

Helsingin kaupungin julkisten rakennusten regeneratiivisten ja rekuperatiivisten lämmöntalteenottolaitteistojen toiminnan analysointi

Elina Järvelä

OPINNÄYTETYÖ	
Arcada	
Koulutusohjelma:	Hajautetut energiajärjestelmät
Tunnistenumero:	11597
Tekijä:	Elina Järvelä
Työn nimi:	Helsingin kaupungin julkisten rakennusten regeneratiivisten ja rekuperatiivisten lämmöntalteenottolaitteistojen toiminnan analysointi
Työn ohjaaja (Arcada):	Kim Skön
Toimeksiantaja:	Helsingin kaupunki – Rakennusvirasto, Talotekninen toimisto
<p>Tiivistelmä:</p> <p>Helsingin kaupunki, muiden kuntien ja Suomen valtion ohessa, on sitoutunut noudattamaan EU-direktiiviä energiatehokkuudesta ympäristöministeriön laatiman rakennusmääräyskokoelman muodossa.</p> <p>Helsingin kaupungin rakennusviraston talotekninen toimisto halusivat tutkimuksen julkisten rakennusten lämmöntalteenottolaitteistojen tuloilman hyötysuhteista ja toiminnasta. Tutkimus rajattiin regeneratiivisiin ja suoriin rekuperatiivisiin lämmöntalteenottolaitteisiin (LTO-laitteisiin), koska talotekninen toimisto oli aiemmin tilannut tutkimuksen nestekiertoisten, eli epäsuorien, LTO-laitteiden toiminnasta. Toisaalta taloteknisessä toimistossa epäiltiin muidenkin lämmönsiirrintyyppien hyötysuhteissa olevan puutteita.</p> <p>Käytössä olevan LTO-laitteen tuloilman hyötysuhteeseen vaikuttaa monta tekijää, kuten ulkolämpötila, huurre ja jää, sekä niiden mahdollinen ennaltaehkäisy ja sulatus, lika ja rakenneviat, sekä regeneratiivisilla lämmönsiirtimillä pyörimisnopeus. Tutkimuksen rakennukset rajattiin kahteentoista julkiseen opetusrakennukseen, joissa suoritettiin mittauksia helmikuun 2013 aikana. Mittauksia tehtiin lämpötila-kosteusloggereilla ja paineero mittareilla ja lisäksi otettiin videoita lämpökameralla, tarkoituksena laskea LTO-laitteen hyötysuhde ja selvittää miksi se mahdollisesti on matala. LTO-laitteiden hyötysuhteet on laskettu ympäristöministeriön monisteen 122 ohjeiden mukaisesti.</p> <p>Tutkimuksessa tehtiin mittauksia 28 LTO-laitteelle, joista 21 olivat pyöriä regeneratiivisia ja 7 suoria rekuperatiivisia lämmönsiirtimiä. Koska kohteet, niiden IV-koneet ja LTO-laitteet ovat kaikki erilaisia, tuloksetkin ovat hyvin hajanaisia eivätkä ne ole kovin vertailukelpoisia. Siksi opinnäytetyön tulokset on esitetty tarkemmin kohdekohtaisesti.</p>	
Avainsanat:	Helsingin kaupunki – rakennusvirasto, julkiset rakennukset, ilmastointi, lämmöntalteenotto, hyötysuhde, lämpökamera
Sivumäärä:	60
Kieli:	Suomi
Hyväksymispäivämäärä:	12.6.2013

EXAMENSARBETE	
Arcada	
Utbildningsprogram:	Distribuerade energisystem
Identifikationsnummer:	11597
Författare:	Elina Järvelä
Arbetets namn:	En operativ analys av regenerativ och rekuperativ värmeåtervinning i Helsingfors stads offentliga byggnader
Handledare (Arcada):	Kim Skön
Uppdragsgivare:	Helsingfors stad – Byggnadskontoret, Hustekniska byrån
<p>Sammandrag:</p> <p>Helsingfors stad, andra kommuner och den finska staten är engagerade att följa det nya EU-direktivet om energieffektivitet (Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency), som har samma målsättning som förut. Energiförbrukningen skall sänkas med 20 % och andelen förnybar energi höjas med 20 % tills år 2020, men åtgärder för att nå detta har blivit strängare. Mera krav riktas till den offentliga sektorn. Dessutom har Helsingfors stad engagerat sig att följa ett frivilligt the Covenant of Mayors – avtal, som syftar till lokal energieffektivitet och förnybara energikällor.</p> <p>80 % av Helsingfors stadskoncerns energiförbrukning sker i fastigheter som staden äger. (Helsingin kaupungin palvelurakennusten matalaenergiarakentamisohje, 2010, s. 4). Offentliga byggnader upptar största delen av fastigheters totala ytarean. I byggnader som har stor volym, som skolor, lagras det mycket värmeenergi i inomhusluft. Den värmeenergin skulle gå till spillo med frånluften om det inte fanns möjlighet till värmeåtervinning i ventilationen.</p> <p>Hustekniska byrån i Helsingfors stads byggnadskontor tar hand om stadens offentliga byggnaders underhållning och energieffektivitet på hustekniska sidan. Hustekniska byrån hade redan tidigare beställt en studie om indirekta rekuperativa värmeväxlare, d.v.s. vätskekopplade värmeväxlare, och misstänkte att det möjligtvis fanns defekter i andra typer av värmeväxlare också. Därför beställde de en utredning om effektiviteten och det allmänna skicket av regenerativa och rekuperativa värmeväxlare, exklusive vätskekopplade värmeväxlare. Fokusen i studien var att ta reda på tilluftens temperaturverkningsgrader i värmeväxlare och orsaken till att de möjligen var låga. I studien ingår tolv offentliga pedagogiska byggnader och högst tre ventilationsaggregat med värmeåtervinning per byggnad. Mätningarna utfördes i februari 2013.</p> <p>Det finns många olika typer av värmeväxlare med olika verkningsgrader. De vanligaste värmeväxlarna i ett ventilationsaggregat är roterande regenerativa värmeväxlare, direkt rekuperativa värmeväxlare (plattvärmeväxlare) och indirekt rekuperativa värmeväxlare. Med regenerativ värmeväxlare menas värmelagrande värmeväxlare, som tar upp värme från frånluften och levererar det till tilluften med en värmelagrande massa. Rekuperativ värmeväxlare överför värmen direkt via ett värmeöverföringsmaterial. Typisk tillufts</p>	

temperaturverkningsgrad för roterande värmeväxlare är 60 – 80 % och för plattvärmeväxlare 50 – 70 %.

Effektiviteten av en värmeväxlare bestäms med hjälp av temperaturverkningsgraden. I denna studie har man räknat och använt tilluftens temperaturverkningsgrad som mått. Man behöver tilluftens temperaturverkningsgrad vid t.ex. beräkningen av ett energicertifikat enligt byggbestämmelsesamlingens del D5. Tilluftens temperaturverkningsgrad beskriver hur mycket av värmen, som har tagits till vara från frånluften, kan utnyttjas vid uppvärmning av tilluft. Många faktorer påverkar effektiviteten av en värmeväxlare. Förstås påverkar arean och värmeledningsförmågan av värmeväxlarens material, men denna studie fokuserar på defekter som uppstår i värmeväxlare som redan är i bruk. Defekter kan uppstå av frost och is, smuts, fel i konstruktion, samt roteringshastigheten i regenerativa värmeväxlare. Andra aspekter som påverkar tilluftens temperaturverkningsgrad är ute temperaturen, automationen som förhindrar is- och frostbildning och ventilationsaggregatets luftflöden.

Syftet med mätningarna var att beräkna tilluftens verkningsgrad och att ta reda på varför den möjligtvis var låg. Mätningar utfördes med dataloggrar, som mätte luftens relativa fuktighet och temperatur. För att beräkna tilluftens temperaturverkningsgrad, enligt miljöministeriets guide 122, behövs tilluftens temperatur efter värmeväxlaren och frånluftens temperatur före värmeväxlaren, samt uteluftens temperatur. Fuktighet och temperatur tillsammans inverkar på kondenseringen i värmeväxlare. Ju lägre temperatur desto högre relativ fuktighet. Om fukten kondenseras, kan det uppstå frost. Om det finns frost eller andra hinder i värmeväxlare, kan man detektera dem med hjälp av en differentiell tryckmätare. I detta examensarbete har man mätt tryckskillnaden över värmeväxlare från frånluftskanal och jämfört den med det dimensionerade luftflödet. Värmeamera användes för att se om det fanns värme läckage i värmeväxlaren.

I forskningen utfördes mätningar på 28 värmeväxlare, varav 21 var roterande värmeväxlare och 7 var plattvärmeväxlare. Tilluftens temperaturverkningsgrad beräknades till alla värmeväxlare och en verkningsgrad betonad med luftflöden för de ventilationsaggregat som har olika stora dimensionerade luftflöden. Gränsen mellan bra och dålig verkningsgrad bestäms vara den lägsta typiska verkningsgraden av respektive värmeväxlartyp. Sex av alla regenerativa värmeväxlare hade lägre än 60 % verkningsgrad och tre plattvärmeväxlare hade lägre än 50 % verkningsgrad.

Varken frost eller is träffades på under mätningarna på grund av en relativt varm februari månad. Oftast var problemen med låg verkningsgrad relaterade till otillräckligt service av ventilationsaggregat, som syntes som smuts och relativt höga tryckskillnader över värmeväxlare. Eftersom alla ventilationsaggregaten och värmeväxlaren var olika, blev resultaten mycket fragmenterade och därför är inte särskilt jämförbara. Därför presenteras resultaten skilt för varje byggnad.

Nyckelord:	Helsingfors stad – Byggnadskontoret, offentliga byggnader, ventilation, värmeåtervinning, effektivitet, värmeamera
Sidantal:	60
Språk:	Finska
Datum för godkännande:	12.6.2013

DEGREE THESIS	
Arcada	
Degree Programme:	Distributed Energy Systems
Identification number:	11597
Author:	Elina Järvelä
Title:	An operational analysis of regenerative and recuperative heat recovery systems in public buildings of the City of Helsinki
Supervisor (Arcada):	Kim Skön
Commissioned by:	The City of Helsinki – Public Works Department, Building services unit
<p>Abstract:</p> <p>The City of Helsinki, with other municipalities and the State of Finland, is engaged to follow the EU Directive on energy efficiency (Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency) in the form of the Finnish building codes that the Ministry of the Environment has prepared.</p> <p>The Building services unit in the Public Works Department of the City of Helsinki wanted a study about the operation of heat recovery systems in public buildings. More specifically about the effectiveness of a heat exchanger. The study was limited to the regenerative and direct recuperative heat exchangers, because the Building service unit had previously commissioned a study on the operation of hydronic or indirect heat recovery systems. Reasonably the Building works department suspected that the other heat exchanger types may also have defects. Many things affect the efficiency of a heat exchanger, e.g. outdoor temperature, frost and ice, dirt, construction defects and in regenerative heat exchangers the velocity of rotation. The study was also limited to twelve public educational buildings, where the measurements were carried out in February 2013. Temperature and moisture loggers and differential pressure gauges were used to gather information. Additionally, videos were taken with a thermal camera. To calculate the coefficient of efficiency for the heat exchangers and find out why the coefficient may have been low was the main aim of this study. The coefficients of efficiency were calculated according to the instructions of the Ministry of Environment.</p> <p>The study carried out measurements for 28 heat exchangers, of which 21 were rotary wheels and 7 were plate heat exchangers. Because the ventilation systems and heat exchangers are all different, the results are highly fragmented and not very comparable. Therefore the thesis' results are presented in detail by target building.</p>	
Keywords:	The City of Helsinki – Public Works Department, public buildings, ventilation, heat recovery, efficiency, heat camera
Number of pages:	60
Language:	Finnish
Date of acceptance:	12.6.2013

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	12
2	RAJAUS.....	14
2.1	Tutkittavat rakennukset.....	14
2.2	Lämmöntalteenottolaitteiden valinta	15
3	ILMASTOINNIN LÄMMÖNTALTEENOTTOLAITTEET.....	15
3.1	Regeneratiivinen pyörivä vastavirtalämmönsiirrin.....	16
3.2	Kiinteä regeneratiivinen lämmönsiirrin	17
3.3	Suora rekuperatiivinen ristivirtalämmönsiirrin	17
3.3.1	<i>Kaksoislevylämmönsiirrin.....</i>	<i>18</i>
3.3.2	<i>Ilman virtaussuunnat.....</i>	<i>19</i>
3.4	Suora rekuperatiivinen vastavirtalämmönsiirrin	19
3.5	Epäsuora rekuperatiivinen lämmönsiirrin	20
4	LÄMMÖNTALTEENOTTOLAITTEEN HYÖTYSUHTEESEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.....	21
4.1	Ulkolämpötila.....	21
4.2	Huurre	22
4.3	Huurteen esto ja sulatus	23
4.4	Likaantuminen.....	23
4.5	Rakenneviat.....	23
4.6	Pyörimisnopeus.....	24
4.7	Ilmastointikoneen ilmavirrat.....	24
5	MITTAUKSET	25
5.1	Hyötysuhteet	25
5.2	Kosteus	28
5.3	Paine-ero.....	28
5.4	Pyörimisnopeus.....	28
5.5	Lämpökamera	29
5.5.1	<i>Ominaisuudet.....</i>	<i>29</i>
5.5.2	<i>Lämpökameran sijoitus</i>	<i>31</i>
6	TULOKSET KOOTUSTI.....	32
6.1	Pyörivien lämmönsiirtimien hyötysuhteet.....	32
6.2	Levylämmönsiirtimien hyötysuhteet	33
7	MITTAUSKOHTEIDEN ERITTELY	34
7.1	Apollon yhteiskoulu	34
7.1.1	<i>1 TK/PK.....</i>	<i>34</i>
7.1.2	<i>2 TK/PK-1.....</i>	<i>35</i>
7.1.3	<i>4 TK/PK.....</i>	<i>36</i>
7.2	Arabianrannan peruskoulu	37
7.2.1	<i>TK/PK 204.....</i>	<i>37</i>
7.2.2	<i>TK/PK 205.....</i>	<i>38</i>

7.2.3	TK/PK 208	38
7.3	Helsingin medialukio	39
7.3.1	TK/PK 202	39
7.3.2	TK/PK 209	40
7.4	Helsingin sosiaali- ja terveysoppilaitos Malmin yksikkö (HESOTE)	41
7.4.1	7 TK/PK	42
7.4.2	8 TK/PK	42
7.4.3	10 TK/PK	42
7.5	Herttoniemenrannan ala-aste	43
7.5.1	TK/PK 201	44
7.5.1	TK/PK 204	45
7.5.2	TK/PK 208	45
7.6	Käpylän peruskoulu	46
7.6.1	TK/PK 201	47
7.6.2	TK/PK 202	47
7.6.3	TK/PK 214	47
7.7	Latokartanon peruskoulu	47
7.7.1	TK/PK 201	48
7.8	Metsolan ala-aste	48
7.8.1	TF/PF 6	49
7.9	Monitoimitalo Puustelli ja ala-aste	50
7.9.1	TK/PK 2	51
7.9.2	TK/PK 3	51
7.10	Naulakallion erityiskoulu	52
7.10.1	5 TK/PK	53
7.10.2	6 TK/PK	54
7.11	Poikkilaakson ala-aste	54
7.11.1	TK/PK 201	54
7.11.2	TK/PK 202	55
7.12	Porolahden peruskoulu	56
8	YHTEENVETO	57
9	PARANNUSEHDOTUKSIA	58

KUVAT

Kuva 1. (Oikea) Regeneratiivinen pyörivä lämmönsiirrin. Kuva Elina Järvelä (Vasen) Pyörivän lämmönsiirtimen periaate Olli Seppäsen (1996, s.288) esimerkin mukaan	16
Kuva 2. Virtausta vaihtavan lämmönsiirtimen periaate Olli Seppäsen (1996, s.289) esimerkin mukaan	17
Kuva 3. (Oikea) Suora rekuperatiivinen ristivirtalämmönsiirrin naulakallion koululla. Kuvaa Elina Järvelä (Vasen) Levylämmönsiirtimen periaate Olli Seppäsen (1996, s.286) esimerkin mukaan	18
Kuva 4. Esimerkki kaksoislevylämmönsiirtimen periaatteesta Talotekniikkalehden (3/2013, s. 72) mukaan	19
Kuva 5. Myötä-, vasta ja ristivirtaus	19
Kuva 6. (vasen) vastavirtaus levylämmönsiirrin SunAIR 431 EC Premium pientalolle (oikea) vastavirtaus levylämmönsiirtimen periaate	20
Kuva 7. Nestekiertoisen lämmönsiirtimen periaate Olli Seppäsen (1996, s.299) mallin mukaan	21
Kuva 8. Kiekon hyötysuhteen riippuvuus pyörimisnopeudesta (Seppänen Olli, 1996, s.289)	24
Kuva 9. Hyötysuhteen määrittelyn merkinnät ympäristöministeriön esimerkin (moniste 122, s. 11) mukaan	27
Kuva 10. Porolahden peruskoulu TK/PK 214 poistoilmakanavasta ennen LTO:ta kuvattuna, pyörimissuunta oikealle.....	30
Kuva 11. (Vasen) Flir b 60 jalustassa. Kuvaaja Elina Järvelä (Oikea) USB-kaapelilla kameraan kiinnitetyn tietokoneen näytöllä Flir IR Camera Player ohjelma. Kuva Elina Järvelä	31
Kuva 12. 2 TK/PK-1 (vasen) käynnistys, (keskellä) tasaantunut käynti, (oikea) pinnalla näkyy kaksi lämpimämpää pistemäistä kohdetta	36
Kuva 13. 4 TK/PK:n LTO-laitteen levennys ja kiinteän lämpömittarin paikka	36
Kuva 14. (vasen) TK/PK 204 tuloilmakanavasta LTO-laitteen jälkeen (oikea) raitisilma suodattimet ovat likaiset	38
Kuva 15. LTO-laitteen kiinnitys estää LTO-laitteen ja lämmityspatterin väliseen tilaan pääsemisen. Kuva Elina Järvelä	40

Kuva 16. TK/PK 209 raitisilmapuolelta (vasen) käynnistys (oikea) tasaantunut.....	41
Kuva 17. 10 TK/PK:n LTO-laite.....	43
Kuva 18. 10 TK/PK:n LTO-laite, pyörimissuunta vasemmalle.....	43
Kuva 19. TK/PK 201 vasen ja oikea puoli LTO-laitteesta.....	44
Kuva 20. TK/PK 208 vasen ja oikea puoli LTO-laitteesta.....	45
Kuva 21. TK/PK 208 likainen raitisilma suodatin. Kuva Elina Järvelä.....	45
Kuva 22. 6 TF/PF periaate ja automaatiojärjestelmä.....	49
Kuva 23. TK/PK 3 jäteilmakanavasta (vasen) Kiekon pinta LTO-laitteen jälkeen (oikea) pitkä naarmu kiekon pinnassa.....	51
Kuva 24. vasen) 5 TK/PK tuloilma ennen LTO:ta (oikea) 6 TK/PK poistoilma LTO:n jälkeen.....	53
Kuva 25. Lämmönsiirtimen lämpötilajakauma raitisilmapuolelta.....	54
Kuva 26. Levylämmönsiirtimen tiivisteet ovat huonossa kunnossa. Kuva Elina Järvelä.....	55

TAULUKOT

Taulukko 1. Pyörivien regeneratiivisten lämmönsiirtimien hyötysuhteet	33
Taulukko 2. Suorien rekuperatiivisten lämmönsiirtimien hyötysuhteet	33
Taulukko 3. Apollon yhteiskoulun mittaukset	34
Taulukko 4. Arabianrannan peruskoulun mittaukset	37
Taulukko 5. Helsingin medialukion mittaukset	39
Taulukko 6. Helsingin sosiaali- ja terveysoppilaitoksen mittaukset	42
Taulukko 7. Herttoniemenrannan ala-asteen mittaukset	44
Taulukko 8. Käpylän peruskoulun mittaukset	46
Taulukko 9. Latokartanon ala-asteen mittaukset	48
Taulukko 10. Metsolan ala-asteen mittaukset	48
Taulukko 11. Monitoimitalo Puustellin ja ala-asteen mittaukset	50
Taulukko 12. Naulakallion erityiskoulun mittaukset	52
Taulukko 13. Poikkilaakson ala-asteen mittaukset	54
Taulukko 14. Porolahden peruskoulun mittaukset	56

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

η_t	LTO:n lämpötilahyötysuhde
η_p	poistoilman lämpötilahyötysuhde
t_{tLTO}	tuloilman lämpötila LTO:n jälkeen
t_s	poistoilman lämpötila ennen LTO:ta
t_u	tuloilman lämpötila ennen LTO:ta
t_j	poistoilman lämpötila LTO:n jälkeen
R_{LTO}	lämmöntalteenoton läpikulkevien tulo- ja poistoilmavirtojen suhde
q_{tLTO}	tuloilmavirta LTO-laitteelle
q_{pLTO}	poistoilmavirta LTO-laitteelle
$\eta_{t(R_{LTO})}$	tuloilman lämpötilahyötysuhde epäsuhteisilla ilmavirroilla
$\eta_{t(R_{LTO}=1)}$	tuloilman lämpötilahyötysuhde kun ilmavirtojen suhde on yksi

Lyhenteet

IV	ilmanvaihto
LTO	lämmöntalteenotto
YM	ympäristöministeriö
TK	tuloilmakone
PK	poistoilmakone
aa	ala-aste
pk	peruskoulu
yk	yhteiskoulu
ek	erityiskoulu

ALKUSANAT

Tämän opinnäytetyön aihe, kahdentoista Helsingin kaupungin julkisen opetusrakennuksen regeneratiivisten ja rekuperatiivisten lämmöntalteenottolaitteistojen toiminnan ja hyötysuhteiden kartoitus, on saatu Helsingin kaupungin Rakennusviraston Talotekniseltä toimistolta. Aiheeseen ovat vaikuttaneet toimistopäällikkö Jukka Forsman, energia-asiantuntija Timo Posa, sekä taloautomaatiopäällikkö Tom Bremer, joka toimi myös opinnäytetyön ohjaajana. Lisäksi suureksi avuksi tutkimuksessa on ollut tekninen asiantuntija Asko Kämäräinen.

Osoitan lämpimät kiitokset kaikille Taloteknisen toimiston yhteyshenkilöille avusta ja mahdollisuudesta tehdä mielenkiintoista työtä opinnäytetyön muodossa.

Helsingissä 14.06.2013

Elina Järvelä

1 JOHDANTO

Uudessa EU-direktiivissä energiatehokkuudesta (Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency) pysytään samassa tavoitteessa kuin vuonna 2010. Fossiilisia polttoaineita pyritään vähentämään 20 % ja uusiutuvia lisäämään 20 % vuoteen 2020 mennessä, mutta toimenpiteet tavoitteen pääsemiseksi tiukentuivat. Direktiivin myötä lisää vaatimuksia kohdistuu julkisiin sektoreihin, joiden pitää direktiivin mukaan mm. toimia kansallisena esimerkkinä ja ottaa huomioon energiatehokkuus kaikissa hankinnoissaan.

Helsingin kaupunki on sitoutunut noudattamaan jo aikaisemman EU:n Energiapalveludirektiivin (2006/32/EY) pohjalta työ- ja elinkeinoministeriön laatimaa energiatehokkuussopimusta (KETS). KETS velvoittaa kaupunkia säästämään 9 % (verrattuna vuoteen 2005) energian loppukäytöstä vuoteen 2016 mennessä.

Helsingin kaupunki on myös sitoutunut noudattamaan Euroopan laajuista vapaaehtoista the Covenant of Mayors – sopimusta, jossa pyritään paikallisesti kohentamaan energiatehokkuutta ja uusiutuvan energian käyttöä kunnissa ja kaupungeissa.

Helsingin kaupunkikonsernin energiankulutuksesta 80 % tapahtuu kaupungin omistamissa rakennuksissa (Helsingin kaupungin palvelurakennusten matalaenergiarakentamisohje, 2010, s. 4). Näistä rakennuksista pinta-alallisesti suuren osan vievät julkiset palvelurakennukset. Julkisissa rakennuksissa, kuten kouluissa joiden tilavuus on suuri, sisäilmaan sitoutuu paljon rakennuksen lämmitysenergiaa, joka ilman lämmöntalteenottoa häviäisi poistoilman mukana.

Tämän opinnäytetyön tilaaja, Helsingin kaupungin rakennusviraston talotekninen toimisto, huolehtii Helsingin kaupungin julkisten rakennusten kunnosta, huollosta ja energiatehokkuudesta talotekniikan osalta. Talotekninen toimisto on jo aiemmin saanut selville puutteita joidenkin rakennuskannan kohteiden nestekiertoisissa lämmöntalteenotto-laitteistoissa ja tilannut erillisen tutkimuksen vesi-glykoli järjestelmien hyötysuhteista. Perustellusti puutteita oletetaan löytyvän myös muista lämmöntalteenottojärjestelmistä.

Opinnäytetyön tarkoituksena on kartoittaa kahdentoista Helsingin kaupungin julkisen opetusrakennuksen regeneratiivisten ja rekuperatiivisten lämmöntalteenottolaitteistojen toimintaa ja tuloilman hyötysuhteet empiirisin keinoin, sekä ehdottaa niille mahdollisia korjaavia toimenpiteitä. Otantatusina käydään läpi helmi-maaliskuun 2013 aikana, ulkoilman ollessa vielä varmuudella tarpeeksi kylmää lämmöntalteenottolaitteiden toiminnan kannalta.

2 RAJAUS

Tutkimuksen kohteena ovat Helsingin kaupungin julkiset opetusrakennukset. Talotekninen toimisto rajasi tutkimuksen otannan kahteentoista kouluun tai oppilaitokseen kaupungin vajaasta 200 opetusrakennuksesta (poislukien päiväkodit). Toimiston yhteyshenkilöiden pitkä kokemus koulujen energiatehokkuudesta ja ilmastointilaitteista vaikutti juuri näiden koulujen valintaan. Perusteena otannalle oli muun muassa ilmastointikoneiden (IV-koneiden) ja LTO-laitteiden aikaisempi kunto. Tutkimuksen päärakennuksien pinta-ala vaihtelee noin 2000 m²:stä noin 15 000 m²:in, joten IV-koneita joissa on lämmönsiirrin on kussakin valitussa rakennuksessa yhdestä seitsemään. Useassa kohteessa on käytetty eri lämmönsiirrintyyppejä eri IV-koneissa.

Opinnäytetyön pääpainona on valittujen koulujen ilmastoinnin lämmöntalteenottolaitteiden (LTO-laitteiden) tuloilman lämpötilahyötysuhteiden selvittäminen. Samalla opinnäytetyössä tutkitaan LTO-laitteiden yleistä toimintaa ja kuntoa, eli miksi niiden hyötysuhde on mahdollisesti matala. Jos lämmöntalteenoton (LTO:n) puutteellinen toiminta liittyy johonkin muuhun ilmastointilaitteen osaan, se otetaan huomioon tutkimuksessa. Opinnäytetyössä ei tutkita epäsuoria rekuperatiivisia lämmöntalteenottolaitteita eli nestekiertoisia lämmöntalteenottimia, aiemmin tilatun tutkimuksen takia.

2.1 Tutkittavat rakennukset

- | | |
|---|----------------------|
| 1. Apollon yhteiskoulu | Arentipolku 1 |
| 2. Arabianrannan peruskoulu | Berliininkatu 4 |
| 3. Helsingin sosiaali- ja terveystalon oppilaitos | Vilppulantie 14 |
| 4. Helsingin Medialukio | Moisiontie 3 |
| 5. Herttoniemenrannan ala-aste | Petter Wetterintie 5 |
| 6. Käpylän peruskoulu | Mäkelänkatu 93 |
| 7. Latokartanon peruskoulu | Agronominkatu 22 |
| 8. Metsolan ala-aste | Kartanonmuseontie 2 |
| 9. Monitoimitalo Puustelli ja ala-aste | Puustellintie 6 |
| 10. Naulakallion erityiskoulu | Naulakalliontie 13 |
| 11. Poikkilaakson ala-aste | Puuskaniementie 21 |
| 12. Porolahden peruskoulu | Roihuvuorentie 2 |

2.2 Lämmöntalteenottolaitteiden valinta

Yhdellä koululla käymiseen on varattu noin yksi työpäivä aikaa, eli 8 tuntia. Käytössä on kaksi VelociCalc TSI 9555-P paine-ero mittaria, yhdeksän Testo 175-H2 dataloggeria ja Flir b60 lämpökamera, sekä niiden ohjelmointiin ja purkuun tarkoitetut tietokoneohjelmat ja kannettava tietokone. Näillä edellytyksillä ja laitteilla on mahdollista selvittää kolmen LTO-laitteen tuloilman hyötysuhde ja vähintään kahden LTO-laitteen monipuolisempi tutkinta jokaisesta kiinteistöstä. Jos joku kohteen LTO-laitteista on silmämääräisesti huonossa kunnossa, valitaan se tutkimukseen. Jos ei ole syytä epäillä minkään LTO-laitteen huonoa kuntoa, valitaan tutkittavat lämmönsiirtimet pistokoemaisesti. Tutkimuksessa on yritetty saada mukaan paljon eri-ikäisiä ja kokoisia laitteita, jotta saataisiin mahdollisimman monipuolinen otanta.

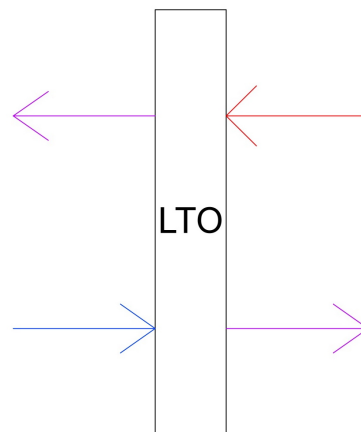
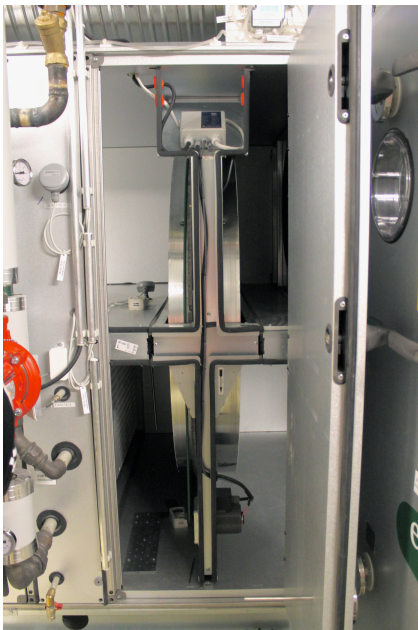
3 ILMASTOINNIN LÄMMÖNTALTEENOTTOLAITTEET

Lämmöntalteenottolaitteistolla tarkoitetaan järjestelmää, jonka avulla poistoilmasta siirtyy lämpöä joko tuloilmaan tai muuhun rakennuksen tiloja lämmittävään järjestelmään ja siten alentaa rakennuksen lämmitysenergiankulutusta (ympäristöministeriön moniste 122, 2003, s. 8). Lämmönsiirrin on yleisnimitys, jota käytetään laitteistoista jotka siirtävät lämpöä johtumalla tai säteilemällä jonkin väliaineen kautta.

Opinnäytetyön kohteena olivat regeneratiiviset eli lämpöä varastoivat ja suorat rekuperatiiviset lämmöntalteenottolaitteet. Rekuperatiiviset LTO-laitteet jaotellaan kahteen ryhmään, suoriin ja epäsuoriin eli nestekiertoisiin (Seppänen, 1996, s.285). Regeneratiiviset lämmöntalteenottolaitteet jaotellaan myös kahteen ryhmään; liikkuvan massan (pyörivä) LTO-laitteisiin ja kiinteän massan (virtausta vaihtava) LTO-laitteisiin (Seppänen, 1996, s.285). Tutkimuksen kouluissa esiintyi ainoastaan pyöriviä regeneratiivisia LTO-laitteita, koska virtauksen vaihto olisi hankala toteuttaa eri suuruisille tulo- ja poistoilmavirroille.

3.1 Regeneratiivinen pyörivä vastavirtalämmönsiirrin

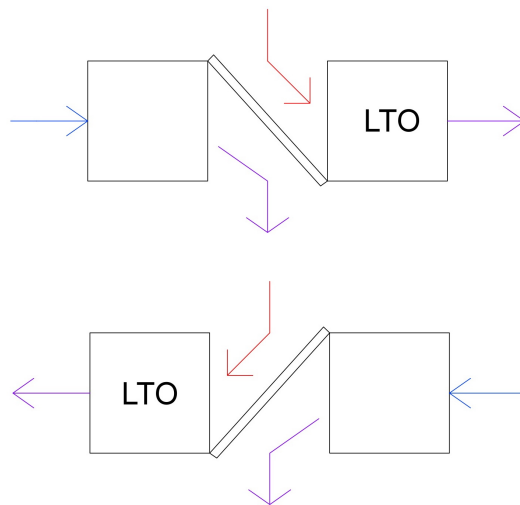
Regeneratiivisten pyörivien lämmöntalteenottolaitteiden tyypillinen tuloilman lämpötilahyötysuhde on 60 – 80 % (ympäristöministeriön moniste 122, 2003, s. 9). Kennon rakenne vaikuttaa lämmönsiirtimen hyötysuhteeseen. Ohuella materiaalilla ja tiheällä kennostolla saadaan aikaa parempi hyötysuhde. Myös kennon pyörimisnopeus vaikuttaa lämmönsiirtonopeuteen. Pyörivä lämmönsiirrin asettuu puoliksi ilmastointikoneen tulo- ja poistoilmakanavaan. Poistoilmapuolelta se varaa lämpöä metalliseen kennorakenteeseensa ja luovuttaa sen tuloilmapuolella. Regeneratiivinen LTO-laite saattaa siirtää myös kosteutta talviaikaan. Kosteutta absorboivasta materiaalista valmistettu pyörivä lämmönsiirrin siirtää kosteutta jopa lämpimällä säällä, jolloin LTO-laitteen entalpia hyötysuhde on parempi. Kosteutta absorboimattomasta materiaalista valmistettu ”normaali” LTO-laite siirtää kosteutta kylmällä ilmalla, kun poistoilman kosteus lauhuu kennoston tuloilmasta kylmentyneelle pinnalle ja höyrystyy tuloilmapuolella (Seppänen, 1996, s. 288). Vähäinen tulo- ja poistoilmavirtojen sekoittuminen on mahdollista kiekon pyöriessä kummankin kanavan läpi.



Kuva 1. (Oikea) Regeneratiivinen pyörivä lämmönsiirrin. Kuva Elina Järvelä (Vasen) Pyörivän lämmönsiirtimen periaate Olli Seppäsen (1996, s.288) esimerkin mukaan

3.2 Kiinteä regeneratiivinen lämmönsiirrin

Kiinteä regeneratiivinen lämmönsiirrin eli virtausta vaihtava lämmönsiirrin toimii samalla periaatteella kuin pyörivä regeneratiivinen lämmönsiirrin. Regeneratiivinen lämmönsiirrin varaa lämpöä massaansa kun lämmin ilma virtaa sen läpi ja vastaavasti luovuttaa lämpöä kylmässä ilmavirrassa. Yhden pyörivän kiekon sijaan kiinteässä regeneratiivisessa lämmönsiirtimessä käytetään kahta varaavaa kennoa, jotka vuorotellen lämpiävät ja kylmenevät. Lämmönsiirtimessä tarvitaan myös jonkinlaista virransäätelymekanismia, esimerkiksi laippaa kennojen välillä kuten kuvassa 3 havainnollistetaan. Ilmavirtojen edestakaisella liikkeellä saadaan aikaan vuoroittainen lämmönvaraus ja -luovutus LTO-laitteessa. Nopeus ilmavirtojen vaihdon välillä vaikuttaa samalla tavalla regeneratiivisen LTO-laitteen hyötysuhteeseen kuin pyörimisnopeus. Tämän tyyppisten lämmönsiirtimien tuloilman lämpötilahyötysuhde voikin olla yhtä korkea, jopa 80 % (Seppänen, 1996, s. 290).

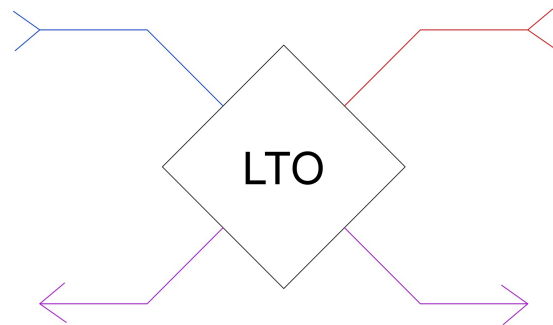


Kuva 2. Virtausta vaihtavan lämmönsiirtimen periaate Olli Seppäsen (1996, s.289) esimerkin mukaan

3.3 Suora rekuperatiivinen ristivirtalämmönsiirrin

Suorissa rekuperatiivisissa lämmönsiirtimissä eli levylämmönsiirtimissä käytetty ilman virtaussuunta on yleensä ristivirtaus. Ristivirtalevylämmönsiirtimen tuloilman tyyppinen lämpötilahyötysuhde on 50 - 70 % (ympäristöministeriön moniste 122 , 2003, s.

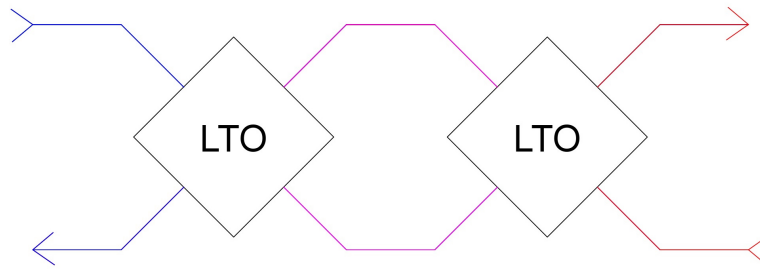
9). Levylämmönsiirrin on yksinkertainen, se ei tarvitse pumppua virtojen liikuttamiseen eikä moottoria LTO-laitteen pyörittämiseen. Levylämmönsiirtimen sisällä on hyvin lämpöä johtavasta metallista valmistetut levyt, joiden läpi joka toisesta välistä virtaa poistoilma ja joka toisesta tuloilma. Mitä enemmän levyjä on, sitä enemmän pinta-alaa lämmöllä on siirryä. Ainoa kosketus toisiinsa ilmajirroilla on levyn lämpöä johtavan pinnan kautta. Tästä on hyötyä, kun tulo- ja poistoilmavirrat eivät saa sekoittua. Näin ollen esimerkiksi teknisyöntilaa ja keittiötä palvelevissa ilmanvaihtokoneissa on yleisemmin kuutio. Kylmällä ilmalla poistoilman kosteus todennäköisesti tiivistyy tuloilmasta kylmenneiden levyjen pinnalle. Tästä voi seurata ongelmia, muun muassa tiivistyneen veden jäätyminen ja LTO-laitteen hyötysuhteen laskeminen joko jään tai sulatusautomaatiikan takia.



Kuva 3. (Oikea) Levylämmönsiirrin naulakallion koululla. Kuva Elina Järvelä (Vasen) Levylämmönsiirtimen periaate Olli Seppäsen (1996, s.286) esimerkin mukaan

3.3.1 Kaksoislevylämmönsiirrin

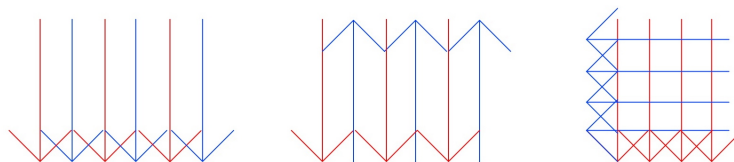
Yksi sovellus levylämmönsiirtimestä, jolla saadaan suoran rekuperatiivisen lämmöntalteenottimen tuloilman hyötysuhde nousemaan, on kaksoislevylämmönsiirrin. Tällöin lämmönsiirtimiä laitetaan kaksi peräkkäin kuten esimerkiksi kuvassa 4 on hahmotettu.



Kuva 4. Esimerkki kaksoislevylämmönsiirtimen periaatteesta Talotekniikkalehden artikkelin (3/2013, s. 72) mukaan

3.3.2 Ilman virtaussuunnat

Lämmöntalteenottolaitteiden ilmanvirtaussuuntien lämmönsiirtotehokkuudessa on eroja, mistä suureksi osaksi johtuu erilaisten lämmönsiirtimien tyypilliset hyötysuhteet. Rekuperatiivisissa lämmöntalteenottolaitteissa on kolme eri ilmanvirtaus vaihtoehtoa, myötä-, vasta- ja ristivirtaus, joista ristivirtaus on kuitenkin yleisimmin käytetty. Suorissa rekuperatiivisissa LTO-laitteissa ristivirtauksen ja vastavirtauksen hyötysuhteiden välillä on jonkin verran eroa, mutta ristivirta-mallin yksinkertaisuus ja halvempi hinta ovat tehneet siitä paljon yleisemmän.

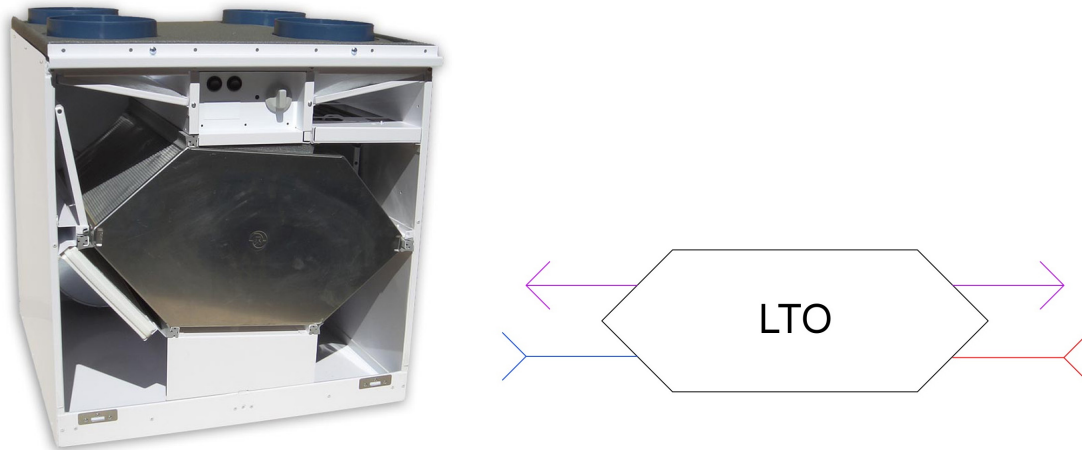


Kuva 5. Myötä-, vasta- ja ristivirtaus

3.4 Suora rekuperatiivinen vastavirtalämmönsiirrin

Suora rekuperatiivinen vastavirtalämmönsiirrin toimii samalla periaatteella kuin ristivirtalämmönsiirrin. Ainoa ero perinteiseen levylämmönsiirtimeen on se, että kuutiota on pidennetty vastakkaisilta sivuilta niin, että ilmavirrat saadaan kulkemaan vastakkain. Toimenpiteellä on saatu siirtimen tuloilman hyötysuhde nousemaan 60 – 70 %:iin.

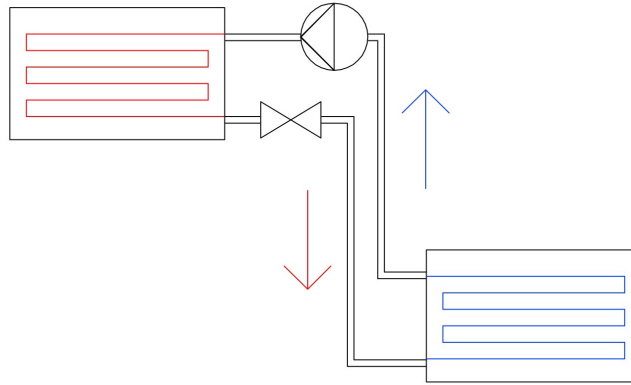
Lämmönsiirrin on tehokkaampi, kun ulkona ei ole kylmä, mutta talvella vastavirtalevy-lämmönsiirtimellä on jopa suurempi todennäköisyys jäätyä suuremman hyötysuhteen takia.



Kuva 6. (vasen) vastavirtaus levylämmönsiirrin SunAIR 431 EC Premium pientalolle (oikea) vastavirtaus levylämmönsiirtimen periaate

3.5 Epäsuora rekuperatiivinen lämmönsiirrin

Epäsuora rekuperatiivinen lämmönsiirrin eli nestekiertoinen lämmönsiirrin siirtää lämpöä välillisesti jonkin liuoksen, yleensä vesi-glykoli seoksen, välityksellä ilmavirrasta toiseen. Ilmastointikanavassa on tällöin lamellipatteri, jonka putket kiertävät tiheään kanavan poikkileikkauksen pinta-alalla. Liuos lämpenee poistoilmakanavassa ja luovuttaa lämmön tuloilmakanavassa. Liuoksen kierron nopeutta ja sen kautta tuloilman hyötysuhdetta säätelee pumppu. Välillisen lämmöntalteenottojärjestelmän hyötynä on, että ilmavirtojen sekoittumisesta ei ole pienintäkään pelkoa. Kanavien ei myöskään tarvitse olla lähekkäin, vaikka lämmönsiirtimen hyötysuhde pienenee mitä kauemmas talteenotettu lämpö pitää siirtää. Tyypillisesti nestekiertoisten lämmönsiirtimien tuloilman hyötysuhde on 40 – 60 % (ympäristöministeriön moniste 122, 2003, s. 9).



Kuva 7. Nestekiertoisen lämmönsiirtimen periaate Olli Seppäsen esimerkin (1996, s.299) mukaan

Yksinkertaisempi versio nestekiertoisesta lämmöntalteenottimesta on lämpöputkipatteri. Lämpöputkipatterissa ei tarvita pumppua nesteen liikuttamiseen, koska kylmäaine lauhduessaan tuloilmakanavan puolella imeytyy takaisin poistoilma puolelle kapillaari-imensiosta, jossa se taas höyrystyy ja kulkeutuu tuloilmapuolelle. Tässä versiossa kanaviin tulee olla vierekkäin. Lämpöputkipatterin tyypillinen hyötysuhde on 50 - 80 %.

4 LÄMMÖNTALTEENOTTOLAITTEEN HYÖTYSUHTEESEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

LTO-laitteen hyötysuhteeseen vaikuttaa ensisijaisesti lämmönsiirtimen materiaalin lämmönjohtokyky ja pinta-ala. Näitä ominaisuuksia ei voi parantaa kuin LTO-laitetta vaihtamalla toiminnassa olevasta IV-koneesta. Tässä tutkimuksessa keskityttiin tekijöihin, joihin on mahdollista vaikuttaa joko korjaavasti tai ennaltaehkäisevästi.

4.1 Ulkolämpötila

Koska tuloilman hyötysuhde lasketaan LTO-laitteen jälkeisen lämpötilan ja ulkoilman, sekä sisäilman ja ulkoilman lämpötilojen erotuksien suhteena, vaikuttavat kaikki nämä lämpötilat tuloilman hyötysuhteen muodostumiseen. Sisäilman pitäisi pysyä suhteellisen samana vuodenajasta riippumatta, ihanteellisesti +20 – +22 asteessa normaalissa huonetilassa (sisäilmayhdistys, 2008, haettu 20.4.2013) ja noin +19 asteessa liikuntati-

loissa. Vaikka Helsingissä talvikuukausien keskilämpötilat ovat kaikki alle nollan asteen, ne voivat vaihdella päiväkohtaisesti paljonkin. Kun ulkolämpötila laskee, LTO:n jälkeinen lämpötilakin laskee, mutta sisälämpötilan ja ulkolämpötilan ero kasvaa, jolloin tuloilman hyötysuhde pienenee. Tuloilman lämpötilahyötysuhde kuvaa prosentteina kuinka paljon poistoilmasta talteenotetusta lämmöstä saadaan käytettyä hyödyksi tuloilman lämmityksessä. Tuloilman lämpötilahyötysuhteeseen vaikuttaa siis myös poistoilman lämpötilahyötysuhde, joka kuvaa poistoilmasta talteen otetun lämmön määrää prosentteina.

4.2 Huurre

Mittaukset tutkimuksen kohteissa päätettiin suorittaa suurimmaksi osaksi helmikuussa, koska helmikuun keskilämpötila Helsingin alueella on menneiden kolmenkymmenen vuoden perusteella $-4,7\text{ °C}$ (ilmatieteenlaitos, helmikuun tilastot, 4.4.2013) eikä mittauksia ehditty tekemään aiemmin talvella. Kouluissa käytetään pääsääntöisesti S3 sisäilmastoluokkaa. Sen mukaan sisäilma voi olla hyvinkin kuivaa, koska S3 sisäilmastoluokassa ei ole ilmoitettu raja-arvoja sisäilman suhteelliselle kosteudelle (sisäilmayhdistys, fysikaaliset tekijät, haettu 20.4.2013). Siksi talvella sisäilman suhteellinen kosteus on suunnilleen 20 %. Mollier-käyrästä katsottaessa huomataan, että jäähdytettäessä sisäilmaa, jonka suhteellinen kosteus on noin 20 % ja sisälämpötila noin $+21\text{ °C}$, kosteus alkaa tiivistyä lämmönsiirtimen pinnoille niiden ollessa noin -3 °C . Toisaalta sisäilman suhteellinen kosteus voi kosteissa tiloissa nousta myös hyvin korkeaksi raja-arvojen puuttuessa ja silloin lämpötila, jossa huurretta alkaa muodostua nousee ja sen riski kasvaa.

Vaikka vesi johtaa hyvin lämpöä, ohut vesikalvo lämmönsiirtimen pinnalla paksuntaa kerrosta minkä läpi lämmön tulisi siirtyä. Vesikalvo myös kerää herkemmin likaa ja pölyä ilmavirrasta, joka entisestään huonontaa materiaalin lämmönsiirtokykyä. Lämmönsiirtopinnan ollessa alle 0 °C , vesi alkaa tiivistyessään muodostaa huurretta. Huurrekerros huonontaa LTO-laitteen hyötysuhdetta samalla tavalla kuin vesi, mutta huurteen sulattaminen ja sen ennalta ehkäisy vaatii LTO-laitteen hyötysuhteen laskemista mekaanisesti. Tällöin kylmää tuloilmaa päästetään rajoitetusti tai ei ollenkaan LTO-laitteelle ja poistoilman annetaan lämmittää lämmönsiirtimen pintoja enemmän.

4.3 Huurteen esto ja sulatus

LTO-laitteen sulatuksessa tai huurteen estämisessä lämmönsiirtimen hyötysuhdetta lasketaan tarkoituksella. Useimmat IV-koneet ovat automatisoituja, jolloin LTO-laitteesta mitataan paine-eroa poistoilmapuolen yli. Jos paine-ero nousee normaalista tasosta, tarkoittaa se huurteen muodostumista ja sulatusautomaattikka käynnistyy. Pyörivässä LTO-laitteessa tämä tarkoittaa kennon pyörimisnopeuden hidastamista tai jopa pysäyttämistä kokonaan, jolloin poistoilman kosteus ei pääse kylmään tuloilmaan. Levylämmönsiirtimessä tuloilma ohjataan toista kautta lämmönsiirtimen ohi, joko osittain tai kokonaan, jolloin lämmin poistoilma sulattaa mahdollisesti jo huurtuneet osat ja pysyy lämpimämpänä.

4.4 Likaantumisen

Likaa LTO-laitteisiin tulee kahta kautta, tulo- ja poistoilmavirran mukana. Sen takia suodatus on erittäin tärkeää ennen lämmöntalteenottoa tulo- ja poistoilmakanavassa. Pölyä kerääntyy kuitenkin IV-koneen kaikille pinnoille ajan kuluessa, siksi niitä tulisi puhdistaa säännöllisin väliajoin. Kosteuden tiivistyminen IV-koneen osissa kerää likaa nopeammin sen tarttuessa silloin paremmin. Kerääntyvä pöly on myös kosteassa ilmavirrassa kasvualusta homeille ja muille mikrobeille. Lian kerääntymistä voidaan onneksi hidastaa ilmansuodattimilla ja niiden säännöllisellä vaihdolla.

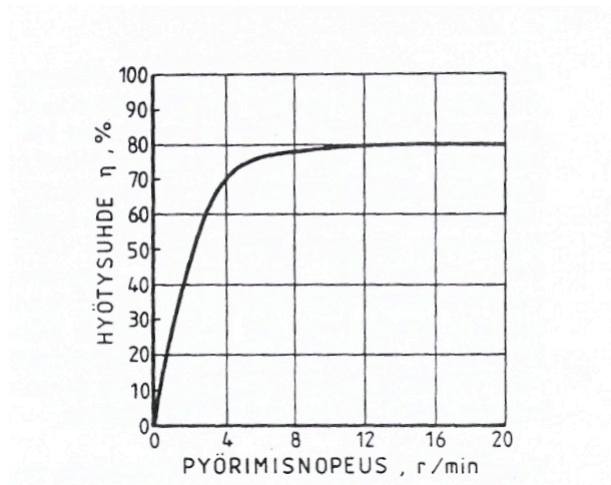
4.5 Rakenneviat

Lämmöntalteenottolaitteen pinnalla tai liitoksissa olevat viat saattavat huonontaa laitteen hyötysuhdetta, jos niiden kautta ilma pääsee ohittamaan lämmönsiirtimen kokonaan, nopeammin tai ei ollenkaan. Yleisin ongelma on tiivisteiden kuluminen. LTO-laitteissa tiivisteiden kuluminen ja irtoaminen tarkoittaa ohivuotoja, jolloin ilmavirta ei kulje tarkoitettua reittiä LTO:n läpi. Koska pyörivän lämmönsiirtimen täytyy liikkua, käytetään perinteisten kumitiivisteiden sijaan usein harjaksia, jotka ovat juuri ja juuri kennon pinnalla. Nämä harjakset usein kulumat ja aiheuttavat ohivuotoja kanavasta toiseen tai LTO-laitteen vierestä. Lämmönsiirtimet valmistetaan ohuesta metallista, joka

kolhiintuu ja vääntyy suhteellisen helposti. Esimerkiksi asennus- tai huoltovaiheessa syntyneet kolhut ja naarmut ovat yleisiä, mutta harvemmin vakavia.

4.6 Pyörimisnopeus

Optimoimalla regeneratiivisen LTO-laitteen pyörimisnopeuden tai virtauksen vaihdon ajan saadaan hyötysuhde maximoitua. Virtausta vaihtavan LTO:n hyötysuhde käyttäytyy samoin kuin pyörivänkin, mitä suurempi kierrosluku tai nopeampi virtauksen vaihto, sitä korkeampi hyötysuhde, mutta vain tiettyyn pisteeseen asti. Noin 12 r/min jälkeen ei pyörivän LTO:n hyötysuhde enää mainittavasti nouse eikä nopeuden nostaminen enää kannata, koska LTO-laitteen pyörittäminen nopeammin tarvitsee enemmän sähkötehoa.



Kuva 8. Kiekon hyötysuhteen riippuvuus pyörimisnopeudesta (Seppänen Olli, 1996, s.289)

4.7 Ilmastointikoneen ilmavirrat

Jos ilmanvaihtokoneen puhaltimet ovat kiinni, eivät ilmavirrat kulje myöskään LTO-laitteen läpi. Tällöin tulo- ja poistoilman hyötysuhteet jäävät nolnaan. Tarpeenmukaisessa IV-koneen ohjauksessa pienillä ilmavirroilla hyötysuhteet laskevat. Jos poistoilmavirta on mitoitettu paljon pienemmäksi kuin tuloilmavirta likaisen ilman erillispoistojen takia, saattaa tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa tuloilmavirta olla merkittävästi suu-

rempi kuin poistoilmavirta. Tällöin poistoilman lämpötilahyötysuhde laskee enemmän suhteessa tuloilman lämpötilahyötysuhteeseen, jolloin tuloilman lämpötilahyötysuhdekin laskee pienen talteenotetun lämmön määrän takia.

5 MITTAUKSET

Jotta LTO:iden toiminnasta ja kunnosta saataisiin mahdollisimman laaja kuva, on niille tehty lämpötila, kosteus ja paine-ero mittauksia, sekä otettu lämpökamera kuvaa mahdollisuuksien mukaan.

5.1 Hyötysuhteet

Tutkimuksen pääpainona oli selvittää lämmöntalteenottolaitteiden tuloilman lämpötilahyötysuhteet. Tuloilman lämpötilahyötysuhdetta tarvitaan muun muassa selvitetessä ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhdetta, jota taas tarvitaan energiatodistusta Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 mukaan laskettaessa. Ympäristöministeriön monisteessa 122 *“esitetään yksityiskohtaisemmat ohjeet, miten ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde voidaan laskea tuloilman lämpötilahyötysuhteen ja ulkolämpötilan pysyvyystietojen avulla”* (ympäristöministeriön moniste 122, s. 11).

Tuloilman lämpötilahyötysuhteen laskemiseen tarvitaan tuloilman lämpötila ennen ja jälkeen LTO-laitetta, sekä poistoilman lämpötila ennen LTO-laitetta. Tässä tutkimuksessa on käytetty EN 308-standardia vastaavaa kaavaa laskettaessa LTO-laitteiden tuloilman lämpötilahyötysuhteita, kuten myös ympäristöministeriön monisteessa 122 ehdotetaan. Käytetyssä laskukaavassa ei oteta huomioon kondensaatiota. Hyötysuhteen laskemiseen voisi käyttää ulko- ja sisäilman lämpötilaa, mutta riippuen koulusta, ilmastointi kanavat saattavat kulkea talon sisällä pitkiä matkoja. Matkan aikana kanavassa kulkevan ilman lämpötila saattaa nousta tai laskea ennen LTO-laitteelle saapumista. Tämän takia loggerit sijoitettiin mahdollisimman lähelle itse LTO-laitetta, kuitenkin ottaen huomioon ilman liike ja lämpötilajakauma LTO-laitteen jälkeen. Sijoituksen tarkoituksenmukaisuutta on yritetty varmistaa lämpökameramittauksilla. Joissain tapauksissa lämmöntalteenottolaitteen jälkeinen tuloilman lämmityspatteri vaikeutti loggereiden sijoittamista. Lämmityspatterin läheisyys ja lämmitysteho mittaushetkellä vaikuttavat

LTO:n jälkeisen ilmavirran lämpötilaan, joka pitää ottaa huomioon tuloksia arvioitaessa. Tuloilman lämpötilahyötysuhteen laskemiseen tarvittavat lämpötilat mitattiin Testomerkkisillä, 175-H2 mallisilla, loggereilla. 175-H2-loggerin virhemarginaali lämpötilaa mitattaessa on $\pm 0,5$ °C. Loggerit tallensivat ilmavirtojen lämpötilan viiden minuutin välein. Saaduista arvoista laskettiin keskilämpötilat mittaussajanjaksoilla, joita käytettiin laskettaessa lämpötilahyötysuhdetta. Lämpötilahyötysuhde ilmoittaa kuinka monta prosenttia lämmöntalteenotolla saadaan lämmitettyä tuloilmaa sisä- ja ulkolämpötilan erotuksesta. Hyötysuhteet lasketaan ensin olettaen, että ilmamäärät ovat samankokoiset. Sitten niiden ilmanvaihtokoneiden LTO-laitteiden tuloilman hyötysuhteet, joiden ilmavirrat ovat erisuuruiset, painotettiin ilmavirroilla. Ympäristöministeriön monisteessa 122 on annettu ohjeet lämpötilahyötysuhteen laskemiseen erikokoisilla ilmamäärillä. Joistain LTO-laitteista mitattiin testimielessä jäteilmastakin keskilämpötila ja laskettiin poistoilman lämpötilahyötysuhde ilmavirtojen vaikutusta ajatellen. Poistoilman lämpötilahyötysuhde lasketaan jäteilman erotuksen suhtena suurimpaan lämpötilaeroon eli sisä- ja ulkolämpötilan eroon.

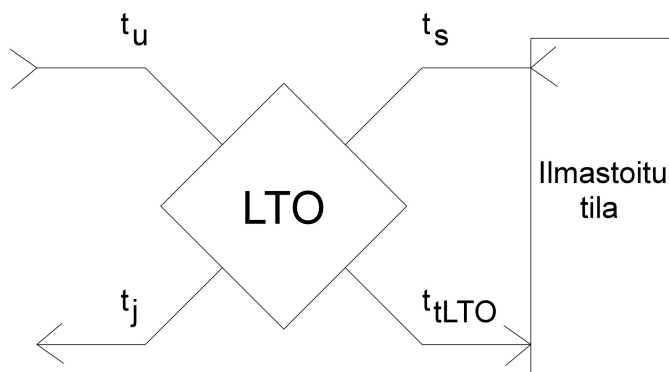
Tuloilman lämpötilahyötysuhde;

$$\eta_t = \frac{t_{tLTO} - t_u}{t_s - t_u} * 100$$

Poistoilman lämpötilahyötysuhde;

$$\eta_p = \frac{t_s - t_j}{t_s - t_u} * 100$$

η_t	tuloilman lämpötilahyötysuhde
η_p	poistoilman lämpötilahyötysuhde
t_{tLTO}	tuloilman lämpötila LTO:n jälkeen
t_s	poistoilman lämpötila ennen LTO:ta
t_u	tuloilman lämpötila ennen LTO:ta
t_j	poistoilman lämpötila LTO:n jälkeen



Kuva 9. Hyötysuhteen määrittelyn merkinnät ympäristöministeriön esimerkin (moniste 122, s. 11) mukaan

Tulo- ja poistoilmavirtojen suhde:

$$R_{LTO} = \frac{q_{tLTO}}{q_{pLTO}}$$

R_{LTO}	lämmöntalteenoton läpikulkevien tulo- ja poistoilmavirtojen suhde
q_{tLTO}	tuloilmavirta LTO-laitteelle
q_{pLTO}	poistoilmavirta LTO-laitteelle

Tuloilman lämpötilahyötysuhde epäsuhteisilla ilmavirroilla (ympäristöministeriön moniste 122, s. 15):

$$\eta_{t(R_{LTO})} = \frac{2}{(1+R_{LTO})} \eta_{t(R_{LTO}=1)}$$

$\eta_{t(R_{LTO})}$	tuloilman lämpötilahyötysuhde epäsuhteisilla ilmavirroilla
$\eta_{t(R_{LTO}=1)}$	tuloilman lämpötilahyötysuhde kun ilmavirtojen suhde on yksi

5.2 Kosteus

Testo-loggereilla saatiin myös ilmvirran suhteellinen kosteus viiden minuutin välein. Loggerin virhemarginaali suhteellista kosteutta mitattaessa on $\pm 3\%$. Vaikuttavin suhteellinen kosteus on poistoilmavirralla, joka LTO-laitteen ohittaessaan viilenee ja saattaa kylmällä säällä tiivistyä LTO-laitteen pinnalle ja pakkasella jäätyä. Vaikka ulkoilma on ilmvirroista yleensä suhteellisesti kosteinta, talvella se sisältää vähemmän vettä kuin sisäilma. Lisäksi ulkoilma lämpenee LTO-laitteella eikä kosteuden enää tämän jälkeen pitäisi tiivistyä kanaviin.

5.3 Paine-ero

Paine-eroa LTO-laitteen yli ja IV-koneiden mitoitettua tilavuusvirtaa vertaamalla saadaan suuntaa onko LTO:sta mitattu paine-ero korkea vai ei. Mitoitetut tilavuusvirrat ovat haettu Helsingin kaupungin sisäisestä julkisia rakennuksia koskevasta datapankista, FacilityInfonsta. Koska poistoilman kosteus huurtuu levylämmönsiirtimen pinnoille, mahdollisen huurtumisen selvittämiseksi rekuperatiivisten LTO-laitteiden paine-ero tulisi mitata poistoilmakanavan puolelta. Useissa IV-koneissa on kiinteä mittari tai mittausyhteet paine-eron mittaamista poistoilmapuolelta varten. Regeneratiivisilla LTO-laitteilla ei ole niin suurta eroa mitataanko tulo- poistoilmapuolelta, koska ilmvirrat menevät vuorotellen massan läpi. Jos tulo- ja poistoilmavirrat ovat eri suuruiset, pitää se ottaa huomioon paine-eroa tarkasteltaessa. Myös puhaltimien sijoitus vaikuttaa LTO:n yli mitattuun paine-ero suhteeseen. Yleensä ilmanvaihtokoneen puhaltimet ovat sijoitettu tulo- ja poistoilmakanavassa LTO-laitteen jälkeen, mutta jos toinen puhaltimista onkin sijoitettu ennen LTO-laitetta, saattaa paine-ero näyttää pienemmältä kanavien välisen vuotoilman takia. Paine-ero mitattiin LTO:ista TSI 9555-P mittarilla, jonka sisäinen virhemarginaali on $\pm 1\%$ lukemasta.

5.4 Pyörimisnopeus

Pyörivien regeneratiivisten lämmöntalteenottimien kierrosnopeudet laskettiin sekuntikellolla kiekoon lisätystä merkistä. Ihmisen silmä-käsi koordinaatio ei valitettavasti ole hyvin tarkka, mutta tarpeeksi monella testikierroksella ja niiden keskiarvolla saadaan

tarkoitukseen sopiva tulos. Tässä tapauksessa viisi testikierrosta oli riittävä määrä, koska testikertojen lisääntyessä mittaja osasi jo ennakoita milloin pysäyttää sekuntikello. Menetelmällä saadaan aika, joka kiekolla menee yhden kierroksen tekemiseen. Tästä voidaan laskea kuinka monta kierrosta kiekko tekee minuutissa ja edelleen kuinka monta kierrosta sekunnissa. Vaikka yksikkö ”kierrosta sekunnissa” (r/s) on SI-järjestelmän johdannainen, tulokset on valittu esitettäväksi yksikössä ”kierrosta minuutissa” (r/min), koska se on yleisempi tapa.

$$\frac{r}{min} = \frac{60}{t_{\text{yksi kierros}}}$$

$$r/s = \frac{r/min}{60}$$

r/s	kierrosta sekunnissa
r/min	kierrosta minuutissa
$t_{\text{yksi kierros}}$	aika, joka menee yhteen kierrokseen

5.5 Lämpökamera

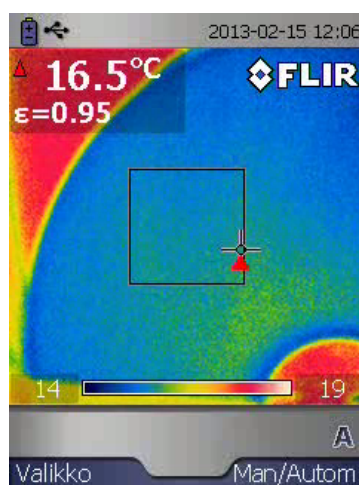
Käytössäni oli Flir b60-lämpökamera ja tietokone-ohjelma Flir IR Camera Player. Kameraan soveltuvalla ohjelmalla saatiin tallennettua videot suoraan tietokoneelle. Lämpökameralla oli tarkoitus selvittää onko pyörivien LTO-laitteiden pinnalla tai rakenteessa vuotokohtia, joista ilma pääsee liian nopeasti tai hitaasti läpi eikä luovuta lämpöä suunnitellusti. Tarkoituksena oli myös arvioida mahdollisten vuotokohtien vaikutus hyötysuhteeseen. Lämpökameravideoista pystytään myös arvioimaan lämpötilajakauma LTO-laitteen jälkeen, josta on paljon hyötyä loggereiden mittaaman lämpötilan luotettavuutta arvioidessa.

5.5.1 Ominaisuudet

Kuvassa yhdeksän on esimerkki kuvakaappauksesta lämpökameran tallenteesta. Aivan oikeassa yläkulmassa näkyy kuvauspäivämäärä ja -aika. Valikkorivin yläpuolella, kuvan alareunassa, näkyy lämpötilajakauman värit, sekä suurin ja pienin lämpötila Celsius-

asteissa. Alin lämpötila kuvassa on + 14 °C ja ylin + 19 °C, kamera määrittää nämä itse kun valittuna on automaattiasetus. Kuvan keskellä liikkuu risti, joka mittaa sen alapuolella olevan pisteen lämpötilaa. Mitattu lämpötila näkyy kuvan vasemmassa yläreunassa. Mitatun lämpötilan alapuolella on materiaalin emissiivisyys (ϵ), joka ilmoittaa kuvattavan materiaalin kyvyn heijastaa lämpösäteilyä. Mitä suurempi emissiivisyys, sitä vähemmän materiaali heijastaa. Teoriassa käytettävän “black bodyn”, joka ei heijasta ollenkaan, emissiivisyys on yksi. Flir b60-lämpökameran valikosta löytyy emissiivisyys muutamalle materiaalille valmiiksi, esimerkiksi vesi (0,96), maali (0,90), betoni (0,97) ja ruoste (0,80). Yleensä aineiden ja kappaleiden emissiivisyyskerroin osuu välille 0,8-0,97, koska normaalissa elinympäristössä mikään aine ei ole täysin puhdas eikä sileä.

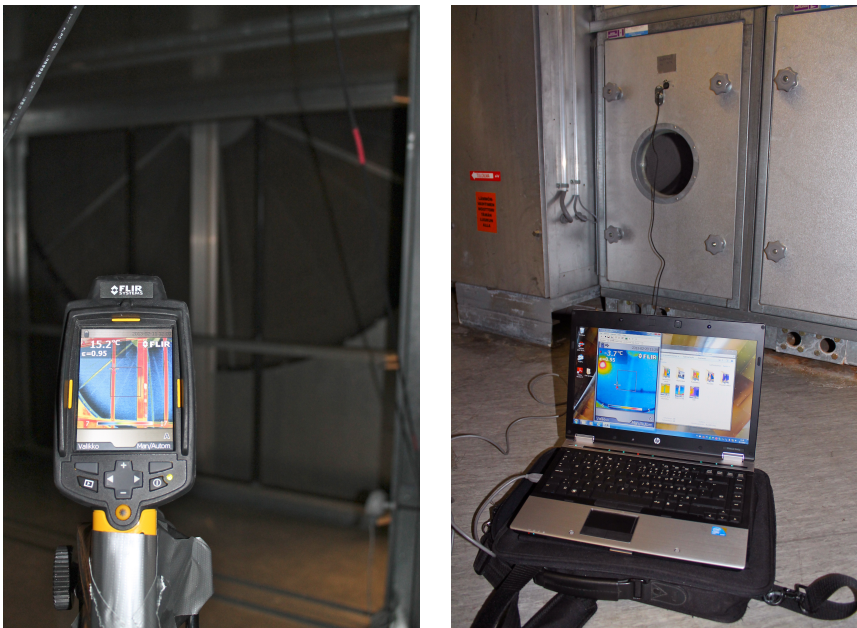
Lämpökameran toimittaja Infradex Oy ilmoittaa verkkosivuillaan, että kiiltävän metallin lämpötilaa ei voi luotettavasti mitata lämpökameralla sen hyvin matalan emissiivisyyden takia. Tällä tarkoitetaan esimerkiksi kiiltävää alumiinia, jonka emissiivisyyskerroin on karkeasti noin 0,1 – 0,4. LTO-laitteen pinta on hyvin epätasainen, mikä nostaa emissiivisyyttä, siksi metallikennon emissiivisyyttä on vaikea arvioida silmämääräisesti. LTO-laitteita kuvatessa valittiin emissiivisyys kertoimeksi 0,95. Kertoimen toimivuutta kokeiltiin pienellä testillä mittaamalla ensin lämpötila kennon viereen asetetulla loggerilla ja sitten lämpökameralla eri emissiivisyys kertoimilla. Arvolla $\epsilon=0,95$ päästiin lähimmäksi loggerin arvoa. Myös Nokeval Oy:n muissa edullisemmissä lämpökameroissa emissiivisyyskerroin on asetettu kiinteästi yleispätevään 0,95.



Kuva 10. Porolahden peruskoulun TK/PK 214 poistoilmakanavasta ennen LTO:ta, pyörimissuunta oikealle.

5.5.2 Lämpökameran sijoitus

Suurimmaksi esteeksi lämpökameran sijoitukselle IV-koneen sisällä oli tilanpuute. Isompien IV-koneiden kanavan korkeus riitti yleensä hyvin, mutta pituutta kanavalla oli vaihtelevasti. Lämpökamerassa ei ollut zoomia, joten se oli sijoitettuna siihen kanavan osaan, missä se saatiin kauimmaksi LTO-laitteesta. Näin saatiin mahdollisimman paljon lämmönsiirtimen pinta-alasta samaan kuvaan. Usein kameran tieltä oli poistettava suodattimia. Kamera kiinnitettiin jalustaan, laitettiin IV-koneen sisälle ja yhdistettiin USB-liittimellä tietokoneeseen. Johdolle saatiin reikä poistamalla kiinteä lämpömittari tai huoltoluukun kahva. Kameran toimittajan mukaan kamera tulisi sijoittaa vähintään ± 60 asteen kulmaan kohteeseen nähden, jottei kohteen emissiivisyys laskisi liikaa.



Kuva 11. (Vasen) Flir b 60. Kuva Elina Järvelä (Oikea) USB-kaapelilla kameraan kiinnitetyn tietokoneen näytöllä Flir IR Camera Player ohjelma. Kuva Elina Järvelä

6 TULOKSET KOOTUSTI

Tutkimuksen 28 lämmöntalteenottolaitteesta 21 oli regeneratiivisia ja 7 oli rekuperatiivisia. Otannan ilmastointikoneissa pyörivä regeneratiivinen LTO-laite oli selvästi yleisempi. Tämä muun muassa johtuu regeneratiivisten LTO-laitteiden tyypillisesti paremmasta hyötysuhteesta, luotettavammasta toiminnasta talviaikaan ja suhteellisen pienestä koosta. Mitä suurempi IV-kone, sitä suurempi LTO-laite tarvitaan ja levylämmönsiirtimen tilavuus kasvaa suhteessa ilmamäärään enemmän kuin pyörivän lämmönsiirtimen. Tutkimuksessa ei kohdattu yhtäkään vastavirtalevylämmönsiirintä.

25/28 LTO-laitteesta on mitattu paine-ero laitteen yli ja 11 pyörivästä regeneratiivisesta lämmönsiirtimestä pystyttiin laskemaan pyörimisnopeus. Kaikille tutkimuksen lämmönsiirtimille on laskettu hyötysuhde mittausajanjakson keskilämpötiloista, sekä ilmamääräpainotettu hyötysuhde. Ilmamäärillä painotetun hyötysuhteen laskemisessa on käytetty FacilityInfossa ilmoitettuja IV-koneiden mitoitettuja ilmamääriä. Kaikkia loggereista saatuja lämpötiloja on verrattu lämpökameran tallenteeseen ja LTO-laitteen lämpötilajakaumaan, sekä IV-koneen kiinteiden lämpömittareiden lukemiin, jos siihen oli mahdollisuus. Mitä huonompi hyötysuhde, sitä enemmän tuloilmanlämmittin lämmittää, jolloin on vaikea määrittää kuinka paljon radiaattori on nostanut hyötysuhdetta. Siksi rajana hyvän ja huonon välillä käytetään karkeasti LTO-laitteiden tyypillisen hyötysuhteen alarajaa.

6.1 Pyörivien lämmönsiirtimien hyötysuhteet

Jos tyypillinen tuloilman lämpötila hyötysuhde regeneratiivisille lämmöntalteenottolaitteille on 60 – 80 %, alle 60 %:in hyötysuhdetta voidaan pitää matalana. Vajaa kolmasosa pyörivien LTO-laitteiden hyötysuhteista oli alle 60 % ja neljä 21:stä pyörivän lämmönsiirtimen hyötysuhteesta oli alle 50 %.

Taulukko 1. Pyörivien regeneratiivisten lämmönsiirtimien hyötysuhteet

Koulu	IV-kone	LTO-tyyppi	Tuloilman lämpötilahyötysuhde
Puustellin aa	TK/PK 3	kiekko	15,75
Herttoniemenrannan aa	TK/PK 201	kiekko	43,83
Herttoniemenrannan aa	TK/PK 208	kiekko	47,24
Herttoniemenrannan aa	TK/PK 204	kiekko	49,88
Medialukio	TK/PK 202	kiekko	50,17
Käpylän pk	TK/PK 201	kiekko	57,2
HESOTE	10 TK/PK	kiekko	61,9
Porolahden pk	TK/PK 213	kiekko	62,45
Arabianrannan pk	TK/PK 204	kiekko	63,9
Apollon yk	4 TK/PK	kiekko	66,24
Apollon yk	2 TK/PK	kiekko	66,53
Porolahden pk	TK/PK 211	kiekko	66,67
Poikkilaakson aa	TK/PK 201	kiekko	67,21
HESOTE	8 TK/PK	kiekko	69,1
Porolahden pk	TK/PK 214	kiekko	70,38
HESOTE	7 TK/PK	kiekko	74,6
Käpylän pk	TK/PK 202	kiekko	75,5
Latokartanon aa	TK/PK 201	kiekko	77,7
Medialukio	TK/PK 209	kiekko	80,4
Apollon yk	1 TK/PK	kiekko	80,47
Arabianrannan pk	TK/PK 205	kiekko	80,8

6.2 Levylämmönsiirtimien hyötysuhteet

Suorien rekuperatiivisten LTO-laitteiden tyypillinen hyötysuhde on 50 – 70 %, joten alle 50 %:in hyötysuhdetta voidaan pitää matalana. Kolmella seitsemästä kuutiosta oli alle 50 % hyötysuhde. Tarkempi analyysi hyötysuhteista löytyy koulukohtaisesta esittelystä.

Taulukko 2. Suorien rekuperatiivisten lämmönsiirtimien hyötysuhteet

Koulu	IV-kone	LTO-tyyppi	Tuloilman lämpötilahyötysuhde
Puustellin aa	TK/PK 2	kuutio	14,65
Poikkilaakson aa	TK/PK 202	kuutio	40,6
Metsolan aa	TK/PK 6	kuutio	41,23
Arabianrannan pk	TK/PK 208	kuutio	52,3
Käpylän pk	TK/PK 214	kuutio	55,4
Naulakallion ek	6 TK/PK	kuutio	64,72
Naulakallion ek	5 TK/PK	kuutio	78,16

7 MITTAUSKOHTEIDEN ERITTELY

7.1 Apollon yhteiskoulu

Apollon yhteiskoululla käytiin tutkimassa kaikkia kolmea IV-konetta, jotka sisältävät LTO-laitteen, 1 TK/PK, 2 TK/PK-1 ja 4 TK/PK. Kaikki IV-koneet ovat alkuperäisiä vuodelta 1985, ainoastaan 1 TK/PK:n tuloilmapuhallin on vaihdettu helmikuun 2013 alussa vastaamaan paremmin liikuntasalin tarpeenmukaisen ilmastoinnin tehon vaihtelua. Puhaltimen säädöt olivat vielä kesken sovittuna mittauspäivänä, joten 1 TK/PK:sta ei saatu lämpökamerakuvaa. Muut mittarit jätettiin parin päivän ajaksi koululle. Apollon yhteiskoulun energiakatselmuksesta käy ilmi (FacilityInfo), että yleisilmanvaihdosta vastaavat kaksi muuta ilmastointikonetta toimivat täydellä teholla koko koulupäivän ajan luokkakokojen ja ilmamääräntarpeen kasvun takia. Lämmöntalteenottolaitteiden hyötysuhteet ovat pyörivälle regeneratiiviselle lämmönsiirtimelle tyypillisissä rajoissa. Kaikki IV-koneet ovat umpinaisia ja ainoastaan 2 TK/PK-1:n LTO-laitteesta saatiin laskettua pyörimisnopeus lämpökameratallenteesta.

Taulukko 3. Apollon yhteiskoulun mittaukset

IV-kone	LTO-tyyppi	Toiminta-alue	Ala	Pyörimisnopeus	Paineero	Mitoitetut ilmamäärät	Hyötysuhde	Ilmamäärä-painotettu hyötysuhde
			[m ²]	[r/min]	[Pa]	[m ³ /s]	[%]	[%]
1 TK/PK	kiekko	liikuntasali	2,84	-	-15,8	3,9 (0,54) TK 3,9 (0,45) PK	80,47	73,15 (min. teho)
2 TK/PK-1	kiekko	osa B yleisIV	1,54	11,57	-168,7	2,22 TK/PK	66,53	66,53
4 TK/PK	kiekko	osa C yleisIV	3,14	-	-91,8	2,58 TK/PK	66,24	66,24

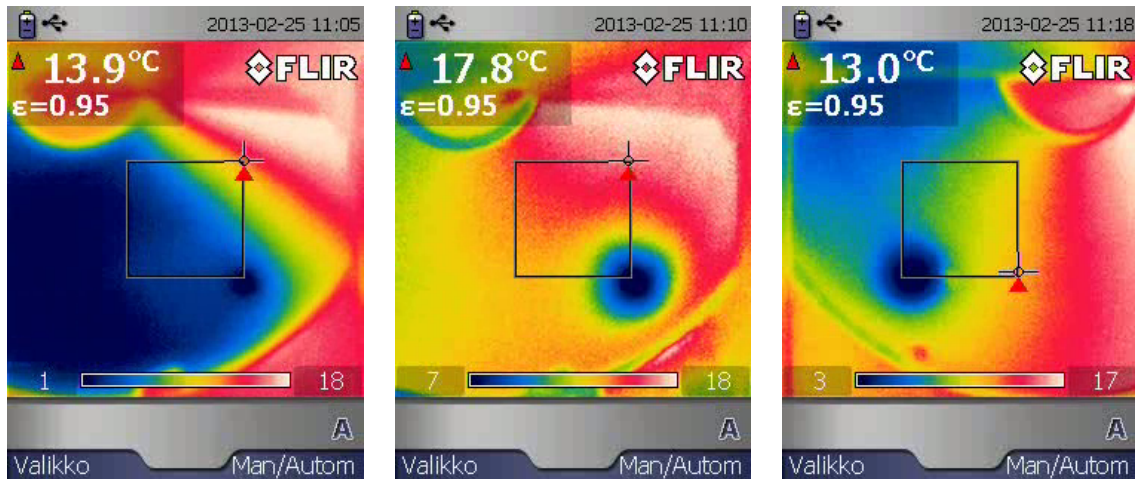
7.1.1 1 TK/PK

1 TK/PK-ilmastointikone palvelee liikuntasalia. IV-koneen tuloilmapuhallin on vaihdettu uuteen ja koneen taajuusmuuntaja säätelee puhallintehoa liikuntasalin hiilidioksididi-

mittareiden mukaan. IV-koneen mitoitettujen ilmavirtojen suhde puhaltimen vaihdon jälkeen on 1, kun puhallin käy täydellä teholla ja 1,2 pienimmällä teholla. Paine-ero on mitattu aamulla ennen liikuntatunteja koneen käydessä vielä pienellä teholla. Tämä huomioon ottaen paine-ero on normaali. LTO-laite ei näyttänyt silmämääräisestikään likaiselta, vaikka tuloilmakanavassa ennen LTO:ta ei ole ilmansuodattimia. Kahden metrin pituiseen kanavaan ei myöskään ollut luukkuja, joten loggeri sijoitettiin ulkoilmaan ilman sisääntuloaukon viereen. Ulkoilman keskilämpötila mittausajanjaksolla oli +1,5 °C, joten riskiä jäätymiselle ei ollut. LTO-laitteen hyötysuhde 80,47 % on erittäin hyvä, mutta tässä pitää huomioida kiertoilman vaikutus. Koska kiertoilmapelit olivat auki, olisi LTO-laitteen oikeampi hyötysuhde oman arvion mukaan enintään 70 %:n luokkaa, kuten kahdessa muussakin koneessa. Lisäksi mittausajankohtana puhallin toimi pienimmällä teholla. Minimitehon ilmamäärien suhde huomioiden hyötysuhde laskee 80 %:sta 73 %:iin.

7.1.2 2 TK/PK-1

2 TK/PK-1 ilmanvaihtokoneen pyörivän regeneratiivisen LTO-laitteen hyötysuhde oli mittausajanjaksolla noin 66,5 %. Paine-ero LTO:n yli on korkeahko, mutta tämä johtuu ilmamäärän ylimitoituksesta kun verrataan puolet isompaan 4 TK/PK:n LTO-laitteeseen ja lähes samaan mitoitettuun ilmamäärään. LTO-laitteen pyörimisnopeus on hyvä. Lämpökamera oli sijoitettu tuloilmakanavaan LTO-laitteen jälkeen. Kuvissa näkyvä pyöreä kylmä kohta on heijastus lämpökamerasta. Vasemmassa kuvassa IV-kone on juuri käynnistetty ja kiekko alkanut pyörimään. Poistoilmapuolelta kääntyvässä kiekossa näkyy selvästi lämpötilaero. Keskimmaisessä ja oikean puoleisessa kuvassa lämpötilaero on tasaantunut IV-koneen ja LTO-laitteen käynnin tasaannuttua. Kuvista huomataan, että lämpötilajakauma on noin 15 astetta (+3 – +18 °C) eli kiekko luovuttaa suurimman osan + 20 asteisesta poistoilmasta sitomansa lämmön tuloilmakanavassa. Oikeanpuoleisessa kuvassa nähdään lisäksi kaksi pientä lämpimämpää kohtaa. Ne osoittautuivat painaumiksi, jotka eivät luovuttaneet lämpöä yhtä nopeasti kuin ympäröivä kenno, koska ilma ei päässyt niistä läpi yhtä nopeasti. Ne eivät kuitenkaan vaikuta huomiotavasti LTO-laitteen hyötysuhteeseen.



Kuva 12. 2 TK/PK-1 LTO-laite (vasen) käynnistys, (keskellä) tasaantunut käynti, (oikea) kennon pinnalla kaksi lämpimämpää pistemäistä kohdetta

7.1.3 4 TK/PK

4 TK/PK oli ainoa koko otannassa, missä LTO oli jaettu kanaville pystysuunnassa ja ilmastointikanavaa levennetty laitteelle tultaessa puolella. Levennyksestä johtuu ainakin osittain matala paine-ero. Hyötysuhde on kuitenkin samaa luokkaa 2 TK/PK-1:n LTO-laitteen kanssa, noin 66 %. Hyötysuhdetta laskiessa oli tosin pakko käyttää kiinteän mittarin lämpötilaa, koska kanavaan ei päässyt sisälle kennon ja lämmitys patterin välistä.



Kuva 13. 4 TK/PK:n kanavan levennys ja kiinteän lämpömittarin paikka

7.2 Arabianrannan peruskoulu

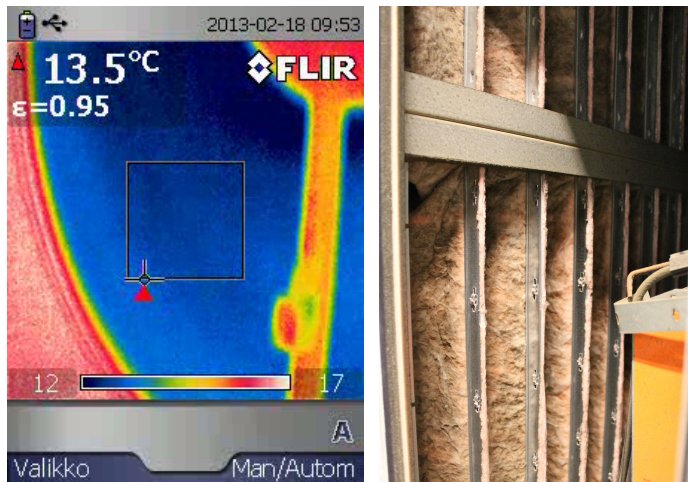
Arabianrannan peruskoululla käytiin hiihtoloman aikana ja sieltä ehdittiin tutkia kolme LTO-laitetta TK/PK 204, TK/PK 205 ja TK/PK 208 ilmastointikoneista. TK/PK 204 ja 205 ovat alkuperäisiä vuodelta 2002 ja niissä on kummassakin pyörivät regeneratiiviset lämmönsiirtimet. TK/PK 208 ilmastointikoneessa on suora rekuperatiivinen lämmönsiirrin ja se on vuonna 2009 valmistuneen laajennuksen puolella. Ulkolämpötila Arabianrannan peruskoulun tutkimuspäivänä oli noin +1 °C. Hiihtoloman takia sisälämpötilat olivat hieman normaalia alhaisemmat, noin +18. Kaikkien LTO-laitteiden hyötysuhteet olivat tyyppillisten hyötysuhteiden rajoissa. Minimi ilmamäärien suhde on sama kuin maksimi ilmamäärien.

Taulukko 4. Arabianrannan peruskoulun mittaukset

IV-kone	LTO-tyyppi	Toiminta-alue	Ala	Pyörimisnopeus	Paine-ero	Mitoitetut ilmamäärät	Hyötysuhde	Ilmamäärä-painotettu hyötysuhde
			[m ²]	[r/min]	[Pa]	[m ³ /s]	[%]	[%]
TK/PK 204	kiekko	liikuntasali	3,14	10,16	-134,9	4,2 (2,1) TK 3,8 (1,9) PK	63,9	60,71
TK/PK 205	kiekko	Auditorio, aula	1,13	12,63	-48,5	1,4 (0,7) TK 1,2 (0,6) PK	80,8	74,58
TK/PK 208	kuutio	teknisen-työn tila	0,66	-	-28,5	2,9 TK 1,2 PK	52,3	30,61

7.2.1 TK/PK 204

TK/PK 204 palvelee liikuntasalia liiketunnistimien avulla, mutta mittauksia tehdessä kone oli käsikäytöllä. Vaikka paine-ero ei vaikuta kovin suurelta, tarkastaessa tuloilman suodattimia, ne olivat hyvin likaiset. LTO:n hyötysuhde on tyyppillisen hyötysuhteen alarajoilla, vaikka kiertoilmapelit olivat auki. Kiertoilmapeltejä ohjaa hiilidioksidimittari liikuntasalissa, joten ne olivat kokonaan auki hiihtolomalla. TK/PK 204 oli ainoa Arabianrannan peruskoululla, josta otettiin lämpökameralla tallenteita. Tallenteet on otettu tuloilmakanavasta LTO:n jälkeen. Kuvasta 14 näkyy LTO-laitteen pinta, joka on noin + 13,5 °C ja täsmää loggerin mittaustuloksen kanssa. Loggerin mittaama LTO:n jälkeisen lämpötilan keskiarvo on + 12,9 °C.



Kuva 14. (vasen) TK/PK 204 tuloilmakanavasta LTO-laitteen jälkeen (oikea) raitisilma suodattimet ovat likaiset

7.2.2 TK/PK 205

TK/PK 205 palvelee koulun aulaa ja auditoriota liiketunnistimien avulla. IV-koneen pienen koon takia tuloilman lämmityspatterin lämpö on voinut nostaa loggerin mittaamaa lämpötilaa ja saanut tämän LTO-laitteen hyötysuhteen nousemaan 80 %:iin. Loggerin mittaama keskilämpötila LTO:n jälkeen oli +15,5 °C, joka vaikuttaa hyvin korkealta sisäilman ollessa +18,8 °C. Hyötysuhde olisi kuitenkin lähelle 70 %, vaikka oletettaisiin tuloilman LTO:n jälkeen olevan pari astetta alhaisempi.

7.2.3 TK/PK 208

TK/PK 208 IV-koneen suora rekuperatiivinen lämmönsiirrin on vuodelta 2009 ja se palvelee teknisyöntilaa. Kuution pinta-ala tarkoittaa vain tulo- tai poistoilmapuolen ilman sisään- tai ulosvirtausta eli kanavan poikkipinta-alaa lämmönsiirtimen sisällä. LTO:n hyötysuhde on hyvä, mutta teknisyöntiluokan erilliset poistoilmakoneet saavat ilmamääräpainotetun hyötysuhteen tippumaan 30 %:iin. Hyötysuhteen lasku ilmamäärillä painottaessa johtuu teknisyöntiluokan erillispoistoista, jolloin poistoilmavirta LTO-laitteen läpi pienenee. Tämän LTO-laitteen paine-ero on katsottu poistoilmapuolelle asennetusta kiinteästä mittarista, kun IV-kone on ollut normaaliasetuksella, jolloin koneen automatiikka hoitaa ilma-

määrien säätelyn. Hiihtoloman pienet ilmamäärät laskevat hieman hyötysuhteita. Ulkoilma oli +1 °C mittauspäivänä, IV-kone oli puhdas ja paine-eron oli normaali.

7.3 Helsingin medialukio

Helsingin medialukion alkuperäinen rakennus on vuodelta 1964. IV-koneet sinne asennettiin 1980-luvun puolivälissä. Näistä alkuperäisistä IV-koneista on jäljellä enää yksi, liikuntasalin TK/PK 209, ja sekin vain LTO-laitteen ja parin muun osan osalta. Muut koneet ovat pari vuotta vanhoja. Kaikki uudemmat koneet (4 kpl.) ovat lähes samanlaisia Danvent-merkkisiä ilmastointikoneita. Ongelmana uusissa koneissa ilmeni pyörivän regeneratiivisen lämmönsiirtimen kiinnitys IV-koneeseen. LTO-laitteesta oli mahdotonta mitata tuloilman lämpötilaa LTO:n jälkeen, koska mittaria ei saanut mistään LTO-laitteen ja lämmityspatterin väliin. Lisäksi tämä väli oli niin pieni, että kiinteä mittari oli vain noin viiden senttimetrin päässä lämmityspatterista. Sama ongelma on kaikissa uusissa IV-koneissa (TK/PK 201, 202, 203 ja 204). Ulkoilma oli mittauksia tehdessä noin -3 °C ja sisäilma noin +20 °C.

Taulukko 5. Helsingin medialukion mittaukset

IV-kone	LTO-tyyppi	Toiminta-alue	Ala	Pyörimisnopeus	Paine-ero	Mitoitetut ilmamäärät	Hyötysuhde	Ilmamäärä-painotettu hyötysuhde
			[m ²]	[r/min]	[Pa]	[m ³ /s]	[%]	[%]
TK/PK 202	kiekkokone	2 krs. luokat	2,01	-	-105,6	2,30 TK 2,10 PK	50,17	47,89
TK/PK 209	kiekkokone	liikuntasali	0,95	-	-84,6	1,5 TK 0,75 PK	80,4	53,60

7.3.1 TK/PK 202

TK/PK 202 ilmastointikoneen hyötysuhde on yllättävän alhainen koneen uutuuteen nähden. Koneen käydessä LTO-laitteen ja lämmityspatterin väliin asennettu kiinteä mittari näytti noin +9 °C, mikä vaikuttaa kovin alhaiselta mittarin sijoitukseen nähden. IV-kone palvelee toisen kerroksen luokkahuoneita. Koulu oli toiminnassa normaalisti, joten alhainen hyötysuhde ei voi johtua IV-koneen passiivisuudesta. Paine-erostakin voi todeta ilmamäärien olleen suuria, koska uusi IV-kone tuskin on ehtinyt likaantua. Epäselväksi jäi kui-

tenkin mistä koneen alhainen hyötysuhde johtuu. Koneen umpinaisuuden takia kierrosnopeus jäi selvittämättä, eikä uusiin IV-koneisiin haluttu tehdä lämpökameran USB-liittimen mentävää reikää.

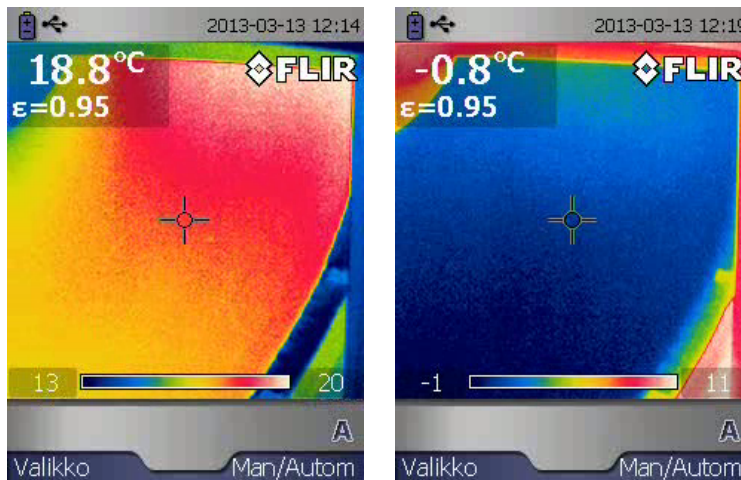


Kuva 15. LTO-laitteen kiinnitys estää kennon ja lämmityspatterin väliseen tilaan pääsemisen. Kuvat Elina Järvelä

7.3.2 TK/PK 209

1980-luvun TK/PK 209 ilmastointikoneen hyötysuhde on korkea mittaolosuhteista johtuen. Pienessä IV-koneessa ilmastoinnin lämmityspatteri oli hyvin lämmin ja lähellä loggeria. Jos LTO-laitteen tuloilman hyötysuhde olisi 80 %, lämmityspatteri ei olisi ollut niin lämmin. Tämän LTO-laitteen hyötysuhde on varmasti matalampi. LTO-laitteesta otettiin videokuvaa raitisilmapuolelta. Koneita käynnistettäessä LTO-laitteen pinnan lämpötila oli melkein + 19 °C. LTO-laitteen takana oleva lämmityspatteri sai kennon lämpenemään raitisilmapuolelle saakka. Sisälämpötila liikuntasalissa oli myös noin + 19 °C, joten lämmityspatteri lämmitti suurimman osa tuloilmasta. Loggerin mittaama lämpötila LTO:n jälkeen koneen ollessa päällä oli noin + 15,5 °C, mutta ei voida olla varmoja kuinka paljon tästä lämpötilasta on lämmönsiirtimen ansiota. Vasemmasta kuvasta nähdään, kun LTO-laite on ollut käynnissä vähän aikaa, että sen lämpötila on vähän alle nollan, mutta oikeassa alakulmassa tiivisteiden kohdalla lämpötila on noin + 5 °C. Kumiset tiivisteet murenivat nii-

hin koskettaessa, tiivisteet siis vuotavat jonkin verran. LTO-laitteen tiivisteistä on voinut siirtyä muruja kennostoonkin.



Kuva 16. TK/PK 209 raitisilmapuolelta (vasen) käynnistys (oikea) tasaantunut

7.4 Helsingin sosiaali- ja terveysoppilaitos Malmin yksikkö (HESOTE)

HESOTE:lla tehtiin mittauksia kolmelle eri lämmöntalteenottolaitteelle. 7, 8 ja 10 TK/PK ilmastointikoneet ovat kolme yhteensä seitsemästä LTO-laitteella varustetusta IV-koneesta. Oppilaitoksen IV-koneita etäohjataan ja nämä kolme konetta olivat kokonaan suljettu hiihtolomalla. Koneet saatiin käsikäytölle mittauksien ajaksi soittamalla kouluisännälle. Osittain hiihtoloman takia sisälämpötilat olivat normaalia matalammat luokkatiloissa ja auditoriossa. 7 TK/PK:lla lämpötila oli + 19,6 °C, 8 TK/PK:lla + 18,7 °C ja 10 TK/PK:lla + 16,9 °C. LTO-laitteiden hyötysuhteet ovat tyypillisen regeneratiivisen LTO:n rajoissa. Mielenkiintoista on se, että IV-koneet 7 ja 8 ovat suunnilleen samanlaiset, silti 8 TK/PK:ssa on neljäsosan isommat ilmavirrat ja LTO-laite pyörii paljon nopeammin. IV-koneiden raitisilman lämpötila oli mittauspäivänä noin - 4 °C, jolloin kondensaatiota poistoilmapuolella voi tapahtua, mikä nostaa hieman LTO-laitteiden hyötysuhdetta verrattuna pelkkään lämmön siirtymiseen. Yhteistä kaikille LTO-laitteille on hyvin korkea pyörimisnopeus.

Taulukko 6. Helsingin sosiaali- ja terveysoppilaitoksen mittaukset

IV-kone	LTO- tyyppi	Toiminta- alue	Ala	Pyörimis- nopeus	Paine- ero	Mitoitetut ilmamäärät	Hyöty- suhde	Ilmamäärä- painotettu hyötysuhde
			[m ²]	[r/min]	[Pa]	[m ³ /s]	[%]	[%]
7 TK/PK	kiekko	jatkokoulu- tus, osa C	1,54	15,67	-119,7	2,36 TF 2,05 PF	74,6	69,36
8 TK/PK	kiekko	oppilaitos, osat A-C	1,54	20,77	-	3,2 TF 2,54 PF	69,1	61,15
10 TK/PK	kiekko	auditorio	0,95	18,84	-240	1,44 TF, PF	61,9	61,9

7.4.1 7 TK/PK

7 TK/PK:n lämmönsiirtimellä oli paras hyötysuhde mitatuista kolmesta IV-koneesta, melkein 75 %. Paine-ero on normaali, eikä koneessa havaittu silmämääräisesti likaa.

7.4.2 8 TK/PK

Tämä lämmönsiirrin pyörii todella nopeasti. Yli 20 r/min ei näy edes kuvassa 7. esite-tyssä käyrässä. Tässä tapauksessa kiekon pyörimisnopeutta voisi alentaa, koska näin suurella nopeudella ei ole enää dramaattista merkitystä hyötysuhteeseen. Kennon pyörit-täminen nopeampaa vie vain enemmän sähköenergiaa. Lämpökamerakuvissa ei näkynyt lämpötilajakaumaa, koska LTO-laitteesta saatiin vain pieni osa kuvaan tilanahtauden takia.

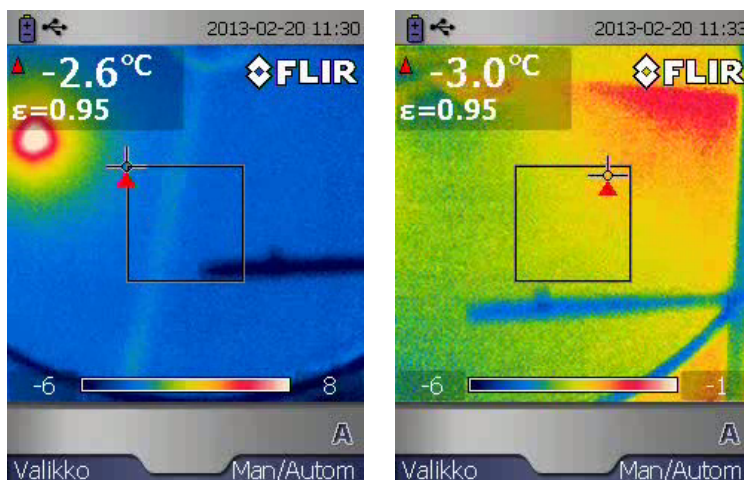
7.4.3 10 TK/PK

Auditoriota palvelevan ilmastointikoneen lämmönsiirtimellä oli heikoin hyötysuhde tällä koululla mitatuista kohteista, mutta silti tyypillisen pyörivän lämmönsiirtimeen rajoissa. LTO-laitteella oli korkea paine-ero, mikä selittyy osin sen pienellä koolla verrattuna kana-van kokoon, joka näkyy kuvasta 16. Kenno oli myös pölyinen. Tämänkin LTO-laitteen pyörimisnopeus on suuri. LTO-laitteesta saatiin myös lämpökamerakuvaa raitisilmapuolel-ta, josta nähdään neljäsosa kennon lämpötilajakaumasta. Lämpökamerakuva saa epäile-mään LTO-laitteen hyötysuhdetta, koska kennon lämpötila on alle nollassa jo poistoilma-puolelta tullessaan. Paine-ero LTO-laitteen yli tukee ajatusta. Jäätä ei havaittu paljaalla silmällä, mutta loggereiden mittaamat lämpötilat ovat epäilyttäviä. Tämän laitteen kohdalla

raitisilma oli noin $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, sisäilma oli $+16,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja lämpötila LTO-laitteen jälkeen oli $+8,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Kuva 17. 10 TK/PK:n LTO-laite



Kuva 18. 10 TK/PK:n LTO-laite, pyörimissuunta vasemmalle

7.5 Herttoniemenrannan ala-aste

Herttoniemenrannan ala-asteelta mitatut kolme IV-konetta, ovat kolme viidestä LTO-laitteella varustetusta koneesta. Mitattujen LTO-laitteistojen hyötysuhteet olivat keskimäärin noin 15 %-yksikköä tyypillistä hyötysuhdetta alempana. Mittauspäivän ulkolämpötila oli noin $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Koululla käytiin normaalin toiminnan aikana, jolloin ilmanvaihtokoneet ovat toimineet täydellä teholla, paitsi liikuntasalin IV-kone, koska sen ilmapirrat säätyvät liiketunnistimen avulla. Energiakatselmuksesta käy ilmi, että muut

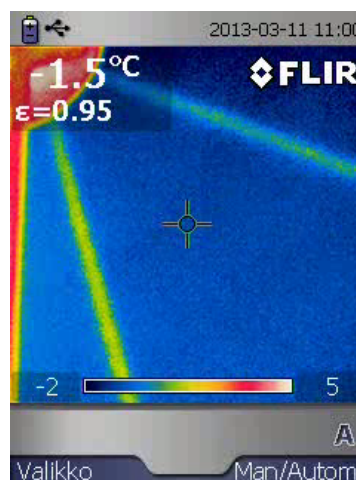
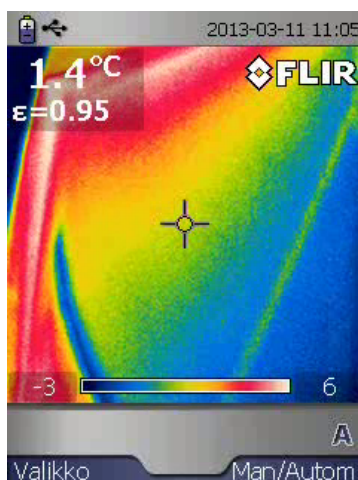
IV-koneet käyvät joko täydellä tai puoli teholla koko ajan. Koulu on valmistunut vuonna 2000 ja IV-koneet ovat alkuperäisiä. Koulun pyörivien LTO-laitteiden huurteensulatausta ei ole automatisoitu, ehkä juuri sen takia pyörimisnopeuksia ja siten hyötysuhteita on laskettu.

Taulukko 7. Herttoniemenrannan ala-asteen mittaukset

IV-kone	LTO-tyyppi	Toiminta-alue	Ala	Pyörimisnopeus	Paine-ero	Mitoitetut ilmamäärät	Hyötysuhde	Ilmamäärä-painotettu hyötysuhde
			[m ²]	[r/min]	[Pa]	[m ³ /s]	[%]	[%]
TK/PK 201	kiekkokone	solut 1,3,5 yleisilmanvaihto	4,52	5,52	-137,4	7,3 TK 6,6 PK	43,83	41,62
TK/PK 204	kiekkokone	ruokala	1,54	-	-	2,6 TK 1,4 PK	49,88	34,92
TK/PK 208	kiekkokone	liikuntasali	2,84	-	-241,5	4,4 TK 4,4 PK	47,24	47,24

7.5.1 TK/PK 201

Tämän LTO-laitteen pyörimisnopeus on hyvin matala. Muiden LTO-laitteiden pyörimisnopeuksia ei pystytty mittaamaan, mutta hyötysuhteiden perusteella vaikuttaisi siltä, että niidenkin pyörimisnopeudet ovat yhtä matalat. TK/PK 201 yleisilmanvaihtokone toimi täydellä teholla ja paine-ero vaikuttaa normaalilta. Lämpökameratallenteissa näkyy LTO-laitteen tukirakenne lämpimämpänä. Lämpökamera oli sijoitettuna raitisilma-puolelle.



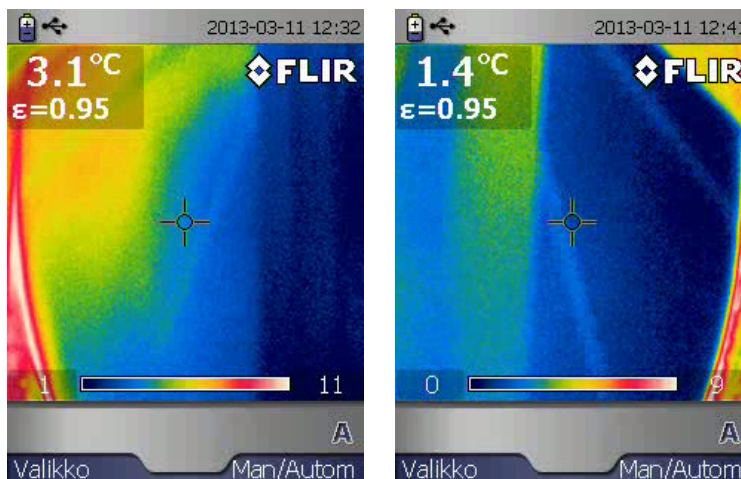
Kuva 19. TK 201 vasen ja oikea puoli LTO-laitteesta

7.5.1 TK/PK 204

Ruokalaa palvelevan TK/PK 204:n lämmöntalteenottolaitteella oli noin 50 % hyötysuhde, joka oli paras näistä kolmesta LTO-laitteesta. IV-koneen noin puolet pienemmän poistoilman takia ilmamääräpainotteinen hyötysuhde jäi noin 35 %:iin. TK/PK 204:stä ei mitattu muita arvoja.

7.5.2 TK/PK 208

TK/PK 208:n on koko tutkimuksen suurin paine-ero LTO:n yli. Kaikki suodattimet olivat likaisia kuten kuvasta 20 näkyy. Liikuntasalia palvelevassa IV-koneessa oli ilman kosteuttaja tuloilmakanavassa lämmityspatterin jälkeen. Kostuttajasta ei päällepäin näkynyt sen kostutuksen määrää, mutta se oli automaatti asetuksella mittauksien ajan. Energiakatselmuksesta käy ilmi, että sen tarkoituksena on pitää liikuntasalin ilma kosteana puulattian takia. Loggerin mittaama sisäilman suhteellinen kosteus oli kuitenkin noin 22 %, mikä on suositellun sisäilman kosteuden alapuolella. Näin ollen jäätymistä tuskin tapahtui raitisilman lämpötilan ollessa tämän laitteen kohdalla noin -3,5 °C.



Kuva 20. TK 208 vasen ja oikea puoli LTO-laitteesta



Kuva 21. TK/PK 208 likainen raitisilmasuodatin. Kuva Elina Järvelä

7.6 Käpylän peruskoulu

Käpylän peruskoulu oli kolmas ja viimeinen koulu, missä käytiin hiihtoloman aikana. Koululle on viime vuoden aikana vaihdettu täysin uusi ilmastointijärjestelmä, jonka ilmamääriä säädellään luokkatilojen hiilidioksidipitoisuuden mittaroinnin avulla. Hiihtoloman aikana ilmastointijärjestelmä piti yllä perusilmanvaihtoa kaikissa koulun osissa. Vähän koulun henkilökuntaa oli paikalla mittauspäivänä. TK/PK 201 ja 202 ovat samanlaisia, toinen 1. kerroksessa ja toinen 2. kerroksessa. Kaikkien LTO-laitteiden hyötysuhteet ovat tyypillisten hyötysuhteiden rajoissa, jos ilmamäärät olisivat olleet suuremmat TK/PK 201:ssä.

Taulukko 8. Käpylän peruskoulun mittaukset

IV-kone	LTO-tyyppi	Toiminta-alue	Ala	Pyörimisnopeus	Paineero	Mitoitetut ilmamäärät	Hyötysuhde	Ilmamäärä-painotettu hyötysuhde
			[m ²]	[r/min]	[Pa]	[m ³ /s]	[%]	[%]
TK/PK 201	kiekko	1krs. luokat	0,95	-	-27,3	1,48 TF, PF	57,2	57,2
TK/PK 202	kiekko	2krs. luokat	0,95	-	-	1,6 TF, PF	75,5	75,5
TK/PK 214	kuutio	teknisentyön tila	0,55	-	-66,7	1,0 TK/PK	55,4	55,4

7.6.1 TK/PK 201

TK/PK 201 palvelee ensimmäisen kerroksen luokkahuoneita ja käytävää. Hiihtolomalla kerroksessa ei ollut ketään, joten IV-kone toimi minimi teholla, siksi tulokseksi saatiin pieni paine-ero ja pieni hyötysuhde. Tulo- ja poistoilmamäärät ovat samat ja vähän suuremmilla ilmamäärillä hyötysuhde nousisi varmasti yli 60 %:in.

7.6.2 TK/PK 202

TK/PK 202 palvelee toisen kerroksen huoneita ja käytävää. Tällä käytävällä sijaitsi opettajainhuone ja rehtorin kanslia, joissa työskenteli muutama henkilö, joten IV-kone toimi hieman suuremmilla ilmavirroilla mittauspäivänä kuin TK/PK 201. Siitä syystä hyötysuhde on suurempi. Vaikka ilmamäärät eivät olleet vielä kovin suuret, on LTO:n hyötysuhde hyvä.

7.6.3 TK/PK 214

Kouluisäntä kertoi teknisytyön luokkaa palvelevan IV-koneen automatiikassa olevan vikaa. Poistoilmapuhaltimen huomattiin vaihtelevan melkein täydeltä teholta täysin pysähdyksiin. Mittaukset tallennettiin viiden minuutin välein ja paine osui aina silloin hyväälle tasolle, siksi paine-ero näyttää oikealta. Paikan päällä mittarin näytöstä katsoen paine-ero vaihteli kuitenkin noin 30 – 120 Pa:n välillä noin 10 kertaa viiden minuutin sisällä. Levylämmönsiirtimen sulatusautomaatiikan ei pitäisi vaikuttaa puhaltimen tehoon ja raitisilman lämpötilakin oli juuri ja juuri alle nollan asteen. Muita ongelmia ei levy-
lämmönsiirtimessä havaittu ja hyötysuhdekin on tyyppillisen hyötysuhteen rajoissa.

7.7 Latokartanon peruskoulu

Latokartanon peruskoulussa on yhdistetty luonnollinen eli painovoimainen ja koneellinen ilmanvaihto. Järjestelmän automaatio ohjaa ilmastointikoneen käyntiä, mutta arkipäivien kuormituksessa 2011 vuodelta peräisin oleva IV-kone on koko ajan päällä.

Taulukko 9. Latokartanon peruskoulun mittaukset

IV-kone	LTO-tyyppi	Toiminta-alue	Ala	Pyörimisnopeus	Paine-ero	Mitoitetut ilmamäärät	Hyötysuhde	Ilmamäärä-painotettu hyötysuhde
			[m ²]	[r/min]	[Pa]	[m ³ /s]	[%]	[%]
TK/PK 201	kiekko	luokat, sali, toimistot	7,07	10,54	-180	8,25 TK 8 PK	77,7	76,50

7.7.1 TK/PK 201

TK/PK 201 ilmastointikoneen hyötysuhteeksi saatiin 78 %, joka on hyvä. Ilmamääräpainotteen hyötysuhde on sekin 76,5 %. Koska koululla on vain yksi IV-kone, mitattiin jäteilmastakin keskilämpötila ja laskettiin poistoilman lämpötilahyötysuhde, eli poistoilman ja jäteilman erotuksen suhde suurimpaan lämpötilaeroon eli sisä- ja ulkolämpötilan eroon. Poistoilman lämpötilahyötysuhde oli 88 %. Pyörimisnopeus on normaali. Paine-ero on hieman korkea, joka saattaa johtua IV-koneen ilmamäärien pienestä ylimitoituksesta painovoimaisen ilmanvaihdon toimiessa pienemmällä ilmamäärällä kuin on suunniteltu. Uuden LTO-laitteen lämpökameratallenteessakaan ei näkynyt vikoja.

7.8 Metsolan ala-aste

Metsolan ala-aste on melko pieni koulu, jossa on kaksi IV-konetta varustettu lämmön-talteenottimilla, joista toinen on vesi-glykoli lämmönsiirrin ja toinen on levylämmönsiirrin. IV-koneet ovat alkuperäisiä vuodelta 1991, mutta ne ovat automatisoitu vuonna 2003.

Taulukko 10. Metsolan ala-asteen mittaukset

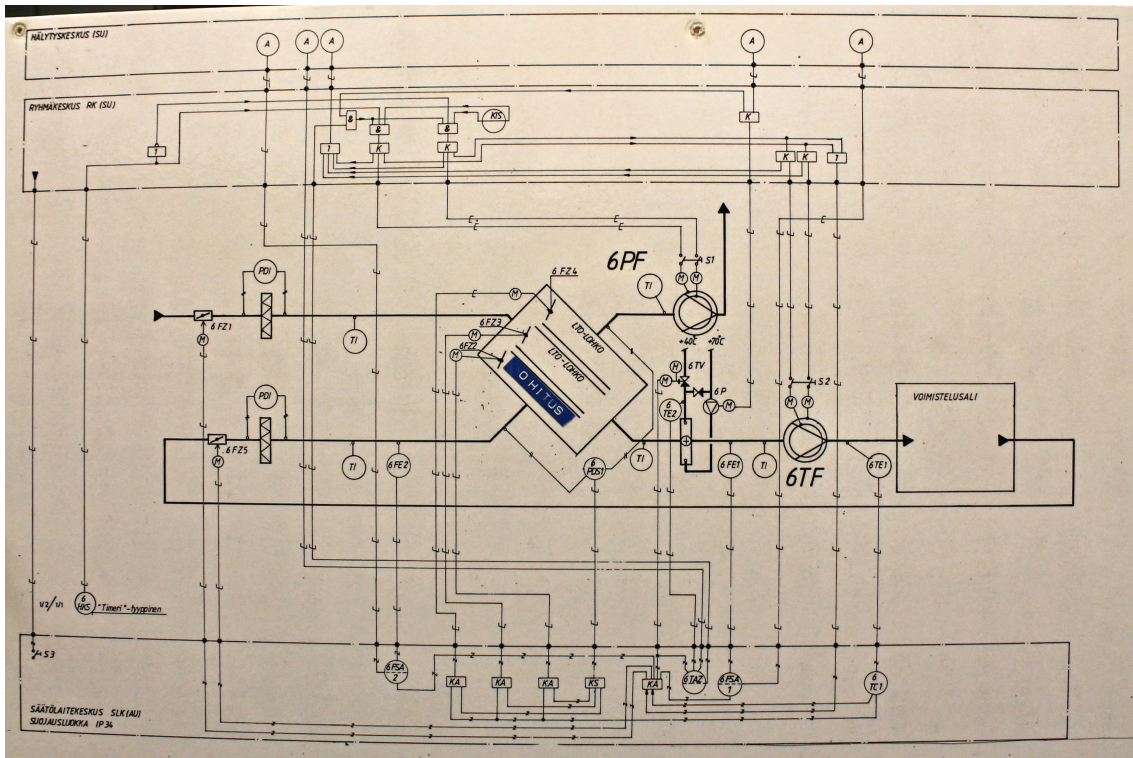
IV-kone	LTO-tyyppi	Toiminta-alue	Ala	Pyörimisnopeus	Paine-ero	Mitoitetut ilmamäärät	Hyötysuhde	Ilmamäärä-painotettu hyötysuhde
			[m ²]	[r/min]	[Pa]	[m ³ /s]	[%]	[%]
TF/PF 6	kuutio	juhlasali	0,5	-	-168 TF 260 PF	2,27 TK	41,23	41,23

7.8.1 TF/PF 6

TF/PF 6 palvelee Metsolan ala-asteen liikuntasalia. Avattaessa IV-konetta huomattiin, että levylämmönsiirrin oli pysyvästi ohituksella. LTO-laitteen sulkupeltien akselit IV-koneen päällä oli pultattu kiinni, mutta ne saatiin auki mittauksien ajaksi. Levylämmönsiirtimeen tuloilman hyötysuhteeksi saatiin 41 %. Koska kohteessa oli vain yksi tutkimukseen soveltuva lämmönsiirrin, mitattiin IV-koneesta myös jäteilman lämpötila ja poistoilman hyötysuhteeksi laskettiin 30 %. Ilmavirtojen ollessa yhtä suuria, tuloilman hyötysuhteen pitäisi olla hieman alle 30 %:n. Kuitenkin se on hyvä verrattuna siihen, että tämä levylämmönsiirrin on ollut pysyvästi ohituksella ainakin puolitoista vuotta IV-konetta huoltavan henkilön mukaan. Yhteyshenkilö ei kuitenkaan osannut sanoa miksi LTO-laite oli pysyvästi ohituksella. Vuonna 2003 tehdystä Metsolan ala-asteen energiakatselmuksesta selviää, että LTO-laitteen sulkupeltien ohjaus ei silloinkaan toiminut kunnolla.

Mittauksia tehdessä IV-kone oli käsikäytöllä ja puhaltimet kävivät 1/1 teholla. Mitattu paine-ero tuloilmakanavasta LTO:n yli on normaali, mutta poistoilman paine-ero, 260 Pa, kiinteästä mittarista on suuri. Poistoilman paine-eromittari LTO:n yli on kiinni IV-koneen automaatiojärjestelmässä ja jos paine-ero nousee liian suureksi, menevät levylämmönsiirtimeen sulkupellit kiinni tai vain toinen lohkoista. Oletuksena on, että suuri paine-ero tarkoittaa huurteen kerääntymistä lämmönsiirtimeen pinnoille. Automaatiojärjestelmän rajasta paine-erolle LTO:n yli ei ole tietoa, mutta jos paine-ero on jatkuvasti 260 Pa, on todennäköistä että LTO-laitteen sulkupellit suljettu automatiikan takia. IV-kone kuitenkin toimi mittausten ajan, noin 5 h, jäätyttä. Jäätä ei myöskään havaittu silmämääräisesti LTO-laitteen pinnoilla korkeasta paine-erosta huolimatta. On mahdollista, että kiinteä paine-eromittari on asennettu väärin tai sen mittausputket ovat osittain tukossa, kuten Poikkilaakson ala-asteella.

Raitisilmakanavasta mitattu ulkolämpötila oli Metsolan ala-asteella käydessä noin - 4 °C ja suhteellinen kosteus 95 %. Poistoilma ennen lämmöntalteenottoa oli + 20,5 °C ja suhteellinen kosteus noin 22 %. Jäteilma oli noin + 13 °C ja suhteellinen kosteus oli 35 %. Poistoilma ei ole lähellä kondensoitumista kulkiessaan levylämmönsiirtimeen läpi. Ristiriitaista on, että kun IV-kone pysäytettiin kondenssivettä alkoi tihkumaan raitisilmakanavan liitoksesta, mutta tämäkään ei selitä korkeaa paine-eroa LTO-laitteen poistoilmapuolella.



Kuva 22. 6 TF/PF periaate ja automaatiojärjestelmä

7.9 Monitoimitalo Puustelli ja ala-aste

Monitoimitalo Puustellin ilmastointikoneet ovat alkuperäisiä vuodelta 1985. Kaksi viidestä lämmönsiirtimellä varustetusta IV-koneesta tutkittiin. Kummankin LTO-laitteen hyötysuhteet ovat todella huonot, noin 15 %.

Taulukko 11. Monitoimitalo Puustellin ja ala-asteen mittaukset

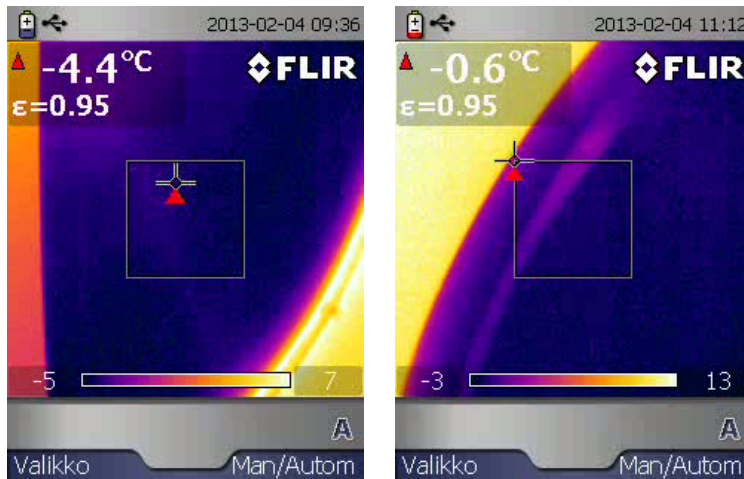
IV-kone	LTO-tyyppi	Toiminta-alue	Ala	Pyörimisnopeus	Paineero	Mitoitetut ilmamäärät	Hyötysuhde	Ilmamäärä-painotettu hyötysuhde
			[m ²]	[r/min]	[Pa]	[m ³ /s]	[%]	[%]
TK/PK 2	kuutio	ruokala, keittiö	0,54	-	-105	0,83 TK	14,65	14,65
TK/PK 3	kiekko	liikuntatila	3,14	12,21	-120	2,36 TK	15,75	15,75

7.9.1 TK/PK 2

TK/PK 2 palvelee ala-asteen ruokalaa ja sillä on melko pieni mitoitettu ilmavirta. Paine-ero vaikuttaa normaalilta, se voi olla hieman kohonnut IV-koneiden ilmavirtojen pienen ylimitoituksen takia, mitä monelle vanhalle IV-koneelle tapahtuu koulujen luokkakokojen ja ilmamääräntarpeen kasvaessa. Paine-ero on mitattu kiinteän paine-eromittarin mittayhteistä poistoilmapuolelta. Loggereiden mittaustuloksista laskien tuloilma lämpenee levylämmönsiirtimessä hieman yli kolme astetta, vaikka sisäilma on + 21,5 °C. Tästä johtuen LTO:n ohitus on varmasti ollut jo ainakin osittain päällä, jotta sisäilma, jonka suhteellinen kosteus oli 35 % ei jäätyisi. Toisaalta paine-ero on melko korkea, jos levylämmönsiirrin on ollut ohituksella. Ulkoilma oli mittauspäivänä noin - 1,5 °C. Levylämmönsiirtimen levyt ovat kolhiintuneet monesta kohdasta näkyviltä osilta, tämä on varmaan tapahtunut LTO-laitteen puhdistuksen yhteydessä.

7.9.2 TK/PK 3

Pyörivä lämmönsiirrin ja kanavat olivat silmämääräisesti pölyisiä, jopa siinä määrin, että se vaikuttaa LTO-laitteen lämmönsiirtokykyyn. Tuloilmakanavassa oli ilmansuodattimet, mutta ne olivat vasta lämmöntalteenoton jälkeen. Lisäksi kennon reunassa oli suuri lovi (kuva 22. vasen), joka näyttää siltä kuin se olisi tullut sen pyöriessä. Lämpökameralla mitattaessa tuloilmakanavasta LTO:n jälkeen kennon pinta oli hyvin kylmä, noin -4 °C, vaikka kameran takana oleva lämmityspatteri oli hyvin lämmin. Loggerinkin mitaama lämpötila LTO-laitteen jälkeen oli vain +0,7 °C eli ilma lämpeni LTO-laitteella hieman alle kolme astetta. LTO-laitteen kierrosnopeutta saatetaan vähentää, jotta hyötysuhde ja huurteen muodostumisen riski alenisi, mutta tälle lämmönsiirtimelle ei olla tehty niin. Silti hyötysuhde on hyvin matala. Kiinteä lämpömittari LTO-laitteen jälkeen näytti lämpötilaa +6 °C. Plus kuuden asteen lämpötilalla hyötysuhde kohoaisi noin 45 %:iin, mutta lukema on epävarma kiinteän mittarin sijoituksen takia. Todellinen tuloilman lämpötila LTO:n jälkeen on todennäköisesti jossain loggerin ja kiinteän mittarin arvojen välissä. Ohivuodot kennon tiivisteistä ovat myös mahdollisia. Poistoilman lämpötila oli vain noin +15,5 °C, mutta laskennallisesti matala poistoilman lämpötila vaikuttaa nostavasti hyötysuhteeseen. Ei siis tiedetä matalan hyötysuhteen syytä.



Kuva 23. TK/PK 3 jäteilmakanavasta (vasen) kiekon pinta LTO-laitteen jälkeen (oikea) pitkä naarmu kiekon pinnassa

7.10 Naulakallion erityiskoulu

Naulakallion koululla on kaksi IV-konetta, joissa kummassakin on levylämmönsiirrin. Koulun energiakatselmusta tehtäessä vuonna 1995 IV-koneet ja lämmönsiirtimet ovat ainakin olleet vielä alkuperäisiä vuodelta 1986. Kummankin LTO-laitteen hyötysuhde on jopa epärealistisen korkea. Energiakatselmuksesta selviää, ettei IV-koneissa ole muunlaista sulatusautomaatiikkaa kuin termostaatti, joka vähentää ilmavirtoja kun ulkona on alle -10 °C ellei sellaista olla jälkikäteen lisätty. Kummankin LTO-laitteen yli mitattu paine-ero on hyvin suuri, joka johtuu todennäköisimmin likaisuudesta.

Taulukko 12. Naulakallion erityiskoulun mittaukset

IV-kone	LTO- tyyppi	Toiminta- alue	Ala	Pyörimis- nopeus	Paine- ero	Mitoitetut ilmamäärät	Hyöty- suhde	Ilmamäärä- painotettu hyötysuhde
			[m ²]	[r/min]	[Pa]	[m ³ /s]	[%]	[%]
5 TK/PK	kuutio	yleisIV, uimahalli	1,56	-	-179,2	5,33 TK	78,16	78,16
6 TK/PK	kuutio	yleisIV	0,56	-	-236	2,27 TK	64,72	64,72

7.10.1 5 TK/PK

5 TK/PK ilmastointikone palvelee uima-allastilan lisäksi liikuntasalia, teknisyöntilaa ja luokkahuoneita. Uima-allastilan lämpimämmän sisäilman vuoksi tuloilmaa joudutaan lämmittämään enemmän kuin normaalisti. Energiakatselmuksen mukaan uima-allastilaan haarautuvassa tuloilmakanavassa on erillinen ilmanlämmitin, mutta IV-konetta avatessa tuntui tuloilman lämmityspatteri olevan hyvin lämmin. Loggerin mittaama lämpötila LTO-laitteen jälkeen oli noin +20 °C, joka on mahdotonta saavuttaa ainoastaan levylämmönsiirtimellä, vaikka poistoilman lämpötila olikin noin +25 °C. On mahdollista, että IV-koneen lämmityspatterin tehoa on nostettu tarkoituksella, jotta se lämmittäisi tuloilman ja koko lämmönsiirtimen huurtumisen estämiseksi tarkemman sulatusautomaatiikan puuttuessa. Tämän LTO-laitteen hyötysuhde on varmasti matalampi, mutta sitä on vaikea arvioida mitaustuloksista. Raitisilman lämpötila vaihteli mittauspäivänä 2 – 3 plusasteen välillä. Poistoilman suhteellinen kosteus ennen LTO-laitetta ei ollut 25 % enempää, joka vaikuttaa pieneltä uima-allastilasta tulevalle ilmalle, vaikka uima-allas ei ollut käytössä mittauspäivänä. Huurretta tai jäätä ei havaittu, eikä myöskään kondenssivettä. Kuvan 23 vasemmanpuoleisesta kuvasta näkyy jäteilma puolella jälkiä aikaisemmin LTO-laitteesta valuneesta kondenssi vedestä, jälkiä oli kummassakin IV-koneessa. Kanavien pohjalla oli myös monenlaista ulkoa tulevaa roskaa ja pölyä, joka saa epäilemään onko IV-koneissa ollut jatkuvasti suodattimet. Joka tapauksessa IV- koneet tarvitsevat perusteellisen puhdistamisen.



Kuva 24. (vasen) 5 TK/PK tuloilma ennen LTO:ta (oikea) 6 TK/PK poistoilma LTO:n jälkeen

7.10.2 6 TK/PK

6 TK/PK:n LTO-laitteen paine-ero oli korkea, joka johtuu ainakin osittain lian määrästä. LTO-laitteesta valuneen kondenssiveden mukana on tullut paljon siitepölyä, jota on varmasti vielä paljon lisää lämmönsiirtimen sisällä. Voi olla myös, että IV-koneen ilmamääriä on nostettu alkuperäisistä suunnitelluista määristä. Huurretta tai kondenssivettä ei havaittu mittauspäivänä.

7.11 Poikkilaakson ala-aste

Poikkilaakson ala-asteella on kaksi IV-konetta. Toisessa on pyörivä ja toisessa on levylämmönsiirrin. Koneet ovat alkuperäisiä vuodelta 2001, mutta levylämmönsiirrintä on korjattu ohituspeltien osalta. Hyötysuhteet ja paine-erot ovat normaalit.

Taulukko 13. Poikkilaakson ala-asteen mittaukset

IV-kone	LTO-tyyppi	Toiminta-alue	Ala	Pyörimisnopeus	Paine-ero	Mitoitetut ilmamäärät	Hyötysuhde	Ilmamäärä painotettu hyötysuhde
			[m ²]	[r/min]	[Pa]	[m ³ /s]	[%]	[%]
TK/PK 201	kiekko	yleisilmanvaihto	4,91	14,45	-82,3	6,3 TF 5,5 PF	67,21	62,65
TK/PK 202	kuutio	liikuntasali, teknisen työ, keittiö	1,82	-	-90 TF -30 PF	3,9 TF 2,4 PF	40,6	30,93

7.11.1 TK/PK 201

TK/PK 201 IV-koneen pyörivä lämmönsiirrin toimii moitteettomasti. Suurehko ero ilmamäärien välillä heikentää ilmamääräpainotettua hyötysuhdetta. Kuvasta 24. näkyy osa kiekon lämpötilajakaumaa LTO-laitteen jälkeisestä tilasta katsottuna. Tiivisteet näkyvät melko viileinä, jolloin ne saattavat vuotaa. Pyörimissuunta on oikealle. Sininen alue on heijastus lämpökamerasta.



Kuva 25. Lämmönsiirtimen lämpötilajakauma raitisilmapuolelta

7.11.2 TK/PK 202

LTO-laitteella oli kiinteästä mittarista katsottuna ensin todella pieni paine-ero, -5 Pa. Myöhemmin huomattiin, että mittarin putki oli nippusiteellä puristettu kasaan. Nippusiteen tarkoitus oli pitää putki paikallaan kanavan sisällä, mutta sen poiston jälkeen paine-ero oli normaali, noin -30 Pa. Paine-ero poistoilmapuolelta tarkistettiin omalla mittauksella. Tosin paine-ero kasvoi -45 Pa:iin mittauksen aikana ilmamäärantarpeen kasvaessa. Paine-ero mitattiin myös tulopuolelta levylämmönsiirtimen yli, joka nousi 90 Pa:sta 150 Pa:iin päivän aikana ilmamäärantarpeen kasvun takia. Hyötysuhde on melko huono ja tippuu paljon ilmavirtojen suhteella painotettaessa. Levylämmönsiirtimen huono tiiviys vaikuttaa hyötysuhteeseen, koska ilmavirta pääsee tahattomasti ohittamaan LTO-laitteen. Myös huolto-
luukut lämmönsiirtimelle vuotavat pahasti IV-konehuoneeseen.



Kuva 26. Levylämmönsiirtimen tiivisteet ovat huonossa kunnossa. Kuva Elina Järvelä

7.12 Porolahden peruskoulu

Porolahden peruskoululla on tehty ilmastoinnin perusparannus vuonna 2012, jonka yhteydessä vaihdettiin kaikki ilmastointikoneet. Tutkitut uudet ilmastointikoneet toimivat moitteettomasti ja ovat lisäksi hyvin samanlaisia. Ulkoilmanlämpötila mittauspäivänä oli hieman yli nollan asteen ja poistoilman lämpötilat noin + 19 °C. Ilmeisesti IV-koneiden säätöjä ei oltu vielä peruskorjauksen jälkeen optimoitu. Pyörimisnopeutta voisi hieman säätää hitaammaksi ja ne olisi hyvä tarkistaa kaikista pyörivällä LTO-laitteella varustetuista IV-koneista, joita on Porolahden koululla yhdeksän kappaletta.

Taulukko 14. Porolahden peruskoulun mittaukset

IV-kone	LTO-tyyppi	Toiminta-alue	Ala	Pyörimisnopeus	Paineero	Mitoitetut ilmamäärät	Hyötysuhde	Ilmamäärä painotettu hyötysuhde
			[m ²]	[r/min]	[Pa]	[m ³ /s]	[%]	[%]
TK/PK 211	kiekkokone	A-osa luokat, atk-tilat	0,79	-	-72	1,2 TK 1,1 PK	66,67	63,77
TK/PK 213	kiekkokone	A-osa aula	0,79	15,70	-71	1 TK, PK	62,45	62,45
TK/PK 214	kiekkokone	liikuntasali	1,13	-	-75	1,4 TK, PK	70,38	70,38

8 YHTEENVETO

Tutkimuksen hyötysuhteet ovat suuntaa antavia arvoja, koska mittausvirhemarginaalit ovat vaihtelevia. Otannasta voi silti päätellä suuria linjoja. Kaikki tutkimuksen 2000-luvun jälkeen asennetut ilmastointikoneet ja lämmöntalteenottolaitteet toimivat moitteettomasti tai hyvin ja tyypillisten hyötysuhteiden rajoissa. Lukuun ottamatta Poikki-laakson ala-asteen levylämmönsiirtimen ohivuotoja ja Helsingin medialukion uutta IV-konetta, jonka matalan hyötysuhteen syytä ei saatu selville.

Uusien LTO-laitteiden hyötysuhteet eivät kuitenkaan pysy automaattisesti hyvinä. Ilman huoltoa ja säätöjen päivittämistä, kuten pyörimisnopeus ja sulatusautomaatiikan raja-arvot, niidenkin hyötysuhde laskee nopeasti. Tutkimuksessa huomattiin, että enemmän kuin kymmenen vuotta vanhoissa IV-koneissa yleistyy huollon puutteesta johtuva hyötysuhteen lasku, vaikka yksi täysin selittämätönkin matala tuloilman hyötysuhde kohdattiin. Likaisuuteen liittyvät ongelmat olivat tutkimuksessa selkeimmin esillä. Myös automaatioon ja LTO-laitteiden säätöihin liittyviä ongelmia selvisi, kuten liian suuri tai pieni pyörimisnopeus. Vanhemmissa IV-koneissa suunnitteluun liittyvät virheet, esimerkiksi suodattimien puuttuminen olivat yleisempiä. Uudemmissa IV-koneissa vain yksi tapaus liittyi huolimattomaan alkuperäiseen asennukseen. Lisäksi yksi otannan LTO-laite hajooa pikkuhiljaa vanhuuttaan, vaikka samanikäisiä ja hyväkuntoisia LTO-laitteitakin kohdattiin. Hyvä huolto parantaa LTO-laitteiden hyötysuhteita, mutta pidentää myös LTO-laitteiden käyttöikää. Vanhoissa IV-koneissa havaittiin myös rakenteellisia ongelmia, kuten suodattimien sijoitus tai niiden puuttuminen ennen LTO-laitetta, joka saattaa vaikuttaa hyötysuhteisiin pidemmällä aikavälillä liian kertyessä.

Helmikuun 2013 ulkoilman lämpötilat eivät suosineet tutkimuksessa huurteen tai jään havaitsemista LTO-laitteissa, mutta muut jäljet paljastivat LTO-laitteet, jotka ovat jäätyneet aiemmin tai joilla on riski jäätyä helpommin. Muutamassa IV-koneessa on syytä epäillä sulatusautomaatiikan optimaalisuutta.

Tutkimuksessa löydettiin myös pari vikaa, jotka eivät vaikuttaneet hyötysuhteeseen suoraan laskevasti, mutta ovat haitallisia, kuten reilusti liian suuri pyörimisnopeus ja tuloilmapuhaltimen epätasainen käynti.

9 PARANNUSEHDOTUKSIA

Kaupungin omassa kiinteistöjen datapankissa FacilityInfossa on osio kiinteistön huololle. Siellä seurataan jo IV-koneiden viikkohuoltoa, jonka huollon suorittaja käy kuitaamassa tehdyksi ja lisää mitä toimenpiteitä on tehty. Viikkohuollon ohjeissa, joiden pitäisi näkyä myös huoltajalle, on huomioitu kaikki ongelmat, mitä tutkimuksen tuloksissakin huomattiin. Koska huollon seurantaan tarkoitettu ohjelma on jo saatavilla, kaikkien tulisi myös osata käyttää sitä kunnolla. Esimerkiksi harvan tutkimuksen IV-koneen viimeisestä suodattimienvaihdon ajankohdasta oltiin varmoja, koska FacilityInfoon ei oltu sitä merkitty, eikä kaikista IV-konehuoneistakaan löydetty dokumentointia. Seurannan täytöstä vastaavia henkilöitä voisi ohjeistaa lisäämään tarkempaa informaatiota FacilityInfoon ja vaatia jotain tiettyä informaation minimi tasoa. Koska huoltopalvelut ovat ulkoistettu, ongelmana huollon riittävyyden takaamisessa on, ettei kenenkään työtehtäviin kuulu huollon onnistumisen valvominen. Erillisen henkilön palkkaaminen niin sanotuksi huollon laaduntarkastajaksi voisi kuitenkin olla liioittelua.

Koska likaisuuteen liittyvät ongelmat olivat selkeästi esillä, ehdotetaan huollon lisäämistä tai ainakin sen laadun parantamista. Joidenkin LTO-laitteiden hyötysuhteen parantamiseen riittäisi perusteellinen siivous. Toisaalta mittauksia tehdessä huomattiin, että joillain tutkimuksen kouluilla oli vaarallista avata suurien IV-koneiden luokkuja yksin. Ainakin suurempien huoltotoimenpiteiden, kuten IV-koneiden pesun, suorittamisen helpottamiseksi olisi hyvä olla aina kaksi huoltavaa henkilöä. Myös suodattimien vaihtotikkailla seisoen on vaikeaa tehdä yksin, tämä voi johtaa vaihdon pitkittymiseen.

Koska moni toiminto on nykyisissä IV-koneissa automatisoitu, on erittäin tärkeää, että automaatiassa käytettävää ohjelmaa osataan käyttää oikein. Automatiikan raja-arvoja kuten käyntiaikoja on hyvä päivittää aika-ajoin. Samoin sulatusautomaatiikan raja-arvot olisi hyvä tarkistaa ja päivittää ainakin kerran talvessa. On tärkeää tietää myös mistä raja-arvot saadaan, jotta ongelmat voidaan havaita helposti.

Lisäksi on LVI-suunnittelijan ja asentajan vastuulla, että IV-kone ja LTO-laite ovat parhaat edellytykset niiden toimintaan, kuten rakenteen tiiviyden ja riittävät suodattimet. Tosin uusissa IV-koneissa tämä on jo otettu huomioon.

LÄHTEET

Olli Seppänen, 1996, ILMASTOINTITEKNIikka JA SISÄILMASTO, Suomen LVI-liitto ry.

EU standardit:

http://www.eurovent-certification.com/en/Certification_Programmes/Programme_Descriptions.php?lg=en&rub=03&srub=01&select_prog=AAHE (haettu 16.4.2013)

Flir-lämpökamera:

<http://www.infradex.com/faq.html> (haettu 15.3.2013)

Helsingin kaupungin palvelurakennusten matalaenergiarakentamisohje:

<http://www.hel.fi/wps/wcm/connect/4b7f898045cf33739ad3ff527882ad24/Yleiso+hje-+Helsingin+kaupungin+palvelurakennusten+matalaenergiarakentaminen.pdf?MO=D=AJPERES> (haettu 4.4.2013)

Helsingin kaupungin sisäinen kiinteistöloki FacilityInfo, ylläpitäjä; Buildercom Oy

Ilmatieteenlaitos, helmikuun sää:

<http://ilmatieteenlaitos.fi/helmikuu> (haettu 14.4.2013)

KETS, energiatehokkuussopimus:

<http://www.hel.fi/hel2/esnk/Sopimukset/KETS.pdf> (haettu 4.4.2013)
<http://www.hel.fi/hel2/esnk/Sopimukset/KETS%20Toimintasuunnitelma.pdf>

Komfovent Domekt ilmanvaihtokoneen esite:

http://www.mkm-trade.fi/MKM-Trade_Oy/komfovent.html (haettu 22.5.2013)

Metallien emissiivisyys, Nokeval Oy:

http://www.nokeval.com/pdf/misc/Metallien_emissiivisyys.pdf (haettu 15.3.2013)

Rakennusmääräyskokoelma D5 ja D2:

<http://www.finlex.fi/data/normit/29520-D5-190607-suomi.pdf> (haettu 20.4.2013)
<http://www.finlex.fi/data/normit/1921-D2s.pdf> (haettu 20.4.2013)

Sisäilmayhdistys, 2008:

http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/terveelliset_tilat/sisailmasto/fysikaaliset_tekijat/ (haettu 20.4.2013)

Suomen standardoimisliitto, SI-opas:

<http://www.sfs.fi/files/70/si-opas.pdf> (haettu 18.4.2013)

Kaksoislevylämmönsiirrin:

Talotekniikkalehti, 3/2013, sivu 72 (kysymys)
Talotekniikkalehti, 4/2013, sivu 73 (vastaus)

Testo 175-H2 dataloggerin esite:

<http://www.jjltekno.fi/documents/Esite174-175-1779.7.08.pdf> (haettu 4.4.2013)

Tilastokeskus:

http://tilastokeskus.fi/til/ehk/2012/04/ehk_2012_04_2013-03-22_kuv_014_fi.html
(haettu 20.4.2013)

TSI 9555-p mittarin manuaali:

http://www.tsi.com/uploadedFiles/Site_Root/Products/Literature/Manuals/9555-VelociCalc_Finnish-6001069B.pdf, (haettu 4.4.2013)

Ympäristöministeriön moniste 122, Helsinki 2003, ILMANVAIHDON LÄMMÖNTALTEENOTTO LÄMPÖHÄVIÖIDEN TASAUSLASKENNASSA

