

Ilmanvaihtolämmityksen hajautettu automaatio matalaenergiatalossa

Petri Pietarinen & Mikko Saari

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-5415-9 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5416-7 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1999

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 455 2408

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsfysik, hus- och brandteknik, Värmemansgränden 3, PB 1804, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 455 2408

VTT Building Technology, Building Physics, Building Services and Fire Technology,
Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 2408

Toimitus Leena Ukoski

Libella Painopalvelu Oy, Espoo 1999

Pietarinen, Petri & Saari, Mikko. Ilmanvaihtolämmityksen hajautettu automaatio matalaenergiatalossa [Distributed automation of ventilation heating system in a low-energy building]. Espoo 1999, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1950. 43 s.

Avainsanat HVAC, ventilation heating, low-energy houses, distributed systems, building automation, indoor air, air conditioning

Tiivistelmä

Ilmanvaihtolämmityksessä rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmää käytetään ilmanvaihdon lisäksi myös rakennuksen lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen. Järjestelmän tehokas käyttö edellyttää toimivaa säätö- ja ohjausjärjestelmää. Hajautetussa rakennusautomaatiojärjestelmässä tarvittava automaatio on sulautettu ohjattaviin laitejärjestelmiin ja tarvittava tiedonsiirto niiden välillä tapahtuu yhteisen tiedonsiirtoverkon kautta.

Ilmanvaihtolämmityksen hajautetun automaation prototyyppi -projektissa toteutettiin hajautetulla rakennusautomaatiojärjestelmällä ohjatun ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän pilottiasennus METOP-matalaenergiatoimistotaloon VTT:n koetaloalueella Espoossa. Asennetun järjestelmän pääkomponentteja ovat sulautetulla automaatiolla varustettu ilmanvaihtokone, huonekohtaiset tuloilmalämmittimet ja huonesäätimet sekä mikrotietokonepohjainen käyttöliittymä. Automaatiolaitteet on yhdistetty järjestelmäksi teollisuusstandardityyppisellä LonWorks-kenttäväylällä, jonka kautta tapahtuu tarvittava kommunikointi järjestelmän osien välillä.

Tutkimuksessa kehitetyllä käyttöliittymäohjelmistolla voidaan ohjata sekä ilmanvaihtokonetta että huonelämmitystä. Ilmanvaihtokoneen ilmavirta ja tuloilman lämpötila voidaan asettaa halutuiksi. Kun käytetään ilmanvaihdon automaattista säätöä, sisäilman hiilidioksidipitoisuuden ja kosteuden asetusarvot voidaan asettaa halutuiksi. Huonekohtaisia lämpötilan asetusarvoja voidaan muuttaa sekä paikallisesti että kenttäväylän kautta mikrotietokonepohjaisen käyttöliittymän avulla. Käyttöliittymäohjelmistolla voidaan myös seurata ilmanvaihtokoneen ja huonekohtaisen lämpötilansäädön toimintaa. Toteutetulla ilmanvaihtolämmitysjärjestelmällä saadaan seurantamittausten mukaan aikaiseksi hallittu ilmanvaihto ja tasaiset sisälämpötilat.

Projekti oli jatkoa *Ilmanvaihtolämmityksen ja -jäähdytyksen hajautettu automaatio* -tutkimusprojektille, jossa määriteltiin toimintamalli hajautetulla automaatiolla ohjatulle ilmanvaihtolämmitysjärjestelmälle. Projektissa tehdyn pilottiasennuksen avulla on voitu tutkia järjestelmän toimivuutta käytännössä hyödyntäen projektissa mukana olleiden yritysten toimittamia tuotteita, joista osa oli tutkimustyötä tehtäessä vasta tulossa markkinoille. Toteutettua pilottikohdetta voidaan hyödyntää järjestelmän ja siihen kuuluvien laitteiden kehityksessä, testauksessa ja markkinoinnissa.

Pietarinen, Petri & Saari, Mikko. Ilmanvaihtolämmityksen hajautettu automaatio matalaenergiatalossa [Distributed automation of ventilation heating system in a low-energy building]. Espoo 1999, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1950. 43 p.

Keywords HVAC, ventilation heating, low-energy houses, distributed systems, building automation, indoor air, air conditioning

Abstract

A ventilation heating system can be used for both ventilation and heating or cooling of a building at the same time. A well-designed control system is needed to use the system effectively. In a real distributed building automation system, HVAC-devices are fitted with local controllers, which communicate together via a digital communication network.

In the project entitled *Distributed automation of ventilation heating system in a low-energy building*, a prototype of a ventilation heating system controlled by a real distributed building automation system was set up at the METOP low-energy office building in the test house area of VTT in Espoo, Finland. The main components of the system are an air handling unit equipped with a local controller, distributed supply air heating devices in every room controlled by local room temperature controllers and a microcomputer based user interface of the system. Communication of the building automation system takes place via a communication network, which is based on the industrial fieldbus standard LonWorks.

User interface software developed in the project can be used to control the functionality of the air handling unit and the heating of each room. Supply air flow and supply air temperature can be set to desired values. When the automatic control of supply air flow is used, setpoints of carbon-dioxide concentration and relative humidity of the indoor air can be set to desired values. The setpoints of the room temperature controllers can be changed both locally and via fieldbus using the microcomputer based user interface. The user interface software makes it possible to monitor the behavior of the air handling unit and room temperature controllers. Measurements done with the system indicated that both the ventilation and temperature control at individual rooms worked well.

This project continued the work done in the project entitled *Distributed control of ventilation heating systems*, in which an outline of a distributed control system of ventilation heating was developed. This project made it possible to examine the functionality of the system in practice using products manufactured and supplied by companies that partook in the project. The pilot system set up in this project can be utilized for system and product development, testing and marketing.

Alkusanat

Ilmanvaihtolämmityksen hajautetun automaation prototyyppi -projekti kuului osana Teknologian kehittämiskeskuksen (Tekes) rahoittamaan Rakennusten energiankäytön tutkimusohjelmaan (RAKET). Muita tutkimusprojektin rahoittajia olivat Vallox Oy, RC-Linja Oy, Pirkanmaan AutomaatioKeskus Melo Oy (PAK Melo Oy) ja VTT Rakennustekniikka.

Projekti vietiin läpi vuosien 1997 - 1998 aikana. Tutkimustyön toteutuksesta vastasivat tutkijat Petri Pietarinen ja Mikko Saari VTT Rakennustekniikasta, joista ensin mainittu toimi projektipäällikkönä. Lisäksi tutkimustyöhön osallistui VTT Rakennustekniikasta työtekniikko Antti Mäkelä, jonka tehtäviin kuuluivat METOP-talossa tehdyt LVI-, sähkö- ja automaatioasennustyöt. Projektin seurantaan ottivat osaa Heikki Kotila Tekesistä, Markku Virtanen VTT Rakennustekniikasta, Olavi Suominen, Erkki Marjasto, Tapio Åhlman ja Petri Koivunen Vallox Oy:stä, Christer Grönlund ja Isto Rantanen RC-Linja Oy:stä sekä Mauri Elo PAK Melo Oy:stä.

Projektin tulokset dokumentoidaan tässä julkaisussa. Tekijöiden aloitteesta päätettiin julkaisun nimeksi vaihtaa *Ilmanvaihtolämmityksen hajautettu automaatio matala-energiatalossa* projektin alkuperäisen nimen sijaan. Julkaisun ovat kirjoittaneet Petri Pietarinen ja Mikko Saari. Julkaisun englanninkielisen tiivistelmän kielentarkastuksen teki vieraileva tutkija Carey Simonson VTT Rakennustekniikasta.

Projekti on ollut tekijöilleen haastava ja mielenkiintoinen kokemus. Kiitämme kaikkia tutkimukseen osallistuneita.

Espoossa 1998

Petri Pietarinen

Mikko Saari

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Alkusanat	5
Sisällysluettelo	6
1 Johdanto	7
2 Tutkimuksen taustaa.....	8
2.1 Matalaenergiarakentaminen.....	8
2.2 Ilmanvaihtolämmitys	9
2.3 Hajautettu rakennusautomaatio.....	11
3 Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmä	15
3.1 METOP-matalaenergiatoimistotalo	15
3.2 Järjestelmän kuvaus	15
3.3 Toimintaselostus	20
4 Rakennusautomaatiojärjestelmä.....	22
4.1 Ilmanvaihtokoneen automaatio.....	24
4.2 Huonesäätimet	28
4.3 Käyttöliittymä	31
5 Seurantamittaukset	35
5.1 Analoginen huonesäädin.....	35
5.2 Kenttäväylään asennetut laitteet	37
6 Yhteenveto	42
Lähdeluettelo.....	43

1 Johdanto

Ilmanvaihtolämmityksessä rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmää käytetään ilmanvaihdon lisäksi myös rakennuksen lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen. Rakennuksen tekniset järjestelmät sekä niiden käyttö ja ylläpito yksinkertaistuvat, koska erillistä lämmitysjärjestelmää ei tarvita. Yksinkertaistumisesta huolimatta järjestelmän tarjoamat ominaisuudet lisääntyvät. Ilmanvaihtolämmitys sopii erityisesti matalaenergiarakennuksiin.

Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän tehokas käyttö edellyttää toimivaa säätö- ja ohjausjärjestelmää. Hajautetussa rakennusautomaatiojärjestelmässä tarvittava automaatio on sulautettu ohjattaviin LVIS-laitteisiin ja järjestelmiin. Järjestelmän hallinta kokonaisuutena vaatii tiedonsiirtoa. Tämä on mahdollista toteuttaa yhdistämällä laitteet järjestelmäksi yhteisellä tiedonsiirtoverkolla. Laitevalmistajariippumattomien standardiratkaisujen käyttö rakennusautomaatiojärjestelmän tiedonsiirrossa mahdollistaa eri valmistajien laitteiden ja laitejärjestelmien asentamisen samaan järjestelmään sekä eri laitejärjestelmien toiminnan yhdistämisen.

Keväällä 1996 käynnistyi RAKET-tutkimusohjelman puitteissa VTT Rakennustekniikan vetämä hanke - *Ilmanvaihtolämmityksen ja -jäähdytyksen hajautettu automaatio* - jossa määriteltiin toimintamalli hajautetulla rakennusautomaatiojärjestelmällä ohjatulle ilmanvaihtolämmitysjärjestelmälle /1/. Työ saatiin päätökseen keväällä 1997 ja samalla käynnistyi jatkohanke, jossa toteutettiin edeltävässä projektissa määritellyn järjestelmän pilottiasennus METOP-matalaenergiatoimistotaloon VTT:n koetaloalueella Espoossa. Järjestelmä oli kokonaisuudessa asennettuna ja toiminnassa alkusyksystä 1998. Järjestelmään kuuluu sulautetulla automaatiolla varustettu ilmanvaihtokone sekä huonekohtaiset tuloilmalämmittimet, joita ohjataan huonekohtaisilla lämpötilasäätimillä. Laitteet on yhdistetty kenttäväylällä, jonka kautta tapahtuu niiden toiminnan hallinta keskitetysti mikrotietokonepohjaisen valvomoaseman kautta. Syksyllä 1998 tehtyjen seurantamittausten perusteella järjestelmä näytti toimivan odotusten mukaisesti.

Tämä julkaisu dokumentoi jälkimmäisessä projektissa tehdyn työn. Toteutetut LVIS-järjestelmät kuvataan luvussa 3 ja niiden ohjaamisessa käytettävä rakennusautomaatio luvussa 4. Seurantamittausten tulokset esitetään luvussa 5.

2 Tutkimuksen taustaa

Tässä julkaisussa kuvattavaa tutkimusprojektia edelsi VTT Rakennustekniikan vuosien 1996 - 1997 aikana toteutettu RAKET-tutkimusohjelman projekti, jossa määriteltiin hajautetun ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän toimintamalli /1/. Tätä vastaava järjestelmä asennettiin sittemmin METOP-koetaloon, mistä kerrotaan tarkemmin tämän julkaisun muissa luvuissa. Yleistä taustanäkemyistä työlle on antanut VTT Rakennustekniikassa tehty aikaisempi tutkimustyö matalaenergiarakentamiseen ja ilmanvaihtolämmitykseen sekä hajautettuihin rakennusautomaatiojärjestelmiin liittyen.

2.1 Matalaenergiarakentaminen

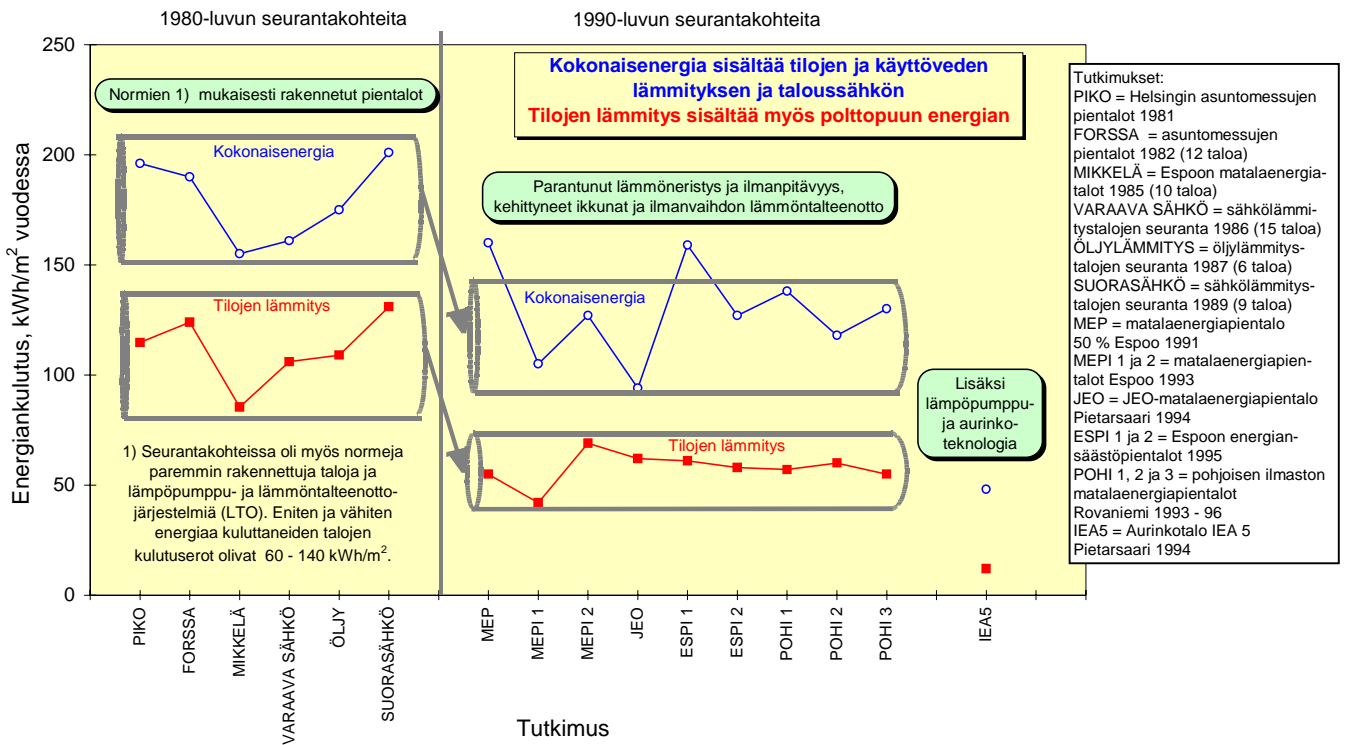
Lämmitys- ja jäähdytysenergiaa säästävät rakennukset ovat keskeinen tavoite maamme energiatalouden ja ympäristönsuojelun sekä suomalaisten rakennus- ja LVIS-alan yritysten kansainvälisen kilpailukyvyn kannalta. Rakennusten tulee olla käytössä sisäilmastoltaan turvallisia ja viihtyisiä, tuotannossa taloudellisia ja nopeita rakentaa sekä energiankulutukseltaan edullisia.

Koska rakennusten laskennallinen käyttöikä on yleensä vähintään 50 vuotta, ei uudisrakentamisen suunnitteluperusteena pitäisi käyttää nykyisten rakentamismääräysten minimivaatimuksia. Suunnittelussa tulisi ottaa huomioon rakennuksen koko elinkaari. Tällöin Suomen olosuhteissa jää ainoaksi vaihtoehdoksi siirtyä matalaenergiarakentamiseen.

Matalaenergiarakentaminen on myös tärkein rakennusten ympäristökuormitusta pienentävä keino, koska rakennuksen käytönaikainen energiankulutus on suurin ympäristökuorma sen elinkaaren aikana. Suomen koko rakennuskannan lämmitysenergian bruttokulutus oli vuonna 1995 noin 64 TWh, mikä oli lähes 20 % Suomen koko energiankulutuksesta ja käytännössä myös energiankäytön ympäristöpäästöistä.

Rakennusten energiataloudellisen suunnittelun tietoutta on kertynyt paljon eri tutkimus-, tuotekehitys- ja koerakentamishankkeissa /2/. Uusien rakennusten lämmitysenergiankulutusta voidaan pienentää alle puoleen nykyisestä jo olemassa olevaa matalaenergiateknologiaa hyödyntämällä (kuva 1). Tehokkaamman lämmöneristyksen ja ilmanvaihdon lämmöntalteenoton ansiosta myös lämmitystehontarve pienenee ja lämpöolosuhteet sisällä paranevat.

Matalaenergiarakentamisen pääperiaate on toteuttaa vaadittava sisäilmasto mahdollisimman yksinkertaisilla mutta vaaditut ominaisuudet täyttävillä ja toimivilla rakenne- ja laiteteknisillä ratkaisuilla, niin että energiankulutus- ja kustannusvaatimukset samalla täyttyvät.



Kuva 1. Pientalojen mitattuja energiankulutuksia eri seurantatutkimuksissa 1980- ja 1990-luvuilla. Uusi matalaenergiateknologia on pienentänyt 1990-luvulla rakennettujen talojen energiankulutusta merkittävästi.

2.2 Ilmanvaihtolämmitys

Toteutetuissa matalaenergiataloissa tilojen lämmitystehontarve on mitoituspakkasillakin vain 30 W/m², kun se tavanomaisissa taloissa on vähintään 60 W/m². Kun ulkoilman lämpötila on -10 °C, matalaenergiatalon lämmittämiseen riittää 10 W/m² lämmitysteho. Tämä vastaa kahden ihmisen makuuhuoneessa tuottamaa lämpötehoa. Etelä-Suomessa tätä kylmempää on keskimäärin vain kolme viikkoa vuodessa.

Pieniä lämmitystehoja jakamaan ei kannata rakentaa erillistä lämmönjakojärjestelmää vaan lämpö voidaan jakaa ilmanvaihtoilman mukana. Ilmanvaihtoilman käyttäminen lämmitykseen on luonnollista, koska kaikissa rakennuksissa tarvitaan

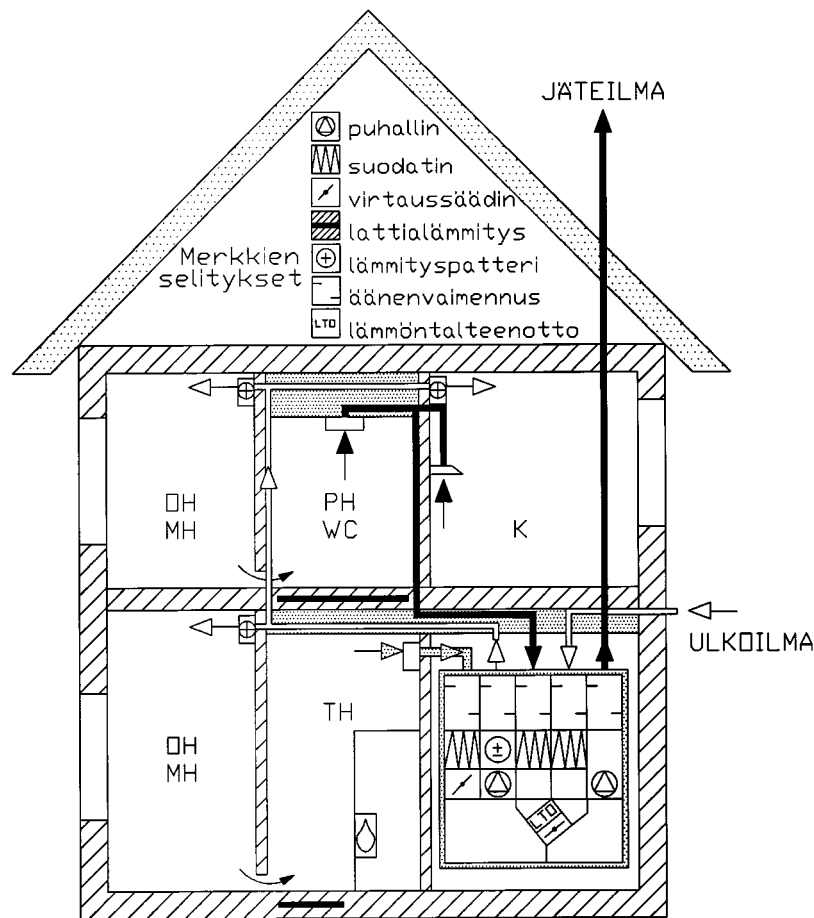
ilmanvaihtojärjestelmä. Erillisen lämmönjako- ja luovutusjärjestelmän poisjättämistä tukee sekin, että hyvin lämpöeristetyssä talossa lattian, seinien ja ikkunoiden pintalämpötilat ovat niin korkeita, että esimerkiksi ikkunan alle ei tarvita lämmityspatteria vedontunteen poistamiseksi. Koska matalaenergiatalossa on aina hallittu lämmöntalteenotolla varustettu ilmanvaihtojärjestelmä, ei myöskään kylmää pakkasilmaa imetä ikkunoiden ja ovien raoista sisälle vetoa aiheuttamaan, kuten tavanomaisissa taloissa.

Ilmanvaihtolämmityksessä rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmää käytetään ilmanvaihdon lisäksi myös rakennuksen lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen. Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmään kuuluu lämmöntalteenotolla varustettu ilmanvaihtokone, ilmapuhaltin, päätelaitteet sekä ohjaus- ja säätöautomaatiikka. Järjestelmässä ei tarvita erillisiä ilman-, lämmön- tai kylmänjakojärjestelmiä eikä niiden huone- tai automaatiolaitteita. Vähentyneiden laitteiden ansiosta rakennuksen tekniset järjestelmät yksinkertaistuvat. Järjestelmän yksinkertaistumisesta huolimatta sen tarjoamat ominaisuudet lisääntyvät. Tarpeenmukaisen käytön mahdollisuudet lisääntyvät niin lämpöolojen kuin ilman laadun hallinnassa ja energiaa voidaan käyttää tehokkaasti. Järjestelmän käyttö, toiminta ja ylläpito eivät kuitenkaan monimutkaistu, koska useita erillisiä ja usein päällekkäin toimivia järjestelmiä ei ole. Yksinkertaistuminen lisää myös järjestelmien toimintavarmuutta ja käyttöikä.

Rakenne- ja laiteteknisten ratkaisujen lisäksi matalaenergiatalon energian tehokas ja tarpeenmukainen käyttö edellyttää toimivaa säätö- ja ohjausjärjestelmää. Yksinkertaisimmin tämä voidaan toteuttaa hajauttamalla automaatio LVIS-laitteisiin ja -järjestelmiin. Tällöin LVIS-laitteen toimittaja toimittaa myös laitteen tarvitseman automaation ja vastaa niiden toiminnasta.

Rakennusten energiatalouden seurantatutkimuksissa on havaittu, että epätaloudellisesti toimivat pumput tai puhaltimet voivat olla merkittäviä energian tuhlaajia. Tavanomaisissa rakennuksissa näiden kulutukset hukkuvat muuhun kulutukseen. Matalaenergiarakennuksissa, joissa energian kokonaiskulutus on alhainen, näiden energiankulutuksen merkitys kasvaa. Energiankulutusta pienennetään tehokkaimmin oikealla suunnittelulla ja käyttämällä toimivaa ja helposti käytettävää säätö- ja ohjausjärjestelmää.

Kuva 2 esittää ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän toimintaperiaatetta. Järjestelmä soveltuu pientaloihin, rivitaloihin, kerrostaloihin ja kouluihin sekä toimisto- ja liikerakennuksiin. Isoissa kiinteistöissä järjestelmä hajautetaan toiminnallisten tarpeiden mukaan osarakennuskohtaiseksi tai esimerkiksi huoneistokohtaiseksi.

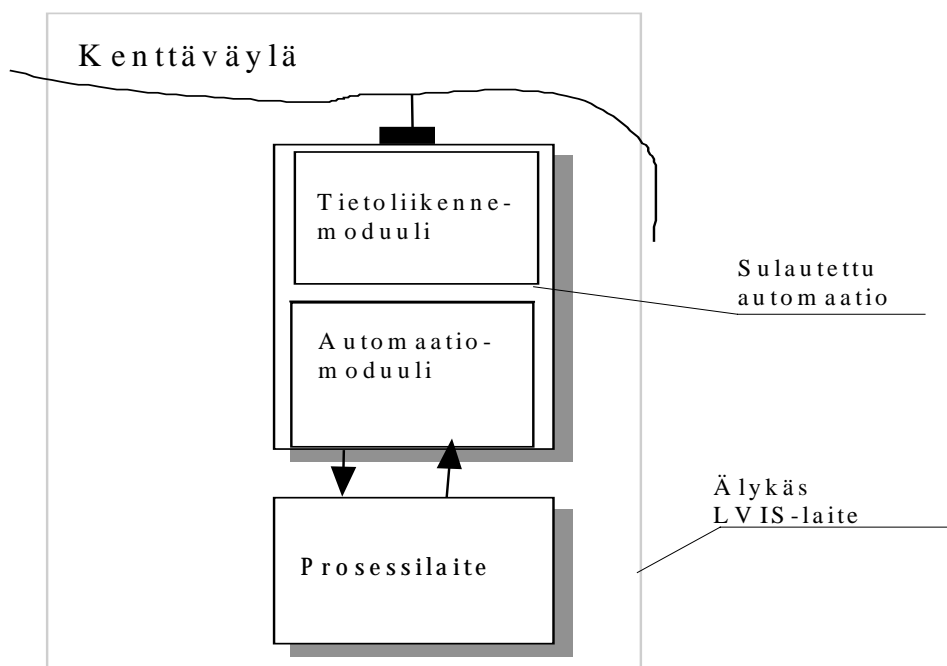


Kuva 2. Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän toimintaperiaate. Rakennuksen ilmanvaihto ja lämmitys on toteutettu samalla järjestelmällä. Huonekohtainen lämmönsäätö tapahtuu lämmittävillä tuloilmalaitteilla.

2.3 Hajautettu rakennusautomaatio

Nykyisin käytössä olevat rakennusautomaatiojärjestelmät voidaan karkealla tasolla jakaa kolmeen kategoriaan, jotka edustavat kolmea eri rakennusautomaation sukupolvea. Näistä ensimmäistä edustavat analogiset yksikkösäätimet. Niiden käytön etuna on suhteellisen edullinen hinta sekä järjestelmän helppo ja joustava laajennettavuus, mutta toisaalta rakennuksen järjestelmien toiminnan seuranta ja ohjaus kokonaisuutena ei ole mahdollista. Seuraavaa sukupolvea edustavat keskitetyt DDC-pohjaiset rakennusautomaatiojärjestelmät, joiden edut ja haitat ovat periaatteessa käänteiset ensimmäisen sukupolven järjestelmien kanssa. Uusinta sukupolvea edustavat 1990-luvulla kehitetyt hajautetut kenttäytläpohjaiset järjestelmät, joilla pyritään yhdistämään kahden aikaisemmin mainitun järjestelmätyypin tarjoamat edut.

Hajautettujen rakennusautomaatiojärjestelmien yhteydessä puhutaan usein automaation sulauttamisesta, mikä saattaa tuntua ristiriitaiselta. Automaation sulauttaminen ohjattaviin laitejärjestelmiin tarkoittaa sitä, että yksittäisten LVIS-laitejärjestelmien - esim. ilmanvaihtokoneen tai lämmönjakokeskuksen - säädössä ja ohjauksessa tarvittava automaatio kuuluu kiinteänä osana laitejärjestelmän toimitukseen ja muodostaa sen kanssa yhdessä toiminnallisesti itsenäisen kokonaisuuden. Koko rakennuksen tasolla automaation tehtävät on tällöin hajautettu laitejärjestelmä- ja tilakohtaisesti - esim. ilmanvaihtokoneeseen ja huonekohtaisiin säätimiin. Jotta järjestelmän toiminnan hallinta kokonaisuutena olisi mahdollista, tarvitaan tiedonsiirtoa. Tämä saavutetaan yhdistämällä laitteet digitaalisella tiedonsiirtoverkolla, jonka kautta laitteiden välillä tarvittava kommunikointi tapahtuu yhteistä tiedonsiirtoprotokollaa käyttäen. Käytännössä edellä mainittu edellyttää sitä, että järjestelmän säätimet on toteutettu mikroprosessoripohjaisesti. Yksittäisen säätimen tehtävät voidaan toiminnallisella tasolla jakaa kahteen osaan: säätöön ja ohjaukseen sekä tiedonsiirtoon (kuva 3).



Kuva 3. Sulautetulla automaatiolla varustettu älykäs LVIS-laite osana hajautettua rakennusautomaatiojärjestelmää /3/.

Järjestelmään kuuluvien laitteiden kommunikointi edellyttää yhteistä tiedonsiirtomediaa - kenttäväylää - sekä yhteistä kieltä - tiedonsiirtoprotokollaa - kuten ihmistenkin välinen kommunikointi. Mikäli kommunikointi perustuu valmistajariippumattomaan tiedonsiirtoprotokollaan - joko viralliseen standardiin tai käytännön teollisuus-

standardiin - voidaan samaan järjestelmään yhdistää eri valmistajien laitteita. Tämän tyyppisellä järjestelmällä voidaan saavuttaa monenlaisia etuja - taulukossa 1 luetellaan niistä keskeisimpiä.

Taulukko 1. Hajautetulla rakennusautomaatiolla ja valmistajariippumattomien tiedonsiirtotapojen hyödyntämisellä saavutettavissa olevia etuja.

SAAVUTETTAVISSA OLEVA ETU	PERUSTELU	ENSISIJAINEN HYÖDYNTÄJÄ
LVIS-laitejärjestelmien jalostusarvon nostaminen	Tarvittava automaatio sisältyy itse laitejärjestelmän toimitukseen. Valmistaja tuntee laitejärjestelmän ominaisuudet, mitä voidaan hyödyntää säätö- ja ohjausjärjestelmän suunnittelussa.	Rakennuksen omistaja ja ylläpitäjä LVIS-laitteita valmistava yritys
Eri laitejärjestelmien toimintojen yhdistäminen	Voidaan hallita ohjattavaa rakennusta kokonaisuutena ja saavuttaa energiansäästöjä (esim. ilmanvaihdon tarpeenmukainen ohjaus kulunvalvonnan tietojen perusteella).	Rakennuksen omistaja ja ylläpitäjä
Eri laitetoimittajien laitteiden ja järjestelmien asentaminen samaan järjestelmään	Ostajan ei tarvitse sitoutua yhteen järjestelmätoimittajaan. Laitevalmistaja voi keskittyä oman tuotteensa kehittämiseen ilman tarvetta koko järjestelmän toimittamiseen.	Rakennuksen omistaja ja ylläpitäjä. Pienet ja keskisuuret LVIS- ja rakennusautomaatioalan yritykset.
Rinnakkaisten taloteknisten järjestelmien keskitetty hallinta	Voidaan hallita rakennusta yhtenä kokonaisuutena, ei erillään toimivia rinnakkaisjärjestelmiä (esim. valaistus, ilmanvaihto, lämmitys).	Rakennuksen omistaja ja ylläpitäjä.

LonWorks on tällä hetkellä se tiedonsiirtotapa, johon talotekniikka-alan yritykset Suomessa ensisijaisesti panostavat kehittäessään tuotteita valmistajariippumattomaan järjestelmäympäristöön. Kyseessä on yksityisen yrityksen Yhdysvalloissa kehittämä tiedonsiirtotapa ja tuote, joka on laitevalmistajien vapaasti hyödynnettävissä asiaan kuuluvia lisenssimaksuja vastaan. LonWorks on viime vuosien aikana noussut kansainvälisen teollisuusstandardin asemaan rakennusautomaatiossa. Suomessa se on valittu avainteknologiaksi Tekesin rahoittamassa rakennusautomaation SaMBA-tekniologiaohjelmassa. Se ei ole ainoa kansainvälisesti merkittävä standardi rakennusautomaation tiedonsiirrossa eikä voida varmuudella sanoa, mikä sen merkitys tulevaisuudessa tulee

olemaan. Olennaisempaa kuin käytettävän tiedonsiirtoratkaisun nimi tai merkki on kuitenkin se, että tämän tyyppiseen teknologiaan perustuvien järjestelmien osuus rakennusautomaatiossa tulee todennäköisesti kasvamaan.

VTT Rakennustekniikan vuosien 1995 - 1997 aikana toteutuneessa tutkimusprojektissa *Älykkyyden hajauttaminen LVIS-järjestelmien automaatiossa* hankittiin hajautettujen rakennusautomaatiojärjestelmien toteuttamiseen liittyvä perusosaaminen /3/, jota on sen jälkeen sovellettu erilaisissa soveltavan tutkimuksen hankkeissa ja tuotekehitys-hankkeissa. Vastaavana aikana ovat myös merkittävimmät talotekniikka-alan yritykset Suomessa panostaneet alan tuotekehitykseen.

3 Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmä

3.1 METOP-matalaenergiatoimistotalo

Tutkittu ilmanvaihtolämmitysjärjestelmä asennettiin vuonna 1998 METOP-matalaenergiatoimistotalon toiseen kerrokseen. METOP-toimistotalo rakennettiin VTT:n koetaloalueelle Espoon Otaniemeen jo vuonna 1991 /4/. Rakennuksessa oli ilmanvaihtolämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä. Tavoitteena oli, että toimistotalo lämpiää päivisin omilla toiminnoillaan suurimman osan vuotta ja jäähtyy ulkoilmalla. Kesähelteelläkään CFC-aineita käyttävillä tai muillakaan kylmäkoneilla tuotettavaa jäähdytysenergiaa ei tarvita, vaikka ulkolämpötila olisi +30 °C.

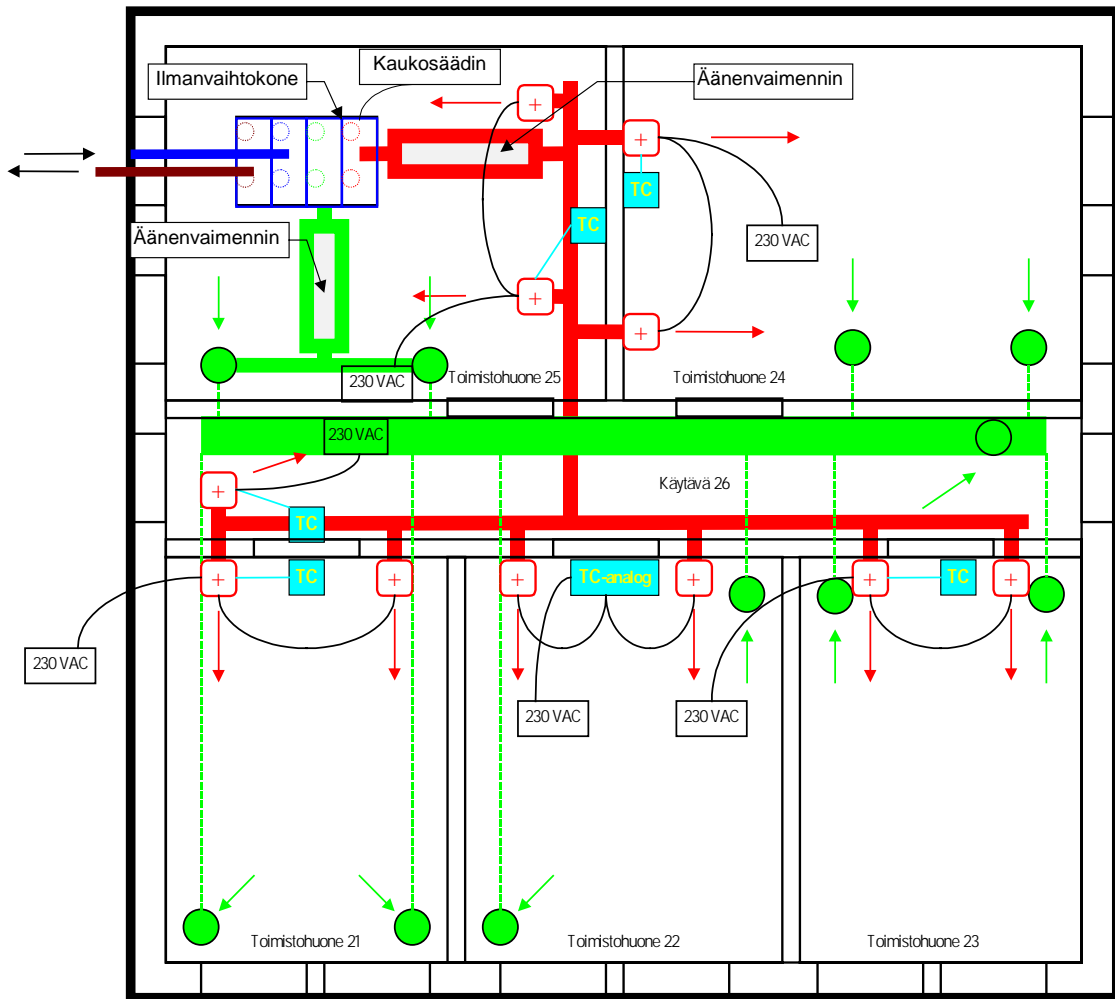
Kaksivuotisen seurantatutkimuksen mukaan METOP-toimistotalon lämmitysenergiankulutus oli noin 60 % pienempi kuin toimistotalojen keskimäärin. METOP-taloa varten kehitetty erikoisikkuna pienensi merkittävästi lämmitys- ja jäähdytystarvetta. Ikkunan lämmönläpäisy oli 60 - 70 % pienempi (k-arvo on 0,5 W/m²K) ja auringon säteilyn läpäisy 70 % pienempi kuin tavanomaisen kolmilasisen ikkunan. METOP-toimistossa mikrotietokone oheislaitteineen sijoitettiin ilmastoidun työpöydän sisälle, ja näin voitiin poistaa yli 60 % mikrotietokoneen aiheuttamasta ylilämmöstä. Mikäli huoneessa oli lämmitystarvetta, voitiin lämpö hyödyntää kokonaisuudessaan lämmityksessä.


Sisäilmastomittausten mukaan toimistohuoneen ilman haitallisten aineiden pitoisuudet olivat alhaiset ja alittivat selvästi nykyiset enimmäisarvot. Terminen sisäilmasto täytti hyvälle sisäilmastolle esitetyt vaatimukset.


3.2 Järjestelmän kuvaus

Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän pääkomponentit ovat lämmöntalteenotolla varustettu tulo- ja poistoilmanvaihtokone, äänenvaimentimet, ilmanakanavisto, poistoilman päätelaitteet ja lämmittävät tuloilmalaitteet säätimineen.

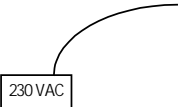
Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmä rakennettiin viiteen toimistohuoneeseen ja niitä yhdistävään käytävään METOP-toimistotalon toiseen kerrokseen, jossa on oma sisäänkäynti suoraan ulkoa. Muutostöiden yhteydessä toisen kerroksen ilmanvaihtokanavisto erotettiin muusta rakennuksesta. Alun perin huoneiden tulo- ja poistoilmanakanavointi oli toteutettu katon ontelolaattakanavilla. Uuteen järjestelmään rakennettiin uusi peltinen tuloilmanakanavisto, koska tuloilman sisäänpuhalluksessa haluttiin käyttää seinältä puhallusta kattopuhalluksen sijaan. Poistoilmanakanavistona käytettiin alkuperäistä ontelolaattakanavistoa ja käytävässä sijaitsevaa peltistä kokoojakanavaa. Kuva 4 esittää toteutettua ilmanvaihtolämmitysjärjestelmää.




 OKI-E lämmitävä tuloilmalaite ja tuloilmakanava

 Huonesäädin (lämpötilan säätö)

 Kaukosäädin Ilmanvaihtokoneen oma ohjauspaneeli

 Sähkönsyöttö huonekohtaisille tuloilmalämmittimille

 Poistoilmalaite ja poistoilmakanava (katkoviiva ontelokanava)

Kuva 4. METOP-matalaenergiatoimistotalon ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän rakenne.

Ilmanvaihtokone (kuva 5) sijaitsi toimistohuoneessa 25. Ulkoilma- ja jäteilmakanavat johdettiin koneelta suoraan seinästä ulos avattavaan ikkunaan asennetun läpivientilevyn kautta. Ilmanvaihtokone asennettiin lattialle jalustalle ja kanavat liitettiin siihen kokoojaliitososilla. Ilmanvaihtokoneesta lähtevät kaksi halkaisijaltaan 125 mm:n kanavaa yhdistettiin kokoojaosassa yhdeksi 160 mm:n kanavaksi, johon liitettiin ulkoilma- ja jäteilmakanavat sekä tulo- ja poistokanavat äänenvaimentimiseen.

Äänenvaimentimen jälkeen tuloilmakanavat suunniteltiin väljiksi: kanava huoneesta 25 käytävään 26 oli halkaisijaltaan 250 mm ja käytävässä oleva 160 mm. Huoneisiin johdetut kanavahaarat olivat halkaisijaltaan 125 mm. Jokaisessa toimistohuoneessa oli kaksi lämmittävää tuloilmalaitetta (á 300 W), jotka sijaitsivat ikkunaseinän vastaisella seinällä noin kahden metrin korkeudella (kuva 6). Käytävässä oli yksi tuloilmalaite.

Jokaisessa toimistohuoneessa oli kaksi poistoilmalaitetta katossa. Poistoilma johdettiin katon ontelolaatan onteloita (halkaisija 185 mm) pitkin käytävässä olevaan kokoojakanavaan (halkaisija 400 mm). Sieltä poistoilma johdettiin edelleen onteloiden kautta toimistohuoneeseen 25 ja äänenvaimentimen läpi ilmanvaihtokoneelle.

Ilmanvaihtokoneen maksimi-ilmavirta oli 117 dm³/s eli noin 1,7 dm³/s/m². Toimistohuoneissa (10 - 11 m²) oli tavoitteena noin 20 dm³/s ilmavirta. Taulukossa 2 on ilmanvaihtokoneen ilmavirtojen mittaustulokset eri säätöasunnoilla. Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 /5/ mukaan toimistohuoneiden ilmanvaihdon ilmavirran tulee olla 10 dm³/s henkeä kohti tai 1 dm³/s lattia-m²:ä kohti.

Riittävän väljällä mitoituksella kanaviston painehäviöt olivat pienet eikä ääniongelmia syntynyt ja lisäksi kanavistosta tuli itsesäätyvä. Itsesäätyvyys tarkoittaa sitä, että halutut ilmavirrat toteutuvat toimistohuoneissa ilman mittauksia ja perussäätöä. Taulukossa 3 ovat tuloilmavirtojen tarkistusmittausten tulokset eri huoneista. Kaikissa huoneissa tuloilmalaitteiden esisäätöasento oli sama ja erot eri huoneiden ilmavirtojen välillä olivat pienet.

METOP-matalaenergiatoimistotalon mitoituslämpöhäviöt olivat noin 27 W/m² eli noin 300 W toimistohuonetta kohti. Yhden toimistohuoneen lämmittävien tuloilmalaitteiden teho oli noin 660 W. Mitoitustehoa suurempi teho on eduksi, jos halutaan nostaa sisälämpötilaa nopeasti. Toisaalta lämmitysteho riittää myös pienemmillä ilmavirroilla, kun lämmittimiä on kaksi. Vaihtoehtoinen tapa olisi ollut asentaa huoneeseen vain yksi tuloilmalämmitin ja toinen tuloilmalaite ilman lämmitintä.

Kuvassa 7 esitetään ilmanvaihtolämmitysjärjestelmässä käytetyn PTC-lämmityselementtiin perustuvan OKI-E-tuloilmalaitteen lämmitystehon riippuvuus tuloilmavirrasta. Lämmityselementti rajoittaa itse tehoaan, kun ilmavirta pienenee. Jos ilmavirta

pysähtyy kokonaan, lämmityselementin teho on alle 50 W eikä se vaadi ylikuumentamis-
suojausta tai muita varolaitteita. Lämmityselementin pintalämpötila ei nouse yli 80 °C:n.



Kuva 5. Ilmanvaihtokoneen ulkoilma- ja jäteilmakanavat johdettiin seinästä ulos. Ilmanvaihtokone oli toiminnoiltaan ja rakenteeltaan laitetoimittajan vakiomalli.



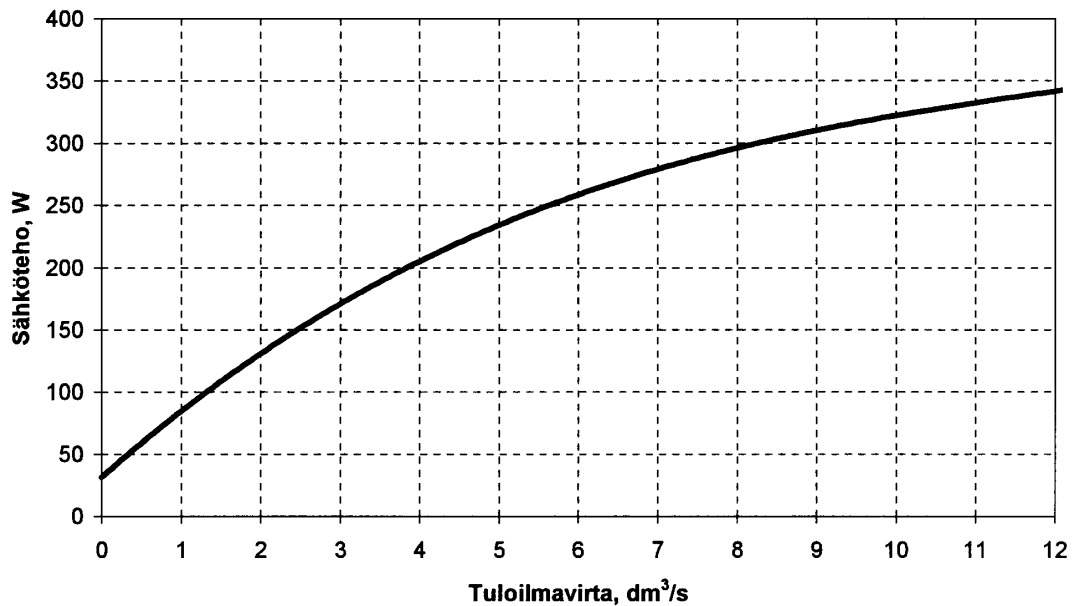
*Kuva 6. Toimistohuoneen ilmanvaihtolämmitysjärjestelmään kuului kaksi tuloilma-
lämmittintä ja lämpötilansäädin. Kun lämmitettävä tuloilmalaite avataan, sen kaikki osat
ovat esillä ja tarvittaessa helposti huollettavissa.*

Taulukko 2. Ilmanvaihtokoneen ilmavirtojen mittaustulokset eri säätöasunnoilla. Taulukkoon on laskettu myös keskimääräiset huonekohtaiset ilmavirrat ja niitä vastaavat lämmitystehot, kun tulevan ilman lämpötila on 20 °C. Ilmanvaihtolämmityksen lämmitysteho riittää ilmanvaihdon pienimmälläkin säätöasennolla kattamaan mitoitusslämpöhäviöt. Ilmanvaihtokone oli tyyppiä ILMAVA DIGIT S (Vallox Oy).

Säätöasento	Ilmanvaihtokoneen ilmavirta				Lämmitys- teho W/huone
	jäteilma dm ³ /s	dm ³ /s	ulkoilma dm ³ /s/m ²	dm ³ /s/huone	
1	27	23	0,33	4	260
2	39	35	0,50	6	360
3	52	48	0,68	9	420
4	64	60	0,86	11	500
5	77	75	1,07	14	540
6	90	85	1,21	15	580
7	100	96	1,36	17	620
8	117	116	1,65	21	660

Taulukko 3. Huonekohtaisten tuloilmavirtojen mittaustulokset. Kaikissa huoneissa tuloilmalaitteiden esisäätöasento on sama. Itsesäätäväksi suunnitellun ilmakanaviston takia myöskin ilmavirrat olivat käytännössä samat eri huoneissa. Käytävässä oli yksi tuloilmalaite, muissa tiloissa kaksi. Kokonaisilmavirta oli mittausepävarmuuden ja ilmavuotojen takia noin 10 % pienempi kuin ilmanvaihtokoneelta mitattu. Lämmitävä tuloilmalaite oli tyyppiä OKI-E (RC-Linja Oy).

Tila	Tuloilmavirta dm ³ /s
Toimistohuone 21	18
Toimistohuone 22	19
Toimistohuone 23	19
Toimistohuone 24	20
Toimistohuone 25	19
Käytävä 26	10
Yhteensä	104



Kuva 7. Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmässä käytetyn PTC-lämmityselementtiin perustuvan OKI-E-tuloilmalaitteen lämmitystehon riippuvuus tuloilmavirrasta, kun tulevan ilman lämpötila on 20 °C. Lämmityselementti rajoittaa itse tehoaan, kun ilmavirta pienenee. Vaikka ilman virtaaminen loppuu kokonaan, lämmitin ei vaadi ylikuumenemissuojaa tai muita varolaitteita, koska lämmityselementin pintalämpötila ei nouse yli 80 °C:n. Jos tulevan ilman lämpötila laskee, lämmittimen teho kasvaa. Jos lämmittimelle tulevan ilman lämpötila on 14 °C, niin lämmittimen sähköteho kasvaa noin 10 %.

3.3 Toimintaselostus

Ilmanvaihtolämmityksessä samalla järjestelmällä hoidetaan sekä rakennuksen ilmanvaihto että tilojen lämmitys. Ilmanvaihtoa voidaan säätää tarpeen mukaan ja sisälämpötilat voidaan valita huonekohtaisesti.

Ilmanvaihtokoneen kokonaisilmavirta voidaan valita käsin ohjauspaneelistä. Valittavissa on kahdeksan säätöasentoa. Vaihtoehtoisesti ilmavirtaa voidaan tehostaa automaattisesti hiilidioksidilähtetimen tai ilman suhteellisen kosteuden lähtetimen viestin perusteella. Huonekohtaiset ilmavirrat muuttuvat samassa suhteessa kuin ilmanvaihtokoneen kokonaisilmavirta. Kolmantena vaihtoehtona voidaan valita ilmavirtojen ohjaus kanavistopaineen mukaan. Tällöin ilmavirtojen säätö voidaan toteuttaa huonekohtaisesti säätöpelleillä.

Ilmanvaihtokoneen jälkeisen tuloilman lämpötila voidaan valita käsin ohjauspaneelista. Jos tuloilman lämpötila alittaa asetusarvon, lämmitysvastus (vaihtoehtoisesti vesipatteri) kytkeytyy päälle pitäen tuloilman lämpötilan asetusarvossaan. Koska kaikissa toimistoissa on lämmittävät tuloilmalaitteet, ilmanvaihtokoneelta lähtevän tuloilman asetusarvo voidaan pitää matalana (esim. 15 °C:ssa). Jos tuloilman lämpötila on korkea, ilmaislämpöjä ei pystytä hyödyntämään tehokkaasti. Kesällä lämmöntalteenotto ohitetaan automaattisesti ja sisätiloja voidaan viilentää ulkoilmalla.

Huonekohtainen lämmitys on toteutettu lämmittävillä tuloilmalaitteilla, joita ohjataan huonekohtaisilla säätimillä.

Kaikkia asetusarvoja voidaan muuttaa paikallisen ohjauksen lisäksi myös kenttäväylän kautta.

4 Rakennusautomaatiojärjestelmä

METOP-talon 2. kerrokseen asennettu rakennusautomaatio käsittää ilmanvaihtokoneen automaation sekä huonekohtaiset yksikkösäätimet. Automaatiolaitteet on yhdistetty järjestelmäksi LonWorks-kenttäväylällä. Järjestelmän toiminnan seuranta ja ohjaus tapahtuvat keskitetysti mikrotietokonepohjaisen käyttöliittymän kautta. Kuva 8 esittää asennetun järjestelmän rakennetta.

Ilmavaihtokoneen oma automaatio sisältyi osana Vallox Oy:n ILMAVA DIGIT - ilmanvaihtokoneen kokonaistoimitukseen. Varsinainen ohjausyksikkö on ilmanvaihtokoneen sisälle sijoitettava emokortti. Emokorttiin voidaan RS485-pohjaisen DIGIT-väylän kautta liittää oheislaitteina koneen paikallisena käyttöliittymänä toimiva kaukosäädin sekä hiilidioksidianturi, molempia enintään kolme järjestelmää kohti. Lisäksi emokorttiin voidaan liittää kosteus- ja paineantureita, molempia enintään kaksi.

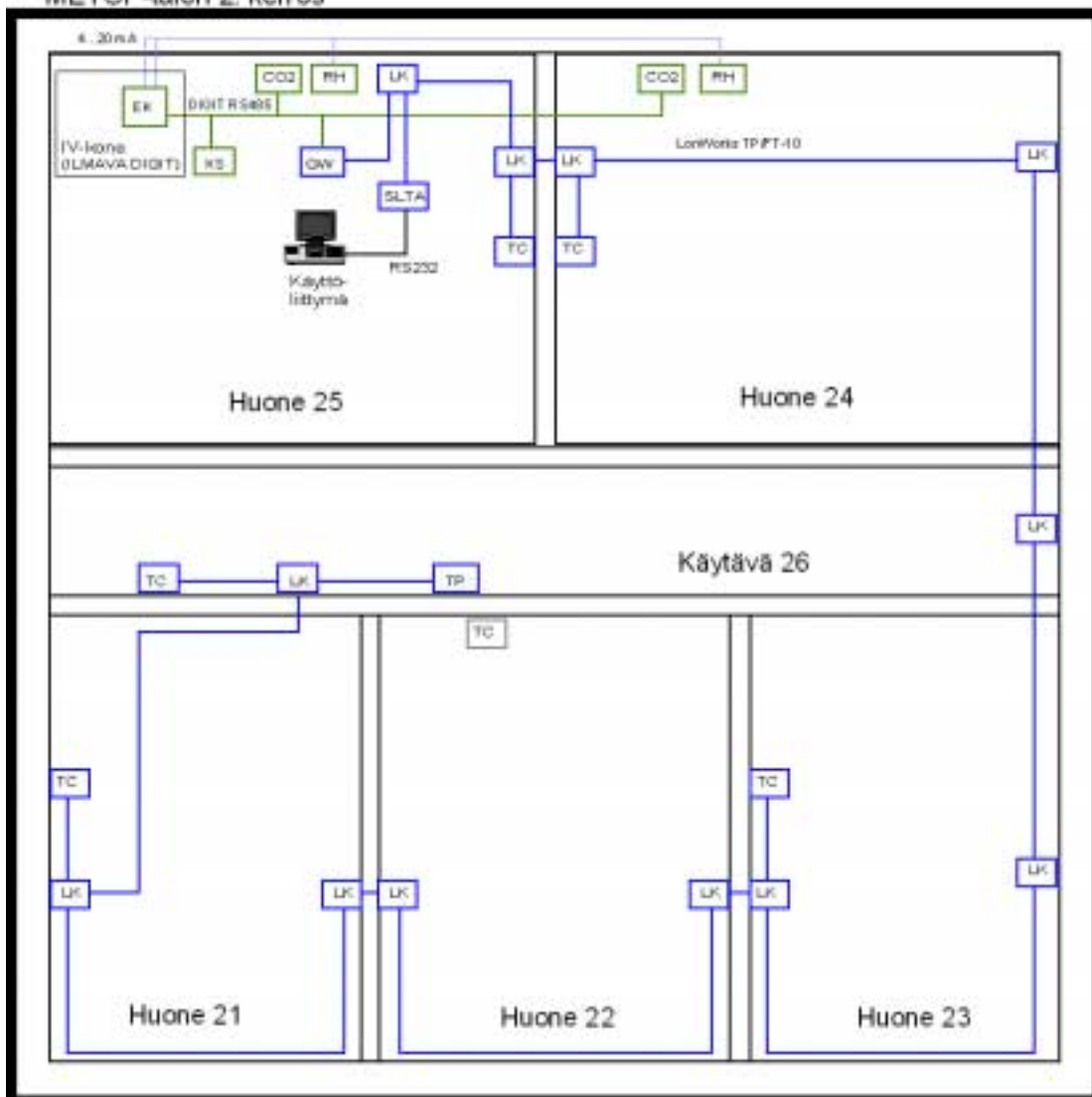
Ilmavaihtokoneen automaatio liitettiin muuhun rakennusautomaatiojärjestelmään erillisellä yhdyskäytävälaitteella, joka tekee muunnoksen DIGIT-väylällä kulkevien laitevalmistajakohtaisten sanomien ja LonWorks-väylällä kulkevien sanomien välillä. Tämä mahdollistaa ilmanvaihtokoneen toiminnan seurannan ja ohjauksen järjestelmän yhteisen kenttäväylän kautta. Yhdyskäytävän toteutuksessa hyödynnettiin ohjelmoitavaa sarjaväyläadapteria, jonka ohjelmointi tehtiin projektissa VTT:n omana työnä.

Huonekohtaisina säätiminä hyödynnettiin PAK Melo Oy:n toimittamia digitaalisia LonWorks-yksikkösäätimiä, joilla ohjataan huonekohtaisten tuloilmalämmittimien päälläoloa huonelämpötilan mittauksen ja asetusarvon perusteella. Neljään toimistohuoneeseen ja käytävätilaan asennettiin digitaalinen yksikkösäädin. Yhteen toimistohuoneesta jätettiin vertailun vuoksi sinne aiemmin asennettu analoginen yksikkösäädin.

Järjestelmän käyttöliittymänä hyödynnettiin mikrotietokonetta, joka liitettiin SLTA-10-sarjaväyläadapterin kautta LonWorks-väylään. Käyttöliittymänä toimivan ohjelmiston avulla on mahdollista lukea järjestelmästä kenttäväylän kautta ilmanvaihtokoneen ja huonesäädinten oloarvoja sekä muuttaa niiden asetusarvoja.

Tiedonsiirrossa käytettävä LonWorks-väylä on fyysisesti parikaapelia ja perustuu TP/FT-10-tyyppiseen vapaaseen verkkotopologiaan. Asennettu kaapeli on kaksiparista 0,8 mm:n johtimilla varustettua LONAK-tuoteperheen kiinteistöautomaatiokaapelia (valmistaja NK Cables Oy, Suomi) ja perustuu ST-kortiston ohjeissa määriteltyyn kaapelityyppiin 0,8 mm vapaalle verkkotopologialle /6/. Kaapelin ensimmäistä paria käytetään itse tiedonsiirrossa ja toista paria pitkin syötetään huonesäätimille niiden tarvitsema 24 VAC:n käyttöjännite käytävähuoneeseen 26 asennetulta huonesäädinten yhteiseltä tehonsyöttölaitteelta. Kuhunkin huoneeseen on asennettu kaksi liitäntäkoteloa, jotka palvelevat kaapeloinnin nykyistä ja mahdollista tulevaa haaroittamista.

METOP-talon 2. kerros



- LonWorks-väylän kaapelointi (TP/FT-10) ja huonesäädinten tehonsyöttö
- [OW] Yhdyskäytävä DIGIT RS485 -väylän ja LonWorks-väylän välillä
- [TC] LonWorks-huonesäädin
- [SLTA] SLTA-10 LonWorks -sarjavyölkäadapteri
- [TP] LonWorks-väylän päätevastus ja huonesäädinten yhteinen 24 VAC -tehonsyöttö
- [LK] Liityntäkotelo kaapeloinnin haaroittamista varten
- DIGIT RS485 -väylän kaapelointi ja tehonsyöttö emokortilta muille laitteille
- [EK] Emokortti
- [KS] Kaukosäädin
- [CO2] Hiilidioksidianturi
- [RH] Kosteusanturi
- [TC] Analoginen huonesäädin

Kuva 8. METOP-talon 2. kerroksen automaatiolaitteet ja kaapelointi. Automaatio on hajautettu ohjattaviin laitejärjestelmiin ja automaatiolaitteet on yhdistetty LonWorks-kenttäväylällä. Järjestelmän toiminnan hallinta voidaan tehdä keskitetysti mikrotietokonepohjaisen käyttöliittymän kautta.

4.1 Ilmanvaihtokoneen automaatio

Ilmanvaihtoa säädetään ILMAVA DIGIT -ilmanvaihtokoneessa kahdeksanportaisesti. Lisäksi voidaan säätää huonetiloihin puhallettavan tuloilman lämpötilaa ohjaamalla ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton jälkeisen jälkilämmityspatterin päälläoloa.

Koneen ilmanvaihto voidaan asettaa manuaalisesti, tai voidaan käyttää automaattista säätöä. Jälkimmäisessä tapauksessa säätökriteerina voidaan käyttää koneen säädöistä ja ohjauksista vastaavaan emokorttiin liitettäviä hiilidioksidi- ja kosteusmittauksia sekä vakiopainesäätöä käytettäessä painemittausta.

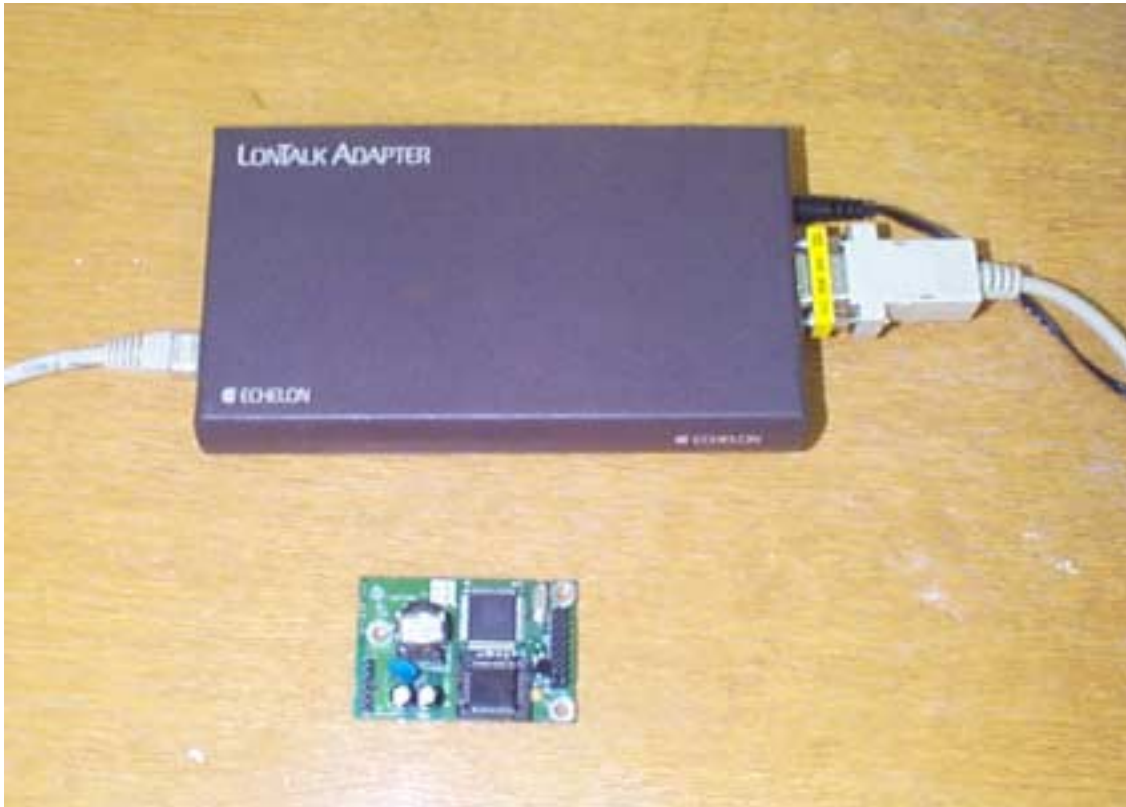
Muita koneen automatiikan tuottamia palveluita ovat hälytykset sekä erilaiset koneen anturoinnin kautta saatavat mittaustiedot. Suodatinvahtihälytys kertoo, milloin koneen suodattimet tulisi puhdistaa tai vaihtaa.

Nämä toiminnot toteuttaa ILMAVA DIGITin kokonaistoimituksen mukana tuleva automaatio, johon kuuluu ilmanvaihtokoneen sisälle sijoitettava emokortti ja siihen liitettävät oheislaitteet ja anturit. Emokortti ohjaa ilmanvaihtokoneen toimintaa. Siihen voidaan RS485-pohjaisen DIGIT-väylän kautta liittää kolme kaukosäädintä ja hiilidioksidianturia. Kaukosäädin toimii ilmanvaihtokoneen käyttöliittymänä, jonka avulla on mahdollista lukea koneen oloarvot ja muuttaa asetuksia. DIGIT-väylällä kulkevat sanomat perustuvat laitevalmistajakohtaiseen tiedonsiirtoprotokollaan.

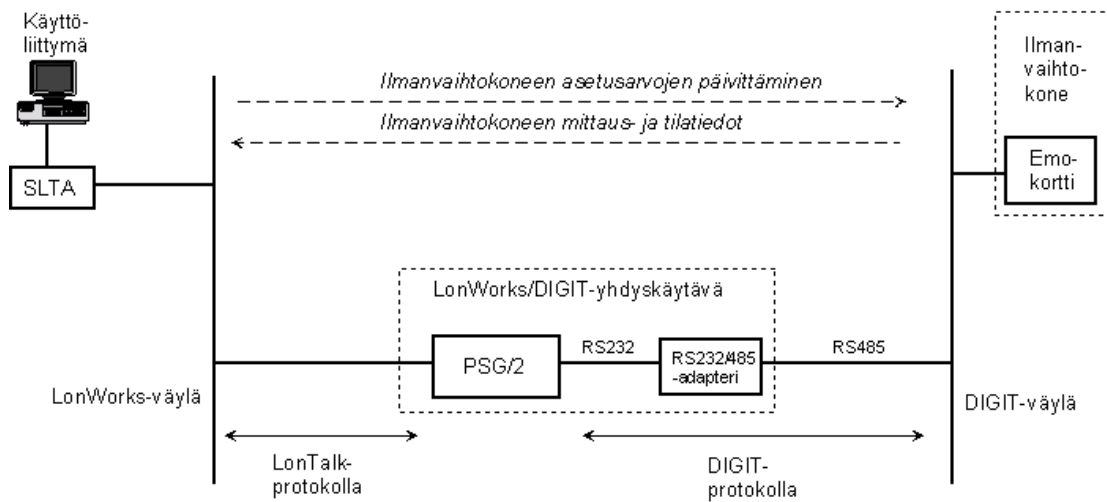
Ilmanvaihtokoneen yhdyskäytävä tekee muunnoksen DIGIT-väylän sanomien ja ilmanvaihtokoneen ohjauksessa LonWorks-väylän kautta käytettävien sanomien välillä. Yhdyskäytävän toteutuksessa oli lähtökohtana hyödyntää mahdollisuuksien mukaan markkinoilla olevia valmiita laitekomponentteja. Varsinainen protokollamuunnos ohjelmoitiin hyödyntäen PSG/2 (Programmable Serial Gateway) -laitetta (valmistaja Echelon, USA). PSG/2 on LonWorks-väylään asennettava laite, joka on varustettu ohjelmoitavalla RS232-sarjaväyläliitynnällä. Laitteen varsinainen älykkyys perustuu sen sisälle asennettavaan erilliseen ohjainkorttiin, joka sisältää mm. laitteen toimintaa ohjaavan mikroprosessoripiirin sekä paikan ohjelmoitavalle muistipiirille, johon itse sovellusohjelma on tallennettu. Kuva 9 esittää PSG/2-laitetta ja sen sisälle tulevaa ohjainkorttia.

/7/

Projektissa tehty yhdyskäytävän sovellusohjelma muuntaa LonWorks-verkon kautta tulevat ja lähtevät standardisanomat RS232-väylän kautta tuleviksi ja lähteviksi DIGIT-protokollan mukaisiksi sanomiksi. PSG/2-laitteeseen kytketyn RS232-sarjaväylän ja DIGITin RS485-pohjaisen parikaapeliväylän sähköisten ja mekaanisten ominaisuuksien yhteensovittamiseen tarvittiin vielä erillinen fyysisen tason adapterilaite. Kuva 10 esittää yhdyskäytäväsovelluksen toimintaperiaatetta ja toteutusta.



Kuva 9. Ohjelmoitava sarjaväyläsovitin (PSG/2) ja sen toimintaa ohjaava ohjainkortti.



Kuva 10. LonWorks/DIGIT- yhdyskäytävän toiminta- ja toteutusperiaate. Sanomien välisen muunnoksen tekee PSG/2-laitteen muistiin tallennettu sovellusohjelma.

Ilmanvaihtokoneen toiminnan seuranta ja ohjaus LonWorks-väylän kautta tapahtuu verkkomuuttujapohjaisten sanomien välityksellä. Verkkomuuttujapohjaisten sanomien käyttö on se sanomanvälitysmekanismi, jolla LonWorks-väylään asennetut laitteet normaalisti kommunikoivat keskenään. Tässä tapauksessa verkkomuuttujien avulla siirretään mittaus- ja tilatietoja ilmanvaihtokoneelta muuhun järjestelmään ja muutetaan ilmanvaihtokoneen asetuksia muusta järjestelmästä käsin. LonMark Interoperability Association -järjestön hyväksymät standardiverkkomuuttujatyypit määrittelevät laitevalmistajariippumattoman esitystavan erilaisille rakennusautomaatiojärjestelmissä siirrettäville mittaus- ja ohjaussanomille. /1/

Taulukko 4 sisältää joukon ilmanvaihtokoneen toiminnan hallinnan kannalta keskeisiä verkkomuuttujia, joita toteutettu yhdyskäytäväsovellus tukee. Standardiverkkomuuttujien käyttöä ilmanvaihtokoneen toiminnan hallinnassa on tarkemmin kuvattu lähteessä 1.

Taulukko 4. Ilmanvaihtokoneen toiminnan ohjauksessa ja seurannassa käytettäviä verkkomuuttujia.

VERKKOMUUTTUIJAN LYHYT KUVAUS	STANDARDIVERKKO-MUUTTUIJATYYPPI
Ilmanvaihtokoneen toiminnan päälle-pois-asetus	SNVT_hvac_mode
Tuloilmavirran manuaalinen asetusarvo	SNVT_switch
Tuloilman lämpötilan asetusarvo	SNVT_temp_p
Koneen perustoimintatiedot <ul style="list-style-type: none"> • päälläolo • jälkilämmityksen käyttö • lämmöntalteenoton käyttö • tuloilmapuhaltimen ohjaus • hälytykset 	SNVT_hvac_status
Mitattu tuloilman lämpötila	SNVT_temp_p
Sisäilman hiilidioksidipitoisuuden asetusarvo	SNVT_ppm
Sisäilman suhteellisen kosteuden asetusarvo	SNVT_lev_percent
Tuloilmavirran säätötavan valinta, vaihtoehdot: <ul style="list-style-type: none"> • manuaalinen • hiilidioksidisäätö • kosteussäätö • painesäätö 	SNVT_state
Mitattu sisäilman hiilidioksidipitoisuus	SNVT_ppm
Mitattu sisäilman suhteellinen kosteus	SNVT_lev_percent
Mitattu ulkolämpötila	SNVT_temp_p
Mitattu poistoilman lämpötila (sisäilman lämpötila)	SNVT_temp_p

4.2 Huonesäätimet

Tuloilmalaitteiden ohjauksessa käytettävä huonesäädin on tyyppiä HLLON (valmistaja Produal Oy, Suomi). Kyseessä on LonWorks-kenttäväylään liitettävä PI-säädin, jolla säädetään huonelämpötilaa. Säätimen oloarvojen luenta sekä asetus- ja konfigurointi-arvojen muuttaminen tapahtuvat kenttäväylän kautta.

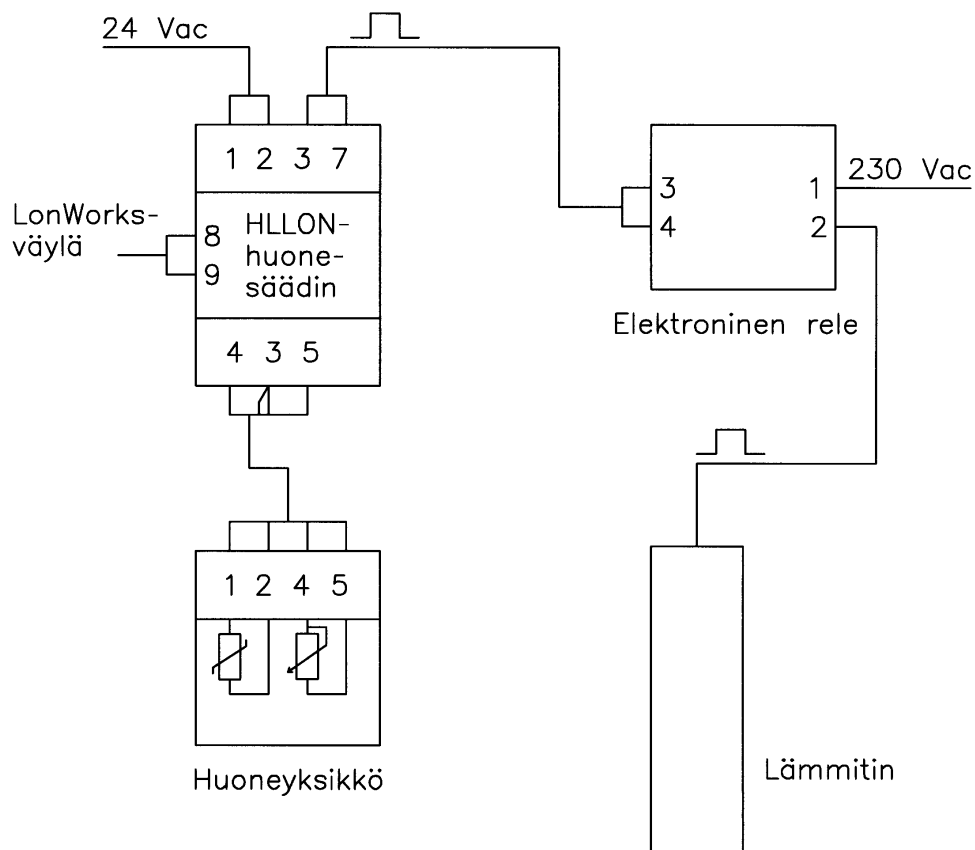
Taulukko 5 sisältää joukon huonesäätimen ohjauksen kannalta keskeisiä verkkomuuttujia.

Taulukko 5. HLLON-huonesäätimen toiminnan ohjauksessa ja seurannassa käytettäviä verkkomuuttujia.

VERKKOMUUTTUIJAN LYHYT KUVAUS	STANDARDIVERKKO-MUUTTUIJATYYPPI
Huonelämpötilan mittaus	SNVT_temp_p
Huonelämpötilan asetusarvo LonWorks-väylän kautta annettuna	SNVT_temp_p
Huonelämpötilan todellinen asetusarvo: LonWorks-väylän kautta annettu asetusarvo +/- huonepotentiometrin vaikutus	SNVT_temp_p
Toimilaitteen suhteellinen ohjaustieto	SNVT_lev_percent
Lämpötila-anturin tai huonepotentiometrin vikahälytys	SNVT_lev_disc
Säätimen vahvistus	SNVT_muldiv
Säätimen integrointi-aika	SNVT_time_sec

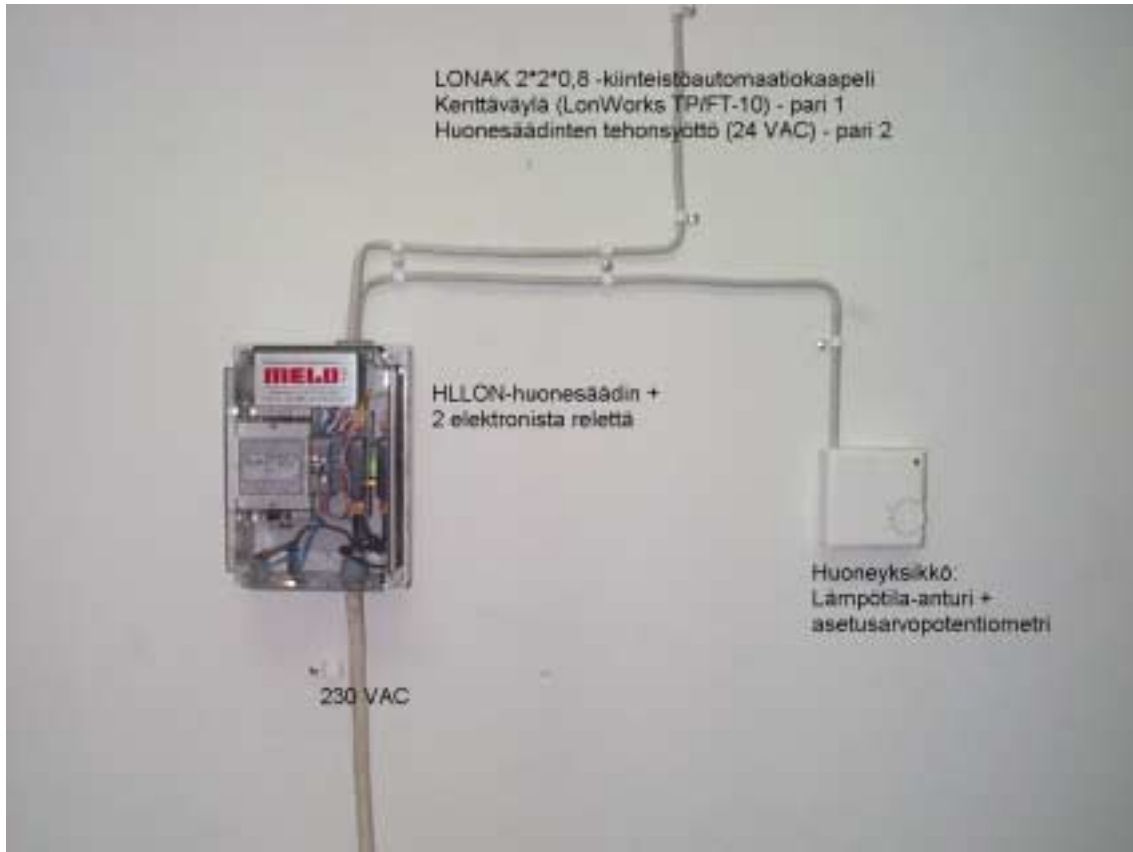
Säätimeen liitetään kaksiparisella kaapeloinnilla paikallinen huoneyksikkö, jossa on lämpötila-anturi sekä potentiometri asetusarvon paikallista muuttamista varten. Lämpötilan asetusarvoa voidaan muuttaa paikallisesti +/-6 °C suhteessa kenttäväylän kautta annettuun asetusarvoon.

Huoneiden tuloilmalämmittimien päälläoloa ohjataan käyttäen nollapistekytkentäisiä elektronisia releitä, jotka on kytketty säätimen 0 - 10 V ohjauslähtöön. Rele kytkeytyy päälle, kun sen ohjausjännite ylittää tietyn tason. Relettä ohjataan säätimeltä pulssimaisella jännitesignaalilla. Kuva 11 esittää kytkentäperiaatetta. Käytävätilassa on vain yksi tuloilmalämmitin, ja kytkentä on kuvan kaltainen. Toimistohuoneissa on kaksi tuloilmalämmitintä, joita ohjaavat releet on kytketty sarjaan säätimen ohjauksen kanssa.



Kuva 11. Huonekohtaisen tuloilmalämmittimen ohjaus HLLON-huonesäätimellä.

Kuva 12 esittää huonesäätimen kotelointia ja huoneyksikköä.



Kuva 12. Huonesäädin ja huoneyksikkö. Samaan koteloon huonesäätimen kanssa on asennettu tuloilmalämmittimien ohjaamisessa käytettävät elektroniset releet (kuvassa vasemmalla). Huoneyksikkö sisältää lämpötila-anturin ja paikallisen asetusarvopotentioimetrin (kuvassa oikealla). Ohjausreleiltä tuloilmalämmittimille menevä ohjauskaapelointi on vedetty seinän sisäpuolelta eikä näy kuvassa.

4.3 Käyttöliittymä

Järjestelmän käyttöliittymä on toteutettu hyödyntäen tavallista 486 PC -mikrotietokonetta, joka on varustettu Microsoft Windows for Workgroups 3.11 -käyttöjärjestelmällä. Mikrotietokone liitetään fyysisesti LonWorks-kenttäväylään SLTA-10-adapterilaitteella (valmistaja Echelon, USA). Adapterilaite yhdistetään mikrotietokoneeseen RS232-sarjapäivälinän kautta.

Mikrotietokoneeseen asennettiin seuraavat valmisohjelmat:

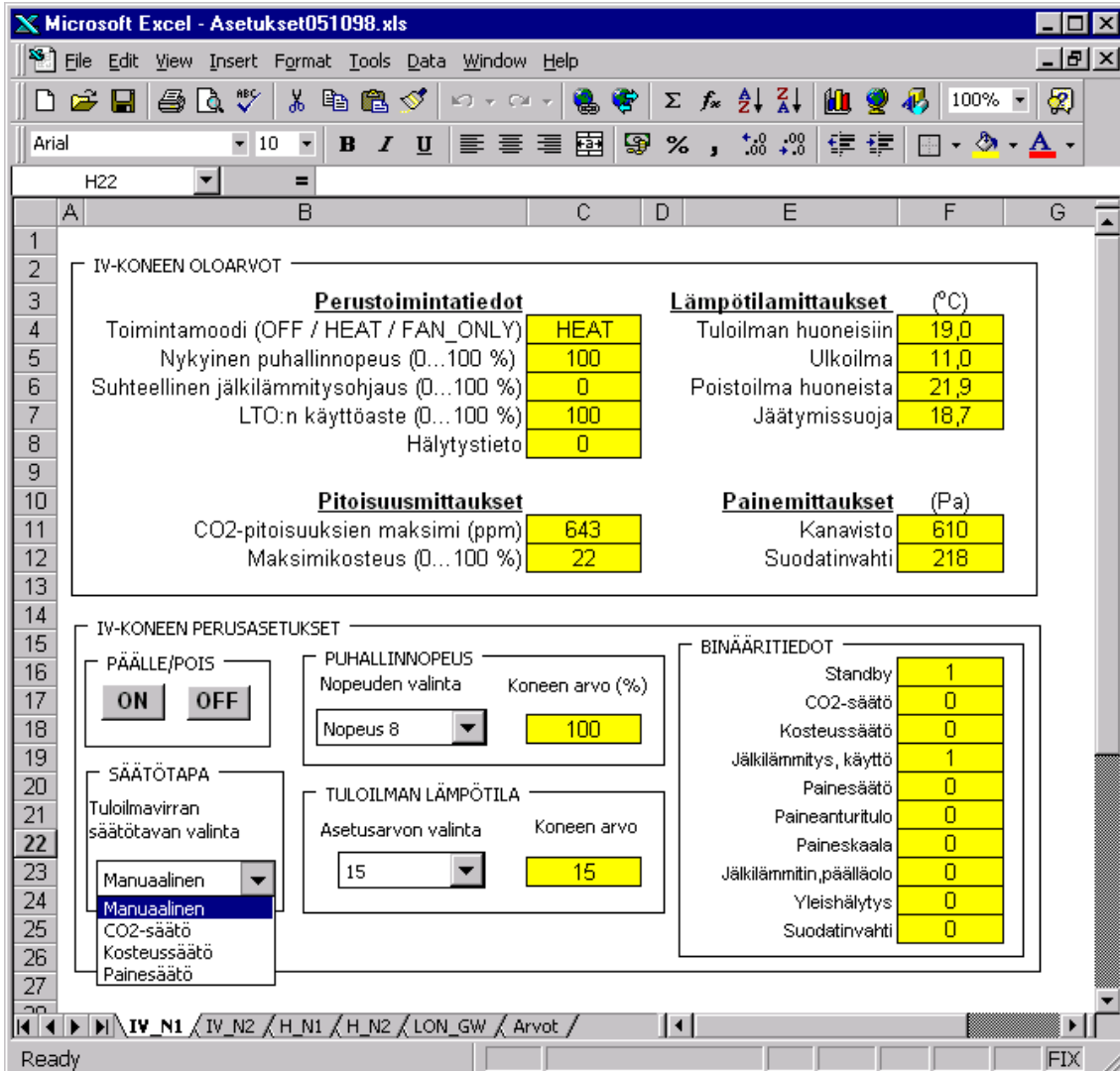
- LonManager LonMaker -asennusohjelma. Ohjelman avulla asennetaan LonWorks-väylän kautta kommunikoivat laitteet osaksi järjestelmää. Asennus ei tässä yhteydessä tarkoita fyysistä asennusta vaan laitteiden ohjelmallista konfigurointia, kuten laitteiden osoitteet. Ohjelmalla tehdyn asennuksen tuloksena syntyy asennustietokanta, johon on tallennettu tiedot järjestelmään asennetuista laitteista. /8/
- LonManager DDE Server -ohjelma, jota hyödynnettiin käyttöliittymäohjelmiston toteutuksessa. Ohjelma tarjoaa ylemmän tason sovellusohjelmille - tässä tapauksessa käyttöliittymälle - Windows-käyttöjärjestelmän standardiominaisuuksiin kuuluvan DDE-palvelurajapinnan, jota hyödyntäen sovellusohjelma pystyy kommunikoimaan järjestelmään asennettujen laitteiden kanssa. LonManager DDE Server -ohjelma kommunikoi järjestelmään asennettujen laitteiden kanssa käyttäen järjestelmän asennuksen tuloksena syntyneitä asennustietokantaa. /9/

Tässä tapauksessa itse käyttöliittymä toteutettiin hyödyntäen Microsoft Excel -ohjelmaa. LonWorks-väylällä käytettävien verkkomuuttujapohjaisten sanomien lähetyksen ja vastaanotto Excel-ohjelmasta on suhteellisen yksinkertaista LonManager DDE Server -ohjelman tarjoamia palveluita hyödyntäen. Käytännössä sanomien vastaanotto ei vaadi erityistä ohjelmointia ja lähetyksen voidaan toteuttaa Visual Basic -ohjelmointikielellä tehtäviä Excelin makroja hyödyntäen. /10/

Toteutetussa Excel-pohjaisessa käyttöliittymässä on neljä perusnäyttöä, joilla voidaan seurata ilmanvaihtokoneen ja huonesäädinten toimintaa ja muuttaa niiden asetuksia.

- Ilmanvaihtokoneen perusnäyttö 1:n avulla voidaan lukea koneen oloarvot ja muuttaa koneen keskeisiä asetuksia. Kuva 13 esittää ilmanvaihtokoneen perusnäyttöä 1.
- Ilmanvaihtokoneen perusnäyttö 2:n avulla voidaan muuttaa sellaisia ilmanvaihtokoneen asetuksia, joita ei ole sisällytetty perusnäyttöön 1:

- hiilidioksidisäädön asetusarvo
 - kosteussäädön asetusarvo
 - jäätymissuojaraja
 - jäätymissuojan hystereesi
 - painesäädön asetusarvo
 - suodatinvahdin asetusarvo
 - jälkilämmityspatterin käyttö
 - säätöväli minuuteissa
 - puhaltimen perusnopeus.
- Huonesäädinten perusnäyttö 1:n avulla voidaan lukea huonesäädinten oloarvot. Kuva 14 esittää huonesäädinten perusnäyttöä 1.
 - Huonesäädinten perusnäyttö 2:n avulla voidaan muuttaa huonesäädinten asetuksia, joita ovat:
 - huonelämpötilan asetusarvo
 - säätimen vahvistus
 - säätimen integrointiaika.



Kuva 13. Ilmanvaihtokoneen perusnäyttö 1. Käyttöliittymä lukee koneen oloarvot ilmanvaihtokoneen yhdyskäytävälaitteelta kenttäväylän kautta ja viimeisimmät arvot päivittyvät näytölle automaattisesti. Lisäksi perusnäyttö 1:n kautta tapahtuu koneen keskeisimpien asetusten muuttaminen.

Room	Temperature (°C)	Setpoint (°C)	Heating Control (%)	Alarm Status
Huone 1	21,4	21,9	65	OFF
Huone 2	22,4	21,9	0	OFF
Eteinen	21,4	21,9	92	OFF
Huone 5	22,4	21,9	0	OFF
Huone 4				
Huone 3	21,9	21,9	48	OFF

Kuva 14. Huonesäädinten perusnäyttö 1. Käyttöliittymä lukee huonesäädinten oloarvot kenttäväylän kautta ja viimeisimmät arvot päivittyvät näytölle automaattisesti.

5 Seurantamittaukset

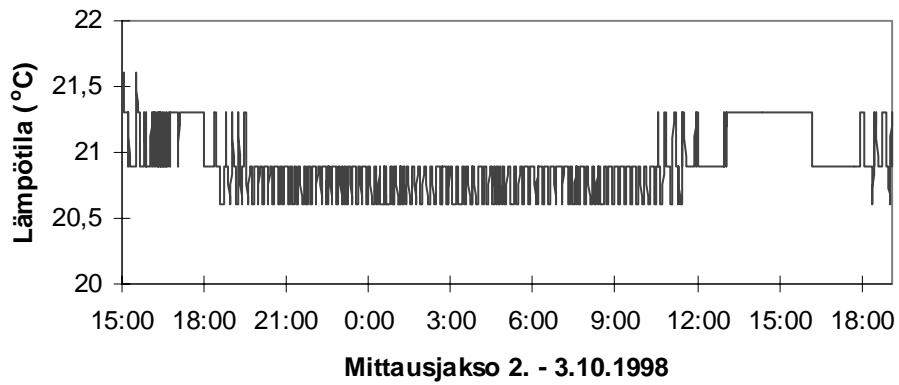
METOP-talon hajautetulla automaatiolla ohjatun ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän toimintaa seurattiin keräämällä ilmanvaihtokoneen ja huoneiden lämpötilansäädön toiminnasta kertovaa mittausdataa hieman yli vuorokauden mittaisen seurantajakson ajalta. Analogisen huonesäätimen toiminnan seuranta tapahtui käyttäen erillistä mittausjärjestelmää. Muuten mittausdatan kerääminen tapahtui LonWorks-kenttäväylän kautta suoraan järjestelmän toimintaa ohjaavilta digitaalisilta säätimiltä.

5.1 Analoginen huonesäädin

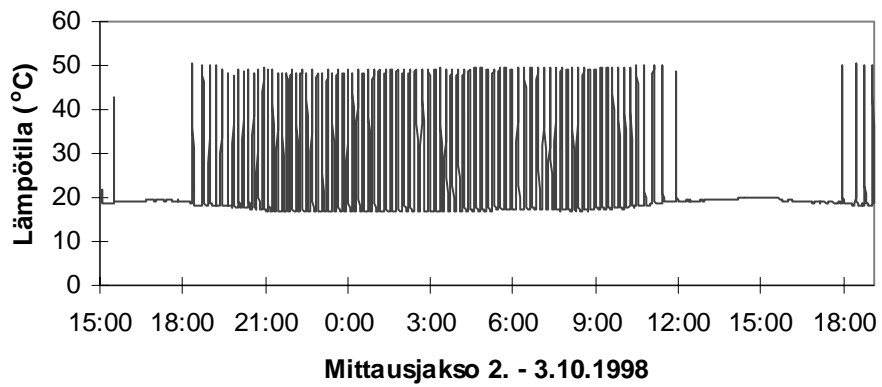
Huoneeseen 22 oli lämpötilansäätöä varten asennettu analoginen yksikkösäädin, josta ei ole mahdollista lukea automaattisesti mittausdataa. Huonekohtaisen lämpötilansäädön toiminnan seuraamiseksi mitattiin huoneesta erillisellä mittausjärjestelmällä huoneilman ja tuloilman lämpötilat hieman yli vuorokauden mittaisen seurantajakson ajalta. Tietojen tallennusväli oli yksi minuutti ja lämpötilamittausten resoluutio 0,3 °C.

Kuva 15 esittää mitattua huoneilman lämpötilaa ja kuva 16 mitattua tuloilman lämpötilaa. Huonelämpötila pysyi seurantajakson aikana noin 21 °C:n tuntumassa vaihdellen sen molemmin puolin mittausjärjestelmän lämpötilamittauksen resoluution verran. Tuloilman lämpötilasta voidaan päätellä, milloin huoneen tuloilmakanavassa oleva sähkölämmityslaite on säätimen ohjaamana ollut päällä.

Käytetyssä säätimessä on potentiometriasetus, josta voidaan muuttaa suurinta sallittua enimmäispoikkeamaa asetusarvosta. Säätöä voidaan tarkentaa valitsemalla mainitulle parametrille pienempi arvo, minkä seurauksena säätimen ohjaus muuttuu herkemmin.



Kuva 15. Huoneen 22 lämpötila erillisellä mittausjärjestelmällä mitattuna.

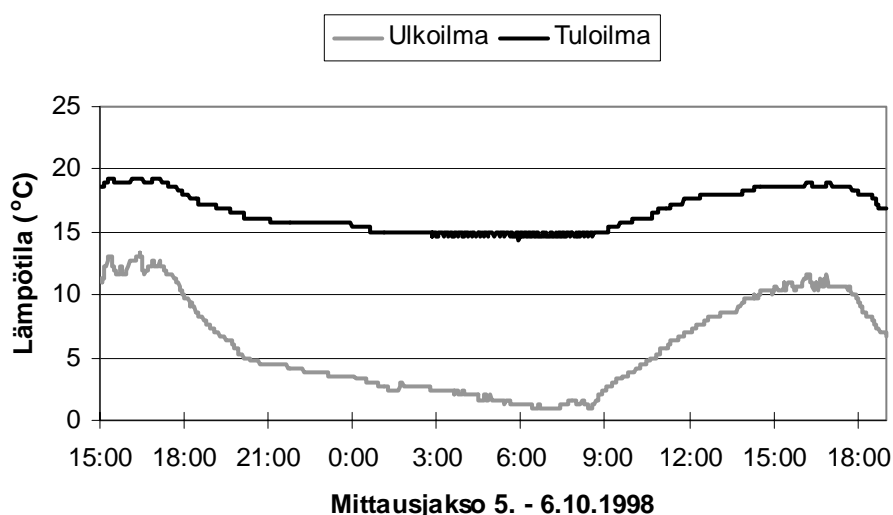


Kuva 16. Huoneen 22 tuloilman lämpötila erillisellä mittausjärjestelmällä mitattuna.

5.2 Kenttäväylään asennetut laitteet

Kenttäväylän kautta luettiin järjestelmään asennetuilta digitaalisilta säätimiltä niiden keskeiset oloarvot valvomoasemana käytettävälle mikrotietokoneelle. Ilmanvaihtokoneen säätimeltä luettiin koneen tuloilman ja ulkoilman lämpötilojen mittausravot. Huonesäätimiltä luettiin huonelämpötilojen mittausravot ja säädinten suhteelliset ohjaukset. Mittaustietoja kerättiin hieman yli vuorokauden mittaisen seurantajakson ajalta ja tietojen tallennusväli oli yksi minuutti.

Kuva 17 esittää ilmanvaihtokoneen säätimeltä luettuja tulo- ja ulkoilman mittausravot. Tuloilman lämpötilan asetusarvo seurantajakson aikana oli 15 °C. Mitattu lämpötila oli päivällä hieman korkeampi, koska tällöin pelkästään lämmöntalteenotto riitti nostamaan tuloilman lämpötilan korkeimmillaan yli 18 °C:n tasolle. Tarvittava lisälämmitys ja tuloilman lämpötilan säätö tehdään koneen sähköisellä jälkilämmityspatterilla, jota jouduttiin seurantajakson aikana tehtyjen mittausten perusteella käyttämään ainoastaan yöllä ja varhain aamulla. Kyseisenä aikana tuloilman lämpötila pysyi varsin tasaisesti asetusarvon tuntumassa.



Kuva 17. Ilmanvaihtokoneen säätimen mittaamat tuloilman ja ulkoilman lämpötilat.

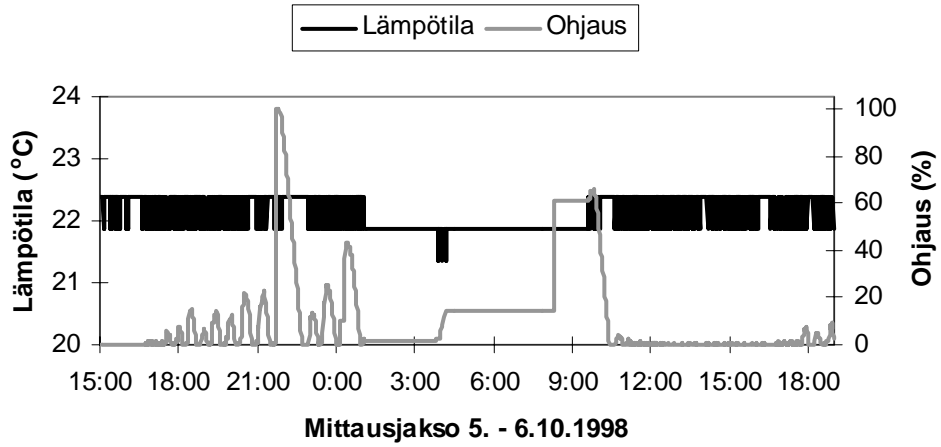
PI-säätöalgoritmin mukaan toimivia huonesäätimiä ei ollut erikseen viritetty ohjattavalle järjestelmälle, vaan sen sijaan käytettiin laitteen valmistajan tehdasetusten mukaisia oletusarvoja. Näitä olivat säätimen vahvistus - 1 000 - ja integrointi-aika - 100 s. Kunkin säätimen huonelämpötilan asetusarvo oli noin 22 °C. Lämpötilamittauksen resoluutio oli 0,5 °C luettaessa arvo säätimeltä kenttäväylän kautta.

Kuvat 18, 19 ja 20 esittävät huoneiden 21, 23 ja 24 säätimiltä luettuja oloarvoja. Kuvien perustella huonelämpötilat poikkesivat seurantajakson aikana asetusarvoistaan enemmän osan ajasta korkeintaan säätimen lämpötilamittauksen resoluution verran. Iltapäivällä lämpötila nousi lämpökuormien takia huoneessa 23 korkeimmillaan noin 23 °C:seen.

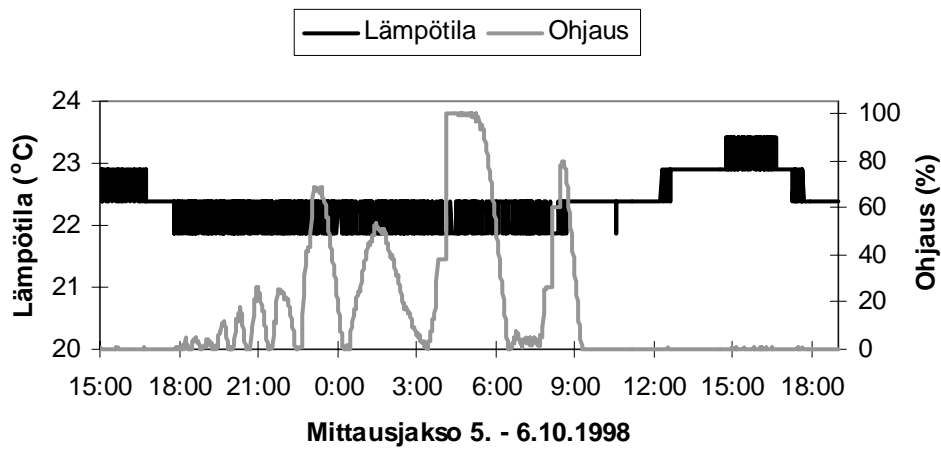
Huoneiden 21, 22 ja 23 hieman toisistaan poikkeavat oloarvot seurantajakson aikana johtuvat huoneiden erilaisista olosuhteista. Päivällä näitä olivat esimerkiksi huoneen ilmansuunta ja huoneiden erilaiset valaisimista aiheutuvat lämpökuormat. Lisäksi on syytä huomioida METOP-talon sisäiset lämpöhäviöt, sillä lämpöeristys talon ensimmäisen ja toisen kerroksen välillä ei ole samantasoinen kuin esimerkiksi ulkoseinien lämpöeristys. Huonekohtaiset lämpötilat olivat seurantamittausten aikana alhaisempia talon ensimmäisessä kerroksessa, mikä aiheutti jonkin verran lämpöhäviöitä etenkin yöllä.

Kuvat 21 ja 22 esittävät huoneen 25 ja käytävätilan 26 säätimiltä luettuja arvoja. Mitatut huonelämpötilat ovat aamuyöllä ja aamulla jääneet pysyvästi noin 0,5 °C alle asetusarvon, vaikka säädinten ohjaukset ovat vastaavana aikana olleet maksimissaan. Huoneessa 25 on säätimen ohjaus noussut maksimiinsa illan aikana ja pysynyt siinä seuraavan vuorokauden iltapäivään asti. Käytävätilan osalta on havaittavissa samantyyppinen ilmiö, mutta säätimen ohjaus on noussut maksimiinsa hieman myöhemmin ja laskenut takaisin myös hieman myöhemmin.

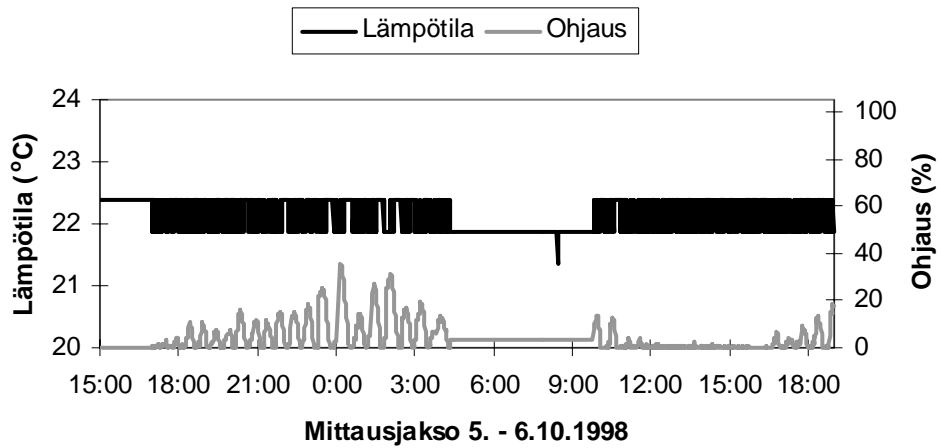
Kuvattu tilanne mainituissa huoneissa johtui siitä, että järjestelmän ilmanjakokanavisto kulki mainittujen huoneiden kautta eikä kanavia ollut lämpöeristetty. Kanavissa kulkeva huonelämpötilaa viileämpi ilma jäähdytti huoneita etenkin yöllä. Asiaan vaikuttivat ilmanvaihtokoneen ulko- ja poistoilmakanavat huoneessa 25 sekä huoneiden tuloilmakanavisto huoneessa 25 ja käytävätilassa. Lisäksi käytävätila oli varustettu vain yhdellä tuloilmalämmittimellä, mistä johtuen säätimen käytettävissä ollut lämmitysteho oli puolet toimistuhuoneiden vastaavasta.



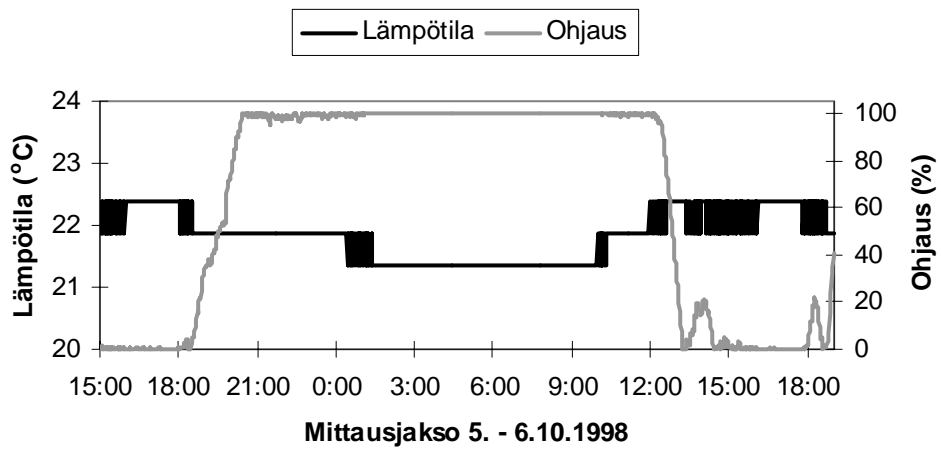
Kuva 18. Huoneen 21 säätimen mittaama huonelämpötila ja säätimen ohjaus.



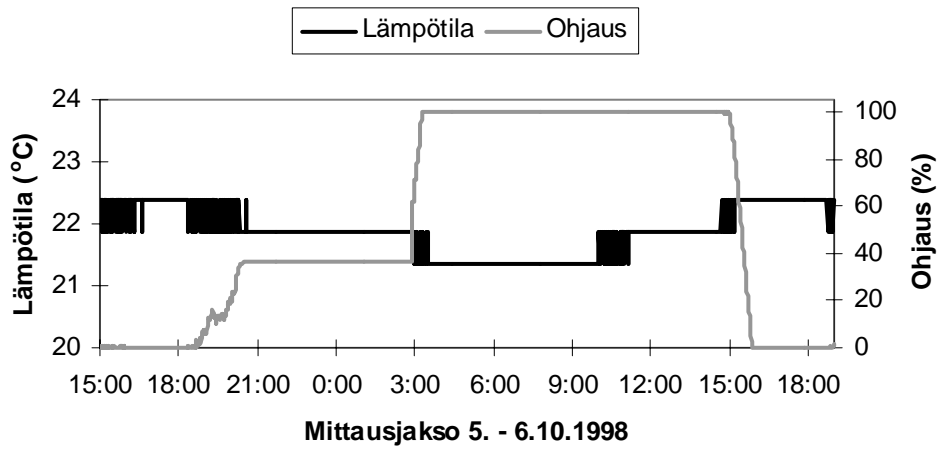
Kuva 19. Huoneen 23 säätimen mittaama huonelämpötila ja säätimen ohjaus.



Kuva 20. Huoneen 24 säätimen mittaama huonelämpötila ja säätimen ohjaus.



Kuva 21. Huoneen 25 säätimen mittaama huonelämpötila ja säätimen ohjaus.



Kuva 22. Käytävätilan 26 säätimen mittaama huonelämpötila ja säätimen ohjaus.

6 Yhteenveto

Projektissa toteutettiin hajautetulla rakennusautomaatiojärjestelmällä ohjatun ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän pilottiasennus VTT:n METOP-koetaloon Espoon Otaniemessä. Asennetun järjestelmän peruskomponentteja ovat ilmanvaihtokone, jonka toimintaa ohjataan sen omalla sulautetulla automaatiolla, sekä huonekohtaiset tuloilmalämmittimet, joiden toimintaa ohjataan huonekohtaisilla digitaalisilla säätimillä. Säätölaitteet asennettiin järjestelmän yhteiseen tiedonsiirtoverkkoon, jonka kautta tapahtuu niiden toiminnan hallinta. Tiedonsiirtoverkkoon liitettiin myös järjestelmän käyttöliittymänä toimiva mikrotietokone, jossa olevan ohjelmiston avulla voidaan seurata ilmanvaihtokoneen ja huonesäädinten toimintaa ja muuttaa niiden asetuksia.

Järjestelmän asennus ja käyttöönotto sujuivat ilman mainittavia ongelmia. Erillistä ohjelmointityötä jouduttiin tekemään ilmanvaihtokoneen automaation sovittamiseksi LonWorks-kenttäväylän kautta kommunikoivaan järjestelmään sekä järjestelmän käyttöliittymän toteutuksessa. Rakennusautomaatiolaitteiden ohjelmallinen konfigurointi ja käyttöönotto tähän tarkoitukseen kehitettyjen asennustyökalujen avulla oli varsin helppoa ja vaivatonta. Käyttöönoton jälkeen tehtyjen seurantamittausten perustella järjestelmä näytti toimivan odotusten mukaisella tavalla.

Toteutetussa järjestelmässä on yhdistetty kehittyneet matalaenergiarakentamisen LVIS-tekniset ratkaisut ja nykyaikainen hajautukseen ja avoimeen tiedonsiirtoon perustuva rakennusautomaatioteknologia. Järjestelmä on luonnostaan modulaarinen sekä LVIS- että automaatiojärjestelmätasolla. Siksi se on yksinkertainen käyttää ja ylläpitää sekä myöhemmin helposti laajennettavissa. Laitevalmistajariippumattoman standardiratkaisun käyttö järjestelmän tiedonsiirrossa mahdollistaa eri laitevalmistajien tuotteiden samanlaisen hyödyntämisen. Järjestelmä voidaan tarvittaessa liittää kaukovalvontaan puhelinverkon kautta ja myöhemmin mahdollisesti myös kiinteällä TCP/IP-verkkoyhteydellä, mikäli sellainen tullaan toteuttamaan VTT:n koetaloalueelle.

Projektissa toteutetun järjestelmän avulla on voitu testata eri valmistajien laitteista koostuvan hajautetulla automaatiolla ohjatun ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän toimivuutta käytännössä. Lisäksi projektissa on voitu testata mukana olleiden yritysten uusia markkinoille tulossa olevia tuotteita ja varmistua näin niiden toimivuudesta. Jatkossa kohdetta on mahdollista edelleen hyödyntää uusien laitteiden ja laitejärjestelmien kehityksessä ja testauksessa sekä toisaalta markkinoinnissa tämäntyyppisen järjestelmän referenssi-kohteena.

Lähdeluettelo

1. Pietarinen, P. & Saari, M. Ilmanvaihtolämmityksen hajautettu automaatio. Espoo 1997, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1859. 47 s. ISBN 951-38-5153-2 (nid.); ISBN 951-38-5154-0 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
2. Laine, J. & Saari, M. ESPI-matalaenergiapientalot. Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1924. 75 s. + liitt. 44 s. ISBN 951-38-5332-2 (nid.); ISBN 951-38-5333-0 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
3. Pietarinen, P., Honkanen, T. & Hyvärinen, J. Älykkyyden hajauttaminen LVIS-järjestelmien automaatioissa. HAJAÄLY-projektin loppuraportti. Espoo 1997, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1844. 106 s. + liitt. 6 s. ISBN 951-38-5130-2
4. Laine, J. & Saari, M. METOP, CFC-aineeton matalaenergiatoimistotalo [METOP, CFC-free low-energy office building]. Espoo 1994, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Julkaisuja 795. 58 s. + liitt. 21 s. ISBN 951-38-4503-6
5. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Osa D2. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet. Helsinki: Ympäristöministeriö, 1987. 21 s.
6. ST 701.51. Talotekniikan hajautetut tietojärjestelmät, LON-väylän kaapelointi. Espoo 1997, Sähkötieto ry, ST-kortisto. 16 s.
7. Serial LonTalk® Adapter and Serial Gateway User's Guide. Revision 9. USA 1996, Echelon Corporation.
8. LonManager® LonMaker Installation Tool User's Guide. USA 1993, Echelon Corporation.
9. LonManager® DDE Server User's Guide. Version 1.5. USA 1995, Echelon Corporation.
10. Ahonen, M. & Pietarinen, P. Lämmönjakokeskuksen hajautettu säätöjärjestelmä. Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1893. 36 s. + liitt. 3 s. ISBN 951-38-5280-6