)	Paluu(°C)	Tulo(°C)
Radiaattorilämmitys	115	33 (max)	30 (max)	45 (max)
Lattialämmitys	115	33 (max)	30 (max)	35 (max)
Mukavuuslattialämmitys	70	28 (max)	25 (max)	30 (max)
Ilmanvaihto	115	33 (max)	30 (max)	60 (max)

Huomautus

Ensiöpuolen paluulämpötila saa olla korkeintaan 3 °C korkeampi kuin toisipuolen paluulämpötila

Mukavuuslattialämmitys on tarkoitettu vain lattianpinnan lämpötilan ylläpitämiseen miellyttävällä tasolla. Taulukossa esiintyvät termit ensiö ja toisio ovat kaukolämmössä yleisesti käytettyjä termejä. Ensiöpuolella tarkoitetaan kaukolämmön verkkoa ja toisipuolella kiinteistön omaa lämmitysverkkoa.

Lämpimän käyttöveden osalta mitoituslämpötilat ovat ensiöpuolelle 70 °C / 20 °C ja toisiopuolelle 10 °C / 58 °C. Toisiopuolen menolämpötila määräytyy Rakentamismääräyskokoelman osa D1 mukaisesti. Korkealla lämpimän käyttöveden lämpötilalla pyritään välttämään legionellabakteerin kasvu.

Uudisrakennusten mitoitustehot lasketaan Rakentamismääräyskokoelman ohjeiden avulla. Tilojen lämmityksen tehontarve perustuu rakennuksen lämpöhäviöihin ja käyttöveden tehontarve laskettuun käyttöveden mitoitusvirtaamaan. Käyttöveden mitoitusvirtaama q_{N1} määräytyy vesikalusteille laskettujen normivirtaamien summan avulla. Kaavoissa (2.1) ja (2.2) on esitetty tilojen lämmityksen ja käyttöveden lämmönsiirtimen mitoitustehon laskenta. Lämmitystehon kohdalla muuttuja ϕ_i tarkoittaa yksittäistä lämmitysverkostoa, joka kyseisellä lämmönsiirtimellä on tarkoitus kattaa. Kiinteistössä voi olla useita lämmitysverkostoja, jolloin kokonaislämmitysteho muodostuu yksittäisten verkostojen summasta. Olemassa olevissa kiinteistöissä tehontarve mitoitetaan kulu-
tustietojen perusteella.

$$\phi_{ls,l} = \phi_i \quad (2.1)$$

$$\phi_{ls,lkv} = q_{N1}\rho_v c_{p,v}\Delta T_{kv} \quad (2.2)$$

missä ρ_v on veden tiheys, $c_{p,v}$ on veden ominaislämpökapasiteetti ja ΔT_{kv} on kylmän ja lämpöisen veden lämpötilojen erotus, joka voidaan olettaa olevan 50 °C.

Lämmönsiirtimen lisäksi mitoitetaan kaukolämmön tilausteho. Tilausteho tarkoittaa suurinta asiakkaan käyttöön varattua tuntista lämpötehoa, joka on tunnin ajanjakson keskimääräinen lämpöteho. Lämmityksen ja käyttöveden kierron osalta tuntinen lämpöteho on sama kuin suurin mahdollinen tehontarve. Käyttöveden osalta tilausteho voidaan määrittää mitoitusvirtaaman tai asuntojen lukumäärän avulla. Jos mitoitusvirtaama on alle 0,5 dm³/s saadaan tilausteho kaavasta (2.3) ja muussa tapauksessa kaavasta (2.4) [2, s. 5].

$$\phi_{tilausteho,lkv} = 0,35q_{N1}\rho_v c_{p,v}\Delta T_{kv} - 14,1 \quad (2.3)$$

$$\phi_{tilausteho,lkv} = 0,2q_{N1}\rho_v c_{p,v}\Delta T_{kv} \quad (2.4)$$

missä ΔT_{kv} on kylmän ja lämpöisen veden lämpötilojen erotus, joka on 50 °C.

Asuntojen lukumäärän ollessa vähemmän kuin 5 kpl lasketaan tilausteho kaavalla (2.5) ja lukumäärän ollessa enemmän kaavalla (2.6) [2, s. 5].

$$\phi_{tilausteho,lkv} = 0,49N_{as} + \sqrt{60,8N_{as} - 24,3} - 1,3 \quad [\text{kW}] \quad (2.5)$$

$$\phi_{tilausteho,lkv} = 0,28N_{as} + \sqrt{19,9N_{as} - 7,9} + 7,3 \quad [\text{kW}] \quad (2.6)$$

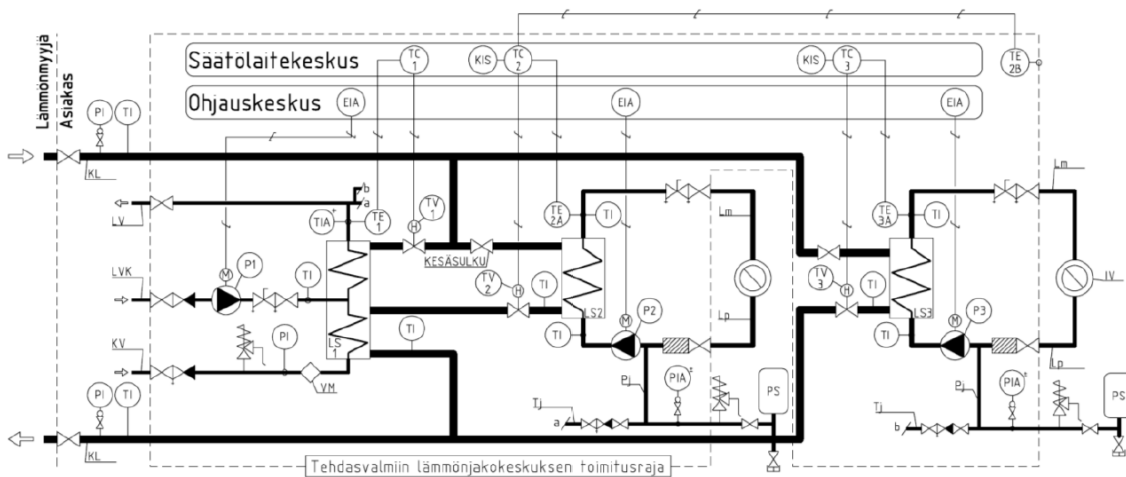
Kokonaistilausteho on lämmityksen ja käyttöveden tilaustehojen summa.

$$\phi_{tilausteho,kok} = \phi_{tilausteho,l} + \phi_{tilausteho,lkv} \quad (2.7)$$

Kokonaistilaustehoa voidaan olemassa olevissa kiinteistöissä päivittää vastaamaan todellista tilannetta. Suurissa kiinteistöissä päivityksellä voidaan saada aikaan suuria kustannussäästöjä.

Kaukolämmön kytkentävaihtoehtoja on useita, ja ne määräytyvät käyttötilanteittain. Suomen Kaukolämpö ry esittää kolme niin sanottua peruskytkentää. Ensimmäinen kytkentämalli on niin sanottu peruskytkentä, jossa käyttövesi ja lämmitysverkko omilla siirtimillään sekä erillisillä putkituksilla. Samalla periaatteella on pientalokytkentä, jossa erona on tasaussäiliön käyttö lämpimän käyttöveden menoputkessa. Kolmantena kytkentä vaihtoehtona on välisyöttökytkentä, jossa lämmitysverkostosta palaavalla kaukolämpövedellä esilämmitetään käyttövesi. Näin ollen kaukolämmölle saadaan parempi jäähtymä. Perusperiaatteena kaikissa kaukolämmönkytkennöissä on saada kaukolämmölle mahdollisimman hyvä jäähtymä.

Kuvassa 2.1 on esitetty kaukolämmön välisyöttökytkentä, jossa on lisäksi ilmanvaihdon lämmönsiirrin.

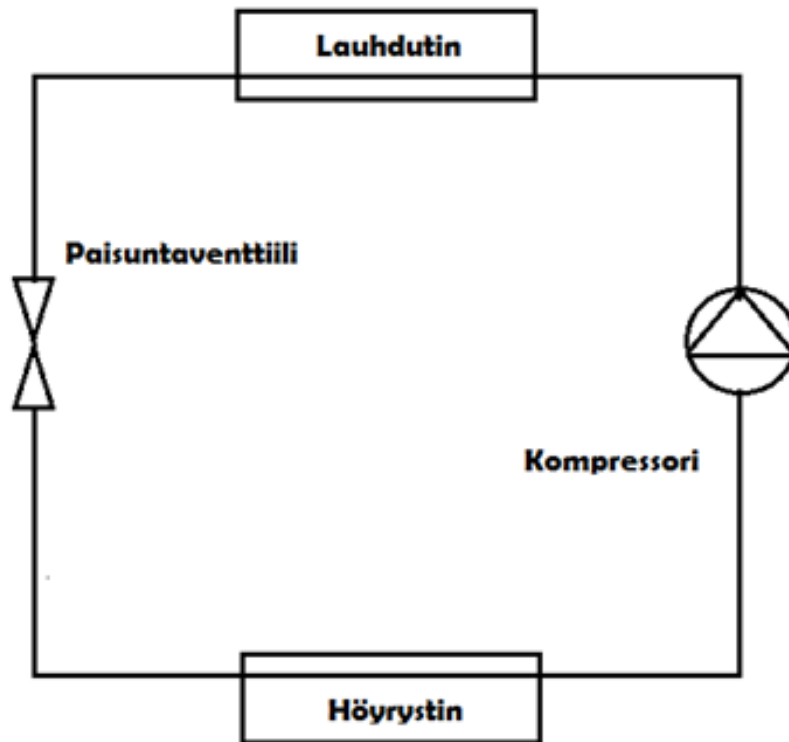


Kuva 2.1 Kaukolämmön välisyöttökytkentä ja ilmanvaihdon lämmönsiirrin [1, s. 86]

Hypermarketeissa itsenäisiä lämmitysverkkoja on tavanomaisesti useita, jolloin niiden kytkentä tulee samalla periaatteella kuin kuvassa ilmanvaihdon lämmitysverkon [1, s. 86].

2.1.2 Lämpöpumppu

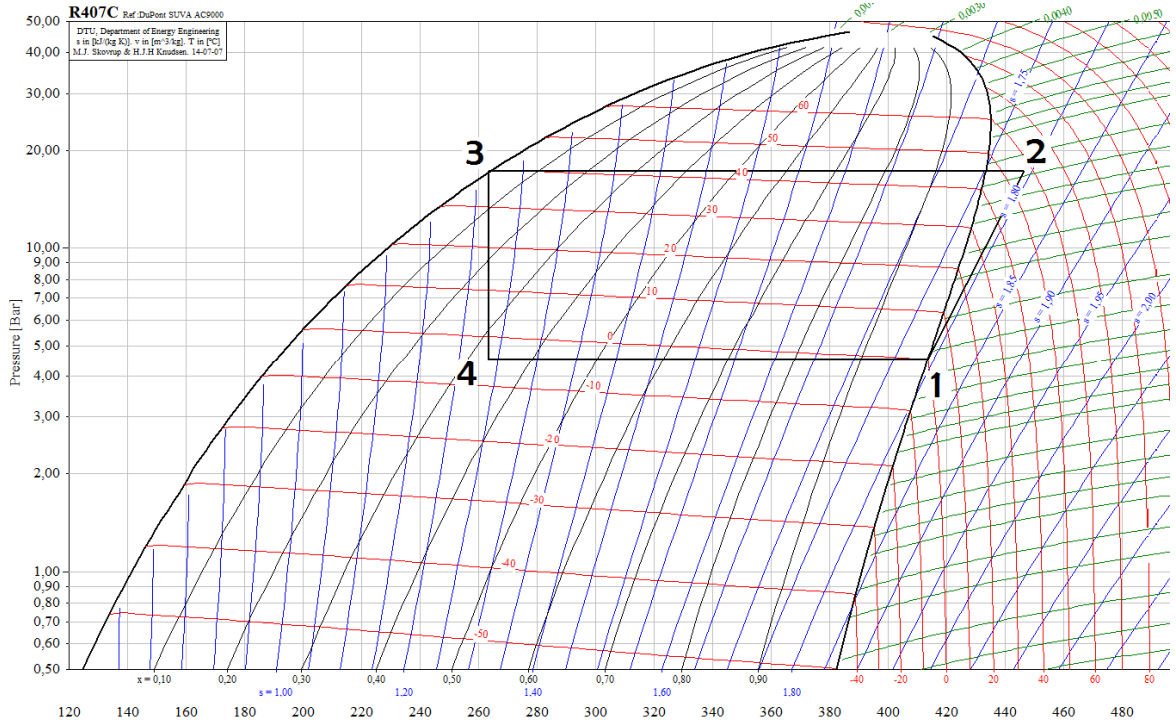
Energian hintojen nousun myötä lämpöpumppujen suosio on kasvanut. Lämpöpumput ryhmitellään usein lämmönlähteen ja lämmönlähteen mukaisesti. Lämmönlähteitä ovat muun muassa maaperä, vesistö, ulkoilma, poistoilma ja kylmäkoneikkojen lauhdelämpö. Lämpöpumpun peruskomponentit ovat höyrystin, lauhdutin, kompressori ja paisuntaventtiili. Kuvassa 2.2 on esitetty lämpöpumpun toimintaperiaate.



Kuva 2.2. Lämpöpumppuprosessi

Kierto alkaa höyrystimestä, joka höyrystää kylmäaineenesteen, ja sitoo lämpöenergiaa joko suoraan alkuperäisestä lämmönlähteestä tai vaihtoehtoisesti välillisestä kierto-putkesta otettavalla lämmöllä. Höyrystimestä kylmäaineen kierto jatkuu kompressorille. Kompressorissa kylmäainehöyry puristetaan ja tämän vaikutuksesta kylmäaineen lämpötila ja paine nousevat voimakkaasti. Lämmenneen kylmäaineen kierto jatkuu kompressorilta lauhduttimeen. Lauhduttimella sitoutunut lämpöenergia luovutetaan. Lauhduttimelta kylmäaineen kierto jatkuu paisuntaventtiilille, jossa paine ja lämpötila laskevat jyrkästi. Paisuntaventtiilin jälkeen vuorossa on jälleen höyrystin ja näin ollen kierto on päättynyt. Höyrystimessä kierto alkaa uudelleen. [3, s. 10]

Laskennallisesti lämpöpumppuprosessia tarkastellaan usein logaritmisella paine-entalpia-tilapiirroksen avulla. Tilapiirroksessa on pystyakselilla esitetty logaritminen paine ja vaakakselilla entalpia. Kuvassa 2.3 on esitetty kylmäaineen R407C log p, h-tilapiirros. Lauhtumislämpötilana on 45 °C ja höyrystymislämpötilana 0 °C.



Kuva 2.3 Log p , h -tilapiirros [4]

Tilapiirroksen rajakäyrä jakaa kylmäaineen eri faaseihin. Rajakäyrän vasemmalla puolella on alijäähtynyttä nestettä ja oikealla puolella tulistunutta höyryä. Käyrän huippu on kriittinen piste. Kriittisen pisteen yläpuolella höyry ei enää nesteydy. Käyrän sisällä kylmäaine on nesteen ja höyryn seosta.

Rajakäyrän lisäksi tilapiirrokseseen on piirretty kylmäaineen kierto-prosessi. Kuvassa välillä 1-2 on kompressori, joka puristaa kylmäaineen ennen lauhdutinta. Välillä 2-3 on lauhdutin, jossa lämpö luovutetaan. Välillä 3-4 on paisuntaventtiili, jossa lämpötila ja paine laskevat voimakkaasti. Lämmönkeräys tapahtuu höyrystimessä välillä 4-1.

Kompressorin, lauhduttimen ja höyrystimen laskennalliset tehot määräytyvät tilapisteen entalpioiden erotuksesta ja kylmäaineen massavirran tulosta. Entalpia ei ole absoluuttinen suure, vaan sille on valittu tietty referenssipiste. Tällä ei ole kuitenkaan merkitystä, kun laskennassa käytetään tilapisteen entalpioiden erotuksia. Kaavassa (2.7) on esitetty kylmäainekierron tilapisteen muutokseen vaadittu teho.

$$\phi_{lp} = \dot{m}_k (h_a - h_b) \quad (2.7)$$

missä

\dot{m}_k	on kylmäaineen massavirta
h_a	on lopetuspisteen a entalpia
h_b	on aloituspisteen b entalpia

Lämpöpumpun prosessin hyötysuhdetta kuvaa lämpökerroin, joka kuvaa tuotetun lämmitystehon suhdetta kompressorin ottamaan sähkötehoon. Kaavassa (2.8) on esitetty lämpökerroin

$$\varphi = \frac{\phi_l}{P_k} \quad (2.8)$$

missä ϕ_l on lauhduttimen teho
 P_k on kompressorin teho

Lämpökertoimelle ja kylmäkertoimelle voidaan esittää myös seuraava korrelaatio (2.9).

$$\varphi = \varepsilon_k + 1 \quad (2.9)$$

missä ε_k on kylmäkerroin.

Carnot'n lämpökerroin on ideaalisen lämpöpumpppuolosuhteen lämpökerroin. Carnot'n lämpökerroin on huomattavasti todellista suurempi, koska se ei huomioi prosessin häviöitä. Carnot'n lämpökerroin lasketaan seuraavasti (2.10). [5, s. 378]

$$\varphi_c = \frac{T_L}{T_L - T_H} \quad (2.10)$$

missä T_L on lauhtumislämpötila
 T_H on höyrystymislämpötila

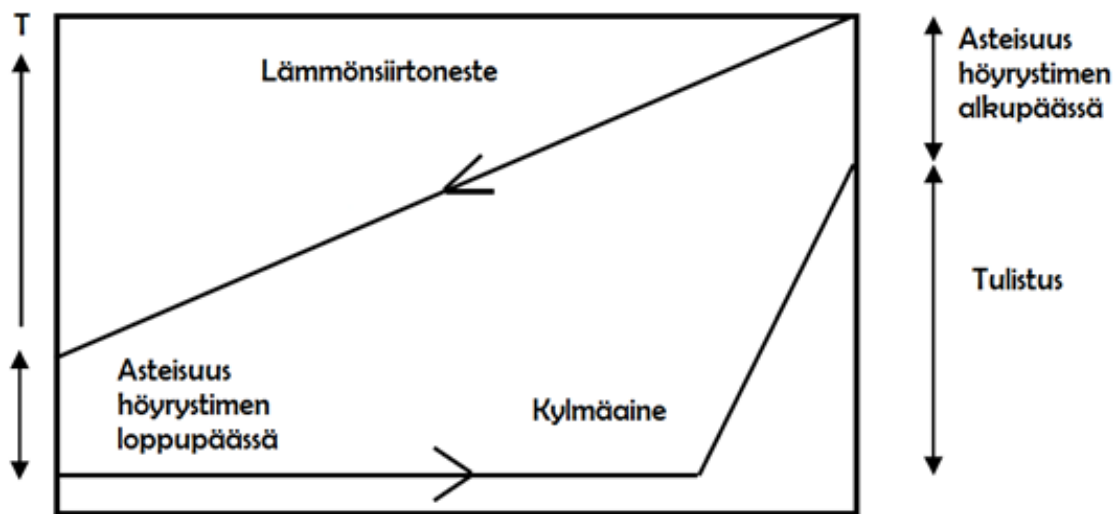
Kaavasta (2.10) nähdään, että lämpökertoimen kannalta edullisinta on, että lämpötila on mahdollisimman korkea lämmönoton puolella ja puolestaan alhainen lämmön luovutuksen puolella.

Lämpöpumpulla on kaksi vaihtoehtoista lämmönlähdettä hypermarketin lämmöntuotannossa. Maaperä on tavanomainen lämmönlähde kaikissa lämpöpumppujen kokoluokissa. Maalämpöpumpun höyrystinverkostossa on tietty määrä lämpökaivoja, jossa kiertää lämmönsiirtoneste. Lämpökaivot ovat suurissa kohteissa 200–300 metrin syvyisiä. Putkena käytetään tavanomaisesti muoviputkea ja lämmönsiirto nesteinä etanolin ja veden sekoitusta. Lämmönsiirtoneste kiertää höyrystimen ja lämpökaivojen välillä jäähtyen höyrystimellä ja lämmiten uudestaan lämpökaivoissa. Lämpökaivoista saatu energiamäärä voi olla hyvin yksilöllistä johtuen maaperän pohjaveden virtauksista. Nykyisin onkin suosittua tehdä ensin niin sanottu testilämpökaivo, jonka perusteella mallinnetaan kiinteistön alla olevan lämpökentän lämmöntuottopotentiaali. Kallioperän lämpötila Suomessa on noin 7-8 °C, jolloin höyrystimelle palaavan nesteen lämpötila on tavanomaisesti yli 0 °C.

Toinen vaihtoehto lämpöpumpun lämmönlähteeksi marketeissa on kylmäjärjestelmien lauhdelämpö. Lämpöpumpulla saadaan lämpötila nostettua hieman korkeammaksi kuin pelkällä kylmäkoneikolla. Lämpöpumppua käytettäessä voidaan kylmäkoneikkoja käyttää alhaisemmalla lauhtumislämpötilatasolla, jolloin sähkönkulutus on alhaisempi. Toisaalta kokonaissähkönkulutukseen täytyy huomioida myös lämpöpumpun sähköteho. Lauhdelämpöpiirin lämpötila pyritään pitämään marketeissa sellaisena, että markettin sähkönkulutus ja lisälämmönlähteiden käytön määrä saadaan minimoitua. Kun läm-

pömpppua ei käytetä, lauhtumislämpötilaa voidaan nostaa ulkoilmanlämpötilan funktiona, jolloin saadaan kasvatettua lämmitystehoa. Lämpötilatason noston kannattavuus täytyy kuitenkin tarkastella aina erikseen jokaisen marketin kohdalla. Lämpöpumpun tapauksessa lauhtumislämpötilan vaihtelutaso on huomattavasti pienempi koska kylmäkoneikon rajoitteiden lisäksi täytyy huomioida lämpöpumpun käyttöalue. Perinteisillä kylmäaineilla kylmälaitoksen lauhtumislämpötila voidaan asettaa 20–25 °C välille.

Lämpöpumpun höyrystin hakeutuu lämpötilatasapainoon lämpöä luovuttavan piirin kanssa. Kylmäaineen ominaisuuksista riippuen kylmäaineen lämpötila voi pysyä vakiona koko höyrystymisen ajan. Tämänlaisia kylmäaineita ovat yksikomponenttiset kylmäaineet sekä atseotrooppiset kylmäaineseokset. Kuvassa 2.4 on esitetty höyrystimen lämmönsiirron lämpötilamalli, jossa lämpötila on vakio höyrystimessä. [3, s. 23]

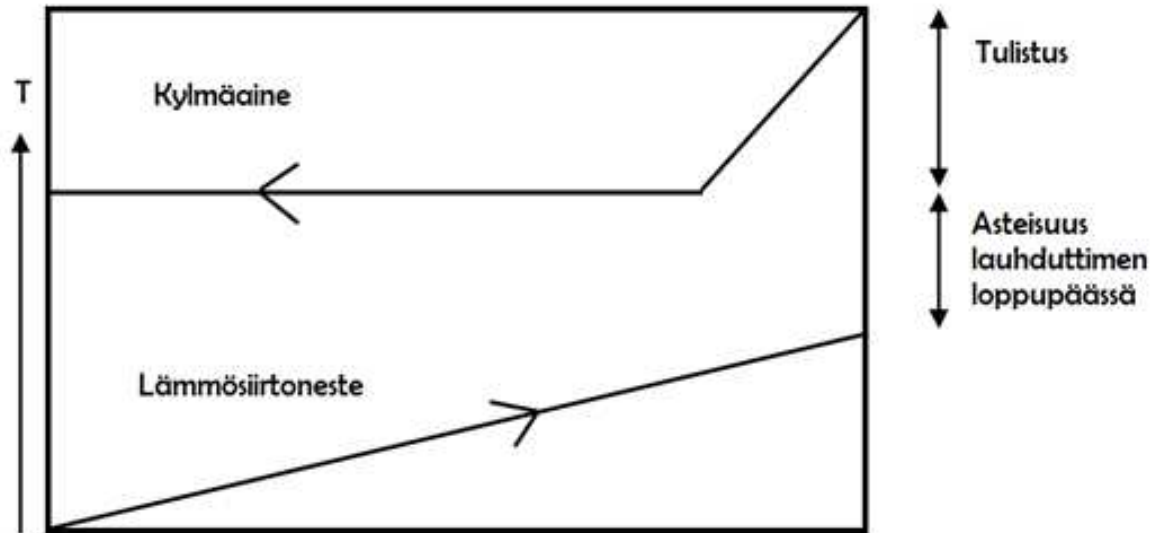


Kuva 2.4. Höyrystimen lämmönsiirron lämpötilamalli [6, s. 2]

Tseotrooppisilla kylmäaineilla puolestaan lämpötila muuttuu höyrystymisen aikana. Lämpötilamuutoksesta käytetään nimitystä lämpötilaliukuma. Käytetyimmät kylmäaineet lämpöpumpuissa ovat R407C, R410A ja R134a, joista ensin mainittu on suosituin lämpöpumpussovelluksissa. R407C:llä on erittäin suuri lämpötilaliukuma, joka täytyy huomioida suunnitteluvaiheessa. R410A:lla lämpötilaliukuma on erittäin pieni ja R134a on yksikomponenttinen kylmäaine, jolla ei ole lämpötilaliukumaa. [3, s. 24]

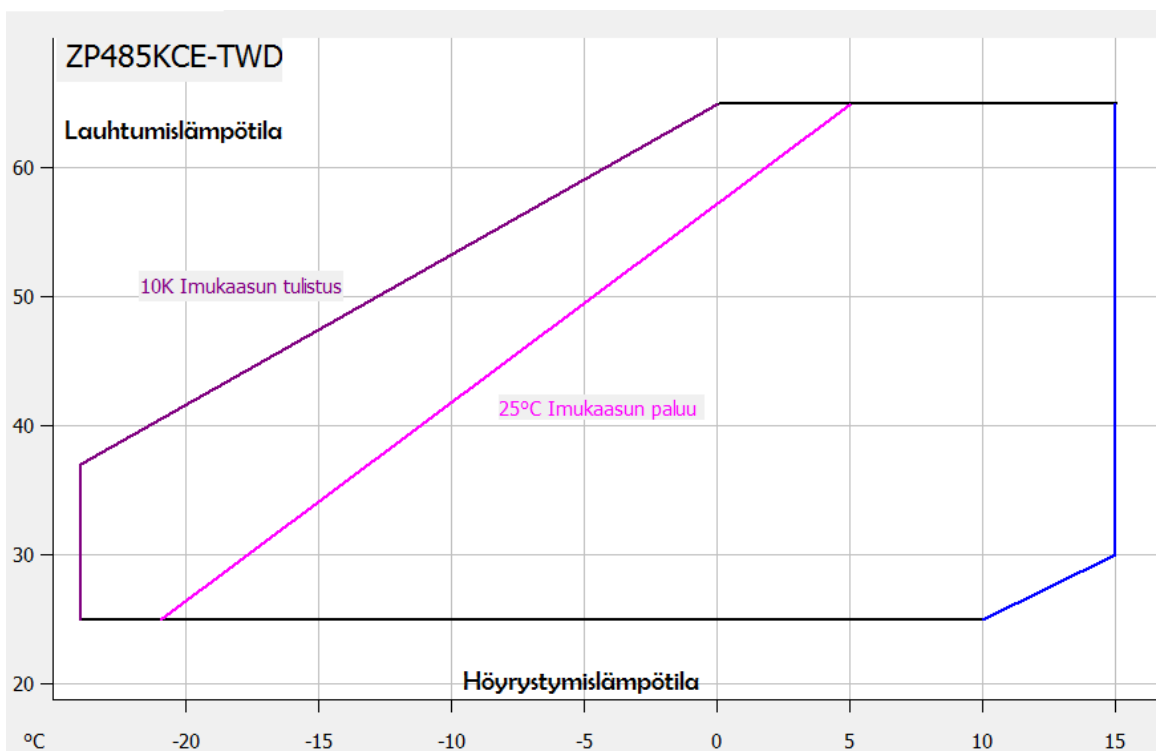
Lämpöpumpuilla on kaksi erilaista lauhtumislämpötilan säätötapaa. Lauhtumislämpötilan seurattessa lämmitysverkon lämpötiloja, on kyseessä vaihtuvalauhdutteinen lämpöpumppu. Kiinteälauhdutus pitää puolestaan vakiolämpötilaa yllä esimerkiksi varajassa, jolloin jäädään huomattavasti huonompaan kokonaislämpökertoimeen kuin vaihtuvalauhdutteisessa säätötavassa.

Lauhduttimessa lämpötilat hakeutuvat höyrystimen tapaan tasapainotilanteeseen lämmitysverkon kanssa. Kuvassa 2.5 on esitetty lauhduttimen lämmönsiirron lämpötilamalli, jossa lämpötila on vakio koko lauhtumisen ajan.



Kuva 2.5. Lauhduttimen lämmönsiirron lämpötilamalli [6, s. 3]

Lämpöpumpuissa käytetyin kompressorityyppi on scroll-kompressori. Suuria scroll-kompressorivalmistajia maailmalla ovat muun muassa Danfoss ja Copeland. Kuvassa 4 on esitetty Copelandin scroll-kompressorin ZP485KCE-TWD käyttöaluekuvaaja. Kylmäaineena on R410A.

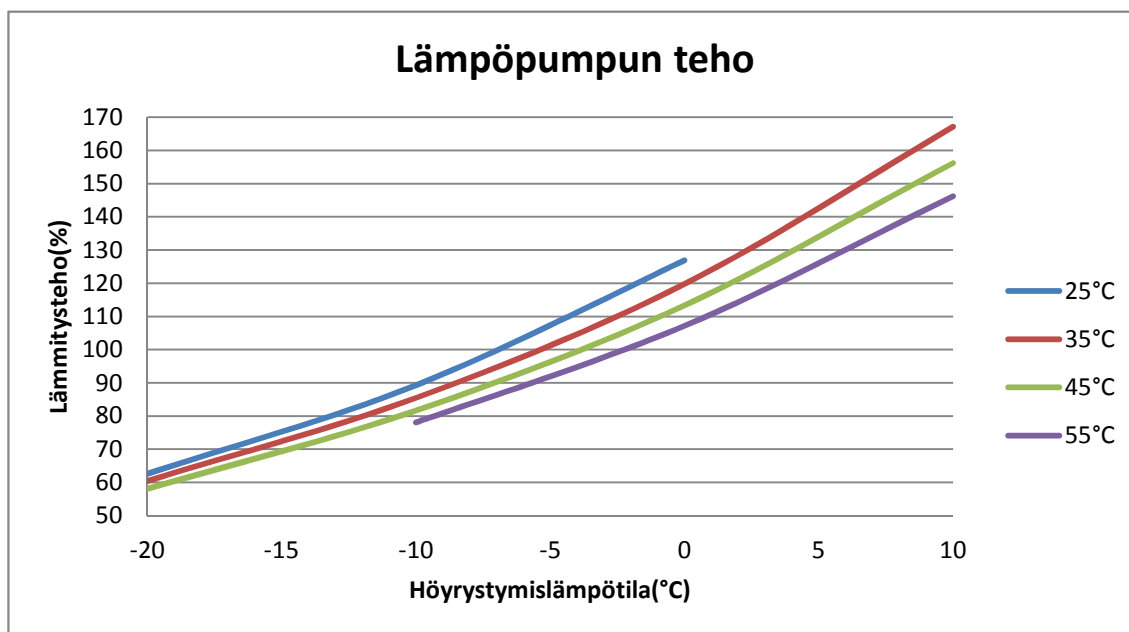


Kuva 2.6. ZP485KCE-TWD -kompressorin toimintalämpötila-alue [7]

Kuvaajassa pystyakselilla on lauhtumislämpötila ja vaaka-akselilla höyrystyslämpötila. Kuvaajan avulla voidaan arvioida kompressorin soveltuvuus eri käyttötilanteisiin. Esimerkkikompressorin kuvaajasta nähdään, että kompressorin sopii hyvin keskilämpötila-alueille. Korkein mahdollinen höyrystyslämpötila on noin 15,0 °C, jonka seurauksena lauhtelämmön talteenotossa on syytä huomioida, että lämpötila pysyy riittävän alhaisena. Lauhtumispuolella rajoitteena on suurin mahdollinen lauhtumislämpötila. Se on esimerkiksi höyrystyslämpötilan alueella 0–15 °C noin 65 °C. Lämmitysverkostojen lämpötilat ovat usein mitoitettu tätä korkeammaksi, jolloin lämmitystarvetta ei voida kokonaan kattaa lämpöpumpulla.

Tarvittavan lämpöpumpputehon arviointiin voidaan käyttää niin sanottua lämpötilan pysyvyyskäyrää. Pysyvyyskäyrästä nähdään kuinka pitkä ajanjakso tiettyä lämpötilaa vuodessa keskimäärin on. Lämpötilan pysyvyyden avulla saadaan painotettua ajallisesti eri ulkolämpötiloilla tarvittavat lämmitystehontarpeet, koska lämmitysteho korreloi ulkolämpötilan kanssa. Lämpöpumppu voidaan mitoittaa joko täysi- tai osatehoiseksi. Osatehoisella mitoituksella voidaan kattaa vuotuisesta energiatarpeesta 80–90% huomattavasti pienemmillä laitteistomitoituksilla.

Lämpöpumpuilla on standardoitu järjestelmä, jonka määräämillä lämpötiloilla ilmoitetaan lämpöpumpun teho ja lämpökerroin. Standardin EN -14511 mukaan lämmitysteho ilmoitetaan siten, että höyrystimelle tulevan liuoksen lämpötila on 0 °C ja lauhtumelta lämmitysverkkoon lähtevä lämpötila 35 °C. Kompressorien teho vaihtelee erittäin paljon eri höyrystymis- ja lauhtumislämpötiloilla. Kuvassa 2.7 on esitetty Copelandin scroll kompressorin lämmitysteho eri lämpötiloilla. Pystyakselilla on ilmaistu tehon suhde standardin mukaiseen tehoon. Kylmäaineena on R407C.



Kuva 2.7. Kompressorin lämmitysteho [7]

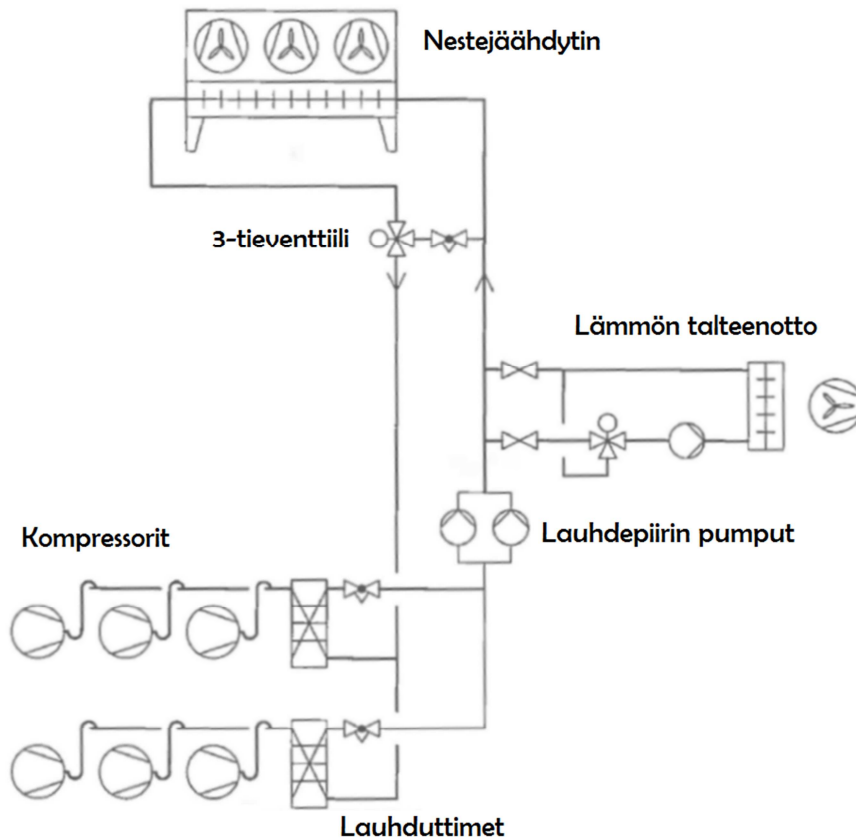
Kuvaajasta voidaan huomata, että höyrystymislämpötilan muutokset vaikuttavat kompressorin tehoon erittäin paljon. Lauhtumislämpötilalla 35 °C ja höyrystymislämpötilalla -10 °C teho on noin 85 % standarditehosta. Jos lauhtumislämpötila pidetään vakiona ja nostetaan höyrystymislämpötilaa 20 °C, on kompressorin lämmitysteho 167 % eli teho on lähes kaksinkertaistunut.

2.1.3 Lauhdelämmön talteenotto

Hypermarketeissa kylmätehontarve on jatkuva, jolloin kylmäkoneikon lauhdelämpöä on tarjolla jokaisena vuoden aikana ja kellonaikana. Yöerhojen käyttö kylmäkalusteissa on vähentänyt yöaikaista kylmätehontarvetta, mutta samalla myös lämmitystehtötarve on yöaikaan pienempi, koska suurin osa ilmanvaihtokoneista voidaan pitää kiinni ja kylmäkalusteiden tilaa jäädyttävä vaikutus on pienempi.

Kylmäkoneikkojen lauhdetta voidaan hyödyntää usealla eri kytkennällä. Lauhdutuksen kytkentä voi olla suora, välillinen tai näiden yhdistelmä. Hypermarket- kokoluokassa etäisyydet usein ovat niin suuria, että välillinen järjestelmä on ainoa järkevä vaihtoehto. Pienemmissä päivittäistavarakaupoissa suoralauidutteiset järjestelmät ovat yleisiä. Suoralauidutteisissa järjestelmissä lauhdutin voidaan asentaa IV-lämmityspatterin tavoin IV-kanavaan tai lauhdutin voi olla suoraan marketin myymälätilassa. Yleinen IV-kanavaan asennettava ratkaisu on ruotsalaisen Kryotherm Ab:n valmistama lämmön talteenottojärjestelmä. Kryothermin järjestelmässä lauhdutin on sarjassa lauhdutinpuhaltimien, jälkilämmityspatterin ja varsinaisen tuloilmapuhaltimen kanssa. Lauhduttimelle ilma otetaan kiertoilmana ja osittain ulkoilmasta. Lauhduttimella lämmennyt ilma voidaan tarpeen mukaan ohjata jäteilmasta ulos, jolloin jäteilman tilalle ohjataan lisää ulkoilmaa. Järjestelmää voidaan käyttää myös välillisenä. Kytkennän ongelma on kuitenkin se, että siinä ei ole ilmanvaihdon lämmön talteenottoa. [3, s. 224]

Välillinen lauhdutus on super- ja hypermarketeissa yleinen tapa ottaa kylmäkoneikon lauhdetta talteen [3, s. 224]. Lauhduttimilla lämmennyt liuos käytetään ensisijaisesti kiinteistön lämmitystarpeisiin ja ylimääräinen lämpö ohjataan nestejäähdyttimille. Uudemmissa marketeissa lauhdutinpiiriä ohjataan usein lauhdutinpaineiden perusteella. Lauhtumispainetta ylläpidetään taajuusmuuttajaohjatuilla pumpuilla, jotka lauhtumispaineen noustessa nostavat pumpun kierrosnopeutta. Lauhtumispaineen minimitaso määritetään lauhduttimille tulevan nesteen lämpötilan avulla. Lauhdepiirin 3-tieventtiili pitää lauhduttimille tulevan nesteen lämpötilan mahdollisimman tasaisena ohjaamalla tietyn osan virtaamasta nestejäähdyttimille, jos lämpöä ei saada hyödynnettyä kiinteistön tarpeisiin. Kuvaajassa 2.8 on liuoskiertoisen lauhdelämmön talteenoton esimerkkikytkentä.



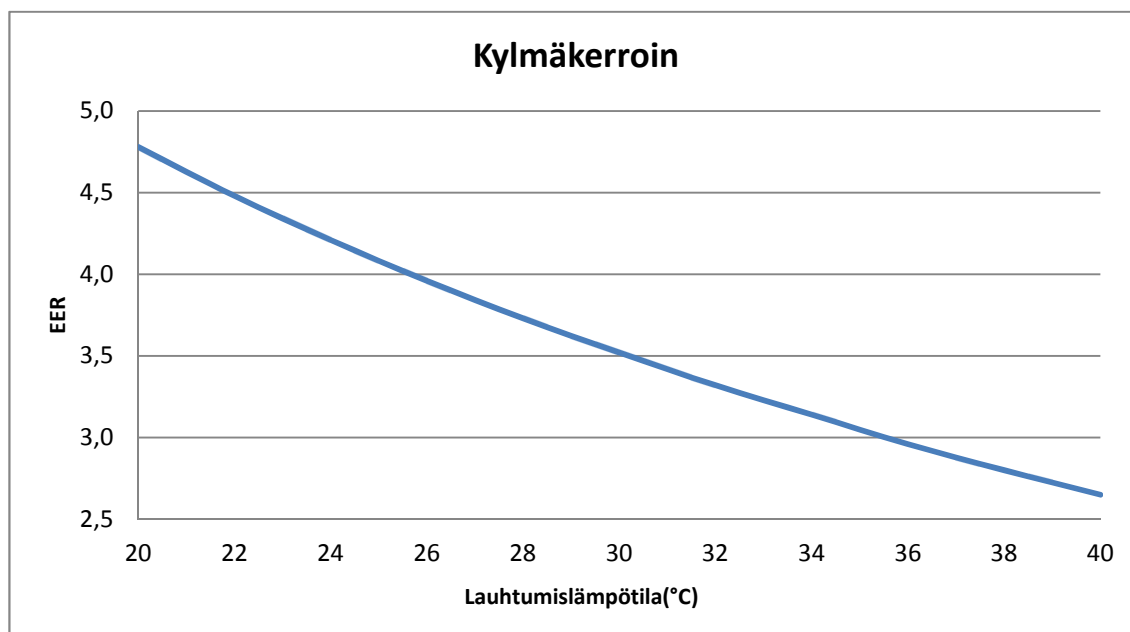
Kuva 2.8. Lauhdelämmön talteenoton kytKentä [3, s.226]

Lauhdelämpö voidaan käyttää joko suoraan tai epäsuorasti lämpöpumpun avulla markettin lämmitykseen. Ongelmana suorassa käytössä on lauhdelämmön matala lämpötilataso. R404A – laitoksessa lämpötila voidaan korkeimmillaan nostaa noin arvoon 36 °C. Suurin osa lämmitysverkoista toimii huomattavasti tätä korkeammille lämpötiloille varsinkin vanhemmissa kiinteistöissä. Toisekseen lauhtumislämpötilan nosto lisää kompressorien sähkönkulutusta. Näin ollen lauhtumislämpötilalle täytyy hakea optimilämpötila huomioiden lämmitystehotarve, lisääntynyt sähkönkulutus, kaukolämmön ja sähkön hintojen suhde.

Kaupan alalla on yleisesti käytössä niin sanottu kelluva lauhdutus, jossa lauhtumislämpötilaa säädetään ulkoilman lämpötilan perusteella. Lauhtumislämpötila pyritään pitämään lämmityskauden ulkopuolella sillä tasolla, että saadaan minimoitua sähkön kokonaiskulutus. Lämmityskaudella lauhtumislämpötilaa voidaan ohjata kiinteistön lämmitystarpeen perusteella nostamalla lauhdepiirin lämpötilaa lämmöntarpeen kasvaessa.

Kylmäkoneikkojen sähkönkulutus kasvaa kun lauhtumislämpötilaa kasvatetaan. Kuvaajassa 2.9 on esitetty kylmäkertoimen riippuvuus lauhtumislämpötilasta. Kuvaajassa on käytetty Bitzerin 4H-25-2Y kompressorin ja kylmäaineen R404A tietoja. Höyrystymislämpötilaksi on valittu - 8 °C, joka vastaa tavanomaisesta pluskoneikon höyryst-

tymislämpötilaa. Termi pluspuoli tarkoittaa kylmälaitoksen korkeamman lämpötilatason piiriä, joka jäädyttää kylmäkalusteita ja -varastoja.



Kuva 2.9. Kylmäkerroin kylmäaineella R404A [8]

Kuvaajasta voidaan huomata, että kylmlaitos reagoi melko jyrkästi korkeampaan lauhtumislämpötilaan. Kuvaajan ääripäiden välillä sähkötehossa on eroa jo lähes puolet, mikä varsinkin suuressa kylmlaitoksessa voi olla erittäin suuri ero käyttökustannuksissa.

Suurissa järjestelmissä on alettu hyödyntämään lämpöpumppua lauhdelämmön talteenotossa. Järjestelmässä lämpöpumppu ottaa lämpöä kylmälaitoksen lauhdepiiristä ja korottaa lämpötilan lämmitysjärjestelmän vaatimaan lämpötilaan, jos lämpöpumpun ominaisuudet riittävät. Lämmitysverkostojen lämpötilat voivat olla kaikista kylmimmillä sääolosuhteilla liian korkeita lämpöpumpulle, joten osa joudutaan lämmittämään esimerkiksi kaukolämmöllä. Myös lämpöpumpun teho voi olla rajoittava tekijä. Lauhtumislämpötilan optimointi lauhdelämpöpumppujärjestelmään on hieman erilainen kuin suorassa lauhdelämmön talteenotossa. Kylmäkoneikkojen lauhtumislämpötilaa ei useimmilla kompressoreilla voida laskea alle 20 °C, jotta paine-ero paisuntaventtiilin yli pysyy riittävänä. Käytännössä lauhtumislämpötila halutaan pitää vielä 20 °C korkeampana, koska lämpötilaa ei haluta asettaa aivan koneikon toiminta-arvojen rajalle. Toisaalta lämpöpumpun höyrystymislämpötilaa ei voida nostaa kovinkaan korkealle. Aiemmin luvussa 2.1.2 on esitetty kuvaaja 2.6, jossa on esimerkkikompressorin lämpötilakäyttöalue, joka vastaa hyvin tavallisen scroll-kompressorin käyttöaluetta. Siitä voidaan huomata, että kylmälaitoksen lauhtumislämpötilan nostolla ei saada hyötyä, koska useimmat lämpöpumput eivät pysty hyödyntämään korkeita lämpötiloja. Näin ollen käytettävissä oleva lämpötilaskaala jää erittäin kapeaksi. Useimmiten lauhteen lämpötila pidetään kylmäkoneikkojen kompressorien minimilämpötilan läheisyydessä.

Laitteistojen toiminta-alueiden sallimissa rajoissa, voidaan lauhtumislämpötila optimoida eri ulkoilman lämpötiloille. Optimipiste on kylmäkoneikkojen sähkönkulutuksen ja kaukolämmön kulutuksen minimi, jossa kulutuksissa huomioidaan kaukolämmön ja sähkön hintojen suhde. Jos lauhdepiirissä käytetään lämpöpumppua, niin huomioidaan lisäksi lämpöpumppujen kompressorien sähkönkulutus.

Kaukolämmön hintataso on erittäin alueellista. Myös sähkön hinnoissa on eroavaisuuksia. Näin ollen täysin LVI- ja kylmäteknikaltaan identtisten markettien optimikäyrä voi olla täysin erilainen eri paikkakunnilla. Lauhdelämmön talteenotossa on kuitenkin tärkeä huomioida, että kylmälaitoksen pääasiallinen tehtävä on elintarvikkeiden säilyvyyden takaaminen, joten laitteiston toiminnallisuuden ei kannata antaa heikentyä lauhdelämmön talteenoton kustannuksella.

2.2 Lämmönluovutus

2.2.1 Laskennallinen tarkastelu

Hypermarkettiin tarvitaan useita erilaisia lämmönluovutintyyppisiä. Lämmönluovuttimen tehtävä on kattaa tilan lämpöhäviöt ja luoda lämpöoloiltaan miellyttävä ympäristö. Lämmönluovuttimet mitoitetaan peittämään tilan johtumisen, ilmanvaihdon ja vuotoilman häviöt ulkoilman mitoituslämpötilassa. Nestekiertoisten lämmitysverkostojen ja verkostoissa olevien lämmönluovuttimen lämmitysteho on kaavan (2.11) muotoa.

$$\phi_{\text{lämmitys}} = \dot{m}_l c_{p,l} \Delta T_l \quad (2.11)$$

missä \dot{m}_l on massavirta
 $c_{p,l}$ on liuoksen ominaislämpö
 ΔT_l on meno- ja paluunesteen lämpötilojen erotus

Toimistoihin ja vastaavan tyyppisiin tiloihin yleisin lämmönluovutin on lämmityspatteri. Lämmityspattereita on useita eri malleja, joista suosituin malli on levyradiaattori. Levyradiaattoreita on tarjolla useita eri kokoja ja useilla eri levyäärillä. Levyradiaattoriin voidaan levyjen väliin lisätä rivoitus, joka lisää lämmönsiirtopinta-alaa ja lisää lämmönsiirtotehoa. Toinen yleisesti käytössä oleva patterimalli on konvektori, jossa lämmönsiirto perustuu suurimmaksi osaksi konvektioon. Konvektoreissa on erittäin tiheä rivoitus. Muita patterityyppejä ovat muun muassa liite-, putki-, ja ripaputkipatterit sekä lämpimän käyttöveden kiertoön liitettävät käyttövesipatterit. [5, s. 161–163]. Lämmityspatterien koon ja sijainnin valinta perustuu esteettisyyteen ja käytettävyyteen.

Tavanomaisesti patteri sijoitetaan ikkunan alle ja patterin pituus valitaan ikkunan leveyden mukaan. Patterin sijoittamista esteiden taakse tulee pyrkiä välttämään, koska patterin lämmönsiirto heikkenee [5, s. 160]. Lämmityspattereiden lämmön luovutus riippuu patterin veden lämpötilasta, tilan lämpötilasta ja patterin lämmönsiirto-ominaisuuksista. Suurin osa patteriverkostoista on mitoitettu lämpötiloille 70/40 °C. Vanhemmissa kiinteistöissä menoveden mitoitus voi olla jopa 80–90 °C. Vuoden 2014 alusta lähtien Energiategollisuus ry:n suosittama mitoituskäytäntö muuttui suhteellisen radikaalisti. Nykyiset suosituslämpötilat ovat 45/30 °C, joka muuttaa runsaasti patteriverkoston mitoitusta. Toisaalta uudisrakennusten lämpöhäviöt ovat myös alentuneet runsaasti, joka osittain kompensoi muutosta. Periaatteessa patterit voidaan mitoittaa mille lämpötilalle tahansa. Lämpötilojen madaltuessa patterikokoa joudutaan suurentamaan, jotta saadaan sama lämpöteho alemmista lämpötiloista. Pattereihin asennetaan patteriventtiilit, joiden avulla säädetään pattereille oikea vesivirta. Tilojen ilmaiskuormien kompensoinnista vastaavat termostaatit, jotka rajoittavat virtaamaa, kun tilan lämpötila ylittää asetetun ylärajan. Patterin lämmönluovutus on esitetty kaavassa (2.12). [5, s. 165]

$$\phi_{patteri} = UA \frac{T_m - T_p}{\ln \frac{T_m - T_s}{T_p - T_s}} = UA \theta_{ln} \quad (2.12)$$

missä	U	on patterin lämmönsiirtokerroin
	A	on patterin pinta-ala
	T_m	on menoveden lämpötila
	T_p	on paluueden lämpötila
	T_s	on sisäilman lämpötila
	θ_{ln}	on logaritminen lämpötilaero

Käytännössä patterin lämmönsiirtokertoimen laskennallinen määrittäminen voi olla vaikeaa, joten usein matemaattisissa tarkasteluissa kannattaa käyttää patterivalmistajien ilmoittamia kokeellisia yhtälöitä.

Lattialämmityksessä lämmitettävän tilan lattiaan asennetaan putkikilnistö, jonka asennusväli, putkikilnistöjen lukumäärä ja pituus määräytyy tilan lämmitystehontarpeen avulla. Suuren lämmön siirtopinta-alan vuoksi lattialämmitysverkosto mitoitetaan huomattavasti alemmille lämpötilatasoille kuin patteriverkosto. Tavanomaisesti menoveden lämpötila on luokkaa 30...45 °C ja verkoston lämpötilaero 5...10 °C [5, s. 185]. Lattialämmitysjärjestelmässä tilojen putkitukset on koottu jakotukeille, joista ne jakaantuvat lämmitettävään tilaan. Jakotukien välillä on putkisto, joka tasapainotetaan linjasäätöventtiileillä samaan tapaan kuin patteriverkoston kohdalla. Jakotukeilla jokainen putkikilnistö tasapainotetaan keskenään, ja varustetaan termostaattisella toimilaitteella. Lattialämmitys on suurissa marketeissa melko vähän käytetty, koska mahdolliset tilamuutokset sekä kylmäkalusteiden kondenssiviemäroinnit ovat aiheuttaneet ongelmia. Nykyisin kuitenkin alipaineviemärointi on yleistynyt, jonka seurauksena lattialämmitys on varustettava lämmitysmuoto. Lisäksi lämpötilatasoiltaan lattialämmitys on erittäin hyvä

markettien lämmitysmuodoksi, koska kylmälaitoksen lauhdelämpö ja lämpöpumput soveltuvat erinomaisesti lattialämmityksen lämpötiloille.

Lämmitysverkostojen lämmitysteknistä käyttäytymistä eri lämpötiloilla ja vesivirroilla voidaan tarkastella asettamalla kaavat (2.11) ja (2.12) yhtä suuriksi, jolloin yhtälö on seuraavaa muotoa

$$UA \frac{T_m - T_p}{\ln \frac{T_m - T_s}{T_p - T_s}} = \dot{m}_l c_{p,v} (T_m - T_p) \quad (2.14)$$

missä UA on konduktanssi, jota voidaan merkitä kirjaimella G . Konduktanssi ei ole vakio, vaan muuttuu säteilyn ja konvektiivisen lämmönsiirtokertoimien mukaan. Lämpötilojen kasvaessa säteilyn osuus kasvaa. Konduktanssille voidaan luoda sovitefunktio logaritmisen lämpötilaeron funktiona. Käytännössä sovitefunktio voidaan luoda esimerkiksi valmistajan antamalla tiedoilla tai mittautiedoilla olemassa olevista kohteista. Sovitefunktio on muotoa (2.15)

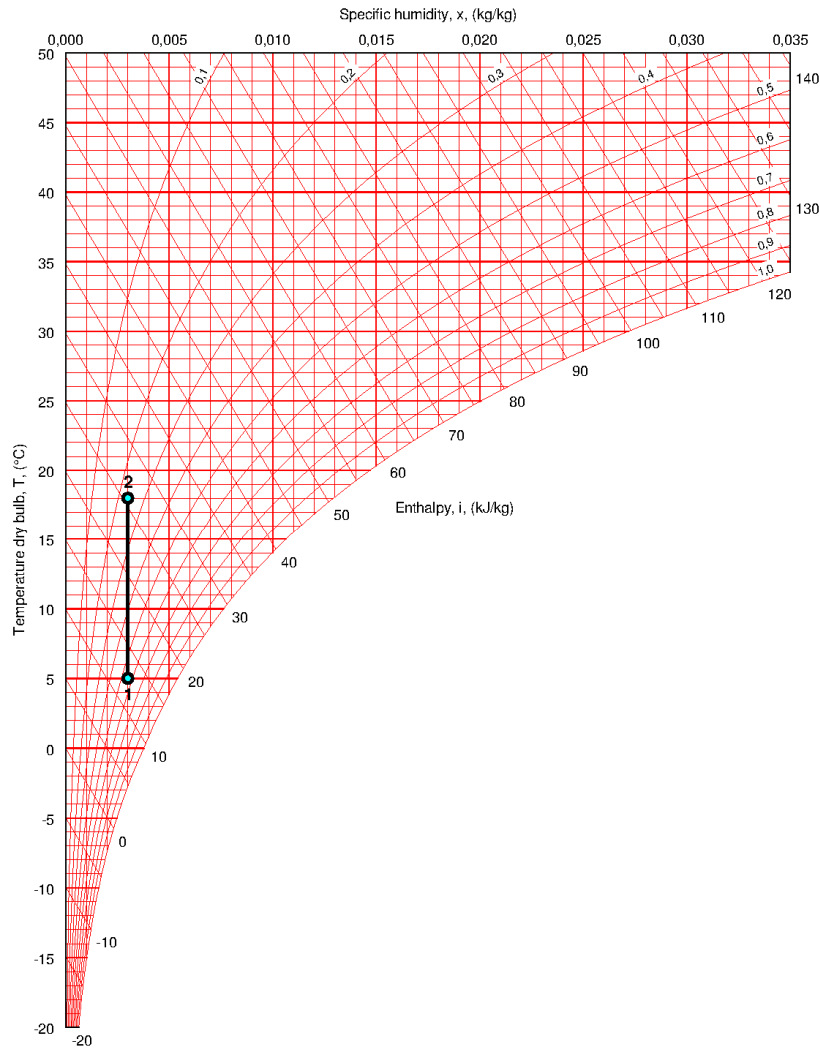
$$G = G_0 \left(\frac{\theta_{ln}}{\theta_{ln,0}} \right)^n \quad (2.15)$$

missä G_0 on konduktanssi ja θ_0 logaritminen lämpötilaero tietyssä vertailupisteessä. Tekijä n on lämmönluovutusekspONENTTI.

Suurten markettien suosituin lämmönjakotapa on ilmalämmitys. Ilmalämmitys voidaan toteuttaa ilmanvaihdon tai kiertoilman lämmityksellä. Ilmanvaihdon lämmitys toteutetaan tuloilmakanavaan asennettavalla liuoskiertoisella lämmityspatterilla. Ilman lämmityksessä pätee seuraava yhtälö [9, s. 90].

$$\phi_{ilma} = \dot{m}_i \Delta h_i \quad (2.16)$$

missä Δh_i on patterille tulevan ja lähtevän ilman entalpioiden erotus. Ilmanlämmitys prosessissa voidaan olettaa, että $\Delta h_i \approx c_{p,i} \Delta T_i$, koska ilmalämmityksessä ei ole latenttia eli kosteuden tiivistymisestä aiheutuvaa tehoa. Ilman lämmitys ja jäädytysprosesseja kuvataan usein Mollier-piirroksen avulla. Kuvassa 2.10 on esitetty Mollierin piirros, jossa on esitettyä ilman lämmitysprosessi, jossa ilma lämmitetään lämpötilasta 5 °C lämpötilaan 18 °C. Ilman lämmityksessä absoluuttinen kosteus ei muutu eli prosessi kulkee aina pystysuorassa linjassa. [9, s. 91].



Kuva 2.10. Mollierin piirros [10]

Mollierin piirroksessa pystyakselilla on lämpötila ja vaaka-akselilla on absoluuttinen kosteus. Lisäksi piirroksessa on piirrettynä entalpian arvot, jotka rajoittavat alueen vinoiviin ja ilman suhteellinen kosteus, joka on kuvassa nähtävissä käyrinä. Vaaka- ja pystyakselin lisäksi käyrää rajoittaa kastepistekäyrä, joka on ilman 100 % suhteellisen kosteuden rajakäyrä.

Laskennallisesti ilmalämmityksen pattereita voidaan käsitellä lämmönsiirtimien matemaattiseen tarkasteluun soveltuvilla menetelmillä. Lämmönsiirintarkasteluissa yleinen laskentamenetelmä on niin sanottu logaritminen lämpötilaeromenetelmä. Menetelmän mukaisesti lämmönsiirtimen teho on muotoa (2.17).

$$\phi_{ls} = G \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}} \quad (2.17)$$

missä θ_1 ja θ_2 ovat lämpötilaerot lämmönsiirtimen eri päissä.

Logaritminen lämpötilaeromenetelmä vaatii tiedon kaikista lämpötiloista siirtimen molemmiin puolin, joka rajoittaa kaavan käyttöä useissa tilanteissa. Monissa laskennallisissa tarkasteluissa huomattavasti käyttökelpoisempi on niin sanottu ε -NTU – menetelmä, jossa voidaan lämmönsiirtimen toimintaa tarkastella vain lämmönsiirtimelle tulevien lämpötilojen avulla. Lämmityspatterissa lähtötietoina riittää patteriin tulevan liuoksen ja ilman lämpötila. ε -NTU – menetelmän laskenta perustuu kolmeen dimensiottomaan parametriin. Ensimmäinen parametreista on patterin konduktanssin ja pienemmän lämpökapasiteettivirran suhde (2.18). [11, s. 5]

$$NTU = \frac{G}{\dot{C}_{min}} \quad (2.18)$$

Lämpökapasiteettivirtojen suhde on puolestaan muotoa (2.19) [11, s. 5].

$$R_C = \frac{\dot{C}_{min}}{\dot{C}_{maks}} \quad (2.19)$$

Parametrien NTU ja R_C avulla voidaan laskea lämmönsiirtimen dimensioton tehokkuus, jonka laskentakaava riippuu virtaustyyppistä ja lämmönsiirtimen geometriasta. Kaavassa (2.20) on suurempien tai yhtä suurten kuin kaksirivisten lämmityspatterien dimensioton tehokkuus. Oletuksena on, että lämmönsiirrin toimii vastavirtaperiaatteella. [11, s. 6].

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1-R_C)}}{1 - R_C e^{-NTU(1-R_C)}} \quad (2.20)$$

Dimensiottomalle tehokkuudelle on lisäksi eri kaavat joillekin erikoistapauksille, kuten lauhtumiselle ja höyrystymiselle. Dimensiottoman tehokkuuden avulla voidaan lopulta laskea lämmityspatterin teho, joka on muotoa (2.21) [11, s. 18].

$$\phi_{ivpatteri} = \varepsilon \dot{C}_{min} (T_{liuos, sisään} - T_{ilma, sisään}) \quad (2.21)$$

missä $T_{liuos, sisään}$ on patteriin tulevan liuoksen lämpötila ja $T_{ilma, sisään}$ on patteriin tulevan ilman lämpötila.

Jos olosuhteet eivät muutu suuresti, voidaan konduktanssi olettaa vakioksi. Muussa tapauksessa laskennassa täytyy huomioida ilma- ja liuosvirran, ilman ja liuoksen lämpötilan, liuoksen lämmönsiirto-ominaisuuksien sekä patterin geometrian vaikutus konduktanssiin (2.22). [11, s. 17].

$$G = f(\dot{V}_i, \dot{V}_l, T_i, T_l, liuos, geometria) \quad (2.22)$$

Oviverhopuhaltimet ovat erittäin suosittuja liikerakennusten sisääntuloissa. Vilkkaimpina aikoina ovien aukaisutiheydet voivat olla erittäin suuria, jolloin ulko- ja sisätilan välisen paine-eron vuoksi ilmavirtaus sisään on esteettömänä suuri. Oviverhopuhaltimet luovat ilmaverhon tilojen välille, jonka avulla voidaan estää ulkoilman virtausta sisätiloihin. Paine-ero muodostuu tilojen välille ilman tiheyserojen, tuulen ja ilmanvaihdon summana. Virtausaukon paine-eroista aiheutuvaa virtausta voidaan laskennallisesti tarkastella kaavan (2.23) mukaisesti [12, s. 5]

$$\dot{V}_a = C_{d,A} A_{ovi} \Delta p_{tk}^k \quad (2.23)$$

missä $C_{d,A}$ on pinta-alakohtainen purkauskerroin
 A_{ovi} on oven ala
 Δp_{tk} on paine-ero sisä- ja ulkopuolen väillä
 k on virtauskerroin

Oviverhopuhaltimen ilmaverhon tiiveyttä voidaan tarkastella suhdeluvulla η_{ov} , joka on muotoa (2.24). [13]

$$\eta_{ov} = 1 - \frac{\dot{V}_{ov}}{\dot{V}_a} \quad (2.24)$$

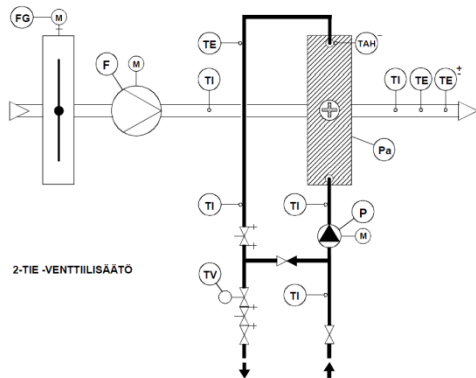
missä \dot{V}_{ov} on ilmavirtaus oviaukosta sisään oviverhopuhaltimen ollessa käynnissä. Tuulikaapin lämmitystehontarve koostuu lähes kokonaan vuotoilmavirrasta. Vähäisissä määrin tuulikaapissa on myös johtumisesta aiheutuvaa lämpöhäviötä, mutta osuus on erittäin pieni. Näin ollen voidaankin tuulikaapin lämmitystehontarve ilmaista seuraavassa muodossa (2.25).

$$\phi_{tk} = (1 - \eta_{ov}) \rho_i c_{p,i} \dot{V}_a (T_s - T_u) \quad (2.25)$$

2.2.2 Ilmalämmityksen kytkennät

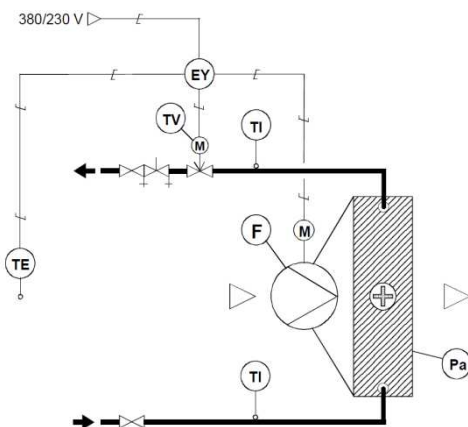
Ilmanvaihdon lämmityspatterit voidaan kytkeä kahdella eri kytkentämallilla. Niin sanottussa 2-tieventtiilikytkennässä on lämmityspatterilla oma pumppu, joka pitää lämmityspatterissa vakiovesivirran. Lämmityksen säätöventtiilin avulla säädetään tuloilman lämpötila halutuksi. Jäätymisriskin eliminoinemiseksi seurataan patterin paluuveden lämpötilaa tai patterin jälkeisen ilman lämpötilaa. Jos lämpötila putoaa raja-arvojen alapuolelle, on ensimmäisenä varotoimenpiteenä lämmitysventtiilin aukaisu ja tämän jälkeen pellin sulkeminen ja tuloilmapuhaltimen pysäyttäminen. Toinen kytkentämalli on 3-tieventtiilikytkentä. Kytkentää käytetään silloin, kun verkostossa ei ole varsinaista pääpumpua.

3-tieventtiin tehtävänä on säätää patterille tulevan ja paluun ohittavan nestevirran suhdetta. Kuvassa 2.11 on esitetty ilmanvaihdon lämmityspatterin 2-tieventtiilikytkentä. [1, s. 92]



Kuva 2.11. IV-lämmityspatterin 2-tieventtiilikytkentä [1 s. 92]

Kiertoilmakoneiden kohdalla kytkentä on hieman erilainen.. Kuvassa 2.12 on esitetty esimerkkykytkentä kiertoilmakoneen liittämistä lämmitysverkostoon.



Kuva 2.12. Kiertoilmakoneen kytkentä [14 s.79]

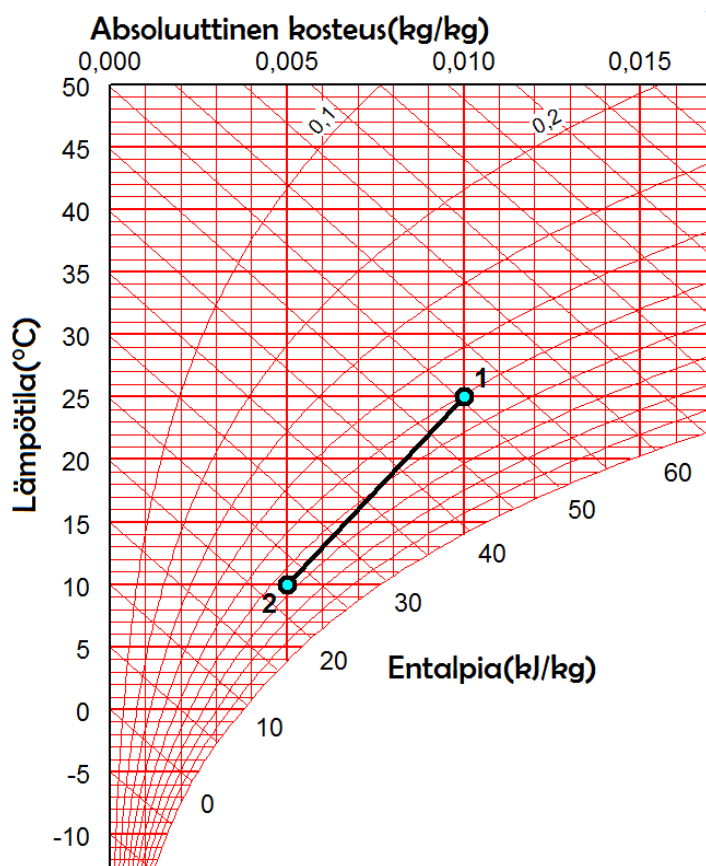
Patterin läpi kulkevaa vesivirtaa säätelee magneettiventtiili, joka aukeaa, kun puhallin käynnistyy ja sulkeutuu puhaltimen pysähtyessä. Kytkentä voidaan tehdä myös säätoventtiilillä, jolloin vesivirtaa voidaan patterissa säätää tarvittavalle tasolle magneettiventtiilin on/off – säädön sijasta.

3 JÄÄHDYTYS- JA KYLMÄJÄRJESTELMÄT

3.1 Tilojen jäähdytys

Liikerakennuksissa ovat suuret lämpökuormat, jotka aiheuttavat joissakin tapauksissa jäähdytystarvetta jopa talvella. Nykyisten rakentamismääräysten mukaisten ohjeistuksen mukaan liikerakennuksen lämpötila saa olla korkeintaan 150 astetuntia asetetun tavoite lämpötilan yläpuolella. Liikerakennusten kohdalla lämpötilan raja-arvo on 25 °C. [15, s. 18]

Jäähdytysprosessi eroaa lämmityksestä kondenssi-ilmiön vuoksi. Jäähdyttävän pinnan lämpötilan ollessa ilman kastepistelämpötilan alapuolella alkaa kondensoituminen. Varsinkin tilojen jäähdytyksen kohdalla kondenssi-ilmiö on tavallinen, koska jäähdytystarve kohdistuu kesäaikaan, jolloin ilman kosteus on suuri. Kuvaajassa 3.1 on esitetty ilman jäähdytysprosessi Mollierin piirroksessa.



Kuva 3.1. Ilman jäähdytysprosessi [10]

Jos jäädyttävän pinnan lämpötila on ilman kastepistelämpötilan alapuolella, voidaan jäädytys jakaa tuntuvaan ja latenttiin osaan. Tuntuva teho tarkoittaa ilman lämpötilan laskuun vaadittavaa entalpiian muutosta ja latentti teho veden tiivistymisen aiheuttamaa entalpiian muutosta. Laskennallisesti jäädytysprosessi voidaan esittää seuraavassa muodossa (3.1).

$$\phi_{\text{jäädytys}} = \dot{m}_i(h_1 - h_2) \quad (3.1)$$

missä h_1 on ilman entalpia ennen jäädytystä
 h_2 on ilman entalpia jäädytyksen lopussa

Hypermarketit eroavat muista liikerakennuksista siinä, että niissä päivittäistavaran kylmäkalusteet aiheuttavat suuren jäädytystehon ympäri vuoden. Nykyisin suuri osa kylmäkalusteista on vielä kannettomia, jolloin saadaan myös suuri kosteuskuormien poisto kylmäkalusteiden avulla. Kesäajan olosuhteet aiheuttavatkin suuren kylmätehon-tarpeen lisäyksen kylmälaitokselle.

Päivittäistavaraosa edustaa vain osaa koko marketin pinta-alasta, jolloin muihin tiloihin täytyy jäädytys toteuttaa. Jäädytys toteutetaan keskitetysti ilmanvaihdon jäädytyksellä ja tilakohtaisesti jäädytyslaitteilla. Laitteisto täytyy valita jäädytystehon tarpeen avulla. Taulukossa 3.1 on esitetty erilaisten jäädytystapojen pinta-akohtaisia maksimijäädytystehoja.

Taulukko 3.1. Erilaisten jäädytystapojen pinta-akohtaiset jäädytystehot [9, s. 43]

<i>Ilmanjakotapa</i>	<i>Jäädytysteho(W/m²)</i>
<i>Tuloilmajäädytys</i>	
<i>Puhallus käytäväseinältä</i>	30
<i>Puhallus ikkunaseinältä</i>	40...45
<i>Lattia- ja ikkunapenkkipuhallus</i>	60
<i>Puhallus alakatosta</i>	60...100
<i>Huonelaite</i>	
<i>Puhallinkonvektori ikkunapenkissä</i>	100
<i>Puhallinkonvektori alakatossa</i>	150
<i>Passiivipalkki</i>	30
<i>Aktiivipalkki</i>	100

Tuloilman jäädytys toteutetaan tuloilmakanavaan asennettavalla jäädytyspatterilla. Jäädytyspatteri voi olla nestekiertoinen tai suorahöyrysteinen patteri. Suurissa järjestelmissä välimatkat ovat suuria, jolloin välilliset järjestelmät ovat parempi ratkaisu. Tavanomainen nestekiertoisen jäädytyspatterin mitoituslämpötilat ovat 7 °C / 12 °C. [9, s. 231] Ilmanvaihdon jäädytysteho on suoraan verrannollinen tuloilman määrään,

jolloin riittävän tehon saavuttamiseksi ilmamäärän riittävyys aiheuttaa ongelmia monissa pienemmissä tiloissa. Myös mahdollinen vedon tunne täytyy huomioida aina jäähdytyksen suunnittelussa.

Toimisto- ja myymälätiloihin asennetaan erillisiä jäähdytyslaitteita kuten puhallinkonvektoreita ja jäähdytyspalkkeja. Puhallinkonvektoreissa kiertää ilmanvaihdon jäähdytyspatterin tavoin neste, joka lämpiää puhallinkonvektorin patterissa. Puhallinkonvektorin lämpötilaa ja jäähdytystehoa säädetään säätöventtiilillä rajoittamalla virtaamaa sekä säätämällä puhaltimen tilavuusvirtaa. Puhallinkonvektorit suunnitellaan usein kondensoimattomiksi, jolloin konvektorissa kiertävä nesteen lämpötila ei voi olla huonetilan ilman kastepistelämpötilan alapuolella. Suunnittelu voidaan tehdä myös kondensoivaksi, jos tilassa on runsaat kosteuskuormat. [9, s. 55–56] Tällöin tarvitaan kondenssivesille kaukalo ja kondenssiviemärointi.

Jäähdytyspalkit toimivat lähes samalla periaatteella kuin puhallinkonvektoritkin. Erona on, että jäähdytyspalkkeissa ei ole erillistä puhallinta. Jäähdytyspalkit jaetaan aktiivi- ja passiivipalkkeihin. Passiivipalkit asennetaan yleensä tilan alakattoon. Palkki jäähdyttää tilan lämmintä ilmaa sen noustessa alakaton rajaan. Viilennyt ilma laskeutuu tiheyserojen vuoksi takaisin alas. Aktiivipalkkeissa tilan sisäänpuhallus on integroitu palkkiin, jolloin saadaan aikaiseksi pakotetun konvektion avulla tehokkaampi lämmönsiirto. Muilta osin aktiivipalkit ovat hyvin samankaltaisia kuin passiivipalkit. Konvektorien tapaan myös jäähdytyspalkit suunnitellaan kondensoimattomiksi, jolloin menoveden lämpötila joudutaan rajoittamaan noin tasolle 14–15 °C. [9, s.50–54]

Konvektorien ja palkkien lisäksi toimistotilojen jäähdytykseen voidaan käyttää niin sanottua split-jäähdytys laitteistoa, joissa on sisä- ja ulkoyksikkö, jotka ovat kylmäainekiertoisia. Käytettyjä kylmäaineita ovat R407C ja R410A eli samat kuin lämpöpumpusakin. Laitteita voidaan käyttää lämmityskäytössä ilma-ilma- lämpöpumppuina. Yleensä split-laitteisto koostuu yhdestä ulkoyksiköstä ja siihen liitetyistä useasta sisäyksiköstä. [9, s.237–239]

3.2 Kylmäkoneikot

Kylmäkoneikkojen teoreettinen perusta ja peruskomponentit ovat samat kuin lämpöpumppujen kohdallakin. Täysin erilainen käyttösovellutus luo kuitenkin täysin erilaiset suunnittelu- ja mitoitusperiaatteet.

Hypermarketeissa on runsaasti erilaisia elintarvikkeita, jotka tarvitsevat erilaiset säilytyslämpötilat. Maa- ja metsätalousministeriö on säätänyt asetuksen pilaantuvien elintarvikkeiden säilytys- ja myyntilämpötiloista. Taulukossa 3.2 on esitetty yksinkertaistettu versio asetuksen 1367/2011 lämpötilavaatimuksista.

Taulukko 3.2. Elintarvikkeiden lämpötilavaatimukset [16, s. 2]

<i>Elintarvike</i>	<i>Lämpötila(maksimi)</i>
<i>Tuoreet kalatuotteet</i> <i>Sulatetut kalatuotteet</i> <i>Keitetyt äyriäiset ja nilviäiset</i>	<i>Sulavan jään lämpötila</i>
<i>Kylmäsavu ja tuoresuola kala</i> <i>Tyhjiö- ja suojakaasupakattu kala</i>	0...3 °C
<i>Jauheliha</i>	4 °C
<i>Maito</i> <i>Kerma</i> <i>Idut</i> <i>Sushi</i>	6 °C
<i>Pastöroidut</i> <i>maitotuotteet</i>	8 °C
<i>Pakasteet</i>	-18 °C

Kaupan kylmälaitoksen mitoitus tehdään kylmäkalustemäärien, kalusteiden ominaistehojen sekä kylmä- ja pakkasvarastojen perusteella. Kylmäkalusteiden kylmätehontarpeen arviointi tehdään kalustevalmistajan antamilla kylmätehotiedoilla, jotka ilmoitetaan muodossa tarvittu teho kalustemetriä kohden. Ilmoitettu kylmätehontarve useilla valmistajilla perustuu standardiin ISO 23953-2, jonka mukaan kylmäkalusteen teho ilmoitetaan sisäilman lämpötilalla 25 °C ja suhteellisella kosteudella 60 % [16, s. 2]. Kylmätehontarpeet voidaan muokata vastamaan todellisia olosuhteita käyttämällä Euroventin sertifiointiohjelman lanseeraamia korjauskertoimia. Korjauskertoimien käytöllä voidaan ehkäistä ylimitoitusta, koska standardin ISO 23953-2 olosuhteet eivät vastaa Pohjoismaiden olosuhteita [16, s. 3]. Kylmä- ja pakkasvarastojen tehontarpeen määrittäminen voidaan tehdä taulukkojen avulla tai laskennallisesti huomioimalla varaston rakenteiden läpi johtuva lämpöenergia, ilmanvaihdon ja vuotoilman kautta tuleva lämpövirta sekä tilan sisäisten kuormien aiheuttama kylmätehontarve. Kylmälaitoksen kokonaiskylmätehontarve saadaan summaamalla kylmäkalusteiden ja – varastojen kylmätehontarpeet. Kokonaistehoon voidaan lisäksi huomioida mahdollinen laajennus ylimitoittamalla kylmälaitos. Erilaisten säilytyslämpötilojen perusteella kylmäkoneikot on jaettu kahteen ryhmään, jotka ovat plus- ja pakkaskoneikot. Pluskoneikot jäädyttävät korkeamman lämpötilan varastoja ja kalusteita. Pakkaskoneikot puolestaan jäädyttävät matalan lämpötilan varastoja ja kalusteita. [16, s. 7-10].

Kylmäkoneikot voidaan jakaa suorahöyrysteisiin ja välillisiin järjestelmiin. Suorahöyrysteisissä järjestelmissä höyrystin on sijoitettu jäädytettävään tilaan. Välillisessä järjestelmässä on jäädytyspatteri, jossa kiertää kylmäkoneikon höyrystimellä jäähtynyt

lämmönsiirtoneste. Suorahöyrytys on Suomessa tavanomaisin kylmälaitosjärjestelmä. Välillisessä järjestelmässä tarvitaan yksi lämmönsiirrin enemmän, jolloin lämmönsiirrimen aiheuttama lämpötilaero heikentää kylmälaitoksen kylmäkerrointa. Myös putkikoot ovat huomattavasti suurempia kuin kylmäaineputkissa. Suuri kylmäainetäytös on suoran järjestelmän huonoin puoli, koska se lisää vuotoriskiä. Vuotoriskin lisäksi öljyn palautuminen ja poistaminen voivat aiheuttaa ongelmia. [17, s. 281–284].

Hypermarketin kylmälaitoksissa käytetyin kylmäaine on R404A. Hiilidioksidi eli R744 on lisännyt osuuttaan pienemmissä marketeissa ja tulee korvaamaan R404A:n tulevaisuudessa uuden F-kaasuasetuksen johdosta. F-kaasuasetus tulee rajoittamaan HFC-yhdisteiden käyttöä EU-maissa [18, s. 1]. R404A suosio markettien kylmälaitoksissa perustuu sen soveltavuuteen alhaiselle lämpötila-alueelle.

Hiilidioksidi kuuluu luonnollisiin kylmäaineisiin, joka on haitaton luonnolle. Hiilidioksidi poikkeaa muista kylmäaineista kylmäprosessin osalta. Hiilidioksidin kriittinen piste on muita kylmäaineita huomattavasti alhaisemmassa lämpötilassa. Kriittinen lämpötila on ainoastaan 31,1 °C, jolloin paine on 73,8 baaria. Näin ollen lauhtuminen tapahtuu usein kriittisenpisteen yläpuolella, jolloin käytetään nimitystä transkriittinen prosessi. Kriittisen pisteen alapuolella prosessi on alikriittinen. Hiilidioksidin suurin ongelma on prosessin vaatima painetaso, mikä täytyy huomioida komponenttimitoituksessa. [17, s. 118,130].

Järjestelmien kytkennät voidaan tehdä erilliskoneikkona tai yhdistettynä koneikkona. Yhdistetyissä koneikoissa pakkaspuolen koneikko on yhdistetty pluspuolen koneikkoon. Järjestelmä koostuu kahdesta piiristä, jotka ovat matalapaine- ja korkeapainepiiri. Kaksiportaisessa järjestelmässä pakkaspuolen koneikon kompressorit (matalapainepiiri) puristavat höyryn niin sanottuun välipaineeseen, joka toimii korkeapainepiirin höyrystymislämpötilaa vastaavaan paineeseen. Toinen yhdistettyjen koneikkojen kytkentätapa on kaskadikytkentä. Kaskadijärjestelmässä on kaksi erillistä eri lämpötilatason kylmäainepiiriä, jossa matalamman lämpötilan ja paineen piirin lauhtutin toimii korkeamman lämpötilan höyrystimenä. Järjestelmän etuna on, että voidaan valita sopiva kylmäaine molemmille lämpötilatasoille. [17, s. 289–291]

Suuritehoisissa järjestelmissä kuten hypermarkettien kylmälaitoksissa on yleistä käyttää rinnankytkettyjä koneistoja, joissa usea kompressorit kytketty rinnan. Rinnankytketyillä koneistoilla saadaan katettua suuret tehot sekä runsas tehontarpeen vaihtelu, jota aiheuttaa esimerkiksi yö – ja päiväkäytön erilainen kylmätehontarpeen profiili [3, s. 139].

4 JÄRJESTELMIEN VIRTAUSTEKNINEN TA-SAPAINOTUS, SÄÄTÖ JA OHJAUS

4.1 Putkiston painehäviöt

Suurta osaa hypermarkettien LVI-järjestelmien sähkönkulutuksesta edustaa lämmitys- ja kylmäjärjestelmien pumppauksen sähkönkulutus. LVI – ja kylmäjärjestelmien päälaiteistot kuten kaukolämmön alajakokeskus, lämpöpumput, kylmäkoneikot, IV-koneet ja vedenjäähdytyskoneet sijoitetaan vain muutamaaan erilliseen sijaintiin, jolloin liuoksia tarvitsee siirtää pitkiä matkoja marketin sisällä. Suurimmissa piireissä liuosvirtaamat voivat olla kymmeniä litroja sekunnissa ja painehäviöt verkostossa satoja kilopascaleita.

Verkoston painehäviöt koostuvat verkoston kitka- ja kertavastushäviöistä. Kitkavastushäviöt muodostuvat putken pinnan ja virtaavan aineen välisestä kitkasta. Kertavastushäviöt puolestaan ovat esimerkiksi venttiilien ja putkimutkien aiheuttamia vastuksia verkossa. Verkoston painehäviö lasketaan kaavan (4.1) mukaisesti [19, s. 32]

$$\Delta p_v = \left(\Sigma \zeta + \frac{\xi L}{d_i} \right) \frac{\rho_l v^2}{2} \quad (4.1)$$

missä	$\Sigma \zeta$	on kertavastusten summa
	ξ	on kitkakerroin
	L	on putken pituus
	d_i	on putken sisähalkaisija
	ρ_l	on liuoksen tiheys
	v	on virtausnopeus

Virtaus jaetaan kahteen eri osaan virtaustavan mukaisesti. Reynoldsin dimensiotonta lukua käytetään jakamaan virtaus laminaariseen ja turbulenttiseen virtaukseen. Reynoldsin luvun ollessa alle 2300 on virtaus laminaarista ja luvun ollessa yli 3000 virtaus on turbulenttista. [19, s. 32] Käytännössä LVI-tekniikan sovellutuksissa putkivirtaukset ovat useimmiten turbulenttisia. Kitkakertoimen laskentaan turbulenttisella alueella on useita eri korrelaatiota, joista käytettyjä ovat muun muassa Colebrookin ja Gnielinskin kitkakerroinyhtälöt. Kaavassa (4.2) on esitetty Gnielinskin kitkakerroin [19, s 32]

$$\xi = (1,84 \log(Re) - 1,64)^2 \quad (4.2)$$

missä Re on Reynoldsin luku

Reynoldsin luku lasketaan kaavan (4.3) mukaisesti [19, s. 33]

$$Re = \frac{vd_i}{\nu} \quad (4.3)$$

missä ν on kinemaattinen viskositeetti. Kertavastushäviöiden laskenta pohjautuu kokeellisiin arvoihin eri vastusten suuruksista, koska niiden määrittäminen teoreettisesti on erittäin hankalaa. Erilaisten venttiilien painehäviöistä virtaaman funktiona löytyvät kattavat tiedot venttiilivalmistajilta.

Putkistomitoituksessa käytetään maailmalla hyvin vaihtelevia mitoitusperiaatteita. Yleensä mitoittavana tekijänä on virtausnopeus tai painehäviö pituusmittaa kohden. Suomessa yleinen tapa on käyttää painehäviöön perustuvaa mitoitusta lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien putkimitoituksessa. Alhaisten virtaamien verkostoissa suurin sallittu painehäviö on yleensä 50 Pa/m. Jos verkoston virtaama on suuri kuten isoissa ilmanvaihdon lämmitysverkostoissa tai alhaisella lämpötilaerolla toimivissa jäähdytysverkostoissa, ominaispainehäviönä täytyy käyttää hieman suurempia arvoja, koska putkikoot kasvavat muuten todella suuriksi. Investointikustannukset voivat kasvaa erittäin korkeiksi, koska suurissa kokoluokissa putkikoon ja venttiilikokojen muutokset vaikuttavat investointikustannuksiin erittäin jyrkästi. Pyrkimyksenä putkimitoituksessa on saada verkosto rakennettua mahdollisimman edullisesti, mutta toiminnaltaan energiatehokkaaksi ja säätöominaisuuksiltaan toimivaksi.

4.2 Tasapainotuksen perusteet

Liuvovirtaamien tasapainotuksella on erittäin suuri merkitys hypermarkettien lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien energiatehokkuuden kannalta. Vaikutukset näkyvät kiinteistön lämmityksen ja sähkön kulutuksessa sekä työntekijöiden että asiakkaiden viihtyvyydessä. Huolimattoman säätötyön vuoksi kiinteistön eri osissa voivat lämpötilat vaihdella erittäin paljon. Myös järjestelmien huojunta on tavanomaista huonosti säädetyssä järjestelmässä, jolloin lämpötila on jatkuvasti epäsuotuissa arvossa ja energiankulutus suurta.

Putkiverkoston suunnittelussa mitoitetään putkistot painehäviökriteerien perusteella ja lisätään verkostoon tarvittavat venttiilit. Jokaisen putkilenkin painehäviö on sama, joten virtausteknisesti eriarvoiset piirit voidaan tasapainottaa keskenään. Tasapainotus tehdään yleensä säätöventtiilien avulla, jolloin painehäviöiden erotukset eri piirien kesken kompensoidaan säätöventtiileillä. Myös virtausteknisesti vaikeimman piirin säätöventtiiliä kuristetaan hieman, jos verkoston säätö tehdään mittaamalla vesivirrat venttiilistä. Kuristus perustuu vesivirtamittarien mittaustarkkuuteen, joka vaatii tietyn paine-

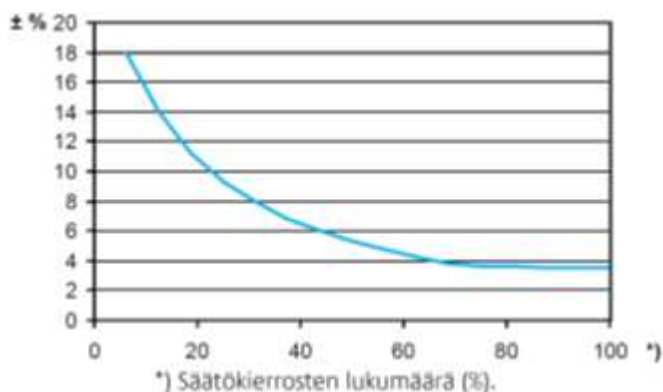
eron venttiilin yli. Vesivirtamittareita valmistava TA Hydronics Oy ohjeistaa käyttämään vähimmäispainehäviönä vähintään 3 kPa [20, s. 2]. Väljästi mitoitetuissa patteriverkoissa säätö kannattaa tehdä niin sanotulla paine-eromenetelmällä, jossa säätöventtiileitä ei käytetä ollenkaan. Menetelmässä säädetään linjojen paine-erot suunniteltuihin arvoihin. Eri linjoissa käytetään patteriventtiilien paine-erona kyseisen linjan paine-eroa. Näin ollen verkoston painehäviöt kompensoidaan patteriventtiileillä. Menetelmä on tarkin ja energiataloudellisin verkkoihin, joissa painehäviöt ovat vähäisiä [21, s. 124–130]. Hypermarket kokoluokassa kuitenkin välimatkat ovat pitkiä ja näin ollen myös painehäviöt ovat kohtuullisen suuria väljälläkin mitoituksella.

Paine-eromenetelmää lukuun ottamatta muut verkoston säätömenetelmät perustuvat vesivirtojen mittaukseen ja säätöön säätöventtiilien avulla. Säätöventtiiliin muodostuu paine-ero, kun venttiiliä kuristetaan. Venttiilien virtausaukon säätöä varten on venttiilissä säätöasteikko, jonka arvot ovat nimeltään esisäätöarvoja. Arvoasteikko vaihtelee venttiilivalmistajan mukaisesti. Esisäätöarvot vastaavat aina tiettyä kv-arvoa. Kv-arvon avulla voidaan määrittää virtaama, kun tiedetään paine-ero venttiilin yli. Kv-arvo tarkoittaa virtaamaa, joka venttiilistä menee läpi 1 bar:in paine-erolla. Virtaaman yksikkönä käytetään m³/h. Venttiilivalmistajilla on kv-arvotaulukoita, joissa on eri venttiilikokojen kv-arvoja eri esisäätöarvoilla. Kaavalla (4.4) voidaan laskea venttiilin virtaama [22, s. 3].

$$q_v = \frac{kv\sqrt{\Delta p_v}}{36} \quad (4.4)$$

missä kv on venttiilin kv-arvo
 Δp_v on paine-ero venttiilin yli

Säätöventtiileiden avulla suoritettavan säädön mittaustarkkuus riippuu suurimmaksi osaksi paine-eron suuruudesta ja esisäätöarvosta. Mittalaitteen mittaustarkkuus paranee, kun paine-ero kasvaa. Esimerkiksi TA CMI mittalaitteen tarkkuus on +/- 0,2 kPa, kun paine-ero on alle 20 kPa ja +/- 1 %, kun paine-ero on enemmän kuin 20 kPa [23, s. 2]. Puolestaan venttiiliä kiristämällä mittaustarkkuus heikkenee, koska venttiilien valmistuksen toleranssi kasvaa. Osa venttiilivalmistajista ilmoittaa valmistustoleranssin vaikutuksen nestevirtaamien mittaustarkkuuteen. Kuvassa 4.1 on esitetty TA STAF linjasäätöventtiilien valmistustoleranssin vaikutus mittaustarkkuuteen venttiilin säätökierrosten lukumäärän eli esisäätöarvojen funktiona kokoluokassa DN65-400. Pienemmissä venttiili kokoluokissa laajalti käytetyn TA STAD linjasäätöventtiilin valmistustoleranssi on hieman parempi, joten vaikutus virtaaman mittaustarkkuuteen on pienempi.



Kuva 4.1. Venttiilin valmistustoleranssin vaikutus mittaustarkkuuteen säätökierrosten funktiona [22, s. 3].

Kuvaajasta nähdään, että pienemmillä esisäätöarvoilla virhe on suurimmillaan jopa +/- 18 %, jota voidaan pitää jo varsin merkittävänä. LVI-säätöurakoissa säädön vaadittuna tarkkuutena käytetään yleisesti nestevirtaamalla +/- 10 %. Vaadittuun tarkkuuteen ei välttämättä kuitenkaan päästä, vaikka mittarin näyttämä olisi täsmälleen vaadittu, koska mittalaitteesta ja valmistustoleranssista aiheutuva kokonaismittausvirhe voi olla suurempi.

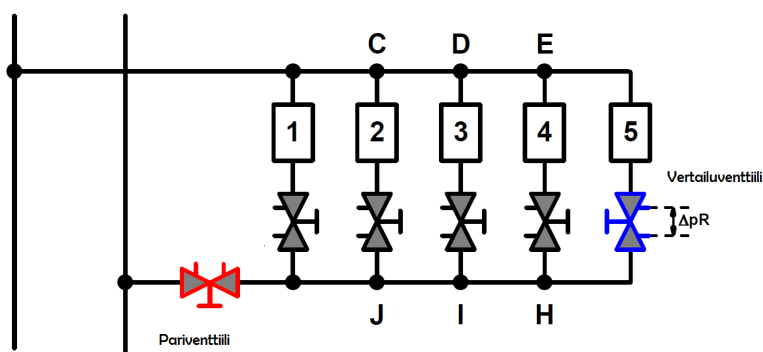
4.3 Tasapainotusmenetelmät

Verkoston tasapainotus voidaan tehdä monella eri tavalla. Esisäätömenetelmä on laajasti käytetty yksinkertaisuutensa vuoksi. Esisäätömenetelmässä verkosto mallinetaan tietokoneohjelmalla ja tasapainotetaan suunnittelutietojen perusteella. Nykyisissä LVI-suunnitteluohjelmissa kuten AutoCad ja Revit -pohjaisessa MagiCadissa verkoston tasapainotus on tehty erittäin helpoksi. Jos verkosto on kohtuullisen tarkasti suunnitellun mukainen, saadaan verkko hyvin tasapainoon pelkästään asettamalla venttiilit suunnitelmien mukaisiin esisäätöarvoihin. Tällöin mittaus- ja säätöurakan toimenpiteiksi jää virtaamien varmennus, hienosäätö ja dokumentointi eli mittauspöytäkirjan laadinta. Usein verkosto poikkeaa suunnitelmista, jolloin verkoston tasapainotus ei esisäätömenetelmällä onnistu.

Verkoston tasapainotukseen on kehitetty useita erilaisia menetelmiä. Suhteellisen menetelmän perusajatuksena on, että piiriin yhteisesti vaikuttavan paine-eron muutokset vaikuttavat yhtä paljon piiriin kaikkiin virtaamiin. Ensimmäisenä vaiheena suhteellisessa menetelmässä on tunnistaa virtausteknisesti vaikein runkojohto avaamalla kaikki linjasäätöventtiilit auki ja määrittämällä jokaiselle runkojohdolle mitatun ja mitoitettun virtaaman suhde. Säätö aloitetaan suurimman virtaamasuhteen piiristä ja jatkuu siitä järjestyksessä kohti pienintä. Haarajohdoissa mitataan jokaisen johdon virtaama ja ku-

ristetaan niitä, joissa virtaama on huomattavasti mitoitettu korkeampi. Tämän jälkeen virtaamat mitataan uudestaan ja säätö aloitetaan niistä haaroista, joissa virtaamasuhde on suurempi tai yhtä suuri kuin yksi. Haarajohdoissa olevista laitteista etsitään venttiili, jossa on pienin virtaamasuhde. Tätä venttiiliä kutsutaan indeksiventtiiliksi. Indeksiventtiili on yleensä verkon perimmäinen venttiili, mutta jos näin ei ole säädetään virtaamasuhteet perimmäisessä ja indeksiventtiilissä yhtä suuriksi. Tämän jälkeen jokaisen venttiilin virtaama säädetään oikeaksi venttiili kerrallaan. Säätö toimii haara- ja runkojohdoissa samankaltaisesti. Kokonaisuutena suhteellinen menetelmä on erittäin työläs ja sen vuoksi suositellaan käyttämään muita säätömenetelmiä. [24, s. 15–20]

Kompensaatiomenetelmä on kehitetty suhteellisesta menetelmästä. Kompensaatiomenetelmässä säätötyö voidaan aloittaa mistä verkoston osasta vain. Piirin perimmäistä venttiiliä kutsutaan vertailuventtiiliksi. Siihen pyritään saaman mittausteknisesti mahdollisimman alhainen paine-ero siten, että mitoitettu virtaama toteutuu. Vertailuventtiilin lisäksi piiriin määritetään pariventtiili, joka on haaran pääventtiili. Kuvassa 4.2 on esitetty periaatepiirros kompensatiomenetelmästä.



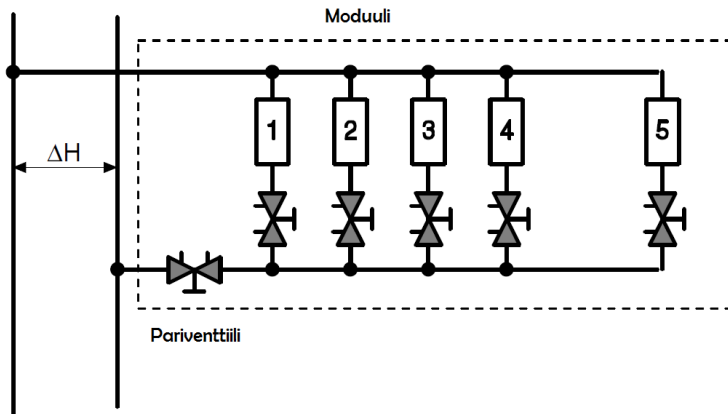
Kuva 4.2. Kompensaatiomenetelmä. [24, s.15–20]

Pariventtiiliin asetetaan mitoitettu virtaama, jonka jälkeen vertailuventtiiliin asetetaan mitoitusvirtaama. Tämän jälkeen jokainen venttiili pari- ja vertailuventtiilin välillä säädetään siten, että vertailuventtiilin paine-ero pyritään pitämään vakiona säätämällä pariventtiiliä. Kompensaatiomenetelmän etuna suhteelliseen menetelmään verrattuna on se, että eri virtaamapiirien virtaamasuhteita ei tarvitse määrittää. Kompensaatiomenetelmällä voidaan myös säätää verkko laajennusurakoissa vain lisättyjen piirien osalta eli koko verkko ei tarvitse säätää uudelleen. Muita menetelmän etuja ovat muun muassa säätötyön nopeus ja verkon kokonaispainehäviön minimointi. Huonona puolena kompensatiomenetelmässä on se, että työn suorittamiseen vaaditaan kolme säätötyöntekijää ja kaksi mittauslaitteistoa. [24, s.22–34]

Kolmas säätömenetelmä pohjautuu matemaattiseen laskentamalliin, jossa venttiilit ja verkosto mallinnetaan virtausmittarilla mitattujen arvojen perusteella. Säätötyönvaiheet ovat seuraavat:

1. Numeroi jokainen venttiili ja syötä venttiilikoko sekä esisäätöarvo
2. Syötä mitoitettu virtaama
3. Mittaa virtaama
4. Sulje venttiili
5. Mittaa paineen muutos
6. Aukaise venttiili
7. Kun kaikki venttiilit on mitattu, suljetaan piirin pääventtiili, jotta tiedetään piirin linjojen yli vallitseva paine-ero
8. Tietojen pohjalta mittalaite laskee uudet esisäätöarvot ja ne asetetaan venttiileille
9. Suoritetaan tarkistusmittaukset ja dokumentointi

Samaa menetelmää voidaan käyttää kaikille verkoston venttiileille. Erona kompensointimenetelmään on, että työ voidaan suorittaa yksin ja yhdellä mittalaitteella. Edut ovat samat kuin kompensointimenetelmissä. Menetelmässä kuitenkin joudutaan venttiili mitaamaan yhden kerran enemmän, koska menetelmä sisältää laskennallisia tietoja varten suoritettua mittauskerran. Jos venttiilit on asennettu ahtaisiin ja hankaliin paikkoihin kannattaa käyttää kompensointimenetelmää. Kuvassa 4.3 on esitetty menetelmän periaatepiirros. [20, s. 1-3]



Kuva 4.3. TA Balance -menetelmä. [20, s. 1]

Kuvassa merkintä ΔH tarkoittaa meno- ja paluulinjan yli vallitsevaa paine-eroa.

4.4 Kiertovesipumput

Verkoston tärkein osa on verkoston pumppu. Nykyisin kierrosnopeussäätö on yleistynyt nopeasti ja sen avulla voidaan saada runsaasti säästöjä pumppauksen aiheuttamissa kustannuksissa. Ilman kierrosnopeussäätöä verkoston säätö suoritettiin tavanomaisesti kuristamalla säätöventtiiliä siinä määrin, että virtaus oli suunnitelmien mukainen. Kuristussäätö luo kuitenkin ylimääräistä painehäviötä verkkoon, jolloin pumpun sähkönkulutus kasvaa. Taajuusmuuttajien ja EC-moottorien avulla verkoston virtaama voidaan säätää pumpun kierrosnopeuksien avulla.

Pumppaustekniikan teorian perustana käytetään affiniteettisääntöjä [19, s. 71]. Affiniteettisääntöjen oletuksena on, että moottorin hyötysuhde pysyy vakiona prosessin aikana, joten kaavojen käyttökelpoisuus on huomioitava tapauskohtaisesti. Affiniteettisäännöt on esitetty kaavoissa (4.5), (4.6) ja (4.7).

$$\frac{q_p}{q_{p,0}} = \frac{n_p}{n_{p,0}} \quad (4.5)$$

$$\frac{H_p}{H_{p,0}} = \left(\frac{n_p}{n_{p,0}}\right)^2 \quad (4.6)$$

$$\frac{P_p}{P_{p,0}} = \left(\frac{n_p}{n_{p,0}}\right)^3 \quad (4.7)$$

missä

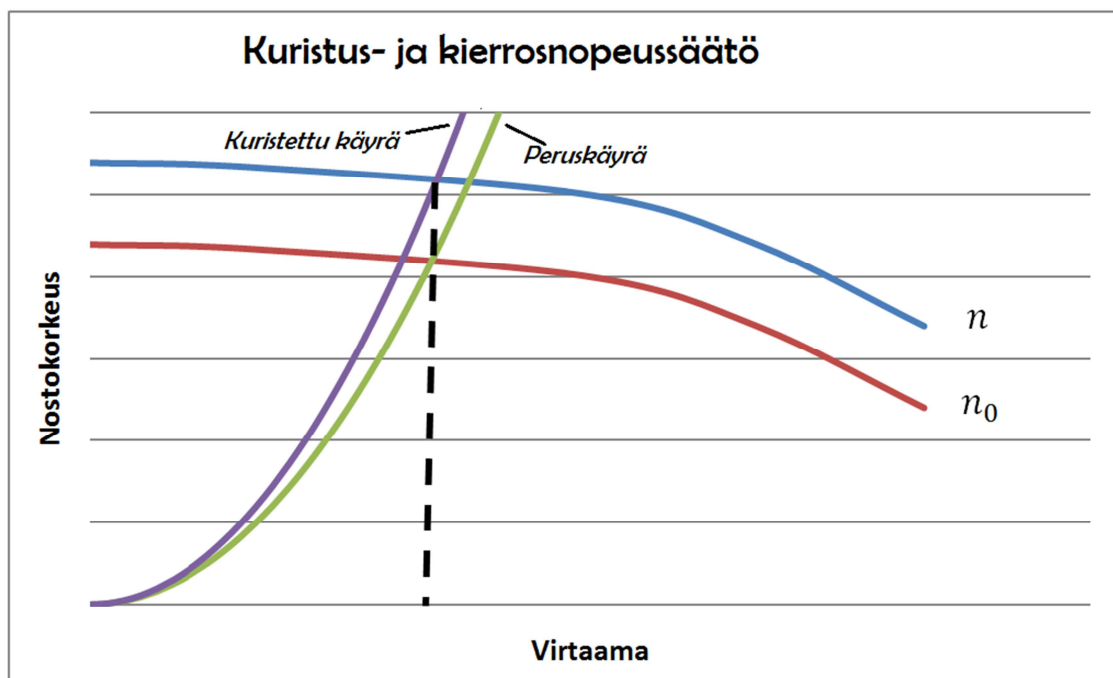
q_p	on pumpun virtaama
n_p	on pumpun pyörimisnopeus
H_p	on nostokorkeus
P_p	on pumpun sähköteho

Pumpun toimintaa tarkastellaan tuottokäyrän avulla. Tuottokäyrässä esitetään pumpun nostokorkeus virtaaman funktiona. Jos pumppu on kierrosnopeussäätöinen, voidaan pumpun toimintapiste valita taajuuden ylä- ja alarajan väliseltä alueelta mistä tahansa. Jokaisella verkostolla on ominainen virtausvastus, joka muuttuu verkoston virtaaman funktiona. Verkoston mitoitettu kokonaispainehäviö ja mitoitusvirtaama määrittävät pumpun toimintapisteen. Toimintapisteen ja origon välille piirretty paraabeli on affiniteettiparaabeli. Affiniteettiparaabelin avulla voidaan määrittää verkoston toiminta muilla pumpun pyörimisnopeuksilla [19, s. 70]. Affiniteettiparaabeli on esitetty kaavassa (4.8).

$$H_p = k_{vk} q_p^2 \quad (4.8)$$

missä k_{vk} on verkoston virtausvastuskerroin.

Kuvaajassa 4.4 on esitetty pumpun tuottokäyrällä kuristus- ja kierrosnopeussäädön ero.



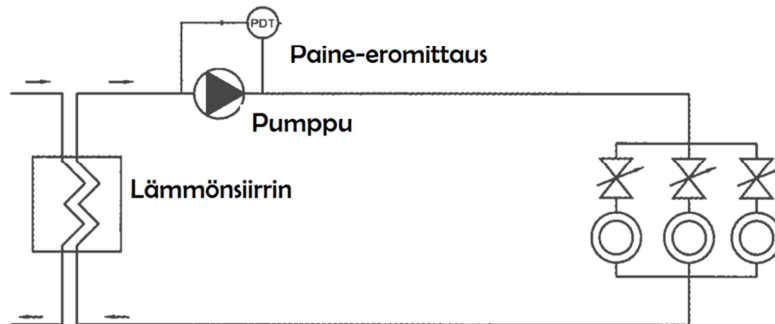
Kuva 4.4. Kuristus- ja kierrosnopeussäätö

Kuvaajassa punainen ja sininen käyrä ovat pumpun tuottokäyriä kahdella eri pyörimisnopeudella n ja n_0 . Violetti ja vihreä paraabeli ovat kuristus- ja kierrosnopeussäädön affiniteetti-paraabeleja. Kierrosnopeussäädön paraabeli on niin sanottu peruskäyrä. Kuristussäädössä paraabeli on jyrkempi, jolloin haluttu virtaama vaatii suuremman nostokorkeuden, jolloin pumpun sähkötehtäjä on suurempi. Kierrosnopeussäädöllä saadaan haluttu virtaama muuttamalla pyörimisnopeus arvosta n arvoon n_0 .

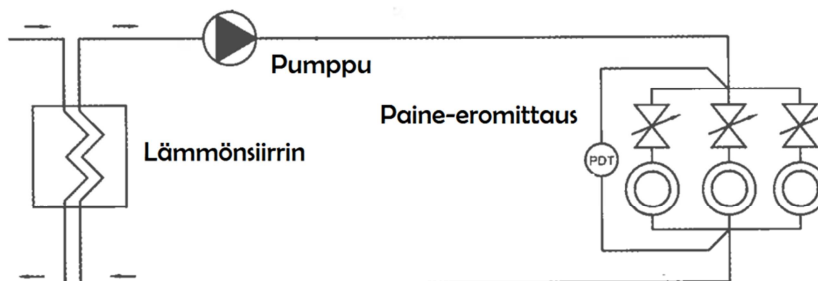
Kierrosnopeussäätöisillä pumpuilla on useita eri säätötapoja käyttötilanteesta riippuen. Verkostoille on ominaista, että tarvittu virtaama voi vaihdella runsaasti. Jos pumpua käytetään vakio- ja vakiopyörimisnopeudella muuttuvan virtaaman verkostoissa, energiankulutus on tarpeettomasti ja ääniongelmien riski kasvaa. Vakiopyörimisnopeussäätöä nimitetään vakiokäyräsäädöksi. Vakiokäyräsäädössä pumpun toimintapiste liikkuu pumpun tuottokäyrää pitkin. Muuttuviin olosuhteisiin on tarjolla kaksi perussäätötapaa, jotka ovat pumpun vakio- ja vakiopaine-erosäätö ja vakio- ja vakiopaine-ero putkistossa -säätö. Pumpun vakio- ja vakiopaine-ero säädössä pumpun pitää vakio- ja vakiopainetta pumpun yli jatkuvasti. Kun verkoston painehäviö pyrkii kasvamaan esimerkiksi termostaattien vaikutuksesta, vähentää pumpun pyörimisnopeutta. Näin ollen verkostoissa, joissa virtaama vaihtuu, voidaan pumpua käyttää usein pienemmällä kierrosnopeuksella kuin mitoitusolosuhteissa. Säätötavan etuna ovat pienentynyt energiankulutus ja ääniongelmien vähentyminen. Vakio- ja vakiopaine-ero putkistossa -säädössä paine-ero meno- ja paluuputken välillä pidetään vakiona, jolloin saadaan huomioon otettua esimerkiksi lämmönsiirtimen vaikutus kokonaispainehäviöön. Erona pumpun vakio- ja vakiopaine-erosäätöön on se, että myös nostokorkeus vaihtelee, jolloin

pumpun kierrosnopeus laskee jyrkemmin. Kuvassa 4.5 on esitetty pumpun vakio paine-eron ja vakio paine-ero putkistossa säätötapojen periaatepiirroksset.

Pumpun vakio paine-ero

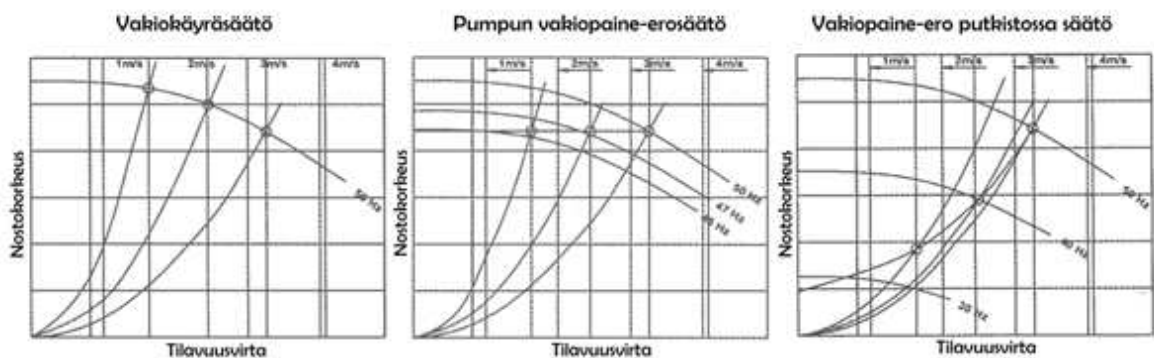


Vakio paine-ero putkistossa



Kuva 4.5. Pumpun vakio paine-ero ja vakio paine-ero putkistossa säätötapojen periaatepiirroksset [19, s. 74–75]

Kuvassa 4.6 on eri säätötavat esitettynä tuottokäyrillä. Kuvasta nähdään säätötavan merkitys pumpun nostokorkeuteen, kun olosuhteet muuttuvat. Kuvassa vakio paine-ero putkistossa säätötavassa pumpun nostokorkeuden käyrä liikkuu ulkopuolisten virtausvastusten kuten lämmönsiirtimen sekä vakiona pysyvän verkoston paine-eron summan määräämää käyrää pitkin.



Kuva 4.6. Säätötapojen tuottokäyrät [19, s. 73–75]

5 TUTKIMUSKOHTEET

5.1 Prisma Lielahdi

Lielahden Prisman lämmitysenergia tuotetaan kaukolämmön, lämpöpumpun ja kylmlaitoksen lauhdelämmön hybridijärjestelmällä. Tilojen lämmönjakotapana on tuloilman lämmitys, patteriverkosto, kattosäteilijäverkosto sekä erilaiset kiertoilmakoneet.

Fyysisesti laitteistot ovat sijoitettu siten, että kaukolämmön alajakokeskus sijaitsee marketin alla sijaitsevassa parkkihallissa, lämpöpumppu 1 ilmanvaihtokonehuoneessa 2 ja lämpöpumppu 2 ilmanvaihtokonehuoneessa 1 yhdessä kylmäkoneikkojen kanssa. Ilmanvaihtokonehuoneet ovat marketin molemmissa päissä vesikaton tasolla. Ilmanvaihtokonehuone 1 on päivittäistavaraosaston ja ilmanvaihtokonehuone 2 käyttötavaraosaston puoleisessa päässä.

Kaukolämmön alajakokeskuksessa ovat patteriverkoston, lämpimän käyttöveden, lumensulatusverkoston ja IV-verkoston 1 lämmönsiirtimet. Patteriverkosto on mitoitettu lämpötiloille 70 °C / 40 °C ja mitoitusvirtaama on 1,11 l/s, jolloin mitoitus-teho on noin 140 kW. Myöhemmin patteriverkostoon on lisätty myymälöiden kiertoilmakoneita. Pääsääntöisesti patterit ovat sijoitettu toimistoihin ja yleisiin tiloihin, joissa sopivien lämpöolojen kannalta lämmityspatteri on toimivin vaihtoehto.

Käyttöveden mitoitus on tehty Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan D1 mukaisesti, jossa vesipisteiden määrän mukaisesti määritetään mitoitusvirtaama. Lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaama on 2,48 l/s, joka tarkoittaa lämmönsiirtimen tehoksi noin 500 kW. Lämpimän käyttöveden kierron mitoitusvirtaama on 0,4 l/s.

Luiskalämmitys on mitoitettu pinta-alakohtaisesti, jolloin neliökohtainen mitoitus-teho on 300 W/m². Mitoitustehon on määritetty olosuhteisiin, joissa ulkoilman lämpötila on -13 °C ja lumisateen määrä 30 mm/h. Lämmitettäviä ulkoalueita on hieman alle 900 m², jolloin mitoitustehoksi saadaan noin 265 kW. Mitoitus lämpötiloina käytetään 40 °C / 25 °C, jolloin lämmityspiirin virtaama on 4,3 l/s. Lämmityspiirin lämmönsiirtonesteenä käytetään jäätyminen estämiseksi vesi-glykoliseosta, jossa glykolipitoisuus on 40 %. Konsentraatiolla saadaan jäätympiste alle -20 °C. Lumensulatusverkostolle on käytössä kaksi erilaista lämmityskäyrää. Normaalina säätökäyrää käytetään silloin, kun ei sada ja korotettu kun sataa. Verkoston lämpötilaa säädetään paluulämpötilan perusteella. Ilmanvaihtoverkosto 1 sisältää parkkihallin neljä tuloilmakonetta TK07-TK10, kolme lisälämmityslämmönsiirrintä ja suurimman osan kiertoilmakoneista. Parkkihallin tuloilmakoneet on mitoitettu lämmittämään 13,4 m³/s ilmavirtaus lämpötilasta -12 °C lämpötilaan 17 °C, jolloin yhden patterinteho on 465 kW. Lämmityspatterit ovat mitoitettu lämpötiloille 60 °C / 40 °C. Kytkenät on tehty perinteisellä 2-

tieventtiilikytkennällä, jossa lämmityspatterilla on oma lämpöjohtopumppu, joka kierättää vettä patterissa. Pääverkossa mitoituslämpötilat ovat 70 °C / 40 °C, jolloin mitoitustilanteessa 2/3 vesivirtaamasta otetaan pääverkosta ja 1/3 ohituksen kautta. Parkkihallin tuloilmakoneet ovat tuloilmasäätöisiä, jolloin niiden tuloilman lämpötila pyritään pitämään asetusarvossaan. Lämmöntalteenottotapana on nestekiertoinen järjestelmä, jossa vesi-glykoliliuos kiertää kahden patterin välillä, jotka ovat sijoitettu tulo- ja poistoilmakanaviin. Lämmöntalteenoton lämpötiloja hallitaan huurtumisen estämiseksi kolmitieventtiilin avulla, joka kierrättää tarvittaessa osan liuoksesta patterin tuloilmapatterin ohi. Lämmityspatterille määritetään lämmityksen paluuveden asetusarvo ja jäätymissuojan asetusarvo. Kun paluuvesi saavuttaa lämmityksen paluuveden asetusarvon, aukaistaan lämmityspatterin säätöventtiili kokonaan. Jos lämpötilan lasku ei pysähdy venttiilien aukaisusta huolimatta saavutetaan jäätymissuojan asetusarvo, jolloin tuloilmapuhallin pysähtyy ja tuloilmapelti sulkeutuu. Tuloilman pelti suljetaan, koska parkkihallin ja ulkoilman välinen paine-ero voi aiheuttaa ilmavirran, joka saattaa jäädyttää patterin. Jäätymissuojan asetusarvoa ei saavuteta yleensä, jos kaikki verkoston komponentit toimivat. Yleensä syy jäätymissuojan laukeamiseen ovat häiriöt verkoston toimilaitteista. Häiriöitä ovat esimerkiksi lämmityspatterin tai pääverkon pumpun hajoaminen, moottoriventtiilien toimintahäiriöt tai lämmöntuotannon häiriöt. Lämmityspatterin ohitusputkeen asennetaan usein myös takaiskuventtiili, jolloin lämmityspatterin pumpun hajotessa saadaan pääpumpun avulla virtaus patteriin.

IV-verkossa 1 on kolme lämmönsiirrintä, joita käytetään lämpöpumppujen lämmitysverkostojen mahdollisen lisälämmöntarpeen täyttämiseksi. Syynä lisälämmityksen tarpeeseen voi olla lämpöpumpun lämpötilatasojen tai tehokapasiteettiin riittämättömyys. Kaksi lämmönsiirtimistä palvelee maalämpöpumppua ja yksi lauhdelämpöpumppua. IV-verkon 1 kierrätysilmakoneet koostuvat sisääntulojen ja parkkihallin koneista. Koneiden kytkentä on tehty kuvan 2.12 mukaisesti, missä ei koneilla ole erillisiä omia pumppuja, kuten tuloilmakoneiden lämmityspattereissa. Kiertoilmakoneiden toimintaa säädetään tilan lämpötilan asetusarvon perusteella. Tuulikaapeissa moottoriventtiilien lisäksi ohjataan myös puhaltimen taajuutta ulkoilman lämpötilan perusteella. Kaikki kiertoilmakoneiden lämmityspatterit ovat mitoitettu lämpötiloille 70 °C / 40 °C.

Ilmanvaihtokonehuoneessa 2 on toinen hypermarketin lämpöpumpuista. Lämpöpumppua käytetään kesäaikaan myös vedenjäähdytyskoneena. Lämpöpumpun lämmönlähteenä on marketin alle porattu kaivokenttä, jossa 40 kappaletta 200 metriä syviä kaivoja. Kaivoissa kiertää vesi ja etanolin seos, jossa etanolin osuus konsentraatiosta on 27 %. Lämpöpumppu koostuu neljästä kompressorista, jotka ovat kytketty rinnan. Lämmityskäytössä lämpöpumpun teho on 420 kW, kun höyrystimelle tulevan nesteen lämpötila on 2,0 °C ja lauhduttimelta lähtevän nesteen lämpötila 52,0 °C. Mitoituslämpötilaerot lämmönsiirtimien yli ovat höyrystimellä 3,5 °C ja lauhduttimella 6,0 °C. Lämpöpumpun teho korreloi erittäin vahvasti höyrystymislämpötilaan, joten kaivokentän ominaisuuksista ja vuotuisesta energiataseesta riippuen höyrystin puolen nesteen lämpötila voi vaihdella runsaastikin. Jäähdytyskäytössä mitoitusteho on 426 kW, kun höyrystimelle tulevan nesteen lämpötila on 11,0 °C ja lauhduttimelta lähtevän nesteen

lämpötila 42,0 °C. Lämpöpumpun jäähdytyskäyttö on mitoittava tekijä integroidussa lämmitys- ja jäähdytyskäytössä. Lämpöpumpun höyrystinpuolen kytkentä on suunniteltu käytettäväksi kolmessa eri käyttötilanteessa, jotka ovat lämmitys, koneellinen jäähdytys ja vapaajäähdytys. Lämmityskäytössä verkoston liuos kiertää porakaivojen kautta höyrystimelle. Lisäksi kolmitieventtiilin avulla ohjataan osa kylmävaraajan lämmönsiirtimen kautta, jos varaajan lämpötila on noussut asetusarvostaan. Koneellisessa jäähdytyksessä suljetaan kaivokentän piiri, jolloin liuos kiertää kylmävaraajan lämmönsiirtimen ja höyrystimen välillä. Lauhdutinpuolella lämpöä voidaan käyttää kolmeen eri kohteeseen tilanteesta riippuen. Lauhduttimen lämpöä voidaan luovuttaa kaivokenttään, vesikatolla sijaitsevien nestejäähdyttimien kautta ulkoilmaan tai lämmitysvaraajan, jos lämmitysverkolla on pyyntiä. Vapaajäähdytyksessä liuos kiertää kaivojen kautta kylmävaraajan lämmönsiirtimelle. Vapaajäähdytystä voidaan käyttää niin kauan kuin se kykenee pitämään jäähdytyspiirin lämpötilan riittävän alhaisena. Lauhdutinverkosto on puolestaan kytketty lämmitysverkoston lämmönsiirtimeen, nestejäähdyttimeen ja kaivojen lataussiirtimeen. Lämmityskäytössä lämpö luovutetaan lämmitysverkkoon. Lämmitysverkostoon kuuluvat tuloilmakoneet TK03, TK06 ja TK16 sekä kattosäteilijäverkostot. TK03 on tuloilmakoneista suurin ja sen alueena on marketin käyttötavaraosasto. TK06 on puolestaan myymälöiden ja TK13 varaston tuloilmakone. Fyysisesti kaikki tuloilmakoneet sijaitsevat samassa tilassa maalämpöpumpun kanssa. Tuloilmakoneiden kytkentä on suoritettu samalla tavoin kuin parkkihallisakin. Lämmityspatterien mitoituslämpötilat ovat 50 °C / 30 °C, joten ne ovat hieman parkkihallia alhaisemmat. Parkkihallia lukuun ottamatta muut hypermarketin tuloilmakoneet ovat kaskadisäätöisiä eli niiden lämpötilaa säädetään huoneilman tai poistoilman lämpötilan perusteella.

Säteilylämmönsiirto vaatii korkeita lämpötiloja, joten kattosäteilijät mitoitetaan korkeille lämpötiloille. Lielahdessa kattosäteilijät on mitoitettu 70 °C / 45 °C lämpötiloille. Kattosäteilijöiden lämpötilan säätö on tilakohtainen ja menoveden lämpötilaa säädetään huonelämpötilan perusteella. Lämpöpumpun lämmitysverkon lämpötilan säätö on ohjattu rakennusautomaatiosta siten, että lämmitysvaraajan lämpötila pyritään pitämään ulkoilman lämpötilaan suhteutetussa asetusarvossa. Käytännössä kuitenkin lämmitysverkon lämpötila hakeutuu siihen lämpötilaan missä piirin korkein haluttu lämpötilataso on. Jos lämpöpumpun lämmitysteho tai lämpötilataso ei riitä, käytetään IV-verkoston 1 lisälämmityssiirtimiä, jotka ovat kytketty lämmityspiiriin.

Lämpöpumpun kylmävaraaja on kytketty tuloilmakoneisiin TK03 ja TK06, myymälöiden puhallinkonvektoreihin sekä kolmeen viidestä kattosäteilijäverkoista. Tuloilmakoneet ja puhallinkonvektorit ovat mitoitettu lämpötiloille 9 °C / 14 °C. Jäähdytyksen säätö toimii huonelämpötilan perusteella. Kattosäteilijöiden mitoitus 15 °C / 19 °C. Kattosäteilijöiden jäähdytyksen aikainen lämpötilan säätö on toteutettu samalla periaatteella kuin lämmityksenkin kohdalla. Jokaisella kattosäteilijäpiirillä on oma tilakohtainen säätökäyrä, jota säädetään huonelämpötilan perusteella. Kattosäteilijät ovat suunniteltu jäähdytyspalkkien tavoin kondensoimattomiksi, jolloin kattosäteilijän kondenssianturin havaitessa kosteutta nostetaan menoveden lämpötilaa.

Ilmanvaihtokonehuoneessa 1 sijaitsee lauhdelämpöpumppu sekä marketin kylmäkoneikot. Marketin kylmäjärjestelmän lauhdelämpöä hyödynnetään lämpöpumpulla, joka nostaa lämpötilan tarvittavalle tasolle. Myös lauhdelämpöpumppua käytetään kesäaikaiseen jäähdytykseen. Kylmäkoneikkojen rinnankytketyt lauhduttimet ovat kytketty lämpöpumppujärjestelmään lauhdevaraajan kautta. Kylmäkoneikoille on lisäksi nestejäähdyttimet ylimääräisen lauhdelämmön luovutukseen. Lämmönluovutusta lauhdevaraajan ja nestejäähdyttimien välillä säätää kolmitieventtiili, joka ensisijaisesti ohjaa lämmön lauhdelämpöpumpun tarpeisiin. Kylmäjärjestelmän lauhtumispaineen säätö tapahtuu rakennusautomaatiikan avulla. Säätö voidaan tehdä myös kylmäautomaatiikan kautta, mutta tapauksissa, joissa lauhdetta hyödynnetään kiinteistön lämmityksen tarpeisiin, on rakennusautomaatiosta johdettu säätötapa toimiva. Lauhdutinpaineen säätö toteutetaan asettamalla lauhduttimille tulevan nesteen lämpötilalle ja lauhduttimen lämpötilaerolle asetusarvot, joiden perusteella säädetään piirin kolmitieventtiiliä ja pumppua. Lisäksi lauhdepiirin pumpuille asetetaan säätökäyrä, joka säätää pumppujen taajuutta siten, että saadaan pidettyä haluttu painetaso lauhduttimissa. Lauhdepiirin lämmitysvaraaja on kytketty lauhdelämpöpumpun höyrystinpiiriin. Lämmityskäytössä lauhdelämpöpumpun teho on 360 kW, kun höyrystimelle tulevan nesteen lämpötila on 23,0 °C ja lauhduttimelta lähtevän nesteen lämpötila 52,0 °C. Jäähdytystehoa kesäaikaan saadaan 210 kW, kun höyrystimelle tulevan nesteen lämpötila on 11,0 °C ja lauhduttimelta lähtevän nesteen lämpötila 22,0 °C.

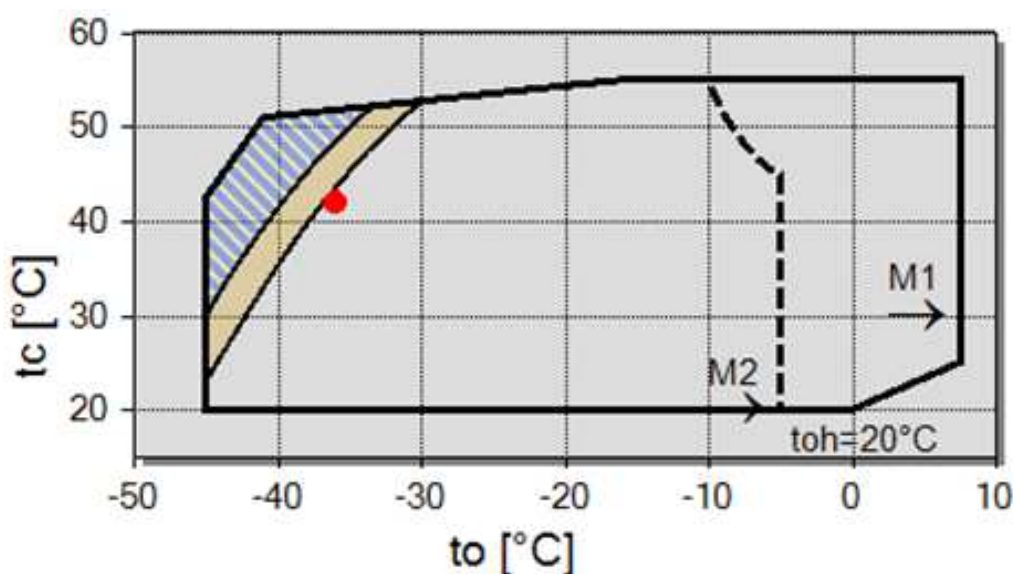
Lämpöpumpun höyrystinpiiri on kytketty vastaavalla tavalla kuin maalämpöpumpussakin sekä lämmönlähteeseen, että kylmävaraajaan. Lämmityskäytössä höyrystimelle tulevan nesteen lämpötila pyritään pitämään asetusarvossaan, jos lämpötila pyrkii nousemaan liian korkeaksi, voidaan höyrystimeltä lähtevä ja lauhdevaraajasta tuleva virtaama sekoittaa kolmitieventtiilin avulla sopivan lämpöiseksi. Lämpötilaa joudutaan rajoittamaan, koska höyrystymislämpötilaa ei voida nostaa korkeammaksi kuin 15,0 °C.

Lauhdelämpöpumppua käytetään lisäksi jäähdytykseen, jossa vastaavasti kuin maalämpöpumpun kohdalla, silmukka suljetaan kiertämään höyrystimen ja kylmävaraajan lämmönsiirtimen väliä. Lisäksi jäähdytystä voidaan tuottaa myös vapaalla jäähdytyksellä kierrättämällä liuosta nestejäähdyttimen ja kylmävaraajan välillä. Lämmityskäytössä lauhdutinpiiri toimii aivan vastaavalla kuin maalämpöpumpun lauhdutinpiiri.

Lauhdelämpöpumpun lämmityspiiri on kytketty tuloilmakoneisiin TK01,TK02,TK04,TK05,TK11 ja TK12 sekä kylmäkalusteiden alapuhallukseen. Koneista suurin on TK02, joka on päivittäistavaran tuloilmakone. Lämmityspatterien kytkentä ja mitoituslämpötilat ovat vastaavat kuin toisenkin lämpöpumpun kohdalla. Kylmävaraaja on kytketty tuloilmakoneisiin TK04,TK05,TK11,TK12 ja TK14 ja jäähdytyksen mitoituslämpötilat ovat samat kuin toisen IV-konehuoneen jäähdytyspattereilla.

Kylmäkoneiden lauhduttimien lisäksi kylmäkoneilla on erilliset tulistussiirtimet, joiden avulla saadaan tulistuksen korkeampi lämpötilataso hyödynnettyä. Tulistussiirtimiä on yhteensä neljä ja ne ovat kytketty rinnan. Lämpöä käytetään lämpimän käyttöveden esilämmitykseen ja kalusteiden alapuhallukseen.

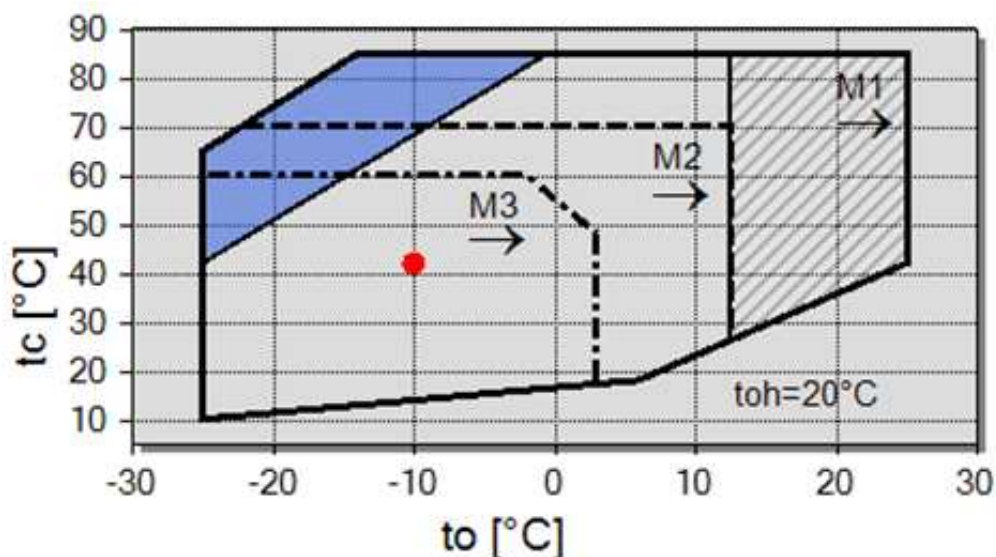
Kylmäkoneikkoja on yhteensä neljä kappaletta, joista kaksi on pluspuolen ja kaksi pakkapuolen koneikkoja. Kaikissa neljässä koneikossa on kuusi rinnan kytkettyä Bitzerin puolihiermeettistä kompressoria. Pakkaskoneikot ovat nimeltään JK1 ja JK2. Molemmissa on kuusi kappaletta samanlaisia kompressoreita, joiden mallityyppi on Bitzer NCS-12.2Y. Kylmäteho kompressoria kohden on 10,8 kW höyrystyslämpötilalla -36 °C ja lauhtumislämpötilalla 42 °C . Imukaasun lämpötilaksi on oletettu -10 °C ja nesteen 0 °C . Kylmäaineena pakkaspuolella on R404A, joka on suosituin kaupankylmässä käytetty kylmäaine. Kuvassa 5.1 on esitetty kompressorin toiminta-alue.



Kuva 5.1. Bitzer NCS-12.2Y kompressorin toiminta-alue [8]

Kuvaajassa on pystyakselilla lauhtumislämpötila ja vaaka-akselilla höyrystyslämpötila. Kuvaajan piirretty alue on kompressorille sallittu lämpötila-alue. Kuvaajassa punainen piste on laitteiston mitoituspiste. Värilliset alueet ovat saavutettavissa lisäjäähdetyksellä. M1 ja M2 ovat kompressorissa käytetyt eri moottorityypit. Moottorityyppi M1 on tarkoitettu muun muassa vedenjäähdytyskoneikkosovelluksiin, joissa kylmäaineena käytetään esimerkiksi R407C ja R134a. Moottorityyppi M2 on puolestaan tarkoitettu matalille lämpötiloille kuten kaupankylmän pakkaskoneikoille. Tavallinen kylmäaine on R404A.

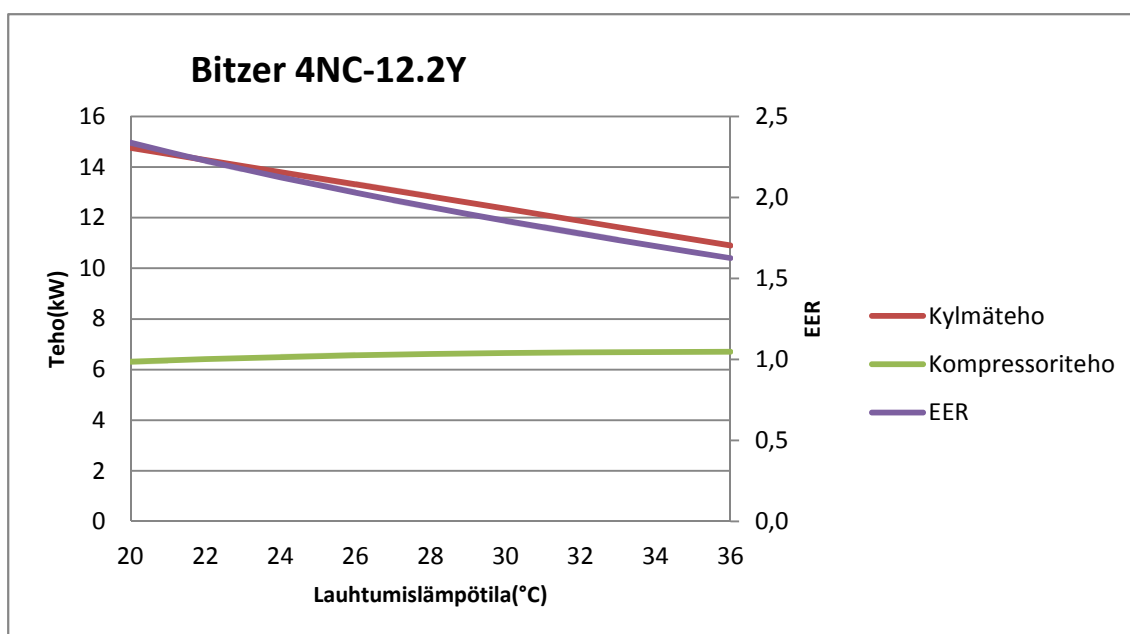
Pluskoneistot ovat JK3 ja JK4. Niissä on myös kuusi kappaletta samanlaisia Bitzerin kompressoreita, jotka ovat kytketty rinnan. Pluspuolen koneikoissa yhtä kompressoria koneikkoa kohden ohjataan taajuusmuuttajan avulla. Kylmäaineena on R134a, joka on valittu pienemmän GWP -arvonsa (Global Warming Potential) vuoksi kylmäaineeksi, koska marketille haettu sertifikaatti on sitä vaatinut. Kylmätehoa kompressoria kohden on 48,9 kW höyrystyslämpötilalla -10 °C ja lauhtumislämpötilalla 42 °C . Imukaasun lämpötilaksi on oletettu 10 °C . Kuvassa 5.2 on esitetty kompressorin Bitzer 6FE-40Y-40P toiminta-alue.



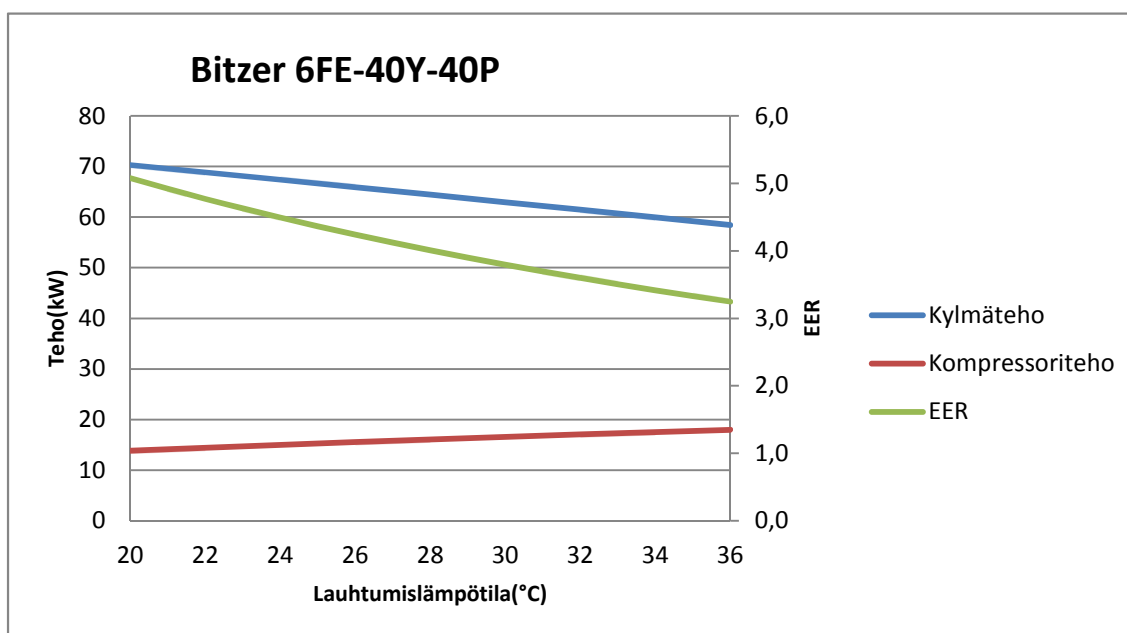
Kuva 5.2. Bitzer 6FE-40Y-40P kompressorin toiminta-alue [8]

Kompressoria on saatavissa kolmella eri moottorityypillä käyttöalueesta riippuen. Kaupan pluskoneistojen tarpeeseen parhaiten sopii moottorityyppi kolme, kuten kuvaajasta nähdään. Punaisella pisteellä on merkitty mitoituspiste.

Yhteensä pluspuolenkoneikkojen kylmäteho on noin 587 kW ja pakkaspuolenkoneikkojen noin 130 kW. Normaalikäytössä täydestä kapasiteetista on käytössä kuitenkin vain murto-osa. Suomen leveysasteilla lämmityskausi on erittäin pitkä, jonka vuoksi lauhtumislämpötilan määräävänä tekijänä on suurimman osan vuotta muu kuin ulkoilman lämpötila. Kuvaajissa 5.3 ja 5.4 on esitetty plus- ja pakkaskoneikkojen toiminta-arvojen lämpötilariippuvuus. Pakkaspuolen höyrystyslämpötilana on -33 °C ja pluspuolen -8 °C .



Kuva 5.3. Pakkaskoneikkojen toiminta-arvot [8]



Kuva 5.4. Pluskoneikkojen toiminta-arvot [8]

5.2 Prisma Linnainmaa

Prisma Linnainmaa on Lielahden tavoin kaukolämmön, lämpöpumppujen ja lauhde-lämmön hybridijärjestelmä. Kooltaan Linnainmaan marketti on hieman pienempi kuin Lielahden. Varsinkin tilojen korkeudessa on iso ero. Lisäksi erona on, että Linnainmaan marketti on laajennettu aikaisemmista S-marketin tiloista, kun taas Lielähti on uudisrakennus. Koska järjestelmien kytkennät ovat erittäin samankaltaisia, Lielahden marketin yhteydessä selitetyt tarkemmat toimintakuvaukset jätetään tässä yhteydessä pois.

Lämmitysjärjestelmiltään ja kytkennöiltään molemmat hypermarketit ovat hyvin samanlaisia. Linnainmaalla laitteet ovat fyysisesti sijoitettu kahteen IV-konehuoneeseen ja parkkihallissa sijaitsevaan kaukolämmön alajakokeskukseen. Kaukolämmön lämmönsiirtimet ovat osittain sijoitettu IV-konehuoneeseen 1. Patteriverkoston, lämpimän käyttöveden ja kiertoilmakoneiden sekä tuloilmakoneiden lämmönsiirtimet sijaitsevat kyseisessä IV-konehuoneessa. Patteriverkoston mitoitusteho on Lielähtea puolet pienempi eli mitoitusteho on noin 65 kW. Käyttöveden kierron mitoitusvirtaama on noin 0,87 l/s. Lielahdessa kaukolämpö on kytketty niin sanotulla välisyöttökytkennällä. Linnainmaalla kaikki piirit on omissa putkituksissa. Kaukolämmön mittauskeskus on sijoitettu parkkihallin lämmönjakokeskukseen, missä sijaitsee myös lumensulatusverkoston lisälämmityssiirrin ja parkkihallien tuloilmakoneiden lämmönsiirrin.

Parkkihallissa on kaksi tulo-poistokonetta, joissa mitoitusilmavirta on 21,0/22,5 m³/s. Molemmissa hypermarketeissa parkkihallien mitoitusilmavirta perustuu rakenta-

mismääräyskokoelman osan D2 liitteeseen 2, jossa ohjeistetaan moottoriajoneuvosuojausten ilmanvaihdon mitoitusperiaatteita. Hypermarkettien yhteydessä olevien parkkihallien mitoitusilmavirtana käytetään 3,6 l/s/m². Ilmamääriä kuitenkin voidaan pienentää, jos parkkihalliin sijoitetaan ilmanlaatua seuraavia antureita. Parkkihalleissa ilmanlaatua tarkkaillaan yleensä häkäpitoisuuksien perusteella. Vähimmäismäärä ohjaus- ja hälytysantureita on kolme kappaletta ajotasoa kohden [25, s. 32]. Hiilidioksidipitoisuus on suoraan verrannollinen häkäpitoisuuteen, joten häkäpitoisuuksien hallinnalla saadaan myös hiilidioksidipitoisuudet pidettyä alhaisina. Täyden ilmanvaihdon raja-arvona käytetään 50 ppm häkäpitoisuutta.

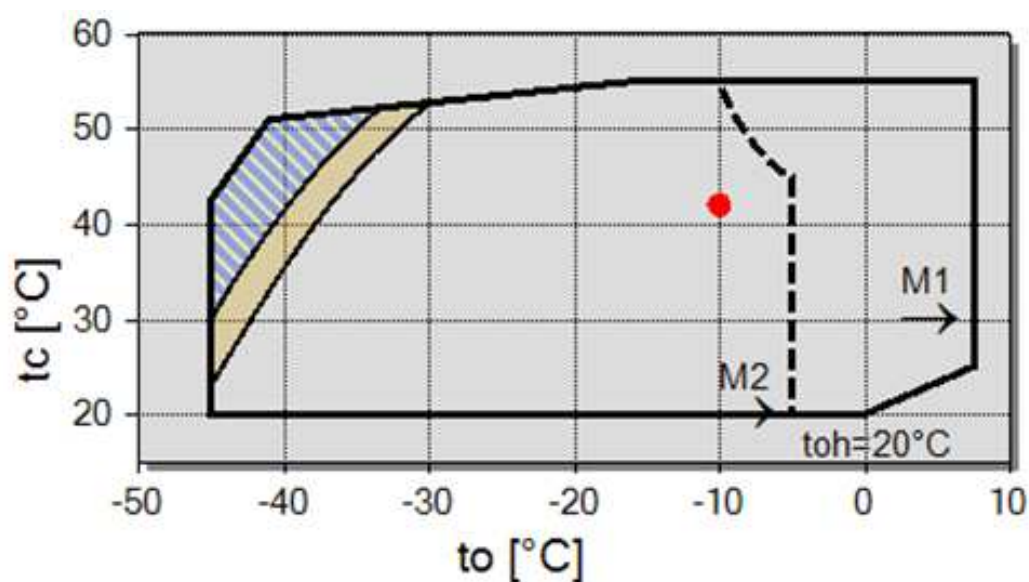
Lumensulatusverkosto lämmitetään ensisijaisesti lämpöpumpun avulla, mutta lämmitystehon ollessa riittämätön, on piirissä vielä kaukolämmön lämmönsiirrin lisälämmitykseen. Lumensulatusverkosto on mitoitettu samoilla lämpötiloilla ja pinta-alaakohtaisilla tehoilla kuin Lielahdinkin. Mitoitustilanteessa lämpöpumpun lämmönsiirtimen teho on 160 kW, jolla verkoston liuos lämpiää 5 °C ja loput 10 °C lämmitetään kaukolämmöllä, jolloin kaukolämpöteho on 281 kW. Kaukolämmöllä lämmitetään lisäksi kiertoilmakoneet ja tuloilmakoneiden lisälämmityspatterit.

Ilmanvaihtokonehuone 1 on sijoitettu kiinteistön kaakkoiskulmaan. IV-konehuoneessa on toinen marketin lämpöpumpuista, kolme kaukolämmön lämmönsiirrintä sekä ravintolan ja keittiön ilmanvaihtokoneet. Lämpöpumppua käytetään sekä lämmitykseen, että jäähdytykseen eli kyseessä on yhdistetty lämpöpumppu ja vedenjäähdytyskone. Kiinteistön alle on porattu yhdeksän kappaletta 200 metrin porakaivoja, joita voidaan hyödyntää lämpöpumpun lämmönlähteenä ja kesällä vapaajäähdytyksessä. Jälkeenpäin ilmanvaihtokonehuoneesta 2 on tehty putkiveto ilmanvaihtokonehuoneeseen 1, jolla saadaan siirrettyä kylmälaitoksen lauhdelämpöä myös toisen lämpöpumpun hyödynnettäväksi. Suurin hyöty muutoksesta on lämpöpumpun höyrystymislämpötilan kohoaminen ja siitä seuraava lämpökertoimen paraneminen. Myös lämmitysteho kompressorilla kohden kasvaa riippuen höyrystymislämpötilan noususta. Lämmityskäytössä lämpöpumpun mitoitus-teho on 156 kW, kun höyrystimelle tulevan nesteen lämpötila on 2 °C ja lauhduttimelta lähtevän nesteen lämpötila 60 °C. Jäähdytyskäytössä sekä lauhduttimen ja höyrystimen tehot nousevat huomattavasti, kun höyrystymislämpöä nousee. Mitoitusjäähdytysteho on 182 kW kun höyrystimelle tulevan nesteen lämpötila on 14 °C ja lauhduttimelta lähtevän nesteen lämpötila 44 °C. Lämmityskäytössä lämpöpumpun tuottama lämpöenergia hyödynnetään ravintolan ja keittiön tuloilmakoneiden sekä lämpimän käyttöveden ja lumensulatuksen esilämmitykseen. Jäähdytyskäytössä ravintolan ja keittiön tuloilmakoneiden lisäksi jäähdytetään myös pienliiketilöiden ja Alkon tuloilmakoneiden tuloilma. Myös liiketilöiden puhallinkonvektorit ovat samassa verkostossa.

Ilmanvaihtokonehuoneeseen 2 on sijoitettu hypermarketin kylmälaitos ja lauhdelämpöpumppu. Lauhdelämmön talteenoton kytkentä ja säätötapa ovat lähes vastaava kuin Lielahden marketissakin. Erotuksena on se, että lauhdelämpöä käytetään myös maalämpöpumpun tarpeisiin ja erillisiä tulistussiirtimiä ei Linnainmaalla ole. Lämmityskäytössä lämpöpumpun mitoitus-teho on 345 kW, kun höyrystimelle tulevan nesteen lämpötila on 27 °C ja lauhduttimelta lähtevän nesteen lämpötila 60 °C. Mitoitusjäähdy-

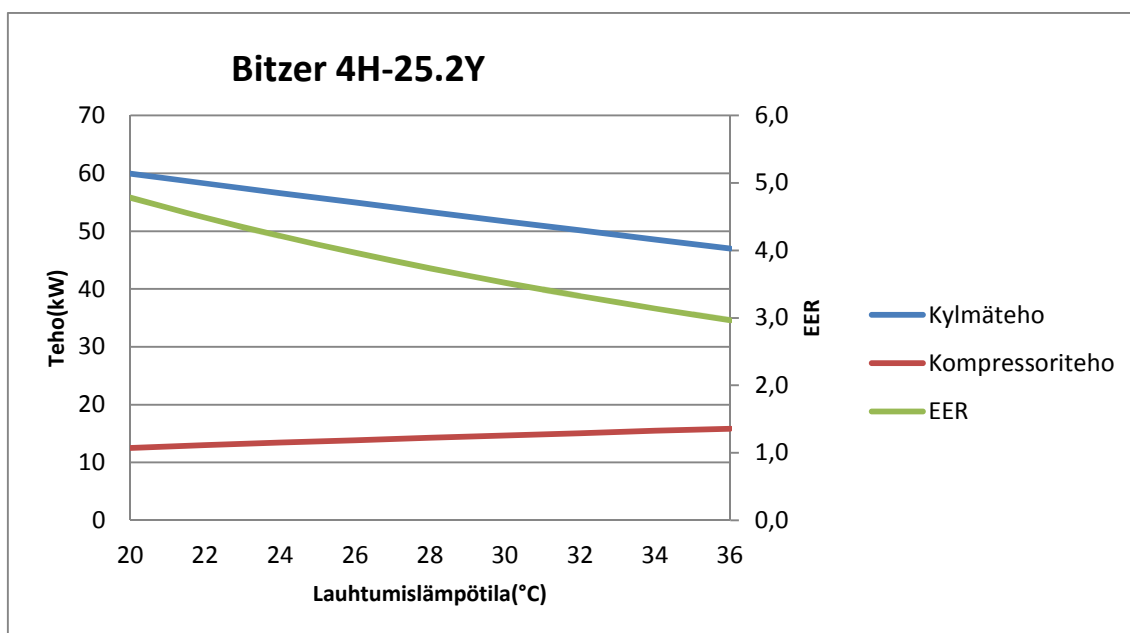
tysteho on 238 kW kun höyrystimelle tulevan nesteen lämpötila on 14 °C ja lauhduttimelta lähtevän nesteen lämpötila 44 °C. Lämmityskäytössä lämpöenergia hyödynnetään käyttö- ja päivittäistavaraosaston tuloilmakoneiden sekä kylmäkalusteiden alapuhallukseen. Kesäisessä jäähdytyskäytössä jäähdytetään päivittäistavaraosaston ja sosiaalilojen tuloilmakoneita.

Linnainmaan Prisman kylmäkoneikkomitoitus on samanlainen pakkaskoneikkojen osalta kuin Lielahdessa. Pakkaspuolella on kaksi kylmäkoneikkoa, joissa molemmissa on kuusi puoli hermeettistä mäntäkompressoria, jotka on kytketty rinnan. Kokonaispakasteho on 130 kW. Lielahdessa pluspuolen koneikot ovat kylmäaineella R134a, mutta Linnainmaalla on käytössä perinteinen R404A. Pluspuolen koneikkoja on kaksi, joissa molemmissa on kuusi kompressoria. Kompressorimallina on Bitzerin puolihermeettinen mäntäkompressori 4H-25.2Y. Malli on jo nykyään poistunut Bitzerin mallistosta. Kuvasssa 5.5 on kompressorin käyttölämpötila-alue.



Kuva 5.5. Bitzer 4H-25.2Y kompressorin toiminta-alue [8]

Kylmätehoa kompressoria kohden on 38,7 kW höyrystymislämpötilalla -10 °C ja lauhtumislämpötilalla 42 °C. Imukaasun lämpötilaksi on oletettu 10 °C. Näin ollen kokonaisteho pluskoneikkojen osalta on 464 kW. Kuvaajassa 5.6 on esitetty Bitzerin 4H-25.2Y kompressorin kylmäteho, kompressorin sähköteho ja kylmäkerroin lauhtumislämpötilan funktiona.



Kuva 5.6. Pluskoneikkojen toiminta-arvot [8]

6 ENERGIA-ANALYYSI

6.1 Hypermarketin energiatalous

6.1.1 Energiataseet

Hypermarketin energiatalous koostuu lämpöenergian osalta lämmityksen, jäähdytyksen ja kylmän osuuksista. Sähköä puolestaan kuluu LVI- ja kylmäjärjestelmiin kuuluviin laitteisiin, kuten pumppuihin, puhaltimiin ja kompressoreihin. Lisäksi kiinteistön valaistus ja muut sähkölaitteet vievät oman osuutensa.

Hypermarketin sisätilojen lämmitysenergiatarve voidaan määrittää marketin energiataseen perusteella, joku koostuu markettia kuormittavista energiavirroista (6.1). [26, s. 15,24,40]

$$Q_{\text{lämmitys}} = Q_{\text{joht}} + Q_{\text{iv}} + Q_{\text{vuoto}} + Q_{\text{lkv}} + Q_{\text{kylmä}} - Q_{\text{sis}} \quad (6.1)$$

missä

- Q_{joht} on johtumisen lämmitysenergiatarve
- Q_{iv} on ilmanvaihdon lämmitysenergiatarve
- Q_{vuoto} on vuotoilman lämmitysenergiatarve
- Q_{lkv} on lämpimän käyttöveden lämmitysenergiatarve
- $Q_{\text{kylmä}}$ on kylmäkalusteiden tilaa jäähdyttävä energia
- Q_{sis} on sisäisten kuormien lämmitysenergia

Johtumisen lämpötehotarve koostuu marketin rakenteiden läpi johtumasta lämpötehosta. Suomen Rakentamismääräyskokoelma määrittää eri rakennustyypeille vähimmäis- E-lukuvaatimukset. E-luku määritetään laskennallisesti rakennuksen lvi – ja rakennusteknisten tietojen pohjalta. Suomen Rakentamismääräyskokoelma määrittää seinille, alapohjille, yläpohjille, ikkunoille ja oville U-arvojen vertailuarvot, joita ei saa ylittää. U-arvo on rakenteen lämpövastuksen käänteisarvo. Rakenteiden läpi johtuva lämpöteho on suoraan verrannollinen ulkoilman lämpötilaan. Johtumisen lämmitysenergiatarve on esitetty kaavassa (6.2). [26, s. 15]

$$Q_{\text{joht}} = \sum_{i=1}^n U_i A_i \Delta T_j t + H_{ks} \Delta T_j t \quad (6.2)$$

missä	U_i	on rakenneosan U-arvo
	A_i	on rakenneosan pinta-ala
	ΔT_j	on lämpötilaero rakenneosan eri puolilla
	t	on aikajakson pituus
	H_{ks}	on kylmäsiltojen ominaislämpöhäviö

Ilmanvaihdon lämpöhäviöiden osuus on suuri. Nykyiset lämmön talteenottoratkaisut ovat kehittyneet nopeasti, mutta edelleen paljon energia kuluu myös ilmanvaihdon lämmitykseen. Erilaisia lämmön talteenottoratkaisuja on kolme erilaista mallia, jotka ovat pyörivä lämmönsiirrin, levylämmönsiirrin ja nestekiertoinen lämmönsiirrin. Näistä kolmesta paras hyötysuhde on ensin mainitulla ja huonoin jälkimmäisenä mainitulla. Pyörivän lämmönsiirtimen lämpötilasuhde on noin 70–80% ja nestekiertoisen noin 40–50%. Lämmöntalteenotolla varustetun ilmanvaihdon lämmitysenergian tarve on määritetty kaavassa (6.3). [26, s. 63] Kaavassa ei ole huomioitu sulatusjaksoja, koska markettin sisäilma on erittäin kuivaa.

$$Q_{iv} = \rho_i \dot{V}_t c_{pi} (T_t - T_u - \eta_t (T_s - T_u)) t \quad (6.3)$$

missä	ρ_i	on ilman tiheys
	\dot{V}_t	on tuloilmavirta
	c_{pi}	on ilman ominaislämpö
	T_t	on tuloilman lämpötila
	T_u	on ulkoilman lämpötila
	T_s	on sisäilman lämpötila
	η_t	on tuloilman lämpötila

Tuloilman lämpötilasuhde on poistoilman lämpötilasuhde painotettuna ilmavirtojen suhteella. Jos ilmavirrat ovat yhtä suuret, on $\eta_t = \eta_p$. Poistoilman lämpötilasuhde on esitetty kaavassa (6.4). [26, s. 63]

$$\eta_p = \frac{T_s - T_j}{T_s - T_u} \quad (6.4)$$

missä T_j on jäteilman lämpötila. Markettin vuotoilman lämmitysenergian tarve koostuu ulko- ja sisäolosuhteiden paine-eron aiheuttamasta ilmavirrasta, joka on verrannollinen kiinteistön ilmatiiveyteen (6.5). [26, s. 19]

$$Q_{vuoto} = \frac{q_{50A_{vaippa}}}{3600x} \rho_i c_{p,i} (T_s - T_u) t \quad (6.5)$$

missä	A_v	on vaipan pinta-ala
	q_{50}	on vaipan tiiveys
	x	on kerroin, joka riippuu kiinteistön korkeudesta

Käyttöveden lämmitystehontarve jakaantuu käyttöveden nettolämmitykseen ja käyttöveden kierron häviöiden lämmitystehontarpeeseen. Kiinteistön tulevan kylmän käyttöveden lämpötila vaihtelee 4 °C - 10 °C välillä vuodenajan mukaan. Rakentamismääräyskokoelman mukaan lämpimän käyttöveden lämpötilan täytyy olla 58 °C. Näin ollen nettolämmitysenergiantarve koostuu kiinteistön tulevan kylmän veden lämmittämisestä 58 °C lämpötilaan (6.6). [26, s. 24]

$$Q_{lkv,netto} = \frac{\rho_v c_{pv} V_{lkv}}{3600} (T_{lkv} - T_{kv}) \quad (6.6)$$

missä	ρ_v	on veden tiheys
	c_{pv}	on veden ominaislämpö
	V_{lkv}	on lämpimän käyttöveden vesimäärä
	T_{lkv}	on lämpimän käyttöveden lämpötila
	T_{kv}	on kylmän veden lämpötila

Lämpimän käyttöveden nopea saatavuus on varmistettava myös kaukaisimmissa vesipisteissä, jolloin tarvitaan käyttöveden kiertojohto. Kiertojohtoon kuuluva lämmitysenergiantarve on usein lähes yhtä suuri kuin nettolämmityksen energiantarve. Rakentamismääräysten mukaan kierron paluun lämpötila on oltava vähintään 55 °C, joten kierron aikana lämpötila saa laskea korkeintaan 3 °C. Kierron lämmitysenergian määrä koostuu kierron paluun virtaamaan lämmittämisestä lämpimän käyttöveden asetustarvoon (6.7). [26, s. 64]

$$Q_{lkv,kierto} = \rho_v q_{kierto} c_{pv} (T_{lkv} - T_{kierto}) t \quad (6.7)$$

missä	q_{kierto}	on lämpimän käyttöveden kierron virtaama
	T_{kierto}	on kierron paluun lämpötila

Marketeissa kylmäkalusteet ja -varastot lisäävät lämmitystehon tarvetta. Varsinkin avonaisten kylmäkalusteiden osuus voi olla erittäin merkittävä (6.8). [16, s. 9]

$$Q_{kylmä} = Q_{kalusteet} + Q_{varastot} \quad (6.8)$$

missä	$Q_{kalusteet}$	on kylmäkalusteiden aiheuttama lämpöhäviö
	$Q_{varastot}$	on kylmävarastojen aiheuttama lämpöhäviö

Sisäiset lämpökuormat hypermarketissa koostuvat asiakkaista, valaistuksesta, auringon säteilystä ja sähkölaitteista. Myös käyttöveden lämmityksen häviöt siirtyvät marketin sisätiloihin, mutta niiden osuus kokonaisuudesta on hypermarket kokoluokassa lähes olematon. Hypermarkettien valaistuksen tarve on erittäin suuri, jolloin lämpökuormat ovat myös suuria. Tulevaisuudessa LED – tekniikka tulee karsimaan lämpökuormaa, mutta vielä tällä hetkellä LED – valaisimien hintataso ja ominaisuudet eivät ole täysin vastanneet hypermarkettien myymälöiden vaatimuksia. Pienemmissä marketeissa LED – valaisimet ovat yleistyneet viime vuosina. Myös hypermarkettien yleisissä tiloissa ne ovat laajalti käytössä. Sisäisten kuormien osuus on esitetty kaavassa (6.9). [26, s. 29–36]

$$Q_{sis} = Q_{as} + Q_{val} + Q_a + Q_{lait} + Q_{lqv,häviöt} \quad (6.9)$$

missä	Q_{as}	on asiakkaiden aiheuttama lämpökuorma
	Q_{val}	on valaisimien aiheuttama lämpökuorma
	Q_a	on auringon säteilyn aiheuttama lämpökuorma
	Q_{lait}	on laitteiden lämpökuorma
	$Q_{lqv,häviöt}$	on lämpimän käyttöveden häviöenergia

Sisäiset kuormat vaikuttavat myös kesäaikana, jolloin ulkolämpötilojen noustessa ne aiheuttavat johtumisen ja ilmanvaihdon kanssa markettiin jäähdytystehontarvetta. Kesäaikana kylmäkalusteiden teho kääntyy edulliseksi marketin energiatalouden näkökulmasta, koska ne kattavat osan marketin jäähdytystehontarpeesta. Hypermarketin jäähdytysenergiantarve on esitetty kaavassa (6.10). [9, s. 165–166]

$$Q_{jäähd} = Q_{joht} + Q_{iv} + Q_{sis} - Q_{kylmä} \quad (6.10)$$

Hypermarketin sähkönkulutus koostuu lvi- ja kylmäjärjestelmien, valaistuksen ja sähkölaitteiden energiatarpeesta. Tämän diplomityön pääpaino on lvi- ja kylmäjärjestelmissä, joten myös sähkön osalta niitä käsitellään valaistusta ja laitesähköä enemmän. Lvi – järjestelmien sähkönkulutus koostuu liuospiirien pumpuista ja ilmanvaihdon puhaltimista. Myös lämpöpumppujen kompressorit voidaan laskea lvi – järjestelmiin mukaan (6.11). [26, s. 26–38, 52–54]

$$W_{lvi} = W_{pumppu} + W_{puhaltimet} + W_{lp,komp} \quad (6.11)$$

missä	W_{pumppu}	on pumppujen sähkönkulutus
	$W_{puhaltimet}$	on puhaltimien sähkönkulutus
	$W_{lp,komp}$	on lämpöpumppujen kompressorien sähkönkulutus

Kylmäjärjestelmien sähkönkulutus koostuu enimmäkseen kylmälaitoksen kompressorien sähkönkulutuksesta. Muita kylmäjärjestelmien sähkötehoa tarvitsevia laitteita ovat höyrystimen ja lauhduttimen puhaltimet, reunalämmitykset, kylmäkalusteiden valaistus, sulatusvastukset (6.12). [3, s. 250–252]

$$W_{kylmä} = W_{k,komp} + W_{k,puhaltimet} + W_{reunal} + W_{k,val} + W_{sulatus} \quad (6.12)$$

missä	$W_{k,komp}$	on kylmälaitoksen kompressorien sähkönkulutus
	$W_{k,puhaltimet}$	on kylmälaitokseen kuuluvien puhaltimien sähkönkulutus
	W_{reunal}	on reunalämmityksen sähkönkulutus
	$W_{k,val}$	on kylmäkalusteiden valaistuksen sähkönkulutus
	$W_{sulatus}$	on sulatuksen sähkönkulutus

6.1.2 Todellinen kulutus

Hypermarkettien kulutusmittaus jakaantuu yleensä kolmeen päämittaukseen, jotka ovat kaukolämmön kulutus, sähkönkulutus ja vedenkulutus. Näiden lisäksi voi olla useita alamittauksia, jolla saadaan tietoa tietyn piirin tai kiinteistön osan kulutuksesta. Lämmityksen puolella alamittauksen ongelmalliseksi aiheuttavat lämmityspiirit, jotka ovat veden ja glykolin tai etanolin seoksia, koska ultraäänilämpömittari ei toimi kuin puhtaan veden kanssa.

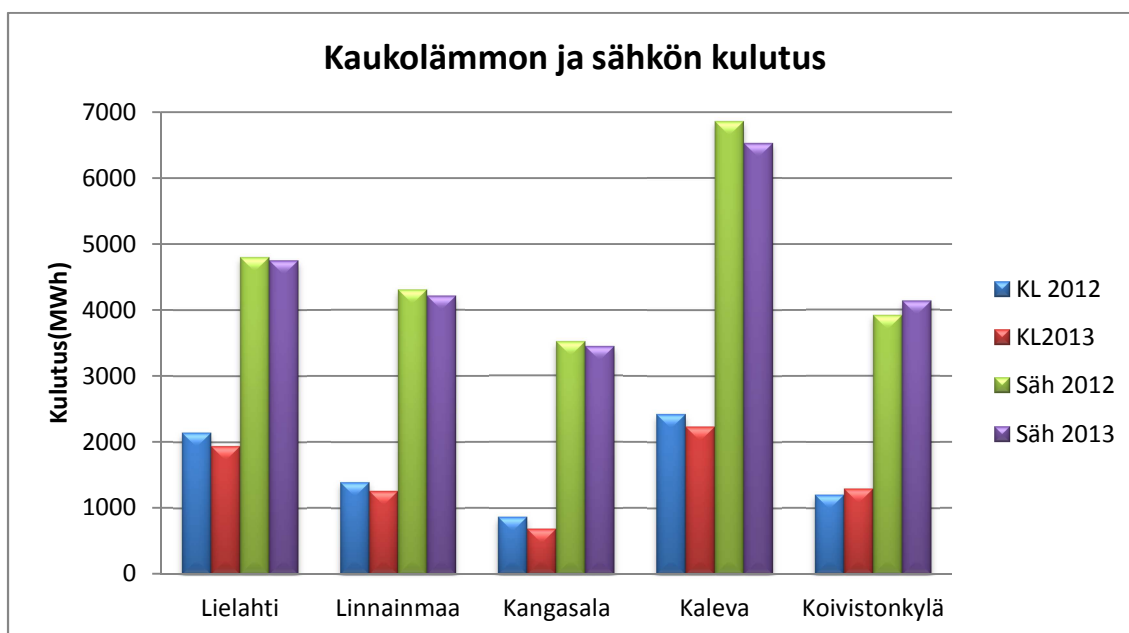
Energian ja veden kulutus vaihtelee erittäin paljon eri hypermarkettien kesken. Hypermarkettien pinta-ala tai tilavuuskohtaisissa kulutuksissa voi olla jopa kaksinkertaisia eroja. Vuonna 2010 Kesko julkaisi kulutusseurantaraportin, jossa julkaistiin 58 Citymarketin keskimääräisiä lämmön, sähkön ja veden ominaiskulutuksia. Raportin mukaan Keskon hypermarketin keskimääräinen lämmön bruttoalakohtainen ominaiskulutus on noin 80 kWh/brm². Sähkön ominaiskulutus on noin 215 kWh/brm² ja veden noin 210 m³/brm² [27]. Ominaiskulutusten vertaaminen on kuitenkin erittäin ongelmallista, joten eri hypermarkettien vertaaminen niiden perusteella on virheellistä.

Pirkanmaan Osuuskaupalla on tällä hetkellä kuusi Prismaa, joista yksi on osa suurempaa liikekiinteistöä. Kiinteistöistä uusin on vuonna 2011 avattu Lielahden Prisma ja vanhin puolestaan Koivistonkylän Prisma, joka ei ole ollut alun perin Prisma. Taulukossa 6.1 on esitetty Pirkanmaan Osuuskaupan Prisma-kiinteistöjen rakennustekniset perustiedot eli bruttoala, tilavuus ja rakennusvuosi.

Taulukko 6.1. Pirkanmaan osuuskaupan Prisma-kiinteistöjen tiedot [28]

Marketti	Bruttoala(brm ²)	Tilavuus(m ³)	Rakennusvuosi
Lielähti	39608	180980	2010
Linnainmaa	28587	164755	2010
Kangasala	10755	58490	1991
Kaleva	31690	219570	1978
Koivistonkylä	25373	147853	1976

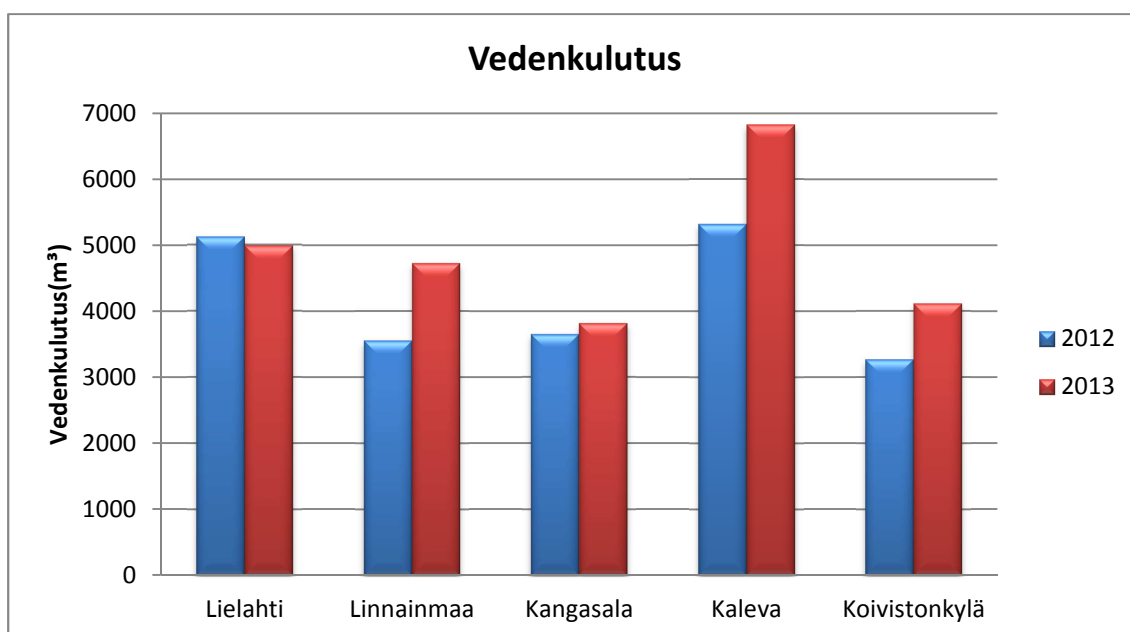
Kohteiden vuotuinen lämmön ja sähkön kulutus on melko stabiilia. Erot eri kiinteistöjen välillä ovat kuitenkin melko suuria, jotka selittyvät muun muassa kiinteistöjen koeroilla, teknisillä ratkaisuilla ja myymälätilan suhteellisella jakautumisella eri käyttötarkoituksiin. Suurin kaukolämmön ja sähkön kuluttaja on Kalevan Prisma, jossa kaukolämmön kulutus on vuositasolla hieman yli 2000 MWh ja sähkönkulutus noin 6500 MWh. Kangasalan Prisma edustaa kulutustiedoiltaan toista ääripäätä, mutta on myös kooltaan selkeästi pienin. Ominaiskulutukset kaukolämmön osalta vaihtelevat 46–74 kWh/brm² ja sähkön osalta 120–320 kWh/brm². Kuvajassa 6.1 on esitetty Pirkanmaan Osuuskaupan viiden eri Prisman normeerattu kaukolämmön ja sähkönkulutus vuosina 2012 ja 2013.

**Kuva 6.1.** Kaukolämmön ja sähkön kulutus Prisma-kiinteistöissä [28]

Varsinaisesta lämmitysenergian kokonaiskulutuksesta ei saada näiden tietojen pohjalta selville, koska tapauskohtaisesti osa lämmitysenergiasta tuotetaan myös muilla tavoin kuin kaukolämmöllä.

Kaukolämmön ja sähkön lisäksi päämittauksessa on myös kokonaisvedenkulutus. Vedenkulutusta voidaan seurata myös tarkemmin alamittauksilla, jossa mitataan erikseen

lämpimän ja kylmän kulutusta. Kuvaajassa 6.2 on esitetty Pirkanmaan Osuuskaupan eri Prismojen vedenkulutukset vuosina 2012 ja 2013



Kuva 6.2. Vedenkulutus Prisma-kiinteistöissä [28]

Kaukolämmön ja sähkön kulutuksen tavoin Kalevan Prismassa vedenkulutus on ollut suurinta. Vuodessa Kalevan Prismassa vettä kuluu noin 6000 m³. Alhaisimmat luekemat ovat olleet Kangasalan ja Koivistonkylän Prismoissa, joissa vedenkulutus on noin 3500 m³ vuodessa. Ominaiskulutus bruttoalaa kohden vaihteli 130–350 m³/brm².

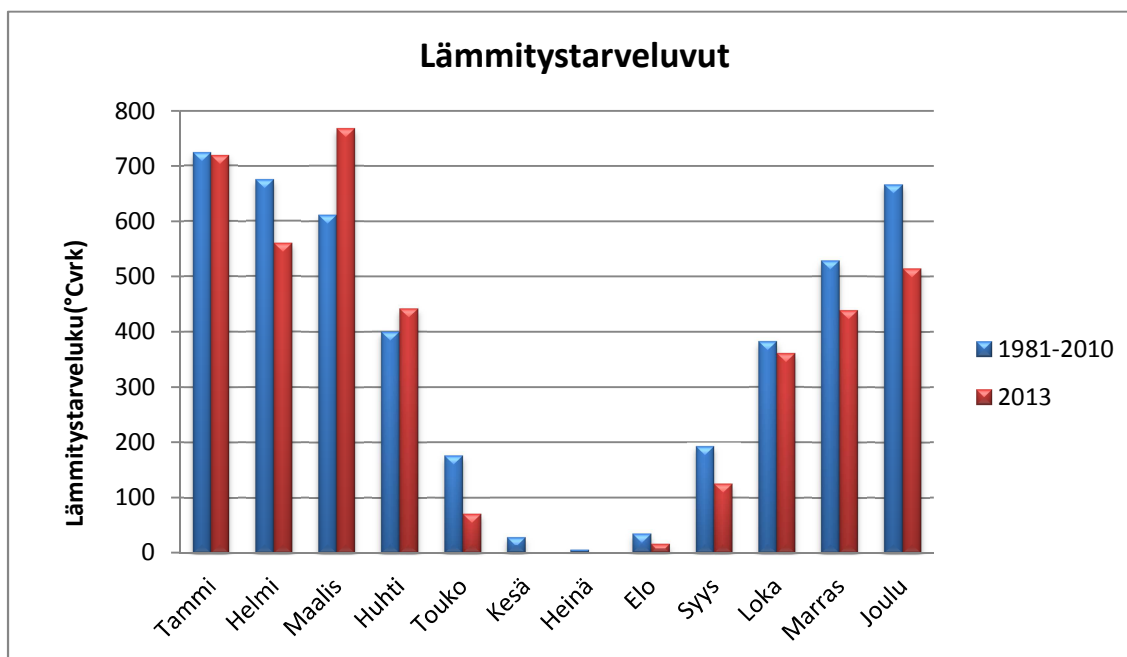
6.2 Tutkimuskohteiden energia-analyysi

6.2.1 Sääolosuhteet ja lähtökohdat

Yleensä kohteista mitataan lämmityksen osalta vain kokonaiskulutusta, jolloin marketin kokonaislämmitysenergian käytön hallinta on vaikeaa, koska ei tiedetä, missä suhteessa lämmityspiirit kuluttavat lämmitysenergiaa. Molemmille marketeille luotiin energia-analyysi vuoden 2013 mittaustulosten perusteella. Energia-analyysin tarkoitus on suhteuttaa likimääräisesti eri lämmityspiirit, jotta voidaan havaita energiatehokkuuden kanalta kriittisimmät lämmityspiirit.

Lämmitysenergiatarkasteluissa tavanomainen tapa vertailla eri vuosia on suhteuttaa lämmitysenergiakulutus lämmitystarvelukujen perusteella. Lämmitystarveluku laskeaan päivittäisten ulko- ja sisälämpötilojen erotuksen avulla. Kun päivittäiset lämmitys-

tarveluvut summataan, saadaan kuukausittaiset ja vuosittaiset lämmitystarveluvut. Sisälämpötilana laskennassa käytetään 17 °C, jonka oletuksena on, että sisäiset lämpökuormat nostavat lämpötilan tavoiteltuun 21 °C. Lisäksi laskennassa oletetaan, että lämmitystä ei tarvita syksyllä yli 12 °C ulkolämpötiloilla ja keväällä yli 10 °C. Kuvaajassa 6.3 on keskimääräiset Tampereen alueen lämmitystarveluvut kuukausitasolla vuosilta 1981–2010 sekä vuodelta 2013.



Kuva 6.3. Tampereen lämmitystarveluvut [29]

Vuoden 2013 lämmitystarveluku oli Tampereella 4016 Kd (°C vrk). Vertailuajanjakson lämmitystarveluku on vastaavasti 4424 Kd, joten lämmitystarpeen osalta vuosi oli hieman tavanomaista lämpimämpi [29]. Lämmitystarvelukujen käyttötarkoitus on normeerata eri vuosien ja kuukausien lämmitysenergiankulutukset vertailukelpoiseksi. Normeerauksessa kaikkien ulkolämpötilan funktiona toimivien lämmitysverkkojen kulutus suhteutetaan lämmitystarvelukujen perusteella. Asuinkerrostaloissa lämmitysenergian normeeraus toimii kohtuullisen hyvin, mutta hypermarkettien kohdalla normeerauksen antamiin tuloksiin kannattaa suhtautua varauksella, koska järjestelmien monimutkaisuus aiheuttaa epävarmuutta normeeraukseen.

Taulukossa 6.2 on esitetty vuoden 2013 säätiedot, jotka perustuvat Lielahden Prismen taloautomaation mittaamiin lämpötiloihin. Taulukon vasemman puoleisessa sarakkeessa on merkitty kuukauden keskilämpötila, keskimmaisessä on kuukauden alin mitattu lämpötila ja oikean puolimmaisessa kuukauden korkein mitattu lämpötila. Havaintojen perusteella taloautomaation lämpötilamittauksen tarkkuus on kohtuullisen hyvä, vaikka äärimmäisen tarkka lämpötilamittaus ei ole taloautomaatiikan kannalta välttämätöntä, jolloin likimain oikea ulkolämpötila riittää.

Taulukko 6.2. Vuoden 2013 säätiedot

	Keskilämpötila(°C)	Min(°C)	Maks(°C)
Tammikuu	-5,90	-24,80	2,70
Helmikuu	-2,68	-9,90	5,00
Maaliskuu	-7,39	-20,70	3,20
Huhtikuu	2,25	-11,30	11,10
Toukokuu	13,31	-0,70	26,50
Kesäkuu	17,93	7,70	32,60
Heinäkuu	17,39	9,40	28,70
Elokuu	16,16	6,60	27,30
Syyskuu	11,10	-1,20	21,70
Lokakuu	5,27	-5,60	12,50
Marraskuu	2,43	-8,20	7,70
Joulukuu	0,38	-10,00	5,90
Koko vuosi	5,85	-24,80	32,60

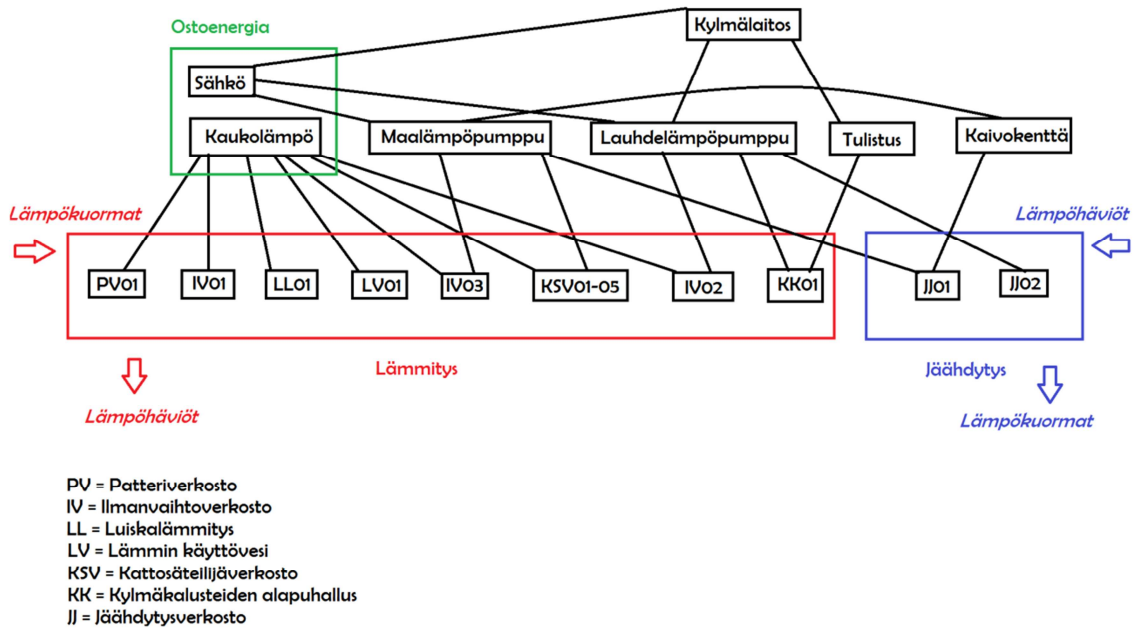
Molemmat tämän diplomityön esimerkkikohteista ovat toteutettu Siemensin Desigo Insight taloautomaatio-järjestelmällä. Järjestelmässä saadaan mittauspisteiden historia tallennettua. Pääosin mitatut parametrit ovat lämpötiloja ja paineita. Ongelmana lämpötiloihin perustuvissa energiatarkasteluissa on, että lämmitys- ja jäähdytyspiirien virtaamat vaihtelevat paljon, jolloin niiden tehoa ja energiakulutusta ei tiedetä. Esimerkkikohteiden järjestelmissä on myös useita piirejä, joissa virtaaman voidaan olettaa olevan vakio. Lisäksi joitakin ultraäänilämpömittareita pystyttiin hyödyntämään, vaikka ne eivät sovellu muihin kuin vettä sisältäviin verkostoihin.

Esivalmisteluna energia-analyysille oli liuosvirtaamien mittaaminen. Liuosvirtaamien mittaaminen piireistä, joissa virtaamien oletettiin olevan vakioita eli piireistä, joissa virtausvasutus pysyy samana ja pumppu käy vakio kierroksilla. Virtaamamittaus suoritettiin TA Hydronicsin virtaamamittarilla, jonka mittaustekniikka perustuu paine-eron mittaamiseen venttiilin yli.

6.2.2 Lielahden Prisman energia-analyysi

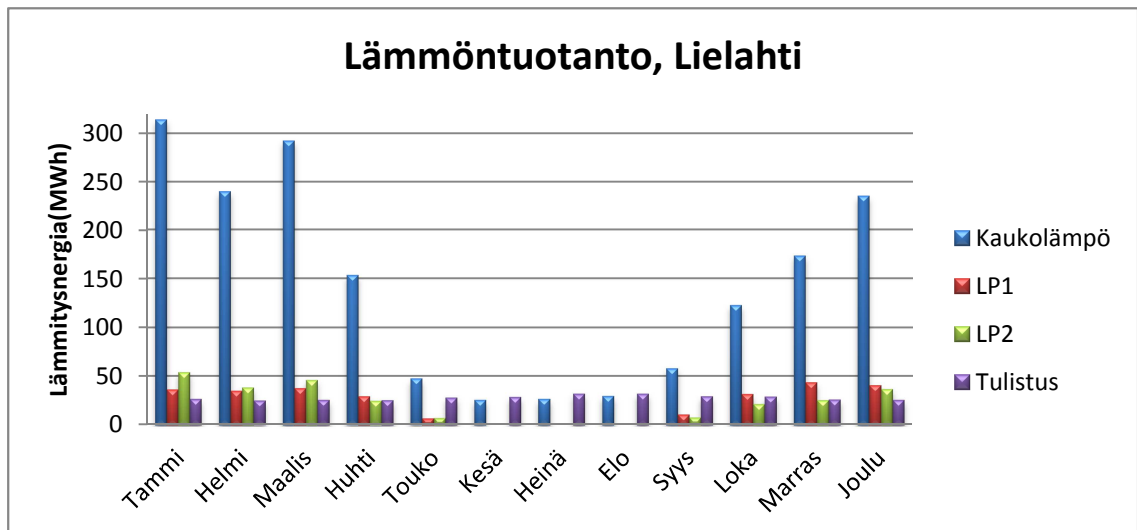
Lielahden Prisman talotekniset järjestelmät edustavat suurelta osin alan moderneinta laitteistoa. Tästä huolimatta marketin kaukolämmönkulutus on ollut kohtuullisen suurta. Kuvassa 6.4 on esitetty Lielahden Prisman lämmityksen ja jäähdytyksen energiataseet. Kuvassa merkintä PV tarkoittaa patteriverkostoa, IV ilmanvaihtoverkostoa, LL luiskalämmitysverkostoa, LV lämmintä käyttövettä, KSV kattosäteilijäverkostoa, KK kylmäkalusteiden alapuhallusta ja JJ jäähdytysverkostoa.

Lielahden Prisman lämmityksen ja jäähdytyksen energiataseet



Kuva 6.4. Lielahden Prisman lämmityksen ja jäähdytyksen energiataseet

Marketin lämmitysenergia tuotetaan kaukolämmöllä, kahdella lämpöpumpulla ja kylmäkoneiden lauhdelämmöllä. Toinen lämpöpumpusta käyttää lämmönlähteenään kylmäkoneiden lauhdelämpöä. Suurin osa hypermarketin lämmitysenergiasta tuotetaan kaukolämmöllä. Kuvaajassa 6.5 on esitetty eri lämmöntuottomuotojen osuus tuotannosta.



Kuva 6.5. Lielahden Prisman lämmöntuotanto

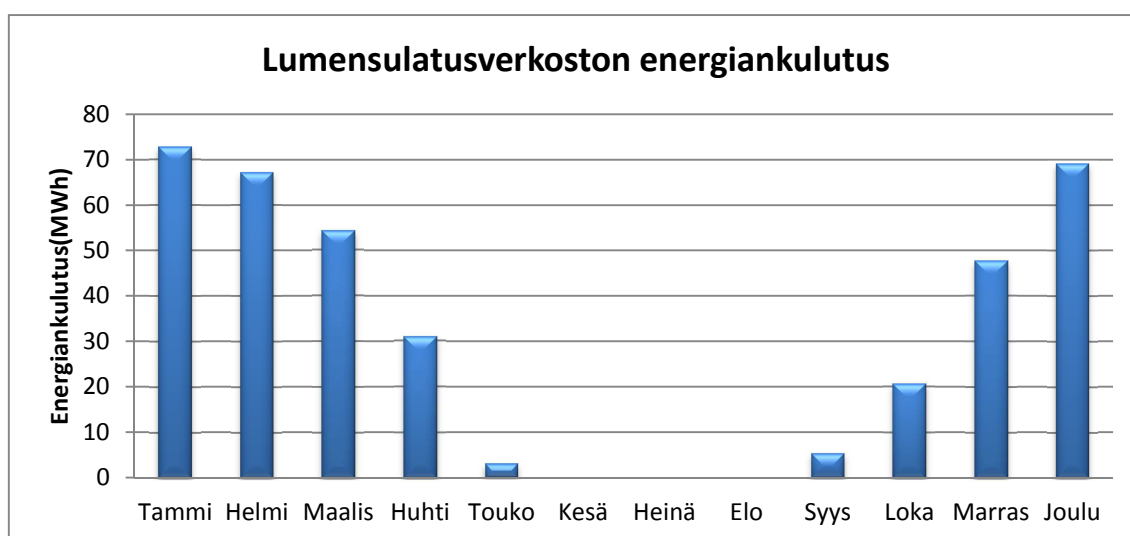
Kaukolämmön osuus vuotuisesta lämmitysenergiatuotannosta oli vuonna 2013 noin 67 %, joten kaukolämpö on selvästi marketin päälämmitysmuoto. Lämpöpumppujen yhteinen osuus oli noin 20 % ja kylmälaitoksen tulistuksen 13 %. Taulukossa 6.3 on esitetty lämmöntuoton jakaantuminen.

Taulukko 6.3. Lämmöntuotannon vuotuinen jakaantuminen Lielahden Prismassa

Lämmitysmuoto	Energia(MWh)	Osuus(%)
Kaukolämpö	1719	67
LP1	270	10
LP2	260	10
Tulistus	333	13
Yhteensä	2582	

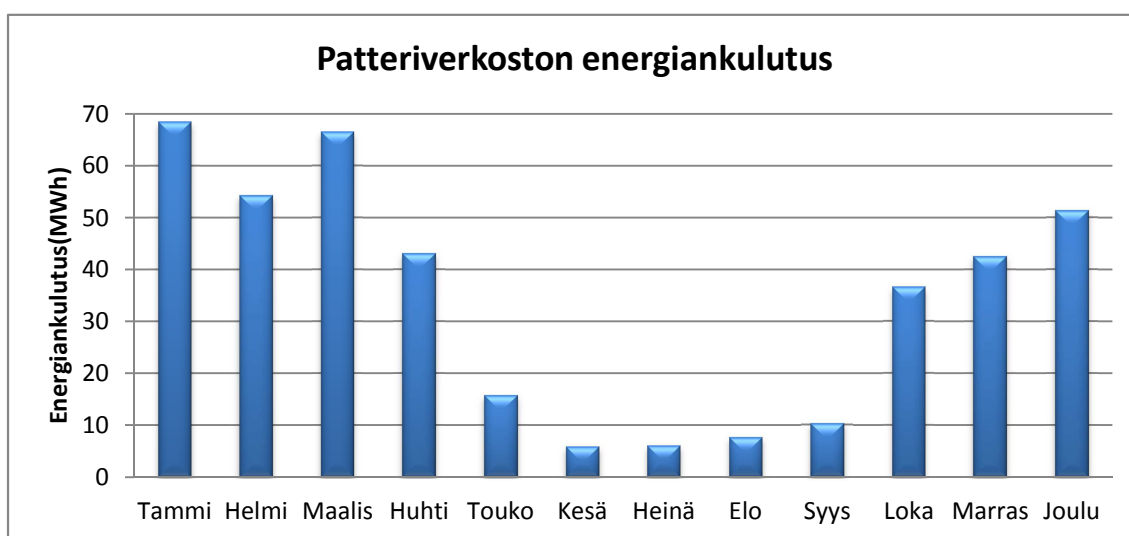
Lämmöntuotannon suhteiden lisäksi selvitettiin kaukolämmön kulutuksen jakaantuminen eri lämmityspiirien suhteen, jotta voitiin arvioida kunkin lämmityspiirin säästöpotentiaali. Lämpöpumppujen ja tulistukseen liitettyjen piirien lämmönsäästöstä ei juuri ole hyötyä, koska lauhde on ilmaisenergiaa ja lämpöpumppujen energiakustannus on selvästi kaukolämpöä pienempi. Näin ollen pääpaino energiasäästötoimenpiteille kohdistettiin kaukolämpöpiireihin.

Lielahdessa lumensulatusverkosto on kytketty kokonaan kaukolämpöön. Verkoston tehtävänä on pitää ajoluiskat ja sisääntulot lumettomina ja sulina. Nimestään huolimatta verkoston lämmittämät alueet ovat pääosin katettuja, jolloin lumensulatasta ei juurikaan tarvita. Lämmitysverkoston lämmitysenergiankulutus on verrannollinen sekä ulkolämpötilaan että sademäärään. Verkoston säätö on toteutettu siten, että paluulämpötila pyritään pitämään asetusarvossaan. Säätekäyrä on korkeimmillaan ulkolämpötilan 0 °C molemmin puolin. Lisäksi sateella käytetään korotettua käyrää, joka on asetettu pystysuuntaissiirtana hieman korkeammaksi. Näin ollen verkoston energiankulutus korreloi sateen määrän kanssa, vaikka verkoston alueet olisivatkin pääosin katettuja. Lämmitys lopetettiin ulkolämpötilan ylittäessä 6 °C pysäyttämällä verkoston pumppu. Pintojen lämpötilan tai kitkan seurantaan ei marketissa ollut mittarilaitteistoa. Kuvassa 6.6 on esitetty lumensulatusverkoston kuukausittainen lämmitysenergiankulutus.

**Kuva 6.6.** Lumensulatusverkoston energiankulutus

Lumensulatuksen vuoden kokonaisenergiankulutus oli noin 370 MWh, joka vastaa kaukolämmön energiakulutuksesta noin 22 %. Lumesulatuksen keskimääräisen tehontarpeen profiili seuraa melko tarkasti paluuveden säätökäyrää. Tehontarve on suurin ulkoilman lämpötiloilla $-5\text{ °C} \dots 0\text{ °C}$, jolloin paluuveden asetusarvo on korkeimmillaan. Lisäksi kulutukseen vaikuttaa lämpötilojen vuorokautinen amplitudi. Keväällä lämpötila vaihtelee runsaammin, jolloin varsinkin päivisin lämpötila nousee pumpun pysäytyslämpötilan yläpuolelle. Huhti- ja marraskuussa kuukauden keskilämpötila oli suurin piirtein sama, mutta keskimääräinen tehontarve oli marraskuussa yli 1,5 -kertainen johdettujen lämpötila-amplitudista ja syksyn suuremmista sademääristä.

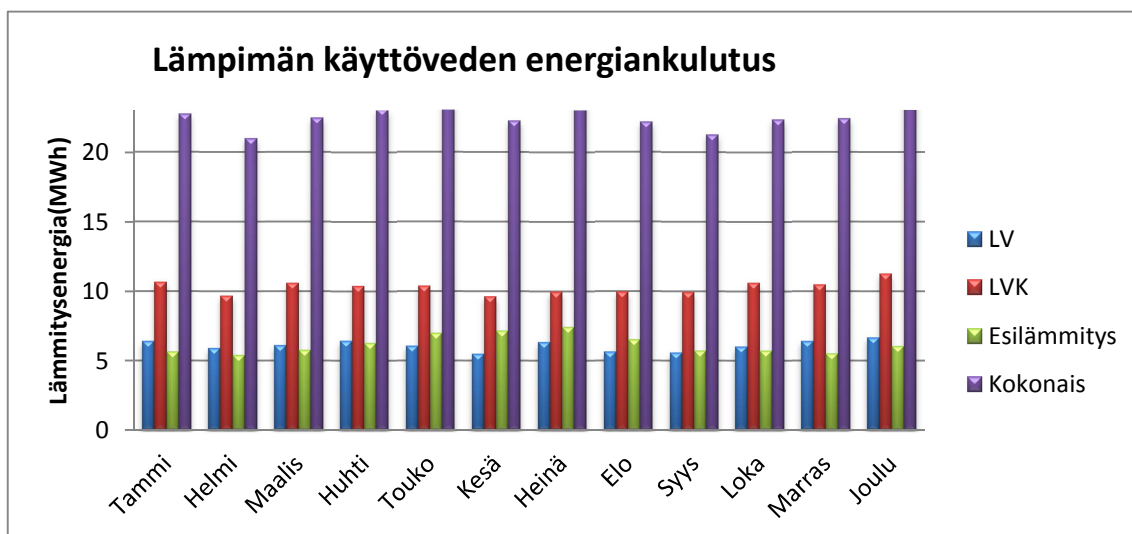
Patteriverkoston osalta kulutusprofiilin luominen meno- ja paluulämpötilojen perusteella oli hieman hankalampaa, koska patteriverkostossa termostaattien toiminta tekevät patteriverkoston virtausvastuksesta vaihtelevan. Virtaaman vaihteluista saatiin tietoa mittaamalla virtaama kahdella eri mittauskerralla, joidenka ajankohdat valittiin siten, että ulkolämpötilat eroaisivat mahdollisimman paljon. Ensimmäisellä mittauskerralla ulkolämpötila oli noin 2 °C ja toisella noin -18 °C . Patteriverkoston kokonaisvirtaama oli molemmilla mittauskerroilla lähestulkoon sama, joten virtaaman voitiin olettaa olevan lämmityskauden ajan vakio. Kuvaajassa 6.7 on esitetty patteriverkoston energiankulutuksen jakaantuminen kuukausittain.



Kuva 6.7. Lielahden patteriverkoston energiankulutus

Käyttövesi lämmitettiin pääosin kaukolämmöllä. Sen nettoenergian tarpeesta noin puolet tuotettiin tulistislämmöllä. Miten pääosa energiasta tuotetaan kaukolämmöllä, jos nettoenergian tarpeesta puolet tuotetaan lämpöpumppujen tulistislämmöllä? Netto-
lämmityksen loppuosuus ja käyttöveden kierron lämmitys tuotettiin kokonaan kaukolämmöllä. Kulutusprofiilin luonnissa käytettiin käyttövedenkulutusta sekä taloautomaation historiatietoja lämpötiloista. Lämpimän käyttöveden kulutuksen osuudeksi vedenkulutuksesta arvioitiin 50 %, koska hypermarketin ravintoloiden astianpesukoneet on

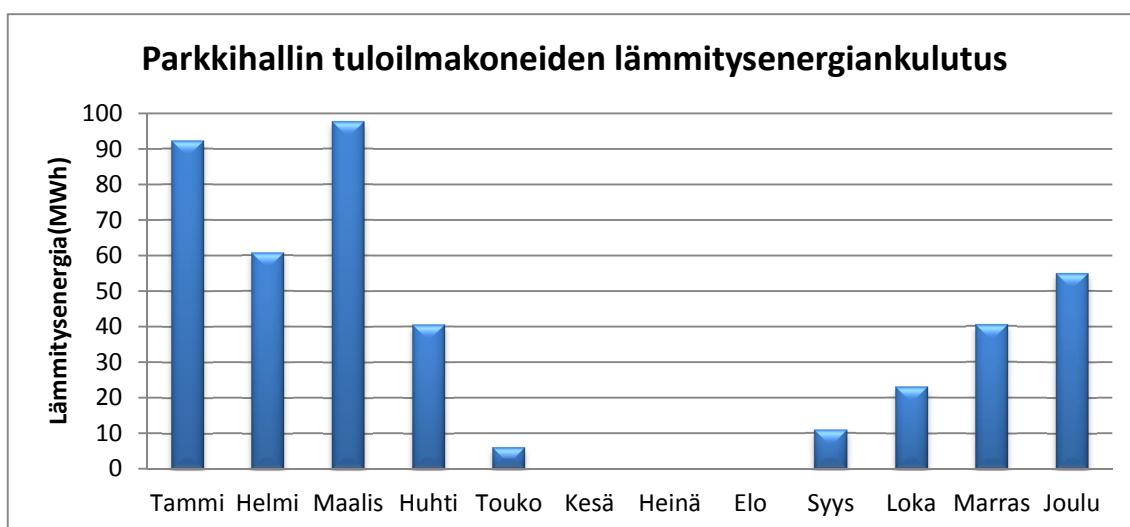
kytketty lämpimään käyttövedeen, joka lisää hieman lämpimän veden osuutta normaalista. Kuvaajassa 6.8 on esitetty käyttöveden energian kulutusprofiili.



Kuva 6.8. Lielahden lämpimän käyttöveden energiankulutus

Käyttöveden kuukausittainen lämmitysenergiantarve on suhteellisen tasainen. Lämmöntuottosuhteet muuttavat hieman, koska kesällä tulistuksen lämpötilataso on hieman korkeampi ja tulistustehoa on hieman enemmän käytettävissä.

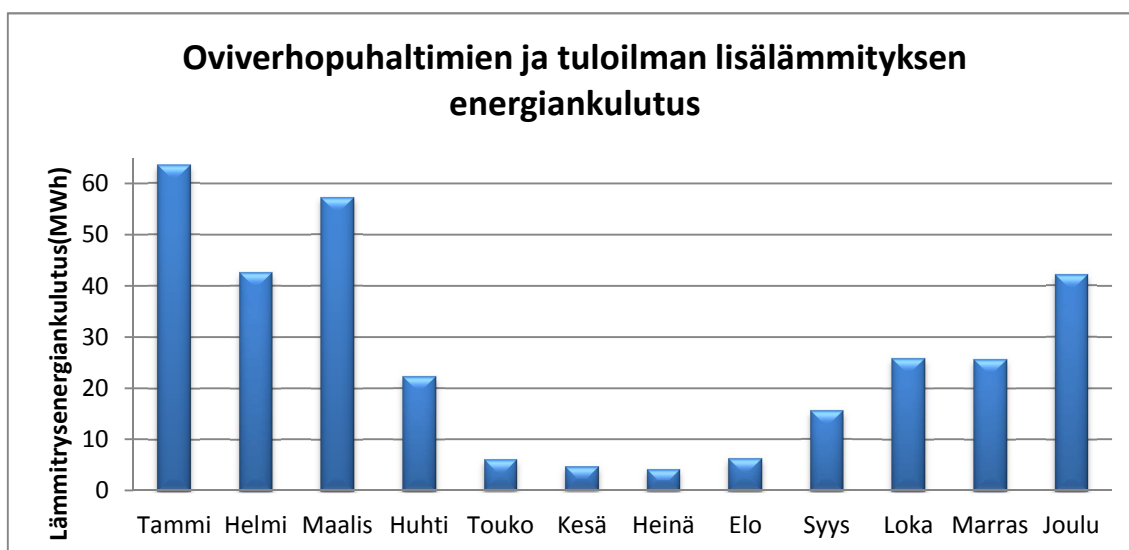
Parkkihallin tuloilmakoneiden ilma lämmitetään kokonaisuudessaan kaukolämmöllä. Ilman epäpuhtauskuten kuten hakan ja hiilidioksidin vuoksi parkkihallien ilmanvaihtuvuuden täytyy olla iso. Epäpuhtauksien seurauksena ainoa lämmöntalteenottovaihtoehto on nestekiertoinen LTO-patteri, jolla on väljällä patterimitoituksella huono lämmöntalteenoton lämpötilasuhde. Kiertoilmaa ei niin ikään voida parkkihallien lämmityksessä hyödyntää. Näin ollen parkkihallien tuloilman lämmitys on suurin yksittäinen kaukolämmönkuluttaja Lielahden Prismassa. Kuvassa 6.9 on esitetty parkkihallin tuloilman lämmityksen kuluttama energia kuukausitasolla.



Kuva 6.9. Lielahden parkkihallin tuloilman lämmitys

Helmikuussa tuloilmakone TK308 oli pois käytöstä lähes koko kuukauden, mikä näkyy osaltaan helmikuun alhaisempana lämmitysenergian kulutuksena. Parkkihallin kokonaislämmitysenergiankulutus oli noin 430 MWh.

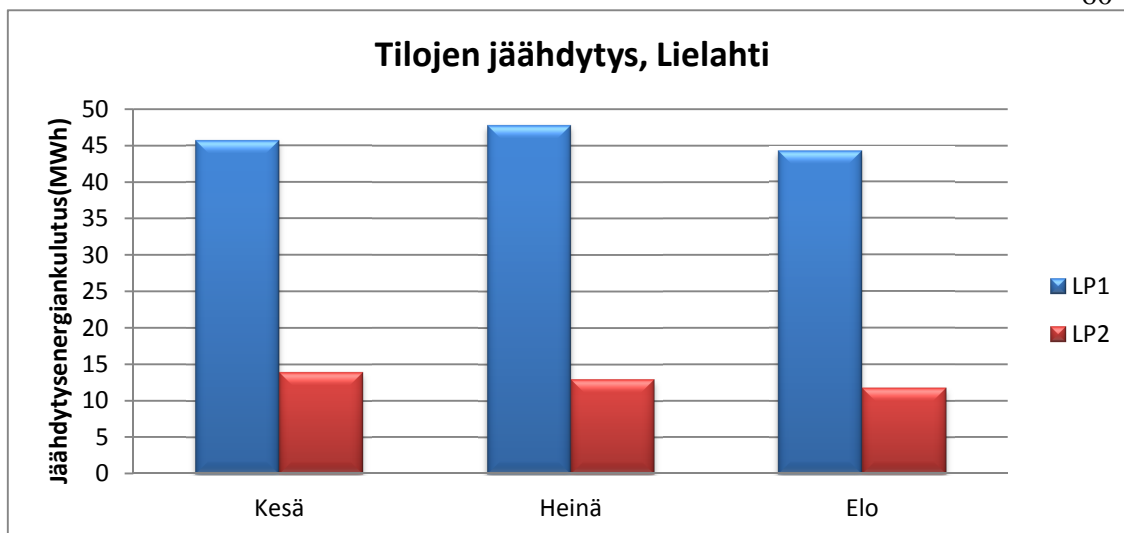
Hypermarketeissa on runsaasti sisääntuloja, joissa tarvitaan vedon estämiseksi kiertoilmapuhaltimia. Lielahdessa on kolme pääsisäänkäyntiä, joiden käyttö vilkkaimpina hetkinä on todella suurta. Taloautomaatiikan historiadatasta saatiin eriteltyä kiertoilma-koneiden sekä tuloilmakoneiden lisälämmityksen energiankulutus yhtenä kokonaisuutena. Lisälämmityksen osuus on kuitenkin hyvin pieni kokonaisenergiamäärästä. Kuvassa 6.10 on esitetty oviverhopuhaltimien ja tuloilman lisälämmityksen energiankulutus.



Kuva 6.10. Oviverhopuhaltimien ja tuloilman lisälämmityksen energiankulutus

Kesä 2013 oli kohtuullisen lämmin. Kesäkuussa keskilämpötila oli peräti 2,7 °C keskimääräistä korkeampi, heinäkuussa 0,3 °C alhaisempi ja elokuussa 0,6 °C korkeampi [30]. Lämpimästä kesästä huolimatta marketin tilojen jäähdytysenergiatarve oli melko vähäistä. Esimerkiksi marketin myymälän päivittäistavaraosasto tarvitsi koko kesän ajan alapuhalluksen täyden lämmitystehon.

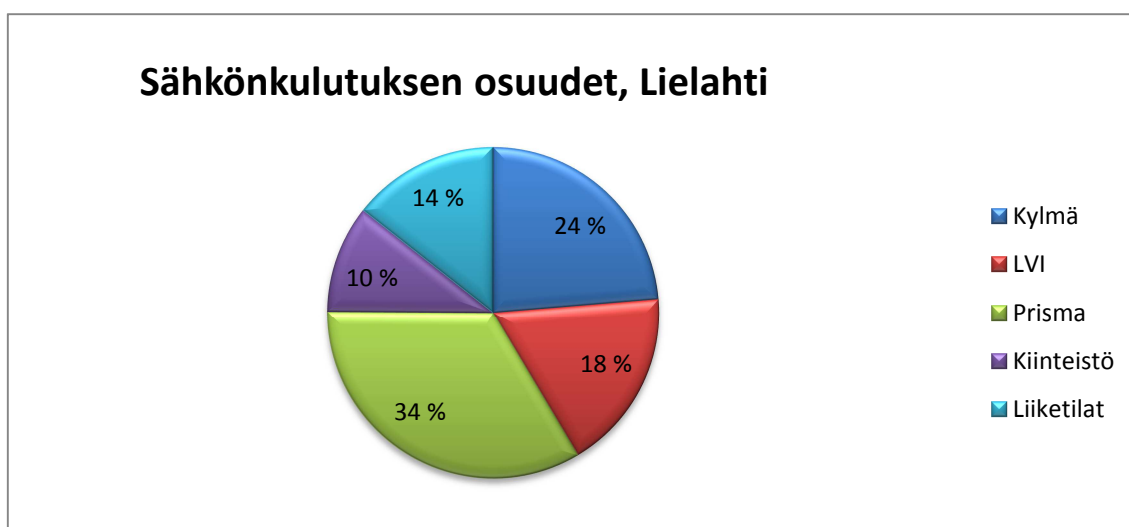
Lielahdessa päämyymälän ilmatilavuus on suuri, jolloin ilman lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuksien muutokset ovat hitaita. Kesäaikana kiertoilmaa pystyttäisiin hyödyntämään erinomaisesti jäähdytyksen tarpeen laskemiseksi entisestään. Myös yötuule-tusta voitaisiin hyödyntää tehokkaammin kiinteistön suuren lämmönvarauskyvyn vuoksi hyvin. Kuvassa on 6.11 esitetty kesäkuukausien vedenjäähdytyskoneiden tuottama jäähdytysenergia eli höyrystimen energia. Kompressorien sähkönkulutus on noin kolmannes höyrystimen energiamäärästä.



Kuva 6.11. Lielahden tilojen jäähdytysenergiantarve

Kuvaajassa sininen palkki edustaa vedenjäähdytyskoneen 1 höyrystimen energian tuottoa ja punainen vedenjäähdytyskoneen 2 höyrystimen tuottamaa energiamäärää. Kesän kokonaisjäähdytysenergian tarve oli noin 177 MWh, josta ostoenergiaa on vedenjäähdytyskoneiston kompressorien kuluttama sähköenergia, joka on koneiston jäähdytysenergian tuotto jaettuna prosessin kylmäkertoimella.

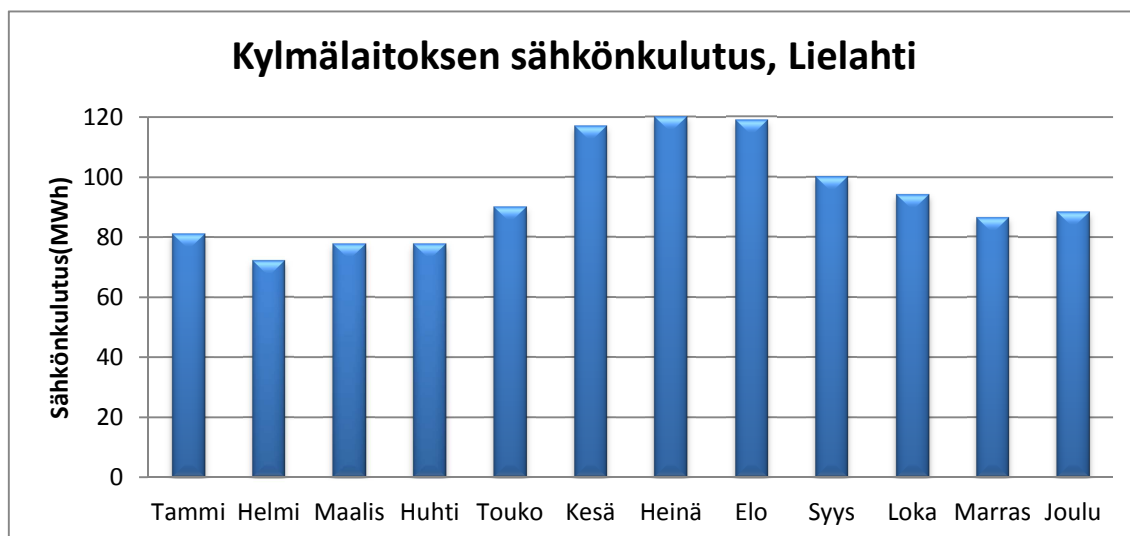
Sähkönkulutuksen osalta Lielahdessa mittaus on jaettu viiteen eri alamittaukseen, jotka ovat kylmälaitos, LVI -laitteet, Prisma myymälä, myymälän ulkopuolinen alue eli kiinteistö ja pienliiketilat. Kylmälaitoksen sähkönkulutukseen kuuluvat kaikki kylmälaitokseen kuuluvat laitteet ja niiden kulutukset. LVI – laitteiden sähkönkulutus koostuu järjestelmiin kuuluvista laitteista kuten pumpuista ja puhaltimista. Valaistuksen ja sähkölaitteiden kulutus on jaettu kahteen osaan. Myymälän sähkönkulutus mitataan omana kokonaisuutena ja myymälän ulkopuolinen sähkönkulutus omanaan. Myymälän ulkopuoliseen sähkönkulutukseen kuuluvat muun muassa parkkihalli ja ulkoalueet. Lisäksi jokaisen liiketilan sähkönkulutus mitataan erikseen, koska liiketilat ovat vuokratiiloja. Kuvaajassa 6.12 on esitetty sähköenergiakulutuksen jakaantuminen. Sähkön kokonaiskulutus oli vuonna 2013 noin 4753 MWh.



Kuva 6.12. Sähkönkulutuksen osuudet

Huomattavaa on kylmälaitoksen sähkönkulutuksen suhteellisen osuuden aleneminen pienemmistä market-kokoluokista, joissa kylmän osuus voi olla jopa 40–60 %. Teknisiä järjestelmiä lukuun ottamatta sähkönkulutuksesta vastaa pääosin valaistus, jolloin Lielahden hypermarketin suurin yksittäinen sähkönkuluttaja on valaistus.

Kylmälaitoksen sähkönkulutuksessa näkyy kesän suurempi lämpö- ja kosteuskuorma sekä lauhdutuksen kohentunut sähkönkulutus. Kesäkuukausien sähkönkulutus on noin 1,5-kertainen talvikuukausiin verrattuna. Kuvassa 6.13 nähdään Lielahden Prisman kylmälaitoksen sähkönkulutuksen kuukausittainen jakaantuminen.



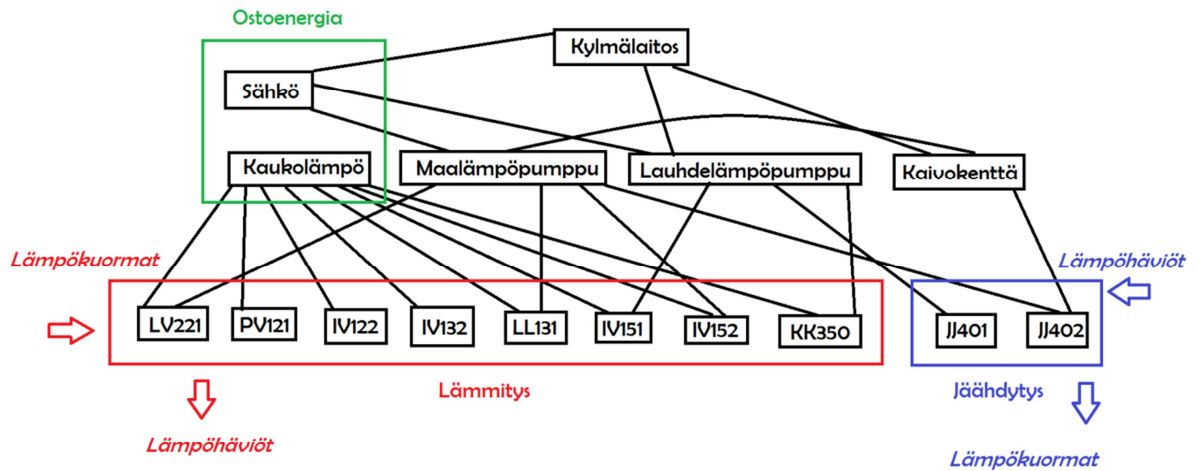
Kuva 6.13. Lielahden kylmälaitoksen sähkönkulutus

Kylmälaitoksen kokonaissähköenergian kulutus oli vuonna 2013 noin 1125 MWh. Kylmäsähkön jakautumisesta ei tietoa ole saatavilla.

6.2.3 Linnainmaan Prisman energia-analyysi

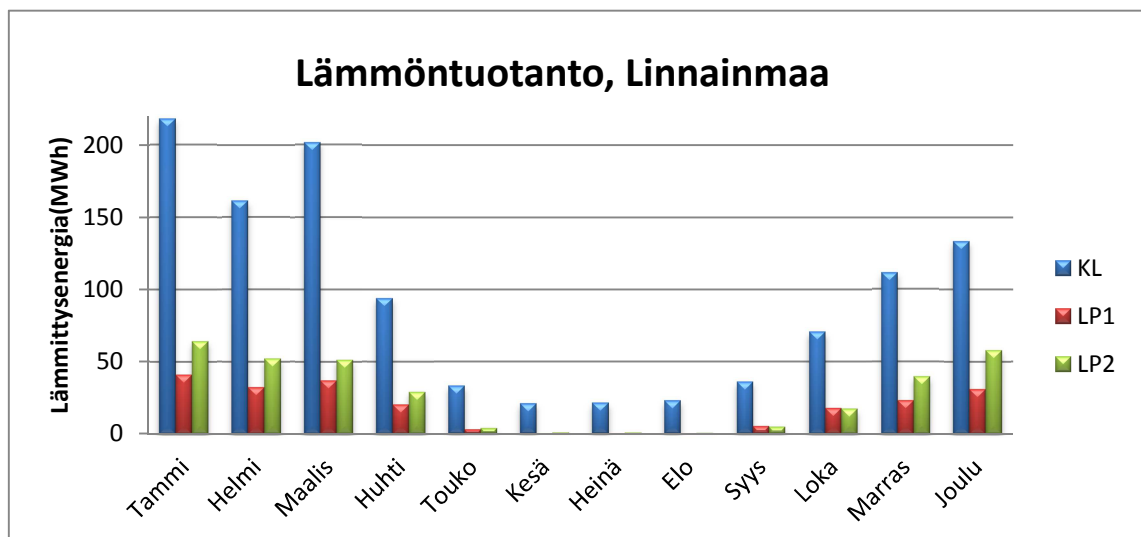
Linnainmaan Prisman lämmöntuotanto on pääosin hyvin samankaltainen kuin Lielahdessakin. Suurimmat eroavaisuudet ovat lämpöpumppujen lämmön hyödyntäminen sekä kylmälaitoksen tulistussiirtimien puuttuminen. Kuvassa 6.14 on esitetty Linnainmaan Prisman lämmityksen ja jäähdytyksen energiataseet. Merkinnät ovat vastaavat kuin Lielahdenkin kuvassa eli PV tarkoittaa patteriverkostoa, IV ilmanvaihtoverkostoa, LL luisikalämmitysverkostoa, LV lämmintä käyttövetä, KK kylmäkalusteiden alapuhallusta ja JJ jäähdytysverkostoa.

Linnainmaan Prisman lämmityksen ja jäähdytyksen energiataseet



Kuva 6.14. Linnainmaan Prisman lämmityksen ja jäähdytyksen energiataseet

Linnainmaalla tuloilman lämmityksen lisäksi lämpöpumppuja hyödynnettiin lumensulatusverkostoon ja käyttöveden esilämmitykseen. Kuvaajassa 6.15 on esitetty Linnainmaan Prisman lämmöntuotannon jakaantuminen kuukausittain vuonna 2013.



Kuva 6.15. Lämmöntuotannon jakaantuminen Linnainmaan Prismassa

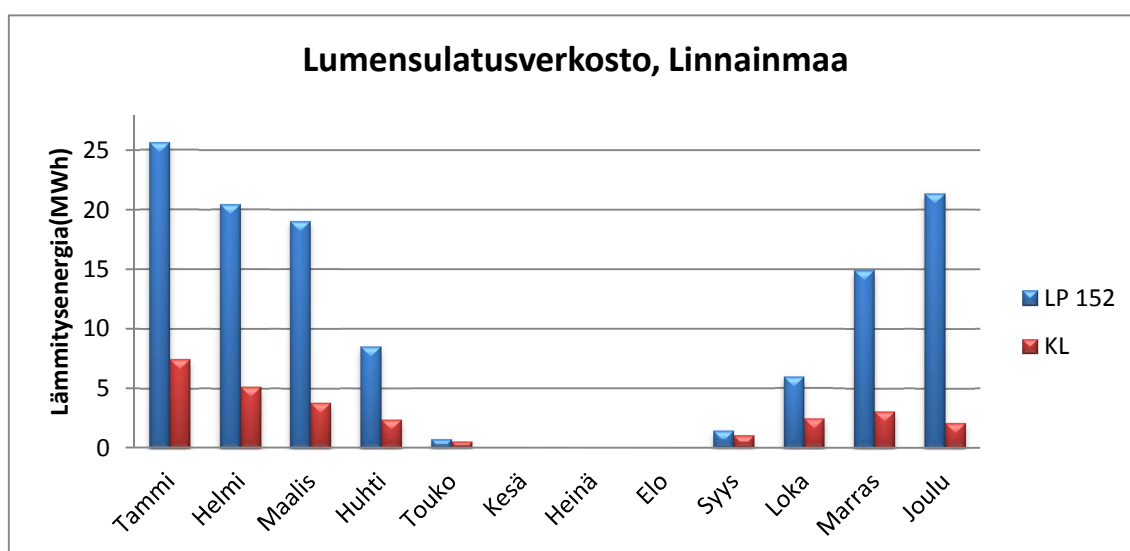
Lielahden tavoin Linnainmaan Prisman päälämmitys muoto on kaukolämpö, jonka suhteellinen osuus kokonaislämmöntarpeesta on noin 68 %. Lämpöpumppujen abso-

luuttinen tuotto oli yhtä paljon kuin Lielahdessakin, mutta suhteellinen osuus oli lähes kolmannes Lielahden viidenneksen sijaan. Taulukossa 6.5 on esitetty Linnainmaan Prisman lämmöntuotannon jakaantuminen vuonna 2013

Taulukko 6.5. Linnainmaan Prisman lämmöntuotannon vuotuinen jakaantuminen

Lämmitysmuoto	Energia(MWh)	Osuus(%)
Kaukolämpö	1123	68
LP1	213	13
LP2	323	19
Yhteensä	1659	

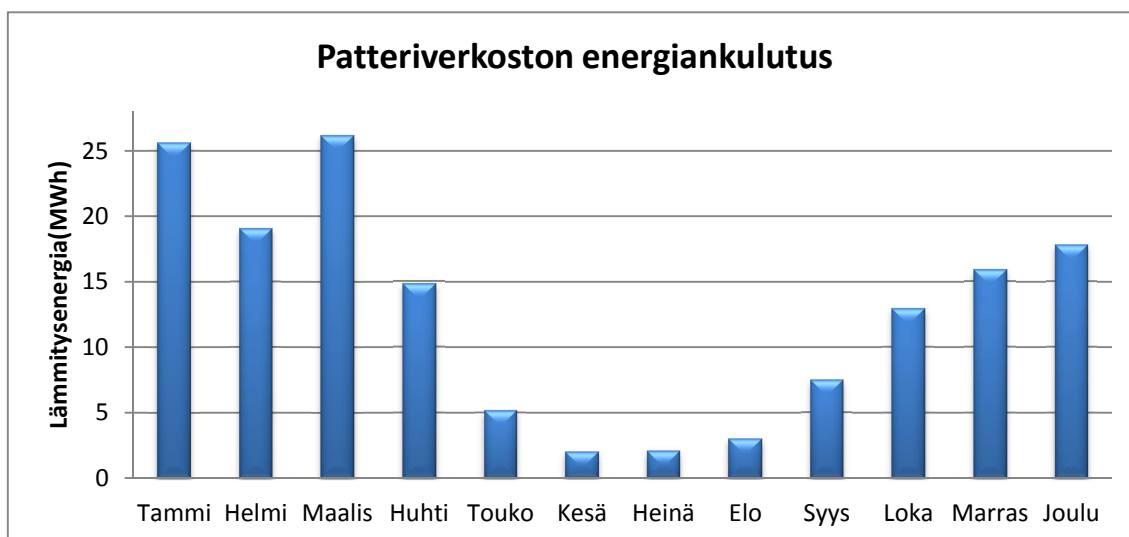
Lumensulatusverkosto lämmitetään pääosin lämpöpumpulla LP152 eli maalämpöpumpulla. Lisälämmityksenä on kaukolämpö, mutta lisälämmön tarve rajoittuu sadekeleille, jolloin tehontarve on suurimmillaan. Kuvajassa 6.16 on esitetty lämmitystarpeen jakautuminen kuukausittain.



Kuva 6.16. Linnainmaan lumensulatusverkoston energiankulutus

Kuvaajasta nähdään, että kaukolämmön kulutus on erittäin vähäistä. Myös kokonaiskulutus on ollut huomattavasti vähäisempää kuin Lielahdessa. Täysin selittävää tekijää asialle ei tässä tutkimuksessa ilmennyt.

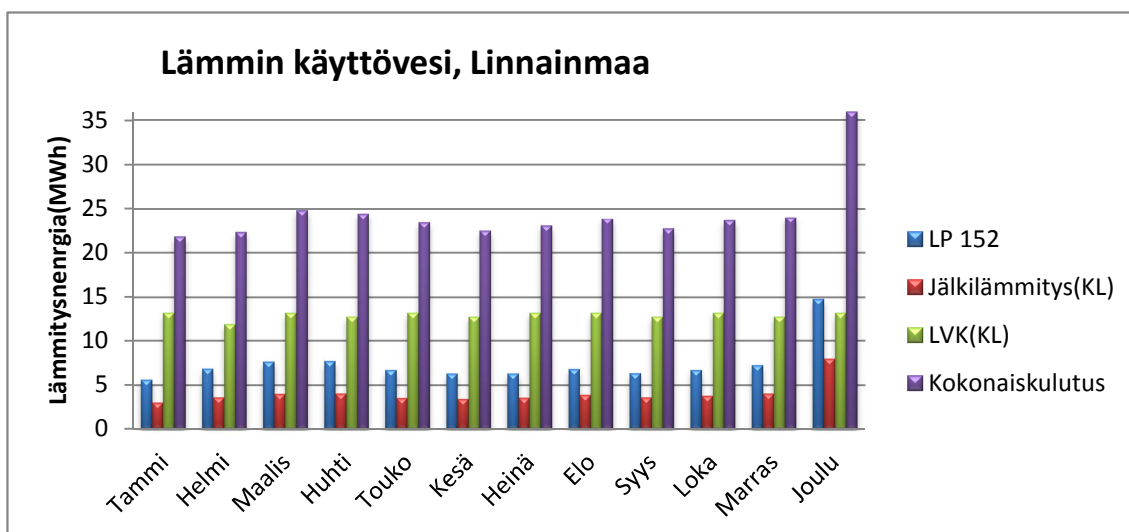
Patteriverkosto on Lielahden tavoin kokonaan kytketty kaukolämpöön. Verkosto on kooltaan huomattavasti pienempi kuin Lielahdessa ja menoveden lämpötilan säätökäyrä on ollut alhaisempi. Nämä tekijät näkyvät myös verkoston energiankulutuksessa. Kuvajassa 6.17 on patteriverkoston energiankulutuksen kuukausittainen jakaantuminen.



Kuva 6.17. Linnainmaa Prisman patteriverkoston energiankulutus

Kummassakaan marketissa kesäsuut eivät ole olleet kiinni kesäisin, jolloin lämmitysenergiaa on kulunut myös kesäkuukausien aikana.

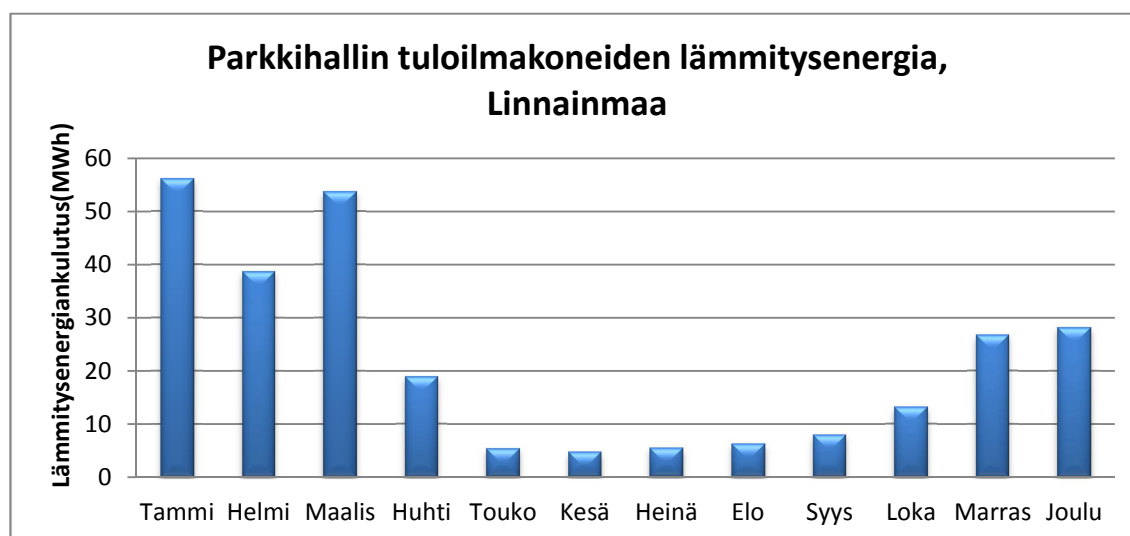
Lämpimän käyttöveden tuotanto on jakaantunut esilämmitykseen, jälkilämmitykseen ja käyttöveden kierron lämmitykseen. Lämpöpumpulla LP 152 esilämmitetään käyttövesi ja loppulämmitys tehdään kaukolämmöllä. Myös käyttöveden kierron häviöiden lämmitystehontarve tuotetaan kaukolämmöllä. Kuvaajassa 6.18 on käyttöveden lämmitysenergian tarpeen jakautuminen eri kuukausille.



Kuva 6.18. Lämpimän käyttöveden energiankulutus

Linnainmaalla on parkkihalli, jossa on kaksi IV-konetta, joiden kokonaisilmavirta on noin 11,0 m³/s eli ilmavirta huomattavasti alhaisempi kuin Lielahdessa. Vuodelle 2013 tuloilmakoneiden lämmityspatteriverkoston vaihdettiin liuokseksi vesiglykoliseos veden tilalle, jotta tuloilman asetusarvo voitiin laskea arvosta 13 °C arvoon 10 °C. Vesikiertoisissa pattereissa tavanomainen jäätymissuojan asetusarvo on 8 °C, joten kyseisellä asetusarvolla ei tuloilman lämpötilaa voi laskea alle tason 12–13 °C. Vesiglykoliliuoksella asetusarvoa voidaan kuitenkin hieman laskea, jolloin saadaan

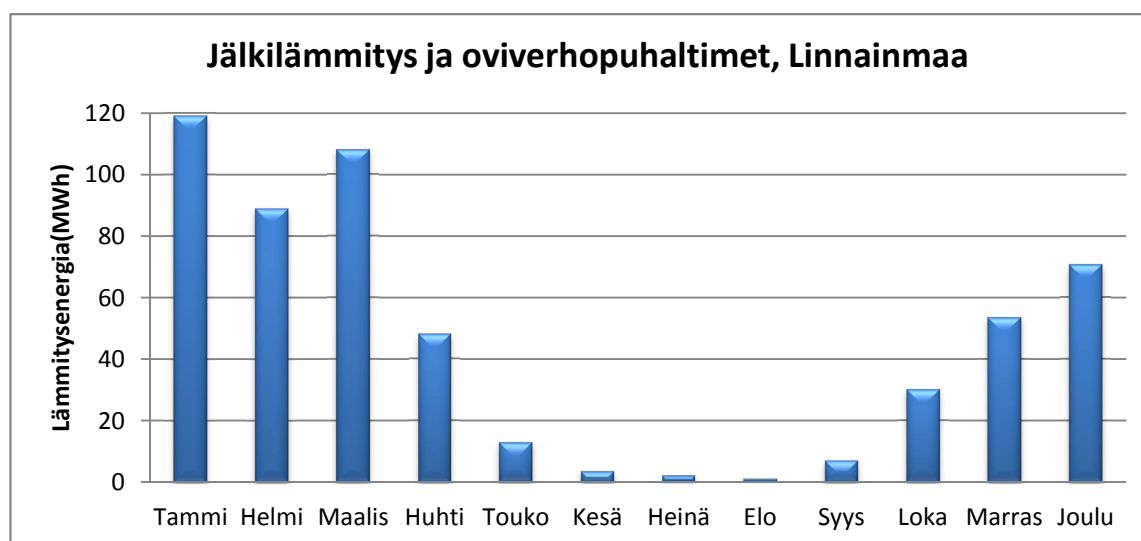
myös tuloilman lämpötilaa laskea hieman alemmas. Parkkihallin lämmitysenergian kuukausittainen kulutus on esitetty kuvaajassa 6.19.



Kuva 6.19. Linnainmaan parkkihallin tuloilman lämmitysenergia

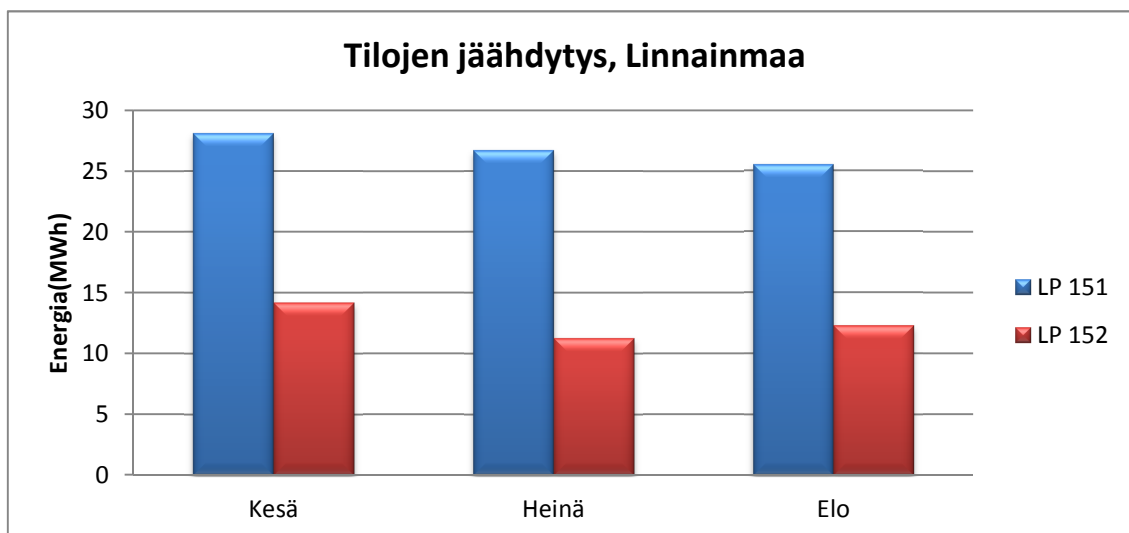
Alhaisemman tuloilman lämpötila-asetuksen ja pienemmän ilmamäärän vuoksi vuotuisen lämmitysenergiatarve on huomattavasti Lielahden Prismaa vähemmän. Vuonna 2013 parkkihallin tuloilman lämmitysenergiankulutus oli noin 266 MWh.

Tuloilmakoneissa, missä hyödynnetään lämpöpumppuja, on oma lämmityspatterinsa esilämmitykselle ja oma jälkilämmitykselle. Näin ollen lämpöpumppujen lämpöä voidaan hyödyntää myös alhaisemmillä lämpötiloilla. Tuloilmakoneiden jälkilämmityspatterit ovat samassa verkostossa yhdessä pienliiketilöiden tuloilmakoneiden TK306-308 lämmityspatterien, jotka ovat kytketty pelkkään kaukolämpöön. Lisäksi samassa verkossa ovat kaikki oviverhopuhaltimet. Kuvaajassa 6.20 on esitetty kyseisen lämmitysverkoston lämmitysenergiankulutus.



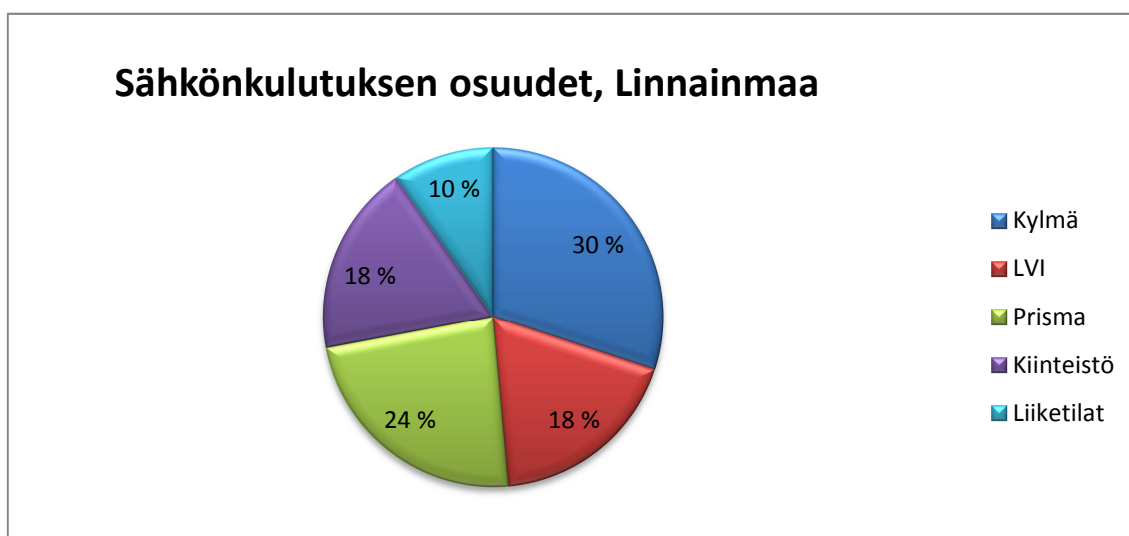
Kuva 6.20. Linnainmaan jälkilämmityksen ja oviverhopuhaltimien energiankulutus

Tilojen jäähdytys on Linnainmaalla tuloilman jäähdytyksen ja konvektoriverkoston yhdistelmä. Lämpöpumput LP0151 ja LP0152 ovat kytketty tuloilmakoneiden jäähdytyspattereihin vastaavalla kytkentäperiaatteella kuin Lielahden Prismassakin. Erotuksena on, että Lielahdessa on käytetty siirrintä lämpöpumpun ja varaajan välissä sekä lämmitys- että jäähdytyspuolella. Lämpimästä kesästä huolimatta tilojen jäähdytyksen tarve oli kohtuullisen vähäinen. Kuvaajassa 6.21 on Linnainmaan Prismassa kesäkuukausien jäähdytysenergian tarve eli höyrystimen tuottama energia.



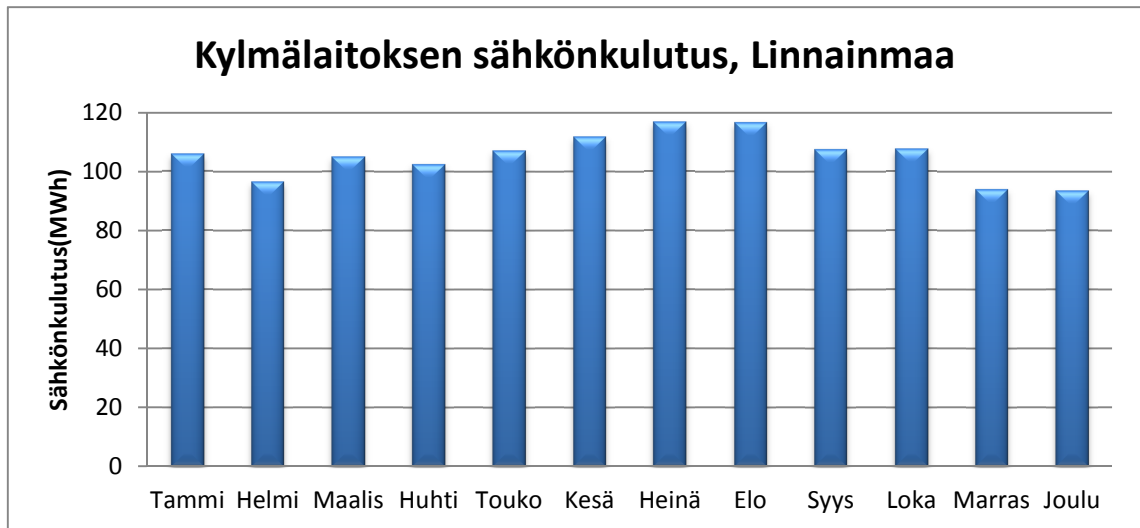
Kuva 6.21. Tilojen jäähdytysenergian tarve

Kokonaissähköenergian kulutus vuonna 2013 Linnainmaalla oli noin 4200 MWh. Kulutusprofiili on hieman erilainen kuin Lielahdessa, jossa valaistuksen osuus oli erittäin merkittävä. Myös Linnainmaalla valaistuksen osuus on suuri, mutta absoluuttinen kulutus jää pienemmäksi. Sähkönkulutuksen osuudet Linnainmaan Prismassa on esitetty kuvassa 6.22. Merkinnät ovat vastaavat kuin Lielahden Prismankin kohdalla.



Kuva 6.22. Sähkönkulutuksen osuudet Linnainmaan Prismassa

Kylmälaitoksen absoluuttinen sähkönkulutus oli noin 1266 MWh, joka on samaa suuruusluokkaa kuin Lielahdessakin. Kylmälaitoksen sähkönkulutuksen jakautuminen eri kuukausille on kuitenkin huomattavasti tasaisempaa. Kuvaajassa 6.23 on esitetty Linnainmaan Prisman kylmälaitoksen sähkönkulutuksen kuukausittainen jakautuminen.



Kuva 6.23. Kylmälaitoksen sähkönkulutus Linnainmaan Prismassa.

Marketeissa ei ollut kylmälaitosten sähkönkulutuksen mittauksessa erillisiä alamittauksia kompressoreille. Plus- ja pakastelaitoksen kulutukset ovat kuitenkin eri sähkömittauksissa. Pluspuolella kompressorien osuuden voidaan arvioida olevan noin 70 % ja pakkaskoneikoissa noin 40 % kokonaissähkönkulutuksesta.

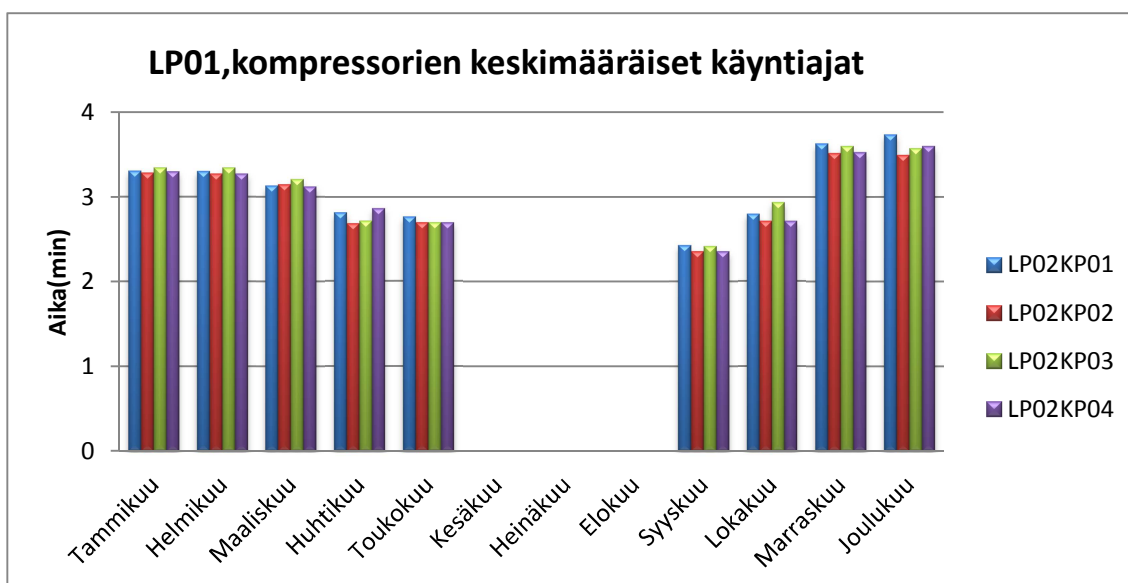
7 ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN

7.1 Lämpöpumput

7.1.1 Lämpöpumppujen käyntiajat

Molemmissa tutkimuskohteissa lämpöpumppujen mitoitus on tehty kesäajan jäähdytyksen perusteella. Jäähdytysmitoituksesta johtuen kompressorit ovat erittäin tehokkaita, koska hetkellinen jäähdytystehontarve voi olla todella suuri. Lämpöpumput on pääosin kytketty tuloilman lämmityspattereihin. Tuloilmakoneissa on suurimmaksi osaksi hyvällä lämpötilasuhteella toimiva lämmön talteenotto sekä osassa on mahdollisuus myös kiertoilman hyödyntämiseen, jolloin lämmitystehontarve jää vähäiseksi. Varaajat ovat lämpöpumppuun kytketyissä lämmitysverkostoissa tehoon suhteutettuna kohtuullisin pieniä. Näiden tekijöiden seurauksena on ongelmaksi muodostunut suuri käynnistyskerrojen lukumäärä. Lielahden lämpöpumpuista on käyntiaikatiedot saatavissa, mutta Linnainmaalta ei ole.

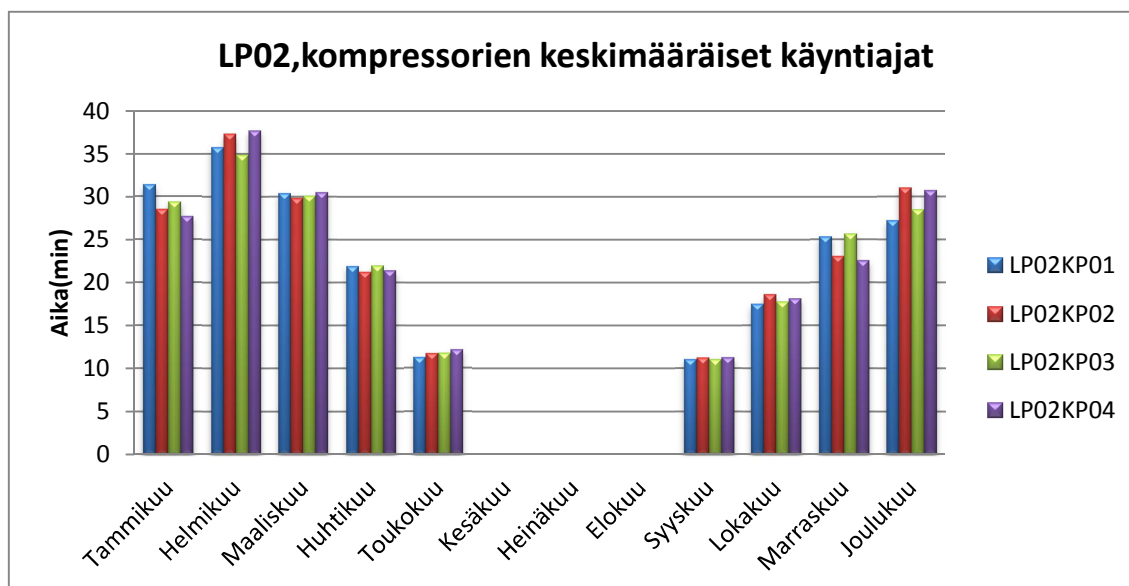
Ongelmallisin markettien neljästä lämpöpumpusta on Lielahden maalämpöpumppu. Lielahden maalämpöpumpussa on neljä kompressoria, joiden kompressorikohtainen lämmitysteho tämän hetkisisissä lämpötilaolosuhteissa on noin 130 kW. Kuvaajassa 7.1 on esitetty lämpöpumpun kompressorien keskimääräiset käyntiajat kuukausitasolla.



Kuva 7.1. LP01, Maalämpöpumpun kompressorien keskimääräiset käyntiajat

Kuvaajasta nähdään, että keskimääräinen kompressorin käyntiaika on vain noin kolme minuuttia. Marras- ja joulukuun keskimääräiset käyntiajat ovat hieman korkeampia, koska rakennustöiden vuoksi kattosäteilijäverkoston KSV05 alueella oli ylimääräisiä lämpövuotoja. Lyhyiden käyntiaikojen suurin haittatekijä on kompressorien vaurioituminen. Lielahden markettia vastaavassa Prismassa on rikkoutunut useita kompressoreita kolmen vuoden aikana, koska kompressorien käyntiajat ovat olleet erittäin lyhyitä. Toinen suuri ongelma on lämpöpumpun lämpökertoimen heikentyminen. Kompressorin käynnistyessä kylmäainekierrolla kestää hetken aikaa hakeutua tasapainotilaan. Lielahden tilanteessa lämpöpumpun kompressorit ovat jatkuvasti epätasapainotilassa, jolloin sähkönkulutus normaalia suurempaa.

Lielahden lauhdelämpöpumpun suhteen tilanne on hieman parempi, koska lämpöpumpun kompressorien lämmitystehot hieman pienempiä. Nykyisillä kylmälaitoksen lauhtumislämpötilan asetuksilla ja lämpöpumpun lauhtutinp puolen säätökäyrillä on keskimääräinen kompressorikohtainen lämmitysteho hieman yli 80 kW.



Kuva 7.2. LP02, Lauhdelämpöpumpun kompressorien keskimääräiset käyntiajat

Lauhdelämpöpumpun käyntiajat ovat selkeästi pidempiä kuin maalämpöpumpulla. Kylmimpinä kuukausina keskimääräinen käyntiaika on noin 30 minuuttia. Lämmitystarpeen laskiessa käyntiajat laskevat noin kymmeneen minuuttiin. Linnainmaan kohdalla käyntiaikoja ei ole saatavilla, mutta suhteuttaessa lämpöpumpujen tehon tuotettuun lämmitysenergian määrään, voidaan arvioida, että käyntiajat ovat suurin piirtein Lielahden lauhdelämpöpumpun luokkaa.

Ainoa keino käyntiaikojen pidentämiseksi ilman rakenteellisia muutoksia on antaa lämmitysvaraajan lämpötilan vaihdella tavanomaista suuremmalla amplitudilla. Suurin osa varaajista on kooltaan 2000 litraa, jonka seurauksena suuremmalla lämpötilan vaihtelulla ei saavuteta välttämättä suurta hyötyä. Varaajan lämpötilan nosto yhdellä asteella tarvitsee energiaa noin 2,3 kWh eli 100 kW:n lämmitysteholla lämmittäminen ei kestä

kuin reilut 80 sekuntia. Lisäksi lämmitysverkon suuri lämpötilan vaihtelu voi aiheuttaa lämmitysverkon lämmönluovuttimissa säätötekniisiä ongelmia, kuten lämpötilan huojuntaa.

7.1.2 Lämmitysverkon lämpötilan vaikutus lämpökertoimeen

Lämpöpumpuilla lämmitysverkon menoveden säätökäyrällä on iso merkitys lämpökertoimeen. Tavanomainen käytäntö on käyttää lämmitysverkon menoveden mitoituslämpötilaa ja jatkaa käyrää lineaarisesti tiettyyn lopetuspisteeseen. Kaukolämpöverkoissa menovesikäyrän ylimitoituksella ei ole suurta merkitystä, koska käytetty lämpöenergia on likimain sama käyrästä riippumatta. Tosin laajoissa verkostoissa tilanne on eri, koska verkoston lämpöhäviöillä on merkitystä. Hypermarketeissa valtaosa lämmityksestä on ilmalämmitystä, missä ilmanvaihdon lämmityspatterien tavallisia mitoituslämpötiloja ovat 60 °C/40 °C tai 50 °C /30 °C. Jos pääverkosto on mitoitettu samoille lämpötiloille, mitoitusstilanteessa pääverkostossa ja IV-lämmityspatterissa virtaa sama vesimäärä. Lielahden IV-lämmityspatterien mitoitukset on tehty siten, että kaukolämpöön kytkeydyissä verkostoissa mitoitus on 60 °C/40 °C ja lämpöpumppuverkostoissa on 50 °C /30 °C. Linnainmaalla kaikki lämmityspatterit ovat mitoitettu 60 °C/40 °C.

Lämmityspatterien mitoituksessa oletetaan, että ilmakehän kosteuden vuoksi lämmön talteenottoa ei voida täysimääräisesti hyödyntää viileimmillä ulkoilman lämpötiloilla. Tutkimuskohteena olleissa hypermarketeissa suurimmassa osassa ilmanvaihtokoneita ei ole tarvinnut lämmön talteenottoa rajoittaa ollenkaan koko markettien olemassaoloaikana. Alhaisimmillaan ulkoilman lämpötila on ollut noin -26 °C mittaushistorian aikana. Markettien sisätiloissa sisäiset kosteuskuormat ovat erittäin pieniä keittiöitä lukuun ottamatta. Lisäksi päivittäistavaraosastolla kylmäkalusteet kuivattavat ilmaa. Näin ollen sisäilman kosteus pysyy talvella erittäin pienenä ja lämmön talteenoton huurtuminen on erittäin vähäistä. Lämmön talteenoton toiminnan lisäksi ilmanvaihtokoneiden ilmamäärät eroavat paljon mitoitusstilanteesta. Suurin osa Lielahden ja Linnainmaan koneista toimii huomattavalla osateholla. Tuloilman lämpötila on usein eri kuin mitoitettu, koska tilan lämpökuormia ei ole huomioitu mitoituksessa. Myymälän ilmanvaihtokoneissa on molemmissa marketeissa kiertoilmapelit, joita pääsääntöisesti voidaan hyödyntää, koska hiilidioksidipitoisuudet pysyvät halutulla tasolla ilman 100 % raitisilman osuutta. Seurauksena on, että ilmanvaihdon lämmityspatterin tarvitsema menovesikäyrä on aivan eri kuin mitoitettu.

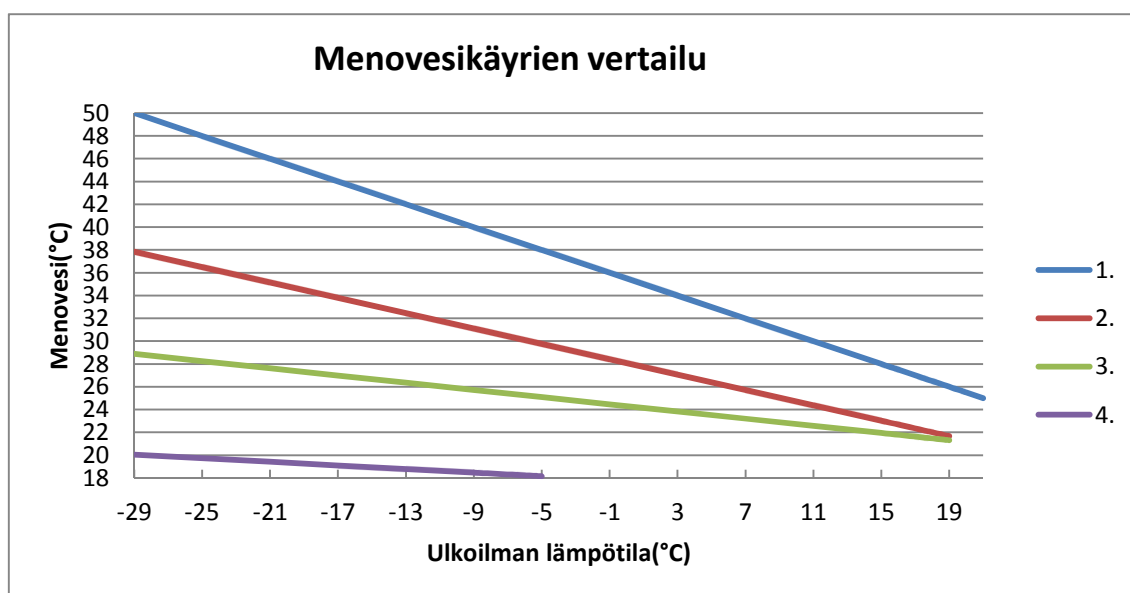
Menoveden merkityksen konkretisoimiseksi käsitellään asiaa esimerkkitalanteiden avulla. Lämmityspatterin lämmitystekniset tiedot valittiin esimerkkiin erään Lielahden ilmanvaihdon lämmityspatterien mukaan. Alla on esitetty lämmityspatterin menoveden säätökäyrän muuttuminen olosuhteiden mukaan. Lämmityspatterin lämmitystekniset mitoitus tiedot ovat:

- Ilman lämpötilat $-2\text{ °C}/20\text{ °C}$
- Veden lämpötilat $50\text{ °C}/30\text{ °C}$
- LTO:n lämpötilasuhde 75 %
- Konduktanssi oletetaan vakioksi

Menovesikäyrävertailussa ovat seuraavat tilanteet:

1. Lineaarinen menovesikäyrä, joka perustuu mitoitusolanteeseen $50\text{ °C}/30\text{ °C}$
2. Lämmöntalteenotto toimii kaikilla ulkoilman lämpötiloilla
3. Ilmavirta on 60 % mitoitetusta
4. Ilmavirta on 60 % mitoitetusta, kiertoilmaa käytetään 50 % ja tuloilman lämpötila on 18 °C

Menovesikäyrät ovat esitetty kuvaajassa 7.3.



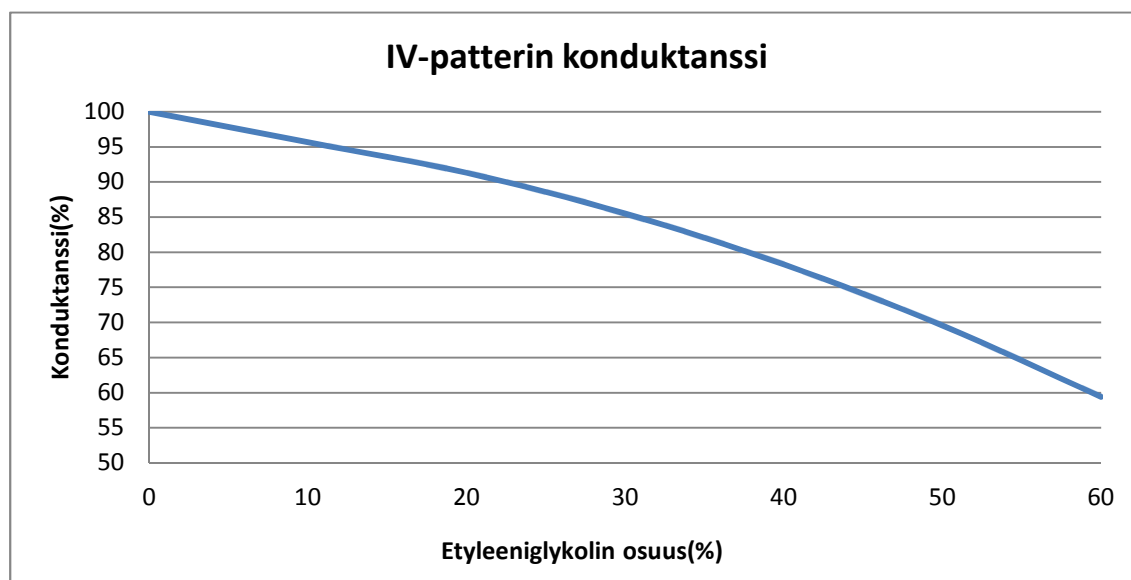
Kuva 7.3. Vaaditun menoveden lämpötilatason muutos mitoitusolanteesta

Menoveden lämpötilan säätökäyrän energiataloudellista merkitystä lämpöpumppu-prosessille arvioitiin Tampere-Pirkkala säähavaintoaseman lämpötilan pysyvyystietojen ja Copelandin kompressorimitoitusohjelman tietojen perusteella. Tarkastelussa oli lämpöpumpun kompressorien sähkönkulutus. Vertailukäyränä toimi säätökäyrä numero yksi, johon muita säätökäyriä verrattiin. Sähkönkulutuksen erot ovat seuraavat:

- Säätökäyrällä 2 sähkönkulutus on 16,2 % pienempi kuin säätökäyrällä 1
- Säätökäyrällä 3 sähkönkulutus on 22,4 % pienempi kuin säätökäyrällä 1
- Säätökäyrällä 4 sähkönkulutus on 33,2 % pienempi kuin säätökäyrällä 1

Suurissa lämpöpumppujärjestelmissä, joissa käyttöaste on suuri saattaa sähkönkulutuksessa olla suurikin ero, jos säätökäyrä on tarpeettoman korkea.

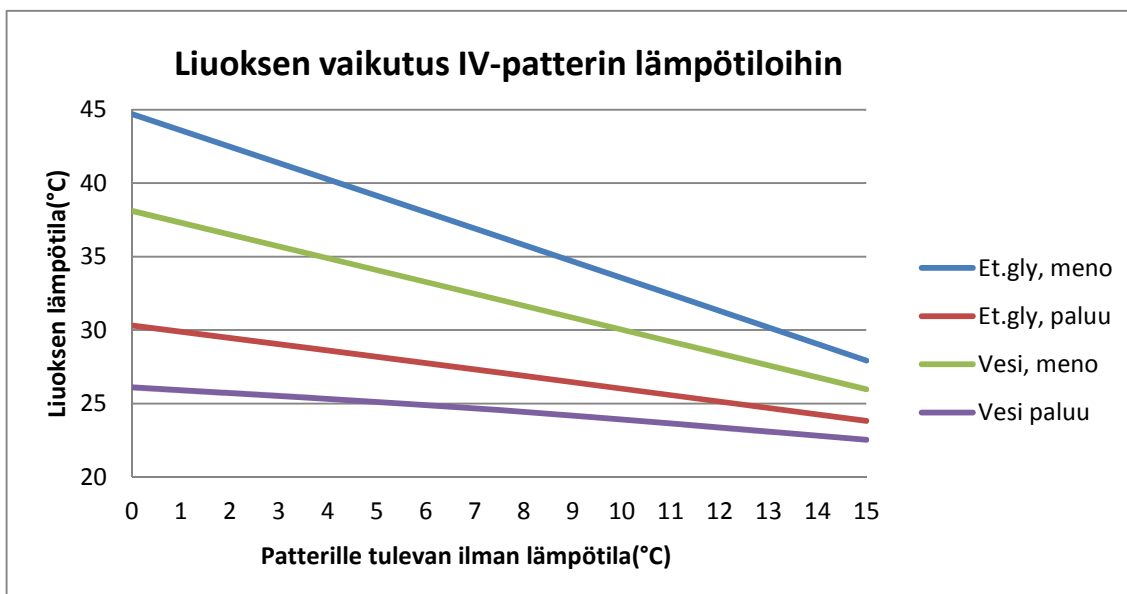
Ilmanvaihdon lämmityspatterin tarvitsemaan menoveden lämpötilaan vaikuttaa myös patterissa kiertävä liuos. Piireissä, joissa on jäätymisriski, yleisin liuos on veden ja etyleeniglykolin seos. Etyleeniglykolilla on huonommat lämmönsiirrolliset ominaisuudet, jotka vaikuttavat patterin lämmönsiirtoon. Kuvaajassa 7.4 on esitetty IV-patterin suhteellinen konduktanssi etyleeniglykolipitoisuuden funktiona.



Kuva 7.4. Etyleeniglykolin vaikutus patterin konduktanssiin. [31]

Lielahdessa kaikissa IV-pattereissa kiertää vesi. Linnainmaalla kiertävänä liuksena on 40 % etyleeniglykoli-vesi-seos. Suurimpana erona lämpöpumpun lauhdutinpuolen kytkennässä on, että vesijärjestelmä vaatii ylimääräisen lämmönsiirtimen ja varaajan latauspumpun. Etyleeniglykolijärjestelmässä lauhdutinpiiri voidaan puolestaan kytkeä suoraan varaajaan. Patterin kytkentä on vesijärjestelmässä toteutettu vakiovirtaamakytkennällä, jossa patterilla on oma pumppu. Glykolipatterien kytkentä on vesivirtasäätöinen, jolloin patterille ei tarvita omaa pumppua.

Etyleeniglykoli kuitenkin huonontaa patterin lämmönsiirtoa, joten samaan lämmitystehoon samankokoisen vesipatterin kanssa vaaditaan korkeampi menoveden lämpötila ja virtaama. Myös virtausteknisesti etyleeniglykoli on huonompi, koska suuremman viskositeetin vuoksi verkoston painehäviöt ovat suuremmat. Kuvaajassa 7.5 nähdään veden ja vesiglykoliseoksen erot patterin lämmönsiirtonesteinä. Kuvaajassa patterin mitoitus on veden lämpötiloille 50 °C /30 °C ja ilman lämpötiloille 0 °C /21 °C. Lisäksi oletuksena on, että tuloilman lämpötila on vakio, ja ilmamäärä käyttötilanteessa on 60 % mitoitetusta.



Kuva 7.5. Liuoksen vaikutus IV-patterin tarvittaviin lämpötiloihin [31]

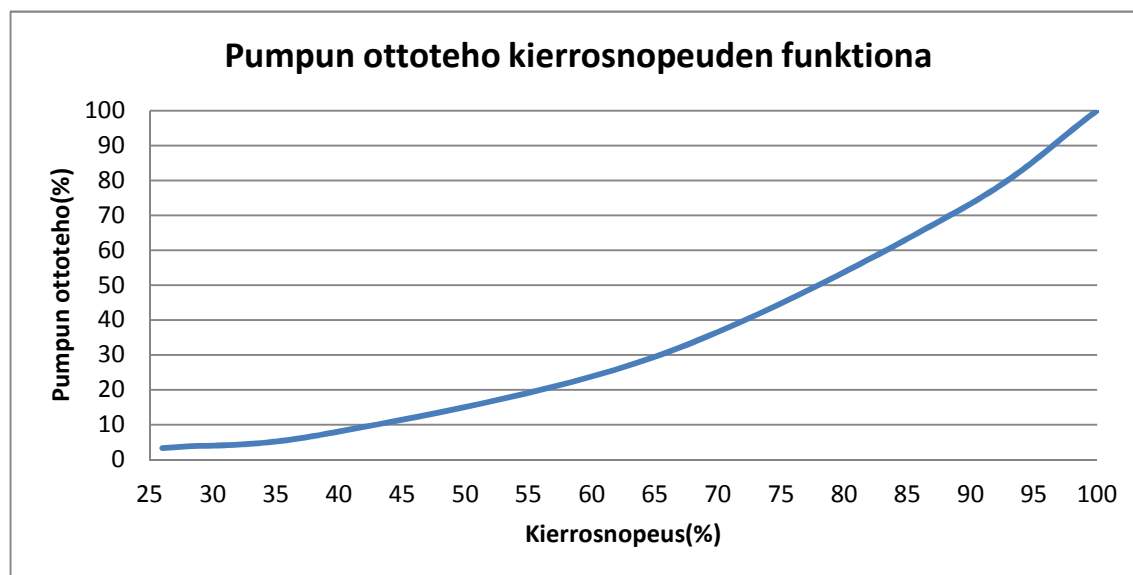
Etyleeniglykolin huonompi lämmönsiirto voidaan korvata ominaislämpöjen suhteessa suuremmalla liuosvirtaamalla ja suuremmalla patterin lämmönsiirtopinta-alalla. Suurempi liuosvirtaama ja pinta-ala johtavat kuitenkin suurempiin painehäviöihin niin ilma- kuin vesipuolellakin.

7.1.3 Lämpöpumppujärjestelmän kiertovesipumput

Lämpöpumppujärjestelmissä kiertonesteiden lämpötilan muutokset lauhduttimissa ja höyrystimissä ovat kohtuullisen pieniä. Pienten lämpötilaerojen vuoksi mitoitusvirtaamat ovat suuria. Maalämmön kohdalla suurissa kaivokentissä on myös pitkät putkivedot, jolloin sähkönkulutus on korkea mitoitusvirtaamalla. Linnainmaalla pumput pyörivät koko ajan samalla kierrosnopeudella. Lielahdessa on hieman eroa jäähdytys- ja lämmityskäytön suhteen, mutta energiateknisesti merkitys on olematon. Nykyisissä pumpuissa sähkön ottoteho kierrosnopeuden suhteen on likimain affiniteettisääntöjen mukainen, joten suurissa järjestelmissä pumppauskustannukset voivat kohota erittäin merkittäviksi, jos kierrosnopeutta ei säädetä. Suuret lämpöpumppulaitokset koostuvat yleensä kompressoreista, jotka eivät ole invertterisäätöisiä. Näin ollen höyrystimille ja lauhduttimille vaadittu virtaama riippuu käynnissä olevien kompressorien lukumäärästä. Yhdistetyssä lämpöpumppu/vedenjäähdytyskone – järjestelmissä lämmityskäytön tehontarve voi olla suhteellisen pieni koneikon tehoon nähden, jolloin suurin osa lämmityskaudesta pärjätään yhdellä tai kahdella kompressorilla. Lielahden ja Linnainmaan lämpöpumpuissa on yhteensä neljä kompressoria lämpöpumppua kohden.

Kuvaajassa 7.6 on esitetty Lielahden maalämpöjärjestelmän Grundfosin pumpun TP80-400/2 sähkön ottoteho kierrosnopeuden funktiona höyrystinpiirin vastuskäyrällä.

Koska lämmitystehontarve on pieni, voidaan myös pumpun virtaamaa laskea, silloin kun lämpöpumppulaitos käy osateholla. Pumpun kierrosnopeuden lasku mitoituspyörimisnopeudesta puoleen pudottaa pumpun sähkötehon tarpeen 15 % alkutilanteesta. EC-moottoreilla käyrä on lähes affiniteettisääntöjen mukainen.



Kuva 7.6. Pumpun ottoteho kierrosnopeuden funktiona [32]

Esimerkkitarkasteluun pumppauskustannusten vaikutuksesta voidaan ottaa Lielahden maalämpöjärjestelmän kiertovesipumput, jotka ovat molempien markettien lämpöpumppujärjestelmien kiertovesipumpuista suurimpia sähkönkuluttajia. Höyrystinpuolen pumpun LP01PU01 lämmityskäytön virtaama on 21,5 l/s ja nostokorkeus 30 metriä, joka tarkoittaa noin 9 kW:n sähkötehoa kiertovesipumpulle. Lauhduttimen piirissä lämmityskäytössä pumpun LP01PU02 virtaama on 20,6 l/s, nostokorkeus 18,7 metriä ja sähkönnottoteho hieman vajaa 6 kW. Lisäksi piiriin voidaan vielä laskea varaajan latauspumppu. Pumppujen virtaaman vastuskäyrä pysyy lähes vakiona koko lämmityskauden, joten voidaan olettaa, että sähkönnottoteho on vakio lämmityskaudella. Näistä lähtötiedoista voidaan arvioida maalämpöpumpun vuotuista kannattavuutta:

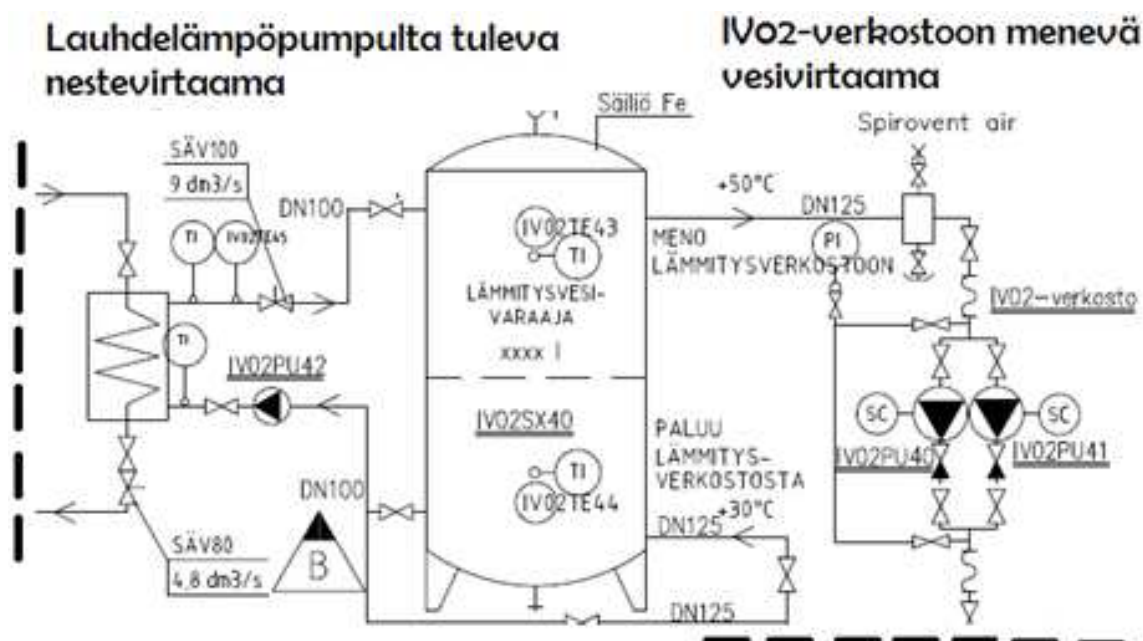
- Lämmityskauden pituus noin 5832 h
- Kiertovesipumppujen sähkönkulutus $16 \text{ kW} \times 5832 \text{ h} = 93,3 \text{ MWh}$
- LP01 lämmitysenergian tuotto noin 270 MWh/vuosi
- LP01 kylmäainekierron lämpökerroin noin 4,70
- Kokonaislämpökerroin 1,79

Kylmäainekierron hyvästä lämpökertoimesta huolimatta jää vuotuinen kokonaislämpökerroin erittäin alhaiseksi suuren pumppauksen energiankulutuksen vuoksi. Tampereen alueella kaukolämmön hinta on hieman Suomen keskitasoa korkeampi, joten lämpöpumpulla tuotettu lämmitysenergia on hieman kannattavampaa kuin kaukoläm-

möllä. Lämpöpumppujärjestelmän investoinnin kannattavuutta tarkasteltaessa täytyy kuitenkin huomioida kaukolämpöä suuremmat investointikustannukset, joten vuotuisissa energiakustannuksissa täytyy olla selkeä ero lämpöpumpun hyväksi, jotta investointia voidaan pitää järkevänä. Lämpöpumppujen kokonaislämpökertoimia saadaan kuitenkin kohennettua säätämällä pumppujen kierrosnopeutta tarvittavan virtaaman perusteella.

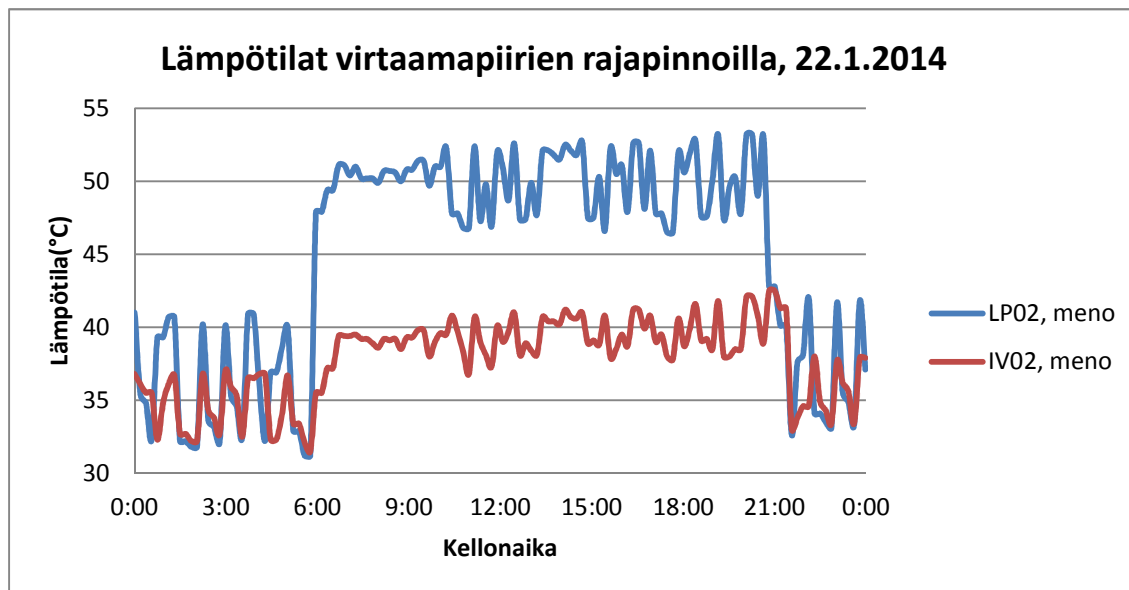
Lämpöpumppujärjestelmän kiertovesipumppujen säädössä huomioitavaa on virtaamien tasapaino lämmönsiirtimien ja varaajien eri puolilla. Epätasapainossa olevat virtaamat aiheuttavat lämpötilaeroja järjestelmien rajapinnoille, jolloin lämpöpumpun lämpökerroin voi alentua merkittävästi.

Lielahdessa lauhdelämpöpumpun LP02 lauhdutinpuolen lämmityskäytön mitoitettu virtaama on lähes puolet pienempi kuin varaajan latauspumpun, jolloin lämpöpumpulta lähtevän ja lämmitysverkostoon menevän liuoksen välille syntyy lämmitystehon kasvassa erittäin suuri lämpötilaero. Kuvassa 7.7 on esitetty lauhdelämpöpumpun kytkentä lämmitysvaraajaan ja IV02 -verkostoon. Kuvan kytkennässä lämpöpumpun LP02 lauhdutinpiirin ja IV02 - verkoston kiertovesipumput ovat kierrosnopeussäätöisiä. Lisäksi IV02 - verkoston pumput pyrkivät pitämään putkiston paine-eron vakiona, jolloin piirissä virtaama voi vaihdella paljon. Varaajan latauspumppu ei ole kierrosnopeus ei ole kierrosnopeussäätöinen, joten ainoa tapa hallita virtaamaa, on säätöventtiilin kuristaminen.



Kuva 7.7. Lauhdelämpöpumpun LP02 kytkentä lämmitysvaraajaan ja IV02-verkostoon

Kuvaajassa 7.8 on esitetty lauhdelämpöpumpulta lähtevän liuoksen ja lämmitysverkkoon IV02 menevän veden lämpötilan ero yhden päivän aikajaksolla 22.1.2014.



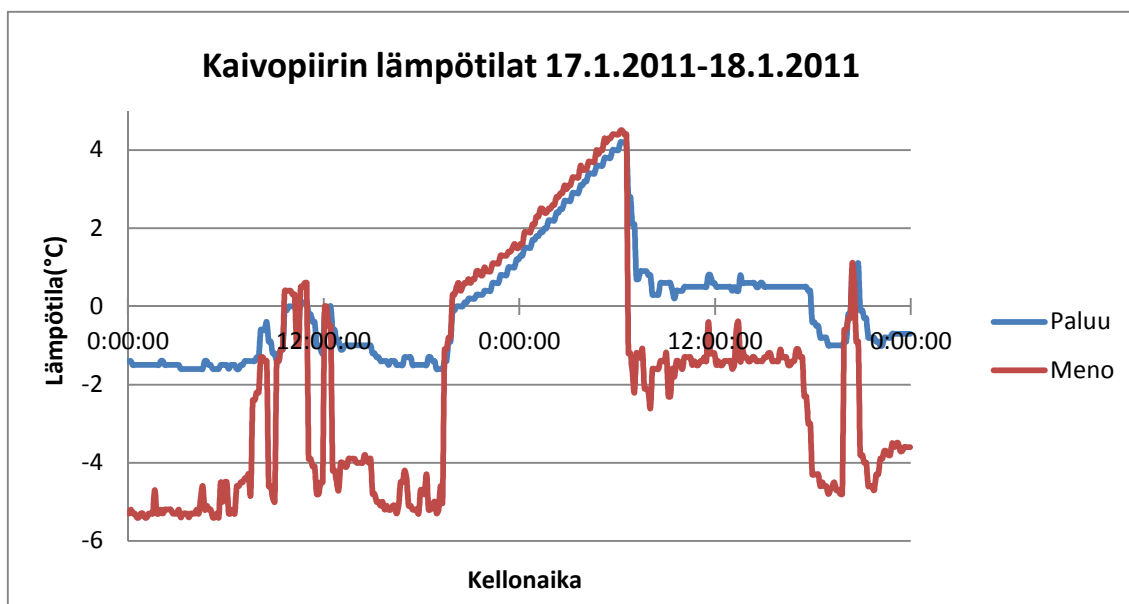
Kuva 7.8 Lauhdelämpöpumpulta LP02 lähtevän liuoksen ja lämmitysverkkoon menevän lämpötilan ero

Esimerkkiajanjaksolla ulkoilman lämpötila oli alhainen ja lämmitystehontarve suuri, jolloin lämpöpumpun koko tehokapasiteetti oli ajoittain käytössä. Kuvaajasta nähdään, että neljän kompressorin käydessä lämpötilaero on yli 10 °C virtaamien rajapinnalla. Lämpötilaeron suuruus muodostuu portaittain käynnissä olevien kompressorien lukumäärän mukaan.

Vaikka Lielahden tapauksessa pienellä virtaamalla säästetään hieman pumppauskustannuksissa, ovat kompressorit pääsääntöisesti hallitseva tekijä sähkönkulutuksessa. Toisekseen suuresta kiertonesteen lämpötilan muutoksesta lämpöpumpun lauhduttimesa voi aiheutua säätötekniisiä ongelmia.

7.1.4 Maalämmön kaivopiiri

Maalämpöpumppujen kaivojen lukumäärät eroavat toisistaan paljon. Lielahdessa on kaivoja 40 kappaletta ja Linnainmaalla 9 kappaletta. Kaivojen syvyys on 200 metriä. Lielahdessa kaivopiirin lämpötila on pysynyt marketin valmistumisesta lähtien noin 8 °C:ssa, joka on kohtuullisen korkea lämpötila. Linnainmaalla marketin avaamisen jälkeen kaivokenttä oli melko viileä kaksi ensimmäistä talvea. Kuvaajassa 7.9 on esitetty talvelta 2011 kaivoihin menevän ja palaavan liuoksen lämpötilat kahdelta vuorokaudelta Linnainmaan Prisman kaivopiiristä.



Kuva 7.9. Linnainmaan kaivopiirin lämpötilat 17.1.2011–18.1.2011

Esimerkkiajanjaksolla kaivolta palaava liuos oli alimmillaan noin $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ eli erittäin kylmää. Kaivokenttä näyttäisi olevan alimitoitettu lämpöpumpun koko tehokapasiteetille, koska kaivoilta palaavan liuoksen lämpötila ei saisi laskea alle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Syksyllä 2011 asennettiin kaivopiirin ylimääräinen lataussiirrin, jolla saadaan lauhdelämpöä tuotua kaivopiiriin. Ratkaisulla saatiin kaivon lämpötila nousemaan ja lämpöpumpun lämpökerroin sekä teho suuremmaksi. Nykyisin kaivopiirin lämpötila on noussut yli lämpötilan $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Täysin ongelmaton lataussiirtimen asentaminen ei ole kuitenkaan ollut. Siirtimen asentamisen vuoksi molemmat lämpöpumput ovat ajoittain pelkän lauhdelämmön varassa, jolloin lämmitystehontarpeen ollessa suurimmillaan voi kylmälaitoksen lauhde-teho olla pienempi kuin lämpöpumppujen höyrystimien tehontarve. Epätasapainon seurauksen lauhdepiirin lämpötila laskee ja lopulta lauhdelämpöpumpun käyntilupa poistuu. Ongelman ydin on lauhteen korkeassa lämpötilassa, jolloin maalämpöpumppu ei saa lämmitystehoa kaivoista, koska höyrystimiltä lähtevä nesteen lämpötila on kaivojen lämpötilaa korkeampi, jolloin lämpöä ei siirry. Ongelma on kuitenkin ratkaistavissa latauspumpun säädöllä. Lauhdepiirin lämpötilan laskeessa on, järkevintä laskea latauspumpun pyörimisnopeutta, jolloin saadaan kaivoa hyödynnettyä kuormitushuippujen aikaan.

Molemmissa marketeissa on ollut tarkoituksena käyttää kaivokenttiä hyödyksi myös vapaajäähdytyksessä. Varsinkin Lielahdessa kaivoja on runsaasti, jolloin teoriassa energiaa jäähdytyskäyttöön olisi hyödynnettävissä runsaasti. Yhdistetty lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä tarvitsee tasapainon lämmityksen ja jäähdytyksen välille. Lielahdessa maalämpöpumpun lämmityksen tarve on erittäin pieni talvella, jolloin kaivokenttä ei jäähdy koko talven aikana. Linnainmaalla lauhteen lataus aiheuttaa vastaavan tilanteen. Koska kaivopiiri ei jäähdy ollenkaan, ei vapaajäähdytystä voida käyttää kummassakaan marketissa.

7.2 Lauhtumislämpötilan optimointi

7.2.1 Järjestelmien kytkennät

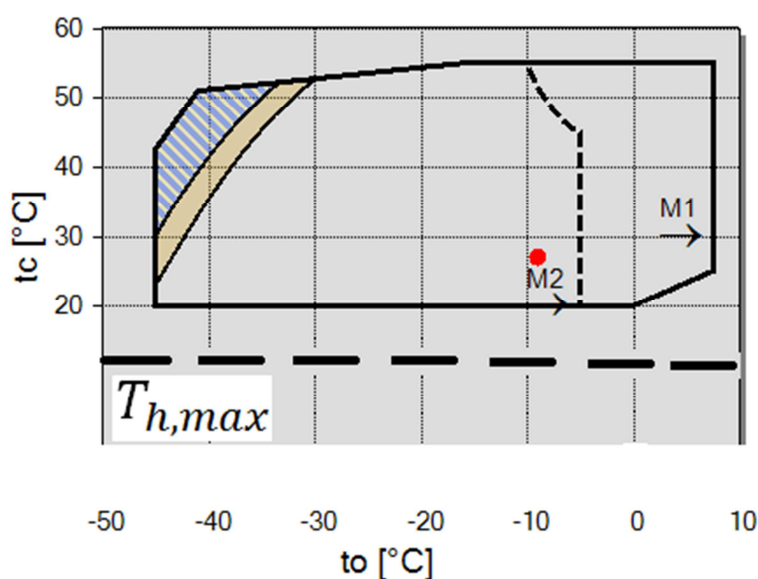
Hypermarketin energiatehokkuuden näkökulmasta kylmälaitoksen lauhdelämmön hyödyntäminen on yksi tärkeimmistä asioista. Kylmätehtarve marketeissa on jatkuva, jolloin lämpöä on saatavilla ympäri vuoden. Suurin ongelma on kuitenkin lauhteen alhainen lämpötilataso. Alhaisen lämpötilatason vuoksi osaan järjestelmistä on yhdistetty lämpöpumppu nostamaan lämpötilatasoa. Suorissa järjestelmissä lauhdelämpö hyödynnetään ilmalämmitykseen, koska esilämmityksessä voidaan hyödyntää myös alhaisempaa lämpötilaa. Jos kylmälaitoksen lauhdajärjestelmässä on tulistussiirtimet, voidaan lämpöä hyödyntää myös lattialämmitykseen, käyttöveden esilämmitykseen ja kylmäkalusteiden alapuhallukseen. Lämpöpumpulla lämpöä voidaan hyödyntää myös hieman korkeamman lämpötilan lämmityspiireihin. Suurimmalla osalla lämpöpumpuista lämpötilan yläraja on noin 55 °C.

Lielahden ja Linnainmaan marketeissa lauhdelämmön talteenottoon hyödynnetään lämpöpumppuja, jotka ovat kytketty ilmalämmityspiireihin. Linnainmaalla on omat lämmityspatterit lauhtepiirille, jolloin tarvitaan lisäksi kaukolämmön jälkilämmityspatterit. Lielahdessa käytetään puolestaan yhdistettyä lämmityspatteria. Lisälämmitys järjestelmässä toteutetaan lämmönsiirtimellä, joka on kytketty lämmityspiirin. Lämmityspatterien kytkennän lisäksi erona järjestelmissä on, että Lielahdessa on lauhtepiirin lisäksi erillinen tulistuspiiri.

Järjestelmien kytkentätavoilla on voi olla energiatehokkuuden kannalta suurikin merkitys. Suorissa järjestelmissä lauhdelämmön kytkentä on tehty pääosin omilla ilmalämmityspattereilla, jolloin voidaan lauhtumislämpötila asettaa halutulle tasolle. Yhdistetyllä lämmityspatterilla menoveden lämpötila joudutaan asettamaan niin ylös, että haluttu tuloilman lämpötila saavutetaan. Tällöin matalalämpöistä lauhdetta ei voida välttämättä hyödyntää ollenkaan tai joudutaan nostamaan kylmälaitoksen lauhtepaineet erittäin korkealle. Epäsuorassa lämmön talteenotossa tilanne on eri, koska lämpöpumpulla päästään myös korkeampiin lämpötiloihin. Yhdistetystä lämmityspatterista voi seurata ongelmia, jos lämmityspatterin mitoitus on todella väljä, jolloin patterin lämpötilatasot nousevat jo korkeilla ulkoilman lämpötiloilla sille tasolle, että lämpöpumppua ei voida täysimääräisesti hyödyntää. Mitoitus- ja käyttöolosuhteiden erojen vuoksi lämmityspatterit ovat yleensä lämmönsiirrollisesti kohtuullisen hyviä. Toinen ongelmallinen tilanne voi seurata, jos lämmityspiirin kytketyt lämmönlvovuttimet toimivat täysin erilaisilla lämpötiloilla, jolloin lämpötilataso on nostettava korkealle tiettyjen lämmönlvovuttimien vuoksi tai jättää nämä kokonaan kaukolämmön varaan.

7.2.2 Lauhdelämmön talteenoton optimointi

Lämpöpumppujärjestelmässä lauhdelämmön talteenoton optimointi voi olla useimmiten lähes mahdotonta, koska eri järjestelmien käyttöalueet rajoittavat mahdollista lämpötilaskaalaa. Lielahdessa ja Linnainmaalla tilanne on optimoinnin kannalta juuri edellä mainitun kaltainen. Kylmälaitoksen alhaisin mahdollinen lauhtumislämpötila on molemmissa marketeissa noin 20 °C ja lämpöpumppujen korkein mahdollinen höyrystyslämpötila noin 15 °C. Kuvassa 7.10 on esitetty katkoviivalla lämpöpumpun korkein mahdollinen höyrystyslämpötila Linnainmaan pluspuolen kompressorien käyttöaluekuvaajassa.



Kuva 7.10. Linnainmaan kylmälaitoksen ja lämpöpumpun käyttöalueet [7,8]

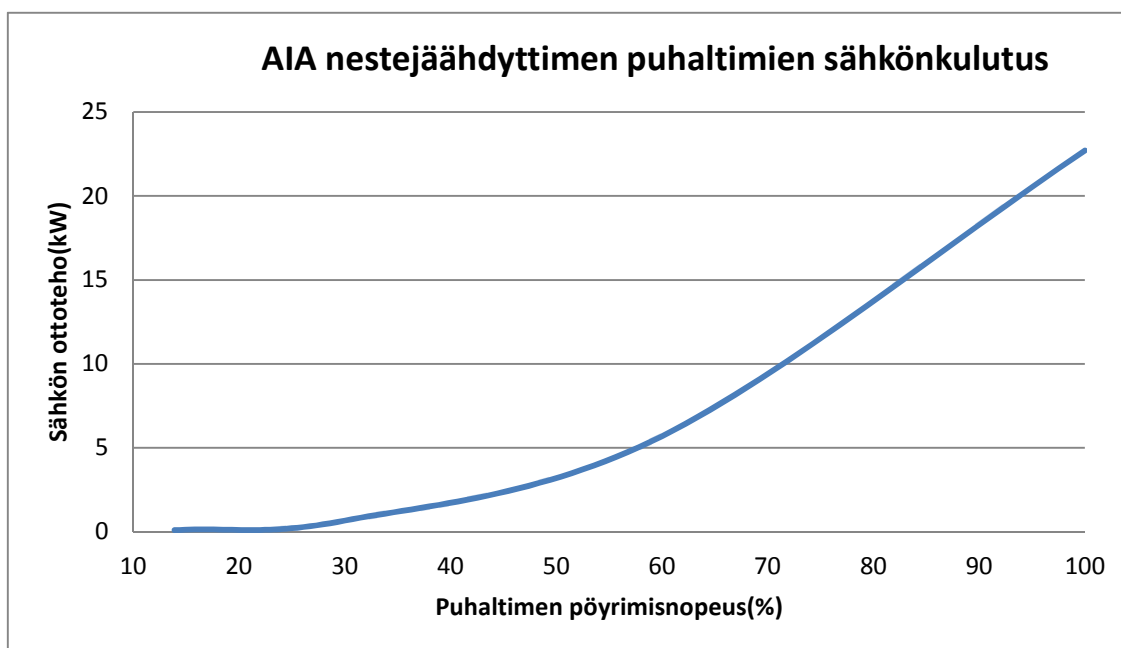
Kun lämpötiloihin huomioidaan varmuuskertoimet ja lämmönsiirtimien asteisuudet, voidaan todeta, että järjestelmien käyttöalueet lukitsevat lämpötilat hyvin vahvasti. Kylmälaitokselta lähtevän liuksen lämpötila vaihtelee hieman kuormituksen mukaan, joten lämpötila on välillä jopa liian korkea lämpöpumpuille, vaikka lauhtumislämpötila on alimmalla mahdollisella tasolla. Liian korkea lämpötila ei kuitenkaan estä lämpöpumpun toimintaa, koska lämpötila voidaan sekoittaa sopivaksi 3-tieventtiin avulla.

Suorassa järjestelmässä lauhtumislämpötilan sallittu vaihteluväli on huomattavasti laajempi, koska lämpötilaa voidaan nostaa kylmälaitoksen lauhdepaine-alueen sallimissa rajoissa. Korkeammalla lämpötilalla saadaan esilämmityspatterin tehoa kasvatettua, mutta samalla kasvaa kylmälaitoksen kompressorien sähkönkulutus. Tilanne mahdollistaa lauhdepaineen optimoinnin, jossa täytyy huomioida lämmityspiirien lämmönsiirroliset ominaisuudet, kylmälaitoksen ominaisuudet, kiinteistön lämmitystehontarve ja energiahinnat. Optimoinnilla voidaan säästää tuhansia euroja vuositasolla, joten merkitys on kokonaisenergiatehokkuuden kannalta myös merkittävä.

7.2.3 Kesäaikainen lauhtumislämpötilan optimointi

Lämmityskauden tapaan voidaan myös kesäaikainen kylmälaitoksen lauhtumislämpötila optimoida käyttökustannusten suhteen. Kesällä optimoinnin parametreina ovat kylmälaitoksen kompressorien sähköteho, nestejäähdyttimien puhaltimien sähkötehot ja lauhtutinpäin pumpun sähköteho. Pumppu kuitenkin suljetaan tässä tarkastelussa pois, koska nykyinen säätötapa aiheuttaa tietyt rajoitteet pumpun säätöalueeseen.

Lielahdessa ja Linnainmaalla lauhtutuspiirin säätö toteutetaan siten, että lauhtutimille palaavan nesteen lämpötila pyritään pitämään asetusarvossaan. Ulkoilman lämpötilan kasvaessa nestejäähdyttimien puhaltimet nostavat ilmamäärää niin kauan, että haluttu lämpötila saavutetaan. Kun ulkoilman lämpötila on riittävän korkea ja puhaltimien pyörimisnopeus suurin mahdollinen, alkaa piirin lämpötila nousta lämmönsiirtoon tarvittavalle tasolle. Säätötavan suurin ongelma on puhaltimien jyrkkä sähkökulutuksen kasvu kierrosnopeuden kasvaessa, jolloin kokonaissähköteho ei ole optimaalinen. Kuvassa 7.11 on esitetty ruotsalaisen nestejäähdytinvälikäsitteittäjä AIA:n X2-sarjan nestejäähdyttimien puhaltimien sähkökulutus pyörimisnopeuden funktiona. Kyseistä nestejäähdytintyyppiä on käytetty Lielahden Prismassa.

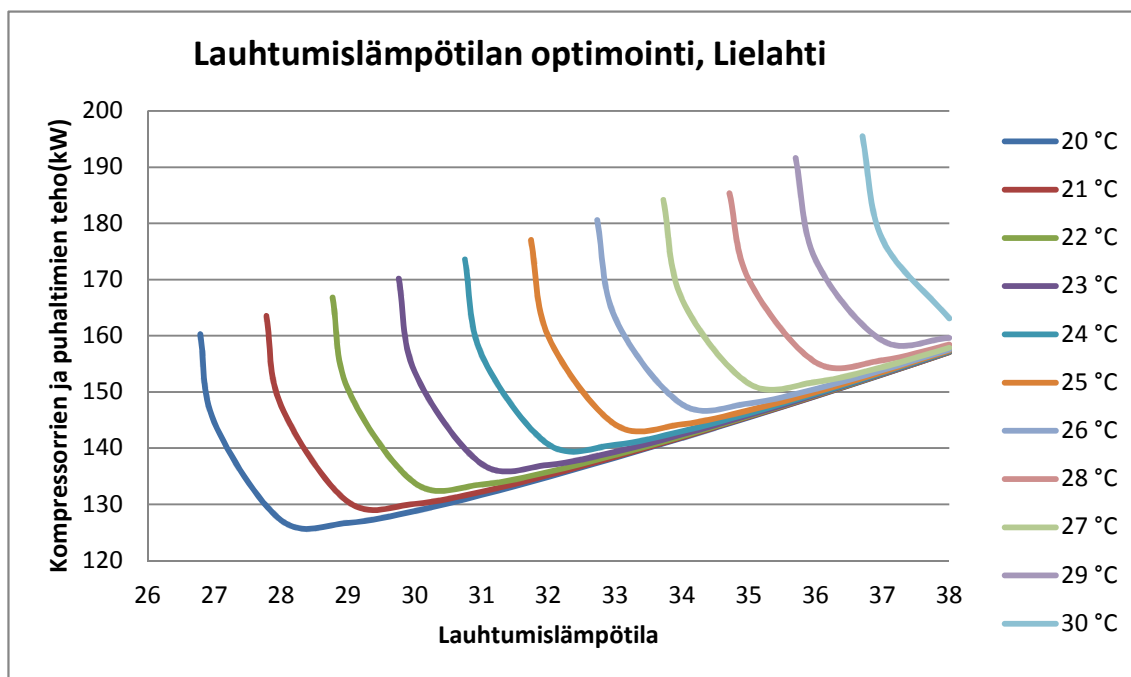


Kuva 7.11. AIA X2-D-100Q1L-25-3E-6B1-V-900-168-LSS-JBS-CE-EC-DBOD puhaltimien sähkökulutus

Tarkastellaan seuraavaksi Lielahden Prismassa kylmälaitoksen kesäaikaista lauhtutusta kokonaissähkökulutuksen näkökulmasta. Kylmälaitoksen komessoreista ja nestejäähdyttimistä on tarjolla kattavat tiedot sähkötehon osalta, jolloin järjestelmän toimintaa voidaan tarkastella laskennallisesti. Nestejäähdyttimien pattereille käytettiin ε-NTU – menetelmää. Lämmönsiirtimen oletettiin toimivan vastavirtaperiaatteella, jolloin

voitiin käyttää kaavaa (2.20). Patterin konduktanssi saatiin valmistajan ilmoittamista tiedoista.

Kylmälaitoksen lauhdutusteho on ollut kesäaikana hieman yli 400 kW, josta osa saadaan myös kesällä hyödynnettyä kylmäkalusteiden alapuhallukseen ja lämpimän käyttöveden esilämmitykseen. Optimointi suoritettiin ulkoilman lämpötiloille 20...29 °C. Kuvaajassa 7.12 on esitetty optimoinnin tulokset. Eriväriset kokonaissähkötehon käyrät edustavat eri ulkoilman lämpötiloja. Värien ja ulkolämpötilojen vastaavuudet on esitetty kuvaajan oikeassa laidassa.



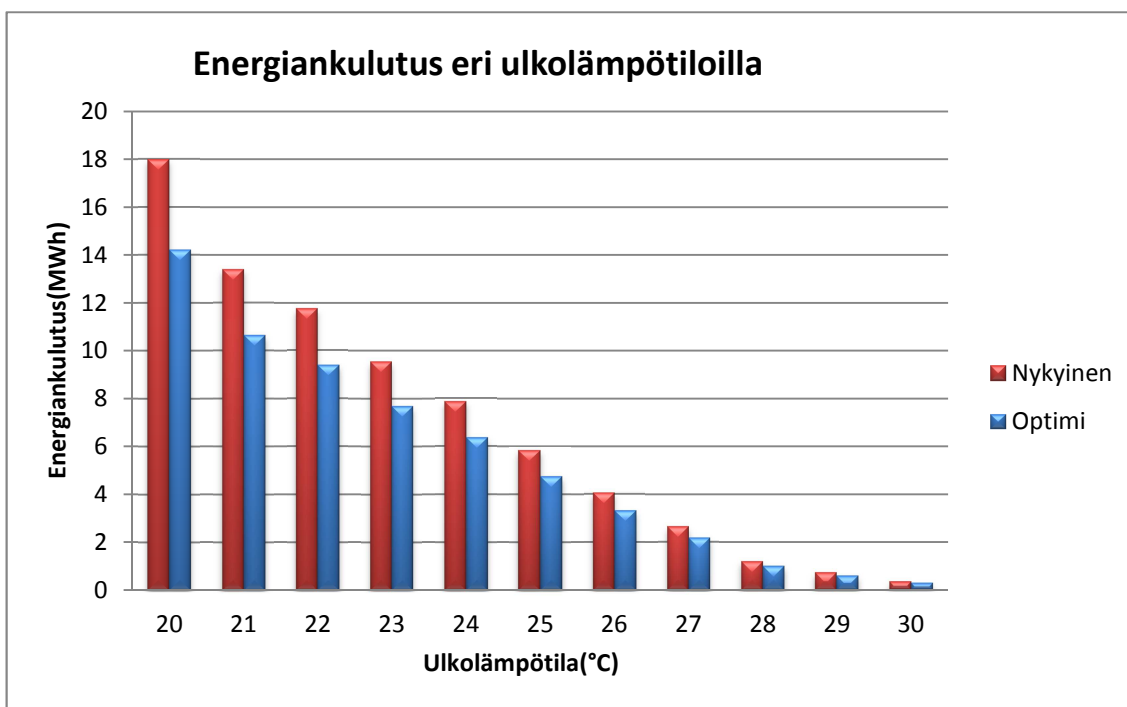
Kuva 7.12. Kesäaikaisen lauh tumislämpötilan optimointi

Kuvaajasta nähdään nestejäähdyttimien EC-moottorien jyrkkä sähkönkulutuksen kasvu suurimmilla pyörimisnopeuksilla. Optimilauhtumislämpötilaa korkeammilla lämpötiloilla alkaa kokonaissähkönkulutus seurata vahvasti kompressorien sähkönkulutusta lauh tumislämpötilan funktiona, koska puhaltimien tehontarve on pieni.

Kokonaissähkötehon erot eri lauh tumislämpötilojen välillä ovat erittäin suuria, joten lauhdutinpiirin kokonaissähkötehoa voidaan alentaa merkittävästi optimoinnilla. Kuvaajan 7.11 optimikäyrä perustuu nestejäähdyttimen valmistajan antamiin tietoihin, mutta marketin todellinen optimikäyrä voidaan luoda myös taloautomaation historiatietojen perusteella, jolloin saadaan nestejäähdyttimien todellinen lämmönsiirtokyky huomioitua.

Tarkastellaan seuraavaksi optimoinnin energiataloudellista merkitystä. Sääolosuhteina käytetään Tampereen alueen lämpötilan pysyvyyden tietoja. Keskimäärin Tampereella on hieman yli 300 tuntia vuodessa yli 20 °C lämpötiloja, jota voidaan pitää erittäin lyhyenä ajanjaksona kokonaisuuden näkökulmasta.

Kuvaajassa 7.13 on nykyisen ja optimoidun kylmälaitoksen lauhtumislämpötilan sähkönkulutus ulkoilman lämpötiloilla 20...30 °C.



Kuva 7.13. Kylmälaitoksen lauhdepiirin sähkönkulutuksen kesäaikainen optimointi

Energiankulutus laskee noin viidenneksen kylmälaitoksen lauhdepiirin sähkönkulutuksen optimoinnilla, mutta kuten kuvaajasta voidaan huomata, ei energiamäärä ole kokonaisuudessaan kovin suuri. Suomen pohjoisen sijainnin vuoksi korkeita ulkolämpötiloja on erittäin vähän, jolloin kylmälaitoksen kompressorien ja nestejäähdyttimien kesäaikaisella kokonaiskulutuksella ei ole suurta merkitystä. Kylmälaitoksen lauhtumislämpötilan säätökäyrä on kuitenkin erittäin helppo lisätä taloautomaatiikkaan, joten siihen suhteutettuna hyöty on suuri. Käytännössä lauhtumislämpötilan säätökäyrä saadaan taloautomaatiikkaan luotua asettamalla lauhduttimille palaavan nesteen lämpötilalle ulkoilman lämpötilaan pohjautuva säätökäyrä.

Linnainmaalla vedenjäähdytyskoneiden lämmönpoisto (lauhdutus) on samoilla nestejäähdyttimillä kuin kylmälaitoksen, mikä hankaloittaa optimointia, koska lauhdutusteho vaihtelee runsaasti. Muutostöiden seurauksena Linnainmaalla on nykyisin mahdollisuus hyödyntää maalämmön kaivoja lauhdutukseen. Lämpöä voidaan ladata maahan silloin kuin vedenjäähdytyskone 152 ei ole käynnissä. Kaivokenttää ei ole aikaisemmin hyödynnetty, mutta se kannatta ehdottomasti ottaa käyttöön tulevaisuudessa.

Kesäaikainen lauhtumislämpötilan optimointi voidaan suorittaa samaan tapaan myös markettien vedenjäähdytyskoneille.

7.3 Ilmalämmitys

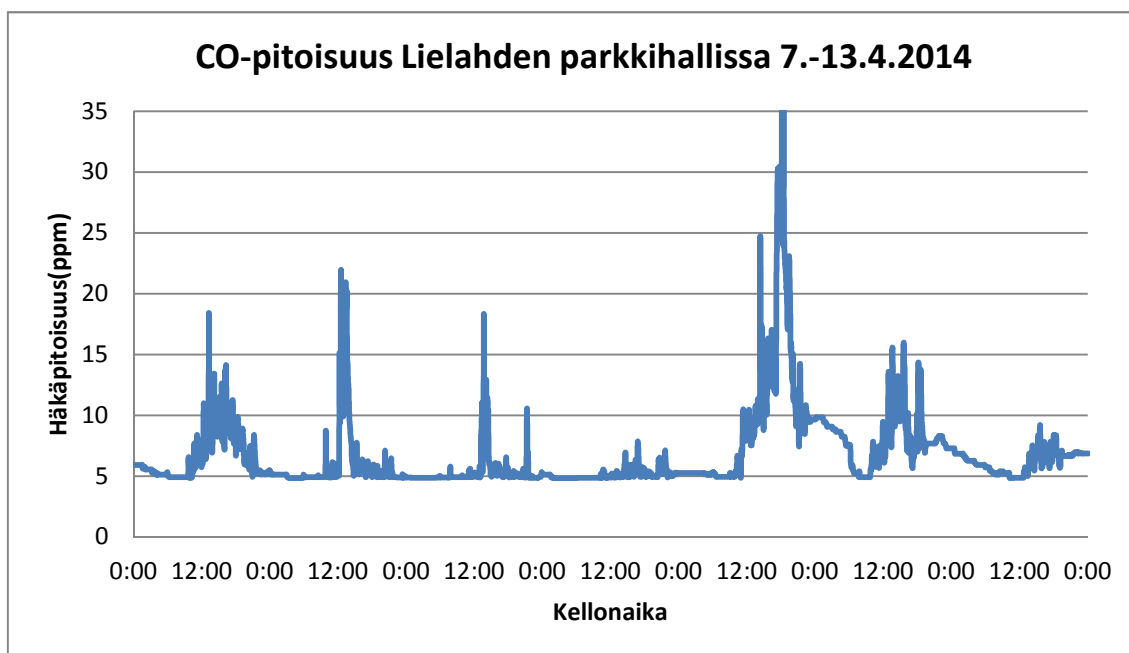
7.3.1 Aikaohjelmat

Ilmanvaihtokoneiden aikaohjelmat ovat yksi helpoimpia energiatehokkuuden kohentamisen menetelmistä. Oikein mitoitettujen aikaohjelmien hyöty on myös todella suuri ohjaamattomaan järjestelmään verrattuna. Yksinkertaisin tapa on tehdä aikaohjelmat markettien käyttöajan mukaan. Hypermarkettien aukioloajat ovat arkisin 08-21, lauantaisin 08-18 ja sunnuntaisin 12-18 eli viikoittainen aukioloaste on noin 48 %. Ensimmäiset työntekijät tulevat markettiin muutamaa tuntia ennen aukeamista ja viimeiset työntekijät lähtevät noin 1-2 tuntia sulkeutumisajan jälkeen, joten aukioloaikoja hieman venyttämällä aamusta ja illasta saadaan ilmanvaihtokoneille sopivat käyntiajat.

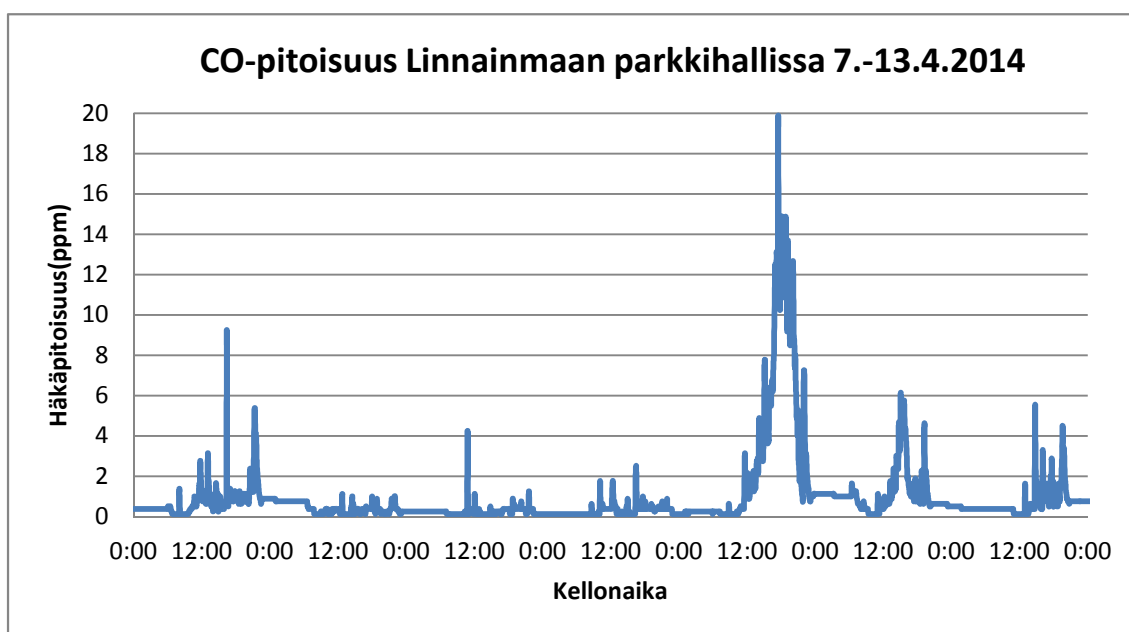
Ilmalämmitteisissä tiloissa aikaohjelmien käytössä täytyy huomioida mahdollisuus sisäilman liialliseen laskuun yöaikaan. Sisätilan lämpötilan lasku estetään yölämmitystoiminnolla. Yölämmitystoiminto saa käyntiluvan, kun sisäilman lämpötila laskee alle asetetun raja-arvon. Yölämmityksessä tilaa lämmitetään suurimmalla mahdollisella ilmamäärällä ja tuloilman lämpötilalla. Lämmitys lopetetaan, kun ilman lämpötila saavuttaa asetetun ylärajan. Suurissa kiinteistöissä lämpötilan vaihtelut ovat kuitenkin hitaita, joten yölämmitystoimintoa ei juuri Lielahdessa eikä Linnainmaalla tarvita. Lämmitysenergian säästö aikaohjelmilla on lähes lineaarista, joten säästö on suoraan verrannollinen IV-koneen käyttöasteeseen. Koska ulkoilman vuorokautinen lämpötilaprofiili on sinimuotoinen suurimman osan vuodesta, on suhteellinen säästö jopa suurempi kuin suhteellinen käyttöasteen aleneminen.

7.3.2 Parkkihallin tuloilman lämmitys

Samaa tilaa palvelevat ilmanvaihtokoneet muodostavat aikaohjelmiin poikkeuksen, koska kaikkia koneita ei välttämättä tarvitse käyttää aina samaan aikaan. Markettien energia-analyyseissä kävi ilmi, että parkkihallin tuloilman lämmitys on suuri kaukolämmön kuluttaja. Lielahdessa parkkihallissa on neljä samanlaista konetta ja Linnainmaalla kaksi. Kulutus on ollut erityisen suurta varsinkin Lielahdessa, jossa on hieman suurempi parkkihalli, suuremmat ilmamäärät ja korkeampi tuloilman lämpötila. Molemmissa marketeissa tuloilman lämpötila pidetään vakiona ja ilmamäärän suuruutta säädetään hiilimonoksidin perusteella. Parkkihallien käyttöprofiili on erittäin vaihteleva. Käyttöprofiilin vaihtelevuutta voidaan hyödyntää parkkihallien aikaohjelmissa ja ilmamääräisissä. Kuvaajissa 7.14 ja 7.15 on parkkihallien hiilimonoksidipitoisuudet viikon ajanjaksoilta.



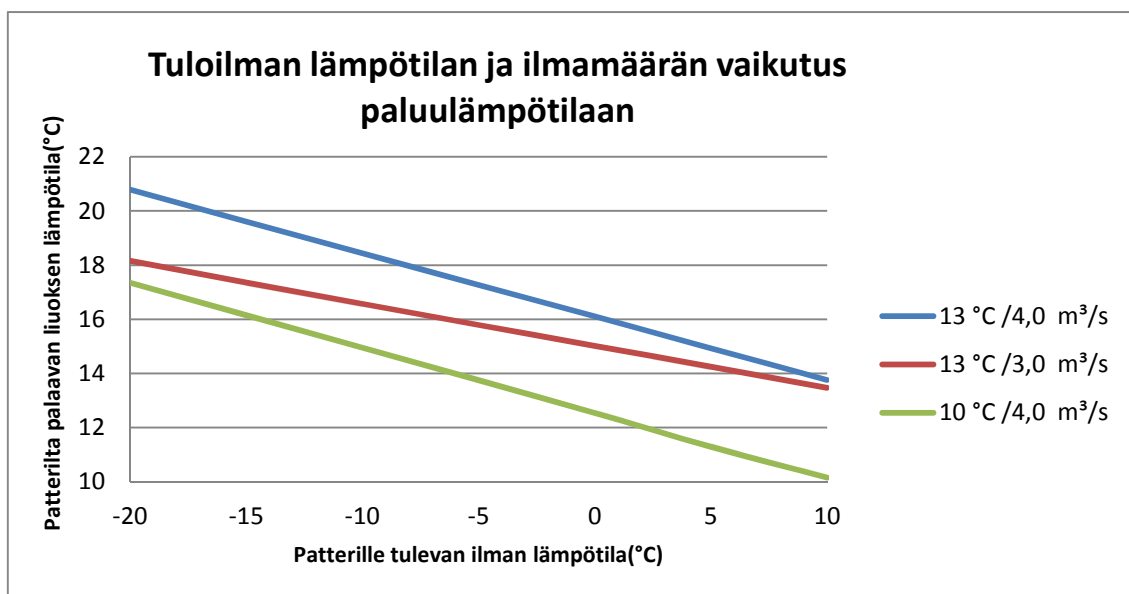
Kuva 7.14. CO-pitoisuus Lielahden parkkihallissa 7.-13.4.2014



Kuva 7.15. CO-pitoisuus Linnainmaan parkkihallissa 7.-13.4.2014

CO-pitoisuuksien vaihtelu eri viikkojen välillä on kohtuullisen vähäistä. Kuten Lielahden ja Linnainmaan viikkoprofiilista nähdään, on perjantaisin suurin parkkihallin täyttöaste. Perjantain jälkeen seuraavaksi kuormitetuin päivä on lauantai, vaikka esimerkiksi viikolla häkäpitoisuudet ovat olleetkin kohtuullisen maltillisia. Kuvaajista nähdään myös vuorokautinen profiili. Vuorokautinen profiili korreloi vahvasti kaupan asiakasmäärien kanssa. Arkisin kello 8 -12 on parkkihallin käyttöaste erittäin pieni. Suurin käyttöaste on puolestaan noin kello 16–19. Viikonloppuisin ei ole yhtä suurta vaihtelua, vaan käyttö on tasaisempaa.

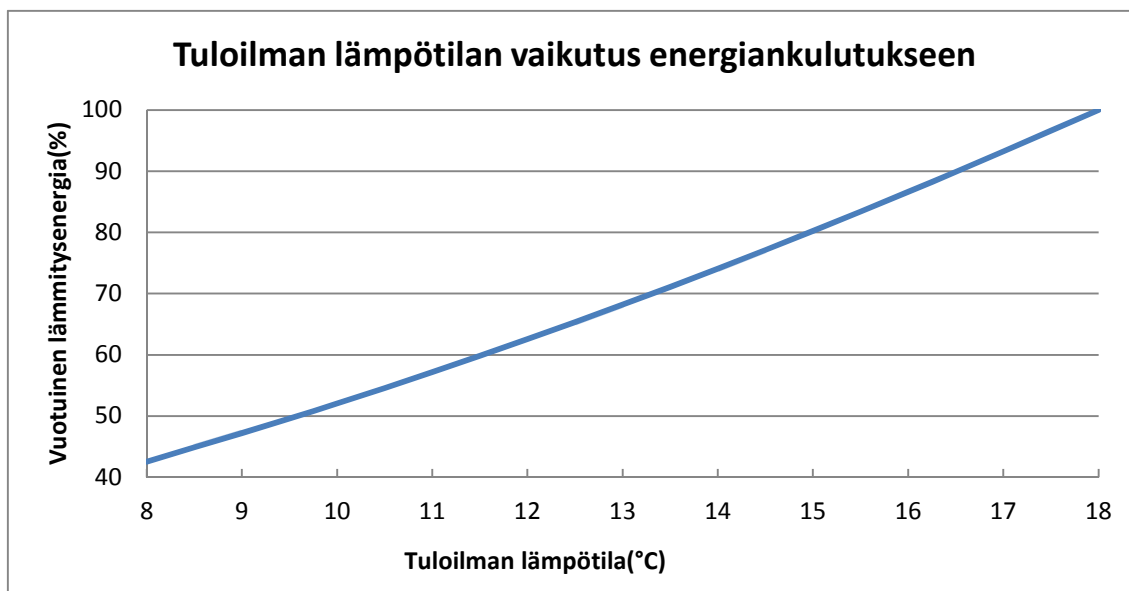
IV-koneiden optimaalisten käyntiaikojen iterointi on suhteellisen helppoa. Käyntiaikojen lisäksi parkkihallin tuloilmakoneiden energiankulutukseen voidaan vaikuttaa tuloilman lämpötilan ja tuloilmavirran suuruudella. Näiden kahden tekijän suhteen muutosten tekeminen ei ole kuitenkaan aivan niin yksinkertaista kuin käyntiaikojen tapauksessa. Parkkihallien ilmanvaihdon vaatimukset ovat korkeita, jolloin tuloilmakoneiden patterit ovat konduktanssiltaan suuria käyttöolosuhteisiin nähden. Patterin suuri konduktanssi tarkoittaa pientä lämpötilaeroa vesi- ja ilmapuolen välille, jolloin ilmanvaihtopatterin jäätymissuojan kanssa saattaa tulla ongelmia. Ilmanvaihtopatterin jäätymissuojan minimiarvona LVI-alalla on yleensä 8 °C , joka tarkoittaa patterilta palaavan veden lämpötilaa. Patterin jäätymissuojaa ennen on yleensä vielä patterin lämmityksen asetusarvo, jota voidaan pitää ensimmäisen portaan jäätymissuojana. Lämmityksen asetusarvo on sovelluksesta riippuen hieman korkeampi kuin jäätymissuojan asetusarvo. Lielahdessa lähtötilanteessa tuloilman lämpötila oli asetettu arvoon 13 °C ja ilmamäärä noin $4,7\text{ m}^3/\text{s}$. Ilmamäärää saatiin laskettua noin arvoon $4,0\text{ m}^3/\text{s}$. Muutoksen jälkeen oltiin tuloilman lämpötilan ja ilmamäärän suhteen ääriarajoilla, koska paluuvesi laski jo suhteellisen lähelle lämmityksen asetusarvoa, joka on $11,0\text{ °C}$. Kuvaajassa 7.16 on esitetty Lielahden Prisman parkkihallin ilmanvaihtokoneiden lämmityspatterien paluuveden lämpötilan muutos eri ilmamäärillä ja tuloilman lämpötiloilla.



Kuva 7.16. Tuloilman lämpötilan ja ilmamäärän vaikutus paluulämpötilaan

Kuvaajasta nähdään, että stationääritilassa ongelmia ei tule. Paluuveden lämpötilaa ei kuitenkaan saada pidettyä koko ajan tasaisena, joten mitä suurempi ero on paluuveden lämpötilan ja asetusarvon välillä sitä pienempi riski on lämpötilan huojuntaan. Suurin riskitilanne ilmenee usein tuloilmakoneen käynnistyshetkellä, jolloin lämmityshontarve muuttuu äkillisesti. Samankaltaisen tilanteen aiheuttaa ilmamäärän äkillinen kasvu häikäpitoisuuksien vuoksi. Parkkihallin tuloilmakoneissa ongelmaa lisäävät mitoitus tilanteen ja käyttöolosuhteiden eroavaisuudet, jonka vuoksi venttiilien mitoitus ja menovesikäyrän asetus eivät ole sopivia käyttötilanteeseen.

Linnainmaalla vaihdettiin parkkihallin lämmityspattereihin liuokseksi vesi-glykoliseos veden tilalle. Muutoksen myötä jäätämssuojan asetusarvoja voitiin laskea, jolloin myös tuloilman lämpötila saatiin asetettua alemmas. Tuloilman lämpötilan asetusarvo laskettiin 13 °C:sta ja 10 °C:en. Toimenpiteellä saatiin tuloilman lämmitysenergiankulutusta alennettua melkein 24 %. Kuvaajassa 7.17 nähdään tuloilman lämpötilan vaikutus energiankulutukseen.



Kuva 7.17. Tuloilman lämpötilan vaikutus energiankulutukseen

Energiankulutuksen käyrä ei ole täysin lineaarinen, koska lämmityskauden alkaminen riippuu tuloilman asetusarvosta.

Parkkihallien tuloilmana voidaan käyttää marketin muiden tilojen jäteilmaa. Jäteilman hyödyntämisellä voidaan energiakustannuksista säästää suuri osa riippuen hyödynnettävän ilman määrästä. Jäteilman hyödyntäminen koskee uudiskohteita, koska olemassa oleviin kohteisiin muutostöiden investointikustannukset nousevat korkeaksi. [26, s. 32]

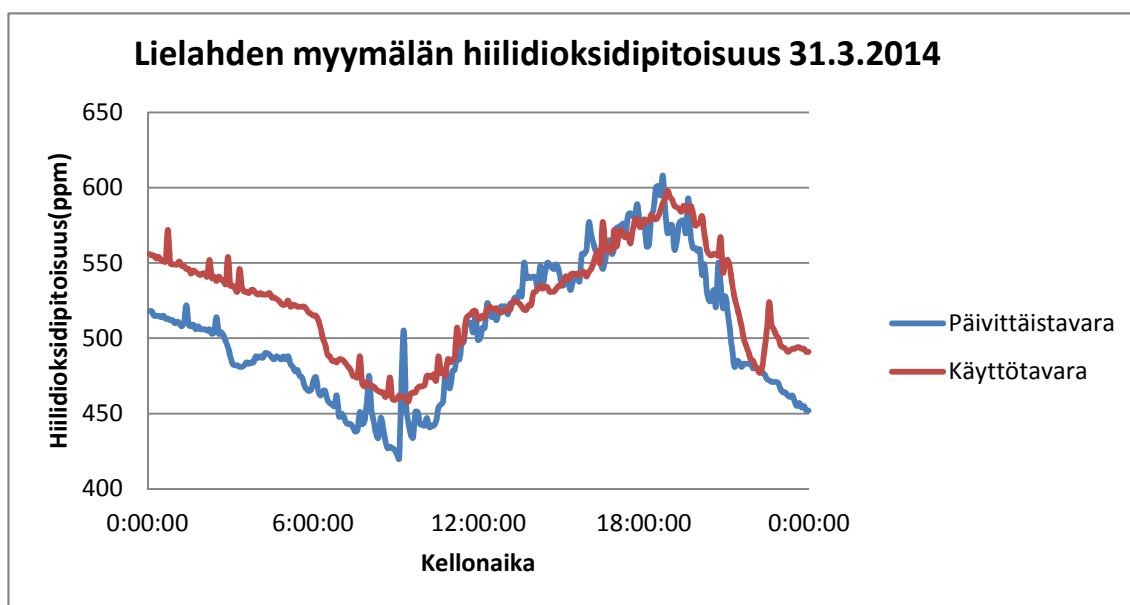
7.3.3 Kiertoilman hyödyntäminen

Tuloilman lämpötilaa ohjataan useimmiten joko huonelämpötilan tai poistoilman lämpötilan perusteella. Säädetävällä saadaan pidettyä tilan energiatase sellaisena, että haluttu lämpötila pysyy tilassa. Tuloilman lämpötilan lisäksi ilmavirran määrää säädetään tilan energiataseen perusteella.

Tiloissa, joissa poistoilma on hyvälaatuista hiilidioksidin ja hajuhaittojen osalta, voidaan hyödyntää myös kiertoilmaa. Kiertoilmaa hyödyntämällä voidaan saada suuret

säästöt niin lämmitys- kuin jäähdytyskäytössäkin. Kiertoilman ja raitisilman osuuksia säädetään ilman hiilidioksidipitoisuuden mukaan.

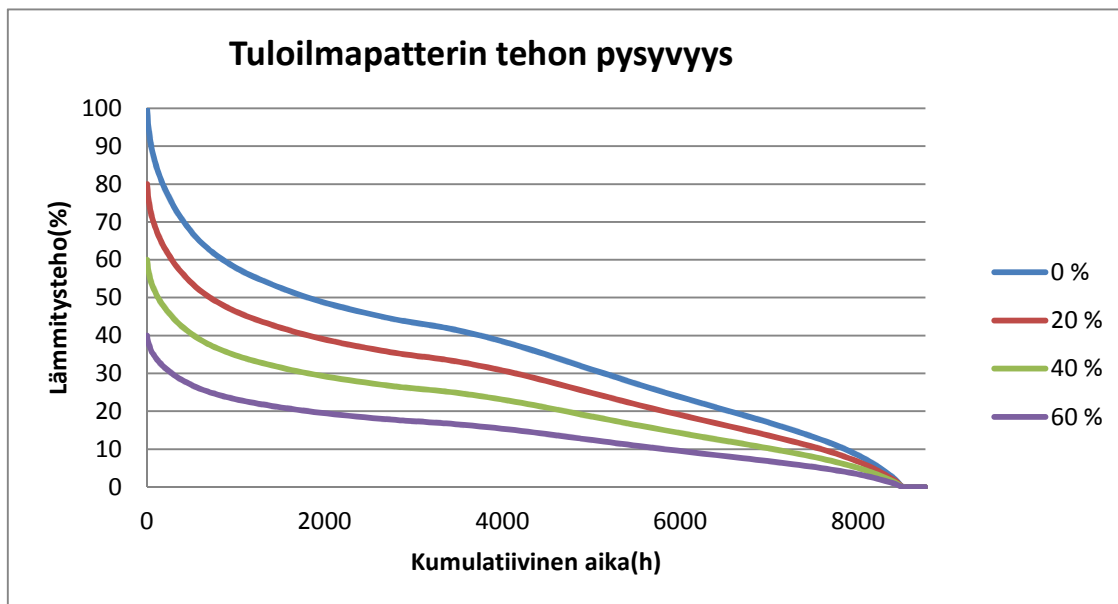
Lielahdessa myymälän tuloilmakoneita TK02 ja TK03 sekä Linnainmaalla tuloilmakoneita TK301-303 säädetään hiilidioksidipitoisuuksien perusteella. Erotuksena markettien välillä ovat hiilidioksidipitoisuuden mittausspaikat, jotka ovat Lielahdessa myymälätilassa ja Linnainmaalla poistoilmakanavassa. Oleskeluvyöhykkeeltä saatu informaatio on säädön kannalta parempi ratkaisu, koska pitoisuudet voivat olla marketin yläosissa aivan eriluokkaa kuin oleskelualueella. Sama koskee sisälämpötilan hallintaa. Linnainmaan mittaustavan vuoksi oleskeluvyöhykkeen hiilidioksidipitoisuuksia on hankala arvioida, vaikka poistoilman pitoisuudet korreloivat vahvasti oleskeluvyöhykkeen pitoisuuksien kanssa. Lielahdessa sekä käyttötavaran että päivittäistavaran osastoilla ilmanlaatu on pysynyt erinomaisena koko mittaushistorian ajan. Lielahdessa raitisilman osuutta nostetaan lineaarisesti hiilidioksidipitoisuuden noustessa yli 600 ppm:n. Raitisilman minimiosuus on ollut noin 50 %. Kuvaajassa 7.18 on Lielahden myymälän hiilidioksidipitoisuuksien vuorokautinen profiili 31.3.2014.



Kuva 7.18. Hiilidioksidipitoisuuden vuorokautinen profiili

Lielahdessa hiilidioksidipitoisuuden profiili on sinikäyrän muotoinen. Yöllä pitoisuudet laskevat lähes ulkoilman tasolle eli noin 400 ppm ja päivisin nousevat tasolle 550–650 ppm. Lielahden päämyymälän ilmanlaatu kuuluu sisäilmaluokkaan S1, joka on paras mahdollinen luokka. Sisäilmaluokan S1 raja-arvo on 700 ppm [33]. Linnainmaalla hiilidioksidipitoisuuden vuorokautinen käyttäytyminen on hyvin samanlaista. Koska Linnainmaan pitoisuusmittaukset ovat poistoilmasta, ei oleskeluvyöhykkeen sisäilman laadusta voida tehdä yhtä hyviä johtopäätöksiä kuin Lielahdessa. Pääosin pitoisuudet poistoilmassa ovat noin 150 ppm korkeampia kuin Lielahden oleskeluvyöhykkeellä.

Tuloilman lämmitysenergiankulutusta voidaan kiertoilmalla vähentää merkittävästi. Kuvaajassa 7.19 on esitetty tuloilman lämmitystehon pysyvyys erilaisilla kiertoilman osuuksilla.



Kuva 7.19. Tuloilmapatterin tehon pysyvyys erilaisilla kiertoilmaosuuksilla

Kuvaajasta voidaan nähdä, että kiertoilman osuus tuloilmasta on kääntäen verrannollinen tarvittavaan lämmitystehoon. Näin ollen tuloilman vuotuinen lämmitysenergia on kääntäen verrannollinen kiertoilman osuuteen.

Kiertoilman hyödyntäminen vaatii puhdasta ja hajutonta ilmaa. Näissä olosuhteissa voidaan hyödyntää myös pyörivää lämmönsiirintä, joissa on pääsääntöisesti erittäin hyvä lämpötilasuhde. Lisäksi myymälän ilma on erittäin kuivaa, jolloin sulatusjaksot ovat erittäin harvinaisia. Näiden tekijöiden seurauksena saadaan patterille tuleva ilma pidettyä suhteellisen lämpöisenä ilman kiertoilman hyödyntämistäkin. Lielahdessa on myymälän tuloilmakoneiden lämmityskauden aikainen keskimääräinen ilmavirta noin 8 m³/s tuloilmakoneetta kohden. Linnainmaalla yksi tuloilmakoneista on Kryotherm – järjestelmän mukainen eli siinä ei ole lämmön talteenottoa lainkaan. Kaksi muuta konetta ovat vastaavia kuin Lielahdessa. Yhteensä tuloilmavirta lämmityskaudella on noin 15 m³/s, josta kolmannes on tuloilmakoneesta TK301. Molemmissa marketeissa ilmanvaihtokoneiden lämmön talteenoton lämpötilahyötysuhde on yli 70 % kaikissa koneissa, joissa on pyörivä LTO -lämmönsiirrin. Lielahdessa ilmamäärät ovat myymälässä suuria, mutta kiertoilmalla saavutettu hyöty ei ole silti valtava. Lämpötilan pysyvyyskäyrällä tarkasteltuna vuotuinen kokonaisenergiamäärä ilman kiertoilman hyödyntämistä on käyttötavaraosaston tuloilmakoneen TK03 osalta noin 28 MWh ja päivittäistavaraosaston tuloilmakoneen TK02 osalta noin 140 MWh. Kiertoilmalla voidaan tästä säästää hiilidioksidipitoisuuksien sallima määrä eli noin 30–50 %. Linnainmaalla tilanne on eri, koska Kryotherm – järjestelmässä ei ole lainkaan lämmön talteenottoa. IV-koneessa on

myös erittäin suuri ilmamäärä, jolloin suurella raitisilman osuudella vuotuiset energia-kustannukset ovat suuret.

Kiertoilmaa kannatta hyödyntää myös kesäaikaan, jolloin voidaan marketin jäähdytyksen latenttia ja tuntuvaa kuormaa vähentää. Käyttötavarapuolella kosteus kuormittaa kylmäkalusteita, jolloin kylmäkalusteiden kuivattamaa ilmaa kannatta hyödyntää kierättämällä myymälän hiilidioksidipitoisuuksien mukaan.

7.3.4 Kiertovesipumppujen säätötapa

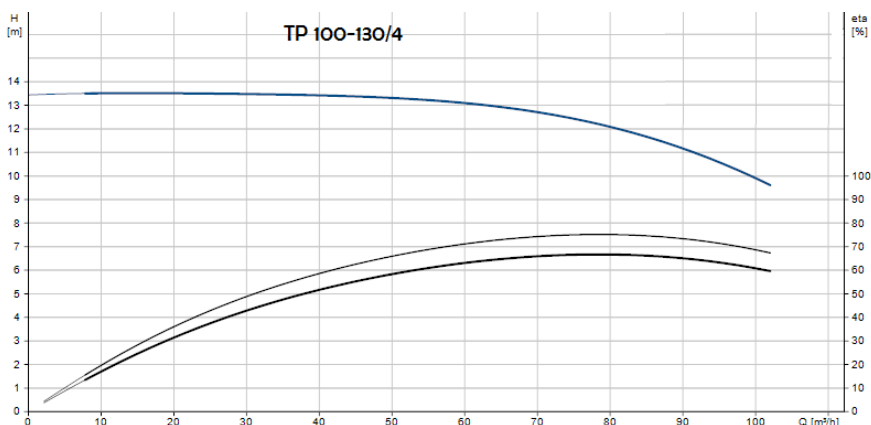
Ilmalämmitysverkostoissa nestekierron virtaamat vaihtelevat runsaasti, jolloin pumpun säätötapana on joko pumpun vakiopaine-ero tai putkiston vakiopaine-ero.

Linnainmaalla pumput ovat säädetty pitämään pumpun vakiopaine-eroa. Lielahdessa on puolestaan kaikki ilmalämmitysverkostojen pumput pitävät vakiopaine-eroa putkistossa. Paine-ero säädöllä on monia hyviä puolia energian säästön lisäksi, mutta keskitytään tässä tapauksessa pelkästään pumppujen sähkönkulutukseen. Analysoitaessa pumppujen toimintaa on saatavilla yleensä saatavilla pumppujen taajuusohjeet, jolloin affiniteettisääntöjen perustella olettaa taajuusohjeen ja pumpun pyörimisnopeuden välille seuraava korrelaatio (7.1).

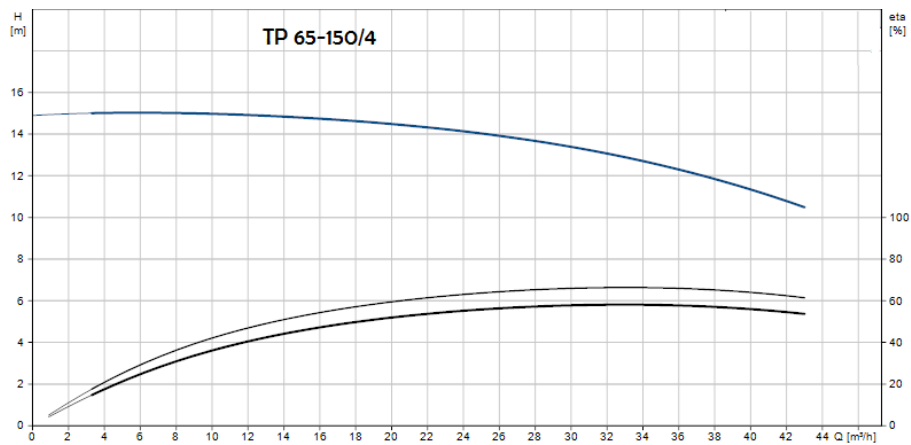
$$\frac{n}{n_{max}} = \frac{f}{f_{max}} \quad (7.1)$$

missä f_{max} on pumpun taajuusohje ja n_{max} pyörimisnopeus mitoituspisteessä

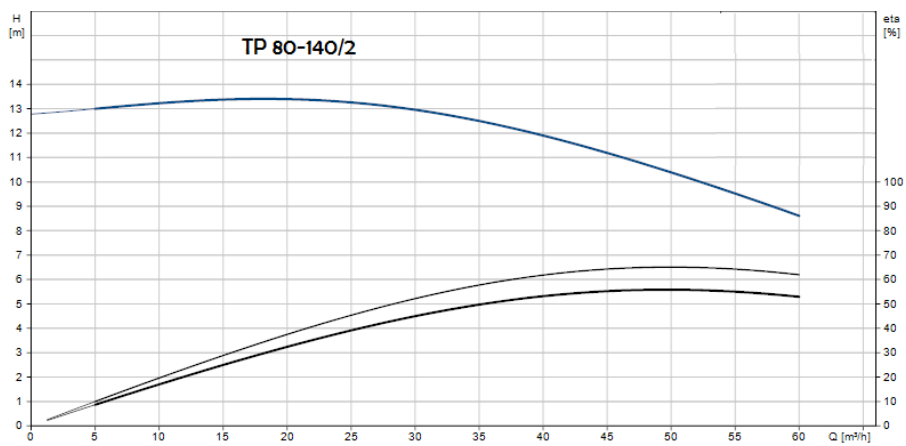
Lielahden taloautomaation historiatietoihin tallentuu pumppujen pyörimisnopeudet, joiden avulla voidaan arvioida säätötavan hyödyllisyyttä. Ilmanvaihtoverkostojen 01-03 pumppujen tuottokäyrät ovat esitetty kuvissa 7.20–7.22. Kuvaajissa on esillä myös hyötysuhteet. Ylin käyrä kuvaajissa on pumpun tuottokäyrä. Keskimääräinen käyrä on pumpun hyötysuhde ja alimmainen pumpun sekä moottorin kokonaishyötysuhde.



Kuva 7.20. IV01-verkoston pumpun tuottokäyrä (nostokorkeus), pumpun hyötysuhde ja kokonaishyötysuhde [32]

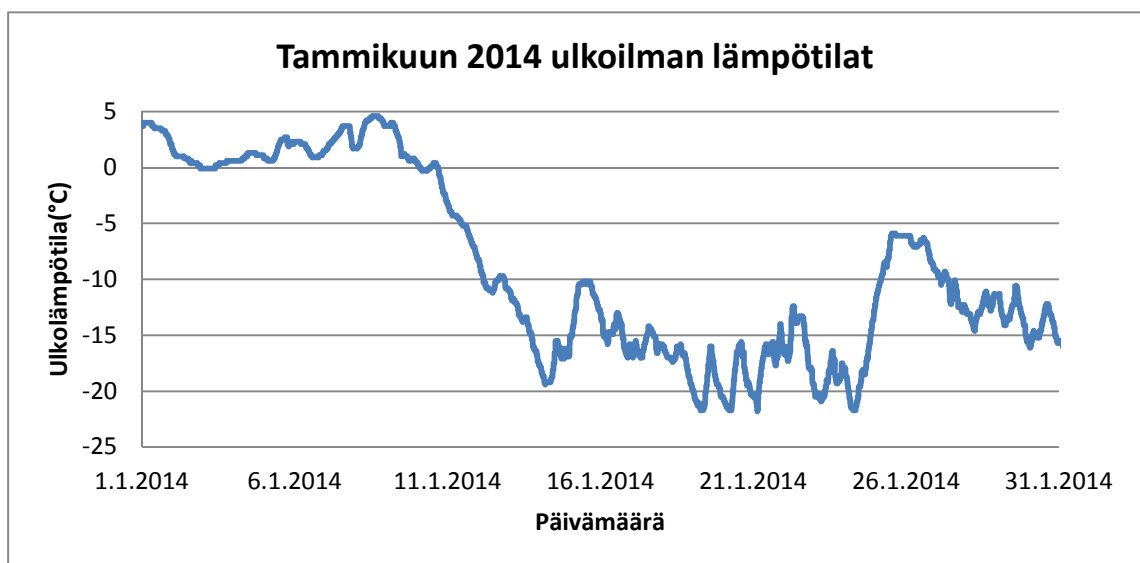


Kuva 7.21. IV02-verkoston pumpun tuottokäyrä (nostokorkeus), pumpun hyötysuhde ja kokonaishyötysuhde [32]



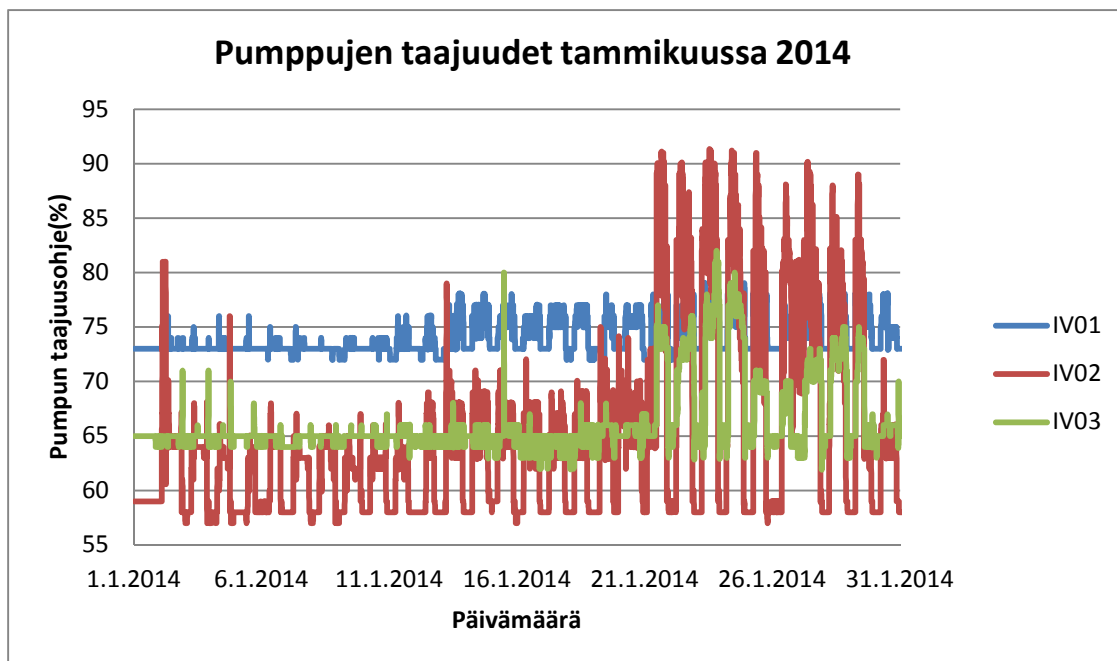
Kuva 7.22. IV03-verkoston pumpun tuottokäyrä (nostokorkeus), pumpun hyötysuhde ja kokonaishyötysuhde [32]

Tammikuussa 2014 alkukuukausi oli lämmin, mutta kuukauden keskivaiheilla lämpötila laski jyrkästi. Koska ajanjaksolla oli eri ääripäiden olosuhteita, soveltuu se hyvin pumpun säätötavan tarkasteluun. Ulkoilman lämpötila ajanjaksolla on esitetty kuvaajassa 7.23.



Kuva 7.23. Ulkoilman lämpötilat tammikuussa 2014

Tarkasteluun otettiin Lielahden Prisman kolmen pumpun taajuustiedot. Kuvaajassa 7.23 on esitetty kolmen eri pumpun taajuudet tammikuun ajalta.



Kuva 7.24. Pumppujen taajuudet

Vähiten pumpun kierrosnopeus vaihtelee ilmanvaihtoverkoston 01 pumpussa. Edes pitkä pakkasjakso ei muuttanut juurikaan pumpun taajuutta. Syynä vähäisiin muutoksiin on pumpun todellinen toimintapiste sekä tuottokäyrä. Verkoston virtaama on huomattavasti alhaisempi kuin mitoitusilanteessa, jolloin lämmönsiirtimen painehäviö on erittäin pieni. Lisäksi tuottokäyrä on lähes vaakasuora alhaisimmilla virtaaman arvoilla. Seurauksena on, että vastuskäyrän muuttuessa pumpun toimintapiste liukuu vaakasuoraa tuottokäyrää pitkin.

Ilmanvaihtoverkostoissa 02 ja 03 kierrosnopeuden vaihtelut ovat olleet huomattavasti suurempia. Varsinkin verkostossa 02 on selkeä ero jopa vuorokautisessa käytössä. Yöllä ilmanvaihtokoneiden venttiilien ollessa kiinni pumpun kierrosnopeus pienenee, kun virtausvastus verkostossa kasvaa.

Vakiopaine-ero putkistossa toimii, jos verkoston käytönaikainen toimintapiste on lähellä mitoitusilanteen toimintapistettä, koska silloin lämmönsiirtimien ja muiden vastusten painehäviöt ovat suhteellisesti merkittäviä. Energiatarkastelua ei taloautomaatiikan avulla voitu tehdä, joten energiamääräinen hyöty jää tarkastelematta.

Nykyisin lähes kaikissa pumppumalleissa on mahdollista valita säätötapa. Paine-ero putkistossa säätötapa voidaan toteuttaa myös ilman erillistä paine-eron mittausta. Tällöin pumppuun asetetaan nostokorkeudelle suora, jota pumppu seuraa verkoston virtausvastuksen mukaan. Yleensä suora kulkee mitoitusilanteen nostokorkeuden ja sen puolikkaan välillä. Jos lämmönsiirtimen mitoitusilanteen painehäviön suuruus on lähellä suoran aloitus ja lopetus nostokorkeuden välistä erotusta, toimii säätö lähes samalla tavalla kuin erillisellä paine-eromittauksella.

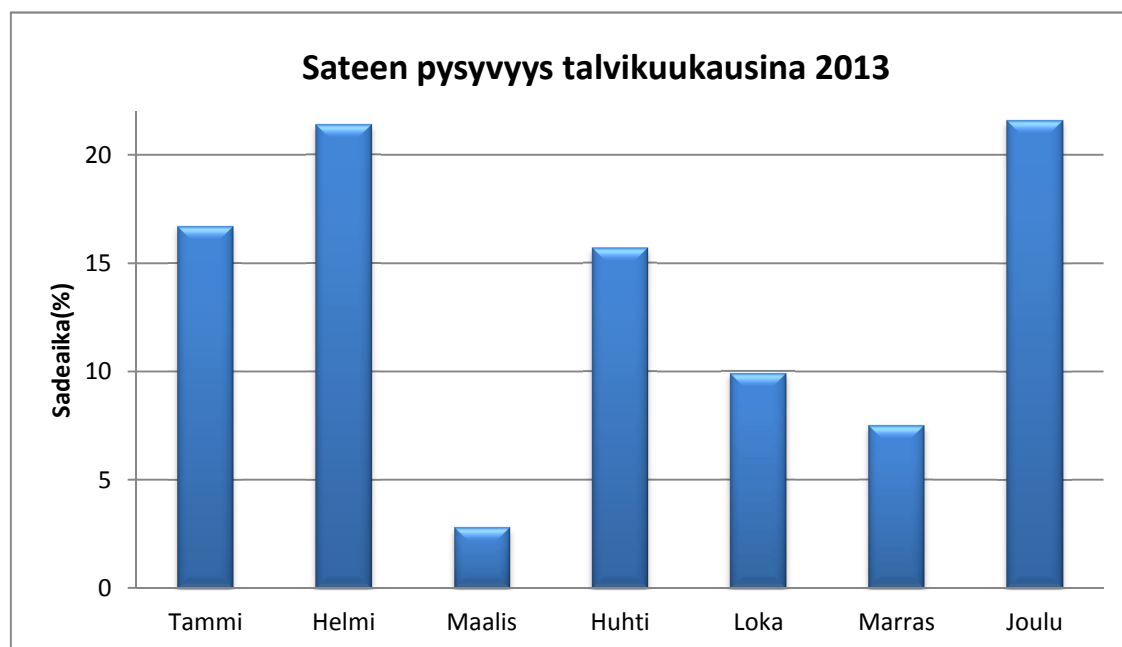
7.4 Lämmitysverkostojen lämpötilat

7.4.1 Lumensulatusverkosto

Lumensulatusverkoston tehtävä on pitää ulkoalueet lumettomina ja sulina. Ulkoalueiden lämmityksessä on kuitenkin suuri riski tarpeettomalle lämmitykselle, jolloin vuotuiset lämmityskustannukset voivat kohota erittäin suuriksi.

Lielahden marketissa koko lumensulatusverkoston lämmitysenergiatarve katetaan kaukolämmöllä. Linnainmaalla lämmitys on pääosin lämpöpumpulla, jolloin tarpeettoman lämmityksen merkitys ei ole niin suuri kuin Lielahden marketin osalta. Energia-analysissä kävi ilmi, että varsinkin Lielahdessa vuotuinen kulutus on ollut suhteellisen suurta. Lämmityksen säätö molemmissa marketeissa on hyvin samankaltainen. Lämmitystä säädetään ulkolämpötilaan perustuvalla paluueden säätökäyrällä, jota korotetaan suuntaissiirtona sadeanturin perusteella.

Sadetunteja talven aikana on suhteellisen vähän, jolloin pääosa ajasta lämmitystä säädetään niin sanotulla normaalikäyrällä. Sadetuntien vuotuisesta määrästä ei ole saatavilla maksutonta tilastotietoa, mutta markettien sadeanturien avulla voidaan sateen lämmityskauden aikaista pysyvyyttä arvioida. Kuvaajassa 7.26 on sadeanturin tietojen perusteella luotu kuukausittaiset sadejaksojen pituudet.



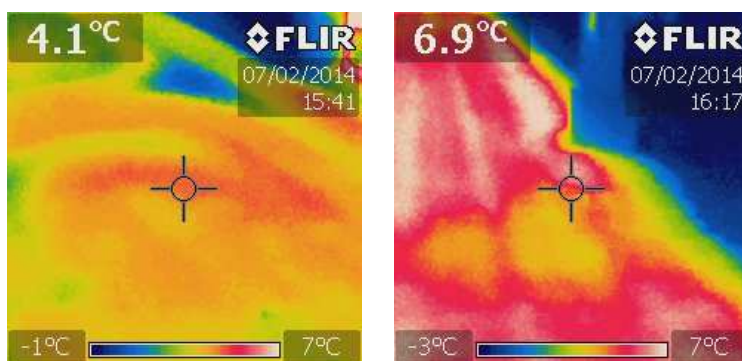
Kuva 7.26. Sateen pysyvyys talvikuukausina 2013

Vuosi 2013 oli sademääriltään suhteellisen lähellä vuosien 1980–2010 keskiarvoa, joten voidaan arvioida, että keskimääräinen sateen ajallinen kesto on noin 10–15 %

lämmityskaudesta [34]. Näin ollen suurin osa lämmitysenergiasta kuluu muulloin kuin lumisateella.

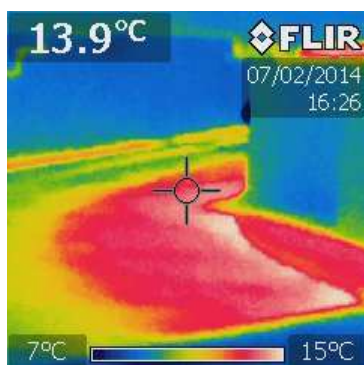
Normaalikäyrän lämmityksen säätö on erittäin haastavaa. Satamattomana aikana verkoston täytyy pitää pinnan kitka sellaisena, että asiakkaat voivat liikkua ilman liukastumisriskiä. Yleensä pinnan lämpötila pyritään pitämään niin lämpöisenä, ettei jäätymisriskiä ole. Riskinä on kuitenkin, että pinnan lämpötila nousee liian korkeaksi, jolloin energiaa kuluu tarpeettomasti. Yleinen tapa hallita liiallista lämmitystä on säätää piiriä pinnan lämpötilan perusteella erillisellä pintalämpötila-anturilla. Pintalämpötilalle annetaan raja-arvo, jonka ylittyessä lämmitys katkaistaan. Lielahdessa tai Linnainmaalla ei pintalämpötila-antureita ole, jolloin liiallisen lämmityksen riski on suuri.

Helmikuussa 2014 lumensulatusverkoston pintalämpötiloja tarkasteltiin lämpökamerakuvausten avulla. Kuvassa 7.27 on Lielahden ja Linnainmaan sisäänkäyntien lämpökamerakuvia. Kuvan vasemmassa yläkulmassa oleva lämpötila on kuvan keskipisteen lämpötilamittaus.



Kuva 7.27. Sisäänkäyntien pintalämpötilat

Ulkoilman lämpötila oli kuvaushetkellä noin 0,0 °C ja ei satanut. Paluuveden lämpötila oli Lielahdessa noin 15,0 °C ja Linnainmaalla noin 17,0 °C. Lämpökamerakuvausten perusteella molemmissa marketeissa ulkoalueiden pintalämpötila olivat kohtuullisen korkeita. Lämpötiloissa oli suuria paikallisia eroja. Linnainmaalla parkkihallin sisään-tulo on katettua tilaa, jossa on nosto-ovet molemmissa päissä parkkihalliin vievää luiskaa. Luiskan parkkihallin puoleisessa päässä pinnan lämpötila oli mittaushetkellä jopa 14 °C. Kuvassa 7.28 on parkkihallin sisään-tulon lämpökamerakuva.

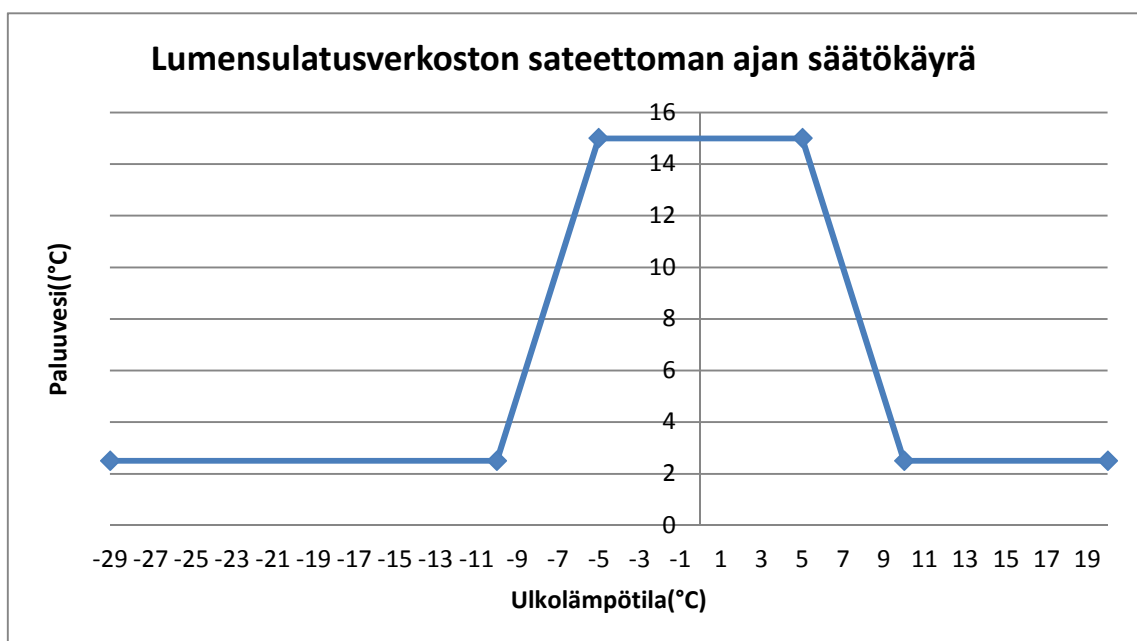


Kuva 7.28. Linnainmaan parkkihallin edustan pintalämpötila

Kuvausten perusteella pinnan lämpötilat ovat Linnainmaalla hieman korkeampia. Korkeammista lämpötiloista huolimatta Linnainmaalla kokonaislämmitysenergiankulutus on ollut pienempää, joka johtunee rakenteellisista eroista.

Kuvausten perusteella voidaan todeta, että pintalämpötila-antureilla voitaisiin karsia jossain määrin piirien lämmityskustannuksia. Pintalämpötilaan perustuva säätötapa ei poista kuitenkaan täysin tarpeetonta lämmitystä, koska pinnan kitkakerroin ei korreloi täysin pinnan lämpötilan kanssa. Pinnan kitkakerroin pysyy varsinkin kuivalla ilmalla todella hyvänä, vaikka pintaa ei lämmitetä lainkaan. Varsinkin kevät-talvella ilman suhteellinen kosteus on pieni, jolloin pinnan lämpötila voi olla huomattavasti ulkoilmaa kylmempää ilman, että pintaan tiivistyy kosteutta. Vaihtoehtona lämpötilaan perustuvalle säädölle olisi optiseen kitkan mittaukseen perustuva säätö. Suurin ongelma kitkamittauksessa on mittalaitteiden hintataso, joka on nykyisin vielä erittäin korkea. Lämpötila- ja kitkamittauksen lisäksi sääennustepohjaisella säätötavalla voidaan lumensulatusverkon energiankulutus karsia.

Edullisin ratkaisu lämmitysenergiankulutuksen vähentämiseen on satamattoman ajan lämmityskäyrän lämpötilojen iterointi niin alas kuin on mahdollista. Lämmityskäyrän muotoa ja lämmityksen käynnistyslämpötilaa voidaan myös hieman muuttaa. Tarkastellaan seuraavaksi Lielahden Prisman lumensulatusverkon normaaliajan lämmityskäyrää ja säästöpotentiaalia. Alkuperäinen lämmityskäyrä oli kuvan 7.28 kaltainen, jossa paluuveden lämpötilan asetusarvo oli korkeimmillaan $-5...+5\text{ °C}$ välisillä ulkoilman lämpötiloilla. Lämmitys aloitettiin ulkolämpötilan laskiessa alle arvon 6 °C , jolloin verkoston pumppu käynnistyy. Ajallisesti ulkolämpötilojen $-5...+5\text{ °C}$ väli vastaa 69 %:ta koko lämmityskaudesta Pirkanmaan alueella.

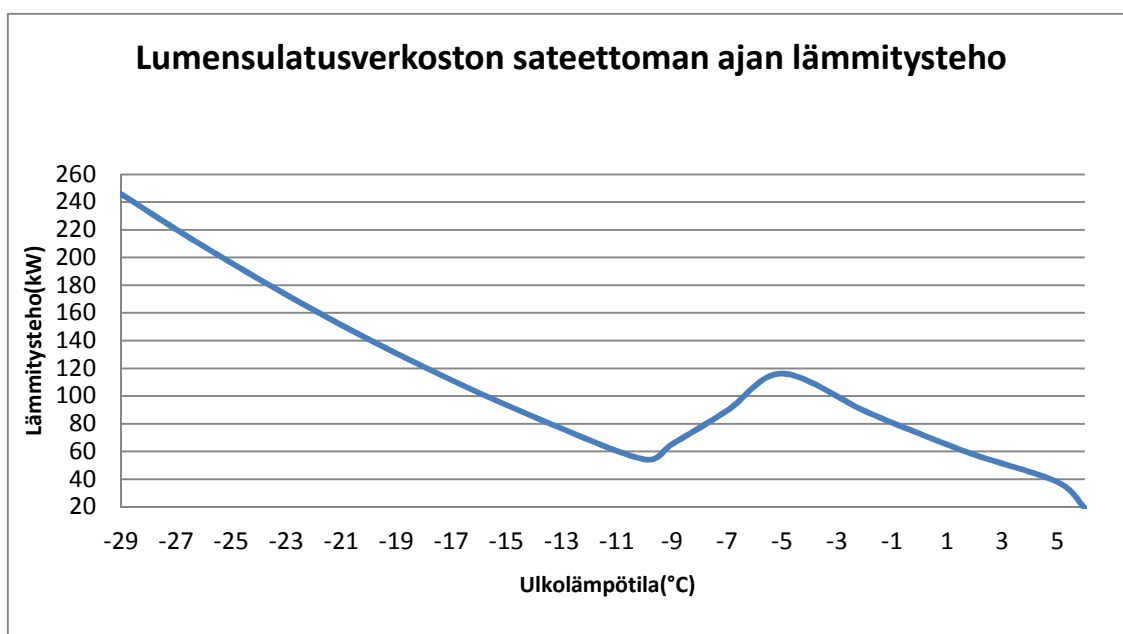


Kuva 7.29. Lumensulatusverkon sateettoman ajan paluuv veden lämpötilan säätökäyrä

Taloautomaation kattavien historiatietojen avulla saatiin luotua lumensulatusverkoston konduktanssille sovitefunktio, jolla voidaan tarkastella lämmitystehoa eri ulkolämpötiloilla. Konduktanssin sovitefunktio on seuraavaa muotoa (7.2)

$$G = 4,319 \left(\frac{\theta_{in}}{16,45} \right)^{0,52} \quad (7.2)$$

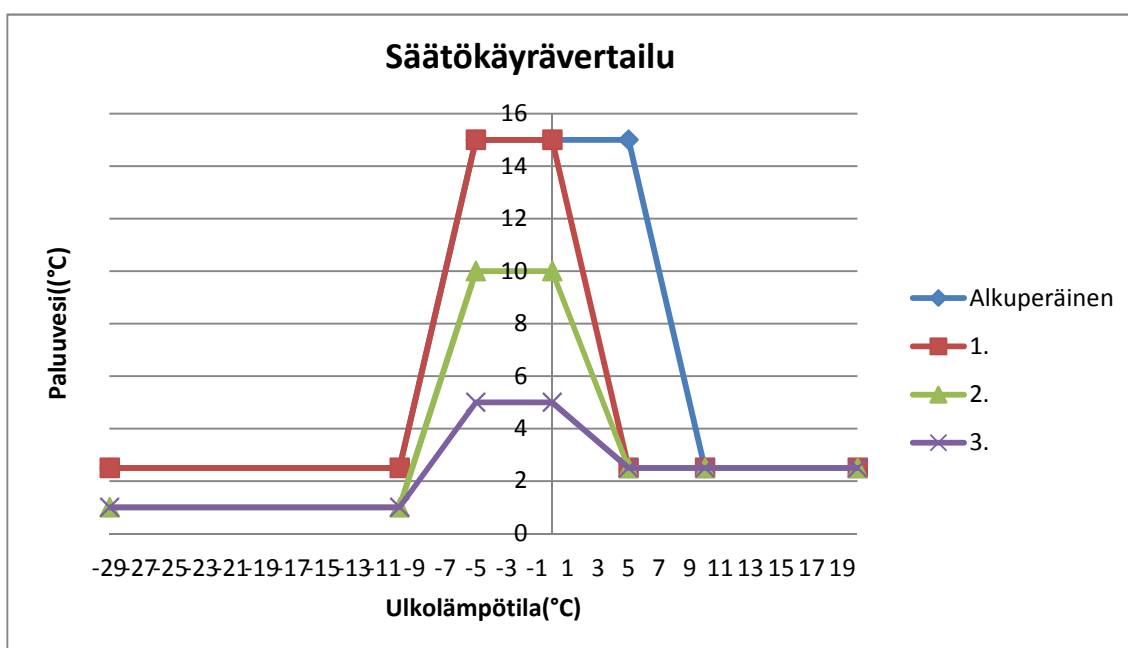
Konduktanssisovitteen avulla voitiin luoda lämmitystehoprofiili. Lämmitysteho eri ulkolämpötiloilla on esitetty kuvaajassa 7.30



Kuva 7.30. Lumensulatusverkoston sateettoman ajan lämmitysteho ulkolämpötilan funktiona

Alentamalla ulkoilman lämpötilan asetusarvoa, jossa lumensulatusverkoston lämmitys aloitetaan, voidaan lämmitysenergia kulutusta vähentää kohtuullisen paljon. Alkuperäisessä asetuksessaan aloituslämpötila oli hieman liian korkea. Huomattavaa on kuitenkin, että lämmitys täytyy aloittaa jo korkeammilla ulkoilman lämpötiloilla kuin 0 °C, koska säteilylämmönsiirron vaikutuksesta pinnat saattavat jäätyä. Aloituslämpötilan pudotus arvosta 6 °C arvoon 3 °C:n vähentää sateettoman ajan lämmitysenergiankulutusta lähes 7 %. Lämmityskauden aloituslämpötilan lisäksi säätökäyrää voidaan siirtää. Kuvaajan 7.28 mukaisessa paluuveden säätökäyrässä asetusarvo on lähes heti lämmityksen alettua korkeimmassa arvossa, vaikka ulkolämpötila on vielä suhteellisen korkea. Käyrää siirrettäessä suuntaissiirtona 5 °C vasemmalta oikealle putoaa lämmitysenergiankulutus jo lähes 20 %. Pinnan kitkan kannalta edellä mainitut muutokset ovat kohtuullisen turvallisia. Paluuveden säätökäyrän pystysuuntaiset siirrot ovat sen sijaan hieman monimutkaisempia, joten muutoksia tehtäessä on syytä huolehtia riittävästä seurannasta, jotta ulkoalueen kitkakertoimet pysyvät vaaditulla tasolla.

Tarkastellaan, mikä merkitys energiataloudellisesti asetusarvoilla on. Verrataan kolmea erilaista säätökäyrää alkuperäiseen käyrään. Säätökäyrässä numero yksi paluueden asetusarvo alkaa kasvaa vasta, kun ulkoilman lämpötila alittaa 5 °C. Muutoin säätökäyrä on samanlainen kuin alkuperäinen. Säätökäyrässä numero kaksi on ulkoilman lämpötilojen -5 °C ...0 °C aikaista paluueden lämpötilan asetusarvoa on alennettu 5 °C. Lisäksi alemmilla ulkoilman lämpötiloilla kuin -10 °C, on paluueden asetusarvo 1,5 °C alempi kuin alkuperäisessä vaihtoehdossa. Säätökäyrä numero kolme on samanlainen kuin numero kaksi, mutta paluueden lämpötila on ulkoilman lämpötilojen -5 °C ...0 °C välillä 5 °C. Vertailtavat paluueden säätökäyrät on esitetty kuvaajassa 7.31.



Kuva 7.31. Paluueden lämpötilan säätökäyrien vertailu

Tuloksissa verrataan sateettoman ajan energiankulutusta korjatuilla paluueden lämpötilojen säätökäyrillä. Eri säätökäyrillä energiankulutukset muuttuvat seuraavasti.

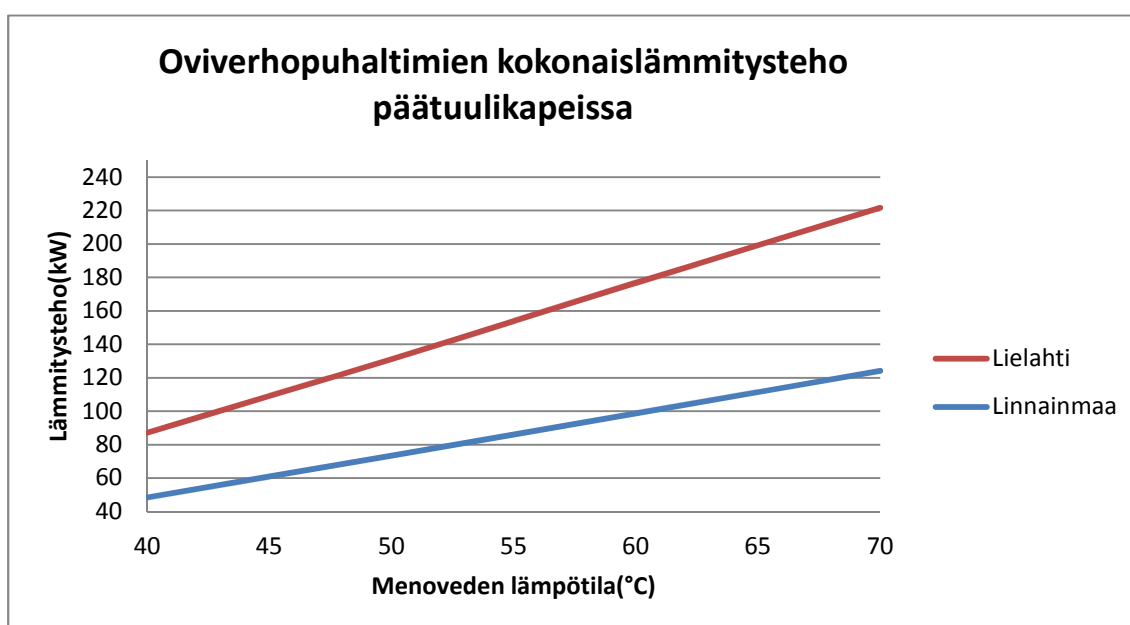
- Säätökäyrällä 1 energiankulutus 79 % alkuperäisestä
- Säätökäyrällä 2 energiankulutus 58 % alkuperäisestä
- Säätökäyrällä 3 energiankulutus 36 % alkuperäisestä

Kuten tuloksista huomataan, voidaan paluueden lämpötilan säätökäyrän laskulla saada merkittäviä energiasäästöjä aikaan, mutta lämmitysverkoston lämpötilan laskussa on aina huomioitava piha-alueen terminen hitaus eli pinnan lämpötilaa ei voida laskea liian alas, jotta lumisateen alkaessa lämpötila on halutussa arvossa riittävän nopeasti. Toinen tärkeä asia on asiakkaiden turvallisuus, joka on aina huomioitava muutoksia tehtäessä.

7.4.2 Muut lämmitysverkostot

Oviverhopuhaltimien lämmitystehontarpeen määrittäminen laskennallisesti on haastavaa. Laskentaan vaikuttavia parametreja on runsaasti ja monet niistä joudutaan arviomaan ilman tarkkaa tietoa.

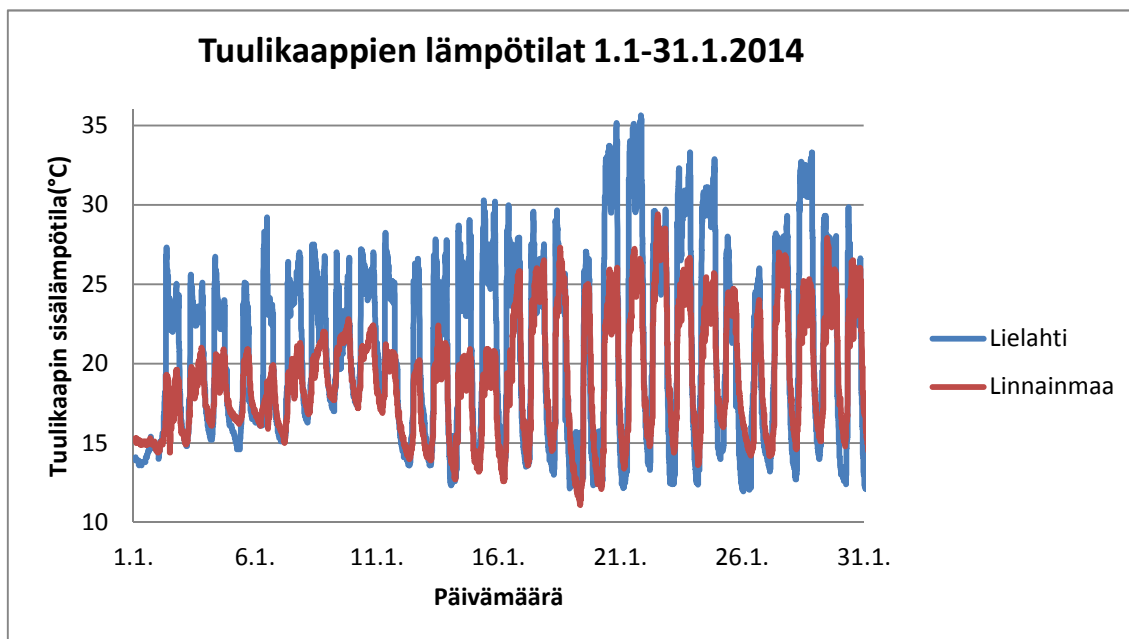
Lielahdessa ja Linnainmaalla on ruotsalaisen oviverhopuhallinvalmistajan Fricon laitteistot. Tuulikaappeja on molemmissa yhteensä kolme. Tuulikaapeista kaksi on niin sanottuja päätuulikaappeja, jotka ovat kooltaan suurempia. Lielahdessa on pystyyn asennetut puhaltimet, joita on kulkuaukon molemmin puolin, jolloin päätuulikaapeissa on yhteensä kahdeksan puhallinta. Linnainmaalla on oviaucon päältä puhaltavat koneet. Päätuulikaapeissa on yhteensä neljä puhallinta. Kuvaajassa 7.32 on esitetty puhaltimien kokonaislämmitysteho eri menoveden lämpötiloilla. Patterille tulevan ilman lämpötila on 20 °C ja ilmamäärä on suurin mahdollinen.



Kuva 7.32. Oviverhopuhaltimien kokonaislämmitysteho päätuulikaapeissa [35]

Molemmissa laitteistot on mitoitettu 70 °C menoveden lämpötilalle, jolloin Lielahdessa lämmitysteho on hieman yli 220 kW ja Linnainmaalla 120 kW. Oviverhokoneissa säädetään sekä ilmamäärää että menoveden lämpötilaa ulkoilman lämpötilan mukaan. Ulkoilman viilentyessä paine-ero kasvaa, jolloin ilmaverhon tiiveyttä pyritään kasvattamaan nostamalla puhaltimen pyörimisnopeutta.

Tuulikaappien sisälämpötilat saattavat nousta erittäin korkeaksi, jos menoveden lämpötila on liian korkea. Lielahdessa tuulikaappien lämpötilat ovat olleet aika ajoin jopa 35 °C. Linnainmaalla tilanne on ollut sen sijaan kohtuullisen hyvä kovimpia pakkasjaksoja lukuun ottamatta. Kuvaajassa 7.33 on esimerkkituulikaappien sisälämpötilat tammikuulta 2014.



Kuva 7.33. Tuulikaappien sisälämpötilat

Tuulikaappien sisälämpötiloille on asetettu erisuuret lämpötilan asetusarvot yölle ja päivälle. Myymälän ollessa kiinni asetusarvo on huomattavasti alhaisempi, jolloin lämpötila laskee yöksi. Aamulla myymälän auetessa asetusarvo muuttuu, ja lämmitysventtiili avautuu. Tehokkaat lämmityspatterit nostavat nopeasti tuulikaapin lämpötilan korkeaksi. Vastaava tilanne tulee myös silloin, kun lämpötila laskee myymälän aukioloaikana asetusarvoon, ja venttiili aukeaa. Seurauksena on, että tuulikaapin lämpötila on lähes koko ajan liian korkea. Korkeasta lämpötilasta huolimatta Lielahdessa on ollut ongelmia vedon kanssa, joten tuulikaapin korkea lämpötila ei ole ratkaisu veto-ongelmaan. Syynä on ilmeisesti marketin suuri sisäkorkeus, joka vaikuttaa tilojen väliseen paine-eroon. Yksi ratkaisu tilanteeseen on vaihtaa liukuovien tilalle pyöröovet, jolloin estetään ilman virtaus ulko- ja sisätilan välillä.

Lämmityspatterien tehokkuutta voidaan hyödyntää madaltamalla menoveden lämpötilaa. Erityisen suuri hyöty saavutetaan, jos lämmityspatterit ovat lämpöpumpun lämmityspiirissä. Näin ei ole kuitenkaan Lielahdessa eikä Linnainmaalla, vaan molemmat lämpiävät kaukolämmöllä. Verkoston kierron aikaiset lämpöhäviöt kuitenkin alenevat, joten hyötyä saadaan myös kaukolämmön tapauksessa. Voidaan todeta, että tulevaisuudessa uudiskohteissa oviverhohuuhaltimet kannattaa kytkeä lämpöpumpun lämmityspiiriin, jos se on mahdollista. Todennäköisesti lämmityspatterit toimivat huomattavasti mitoitettua alhaisemmilla veden lämpötiloilla, ja lämpöpumppua voidaan hyödyntää koko lämmityskauden.

Suurten kiinteistöjen lämmitys on monen eri lämmityspiirin yhdistelmä, jolloin lämmityspiirit vaikuttavat toisiinsa, jos lämmönluovuttimet sijaitsevat samassa tilassa. Virtausmittausten perusteella patteriverkoston toiminta on erilaista osana suurta kokonaisuutta kuin yksittäisenä lämmitysmuotona. Lielahdessa tehtyjen mittausten mukaan patteriverkoston virtaama pysyi hyvin samanlaisena olosuhteiden muuttuessa. Todennäköisesti syynä on se, että lämmityspattereita on runsaasti myös yleisissä tiloissa, joita

lämmitetään myös muilla tavoilla. Näin ollen patterien lämmitysteho ei vaikuta kovin merkittävästi suuren tilan lämpötilaan, jolloin termostaattien asento pysyy hyvin samantaisena jatkuvasti. Hypermarketeissa lämmitysverkostojen lämpötilatasoilla on erityisen suuri merkitys, joten patteriverkosto ei ole energiataloudellisesti paras vaihtoehto. Nykyisin tilanne on kuitenkin kohentunut uusien mitoituslämpötilojen johdosta, jolloin lämpötilat sopivat entistä paremmin myös lämpöpumpuille. Patteriverkoston korvaajana hyvä vaihtoehto on lattialämmitys.

Ilma- ja radiaattorilämmityksen lisäksi Lielahdessa on myös kattosäteilijät. Kattosäteilijät on sijoitettu käyttötavaraosastolle, kassa-alueelle ja entiselle puutarhamyymälän alueelle. Taloautomaation historiatietojen perusteella käyttötavaraosastolla kattosäteilijöitä ei ole tarvittu lämmityskäytössä lainkaan. Erittäin suuri valaistusteho aiheuttaa suuret lämpökuormat, jolloin lämmitystarve jää käyttötavaran puolella erittäin vähäiseksi. Myös kahden muun verkoston tarve on kohtuullisen pieni. Samaisia säteilijöitä käytetään myös jäähdytyskäytössä, mutta ilman vesihöyryn kondensoitumisen estämiseksi menoveden lämpötila täytyy pitää kastepisteen yläpuolella, jolloin jäähdytysteho jää kohtuullisen vähäiseksi. Kattosäteilijöiden tilanne voi hieman tulevaisuudessa muuttua LED – valaisimien myötä.

8 YHTEENVETO

Suunnitteluvaiheen merkitys hypermarketin energiatehokkuuden kannalta on erittäin merkittävä. Erityisesti järjestelmien kytkennät ja verkostojen mitoituslämpötilat ovat suuressa roolissa. Energia-analyysin perusteella suurin osa lämmitysenergiasta tuotetaan kaukolämmöllä molemmissa marketeissa huolimatta suuritehoisista lämpöpumpuista. Runsaasti lämmitysenergiaa kuluttavia lämmityspiirejä on yhdistetty kaukolämpöön, joten kaukolämmön kulutus on ollut vuositasolla Lielahdessa hieman alle 2000 MWh ja Linnainmaalla reilut 1000 MWh. Lielahden kohdalla parkkihalli osoittautui todella suureksi yksittäiseksi energiankuluttajaksi.

Lämpöpumpun vähäisestä käyttöasteesta seuraa suuren kaukolämmönkulutuksen lisäksi myös muita ongelmia. Keskimääräinen käyntiaika Lielahden maalämpöpumpussa on ollut lämmityskaudella vain 2,5–3,0 minuuttia, minkä seurauksena kompressoreilla on erittäin suuri vaara rikkoontua. Osasyynä alhaiseen käyttöasteeseen on myös lämpöpumpun ja vedenjäähdytyskoneikon yhdistelmä, jonka mitoitus on jäähdytystilanteen mukaan. Ratkaisuna yhdistelmäkoneikoissa on kompressorien lukumäärän kasvattaminen, jolloin saadaan tehoportaita lisättyä. Myös invertterikompressorien käytöllä voidaan ongelmaa ehkäistä. Molemmissa ratkaisussa kuitenkin investointikustannukset kasvavat. Olemassa olevissa kohteissa kannattaa harkita järjestelmien kytkentämuutoksia, jos toteutuksen investointikustannusten ja energiakustannusten alenemisen suhde on riittävän hyvä.

Hypermarketeissa lämpöpumput ovat pääosin kytketty ilmalämmitysverkostoihin. Ilmalämmityspattereiden mitoitusolosuhteet ovat yleensä erilaiset kuin käyttötilanteessa, jolloin lämmityspatterit toimivat mitoitettua alhaisemmilla lämpötiloilla. Lämmitysveden säätökäyrä kannattaakin sovittaa alhaisimmille mahdolliselle tasolle, jotta lämpöpumppuprosessi toimii parhaalla mahdollisella lämpökertoimella. Tulevissa projekteissa kannattaa panostaa lämpöpumppuihin ja kylmälaitoksen lauhdepiirin kytkettyjen lämmönluovuttimien mitoitukseen, koska saatu hyöty on merkittävä. Suuritehoiset ilmalämmityspatterit ja lattialämmitys soveltuvat erinomaisesti kylmälaitoksen ja lämpöpumppujen tuottaman lämpöenergian hyödyntämiseen.

Kiertovesipumput ovat tärkeä osa lämpöpumppujärjestelmiä. Maalämmön kohdalla virtaamat ja painehäviöt ovat suuria, jolloin vääränlaisella ohjauksella ja säädöllä pumppauksen kustannukset ovat korkeita. Lämpöpumpuille on erittäin tärkeää riittävä virtaama, mutta virtaama voidaan säätää käynnissä olevien kompressorien lukumäärän perusteella. Näin vältetään ylimääräiset pumppauskustannukset. Lielahden maalämpöjärjestelmän kylmäainekierron lämpökerroin on hyvä, mutta kokonaislämpökerroin on ollut erittäin alhainen kiertovesipumppujen suuren kulutuksen seurauksena. Kierto-

vesipumppujen kohdalla on myös tärkeää, että virtaamat ovat eri verkostojen rajapinnoilla tasapainossa. Hypermarkettien lämmitysjärjestelmissä on runsaasti erilaisia piirejä, joita rajoittavat esimerkiksi lämmönsiirtimet ja varaajat. Jos virtaamat eivät ole tasapainossa, muodostuu piirien välille suuria lämpötilaeroja, jotka huonontavat lämpöpumpun hyötysuhdetta.

Molemmissa hypermarketeissa on ollut alkuperäinen tarkoitus hyödyntää maalämmön kaivokenttää sekä lämmityksessä että jäähdytyksessä. Yhteiskäytössä on kuitenkin erittäin tärkeää, että käyttötilanteiden välillä on tasapaino, jolla maaperän lämpötila on sopiva molemmille prosesseille. Maaperän lämpötila pysyy kuitenkin molemmissa marketeissa korkeana läpi vuoden, jolloin vapaajäähdytystä ei ole saatu hyödynnettyä. Tilojen jäähdytyksen tarve on kuitenkin erittäin pieni molemmissa marketeissa, joten suurta energiataloudellista merkitystä asialla ei ole.

Kylmälaitoksen lauhdepiirin lämpötilan säädöllä voidaan saada aikaan merkittäviä säästöjä. Suomessa lämmityskauden pituus on sijainnista riippumatta kohtuullisen pitkä, jolloin kylmälaitoksen lauhdelämpöä saadaan hyödynnettyä erittäin suuri aika vuodesta. Hyödynnettävän energian määrä kannatta aina optimoida, koska järjestelmät ja energian hinnat ovat erilaisia. Käytettäessä lämpöpumpua lauhdelämmön talteenotossa optimointi voi olla mahdotonta, koska järjestelmien käyttöalueet rajoittavat lämpötila-aluetta. Kesällä lauhdepiirin energiatehokkuus muodostuu nestejäähdyttimien puhaltimien ja kompressorien sähkönkulutuksesta, johon vaikuttaa säätötapa. Nykyisillä EC-moottoreilla sähköteho muuttuu erittäin jyrkästi, jolloin puhaltimen kierrosnopeudella on erittäin suuri merkitys. Kompressorien sähkönkulutus lauhtumislämpötilan funktiona on sen sijaan maltillisempaa, jolloin kokonaissähkönkulutuksessa kesäaikana voi olla suuri eroja eri lauhtumislämpötiloilla. Vaikka lämmityskauden ulkopuolinen lauhtumislämpötilan optimointi ei ole yhtä merkitsevä energiataloudellisesti kuin lämmityskaudella, kannattaa se järjestelmälle kuitenkin tehdä.

Suuret kiinteistöt lämmitetään pääosin ilmalämmityspattereilla, koska niiden avulla saadaan lämmitys jakautumaan tasaisesti suureen tilaan. Ilmalämmityksen osalta energiasäästöjä saadaan aikaan oikein mitoitetuilla aikaohjelmilla ja ilmamäärillä. Kriittisiä ilmanvaihtokoneita ovat erityisesti parkkihallin ilmanvaihtokoneet, koska ilmamäärät ovat suuria ja lämmön talteenoton hyötysuhde alhainen. Uudiskohteissa kannattaakin hyödyntää muiden tilojen jäteilmaa parkkihallin tuloilmana. Aikaohjelmat ja ilmamäärät voidaan kytkeä marketin käyttöprofiiliin, jolloin saadaan ilmanvaihto suhteutettua asiakkaiden ja autojen määrään. Parkkihallin ilmanvaihtokoneiden lisäksi myymälän ilmanvaihto vaatii suuria ilmamääriä. Myymälässä lämmityksen tarve on kuitenkin huomattavasti alhaisempi, koska hyvän ilmanlaadun vuoksi voidaan käyttää pyöriä lämmönsiirtimiä, joiden lämmön talteenoton hyötysuhde on erinomainen. Kiertoilmaa voidaan myös hyödyntää, jos ilman hiilidioksidipitoisuus on riittävän alhainen.

Lämmitysverkostojen lämpötiloilla on merkitystä myös muissakin tapauksissa kuin lämpöpumppujen kohdalla. Verkostot ovat pitkiä, jolloin hyvälläkin putkiston eristystasolla lämpöhäviöitä muodostuu. Suurin osa lämmöstä johtuu marketin tiloihin, mutta hallitsematon lämmitys ei ole kuitenkaan ideaalinen tilanne. Lämmitysverkostoista eri-

tyisesti lumensulatusverkosto ja oviverhopuhaltimien lämmityspiirit ovat tärkeitä energiatalouden kannalta. Piha-alueiden lämmityksessä kannattaa minimoida sateettoman ajan lämmitys kuitenkin huomioiden asiakkaiden turvallisuus. Oviverhopuhaltimissa lämmityspatterit ovat yleensä erittäin tehokkaita, jolloin liian korkealla menoveden lämpötilalla tuulikaappien lämpötila saattaa kohota erittäin korkeaksi.

Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien tasapainotus tehdään tavanomaisesti LVI-piirustusten mukaisesti. Monimutkaisissa järjestelmissä pelkät LVI-piirustukset tarjoavat kuitenkin suhteellisen vajavaiset lähtötiedot säätötyöntekijälle. Järjestelmällä voi olla useita käyttötilanteita kuten lämmitys, jäähdytys ja vapaajäähdytys, jolloin säätötyöntekijän tarvitsee tietää, kuinka järjestelmän tulisi toimia kussakin tilanteessa. Nämä tiedot eivät kuitenkaan lämmityksen piirustuksista selviä, jolloin säätötyöntekijä asetetaan vaikeaan tilanteeseen. Suunnitelmiin kannattaisi lisätä erillinen säätösuunnitelma järjestelmiin, joissa on useita eri käyttötilanteita. Suunnitelman tehtävänä olisi selvittää, kuinka järjestelmän pitää toimia eri tilanteissa. Mittauspöytäkirjaan kirjattaisiin ylös esimerkiksi pumpun pyörimisnopeudet eri käyttötilanteissa, venttiilien asennot ja niin edelleen. Säätösuunnitelma nopeuttaisi koko tasapainotusprosessia ja ei olisi suuritöinen LVI-suunnittelijallekaan.

Suurissa ja monimutkaisissa järjestelmissä on suuri määrä vikaantumisherkkiä komponentteja kuten erilaiset säätöventtiilit ja pumput. Häiriöitä tulee jopa päivittäin, jolloin vikaantumisen nopea havainnointi rakennusautomaatiojärjestelmän avulla sekä ongelman korjaaminen mahdollisimman nopeasti lisää järjestelmän energiatehokkuutta. Ainoa keino nopeaan reagointiin on rakennusautomaatiikan aktiivinen seuranta.

LÄHTEET

- [1] Energiateollisuus ry.2013. Rakennusten kaukolämmitys: Määräykset ja ohjeet julkaisu K1/2013 .[Verkkodokumentti].[Viitattu 5.3.2014] Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/julkaisuk1_2013_rakennustenkaukolammitys_2_0.pdf
- [2] Suomen kaukolämpö ry.1998. Tilausteho ja -vesivirta.[Verkkodokumentti].[Viitattu 5.3.2014] Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/suositusk15_1998.pdf
- [3] Hakala P, Kaappola E.2013. Kylmlaitoksen suunnittelu. 3. painos. Helsinki, Opetushallitus
- [4] CoolPack version 1.49.2011. Refrigeration utilities.[Tietokoneohjelma] Department of Mechanical Engineering , Section of Energy Engineering at the Technical University of Denmark
- [5] Seppänen O. 2001. Rakennusten lämmitys. 2. päivitetty painos. Helsinki, Suomen LVI-liito ry.
- [6] Suomen kylmäliikkeiden liitto.2008. Raporttiosio ilmaston ja jäähdytyslaitoksen tarkastukselle.[Verkkodokumentti].[Viitattu 15.3.2014] Saatavissa: <http://www.skll.fi/www/att.php?type=2&id=184>
- [7] Copeland selection software version 7.7 2013.[Tietokoneohjelma] Emerson Climate Technologies
- [8] Bitzer software 6.3 version 6.4.0.1076 .2013[Tietokoneohjelma] Bitzer
- [9] Seppänen O. 2004. Ilmastoinnin suunnittelu. Helsinki, Suomen LVI-liito ry.
- [10] Mollier Sketcher 2.1b[Tietokoneohjelma] IV Produkt AB
- [11] Wetter M. et al..1999. Simulation model: Finned water-to-air coil without condensation.[Verkkodokumentti].[Viitattu 5.5.2014] Saatavissa: simulationresearch.lbl.gov/dirpubs/42355.pdf
- [12] Karlsson N.2013. Master of Science thesis: Air infiltration through building entrances.[Verkkodokumentti].[Viitattu 16.4.2014] Saatavissa: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/184752/184752.pdf>

- [13] Valkeapää et al.2006. Air leakage through horizontal air curtains-an Experimental study .[Verkkodokumentti].[Viitattu 13.2.2014] Saatavissa: <https://www.aiha.org/aihce06/handouts/a2valkeapaa.pdf>
- [14] Energiateollisuus ry.2007. Rakennusten kaukolämmitys: Määräykset ja ohjeet julkaisu K1/2003 .[Verkkodokumentti].[Viitattu 11.3.2014] Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/julkaisuk1_03_04072007_1.pdf
- [15] Ympäristöministeriö.2012. D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennuksen energiatehokkuus. [Verkkodokumentti].[Viitattu 10.2.2014] Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf
- [16] Sipilä T. 2014. Suomen Kylmäyhdistys ry: Kylmätekniiikan koulutuspäivät, Nykyaikaisen elintarvikemyymälän kylmähontarpeen laskenta. Suomen Kylmäyhdistys ry.
- [17] Aittomäki A.2008. Kylmätekniiikka. 3. painos. Jyväskylä, Gummerus kirjapaino Oy.
- [18] Finel F, Nurmi E. 2014. Suomen Kylmäyhdistys ry: Kylmätekniiikan koulutuspäivät, Uudistuva F-kaasuasetus. Suomen Kylmäyhdistys ry.
- [19] Aittomäki A, Kinta J.2002. Desing of indirect refrigeration systems. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja Prosessitekniikan laitos.
- [20] TA Hydronics . Technical articles: The balance method [Verkkodokumentti].[Viitattu 27.1.2014] Saatavissa: <http://www.tahydronics.com/en/knowledge-tools/technical-articles/theory/the-balance-method/>
- [21] Kärkkäinen A.2010. Väitöskirja, Gas-free filling of heating and cooling systems and balancing of radiator systems. Aaltoyliopisto, Energiatekniiikan laitos
- [23] TA Hydronics .2011. STAF linjasäätöventtiilit. . [Verkkodokumentti].[Viitattu 1.2.2014] Saatavissa: <http://www.tahydronics.com/fi/tuotteet-ja-ratkaisut/ta-balancing-and-control/linjasaatoventtiilit/linjasaatoventtiilit/staf-staf-sg/>
- [23] TA Hydronics .2011. TA-CMI:Virtaus- ja paine-eromittari. . [Verkkodokumentti].[Viitattu 1.2.2014] Saatavissa: <http://www.tahydronics.com/>
- [24] TA Hydronics .2011. Jakelujärjestelmien säätäminen. [Verkkodokumentti].[Viitattu 3.5.2014] Saatavissa: http://www.vantalvi.fi/uploads/files/TA_KaSIKIRJA__Jakelujarjestelmien_Saataminen_2011.pdf

- [25] Ympäristöministeriö.2012. D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. [Verkkodokumentti].[Viitattu 10.2.2014] Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012_Suomi.pdf
- [26] Ympäristöministeriö.2012. D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. [Verkkodokumentti].[Viitattu 18.2.2014] Saatavissa: http://www.ymp.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma
- [27] Energiakolmio Oy.2010. Kesko Oyj: Kulutusseurantaraportti 2010. [Verkkodokumentti].[Viitattu 1.12.2013] Saatavissa: http://www.kesko.fi/PageFiles/16140/Kesko_kulutusseuranta%20Suomi%202010.pdf
- [28] Haahtela.2014.Haahtela Real Estate System:Pirkanmaanosuuskauppa. [Verkkodokumentti].[Viitattu 11.12.2013] Saatavissa: <https://res.haahtela.fi>
- [29] Ilmatieteenlaitos.2014.Lämmitystarveluvut. [Verkkodokumentti].[Viitattu 1.4.2014] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>
- [30] Ilmatieteenlaitos.2014.Kuukausitilastot. [Verkkodokumentti].[Viitattu 1.4.2014] Saatavissa:<http://ilmatieteenlaitos.fi/kuukausitilastot>
- [31] Coils for Windows.Version 9.2.0.0.[Tietokoneohjelma] Luvata Söderköping AB
- [32] Grundfos WinCAPS 2013.01.087.2013[Tietokoneohjelma] Grundfos
- [33] Sisäilmayhdistys. Sisäilmasto: Kemialliset epäpuhtaudet.[Verkkodokumentti].[Viitattu 5.3.2014] Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat-tietojarjestelma/sisailmasto/kemialliset-epapuhtaudet/>
- [34]Ilmatieteenlaitos.2014.Vuositilastot:Vuosi 2013 [Verkkodokumentti].[Viitattu 1.3.2014] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/vuosi-2013>
- [35] Frico.2014.Our knowledge:Heating calculations. [Verkkodokumentti].[Viitattu 12.12.2013] Saatavissa: <http://www.frico.se/en/Our-knowledge/Heating-calculations/>