

Harri Sarvilahti

ILMANVAIHTOKONEIDEN UUSIMISEN VAIKUTUS OSTOENERGIANKULU- TUKSEEN

Päijät-Hämeen keskussairaala

Opinnäytetyö

Insinööri

Talotekniikka

2024



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä	Harri Sarvilahti
Työn nimi	Ilmanvaihtokoneiden uusimisen vaikutus ostoenergiankulutukseen
Toimeksiantaja	Päijät-Hämeen hyvinvointialue
Vuosi	2024
Sivut	38 sivua, liitteitä 3 sivua
Työn ohjaaja	Mika Kuusela

TIIVISTELMÄ

Lähes 40 % Suomessa kulutettavasta energiasta kulutetaan rakennuksissa. Rakennusten energiankulutuksessa ilmanvaihdon osuus on jopa puolet. Ilmanvaihdon energiatehokkuudella on suuri vaikutus kiinteistöjen energiankulutukseen, ja nykyaikaisella lämmöntalteenottojärjestelmällä voidaan kattaa jopa 80 % tuloilman lämmittämisen energiantarpeesta.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin Päijät-Hämeen keskussairaalan K-osan ilmanvaihtokoneiden uusimisen vaikutusta ostoenergiankulutukseen. 1970-luvulla rakennetussa ilmanvaihtojärjestelmässä ei ollut lämmöntalteenottoa, vaan poistoilma johdettiin suoraan ulos. Rakennusosan käyttötarkoituksen muutoksen yhteydessä ilmanvaihtokoneet uusittiin ja korvattiin nestekiertoisella lämmöntalteenotolla varustetuilla koneikoilla.

Tutkimuksessa mitattiin ilmanvaihtokoneiden suoritusarvot käyttötilanteessa. Mittaukset suoritettiin 20.12.2023–2.1.2024 välisenä aikana. Mittausjaksolla lämpötilat olivat tuloilman lämmitystarpeen laskennan kannalta otolliset, kun mittauksien aikana ulkoilman lämpötila pysyi koko ajan alle 0°C lämpötilassa. Mittauksien perusteella tehtiin laskelmat ilmanvaihdon energiankulutuksesta, ja niitä verrattiin vanhan järjestelmän energiankulutukseen. Laskenta tehtiin vuoden 2022 mitattujen päiväkohtaisten keskilämpötilojen perusteella. Energiankulutuslaskelmissa huomioitiin puhaltimien sähköenergiankulutus ja tuloilman lämmittämisen energiankulutus. Laskennallisen ostoenergiankulutuksen perusteella arvioitiin euromääräiset säästöt ostoenergiankulutuksessa ja investoinnin takaisinmaksuaika.

Uusien ilmanvaihtokoneiden taajuusmuuntajaohjattujen EC-puhaltimien sähköenergiankulutus oli 32 % pienempi vanhoihin oikosulkumoottoreilla varustetuihin radiaalipuhaltimiin verrattuna. Mittaushetkellä ilmanvaihtokoneiden tuloilman lämpötilasuhteet olivat välillä 64,4 % ... 83,8 %. Lämmöntalteenotolla pystyttiin kattamaan tuloilman vuotuisesta lämmitysenergiantarpeesta 75 %.

Tarkastelun kohteena olleiden ilmanvaihtokoneiden laskennallisten säästöjen perusteella investoinnin takaisinmaksuajaksi arvioitiin alle viisi vuotta. Ilmanvaihtokoneiden tekninen käyttöikä on 10–15 vuotta, joten investointi oli erittäin kannattava.

Asiasanat: Ilmanvaihto, lämmöntalteenotto, energiankulutus, lämpötilasuhde

Degree title	Bachelor of Engineering
Author	Harri Sarvilahti
Thesis title	The effect of renewing air supply units on energy consumption
Commissioned by	Päijät-Hämeen hyvinvointialue
Time	2024
Pages	38 pages, 3 pages of appendices
Supervisor	Mika Kuusela

ABSTRACT

Nearly 40 % of the energy consumed in Finland is consumed in buildings. In the energy consumption of buildings, ventilation accounts for up to half. The energy efficiency of ventilation has a major impact on the energy consumption of properties, and a modern heat recovery system can cover up to 80% of the energy needs of supply air heating.

The Päijät-Häme Central Hospital renewed the ventilation units of one of the building units, and the thesis examined the impact of new energy-efficient ventilation units on energy consumption. The new machines were equipped with a run-around coil heat recovery system.

This study measured the energy consumption of the ventilation units and compared it with the calculated energy consumption of the old ventilation system. The energy consumption calculation was made on a daily basis, and the measured temperatures for 2022 were used as temperatures. The calculations took into account the energy consumption of heating the supply air and the electric energy consumption of the fans. On the basis of the energy savings, the payback period of the investment was calculated.

The new ventilation units saved 32 % of electrical energy consumption and 75% of heating energy consumption. The payback period of the investment is less than 5 years, so the investment was profitable.

Keywords: ventilation, heat recovery, energy consumption, payback

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TEORIA.....	7
2.1	Puhaltimet.....	7
2.1.1	Puhaltimien moottorin hyötysuhde.....	8
2.1.2	Puhaltimen suoritusarvot toimintapisteen muuttuessa.....	9
2.2	Nestekiertoinen lämmöntalteenotto.....	10
2.2.1	Lämmöntalteenoton lämpötilasuhde.....	11
2.2.2	Econet-yksikkö.....	11
2.3	Ilmavaihtojärjestelmän toiminnalliset mittaukset.....	12
2.3.1	Ilmavirtojen mittaus.....	13
2.3.2	Sähköteho ja energiankulutus.....	14
2.3.3	SFP-luku.....	15
2.4	Investoinnin kannattavuus.....	15
3	TUTKIMUKSEN LÄHTÖKOHDAT.....	16
3.1	Vanhan järjestelmän kuvaus.....	16
3.1.1	Tuloilma.....	16
3.1.2	Poistoilma.....	17
3.2	Uuden järjestelmän kuvaus.....	17
4	TUTKIMUSMENETELMÄT.....	18
4.1	Mittalaitteet.....	18
4.2	Mittaukset.....	19
4.2.1	Lämpötilamittaukset.....	19
4.2.2	Ilmamäärämittaus.....	20
4.2.3	Mittausvirheen arviointi.....	21
4.3	Vanhan järjestelmän energiankulutus.....	22
4.3.1	SFP-luku ja puhaltimien energiankulutus.....	23
4.3.2	Tuloilman lämmittämisen energiankulutus.....	23

4.4	Uuden järjestelmän energiankulutus.....	23
4.4.1	Econet-yksikön lämpötilasuhde ja lisälämmityksen tarve.....	23
5	TULOKSET.....	25
5.1	Vanhan järjestelmän energiankulutus.....	25
5.2	Uuden järjestelmän energiankulutus.....	27
5.2.1	Ilmanvaihtokone 301.....	27
5.2.2	Ilmanvaihtokone 302.....	28
5.2.3	Ilmanvaihtokone 304.....	29
5.2.4	Ilmanvaihtokone 309.....	31
6	OSTOENERGIANKULUTUS.....	32
6.1	Tuloilman lämmittämisen ostoenergiankulutus.....	33
6.2	Sähköenergiankulutus.....	34
6.3	Kustannussäästöt.....	35
7	INVESTOINNIN TAKAISINMAKSUAIKA.....	36
8	POHDINTA.....	37
	LÄHTEET.....	39

LIITTEET

Liite 1: Ilmamäärämittarin kalibrointitodistus

Liite 2. Ilmamäärien mittauspöytäkirja

Liite 3. Sähkötehon mittauspöytäkirja

Liite 4. Lämpötilat ja energiankulutus

1 JOHDANTO

Ilmanvaihdolla pyritään ylläpitämään terveellisiä ja viihtyisiä sisäilmaolosuhteita. Ilmanvaihtojärjestelmän tulisi poistaa huoneilmasta ihmisistä ja toiminnoista syntyvät epäpuhtaudet ja tuoda suodatettua ulkoilmaa korvausilmaksi. Ilmanvaihtojärjestelmä on suunniteltava ja rakennettava rakennuksen käyttötarkoituksen mukaisesti siten, että se luo edellytykset terveelliselle ja viihtyisälle sisäilmastolle.

Ilmanvaihdon osuus rakennuksen energiankulutuksesta voi olla jopa 50 %. Ilmanvaihdon energiantarve koostuu pääosin tuloilman lämmittämisen energiankulutuksesta ja ilman liikuttamiseen vaadittavien puhaltimien sähköenergiankulutuksesta. Lämmöntalteenottojärjestelmän avulla pystytään vaikuttamaan merkittävästi kiinteistön energiankulutukseen. Nykyaikaisella lämmöntalteenottojärjestelmällä pystytään kattamaan jopa 80 % vuotuisesta tuloilman lämmitysenergian tarpeesta.

Päijät-Hämeen keskussairaalassa Lahdessa on vielä käytössä useita alkuperäisiä, 1970-luvulla rakennettuja ilmanvaihtokonehuoneita alkuperäisellä tekniikalla. Vanhassa 1970-luvulla rakennetussa järjestelmässä ei ollut lainkaan

lämmöntalteenottoa, vaan tuloilma jouduttiin lämmittämään kokonaisuudessaan ostoenergialla tavoiteltuun sisäänpuhalluslämpötilaan. Rakennuksen K-osan ilmanvaihtokoneet päädyttiin uusimaan tilojen käyttötarkoituksen muutoksen ja perusparannuksen yhteydessä. Uudistettaviin tiloihin tulee sijoittamaan sisätautien vuodeosasto, lastentautien poliklinikka ja keskusvarasto. Lisäksi ilmanvaihtokonehuoneen uudistus koskee myös toiminnassa olevaa laboratoriota, jonka osalta uusitaan ainoastaan ilmanvaihtokone.

Opinnäytetyön tilaajana toimi Päijät-Hämeen hyvinvointialueen rakennuttamis- ja palvelut-yksikkö. Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia uusilla nestekiertoisella lämmöntalteenottojärjestelmällä varustettujen ilmanvaihtokoneiden avulla saavutettavia säästöjä ostoenergiankulutuksessa. Vanhassa järjestelmässä ei ollut energiankulutukseen seuranta- ja seuranta- ja seuranta- ja seuranta-

neista energiakustannuksista. Tutkimuksessa vanhan järjestelmän energiankulutus selvitetään mittaamalla uusittuja puhaltimia vastaavien puhaltimien sähköenergiankulutus ja hyötysuhde. Uuden järjestelmän energiankulutus lasketaan todellisessa käyttötilanteessa suoritettavien mittausten perusteella. Järjestelmien energiankulutusta verrataan vuoden mittaisella vertailuajanjaksoilla toteutuneiden ulkolämpötilojen mukaan. Laskennan lämpötiloina käytetään vuoden 2022 päiväkohtaisia keskilämpötiloja. Laskennan perusteella arvioidaan investoinnin kannattavuutta ja takaisinmaksuaikaa.

Tutkimuksen tuloksia on tarkoitus käyttää apuna tulevien korjaushankkeiden suunnittelussa. Investointipäätöksiä tehtäessä ja korjaustoimenpiteiden laajuutta suunniteltaessa on tarpeen olla käytettävissä perusteltu arvio saavutettavista käytön aikaisista säästöistä. Mikäli ilmanvaihtolaitteiston uusimisen takaisinmaksuaika jää selkeästi koneiden teknistä käyttöikä lyhyemmäksi, tullaan tulevaisuudessa osastojen saneerauksissa kohdistamaan toimenpiteitä myös ilmanvaihtolaitteisiin.

Opinnäytetyössä tarkastelu rajataan tuloilman lämmittämisen ja puhaltimien vaatimaan energiankulutukseen. Tutkimuksessa ei huomioida kesäaikaisessa jäähdytyksessä saatavaa energiansäästöä, vaikka lämmöntalteenottoa voidaan käyttää hyödyksi myös jäähdytyksessä ulkolämpötilan ollessa sisälämpötilaa korkeampi. Myöskään käytön aikaisia huolto- ja korjaustoimenpiteissä saavutetut säästöt jätetään tarkastelun ulkopuolelle niiden vaikean ennakoitavuuden takia.

2 TEORIA

Ilmanvaihtokoneiden energiankulutus muodostuu tuloilman lämmittämisestä ja puhaltimien sähköenergiankulutuksesta. Energiankulutuksen selvittämiseksi on oltava tiedossa ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirrat, lämmöntalteenoton teho sekä puhaltimien tehontarve.

2.1 Puhaltimet

Puhaltimen tehtävä ilmanvaihtojärjestelmässä on siirtää ilmaa ilmanvaihtokanavissa. Puhaltimessa moottori pyörittää siipipyörää, ja saa ilman virtausnopeuden ja paineen kasvamaan. [1, s. 147.] Puhallinmoottorit ovat yleensä joko

oikosulkumoottoreita tai EC-moottoreita. Nykyisin käytetään yleisesti pienjännitteellä ohjattavia, korkean hyötysuhteen EC-moottoreita, joiden pyörimisnopeutta voidaan säätää portaattomasti. [1, s. 172.]

2.1.1 Puhaltimien moottorin hyötysuhde

Puhaltimen hyötysuhteella tarkoitetaan puhaltimen moottorille tuodun sähkötehon ja ilmavirran liikuttamiseksi vaaditun tehon suhdetta. Hyötysuhteen määrittämiseksi tarvitaan puhaltimen sähköverkosta ottama sähköteho ja hyötyteho, joka vaaditaan ilmavirran liikuttamiseen. Hyötyteho lasketaan kaavalla 1. [2, s. 20.]

$$P_F = q_v * \Delta p_F \quad (1)$$

jossa

P_F = puhaltimen hyötyteho [W]

q_v = puhaltimen ilmavirta [m³/s]

Δp_F = puhaltimen paineenkorotus [Pa]

Puhaltimen hyötysuhde laskettiin jakamalla puhaltimen hyötyteho puhaltimen sähköverkosta ottamalla sähköteholla. Hyötysuhdetta käytetään arvioitaessa vanhojen puhaltimien tehontarvetta uudessa toimintapisteessä. Laskenta tehdään kaavalla 2 [2, s. 24].

$$\eta_{kok} = \frac{P_F}{P_E} \quad (2)$$

jossa

η_{kok} = Puhaltimen kokonaishyötysuhde [-]

P_F = Puhaltimen hyötyteho [W]

P_E = Puhaltimen ottama sähköteho [W]

Arvioitaessa vanhan puhaltimen energiankulutusta mittaustilanteesta poikkeavassa toimintapisteessä ja järjestelmässä käytetään laskennassa uuden toimintapisteen hyötytehoa ja puhaltimen hyötysuhdetta. Laskenta tehdään kaavasta 2 johdetulla kaavalla 3.

$$P_E = \frac{P_F}{\eta_{kok}} \quad (3)$$

jossa

P_E = Puhaltimen ottama sähköteho [W]

P_F = Puhaltimen hyötyteho [W]

η_{kok} = Puhaltimen kokonaishyötysuhde [-]

Puhaltimen moottorin sähköteho lämmittää ilmavirtaa. Ilmavirtaan siirtyvän lämpötehon suhde riippuu puhaltimen moottorin sijainnista. Mikäli puhaltimen moottori sijaitsee ilmavirrassa, kuten yleisesti kammio puhaltimissa, siirtyy moottorin sähköteho kokonaisuudessaan lämpötehona ilmavirtaan. Mikäli moottori ei ole ilmavirrassa käytetään laskennassa kerrointa 0,6. Ilmavirran lämmön nousu puhaltimessa lasketaan kaavalla 4. [1, s. 454.]

$$\Delta T_{puh} = \frac{P_{puh} * P_s}{\rho * c_p * q_v} \quad (4)$$

jossa

ΔT_{puh} = lämpötilan nousu puhaltimessa [°C]

P_{puh} = puhaltimen sähköteho [kW]

P_s = siirtyvän lämpötehon ja sähkötehon suhde [-]

ρ = ilman tiheys [kg/m³]

c_p = Ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]

q_v = ilman tilavuusvirta [m³/s]

2.1.2 Puhaltimen suoritusarvot toimintapisteen muuttuessa

Puhaltimelle mittauksessa saadut suoritusarvot voidaan muuntaa vastaamaan mittaustilanteesta poikkeavan tilanteen suoritusarvoja. Muuntamiselle voi olla tarvetta esimerkiksi silloin, jos mittaustilanteessa ei ole mahdollista toteuttaa mittauksia halutussa toimintapisteesä. Suoritusarvot voidaan muuntaa muuntoyhtälöiden, eli niin sanottujen puhallinlakien avulla. Puhallinlakien käyttö edellyttää, että ilmanvaihtojärjestelmän laitoskäyrä pysyy muuttumattomana. Ilmanvirran muutoksesta johtuva muutos puhaltimen paineenkorotuksessa saadaan laskettua kaavalla 5. [3, s. 56].

Puhaltimen paineenkorotus

$$p_{f2} = \left(\frac{q_{v2}}{q_{v1}}\right)^2 * p_{f1} \quad (5)$$

jossa

p_{f2} = puhaltimen paineen korotus käyttötilanteessa	[Pa]
q_{v2} = ilman tilavuusvirta käyttötilanteessa	[m ³ /s]
q_{v1} = ilman tilavuusvirta mittaustilanteessa	[m ³ /s]
p_{f1} = puhaltimen paineen korotus mittaustilanteessa	[Pa]

Puhaltimen sähkötehon muutos on verrannollinen tilavuusvirran muutoksen kolmanteen potenssiin. Sähköteho uudessa toimintapisteessä lasketaan kaavalla 6. [3, s. 56.]

Puhaltimen sähköteho

$$P_2 = \left(\frac{q_{v2}}{q_{v1}}\right)^3 * P_1 \quad (6)$$

jossa

P_2 = puhaltimen sähköteho käyttötilanteessa	[kW]
q_{v2} = ilman tilavuusvirta käyttötilanteessa	[m ³ /s]
q_{v1} = ilman tilavuusvirta mittaustilanteessa	[m ³ /s]
P_1 = puhaltimen sähköteho mittaustilanteessa	[kW]

2.2 Nestekiertoinen lämmöntalteenotto

Nestekiertoisessa lämmöntalteenottojärjestelmässä poistoilmasta kerätty lämpöenergia siirretään tuloilmaan lämmönsiirtonesteen avulla. Tulo- ja poistoilmavirroissa sijaitsevat lämmöntalteenottopatterit siirtävät lämpöenergian nesteeseen. Lämmöntalteenottopatterit vastaavat rakenteeltaan normaaleja lämmitys- ja jäähdytyspattereita, mutta ovat lämmönsiirron tehostamiseksi lämmönluovutuspinnoiltaan suurempi. [4, s. 184.]

Järjestelmän etuina perinteisiin lämmöntalteenottojärjestelmiin on erillään olevat poisto- ja tuloilmavirrät, jolloin likaisella poistoilmalla ei ole mahdollisuutta

sekoittua tuloilman kanssa. Lisäksi ilmanvaihtokoneet voidaan sijoittaa erilleen, jolloin pystytään tietyissä tilanteissa vähentämään kanavoinnin määrää. [4, s. 184.]

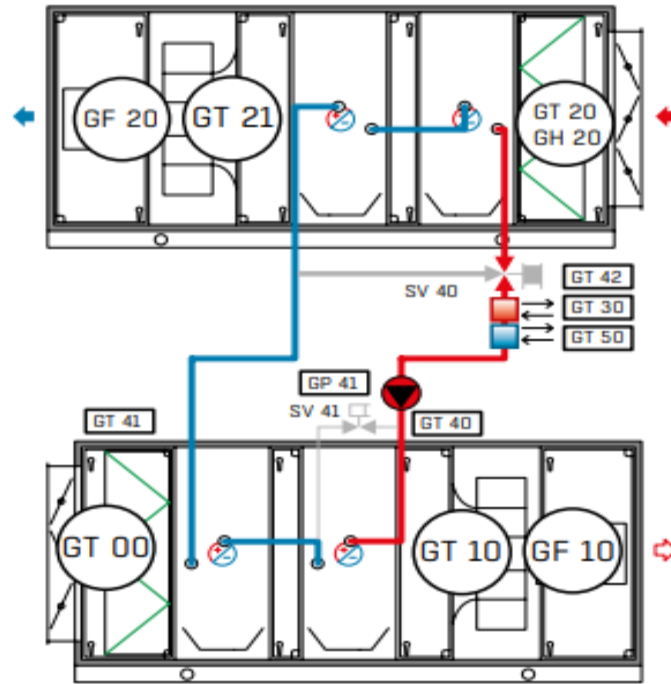
2.2.1 Lämmöntalteenoton lämpötilasuhte

Lämmöntalteenottolaitteen kykyä ottaa talteen lämpöenergiaa poistoilmasta kuvataan lämpötilahyötysuhteella. Laittevalmistajat ilmoittavat yleensä laitteiston lämpötilasuhteen standardin EN 308 mukaan laskettuna tuloilman lämpötilasuhteena. Standardin mukaan lämpötilasuhte lasketaan yhtä suurilla ilmavirroilla, minkä takia se usein poikkeaa käytönaikaisesta hyötysuhteesta. [5, s. 44.]

Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde lasketaan poistoilman lämpötilasuhteesta. Vuosihyötysuhde on poistoilmasta talteen otetun ja hyödynnettävän lämpöenergian suhde ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemaan lämpöenergian määrään. Ilmanvaihtokoneen vuosihyötysuhteen laskenta voidaan tehdä myös yhtä suurilla ilmavirroilla määritetystä tuloilman lämpötilasuhteesta kertomalla luvulla 0,6 tai laskemalla hyötysuhde lämmöntarveluvuilla [1, s. 451].

2.2.2 Econet-yksikkö

Econet on Fläkt Groupin valmistama integroitu lämmöntalteenottojärjestelmä. Sen toiminta perustuu perinteiseen nestekiertoiseen lämmöntalteenottojärjestelmään, mutta tuloilman talviaikainen lisälämmitysenergia ja kesäaikainen jäähdytysenergia tuodaan lämmönsiirtimien avulla talteenottopiirin lämmönsiirtonesteeseen. Lämmöntalteenottopatterit ovat lämmönsiirtopinta-alaltaan suurempia kuin perinteisessä nestekiertoisessa järjestelmässä. Econet-yksikön toimintaperiaate esitetty kuvassa 1. [4, s. 187.]



Kuva 1. Econet-yksikön toimintaperiaate [6, s. 7]

Järjestelmän nestekiertoa ohjataan taajuusmuuntajaohjatulla pumpulla, joka optimoi nestevirran tarpeenmukaiselle tasolle. Järjestelmässä lämmönsiirtonesteinä käytetään yleensä pitoisuudeltaan 25–35 % etyleeniglykolia. [7, s. 12.]

Järjestelmän ansiosta erillisiä lämmitys- ja jäähdytyspattereita ei tarvita, mikä pienentää merkittävästi ilmanvaihtokoneen painehäviöitä ja vaikuttaa siten puhaltimeiden sähköenergiankulutukseen. Lisäksi ilmanvaihtokoneen koko pienenee huomattavasti, kun erillisiä pattereita ei tarvita. [4, s. 184.]

2.3 Ilmavaihtojärjestelmän toiminnalliset mittaukset

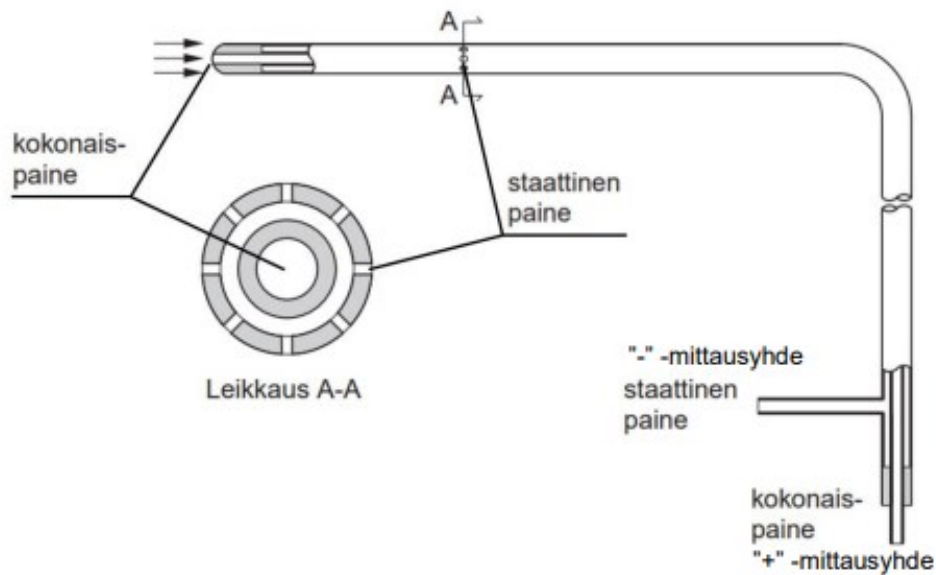
Ilmavaihtojärjestelmän toiminnallisten mittausten tarkoituksena on varmistua siitä, että ilmavaihtojärjestelmällä saavutetaan suunnitelmien mukaiset olosuhteet. Ilmavaihtojärjestelmissä tulee ennen käyttöönottoa todentaa mittauksilla ilmavaihtokoneiden sähköteho ja ilmavirrat. Mittauksissa käytettyjen mittalaitteiden tulee olla kalibroituja ja kalibroinnin on oltava voimassa. [8.]

2.3.1 Ilmavirtojen mittaus

Ilmavirtojen mittaukset tulee suorittaa käyttötilanteen mukaisilla tehostamattomilla ilmavirroilla. Mittauksista laaditaan pöytäkirjat, joissa on esitetty suunnitelmien mukaiset ja mitatut ilmavirrat, säätölaitteen tyyppi ja säätöasento sekä mittauslaitteen tiedot. [9.]

Mittaus voidaan tehdä ilmanvaihtokanavasta säätöpellin aiheuttamasta paine-erosta tai laskea ilman virtausnopeuden ja poikkipinta-alan tulona. Huonekoh- taiset ilmavirrat mitataan yleensä päätelaitteista paine-eron avulla. Paine-ero mitataan paine-eromittarilla ja siihen liitetyillä mittaustavan vaatimalla lisälaitteella, esimerkiksi pitot-putkella tai mittakoukulla. [4, s. 69–70.]

Ilmanvaihtokanavan virtausnopeutta mittavan pitot-putken toiminta perustuu ilman liikkeen aiheuttamaan dynaamiseen paineeseen. Kuvassa 2 on esitetty pitot-putken rakenne ja toimintaperiaate.



Kuva 2. Pitot-putken toimintaperiaate [8, s.18]

Paine-eromittarit laskevat dynaamisen paineen pitot-putken mittaamasta kokonaispaineen ja staattisen paineen erotuksesta. kokonaispaine mitataan putken kärjestä ja staattinen paine putken kehältä. Oikean mittaustuloksen saamiseksi on tärkeää, että pitot-putken pää on suunnattu tarkasti ilman virtausta vastaan. [10, s. 33.]

Ilman virtaus kanavassa ei jakaudu tasaisesti, joten mittaus on suoritettava monipistemittauksena. Mittauspisteen on oltava riittävän kaukana virtauksen häiriölähteistä, jotta tulosta voidaan pitää luotettavana. Pyöreiden kanavien mittauspisteet on esitetty kuvassa 4.

Nimellis-halkaisija ^a <i>D</i> mm	Mittauspisteiden sijainti	<i>a</i> mm	<i>b</i> mm	<i>c</i> mm	<i>d</i> mm	Kuva
100 125 160	$a = 0,29 \cdot D$ $b = 0,71 \cdot D$	29 36 46	71 89 114			
200 250 315 400	$a = 0,10 \cdot D$ $b = 0,50 \cdot D$ $c = 0,90 \cdot D$	20 25 32 40	100 125 158 200	180 225 283 360		
500 630 800 1 000 1 250	$a = 0,043 \cdot D$ $b = 0,290 \cdot D$ $c = 0,710 \cdot D$ $d = 0,957 \cdot D$	22 27 34 43 54	145 185 230 290 360	355 445 570 710 890	478 603 766 957 1 196	

^a Kanavastandardin mukaisesti.

Kuva 3. Pyöreiden kanavien mittauspisteet [11, s. 20]

Mittaustuloksena käytetään mitattujen nopeuksien keskiarvoa. Paine-eromittarit laskevat dynaamisen paineen vakiotiheydellä $1,2 \text{ kg/m}^3$, joten mittauksen tulos on korjattava laskennallisesti mittauksilanteen mukaiseen ilman tiheyteen, jotta mittauksen tulos saadaan todellista nopeutta vastaavaksi. [11, s. 16.]

Säätölaitteissa on paine-eromittauksia varten mittausyhteet, jotka mittavat paineen kuristuslaipan eri puolilta. Päätelaitteissa tehtävässä paine-eromittauksessa mitataan paine-eroa huonetilan ja tuloilmakanavan väliltä. Paine-eroon perustuvissa mittauksissa tarvitaan mitattavan paine-eron lisäksi mitattavan laitteen k-kerroin. Laitteen valmistajan määrittämä säätöasennon ja liityntäkoon mukainen k-kerroin löytyy yleensä laitteen säätö- ja asennusoppaasta. [10, s. 20, s. 26–27.]

2.3.2 Sähköteho ja energiankulutus

Taloteknisten laitteiden sähkötehon mittaukset suoritetaan yleisimmin pihtivirtamittarilla. Pihtivirtamittarilla mitattaessa johtimia ei tarvitse irrottaa, vaan pihti pujotetaan mitattavan johtimen ympärille. Pihtimittari muodostaa magneettisydämen, johon on sijoitettu mittauskäämi. Kun mitattava johdin asetetaan

pihdin sisään, syntyy magneettivuo, joka indusoi mittauskäämin vaihtojännitteen. Indusoituva jännite on suoraan verrannollinen johtimessa kulkevan virran voimakkuuteen. Mittarin pitää pystyä huomioimaan myös sähkövirran siniaallon poikkeamat, joten mittarin on oltava mittaustavaltaan true-RMS. [12, s. 32.]

Laitteiden ottama sähköteho saadaan laskettua virran ja jännitteen tulona. Kolmivaihejärjestelmään kytkettyjen laitteiden kokonaisteho on vaihetehojen summa. Tehon yksikkö on kW. [13, s. 276.]

Sähköenergiankulutus voidaan laskea sähkötehon ja laitteen toiminta-ajan tulona. Energiankulutuksen laskennassa huomioidaan koneen käytilinat. Energiankulutuksen yksikkö on kWh.

2.3.3 SFP-luku

Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho, eli SFP-luku, kertoo ilmanvaihtolaitteiston sähkötehon tarvetta 1 m³/s ilmamäärän siirtämiseen. SFP-luvun yksikkö on kW/(m³/s). Ominaissähköteho voidaan laskea koko ilmanvaihtojärjestelmälle, ilmanvaihtokoneelle tai yksittäiselle puhaltimelle. [14, s. 7.]

Ympäristöministeriön asetuksessa uudenrakennuksen energiatehokkuudesta on annettu raja-arvot ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteholle. Koneellisen tulo- ja poistoilmajärjestelmän ominaissähköteho voi olla enimmillään 1,8 kW/(m³/s) ja koneellisessa poistoilmajärjestelmässä enintään 0,9 kW/(m³/s). Rakennuksen käyttötarkoituksen mukaisen sisäilmaston ylläpitämiseksi nämä arvot voidaan ylittää. [15.]

2.4 Investoinnin kannattavuus

Pitkäaikaisia investointeja suunniteltaessa sijoituksen kannattavuuden laske-
misessa käytetään yleisesti nykyarvomenetelmää. Nykyarvomenetelmässä ar-
voidut tuotot ja kustannukset diskontataan tuottotavoitteen suuruisella korko-
kannalla hankintahetken rahan arvoon. Laskentamenetelmässä huomioidaan
myös investoinnin jäännösarvo. Nykyarvomenetelmä kertoo, onko investointi
kannattava. Mikäli arvioitujen tuottojen ja hankintakustannuksen erotus on po-
siitiivinen, on investointi kannattava. [16, s. 103–104.]

3 TUTKIMUKSEN LÄHTÖKOHDAT

Tutkimuksessa halutaan selvittää ilmanvaihtokoneiden uusimisella aikaansaadut säästöt todellisessa käyttötilanteessa. Tarkoituksena on saada laskettua kustannussäästölle suuntaa antava euromääräinen arvio, jota voidaan käyttää investoinnin kannattavuutta laskettaessa.

Tutkimuksen kohteena on Päijät-Hämeen keskussairaalan K-osa. Se on rakennettu vuosien 1972–1976 aikana. Rakennuksessa on 3 maanpäällistä kerrosta, ja lisäksi yksi kellarikerros. Maanpäällisten osien pinta-ala on noin 6700 m². Parhaillaan käynnissä olevan perusparannuksen ja tilojen käyttötarkoituksen muutoksen jälkeen tiloissa tulee toimimaan sisätautien osasto, laboratorio sekä lastentautien poliklinikka. Toisessa kerroksessa sijaitsevan laboratorion ilmanvaihtotekniikka säilyi ennallaan, ainoastaan osa sitä palvelevista ilmanvaihtokoneista uusittiin.

3.1 Vanhan järjestelmän kuvaus

Vanha ilmanvaihtojärjestelmä oli suurilta osin alkuperäinen. Ilmanvaihtokonehuoneen viimeisimmät suunnitelmat oli päivätty 2.5.1974. Ilmanvaihtokoneina toimi osin hihnavetoiset radiaalipuhaltimet sekä osin suoravetoiset kammioasenteiset radiaalipuhaltimet. Järjestelmässä ei ollut lämmöntalteenottoa. Tulo- ja poistoilmakoneet sijaitsivat erillisissä konehuoneissa. Kanavat johdettiin ilmanvaihdon palvelualueille kuuden pystyhormin kautta.

Rakennus-osan ilmanvaihtojärjestelmään käytön aikana tehtyjä muutoksia ei ollut dokumentoitu asianmukaisesti, joten ilmanvaihtokoneiden palvelualueissa ja ilmamäärissä oli runsaasti eroavaisuuksia suunnittelun lähtötietoina olleisiin suunnitelmiin.

3.1.1 Tuloilma

Kohteen tuloilmanvaihto oli toteutettu kahdenkymmenen tuloilmapuhaltimen avulla. Suuri puhaltimien määrä johtui siitä, että tuloilmajärjestelmä oli toteutettu kaksikanavajärjestelmällä. Kaksikanavajärjestelmässä tuloilma johdetaan

palvelualueelle kahdella kanavalla, lämmin- ja kylmäilmakanavalla. Palvelualueella kanavat johdetaan sekoitusyksikköön, jossa tuloilma sekoitetaan halutun lämpöiseksi. Sekoitusyksiköltä tuloilma johdetaan päätelaitteiden kautta huonetiloihin. Tämän takia lähes jokaista aluetta palveli kaksi erillistä puhallinta.

Tuloilmakonehuone toimi myös tuloilmakammiona. Ulkoilmavirta lämmitettiin +16°C lämpötilaan ja johdettiin konehuoneeseen. Tuloilmakoneiden ilmanotto tapahtui konehuoneesta. Tuloilmakoneissa oli puhaltimien jälkeen lämmitys- ja jäähdytyspatterit, joiden avulla pystyttiin säätämään tuloilman lämpötiloja tarpeenmukaisesti. Toimisto- ja potilastilojen tuloilman asetusarvo oli +18°C.

3.1.2 Poistoilma

Poistoilmanvaihtoa hoiti 12 erillistä poistoilmapuhallinta. Jäteilma puhallettiin kahden erillisen poistoilmakammion kautta ulos. Poistoilmaluokan 4 poistoilma oli johdettu yleisilmanvaihdon kanssa samaan kanavistoon. Tästä aiheutui riski hajujen ja muiden poistoilman epäpuhtauksien leviämiseen ympäröiviin tiloihin.

3.2 Uuden järjestelmän kuvaus

Tilojen käyttötarkoituksen muutoksen yhteydessä muutosalueiden ilmanvaihtokoneet ja ilmanvaihtokanavistot uusittiin kokonaisuudessaan. Tilat varustettiin tulo- ja poistoilmanvaihdolla. Vanhat pystyhormit jäivät ennalleen, ja niihin liitettiin hormien ylä- ja alapäissä uusilla kanavilla. Muutosalueiden välissä sijaitsevan laboratorion ilmanvaihtokoneet ja kanavat uusittiin ilmanvaihtokonehuoneen osalta, mutta laboratoriotiloissa ilmanvaihtotekniikka säilyi entisellään. Kanavat toteutettiin pääosin pyöreillä kierresaumakanavilla.

Tulo- ja poistoilmanvaihtokoneita tuli 5 kappaletta. Ilmanvaihtokoneina toimivat Fläkt Groupin valmistamat eQ-ilmankäsittelykoneet. Koneet ovat tehdasvalmisteisia koteloituja koneikoita. Koneet sisältävät ilmansuodattimet, lämmöntalteenoton ja äänenvaimentimet. Puhaltimina toimivat taajuusmuuntajakäyttöiset EC-moottorilla varustetut kammiopuhaltimet. Puhtaanapidon takia

koneiden tuli olla hygieniamallisia, sisäpuolelta pestävissä olevia koneita. Ilmanvaihtokoneiden lämmöntalteenotto oli toteutettu Fläkt Groupin integroidulla Econet-lämmöntalteenottojärjestelmällä.

4 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimusaineisto kerättiin kohteessa suoritettavilla mittauksilla. Vanhan järjestelmän energiankulutuksen arvioimiseksi mitattiin purettuja puhaltimia vastaavien laitteiden sähköenergiankulutusta ja laskettiin puhaltimien hyötysuhteet. Näiden tietojen perusteella pystyttiin arvioimaan toteutunut ostoenergiankulutus ennen ilmanvaihtojärjestelmän uusimista.

Uuden järjestelmän energian kulutusta tarkasteltiin mittauksiin pohjautuvilla laskelmilla. Lämpötilamittaukset pyrittiin tekemään tilanteessa, jossa lämmöntalteenotto toimi täydellä teholla. Puhaltimen sähköenergian kulutus mitattiin säädetystä järjestelmästä käyttötilanteen mukaisilla koneen asetusarvoilla.

4.1 Mittalaitteet

Mittaukset suoritettiin pääosin kohteen urakoitsijoiden mittalaitteilla. Lämpötilaloggerit lainattiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun laboratoriosta mittausten ajaksi. Mittalaitteet ja niiden mittaustarkkuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Käytetyt mittalaitteet

Suure	Merkki/malli	Tarkkuus
Virta	Fluke 323	2 % ± 5 numeroa
Jännite	Fluke 323	1,5 % ± 5 numeroa
Lämpötila	Grand SQ2010	0,1 % mittaustuloksesta + 0,1 % anturin mittausalueesta
Ilmavirta	AirFlow TA465	Paine-ero ± 1 % + 1 Pa Virtausnopeus ± 1,5 %

Mittalaitteista ainoastaan ilmanvaihdon paine-eromittarin kalibrointitodistus oli saatavilla. Mittalaite oli kalibroitu 13.9.2023 ja kalibrointi oli voimassa. Kalibrointitodistus liitteessä 1.

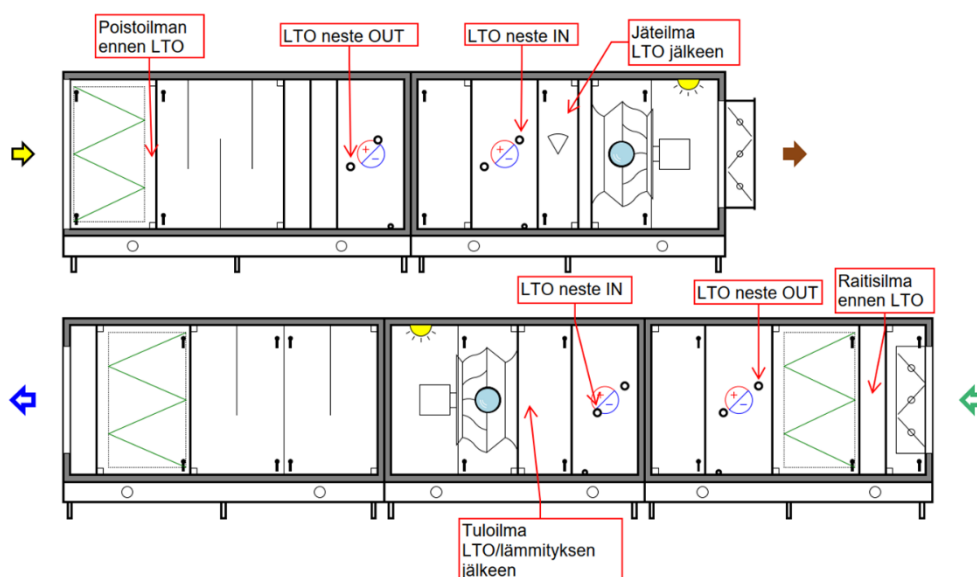
4.2 Mittaukset

Tutkimuksen kannalta tarpeelliset mittaukset suoritettiin joulukuun 2023 ja tammikuun 2024 aikana. Lämmöntalteenottojärjestelmän mittauksia varten olisi vaadittu osittain kovempia pakkasia, jolloin LTO-laitteiden koko kapasiteetti olisi ollut käytössä. Tilannetta pyrittiin kompensoimaan nostamalla tuloilman lämpötilaa siihen asti, että lämmöntalteenotto saatiin toimimaan täydellä teholla.

4.2.1 Lämpötilamittaukset

Lämpötilamittaukset lämmöntalteenoton lämpötilasuhteen ja tehon selvittämiseksi suoritettiin 21.12.2023–3.1.2024 välisenä aikana. Mittausten kesto vaihteli yhden ja neljän vuorokauden välillä. Osassa mittauksia ulkoilman lämpötila oli liian korkea, jotta lämmöntalteenottolaitteiston koko kapasiteetti olisi saatu käyttöön. Näissä tapauksissa tuloilman lämpötilaa nostettiin normaalia käyttötilannetta korkeammalle, jotta mittaukset saatiin tehtyä.

Uuden järjestelmän energiankulutuksen laskemiseksi mitattiin ilmanvaihtokoneista ilmavirran lämpötilat lämmöntalteenottopattereiden molemmilta puolilta, sekä lämmönsiirtonesteen lämpötila ennen ja jälkeen lämmöntalteenottopattereiden. Mittauspisteet esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Mittauspisteiden sijainnit

Raitisilman ja poistoilman lämpötila mitattiin yhdestä pisteestä, koska voitiin olettaa ilmvirran sekoittuneen ja olevan tasalämpöistä. Tuloilman ja jäteilman lämpötilamittaus tehtiin neljästä pisteestä ja laskelmissa käytettiin lämpötilana mittauspisteiden keskiarvoa.

4.2.2 Ilmamäärämittaus

Ilmamäärämittaukset suoritettiin pääosin ilmanvaihtokonehuoneessa sijaitsevista säätöpelleistä paine-eromittauksella. Säätöpelteinä oli Halton PRA-pellit, joiden mittausyhteistä mitattiin säätöpellin paine-ero. Ilmavirta laskettiin kaavalla 7 [10, s. 40].

$$q_v = k * \sqrt{\Delta p_m} \quad (7)$$

jossa

q_v = ilman tilavuusvirta [l/s]

k = laitteen kalibroidun ilmvirran kerroin $\left[\frac{l/s}{\sqrt{Pa}}\right]$

Δp_m = paine-ero [Pa]

K-kerroin vaihtelee laitteen koon ja säätöasennon mukaan. Kertoimet katsottiin valmistajan säätöoppaasta. Säätöpelltien asennuksessa oli huomioitu riittävät suojaetäisyydet mittauslaitteeseen.

Vanhan järjestelmän kanavissa ei ollut mittausyhteillä varustettuja säätöpeltejä, joten niiden osalta mittaukset tehtiin pitot-putken avulla mittaamalla ilman virtausnopeus. Virtausnopeutena käytettiin mittauspisteiden keskiarvoa ja ilman tilavuusvirta laskettiin virtausnopeuden ja kanavan poikkipinta-alan tulona kaavalla 8 [1, s. 634].

$$q_v = v * A \quad (8)$$

missä

q_v = ilman tilavuusvirta [l/s]

v = ilman virtausnopeus [m/s]

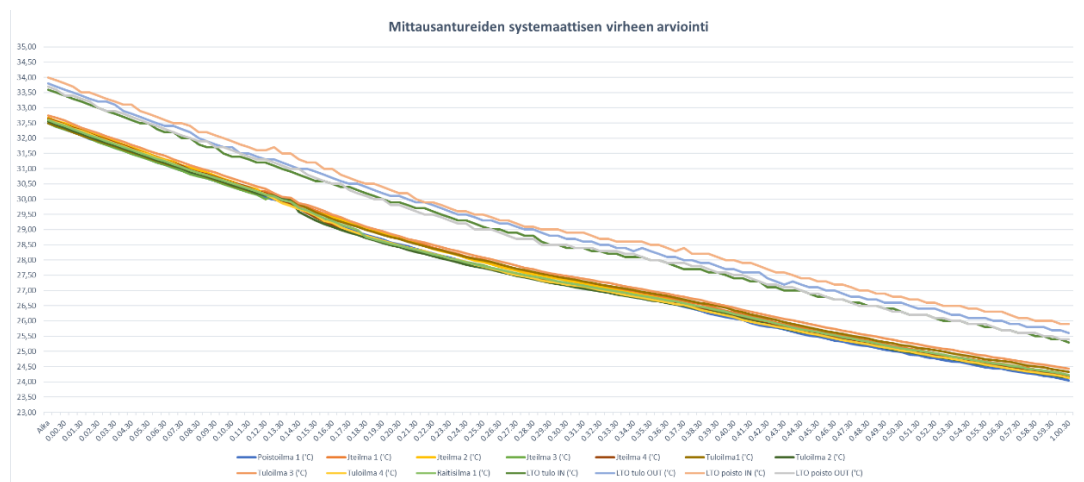
A = kanavan poikkipinta-ala [m²]

4.2.3 Mittausvirheen arviointi

Lämpötilaloggerin antureiden välillä havaittiin mittaustuloksissa eroavaisuuksia. Mittalaitteen anturit testattiin koemittauksin, ja mittauksissa käytettävät anturit valikoitiin siten, että mittaustulokset olisivat mahdollisimman yhtenevät.

Antureiden keskinäinen mittauserpävarmuus testattiin upottamalla anturit muovipussin sisällä vesihauteeseen tunnin ajaksi. Veden jäähtyessä pystyttiin vertailemaan antureiden antamia mittauservoja. Mittauksen tulokset esitetty kuvassa 4.

Antureiden välisen mittauserheen todettiin pysyvän lähes vakiona mitattavasta lämpötilasta riippumatta, eli mittauserve oli systemaattinen. Systemaattinen virhe korjattiin laskemalla, korjaamalla mittaustulokset lähimpänä keskiarvoa olevaan mittaustulokseen.



Kuva 4. mittausantureiden vertailumittaus

Koska lämpötilasuhteen laskenta tehdään mittausten välisistä suhteista, on mittaustulosten kannalta suurempi merkitys mittausten keskinäisellä vertailtavuudella kuin absoluuttisella mittaustarkkuudella. Tämän takia korjauksen jälkeisiä arvoja käytettiin laskelmissa, eikä mittarin ilmoitettua mittauserpävarmuutta huomioitu.

Ilmamäärien mittauksessa mittauserpävarmuus laskettiin standardin SFS 16211:2015 mukaisesti. Vakioepävarmuus laskettiin säätöpelleistä tehtäville

mittauksille ja pitot-putkimittauksille erikseen. Laskenta tehtiin kaavalla 9. [11, s. 9.]

$$u_m = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (9)$$

jossa

u_m = Vakiomittausepävarmuus	[%]
u_1 = Laitteen vakioepävarmuus	[%]
u_2 = Mittausmenetelmän vakioepävarmuus	[%]
u_3 = Lukeman vakioepävarmuus	[%]

Mittausmenetelmälle oli ilmoitettu taulukkoarvot standardissa, ja niitä käytettiin laskennassa [11, s. 9]. Laitteen vakioepävarmuutena käytettiin laitevalmistajan ilmoittamaa mittaustarkkuutta paine-eromittauksessa 1 % + 1 Pa ja pitot-putkimittauksessa 1,5 % virtausnopeudesta. Paine-ero ja ilman virtausnopeutta mitattaessa paine-eromittarin lukemassa oli melko suurta vaihtelua, ja tarkan lukeman saaminen ei ollut mahdollista. Tämän takia lukemaepävarmuutena käytettiin suhteellisen epävarmuuden sijaan paine-eromittauksissa arvoa ± 5 Pa ja pitot-putkimittauksissa 0,5 m/s.

4.3 Vanhan järjestelmän energiankulutus

Vanhan järjestelmän energiankulutuksen arvioimiseksi tehtiin mittauksia kahdesta toiminnassa olevasta puhaltimesta, jotka vastasivat uusilla ilmanvaihtokoneilla korvattuja puhaltimia. Vanhojen puhaltimien osalta ei ollut tarkkaa dokumentaatiota puhallintyypeistä. Saman aikakauden ilmanvaihtokonehuoneiden perusteella oletettiin, että tuloilmapuhaltimet olivat hihnavetoisia ja poistoilmapuhaltimet suoravetoisia.

Toinen mitatuista puhaltimista oli kiilahihnavetoinen radiaalipuhallin, joka toimi tuloilmapuhaltimena. Puhaltimen jälkeen kanavassa oli lämmitys- ja jäähdytyspatterit, joiden avulla tuloilman lämpötila säädettiin haluttuun arvoon. Toinen puhallin oli poistoilmapuhaltimena toimiva suoravetoinen kammioon sijoitettu radiaalipuhallin, jonka poistoilma johdettiin kanavaa pitkin poistoilmakammioon.

4.3.1 SFP-luku ja puhaltimien energiankulutus

Puhaltimien SFP-luvun määrittämiseksi mitattiin puhaltimen sähköteho ja ilmavirrat. Kanavien ilmavirrat mitattiin pitot-putken avulla. Puhaltimen hyötysuhteen laskemiseksi tarvittiin sähkötehon lisäksi puhaltimen hyötyteho, joka tarvitaan ilmavirran liikuttamiseksi. Puhaltimen hyötytehon laskemiseksi mitattiin ilmavirran ja sähkötehon lisäksi puhaltimen paineenkorotus. Mittaus tehtiin mittaamalla paine-ero puhaltimen yli.

4.3.2 Tuloilman lämmittämisen energiankulutus

Koska vanhassa järjestelmässä ei ollut lämmöntalteenottoa, laskettiin tuloilman lämmittämisen energiankulutus koko tuloilmavirralle lämpötilaeron mukaan. Tuloilman lämmittämiseen käytetyn energian määrän laskemisessa käytettiin mitattua tilavuusvirtaa. Tuloilman normaalitilanteen lämpötilana pidettiin laskennassa +18 °C ja ilman tiheytenä 1,2 kg/m³. Puhaltimen aikaansaama lämmön nousu ilmavirrassa huomioitiin laskelmissa. Laskennallisena kokonaisilmavirtana käytettiin tulosten vertailtavuuden vuoksi uuden järjestelmän mitattuja ilmavirtoja.

4.4 Uuden järjestelmän energiankulutus

Uuden järjestelmän energiankulutuksen laskemisessa käytettiin mitattuja ilmavirtoja ja lämmöntalteenoton mittauksissa saatuja lämmöntalteenoton lämpötilasuhteita. Lämmöntalteenoton lämpötilasuhteen avulla laskettiin ulkoilman lämpötila, johon asti tuloilman lämmittämiseen ei tarvita lisälämmitysenergiaa. Sähköenergiankulutuksessa huomioitiin ainoastaan puhaltimien käyttämä sähköenergian määrä ja lämmitysjärjestelmän pumppu jätettiin huomioimatta.

4.4.1 Econet-yksikön lämpötilasuhte ja lisälämmityksen tarve

Econet-yksikön lämmöntalteenoton tuloilman lämpötilasuhteen määrittäminen poikkesi tavanomaisesta lämpötilasuhteen laskennasta. Lämpötilasuhte on poisto- ja raitisilman lämpötilojen erotuksen suhde tuloilman lämpötilan muutokseen, mutta Econet-yksikön lämpötilasuhteen laskennassa on huomioitava

myös lämmönsiirtonesteeseen tuotu lisälämmitysenergia. Kaavalla 6 laskettaessa lisälämmitysenergian osuus poistetaan käyttämällä kertoimena lämmönsiirtonesteen lämpötilan muutosta LTO-patterissa [6, s. 6].

$$\eta_t = \frac{(GT42 - GT41) * (GT10 - GT00)}{(GT40 - GT41) * (GT20 - GT00)} \quad (10)$$

jossa

GT00 = Raitisilman lämpötila	[°C]
GT10 = Tuloilman lämpötila	[°C]
GT20 = Poistoilman lämpötila	[°C]
GT40 = Nestepiirin lämpötila ennen tuloilmapatteria	[°C]
GT41 = Nestepiirin lämpötila tuloilmapatterin jälkeen	[°C]
GT42 = Nestepiirin lämpötila poistoilmapatterin jälkeen	[°C]

Tuloilman lisälämmityksen tarve laskettiin lämmöntalteenottopatterin jälkeisen ja tuloilman tavoitearvon välisen lämpötilaeron avulla. Lämmöntalteenoton jälkeinen lämpötila laskettiin tuloilman lämpötilasuhteen kaavasta johdetulla kaavalla 11 [4, s. 402]. Laskennassa käytettiin arvoina mittausjakson keskilämpötiloja.

$$t_{LTO} = \eta_t * (t_s - t_u) + t_u \quad (11)$$

jossa

t_{LTO} = lämmöntalteenoton jälkeinen lämpötila	[°C]
η_t = tuloilma lämpötilasuhte	[-]
t_s = poistoilman lämpötila	[°C]
t_u = ulkoilman lämpötila	[°C]

Lämpötilan nousu tuloilmapuhaltimissa lisättiin lämmöntalteenoton jälkeiseen lämpötilaan ennen lisälämmitystehon laskemista. Laskennassa käytettiin puhaltimien mitattuja sähkötehoja. Uusissa ilmanvaihtokoneissa puhaltimet sijaitsevat ilmapirrassa, joten koko puhaltimen sähköteho siirtyi lämpötehoksi tuloilmaan.

Lisälämmityksen tulee kattaa tuloilman lämmittäminen tuloilman tavoitelämpötilaan. Lämmöntalteenoton jälkeisen lämpötilan ja puhaltimen aikaansaaman lämpötilannousun jälkeinen lisälämmityksen tehontarve laskettiin kaavalla 12 [1, s. 401].

$$\dot{Q}_{\text{lisä}} = \rho * q_v * C_p * (t_t - t_{LTO}) \quad (12)$$

jossa

$\dot{Q}_{\text{lisä}}$ = lisälämmityksen tehontarve	[kW]
t_{LTO} = lämmöntalteenoton jälkeinen lämpötila	[°C]
t_t = tuloilman lämpötila	[°C]
ρ = ilman tiheys	[kg/m ³]
q_v = ilman tilavuusvirta	[m ³ /s]
C_p = Ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]

Mittaukset tehtiin ilmavirrasta, jonka lämpötila oli 18–21 °C, joten ilman tiheyden kompensointia ei tehty. Energiankulutus laskettiin tehontarpeen ja käyttöajan tulona. Kaikissa koneissa käyttöaika oli 24/7.

5 TULOKSET

Mittauksista jäi alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen pois ilmanvaihtokone TK/PK308, koska tiloja ei saatu siihen valmiuteen, että ilmanvaihtokoneet olisi voitu käynnistää. Lisäksi TK309:n yksi kanava oli mittausten aikana poissa käytöstä. Sähkö- ja hyötytehojen mittaukset korjattiin laskennallisesti vastaamaan käyttötilanteen arvoja, ja säästö-laskelmissa käytettiin korjattuja arvoja. Mitattujen ja tarkastelun kohteena olevien koneiden tuloilmavirta oli 8,8 m³/s ja poistoilmavirta 10,5 m³/s. Mittauspöytäkirja esitetty liitteessä 2.

5.1 Vanhan järjestelmän energiankulutus

Vanhan järjestelmän tuloilman vertailupuhaltimen TK33:n (kuva 5) ilmavirrat mitattiin pitot-putkella. Mittaukset tehtiin jokaisessa kanavassa kahdeksasta mittauspisteestä, ja virtausnopeutena käytettiin näiden mittausten keskiarvoa. Ilmanvaihtokanavien virtausnopeudet olivat 7,5–9,1 m/s. Puhaltimen ilmavirraksi saatiin (3,6 ± 0,3) m³/s. (liite 2).



Kuva 5. TK33 hihnavetoinen radiaalipuhallin



Kuva 6. PK62a sähkötehon mittaus

Sähköteho mitattiin sähkökeskuksesta lähtevistä johtimista. Puhaltimen sähköteho oli 7,3 kW. Ominais sähkötehoksi mittausten mukaisella ilmavirralla ja sähköteholla laskettuna tuli $2,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$. Puhaltimen hyötäteho oli 3,3 kW, joten hyötysuhteeksi saatiin 45,1 %. (liite 3).

Tuloilmapuhaltimen moottori sijaitsi ilmavirran ulkopuolella, joten sähkötehosta ilmaan siirtyvän lämpötehon kertoimena käytettiin arvoa 0,6 [3, s.454]. Mitatulla sähköteholla ja ilmavirralla tuloilman lämpötilan nousu tuloilmapuhaltimessa oli 1°C .

Vanhan poistoilmapuhaltimen vertailupuhallin PK62a ilmavirrat mitattiin puhaltimen imupuolen suorakaidekanavasta pitot-putkella. Mittauspisteitä oli 21 kappaletta. Ilmavirran nopeudeksi saatiin 6,7 m/s ja tilavuusvirraksi $(2,4 \pm 0,2) \text{ m}^3/\text{s}$ (liite 2).

Sähköteho mitattiin sähkökeskuksen johtimilta (kuva 6). Sähkötehoksi saatiin 2,2 kW ja ominais sähkötehoksi $0,92 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$. Puhaltimen hyötysuhde 46,9 % oli lähellä tuloilmapuhaltimen hyötysuhdetta, mutta SFP-luvussa oli merkittävä ero, johtuen puhaltimelta vaaditusta paineenkorotuksesta. (liite 3).

Puhaltimien energiankulutus uudenjärjestelmän mukaisessa toimintapisteessä laskettiin mitatun hyötysuhteen avulla. Puhallin lakeja tai SFP-lukua ei voitu käyttää laskennassa, koska järjestelmien laitoskäyrät poikkesivat toisistaan.

Laskenta tehtiin jakamalla uuden ilmanvaihtokoneen hyötyteho vanhan puhaltimen hyötysuhteella. Puhaltimien lasketut energiankulutukset esitetään liitteessä 3.

5.2 Uuden järjestelmän energiankulutus

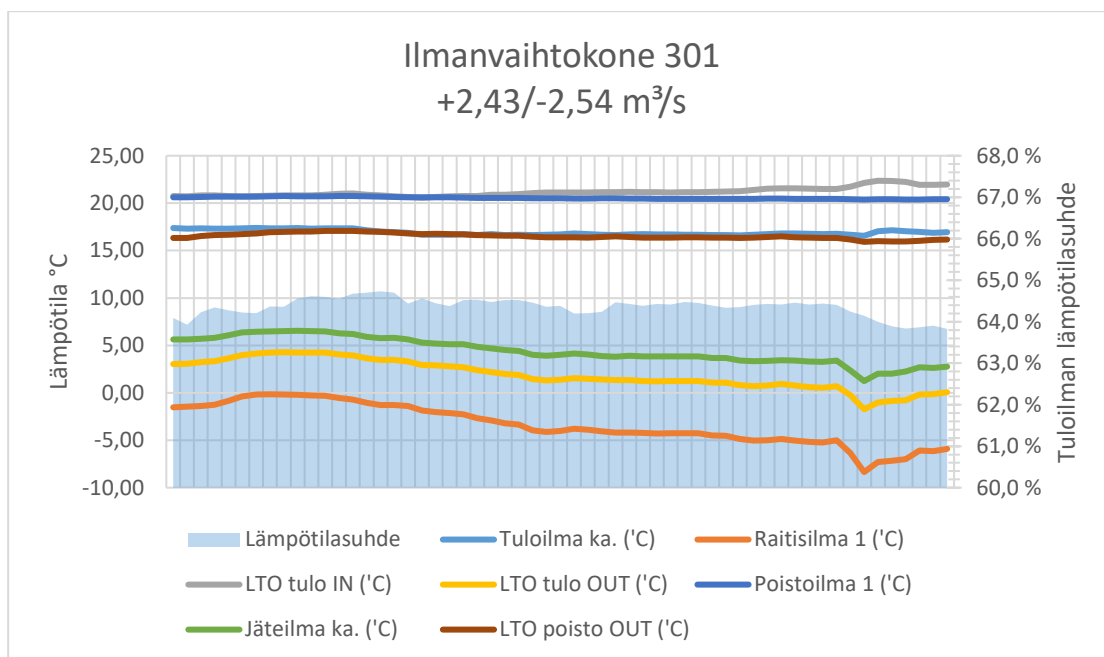
Lämpötilamittaukset suoritettiin 21.12.2023–2.1.2024 välisenä aikana. Mittausjaksolla ulkoilman lämpötila vaihteli $-22\dots 0$ °C välillä. Sähkötehot mitattiin 28.12.2023. Ilmavirtojen mittauspöytäkirja esitetty liitteessä 2 ja sähkötehojen mittauspöytäkirja liitteessä 3.

5.2.1 Ilmanvaihtokone 301

Ilmanvaihtokone 301 palvelee osaa uudesta keuhko-osastosta, ja ilmanvaihdon palvelualueen pinta-ala on noin 1000 m^2 . Mittaukset suoritettiin 23.12.–27.12.2023 välisenä aikana, jolloin ulkoilman lämpötila vaihteli $0^\circ\text{C}\dots-8^\circ\text{C}$ välillä. Lämpötilamittaukset on esitetty kuvassa 7. Mittausolosuhteet olivat optimaaliset, ja lämmöntalteenotto toimi täydellä teholla.

Ilmamäärämittaukset tehtiin ilmanvaihtokonehuoneessa sijaitsevista PRA-säätöpelleistä. Tuloilmakoneessa mitattavia säätöpeltejä oli yksi kappale, ja poistoilmakoneessa kolme kappaletta. Tuloilmavirraksi saatiin $(2,4 \pm 0,1)$ m³/s ja poistoilmavirraksi $(2,5 \pm 0,1)$ m³/s. Ilmamäärämittaukset esitetty mittauspöytäkirjassa liitteessä 2.

Molemmissa ilmanvaihtokoneissa oli yksi taajuusmuuntajaohjattu kammiopuhallin. Puhaltimien sähköteho mitattiin sähkökeskukselta johdonsuojakatkaisijoiden jälkeen. Molemmat puhaltimet toimivat noin 2 kW teholla. Ilmanvaihtokoneen ominaissähkötehoksi saatiin $(1,60 \pm 0,12)$ kW/(m³/s) ja puhaltimien hyötysuhteeksi 70,4 % ja 73,0 %.



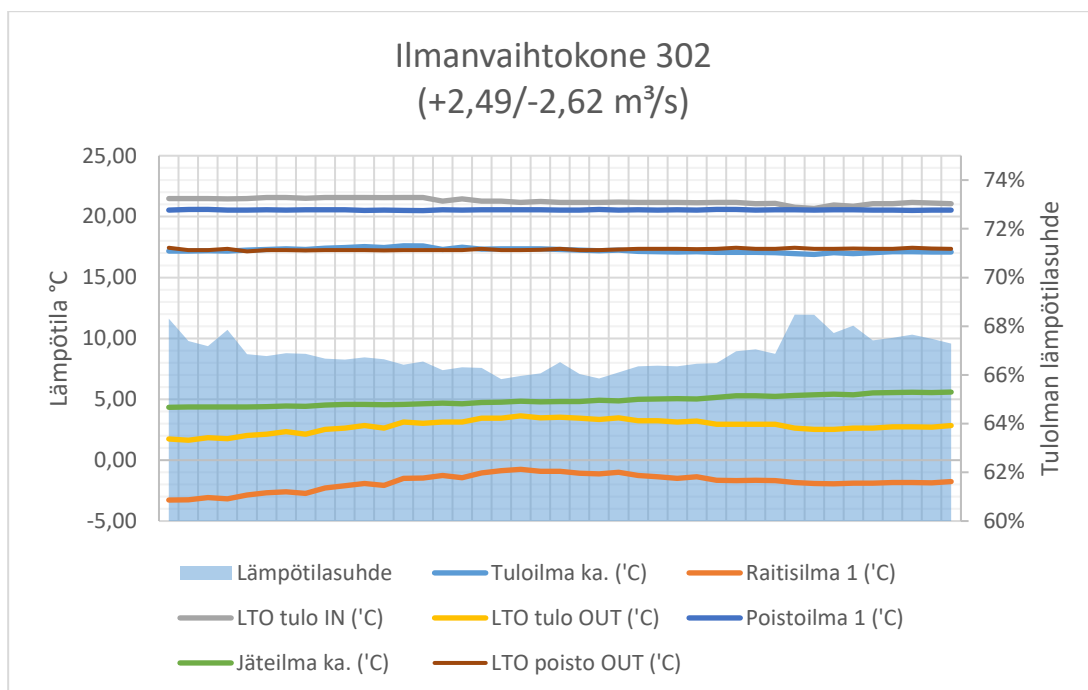
Kuva 7. Lämpötilamittaukset TK/PK301

Tuloilman lämpötilasuhde oli mittauksien ajalta keskimäärin 64,4 %. Ulkolämpötilan laskiessa mittausjakson loppupuolella, lämmöntalteenottopatterin huurteenpoisto laski hieman lämpötilasuhdetta, mutta sen vaikutus oli vähäinen. Puhallin nosti tuloilman lämpötilaa 0,7 °C. Lisälämmitystä tarvittiin ulkolämpötilan laskiessa alle +7,9 °C.

5.2.2 Ilmanvaihtokone 302

Ilmanvaihtokone 302 palvelee osaa keuhko-osastosta koneen 301 rinnalla. Koneiden väliset palvelualueet rajoittuvat palo-osastojen mukaan. Ilmanvaihdon palvelualueen koko on noin 1000 m². Mittaukset suoritettiin 21.12.–22.12.2023 aikana. Ulkoilman lämpötilan vaihteluväli mittauksen aikana oli -3...0 °C. Lämmöntalteenotto toimi koko mittauksen ajan täydellä teholla. (kuva 8).

Ilmanvaihtokoneiden sähköteho mitattiin koneen sähkökeskukselta. Tulo- ja poistoilmakoneiden sähkötehoksi saatiin kummallekin noin 2 kW. Puhaltimien hyötysuhteet olivat tuloilmapuhaltimessa 69,7 % ja poistoilmapuhaltimessa 73,6 %. Ominais sähköteho oli mittauksien mukaan (1,54 ± 0,11) kW/(m³/s). (liite 3).



Kuva 8. Lämpötilamittaukset TK/PK 302

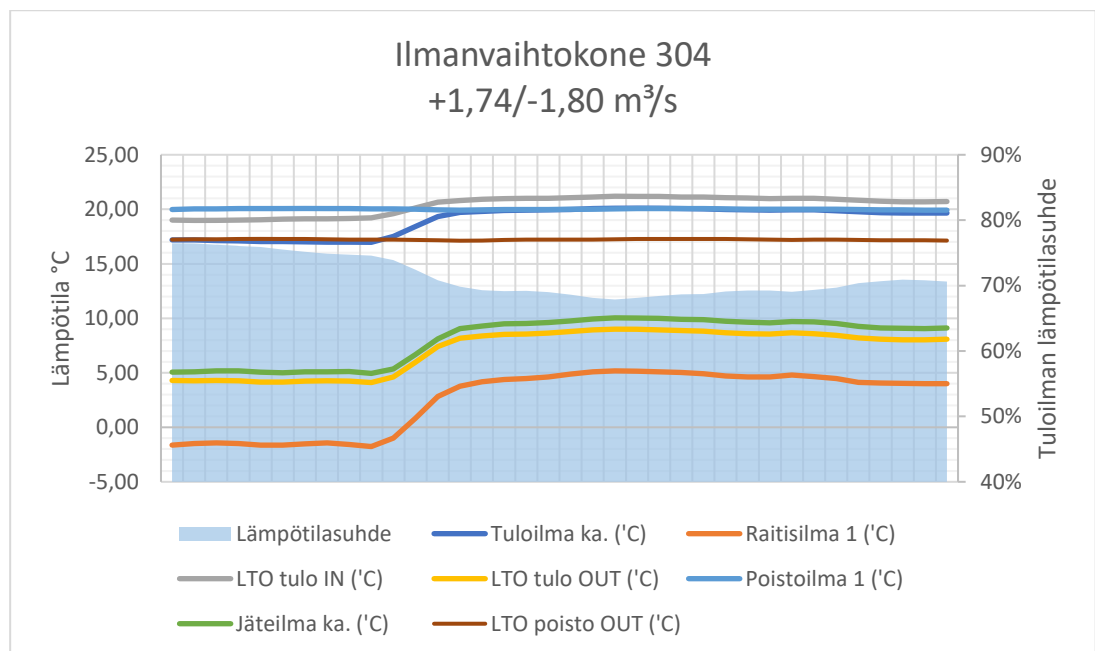
Ilmanvaihtokone 302 oli ominaisuuksiltaan täysin vastaava kuin 301, mutta mittaustuloksissa oli jonkin verran eroavaisuuksia. Eroavaisuudet voivat selittyä osittain, sillä että, tulo- ja poistoilmavirtojen suhde oli hieman erilainen koneiden välillä. Tuloilman lämpötilasuhde oli mittausten mukaan hieman korkeampi, keskimäärin 66,8 %. Puhallin nosti tuloilman lämpötilaa 0,7 °C. Lisälämmitystä tarvittiin ulkolämpötilan laskiessa alle +6,9 °C.

5.2.3 Ilmanvaihtokone 304

Ilmanvaihtokone 304 palvelee lasten poliklinikkaa. Poliklinikalla on toimenpidehuoneita, ja tilat toimivat vakioilmavirtajärjestelmällä, pois lukien kipsaushuonetta, jossa on ilmavirran tehostusmahdollisuus toimenpiteiden aikana. Mittaukset tehtiin tehostamattomilla ilmavirroilla. Ilmanvaihdon palvelualueen pinta-ala on noin 800 m².

Puhaltimien sähkötehoksi mitattiin tuloilmapuhaltimen osalta 1,7 kW ja poistoilmapuhaltimesta 1,5 kW. Ominaisähkötehoksi saatiin (1,75 ±0,14) kW/(m³/s). Puhallin lämmitti tuloilmaa 0,8 °C. (liite 3).

Tuloilmakoneen ulkoilma otettiin ilmanvaihtokonehuoneiden välisestä käytävästä, jonka ulkoilmasäleiköt sijaitsivat noin 40 metrin päässä ilmanvaihtokoneen ilmanotosta. Ilma lämpeni huomattavasti enne kulkeutumistaan ilmanvaihtokoneelle. Mittausajankohtana ulkoilman lämpötila vaihteli -3°C ja -6°C välillä, mutta koneen ilmanottoaukolta mitattu lämpötila oli mittauksen aikana noin $+5^{\circ}\text{C}$. Mittauksen alussa avattiin ulkoilmakammion haalausovet, jotta lämmöntalteenotto saataisiin toimimaan täydellä teholla. Ovet oli kuitenkin suljettava yön ajaksi, ja mittauksien ajaksi asetettiin tuloilman lämpötilan tavoitearvoksi $+20^{\circ}\text{C}$. Tästä aiheutui ongelma, joka havaittiin vasta mittauksien tuloksia analysoidessa. Koska tuloilman lämpötila oli poistoilman lämpötilaa suurempi, oli lisälämmitykselle tarvetta jatkuvasti. Mittauksilla ei saatu todettua lämpötilaa, jossa lisälämpöä todellisessa käyttötilanteessa tarvittaisiin lämmöntalteenoton avuksi. Lämpötilamittaukset esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Lämpötilamittaukset TK/PK304

Tuloilman lämpötilasuhteeksi saatiin mittauksissa keskimäärin 67,9 %. Paras lämpötilasuhte saatiin ulkoilman ollessa pakkasella, ja se heikkeni merkittävästi, kun ulkoilman lämpötila nousi. Tammikuun lopun pakkasjaksoilla seurattiin automaatiojärjestelmästä tuloilman lämpenemistä tuloilmakäytävällä. Tuloilma lämpeni ennen koneen ilmanottoa merkittävästi ja laski ulkolämpötilan ollessa -17°C alimmillaan -4°C lämpötilaan. Lämmitysenergian laskennassa käytetään koneen 304 osalta tuloilman lämpötilana arvoa ulkolämpötila $+6^{\circ}\text{C}$.

Lämmöntalteenoton ja puhaltimen aiheuttaman lämmön nousun jälkeen tuloilma tarvitsee lisälämpöä ulkolämpötilan laskiessa alle 0°C.

Lämmöntalteenottopatterin tehon mittaustuloksia analysoitaessa todettiin, että tehon osalta mittaustuloksia ei voida pitää luotettavina. Tuloilman lämmittämisen tehontarve oli vähäinen, joten poistoilmapatteri ei toiminut täydellä teholla. Lämmönsiirtoneste jäähtyi tuloilmapatterissa noin +9°C lämpötilaan, jolloin lämpötilaero poistoilmaan jäi vähäiseksi. Tästä syystä poistoilmapatterin tehoa ei pystytty luotettavasti arviomaan mittaustuloksista.

5.2.4 Ilmanvaihtokone 309

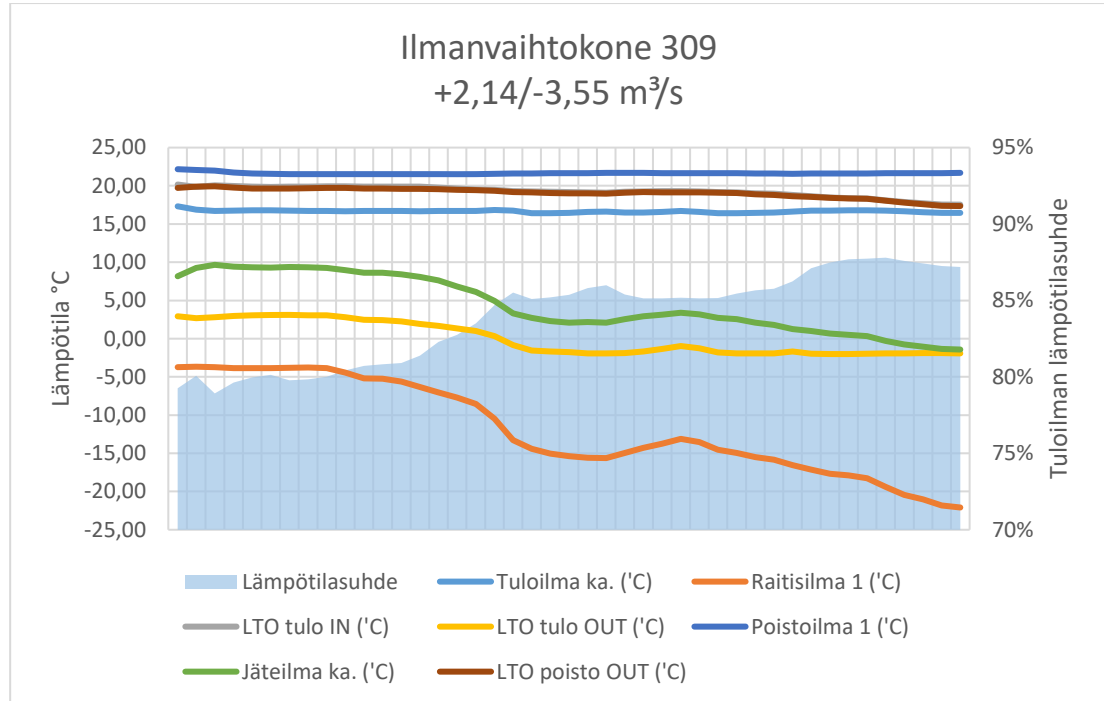
Ilmanvaihtokone 309 palveli käytössä olevia laboratoriotiloja. Ilmanvaihtokoneen palvelualueen pinta-ala on noin 2000 m². Laboratoriossa oli useita veto-kaappeja, ja mittaushetkellä poistoilman määrä suhteessa tuloilmaan oli huomattavan suuri. Mittausajankohtana ulkoilman lämpötila vaihteli -3°C ja -22°C välillä, joten mittauksissa saatiin kattava kuva lämmöntalteenottojärjestelmän toiminnasta.

Mittausajankohtana tuloilmakoneen kaikkia palvelualueita ei ollut vielä liitetty järjestelmään, joten ilmavirtojen suhde poikkesi todellisesta käyttötilanteesta. Käyttötilanteen tehontarve- ja energiankulutuslaskelmat tehtiin puhallinlakien mukaisesti lasketuilla arvoilla.

Ilmanvaihtokoneissa oli muista poiketen kaksi taajuusmuuntajaohjattua kammiopuhallinta rinnan kytkettyinä. Puhaltimien sähkövirta mitattiin konekeskukseen syöttöjohdoista ennen koneen virtakytkintä. Näin saatiin molempien puhaltimien virta mitattua yhdellä mittauksella. Mittaustilanteen mitatut arvot ja käyttötilanteen laskennallinen paineenkorotus ja sähköteho esitetty liitteessä 3.

Mittaushetkellä tuloilmapuhaltimen teho oli 1,4 kW ja käyttötilanteen laskennalliseksi teho 3,6 kW. Poistoilmapuhaltimen teho oli 4,17 kW. Mittaustilanteessa puhaltimien hyötysuhde jäi melko alhaiseksi, 62,4 % ja 64,0 %. Omaissa sähkötehoksi mitattiin (1,57 ± 0,12) kW/(m³/s). Omaissa sähkötehoa vääristää suuri ero koneiden ilmavirroissa. Käyttötilanteen laskennallisilla arvoilla

hyötysuhde parani ja ominaissähkötehoksi tuli ($2,19 \pm 0,12$) kW/(m³/s). Puhaltimilta vaadittu muita koneita suurempi paineenkorotus näkyy heikentävästi SFP-luvussa.



Kuva 10. Lämpötilamittaukset TK/PK 309

Kuvasta 10 voidaan todeta, että lämmöntalteenotto alkoi toimimaan täydellä teholla vasta noin -13°C lämpötilassa. Lämmöntalteenoton lämpötilasuhde oli mittaustilanteessa keskimäärin 83,9 %. Laskennallisesti lämmöntalteenotto riitti lämmittämään tuloilman -22°C asti. Mittausjaksolla ulkoilman lämpötila laski kylmimmillään $-22,5^{\circ}\text{C}$ ja lisälämpöenergiaa ei tarvittu. Laboratorion laitteista syntyvä lämpökuorma nostaa poistoilman lämpötilaa, jolloin myös lämmöntalteenotolla saadaan enemmän lämpöenergiaa talteen.

Tuloilman tilavuusvirta lisääntyi mittausten jälkeen $0,8\text{m}^3/\text{s}$. Todellisen käyttötilanteen ilmavirralla laskettuna lämmöntalteenoton teho riittäisi kattamaan lämmittämisen tehotarpeen $-13,8^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan asti, kun huomioidaan myös ilman lämpeneminen 1°C puhaltimessa.

6 OSTOENERGIANKULUTUS

Ostoenergian kulutus laskettiin tuloilman lämmittämisen ja puhaltimien sähköenergian osalta. Laskennassa ei huomioitu lämmöntalteenotolla saatavaa

hyötyä jäähdytysenergiankulutuksessa, eikä lämmityspiirin kiertovesipumppujen energiankulutusta. Hyvinvointialueella on pörssisähkösopimus. Laskenta tehtiin vuoden 2023 pörssisähkön keskihinnalla, 5,6 snt/kWh (alv. 0 %) [17, s. 3] ja 0,4 snt/kWh marginaalilla. Sähkön siirtohintana käytettiin Lahti Energian hinnaston mukaista hintaa 3,47 snt/kWh. Julkisen sektorin rakennukset kuuluvat sähköveroluokkaan 1, jolloin sähkövero on 2,253 snt/kWh [18]. Sähkön kokonaishinnaksi muodostuu 11,72 snt/kWh. Kaukolämmön sopimushintaa ei saatu opinnäytetyön tilaajalta tietoon, joten lämmitysenergiankulutuksen laskenta tehdään lämmönmyyjän hinnaston mukaan. Lämmönmyyjällä on käytössä kausihinnoittelu. Kausihinnat esitetty kuvassa 11.

Hintakausi		€/MWh
1.11. – 31.3.	Talvikausi	76,01
1.4. – 31.5.	Kevätkausi	54,10
1.6. – 31.8.	Kesäkausi	30,21
1.9. – 31.10.	Syyskausi	54,10

Kuva 11. Kaukolämmön hinnat v.2024 (alv. 0 %) [19]

Ilmanvaihdon lämmitysenergian kulutus painottuu talvikaudelle. Kuvasta nähdään, että lämpöenergian hinta on korkeimmillaan silloin, kun energiankulutus on suurinta.

6.1 Tuloilman lämmittämisen ostoenergiankulutus

Tuloilman lämmittämisen energiankulutus laskettiin vuoden 2022 toteutuneiden lämpötilojen mukaan. Vuorokausikohtaiset keskilämpötilatiedot kerättiin Lahti Energian Oma Watti -palvelusta. Lämpötilat ja laskennallinen energiankulutus esitetty liitteessä 4.

Vanhassa järjestelmässä tuloilman lämmitystä tarvittiin ulkoilman lämpötilan laskiessa alle +15°C, kun huomioidaan ilman lämpeneminen tuloilmapuhaltimissa. Koska lämmöntalteenottoa ei ollut, tuli koko tuloilmavirta lämmittää ulkoilman lämpötilasta +17°C lämpötilaan. Oma Watti -palvelun mukaan vuonna 2022 oli tuloilman lämmittämisen tarve 308 päivänä. Käyttötilanteen ilmavirralla laskettuna tuloilman lämmittämisen tehontarve oli 11,5 kW/°C.

Uusilla ilmanvaihtokoneilla lämmöntalteenotto riittää kattamaan tuloilman lämmityksen tarpeen kokonaisuudessaan +7°C ulkolämpötilaan asti. Lisälämmitykselle olisi ollut tarvetta vuonna 2022 203 päivänä.

Laskelmien mukaan lämmitysenergiankulutus vanhalla järjestelmällä oli vuonna 2022 yhteensä 1040 MWh. Uudella järjestelmällä lämmitysenergiankulutukseksi laskettiin 260 MWh. Vanhan järjestelmän lämmitysenergian tarpeesta 12 % tuli päivinä, jolloin uusi järjestelmä ei tarvinnut lainkaan lisälämpöä. Lämmöntalteenoton avulla pystyttiin kattamaan 75 % vuotuisesta lämmitysenergian tarpeesta.

6.2 Sähköenergiankulutus

Uuden järjestelmän sähkötehon mittauksissa koneiden yhteenlasketuksi sähkötehoksi saatiin (16,8 ±0,4) kW. Tuloilmakoneen 309 toimintapisteen muutoksen takia tehontarve kasvoi arvoon (19,0 ±0,4) kW. Koneet käyvät jatkuvasti vakio ilmavirroilla, joten energiankulutuksen laskenta tehtiin 24 h/vrk ja 365 vrk käyttöajalla. Vanhojen puhaltimien tehontarve laskettiin mitatun hyötysuhteen perusteella käyttötilanteen toiminta pisteessä. Sähköenergiankulutus on esitetty kuvassa 12.

Uudet koneet				Vanhat puhaltimet	
Kone	qv (m ³ /s)	P (kW)	Energiankulutus (kWh/a)	P (kW)	Energiankulutus (kWh/a)
TK301	2,43	1,99	17433	3,11	27242
PK301	2,52	2,04	17838	3,17	27781
TK302	2,49	2,04	17838	3,15	27612
PK302	2,62	2,01	17635	3,16	27673
TK304	1,74	1,69	14798	2,36	20645
PK304	1,80	1,46	12771	1,95	17108
TK309	2,94	3,60	31536	4,99	43692
PK309	3,54	3,96	34663	5,68	49793
YHT (kWh/a)			164511		241545
		Hinta	19 285,67 €		28 316,29 €

Kuva 12. Sähköenergian kulutus

Paremmen hyötysuhteen puhaltimilla saavutetaan 32 % säästö verrattuna vanhoihin puhaltimiin. Säästö sähköenergiankulutuksessa 77 000 kWh vuodessa.

6.3 Kustannussäästöt

Lämmitysenergian myyjällä on käytössä kausihinnoittelu. Laskenta tehtiin kausihinnoittelun mukaisilla hinnoilla. Laskennassa ei huomioitu energiankulutuksen vähenemisen vaikutusta liittymän tehon mukaisiin kuukausimaksuihin. Lämmönmyyjän kaukolämmön hinnat ja energiankulutus hintakaussittain esitetty kuvassa 13.

				Uusi järjestelmä		Vanha järjestelmä	
Hintakausi			Hinta €/MWh (alv. 0%)	Energian kulutus (MWh)	Energia- kustannus (€)	Energian kulutus (MWh)	Energia- kustannus (€)
1	1.11-31.3	Talvi	70,01 €	230,7	16 150 €	744,6	52 132 €
2	1.4-31.5	Kevät	49,84 €	21,7	1 082 €	153,5	7 649 €
3	1.6-31.8	Kesä	24,17 €	0,0	- €	12,0	291 €
4	1.9-31.10	Syksy	49,84 €	7,4	367 €	130,0	6 480 €
				YHT	17 599 €	YHT	66 552 €

Kuva 13. Lämmitysenergiankulutus hintakaussittain

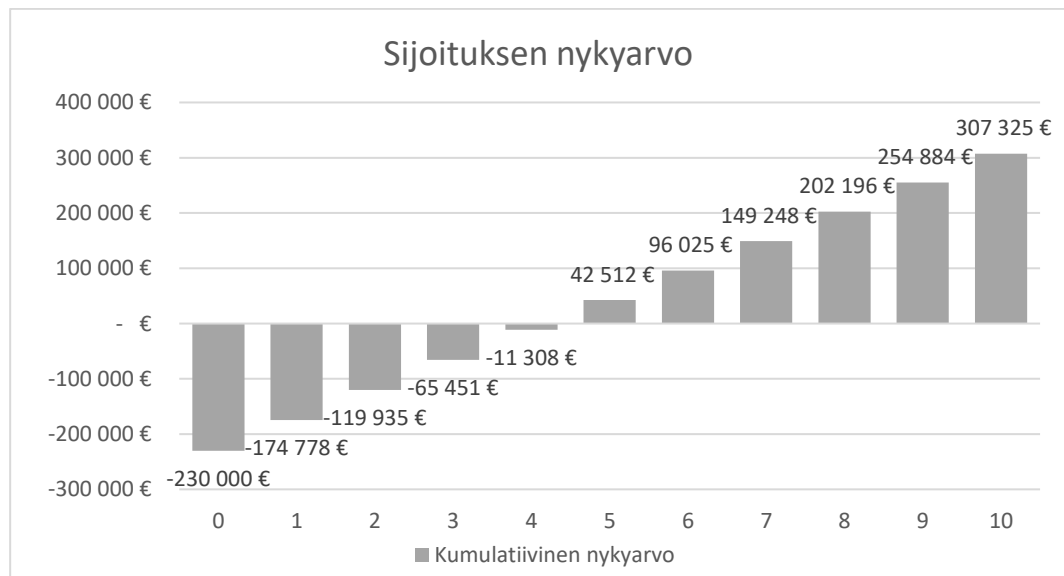
Lämmitysenergian kustannukset laskettiin hintakaussittain toteutuneiden päivittäisen lämmitysenergian tarpeen mukaan. Hintakaussilla 3 ja 4 tarvittiin uudella järjestelmällä lämmöntalteenoton tueksi lisälämmitystä ainoastaan kahtena päivänä. Lisälämmityksen tarve painottuu hintakaussille 1 ja 2, jolloin energian hinta on korkeimmillaan. Vanhalla järjestelmällä lämmitysenergian kulutus jakaantui tasaisemmin. Lämmitystä tarvittiin kaikilla hintakaussilla painottuen erityisesti talvikaudelle.

Lämmitysenergian osalta kustannussäästöä syntyi 48 900 € vuodessa. Prosentuaalisesti tämä on noin 74 %. Lisäksi sähköenergian kulutus pieneni noin 77 000 kWh/a, ja saavutettu vuotuinen säästö on noin 9000 €. Saavutettu kokonaissäästö ostoenergian kustannuksissa on tarkasteluhetken energianhinnoilla noin 57 900 €. Prosentuaalisesti säästö on noin 59 %. Oletettu energian hinnan nousu kasvattaa saavutettavia säästöjä tulevaisuudessa.

7 INVESTOINNIN TAKAISINMAKSUAIKA

Tarkastelun kohteena olevan muutoksen kustannuksista ei ollut saatavilla tarkkaa tietoa. Ilmanvaihtokoneet hankittiin osana useamman koneen kokonaisuutta, ja käytettävissä olevista tiedoista voidaan arvioida koneiden hankinta hinnan olevan yhteensä noin 150 000 €. Vanhan koneen korvaamisessa uudella on työn osuuteen huomioitava vanhan koneen purkutyöt sekä uuden koneen asennuksen vaatimat ilmanvaihto-, sähkö- ja putkikytkennät. Asennustyö ja materiaalien hinnaksi arvioin kokemukseräisesti noin 20 000 €/kone. Investointikustannukseksi muodostui näin arvioiden 230 000 €. Rasitusluokan 1 ilmanvaihtokoneen tekniseksi käyttöikäksi arvioidaan RT-18-10922 -kortissa 10–15 vuotta [20]. Laskenta tehtiin 10 vuoden investointiajalla, ja koneiden jäännösarvoksi arvioitiin 0 €.

Energian hinnannousuna huomioitiin Lahti-Energia oy:n kaukolämmön keskimääräinen hinnannousu vuosien 2016 ja 2023 välillä. Hinnan nousu ajanjaksolla oli noin 33 % ja vuotuisesti energian hinnannousuksi saatiin 5,07 % [21]. Pörssisähkön hinta ei ole ennakoitavissa, joten sähkön hinnalle ei laskettu korotusta kannattavuuslaskelmissa.



Kuva 14, sijoituksen nykyarvo

Nykyarvomenetelmällä laskettuna 10 vuoden investointiajalla ja 5 % korolla laskettuna saadaan investoinnin nykyarvoksi 537 000 €, eli investointi on erittäin kannattava. 5 % korolla laskettuna investointi muuttuu kannattavaksi neljännen käyttövuoden alkupuolella. Vanhan järjestelmän käyttökustannukset 10

vuoden käyttöajalla olisivat olleet noin 1 123 000 €. Uuden järjestelmän käyttökustannukset jäävät 415 000 €.

8 POHDINTA

Tutkimuskohteessa ilmanvaihtolaitteiston uusimista voidaan pitää kannattavana. Nestekiertoisella lämmöntalteenottojärjestelmällä pystyttiin kattamaan 75 % ilmanvaihdon lämmitysenergiatarpeesta, mitä voidaan pitää erittäin hyvänä tasona. Lisäksi energiatehokkaat puhaltimet pienensivät sähköenergiankulutusta 32 %. Saavutettuun energiansäästöön vaikutti merkittävästi se, että koneet toimivat jatkuvasti vakioilmavirralla, eikä esimerkiksi yöaikaista ilmanvaihdon pienentämistä käytetä. Laskelmien perusteella laitteiston takaisinmaksuaika jää huomattavasti teknistä käyttöikää lyhyemmäksi. Investointi maksaa itsensä takaisin noin viiden vuoden kohdalla ja siitä eteenpäin tuottaa merkittäviä säästöjä käyttökustannuksiin.

Energian hinnan kehityksellä on merkittävä vaikutus laitteiden elinkaaren aikana saavutettaviin säästöihin. Laskelmissa lämmitysenergian hinnannousuna käytetty 5,07 % vuodessa voi osoittautua tulevaisuudessa hyvinkin varovaiseksi arvioksi. Lisäksi pörssisähkön hinnan ennakoitiin laskelmissa pysyvän vuoden 2022 tasolla. Pörssisähkön hinnan ennakoimattomuus hankaloi-
taa luotettavien pitkän aikavälin laskelmien tekemistä. Mikäli energian hinta ei tulevaisuudessa laske merkittävästi, voidaan tuloksia pitää käyttökelpoisina korjaushankkeiden suunnittelussa.

Vaikka osa uusituista ilmanvaihtokoneista jäi tarkastelun ulkopuolelle, saatiin kattava otanta eri kokoluokan ilmanvaihtokoneiden suoritusarvoista ja säästö-
potentiaalista. Tutkimuksen perusteella teknisen käyttöikänsä päässä olevien ilmanvaihtokoneiden, joissa ei ole lämmöntalteenottoa, uusiminen on varteen-
otettava vaihtoehto korjaustoimenpiteiden sijaan.

Mittauksien aikana todettiin järjestelmän optimoinnin tärkeys tavoiteltaessa parhaita mahdollisia lämpötilasuhteita, ja sitä kautta energiatehokkuutta. Työn aikana testattiin laitteistoa monipuolisesti ja havaittiin econet-järjestelmässä ongelmia, jotka olisi muuten voineet jäädä käyttöönottovaiheessa huoma-

matta. Esimerkiksi kovalla pakkasella sammutettua ilmanvaihtokonetta ei pystytä käynnistämään ilman erityistoimenpiteitä laitteen automatiikan ohjelmoinnin takia. Tämä ongelma koskee yleisesti econet-järjestelmää, ja siihen yritetään löytää ratkaisuja yhdessä laitevalmistajan kanssa.

LÄHTEET

1. Sandberg, E. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Ilmastointiteknikka osa 2. 2. painos. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy. 2016.
2. SFS 5147. Ilmateknikka. Puhaltimet. Suoritusarvojen mittaukset.
3. SFS-ISO 5801:2007. Industrial fans. Performance testing using standardized airways.
4. Sandberg, E. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointiteknikka osa 1. 2. painos. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy. 2016.
5. SFS-ISO 308:2022. Lämmönsiirtimet. Suorituskyvyn testimenettelyt ilma-ilma-lämmöntalteenottolämmönsiirtimille.
6. Econet Premium – FAQ. Fläkt Group Oy. PDF-dokumentti. 2019. Saatavissa: <https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/128822?analytics=0> [viitattu: 28.12.2023].
7. Econet Premium, Asennus- ja huolto-ohje. Fläkt Group Oy. PDF-dokumentti. 2021. Saatavissa: <https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/128850?analytics=0> [viitattu: 23.12.2023].
8. 1009/2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta.
9. Ilmanvaihtojärjestelmän suunnitelmanmukaisuuden toteaminen. Talotekninen teollisuus ja kauppa ry. WWW-dokumentti. 2018. Saatavissa: <https://talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas/27-ilmanvaihtojarjestelman-suunnitelmanmukaisuuden-toteaminen> [viitattu: 23.12.2023].
10. Mäkinen, S. Alanko, A. Lindholm, J. Määttä, J. Luoma, J. Näppi, J. & Penttilä, J. Ilmavirtojen mittaus ja tasapainotus. Talotekninen teollisuus ja kauppa ry. PDF-dokumentti. 2023. Saatavissa: https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/2024-01/Ilmavirtojen%20mittaus%20ja%20tasapainotus%20-opas_19.12.2023.pdf [viitattu: 26.12.2023].
11. SFS-ISO 16211:2015. Rakennusten ilmanvaihto. Ilmavirtausten mittaus paikan päällä. Menetelmät.
12. Koivisto, P. Mäkinen, A. Tiainen, E. & Vahtera, P. Sähköasennuksiin liittyvät mittaukset. Espoo: Sähköinfo Oy. 1998.
13. Ahoranta, J. Sähkötekniikka. 14. uudistettu painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy. 2015.
14. SFP-opas. Opas ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehon määrittämiseen, laskentaan ja mittaamiseen. Talotekninen teollisuus ja kauppa ry.

PDF-dokumentti. 4.painos. 2023. Saatavissa: <https://talteka.fi/wp-content/uploads/2023/03/sfp-opas-lopullinen-2023-maaliskuu.pdf> [viitattu: 27.12.2023] .

15. 1010/2017 Ympäristöministeriön asetuksen rakennuksen energiatehokkuudesta.
16. Karjalainen, L. Optimi, Matematiikkaa talouselämän ammattilaisille. 5. uudistettu painos. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy. 2005.
17. Sähkömarkkinat nyt – katsaus vuoteen 2023. Energiavirasto. PDF-dokumentti. 2024. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/199565096/Energiavirasto+mediainfo+23012024.pdf/5697715f-e854-813c-f241-80de809d9c34/Energiavirasto+mediainfo+23012024.pdf?t=1705992096426> [viitattu 18.2.2024].
18. Energiaverotus. Valtiovarainministeriö. WWW-dokumentti. 2022. Saatavissa: <https://vm.fi/energiaverotus> [viitattu:29.1.2024].
19. Kaukolämmön hinnastot ja sopimusehdot. Lahti Energia Oy. WWW-dokumentti. 2024. Saatavissa: <https://www.lahtienergia.fi/meista/asiointi/kaukolammon-hinnastot-ja-sopimusehdot/> [viitattu 18.3.2024].
20. RT-18-10922. Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot.
21. Kaukolämmön hintatilastot. Energiateollisuus Ry. WWW-dokumentti. 2024. Saatavissa: <https://energia.fi/tilastot/kaukolammon-hintatilasto/> [viitattu: 18.3.2024].



KALIBROINTITODISTUS

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Mittalaite: Mikromanometri
 Tyyppi: AIRFLOW TA 465-E
 Sarjanumero: TA 4652042012

Tutkittavan mittarin lukemat referenssipaineilla

Referenssi Pa	Mittari	Poikkeama% lukemasta
-10,0	<u>-10,1</u>	<u>1,0</u>
0,00	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>
10,00	<u>10,1</u>	<u>1,0</u>
100,00	<u>100,4</u>	<u>0,4</u>
200,00	<u>200,8</u>	<u>0,4</u>

Kalibroinnissa käytetyt referenssit ja niiden mittausepävarmuus:

Paine-ero: - Furness Controls PPC-500 s/n: 0506001
 - Epävarmuus:
 alueella 20...2000 Pa, 0,1% lukemasta + 0,1 Pa
 alueella 1...19 Pa, 0,21 Pa

Kalibrointiolosuhteet:

Lämpötila 21,9°C
 Suhteellinen kosteus 66,5%
 Ilmanpaine 995 mbar

Kalibroinnin päivämäärä: 13.9.2023
 Kalibroinnin suorittaja: [Signature]

Referenssien jäljitettävyys-, kalibrointi- ja analyysitodistukset näytetään pyydettäessä laboratoriossamme.

OY TEKNOCALOR AB · KALIBROINTI- JA HUOLTOLABORATORIO
 SINIKELLONKUJA 4 · 01300 VANTAA · PUH 010 820 1100

ILMAMÄÄRIEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA										
Kohde:	Päijät-Hämeen keskussairaala				Mittari:	AirFlow TA 465				
Osoite:	IVKH K.3.02				Mittauksen suoritti:	Harri Sarvilahti				
Kerros:	K-osa 3. kerros				Pvm:	28.12.2023				
Kone	Δp puhallin	Paine-ero			Uudet koneet k-arvo	Ilmamäärä (l/s)	Mittavirhe ± (l/s)			
		Mittaus	(Pa)	Säätöasento						
TK 301.1	576	PRA 630	68	6	295	2433	110			
PK301.1	590	PRA-400	159	5	86	1084	33		Tulo	Poisto
PK301.2		PRA-500	69	6	175	1454	65	301	2433	2538
								±	110	98
TK302.1	570	PRA-500	72	5	123	1044	45			
TK302.2		PRA-400	202	3	36,5	519	15			
TK302.3		PRA-400	46	6	137	929	56			
						0				
PK302.1	565	PRA-400	188	5	86	1179	34		Tulo	Poisto
PK302.2		PRA-500	68	6	175	1443	65	302	2492	2622
						0		±	116	99
TK304.1	611	PRA-500	173	2	39	513	15			
TK304.2		PRA-500	49	6	175	1225	70			
						0				
PK304.1	509	PRA-500	60	5	123	953	47			
PK304.2		PRA-400	15	6	137	531	41		Tulo	Poisto
PK304.3		PRA-400	75	3	36,5	316	13	304	1738	1799
						0		±	85	102
TK309.1	405	PRA-500	26	6	175	892	87			
TK309.2		PRA-500	64	5	123	984	46			
TK309.3		PRA-250	106	4	25,6	264	9			
TK309.4		PRA-400	0	6	137	0	0			
						0				
PK309.1	752	PRA-630	53	6	295	2148	116		Tulo	Poisto
PK309.2		PRA-500	264	4	86	1397	38	309	2140	3545
								±	143	154
									Tulo	Poisto
								YHT (m³/s)	8,80	10,50
								±	0,45	0,45
Kone	Δp puhallin	Vanhat koneet				Ilmamäärä (l/s)	Mittavirhe ± (l/s)			
		Mittaus	v (m/s)	Kanava	A, Kanava (m2)					
TK33.1	905	Pitot	7,5	400	0,126	942	75			
TK33.2		Pitot	9,1	400	0,126	1144	80		YHT	
TK33.3		Pitot	7,8	500	0,196	1532	118	3618		
								±	272	
									YHT	
PK62A	435	Pitot	7,6	500x400	0,32	2432	191	2432		
								±	191	

Sähkötehon mittauspöytäkirja

Kone	qv (m ³ /s)	Jännite (V)	Virta (A)			P (kW)	Δp puhallin (kW)	Hyötäteho (kW)	Hyötysuhde	SFP	Ilman lämpeneminen puhaltimessa (°C)	Vanhan puhaltimen teho (kW)
			L1	L2	L3							
TK301	2,43	231,4	2,8	2,9	2,9	1,99	576	1,40	70,4%	1,60	0,68	3,11
PK301	2,52	231,4	2,9	2,9	3,0	2,04	590	1,49	73,0% ± 0,12			3,16
TK302	2,49	231,4	3	2,9	2,9	2,04	570	1,42	69,7%	1,54	0,68	3,15
PK302	2,62	231,4	2,9	2,9	2,9	2,01	565	1,48	73,6% ± 0,12			3,15
TK304	1,74	231,4	2,4	2,4	2,5	1,69	611	1,06	62,9%	1,75	0,81	2,36
PK304	1,80	231,4	2,1	2,1	2,1	1,46	509	0,92	62,8% ± 0,12			1,94
TK309	2,14	231,4	2,0	2,0	2,0	1,39	405	0,87	62,4%	1,57	0,54	1,92
PK309	3,54	231,4	6,0	6,0	6,0	4,17	752	2,67	64,0% ± 0,12			5,66
TK33	3,62	231,4	10,4	10,5	10,5	7,27	905	3,27	45,1%	2,01	1,00	
PK62A	2,43	231,4	3,2	3,1	3,4	2,24	435	1,06	47,1%	0,92		
Laskennalliset arvot käyttötilanteen ilmavirroilla												
TK309	2,94		Jännite (V)	Virta (A) L1	Virta (A) L2	Virta (A) L3	P (kW)	Δp puhallin (kW)	Hyötäteho (kW)	Hyötysuhde	SFP	
PK309	3,54	231,4	6,0	6,0	6,0	6,0	4,17	752	2,67	64,0% ± 0,15	2,19	1,02

LIITE 3

Ulkolämpötila	Päivien lukumäärä	Tuloilman lämmitystehontarve (kW)					Energian kulutus (kWh)	Energiankulutus (kWh)	
		TK 301	TK 302	TK 304	TK 309	YHT		TK 33	2022
°C	2022						2022		
17	13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0
16	10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0
15	10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	7,0	1690
14	13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	18,6	5791
13	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	30,1	2166
12	8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	41,6	7987
11	15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	53,1	19123
10	17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	64,6	26373
9	16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	76,2	29245
8	13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	87,7	27356
7	15	2,5	0,0	0,0	0,0	2,5	896	99,2	35712
6	10	5,4	2,7	0,0	0,0	8,1	1945	110,7	26573
5	9	8,3	5,7	0,0	0,0	14,0	3026	122,2	26404
4	12	11,2	8,7	0,0	0,0	19,9	5735	133,8	38523
3	11	14,2	11,7	0,0	0,0	25,8	6816	145,3	38354
2	9	17,1	14,7	0,0	0,0	31,7	6852	156,8	33869
1	15	20,0	17,6	0,0	0,0	37,6	13545	168,3	60595
0	15	22,9	20,6	0,0	0,0	43,6	15683	179,8	64742
-1	14	25,8	23,6	2,1	0,0	51,6	17322	191,4	64297
-2	18	28,7	26,6	4,2	0,0	59,5	25724	202,9	87644
-3	17	31,7	29,6	6,3	0,0	67,5	27556	214,4	87475
-4	18	34,6	32,6	8,4	0,0	75,5	32629	225,9	97597
-5	11	37,5	35,6	10,5	0,0	83,5	22050	237,4	62684
-6	7	40,4	38,6	12,6	0,0	91,5	15374	249,0	41825
-7	5	43,3	41,5	14,6	0,0	99,5	11941	260,5	31258
-8	4	46,2	44,5	16,7	0,0	107,5	10320	272,0	26112
-9	5	49,1	47,5	18,8	0,0	115,5	13859	283,5	34022
-10	3	52,1	50,5	20,9	0,0	123,5	8891	295,0	21243
-11	0	55,0	53,5	23,0	0,0	131,5	0	306,6	0
-12	2	57,9	56,5	25,1	0,0	139,5	6694	318,1	15268
-13	0	60,8	59,5	27,2	0,0	147,5	0	329,6	0
-14	0	63,7	62,5	29,3	0,6	156,1	0	341,1	0
-15	2	66,6	65,4	31,4	4,1	167,6	8044	352,6	16927
-16	0	69,6	68,4	33,4	7,7	179,1	0	364,2	0
-17	0	72,5	71,4	35,5	11,2	190,6	0	375,7	0
-18	1	75,4	74,4	37,6	14,7	202,1	4851	387,2	9293
-19	0	78,3	77,4	39,7	18,2	213,7	0	398,7	0
-20	0	81,2	80,4	41,8	21,8	225,2	0	410,2	0
-21	0	84,1	83,4	43,9	25,3	236,7	0	421,8	0
-22	0	87,1	86,4	46,0	28,8	248,2	0	433,3	0
-23	0	90,0	89,4	48,1	32,4	259,7	0	444,8	0
-24	0	92,9	92,3	50,1	35,9	271,3	0	456,3	0
-25	0	95,8	95,3	52,2	39,4	282,8	0	467,8	0
-26	0	98,7	98,3	54,3	42,9	294,3	0	479,4	0
-27	0	101,6	101,3	56,4	46,5	305,8	0	490,9	0
-28	0	104,6	104,3	58,5	50,0	317,3	0	502,4	0
-29	0	107,5	107,3	60,6	53,5	328,9	0	513,9	0
							2022		2022
Energiankulutus (MWh/a)							259,8		1040,1