

Satu Paiho, Sami Karjalainen, Kari Alanne,
Markku Norvasuo, Lasse Eriksson, Sanna Pöyhönen,
Jani Kaartinen & Jorma Lehtovaara

Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut

Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut

Satu Paiho, Sami Karjalainen, Kari Alanne & Markku Norvasuo
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Lasse Eriksson, Sanna Pöyhönen & Jani Kaartinen
TKK Systemiteknikan laboratorio

Jorma Lehtovaara
TKK Valaistuslaboratorio



ISBN 951-38-5951-7 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5952-5 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © VTT 2002

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

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

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

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

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 455 2408, (09) 456 4709

VTT Bygg och transport, Värmemansgränden 3, PB 1804, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 455 2408, (09) 456 4709

VTT Building and Transport, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 2408, 358 9 456 4709

Toimitus Kerttu Tirronen

Otamedia Oy, Espoo 2002

Paiho, Satu, Karjalainen, Sami, Alanne, Kari, Norvasuo, Markku, Eriksson, Lasse, Pöyhönen, Sanna, Kaartinen, Jani & Lehtovaara, Jorma. Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut [New control and energy management solutions for buildings]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2134. 279 s. + liitt. 9 s.

Avainsanat buildings, facilities management, building services, control, energy management, intelligent systems, heating, radiators, lighting, fuzzy logic, automatic tuning, HVAC, room temperatures, simulation, energy economy

Tiivistelmä

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää talotekniikkajärjestelmien säätöratkaisuja sekä rakennusten kokonaisenergianhallintamenetelmiä ja demonstroida jotain kehitettyä sovellusta koekohteessa. Kehitystyön painopiste oli asuinrakennuksissa, mutta monia ratkaisuja voidaan soveltaa myös toimisto- ja liikerakennuksissa.

Osatehtävissä käsiteltiin älykkäitä järjestelmiä rakennusten energianhallinnassa yleisesti, ilmastoinnin, lämmityksen ja valaistuksen säätöä, rakennusten kokonaisenergianhallintaa sekä tulosten demonstroitua. Kehitettiin kymmenen uutta säätö-, ohjaus- tai energianhallintaratkaisua. Lisäksi tehtiin muita laskennallisia tai kokeellisia tarkasteluja sekä yleisselvityksiä.

Aluksi selvitettiin oppivien ja älykkäiden menetelmien sovelluksia talotekniikkajärjestelmien säätöön ja rakennusten energianhallintaan. Käsiteltiin älykkäiden järjestelmien käyttöä säätimien virityksessä. Kehitettiin sumeaan logiikkaan perustuva ilmastoinnin lämmityspatterin PI-säätimen automaattinen viritin. Sumean säätimen ominaisuuksien vaikutusta säätötulokseen tarkasteltiin yksinkertaisella järjestelmällä. Todettiin, että jäsenyysfunktioiden on katettava tarkasteltava alue riittävän laajasti.

Tarkasteltiin vesipatterilämmitteisen rakennuksen lämmityksen säätöä. Kehitettiin menetelmä, joka muodostaa automaattisesti menoveden lämpötilan tai virtaaman ulkolämpötilakompensointikäyrän. Simulointitulosten mukaan kompensointikäyrä löydetään nopeasti ja huonelämpötilojen keskiarvo pysyy lähellä asetusarvoa. Kehitetty yksinkertainen menetelmä vaatii vähän laskentatehoa ja muistia. Jos menetelmä implementoitaisiin Suomen koko asuinkerrostalokannan soveltuvaan osaan, säästettäisiin vuositasolla lämmitysenergiana n. 830 GWh, sähköenergiana n. 40 GWh sekä ylläpitokustannuksissa n. 4 milj. €.

Suuri osa ilmastointikoneen lämmityspatterin energiantarpeesta asuinrakennuksissa voidaan tyydyttää radiaattoriverkoston paluueden lämmöllä, kun tuloilman lämpötilan asetusarvo pidetään likimain huonelämpötilan suuruisena.

Kehitettiin ensin älykäs ja oppiva sisälämpötilan säätöalgoritmi vakioilmavirtaiselle järjestelmälle ja siitä edelleen sovellus muuttuvilmavirtaiselle järjestelmälle. Algoritmi soveltuu erityisesti epäjatkuvasti käytössä oleviin rakennuksiin tai huoneistoihin. Algoritmin toimintaa testattiin simuloinein ja koekohteessa.

Simulointien mukaan asuinrakennuksessa tai huoneistossa voidaan talviaikaan säästää jopa viidennes sekä lämpöenergiasta että puhaltimien sähkönkulutuksessa. Energiankulutus alenee, koska kehitetyn algoritmin avulla huoneilman lämpötilaa pystytään laskemaan normaaliarvostaan ja ilmavirtaa pienentämään, kun rakennuksessa ei oleskella. Lämpötila voidaan nostaa normaalitasolle ja tuulettaa rakennus ennen kuin rakennukseen palataan. Algoritmi adaptoituu rakennuksen lämpödynamiikkaan ja oppii lämpötilan nostoon tarvittavan ajan. Asukas valitsee kytkimellä, haluaako hän saavuttaa energian enimmäissäästöt vai painottaako hän viihtyvyyttä.

Kehitettyä oppivaa algoritmia testattiin matalaenergiatalossa. Tiiviissä ja hyvin eristetyssä rakennuksessa lämpötilamuutokset ovat hitaita, minkä vuoksi algoritmillla saavutetut säästöt jäävät pienemmiksi. Kuitenkin myös matalaenergiatalon pientä energiankulutusta pystytään vielä pienentämään algoritmin avulla.

Älykkäistä sisäolojen säätöalgoritmeista laadittiin käytännön toteutusratkaisu suureen toimistokiinteistöön. Algoritmista muokattiin myös kohteeseen implementoitava Java-koodi.

Ilmanvaihtojärjestelmän energianhallinnan käytönaikaista optimointia tutkittiin matemaattisella optimointimenetelmällä. Yksitavoitteista optimointia sovellettiin ilmalämpömitteisessä järjestelmässä viihtyisyysorientoituun ja kustannusorientoituun tapaukseen. Kustannusorientoituneissa tarkasteluissa menetelmä suosi selkeästi lämmön tuontia ilmavirtaa lisäämällä. Menetelmä toimii hyvin.

Tarkasteltiin edellytyksiä toteuttaa automaattinen ilmanvaihdon ohjausmenetelmä asuinkeuhkoston keskitetyn poistoilmanvaihdon tai huoneistokohtaisen tulo- ja poistoilmanvaihdon tapauksissa. Jos huonekohtaiset ilmavirrat ovat säädettävissä säätöpellein, menetelmän avulla voidaan automaattisesti ohjata ilmanvaihtoa sitä eniten tarvitseviin kohteisiin. Tarkastelujen pohjalta johdettiin käytännössä toteutuskelpoinen ohjausratkaisu.

Valaistuksen säätöön liittyen selvitettiin keinovalaistuksen ja päivänvalon yhteissäädön peruskysymyksiä. Kehitettiin sumeaan logiikkaan perustuva integroitu keinovalon ja sälekaihtimien säätömenetelmä. Simulointitulokset eri päivänvalo-olosuhteissa osoittivat säätimen toimivan tyydyttävästi.

Tutkimuksessa käsiteltiin kokonaisenergianhallintaongelmaa esimerkkitapauksen kautta. Lisäksi selvitettiin älykkään järjestelmäintegraation piirteitä. Oleellista on, että älykäs järjestelmäintegraatio tarkoittaa muutakin kuin tiedonsiirron avoimuutta. Tapauksen mukaan älykkäällä järjestelmäintegraatiolla voidaan saavuttaa noin 10–40 %:n energiansäästö.

Todellisen mittausaineiston avulla etsittiin asuinrakennuksen kokonaisenergiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä energiantarvetta ennustavaa neuroverkkomallia tai sumeaan logiikan mallia varten. Aineistosta muodostettiin lineaarinen regressiomalli ennustamaan tehonkulutusta. Suhteellisen hyvät lämmitystehojen ennusteet oli helppo laskea jopa yksinkertaisella, lineaarisella mallilla.

Talotekniikkajärjestelmien kehittyneeseen ohjaamiseen tarvitaan luotettavaa tietoa läsnäolosta. Läsnäolosta voi saada viitteitä esimerkiksi läsnäoloantureilla, seuraamalla veden tai sähkön kulutusta tai huoneilman hiilidioksidipitoisuutta – tai joidenkin edellisten yhdistelmänä. Luotettavin tieto asukkaiden läsnäolosta saataneen turvajärjestelmästä.

Paiho, Satu, Karjalainen, Sami, Alanne, Kari, Norvasuo, Markku, Eriksson, Lasse, Pöyhönen, Sanna, Kaartinen, Jani & Lehtovaara, Jorma. Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut [New control and energy management solutions for buildings]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2134. 279 p. + app. 9 p.

Keywords buildings, facilities management, building services, control, energy management, intelligent systems, heating, radiators, lighting, fuzzy logic, automatic tuning, HVAC, room temperatures, simulation, energy economy

Abstract

The objective of this research was to develop control solutions for building services systems and total building energy management methods as well as to demonstrate some new solutions in a real building. The main focus was in residential buildings but many of the results can also be applied to non-domestic buildings.

The subtasks of the research dealt with intelligent systems in building energy management in general, control of air-conditioning, heating and lighting, building total energy management and demonstration of the results. Ten new control and energy management solutions were developed. In addition, other theoretical and experimental examinations as well as general inspections were made.

First it was found out how learning and intelligent methods have been used in controlling building services and in building energy management. Also the usage of intelligent systems in tuning of controllers was studied. A fuzzy logic based automatic tuner for a PI controller of a heating coil was developed within the project. Effects of the properties of a fuzzy controller on the control result were examined using a simple system. It was found out that the membership functions need to cover the examined area widely enough.

In the project, control of water circulated heating was examined. A method was developed that automatically forms a compensation curve between outdoor air temperature and either supply water temperature or supply water pressure. Simulations showed that the curve is found quickly and that average room temperatures stay close to the setpoint. The method developed is simple and it requires only little computation power and memory. If this method would be implemented into all suitable residential buildings in Finland, this would save about 830 GWh of heating energy, about 40 GWh of electrical energy and about 4 million € in maintenance costs annually.

The return water of a radiator network can be used as a main energy source for heating coils of air-handling units when the supply air temperature setpoint is kept close to room temperature.

In the project, an intelligent and learning room temperature control algorithm was developed for a constant air volume system and was developed further for a variable air volume system. The algorithm suits especially buildings/apartments that are used periodically. The operation of the algorithm was tested in simulations and in experimental tests in a real building.

According to the simulations, up to a fifth of both the heating energy and the electricity consumption of fans can be saved in residential buildings during winter. The energy

consumption decreases because by using the developed algorithm the room air temperature can be dropped from its normal value and the air flow rate can be reduced when there is nobody present. The temperature can again be raised to its normal level and the building ventilated before somebody returns to the building. The algorithm is able to adapt to the thermodynamics of the building and to learn the time required for the temperature increase. The occupant can prioritize maximum energy saving or comfort by using a control switch accordingly.

The algorithm was tested in a low-energy building where the energy consumption is much lower than in a normal modern building. In a tight and well-insulated building the temperature changes are slow, hence the smaller savings. However, even in the low-energy building the algorithm reduced the already low energy consumption.

In addition, an implementation solution of the intelligent indoor control algorithm for a big office complex was made. Also the equivalent Java code was programmed.

The optimisation of the energy management of a ventilation system during operation was examined using a mathematical optimisation method. Linear programming was applied in an air heated system for a comfort oriented as well as a cost oriented case. In the cost oriented case, the method clearly favoured heating by increasing the air flow. The method worked well.

It was also studied how to implement an automated ventilation control method in a residential building with centralized exhaust ventilation or with separate supply and exhaust ventilation in each apartment. If the air flows in each room can be controlled with control dampers, the method enables the ventilation to be steered into the rooms where it is needed the most. Based on the study, a practically workable control solution was presented.

Issues related to integrated control of artificial light and daylight were studied. In addition, a fuzzy logic based algorithm for integrated control of natural daylight and blinds combined was developed. Simulation results in different daylight conditions showed that the controller worked satisfactorily.

A total energy management problem was discussed. The total energy management concept was dealt with using a case study. In addition, properties of an intelligent system integration were clarified. It is essential that the intelligent system integration means more than just an open data transfer. Depending on the case, energy savings of about 10–40 % can be reached by using intelligent system integration.

Using real measurements, factors affecting the total energy consumption of a residential building were examined to be used in a neural network or a fuzzy logic model predicting the energy need. A linear regression model was formed to predict the power consumption. Relatively good predictions for heating powers were easy to calculate even with a simple linear model.

Reliable information on occupancy is needed in advanced control of building services systems. Hints can be received for example from occupancy sensors, by monitoring water or electricity consumption or carbon dioxide concentration, or by a combination of the previous. Security systems are likely to convey the most reliable information in this respect.

Alkusanat

Sekä talotekniikkajärjestelmiä että hajaályyn ja avoimiin tietoväyliin perustuvia modulaarisia automaatiolaitteita ja -järjestelmiä on kehitetty Tekesin teknologiaohjelmissa. Sen sijaan näiden väliin sijoitettavia uusia säätö- ja energianhallintaratkaisuja on kehitetty erittäin vähän. "Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut" -projektin (eli RUSE-projektin) tavoitteena oli kehittää lähinnä oppiviin ja älykkäisiin menetelmiin perustuvia talotekniikkajärjestelmien säätöratkaisuja sekä rakennusten kokonaisenergianhallintamenetelmiä ja demonstroida jotain kehitettyä sovellusta koekohteessa. Kehitystyön painopiste oli asuinrakennuksissa, mutta monia ratkaisuja voidaan soveltaa myös toimisto- ja liikerakennuksissa.

Tutkimusta rahoittivat Teknologian kehityskeskus (Tekes), Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Oy Kolmeks Ab, ABB Fläkt Oy, Vallox Oy, Lonix Oy ja Rettig Lämpö Oy. Projektin johtoryhmä koottiin rahoittajien edustajista. Sen puheenjohtajana toimi Jorma Toivonen (Oy Kolmeks Ab). Muita jäseniä olivat Juhani Yli-Olli (ABB Fläkt Oy), Olavi Suominen (Vallox Oy), Tuomas Koskenranta (Lonix Oy), Mikko Iivonen (Rettig Lämpö Oy), Jarmo J. Heinonen (Tekes) ja Markku J. Virtanen (VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka).

Tutkimuksen projektipäällikkönä toimi diplomi-insinööri Satu Paiho VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta. Lisäksi tutkimuksen toteuttamiseen osallistuivat diplomi-insinööri Sami Karjalainen, tekniikan lisensiaatti Kari Alanne ja diplomi-insinööri, arkkitehti Markku Norvasuo VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta, tekniikan ylioppilas Lasse Eriksson, diplomi-insinööri Sanna Pöyhönen ja diplomi-insinööri Jani Kaartinen TKK Systeemitekniikan laboratorion ja diplomi-insinööri Jorma Lehtovaara TKK Valaistuslaboratorion. Lisäksi loppuraportin työstämiseen on osallistunut julkaisuavustaja Auli Rautakivi VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta.

Kiitämme kaikkia tutkimukseen osallistuneita.

Espoossa 2002

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	5
1. Johdanto	13
2. Yleistä oppivien ja älykkäiden järjestelmien kehityksestä ja sovelluksesta	18
2.1 Asiantuntijajärjestelmät.....	18
2.2 Sumea logiikka	19
2.3 Neuroverkot.....	19
2.4 Bayes-verkot.....	20
2.5 Tilastolliset menetelmät	20
2.6 Älykkäiden järjestelmien sovelluksia rakennusautomaatioon.....	21
2.6.1 Huone-, huoneisto- ja laitetason sovelluksia.....	21
2.6.2 Rakennus- ja järjestelmätason sovelluksia.....	26
3. Säädön arviointimenetelmät ja älykkäiden järjestelmien käyttö säätimien virityksessä	34
3.1 Säädön arviointimenetelmät	34
3.1.1 Yleistä	34
3.1.2 Lämmitysjärjestelmän säädön arviointi	35
3.2 Älykkäät järjestelmät säätimien virityksessä.....	36
3.2.1 Itsevirittyvät ja adaptiiviset säätöalgoritmit.....	36
3.2.2 Sumea logiikka adaptiivisessa säädössä.....	39
3.2.3 Neuroverkot adaptiivisessa säädössä	41
3.3 Sumeaan logiikkaan perustuva ilmastoinnin lämmityspatterin PI-säätimen automaattinen viritin.....	43
3.3.1 Virittämisen periaate	43
3.3.2 Sumean virittimen kuvaus.....	44
3.3.3 Simuloinnein tarkasteltava tapaus.....	46
3.3.4 Simulointitulokset ja niiden analysointia	47
3.4 Sumean säätimen ominaisuuksien vaikutus säätöön	50
3.4.1 Tarkasteltava tapaus	50
3.4.2 Testipenkki ja käytetyt vakioarvot.....	53
3.4.3 Testitapaukset.....	55
3.4.4 Tulokset.....	59
3.5 Yhteenveto luvusta 3	65
4. Radiaattoriverkoston säätöön ja kytkentään liittyvät ratkaisut	67
4.1 Menoveden lämpötilan ulkolämpötilakompensointi	67
4.1.1 Nykyinen käytäntö	67
4.1.2 Kehitettävän menetelmän vaatimukset	68

4.1.3	Kehitetty menetelmä	69
4.1.4	Menetelmän testaus simuloimalla	71
4.1.5	Johtopäätökset luvusta 4.1	79
4.2	Pumpun kierrosluvun säätö	79
4.2.1	Menoveden virtaaman ulkolämpötilakompensointi	80
4.2.2	Energiankulutuksen vertailu	82
4.3	Radiaattoriverkoston paluueden lämmön hyödyntäminen ilmastointi- koneessa	83
4.3.1	Paluuedestä hyödynnettävissä oleva lämpömäärä	83
4.3.2	Järjestelmän periaate	84
4.3.3	Simulointitarkastelut	85
4.4	Kehitettyjen menetelmien kustannusvaikutukset	93
4.4.1	Yhteenveto kustannusvaikutuksista	97
4.5	Yhteenveto luvusta 4	97
5.	Älykäs sisäolojen säätö	99
5.1	Käyttäjän ja LVI-säätöjärjestelmien vuorovaikutuksesta	99
5.1.1	Käyttäjän vaikutusmahdollisuudet	99
5.1.2	Käyttäjäprofiilit ja niiden oppiminen	101
5.1.3	Useiden säätösuureiden hallinta ja kytkimet	103
5.2	Oppiva algoritmi vakioilmavirtaiseen järjestelmään	106
5.2.1	Algoritmin kuvaus	106
5.2.2	Simuloinnit	109
5.2.3	Tulokset koekohteesta	116
5.3	Oppiva algoritmi muuttuvilmavirtaiseen järjestelmään	125
5.3.1	Algoritmin kuvaus	126
5.3.2	Simuloinnit	134
5.3.3	Tulokset koekohteesta	145
5.4	Oppivan algoritmin käyttöliittymä	153
5.5	Yhteenveto luvuista 5.1–5.4	156
5.6	Vaihtoehtoinen menetelmä palautuslämmityksen aloitusajankohdan ennustamiselle	157
5.6.1	Menetelmän perusidea	158
5.6.2	Simuloinnit	159
5.6.3	Yhteenveto luvusta 5.6	161
6.	Ilmanvaihdon säätöön ja ohjaukseen liittyvät ratkaisut	163
6.1	Ilmanvaihdon optimointi eri kriteerien perusteella	163
6.1.1	Optimointimalli	163
6.1.2	Optimointimenetelmät	165
6.1.3	Tietokonesimuloinnin perusteella saatuja tuloksia	167
6.2	Huonekohtaisten ilmavirtojen automaattinen ohjaus	169
6.2.1	Toimintaperiaate	170

6.2.2	Testitapaus.....	170
6.2.3	Simulointituloksia	173
6.2.4	Yhteenveto ja jatkotutkimusideat.....	180
7.	Valaistuksen säätöön liittyvät ratkaisut	183
7.1	Keinovalaistuksen ja päivänvalon yhteissäädön peruskysymyksiä.....	183
7.1.1	Johdanto	183
7.1.2	Säädön tavoitteet	184
7.1.3	Toimistotilan päivänvalonsuunnittelun lähtökohdat.....	187
7.1.4	Sähkövalaistuksen säätö.....	189
7.1.5	Sähköinen valonohjausjärjestelmä.....	192
7.1.6	Loistelampun säätöteknologiat.....	198
7.1.7	Kaihtimen säätö.....	201
7.1.8	Säädön toteutus rakentamisprosessin osana.....	204
7.2	Integroitu valaistuksen ja kaihtimien sumea säätö	208
7.2.1	Lähtökohdat.....	208
7.2.2	Kehitetyn järjestelmän kuvaus	211
7.2.3	Sumean valonsäätimen testaaminen laajemmilla simuloinneilla.....	219
8.	Rakennuksen kokonaisenergianhallintaan liittyviä tekijöitä	226
8.1	Kokonaisenergianhallintaongelmasta.....	226
8.1.1	Yksittäisten järjestelmien toiminta.....	227
8.1.2	Keskittetyt energianhallintatoiminnot.....	228
8.2	Älykäs järjestelmäintegraatio	231
8.2.1	Ominaisuuksia.....	231
8.2.2	Saavutettavissa olevia vaikutuksia.....	232
8.2.3	Vaihtoehtoisia integrointiperiaatteita.....	236
8.3	Esimerkki kokonaisenergianhallintakonseptista	239
8.3.1	Kohteen järjestelmät.....	239
8.3.2	Kehitettyjen menetelmien soveltaminen esimerkkikohteeseen	241
8.4	Tehonkulutukseen vaikuttavat tekijät asuinrakennuksessa	245
8.4.1	Yleinen tarkastelu muuttujien välisistä riippuvuuksista	245
8.4.2	Muuttujien valinta korrelaatioanalyysillä	250
8.4.3	Tehonkulutuksen ennustaminen regressiomallilla	253
8.4.4	Yhteenveto luvusta 8.4.....	256
8.5	Läsnäolon tunnistaminen asuinrakennuksissa.....	256
8.5.1	Menetelmiä läsnäolon tunnistamiseen	257
8.5.2	Yhteenveto luvusta 8.5.....	260

9. Kootut tulokset.....	261
10. Yhteenveto	264

LIITTEET

Liite A: LVIS-2000-tyyppikerrostalon kolmio

Liite B: Kerrostaloyksiön tietoja

Liite C: Rekursiivinen pienimmän neliösumman menetelmä

1. Johdanto

Kuudessa kymmenestä yleisimmästä ongelmasta vastaanotettaessa ja tarkastettaessa uusia ja olemassa olevia rakennuksia havaittiin amerikkalaisessa tutkimuksessa liittyvän jotenkin rakennuksen säätöön ja energianhallintaan (Tseng 1998):

- virheellinen LI- ja valaistusjärjestelmien käytön ajastaminen
- sarjasäätimen lämmitys- ja jäähdytysportaiden väärä järjestys
- antureiden ja muun instrumentoinnin virheellinen kalibrointi
- optimiviihtyisyyteen ja rakennuksen energiataloudelliseen toimintaan tähtäävien säätöstrategioiden puute
- ilma- ja vesipuolen energiansäästöominaisuuksien virhetoiminnot ja
- alihyödynnetyt tietokonepohjaiset säätöjärjestelmät.

Rakennusautomaatioteollisuus ei ole johtavassa asemassa kehitettäessä tietokoneita, televiestintää tai informaatioteknologiaa, mutta sen tulisi seurata näitä alueita tiiviisti rahoittamalla sellaisia uusia teknologioita ja standardeja, jotka tuovat lisäarvoa rakennuksen järjestelmiin (Nesler 1998). Tämän mukaisesti pitäisi siirtyä ydinteknologian kehittämisestä (*miten* tehdään) sovellusten kehittämiseen (*mitä* tulisi tehdä). Tulevien rakennusautomaatiosovellusten pitäisi merkittävästi parantaa laitteiden toimintaa, ympäristön viihtyisyyttä, tilan käyttäjän tuottavuutta ja kiinteistön käyttökustannuksia. Seuraavan sukupolven sovellukset laajentavat myös rakennusautomaatiojärjestelmän roolia siten, että se sisältää yrityslaajuisen informaation integroinnin, hallinnan ja ohjauksen.

Rakennusautomaatiojärjestelmän säätö- ja energianhallintaohjelmat, kuten DDC-säätö, aikaohjelmat, jaksottaiskäyttöohjelmat, porrastetun käynnistyksen ohjelma, käynnistysajan optimointiohjelmat ja huipputehon rajoitusohjelmat, ovat yleensä melko samanlaisia eri järjestelmissä. Mutta nämä strategiat ovat 1970-luvulta ja niiden oletetaan yhä soveltuvan laitejärjestelmille, jotka on suunniteltu 1990-luvun lopulla (Nesler 1998). Siksi järjestelmiä erotellaan enemmän teknisten ominaisuuksien perusteella kuin niiden kyvyllä toteuttaa käyttäjän tarpeet kuten parantunut viihtyisyys, sisäilman laatu, energiatehokkuus ja pienet käyttökustannukset.

DDC-säätimien laskentakapasiteettia ei hyödynnetä täysimääräisesti, kun niihin implementoidaan samoja vanhoja pneumaattisia säätöstrategioita (Nesler 1998). Esimerkkeinä tästä voidaan mainita

- vakiopaine-eroanturin sijoitusongelma muuttuvilmavirtaisessa järjestelmässä
- laitoksen optimikäynnistys ei perustu rakennuksen termisen massan hyödyntämiseen ja
- lämmitys- ja jäähdytystoimintojen jatkuva vaihtelu kevättilanteessa.

Itsevirittyvät säätöalgoritmit ja virtauksen adaptiiviset säätöalgoritmit ovat esimerkkejä nykyisistä älykkäistä sovelluksista. Kuitenkin järjestelmätaso tarjoaa vielä suurempia mahdollisuuksia eri valmistajien laitteiden yhteistoimintaan ja yritystasoiseen informaation integrointiin. Rakennuksen toiminnallisuuden korkein taso voidaan saavuttaa vain tiedon ja informaation integroimisella (Nesler 1998).

Neuraaliverkkoja voidaan rakennuksissa soveltaa esimerkiksi (Kreider 1994 ja Curtiss 1997)

- ennakoimaan, miten rakennuksen pitäisi toimia verrattuna todelliseen toimintaan
- ennakoimaan energiankulutusta
- yksinkertaistamaan ja parantamaan rakennuksesta kerätyn mittaustiedon analysointia ja
- säädön parantamiseksi standardi PID-säätimien tilalle, koska LVI-prosessit ovat tyypillisesti hyvin epälineaarisia.

Sumeaa logiikkaa voidaan rakennuksissa hyödyntää esimerkiksi (Tobi & Hanafusa 1991)

- ottamalla huomioon yksilölliset tarpeet säädössä
- minimoimaan energiankulutusta siten, että lämmityksen, jäähdytyksen ja kostutuksen asetusravot määritetään kuormitustilanteita vastaaviksi ja
- robustiin lämpötilan säätöön.

C.P. Underwood (1999) on käsitellyt kirjansa “HVAC Control Systems – Modelling, Analysis and Design” viimeisissä kappaleissa rakennusautomaation kehityksen suunta- viivoja tulevaisuudessa ja älykkäiden järjestelmien – asiantuntijajärjestelmien, sumean logiikan ja neuroverkkojen – käyttöä rakennusautomaation saralla.

Underwood (1999) toteaa, että asiantuntijajärjestelmiä on sovellettu useimmiten järjestelmän perussäädön ulkopuolella. Monia asiantuntijajärjestelmiä on kehitetty rakennusautomaation suunnittelun apuvälineeksi sekä rakennusautomaatiojärjestelmien seurantaan ja diagnostiikkaan. Asiantuntijajärjestelmiä on sovellettu myös energiankulutuksen hallintaan ja tarkastamiseen. Sumean logiikan yhdistäminen yksinkertaisiin, sääntöpohjaisiin asiantuntijajärjestelmiin on Underwoodin mukaan monissa sovelluksissa ollut hyödyllistä.

Sumea logiikka matkii ihmisen päätöksentekoa ja sopii hyvin käytettäväksi sovelluksissa, joista on olemassa eräänlaista asiantuntijatietoa – peukalosääntöjä – tai joissa halutaan mallintaa ihmisen käyttäytymistä. Sumean logiikan avulla toimiva säädin ei myöskään ole läheskään yhtä herkkä järjestelmässä oleville epälineaarisuuksille kuin esimerkiksi PID-säätö. Underwoodin mukaan rakennusautomaation sovelluksissa sumealla logiikalla on usein saatu aikaan perinteisiä menetelmiä robustimpia säätäjiä. Sumeaa logiikkaa on käytetty rakennusautomaatioissa myös mallinnettaessa ihmisen mieltymyk-

siä, esimerkiksi ihmisen mukavuutta tietyn lämpötilan ja ilman kosteuden vallitessa (Hamdi & Lachiver 1998) tai visuaalisen ympäristön kokemuksessa valaistuksen säädön perustana (Dounis et al. 1995).

Underwoodin (1999) mukaan neuroverkkojen ja LI-järjestelmin ongelmien yhdistämistä tutkittiin aluksi lähinnä identifioinnin, mallintamisen ja ennustamisen kannalta. Neuroverkkoja on käytetty ennustamaan esimerkiksi energian kulutusta tai säädön kannalta hyödyllisiä parametreja. Myöhemmin neuroverkkosovellukset ovat herättäneet huomiota myös säätöteknisissä ongelmissa. Useat tutkijat ovat esimerkiksi opettaneet neuroverkkoja toimimaan kompensattoreina parantaen perinteistä takaisinkytkettyä säätöä (Curtiss et al. 1996) ja (Hepworth et al. 1994) ja neuroverkkoja on sovellettu myös prediktiiiviseen säätöön (Curtiss & Brandemuehl 1993) ja (So et al. 1995). Neuroverkkoja sovellettaessa tarvitaan usein paljon opetusdataa erilaisista tilanteista, mutta samanlainen asiantuntijatieto, jota asiantuntijajärjestelmiä tai sumeaa logiikkaa hyödynnettäessä tarvittiin, ei ole välttämätöntä. Rakennusautomaatiossa on myös tutkittu sumean logiikan ja neuroverkkojen yhdistämistä – esimerkiksi sumeaa logiikkaan perustuvan säätöjärjestelmän virittämistä neuroverkkojen avulla (So et al. 1997).

Neuroverkot ja sumea logiikka ovat oppivista järjestelmistä tunnetuimmat. Niillä voidaan hakea eri ilmiöiden välisiä riippuvuuksia sekä käsitellä epätäsmällistä tietoa. Neuroverkot ovat tunnettuja oppimiskyvystään. Sumeaa logiikkaa hyödynnettäessä säätöjärjestelmien kehitystyö nopeutuu, suunnittelu ja implementointi yksinkertaistuu, säädön toiminta paranee ja laitteistokustannukset alenevat.

Tekesin "Oppivien ja älykkäiden järjestelmien sovellukset" -teknologiaohjelmassa on tavoitteena kehittää liiketoiminnallisesti kannattavia oppivien ja älykkäiden järjestelmien sovelluksia eri toimialojen tuotteisiin ja tuotantoprosesseihin. Sovellukset ovat kuitenkin painottuneet muihin kuin taloteknisiin sovelluksiin.

LVIS-2000-tutkimusohjelmassa analysoitiin systemaattisesti lämmitys- ja ilmastointijärjestelmien säätö- ja energianhallintatapoja. Tulokseksi esitettiin lupaavimpien algoritmien vaikutus säädettävän järjestelmän energiankulutukseen. Energiankulutustietoa tarvitaan rakennusautomaation kannattavuutta arvioitaessa.

Raket-tutkimusohjelmassa kehitettiin energianhallintakonsepti, joka toimii viitekehiksenä rakennusten ylläpidon, käytön ja automaatiojärjestelmien tutkimus- ja kehitystyössä. Lisäksi ohjelmassa analysoitiin valaistus- ja ilmastointijärjestelmien säädön vaikutusta järjestelmien mitoitukseen ja energiankulutukseen tyypillisissä toimistorakennuksissa sekä tutkittiin öljykattilan säätöä. Myös ilmastoinnin, lämmityksen ja korjausrakentamisen laitejärjestelmiä kehitettiin.

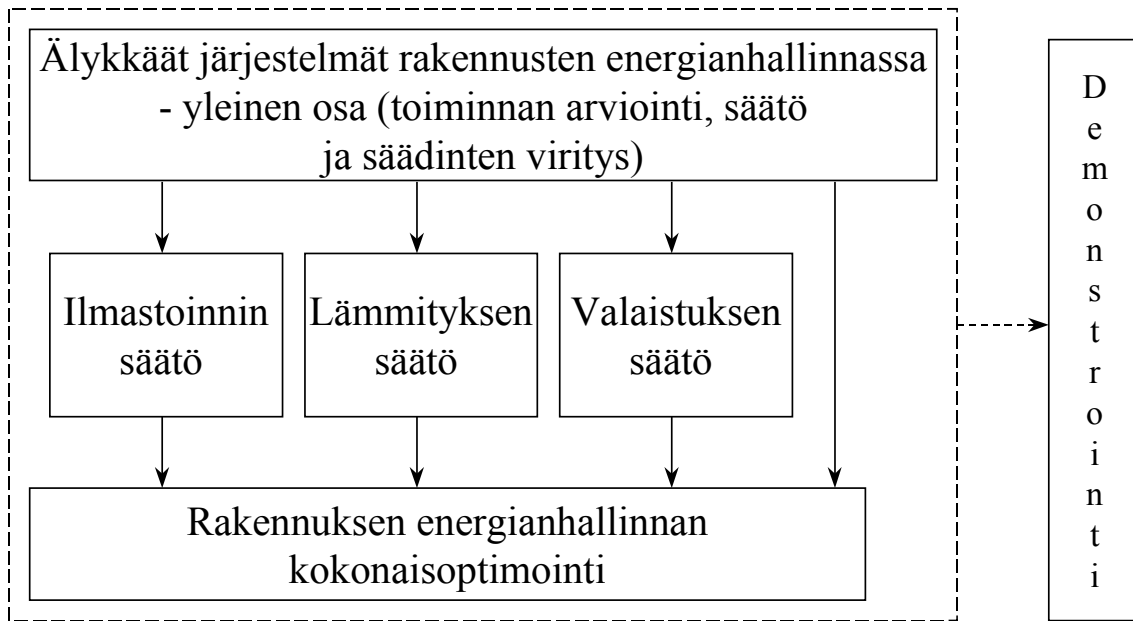
SaMBA-teknologiaohjelmassa on kehitetty rakennuksiin hajaälyyn ja avoimiin tietoväyliin perustuvia modulaarisia laitteita ja järjestelmiä sekä niihin liittyvää osaamista perustuen lähinnä LonWorks-teknologiaan. LonWorks-teknologiaan perustuvat älykkäät solmut pystyvät toimimaan itsenäisesti. Tämä mahdollistaa järjestelmien rakentamisen, uudistamisen, edelleenkehittämisen ja käyttöönoton jopa laite kerrallaan samalla, kun järjestelmien toimintavarmuus kasvaa.

Rakennuksen eri laitejärjestelmien oikea toiminta on perusedellytys rakennuksen energiataloudelliselle käytölle. Energian tehokasta käyttöä ja energiansäästöä voidaan edistää talotekniikkajärjestelmien tarpeenmukaisella säädöllä ja ohjauksella. Kun Rakettutkimusohjelmassa on kehitetty rakennusten laitetekniikkaa ja SaMBA-ohjelmassa on luotu perusteita hajautettujen automaatiojärjestelmien ja järjestelmäintegroinnin toteuttamiseksi LON-kenttäväyläpohjaisesti, näihin ratkaisuihin soveltuvien uusien säätömenetelmien kehittämiseen on selvää tarvetta. Vaikka oppivia ja älykkäitä menetelmiä on monilla tekniikan alueilla sovellettu menestyksekkäästi, niitä ei ole juurikaan hyödynnetty rakennussektorin tarpeisiin. Siten kehitystyön tulisi pohjautua juuri näihin menetelmiin.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kehittää oppiviin ja älykkäisiin menetelmiin (lähinnä sumeaan logiikkaan ja neurolaskentaan) perustuvia talotekniikkajärjestelmien säätöratkaisuja sekä rakennusten kokonaisenergianhallintamenetelmiä. Tavoitteena oli, että näillä uusilla säätö- ja energianhallintamenetelmillä rakennusten ja niiden laitejärjestelmien energiataloudellisuus paranee ja huoltohenkilöstön toiminta helpottuu. Samalla käyttäjän rooli häiriölähteenä pienenee.

Tutkimus jakautui useisiin osatehtäviin, joiden pääjaottelu on esitetty kuvassa 1. Tutkimus sisälsi yleisen osan, johon kuului esi- ja taustaselvitystyyppisiä tarkasteluja sekä muuta projektia tukevia selvityksiä älykkäiden järjestelmien hyödyntämisestä rakennusten toiminnan arvioinnissa, säädössä ja säädinten virityksessä. Tähän osioon liittyvät luvut 2 ja 3.

Lisäksi projektissa kehitettiin ratkaisuja joidenkin yksittäisten talotekniikkajärjestelmien tai -prosessien säätöön ja ohjaukseen. Ilmanvaihtoon tai ilmastointiin liittyviä ratkaisuja käsitellään luvussa 6 sekä osittain luvussa 4.3. Lämmityksen säätöön liittyviä ratkaisuja esitetään luvussa 4 ja valaistuksen säätöön liittyviä ratkaisuja luvussa 7. Älykästä sisäolojen säätöä käsitellään luvussa 5. Rakennuksen energianhallinnan kokonaisoptimointia ja siihen liittyviä tekijöitä käsitellään luvussa 8 ja osittain luvussa 4.3. Kehitettyjen ratkaisujen demonstrointi simuloinnein on esitetty kunkin ratkaisun kuvauksen yhteydessä. Lisäksi älykästä sisäolojen säätöä testattiin todellisessa rakennuksessa, mikä on kuvattu luvuissa 5.2.3 ja 5.3.3. Lukuun 9 on koottu keskeiset tulokset.



Kuva 1. Tutkimuksen pääkokonaisuudet.

2. Yleistä oppivien ja älykkäiden järjestelmien kehityksestä ja sovelluksesta

Tässä luvussa kerrotaan yleistä asiantuntijajärjestelmistä (luku 2.1), sumeasta logiikasta (luku 2.2), neuroverkoista (luku 2.3), Bayes-verkoista (luku 2.4) ja tilastollisista menetelmistä (luku 2.5). Tietoa neurolaskennan ja sumean logiikan työkaluista löytyy useista lähteistä, esim. Kärki & Karjalainen (1999) sekä Pacific Northwest National Laboratoryn selvitykset neuroverkko- ja sumean logiikan ohjelmistoista (<http://www.emsl.pnl.gov:2080/proj/neuron/neural/systems/software.html> sekä <http://www.emsl.pnl.gov:2080/proj/neuron/fuzzy/systems/software.html>)

Lisäksi tässä luvussa on esitetty kirjallisuudesta löytyneitä esimerkkejä oppivien ja älykkäiden menetelmien soveltamisesta talotekniikkajärjestelmien säätöön tai rakennusten energianhallintaan. Suurimmassa osassa esimerkkejä on sovellettu joko sumeaa logiikkaa tai neuroverkkoja (luku 2.6). Koska kaikkia esimerkkejä ei voi luokitella hyödynnetyn menetelmän perusteella, esimerkit on jaoteltu huone-, huoneisto- ja laitetason sovelluksiin (luku 2.6.1) sekä rakennus- ja järjestelmätason sovelluksiin (luku 2.6.2), vaikka tämäkään jaottelu ei ole paras mahdollinen.

2.1 Asiantuntijajärjestelmät

Asiantuntijajärjestelmä on ohjelma, joka hallitsee jonkin kapean ongelma-alueen inhimillisen tietämyksen. Tietämyskanta on yleisnimitys asiantuntijajärjestelmissä käytettyä tiedosta. Asiantuntijajärjestelmän käyttö perustuu käsiteltävän alan asiantuntijan tietämyksen hyödyntämiseen. Asiantuntijalla tarkoitetaan henkilöä, jolla on johonkin varsin suppeaan alaan liittyvä vahva tietämys ja sormituntuma käytännön ongelmien ratkaisemisessa. Tietämyskanta pyrkii tarjoamaan asiantuntijan palvelua ei-asiantuntijalle. Perustietämyskannan pystyttäminen vaatii kohdealueen kuvaamisen lisäksi sen etsimiseen tarvittavien kysymysten valinnan sekä tarvittaessa lisäämisen ja ratkaisun kuvaamisen.

Perinteisten asiantuntijajärjestelmien päättely perustuu tietämyskantaan, joka sisältää yksinkertaisia if-then-sääntöjä. Tarkkailtavan systeemin tietty tila aiheuttaa tietyn säännön aktivoitumisen. Jonkinlaisella varmuuskertoimella voidaan ilmaista, kuinka varmasti tosiasian olemassaolo tiedetään tai säännön antama johtopäätös voidaan tehdä. Sääntöjen avulla on helppo toteuttaa pienehköjä järjestelmiä, mutta ongelmia on muun muassa suuren sääntöjoukon vaikea hallittavuus ja toiminnan hidastuminen. Lisäksi tällaisen järjestelmän toiminta on monesti varsin vaikeasti hahmotettavissa, eikä se ole intuitiivisesti yhdistettävissä reaali maailmaan.

2.2 Sumea logiikka

Sumean logiikan käyttö tuo lisäarvoa perinteisille, ei-sumeille asiantuntija-järjestelmille. Asiantuntijajärjestelmät soveltuvat tavallisesti ongelmiin, joissa asiantuntija osaa sanallisesti kuvata ongelman ratkaisun. Ihmisajattelulle tyypillisen epävarman ja epätäsmällisen tiedon käsittely on kauan ollut perinteisten asiantuntijajärjestelmien heikko kohta. Esimerkiksi raja, jolloin kattilan paine on korkea, ei ihmisen mielessä ole täsmällinen, vaan paine on tietyn arvon jälkeen yhä suuremmassa määrin korkea. Sumeat joukot soveltuvat hyvin tämän tyyppisen tiedon mallintamiseen. Merkittävän osan asiantuntijajärjestelmistä voidaankin tulevaisuudessa olettaa hyödyntävän sumeaa logiikkaa tällaisen tietämyksen mallintamisessa (Isomursu et al. 1993).

Yksi sumean logiikan tuoma etu on, ettei sääntöjen tarvitse olla niin yksityiskohtaisen tarkkoja kuin perinteisissä asiantuntijajärjestelmissä. Sumean logiikan avulla sääntöjä siis voidaan yleistää kattamaan laaja joukko tapauksia. Toinen sumean lähestymistavan etu on se, että sen avulla pystytään paremmin hallitsemaan ristiriitaisuuksia sääntökannan ristiriitaisuuksia (Isomursu et al. 1993).

Perinteisiin säätömenetelmiin verrattuna sumean logiikan käyttö prosessien säädössä on antanut hyviä tuloksia erityisesti, jos säädettävä prosessi sisältää voimakkaita epälineaarisuuksia. Sumeaa logiikkaa on sovellettu sekä suoraan säätöön että esimerkiksi tavallisen PID-säätäjän säätöparametrien virittämiseen.

2.3 Neuroverkot

Sumean logiikan lisäksi älykkäisiin järjestelmiin mielletään yleensä neuroverkot. Neuroverkot eivät käsittele suoraan if-then-tyyppisiä sääntöjä, vaan muodostavat säännöt itse niille syötetyistä, tunnetuista syöttö- ja tulostustietojen yhdistelmistä. Neuroverkkojen oppimiskyky on hyvä ja niillä pystytään hyvin hallitsemaan epälineaariset tilanteet (Taipale & Jurva 1999). Neuraalilaskentaa käytetään yleensä tehtävissä, joissa mallinnettavasta kohteesta on runsaasti mittausaineistoa. Eräs neuroverkkojen haitta on se, että säännöt esitetään verkon solmujen painoarvoina, mikä esitysmuotona on ihmisen huomattavasti vaikeampi hahmottaa kuin esimerkiksi if-then-tyyppiset säännöt. Tämä voi olla ongelma esimerkiksi järjestelmää viritettäessä tai perusteltaessa päätöksen lopputulosta käyttäjälle (Isomursu et al. 1993).

Viime aikoina älykkäissä järjestelmissä ovat yleistyneet erilaiset sumean logiikan ja neuroverkkojen yhdistelmät. Neuroverkkoja on käytetty esimerkiksi sumean säädön virittämiseen. Tämä lähestymistapa on osoittautunut lupaavaksi, sillä se yhdistää toi-

saalta sumean logiikan esityksellisen selkeyden, toisaalta neuroverkkojen oppimiskyvyn (Isomursu et al. 1993).

2.4 Bayes-verkot

Bayes-verkot ovat päättelyjärjestelmiä, jotka pohjautuvat perinteiseen todennäköisyyslaskentaan, erityisesti ns. bayesilaiseen päättelyyn (Myllymäki & Tirri 1998). Tämä tarkoittaa, että kaikille mallituksen elementeille oletetaan todennäköisyysjakaumat ja valitaan sellainen malli ja mallin parametrit, jotka ovat mittausdatan huomioon ottaen todennäköisimmät. Asiantuntijoiden tietämystä käytetään hyväksi asettamalla näiden kokemuksen perusteella eri malleille ja parametreille etukäteistodennäköisyydet.

Perinteistä todennäköisyyslaskentaa voidaan hyödyntää yleisesti, mutta monesti tämä erittäin yleinen kehikko nousee ongelmaksi. Suurta joukkoa tarvittavia todennäköisyysjakaumia on hankala estimoida ja todennäköisyyksien yhdistäminen vaatii monimutkaista laskentaa. Tämän takia mallille joudutaan yleensä tekemään voimakkaita yksinkertaistuksia. On esitetty arvioita, että tällaiset yksinkertaistukset tekevät mallit hyödyttömiksi käytännössä. On kuitenkin osoittautunut, että yksinkertaistetutkin mallit ovat monissa käytännön ongelmissa tehokkaita ja toimivia. (Myllymäki & Tirri 1998).

2.5 Tilastolliset menetelmät

Oppivien ja älykkäiden järjestelmien luomisessa esiintyvät ongelmat liittyvät usein muuttujien tai mallin vääränlaiseen valintaan tai mittausaineiston vääränlaiseen muodostamiseen (Taipale & Jurva 1999). Muuttujia voidaan valita liikaa tai liian vähän kuvaamaan mallinnuksen kohdetta. Mittausaineistoa voidaan kerätä liian vähän tai liian suppealta alueelta tai sen esikäsittely voi olla vääränlaista. Nämä vaiheet kuitenkin luovat älykkäälle järjestelmälle perustan, joka määrää vahvasti, miten hyvin tai huonosti järjestelmä toimii.

Erilaisia tilastollisia menetelmiä käytetään hyväksi järjestelmän perustan luomisessa. Tekesin suorittamassa kyselyssä suosituin muuttujien valinnassa käytetty menetelmä oli pääkomponenttianalyysi (PCA) (Taipale & Jurva 1999). Saman tutkimuksen mukaan on mahdollista käyttää valitettavan harvoin mittausaineiston muodostamisessa kunnollista koesuunnittelua. Kuitenkin on hyvä muistaa, että “kehiteltävä systeemi on korkeintaan niin hyvä kuin data, jolle se perustuu” (Anon 1994a) ja että “dataan ei voi matemaattisin menetelmin lisätä informaatiota, joka siitä puuttuu” (Pudil & Novovicová 1998).

2.6 Älykkäiden järjestelmien sovelluksia rakennusautomaatioon

2.6.1 Huone-, huoneisto- ja laitetason sovelluksia

Käyttäjien toiminnasta oppivan älykkään huonetermostaatin arkkitehtuuri

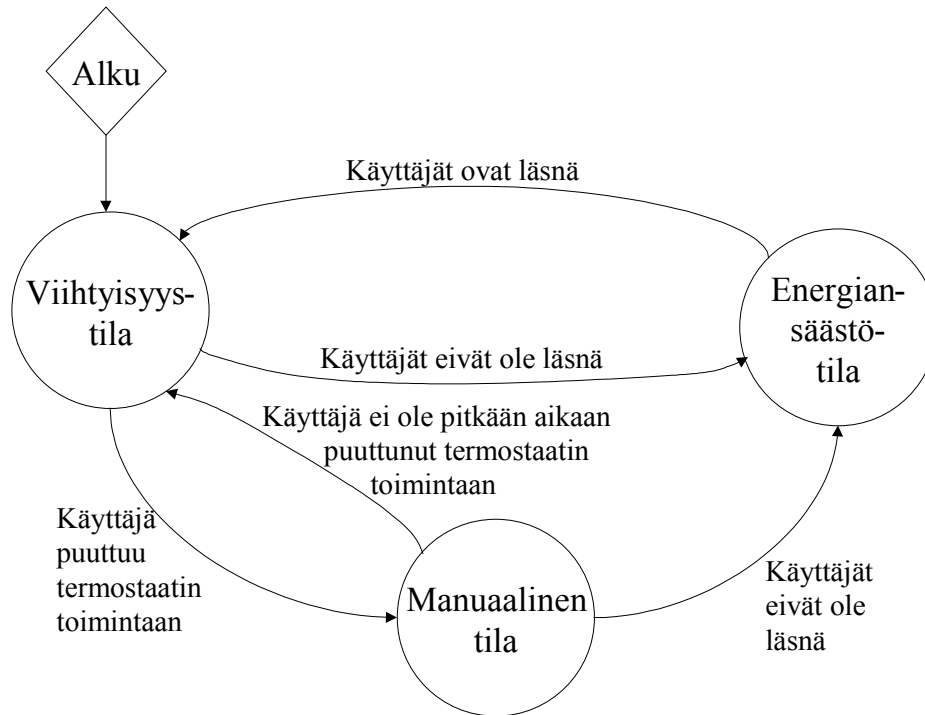
Boisvert & Rubio (1999) esittelevät älykkään huonetermostaatin, joka oppii käyttäjien toiminnasta ja heidän ympäristöstään sekä säätää sisälämpötilaa säilyttääkseen käyttäjän määrittelemän viihtyisyystason. Siten termostaatti vähentää käyttäjän tarvetta puuttua termostaatin toimintaan.

Ideaalisen huonetermostaatin suunnittelutavoitteita ovat

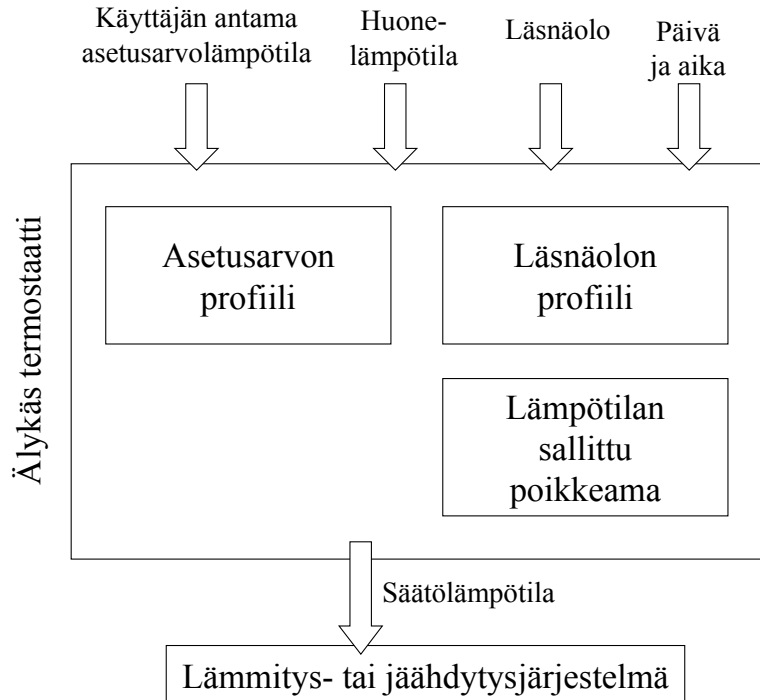
- viihtyisyyden maksimointi
- energiankulutuksen minimointi tinkimättä viihtyisyystasosta
- käyttäjän ja termostaatin vuorovaikutuksen minimointi
- yksinkertainen käyttöliittymä ja
- asennointi- ja käyttökustannusten minimointi (esim. käytetään olemassa olevaa lämmitys- tai jäähdytysjärjestelmää).

Kuvassa 2 on esitetty älykkään termostaatin mahdolliset toimintatilat. Viihtyisyystilassa lämpötilan asetusarvo määritetään automaattisesti termostaatilla perustuen asetusarvon historiatietoon, joka on opittu käyttäjiltä. Energiansäästötilassa käyttäjät eivät ole läsnä, jolloin voidaan pienentää asetusarvoa energiansäästämiseksi. Manuaalisessa tilassa termostaatti pyrkii saavuttamaan käyttäjän antaman huonelämpötilan asetusarvon.

Kuvassa 3 esitetään termostaatin input- ja output-tiedot sekä laskentamoduulit. Termostaatin ulostulona on säätölämpötila, joka on verrannollinen sisälämpötilan asetusarvoon. Periaatteessa kyseessä on se teho, joka on tuotettava lämmitys- tai jäähdytysjärjestelmällä tavoiteltavan sisälämpötilan saavuttamiseksi.



Kuva 2. Termostaatin mahdolliset toimintatilat.



Kuva 3. Älykkään termostaatin rakenne.

Tunnittaisen sähkönkulutuksen ennakointi neuroverkkosovelluksella perustuen käyttötietoon

Kreider et al. (1997) kehittivät hotellin konferenssikeskukselle sähkönkulutuksen neuroverkkomallin noin sadan neuroverkon opetuskerran perusteella. Neuroverkko opetettiin tunnittaisella läsnäolo- ja sähkönkulutustiedolla, jota oli mitattu vuoden ajalta. Ympäristöstään eristetyn konferenssikeskuksen tapauksessa pelkkä käyttötieto riitti ennakoimaan sähkönkulutusta riittävän tarkasti LI-järjestelmän uusimistarpeen arvioimista varten. Tulos poikkeaa merkittävästi muista tutkimuksista, joissa on hyödynnetty neuroverkoja rakennuksen energiankulutuksen ennakoimiseen. Aikaisemmissa tutkimuksissa säätieto ja erilaiset tekniset parametrit ovat olleet keskeisiä neuroverkon syötteitä.

Luonnollisen ja pakotetun ilmanvaihdon yhdistetty älykäs säätö

Sutherland et al. (1999) ovat EU:n Joule III -ohjelman BUILTECH-projektissa kehittäneet ilmanvaihdon sumeita säätöstrategioita. Tarkasteltuja tapauksia olivat pelkkä pakotettu ilmanvaihto, luonnollinen ilmanvaihto sumealla säädöllä, yhdistetty luonnollinen ja pakotettu ilmanvaihto sumealla säädöllä sekä lämpö- ja visuaalisen viihtyisyyden sekä sisäilman laadun yhdistetty sumea säätö. Simuloinneilla todettiin, että luonnollisen ja pakotetun ilmanvaihdon yhdistetty sumea säätö parantaa ilmanvaihdon toimintaa verrattuna pelkkään luonnollisen ilmanvaihdon sumeaan säätöön. Kuitenkin säätöä pitää vielä parantaa joko muuttamalla sääntökantoja tai adaptiivisella järjestelmällä.

Optimointimenetelmän avulla kehitetty, itsevirittyvä PI-säädin

Seem (1997) kehittää optimointimenetelmän avulla PI-säätimen, joka asettaa automaattisesti viritysparametrit, vahvistuksen ja integrointiajan takaisinkytkentätilanteessa. Säätimen avulla voidaan parantaa PI-säätöjärjestelmiä, jotka ovat alttiita oskillaatioille. Säätimen vahvoja puolia ovat helppokäyttöisyys sekä pienet laskennalliset ja muistivaahtimukset. Sovelluskohteina mainitaan julkiset rakennukset. Kenttätutkimuksia on tehty sovelluksista urheiluhallin lämmitysjärjestelmään, teknillisen opiston ilmastointijärjestelmän jäähdytyspatterin säätöön ja tavaratalon ilmastointijärjestelmän painesäätöön.

Oppiva neuroverkko ja PI-säädin sovellettuna lämmityspatteriin

Anderson et al. (1997) vertailevat artikkelissaan ilmastoinnin lämmityspatterin tavallista PI-säädintä ja neuroverkon avulla "trimmattua" PI-säädintä keskenään. Tarkasteltavassa tapauksessa neuroverkon opettaminen tähtää seuraaviin päämääriin:

- PI-säätimen tasapainotilan ulostulon ennustaminen ja
- erosuureiden summan minimoiminen tarkasteluajanjaksolla (integraali).

Vaikka PI-säädin suoriutuu säätötehtävästä hyvin, julkaisun mukaan opetetun neuroverkon avulla suorituskykyä saadaan vielä paremmaksi.

Sumeaan logiikkaan perustuva lämmönvaihtimen adaptiivinen, ennakoiva säätö

Fischer et al. (1998) soveltavat sumeaa malliin perustuvaa ennakoivaa säädintä teollisuusmittakaavaisen vesi-ilma-ristivirtalämmönsiirtimen lämpötilan säätöön. Tutkimuksessa osoitetaan, kuinka Takagi-Sugeno-tyyppistä sumeaa mallia voidaan soveltaa epälineaarisuuden tunnistamiseen mittausdatasta. Malli antaa suuntaviivat asianmukaisten ohjaussignaalien generoinnille. Sumean mallin käytönaikaista adaptaatiota varten käytetään rekursiivista pienimmän neliösumman menetelmää.

Sumeaa logiikkaa hyödyntävä kaihdinten säädin

DELTA-projektin (Bauer et al. 1995) tavoitteena oli kehittää sumeaa logiikkaan pohjautuva kaihtimien säädin, joka huomioi valaistuksen, lämpöviihtyvyyden ja energiankulutuksen optimoinnin sekä antaa sijaa käyttäjän toiveille. Säätimen vaatimat algoritmit luotiin ja simuloitiin tietokoneen avulla ja lopuksi tehtiin kenttätutkimukset koerakennuksessa. Kokeelliset tulokset osoittivat, että kehitetty säädin kykeni hyvin vastaamaan käyttäjien odotuksiin. Tärkeäksi seikaksi osoittautui käyttäjän mahdollisuus valita itse kaihtimien asento.

Sumean logiikan ja karkeiden joukkojen teorian vertailu lämmityksen ja kosteuspitoisuuden säädössä todellisessa ympäristössä

Arima et al. (1995) ovat tutkineet lämpötilan ja kosteuspitoisuuden säätöä yhden huoneen kokoisessa testiympäristössä sekä sumeaa logiikkaa että karkeiden joukkojen teorian (*rough set theory*) avulla. Lämpötilaa säädetään kuumavesivirtauksella ja kosteuspitoisuutta avaamalla ja sulkemalla kosteuttajaa.

Säädettäessä lämpötilaa on sisäänmenomuuttujien sumeudessa käytetty seitsemää kolmiomaista jäsenyysfunktioita ja ulostulomuuttujien sumeudessa yksikköfunktioita. Sumeaan päättelyyn on käytetty Mamdani-tyyppistä päättelyä ja sumea päättelytulos on selkeytetty painopistemethodella. Päättelysäännöt on määritelty erikseen kosteuspitoisuuden ja lämpötilan säätöön.

Karkeiden joukkojen teoria on matemaattinen teoria päättelyyn epämääräisissä tilanteissa kuten sumea logiikkakin, mutta karkeiden joukkojen teoria käyttää datan esitykseen tavallisia joukkoja (*crisp set*) toisin kuin sumea päättely, eli muuttuja voi tietyllä suurusalueella kuulua vain yhteen joukkoon kerrallaan jäsenyysasteella 1. Sovelluksessa

ulostulomuuttujien jäsenyysfunktiot ja päättelysäännöt olivat samat kuin sumeaa logiikkaa hyödynnettäessä.

Sumeaan logiikkaan perustuva säätö antoi parempia tuloksia sekä lämpötilaa että kosteuspitoisuutta ohjattaessa, mutta eri menetelmien välinen ero oli äärimmäisen pieni. Tutkijoiden mielestä sekä sumea logiikka että karkeiden joukkojen teoria tarjoavat varheen otettavan vaihtoehdon LI-järjestelmien säätöön.

LI-järjestelmän adaptiivinen, sumea säätö

Piao et al. (1998) ovat tutkineet adaptiivista, sumeaa säätöä LI-järjestelmään. Sumea säätö LI-järjestelmässä on koettu hyväksi vaihtoehdoksi PID-säätimeen verrattuna järjestelmän voimakkaan epälineaarisuuden vuoksi ja myös itsevirittyvään säätöön verrattuna, koska itsevirittyvässä säädössä tarvitaan koko järjestelmän mallin rakenteen identifioimista ja reaaliaikaista parametrien identifioimista. Sumean säätimen rakentamisessa ongelmia ovat kuitenkin päättelysääntöjen muodostaminen ja jäsenyysfunktioiden muodon identifiointi, mikäli sopivaa asiantuntijatietoa ei ole saatavilla. Näiden ongelmien ratkaisuksi tutkijat ovat ehdottaneet adaptiivista säätömenetelmää, joka perustuu sumeaan liukuvan moodin säätöön (*fuzzy sliding mode control*).

Simuloinneissa PID-säätöä, PID-muotoista sumeaa säätäjää ja kehitettyä adaptiivista sumeaa säätäjää on verrattu. Molemmat sumeat säätäjät ovat ylivoimaisia PID-säätäjään verrattuna ja adaptiivisella säätäjällä saadaan vielä hieman parempi tulos.

Sumea LI-järjestelmän säätö perustuen ihmisen lämpöaistimukseen

Yleensä LI-järjestelmässä pyritään säätämään lämpötilaa, kosteuspitoisuutta ym., mutta Hamdi ja Lachiver (1998) ovat tutkineet säädön perustana ihmisen mukavuustasoa – säädön tarkoitus ei siis ole pitää yllä vakiolämpötilaa tai vakiokosteuspitoisuutta vaan rakennuksen vakiomukavuutta. Ihmisen aistimusta on mallinnettu sumealla logiikalla. Simulointitulokset näyttävät, että ehdotetulla säätöstrategialla saavutetaan suurempi mukavuustaso alhaisemmilla kustannuksilla kuin termostaattisella säädöllä.

Neuroverkkoihin perustuva epälineaarisen LI-järjestelmän säätö

Hepworth ja Dexter (1994) ovat tutkineet epälineaarisen LI-järjestelmän säätöä neuroverkkojen avulla. He perustelevat neuroverkkojen käyttöä sillä, että perinteisillä lineaarisilla menetelmillä on vaikea hallita epälineaarista systeemiä ja niitä on vaikea saada adaptoitumaan pitkällä aikavälillä tapahtuviin muutoksiin järjestelmän toiminnassa. Neuroverkkoihin perustuvalla säädöllä epälineaarisuuksia voidaan hallita ja ne tarjoavat mahdollisuuden on-line-adaptoitumiseen. Ehdotetulla säätömekanismilla vältetään kui-

tenkin epästabiilisuusongelmat, joita voi esiintyä, kun neuroverkko on sisällytetty takaisinkytkentäsilmaukseen. Säätoimenetelmä on testattu virtasäädetyllä lämmittimellä ilmanvaihtojärjestelmässä Yhdistyneen kuningaskunnan rakennustutkimuslaitoksessa (U.K. Building Research Establishment). Ehdotettu menetelmä on todettu paremmaksi kuin perinteinen PI-säättäjä. Tutkijat mainitsevat kuitenkin, että referenssimallin tai radial basis -muotoisten aktivointifunktioiden keskuksien väärä valinta voi aiheuttaa huomattavia säätövirheitä.

PI-muotoisen neuraalisäätimen sovellus rakennusautomaatioon

Fargus ja Chapman (1998) ovat tutkineet PI-muotoista, neuroverkkoihin perustuvaa LI-järjestelmän säättäjää. Tutkijoiden mukaan järjestelmän epälineaarinen luonne hidastaa perinteisten säättäjien toimintaa. Siksi he ehdottavat neuroverkkoihin perustuvaa PI-tyyppistä säätöä. Tämä sisältää takaisinkytketyn suhdessäädön ja hajautettuna integraattorina toimivan feed-forward-neuroverkon. Neuroverkko-osuus pystyy myös järjestelmän käänteismallin (inverse model) on-line-identifiointiin edellyttäen, että yksikäsitteinen ratkaisu on olemassa. Neuroverkossa käytetään radial basis -tyyppisiä aktivointifunktioita.

Koska säädettävästä systeemistä ei ole etukäteistietoa, tulee neuroverkon painot initialisoida nolnaan. Tämä johtaa kuitenkin pitkään oppimisaikaan, ja neuroverkkopohjainen säätöratkaisu on aluksi huonompi kuin tavallinen PI-säättäjä. Siksi säätöön otetaan mukaan apuintegraattori, jota käytetään oppimisaikana eräänlaisena opettajana, jolta neuroverkko oppii off-line. Kun neuroverkko antaa tarpeeksi hyvän ennusteen integroinnille, se otetaan käyttöön apuintegraattorin sijasta. Tällainen lähestymistapa johtaa kaksiosaiseen säätöstrategiaan, jossa apuintegraattoria käytetään toiminta-alueilla, joilla neuroverkko ei vielä ole oppinut järjestelmän mallia, ja neuroverkkosäädintä käytetään alueilla, joilla identifioitu malli toimii. Tehtyjen kokeiden perusteella vaihto apuintegraattorin ja neuroverkon välillä toimii sujuvasti.

2.6.2 Rakennus- ja järjestelmätason sovelluksia

Rakennuksen sähkökulutuksen ennakointi

Gibson & Kraft (1993) kehittivät neuroverkkosovelluksen rakennuksen sähkötehon ennakointiin, jotta toimistorakennuksen käyttö- ja huoltohenkilöstö voisi varautua sähkötariffien tunnittaiseen vaihteluun jäädytysjärjestelmän toimintaa optimoimalla.

Neuroverkko käsitti 13 syötettä (inputia), 24 neuronaa ja 18 vastetta (outputia). Syötteistä 8 liittyi kylmän varastointijärjestelmän toimintatilan kuvaamiseen ja loput viisi antoi-

vat tietoa ulkoilmaolosuhteista ja muusta sähkötehontarpeesta. Vasteista 12 liittyi kylmän varastointijärjestelmään ja sen komponentteihin (lämpötiloja, virtauksia, sähkötehoja jne.), loput kuusi liittyivät sisälämpötilaan, rakennuksen kuormiin sekä varastointi- ja jäähdytysjärjestelmiin. Verkon opetukseen käytettiin 20 päivän tietoja jäähdytyskaudelta. Neuroverkko oli tyypiltään backpropagation.

Jatkuvuustilassa ja sähkön huipputehontarpeen aikana neuroverkko ennakoi hyvin sähkötehontarvetta kyseisessä rakennuksessa. Ennakointitulos huononi, kun kyseessä oli kylmä tai kuuma päivä. Kuitenkin ennakointi parani, kun hyödynnettiin myös tietoa muusta sähkönkulutuksesta.

Rakennuksen energian käytön ennustaminen sumeaa logiikkaan perustuvalla menetelmällä

Kajl et al. (1995) ovat tutkineet asuinrakennuksen energian käytön ennustamista sumean logiikan avulla. Heillä on ollut käytössään Lawrence Berkeley Laboratoryn kehittämä DOE-2-ohjelma, joka on kehitetty erityisesti LI-järjestelmien simulointiin. Ohjelman avulla tutkijat ovat keränneet tietoa säästä sekä rakennukseen tulevista ja rakennuksesta lähtevistä lämpövirroista tunti tunnilta yhden vuoden ajalta. Datan perusteella he ovat muodostaneet kutakin lämpövirtaa kuvaavien sääntöjen joukon. Esimerkiksi:

*JOS auringon säteily on suuri
JA vuodenaika on talvi
JA kello on 14.00
NIIN auringosta aiheutuva lämpö on hyvin suuri,*

tai:

*JOS auringon säteily on suuri
JA vuodenaika on talvi
JA kello on 14.00
JA tuulen nopeus on hyvin suuri
NIIN ylimääräinen lämpöhävikki on hyvin suuri.*

Koko systeemin kuvaamiseen sääntöjä tarvittiin huomattava määrä. Sääntöjä käytettiin hyväksi sumeassa päättelyssä, jonka avulla kukin lämpövirran komponentti ennustettiin ulkoisten muuttujien perusteella. Lopullinen energian kulutuksen ennuste saatiin laske-
malla kaikki lämpövirrat yhteen.

Sumeaa logiikkaa käyttäessä tässä sovelluksessa Kajl et al. (1995) perustelivat sillä, että kyseessä on niin monimutkainen systeemi, ettei sille ole olemassa tarkkaa mallia. Karkeita sääntöjä muodostamalla ja sumeaa logiikkaa käyttämällä saatiin kuitenkin hyviä

tuloksia. Simuloidun energian kulutuksen ja ennusteen välinen ero oli testatun viikon aikana varsin pieni. Suurimmat ennustevirheet 168 tuntia kestäneen koejakson aikana olivat noin 0,5 kW.

Sumeaan logiikkaan perustuvan sisäilmastonhallintajärjestelmän suunnittelu

Dounis et al. (1995) esittelevät sumeaan logiikkaan perustuvan järjestelmän, jota voidaan käyttää sisäilmaston hallintaan. Tällainen järjestelmä ei vaadi rakennuksen tarkkaa matemaattista mallintamista. Keskeisinä sisäänmenomuuttujina ovat valaistus ja lämpöviihtyvyys, jotka ilmaistaan indeksilukuina (esim. PMV-luku). Ulostuloina ovat lämmityksen, jäähdytyksen, tuuletusikkunan, keinovalaistuksen ja sälekaihtimien ohjaukset. Julkaisussa määritellään tapaukselle sumea sääntökanta ja järjestelmän toimintaa arvioidaan simulaatioiden avulla. Tuloksena todetaan, että ratkaisu on edullinen ja pitää hyvin yllä lämpöviihtyvyyttä.

Adaptiivinen pientalon lämmityksen säädin

Mozer et al. (1997) esittelevät pientalon lämmitysjärjestelmän (lähinnä kattilan) adaptiivisen säätimen, joka optimaalisesti kytkee lämmitintä päälle ja pois päältä. Säädessä otetaan huomioon sekä viihtyisyys että energiakustannukset. Lämmitystarpeen määrittämisessä otetaan huomioon rakennuksen ennakoitu käyttöprofiili sekä rakennuksen ja lämmittimen terminen vaste. Simulointien perusteella järjestelmällä saavutetaan alhaisemmat käyttökustannukset kuin perinteisellä säätöjärjestelmällä.

PMV-pohjainen junailmastointi

Funakoshi et al. (1995) kehittivät järjestelmän, joka säätää junan sisälämpötilaa PMV-lämpöviihtyvyysindeksin mukaan. Keskimääräistä säteilylämpötilaa, ilman kosteutta ja ulkolämpötilaa käytettiin määrittämään lämpötilan asetusarvo, jolla PMV-luku saavuttaa nollan (neutraali lämpöaistimus). Sumeaan logiikkaan perustuva säädin käyttää sisäänmenoinaan tätä asetusarvoa ja mitattua sisälämpötilaa, päättelee lämpökuorman ja tuottaa ulostulosignaalina jäähdytyslaitteiston kompressorin ohjauksen. Simulointi osoitti sumean säädön olevan tavanomaista PI-säätöä stabiilimpi.

Energianhallinta keskitetyissä LVI-järjestelmissä neuroverkkoja soveltaen

Curtiss et al. (1994) tarkastelee neurolaskennan soveltamista LVI-järjestelmien energiankulutuksen optimointiin. Taustalla on tarve ennustaa energiankulutusta eri tilanteissa. Neuromallin sisäänmenomuuttujina ovat sääolot, sisäiset kuormitukset ja asetusarvot yksittäisille prosesseille. Malli pyrkii etsimään asetusarvoja, jotka minimoivat energiankulutuksen tinkimättä silti viihtyvyydestä.

Kaukolämmitys- ja -jäähdytysjärjestelmän hallintayksikön kehittäminen

Iwasaki et al. (1998) kuvailevat kaukolämmityksen ja -jäähdytyksen käytönaikaisen kuormituksen ennustamista neurolaskennan menetelmien avulla. Ennustaminen on tarpeen, jotta pystyttäisiin mahdollisimman tehokkaasti hyödyntämään rakennuksiin eri aikoina varastoitunutta lämpöä. Hallintajärjestelmä koostuu kahdesta lohkoista. Toinen lohkoista ennustaa tunnittaiset kuormitukset, toinen etsii menneisyyden tiedoista samankaltaiset päivät, jotta kuormitusten ennustaminen olisi mahdollista.

Hallintajärjestelmä rakennusten keskusjäähdytysjärjestelmien säädön optimointiin

Gibson (1997) esittelee järjestelmän, joka on tarkoitettu rakennustason energianhallintaan ja säädön optimointiin. Julkaisussa demonstroidaan PC-pohjaista säädintä, jolla pystytään optimaalisesti ratkaisemaan, milloin jäähdytysjärjestelmän käyttäminen on kannattavaa. Järjestelmä perustuu kahteen älykkääseen menetelmään: neurolaskentaan ja geneettiseen algoritmiin. Neuraalilaskennan keinoin mallinnetaan rakennuksen dynamiikka, geneettistä algoritmia käytetään itse optimoinnissa. Lisäksi Gibson selvittää, kuinka nämä menetelmät integroidaan toimivaksi kokonaisuudeksi.

Asiantuntijajärjestelmä ilmastointilaitoksessa

Ling et al. (1994) kehittivät sumeaan logiikkaan pohjautuvan hallintajärjestelmän, joka säätää lämpötilan asetusarvoa pitäen sen halutulla viihtyvyysalueella. Kehityksen lähtökohtana oli ennakoiva lähestymistapa. Idea perustuu laitoksesta saataviin tietoihin ja sääntöpohjaiseen ohjaukseen, joka optimoi säädön toimintaa. Säädin hyödyntää prosessin yksinkertaista mallia, jonka parametrit ovat helposti suhteutettavissa toimintaolosuhteisiin. Malliin sisällytetään myös varmuuskertoimet, joilla otetaan huomioon primaarin tiedon epävarmuustekijät ja epälineaarisuudet. Julkaisussa todetaan, että kehitetyn järjestelmän etuna PI-säätimeen verrattuna on laitoksen käyttökustannusten aleneminen.

Sumea, ennakoiva säätö sovellettuna ilmastointijärjestelmään

Sousa et al. (1997) esittelevät epälineaarisen, prediktiivisen säätömenetelmän, jossa hyödynnetään prosessin sumeaa mallia. Sumeana mallina on ns. Takagi-Sugeno-malli, joka toimii ennustajana mallipohjaisessa prediktiivisessä säätimessä. Menetelmää sovelletaan ilmastointijärjestelmän lämpötilansäätöön ja tuloksena todetaan, että kyseinen menetelmä vaatii vähemmän laskutoimituksia ja saavuttaa paremmat tulokset kuin tavallinen, prediktiivisen säädön algoritmi.

Optimisäätö rakennuksen lämmönvarastointikykyä hyödyntävään LVI-järjestelmään

Kintner-Meyer et al. (1995) analysoivat tutkimuksessaan kylmän ja lämmön varastoitumista rakennukseen ja etsivät keinoa säätää LVI-järjestelmiä optimaalisesti siten, että nämä kylmä- ja lämpövarastot voidaan hyödyntää parhaalla mahdollisella tavalla. Tutkimuksessa todetaan, että merkittäviä säästöjä saadaan aikaan esijäähdyttämällä rakennusta aikana, jolloin sähkön hinta on alhainen (yöjäähdytys).

Epäjatkuvasti miehitetyn rakennuksen lämmönsäätö käyttäen klassillista ja sumeaa lähestymistapaa

Fraisse et al. (1997) kuvailevat artikkelin alussa yleisellä tasolla rakennuksen lämpötilansäädön pääperiaatteita ja perusteita sumean logiikan soveltamisesta tämän ongelman ratkaisussa. Julkaisussa esitellään lisäksi kaksi uutta simulointimallia. Toinen näistä perustuu sähköanalogiaan, jonka avulla mallinnetaan rakennusta yksinkertaisesti. Toinen simuloi sumeaa säädintä, joka ratkaisee lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötilan. Tarkastelussa otetaan huomioon rakennuksen terminen tila, ulkolämpötila ja aurinгон säteilylämpökuormitus. Julkaisussa vertaillaan kehitettyä säädintyyppiä ja vastaavaa perinteistä säädintä. Todetaan, että sumea säädin pitää lämpötilan paremmin asetuksissaan ja on myös tarkempi käynnistysajan optimoinnissa.

Integroitu valaistus- ja LVI- automaatiostrategia kaupalliseen rakennukseen

Lee & Selkowitz (1995) tarkastelevat säätöstrategioita järjestelmälle, jonka tehtävänä on vähentää sähkönkulutusta sovittamalla valaistus ja lämmitys vastaamaan tilanteen vaatimia olosuhteita (päivänvalo, auringonsäteily). Strategia perustuu mitattuun dataan tai ennalta estimoituun energiakulutukseen valaistuksen osalta. Näihin kahteen malliin perustuvia strategioita vertaillaan keskenään. Tutkimus osoittaa, että

- energiansäästö riippuu vahvasti käytetystä säätöstrategiasta ja
- säätöstrategian onnistuminen riippuu käytetyn valaistusjärjestelmän ominaisuuksista (esim. kapeakaistainen valo parempi).

Asiantuntijajärjestelmä rakennuksen säädössä

Krauss et al. (1998) esittelevät projektia, jossa tutkittiin neurosumean asiantuntijajärjestelmän soveltamista asuinrakennuksen automaatioon. Rakennuksen lämmityksen säätö perustuu yleensä säätökäyrään, jossa lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötilaa säädetään ulkolämpötilan perusteella. Perinteisen säätötavan ongelmana on heikko energianhallinta. Kehitetty järjestelmä mittaa lämmitysjärjestelmän meno- ja paluuvien lämpötiloja sekä sisä- ja ulkolämpötiloja. Sisä- ja ulkolämpötilatietoa käytetään arvioimaan lämmönsiirtoa rakennuksen ja ulkoilman välillä. Lisäksi järjestelmä hyö-

dyntää auringon säteilytietoa energianhallinnassa. Mahdollisuus valita prediktiivinen säätöstrategia yhdistettynä rakennuksen ja käyttäjän preferenssien epälineaariseen mallintamiseen sekä säätietojen ennustamiseen ovat ominaisuuksia, joiden ansiosta NEUROBAT-säädin säästää energiaa taaten samalla käyttäjien viihtyvyyden.

Sumea säädin aurinkotalossa

Jensen et al. (1997) tarkastelevat sumean säätimen mahdollisuuksia yhdistettynä perinteiseen PID-säätimeen. Raportissa esitetään useita etuja perinteiseen säätöön verrattuna, joista esimerkkeinä voidaan mainita

- ei tarvetta systeemin matemaattiselle mallintamiselle
- epälineaarisuuden hallinta
- suurten aikavakioiden hallinta ja
- monimuuttujajärjestelmien hallinta.

Huonoina puolina mainitaan, että sumea säädin vaatii PID-säädintä enemmän tehoa ja kapasiteettia tietokoneelta.

Yleisesti ottaen tutkimuksessa todetaan sumean säätötavan olevan ideaalinen aurinko-energiaa hyödyntävissä ratkaisuisissa. Lisää käytännön kokemuksia ja tutkimustyötä tarvitaan.

Kaksinkertainen sumea säätö LI-järjestelmälle

Cooper ja Warwick (1994) ovat suunnitelleet toimistorakennuksen lämmitysjärjestelmän säädön, jossa käytetään kahta sisäkkäistä sumeaa järjestelmää. Sisempi sumea säätö käyttää hyväkseen kvalitatiivista tietoa ympäristöstä, ja uloin silmukka auttaa sisempää säätöä adaptoitumaan erilaisiin ympäristöihin.

Sisemmässä säädön päättelysäännöt ovat muotoa:

JOS lämpötila on *suuri* JA *kasvaa* NIIN *kasvata* viilennystä *paljon*

Säätäjän yksinkertaistamiseksi sääntöjen NIIN-osassa käytetään lingvisten muuttujien sijasta asiantuntijoiden arvioimia prosenttiosuuksia, jotka kuvaavat lämmittämisen tai viilentämisen määrää oikein säädetyssä järjestelmässä. Nämä prosenttiosuudet ovat kuitenkin erilaisia rakennuksen eri tiloissa ja erilaisissa ympäristöissä. Uloin säätö muuttaa arvioituja prosenttiosuuksia eri ympäristöissä säätäjän toiminnan parantamiseksi.

Tutkijoiden mielestä sumea logiikka sopii hyvin LI-järjestelmien säätämiseen, koska ne ovat hyvin epälineaarisia ja niissä tyypillisesti esiintyy paljon häiriöitä esimerkiksi sääolojen ja vuodenaikojen muutosten takia.

Monitavoitteinen LI-säädön optimointi sumealla logiikalla

Kuntze ja Bernard (1998) ovat suunnitelleet sumeaan logiikkaan perustuvan menetelmän optimoimaan pientalon LI-järjestelmän säätöä siten, että käyttäjäkohtaiset taloudellisuus- ja mukavuuskriteerit toteutuvat. Käyttäjä painottaa kumpaakin kriteeriä haluamallaan tavalla, ja näitä painokertoimia käytetään lämmityksen ja ilmanvaihdon säätöjen referenssisignaalien on-line-optimointiin. Menetelmän toimivuutta on tutkittu simuloinneilla, joissa on otettu huomioon sekä ulkoisista sään muutoksista aiheutuvat häiriöt että henkilöiden määrän muutokset huoneessa.

Painokertoimien λ ja $(1-\lambda)$ ollessa selvillä optimointi tehdään erikseen kummallekin referenssisignaalille w_i , $i=1,2$ kolmessa vaiheessa:

1. Määrätään kummallekin kriteerille jäsenyysfunktiot μ_{PC1} ja μ_{PC2} , jotka kumpikin riippuvat vain yhdestä tilamuuttujasta.
2. Suunnitellaan malli, joka kuvaa tilamuuttujien välistä yhteyttä riippuen sekä kriteereistä että optimoitavasta referenssisignaalista w_i , $i=1,2$. Tästä saadaan laskettua kriteereitä kuvaavat jäsenyysfunktiot optimoitavan suureen (lämpötilan, ilmanvaihdon nopeuden referenssiarvot) funktiona.
3. Otetaan huomioon painokertoimien vaikutus optimointikriteereihin ja lasketaan optimaalinen referenssiarvo w_i min-max operoinnin avulla:

$$\mu^*(w_i^*) = \max \{ \min(\lambda \mu_{PC1}(w_i), (1-\lambda) \mu_{PC2}(w_i)) \}, 0 < \lambda < 1$$

Simulointitulosten perusteella käyttäjä voi suunnitellulla säätöjärjestelmällä saavuttaa energiakustannuksissaan 70 % säästön painottaessaan maksimaalisesti taloudellisuus-kriteeriä verrattuna mukavuuskriteerin maksimaaliseen painottamiseen. Lämpötilan referenssiarvo muuttuu tällöin 22 C°:sta 18 C°:seen

Kaksiosainen liiketalon LI-järjestelmän säätö neuroverkoilla

Curtiss & Brandemuehl (1993) ovat tutkineet lokaalia ja globaalia liiketalon LI-järjestelmän säätöä neuroverkkojen avulla. Tutkimuksen kokeet on tehty laboratoriossa, jossa monivyohtykeellisen LI-järjestelmän toimintaa voidaan testata. Laboratoriossa kerättyä dataa on käytetty neuroverkkojen opettamiseen. Lokaalissa säätäjässä malli itsessään on neuroverkko, jota on opetettu käyttäen mittauksia lämmityspatterista. Glo-

baalin säätäjän testaamisessa on käytetty kaksivyoähykkeistä LI-järjestelmää, ja sen tarkoituksena on energian kulutuksen minimointi neuroverkkojen avulla.

Lokaali säätäjä on duaalimuotoinen siten, että ensin lasketaan ennuste prosessin ulostulolle ja sitten etsitään oikea säätäjän ulostulo, joka perustuu ensimmäisen verkon laskemaan virheeseen. Kokonaisuudessaan säätäjä voidaan ajatella yhtenä suurena neuroverkkona, joka käyttää normaalia back propagation -algoritmia löytääkseen verkkoon sopivat painokertoimet säätäjän liikkeen mukaan. Tutkimuksessa on havaittu, että neuroverkot tarjoavat yksinkertaisemman ja tarkemman metodin lokaaliin säätöön kuin PID-säätimien käyttö. PID-säätöä sovellettaessa täytyy määrittää kolme parametria (säätöparametrit), kun neuroverkkoja käytettäessä vain ikkunan koko (mille ajanhetkelle ennuste lasketaan) ja oppimisnopeus on määriteltävä.

Tutkijat ovat sitä mieltä, että neuroverkot ovat erittäin hyödyllisiä järjestelmän optimoinnissa. Kun neuroverkkoja sovellettiin asetusarvojen määrittämiseen sopiviksi kyseisen hetken kuormaan, sekä korkealla että matalalla kuormalla saavutettiin noin 10 %:n energiasäästö. Globaalissa säätäjässä neuroverkkojen käyttöä perusteltiin myös sillä, että todellisilla LI-systeemeillä ei ole jatkuvasti sama konfiguraatio, joten normaali regressio antaa tietyssä tilanteessa oikean ennusteen mutta jossain toisessa tilanteessa ennuste voi olla täysin väärä.

Curtiss (1992) on laatinut myös väitöskirjansa neuroverkkojen käytöstä rakennusautomaatiossa.

Neuraaliverkkoapproksimointi lämmitysjärjestelmän optimisäätöön

Alessandri et al. (1994) ovat tutkineet kasvihuoneen lämmitystä optimisäädön avulla. Kasvihuoneen optimisäätö toteutetaan valitsemalla ohjausmuuttujat siten, että tuottajan taloudellinen hyöty maksimoituu. Säätöön vaikuttaa suuresti kasvihuoneen dynamiikan ja sääennusteiden tarkkuus. Alessandri et al. ovat tutkimuksessaan verranneet ympäristön lämpötilan ennustamista lineaarisella aikasarjamallilla ja epälineaarilla neuroverkkomallilla. Lopuksi tutkijat ovat toteuttaneet kasvihuoneen optimisäädön neuroverkkojen avulla.

Neuroverkon opettamisessa tutkijoilla oli aluksi ongelmia. Verkko ei näyttänyt pystyvän oppimaan todellisia luonnonlakeja, joista opetukseen käytetty mittausaineisto muodostui, kun klassiset mallinnusmenetelmät tuottivat kuitenkin hyviä tuloksia. Tutkijat uskoivat tämän johtuvan liian kohinaisesta mittausaineistosta. Neuroverkolla saatiin kuitenkin loppujen lopuksi parempi ennuste kuin perinteisellä aikasarjamenetelmällä, kun verkkoa ei opetettu todellisella mittausaineistolla vaan datalla, joka oli generoitu matemaattisesta lämpötilan vaihtelumallista.

3. Säädön arviointimenetelmät ja älykkäiden järjestelmien käyttö säätimien virityksessä

Tässä luvussa esitellään säädön arviointimenetelmiä taloteknisissä prosesseissa sekä oppivien ja älykkäiden järjestelmien soveltamista säätimien viritykseen. Luvussa 3.1 käsitellään hyvän säädön yleisiä kriteerejä ja rakennuksen lämmitysjärjestelmän säädön onnistumista erityisesti energiataloudelliselta kannalta. Luvussa 3.2 käsitellään itsevirittyviä säätöalgoritmeja ja sumean logiikan ja neuroverkkojen soveltamista säätimen virittämiseen. Luvussa 3.3 esitetään projektissa kehitetty sumeaa logiikkaan perustuva ilmastoinnin lämmityspatterin PI-säätimen automaattinen viritin.

3.1 Säädön arviointimenetelmät

3.1.1 Yleistä

Kuvassa 4 on esitetty kaavio säätöongelman eri ratkaisuvaiheista. Kaavio on lainattu "PID-säätimen käytännön viritysmenetelmät"-esitelmästä (Harju 1999). Se antaa yleiskuvan siitä, miten säädön suunnittelussa tulisi edetä. Yleiseen säätimen virittämiseen on vaikea määrittää tarkkaa toimintamallia, sillä yleensä tietty menetelmä sopii vain tietyn tyyppisen ongelman ratkaisuun. Lisäksi viritysparametrien välinen riippuvuus määräytyy prosessin mukaan, ja viritys riippuu aina myös prosessin toimintapisteestä.

Säädön onnistumisen arvioimiseen voidaan käyttää monia erilaisia kriteerejä. Olennaisimpina säätöpiirin vaatimuksina voidaan mainita

- säädön tarkkuus eli päästäänkö säädöllä haluttuun asetusarvoon ja
- säädön nopeus eli kuinka nopeasti säädetty systeemi pystyy seuraamaan asetusarvoa.

Muita vaatimuksia ovat esimerkiksi

- kuormitushäiriöiden kompensointikyky
- säädön epäherkkyys mittauskohinalle ja mallintamisvirheille
- robustisuus eli parametrimuutosten sietokyky
- ohjaussignaalin käyttäytyminen ja
- järjestelmän dynamiikka, epälineaarisuudet, häiriöt ja epävarmuudet.

Kriteerit saattavat olla osittain ristiriidassa keskenään. Esimerkiksi ohjaussignaalin rauhallinen käyttäytyminen ja säädetyin järjestelmän asetusarvon nopea seurantakyky eivät välttämättä voi molemmat toteutua. Tällöin täytyy eri kriteerien täyttymisessä tyytyä kompromissiin. Olennaisinta on säätöä suunniteltaessa pitää mielessä, mitä järjestelmällä halutaan tehdä ja miksi. Tärkeimmät kriteerit määräytyvät tapauskohtaisesti.

Taloudellisuuskriteeri viittaa lähinnä mahdollisimman pieneen lämmitysenergian kulu-
tukseen. Mukavuudesta ei energiataloudellisista syistä voida tinkiä, mutta hyvin toimi-
valla säätöjärjestelmällä mukavuusvaatimukset voidaan saavuttaa energiaa säästävasti.

Lämmityksen säädön onnistumisella voidaan katsotaan olevan rakennuksen energian-
kulutukseen vaikutusta kolmella tavalla. Ensiksi hyvä säätöpiiri pitää huonelämpötilan
halutussa arvossa ja säästää näin lämmitysenergiaa. Toiseksi jos säätöjärjestelmä on
hyvä, jää huonelämpötilojen vaihtelu pieneksi, jolloin huonelämpötilan asetusarvoa voi-
daan laskea asumismukavuuden kärsimättä. Lisäksi nopea huonekohtainen säätöjärjes-
telmä toimii tehokkaana ilmaisenergian talteenottajana (Koivisto et al. 1983). Jos sää-
töjärjestelmä reagoi nopeasti huonelämpötilan kasvuun esimerkiksi huoneessa oleskele-
vien, lämpöä säteilevien ihmisten lukumäärän kasvamisen takia, huoneen lämmitykseen
tarvittava energiamäärä pienenee. Säätöjärjestelmän nopeus on energiataloudellinen etu
myös jaksottaisessa lämmityksessä, jossa huonelämpötilan asetusarvo määrätään esi-
merkiksi yöllä alhaisemmaksi kuin päivällä. Mikäli säädetty systeemi seuraa asetusar-
voa nopeasti, turha energiankulutus pienenee.

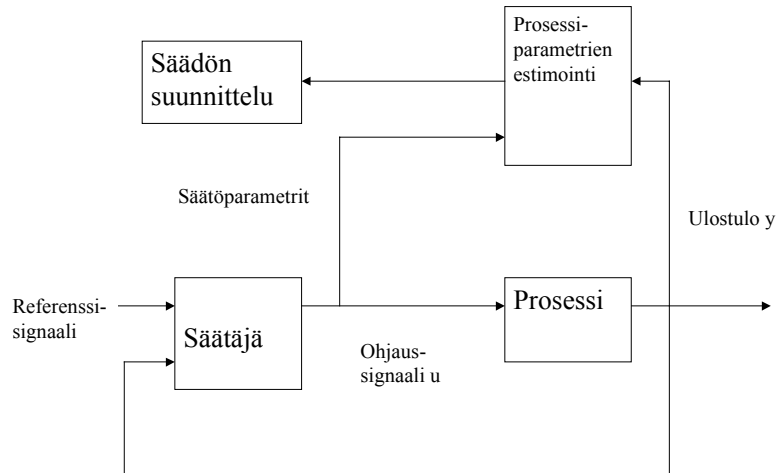
3.2 Älykkäät järjestelmät säätimien virityksessä

3.2.1 Itsevirittyvät ja adaptiiviset säätöalgoritmit

Itsevirittyvä säätäjä on nimensä mukaisesti säätäjä, joka etsii automaattisesti hyvän
säätötuloksen tuottavat säätöparametrit. Eräs tällaisen säätimen suunnittelun tapa on
seuraava:

1. Määrää sopiva mallin rakenne.
2. Estimoi mallin parametrit rekursiivisesti (esim. rekursiivinen pienimmän neliösum-
man menetelmä, stokastinen approksimaatio, laajennettu Kalman suodin)
3. Laske parametrien estimaattien avulla säätölaki sopivalla menetelmällä (esim.
vaihe- ja vahvistusvara, napojen asettelu, minimivarianssisäätö).

Itsevirittyvän säätimen voidaan siis ajatella koostuvan kahdesta silmukasta: sisäsilmu-
ka sisältää prosessin ja tavallisen takaisinkytketyn säätäjän ja ulommaisella silmukalla
päivitetään säätäjän parametreja. Kuvassa 5 on esitetty "Computer Controlled Systems"
-kirjasta (Åström & Wittenmark 1990) lainattu kaavio itsevirittyvän säätimen toiminnasta.

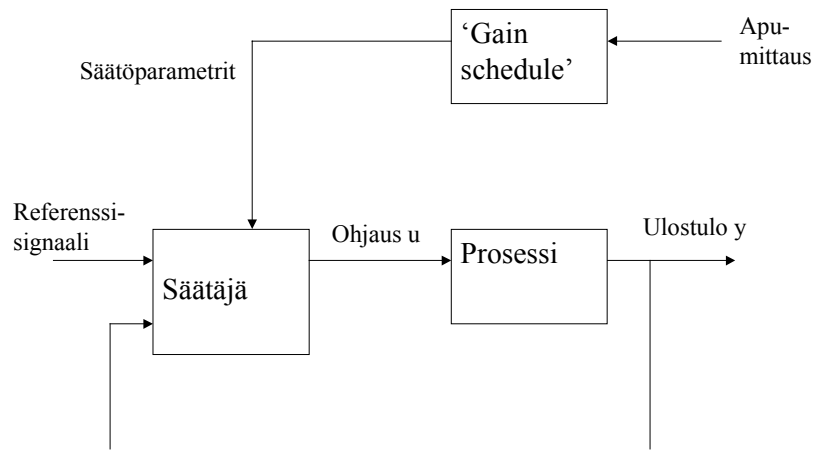


Kuva 5. Itsevirittyvän säätimen toiminta (Åström & Wittenmark 1990).

Itsevirittyvät säätöalgoritmit voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: suoriin ja epäsuoriin algoritmeihin. Epäsuorassa algoritmista prosessin parametrit estimoidaan ja säätöparametrit lasketaan erikseen, kun taas suorassa algoritmista prosessi parametrizoidaan säätöparametrien avulla, jolloin säätöparametrit voidaan estimoida suoraan prosessin ulostulon ja ohjauksen avulla ja säätöalgoritmin laskelmat yksinkertaistuvat (Åström & Wittenmark 1990).

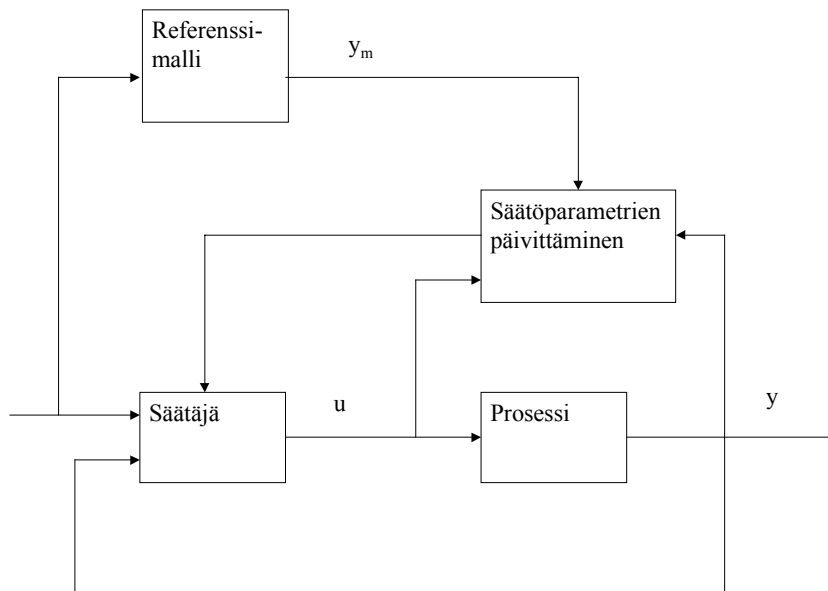
Itsevirittyvällä säätäjällä säätöpiiri saadaan viritettyä automaattisesti. Adaptiivisella säätäjällä tarkoitetaan itsevirittyvää säätäjää, joka pystyy mukautumaan muuttuviin olosuhteisiin ja päivittää säätöparametreja esimerkiksi prosessin toimintapisteen muuttuessa. Tällöin edellä esitettyä itsevirittyvän säätäjän toiminta-algoritmia täytyy muuttaa siten, että prosessin parametrien estimointi pystyy seuraamaan prosessin todellisten parametrien muutosta. Eräs keino tähän on jättää käyttämättä estimoinnissa liian vanhaa dataa (esim. rekursiivinen pienimmän neliösumman menetelmä unohduskertoimella). Muita keinoja ovat muun muassa ns. vahvistuksen suunnittelumenetelmä (Gain Scheduling) ja säätöparametrien päivittäminen referenssimallin avulla (Model-Reference Adaptive Systems).

Joissakin tapauksissa voidaan löytää apumuuttujat, jotka korreloivat hyvin prosessin dynamiikan muutoksien kanssa. Tällöin on mahdollista eliminoida prosessiparametrien muutosten vaikutus muuttamalla säätöparametreja näiden apumuuttujien funktiona. Menetelmästä käytetään nimeä vahvistuksen suunnittelu, koska alun perin sitä käytettiin vain eliminoidaan muutoksia prosessin vahvistuksessa. Kuvassa 6 on esitetty kaavio adaptiivisesta systeemistä, jossa prosessin parametrien muutokset on eliminoitu vahvistuksen suunnittelumenetelmällä. Menetelmän huonoja puolia on se, että parametrien muutoksia kompensoidaan avoimella järjestelmällä.



Kuva 6. Adaptiivinen järjestelmä, jossa prosessin parametrien muutokset on eliminoitu vahvistuksen suunnittelumenetelmällä.

Säätöparametrien päivittäminen referenssimallin avulla on esitetty kuvassa 7. Menetelmässä määrätään aluksi referenssimalli, joka ilmaisee, miten prosessin ulostulo ideaalisesti vastaa herätesignaaliin. Referenssimalli on siis osa säätösilmukkaa. Säädetyin systeemin voidaan ajatella koostuvan kahdesta silmukasta, joista sisempi on tavallinen säätäjän ja prosessin sisältävä säätösilmukka ja ulompi päivittää säätöparametreja siten, että virhe referenssimallin ulostulon ja prosessin ulostulon välillä on pieni. Menetelmän suurin ongelma on suunnitella päivittämismekanismi siten, että tuloksena on stabiili systeemi, joka ajaa virheen nollaan.



Kuva 7. Adaptiivinen järjestelmä, jossa prosessin parametrien muutokset on eliminoitu referenssimallin avulla.

3.2.2 Sumea logiikka adaptiivisessa säädössä

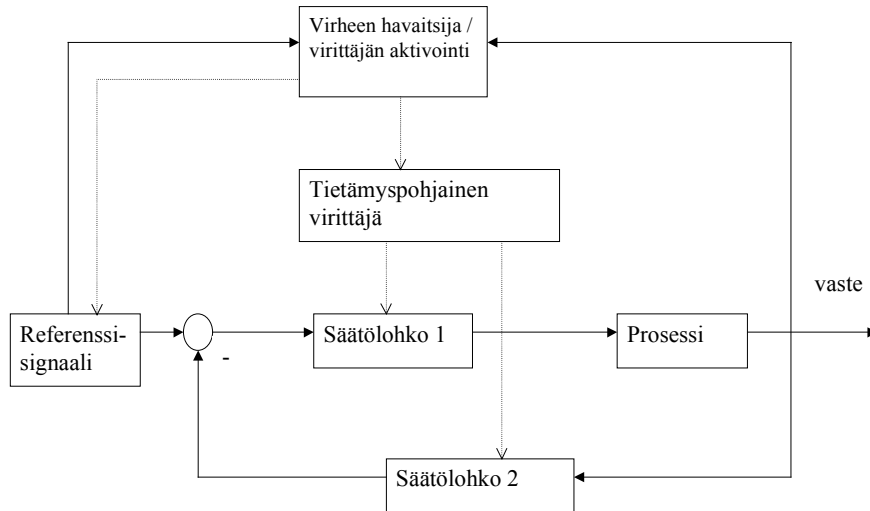
Joissakin säätöongelmissa prosessin mallin analyttinen esittäminen on vaikeaa ja siksi perinteisen adaptiivisen säätäjän kehittäminen ei ole mahdollista. Sellaisissa tilanteissa on havaittu toimivaksi adaptiivinen säätö, joka perustuu säätöinsinöörien aikaisempiin kokemuksiin ja tietämykseen.

Perinteisessä adaptiivisessa säädössä säätöparametreja päivitetään jatkuvasti tarkkailemalla systeemin toimintaa ja optimoimalla jonkinlaista toimivuusfunktiota. Sumeaan logiikkaan perustuvassa adaptiivisessa säätöjärjestelmässä tavallisen säätäjän (esim. PID, LQR) parametreja päivitetään sumealla logiikalla. Sumeasta logiikasta on hyötyä säätimen automaattisesta virittämisessä erityisesti silloin, kun systeemin säädöstä on käytössä asiantuntijatietoa, joka on helppo ilmaista sanallisesti ja josta voidaan muodostaa sääntökanta. Joissakin tapauksissa pelkkä lingvistisen sääntökannan luominen riittää tyydyttävään säätötulokseen, mutta yleensä sumean logiikan käyttö on hyödyllistä.

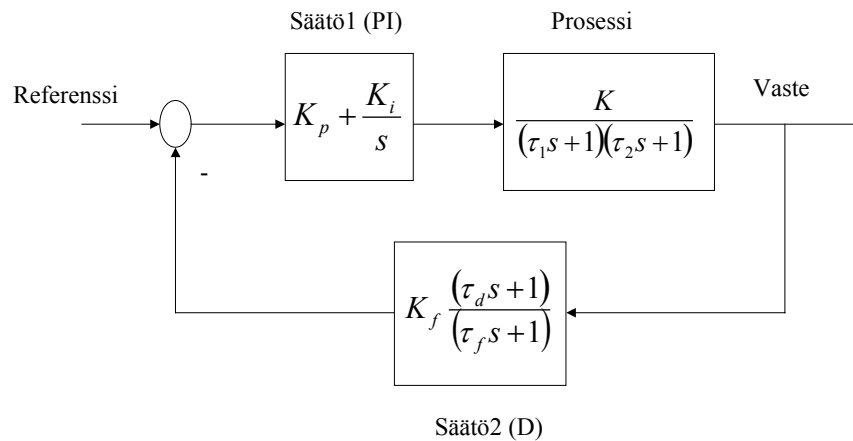
Kuva 8 esittää tietämyspohjaisesti adaptoituvan säätöjärjestelmän toimintaa (de Silva 1990). Kuvan varsinainen säätösilmukka sisältää kaksi perinteistä säätölohkoa, yhden myötähaarassa ja toisen takaisinkytkentähaarassa. Virheen havaitsija valvoo prosessin toimintaa ja jos toiminta heikkenee, se aktivoi tietämyspohjaisen virittäjän. Viritysvaiheessa systeemi pyritään ensin pitämään stabiilina, minkä jälkeen referenssisignaalin lisäksi systeemiin syötetään testisignaali, jonka vaikutusta viritin seuraa. Säätöparametreja päivitetään viritin sääntökannan avulla.

de Silvan (1990) artikkelissa on myös esitetty esimerkki sumeasti adaptoituvasta järjestelmästä, jossa varsinainen säätösilmukka on kuvan 9 mukainen, eli prosessin säätöön on käytetty PID-säätäjää. Viritin sääntökanta on muodostettu taulukossa 1 esitettyjen, PID-säätimen yleisten virityskriteerien mukaan.

Dash et al. (1995), Truong & Hofmann (1995) sekä Karray et al. (1995) ovat myös tutkineet sumeaa viritystä.



Kuva 8. Tietämuspohjaisesti adaptoituvan säätöjärjestelmän toiminta.



Kuva 9. Kuvan 8 säätöpiiri PID-säätimellä.

Taulukko 1. PID-säätimen virityskriteerit.

Virheen tyyppi	Viritystoimenpide		
	K_p	K_i	τ_d
Ei stabiloidu	Pienennä	Pienennä	Kasvata
Vasteen ylilyönti / värähtely	Pienennä	Pienennä	Kasvata
Vaste liian hidas	Kasvata	Pienennä	-
Referenssin ja vasteen välinen ero tasapainotilassa	Pienennä	Kasvata	-

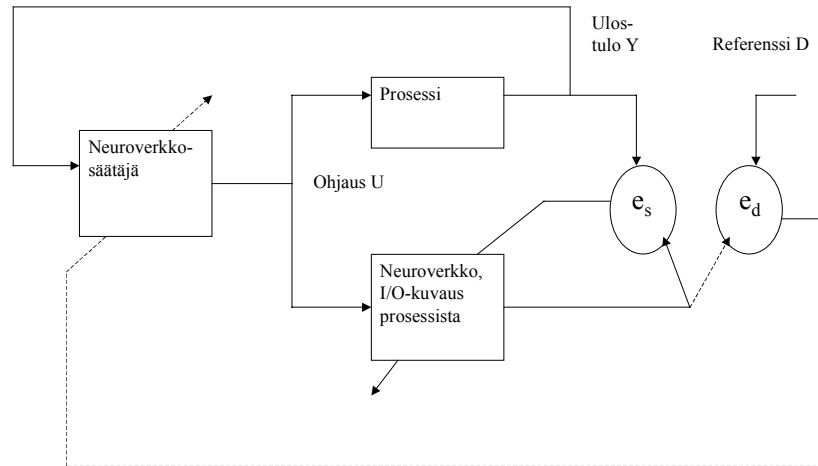
Sumean ja yleensäkin tietämuspohjaisen virittämisen huono puoli on, että adaptioalgoritmi ei ole laskettavissa analyttisessä muodossa. Tämän takia tietämuspohjaiseen adaptioon ei voida liittää perinteisten adaptioalgoritmien teoriaa. Monia suljetun systeemin piirteitäkään, kuten esimerkiksi stabiilisuutta, ei voida varmistaa yleisellä, systemaattisella tavalla.

3.2.3 Neuroverkot adaptiivisessa säädössä

Perinteisissä adaptiivisen säädön lähestymistavoissa oletetaan identifioitavan mallin rakenne tunnetuksi ja ainoastaan mallin parametreja pyritään estimoimaan säätölain päivittämiseksi. Neuroverkkojen käytöllä saavutetaan etua ongelmissa, joissa prosessin matemaattinen malli ei ole käytössä tai jossa mallin rakenne muuttuu ajan funktiona, mutta joissa prosessin sisäänmenosta ja ulostulosta on olemassa mittausaineistoa. Monikerroksisia neuroverkkoja voidaan käyttää adaptiivisina elementteinä epälineaaristen, dynaamisten järjestelmien säädössä.

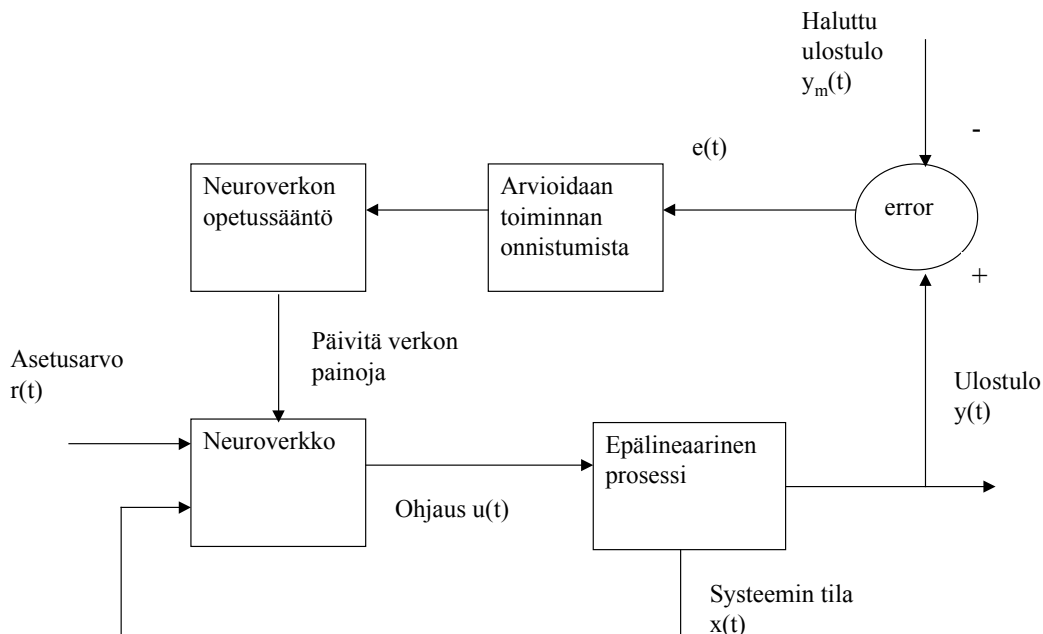
Tyypillisesti adaptiivinen säätöjärjestelmä koostuu kahdesta silmukasta: varsinaisesta säätösilmukasta ja säätäjän parametreja päivittävstä loopista. Esimerkiksi Wu et al. (1991), Meyne et al. (1993), Bumjin & Koivo (1995) sekä Wang & Broome (1994) ovat soveltaneet neuroverkkoja tämän tyyppisessä järjestelmässä. Wu et al. (1991) ja Meyne et al. (1993) ovat käyttäneet neuroverkkoa sekä varsinaisen säätäjänä että säätäjän parametrien päivittämisessä. Järjestelmän toimintaa esittää kuva 10.

Bumjin & Koivo (1995) ja Wang & Broome (1994) ovat käyttäneet neuroverkon ja PID-säätäjän yhdistelmää. Jälkimmäisessä viitteessä neuroverkkoa on opetettu etukäteen antamaan oikeat PID-säätäjän parametrit eri toimintatilanteissa ja sitä käytetään joustavampana ja vähemmän laskentakapasiteettia vievänä vaihtoehtona look-up-taulukon sijasta. Edellisessä viitteessä käytetään yhtä aikaa PID-säätäjää ja neuroverkkosäätäjää siten, että PID-säätäjällä on tarkoitus kompensoida nopeat häiriöt systeemin toiminnassa ja neuroverkkosäätäjä päivittää hitaampia muutoksia systeemin dynamiikassa, esim. toimintapisteen muutosta. Varsinainen säätösignaali on näiden summa.



Kuva 10. Kahteen neuroverkkoon perustuvan adaptiivisen säätöjärjestelmän toiminta (Wu et al. 1991).

Lightbody & Irwin (1994) ja Zomaya et al. (1992) ovat käyttäneet neuroverkkoa suoraan adaptiivisena säätäjänä siten, että referenssimallin avulla neuroverkon painoja päivitetään sopivan ohjauksen löytämiseksi. Kuvassa 11 on esitetty tällaisen neuroverkkoon perustuvan suoran adaptiivisen säätöjärjestelmän yleinen rakenne (Lightbody & Irwin 1994).



Kuva 11. Neuroverkkoon perustuvan suoran adaptiivisen säätöjärjestelmän yleinen rakenne (Lightbody & Irwin 1994).

3.3 Sumeaan logiikkaan perustuva ilmastonin lämmityspatterin PI-säätimen automaattinen viritin

LVI-tekniikan järjestelmien suunnittelun ensisijaisina tavoitteina ovat viihtyvyys, energiataloudellisuus ja laiteystävällisyys. Tämä edellyttää, että järjestelmän säätö toimii halutusti. Edellytyksenä on, että säädin on hyvin viritetty eli sen vitysparametrit vahvistus ja integrointiaika ovat sopivissa arvoissa. Hyvin viritetty säädin pitää säädettävän suureen mahdollisimman tarkasti asetusarvossaan, ja toimilaitteen liikkeet ovat hallittuja eivätkä aiheuta turhaa kulumista.

Säätimen virittäminen suoritetaan perinteisesti käyttämällä vitysalgoritmeja säätimen käyttöönoton yhteydessä. Vitysarvoja joudutaan usein korjaamaan prosessiin vaikuttavien olosuhteiden muuttuessa. Tässä luvussa kuvataan kehitetty sumeaa logiikkaan perustuva automaattinen viritin, joka korjaa voimassa olevia vitysparametreja käytön-aikaisesti prosessiin vaikuttavien häiriöiden vaihdella.

Tutkimuksessa esitetään aluksi periaatteet, joilla virittimen toimintaa kuvataan. Näihin periaatteisiin nojautuen muodostettiin sumean päättelijän tarvitsema sääntökanta ja eri muuttujien jäsenyysfunktiot. Lisäksi suunnitellun virittimen toimintaa tarkastellaan tietokonesimulaation avulla sovelluskohteena kerrostalohuoneiston ilmalämmitysjärjestelmän lämmityspatterin säätö. Tarkasteltava kerrostalohuoneisto on LVIS 2000 -tyyppikolmio, joka on kuvattu liitteessä A. Tarkasteluissa on otettu huomioon sääolojen vaihtelu Helsingissä sekä lämpö- ja epäpuhtauskuormitusten vaihtelu.

3.3.1 Virittämisen periaate

Kun säätöjärjestelmä toimii hyvin,

- 1) säädettävä suure pysyy asetusarvossaan ja mukautuu mahdollisimman nopeasti muutoksiin
- 2) säätö on stabiili eli säädettävässä suureessa ja toimilaitteen asennossa ei esiinny merkittävää värähtelyä.

PI-säätimen vitysparametrit ovat vahvistus K_p ja integrointiaika T_i . Tässä työssä käytetään integroivana parametrina integrointivahvistusta $K_i = K_p/T_i$. Vitysparametrien merkitys säädölle käy ilmi taulukosta 2.

Taulukko 2. Vitysparametrien vaikutus säädön ominaisuuksiin.

Säädön ominaisuus	K_p kasvaa	T_i kasvaa (K_i pienenee)
säädön nopeus	kasvaa	pienenee
säädön stabiilisuus	pienenee	kasvaa

Säätöjärjestelmän toiminnan määrittelevät

- 1) erosuure, ts. säädettävän suureen ja asetusarvon erotus ja
- 2) erosuureen muutosnopeus, ts. määrä, jonka erosuure muuttuu kahdella peräkkäisellä ajanhetkellä.

Säätöjärjestelmän toiminnasta voidaan tehdä mainittujen muuttujien perusteella taulukossa 3 kuvattuja johtopäätöksiä.

Taulukko 3. Erosuureen ja muutosnopeuden merkitys säätöjärjestelmän toimintaa kuvattaessa.

Erosuure	Muutosnopeus	Johtopäätös
Suuri	pieni	-ei säätöä ⇒ K_p ja K_i kasvatettava -hitaan järjestelmän asetusarvossa on tapahtunut äkillinen, merkittävä muutos ⇒ K_p ja K_i pidettävä ennallaan tai kasvatettava hieman
Pieni	pieni	-säätö toimii hyvin K_p ja K_i pidettävä ennallaan
Suuri	suuri	-säätö on epästabiili ⇒ K_p ja K_i pienennettävä -tapahtumassa äkillinen suuri muutos asetusarvossa ⇒ K_p ja K_i pidettävä ennallaan tai pienennettävä hieman
Pieni	suuri	-säätö toimii ⇒ K_p ja K_i pidettävä ennallaan -säädettävä prosessi on nopea ja herkkä värähtelyille ⇒ K_p ja K_i pidettävä ennallaan tai pienennettävä hieman

3.3.2 Sumean viritin kuvaus

Sumean logiikan perusideana on jäljitellä ihmisen kaltaista, epätäsmällistä ajattelutapaa tietokoneen vaatimien täsmällisten lukuarvojen sijasta. Sumean päättelijän toiminta perustuu joukkoon sääntöjä, joilla päättelytehtävä kuvataan.

Automaattinen viritin toimii siten, että sisäänmeno- eli input-tietona käytetään erosuuretta ja muutosnopeutta ja näiden perusteella lasketaan toimintatilanteen muutosten vaatimat korjaukset viritysparametreihin. Säännöt ovat tällöin muotoa:

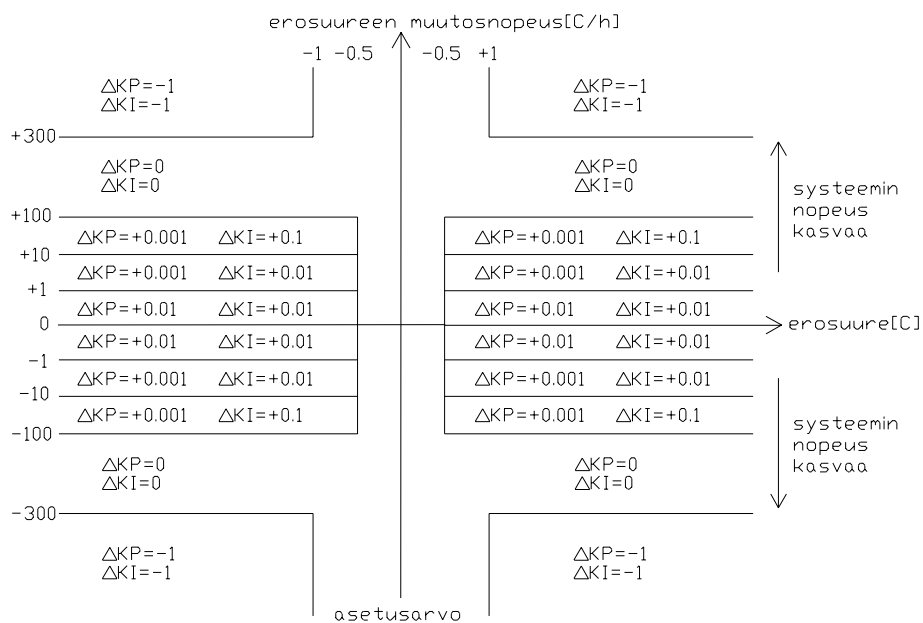
JOS erosuure on pieni/suuri & muutosnopeus on pieni/suuri, NIIN suurena/pienennä K_p :n arvoa vähän/paljon & suurena/pienennä K_i :n arvoa vähän/paljon.

Eräs mahdollinen päätöksentekotilanne on esimerkiksi:

JOS erosuure on suuri & muutosnopeus on suuri

NIIN pienennä K_p :n arvoa paljon & pienennä K_i :n arvoa paljon.

Mikä sitten on "vähän" tai "paljon"? Vastaus tähän kysymykseen riippuu tarkasteltavasta tapauksesta ja sen toimintaympäristöstä. Kyseiseen ongelmaan vastaus etsittiin tutkimalla tarkasteltavan tapauksen käyttäytymistä erilaisissa toimintaympäristöissä tietokonesimuloinnin avulla. Tietokonesimulointitapauksista kerrotaan enemmän tuonempana. Kuvassa 12 on esitetty simulointituloksien perusteella arvioituja viritysparametrien muutoksia sisäänmenomuuttujien funktiona.



Kuva 12. Simulointien tuloksena saatuja parametrien muutoksia erosuureen ja muutosnopeuden funktiona.

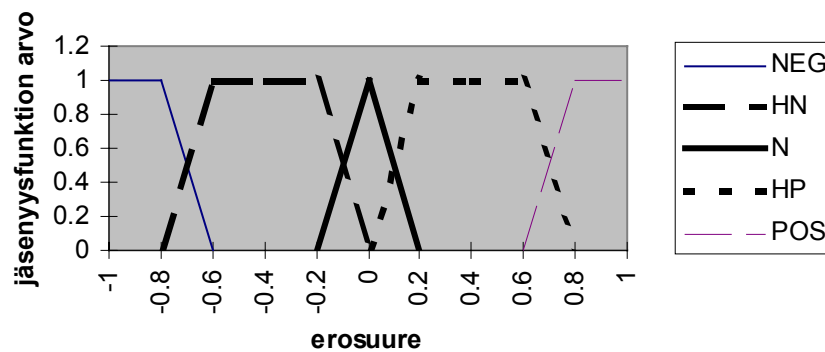
Keskeinen käsite sumeassa logiikassa on sumea joukko, jolla ilmaistaan summittaisesti sisäänmenomuuttujan suuruus. Sumea joukko käsittää siis jotkin tietyllä arvoalueella olevat sisäänmenomuuttujien arvot. (esim. erosuureet välillä $-0,2...+0,2^{\circ}\text{C}$) Tässä tutkimuksessa on otettu käyttöön seuraavasti nimetyt sumeat joukot **pn** (paljon negatiivinen), **neg** (negatiivinen), **hn** (hieman negatiivinen), **n** (neutraali), **hp** (hieman positiivinen), **pos** (positiivinen) ja **pp** (paljon positiivinen).

Toinen keskeinen käsite on jäsenyysfunktio. Jäsenyysfunktio määritellään välillä $[0,1]$ ja se on funktio sisäänmenomuuttujan arvosta. Arvo 1 (täysjäsenyys) merkitsee, että

sisäänmenomuuttujan arvo kuuluu varmasti johonkin sumeaan joukkoon, vastaavasti 0 taas, ettei arvo varmasti kuulu ko. joukkoon.

Jäsenyysfunktioita on olemassa varsin monen muotoisia. Tässä tutkimuksessa kolmio- ja nelikulmiomuodot todettiin soveliaimmiksi. Funktiot saivat lopullisen muotonsa tietokonesimulointien perusteella.

Kuvassa 13 on esitetty erosuureen jäsenyysfunktioiden arvoja joukoille neg, hn, n, hp ja pos. Taulukossa 4 puolestaan on sumean mallin avulla laskettuja virityskorjauksia.



Kuva 13. Erosuureen jäsenyysfunktiot.

Taulukko 4. Esimerkki sumean päättelijän laskemista viritysparametrien muutoksista.

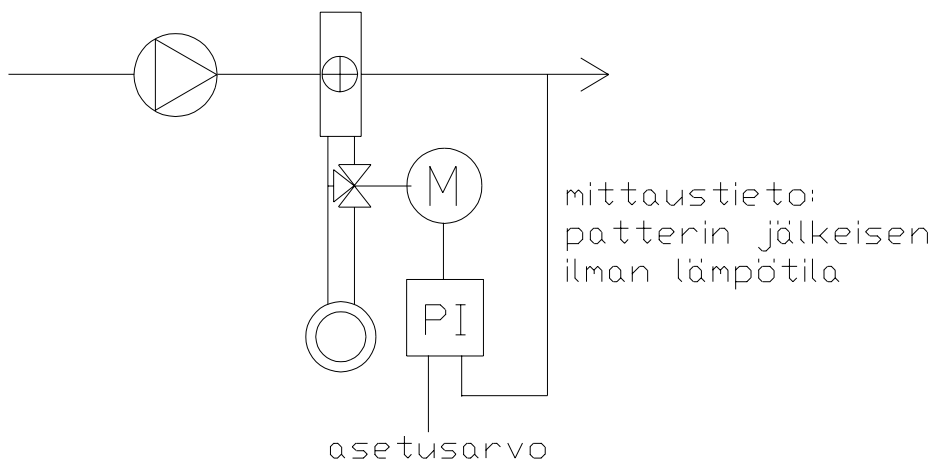
erosuure	muutosnopeus	ΔK_p	ΔK_i
0	0	0	0
0	50	0	0
0	500	0	0
-5	0,5	+0,00634	+0,0357
-5	20	+0,0012	+0,0365
-5	150	0	0
-5	1500	-0,0076	-0,00996

3.3.3 Simuloinnein tarkasteltava tapaus

Dynamiikaltaan hitaassa systeemissä tilasuureet reagoivat hitaasti ja hillitysti ympäristössä tapahtuviin muutoksiin. Tällaisia systeemejä ovat esimerkiksi kokonaiset rakennukset. Hitaita systeemejä ohjaavien säädinten virittäminen on säädön kannalta suhteellisen helppoa, koska ne seuraavat ulkoisia muutoksia hitaasti eivätkä siten ole alttiita värähtelyille. Tosin täysin virheellisesti viritetty säädin saattaa aiheuttaa värähtelyjä toimilaitteessa, mikä on pyrittävä eliminoimaan.

Dynamiikaltaan nopeissa systeemeissä tilasuureet reagoivat nopeasti ja voimakkaasti ympäristössä tapahtuviin muutoksiin. Tällaisia systeemejä ovat LVI-tekniikassa esimerkiksi ilmastoinnin yksikköprosessit kuten lämmitys ja jäähdytys. Nopeita systeemejä ohjaavien säädinten viritäminen on vaikeampaa kuin hitaiden, koska värähtelyalttius lisääntyy systeemin nopeuden kasvaessa. Tässä tutkimuksessa viritintä ohjaavan suureen logiikan kehitystyö perustui tällaisen nopean systeemin tarkasteluun tietokonesimuloinnein, jotka tehtiin TRNSYS-simulointiohjelman avulla.

Systeemiksi valittiin ilman lämmitys vesipatterin avulla ulkoilman lämpötilasta asetusarvoon (kuva 14). Ulkoilman lämpötilan vaihtelut (tunneittaista keskilämpötilaa edustava data-aineisto; lineaariset muutokset) otettiin tarkastelussa huomioon ja tuloilman lämpötilan asetusarvoon sekä puhaltimen pyörimisnopeuteen (lämmityspatterin läpi virtaavan ilman määrä) tehtiin askelmaisia muutoksia. Seuraavassa kuvassa esitetään kaaviona tarkasteltavan järjestelmän periaate.



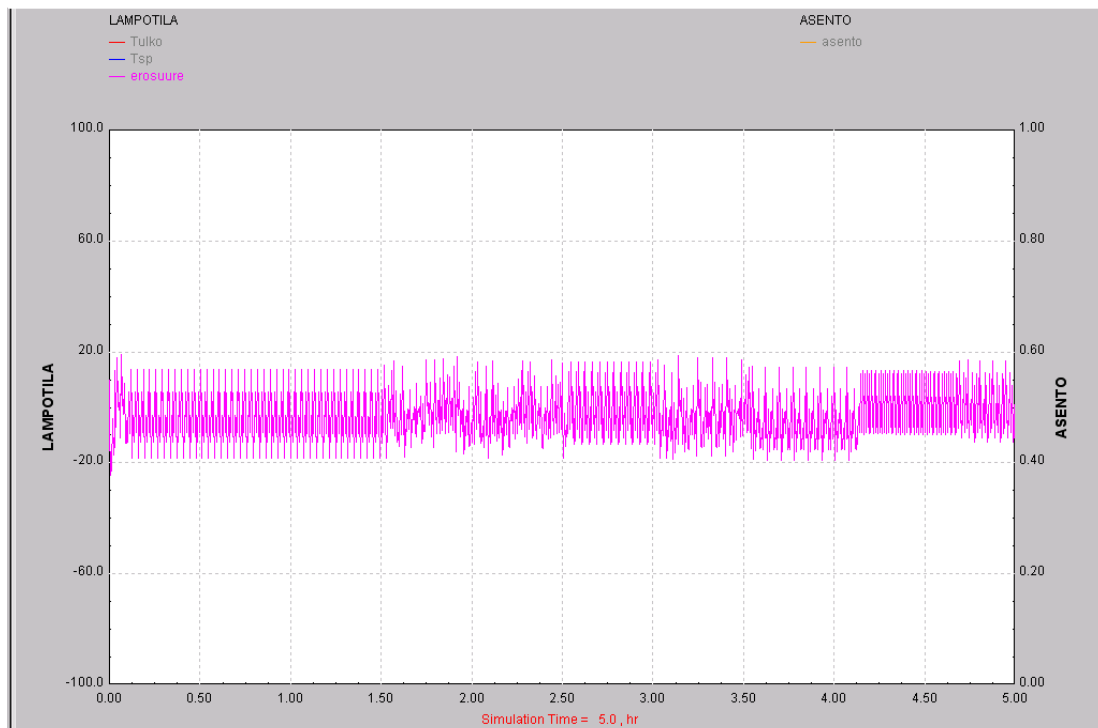
Kuva 14. Kaaviokuva tarkasteltavasta järjestelmästä.

3.3.4 Simulointitulokset ja niiden analysointia

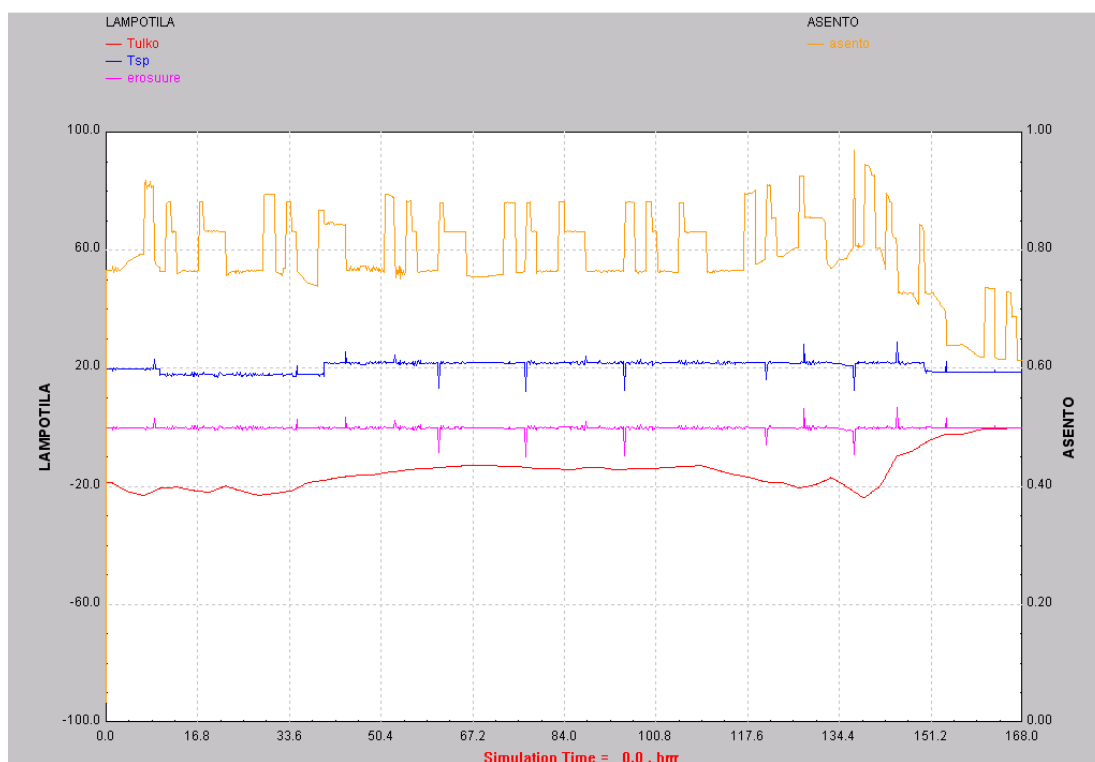
Hyvän säädön kriteerejä ovat

- 1) säädettävän suureen pysyminen asetusarvossaan
- 2) säädettävän suureen mukautuminen muutoksiin (häiriöihin)
- 3) säädettävän suureen värähteleminen ja
- 4) toimilaitteen liikkeiden maltillisuus.

Kuvat 15 ja 16 ovat esimerkkejä säädön onnistumisesta kahdessa eri viritystapauksessa. Kuvassa 15 on esitetty tapaus, jossa säätimelle annetut vakioparametrit on valittu täysin väärin. Kuvasta nähdään, että erosuure (ja siten säädettävä suure) värähtelee voimakkaasti. Kuvassa 16 on sama tapaus, kun alkutilanteessa molemmat viritysparametrit ovat nollija ja käytössä on sumea viritin, joka korjaa parametrien arvot erosuureen ja muutosnopeuden mukaan.



Kuva 15. Vakioviritysparametrit ($K_p = 0.05$, $K_i = 2.0$), talviolosuhteet.



Kuva 16. Sumeaan logiikkaan perustuva viritin, talviolosuhteet.

Taulukossa 5 on esitetty hyvin viritetyn vakiosäätimen ja sumean virittimen toiminnan vertailua talvi- ja kevätolosuhteissa annettujen säädön toimintakriteerien valossa.

Taulukko 5. Eri vitysmenetelmien vertailu.

Viritysmenetelmä	Keskimääräinen poikkeama asetusarvosta [°C]	Säätösuureen värähtely	Säätösignaalin värähtely
Sumea viritin: talvi	0,110	ei esiinny	ei esiinny merkittävästi
Vakioparamerit: talvi	0,348	ei esiinny	ei esiinny merkittävästi
Sumea viritin: kevät	0,164	ei esiinny	ei esiinny
Vakioparametrit: kevät	0,158	ei esiinny	ei esiinny merkittävästi

Värähtelyt pystytään eliminoimaan varsin hyvin. Asetusarvon muutoksiin säätöjärjestelmä reagoi nopeasti ja stabiilisti.

Sen sijaan on ongelmallista saada viritin reagoimaan riittävän nopeasti äkillisiin ilmavirran muutoksiin erityisesti talvioloissa, jolloin lämpötilaerot ovat selvempiä. Tarkasteltua

menetelmää käytettäessä viritin tulkitsee äkillisen ilmavirran muutoksen aiheuttaman lämpötilan muutoksen värähtelyksi ja pyrkii pienentämään parametreja. Tilannetta voidaan hiukan parantaa lisäämällä input-muuttujaksi puhaltimen ohjauksen muutos, joka nolasta poikkeavana joko pitäisi viritysparametrit ennallaan tai kasvattaisi niitä. Parannus ei kuitenkaan ole merkittävä.

Automaattisella virityksellä ei päästä aivan ideaalisesti viritetyn vakioparametrisäätimen suorituskykyyn, mutta automaattisen virityksen etuna on, että voidaan säästää toimintaolosuhteiden muuttuessa vaadittavaan parametrien estimointiin kulunut aika ja vaiva.

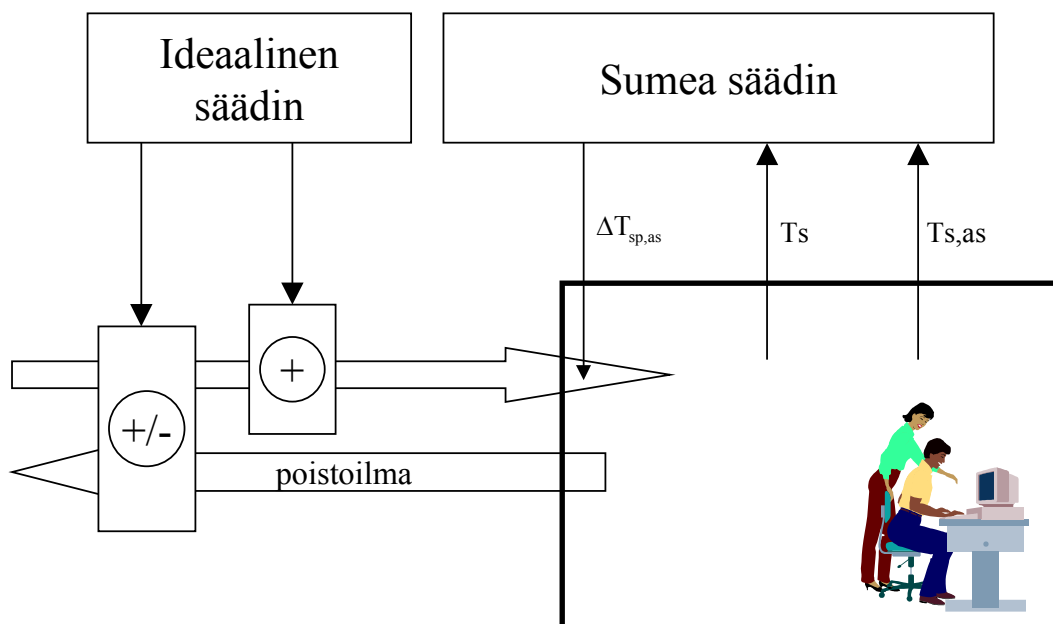
3.4 Sumean säätimen ominaisuuksien vaikutus säätöön

Tässä työssä testattiin yksinkertaisella tapauksella, miten erilaiset sumean säätimen ominaisuudet vaikuttavat säätötulokseen.

3.4.1 Tarkasteltava tapaus

Tarkasteltava järjestelmä

Kuva 17 esittää tarkasteltavaa järjestelmää. Kyseessä oli toimistotila ilmalämmityksellä. Ilmastointikoneeseen kuuluivat LTO ja lämmityspatteri. Näitä säädettiin ideaalisesti. Siis oletettiin, että muutostilanteen jälkeen ne pystyvät viiveettömästi tuottamaan saavutettavissa olevan lämmitystehon.

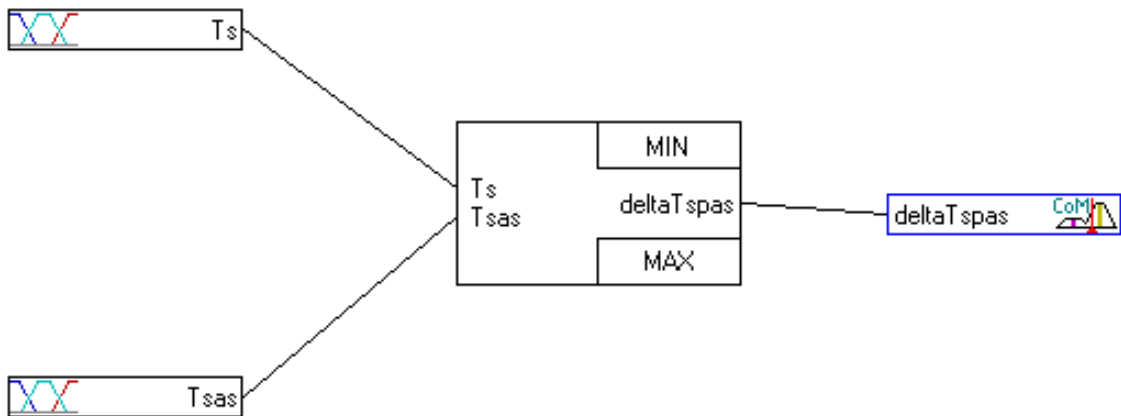


Kuva 17. Tarkasteltava järjestelmä.

Sumean säätimen perusrakenne

Sumean säätimen rakenne identifioi sumean logiikan päättelyvirran sisääntulomuuttujista ulostulomuuttujiksi. Sisäänmenojen analogiset arvot muutetaan sumeuttamalla sumeiksi arvoiksi, joita käytetään sumeassa päättelyssä lingvistiset säännöt sisältävissä sääntökannoissa. Näistä saadaan ulos lingvistiset muuttujat, jotka muutetaan selkeyttämällä analogisiksi ulostulomuuttujien arvoiksi.

Kuvassa 18 esitetään tarkasteluissa käytetyn sumean säätimen perusrakenne, joka käsittelee sisäänmenomuuttujat, sääntökannan ja ulostulomuuttujan. Yhdistävät viivat kuvaavat tietovirtaa. Säätimen sisäänmenomuuttujiksi valittiin huonelämpötila (T_s) ja huonelämpötilan asetusarvo (T_{sas}). Vielä yksinkertaisempi ja toiminnallisesti ehkä parempi säädin olisi sisältänyt vain yhden sisäänmenomuuttujan, joka olisi ollut eroosuure (eli $T_{sas} - T_s$). Säätimen ulostulona on sisänpuhalluslämpötilan asetusarvon muutos ($\text{delta}T_{spas}$).



Kuva 18. Sumean säätimen perusrakenne.

Taulukossa 6 esitetään käytetyt lingvistiset muuttujat. Lingvistisiä muuttujia käytetään kääntämään todelliset muuttujien arvot lingvistisiksi arvoiksi. Taulukossa 7 esitetään käytetty sääntökanta.

Taulukko 6. Lingvistiset muuttujat.

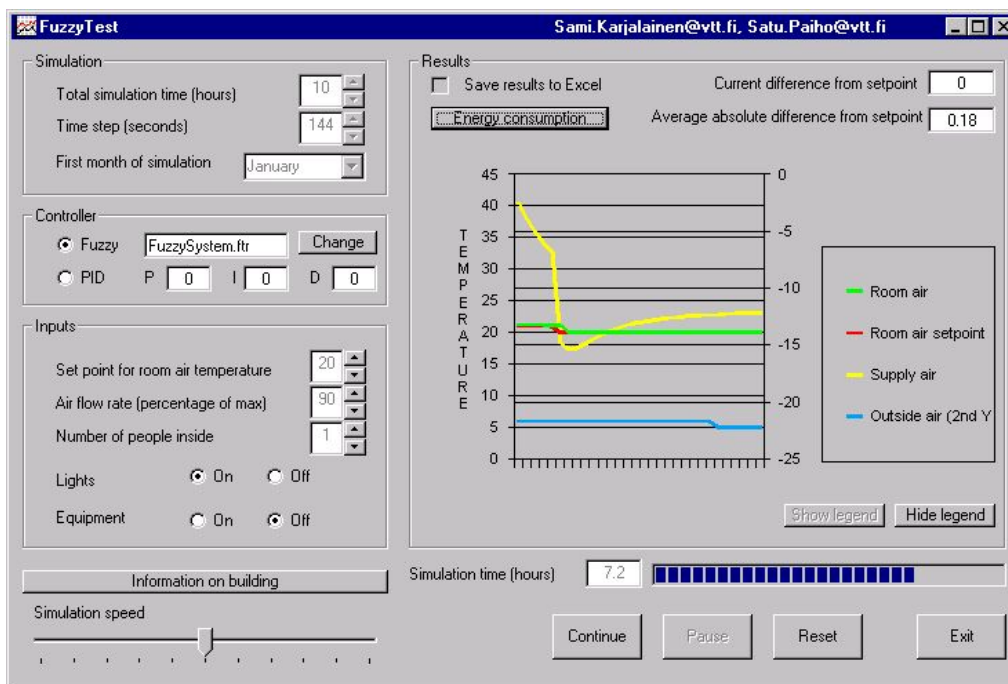
#	Muuttuja	Yksikkö	Min	Max	Oletusarvo	Lingvistinen arvo
1	Ts	Lämpötila (°C)	10 tai 6	40 tai 36	21	very_low low medium high very_high
2	Tsas	Lämpötila (°C)	10 tai 6	40 tai 36	21	very_low low medium high very_high
3	deltaTspas	Lämpötilan muutos (°C)	-1	1	0	high_dec small_dec steady small_inc high_inc

Taulukko 7. Käytetty sääntökanta.

IF		THEN	
Ts	Tsas	DoS	deltaTspas
very_low	very_low	1.00	steady
very_low	low	1.00	small_inc
very_low	medium	1.00	small_inc
very_low	high	1.00	high_inc
very_low	very_high	1.00	high_inc
low	very_low	1.00	small_dec
low	low	1.00	steady
low	medium	1.00	small_inc
low	high	1.00	small_inc
low	very_high	1.00	high_inc
medium	very_low	1.00	small_dec
medium	low	1.00	small_dec
medium	medium	1.00	steady
medium	high	1.00	small_inc
medium	very_high	1.00	small_inc
high	very_low	1.00	high_dec
high	low	1.00	small_dec
high	medium	1.00	small_dec
high	high	1.00	steady
high	very_high	1.00	small_inc
very_high	very_low	1.00	high_dec
very_high	low	1.00	high_dec
very_high	medium	1.00	small_dec
very_high	high	1.00	small_dec
very_high	very_high	1.00	steady

3.4.2 Testipenkki ja käytetyt vakioarvot

Tarkastelut tehtiin VTT:ssä kehitetyllä sumeiden säätimien testipenkillä (Karjalainen & Paiho 2001). Sumeiden säätimien testipenkki on Visual Basic -ohjelmointiympäristössä tehty Windows-ohjelma, jolla voidaan nimensä mukaisesti testata sumeiden säätimien toimintaa. Ohjelmaan voidaan liittää FuzzyTech-kehitystyökalulla (www.fuzzytech.com) tehtyjä sumeita säätimiä. Ohjelman avulla voidaan seurata reaaliajassa säädön onnistumista. Ohjelman käyttäjä voi muuttaa asetusarvoja ja muita lähtöarvoja laskennan aikana – ja näkemään vaikutuksen reaaliaikaisesti (Kuva 19).



Kuva 19. Testipenkin päänäyttö.

Käyttöliittymästä voidaan muuttaa seuraavia (**lihavoituja** voidaan muuttaa kesken laskennan) arvoja:

- simuloinnin pituus
- simuloinnin aika-askel
- simuloinnin alkamisaika (kuukausi)
- sumea säädin (käytössä oleva FuzzyTech-ohjelmalla tehty sumea malli)
- huoneilman lämpötilan asetusarvo
- ilmvirta suhteessa maksimi-ilmavirtaan
- **ihmisten lukumäärä huoneessa** (lämpökuormien laskentaa varten)
- **valaistus päällä/pois** (lämpökuormien laskentaa varten)
- **laitteet päällä/pois** (lämpökuormien laskentaa varten)
- **simuloinnin nopeus** (jotta muutokset näytöllä eivät olisi liian nopeita).

Seuraavia arvoja ei voida muuttaa käytetyssä ohjelmaversiossa (suluisissa käytössä olevat vakioarvot):

- huoneen tilavuus (105 m³)
- huoneen pinta-ala (35 m²)
- ikkunan tyyppi, koko ja suuntaus (kolmilasinen, kirkas, 7,2 m², pohjoiseen)
- maksimi-ilmavirta (210 m³/h)
- lämmöntalteenoton hyötysuhde (60 %)
- vuotoilmanvaihto (0,1 1/h)
- valaisimien huoneeseen luovuttava lämpökuorma (500 W)
- laitteiden huoneeseen luovuttava lämpökuorma (400 W)
- yhden henkilön huoneeseen luovuttava lämpökuorma (100 W)
- säätiedosto (Helsingin testivuoden sää) (luetaan Excel-tiedostosta simuloinnin aikana)
- rakenteet (dokumentoitu Heimosen (1998) raportissa).

Kaikissa tarkasteluissa testijakso kesti 20 tuntia. Sää oli tammikuun alun mukaista. Ilmavirta pidettiin koko ajan maksimiarvossaan. Taulukossa 8 on esitetty muutokset asetusravossa ja kuormituksessa, jotka tehtiin simulointien aikana säädön testaamiseksi. Muutoksia ei aina välttämättä tehty täsmälleen taulukossa esitetyllä hetkellä, mutta ainakin likimain kyseisenä ajankohtana simuloinnin alusta.

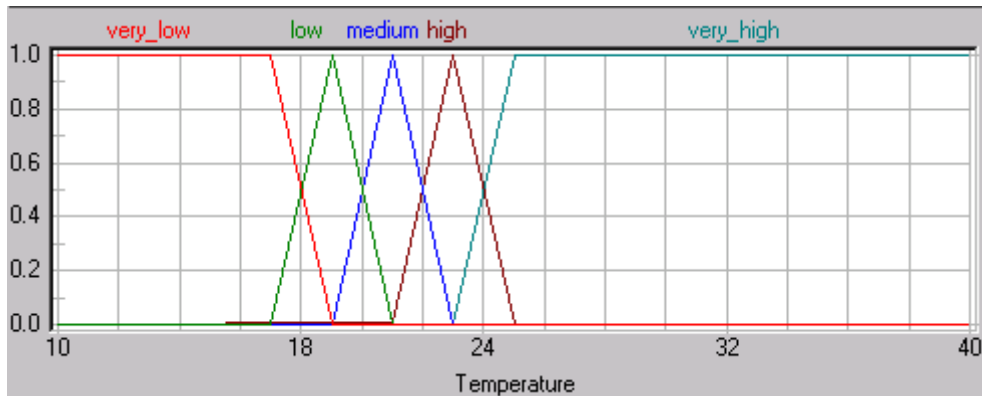
Taulukko 8. Tarkasteluissa tehdyt muutokset.

Aika simuloinnin alusta (h)	Huonelämpötilan asetusravo (°C)	Huoneessa olevien ihmisten lukumäärä	Laitekuorma päällä tai pois päältä	Valaistuskuorma päällä tai pois päältä
0	21	0	pois päältä	pois päältä
2,5	25	-"	-"	-"
5	-"	1	-"	-"
7,5	-"	-"	päällä	päällä
10	23	-"	-"	-"
12,5	-"	-"	pois päältä	pois päältä
15	-"	0	-"	-"
17,5	21	-"	-"	-"

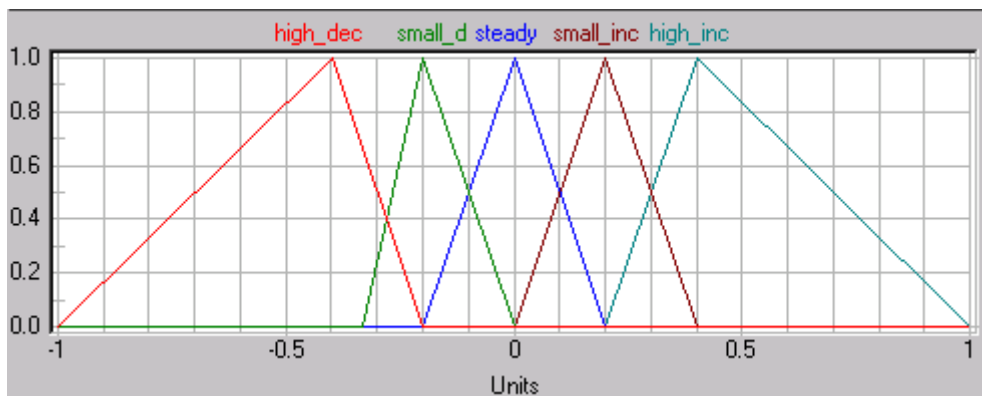
3.4.3 Testitapaukset

Seuraavaksi on selostettu, miten eri testitapaukset poikkeavat toisistaan. Kuvissa 20–27 on esitetty sumean säätimen sisäänmeno- ja ulostulomuuttujien jäsenyysfunktiot eri tapauksessa. Yhteenvedo tapauksista annetaan taulukossa 9.

Tapaus R (referenssitapaus)



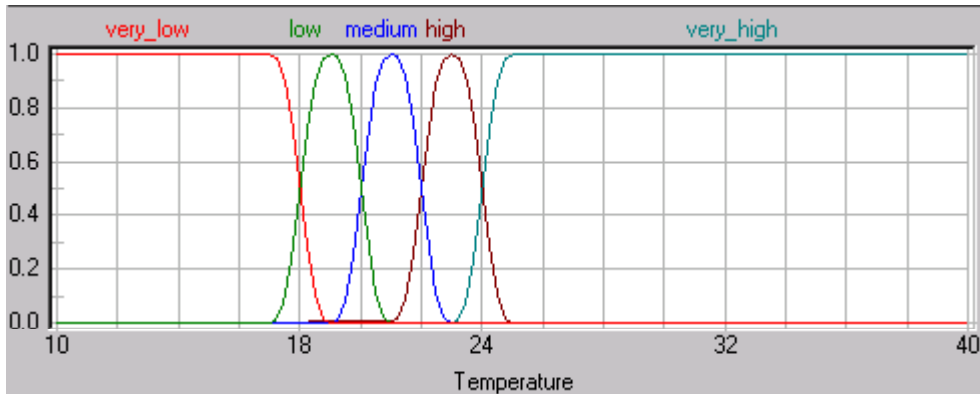
Kuva 20. Sisäänmenomuuttujien T_s ja T_{sas} jäsenyysfunktiot (molemmilla täsmälleen samanlaiset).



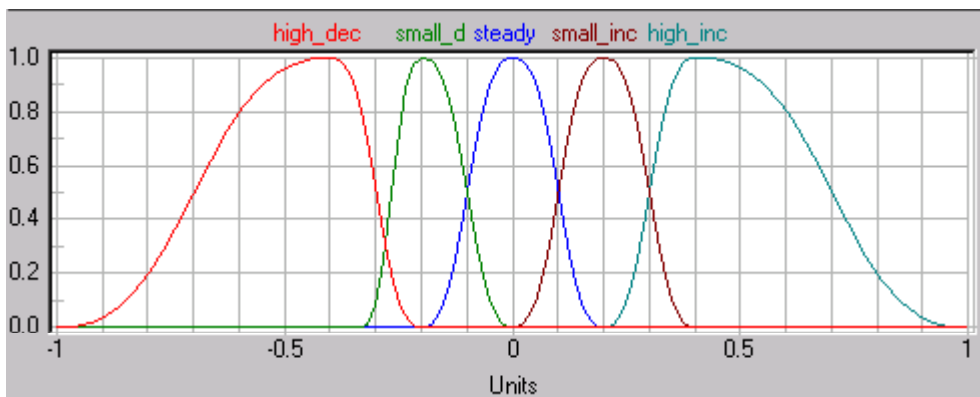
Kuva 21. Ulostulomuuttujan ΔT_{spas} jäsenyysfunktiot.

Tapaus A

Tässä tapauksessa jäsenyysfunktioiden muotoja on muutettu kolmiomaisesta S-muotoon, mutta määrittelypisteet on pidetty samoina kuin referenssitapauksessa.



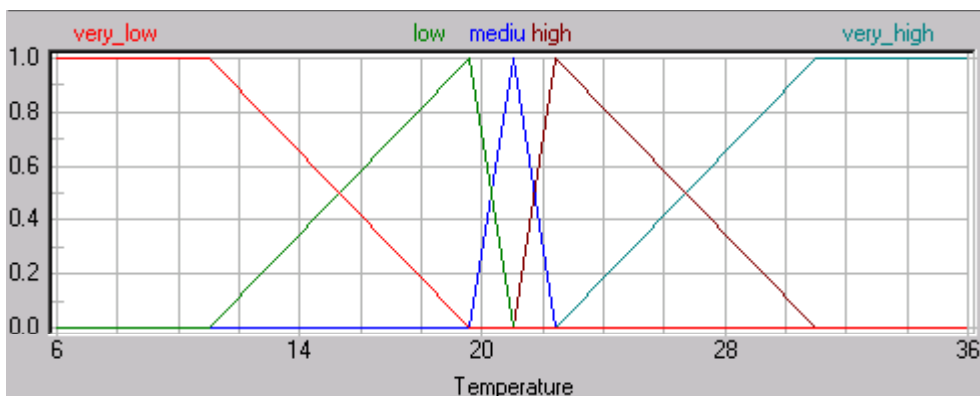
Kuva 22. Sisäänmenomuuttujien T_s ja T_{sp} jäsenyysfunktiot (molemmilla täsmälleen samanlaiset).



Kuva 23. Ulostulomuuttujan ΔT_{sp} jäsenyysfunktiot.

Tapaus B

Tässä tapauksessa sisäänmenomuuttujien jäsenyysfunktioita on muutettu siten, että ne ovat referenssitapausta laajemmalla alueella.

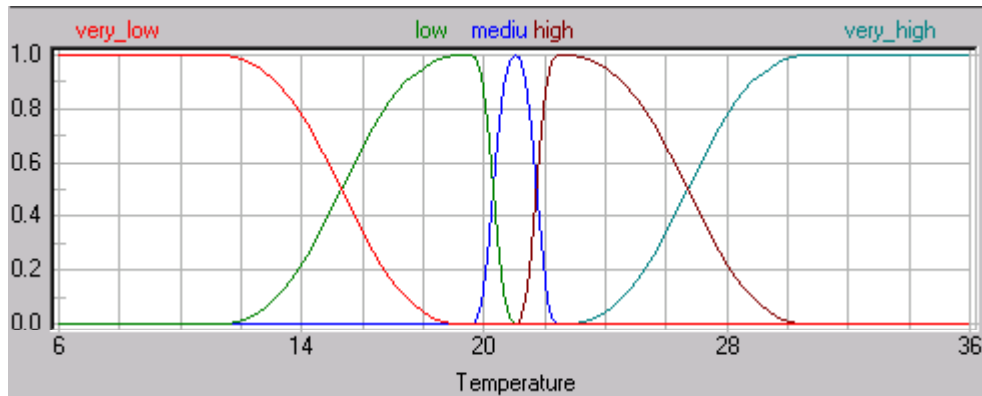


Kuva 24. Sisäänmenomuuttujien T_s ja T_{sp} jäsenyysfunktiot (molemmilla täsmälleen samanlaiset).

Ulostulomuuttujan jäsenyysfunktiot ovat samanlaiset kuin referenssitapauksessa.

Tapaus C

Tässä tapauksessa jäsenyysfunktioiden muotoja on muutettu tapauksen B kolmiomaisesta S-muotoon, mutta määrittelypisteet on pidetty samoina kuin tapauksessa B.

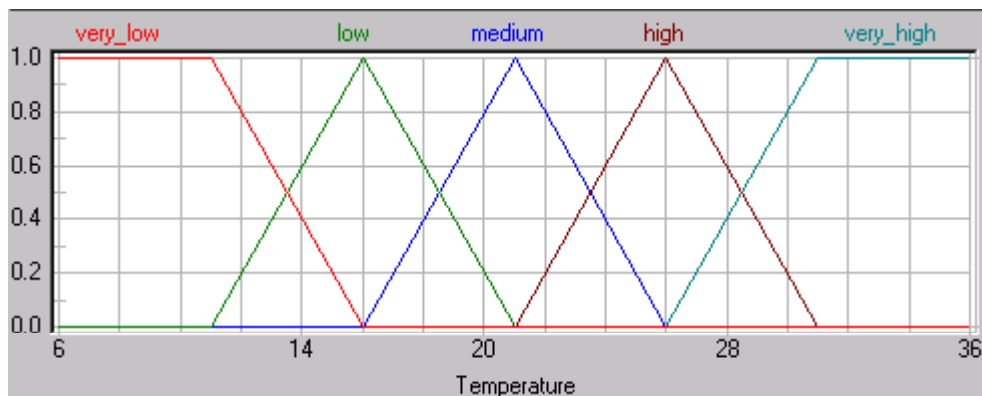


Kuva 25. Sisäänmenomuuttujien T_s ja T_{sas} jäsenyysfunktiot (molemmilla täsmälleen samanlaiset).

Ulostulomuuttojan jäsenyysfunktiot ovat samanlaiset kuin tapauksessa A.

Tapaus D

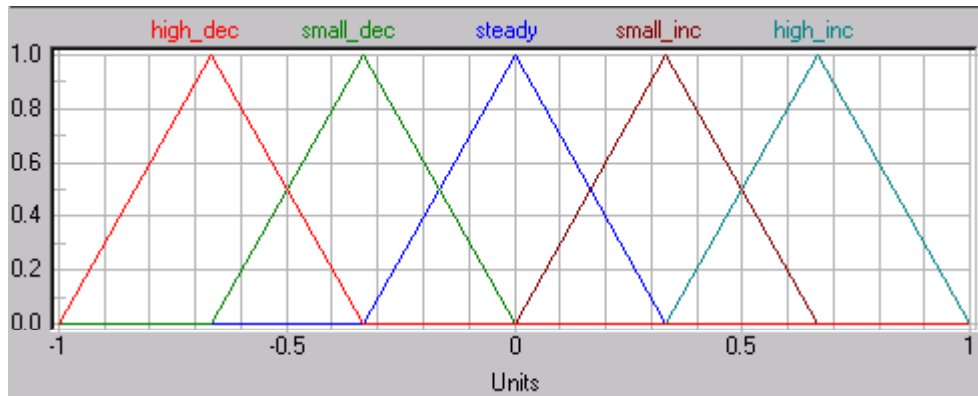
Tässä tapauksessa sisäänmenomuuttujien jäsenyysfunktiot ovat leveitä, kuten Fuzzy-Tech-ohjelma oletusarvona ehdottaa. Ulostulomuuttujien jäsenyysfunktiot ovat samanlaisia kuin referenssitapauksessa.



Kuva 26. Sisäänmenomuuttujien T_s ja T_{sas} jäsenyysfunktiot (molemmilla täsmälleen samanlaiset).

Tapaus E

Sisäänmenomuuttujien jäsenyysfunktiot ovat kuten tapauksessa D. Ulostulomuuttujan jäsenyysfunktiot on pantu tasaisesti koko arvoalueelle.



Kuva 27. Ulostulomuuttujan ΔT_{spas} jäsenyysfunktiot.

Tapaus F

Kaikissa edellisissä tapauksissa selkeyttämisessä (eli lingvistisen ulostuloarvon muuttamisessa lukuarvoksi) on käytetty ns. CoM-menetelmää (Center of Maximum). Tapauksessa F käytetään MoM-menetelmää (Mean of Maximum). Kaikki jäsenyysfunktiot ovat samanlaisia kuin tapauksessa E.

Tapaus G

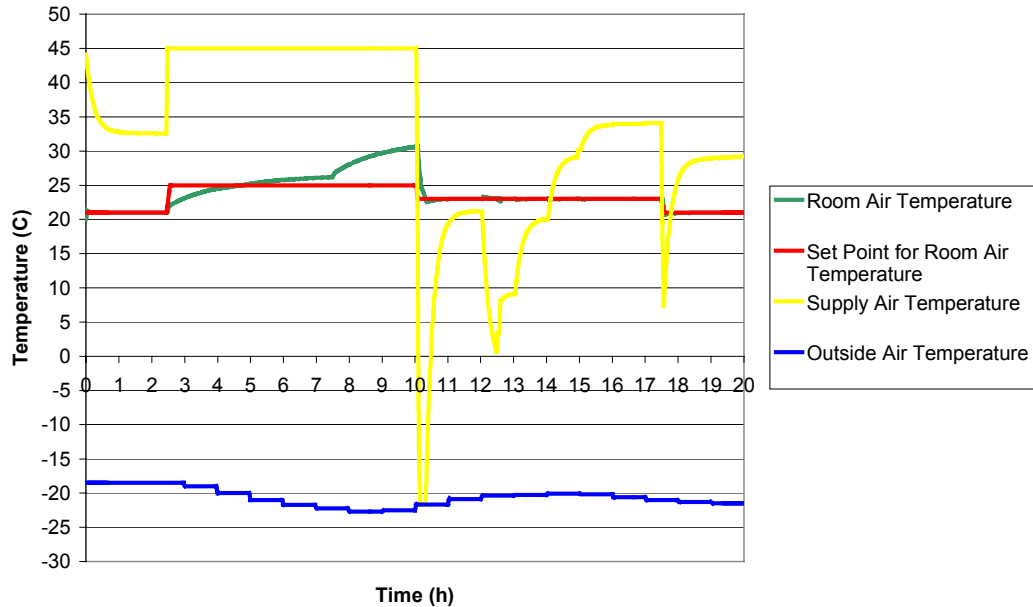
Tässä tapauksessa selkeyttämisessä käytetään CoA-menetelmää (Center of Area). Kaikki jäsenyysfunktiot ovat samanlaisia kuin tapauksessa E.

Tapaus PI

Tarkastelussa ei käytetä ollenkaan sumeaa säädintä, vaan se on korvattu hyvin viritetyllä PI-säätimellä.

3.4.4 Tulokset

Tapaus R (referenssitapaus)

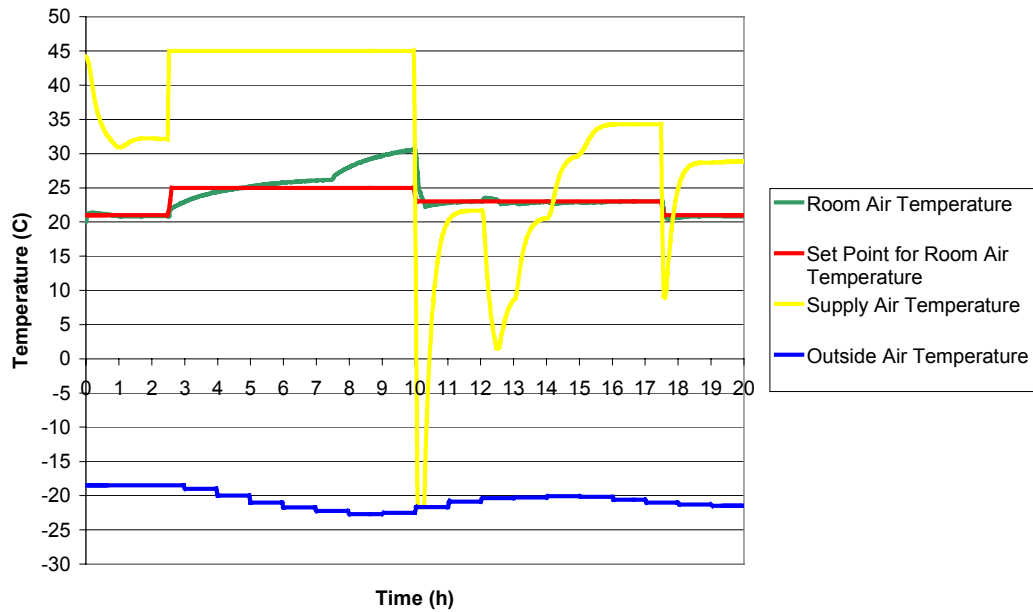


Kuva 28. Huonelämpötila, huonelämpötilan asetusrvo, sisäänpuhalluslämpötila ja ulkolämpötila referenssitapauksessa.

Säädin toimii kaikissa muutostilanteissa "oikein" (Kuva 28). Kun sekä asetusrvo että mittausarvo ovat 25 °C tai enemmän (eli kumpikin saa lingvistisen arvon `very_high`), ohjaus on säätökannan mukaisesti vakio (steady). Säädin toimii siis aivan oikein, kun sisäänmenomuuttujien jäsenyysfunktiot on määritelty kuten referenssitapauksessa. Tästä seuraa sisälämpötilan nousu. Ongelma ehkä pienenee äärimmäisiä jäsenyysfunktioita leventämällä. Ongelma olisi kokonaan vältettävissä, jos säätimen sisäänmenona olisi erosuure.

Testipenkin käytetyssä versiossa tuloilman lämpötila oli rajattu välille ulkolämpötila ...+45 °C. Tämän takia sisäänpuhalluslämpötila käy epärealistisesti hetkellisesti pakkasen puolella, kun tarvitaan viileätä tuloilmaa.

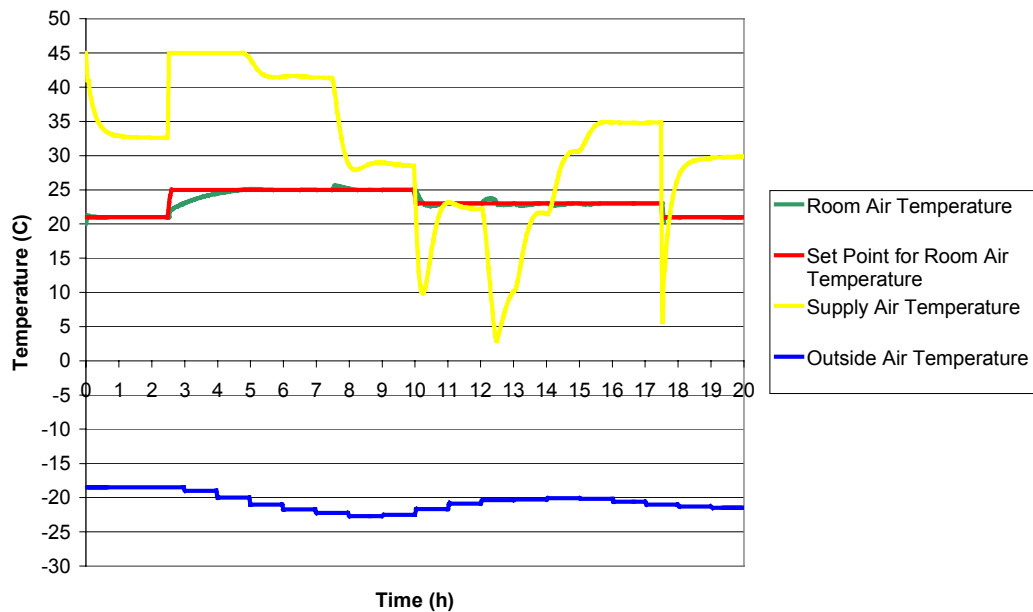
Tapaus A (kuten R mutta jäsenyysfunktiot S-muotoisia)



Kuva 29. Huonelämpötila, huonelämpötilan asetusrvo, sisäänpuhalluslämpötila ja ulkolämpötila tapauksessa A.

Tapaus A:n tulokset (kuva 29) ovat hyvin samantapaisia kuin referenssitapauksessa. Huonelämpötilan keskimääräisessä poikkeamassa asetusrvosta ja lämmitysenergian-kulutuksessa on marginaalinen ero referenssitapaukseen verrattuna (ks. kootut tulokset luvun lopusta).

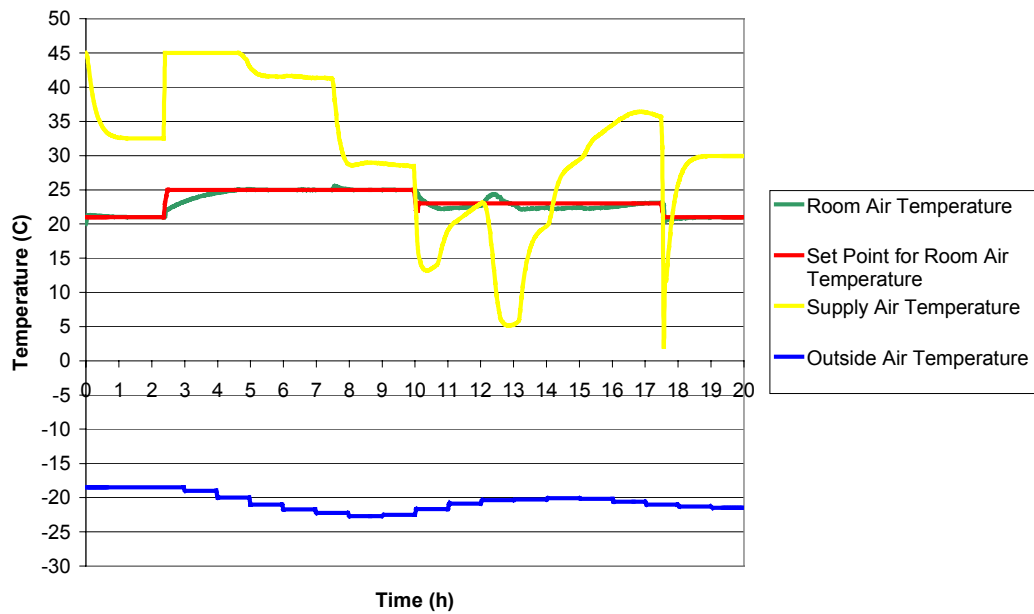
Tapaus B (kuten R mutta sisäänmenomuuttujien jäsenyysfunktiot laajemmalla alueella)



Kuva 30. Huonelämpötila, huonelämpötilan asetusrvo, sisäänpuhalluslämpötila ja ulkolämpötila tapauksessa B.

Tapaus B:n säätö toimii (kuva 30) selvästi paremmin kuin aikaisemmissa tapauksissa. Säädessä on hitautta ainoastaan nostettaessa sisälämpötilan asetusrvo 21 °C:sta 25 °C:seen. Tällöin lämmitysteho ei riitä nopeaan sisälämpötilan nostamiseen.

Tapaus C (kuten B mutta jäsenyysfunktiot S-muotoisia)



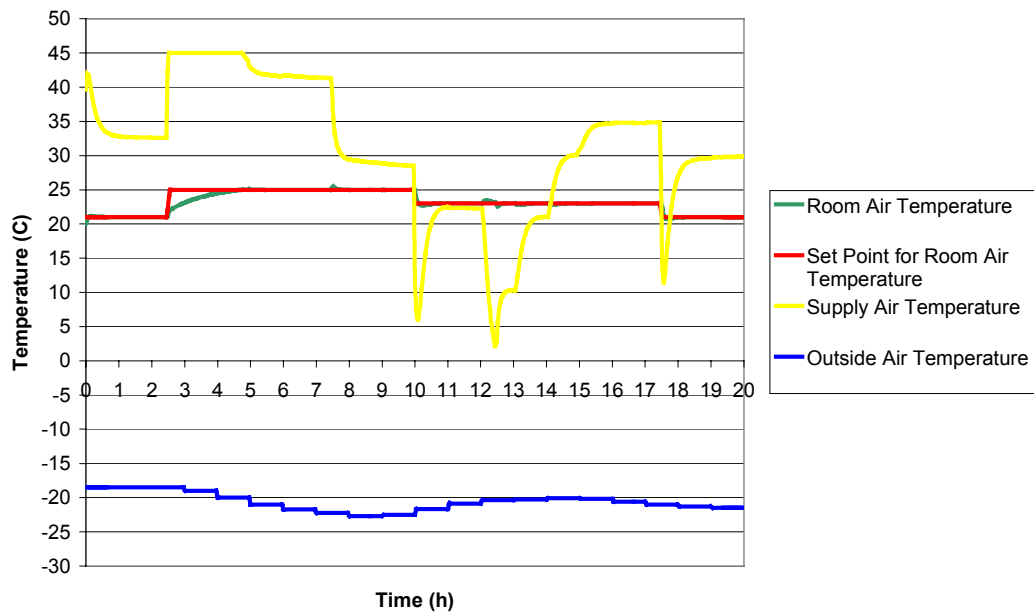
Kuva 31. Huonelämpötila, huonelämpötilan asetusrvo, sisäänpuhalluslämpötila ja ulkolämpötila tapauksessa C.

Tapaus C:n säätö (kuva 31) on samantapaista kuin tapauksessa B, mutta huonelämpötilan keskimääräinen poikkeama asetusrvosta on hieman suurempi kuin tapauksessa B.

Tapaus D (sisäänmenomuuttujien jäsenyysfunktiot leveitä ja säännöllisiä)

Säätö on kaikilta osin hyvin samantapainen kuin tapauksessa B.

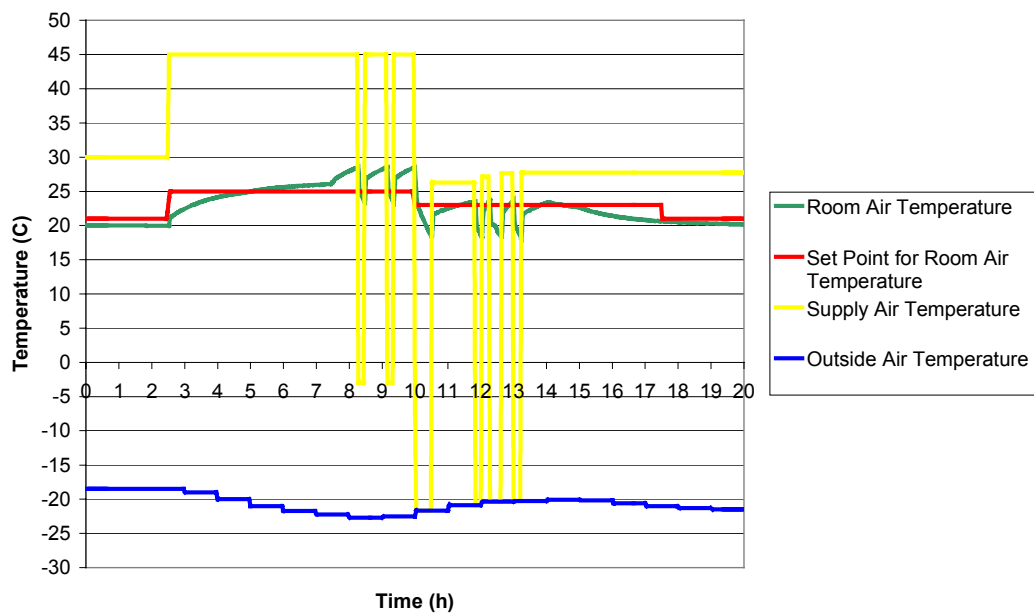
Tapaus E (sisäänmeno- ja ulostulomuuttujien jäsenyysfunktiot leveitä ja säännöllisiä)



Kuva 32. Huonelämpötila, huonelämpötilan asetusrvo, sisäänpuhalluslämpötila ja ulkolämpötila tapauksessa E.

Tapaus E:n säätö (kuva 32) toimii vielä hieman paremmin kuin tapauksessa B.

Tapaus F (selkeyttäminen MoM-menetelmällä)



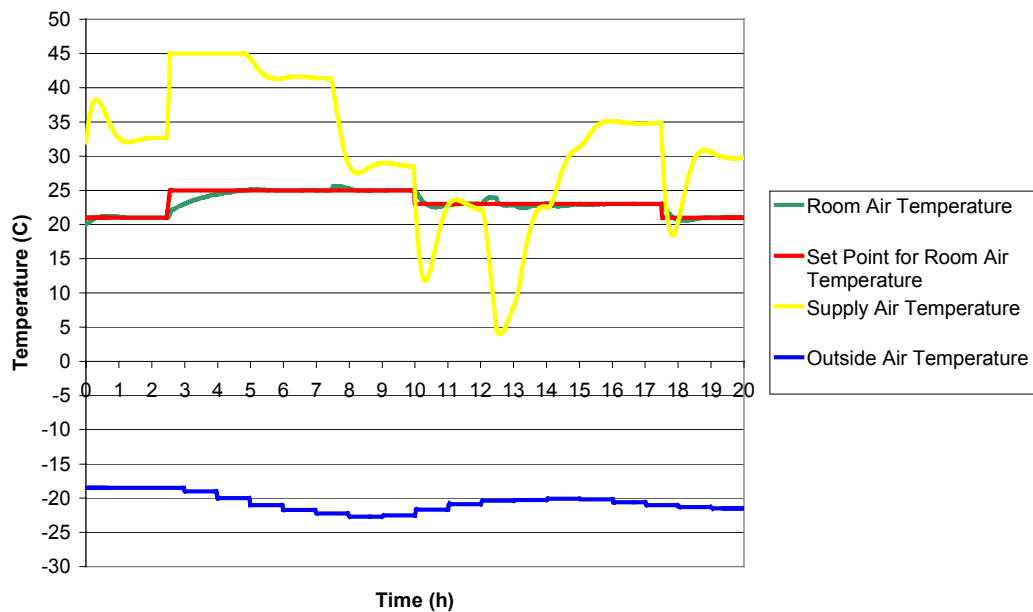
Kuva 33. Huonelämpötila, huonelämpötilan asetusrvo, sisäänpuhalluslämpötila ja ulkolämpötila tapauksessa F.

Tapaus F:n säätö (kuva 33) toimii huonosti. Säättöpoikkeamaa esiintyy usein ja ohjaus heiluu liikaa. Tämä johtuu siitä, että MoM-menetelmä antaa portaittaisia ulostuloja, eikä siten sovellu säätösovelluksiin.

Tapaus G (selkeyttäminen CoA-menetelmällä)

Säätö toimii hyvin. Säättötulos on samaa luokkaa kuin tapauksessa E.

Tapaus PI (PI-säädin)



Kuva 34. Huonelämpötila, huonelämpötilan asetusrvo, sisäänpuhalluslämpötila ja ulkolämpötila tapauksessa PI.

Hyvin viritetyllä PI-säätimellä (kuva 34) saavutetaan hyvä säätötulos.

Kootut tulokset

Taulukko 9. Huonelämpötilan keskimääräinen poikkeama asetusarvostaan sekä lämmitysenergiankulutukset eri testitapauksissa.

Tapaus	Huonelämpötilan keskimääräinen poikkeama asetusarvostaan (°C)	Lämmitysenergiankulutus (kWh)	Lämmitysenergia suhteessa referenssiin (%)
R	0,82	38,04	—
A	0,89	37,81	- 0,6
B	0,2	36,19	- 4,9
C	0,37	35,87	- 5,7
D	0,2	36,15	- 5,0
E	0,17	36,14	- 5,0
F	1,29	37,52	- 1,4
G	0,17	36,16	- 4,9
PI	0,28	36,13	- 5,0

Tarkastelujen perusteella voidaan todeta, että jäsenyysfunktioiden määrittelemisellä voi olla säätötulokseen. Ainakin tarkastellussa yksinkertaisessa tapauksessa hyvin viritetty PI-säädin toimii lähes yhtä hyvin kuin oikein aseteltu sumea säädin.

3.5 Yhteenveto luvusta 3

Tässä luvussa käsiteltiin säätimien toiminnan arvioimista yleisesti ja erityisesti lämmitysjärjestelmissä. Lämmitysjärjestelmien säätimien hyvyyskriteerejä ovat asumismukavuus ja energiataloudellisuus. Asumismukavuus toteutuu, kun rakennuksen sisälämpötila pysyy asetusarvossaan hyvin pienin vaihteluin. Energian kulutuksen minimoimiseksi säätöjärjestelmän tulee reagoida nopeasti sisälämpötilan muutoksiin sekä sisälämpötilan asetusarvon muutoksiin.

Lisäksi käsiteltiin älykkäiden järjestelmien käyttöä säätimien virityksessä eli itsevirittyviä ja adaptiivisia säätäjiä sekä sumean logiikan ja neuroverkkojen soveltamista virittämiseen. Adaptiivisella säätäjällä tarkoitetaan itsevirittyvää säätäjää, joka pystyy mukautumaan prosessin muutoksiin. Todettiin, että sumeaa logiikkaa on hyvä käyttää adaptiivisessa säädössä, mikäli virityksestä on käytettävissä asiantuntijatietoa, joka voidaan helposti esittää sanallisesti. Neuroverkoista on hyötyä erityisesti adaptiivisen säädön rakentamisessa, mikäli säädettävän prosessin matemaattisen mallin rakenne ei ole tiedossa, mutta mallista on käytössä input-output-mittauksia.

Luvussa kuvattiin myös sumeaa logiikkaan perustuvan automaattisen virittimen kehitystyötä. Automaattista viritintä kokeiltiin sekä hitaan että nopean järjestelmän yhteydessä ja sitä verrattiin perinteisiin viritysratkaisuihin. Menetelmien toteutettavuudesta käytännön talotekniikassa voidaan todeta, että ehtolauseilla toteutettu viritin on helposti kirjoitettavissa koodiksi. Simulointiympäristössä ehtolauseista muodostettu viritin vaati yhteensä 72 yhtälöä. Sumeaan logiikkaan perustuva viritin tarvitsisi päättelijäosaa varten erillisen koodin. Simulointien perusteella todettiin, että sumeaa logiikkaa hyödyntävä viritin on laskennallisesti raskaampi kuin pelkkiin ehtolauseisiin perustuva viritin. Käytännön toteutuksen muisti- ja prosessoritehovaatimuksia on kuitenkin mahdoton arvioida etukäteen.

Lisäksi tarkasteltiin yksinkertaisella järjestelmällä sumean säätimen ominaisuuksien vaikutusta säätötulokseen. Tarkastelut toteutettiin tekemällä ennalta määrätty vakiotesti usealle eri tapaukselle. Vaikka testijakso olikin lyhyt, saatiin eri tapausten välille eroja. Keskeisin johtopäätös on, että jäsenyysfunktioiden on katettava tarkasteltava alue riittävästi laajasti.

4. Radiaattoriverkoston säätöön ja kytkentään liittyvät ratkaisut

Tämän osatehtävän tavoitteena oli kehittää menetelmiä lämmityksen säätöön. Ennen työn alkua selvitettiin lämmityksen säädön ongelmia vesipatterilämmitteisessä kerrostalossa. Keskeisiksi ongelmiksi ja kehittämiskohteiksi paljastuivat seuraavat: A) kuinka löytää lämmitysverkoston menoveden kompensointikäyrä helposti (itsestään) ja B) kuinka verkosto voitaisiin perussäätää helposti (itsestään).

Luvussa 4.1 on paneuduttu ongelmaan A ja on kehitetty menetelmä, joka muodostaa menoveden kompensointikäyrän automaattisesti. Kehitettyä menetelmää on testattu simuloimalla. Luvussa 4.2 on tarkasteltu lämmitysverkoston pumpun kierroslukusäätöä. Eri säätötapojen energiataloudellisuutta on myös vertailtu.

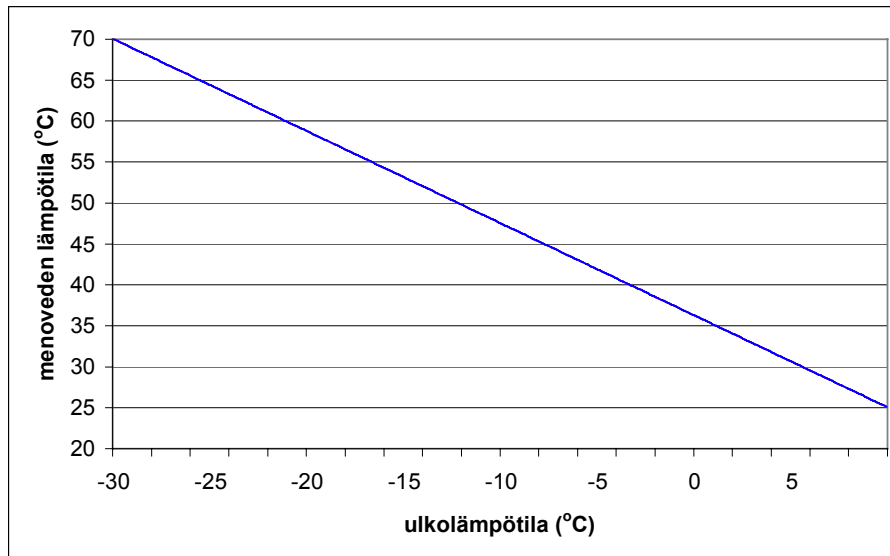
Luvun 4.3 tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon energiaa olisi saatavissa radiaattoriverkoston paluuedestä ilmastointikoneeseen. Tarkastelun kohteena on mm. lämmitysverkoston jäähtymä, koska suuremman jäähtymän etuja ovat mm. pumppauskustannusten pieneneminen ja tilausvesivirran pieneneminen. Kaukolämpölaitokselle palaavan veden lämpötilan aleneminen on myös lämpölaitoksen kannalta toivottavaa. Luvussa 4.4 esitetään kehitettyjen menetelmien kustannusvaikutukset.

4.1 Menoveden lämpötilan ulkolämpötilakompensointi

4.1.1 Nykyinen käytäntö

Esimerkki kompensointikäyrästä esitetään kuvassa 35. Kompensointikäyrä asetetaan kokeilemalla. Kun asukkaat valittavat kylmyyttä tai kuumuutta, huoltomies nostaa tai laskee kompensointikäyrää tai muuttaa sen jyrkkyyttä.

Kompensointikäyrä on yleensä suoran muotoinen, mutta se voi olla muunkin muotoinen. Jos ollaan tarkkoja, sovitteen tulisi olla käyrän muotoinen, koska rakennuksen lämpötehon tarve ei riipu aivan lineaarisesti ulkolämpötilasta eikä pattereiden luovuttama teho aivan lineaarisesti menolämpötilasta. Yleensä kuitenkin riittävän tarkkaan tulokseen päästään suoramuoteisella kompensointikäyrällä.



Kuva 35. Lämmitysverkoston menoveden lämpötilan ulkolämpötilakompensointi. Esi-merkki kompensointikäyrästä.

4.1.2 Kehitettävän menetelmän vaatimukset

Työn tavoitteena on kehittää menetelmä, joka muodostaa kompensointikäyrän automaattisesti. Kompensointikäyrä tulisi pystyä muodostamaan luotettavasti ja riittävän nopeasti, vaikka käyrä olisikin alun perin selvästi väärässä.

Menetelmän tulisi olla mahdollisimman yksinkertainen, ymmärrettävä, eikä se saa vaatia kohtuuttomasti laskentaa tai muistia.

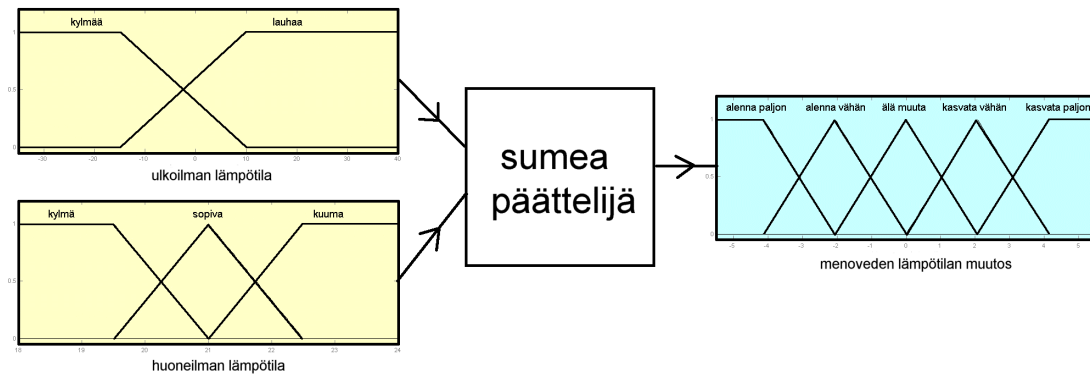
Menetelmä ei saa vaatia monia mittauksia. Ulkoilman lämpötilan ja menoveden lämpötilan lisäksi mitataan ainoastaan huoneilman lämpötila tai lämpötiloja.

Kompensointikäyrä kertoo ulkolämpötilan ja menoveden lämpötilan suhteen. Kompensointikäyrän automaattista muodostamista hankaloittaa se, että huonelämpötilaan vaikuttavat monet muutkin tekijät kuin ulkolämpötila, erityisesti sisäiset kuormat (ihmiset, laitteet ym.) sekä ikkunoista tuleva auringon säteily, jotka vaihtelevat suuresti ajankohdan mukaan.

Toinen kompensointikäyrän muodostamista vaikeuttava tekijä on, että rakennuksen suuren massan vuoksi huonelämpötilan muutokset ovat hitaita. Ulkolämpötilan muuttuminen tai menoveden lämpötilan muuttaminen vaikuttavat vasta viiveen jälkeen.

4.1.3 Kehitetty menetelmä

Kompensointikäyrän automaattisessa muodostamisessa käytetään sumeaa päättelijää, joka laskee ulkoilman lämpötilasta ja huoneilman lämpötilasta tarvittavan menoveden lämpötilan muutoksen. Sumean päättelijän rakenne esitetään kuvassa 36 ja säännöstö taulukossa 10.



Kuva 36. Sumean päättelijän periaatteellinen rakenne: huoneilman lämpötilasta ja ulkolämpötilasta lasketaan tarvittava muutos menoveden lämpötilaan.

Taulukko 10. Sumean päättelijän säännöt.

1. Jos huonelämpötila on ”kylmä” ja jos ulkona on ”kylmää”, kasvata menoveden lämpötilaa ”vähän”.
2. Jos huonelämpötila on ”kylmä” ja jos ulkona on ”lauhaa”, kasvata menoveden lämpötilaa ”paljon”.
3. Jos huonelämpötila on ”kuuma” ja jos ulkona on ”kylmää”, laske menoveden lämpötilaa ”vähän”.
4. Jos huonelämpötila on ”kuuma” ja jos ulkona on ”lauhaa”, laske menoveden lämpötilaa ”paljon”.
5. Jos huonelämpötila on ”sopiva” ja jos ulkona on ”kylmää”, älä muuta menoveden lämpötilaa.
6. Jos huonelämpötila on ”sopiva” ja jos ulkona on ”lauhaa”, älä muuta menoveden lämpötilaa.

Alustavat tarkastelut osoittivat, että suoramutoinen kompensointikäyrä on riittävä. Käyrämuotoista tai useasta suorasta koostuvaa kompensointikäyrää ei tarvita. Suoramutoisen kompensointikäyrän etuna on yksinkertaisuus, koska suora voidaan kuvata kahden pisteen avulla. Kun kompensointikäyrä kuvataan kahden pisteen avulla, eikä se koostu isosta määrästä pisteistä, se voitaneen saada nopeasti kohdalleen.

Periaate jolla suoramutoista kompensointikäyrää muokataan:

1. Kun saadaan tietoon ensimmäinen piste (ulkolämpötila ja sitä vastaava menoveden lämpötila), suuntaisierretään alkuperäistä suoraa.
2. Kun saadaan toinen piste tietoon, muodostetaan suora kahden jo tiedossa olevan pisteen välille.

3. Kun saadaan lisää pisteitä, muokataan suoraa siten, että uusi suora muodostuu uudesta pisteestä sekä vanhan suoran siitä pisteestä, joka on kauempana uutta pistettä.

Kompensointikäyrää ei muokata jatkuvasti, vaan ainoastaan yöajan lämpötilamittausten perusteella, koska huonelämpötilan ja ulkolämpötilan yhteys on tällöin selkeämpi. Päiväaikaan auringon säteilykuorma ja rakennuksen sisäiset kuormat vaihtelevat paljon, mutta yöllä ei ole auringon säteilyä (ainakaan lämmityskaudella). Myös lämpökuormat ovat likimain vakioita yöaikaan (ihmiset nukkuvat, pakastimet ovat päällä jne.).

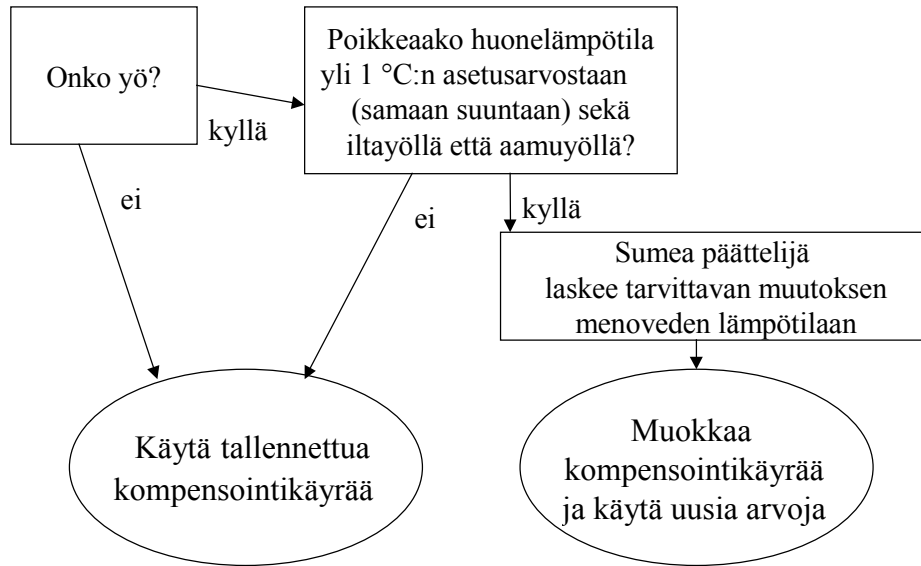
Kompensointikäyrää muokataan yöllä, mikäli muut ehdot täyttyvät. Laskelmissa kehitettiin kahdenlaisia muokkausehtoja (A ja B).

A) Mikäli huonelämpötila poikkeaa iltayöstä liian paljon asetusarvostaan, sumea päättelijä laskee, kuinka paljon menoveden lämpötilaa muutetaan. Mikäli aamuyöstä huonelämpötila on lähellä asetusarvoaan, näin saatu arvopari "ulkolämpötila – menoveden lämpötila" tallennetaan.

B) Mikäli huonelämpötila poikkeaa sekä iltayöstä että aamuyöstä samaan suuntaan ja riittävästi asetusarvostaan, sumea päättelijä laskee, kuinka paljon menoveden lämpötilaa muutetaan. Arvopari "ulkolämpötila aamuyöllä – uusi menoveden lämpötila" tallennetaan.

Jälkimmäinen tapa (B) antoi selvästi paremman tuloksen ja sitä käytetään jatkossa. Käyrän muokkaamiseen riittää tieto siitä, mihin suuntaan sitä pitää muuttaa ja paljonko sitä muutetaan. Vaikutus huonelämpötilaan tapahtuu oikeaan suuntaan. Rakennuksen suuren aikavakion vuoksi ei pystytä luotettavasti tarkistamaan, mihin uusilla arvoilla päädyttiin, niin kuin tapa A edellytti.

Menetelmän periaate esitetään kuvassa 37.



Kuva 37. Kompensointikäyrän muokkaamisen periaate.

Rakennuksessa ei voida käyttää yöaikaista menoveden lämpötilan pudotusta, kun kompensointikäyrä muodostetaan.

4.1.4 Menetelmän testaus simuloimalla

Menetelmää testattiin simuloimalla TRNSYS-simulointiohjelmalla. Simuloitu jakso on neljä kuukautta vuoden alusta. Käytössä oli Helsingin säätiedot. Sumea malli muodostettiin Matlabin Fuzzy Toolboxilla, joka kytkettiin TRNSYS-ohjelmaan.

Lähtöarvot

Simuloituna kohteena oli tyypillinen kerrostaloasunto, jonka jokainen tila kuvattiin omana vyöhykkeenään. Rakennuksen vaippa, sisäiset kuormat ja muut lähtöarvot on dokumentoitu liitteessä A.

Lämmitysjärjestelmään kuuluvat vesikiertoiset patterit, mutta ei termostaattisia patteriventtiileitä. Virtaama kullakin patterilla pysyy siis vakiona. Simuloinnit suoritettiin ilman termostaattisia patteriventtiileitä, koska tällainen järjestelmä on vaikeampi säätää. Mikäli huonelämpötilat saadaan pysymään asetusarvossaan ilman termostaattiventtiileitä, siihen pystytään myös termostaattiventtiileillä varustetulla järjestelmällä.

Lämmönjakokeskusta ei ole mallinnettu, vaan on oletettu, että lämmönsiirrin pystyy jatkuvasti lämmittämään veden halutun lämpöiseksi. Putkistojen lämpöhäviöitä ei ole huomioitu.

Taulukossa 11 esitetään muita lämmitysjärjestelmäsimulointien lähtöarvoja.

Taulukko 11. Vesipattereiden mitoitus ja muita simulointien lähtöarvoja.

mitoitusulkolämpötila	-26 °C
mitoitushuonelämpötila	20 °C
menoveden lämpötila mitoitustilanteessa	70 °C
paluuveden lämpötila mitoitustilanteessa	40 °C
ylilämpötila mitoitustilanteessa	35 °C
lämmönluovutusekspONENTTI	1,3
pattereiden materiaali	teräs
lämmönluovutuksesta säteilyä/konvektiota	80 % / 20 %

Tulokset

Taulukossa 12 esitetään kahdeksan simulointilaskelman tulokset. Simulointilaskelmia on tehty neljällä eri kompensointikäyrän asennolla. Kaikilla neljällä kompensointikäyrällä on laskettu kaksi tapausta, joista toisessa kompensointikäyrä pysyy vakiona ja toisessa sitä muokataan laskennan aikana.

Kompensointikäyrän muokkaamisessa tarvitaan tietoa huonelämpötilasta. Näissä laskelmissa on oletettu, että huoneiston kaikkien huoneiden lämpötila mitataan ja huonelämpötilana käytetään keskimääräistä huonelämpötilaa.

Taulukko 12. Keskimääräinen huonelämpötila ja keskimääräinen poikkeama asetusravosta (21 °C) eri tapauksissa. Neljän kuukauden simulointijakso: tammikuu–huhtikuu.

	automaattinen kompensointikäyrän muokaus	menoveden lämpötila ulkolämpötilassa -30 °C (laskennan alussa) (°C)	Menoveden lämpötila ulkolämpötilassa 10 °C (laskennan alussa) (°C)	keskimääräinen huonelämpötila (°C)	keskimääräinen poikkeama asetusravosta (°C)
1a	ei	70	35	23,7	2,73
1b	on	"	"	21,4	0,50
2a	ei	60	40	23,4	2,71
2b	on	"	"	21,2	0,74
3a	ei	60	25	19,0	2,00
3b	on	"	"	20,9	0,57
4a	ei	70	25	20,8	0,54
4b	on	"	"	21,2	0,54

Tapauksissa 1a ja 2a kompensointikäyrä on liian korkealla, koska keskimääräinen huonelämpötila on yli 23 °C. Tapauksissa 1b ja 2 b kompensointikäyrä on muuttunut laskennan aikana edulliseen suuntaan. Keskimääräinen huonelämpötila poikkeaa vain vähän asetusarvosta.

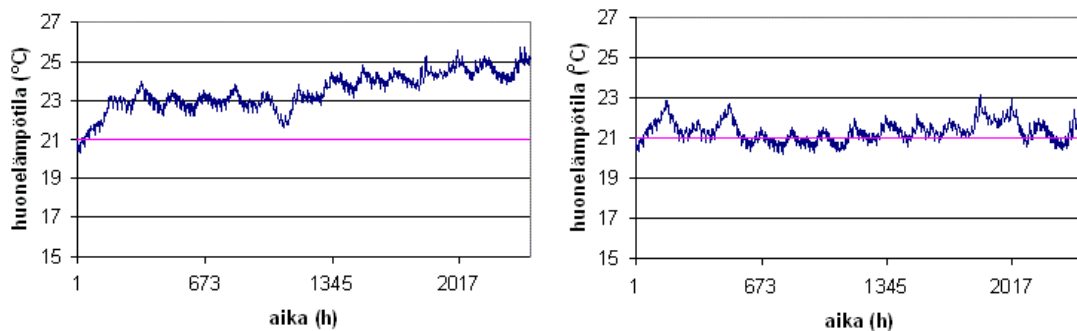
Tapauksessa 3a kompensointikäyrä on liian alhaalla, mutta tapauksessa 3b keskimääräinen huonelämpötila on lähellä asetusarvoa.

Tapauksessa 4a kompensointikäyrä on hyvässä asennossa. Tulokset ovat yhtä hyviä myös tapauksessa 4b.

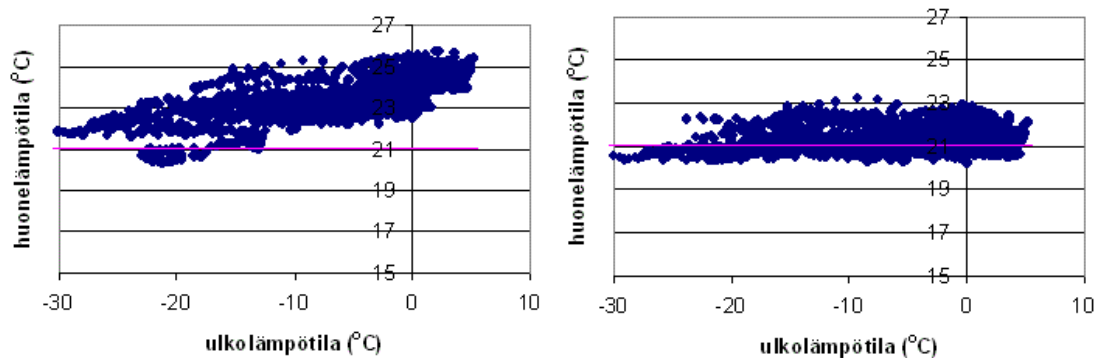
Kun kompensointikäyriä muokataan automaattisesti (tapaukset b), keskimääräinen poikkeama asetusarvosta on tapauksen mukaan 0,50–0,74 °C. Kompensointikäyrä löydetään siis hyvin kaikissa tapauksissa.

On huomattava, että tarkalleen asetusarvossa pysyminen ei ole mahdollista sisäisten kuormien vuoksi, koska järjestelmään ei kuulu jäähdytystä.

Kuvissa 38–39 esitetään keskimääräinen huonelämpötila ajan funktiona ja ulkolämpötilan funktiona kahdessa tapauksessa.



Kuva 38. Huonelämpötilojen keskiarvo ajan funktiona tapauksessa 1a (vasemmalla) ja tapauksessa 1b.



Kuva 39. Huonelämpötilojen keskiarvo ulkolämpötilan funktiona tapauksessa 1a (vasemmalla) ja tapauksessa 1b.

Lisätarkastelu 1: sumean päättelijän korvaaminen yhtälöllä

Edellä olevissa laskelmissa menoveden lämpötilan muutos laskettiin sumealla päättelijällä. Vertailun vuoksi laskettiin kaksi tapausta, jossa sumea päättelijä korvattiin seuraavalla yhtälöllä.

$$\Delta T_m = a (T_{h,asetus} - T_h) \quad (1)$$

jossa

ΔT_m muutos menoveden lämpötilassa,

T_h huonelämpötila,

$T_{h,asetus}$ huonelämpötilan asetusarvo,

$a = 2,5$.

Ilman sumeaa päättelijää lasketut tapaukset vastaavat lähtöarvoiltaan tapauksia 1b ja 2b. Tulokset ovat taulukossa 13.

Taulukko 13. Keskimääräinen huonelämpötila ja keskimääräinen poikkeama asetusarvosta (21 °C) käytettäessä sumeaa päättelijää ja kun se on korvattu yhtälöllä. Neljän kuukauden simulointijakso: tammikuu–huhtikuu.

	menoveden lämpötila ulkolämpötilassa -30°C (laskennan alussa) (°C)	menoveden lämpötila ulkolämpötilassa 10°C (laskennan alussa) (°C)	keskimääräinen huonelämpötila (°C)	keskimääräinen poikkeama asetusarvosta (°C)
sumea päättelijä	70	35	21,4	0,50
yhtälö 1	"	"	21,2	0,47
sumea päättelijä	60	40	21,2	0,74
yhtälö 1	"	"	21,2	0,60

Tulokset ovat yhtä hyviä, jopa hieman parempia ilman sumeaa päättelijää, joten sumeaa päättelijää ei tarvita kompensointikäyrän muodostamisessa.

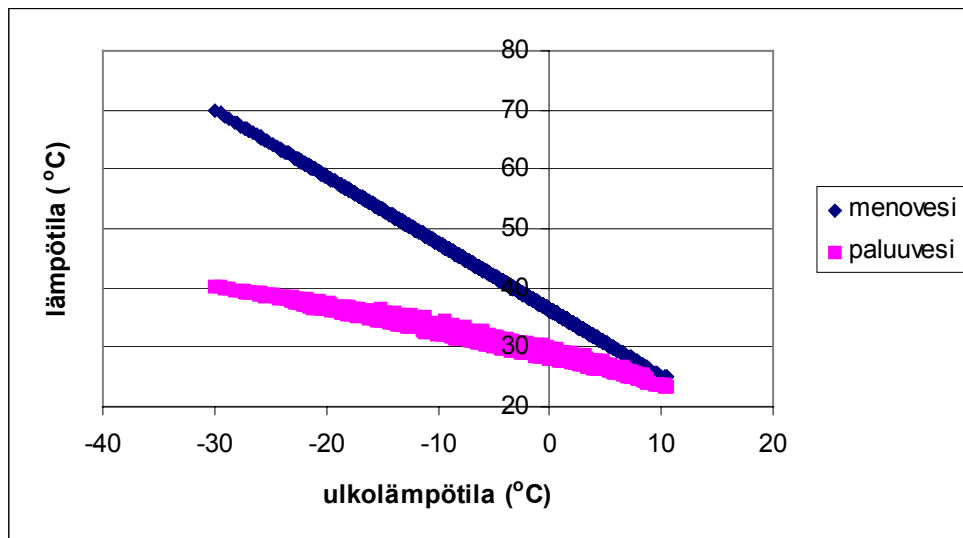
Lisätarkastelu 2: huonelämpötilamittauksen korvaaminen lämmitysverkoston paluuvien lämpötilamittauksella

Edellä olevissa laskelmissa huonelämpötilan arvona on käytetty huonelämpötilojen keskimääräistä lämpötilaa. Todellisuudessa tällaista arvoa ei ole käytettävissä, koska monien huonelämpötilojen mittaaminen ei ole toteutettavissa helposti ja vähin kustannuksin.

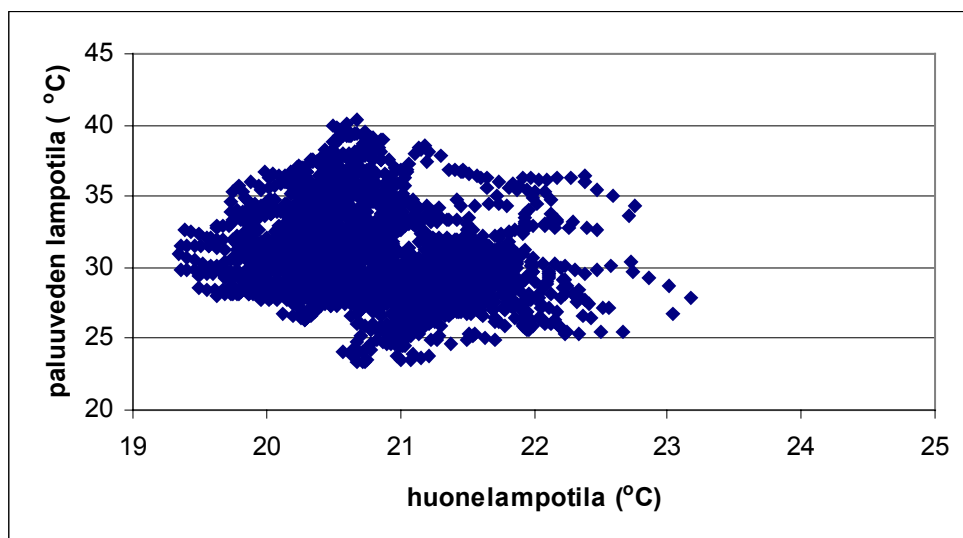
Vastaavaan tulokseen voitaisiin päästä mittaamalla vain yhden huoneen lämpötila. Huone tulisi valita siten, että tämän huoneen lämpötila edustaisi mahdollisimman hyvin rakennuksen eri huonelämpötiloja. Käytännössä tällaisen huoneen löytäminen voi olla vaikeaa. Varmaankin monissa rakennuksen huoneissa huonelämpötila on melko lähellä keskiarvoa, mutta onko se sitä koko ajan? Jos koko rakennuksen menoveden lämpötila riippuu yhden huoneen lämpötilasta, mitä tapahtuu, kun ikkuna avataan kyseisessä huoneessa? Kompensointikäyrän muokkaaminen vaatii sitä, että huonelämpötila poikkeaa samaan suuntaan asetusarvosta sekä iltayöstä että aamuyöstä (kuva 37), joten ikkunan avaaminen ei välttämättä vaikuta kompensointikäyrään. Olisi kuitenkin suotavaa, että huonelämpötilana käytettäisiin vähintään muutaman huoneen keskiarvoa.

Työssä tarkasteltiin myös, olisiko paluuvien lämpötilasta pääteltävissä huonelämpötiloja. Huonelämpötilan noustessa paluuvien lämpötilan pitäisi nousta. Paluuvien lämpötilan mittaaminen on helposti toteutettavissa lämmönjakokeskuksessa. Mittausta puoltaa myös se, että lämpötila kertoo verkoston tilasta, esimerkiksi liian suuresta virtaamasta, jolla on vaikutusta energiankulutukseen.

Kuvat 40–43 havainnollistavat menoveden lämpötilän, paluuveden lämpötilän ja huoneilman lämpötilän riippuvuutta toisistaan. Kuvat on piirretty simulointituloksista.

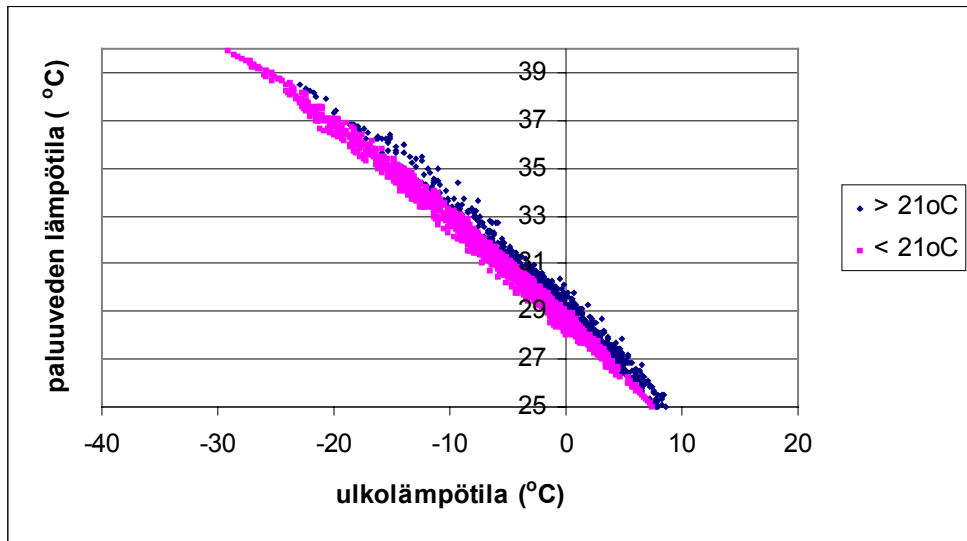


Kuva 40. Menoveden ja paluuveden lämpötilän suhde ulkolämpötilaan.



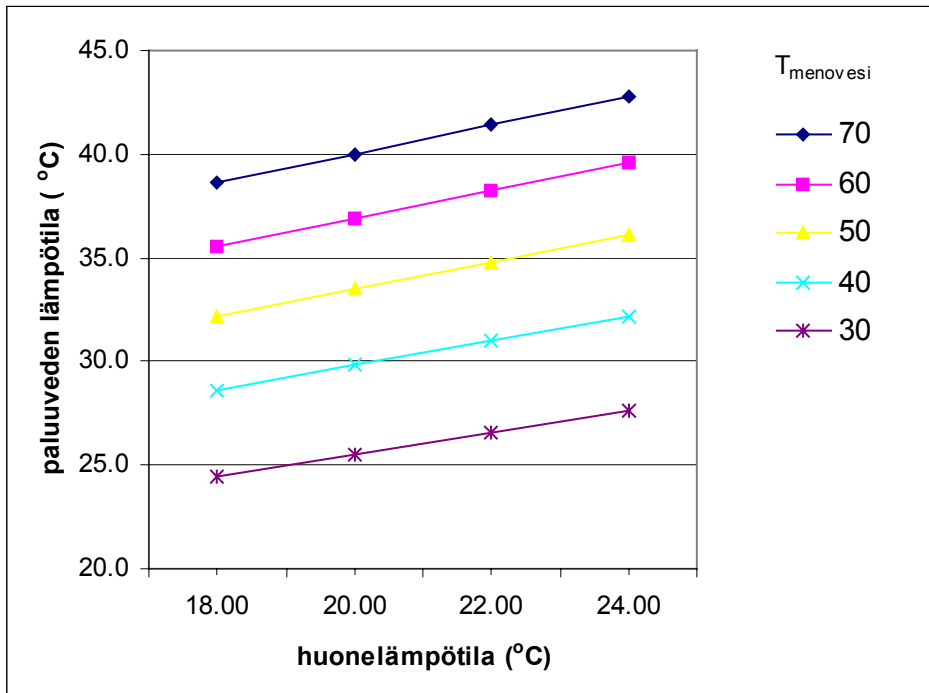
Kuva 41. Huonelämpötilän (keskimääräisen) ja paluuveden lämpötilän suhde.

Kuvista havaitaan, että paluuveden lämpötilän ja ulkolämpötilän korrelaatio on selkeä. Vastaavaa korrelaatiota ei ole löydettävissä paluuveden lämpötilän ja huonelämpötilän väliltä. Koska ulkolämpötila (tai paremminkin menoveden lämpötila) vaikuttaa paluuveden lämpötilaan enemmän kuin huonelämpötila, on piirretty kuva ulkolämpötilän ja paluuveden lämpötilän suhteesta eri huonelämpötiloilla.



Kuva 42. Paluuvien lämpötila ulkolämpötilan ja huonelämpötilan mukaan.

Kuvasta 42 havaitaan, että yli 21 °C:n huonelämpötiloilla paluuvien lämpötila on hie-
man korkeampi kuin alle 21 °C:n huonelämpötiloilla. Kuva 43 havainnollistaa lämpöti-
lojen suhdetta.



Kuva 43. Menoveden lämpötilan, paluuvien lämpötilan ja huonelämpötilan suhde.

Kuvan 43 perusteella muodostettiin yhtälö, jonka avulla arvioidaan huonelämpötila me-
novien lämpötilasta ja paluuvien lämpötilasta. Tätä yhtälöä käytettiin kompensointi-
käyrän muodostamisessa ja sillä korvattiin huonelämpötilojen mittaus. Tulokset simu-
loinneista esitetään taulukossa 14.

Taulukko 14. Keskimääräinen huonelämpötila ja keskimääräinen poikkeama asetusarvosta (21 °C), kun kompensointikäyrän muodostamisessa käytetään hyväksi huonelämpötilojen keskiarvoja ja kun se korvataan paluuveden lämpötilalla. Neljän kuukauden simulointijakso: tammikuu – huhtikuu.

kompensointikäyrän muodostamisessa käytetty mittaus	menoveden lämpötila ulkolämpötilassa -30 °C (laskennan alussa) (°C)	menoveden lämpötila ulkolämpötilassa 10 °C (laskennan alussa) (°C)	keskimääräinen huonelämpötila (°C)	keskimääräinen poikkeama asetusarvosta (°C)
huonelämpötilojen keskiarvo	70	35	21,4	0,50
paluuveden lämpötila	"	"	21,4	0,62
huonelämpötilojen keskiarvo	60	40	21,2	0,74
paluuveden lämpötila	"	"	21,4	0,76
huonelämpötilojen keskiarvo	60	25	20,9	0,57
paluuveden lämpötila	"	"	20,9	0,61
huonelämpötilojen keskiarvo	70	25	21,2	0,54
paluuveden lämpötila	"	"	21,3	0,58

Taulukosta havaitaan, että huonelämpötilojen poikkeama asetusarvosta on suurempi niissä tapauksissa, joissa huonelämpötilojen mittaus korvataan paluuveden lämpötilojen mittauksella. Erot eivät ole kuitenkaan suuria. Paluuveden lämpötilan mittauksella saadut tulokset ovat tyydyttäviä.

Tuloksia tarkastellessa havaittiin, että paluuveden lämpötilasta pystyttiin arvioimaan keskimääräinen huonelämpötila melko tarkasti. Keskimääräinen virhe oli noin 0,35 °C. Suurimmillaan virhe oli menoveden lämpötilan porrasmaisten muutosten jälkeen. Tämä johtuu siitä, että paluuveden lämpötilan arvioinnissa käytetty kaava ei ota huomioon lämmön varastoitumista pattereissa, vaan laskee jatkuvuustilan lämpötiloja.

Tarkkuus riippuu todellisuudessa myös pattereiden mitoituksista. Mikäli pattereiden mitoitus on epätarkka, jolloin tarvittava jäähtymä vaihtelee eri huoneissa, heikkenevät mahdollisuudet arvioida keskimääräistä huonelämpötilaa paluuveden lämpötilasta.

4.1.5 Johtopäätökset luvusta 4.1

Simulointitulosten mukaan kompensointikäyrä pystytään muodostamaan automaattisesti työssä kehitetyllä menetelmällä. Kompensointikäyrän muodostamisessa voidaan soveltaa sumeaa päättelyä, mutta sen soveltaminen ei osoittautunut kannattavaksi, koska yhtä hyviin tuloksiin päästään, kun sumea päättely korvataan yksinkertaisella kaavalla. Menetelmä on varsin yksinkertainen, mutta tarvitsee mittaustietoa huonelämpötiloista.

Laskelmissa kompensointikäyrää muokattiin koko neljän kuukauden simulointijakson ajan. Todellisissa kohteissa saattaa olla järkevää, että kompensointikäyrä kiinnitetään, kun hyvät arvot ovat löytyneet. Tarvittaessa automaattinen kompensointikäyrän muokaus voidaan ottaa uudelleen käyttöön.

Vaikka korrelaatio huonelämpötilan ja paluuveden lämpötilan välillä ei ole kovin selkeä, mittaamalla paluuveden lämpötila voidaan tarvittaessa välttyä huonelämpötilojen mittaukselta. Todellisessa tilanteessa ei ehkä päästä yhtä hyvään tarkkuuteen kuin simuloinneissa, varsinkin jos verkosto ei ole tasapainossa. Parasta olisi, jos ei oltaisi pelkän paluuveden lämpötilan mittauksen varassa, vaan huonelämpötiloista saataisiin tietoa muutenkin. Jos huonelämpötiloja ei mitata, voidaan niitä arvioida poistoilman lämpötilasta. Mikäli rakennuksessa on keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä, poistoilman lämpötila antaa useimmiten, ainakin asuinkerrostaloissa, hyvän kuvan koko rakennuksen huonelämpötiloista.

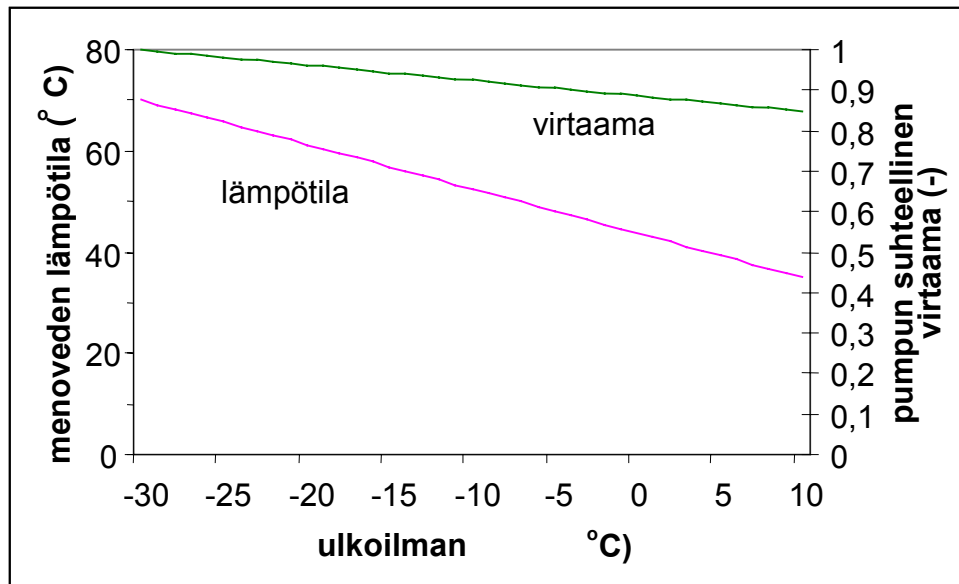
Tulevaisuudessa huonelämpötilojen mittaustiedot pystytään oletettavasti välittämään lämmönjakokeskukseen edullisemmin kuin nykyisin. Markkinoilla on jo laitteita, jotka pystyvät siirtämään tietoa sähköverkossa, jolloin erillistä kaapelointia ei tarvita. Myös langattomat ratkaistut ovat yleistymässä.

4.2 Pumpun kierrosluvun säätö

Luvun 4.1 laskelmissa vesivirrat olivat vakioita. Seuraavassa esitetään tulokset laskelmista, joissa pumpun kierroslukua säädetään. Pumppu oletetaan portaattomasti säädetäväksi. Taajuusmuuttajahäviöt eivät ole mukana sähkökulutuksen säästöissä.

Koska näissä tarkasteluissa käytetty simulointiohjelmisto (TRNSYS) ei sovellu verkostohydrauliikan laskemiseen, on tehty seuraavat oletukset: pumpun paineenkorotus on riittävä ja virtaama muuttuu yhtä monta prosenttia kaikilla pattereilla. Todellisuudessa pumpun paineen riittävyys asettaa rajan pumpun säädettävyydelle.

Simuloidussa tapauksessa pumpun virtaamaa rajoitetaan lauhalla seuraavasti (Kuva 44): ulkolämpötilassa $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ pumpun virtaama on mitoitusvirtaaman mukainen, ulkolämpötilassa $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 85 % mitoitusvirtaamasta. Tällä välillä pumpun virtaama muuttuu lineaarisesti.



Kuva 44. Menoveden lämpötilan ja virtaaman ulkolämpötilakompensointi.

Kun pumpun virtaamaa rajoitetaan, on luonnollista, että huonelämpötila on lauhalla ilmalla hieman alempi kuin vertailutapauksessa. Vertailutapauksessa (Taulukko 12, tapaus 1a) keskimääräinen huonelämpötila on $23,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja keskimääräinen poikkeama asetusarvosta on $2,73\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kun pumpun virtaamaa rajoitetaan, se vaikuttaa luonnollisesti huonelämpötiloja laskien. Vastaavat arvot ovat $23,1$ ja $2,08\text{ }^{\circ}\text{C}$. Säästö pumpun sähkönkulutuksessa on 26 %.

4.2.1 Menoveden virtaaman ulkolämpötilakompensointi

Tämän raportin luvussa 4.1 esitettiin menetelmä lämmitysverkoston menoveden lämpötilan ulkolämpötilakompensointiin. Koska lämmitysverkon menoveden lämpötilan ulkolämpötilakompensointikäyrä voidaan muodostaa automaattisesti, vastaavalla tavalla voitaneen muodostaa menoveden virtaaman kompensointikäyrä. Siis sen sijaan, että etsittäisiin automaattisesti menoveden lämpötilan ulkolämpötilan suhde, etsitäänkin menoveden virtaaman ja ulkolämpötilan suhde.

Tätä tarkoitusta varten voitaisiin muodostaa sumea päättelijä, niin kuin tehtiin luvussa 4.1. Simuloinnit suoritettiin kuitenkin korvaamalla sumea päättelijä yksinkertaisella

kaavalla, koska se näytti riittävältä myös luvun 4.1 tarkasteluissa. Kaava esitetään seuraavassa.

$$\Delta u = a (T_{h,asetus} - T_h) \quad (2)$$

jossa

Δu pumpun virtaaman suhteellinen muutos (0-1) (maksimivirtaamalla $u = 1$),

T_h huonelämpötila,

$T_{h,asetus}$ huonelämpötilan asetusarvo.

Laskelmia suoritettiin muutamilla a :n arvoilla. Tulokset olivat parhaita, kun a :n arvo oli 0,1.

Taulukossa 15 vertaillaan tuloksia, kun muodostetaan menoveden lämpötilan kompensointikäyrä ja menoveden virtaaman kompensointikäyrä.

Taulukko 15. Keskimääräinen huonelämpötila ja keskimääräinen poikkeama asetusarvosta (21 °C), kun muodostetaan menoveden lämpötilan kompensointikäyrä ja kun muodostetaan menoveden virtaaman kompensointikäyrä. Neljän kuukauden simulointijakso: tammikuu–huhtikuu.

	menoveden lämpötila ulkolämpötilassa -30 °C (laskennan alussa) (°C)	menoveden lämpötila ulkolämpötilassa 10 °C (laskennan alussa) (°C)	keskimääräinen huonelämpötila (°C)	keskimääräinen poikkeama asetusarvosta (°C)
menoveden lämpötilan kompensointi	70	35	21,4	0,50
menoveden virtaaman kompensointi	-"	-"	21,4	0,57

Tulosten mukaan menoveden virtaaman kompensointikäyrä pystytään muodostamaan yhtä hyvin kuin menoveden lämpötilan kompensointikäyrä. Tapauksessa, jossa pumpun virtaamaa rajoitetaan, säästö pumpun sähkönkulutuksessa on 70 %.

On tietenkin huomattava, että jos menoveden lämpötilan kompensointikäyrä ei ole riittävän korkealla, menoveden virtaamaa ei voida rajoittaa. Menoveden lämpötilan kompensointikäyrän tulee siis olla korkeammalla kuin siinä tapauksessa, jossa pumpun virtaamaa ei säädetä.

Mahdollista varmaankin olisi muodostaa automaattisesti ja samanaikaisesti sekä menoveden lämpötilan kompensointikäyrä että menoveden virtaaman kompensointikäyrä, mutta sitä ei ole tässä työssä kokeiltu.

4.2.2 Energiankulutuksen vertailu

Työssä on esitetty erilaisia lämmitysverkoston menoveden virtaaman ja lämpötilan säätötapoja. Seuraavassa kartoitetaan lyhyesti näiden säätötapojen energiantaloudellisia vaikutuksia. Tarkastelun kohteena ovat lämpöjohtopumpun sähkönkulutus sekä lämmitysverkoston paluueden lämpötila.

Edellä lasketut (luku 4.2.1) suhteelliset säästöt pumpun sähkökulutuksessa olivat suuria. Seuraavassa tarkastellaan, millaisia säästöt ovat, kun luvut muutetaan kWh:ksi ja markoiksi.

Keskikokoisessa kerrostalossa lämpöjohtopumpun sähköteho on luokkaa 500 W. Jos lämmityskausi on 9 kuukautta, niin vuosienenergiankulutus on noin 3000 kWh. Sähkön hinnalla 50 p/kWh pumpun sähkökulut ovat noin 1500 mk vuodessa. Mikäli puolet tästä säästetään, säästöksi tulee 750 mk/vuodessa. Tämä tekee vuodessa pari kymppiä asuntoa kohden ja alle 10 mk henkilöä kohden. Säästöt siis eivät ole kovin suuria. Kierroslukusäätöisen pumpun hankkiminen ei liene kannattavaa pelkän sähkökulutuksen kannalta, mikäli nykyinen pumpu on käyttökelpoinen.

Lämmitysverkoston paluueden lämpötila laskee, kun vesivirtaa rajoitetaan. Siis niissä tapauksissa, joissa menoveden lämpötilan kompensointikäyrä on korkealla ja virtaamaa rajoitetaan, paluueden lämpötila on alempi kuin niissä tapauksissa, joissa virtaama pidetään vakiona ja menoveden lämpötilan kompensointikäyrä haetaan.

Kun pumpun virtaama on vakio, paluueden lämpötilaksi tuli simulointijaksolla keskimäärin 31 °C. Kun virtaamaa rajoitetaan, keskimääräinen paluueden lämpötila laskee runsaan 1 °C:n tästä, mutta paluueden lämpötilaa olisi alennettavissa tästäkin. Paluueden lämpötila saataisiin mahdollisimman alas, jos menoveden lämpötila olisi korkea koko ajan, ja virtaama pidettäisiin mahdollisimman pienenä.

Kaukolämmitetyssä talossa paluueden lämpötilan alenemisesta saatavat edut ovat tarvittavan tilausvesivirran pieneneminen ja kaukolämmön jäähtymän paraneminen.

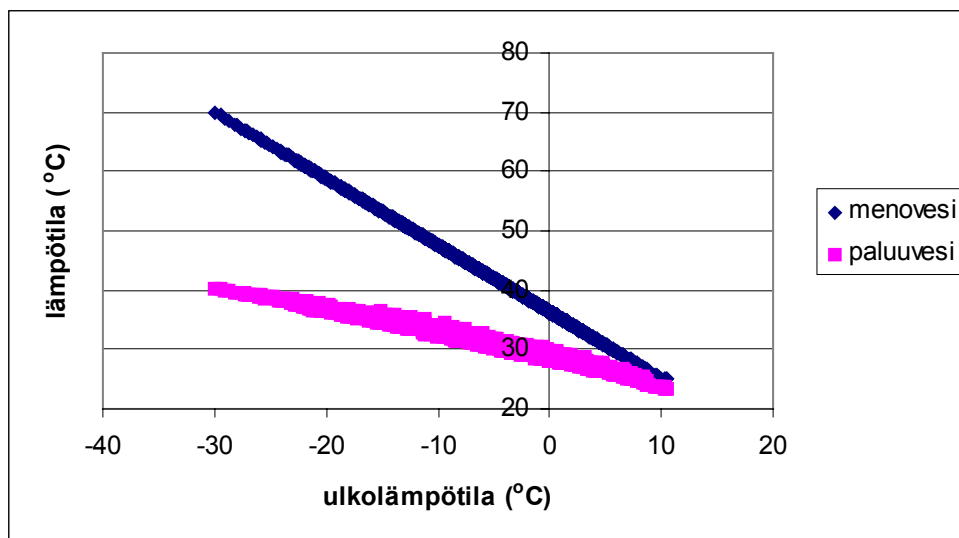
Virtaaman rajoittamisesta aiheutuvat pumpun sähkökulutuksen pieneneminen ja paluueden lämpötilan aleneminen ovat molemmat energiatalouden kannalta tavoiteltavia

asioita. Sen sijaan lämpöhäviöt putkistoista kasvavat, kun virtaaman rajoittamisen vuoksi menoveden lämpötilaa nostetaan.

4.3 Radiaattoriverkoston paluueden lämmön hyödyntäminen ilmastointikoneessa

4.3.1 Paluuedestä hyödynnettävissä oleva lämpömäärä

Suomessa lämmitysjärjestelmät mitoitetetaan yleisesti niin, että menoveden lämpötila on 70 °C ja paluueden lämpötila 40 °C. Muissa kuin mitoituslanteissa lämpötilat ovat alempia. Simulointilaskelman mukaan paluueden keskimääräinen lämpötila on lämmityskaudella noin 30 °C (kuva 45). Asuinkerrostaloissa suoritetuissa mittauksissa (Laine et al. 1998) paluueden lämpötila on ollut samaa suuruusluokkaa.



Kuva 45. Esimerkki menoveden ja paluueden lämpötilasta ulkolämpötilan mukaan. Eräs simulointitapaus.

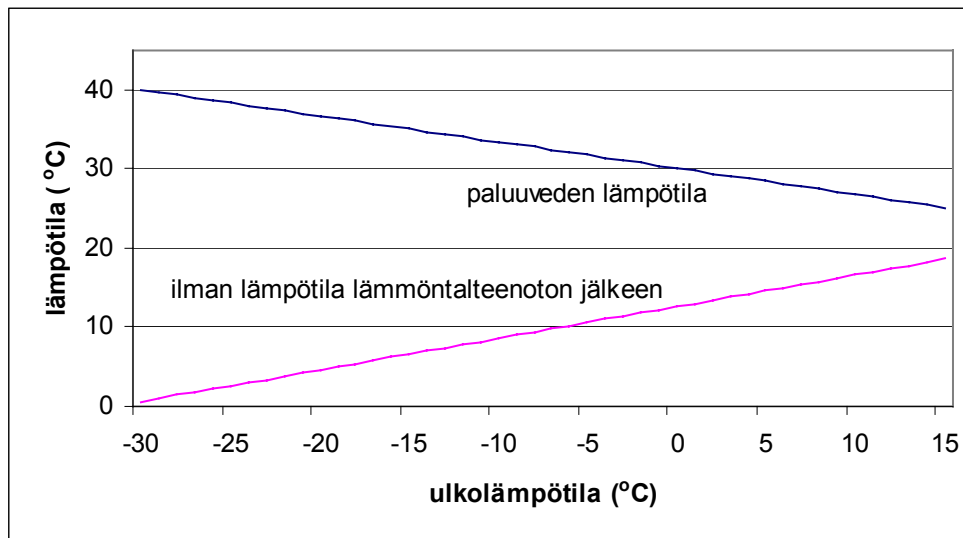
Radiaattoriverkoston mitoitusvesivirta on noin 5 m³/h asuinkerrostalossa, jonka rakennustilavuus on noin 20 000 m³.

Mikäli termostaattiset venttiilit rajoittavat virtaamaa pattereilla, kokonaisvirtaama pienentyä mitoitusarvosta. Karkeasti voidaan arvioida, että radiaattoriverkoston paluueden virtaama on 5 m³/h (= 0,00139 m³/s) ja lämpötila keskimäärin 30 °C. Lämpökapasiteettivirta on noin 5,8 kW/°C (= 1000 kg/m³ * 4,19 kJ/kg°C * 0,00139 m³/s).

Ilmanvaihtokoneiden ilmavirta on tämän kokoisessa talossa yhteensä noin $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Lämpökapasiteettivirta on noin $3,0 \text{ kW}/^\circ\text{C}$ ($= 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3 * 1 \text{ kJ}/\text{kg}^\circ\text{C} * 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Radiaattoriverkoston veden kapasiteettivirta on noin kaksinkertainen ilmavirran kapasiteettivirtaan nähden, ja paluueden lämpötila on riittävä tuloilman lämmittämiseen, joten paluuedestä näyttäisi olevan saatavissa lämmitystehoa ilmastointikoneeseen.

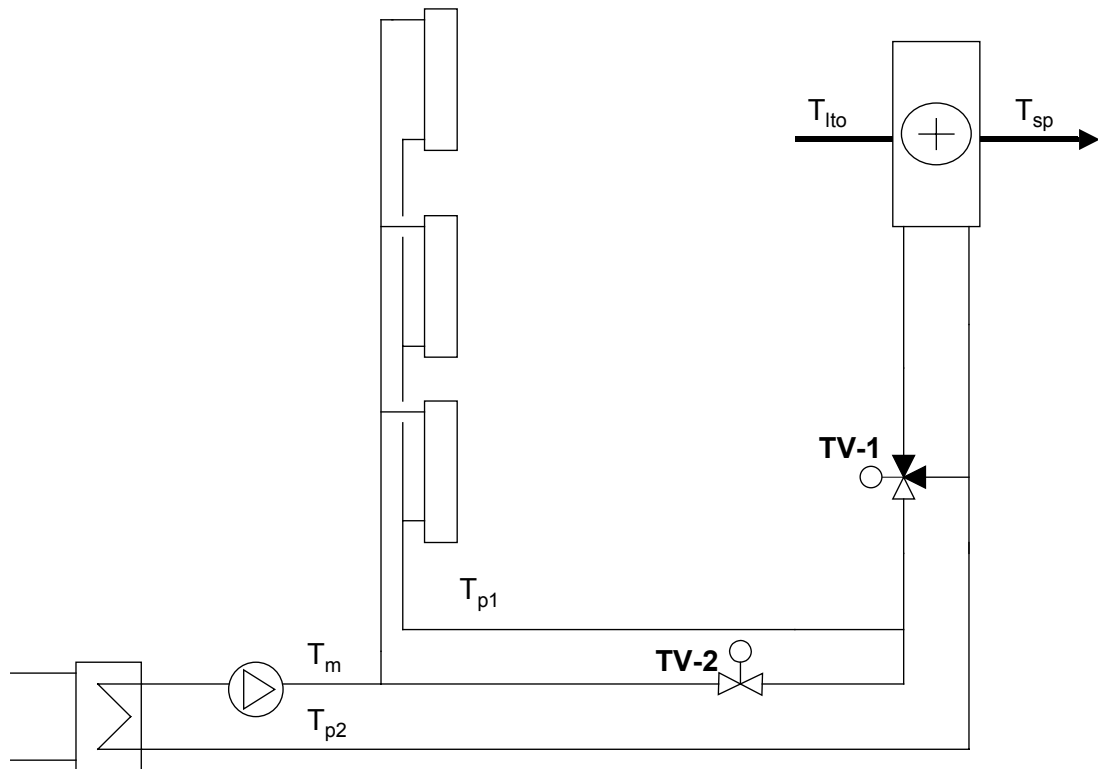
Paluueden lämpötila on korkeimmillaan kylmään vuodenaikaan (kuva 46), jolloin lämpöä tarvitaan eniten ilmastointikoneessa.



Kuva 46. Arvio paluueden lämpötilasta ja ilman lämpötilasta lämmöntalteenoton jälkeen ulkolämpötilan funktiona. Huonelämpötilaksi on oletettu 21°C ja lämmöntalteenoton lämpötilahyötysuhteeksi 60 %

4.3.2 Järjestelmän periaate

Työssä muodostettiin kytkentäkaavio järjestelmästä (kuva 47), jolla voidaan hyödyntää radiaattoriverkoston paluueden lämpöä. Kuvassa on yksi ilmastointikone, mutta mikäli rakennuksessa on niitä useita, paluueden lämpö voidaan jakaa niiden kesken.



Kuva 47. Periaatekuva kytkennästä.

Tuloilman lämpötila T_{sp} pidetään asetusarvossaan ohjaamalla moottoriventtiilien TV-1 ja TV-2 asentoa. Ensimmäisessä hyödynnetään radiaattoriverkoston paluuvien lämpöä ja venttiiliä TV-2 avataan vain, kun paluuvien lämpö ei riitä. Mikäli paluuvien lämpöä ei tarvita, moottoriventtiili TV-1 ei ohjaa virtaamaa ilmastointikoneelle.

Koska järjestelmään kuuluu erillinen lämmitysjärjestelmä (radiaattorit), tuloilman lämpötilan asetusarvo pidetään lähellä huonelämpötilaa, esimerkiksi 21 °C:ssa. Mikäli rakennuksessa on jäähdytystarvetta (sisäisten kuormien tai säteilykuormien vuoksi), tuloilman lämpötilan asetusarvoa voidaan laskea tästä arvosta.

Mikäli ilmastointikone sijaitsee korkealla rakennuksessa (esimerkiksi ullakolla), olisi järkevää, että radiaattoriverkoston kytkentänä olisi ns. käännetty paluu (toisin kuin kuvassa), jotta paluuvettä ei tarvitsi pumpata ilmastointikoneelle erikseen.

4.3.3 Simulointitarkastelut

Simuloinneilla selvitetään, onko kannattavaa käyttää radiaattoriverkoston paluuvien lämpöä hyödyksi ilmastointikoneissa. Vertailun vuoksi on tehty kaksi simulointiajtoa, joista toisessa paluuvien lämpöä hyödynnetään ja toisessa ei. Lisäksi esitetään tulokset yhdestä lisätarkastelusta.

Lähtöarvot ja oletukset

Tarkastelun kohteena oleva rakennus on tavallinen asuinkerrostalo. Rakennuksen vaipa, sisäiset kuormat ja muut lähtöarvot on dokumentoitu liitteessä A.

Työssä simuloidaan ainoastaan yhtä kerrostalon huoneistoa, kolmiota, jonka tilavuus on $199,7 \text{ m}^3$. Näin on tehty, koska voidaan olettaa, että lämmityksen ja ilmanvaihdon tarve on rakennuskuutiota kohden likimain samansuuruinen muissakin huoneistoissa. Lämmitysverkoston ja ilmanvaihdon massavirrat voidaan haluttaessa muuttaa vastaamaan koko rakennuksen arvoja kertoimen avulla.

Simuloitu jakso on neljän kuukauden pituinen ja alkaa vuoden alusta. Käytössä oli TRNSYS-simulointiohjelma ja Helsingin säätiedot.

Ilmastointi

Ilmastointijärjestelmänä on keskitetty koneellinen tulo- ja poistojärjestelmä. Ilmastointikoneessa on lämmöntalteenotto (lämpötilahyötysuhde 0,6) ja vesikiertoinen lämmityspatteri.

Huoneiston tuloilmavirta pysyy laskelmissa vakiona ja on $101,8 \text{ m}^3/\text{h}$ eli $0,0282 \text{ m}^3/\text{s}$. Kapasiteettivirta on $0,034 \text{ kW}/^\circ\text{C}$.

Tuloilman lämpötilan asetusarvo $21 \text{ }^\circ\text{C}$, mutta huonelämpötilan (huonelämpötilojen keskiarvon) noustessa yli $22 \text{ }^\circ\text{C}$:een asetusarvoa aletaan laskea liukuvasti, niin että huonelämpötilan ollessa $24 \text{ }^\circ\text{C}$, asetusarvo on $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Huonelämpötilan ollessa $22\text{--}24 \text{ }^\circ\text{C}$, tuloilman lämpötilan asetusarvo on siis $21\text{--}15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Lämmitysjärjestelmä

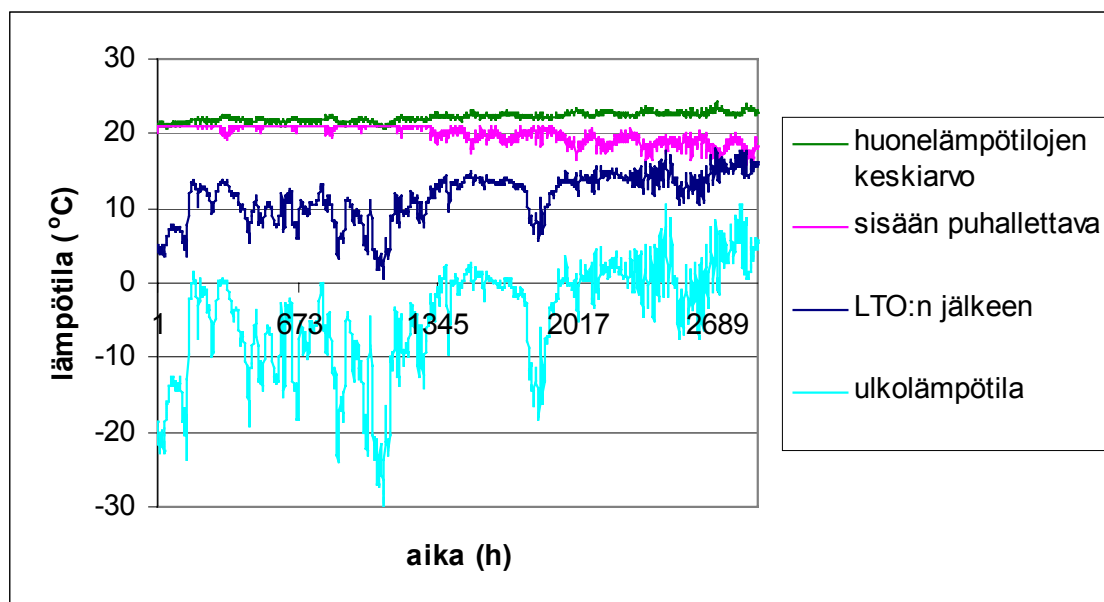
Huoneisto lämmitetään radiaattoreilla, joissa on termostaattiventtiilit. Pattereiden mitoituslämpötilat ovat $70/40/20 \text{ }^\circ\text{C}$ eli yllilämpötila on $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Termostaattiventtiilien asetusarvo on $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhdealue $3 \text{ }^\circ\text{C}$. Termostaattiventtiilien hystereesiä ei ole huomioitu laskennassa, kuten ei myöskään putkistojen lämpöhäviöitä. Pattereiden kokonaisteho on $1,79 \text{ kW}$ ja mitoitusmassavirta on $0,0142 \text{ kg/s}$ ($= 51,1 \text{ kg/h}$). Radiaattoriverkoston veden kapasiteettivirta on mitoitusilanteessa $0,059 \text{ kW}/^\circ\text{C}$, mutta pienenee tästä termostaattiventtiilien sulkeutuessa.

Menoveden lämpötilan kompensointisuora on asetettu siten, että ulkolämpötilassa $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ menoveden lämpötila on $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ja ulkolämpötilassa $10 \text{ }^\circ\text{C}$ se on $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tulokset

Seuraavassa esitetään tulokset kahdesta simulointilaskelmasta, joista toisessa hyödynnetään radiaattoriverkoston paluuveden lämpöä ilmastointikoneen lämmityspatterissa. Vertailulaskelmassa näin ei tehdä, vaan IV-koneen lämmityspatterille menee samanlämpöistä vettä kuin radiaattoreihin.

Lämpöjohtoverkoston kytkentä ei vaikuta huonelämpötiloihin, eikä sisään puhallettavan ilman lämpötilaan. Myös lämmitysenergiat pysyvät samoina riippumatta kytkennästä (taulukko 16). Kuvassa 48 esitetään huonelämpötilojen keskiarvo ja muita lämpötiloja koko neljän kuukauden simulointijaksolta. Huonelämpötilojen keskiarvo pysyy 21 °C:ssa, mutta nousee hieman kevättä kohden. Ilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen on noin 5–15 °C ja lämmitetään patterissa 21 °C:seen tai vähän alle sen riippuen huonelämpötilasta, joka antaa asetusarvon sisään puhallettavan ilman lämpötilalle.

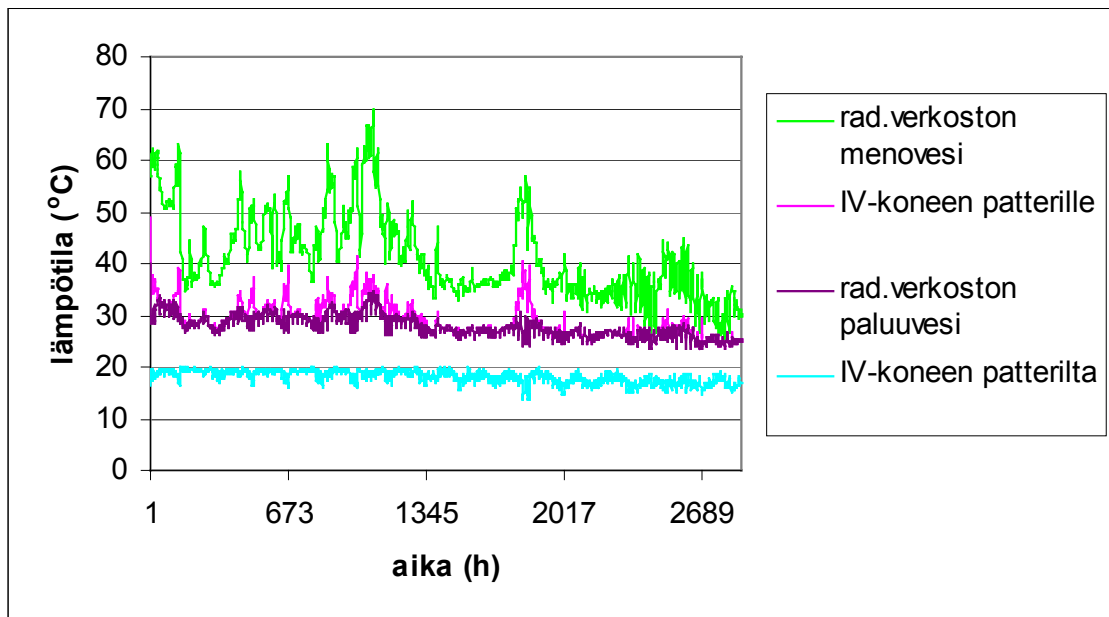


Kuva 48. Huonelämpötila, ulkolämpötila ja muita lämpötiloja. Tulokset ovat samoja molemmissa laskelmissa.

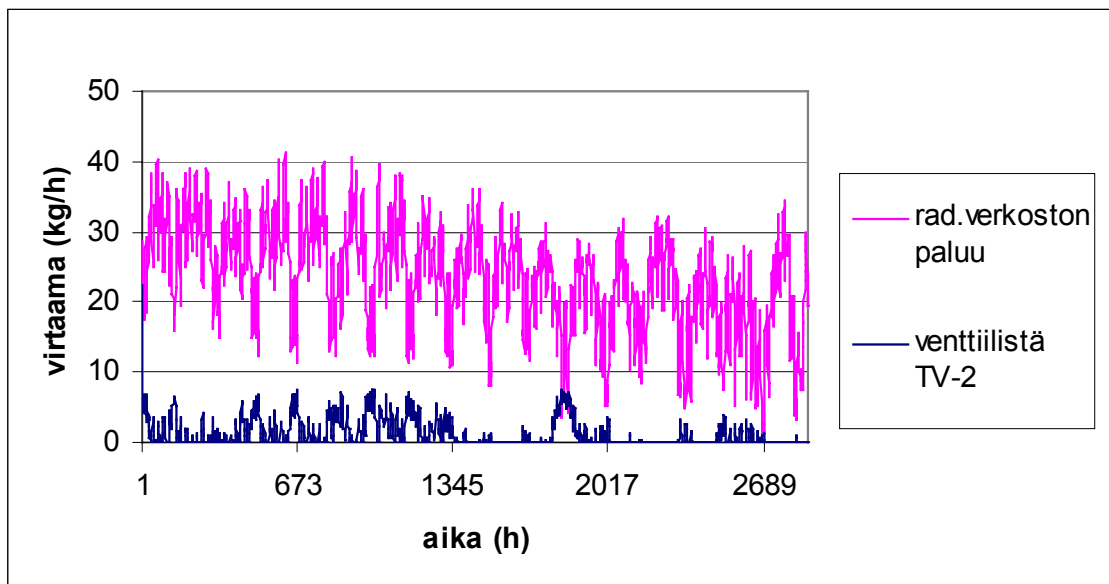
Taulukko 16. Lämmitysenergiat (MWh) neljän kuukauden simulointijaksolla. Tulokset ovat samoja molemmissa laskelmissa.

radiaattorit	1,07
ilmastointikoneen lämmityspatteri	0,79
ilmastointikoneen lämmöntalteenotto	1,57

Seuraavaksi esitetään vesiverkoston lämpötilat ja virtaamat, kun radiaattoriverkoston paluuveden lämpöä hyödynnetään (kuvat 49 ja 50) ja kun sitä ei hyödynnetä (kuvat 51 ja 52).

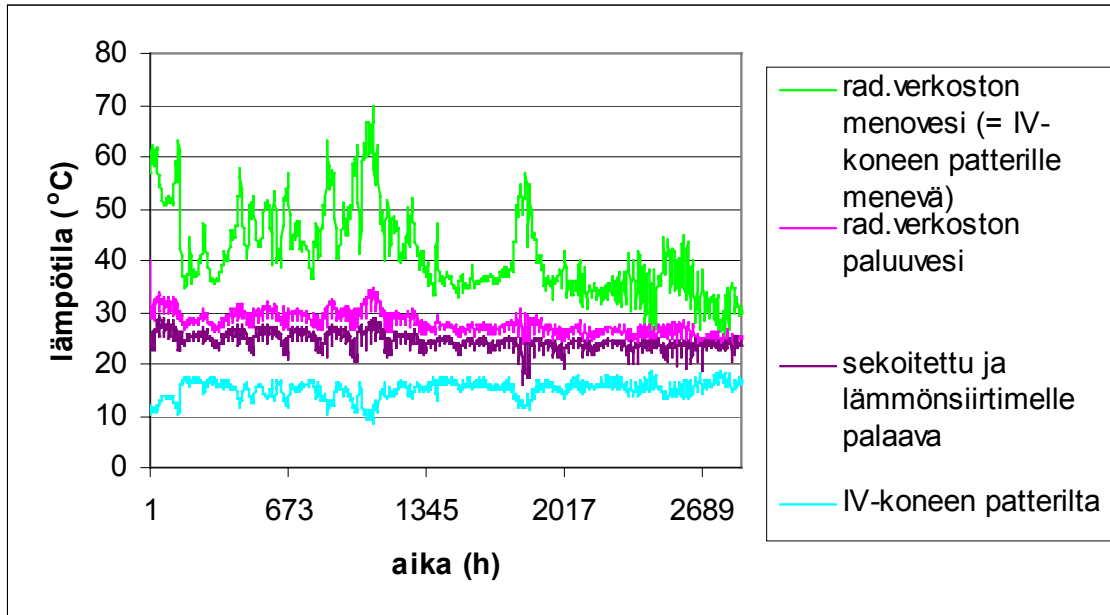


Kuva 49. Vesiverkoston lämpötilat, kun radiaattoriverkoston paluuveden lämpö hyödynnetään ilmastointikoneella.

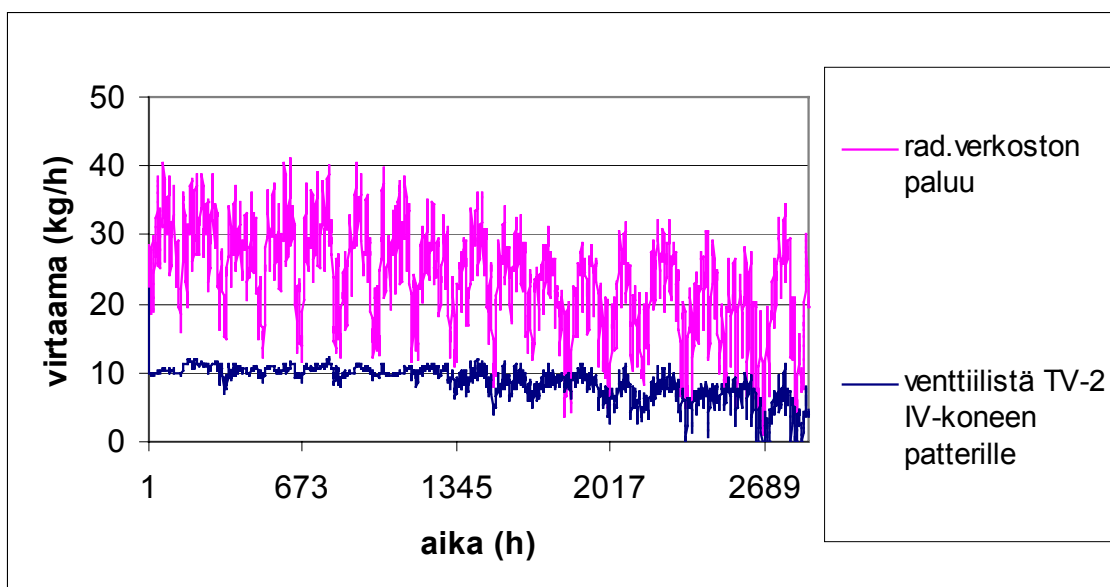


Kuva 50. Vesiverkoston virtaamat, kun radiaattoriverkoston paluuveden lämpö hyödynnetään ilmastointikoneella.

Radiaattoriverkoston paluuveden lämpötila on noin 25–35 °C. Osan ajasta se riittää tyydyttämään koko ilmastointikoneen lisälämmöntarpeen. Ilmastointikoneelta lämmönjakokeskukseen palaavan veden lämpötila on 15–20 °C.



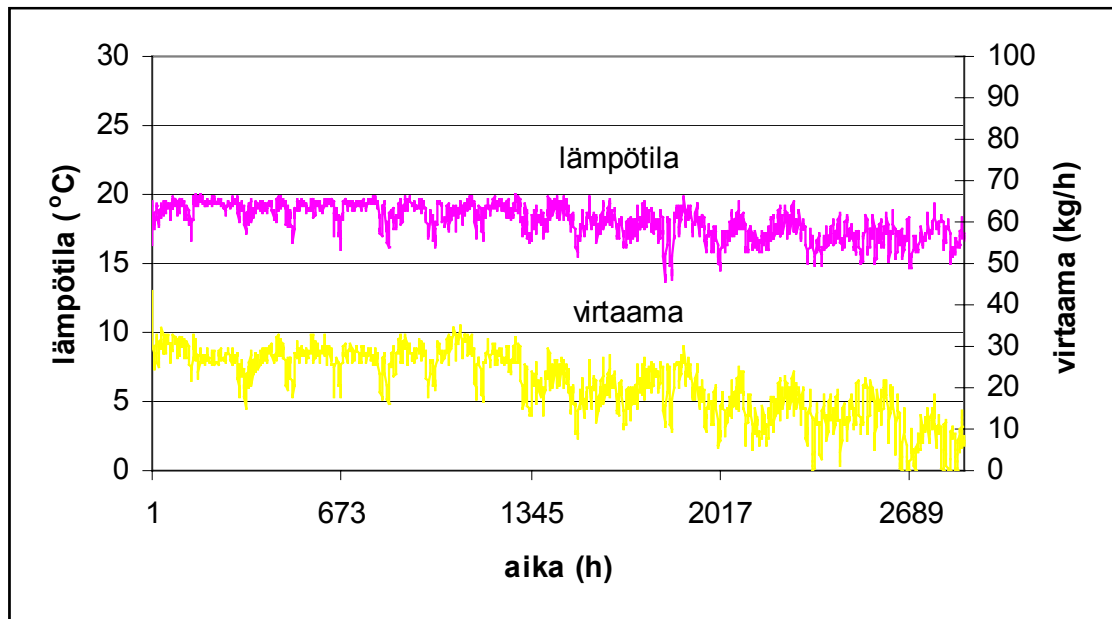
Kuva 51. Vesiverkoston lämpötilat, kun radiaattoriverkoston paluuveden lämpöä ei hyödynnetä ilmastointikoneella.



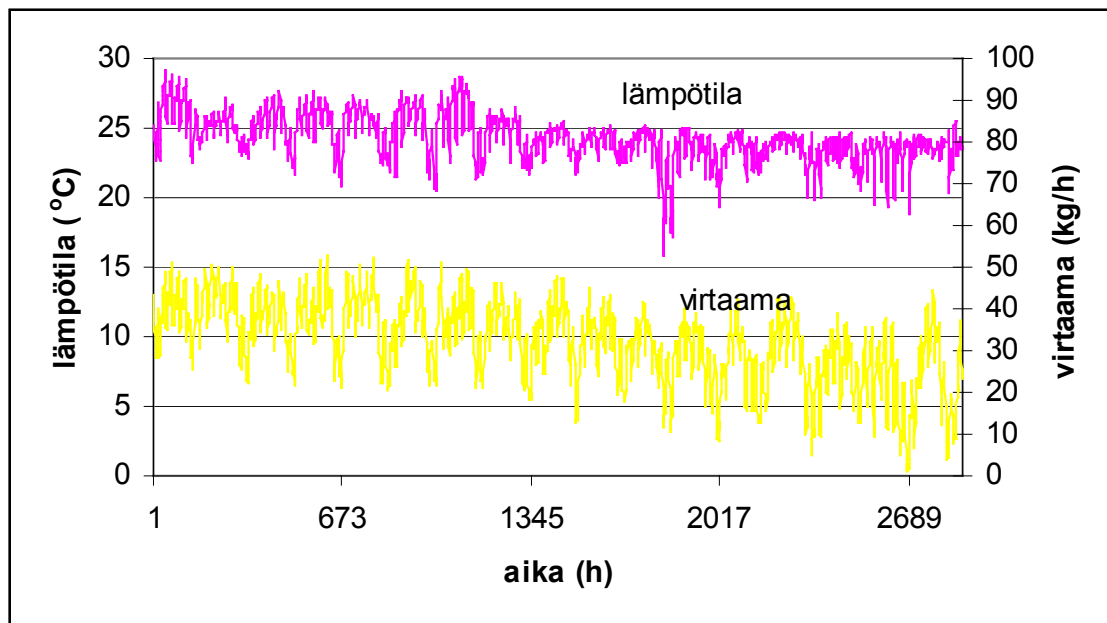
Kuva 52. Vesiverkoston virtaamat, kun radiaattoriverkoston paluuveden lämpöä ei hyödynnetä ilmastointikoneella.

Kun radiaattoriverkoston paluuvettä ei hyödynnetä IV-koneessa, IV-koneen patterilta palaavan veden lämpötila on luokkaa 10–20 °C. Kun se sekoitetaan radiaattoriverkoston paluuveteen, lämmönjakokeskukseen palaavan veden lämpötila on noin 20–25 °C.

Kuvissa 53–54 esitetään selvyyden vuoksi lämmönjakokeskukseen palaavan veden virtaama ja lämpötila molemmissa laskelmissa.



Kuva 53. Lämmönjakokeskukseen palaavan veden virtaama ja lämpötila, kun radiaattoriverkoston paluuveden lämpöä hyödynnetään IV-koneessa.



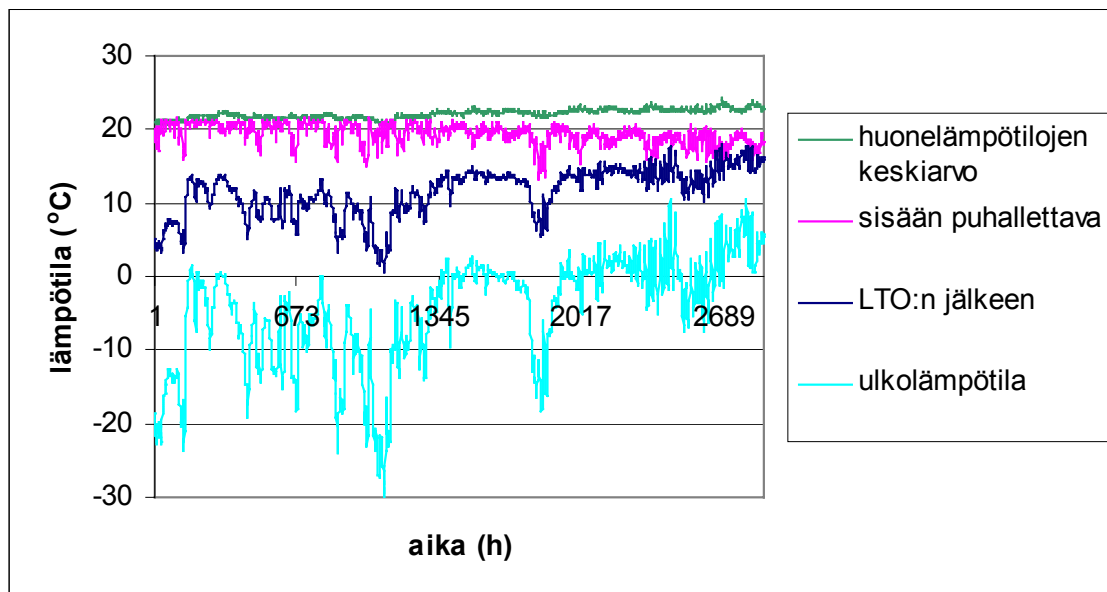
Kuva 54. Lämmönjakokeskukseen palaavan veden virtaama ja lämpötila, kun radiaattoriverkoston paluuveden lämpöä ei hyödynnetä IV-koneessa.

Lämmönjakokeskukseen palaavan veden lämpötila on simulointijaksolla keskimäärin 18,1 °C, kun radiaattoriverkoston paluuvesi ohjataan IV-koneelle ja keskimäärin 24,3 °C, kun niin ei tehdä. Ero on siis 6,2 °C. Jälkimmäisessä tapauksessa tarvittava virtaama on selvästi suurempi.

Kaukolämmön paluulämpötila alenee kytkennän takia, mutta tarkka aleneman suuruus riippuu mm. kaukolämmön alajakokeskuksen kytkennästä.

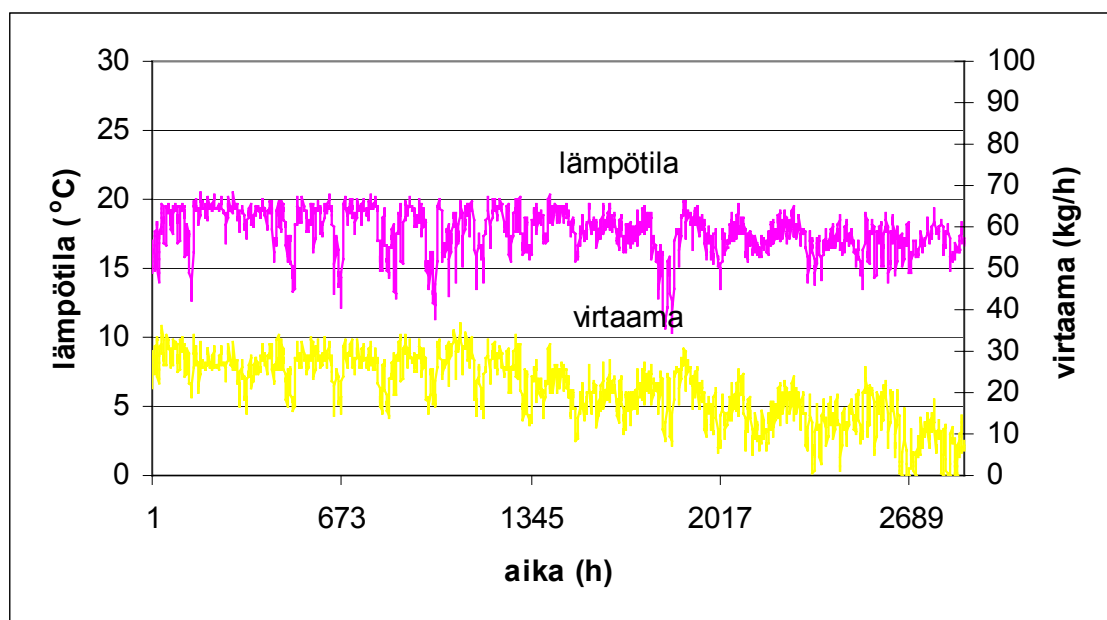
Lisätarkastelu 1

Työssä tehtiin lisätarkastelu, jossa venttiiliä TV-2 ei avata ollenkaan (kuvat 55–56). Tuloilman lämmittämiseen käytetään siis LTO:n lisäksi vain radiaattoriverkoston paluuveden lämpöä.



Kuva 55. Huonelämpötila, sisään puhallettavan ilman lämpötila ja muita lämpötiloja, kun TV-2 pidetään kiinni.

Tuloilman (sisään puhallettava) lämpötilaa ei pystytä kasvattamaan asetuservoonsa avaamalla venttiiliä TV-2. Tuloilman lämpötila on kuitenkin koko ajan vähintään 15 °C. Huonelämpötila pysyy 21 °C:ssa ja nousee siitä hieman kevättä kohden.



Kuva 56. Lämmönjakokeskukseen palaavan veden virtaama ja lämpötila, kun venttiili TV-2 pidetään kiinni.

Lämmönjakokeskukselle palaavan veden lämpötila on simulointijaksolla keskimäärin 17,7 °C eli hieman alempi kuin siinä tapauksessa, jossa radiaattoriverkoston paluuvettä hyödynnetään ja lisälämpöä otetaan venttiilin TV-2 kautta.

4.4 Kehitettyjen menetelmien kustannusvaikutukset

Kustannuksia tarkasteltaessa kohteena on seuraavanlainen asuinkerrostalo:

- rakennustilavuus 20 000 m³, 80 asuntoa
- ilmastointikoneiden yhteenlaskettu tuloilmavirta 2,5 m³/s, tulo- ja poistoilmanvaihto, lämmöntalteenoton hyötysuhde 60 %
- tilojen lämmitysteho 184 kW, tuntinen käyttöveden lämmitysteho 69 kW
- vuotuinen lämpöenergiankulutus 600 MWh.

Taulukko 17. Menetelmät ja taulukot, joihin kustannusvaikutukset on koottu.

Menetelmä	Taulukko
Lämmitysverkoston menoveden <u>lämpötilan</u> kompensointikäyrän automaattinen muodostaminen	Taulukko 18
Lämmitysverkoston menoveden <u>virtaaman</u> kompensointikäyrän automaattinen muodostaminen	Taulukko 19
Radiaattoriverkoston paluuv veden hyödyntäminen ilmastointikoneessa	Taulukko 20

Taulukoissa 18–20 "+" tarkoittaa energiankulutuksen tai kustannusten lisääntymistä ja "-" niiden vähentymistä menetelmän ansiosta. Sähkön hintana on laskelmissa käytetty arvoa 0,084 €/kWh (50 p/kWh) ja lämmön hintana 26,91 €/MWh (160 mk/MWh).

Taulukko 18. Menetelmän hyödyntämisen kustannusvaikutuksia ja muita vaikutuksia. Menetelmä: lämmitysverkoston menoveden lämpötilan kompensointikäyrän automaattinen muodostaminen.

	Sanallinen kuvaus	kWh/vuosi	€/vuosi (mk/vuosi)	investointi- kust. (€)
Vaadittavat muutokset järjestelmiin	Tarvittavan ohjelmakoodin implementointi rakennusautomaatiojärjestelmään, mahdollisesti muutamia lisämittauksia.			- ¹
Vaikutus lämpöenergian kulutukseen	Lämpöenergian kulutus pienenee, jos turhan korkeat huonelämpötilat pystytään leikkaamaan.	-20000 ²	540 (-3200)	
Vaikutus sähköenergian kulutukseen	Ei vaikutusta.			
Vaikutus viihtyvyyteen	Huonelämpötilat pysyvät lähempänä asetusarvoa.		ei arvioitu rahassa	
Vaikutus huoltohenkilöstön tarpeeseen	Huoltohenkilöstöä tarvitaan vähemmän, koska kompensointikäyrä löydetään automaattisesti.		-170 ³ (-1000)	
Vaikutus kaukolämmön tilausvesivirtaan ja paluuvien lämpötilaan	Ei mainittavaa vaikutusta.			

¹ Ei lisäkustannuksia, jos hyödynnetään muutenkin tarvittavia järjestelmiä.

² Oletettu huonelämpötilan laskevan noin 1 °C.

³ Oletettu säästöksi työajassa 5 tuntia/vuosi.

Taulukko 19. Menetelmän hyödyntämisen kustannusvaikutuksia ja muita vaikutuksia. Menetelmä: lämmitysverkoston menoveden virtaaman kompensointikäyrän automaattinen muodostaminen.

	Sanallinen kuvaus	kWh/vuosi	€/vuosi (mk/vuosi)	investointi- kust., € (mk)
Vaadittavat muutokset järjestelmiin	Tarvittavan ohjelmakoodin implementointi rakennusautomaatiojärjestelmään, mahdollisesti muutamia lisämittauksia, taajuusmuuttajasäätöinen pumppu.			+670 ⁴ (+4000)
Vaikutus lämpöenergian kulutukseen	Lämpöenergian kulutus pienenee, jos turhan korkeat huonelämpötilat pysytään leikkaamaan.	-20000 ⁵	-540 (-3200)	
Vaikutus sähköenergian kulutukseen	Kierroslukusäätöisen pumpun avulla säästetään pumpun sähkönkulutuksessa.	-1500 ⁶	-130 ⁷ (-750)	
Vaikutus viihtyvyyteen	Huonelämpötilat pysyvät lähempänä asetusarvoa. Patteriventtiilien äänitaso pienenee.		ei arvioitu rahassa	
Vaikutus huoltohenkilöstön tarpeeseen	Huoltohenkilöstöä tarvitaan vähemmän, koska kompensointikäyrä löydetään automaattisesti.		-170 ⁸ (-1000)	
Vaikutus kaukolämmön tilausvesivirtaan ja paluuveden lämpötilaan	Radiaattoriverkoston paluuveden lämpötila alenee hieman, mikä parantaa kaukolämmön jäähtymää. Tämä ei vaikuta kuitenkaan mitoitustilanteeseen, eikä siis tilausvesivirtaan.			

⁴ Taajuusmuuttajasäätöisen pumpun lisäkustannus. Lähde: Kolmeksin hinnasto 2000.

⁵ Oletettu huonelämpötilan laskevan noin 1 °C.

⁶ Arvioitu luvussa 4.2.2.

⁷ Kuten ed.

⁸ Oletettu säästökseksi työajassa 5 tuntia/vuosi.

Taulukko 20. Menetelmän hyödyntämisen kustannusvaikutuksia ja muita vaikutuksia. Menetelmä: radiaattoriverkoston paluueden hyödyntäminen ilmastointikoneessa.

	sanallinen kuvaus	kWh/vuosi	€/vuosi (mk/vuosi)	investointi- kust., € (mk)
Vaadittavat muutokset järjestelmiin	Uudenlainen lämmitysverkoston kytkentä. Lämmönjakokeskuksessa ei omaa lämmönsiirintä ilmastointikoneille.			-840 ⁹ (-5000) +670 ¹⁰ (+4000)
Vaikutus lämpöenergian kulutukseen	Ei vaikutusta lämmön tarpeeseen, mutta verkoston lämpötilataso alenee ja putkistojen lämpöhäviöt siis pienenevät hieman.			
Vaikutus sähköenergian kulutukseen	Pumppauskustannukset pienenevät, mikäli käytössä on taajuusmuuttajasäätöinen pumppu.	-2000 ¹¹	-170 (-1000)	
Vaikutus viihtyvyyteen	Ei vaikutusta huonelämpötiloihin, eikä viihtyvyyteen muutenkaan.			
Vaikutus huoltohenkilöstön tarpeeseen	Ei vaikutusta.			
Vaikutus kaukolämmön tilausvesivirtaan ja paluueden lämpötilaan			-340 ¹² (-2000)	

⁹ Säästö hinnassa, kun ei tarvita erillistä lämmönsiirintä ilmastointikoneita varten. 2-piirinen kaukolämmön alajakokeskus (lämmitys/käyttövesi) maksaa noin 7600 € (45000 mk) (+alv) ja 3-piirinen (lämmitys/ilmastointi/käyttövesi) noin 9600 € (57000 mk) (+alv.). Kun otetaan huomioon 2-piirisen kytkentään tarvittavat lisävarusteet (säätimet, venttiilit, pumput ym.), säästökksi jää noin 840 € (5000 mk). Lähde: kysytty LPM:ltä 15.5.2000.

¹⁰ Taajuusmuuttajasäätöisen pumpun lisäkustannus. Lähde: Kolmeksin hinnasto 2000.

¹¹ Säästöjä saavutetaan mikäli käytössä on taajuusmuuttajasäätöinen pumppu. Lämmitys/IV-verkoston virtaama pienenee kolmanneksen, mikä tarkoittaa noin 70 %:n alenemista pumppauskustannuksissa. Tavallisen pumpun vuosienenergiankulutukseksi arvioitu 3000 kWh.

¹² Taajuusmuuttajasäätöisen pumpun lisäkustannus. Lähde: Kolmeksin hinnasto 2000

4.4.1 Yhteenveto kustannusvaikutuksista

Lämmitysverkoston menoveden lämpötilan kompensointikäyrän automaattinen muodostaminen (Taulukko 18)

- Ei lisäkustannuksia, jos järjestelmä toteutetaan ilman lisämittauksia ja tarvittava ohjelmakoodi pystytään implementoimaan automaatiojärjestelmään.
- Kustannussäästöjä huoltotarpeen vähenemisestä.
- Kustannussäästöjä ja viihtyvyyden paranemista, koska liian korkeat huonelämpötilat leikkaantuvat.

Lämmitysverkoston menoveden virtaaman kompensointikäyrän automaattinen muodostaminen (Taulukko 19)

- Lisäkustannuksia taajuusmuuttajasäätöisestä pumpusta, joka kuitenkin maksaa elinaikanaan itsensä takaisin pienentyneenä sähkönkulutuksena.
- Kustannussäästöjä huoltotarpeen vähenemisestä. (kuten ed.)
- Kustannussäästöjä ja viihtyvyyden paranemista, koska liian korkeat huonelämpötilat leikkaantuvat. (kuten ed.)
- Muita etuja: patteriventtiilien äänitaso pienenee ja radiaattoriverkoston paluuv veden lämpötila alenee.

Radiaattoriverkoston paluuv veden hyödyntäminen ilmastointikoneessa (Taulukko 20)

- Lisäkustannuksia taajuusmuuttajasäätöisestä pumpusta, joka kuitenkin maksaa elinaikanaan itsensä takaisin pienentyneenä sähkönkulutuksena.
- Kustannussäästöjä kaukolämmön alajakokeskuksen hankintahinnassa, koska lämmönsiirtimiä tarvitaan yksi vähemmän.
- Kustannussäästöjä kaukolämmön tilausvesivirtamaksussa, koska kaukolämmön jäähtymä paranee kytkennän ansiosta.

4.5 Yhteenveto luvusta 4

Työssä on tarkasteltu vesipatterilämmitteisen rakennuksen lämmityksen säätöä. Työssä on kehitetty menetelmä, joka muodostaa menoveden kompensointikäyrän (itse asiassa kyseessä on kompensointisuora) automaattisesti. Menetelmällä voidaan muodostaa menoveden lämpötilan ulkolämpötilakompensointikäyrä tai vaihtoehtoisesti menoveden virtaaman ulkolämpötilakompensointikäyrä. On huomattava, että työssä kehitetty menetelmä ei tietenkään poista patteriverkoston tasapainotuksen tarvetta.

Menetelmää on testattu simuloimalla. Tulosten mukaan kompensointikäyrä löydetään nopeasti ja huonelämpötilojen keskiarvo pysyy lähellä asetusrvoa. Menetelmä soveltaa sumeaa logiikkaa, mutta sumeuden soveltaminen ei ole kannattavaa, koska työssä havaittiin, että sumea päättely voidaan korvata yhdellä kaavalla.

Työssä kehitetty menetelmä on yksinkertainen ja se vaatii vain vähän laskentatehoa ja muistia. Menetelmä vaatii mittaustietoina ulkoilman lämpötilan ja huoneilman lämpötilojen keskiarvon. Koska todellisessa tilanteessa ei ole käytettävissä huoneilman lämpötilojen keskiarvoa, se voidaan harkinnan mukaan korvata muutaman huonelämpötilan keskiarvolla, lämmitysverkoston paluuveden lämpötilalla (josta arvioidaan keskimääräinen huonelämpötila) tai poistoilman lämpötilalla.

Lämmitysverkoston paluuveden lämpötilaa voidaan alentaa rajoittamalla pumpun virtaamaa (menoveden virtaaman ulkolämpötilakompensointi). Samalla saadaan säästöä pumpun sähkönkulutuksessa, mikäli pumppu on kierroslukusäätöinen.

Simulointilaskelmien rakennuksena oli tyypillinen asuinkerrostalo. Todennäköisesti kompensointikäyrä olisi muodostettavissa vastaavasti myös muissa rakennustyypeissä, esim. toimistorakennuksissa.

Radiaattoriverkoston paluuvdestä on saatavissa lämmitystehoa ilmastointikoneeseen. Suuri osa ilmastointikoneen lämmityspatterin energiantarpeesta voidaan tyydyttää radiaattoriverkoston paluuveden lämmöllä, kun tuloilman lämpötilan asetusrvo pidetään likimain huonelämpötilan suuruisena.

Lämmitysverkoston jäähtymä paranee, kun radiaattoriverkoston paluuvesi ohjataan ilmastointikoneelle. Lämmönjakokeskukseen palaavan veden lämpötila on simulointilaskelmien mukaan luokkaa 15–20 °C.

Kehitetyt ratkaisut ovat melko yksinkertaisia, eivätkä ne laajemmin toteutettunakaan ole nykyisiä järjestelmiä kalliimpia.

5. Älykäs sisäolojen säätö

Tässä luvussa esitellään sisäolojen säätöön kehitetty oppiva algoritmi, jota on testattu simuloinnein ja koekohteessa. Luvussa pohditaan myös käyttäjän ja LVI-säätöjärjestelmien vuorovaikutusta ja käyttöliittymäsuunnittelua.

5.1 Käyttäjän ja LVI-säätöjärjestelmien vuorovaikutuksesta

Seuraavassa pohditaan käyttäjän ja LVI-säätöjärjestelmien vuorovaikutusta. Tarkoituksena on kartoittaa vuorovaikutukseen vaikuttavia tekijöitä ja selvittää tutkimustarpeita. Seuraavat näkökohdat ovat pohdinnan aiheina:

- Kuinka paljon käyttäjä haluaa osallistua järjestelmien säätöön, esimerkiksi asetusarvoja muuttamalla? Vai haluaako käyttäjä järjestelmien toimivan itsenäisesti?
- Kuinka paljon käyttäjän tarpeet vaihtelevat eri aikoina? Haluaako käyttäjä esimerkiksi muuttaa huonelämpötilaa kellon ajan mukaan? Tulisiko asetusarvoilla olla vuorokausi-, viikko- tai vuosiprofiileja?
- Missä määrin eri säädettäviä suureita (lämpötila, hiilidioksidipitoisuus, kosteus ym.) kannattaa ohjata yhdestä kytkimestä? Vai tulisiko käyttäjän pystyä vaikuttamaan kaikkiin erikseen? Missä kytkimen tai kytkimien tulisi sijaita?
- Mitä merkitsee viihtyisyyden ja energiankustannusten kannalta se, että käyttäjä muuttaa huonelämpötilan asetusarvoja ja tehostaa ilmanvaihtoa?

5.1.1 Käyttäjän vaikutusmahdollisuudet

Usein kuulee tarinoita, joissa huoneilman kylmyyttä tai kuumuutta jatkuvasti valittanut asiakas on saatu tyytyväiseksi vilppiä käyttämällä. Hänelle on asennettu lämpötilan säätönappi, mutta sitä ei ole kytketty mihinkään. Käyttäjä pysyy tyytyväisenä, kun saa vääntää nupikkaa, jolla ei ole todellisuudessa vaikutusta. Vaikka tarina lieneekin tosi, ei tämän ratkaisun varaan kannata järjestelmiä rakentaa.

Nykyisissä rakennuksissa on vain rajoitetusti yksilöllisen säädön mahdollisuuksia. Tavallisimmin huoneissa on patteriventtiilit, joita kääntämällä huonelämpötilaan voidaan vaikuttaa ainakin vähän. Laitteet eivät yleensä mahdollista ilmanvaihdon tehostamista huonekohtaisesti tai edes huoneistokohtaisesti, vaan ilmanvaihtuvuutta parannetaan ikkunoita avaamalla. Uusissa asuinkerrostalossa tehdyn tutkimuksen (Laine et al. 1998) mukaan ikkunatuuletusta harrasti usein tai ajoittain 69–86 % asukkaista. Noin puolet asukkaista toivoi parempaa ilmanvaihdon tehostusmahdollisuutta.

Toimistorakennuksiin kohdistuneessa tutkimuksessa (Lehto & Karjalainen 1996) pyydettiin toimistotyöntekijöitä antamaan kouluarvosanoja (4–10) työpisteensä ominaisuuksille. Mahdollisuus vaikuttaa lämpötilaan ja ilmanvaihtoon sai arvosanan 6,5. Arvosana oli näin alhainen, vaikka kohderakennukset edustivat uusia, laadukkaita toimistorakennuksia, joissa osassa oli huonekohtainen lämpötilan säätö. Ainoastaan vaikutusmahdollisuudet työpisteen kokoon ja ovien sijaintiin koettiin heikommiksi. Työpisteen muihin ominaisuuksiin, kuten valaistukseen, säilytyskapasiteettiin, työskentelyasentoon ja kalusteihin, pystyttiin vaikuttamaan enemmän.

Näyttääkin siltä, että **käyttäjät haluaisivat paremmat vaikutusmahdollisuudet huonelämpötilaan ja ilmanvaihtoon**. Nykyinen tavanomainen säätöjärjestelmä kykenee pitämään huonelämpötilan lähellä asetusarvoaan, mikäli säädin on oikein viritetty ja säätöjärjestelmä muutenkin tarkoituksenmukaisesti toimiva, mutta ei anna mahdollisuutta yksilölliseen säätöön.

Lähitulevaisuudessa järjestelmät, jotka mahdollistavat yksilöllisen säädön, kuten tarpeenmukaisen ilmanvaihdon ja yksilöllisen huonelämpötilan, varmaankin yleistyvät, joten on syytä miettiä, kuinka niitä tulisi ohjata. Haluavatko käyttäjät, että ilmanvaihdon tehostus toimii itsenäisesti pitäen huoneilman laadun hyvänä vai haluavatko he itse tehostaa ilmanvaihtoa manuaalisesti. Vastaus riippuu siitä, keneltä kysytään, sillä käyttäjiä on erilaisia. Toiset arvostavat itsenäisesti toimivia järjestelmiä ja luottavat, että järjestelmä valitsee mittausten perusteella sopivan ilmavirran. Toiset taas haluavat arvioida sisäilman laatua nenällään ja ohjata laitteita sillä perusteella. Järjestelmien tulisi muokautua molempiin käyttötapoihin.

Valaistustutkimuksissa on havaittu, että käyttäjä kokee ärsyttäväksi sen, jos hänellä ei ole henkilökohtaista mahdollisuutta vaikuttaa valaistuksen säätöön ja järjestelmä muuttaa automaattisesti keinovalaistuksen voimakkuutta. Näin erityisesti, jos keinovalaistuksen voimakkuus muuttuu paljon. **Käyttäjien tyytyväisyyttä edistää se, että he tuntevat järjestelmän toiminnan, osaavat käyttää sitä ja pystyvät tarvittaessa ohjaamaan sitä manuaalisesti.**

Asukkaat eivät tunne talonsa LVI-laitteita kovin hyvin. Kun neljässä asuinkerrostalossa tehtiin kysely (Laine et al. 1998) "miten hyvin tunnette asuntonne lämmityksen ja ilmanvaihdon toimintaperiaatteen?", vain yhdessä rakennuksessa tuntemus oli hyvä: "hyvin" vastasi 28 % ja "pääpiirteissään" 64 %. Muissa kohderakennuksissa puolet vastasi "hyvin" tai "pääpiirteissään" ja toinen puoli "melko huonosti" tai "ei lainkaan".

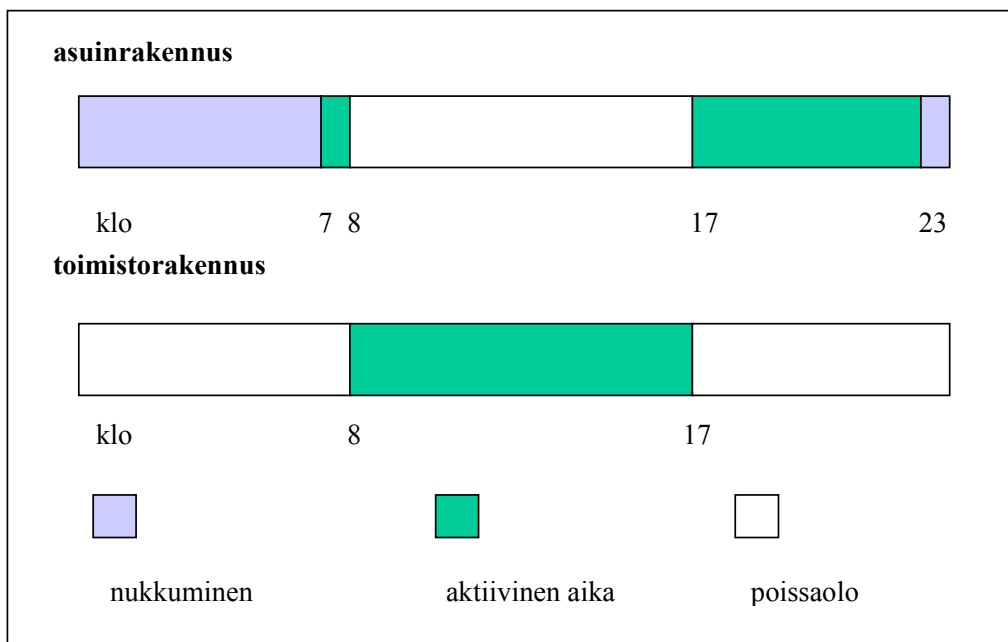
5.1.2 Käyttäjäprofiilit ja niiden oppiminen

Säätöjärjestelmät on yleensä rakennettu pitämään tietty suure lähellä asetusarvoaan. Esimerkiksi lämmityksen säätöjärjestelmän tavoite on pitää huonelämpötila vakiona, kun ulkoilman lämpötila ja muut olosuhteet muuttuvat.

Vaikka rakennuksen käyttö muuttuu kellonajan, vuorokauden ja vuodenajan mukaan, asetusarvot ovat yleensä muuttumattomia. Halutessaan erilämpöisen huoneilman eri kellonaikoina, käyttäjä joutuu muuttamaan asetusarvoa manuaalisesti eli radi-aattorilämmitteisessä talossa vääntämään jatkuvasti patteriventtiiliä.

Energiataloudellisesti olisi järkevää, jos huonelämpötilan asetusarvoa laskettaisiin, kun rakennuksessa ei ole ketään. Viihtyisyyden kannalta on kuitenkin olennaista, että rakennukseen saavuttaessa ja siellä oleskeltaessa rakennus ei ole kylmä. Yöllä monet haluavat hieman alemman huonelämpötilan kuin päivällä.

Asuinrakennuksessa on yhden päivän aikana tyypillisesti kolmenlaista käyttöä: kotona on hereillä olevia ihmisiä, kotona ei ole ihmisiä ja kotona on nukkuvia ihmisiä (kuva 57). Viikonloppuna on samat kolme eri käyttötappaa, mutta ne osuvat eri kellonaikoihin. Toimistorakennuksen aktiivinen käyttöaika on alle kolmasosa viikon tunneista (noin 2 500 tuntia vuodessa), mutta rajat ovat liukuvia, koska ihmiset tulevat eri aikoihin töihin ja lähtevät sieltä eri aikoihin.



Kuva 57. Asuin- ja toimistorakennuksen tyypillinen käyttö arkipäivisin.

Muuttuva asetusarvo voi siis parantaa viihtyisyyttä ja pienentää energiankulutusta. Mikäli energianhinta muuttuu kellonajan mukaan, tietoa voidaan hyödyntää asetusarvojen valinnassa. Mikäli asetusarvo ei ole vakio, se voi

- riippua ajasta (kello, viikonpäivä, kuukausi, auringon lasku/nousu)
- riippua jostakin mitatusta suureesta tai
- muuttua läsnäoloanturin signaalin perusteella.

Mikäli asetusarvo on ajasta riippuva, arvot voivat olla ennalta ohjelmoituja tai käyttäjän mieltymykset voidaan oppia vasta käytön aikana.

Käytön aikana oppiminen voi tarkoittaa esimerkiksi sitä, että järjestelmä rekisteröi käyttäjän asetusarvomuutokset ja oppii hänen tai heidän suosimansa asetusarvoprofiilin. Arkipäivälle ja viikonlopun päivälle tulisi olla oma profiilinsa. Joissakin tapauksissa voi olla tarkoituksen mukaista oppia asetusarvon profiili koko viikon jaksolle, jolloin asetusarvo voisi muuttua eri tavalla eri arkipäivinä.

Huonelämpötilan asetusarvon ja vastaavien tulisi muuttua ennakoivasti. Esimerkiksi, jos käyttäjä palaa kotiin klo 17, niin järjestelmän pitäisi aloittaa huonelämpötilan palauttaminen normaalitasolle hyvissä ajoin ennen sitä. Järjestelmä voi oppia huonelämpötilan nostamiseen tarvittavan ajan.

Käyttäjän ei voida olettaa mukautuvan rakennuksen toimintaan, vaan mukautumisen tulisi tapahtua päinvastoin. Ihanteellista olisi, jos rakennus kykenisi mukautumaan käyttäjän (jatkuvasti) muuttuvaan käyttäytymiseen. Järjestelmien tulisi myös olla hyvin helppokäyttöisiä, ja asetusarvojen "opetuksen" tulisi sujua normaalin käytön aikana, eikä vaatia ylimääräisiä ponnisteluja käyttäjältä. Olisi myös suotavaa, että järjestelmä pystyisi näyttämään tallennetut asetusarvot ja antamaan käyttäjälle mahdollisuuden arvojen muokkaamiseen.

Boisvert & Rubio (1999) ovat esittäneet menetelmän, jossa rakennuksen käyttöprofiili opitaan, ja sitä käytetään hyväksi energian säästössä. Kun käyttäjät eivät ole läsnä, rakennus menee energiansäästötilaan ja huonelämpötilaa alennetaan. Järjestelmä laskee todennäköisyyden sille, että joku tulee kotiin: mitä suurempi tämä todennäköisyys on, sitä vähemmän huonelämpötilaa voidaan alentaa. Ideana on, että saavuttaessa kotiin huonelämpötila on nostettu takaisin viihtyisälle tasolle. Rakennuksen käyttöhistoria on aiemmin opittu läsnäoloanturin avulla, ja käyttäytymisen ennustamisessa hyödynnetään neuroverkkolaskentaa.

Tällaisella järjestelmällä pystytään säästämään energiaa, mutta viihtyisyydessä voi tapahtua heikkenemistä, sillä kun käyttäjä tulee itselleen poikkeukselliseen aikaan kotiin,

rakennus on kylmä. Energiansäästöt on suurimmat sellaisissa tapauksissa, joissa rakennuksen käyttö on hyvin säännöllistä.

5.1.3 Useiden säätösuureiden hallinta ja kytkimet

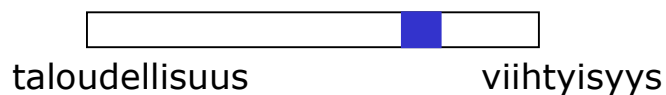
Rakennuksen lämpöoloja kuvaavia suureita ovat mm. lämpötila, suhteellinen kosteus, hiilidioksidipitoisuus, ilman nopeus ja lämpötilaero pystysuunnassa. Niillä on keskinäisiä riippuvuuksia. Lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmien ohjaamisessa käytetään tavallisimmin lämpötilan, kosteuden ja hiilidioksidipitoisuuden mittauksia. Mittausten perusteella ohjataan mm. tuloilmavirtaa, tuloilman lämpötilaa ja raitisilmavirtaa.

Kustannukset kasvavat (lämmityskaudella) ilmavirran, erityisesti raitisilmavirran, ja huonelämpötilan kasvaessa. Taloudellisinta olisi, jos huonelämpötila olisi suhteellisen alhainen ja ilmavirrat suhteellisen pieniä. Viihtyisyys riippuu mm. huonelämpötilasta ja tuloilmavirrasta. Sisäilmastoluokitus 2000:n (2001) mukaan viihtyisyys on suurimmillaan, kun huonelämpötila on tila- tai huoneistokohtaisesti aseteltavissa 20–24 °C. Talvella suositustaso on 21–22 °C. Ilman kosteus on parhaimmassa sisäilmastoluokassa 25–45 % ja hiilidioksidipitoisuus alle 700 ppm. Ilman nopeuden tulisi olla talvella huonelämpötilassa 20 °C alle 0,13 m/s ja huonelämpötilassa 21 °C alle 0,14 m/s. Viihtyisyys siis kasvaa ilmavirran mukana tiettyyn rajaan saakka, mutta liian suuri ilmavirta aiheuttaa epäviihtyisyyttä. Hyvin suurilla ilmavirroilla mm. ilman nopeus ja äänitaso kasvavat liiaksi.

Koska taloudellisuus ja viihtyisyys riippuvat toisistaan, olisi hyvin selkeää, jos käyttäjä valitsisi haluamansa taloudellisuus-viihtyisyystason yhdestä kytkimestä (Kuntze & Bernard 1998) (kuva 58). Yhdellä kytkimellä vaikutettaisiin siis sekä huonelämpötilaan että ilmavirtaan. Käyttäjä voisi valita taipumustensa ja tilanteen mukaan sopivan hinta- ja laatutason. Haluttaessa toiminta voidaan ohjelmoida sellaiseksi, että valituksi tulee taloudellisuus aina yöllä ja ihmisen ollessa poissa.

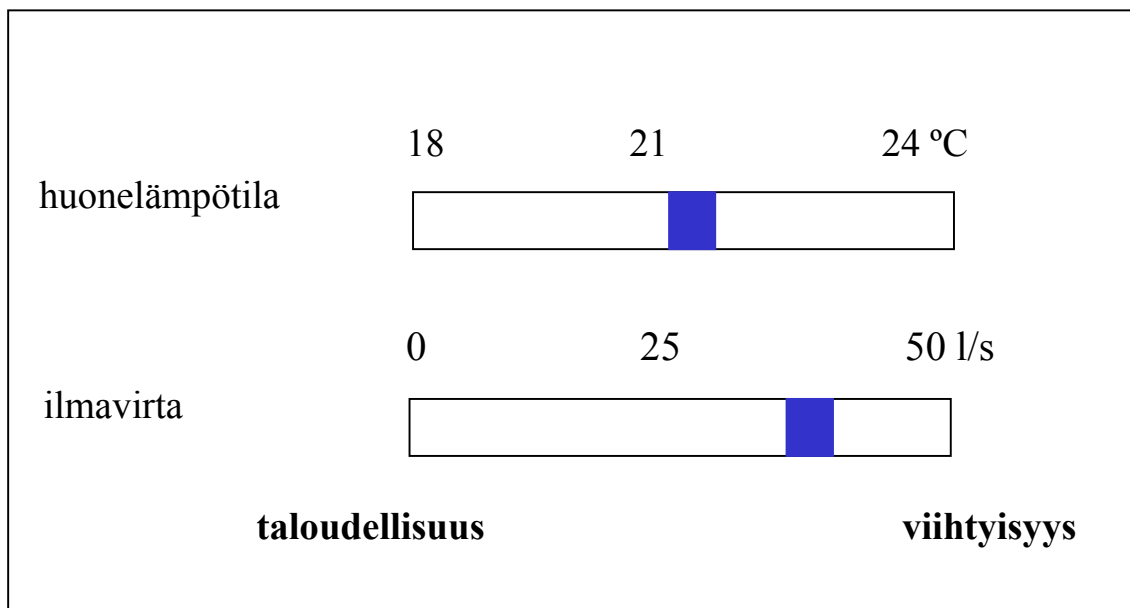
Koska taloudellisuus ja ekologisuus käyvät tässä tapauksessa käsi kädessä, taloudellisuus-teksti voitaisiin korvata tekstillä ekologisuus tai käyttää muotoa "taloudellisuus/ekologisuus". Kytkimeen voidaan tarvittaessa liittää tiedot lämpötila- ja ilmavirtatasoista eri kytkimen asennoilla.

Järjestelmä tulisi konfiguroida siten, että kytkimen ollessa oikeassa reunassaan, huonelämpötila ja ilmavirta ovat suurimman viihtyisyyden arvoissa, siis ei välttämättä laitteiden maksimiarvoissa. Siirrettäessä kytkintä vasemmalle huonelämpötila ja ilmavirta pienenevät. Toki aina pitää olla tietty perusilmanvaihto.



Kuva 58. Kytkin jolla käyttäjä voi valita haluamansa taloudellisuus-viihtyisyystason (Kuntze & Bernard 1998).

Kuvassa 58 esitetyllä kytkimellä vaikutetaan samalla sekä lämpötilaan että ilmavirtaan. Mikäli niitä halutaan ohjata erikseen, voidaan rakentaa seuraavan periaatekuvan (kuva 59) mukainen kytkin.



Kuva 59. Kytkin, jolla voidaan valita huonelämpötilan ja ilmavirran asetusravot.

Kuvan 59 mukaisella kytkimellä valitaan ilmavirta (l/s, litraa sekunnissa), mutta yhtä hyvin kytkimessä voi arvona olla ilmanvaihtuvuus (1/h, vaihtoja tunnissa), vaikka se taitaa olla hankalampi yksikkö tavalliselle käyttäjälle. Kolmas vaihtoehto on, että valittavana suureena on puhallinnopeus, niin kuin nykyisin on yleensä tapana.

Kun huonelämpötila nousee kesällä korkeaksi, käyttäjä todennäköisesti asettaa kytkimestä huonelämpötilan minimiarvoonsa. Mikäli järjestelmään ei kuulu jäähdytystä, tavoiteltu huonelämpötila jää saavuttamatta. Tämä saattaa aiheuttaa ihmetystä käyttäjässä, joka hän ei tunne talonsa järjestelmiä. Jos luottamus rakennuksen järjestelmiin heikenee, niin niitä ei ehkä jatkossa käytetä. Järjestelmien pitäisi mahdollisuuksien mukaan opastaa käyttäjää.

Ilmavirtaa voidaan ohjata myös hiilidioksidipitoisuuden tai ilman kosteuden mukaan. Tavallisimmin nämä arvot pyritään pitämään tietyn, aseteltavissa olevan raja-arvon alapuolella ilmavirtaa kasvattamalla. Tietty minimi-ilmavirta on kuitenkin tarpeellinen, vaikka hiilidioksidi- ja kosteuspitoisuudet olisivatkin alle raja-arvojen. Lausuntovaiheessa olevassa uudessa rakentamismääräyskokoelman osa D2 antaa ohjeen, että käyttäjän ulkopuolella ilmavirta olisi vähintään 0,2 l/h.

Ilmanvaihdon tulisi mielellään olla tehostettavissa kaikissa huoneissa, joissa on lyhytaikaisia epäpuhtaus-, kosteus- tai lämpökuormia. Asuinrakennuksissa tällaisia huoneita ovat keittiö (epäpuhtaudet, kosteus, lämpö), WC (epäpuhtaudet), kylpyhuone (kosteus), saunan pukuhuone (kosteus, lämpö) sekä mahdollisesti myös olohuone, jonne juhlaym. tilaisuuksissa kerääntyy paljon ihmisiä (epäpuhtaudet, lämpö).

Toimistoissa erityisesti kokoushuoneet ja kahviot ovat paikkoja, joissa on ilmanvaihdon tehostamisen tarvetta. Sen sijaan toimistohuoneiden normaali-ilmavirran tulisi kattaa huoneen tavallinen käyttö, jolloin tehostamismahdollisuutta ei tarvita, ellei ilmavirtaa pienennetä, kun toimistohuone on tyhjiällä.

Ihanteellista olisi, jos tehostettaessa ainoastaan kyseisen huoneen ilmavirta muuttuisi. Tällainen järjestelmä edellyttää säätyviä pääte-elimisiä. Asuinrakennuksissa tehostus tarkoittaa tavallisimmin puhaltimen kierrosnopeuden kasvattamista, jolloin kaikkien huoneiden ilmavirrat tehostuvat. Tehostaminen lisää siis energiankulutusta. Vastaavalla tavalla käy, kun järjestelmä esimerkiksi hiilidioksidimittauksen perusteella kasvattaa ilmavirtaa.

Ilmanvaihdon tehostuksen suuruus tai ainakin tehostuksen pituus tulisi olla valittavissa, sillä tarve on erilainen eri tiloissa ja tilanteissa. Ilmanvaihdon tehostuspainikkeessa tai -kytkimessä voisi olla useita eri tehostuksen kestoja: lyhyt tehostus (esim. 5 min), keskipitkä tehostus (esim. 20 min) ja pitkä tehostus (esim. 1 h). Juhlatilanteissa tai vastaavissa olisi tarvetta vielä pidemmille tehostusajoille.

Suotavaa olisi, että huonelämpötila olisi yksilöllisesti valittavissa kaikissa niissä tiloissa, joissa oleskellaan. Toki on selvää, että kovin erisuuruisia huonelämpötiloja ei voida saavuttaa, koska lämpöä kulkeutuu ovista ja sitä johtuu väliseinien läpi. Luultavasti kytkin, joka ilmaisee huonelämpötilan numeroarvona (esim. 17–24 °C), miellyttää käyttäjiä enemmän kuin sellainen, jossa on numeronarvojen sijaan asetusarvon muutossuunta (+/0/-).

Kytkimen tulisi olla yksinkertainen, helposti ymmärrettävä ja sen tulisi sijaita ihmisten ulottuvilla, ei korkealle sijoitettuna tai kaappien takana. Kytkimen tarkoituksen tulisi käydä välittömästi ilmi jokaiselle.

Toimistoissa voisi olla luonnollista, jos omalta tietokoneelta voisi ohjata huoneen talotekniikkaa. Jos tällaiseen järjestelmään ei ole liitetty muita toimintoja, esimerkiksi energiankulutuksen seurantaa, on ehkä yksinkertaisempaa, jos käytetään erillistä kytkintä, joka sijaitsee esim. valokatkaisijan vieressä tai muualla helposti saavutettavissa.

Myös kotitietokonetta voidaan käyttää taloteknisten järjestelmien ohjaamiseen. Tällaiseen järjestelmään kannattaa samalla liittää muitakin ominaisuuksia kuin on edellä mainituilla kytkimillä toteutettavissa. Oppiva järjestelmä voi esimerkiksi panna valot päälle aamulla heräämisaikaan, katkaista sähköt halutuista laitteista automaattisesti jne. Perustasollaan kotiautomaatiojärjestelmän tulisi olla helppokäyttöinen. Toisaalta edistyneitä käyttäjiä varten olisi hyvä olla olemassa mahdollisuus makro-ohjelmointiin

Talotekniikkajärjestelmiä voidaan ohjata myös puheen avulla (Pakanen & Möttönen 1999). Markkinoilla on jo tällaisia tuotteita.

5.2 Oppiva algoritmi vakioilmavirtaiseen järjestelmään

Tässä luvussa kuvataan vakioilmavirtaiseen järjestelmään kehitetyn oppivan algoritmin ominaisuudet, rakenne, simuloinnit ja koekohteessa testauksen tulokset. Algoritmin tehtävä on ohjata älykkäästi rakennuksen tai huoneiston lämmitysjärjestelmää. Tavoitteena on säästää lämmitysenergiaa laskemalla sisäilman lämpötilaa silloin, kun rakennus on tyhjiään. Jottei viihtyisyys rakennuksessa kärsisi, sisälämpötila palautetaan normaaliksi ennen käyttäjien saapumista. Vakioilmavirtaisessa järjestelmässä algoritmi tuottaa rakennuksen lämmitysjärjestelmälle sisäilman lämpötilan asetusarvon. Asetusarvon laskenta perustuu sisä- ja ulkolämpötilojen lisäksi rakennuksen käyttäjien läsnäolotietoihin. Algoritmin oppivat ominaisuudet liittyvät palautuslämmitysjärjestelmän käyttäjää miellyttävien olosuhteiden oppimiseen.

5.2.1 Algoritmin kuvaus

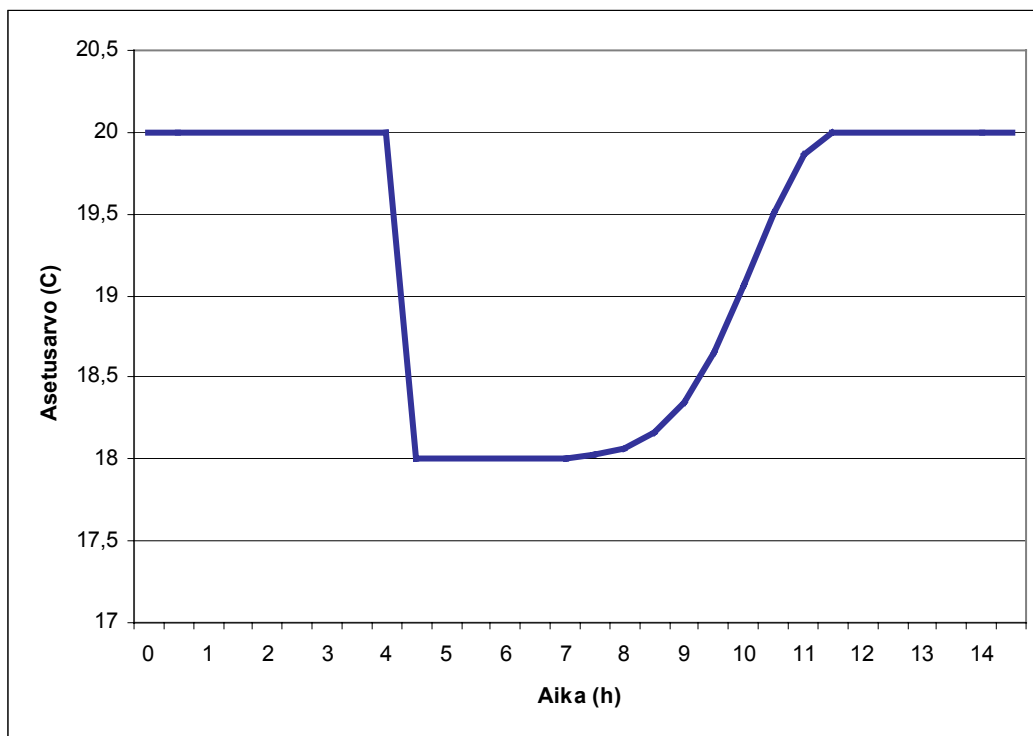
Lämpötilan asetusarvon laskenta-algoritmi päivittää asetusarvoa puolen tunnin välein. Asetusarvon laskemiseksi algoritmin pitää saada tieto rakennuksen sisä- ja ulkolämpötiloista, ajanhetkestä, käyttäjän lämpötilan asetuksesta sekä läsnäolon tilasta rakennuksessa. Mikäli rakennuksen käyttöaikoja ei voida ennalta määrittellä, läsnäolotiedon saamiseksi tarvitaan joko luotettava läsnäoloanturi tai kytkin, jolla käyttäjä viestii järjestelmälle läsnäolostaan. Luvuissa 5.2.2 ja 5.2.3 esitetyissä algoritmin simuloinneissa ja koekohteessa testauksessa läsnäolotieto on tuotettu ennalta sovittujen kellonaikojen mukaisesti.

Algoritmin rakenne ja ominaisuudet

Toimintansa ensimmäisten päivien aikana algoritmi kerää tietoa rakennuksen käytöstä ja tallentaa nämä tiedot. Koska tallennusväli on puoli tuntia, viikon aikana tallennetaan $2 \cdot 24 \cdot 7 = 336$ arvoa. Viikko on valittu algoritmin intervalliksi siksi, että useiden rakennusten kohdalla käyttöaste noudattaa parhaiten viikkorytmiä eikä esimerkiksi kuukausi- tai vuosirytmisiä. Algoritmi vertailee saamiensa läsnäoloarvoja edellisen viikon vastaaviin arvoihin ja tekee näiden perusteella mahdollisia muutoksia asetusarvoon.

Lämpötilan asetusarvo voidaan laskea, jos rakennus on tyhjillään samaan aikaan kuin edellisellä viikolla, ja edellisen viikon tietojen perusteella on todennäköistä, että kukaan ei ole tulossa rakennukseen seuraavien parin tunnin aikana. Asetusarvoa nostetaan lähestyttäessä sitä ajanhetkeä, jolloin käyttäjä on edellisellä viikolla tullut rakennukseen. Asetusarvon pudotus käyttäjän ollessa poissa tapahtuu askelmaisesti, jotta pudotuksesta saadaan mahdollisimman suuri hyöty. Asetusarvon nostaminen tapahtuu pehmenneysti vaiheittain. Kuva 60 esittää asetusarvon laskua ja nostoa. Kuvassa vaaka-akselilla on aika tunneissa ja pystyakselilla lämpötilan asetusarvo Celsius-asteissa.

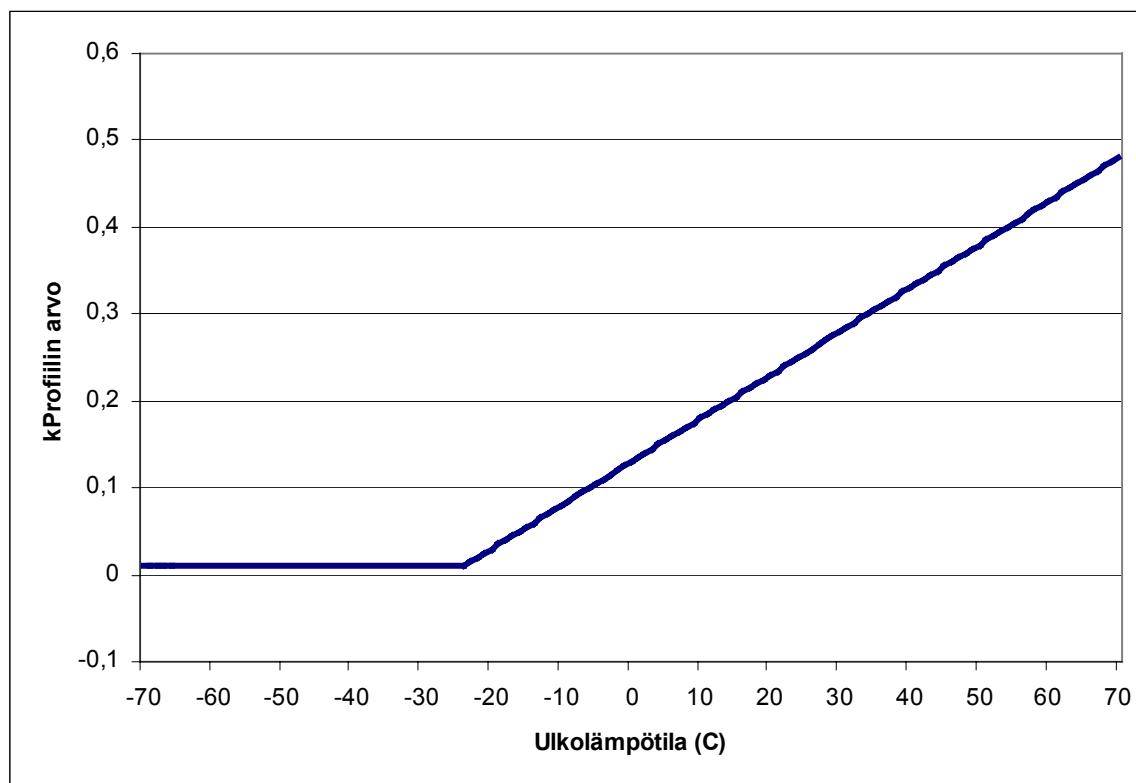
Kuvassa 60 on oletettu, että rakennuksen normaalilämpötila on $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, ja jos rakennuksessa ei ole ketään paikalla, voidaan lämpötilaa laskea $18\text{ }^{\circ}\text{C}$:seen. Käyttäjä voi määrittellä nämä niin sanotut normaali- ja poissaololämpötilat.



Kuva 60. Asetusarvon pudotus ja nosto ulkolämpötilan ollessa $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ulkolämpötila vaikuttaa siihen ajanhetkeen, jolloin asetusarvoa aletaan nostaa kohti normaalilämpötilaa. Ajankohta riippuu ulkolämpötilan lisäksi rakennuksen dynamiikasta ja lämmitysjärjestelmän ominaisuuksista. Näiden riippuvuuksien takia algoritmin pitää mukautua erilaisiin rakennuksiin ja vuodenaikojen vaihteluihin. Sitä varten on toteutettu toiminto, jolla lämpötilan noston aloitushetkeen vaikuttavia parametreja voidaan muuttaa. Tavoitteena on, että todellinen lämpötila on vähintäänkin hyvin lähellä asetusarvoa sillä hetkellä, jolloin rakennukseen tulee ihmisiä (kuvassa 60 ajanhetken 12 h jälkeen). Jos sisälämpötila ei ole noussut asetusarvoon tarpeeksi nopeasti, parametreja muutetaan siten, että seuraavalla kerralla asetusarvon nostaminen aloitetaan aikaisemmin.

Jokaista ulkolämpötilan kokonaislukuarvoa välillä $-70 - +70^{\circ}\text{C}$ vastaa erillinen parametriarvo. Näitä arvoja ylläpidetään kProfiili-nimisessä muuttujassa, joka voidaan tulkitä 141 alkia käsittäväksi vektoriksi. kProfiilin on tarkoitus kuvata rakennuksen ja lämmityslaitteen dynaamisia ominaisuuksia, jotka riippuvat muun muassa ulkolämpötilasta ja rakennusmateriaaleista. Vaikka algoritmi voi muokata kProfiilia, pitää tehdä jonkinlainen alkuarvaus, jotta kProfiilin mukautuminen rakennuksen ominaisuuksiin olisi riittävän nopeaa. Kuva 61 esittää kProfiilin alkuarvoja, joita on käytetty sekä simuloinneissa että koekohteen testeissä.



Kuva 61. kProfiilin alkuarvot.

Asetusarvon nostovaiheessa lasketaan uusi asetuservo kaavan

$$T_{\text{asetus}}(t) = T_{\text{poistaso}} + \Delta T * e^{-k * d(t) * d(t)} \quad (3)$$

mukaan, jossa

t	aika
$T_{\text{asetus}}(t)$	algoritmin laskema lämpötilan asetuservo hetkellä t,
T_{poistaso}	lämpötilan asetuservon minimiarvo asukkaiden poissaoloaikana,
ΔT	lämpötilaero, normaalilämpötilan ja poissaololämpötilan erotus,
k	kProfiilin arvo vallitsevassa ulkolämpötilassa,
d(t)	asetuservon päivityskertojen lukumäärä ennen rakennuksen käyttäjän saapumista (päivitys puolen tunnin välein).

Edellä esitettyjen lähinnä käyttäjän poissaoloaikana opittavien asioiden lisäksi algoritmi oppii käyttäjän läsnäoloaikana lämpötilan asetuservoon tekemistä muutoksista. Algoritmi tallentaa käyttäjän tekemät muutokset ja ohjaa lämmitysjärjestelmää myös seuraavien viikkojen vastaavina hetkinä automaattisesti käyttäjän mielilämpötilaan. Tiettynä iltana viikossa käyttäjä saattaa haluta esimerkiksi saunaillan päätteeksi, että sisälämpötila on astetta korkeampi kuin normaalisti. Asetuservon muuttaminen täytyy tehdä vain yhtenä iltana, jonka jälkeen algoritmi automaattisesti asettaa seuraavien viikkojen vastaavina hetkinä sisälämpötilan asetuservon astetta korkeammaksi. Asetuservoon tehty muutos on voimassa hetkellisesti 1,5 tuntia, jonka jälkeen algoritmi palauttaa asetuservon normaalitasolle. Ainoastaan kello 22:00 jälkeen tehdyt muutokset normaalilämpötilaan nähden ovat voimassa seuraavaan aamuun kello 06:00:een asti, jotta esimerkiksi matalamman yölämpötilan opettamiseksi käyttäjän ei tarvitse valvoa koko yötä.

5.2.2 Simuloinnit

Tässä luvussa esitetään edellä kuvatun oppivan algoritmin testiajot. Kyseinen algoritmi oppii käyttäjän lämpötilamielityksiä ja säästää lämpötilaenergiaa laskemalla huonelämpötilaa talon ollessa tyhjillään, mutta pyrkii nostamaan huoneilman lämpötilan käyttäjän haluamaan arvoon ennen kuin käyttäjä saapuu kotiin.

Simuloitavat tapaukset

Simuloitu kohde on liitteessä A kuvattu asuinkerrostalon huoneisto, jonka lämmitys hoidetaan ilmalämmityskoneella. Näissä laskelmissa ilmavirta (47 l/s eli 0,85 l/h) pi-

detään vakiona. Huonelämpötila pyritään pitämään asetusarvossaan muuttamalla tuloilman lämpötilaa, jonka sallitaan vaihdella 15–45 °C.

Simulointituloksissa tarkastellaan, kuinka algoritmi muuttaa huonelämpötilan asetusarvoa, kuinka hyvin huonelämpötila saavuttaa asetusarvonsa ja saavutetaanko säästöjä energiankulutuksessa. Simuloitu ajanjakso on neljän kuukauden (17 viikkoa) pituinen talvijakso. Energiankulutuksia vertaillaan 15 viimeiseltä laskentaviikolta. Lämpötiloista tärkeimmät esitetään käyrinä simulointijakson kolmannelta viikolta, jolloin ulkolämpötila vaihtelee -20 °C:sta 0 °C:seen (kuva 62).



Kuva 62. Ulkolämpötila tarkasteluvuorokaudella (laskennan kolmas viikko).

Simulointitapaukset:

A) Huonelämpötilan asetusarvo on jatkuvasti 21 °C (ns. vertailutapaus).

B) Huonelämpötilan asetusarvon profiili opitaan käyttäjältä. Aikarajoja ja huonelämpötilan asetusarvoa muutetaan laskelmissa seuraavasti:

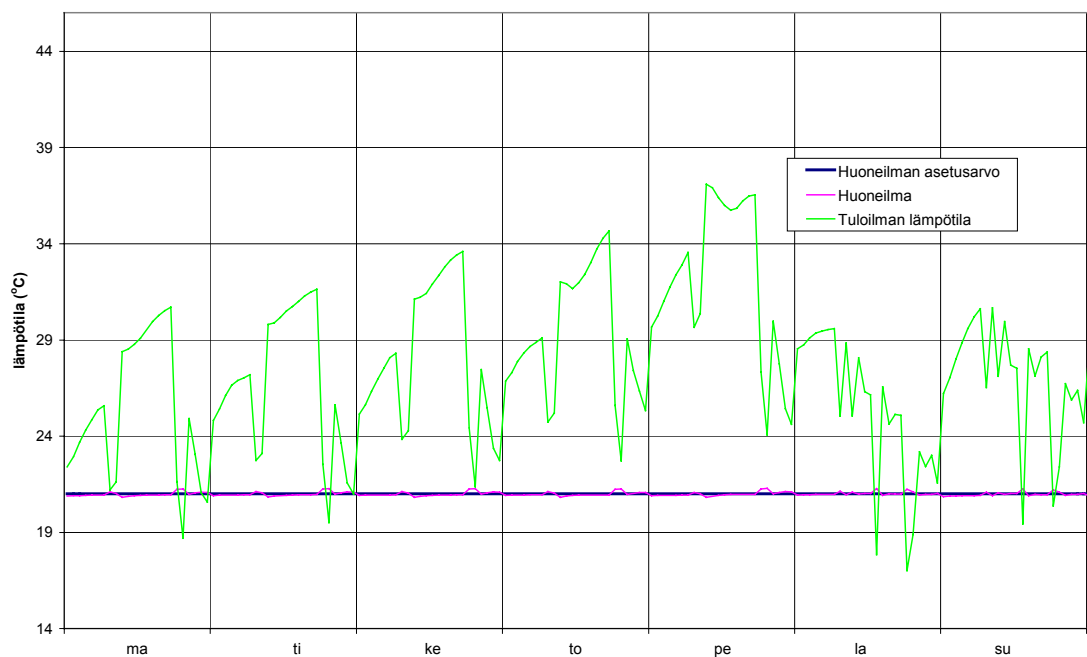
- Simuloinnin alussa aikavälit ovat klo 8–16, 16–22 ja 22–8 kaikkina päivinä, mutta asetusarvo on vakio 21 °C koko ajan.
- Toisena päivänä (tiistai) klo 8 asetusarvoksi muutetaan 20 °C.
- Kolmantena päivänä klo 23 asetusarvoksi muutetaan 19 °C.
- Neljäntenä päivänä klo 9 asetusarvoksi muutetaan 18 °C.
- Seitsemäntenä (sunnuntai) päivänä klo 23 asetusarvoksi muutetaan 19 °C.
- 13. päivänä (lauantai) klo 23 asetusarvoksi muutetaan 19 °C.

- C) Huonelämpötilan asetusarvo on yöllä 19 °C, arkipäivisin keskellä päivää 18 °C ja muulloin 21 °C. Tämä profiili ohjelmoidaan etukäteen tai opetetaan jokaiselle viikonpäivälle erikseen.
- D) Kuten edellinen (C), mutta ihmiset ovat poissa arkisin klo 8–16, minkä läsnäoloanturi aistii.
- E) Kuten edellinen (D), mutta testataan, miten käy, kun kotiin tullaan yllättäen, normaalista käyttöprofiilista poiketen. Kotiin saavutaan testiviikon perjantaina klo 11, minkä läsnäoloanturi havaitsee.

Simulointitulokset

Eri simulointitapausten tulokset nähdään kuvissa 63–67. Tuloksissa esitetään kuva huoneilman lämpötilasta eri simulointitapauksissa yhtenä simulointijakson viikoista. Lisäksi esitetään taulukko 21, johon on koottu eri tapausten energiankulutukset. Simulointitapaukset kuvattiin edellä.

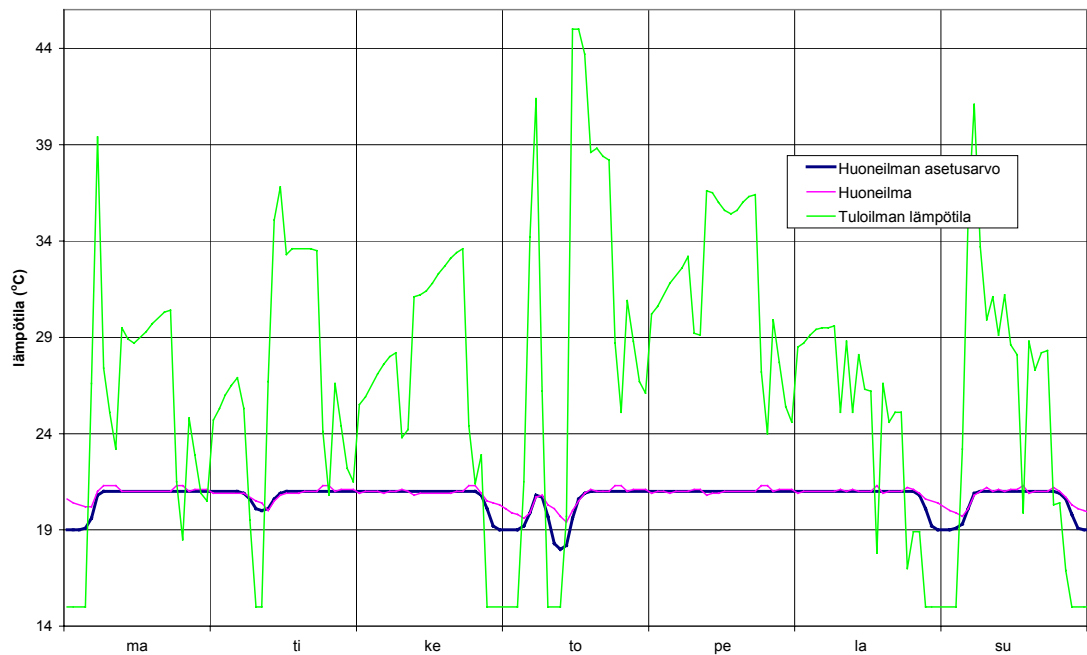
Simulointitapaus A



Kuva 63. Huoneilman lämpötilan asetusarvo, huoneilman lämpötila ja tuloilman lämpötila laskennan kolmannella viikolla. Simulointitapaus A.

Huonelämpötila pysyy hyvin asetusarvossaan koko viikon ajan. Tuloilman lämpötila vaihtelee rakennuksen sisäisten lämpökuormien ja ulkolämpötilan mukaan. Tuloilman lämpötila on korkeimmillaan perjantaina, jolloin ulkolämpötila on viikon minimissään, noin -18 °C:ssa

Simulointitapaus B



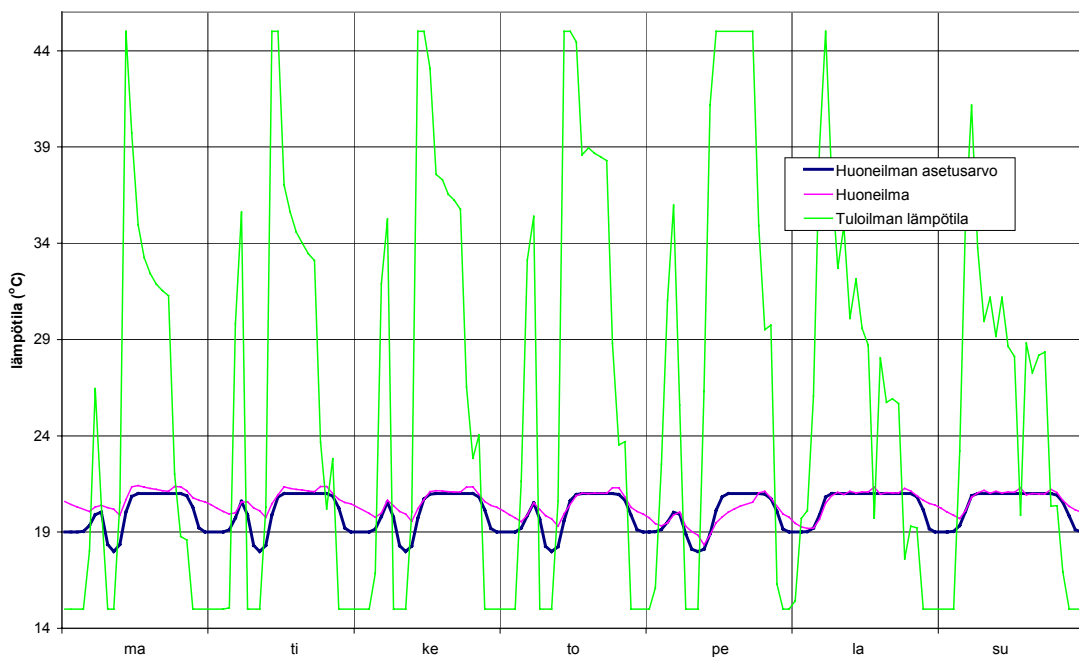
Kuva 64. Huoneilman lämpötilan asetusarvo, huoneilman lämpötila ja tuloilman lämpötila laskennan kolmannella viikolla. Simulointitapaus B.

Huonelämpötilan asetusarvo on suurimman osan ajasta 21 °C. Tämä johtuu siitä, että algoritmi käsittelee jokaista viikonpäivää erikseen (luku 5.2.1) eikä opi asetusarvoprofiilia kaikille arkipäiville yhtäaikaaisesti.

Huonelämpötila pysyy jatkuvasti lähellä asetusarvoaan tai on sen yläpuolella. Koska huonelämpötila laskee hitaasti, se ei aina saavuta asetusarvoaan.

Torstaina ihmisten poistuessa päiväksi kotoa huonelämpötilan asetusarvo laskee 18 °C:seen, mutta on 21 °C:ssa eli asetusarvossaan, kun ihmiset palaavat kotiin.

Simulointitapaus C



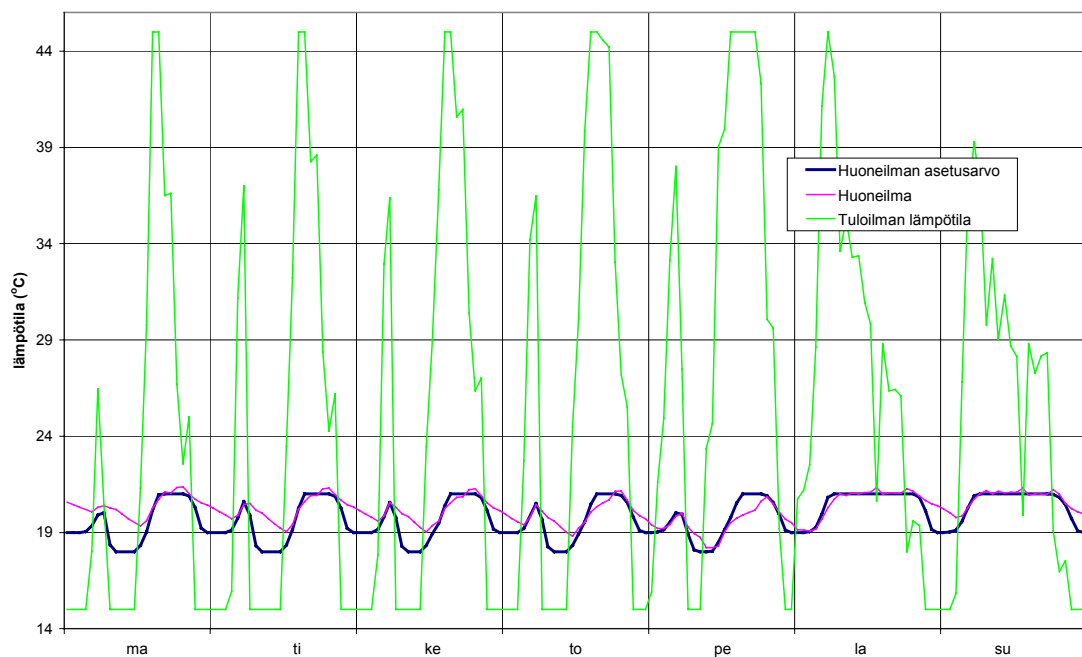
Kuva 65. Huoneilman lämpötilän asetusrvo, huoneilman lämpötilä ja tuloilman lämpötilä laskennan kolmannella viikolla. Simulointitapaus C.

Huonelämpötilän asetusrvolla on selkeä viikkoprofiili. Öisin asetusrvo on 19 °C ja virka-aikaan se on 18 °C. Iltaisin sekä viikonloppuisin päivällä asetusrvo on 21 °C.

Huonelämpötilä seuraa varsin hyvin asetusrvoaan, mutta asetusrvon alentuessa huonelämpötilä seuraa asetusta hitaasti, näin varsinkin lämpiminä päivinä.

Huonelämpötilä on asetusrvossaan ihmisten herätessä. Ihmisten saapuessa kotiin huonelämpötilä on asetusrvossaan lukuun ottamatta viikon kylmintä päivää, perjantaita, jolloin huonelämpötilä on 21 °C:n sijaan noin 20 °C. Poikkeama viittaa siihen, että algoritmin parametrit eivät ole parhaat mahdolliset, eikä oppimista ole tapahtunut riittävästi. Poikkeaman merkitys viihtyisyydelle on kuitenkin pieni.

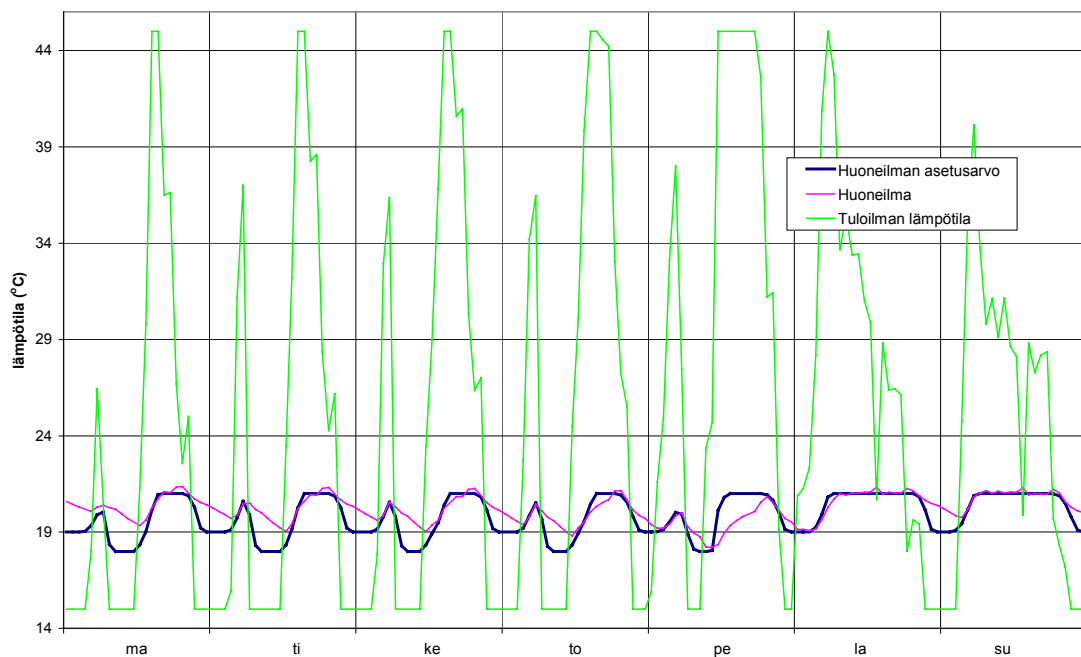
Simulointitapaus D



Kuva 66. Huoneilman lämpötilän asetusrvo, huoneilman lämpötilä ja tuloilman lämpötilä laskennan kolmannella viikolla. Simulointitapaus D.

Huonelämpötilän asetusrvolla on selkeä viikkoprofiili, joka muistuttaa edellistä, mutta asetusrvo on päivällä pidemmän aikaa 18 °C:ssa. Huonelämpötilä seuraa varsin hyvin asetusrvoaan, niin kuin edellisessä tapauksessa. Huonelämpötilä on asetusrvossaan ihmisten herätessä ja myös, kun ihmiset tulevat takaisin kotiin lukuun ottamatta torstaita ja perjantaita, jolloin huonelämpötilä on ihmisten saapuessa 0,5–1 °C alle asetusrvon. Tällä ei ole olennaista merkitystä viihtyisyydelle.

Simulointitapaus E



Kuva 67. Huoneilman lämpötilan asetusarvo, huoneilman lämpötila ja tuloilman lämpötila laskennan kolmannella viikolla. Simulointitapaus E.

Tapaus on siis muuten vastaava kuin edellinen, mutta kotiin saavutaan normaalista poiketen perjantaina jo klo 11. Tällöin huonelämpötilan asetusarvo nousee nopeasti normaaliarvoonsa 21 °C, jolloin tuloilman lämpötila nousee maksimiinsa. Yhden kerran tapahtunut normaalista poikkeava käytös ei vaikuta seuraavan viikon asetusarvoihin.

Säädin toimii moitteettomasti, mutta huonelämpötila on kotiin saavuttaessa alle 19 °C. Testipäivä on kylläkin hankalin mahdollinen, koska ulkolämpötila on tällöin alimmillaan. Muina päivinä kotiin tullessa lämpötila ei olisi yhtä alhainen. Mikäli asetusarvoja voisi muuttaa esimerkiksi GSM-puhelimella (mm. kotimaisella Oumanilla on tällaisia markkinoilla), käyttäjä pystyisi nostamaan huonelämpötilaa ennalta.

Mikäli halutaan maksimoida viihtyvyyttä, ei asetusarvoa kannata laskea poissaoloaikana paljoakaan normaaliarvosta. Mikäli halutaan maksimoida säästöä energiankulutuksessa, asetusarvoa voidaan laskea useita asteita.

Energiankulutukset

Taulukko 21. IV-koneen lämmityspatterin tarvitsema energia (ilmalämmitys) 15 viikon tarkastelujaksolla. Kulutuslukeman alapuolella esitetään poikkeama vertailutapaukseen prosentteina.

Simulointitapaus	Lämpöenergiankulutus	Viihtyisyys (huonelämpötilan poikkeama asetuksesta, kun ihmisiä kotona)	Kommentti
A	1917 kWh (vertailutapaus)	(vertailutapaus)	
B	1843 kWh (- 4 %)	viihtyisyys ei heikkene vertailutapaukseen verrattuna	pienet säästöt energiankulutuksessa
C	1750 kWh (- 9 %)	viihtyisyys ei heikkene vertailutapaukseen verrattuna (paitsi muutamina tunteina perjantaina)	kohtalainen säästö energiankulutuksessa
D	1687 kWh (- 12 %)	viihtyisyys ei heikkene vertailutapaukseen verrattuna (paitsi muutamina tunteina torstaina ja perjantaina)	suurehko säästö energiankulutuksessa
E	kuten ed.	kuten ed.	kuten ed.

Oppivalla algoritmilla voidaan saavuttaa yli 10 %:n säästö lämpöenergiassa ilman, että viihtyisyys heikkenee sanottavasti.

5.2.3 Tulokset koekohteesta

Tässä luvussa esitetään oppivan algoritmin (vakioilmavirtainen tapaus) testaus ja testauksen tulokset METOP-matalaenergiatalossa. Testaus tapahtui vuoden 2001 keväällä (19.3.–4.6.2001). Koekohde oli VTT:n METOP-matalaenergiatalo (Pietarinen & Saari 1999), joka sijaitsee Espoossa Otaniemen koalueella.

METOP-matalaenergiatoimistotalo

METOP-toimistotalo rakennettiin Otaniemeen vuonna 1991. Rakennuksen lämmitysenergiankulutus on noin 60 % pienempi kuin toimistotalojen keskimäärin. Esimerkiksi ikkunoiden k-arvo on 0,5 W/m²K.

Ennalta tiedettiin, että hyvän eristyksen ansiosta lämmitysenergian säästöt tulevat jäämään matalaenergiatalossa pienemmäksi kuin tavanomaisessa rakennuksessa. Tulevaisuuden rakennuksen prototyyppinä METOP-talo soveltuu kuitenkin hyvin koekohteeksi.

METOP-matalaenergiatoimistotalon ilmanvaihtolämmitysjärjestelmässä kommunikointi komponenttien välillä tapahtuu LonWorks-kenttäväylän kautta. Järjestelmän hallintaa varten väylään on liitetty mikrotietokone Microsoft Windows for Workgroups 3.11 -käyttöjärjestelmällä. Testausta varten oppiva algoritmi toteutettiin Visual Basic -ohjelmointikielellä simuloinneissa käytetyn Fortran-kielisen lisäksi.

METOP-talon toinen kerros, jossa testaus suoritettiin, on eristetty alakerrasta, ja toisen kerroksen ilmanvaihtolämmitysjärjestelmä on rakennettu vuonna 1998 (Pietarinen & Saari 1999). Järjestelmän pääkomponentit ovat lämmöntalteenotolla varustettu tulo- ja poistoilmanvaihtokone, äänenvaimentimet, ilmakehäveto, poistoilman päätelaitteet ja lämmitettävät tuloilmalaitteet säätiminen. Järjestelmä ulottuu kaikkiin toisen kerroksen viiteen huoneeseen sekä näitä yhdistävään käytävään (eteiseen). Järjestelmän komponentit on yhdistetty LonWorks-kenttäväylällä, jonka kautta myös säätö ja tarvittavat mittaukset tehdään.

Ilmanvaihtokone (Vallox Oy:n ILMAVA) tuottaa peruslämmön huoneisiin. Lisäksi huonekohtaiset säätimet (Produl Oy:n HLLON-tyyppiset PI-säätimet) säätävät huoneiden lämpötiloja erillisten sähkölämmittimien avulla. Lämpötilan asetusarvoa voidaan muuttaa huonekohtaisesti ± 6 °C suhteessa kenttäväylän kautta annettuun asetusarvoon.

Oppivan algoritmin testaaminen

Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän toiminnan seuranta ja ohjaus tapahtuvat kenttäväylään liitettyltä tavalliselta 486 PC -mikrotietokoneelta. Järjestelmän käyttöliittymä on toteutettu hyödyntäen Microsoft Excel -ohjelmaa ja sen tarjoamia mahdollisuuksia omien makrojen tekemiseen Visual Basic -ohjelmointikielellä. Kuvassa 68 on esitetty METOP-matalaenergiatoimistotalon ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän käyttöliittymän huonesäädinten perusnäyttö, joka havainnollistaa myös talon toisen kerroksen rakennetta.

Kuvan 68 esittämältä ruudulta voidaan lukea huoneiden lämpötilat ja erillisten sähkölämmittimen ohjausarvo (% maksimiarvosta). Huoneen 22 lämpötilansäädöstä huolehtii analoginen yksikkösäädin, josta ei ole mahdollista lukea automaattisesti mittaustietoa. Siksi huonetta 22 ei voitu ottaa huomioon mittauksissa eikä säädössä.

METOP-talon 2. kerroksen LonWorks huonesäädinten oloarvot

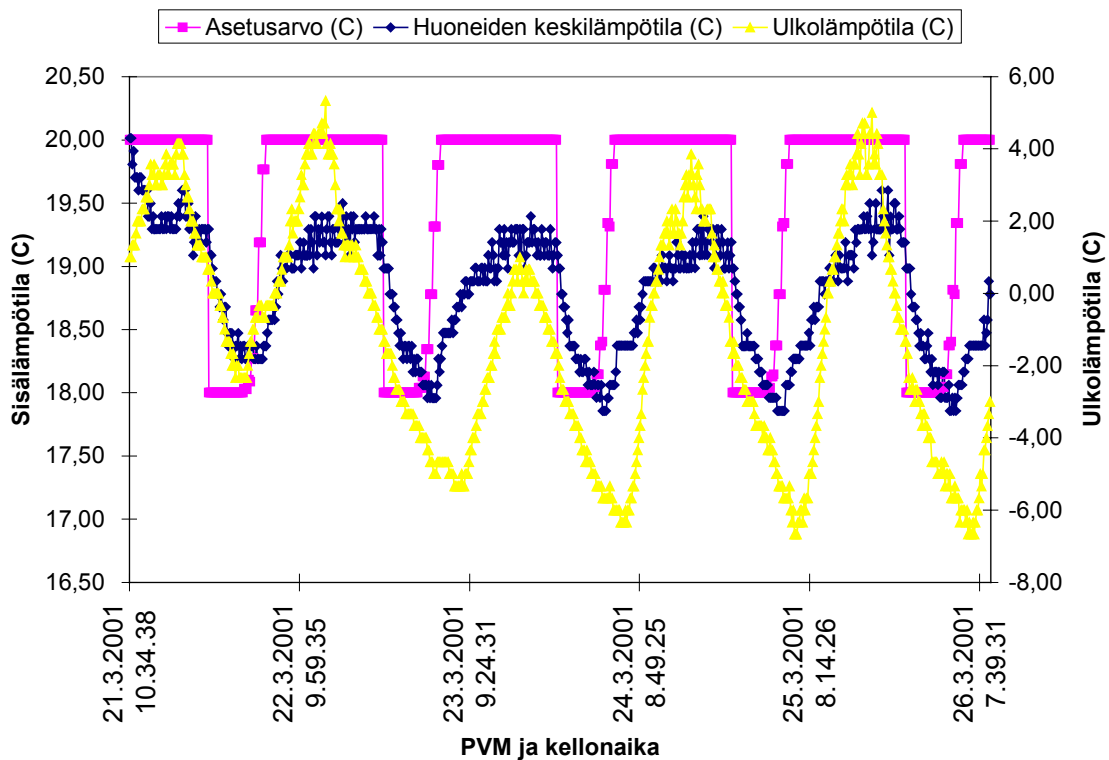
Huone 25 Lämpötila (oC) 18,78 Asetusarvo (oC) 19,43 Lämmitysohjaus (%) 99,92 Vikahälytys OFF	Huone 24 Lämpötila (oC) 18,78 Asetusarvo (oC) 18,39 Lämmitysohjaus (%) 36,72 Vikahälytys OFF	
Eteinen Lämpötila (oC) 18,27 Asetusarvo (oC) 18,97 Lämmitysohjaus (%) 99,96 Vikahälytys OFF	Käytävä 26	
Huone 21 Lämpötila (oC) 19,29 Asetusarvo (oC) 18,68 Lämmitysohjaus (%) 21,08 Vikahälytys OFF	Huone 22	Huone 23 Lämpötila (oC) 19,81 Asetusarvo (oC) 18,97 Lämmitysohjaus (%) 30,44 Vikahälytys OFF

Kuva 68. METOP-talon ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän käyttöliittymän huonesäädinten seurantasivu.

Oppiva algoritmi toteutettiin METOP-talossa ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän käyttöliittymän yhteyteen. Käyttöliittymään lisättiin makro, joka kerää tarvittavat mittaustiedot järjestelmästä ja toimittaa nämä tiedot algoritmille, syöttää algoritmin tuottaman asetusarvon ilmanvaihtokoneelle sekä tallentaa mitatut arvot ja asetusarvon tiedostoon. Rakennuksen sisälämpötila lasketaan keskiarvona kaikkien viiden säädettävän huoneen lämpötiloista. Sisälämpötilat saadaan kuvan 68 esittämältä käyttöliittymän sivulta ja ulkolämpötilan mittaustiedot näkyvät käyttöliittymän pääsivulla. Arvot päivittyvät käyttöliittymässä usein suhteessa valittuun mittaustiedon tallennusväliin, joka on 10 minuuttia.

Testitulokset

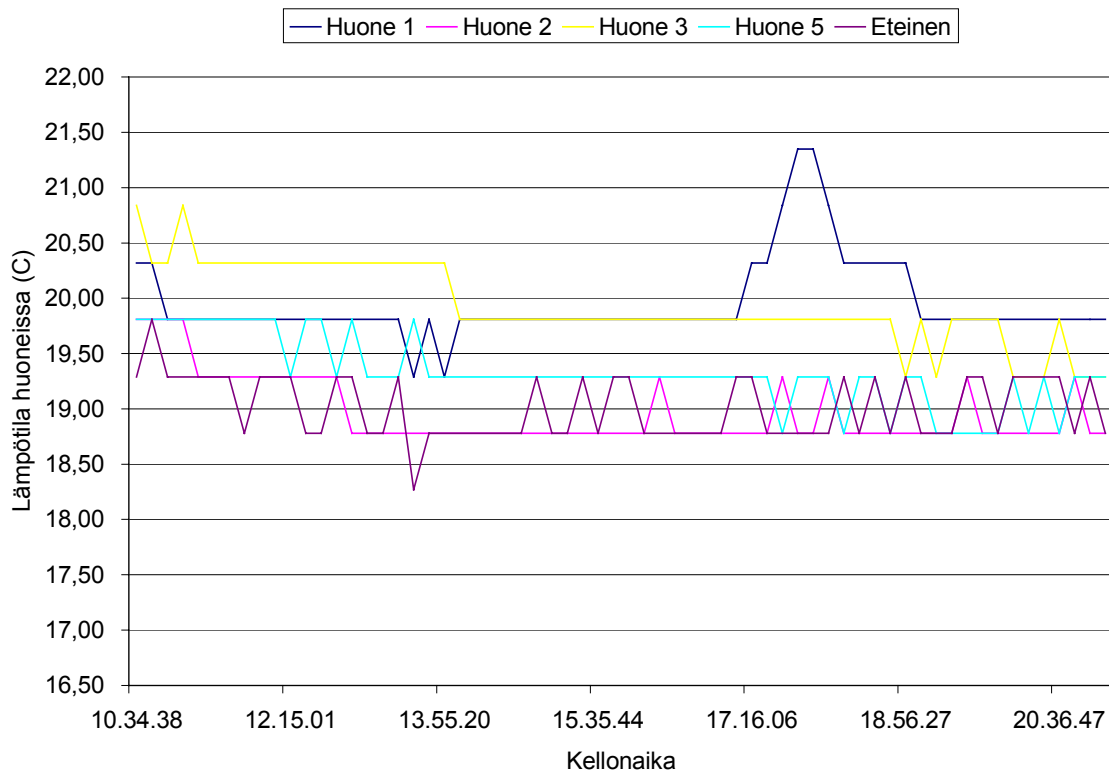
Aluksi algoritmia testattiin siten, että käyttäjän asetukseksi määrättiin kello 22.00–06.00 välisenä aikana 18 °C, ja muina aikoina lämpötilan asetusarvo oli 20 °C. Tässä vaiheessa ei vielä otettu huomioon läsnäolon mittaamista, vaan algoritmille annettiin koko ajan läsnäolotiedoksi 1, joka vastaa rakennuksen käyttäjän läsnäoloa. Testauksessa käytettiin algoritmin ominaisuuksia käyttäjän valitseman yölämpötilan ja rakennuksen dynamiikan oppimiseksi. Ensimmäisen testausjakson (21.–26.3.2001) tuloksia esittää kuva 69.



Kuva 69. Testausjakson 21.–26.3. tulokset.

Kuvasta 69 nähdään selvästi, että sisälämpötila jää alle asetuservon, kun lämpötilan asetuservo on 20 °C. Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän teho olisi riittänyt sisäilman lämmittämiseen, mutta järjestelmän sisäisissä asetuksissa oli virhettä. Tämä todettiin tarkastelemalla eri huoneiden lämmitysvastusten ohjausarvoja. Vastukset eivät lämmitäneet täydellä teholla, kun huoneiden keskilämpötila asettui 19,3 °C:n tuntumaan. Kuva 70 esittää mittausjakson ensimmäiseltä päivältä lämpötilojen toteutuneita huonekohtaisia arvoja, kun kaikkien huoneiden asetuservo on 20 °C.

Kuvasta 70 nähdään, että huoneen 1 lämpötila on pysytellyt lähellä 20 °C:ta lukuun ottamatta noin kello 17.00–19.00 tapahtunutta nousua. Tämä nousu johtuu siitä, että huoneeseen on paistanut aurinko kyseisellä aikavälillä ja ilma on lämmennyt huoneessa. Huoneiden 2 ja 5 lämpötilat ovat asettuneet 19 °C:n ja huoneen 3 lämpötila 19,5 °C:n tuntumaan. Eteisen lämpötila on asettunut 19 °C:seen. Huoneiden numeroinnit poikkeavat tässä kuvan 68 mukaisista numeroinneista. Vastaavuudet on esitetty taulukossa 22.



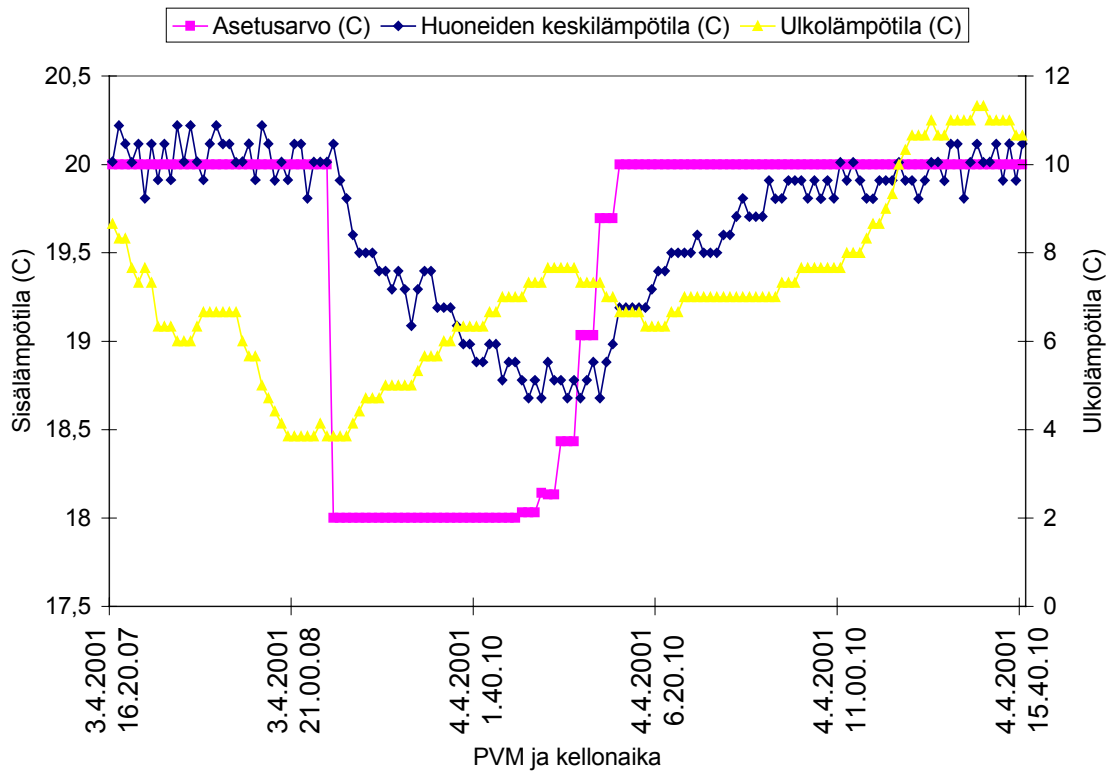
Kuva 70. Huoneissa toteutuneet lämpötilat 21.3. asetusravolla 20 °C.

Taulukko 22. Huoneiden numerointien vastaavuudet.

Kuvan 68 mukainen numerointi	Kuvan 70 mukainen numerointi
25	1
24	2
23	3
21	5

Erilaiset numeroinnit johtuvat siitä, että ilmanvaihtokoneen ohjauksessa huoneet on numeroitu 1–5, mutta käyttöliittymässä 21–25.

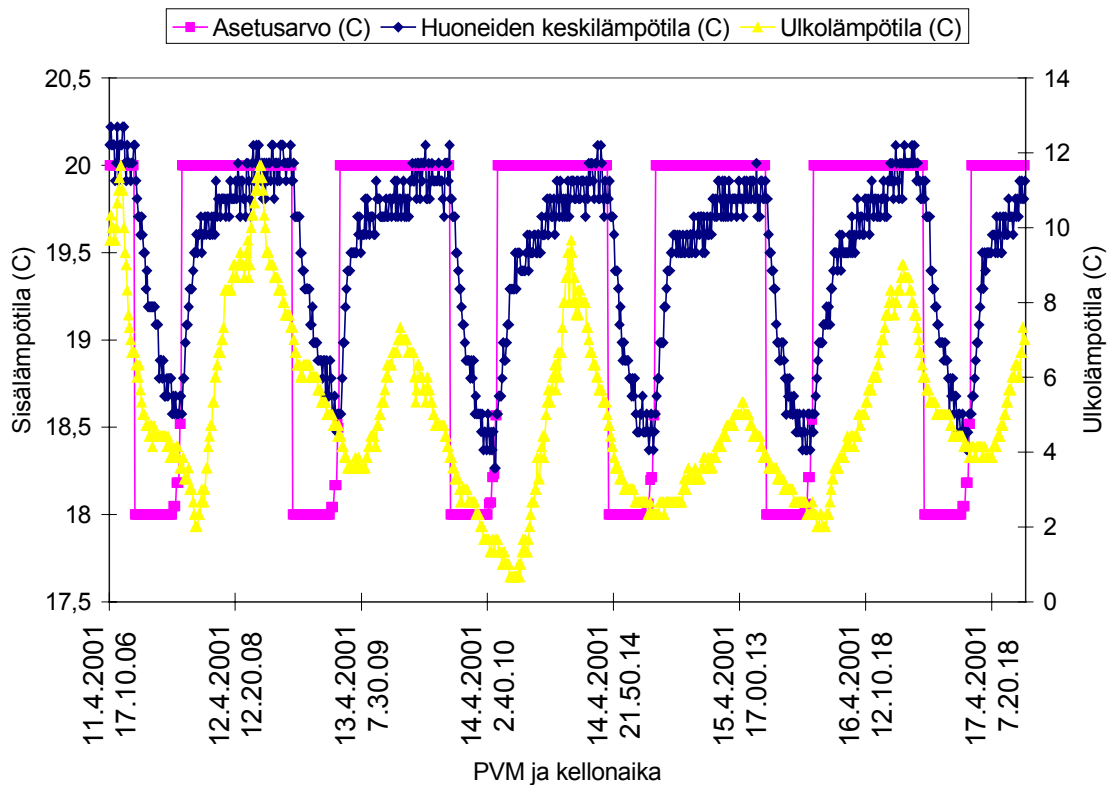
Tulosten perusteella huoneiden yksikkösäätimien asetuksia muutettiin siten, että huoneiden lämpötila nousisi lähemmäksi asetusravoa. Tämä tehtiin muuttamalla huoneiden yksikkösäätimien arvoja suhteessa väylän kautta saatavaan lämpötilan asetusravoon. Seuraavaa koejaksoa varten myös ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilan asetusravoa ryhdyttiin säätämään. Sisälämpötilan asetusravon ollessa 18 °C, tuloilman asetusravoa pudotettiin 10 °C:seen. Muuten tuloilman asetusravoa pidettiin 15 °C:ssa. Tällä pyrittiin siihen, että lämpötilan pudotus 18 °C:seen tapahtuisi nopeammin ja energiaa kuluisi vähemmän. Kuva 71 esittää näillä asetuksilla tehtyjä testiajoja.



Kuva 71. Testausjakson 3.–4.4. tulokset.

Kuten kuvasta 71 nähdään, talon sisäiset asetukset alkoivat olla kohdallaan. Huoneiden sisälämpötila nousee asetukseen, tosin hieman asetuksen jäljessä. Viive on tässä tapauksessa ollut noin neljä tuntia. Huomioitavaa on myös, että sisälämpötila ei laske kuin reilun asteen verran viidessä tunnissa. Tällä mittausjaksolla ulkolämpötilan keskiarvo oli 6,3 °C.

Talon lämmittämistä pyrittiin edelleen minimoimaan, jos sisälämpötila olisi asetusarvoa suurempi. Talon lämmitystä pyrittiin tehostamaan silloin, kun asetusarvo kasvaa. Tehtiin makrot ilmanvaihtokoneen puhallinnopeuden ja jälkilämmityksen säätämiseksi. Lämpötilaa nostettaessa puhallinnopeus säädettiin täydelle teholle, muuten puhallinta käytettiin 62,5 %:n teholla. Myös jälkilämmitys kytkettiin päälle lämpötilaa nostettaessa. Näin sisäilman lämmittäminen oli mahdollisimman tehokasta lämpötilan nostovaiheessa. Jälkilämmitys kytkettiin pois päältä, jos asetusarvo oli alle sisälämpötilan. Näillä toimilla pyrittiin siihen, että sisälämpötila seuraisi asetusarvoa paremmin. Kuvasta 72 nähdään näillä asetuksilla suoritetun testausjakson tulokset.



Kuva 72. Testausjakson 11.–17.4. tulokset.

Testausjakson ulkolämpötilan keskiarvo oli hieman alle 5 °C. Etenkin kylminä päivinä sisälämpötilan nouseminen takaisin 20 °C:seen kestää pitkään. Kuitenkin kohtuullisen lähelle 20 °C:ta päästään melko nopeasti, joten suurta joustoa viihtyvyyden suhteen ei tehdä.

Näillä asetuksilla aloitettiin oppivan algoritmin muuttuvien parametrien mukautuminen talon dynaamisiin ominaisuuksiin. Otettiin käyttöön läsnäolotietoon perustuva asetusarvon laskenta ja talon dynamiikasta oppiva kProfiilin muokkaaminen. Käyttäjän läsnäoloprofiili muotoiltiin taulukon 23 mukaiseksi.

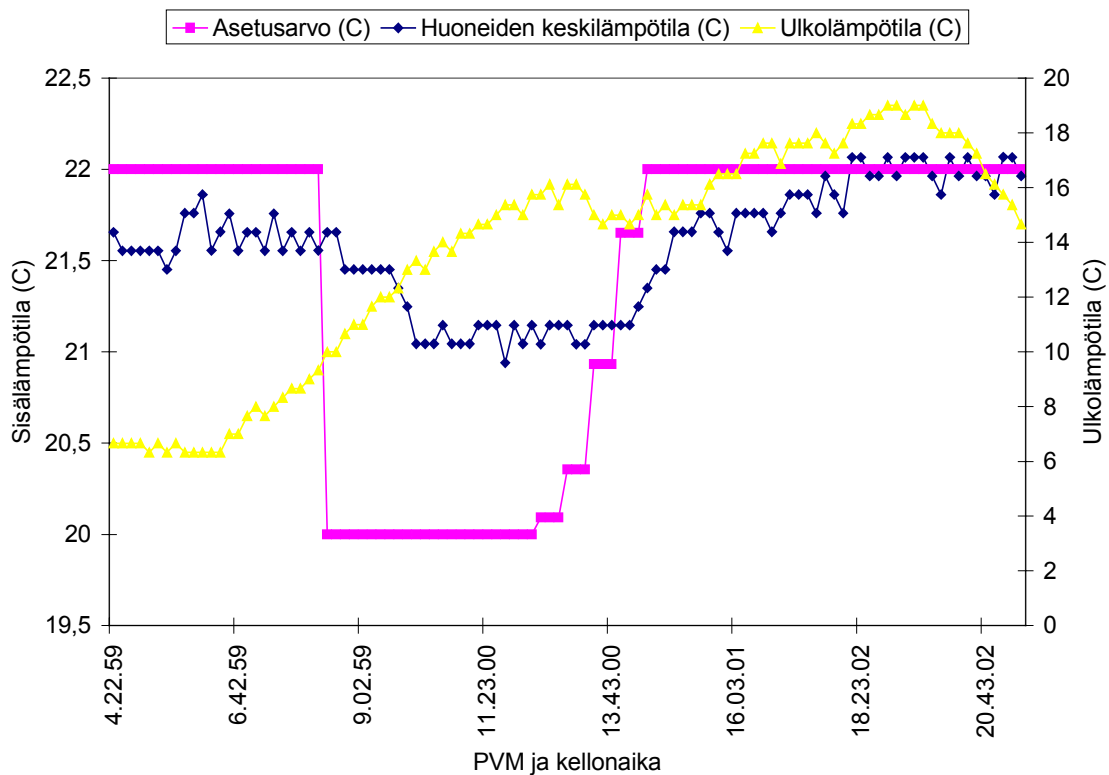
Kuva 73 esittää maanantain 7.5.2001 tuloksia kello 4.20–21.20. Asetusarvo on laskettu sen perusteella, että käyttäjä on poissa kello 8.00–16.00 ja myös edellisillä viikoilla käyttäjä on ollut samaan aikaan poissa. Kello 16.00 mennessä sisälämpötila on noussut 21,8 °C:seen, joten viihtyisyys rakennuksessa on normaalilla tasolla käyttäjän saapessa. Ulkolämpötilan keskiarvo mittausjakson aikana on ollut 13,8 °C. Päivällä sisälämpötila ei ole laskenut yhtä astetta enempää korkean ulkolämpötilan vuoksi.

4.–8.5. suoritetun testausjakson aikana kProfiili alkoi muuttua. Oletettavaa oli, että kProfiilin arvot pienentyisivät, mikä vastaa asetusarvon noston aloittamisajankohdan aikaistamista. Kuvassa 74 on esitetty kProfiili testausjakson jälkeen.

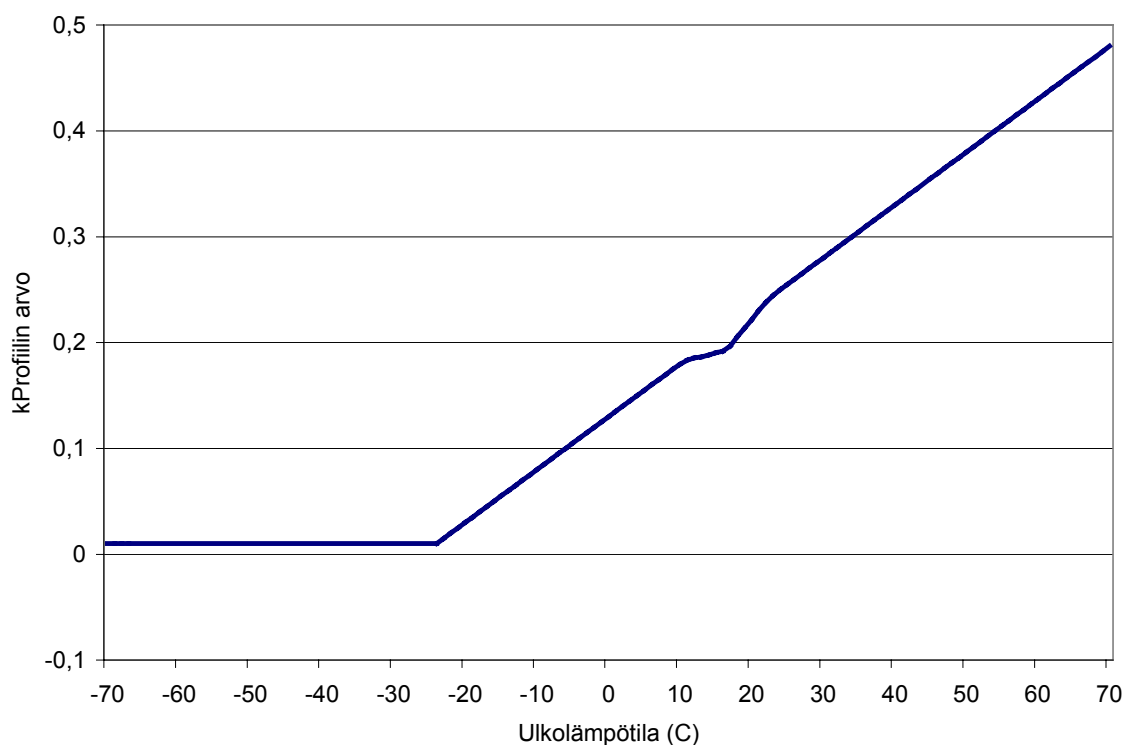
Taulukko 23. Simuloidut käyttäjän poissaoloajat.

	Poissa klo:
MA	8.00–16.00
TI	8.00–16.00
KE	8.00–16.00
TO	8.00–16.00
PE	8.00–16.00
LA	9.00–15.00
SU	13.00–17.00

Tämän taulukon perusteella algoritmille syötettiin läsnäoloarvoksi joko 1 (läsnä) tai 0 (poissa). Lisäksi määrättiin, että käyttäjä antaa tiistaista torstaihin yöasetuksen, jolloin asetusarvo muuttuu yöksi kahta astetta normaalilämpötilaa pienemmäksi. Koska ulkolämpötila alkoi olla jo suhteellisen korkea, päätettiin normaalilämpötila rakennuksessa nostaa 22 °C:seen ja poissaololämpötilaksi asetettiin 20 °C.



Kuva 73. Testauksen tulokset 7.5.



Kuva 74. kProfiili testausjakson 4.–8.5. jälkeen.

Nähdään, että kProfiili on muuttunut odotettuun suuntaan (vertaa kuva 61, jossa kProfiilin alkuarvot). Muutokset ovat tapahtuneet ulkolämpötila-alueella 10–25 °C vastaavassa kohdassa. Ulkolämpötila on vaihdellut testauksen aikana 6,3 °C:n ja 20 °C:n välillä. kProfiili muuttuu pehmeästi, joten vaikka varsinainen muutos tehtäisiin ulkolämpötilaa 15 °C vastaavassa kohdassa, muutoksen vaikutukset ulottuvat myös 15 °C:n ympäristöön kuten kuvasta 74 nähdään.

Johtopäätökset

Tässä luvussa on kuvattu kehitetyn oppivan algoritmin testaus ja testauksen tulokset. Teknisten alkuvaikeuksien jälkeen algoritmia ehdittiin testata METOP-talossa vain melko lyhyen aikaa. Ulkolämpötila alkoi olla liian korkea testaukselle, mutta suuntaa antavia tuloksia saatiin. Kesällä sisälämpötila ei laske päivisin tarpeeksi käyttäjän poissaoloaikana eikä lämmityksen tarve ole muutenkaan suuri, joten algoritmin ominaisuudet eivät tule lämpimillä ilmoilla kovin hyvin esiin.

Verrattaessa testauksen tuloksia TRNSYS-simulointeihin (luku 5.2.2) nähdään, että lämmitysenergian säästö ei ole yhtä suuri METOP-talossa kuin simuloinneissa. Tämä voidaan päätellä siitä, että sisälämpötila ei laske säästöjaksojen aikana yhtä paljon METOP-talossa kuin TRNSYS:llä simuloidussa rakennuksessa. Simuloitu rakennus ja METOP-talo eivät olekaan vertailukelpoisia keskenään, koska ne ovat täysin erilaisia

rakennuksia (esim. erilaiset rakenteiden k-arvot). Lisäksi on huomioitava se, että TRNSYS:llä simuloitiin rakennusta talvikautena, kun METOP-testaus sijoittui ajallisesti kevään loppuun.

METOP-talon huoneilman lämpötila ei laske kovin nopeasti asetusarvon laskiessa. Algoritmi toimisi paremmin, jos lämpötila ehtisi pudota käyttäjän ollessa poissa asetusarvon määräämälle poissaolotasolle. Testauksessa sisälämpötila jäi tavallisesti astetta liian korkeaksi säästöjaksoilla. kProfiilin alkuarvot eivät olleet aivan kohdallaan testauksen alussa. Pidempi testausjakso kylmillä ilmoilla olisi muuttanut kProfiilia enemmän taloon sopivaksi. Osittain kProfiilin liian suurista arvoista johtui pitkä viive lämpötilan nostovaiheessa. Sisälämpötila ei noussut tarpeeksi nopeasti asetusarvoon, kun asetusarvoa nostettiin.

Tulokset antoivat viitteitä siitä, että algoritmi mukautuu ajan myötä taloon sopivaksi kuten pitääkin. Mukautuminen vie kuitenkin aikaa, periaatteessa kaikki ulkolämpötilat pitäisi käydä läpi ennen kuin kProfiili olisi muotoutunut taloon sopivaksi. Mukautuminen onkin jatkuva prosessi ja tapahtuu samalla, kun algoritmi on jo toiminnassa.

Testauksen perusteella voidaan päätellä, että algoritmin toiminnan kannalta on tärkeää, että lämmitysjärjestelmän sisäiset asetukset ovat kunnossa. Koska yksikkösäätimien asetukset eivät olleet kohdallaan METOP-talossa, huoneiden lämpötilojen keskiarvo asettui alle asetusarvon.

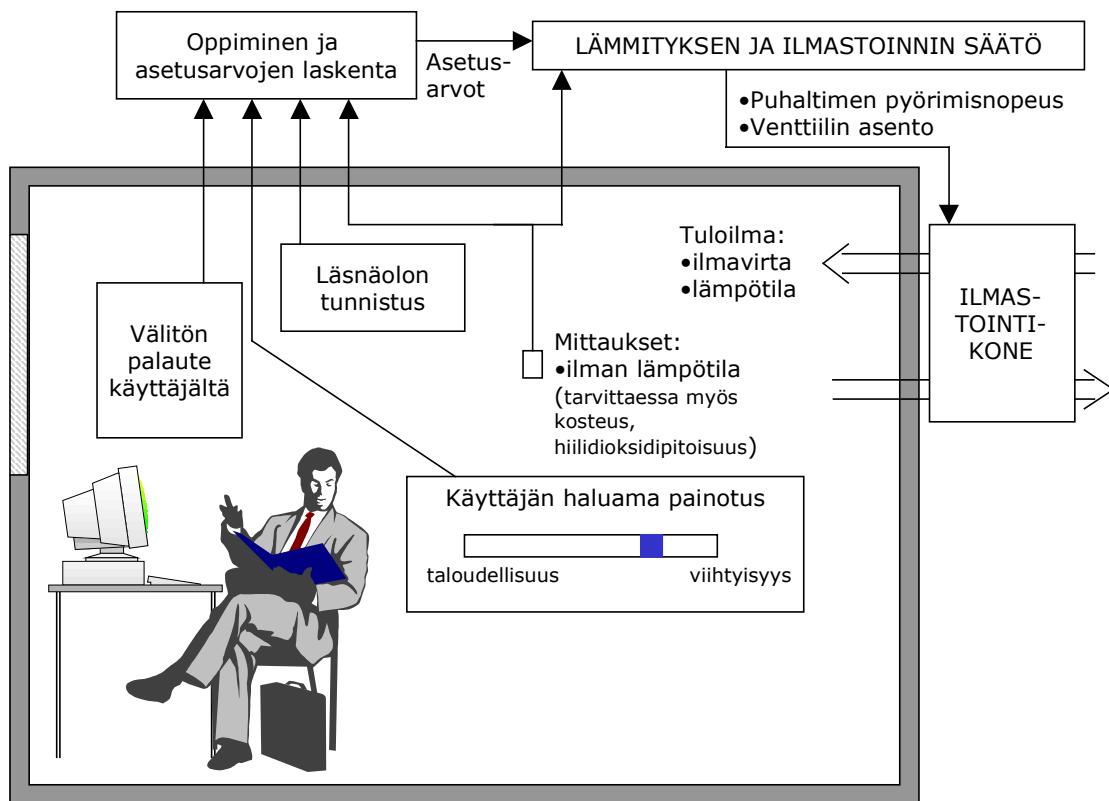
Tulosten perusteella pääteltiin, että algoritmiin kannattaa sisällyttää myös ilmanvaihtokoneen puhallinnopeutta ohjaava toiminto, jolloin lämmitystä voidaan erityisesti tehostaa palautuslämmityksen aikana. Suurella puhallinnopeudella saadaan suurin mahdollinen lämmitysteho, jonka hyödyntäminen on energiataloudellisesti ajateltuna järkevää lämpötilaa nostettaessa. Lisäksi puhallinnopeutta voidaan normaaliolosuhteissa pienentää, mikäli rakennuksessa ei ole suurta ilmanvaihtotarvetta. Suurella puhallinnopeudella on lämmitysvaiheessa sekin etu, että rakennus tuulettuu tehokkaasti lämmitettäessä, jolloin ilma on raikasta käyttäjän saapuessa rakennukseen. Nämä ominaisuudet toteutettiin algoritmin seuraavaan versioon, jonka toiminta, rakenne, ominaisuudet, simuloinnit ja testaus METOP-talossa kuvataan luvussa 5.3.

5.3 Oppiva algoritmi muuttuvailmavirtaiseen järjestelmään

Oppivaa algoritmia kehitettiin edellä esitettyjen simulointien ja koekohteen testauksen tulosten perusteella. Tässä luvussa kuvataan oppivan algoritmin uuden version ominaisuudet ja rakenne. Uuden algoritmin keskeisimmät parannukset vanhaan versioon nähden ovat

- algoritmi muuttaa sekä lämpötilan että ilmanvaihtokoneen ilmavirran asetusarvoja
- palautuslämmityksen alkaessa asetusarvo muuttuu porrasmaisesti, ei pehmentäen niin kuin aiemmin
- palautuslämmitysjakson lopussa ilmanvaihtoa tehostetaan suurimman mahdollisen lämmitystehon takaamiseksi ja sisäilman laadun parantamiseksi
- kProfiilin korvaa ennakkoaikakäyrä, jolta nähdään suoraan arvioitu palautuslämmitykseen kuuluva aika
- ennakkokäyrään tehtävän muutoksen suuruus oppimishetkillä riippuu oppimistarpeen suuruudesta (vakioilmavirtatapauksessa kProfiiliin tehtävä muutos on vakio)
- luvussa 5.1 kuvatun taloudellisuus-viihtyisyyskytkin sisällytetään algoritmiin.

Kuva 75 esittää oppivan algoritmin liittymistä rakennuksen muihin järjestelmiin ja laitteisiin.



Kuva 75. Periaatteellinen kuva oppivan algoritmin liittymisestä eri laitteisiin ja järjestelmiin.

5.3.1 Algoritmin kuvaus

Uuden algoritmin suunnittelussa otettiin huomioon edellisen algoritmin heikkoudet, ja ominaisuuksia pyrittiin parantamaan. Uuden algoritmin toiminta perustuu siihen, että palautuslämmityksen aloittamisen ajankohdan oletetaan riippuvan seuraavista tekijöistä:

- Ulkoilman lämpötila (T)
 - kylmällä ilmalla lämmitys aloitetaan aikaisemmin kuin lämpimämmällä
- Sisä- ja normaalilämpötilan ero (ΔT)
 - jos sisälämpötila on laskenut paljon, lämmitys aloitetaan aikaisemmin
- Aika (t)
 - kuinka kauan aikaa on rakennuksen käyttäjän saapumiseen.

Palautuslämmityksen ennakkokäyrä

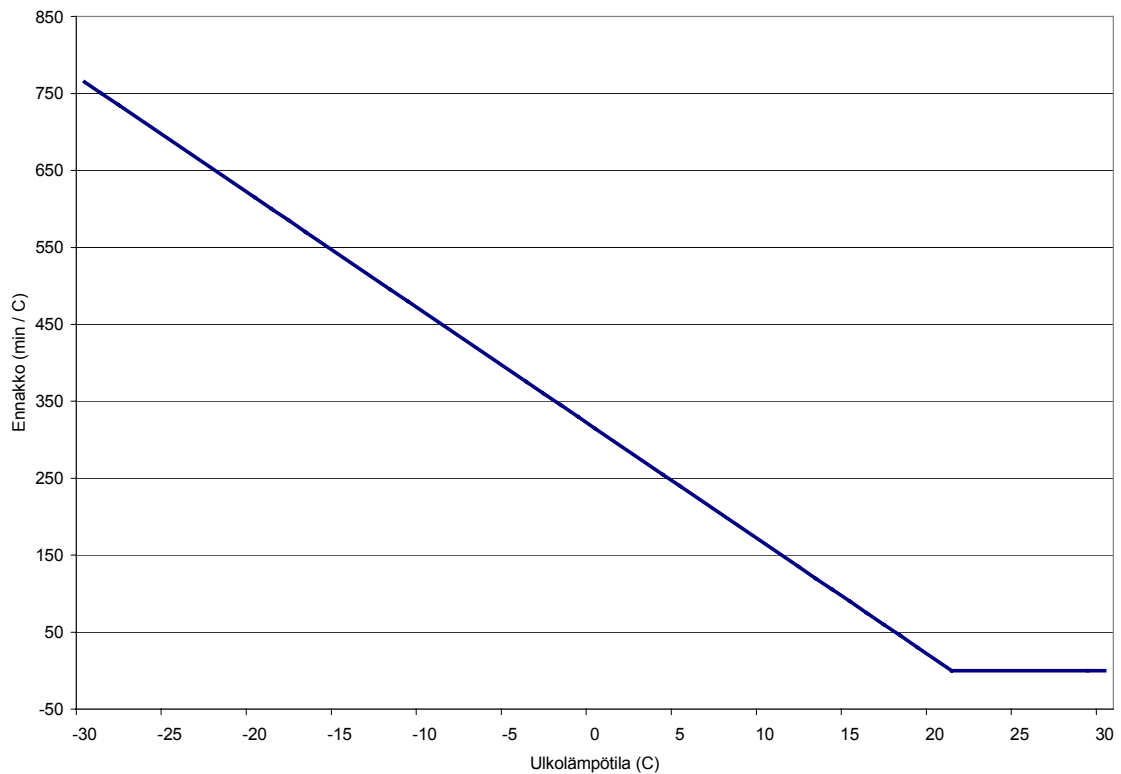
Uuden algoritmin toiminta perustuu läsnäolon tarkkailun suhteen algoritmin edelliseen versioon. Muutokset koskevat enemmän sitä osaa, joka huolehtii rakennuksen dynamiikan oppimisesta. Säästötilassa, jolloin rakennuksen käyttäjä ei ole läsnä, lämpötila saattaa laskea huomattavasti, joten niin sanottuun palautuslämmitykseen kuluva aika voi olla suhteellisen pitkä.

Rakennuksen sisälämpötilan nostamiseen *yhdellä* asteella kuluva aika arvioidaan valitsevan ulkolämpötilan perusteella. Algoritmi alustaa palautuslämmitysaikaa kuvaavan ennakkokäyrän olettaen aluksi lineaarisen riippuvuuden ulkolämpötilan ja palautuslämmitysaajan välille, jotta saadaan yksinkertaiset alkuarvot. Oppimisen tavoitteena on, että algoritmi muuttaa näitä arvoja ja että arvojen muutoksilla on suora vaikutus palautuslämmitysaikaan. Oppimisen myötä edellä mainittu lineaarinen riippuvuus muuttuu paloittain lineaariseksi siten, että opitut tulokset vaikuttavat mahdollisimman paljon. Oppiminen kuvataan myöhemmin.

Kuva 76 esittää edellä mainittua ennakko-ulkolämpötilariippuvuutta alkutilanteessa. Suoran arvot on laskettu muutamien mittausten perusteella METOP-talon testiajojen tuloksista. Normaalilämpötilaksi rakennuksessa on oletettu 21°C , joten tätä suurempia ulkolämpötila-arvoja vastaa lämmitysennakko 0 min / $^{\circ}\text{C}$. Normaalilämpötilalla tarkoitetaan sitä lämpötilaa, jonka tulisi vallita käyttäjän ollessa läsnä rakennuksessa.

Kuvan 76 ennakkokäyrä kuvaa ulkolämpötilan funktiona palautuslämmitykseen kuluvan ajan normaalilämpötilan ja sisälämpötilan eron yhtä astetta kohti. Ennakkokäyrän ulkolämpötila-akselia on pienennetty verrattuna vanhan algoritmin kProfiliin, koska tavoitteena on ollut myös pienentää algoritmin muisti- ja teho vaatimuksia. Ennakkokäyrän arvot on laskettu suoran yhtälön $y = kx + b$ mukaan, jossa alkuarvoina on käytetty

- $k = -15$ ja
- $b = 315$.



Kuva 76. Palautuslämmityksen ennakkokäyrän alkuarvot.

Suoran parametrit on laskettu METOP-talossa 19.3.–15.5.2001 tehtyjen kokeiden perusteella. Testausjaksolta valittiin muutama palautuslämmitys, joiden aikana ulkolämpötila on pysynyt kohtuullisella tarkkuudella samana. Palautuslämmitysten alussa sisä- ja normaalilämpötilojen ero on ollut tavallisesti yhden asteen. Palautuslämmityksen kesto arvioitiin testiajojen tuloksista muutamilla ulkolämpötilan arvoilla, joista laskettiin suoran muut pisteet. Vaikka arvot ovat hyvin likimääräisiä, ne kelpaavat mainiosti alkuarvoiksi, koska algoritmi voi muuttaa arvoja nopeasti tarpeen mukaan.

Jos algoritmin mukautumista tiettyyn rakennukseen halutaan nopeuttaa, voidaan ennakkokäyrän muoto ennustaa etukäteen esimerkiksi askelkokeiden perusteella. Sisälämpötila lasketaan ensin yhden asteen normaalilämpötilaa matalammaksi. Kun lämpötila on asettunut, nostetaan asetusarvoa asteella ja mitataan kuinka kauan kestää saavuttaa tavoitelämpötila halutulla tarkkuudella. Ulkolämpötilan perusteella nähdään, mihin kohtaan vaak-akselia piste sijoittuu ennakkokäyrällä. Ennakkokäyrä voidaan muodostaa tämän yhden pisteen perusteella asettamalla suora kulkemaan mitatun pisteen kautta siten, että suora leikkaa ulkolämpötila-akselin normaalitasoa vastaavan lämpötilan kohdalla. Ulkolämpötilan tulisi olla askelkokeen aikana vakio, mutta kohtuullisiin tuloksiin päästään pienillä ulkolämpötilan vaihteluillakin.

Palautuslämmitysajan arviointi

Kokonaispalautuslämmitysaikaa arvioitaessa on otettava huomioon myös se, kuinka paljon sisälämpötila laskee säästöjakson aikana. Kuva 76 esittää ulkolämpötilan vaikutusta lämmitysaikaan normaali- ja sisälämpötilan eron *yhtä* astetta kohden. Toisin sanoen, jos sisälämpötila on asteen verran normaalilämpötilaa matalampi, voidaan kuvasta 76 lukea suoraan ennakkoajaka, joka rakennusta pitää lämmittää, jotta sisälämpötila nousisi normaalilämpötilaan ennen käyttäjän saapumista rakennukseen. Esimerkiksi, jos ulkona on +10 °C lämmintä ja sisälämpötila on asteen verran normaalilämpötilaa matalampi, pitää lämmitys aloittaa 165 minuuttia ennen käyttäjän saapumista rakennukseen, jos ennakkokäyrä ei ole muuttunut.

Koska palautuslämmityksen aloittamisajankohta riippuu myös sisälämpötilan ja normaalilämpötilan erosta, pitää ΔT :n (= normaalilämpötila – sisälämpötila) vaikutus ennakkoajakaan huomioida. Tämä riippuvuus voidaan oletetaan lineaariseksi siten, että lämmityksen kokonaisennakko lasketaan lopulta tulona: $t_{ennakko} = \text{ennakko}(T_{ulko}) * \Delta T$.

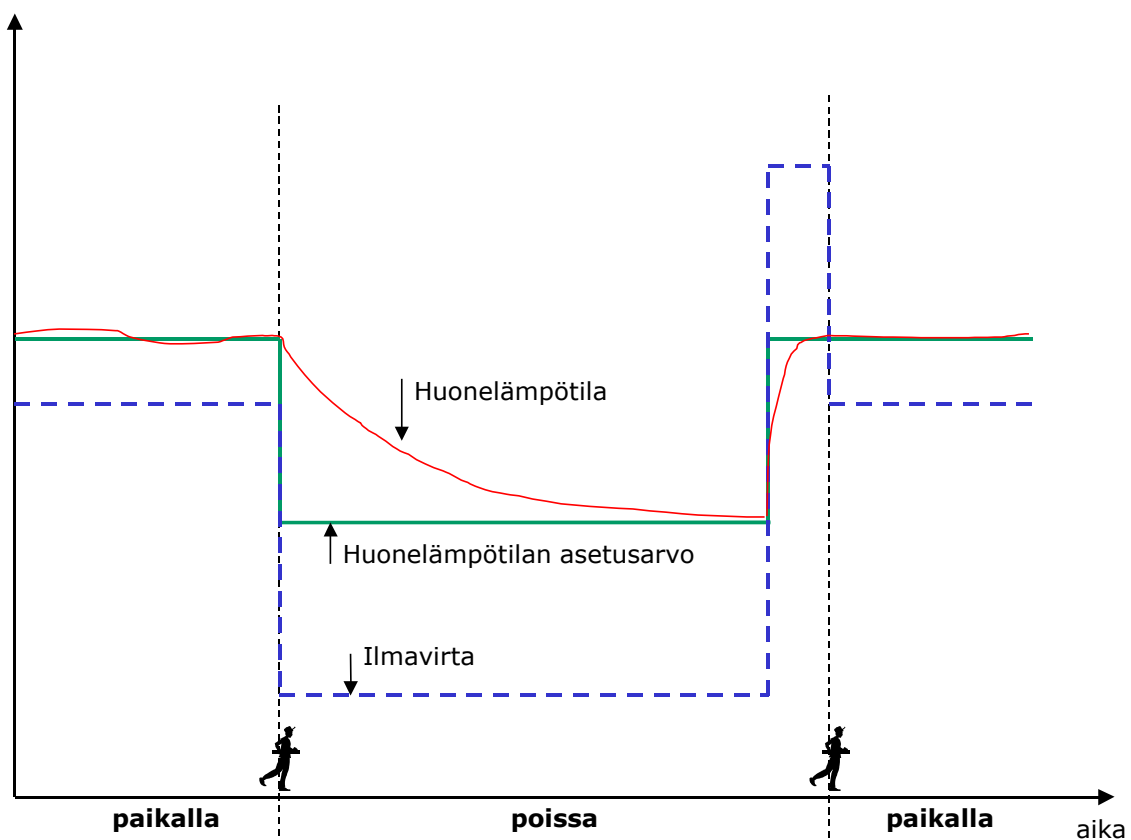
Kokonaisennakon laskemiseksi $\text{ennakko}(T_{ulko})$ luetaan ennakkokäyrältä vallitsevan ulkolämpötilan kohdalta ja vastaavasti kerroin ΔT saadaan normaalitason ja vallitsevan sisälämpötilan erona. Esimerkiksi ulkolämpötilan ollessa +10 °C ja sisälämpötilan 0,8 °C normaalilämpötilaa matalampi, ennakkoajaksi saadaan 165 min * 0,8 = 132 min.

Algoritmi tarkkailee joka laskentakierroksella, onko rakennuksen käyttäjän oletettuun saapumisaikaan enemmän aikaa kuin mitä ennakoksi lasketaan. Jos näin on, voidaan lämpötilan asetusarvoa pitää poissaolotasolla. Jos kuitenkin käyttäjän saapumisajankohtaan on vähemmän aikaa kuin kokonaisennakko edellyttää, aloitetaan lämmitys. Ennakko lasketaan joka kierroksella uudelleen, koska olosuhteet muuttuvat jatkuvasti (ΔT kasvaa, kun sisälämpötila laskee viilennyksen aikana ja ulkolämpötila voi muuttua). Laskentaväliksi on valittu 10 minuuttia, mutta aikaa voi muuttaa.

Lämpötilan ja puhallinnopeuden asetusarvojen laskenta

Kun lämmitys kerran aloitetaan, sitä ei lopeteta ennen kuin lämpötila on noussut normaalitasolle. Lämmitys tehdään siten, että asetusarvo nostetaan normaalilämpötilaan heti eikä pehmentäen kuten algoritmin edellisessä versiossa. Pehmentämällä asetusarvo nousisi vähitellen normaalitasolle ja sisälämpötila seuraisi paremmin asetusta. On kuitenkin energiataloudellisesti kannattavampaa nostaa asetus heti lopulliseen tavoitearvoon, koska tällöin taataan mahdollisimman lyhyt lämmitysjakso täydellä teholla. Samalla myös maksimoidaan aika, joka asetusarvoa voidaan pitää poissaolotasolla, joten energiansäästöjakso on suurimmillaan.

Lähestyttäessä rakennuksen käyttäjän saapumishetkeä, ilmanvaihtokoneen puhallinnopeutta nostetaan, jolloin lämmitysteho kasvaa ja rakennus tuulettuu samalla. Puhallinnopeus on minimissä käyttäjän ollessa poissa, mutta tuntia ennen käyttäjän saapumista nopeus nostetaan maksimiin. Mikäli ulkolämpötila on alle -10°C , puhallinnopeus nostetaan maksimiin jo 1,5 tuntia ennen käyttäjän saapumista rakennukseen, koska kovilla pakkasilla lämmitystehoa tarvitaan selvästi enemmän. Pidempi puhallinnopeuden maksimijakso kylmillä ilmoilla auttaa rakennuksen lämpiämistä (ilmalämmitteisissä rakennuksissa). Mikäli sisäilman lämpötila on kuitenkin noussut jo $0,5^{\circ}\text{C}$:n päähän normaalitasosta, puhallinnopeus nostetaan vain puhalluksen normaalitasolle (sama taso kuin jos käyttäjä on läsnä). Pienillä puhallinnopeuksilla rakennuksen lämmittäminen ei yleensä onnistu, pikemminkin rakennus jäähtyy, vaikka lämpötilan asetusarvo olisikin jo nostettu normaalitasolle. Tämä johtuu siitä, että ilmalämmitteisessä rakennuksessa lämmitysteho on riippuvainen tuloilman lämpötilan lisäksi ilmavirrasta. Kun sisälämpötila on saavuttanut normaalitason, puhallinnopeutta pidetään käyttäjän asettamalla normaalitasolla. Kuva 77 esittää, miten rakennuksen sisälämpötila muuttuu, kun algoritmi tekee muutoksia lämpötilan ja puhallinnopeuden asetusarvoihin käyttäjän läsnä- tai poissaolon perusteella.



Kuva 77. Huonelämpötilan asetusarvon ja ilmavirran riippuvuus käyttäjän paikalla- tai poissaolosta.

Oppimisen periaatteet

Rakennuksen lämmitystä takaisin normaalilämpötilaan voidaan pitää epäonnistuneena, jos jompikumpi seuraavista toteutuu:

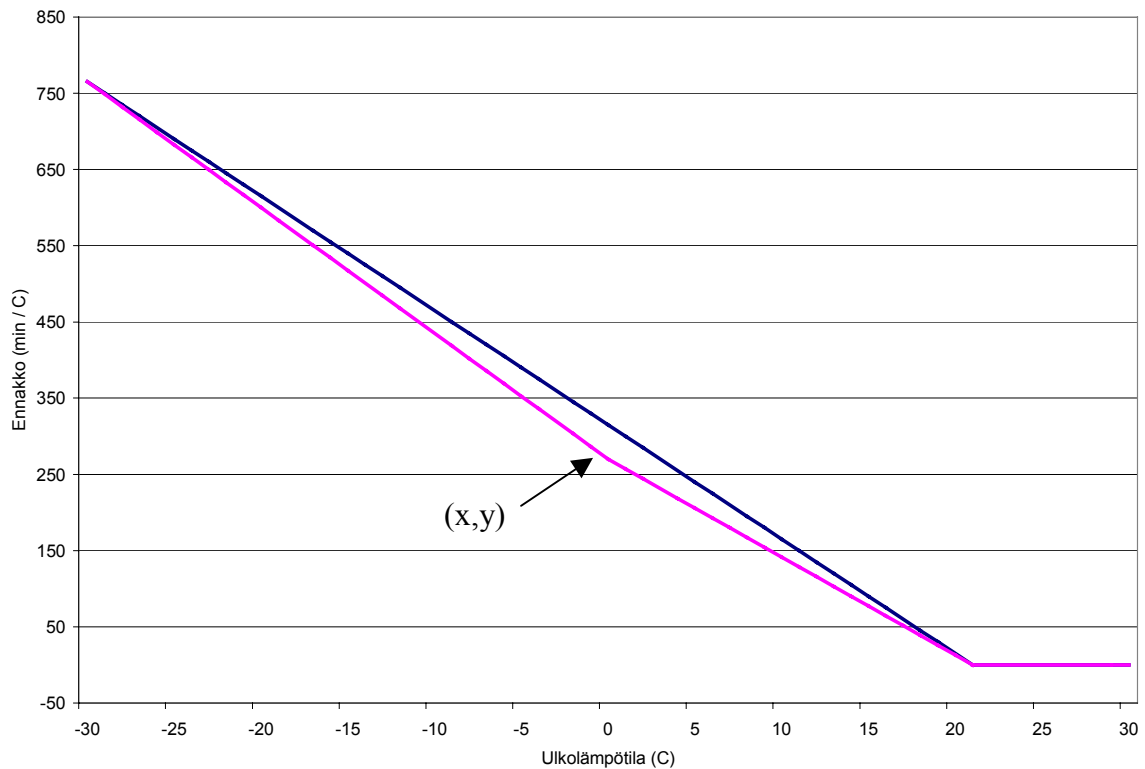
- rakennus ei lämpene riittävästi ennakkoajassa
 - ennakko liian lyhyt
- rakennus lämpenee liian nopeasti
 - ennakko liian pitkä.

Näissä tapauksissa ennakon laskentaparametrit muuttuvat. Algoritmi tulkitsee lämpötilan toteutuneeksi, jos sisälämpötila on *OPPIMISRAJA*ksi kutsutun arvon ($0,5\text{ °C}$) päässä tavoitteesta. Oppimisrajan merkitys on siinä, että algoritmi tulkitsee tavoitelämpötilan toteutuneeksi, mikäli normaalilämpötila on saavutettu oppimisrajan tarkkuudella. Tällä on suora vaikutus oppimishetkeen, joten rajan merkitys voi olla suuri. Tarvittaessa rajaa voi tiukentaa esimerkiksi $0,2\text{ °C}$:seen, mutta ainakin aluksi rajan on syytä olla hiukan suurempi.

Onnistuneesta tai epäonnistuneesta palautuslämmityksestä tapahtuu oppimista: ulkolämpötila-ennakkoaikariippuvuus (kuva 76) muuttuu. Mikäli rakennus lämpenee liian nopeasti, voidaan muutos tähän riippuvuuteen laskea helposti. Tällöin ennakkoa voidaan pienentää sen verran, kuinka paljon etuajassa rakennus on lämmennyt normaalilämpötilaan. Lämmityksen alussa vallinnut lämpötilaero pitää kuitenkin huomioida. Siksi muutos skaalataan ennakkokäyrälle yhden asteen lämpötilaeroa kohden. Muutos tehdään lämmityksen alussa vallinnutta ulkolämpötilaa vastaavaan kohtaan. Esimerkiksi, jos rakennus on lämmennyt 50 minuuttia etuajassa ja lämmityksen alussa on ollut kaksi astetta viileämpää kuin lopussa, ennakkokäyrän parametria pienennetään $50\text{ min} / 2\text{ °C} = 25\text{ min} / \text{°C}$ siinä kohdassa, jonka lämmityksen alussa vallinnut ulkolämpötila määrää.

Jotta oppiminen vaikuttaisi mahdollisimman laajalle, muutos tehdään seuraavalla tavalla (esimerkki kuvassa 78). Jos kyseessä on ensimmäinen oppiminen:

1. Koko ulkolämpötila-ennakkokäyrää muutetaan siten, että ensin asetetaan opittu piste paikalleen kohtaan (x,y) , kuvassa 78 piste $(0, 270)$.
2. (x,y) :n oikealle puolelle jäävät arvot lasketaan pisteiden (x,y) ja (normaalilämpötila, 0) määräämältä suoralta.
3. Vastaavasti (x,y) :n vasemmalle puolelle jäävät arvot lasketaan pisteiden (x,y) ja $(-30, \text{MAXennakko})$ määräämältä suoralta.



Kuva 78. Ennakkokäyrän muuttuminen, alkuarvot ja opitut uudet arvot (alempi käyrä).

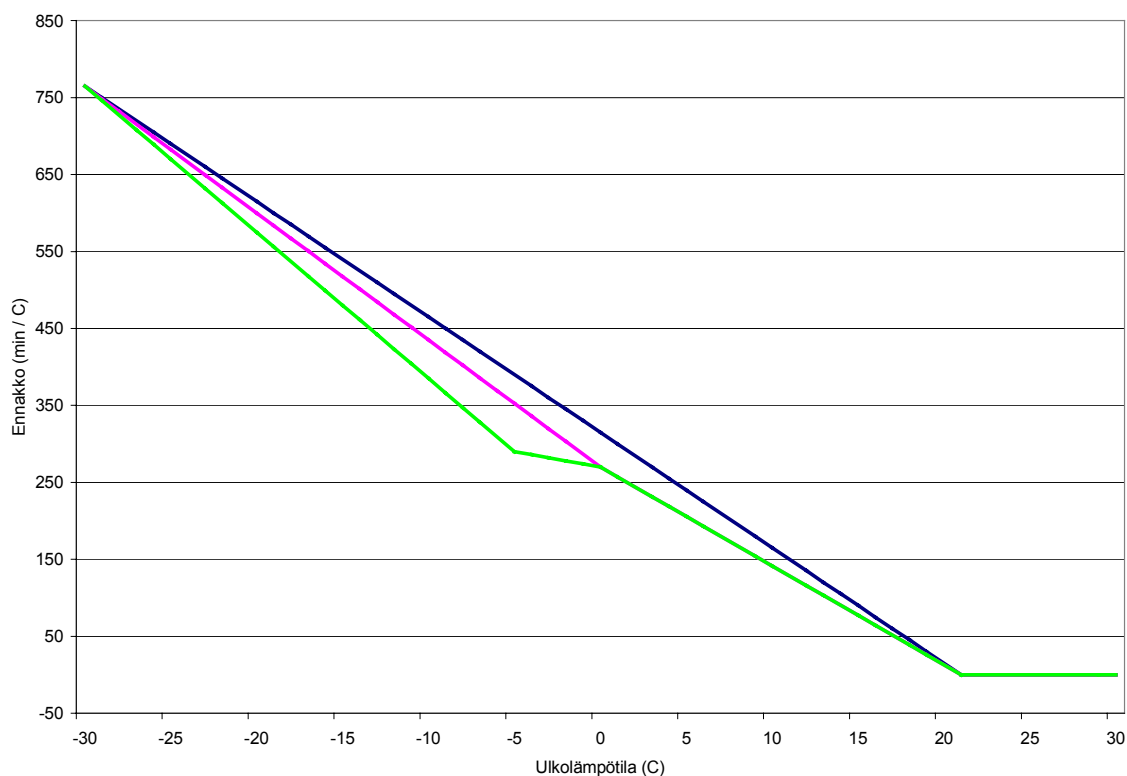
Kuvassa 78 oppiminen on tapahtunut 0 °C:ssa ja muutos on -45 minuuttia. Talo on siis lämmennyt 45 minuuttia etuajassa riittävällä tarkkuudella normaalitasolle (oletetaan, että lämmityksen alussa normaali- ja sisälämpötilan ero on ollut yksi aste). Koko käyrä on pakotettu kulkemaan opitun pisteen kautta.

Jos rakennus ei lämpene riittävän nopeasti, muutetaan lämmityksen alussa vallinneen ulkolämpötilan määräämää kohtaa ennako-ulkolämpötilakäyrällä muuten samalla periaatteella, mutta kyseisen kohdan ennakkoa nostetaan. Jos sisälämpötila on käyttäjän saapumishetkellä vielä T_{ero} :n verran alempi kuin tavoitelämpötila eli normaalitaso, ennakkoa nostetaan ($T_{\text{ero}} * \text{ennakko}$):n verran. Esimerkiksi:

- Oletetaan, että rakennuksen lämpötila on 0,7 °C jäljessä normaalilämpötilaa sillä hetkellä, kun käyttäjä saapuu rakennukseen ja että ulkolämpötila oli -5 °C lämmityksen alussa.
- Luetaan ennakkokäyrältä -5 °C:n kohdalta ennakkoaika ja kerrotaan tämä 0,7:llä.
- Saadaan minuuttimäärä, jolla alkuperäistä ennakkokäyrän parametria kasvatetaan.
- Skaalataan koko ennakkokäyrä siten, että muutos vaikuttaa mahdollisimman laajalle

Käyrän skaalaus tapahtuu samalla tavalla kuin ennakkoa pienennettäessä.

Jos kyseessä ei kuitenkaan ole ensimmäinen oppimiskerta, käyrää muokataan opittujen pisteiden väliltä kuvan 79 mukaisesti. Toinen muutos kuvan 79 käyrällä on tehty ulkolämpötilaa -5 °C vastaavaan kohtaan. Uusin käyrä kulkee kuvassa alimmaisena välillä $-30\text{ °C} - 0\text{ °C}$. Vasemmalle skaalauksessa on käytetty toisena pisteenä ulkolämpötilaa -30 °C vastaavaa maksimiennakkopistettä ja oikealle skaalaus on tehty seuraavaan opittuun pisteeseen asti. Muuten käyrä on jätetty ennalleen.



Kuva 79. Ennakkoulkolämpötilakäyrä kahden muutoksen jälkeen (alimmainen käyrä).

Kaikki muutokset ennakkokäyrään on rajattu siten, että yksittäisen pisteen arvo voi muuttua kerralla enintään 50 % suuntaan tai toiseen. Tällä pyritään estämään mahdollisten virhetilanteiden merkittävä vaikutus. Virheiden vaikutusta voisi vähentää algoritmiin liitettävissä olevalla painotetun pienimmän neliösumman menetelmällä toteutettavalla käyrän sovituksella, joka tehtäisiin ennakkokäyrälle aina sen muuttuessa. Sovitus myös pehmentäisi käyrää ja painottaisi enemmän opittuja pisteitä. Alkuarvojen merkitys vähenisi eikä muokkautuva käyrä olisi riippuvainen alussa annetusta maksimiennakosta.

Viihtyvyys rakennuksessa

Lämmitysjärjestelmän käyttöliittymän ominaisuuksia analysoidaan luvussa 5.4. Käyttöliittymässä tulee huomioida luvussa 5.1 esitetyn taloudellisuus-viihtyisyyskytkimen sisältäminen algoritmin uuteen versioon. Kytkimellä käyttäjä voi valita haluamansa säästötason painottamalla joko taloudellisuutta tai viihtyisyyttä. Painotettaessa taloudellisuutta, lämpötilan pudotus käyttäjän ollessa poissa on suurempi kuin viihtyisyyttä painotettaessa. Taloudellisuus-viihtyisyystaso vaikuttaa myös eri hetkillä käytettävään ilmavirran määrään, joten tason valinnalla on merkittävä vaikutus energiankulutukseen. On tärkeää huomata, että viihtyisyys rakennuksessa ei oleellisesti huonone, vaikka taloudellisuutta painotettaisiin 100-prosenttisesti.

5.3.2 Simuloinnit

Verrattuna aiemmin esitettyihin vakioilmavirtaisen järjestelmän simulointeihin algoritmin toimintaa on muutettu seuraavasti:

- Algoritmi muuttaa myös ilmavirtaa (eli ohjaa puhallinta), kun aiemmissa laskelmissa ilmavirta oli koko ajan vakio. Ilmavirtaa pienennetään, kun huoneisto on tyhjillään, mutta huoneisto tuuletetaan ennen kuin asukkaat saapuvat kotiin. Lyhyt palautuslämmitys- ja tuuletusaika ovat energiataloudellisia.
- Järjestelmään on lisätty "kytkin" (Kuntze & Bernard 1998 & luku 5.1), jolla asukas valitsee haluamansa taloudellisuus-viihtyisyystason. Kytkimen asento vaikuttaa siihen, kuinka paljon huonelämpötilaa lasketaan ja ilmavirtaa pienennetään, kun asukkaat ovat poissa.
- Tuloilman lämpötilan asetusarvon alaraja 15 °C on poistettu, koska huonelämpötila saa laskea asukkaiden ollessa poissa, eikä kylmän tuloilman mahdollisesti aiheuttamalla epäviihtyvyydellä ole tällöin merkitystä. LTO-laitteessa talteen saatava energia käytetään kuitenkin kokonaan hyödyksi. Tuloilman lämpötilan yläraja on 45 °C, niin kuin aiemmissa laskelmissa.
- Algoritmin oppimisominaisuuksia (palautuslämmitysajan ennustaminen) on parannettu, niin että mukautuminen kulloisenkin rakennukseen dynamiikkaan tapahtuu paremmin ja nopeammin.
- Huonelämpötilan asetusarvo nostetaan (kun asukas on saapumassa kotiin) portaittaisesti ylöspäin eikä pehmentäen niin kuin aiemmissa laskelmissa. Näin rakennus on mahdollisimman pitkään kylmillään, mikä on energiataloudellista.

Simuloinnit on suoritettu TRNSYS-simulointiohjelmalla, niin kuin aiemminkin. Simuloitu rakennus, säätiedosto ja muutkin simulointien lähtöarvot ovat samoja kuin aiemmissa laskelmissa, ellei muuta mainita.

Lähtöarvot ja simuloitavat tapaukset

Näissä laskelmissa ilmavirran normaaliarvo on $47 \text{ dm}^3/\text{s}$ (0,85 l/h) ja maksimiarvo $71 \text{ dm}^3/\text{s}$ (1,3 l/h). Minimiarvo riippuu asukkaiden valitsemasta taloudellisuus-viihtyisyystasosta. Täydellä taloudellisuustasolla minimi-ilmavirta on $1,4 \text{ dm}^3/\text{s}$ (0,03 l/h) ja täydellä viihtyisyystasolla normaaliarvon $47 \text{ dm}^3/\text{s}$ (0,85 l/h) suuruinen.

Minimi-ilmavirta voi toteutua vain asukkaiden ollessa poissa kotoa. Asunto tuuletetaan ennen kuin asukas saapuu kotiin nostamalla ilmavirta normaali- tai maksimitasolle 1–1,5 tunniksi. Kylmillä säillä, kun ulkolämpötila on alle $-10 \text{ }^\circ\text{C}$, tuuletusaika on 1,5 tuntia ja muulloin 1 h, koska kylmään aikaan lämpötilan nostamiseen tarvitaan pidempi palautuslämmitysaika. Mikäli huonelämpötila on lähellä asetusarvoaan, ilmanvaihto on tuulettaessa normaaliarvossa, mutta mikäli tämä teho ei näytä riittävän, käytetään maksimi-ilmavirtaa.

Simulointituloksista tarkastellaan kuten aiemmissakin laskelmissa, kuinka huonelämpötilan asetusarvo muuttuu, kuinka hyvin huonelämpötila saavuttaa asetusarvonsa ja saavutetaanko säästöjä energiankulutuksessa. Simuloitu ajanjakso on neljän kuukauden (17 viikkoa) pituinen talvijakso. Energiankulutuksia vertaillaan 15 viimeiseltä laskentaviikolta.

Laskelmissa oletetaan, että asukkaat ovat poissa kotoaan arkisin klo 8–17 ja lauantaisin klo 10–14. Läsnaoloanturi tms. aistii tämän ja tieto välittyy algoritmile.

Simulointitapauksessa E tarkastellaan lisäksi tilannetta, jossa asukas tulee yllättäen kotiin kesken normaalia poissaoloaikaansa.

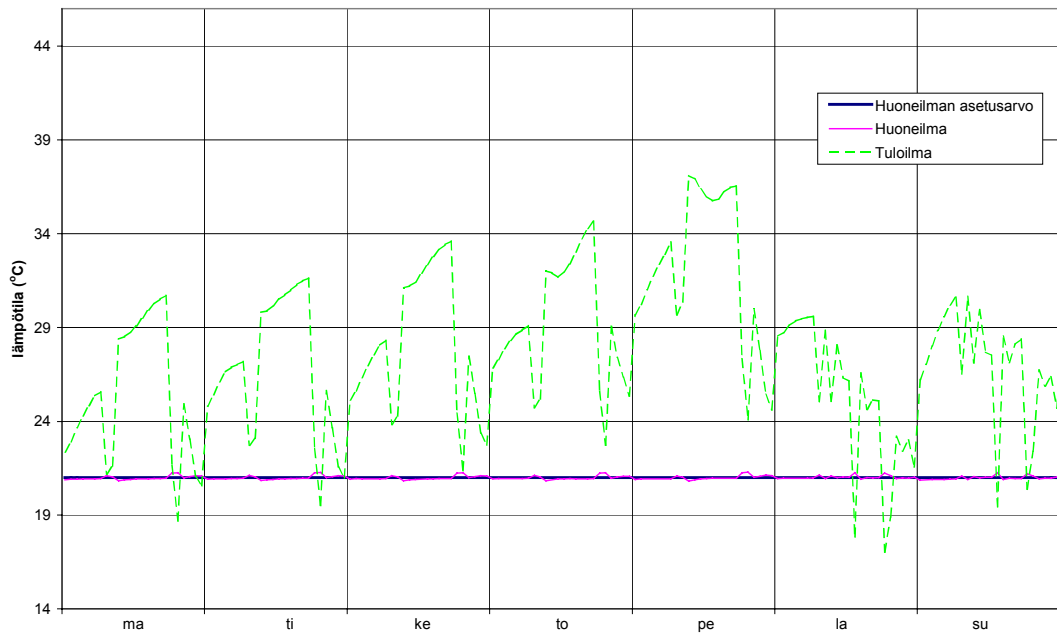
Simulointitapaukset:

- A) Asukkaiden valitsema taloudellisuus-viihtyisyystaso on taloudellisuus 0 % – viihtyisyys 100 %.
- B) Asukkaiden valitsema taloudellisuus-viihtyisyystaso on taloudellisuus 30 % – viihtyisyys 70 %.
- C) Asukkaiden valitsema taloudellisuus-viihtyisyystaso on taloudellisuus 70 % – viihtyisyys 30 %.
- D) Asukkaiden valitsema taloudellisuus-viihtyisyystaso on taloudellisuus 100 % – viihtyisyys 0 %.
- E) Kuten tapaus D, mutta joku asukkaista tulee kotiin testiviikon keskiviikkona klo 11, minkä läsnäoloanturi tms. aistii.

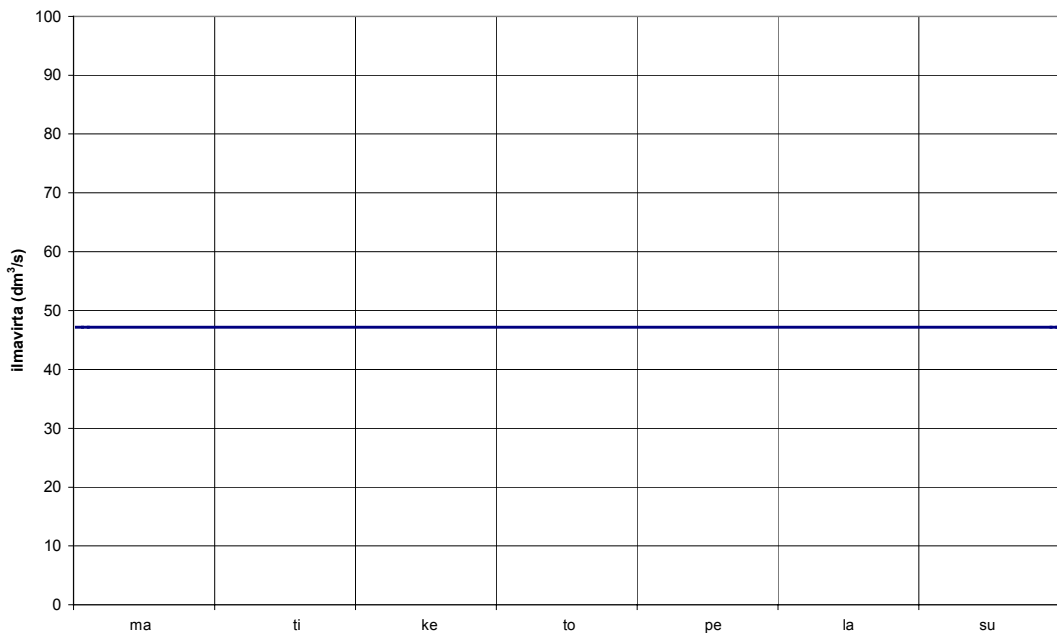
Simulointitulokset

Kuvissa 80–89 esitetään kustakin simulointitapauksesta huoneilman lämpötila, asetusarvo, tuloilman lämpötila sekä ilmavirta yhtenä simulointijakson viikoista. Tämän lisäksi taulukkoon 24 on koottu energiankulutukset eri tapauksissa.

Simulointitapaus A (taloudellisuus 0 % – viihtyisyys 100 %)

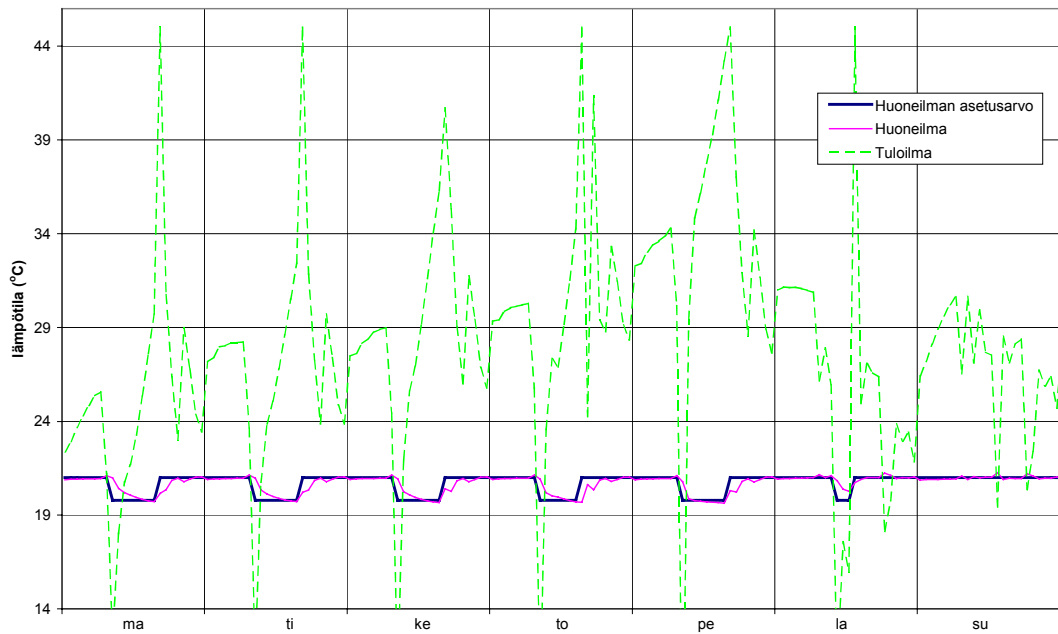


Kuva 80. Huoneilman lämpötilä, huonelämpötilan asetusrvo ja tuloilman lämpötilä simulointitapauksessa A. Laskentajakson kolmas viikko.

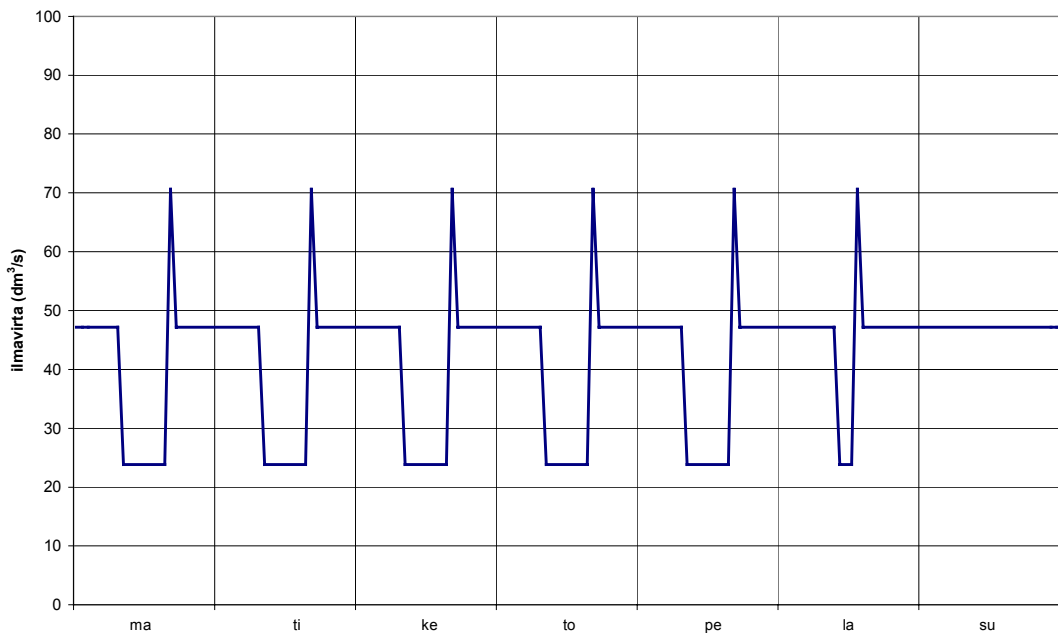


Kuva 81. Tuloilmavirta (poistoilmavirta on samansuuruinen) simulointitapauksessa A. Laskentajakson kolmas viikko.

Simulointitapaus B (taloudellisuus 30 % – viihtyisyys 70 %)

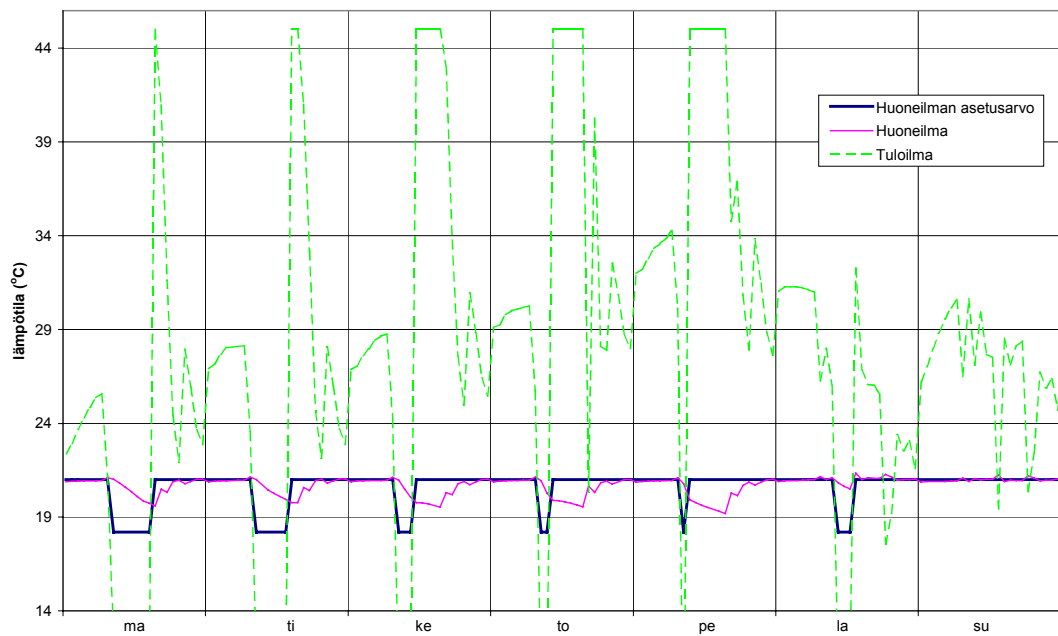


Kuva 82. Huoneilman lämpötilä, huonelämpötilan asetusrvo ja tuloilman lämpötilä simulointitapauksessa B. Laskentajakson kolmas viikko.

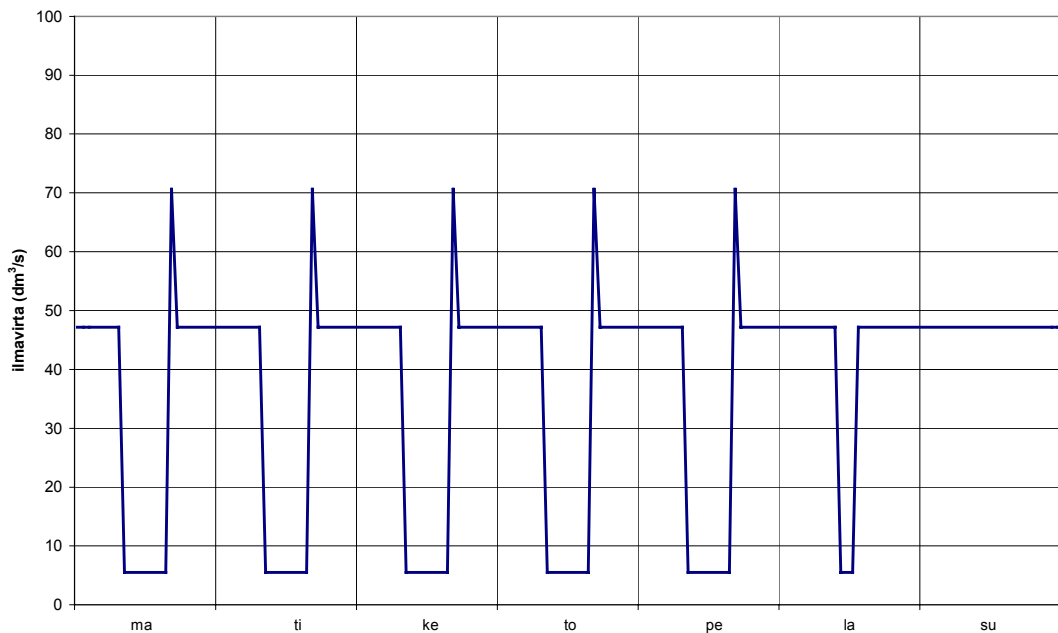


Kuva 83. Tuloilmavirta (poistoilmavirta on samansuuruinen) simulointitapauksessa B. Laskentajakson kolmas viikko.

Simulointitapaus C (taloudellisuus 70 % – viihtyisyys 30 %)

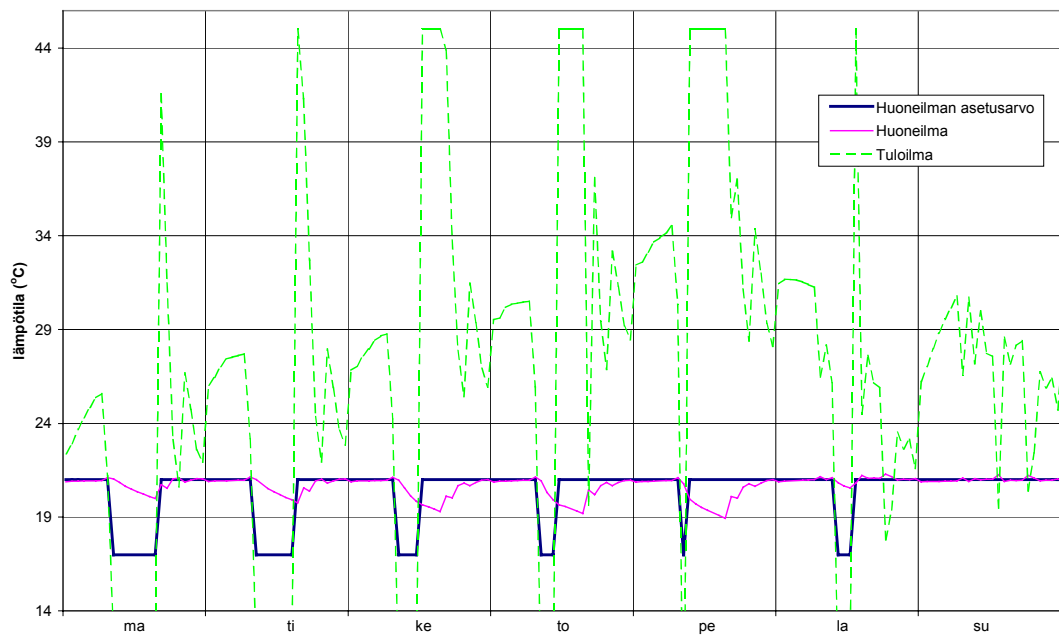


Kuva 84. Huoneilman lämpötilä, huonelämpötilan asetussarvo ja tuloilman lämpötilä simulointitapauksessa C. Laskentajakson kolmas viikko.

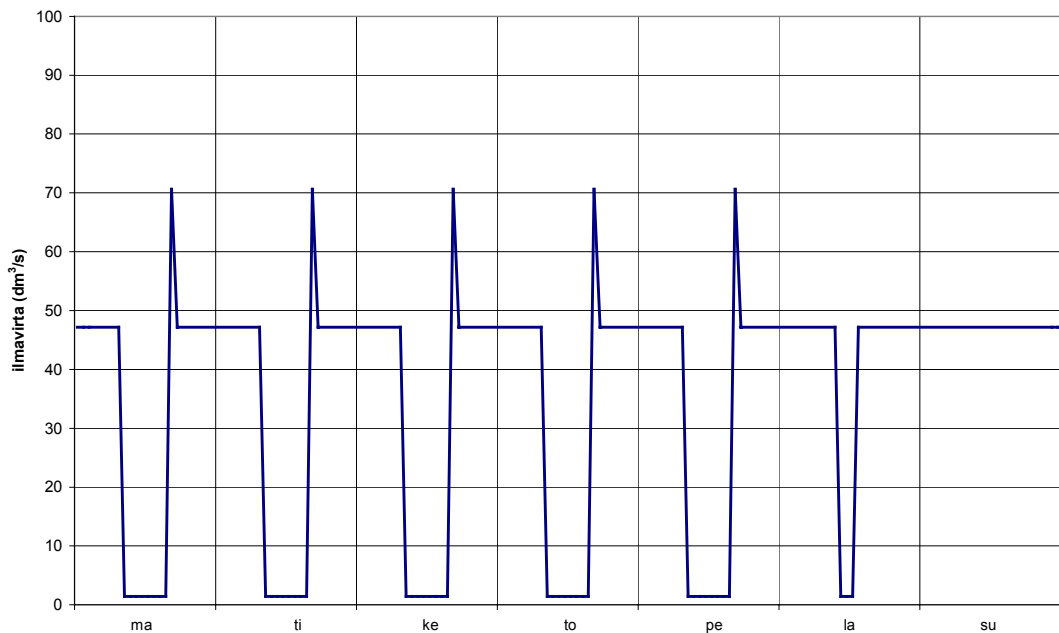


Kuva 85. Tuloilmavirta (poistoilmavirta on samansuuruinen) simulointitapauksessa C. Laskentajakson kolmas viikko.

Simulointitapaus D (taloudellisuus 100 % – viihtyisyys 0 %)

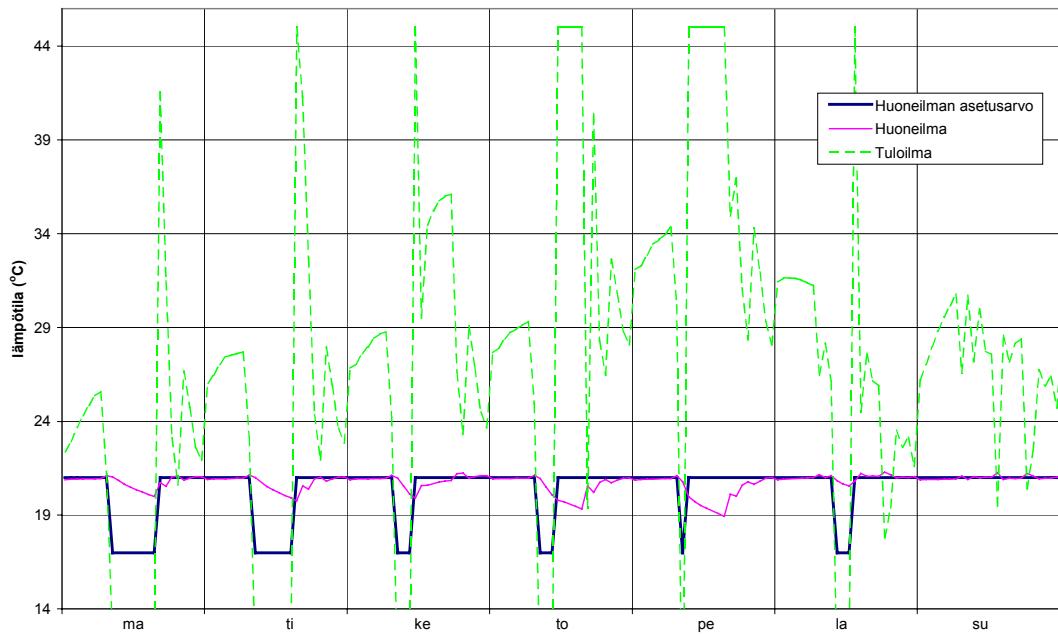


Kuva 86. Huoneilman lämpötilä, huonelämpötilan asetusarvo ja tuloilman lämpötilä simulointitapauksessa D. Laskentajakson kolmas viikko.

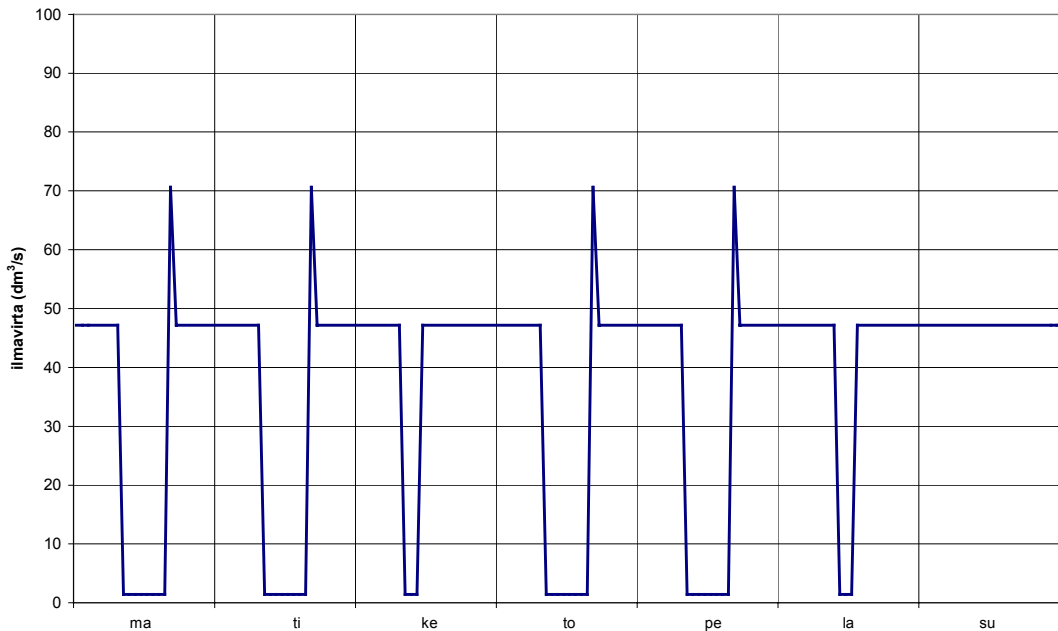


Kuva 87. Tuloilmavirta (poistoilmavirta on samansuuruinen) simulointitapauksessa D. Laskentajakson kolmas viikko.

Simulointitapaus E (taloudellisuus 100 % – viihtyisyys 0 %, ja yllättävä kotiintulo)



Kuva 88. Huoneilman lämpötilä, huonelämpötilan asetusarvo ja tuloilman lämpötilä simulointitapauksessa E. Laskentajakson kolmas viikko.



Kuva 89. Tuloilmavirta (poistoilmavirta on samansuuruinen) simulointitapauksessa D. Laskentajakson kolmas viikko.

Tulosten tarkastelu

A) Asukkaiden valitsema taloudellisuus-viihtyisyystaso on taloudellisuus 0 % – viihtyisyys 100 %.

Huonelämpötilaa ei lasketa asukkaiden ollessa poissa, vaan huonelämpötilan asetusarvo pysyy jatkuvasti arvossa 21 °C. Huonelämpötilaa pysyy jatkuvasti lähellä asetusarvoaan. Tuloilmavirta on jatkuvasti normaaliarvossa.

B) Asukkaiden valitsema taloudellisuus-viihtyisyystaso on taloudellisuus 30 % – viihtyisyys 70 %.

Huonelämpötilan asetusarvo ja huonelämpötila laskevan noin asteen verran asukkaiden ollessa poissa kotoa. Huonelämpötila on takaisin asetusarvoonsa asukkaiden saapuessa kotiin. Tuloilmavirta on noin 25 dm³/s (0,45 l/h), kun ketään ei ole kotona. Useimpina päivinä ennen kotiintuloa ilmavirta on maksimiarvossa ja muulloin se on normaaliarvossa.

C) Asukkaiden valitsema taloudellisuus-viihtyisyystaso on taloudellisuus 70 % – viihtyisyys 30 %.

Huonelämpötilan asetusarvo on kylmimpinä päivinä (to, pe) vain lyhyen aikaa matalalla tasolla, ja nousee näinä päivinä paljon ennen asukkaiden kotiin tuloa normaaliarvoonsa. Huonelämpötila jatkaa kuitenkin laskuaan senkin jälkeen, kun asetusarvo on palannut normaaliksi. Tämä johtuu pienestä ilmavirrasta (vain 5 dm³/s, 0,1 l/h) asukkaiden poissaollessa, jolloin edes korkea tuloilman lämpötila ei pidä huoneilman lämpötilaa normaalitasolla. Tällainen toiminta on kuitenkin järkevää, koska huonelämpötila saa laskea asukkaiden poissaollessa. Palauttamalla asetusarvon kesken poissaoloaikaa normaaliksi varmistetaan, että huonelämpötila ei laske niin paljoa, että nostaminen asetusarvoon ei onnistuisi kohtuullisessa ajassa.

Huonelämpötila laskee 1–2 °C asukkaiden ollessa poissa kotoa. Huonelämpötila ei ole kaikkina päivinä asukkaiden saapuessa kotiin aivan asetusarvoonsa, mutta poikkeama asetusarvosta on alle 1 °C. Useimpina päivinä ennen kotiintuloa ilmavirta on maksimiarvossa 71 dm³/s (1,3 l/h). 1–1,5 tunnin tuuletus ennen asukkaiden saapumasta kotiin, parantaa ilman laadun tyydyttäväksi.

D) Asukkaiden valitsema taloudellisuus-viihtyisyystaso on taloudellisuus 100 % – viihtyisyys 0 %.

Tulokset ovat paljolti kuten edellisessä tapauksessa (C). Huonelämpötila laskee asukkaiden ollessa poissa kotoa enintään noin kahden asteen verran. Asetusarvo laskee lyhyeksi ajaksi tätäkin enemmän, mutta nousee ennen asukkaiden saapumista normaaliksi. Ilmavirta on pienimmillään poissaoloaikana, mutta huoneisto tuuletetaan ennen asukkaiden saapumista.

Huonelämpötila ei ole kaikkina päivinä asukkaiden saapuessa kotiin aivan asetusarvoon: poikkeama voi olla luokkaa 1 °C. Asukkaat oletettavasti hyväksyvät tällaisen poikkeaman asetusarvosta, koska viihtyisyyden sijasta he haluavat painottaa taloudellisuutta. Toisekseen poikkeat asetusarvosta ovat lyhytaikaisia ja niitä esiintyy vain kylmimmillä säillä.

E) Kuten tapaus D, mutta joku asukkaista tulee kotiin testiviikon keskiviikkona klo 11, minkä läsnäoloanturi tms. aistii.

Kuten edellä, mutta kun asukas saapuu kotiin normaaliaikataulusta poiketen, huonelämpötilan asetusarvo ja tuloilmavirta nousevat heti normaalitasolle. Kotiin tullessa huoneilman lämpötila on 1 °C alle normaalin asetusarvon ja ilma on tunkkainen, mutta sisäilman laatu paranee melko pian normaaliksi.

Koska algoritmi on oppiva, seuraavalla viikolla keskiviikkona kyseiseen aikaan huonelämpötilan asetusarvo ja ilmavirta eivät alene normaaliarvoista. Tilanne palautuu seuraavalla viikolla ennalleen.

Yhteenveto edellisistä

Mikäli käyttäjä haluaa painottaa viihtyvyyttä, huoneilman lämpötila pysyy normaalitasolla koko ajan. Mikäli käyttäjä haluaa painottaa taloudellisuutta, huonelämpötila saattaa olla kotiin tullessa hieman asetusarvon alapuolella. Huonelämpötila nousee kuitenkin nopeasti asetusarvoonsa. Epäviihtyvyyttä ilmenee kuitenkin lähinnä, jos painotetaan taloudellisuutta ja tullaan kotiin yllättäen normaalista aikataulusta poiketen.

Energiankulutukset

Taulukko 24. Energiankulutus eri tapauksissa 15 viikon tarkastelujaksolla talvella. Kulutuslukeman alapuolella esitetään poikkeama vertailutapaukseen prosentteina.

Simulointitapaus	IV-koneen lämmityspatterin energiankulutus	Puhaltimien sähköenergian kulutus
A (taloudellisuus 0 % – viihtyisyys 100 %)	1911 kWh (vertailutapaus)	360 kWh (vertailutapaus)
B (taloudellisuus 30 % – viihtyisyys 70 %)	1709 kWh (-11 %)	304 kWh (-16 %)
C (taloudellisuus 70 % – viihtyisyys 30 %)	1537 kWh (-20 %)	279 kWh (-23 %)
D (taloudellisuus 100 % – viihtyisyys 0 %)	1507 kWh (-21 %)	277 kWh (-23 %)
E (taloudellisuus 100 % – viihtyisyys 0 % ja normaalista poikkeava kotiintulo)	1519 kWh (-21 %)	278 kWh (-23 %)

Simulointilaskelmien mukaan sekä lämmitysenergiankulutuksessa että puhaltimien sähköenergiankulutuksessa voidaan säästää runsaat 20 %. Säästöt ovat luonnollisesti pienemmät (tai jäävät saavuttamatta), jos käyttäjä haluaa maksimoida energiansäästön sijasta viihtyisyyttä.

Säästöt ovat selvästi suuremmat kuin aiemmissa simulointilaskelmissa (luku 5.2.2). Suurin syy siihen on, että nyt säädetään myös ilmavirtoja. Laskelmat eivät kylläkään ole aivan täysin vertailtavissa keskenään hieman eri lähtöarvojen vuoksi.

Johtopäätökset

Työssä kehitetyllä algoritmilla voidaan säästää viidennes energiasta, joka muuten kuluisi vastaavassa rakennuksessa. Energiankulutus pienenee, koska algoritmin avulla voidaan alentaa huonelämpötilaa sekä vähentää ilmanvaihtoa, kun huoneisto on tyhjillään, mutta huonelämpötila pystytään nostamaan takaisin normaaliarvoonsa ja huoneisto tuulettamaan ennen kuin asukkaat palaavat kotiin. Viihtyisyys heikkenee säästöjen johdosta vain vähän: huoneilman lämpötila ja laatu eivät ole normaalilla tasolla, mikäli käyttäjä tulee kotiin normaalista vakiintuneesta, aikataulusta poiketen.

Säästöt energiankulutuksessa ovat suurimmillaan, jos asukkailla on säännöllinen rytmi, ts. he ovat pois kotoaan jatkuvasti samaan aikaan viikossa. Tavallisessa päivätyössä käyvillä rytmi on varsin säännöllinen.

Simuloinneissa on oletettu, että järjestelmä saa jatkuvasti oikean tiedon läsnäolosta. Todellisessa rakennuksessa läsnäolotietojen saaminen luotettavasti ei välttämättä onnistu. Erilaisia keinoja läsnäolon tunnistamiseen pohditaan toisaalla raportissa (luku 8.5, s. 256).

Huonelämpötilan nostamiseen takaisin normaaliarvoonsa tarvittava aika ja huoneiston tuulettamiseen tarvittava aika riippuvat käytävissä olevasta lämmitystehosta ja ilmastointikoneen mitoituksesta. Isoilla ilmavirroilla tarvittava palautuslämmitys- ja tuuletusaika ovat lyhyitä, mikä on energiataloudellista, koska näin huoneisto voi olla pitkään seisonatilassa. Riittävän isoksi mitoitettu ilmastointikone parantaa myös viihtyisyyttä, sillä kun asukas saapuu normaaliaikataulusta poiketen kotiinsa ja huoneilman lämpötila on normaalitasoa alempi ja ilmanlaatu huono, sisäilmaolot voidaan palauttaa nopeasti hyvälle tasolla.

Oppivaa algoritmia on näissä laskelmissa testattu asuinrakennuksessa. Luultavimmin tämänkaltainen algoritmi soveltuisi muunkin tyyppisiin rakennuksiin, mutta asia kaipaa selvittämistä. Toimistorakennukset ovat käytössä vain noin kolmasosan viikosta, joten lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmien epäjatkuva käyttö soveltuu niihin hyvin.

5.3.3 Tulokset koekohteesta

Uutta algoritmia testattiin METOP-matalaenergiatoimistotalossa Espoon Otaniemessä syksyllä 2001 (rakennuksen ja lämmitysjärjestelmän kuvaus luvussa 5.2.3). Jakso oli riittävän pitkä, jotta rakennuksen dynamiikan oppimisen etenemistä voitiin seurata. Myös algoritmin toimintaa muuttuvissa olosuhteissa voitiin tarkkailla. Testausjakson aikana ulkolämpötila vaihteli +20 °C:n ja -6 °C:n välillä. Ulkolämpötila-alue kattaa noin puolet algoritmin palautuslämmityksen ennakkokäyrästä.

Algoritmin testaaminen koekohteessa

Algoritmi ajastettiin laskemaan ja päivittämään asetusrvot sisäilman lämpötilalle ja ilmanvaihtokoneen puhallinnopeudelle 10 minuutin välein. Myös eri suureiden mittaukset ja tietojen tallennukset lokitiedostoihin tapahtuivat 10 minuutin välein. Päivitykset ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän asetusrvoihin ajettiin kenttäväylän kautta vain silloin, kun asetusrvot muuttuivat. Erillisillä makroilla ja niihin liitetyillä tarkistuksilla pyrittiin varmistamaan se, että asetusrvot todella päivittyivät oikein. Aikaisempien testauksien aikana oli huomattu puutteita rakennusautomaatiojärjestelmän toiminnassa, joten järjestelmän toimintavarmuutta pyrittiin parantamaan entisest.

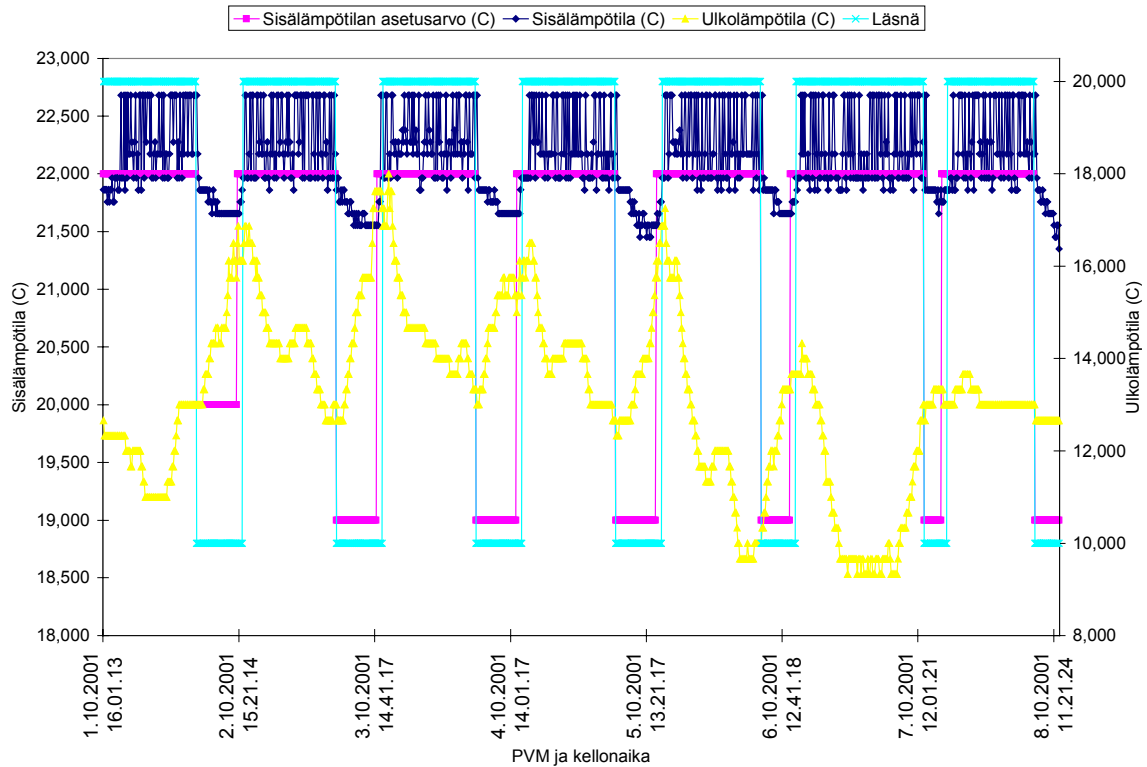
Algoritmin palautuslämmityksen ennakkokäyrä alustettiin kuvan 76 alkuarvojen mukaiseksi. Alkuarvot tälle käyrälle oli laskettu hyvin likimääräisesti kevään tulosten perusteella. Tavoitteena oli käyrän mahdollisimman nopea mukautuminen oikeaan suuntaan, toisin sanoen, rakennuksen dynamiikan oppiminen.

Testausjakson aikana normaalilämpötilaksi valittiin 22 °C ja poissaololämpötilaksi 18 °C. Läsnaolotieto tuotettiin ennalta määrätyn aikataulun mukaisesti tietokoneelta. Uutta algoritmia testattaessa käytettiin samaa läsnaolorytmiä kuin kevään 2001 testeissä vanhalla algoritmilla (ks. taulukko 23, sivu 123).

Ilmavirran asetusarvon on mahdollista saada kolme eri arvoa, jotka ovat ”normaali-”, ”säästö-” ja ”maksimipuhallus”. Normaali-ilmavirtaa käytetään, kun rakennuksessa oleskellaan, säästöilmavirtaa, kun rakennuksessa ei olla läsnä ja maksimi-ilmavirtaa (tarvittaessa) juuri ennen käyttäjän saapumista (lämmityksen tehostamiseksi ja rakennuksen tuulettamiseksi). METOP-talon yläkerran ilmanvaihtokone on isoksi mitoitettu, joten testeissä jouduttiin käyttämään tavanomaista suurempia ilmavirtoja. Tuloilmavirran normaaliarvo on 75 dm³/s ja ilmanvaihtokerroin 1,3 1/h. Säästötilassa arvot ovat 35 dm³/s ja 0,6 1/h. Maksimi-ilmavirta on 116 dm³/s eli 2,0 1/h.

Testitulokset

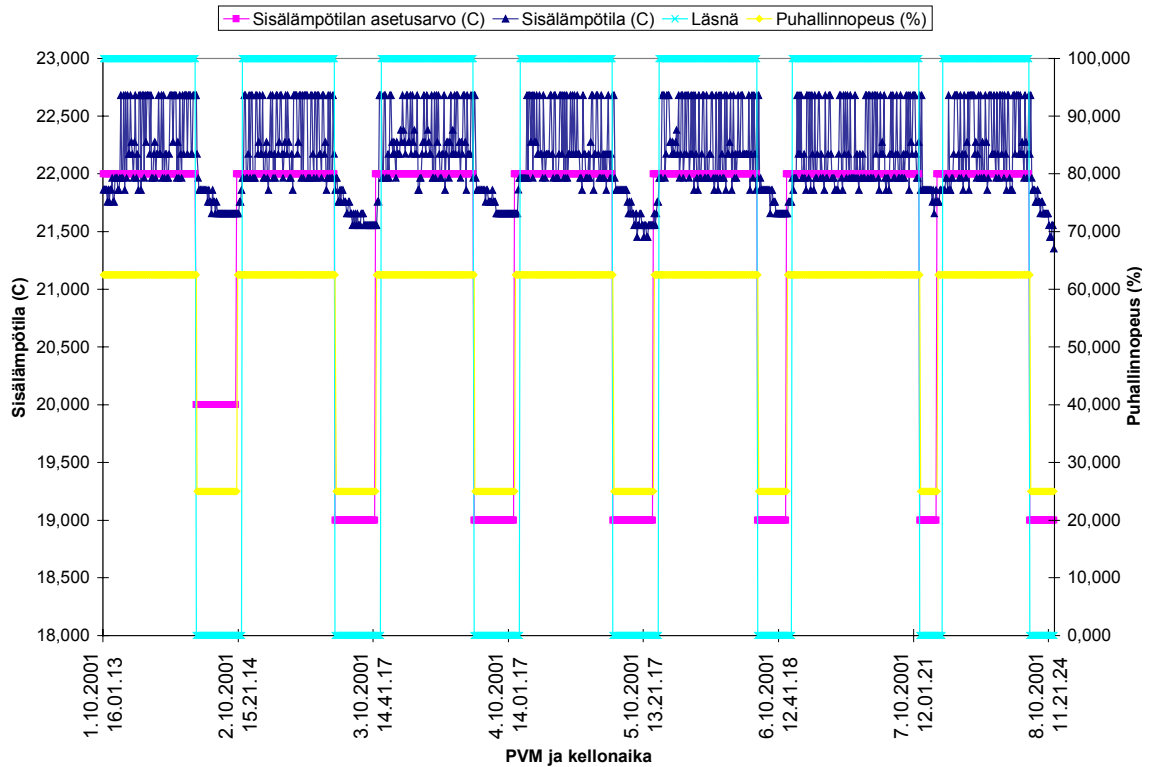
Syksyn ensimmäisiä testaustuloksia ajalta 1.–8.10.2001 esittää kuva 90. Kuvaan on piirretty sisälämpötilan asetusarvo, sisälämpötila, ulkolämpötila sekä läsnaolotieto, jonka perusteella algoritmi päättelee asetusarvot. Läsnaolokäyrän ollessa ylätasolla rakennuksen käyttäjä on läsnä, käyrän ollessa alatasolla käyttäjä on poissa.



Kuva 90. Testausjakson 1.–8.10.2001 tulokset.

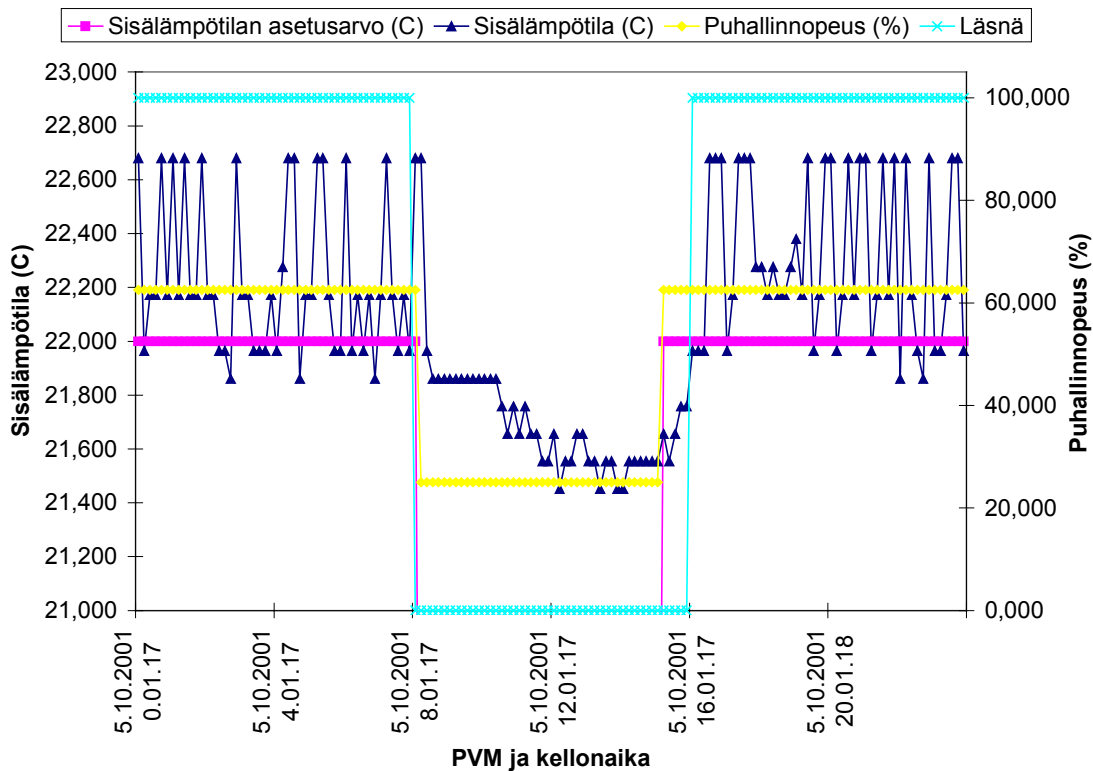
Nähdään, että ulkolämpötila on niin korkea, että sisälämpötila ei laske kovin nopeasti hyvin eristetyssä rakennuksessa säästöjakson aikana. Sisälämpötila putoaa enintään noin $0,5\text{ °C}$ alle normaalitason lämpötilan (22 °C) kahdeksan tunnin säästöjaksojen aikana. Tosin on huomattava, että sisälämpötila on ennen säästöjaksoa hieman normaalitason yläpuolella, joten lämpötilan kokonaispudotus on enimmillään noin 1 °C :n luokkaa. Ulkolämpötilan keskiarvo viikon jakson aikana on noin $13,3\text{ °C}$.

Asetusarvon ja läsnäolon käyrät kulkevat lähes rinnakkain kuvassa, mikä tarkoittaa sitä, että palautuslämmitysaika on hyvin lyhyt joka kerta. Sisälämpötilan arvoja tarkkailtaessa nähdään, että sisälämpötila on jokaisen palautuslämmityskerran lopussa algoritmin oppimisrajan sisällä normaalitasoon nähden. Oppimisraja on tässä $0,5\text{ °C}$. Voidaan siis sanoa, että viihtyisyys rakennuksessa ei ole laskenut lainkaan käyttäjän ollessa läsnä. Kuva 91 esittää saman jakson tuloksia puhallinnopeuden asetusarvolla täydennettynä ilman ulkolämpötilaa.



Kuva 91. Sisälämpötilan ja puhallinnopeuden ohjaukset 1.–8.10.2001.

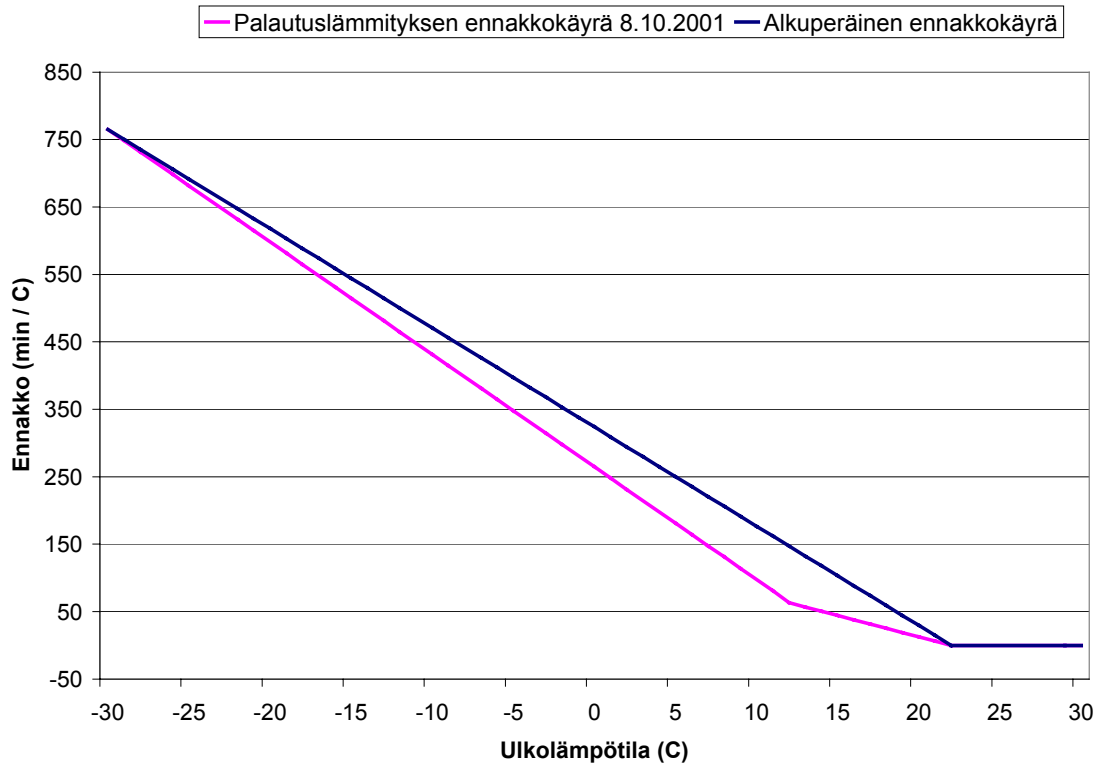
Nähdään, että puhallinnopeuden asetusarvo pysyy lähes koko säästöjakson minimitasolla. Puhallinnopeus nousee normaalitasolle yhtä tuntia ennen käyttäjän saapumisaikakohtaa. Lämmityksen tehostusta ei tarvita, koska sisälämpötila ei ole laskenut kovin paljon, joten puhallinnopeuden palauttaminen normaalitasolle riittää. Näin taataan rakennuksen tuulettuminen ennen käyttäjän saapumista.



Kuva 92. Algoritmin toiminnan tarkastelu yksittäisenä vuorokautena (5.10.2001).

Kuva 92 esittää algoritmin toimintaa yksittäisenä päivänä. Kuvasta nähdään selvemmin, miten puhallinnopeuden ja myös lämpötilan asetusarvot nousevat normaalitasolle tuntia ennen käyttäjän saapumista rakennukseen. Palautuslämmitykseen arviolta kuluvan ajan kasvaminen yli sen ajan, jonka arvioidaan kuluvan käyttäjän saapumiseen, aktivoi lämpötilan asetusarvon noston takaisin normaalitasolle. Kuitenkin lämpötilan asetusarvo palautetaan normaalitasolle viimeistään tuntia ennen käyttäjän saapumista, vaikka ennakkoaika olisi kuinka lyhyt hyvänsä.

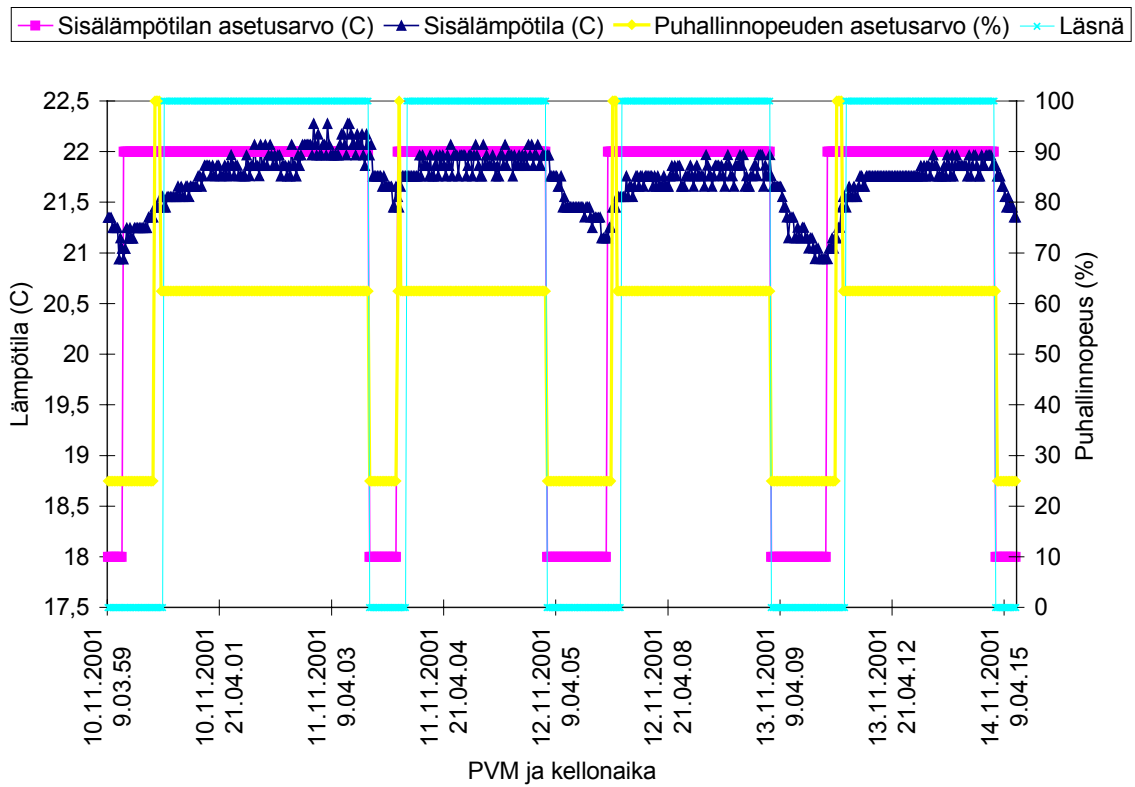
Säästöjaksojen aikana sisälämpötila ei siis juurikaan laskenut jaksolla 1.–8.10.2001. Tästä syystä myöskään palautuslämmityksen ennakkokäyrä ei muuttunut paljoa. Testituloksista voidaan päätellä, että ennakkokäyrän olisi pitänyt laskea etenkin alueella 9–18 °C, koska ulkolämpötila pysytteli kyseisellä välillä testijakson aikana ja toisaalta laskea sen takia, että sisälämpötila nousi tavoitetasolle ennen käyttäjän saapumista (liian aikainen rakennuksen lämmittäminen). Kuva 93 esittää muuttunutta ja alkuperäistä ennakkokäyrää.



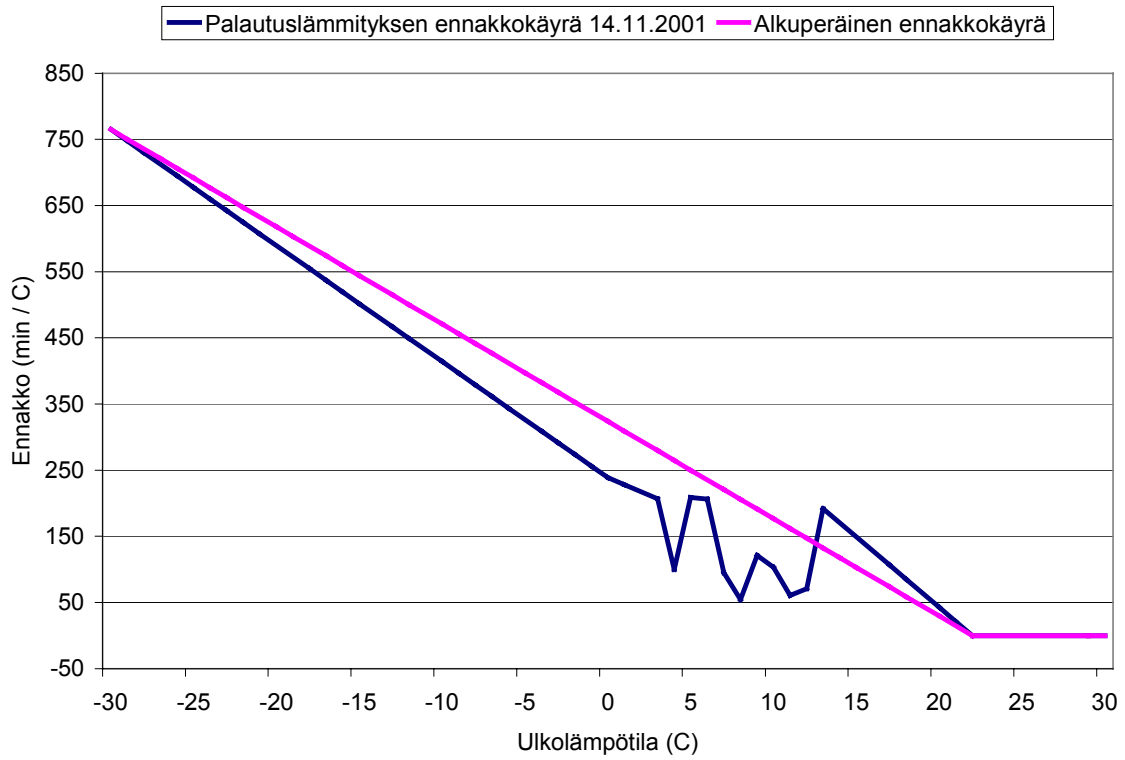
Kuva 93. Ennakkokäyrän muuttuminen METOP-matalaenergiatalossa 1.–8.10.2001.

Kuvasta 93 nähdään, että ennakkokäyrän muuttuminen yhdessä kohtaa on vaikuttanut kaikkialle käyrään. Tämä on tärkeää, koska muuten oppimista pitäisi tapahtua joka kohdassa vaak- eli ulkolämpötila-akselia. Tämä edellyttäisi koko lämpötila-alueen läpikäymistä, toisin sanoen oppiminen kestäisi vähintään vuoden. Toteutettu oppimistapa nopeuttaa algoritmin rakennuksen dynaamisten ominaisuuksien oppimista.

Kuvassa 94 tarkastellaan testaustilannetta kuukautta myöhemmin (10.–14.11.2001), jolloin viimeistään algoritmin tulisi kyetä hallitsemaan rakennuksen dynamiikka riittävän tarkasti. Nähdään, että sisälämpötila laskee noin yhden asteen jokaisella säästöjaksolla. Lämpötilan palauttaminen normaaliksi onnistuu jokaisella kerralla ennen käyttäjän saapumista rakennukseen valitulla tarkkuudella (0,5 °C). Nähdään myös, että lämpötila palautuu normaalitasolle juuri sopivasti, ei liian myöhään eikä myöskään liian aikaisin. Puhallinnopeuden asetusarvo nousee ennen käyttäjän saapumista huippuunsa tarvittavaksi ajaksi, jolloin lämmitystä ja ilmanvaihtoa tehostetaan. Kuvasta 95 nähdään, miten palautuslämmityksen ennakkokäyrä on muuttunut testauksen alusta (1.10.2001) alkaen 14.11.2001 mennessä.



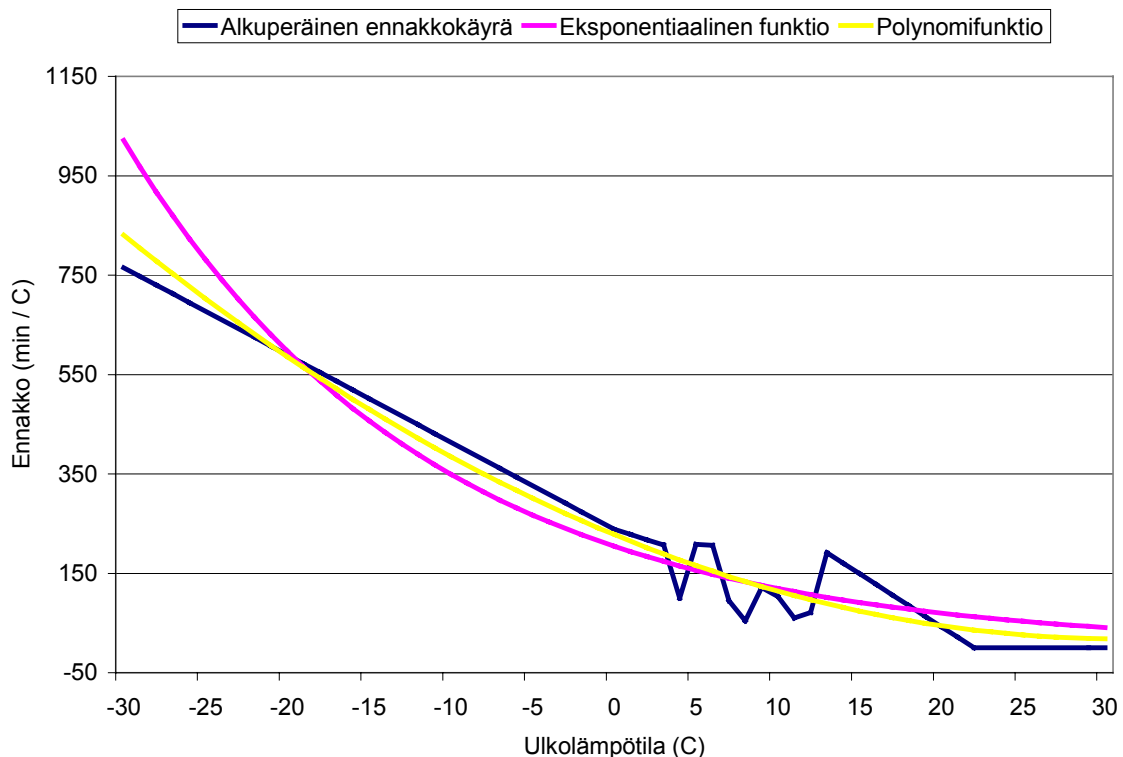
Kuva 94. Testitulokset 10.–14.11.2001.



Kuva 95. Ennakkokäyrän muuttuminen METOP-matalaenergiatalossa 1.10.–14.11.2001.

Palautuslämmityksen ennakkokäyrä on muuttunut useasta kohdasta ulkolämpötila-alueella 0–15 °C. Käyrän epämääräiseltä näyttävä käyttäytyminen selittyy muuttuvilla olosuhteilla, sillä eri palautuslämmitysjaksojen aikana ulkolämpötila saattaa joko nousta tai laskea. Tämän takia johonkin palautuslämmitykseen saattaa kulua merkittävästi vähemmän aikaa kuin toiseen, vaikka ulkolämpötila olisi lähes sama molempien palautuslämmitysten alkaessa. Myös ilmankosteus ja muut ulkoiset, dynaamiset tekijät vaikuttavat palautuslämmitysaikoihin. Vaikka käyrä ei näytä kauniilta, suuruusluokat ovat kuitenkin oikeita, mikä riittää algoritmin toimimiseksi oikein kuten esimerkiksi kuvan 94 tulokset osoittavat.

Jos ennakkokäyrän tarkkuutta halutaan parantaa ja virheherkkyyttä pienentää, algoritmiin voidaan liittää painotetun pienimmän neliösumman menetelmällä toimiva käyrän muokkaus. Tämä ominaisuus toteutettiin algoritmiin, mutta sen testaamista METOP-talossa ei tehty, joten tuloksia ei esitetä tässä. Jotta paremmin selviäisi mistä on kyse, kuva 96 esittää edellä käsiteltyä ennakkokäyrää PPNS-menetelmällä muokattuna kahdella eri käyrämuodolla.



Kuva 96. PPNS-menetelmällä muokatut ennakkokäyrät.

Kuvan 96 kaksi eri käyrää on saatu eri sovituskäytännöillä ja painokertoimilla alkuperäisestä ennakkokäyrän pisteistä. Oleellista PPNS-menetelmän käytössä on sopivan käyrämuodon löytäminen. Kuvan eksponentiaalisella funktiolla ennakkokäyrän pisteitä sovitetaan käyrälle $y = f(x) = ke^{px}$, jossa k ja p ovat sovittavat parametrit ja e Neperin luku.

Polynomifunktiolla sovitettaessa ennakkokäyrän pisteet sovitetaan käyrälle $y = f(x) = k_1 + k_2x + k_3x^2$, jossa k_1 , k_2 ja k_3 ovat sovitettavat parametrit. Ennakkokäyrän pisteitä painotetaan enemmän kustannusfunktiota laskettaessa, mikäli pisteiden kohdalla on joskus tapahtunut oppimista. Jos oppimista ei ole tapahtunut pistettä vastaavalla ulkolämpötilan arvolla, pisteen paino on pienempi. Käytännössä sovitettava käyrä kulkee lähempää paljon painotettua pistettä kuin vähän painotettua.

Eksponentiaalisen käyrämuodon etuna on sen soveltuminen kuvaamaan lämmitystapahtumaa. On helppo mieltää, että lämmitysaika kasvaa eksponentiaalisesti, jos ulkolämpötila laskee lineaarisesti. Toisaalta eksponentiaalinen käyrämuoto on jäykkä muutoksille, joten se saattaa olla hidaskuuttumaan. Polynomifunktion etu on oppimisen nopeus, mutta vaarana on liiallinen herkkyys esimerkiksi virhetilanteissa. Myös käyrän muoto saattaa muuttua helpommin ”vääränlaiseksi”, koska polynomifunktioon sisältyy toisen asteen termi. Tämä tarkoittaa sitä, että käyrän arvot saattavat kasvaa ulkolämpötilan kasvaessa. Menetelmän soveltaminen käytäntöön vaatisi simulointeja ja niiden analysointia, jotta sopivat painotukset PPNS-menetelmän painomatriisille löydetään.

Energiankulutus testeissä

Koekohteen mittaustuloksista arvioitiin saavutettavaa energiansäästöä. Säästö puhallinenergiassa oli tarkastelujaksolla 13 % ja lämpöenergiassa 11 %. Tarkastelu on tehty lyhyellä talvijaksolla keskimääräisen ulkolämpötilan ollessa 6,5 °C. Säästöt saavutettiin käyttäjien poissaoloajan alemman huoneilman lämpötilan ja pienemmän ilmanvaihdon johdosta. Lämmöntalteenotolla talteen saatava energia käytettiin hyödyksi myös käyttäjien poissaoloaikoina (niin kuin tehtiin simuloinneissakin).

Tulokset osoittavat, että matalaenergiatalon jo ennalta pientä kulutusta voidaan pienentää kehitettyä algoritmia hyödyntämällä.

5.4 Oppivan algoritmin käyttöliittymä

Erilaisten järjestelmien käyttöliittymistä tulee helposti hankalia ja sekavia, jolloin niiden käyttäminen ei ole miellyttävää, eikä välttämättä onnistu ilman opaskirjaa. Jokainen on varmaankin törmännyt, myös rakennuksissa, hankaliin kytkimiin.

Seuraavassa pohditaan millainen tässä työssä kehitetyn oppivan algoritmin käyttöliittymän tulisi olla. Käytettävyys on lopulta olennaisen tärkeä tekijä käytännön hyödyntämisessä.

Työssä kehitettyyn oppivaan algoritmiin liittyy monia parametreja:

- huoneilman lämpötilan asetusarvo normaalitilanteessa,
- lämpötilan pudotus poissaoloviikkoa kohden (ja suurin sallittu lämpötilan pudotus),
- normaali puhallinnopeus (normaali ilmavirta),
- maksimi puhallinnopeus (maksimi ilmavirta),
- minimi puhallinnopeus (minimi ilmavirta),
- "on/off-kytkin".

Tämän lisäksi algoritmiin kuuluu monia sisäisiä parametreja, jotka liittyvät oppimiseen yms. Näitä rakennuksen käyttäjän ei kuitenkaan ole ajateltu muuttavan, eikä niitä lueteltu edellä.

Algoritmia kehitettäessä sen ohjelmakoodiin on sisällytetty nk. taloudellisuus-viihtyisyyskytkin (Kuva 58, s.104). Tämän kytkimen asento vaikuttaa poissaoloajan arvoihin, lämpötilan pudotuksen suuruuteen sekä puhallinnopeuden minimiin.

Käyttöliittymän pitäisi olla yksinkertainen ja havainnollinen niin, että käyttäjälle jää hyvät vaikutusmahdollisuudet järjestelmän toimintaan, esim. tarpeen mukaiseen ohjaukseen.

Yksinkertaisimmillaan käyttöliittymä sisältäisi ainoastaan em. liukukytkimen sekä toisen kytkimen, jolla valittaisiin huoneilman lämpötilan normaalitaso (kuva 97). Tällöin tosin käyttäjä ei voi vaikuttaa normaali-ilmavirtaan eikä tehostaa ilmanvaihtoa. Maksimi-ilmavirran voidaan olettaa olevan ilmanvaihtokoneen maksimi-ilmavirta.

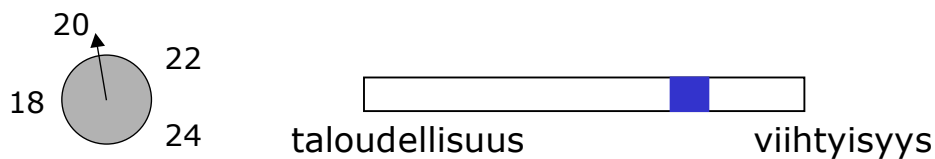
Mikäli käyttäjä haluaa painottaa pelkästään viihtyisyyttä, hän asettaa kytkimen ääri-asentoonsa. Tällöin huonelämpötilan asetusarvoa ei alenneta missään tilanteessa normaaliarvostaan, eikä ilmavirta koskaan pienene normaaliarvostaan. Varsinaista off-kytkintä ei siis välttämättä tarvittaisi, mutta selvyuden vuoksi sellainen olisi mahdollisesti tarpeen.

Normaali-ilmavirran valitsemista varten tarvitaan oma kytkimensä, kuten myös ilmavaihdon tehostamista varten. Nämä molemmat toiminnot voidaan yhdistää samaan-kin kytkimeen, jottei kytkimiä tarvittaisi monia erillisiä. Tapauksesta riippuen voi olla riittävää, että käyttäjä pystyy ainoastaan tehostamaan ilmanvaihtoa, eikä vaikuttamaan ilmanvaihdon normaalitasoon.

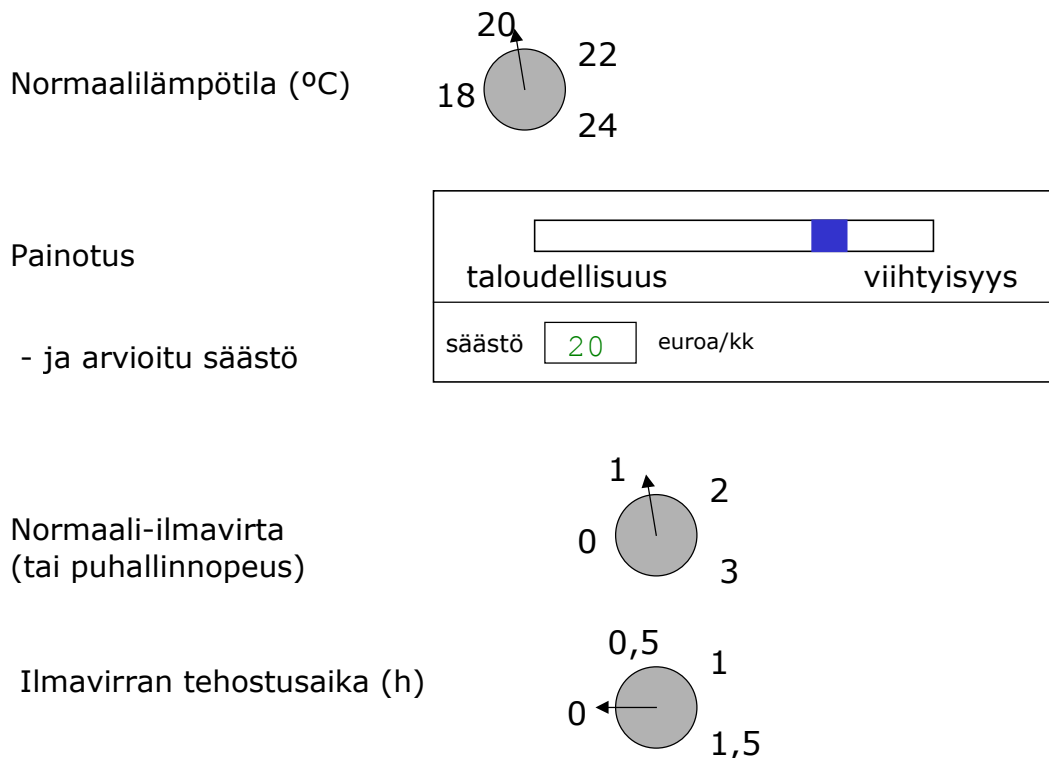
Taloudellisuus-viihtyisyyskytkimen vaikutusta energiankulutukseen voitaisiin havainnollistaa antamalla palautetietona säästetty rahamäärä (kuva 98) * MERGEFORMAT .

Erityisesti omakotitaloissa asuvat ja muut jotka maksavat itse energiastaan olisivat tästä varmasti kiinnostuneita. Tällainen tieto myös edistäisi kyseisen kytkimen käyttöä.

Säästöarvion tuottaminen ei kuitenkaan ole kovin yksinkertaista, koska säästö riippuu energianhinnoista, rakennuksen ja sen järjestelmien ominaisuuksista sekä erityisesti rakennuksen käytöstä, eli siitä kuinka paljon ajasta rakennus on tyhjillään. Tarkka tieto saavutettavista säästöistä voitaisiin tuottaa käyttöhistorian ja kulutustietojen perusteella. Epätarkan arvion saa paljon helpommin, mutta onko se käyttäjälle hyödyllinen?



Kuva 97. Käyttöliittymä yksinkertaisimmillaan. Valittavissa on huonelämpötilan normaalitaso sekä taloudellisuus-viihtyisyystaso.



Kuva 98. Käyttöliittymä josta voidaan myös vaikuttaa normaali-ilmavirtaan ja tehostaa ilmanvaihtoa. Käyttöliittymään saadaan tietoa myös painotuskytkimen asennon vaikutuksesta energiankulutukseen.

Kuvasta 98 havaitaan, että käyttöliittymässä on monia eri kytkimiä. Näistä yksi, painotuskytkin, on ylimääräinen tavanomaiseen verrattuna. Toiminnot voidaan toteuttaa yhtä hyvin myös erityyppisillä kytkimillä, eikä kuvassa esitetty ole välttämättä ihanteellisin. Esimerkiksi ilmanvaihtoa tehostetaan tyypillisesti painikkeella (jolloin kylläkin tehostuksen kestoaika on kiinteä).

Varsin selkeän käyttöliittymän voisi toteuttaa kolmella kytkimellä: tarvitaan normaali-lämpötilakytkin, painotuskytkin ja ilmavaihdon tehostuskytkin. Lisäksi normaali-ilmavirta voisi olla aseteltavissa paneelin alta tms. tai se voisi riippua painotuskytkimen asennosta.

5.5 Yhteenveto luvuista 5.1–5.4

Työssä on kehitetty oppiva algoritmi sisäolojen hallitsemiseen, erityisesti epäjatkuvasti käytössä oleviin rakennuksiin tai huoneistoihin (jollaisia suurin osa rakennuksista on). Algoritmin toimintaa on testattu simuloinnein ja koekohteessa.

Simulointien mukaan asuinrakennuksessa tai huoneistossa voidaan talviaikaan säästää jopa viidennes lämpöenergiasta, joka muuten kuluisi vastaavaan aikaan. Samoin puhaltimien sähkönkulutuksessa voidaan säästää noin viidennes. Energiankulutus alenee, koska työssä kehitetyn algoritmin avulla huoneilman lämpötilaa pystytään laskemaan normaaliarvostaan ja ilmavirtaa pienentämään, kun rakennuksessa ei oleskella. Lämpötila pystytään nostamaan normaalitasolle ja rakennus tuulettamaan ennen kuin rakennukseen palataan. Algoritmi kykenee adaptoitumaan kyseisen rakennuksen lämpödynamiikkaan ja oppimaan lämpötilan nostoon tarvittavan ajan.

Kehitetty algoritmi tarvitsee tiedon ihmisten läsnäolosta. Tämän tiedon oikeellisuus on hyvin kriittinen tekijä järjestelmän toiminnan ja erityisesti oppimisen kannalta. Eri tapoja läsnäolotiedon saamiseen on tarkasteltua toisaalla raportissa (s. 256).

Asukas pystyy kytkimellä valitsemaan, haluaako hän saavuttaa energian enimmäis-säästöt vaiko painottaa viihtyvyyttä, jolloin energiasäästöt jäävät pienemmiksi. Viihtyisyys ei simulointitulosten mukaan kuitenkaan välttämättä heikkene, vaikka tähdättäisiinkin maksimaalisiin säästöihin energiankulutuksessa. Epäviihtyisyyttä ilmenee lähinnä silloin, jos rakennukseen saavutaan normaalista poikkeavaan aikaan, kun rakennus on seisonatilassa.

Kehitettyä oppivaa algoritmia testattiin koekohteena olleessa matalaenergiatalossa, jonka energiankulutus on selvästi pienempi kuin tavanomaisen nykyaikaisen rakennuksen. Tiiviissä ja hyvin eristetyssä rakennuksessa lämpötilamuutokset ovat hitaita, mikä tar-

koittaa myös sitä, että algoritmilla saavutetut säästöt jäävät pienemmiksi. Kuitenkin myös matalaenergiatalon jo ennalta pientä energiankulutusta pystytään pienentämään algoritmin avulla. Koekohteessa arvioitiin saatavan runsaan 10 %:n säästö sekä lämmitysenergiassa että puhaltimien sähköenergiassa.

Oppivien järjestelmien hyvä toimivuus edellyttää säädön ja rakennusautomaatiojärjestelmien muuten moitteetonta toimintaa. Mikäli haluttua asetusarvoa ei saavuteta huonosti viritettyjen säätimien vuoksi tai muusta vastaavasta syystä, oppiminen voi tapahtua virheellisesti, mikäli itse oppiva järjestelmä ei kykene tunnistamaan tällaisia tilanteita. Samoin mikäli rakennusautomaatiojärjestelmä virhetilanteen takia välittää virheellisiä arvoja, saattavat jo aiemmin opitut tiedot mennä hukkaan. Myös muunlaiset ongelmat tietoteknisissä järjestelmissä ovat tavanomaisia. Oppivan järjestelmän tulisi kyetä havaitsemaan tällaiset tilanteet ja kytkeä oppiminen tällöin pois.

Työssä on myös kehitetty käyttöliittymää kyseiseen järjestelmään sekä pohdittu käyttäjän ja LVI-säätöjärjestelmän vuorovaikutusta yleisesti. Käyttöliittymän tulisi tarjota mahdollisuus yksilölliseen säätöön ja olla selkeä ja helppokäyttöinen. Sen tulisi mielellään antaa palautetta käyttäjälle, esim. kertoa saavutetuista energiankulutuksen säästöistä mahdollisimman selkeästi. Työssä kehitetyn kaltaisia järjestelmiä hyödynnettäessä on olennaista, että ne saadaan mahdollisimman nopeasti täyteen toimintakuntoon (esim. adaptoitumaan kyseiseen rakennukseen). Mikäli käyttöönottilanteessa aiheutuu epäviihtyvyyttä tai järjestelmän toiminta on muuten outoa, käyttäjä saattaa kytkeä järjestelmän pois käytöstä.

5.6 Vaihtoehtoinen menetelmä palautuslämmityksen aloitusajankohdan ennustamiselle

Rakennuksissa, joissa ihmisten paikallaolo tai rakennuksen tyhjilläänolo on tunnettua (esimerkiksi toimistorakennukset, joissa paikallaolo on vahvasti sidoksissa virka-aikaan), voidaan energiaa säästää alentamalla sisälämpötilaa tietyksi ajaksi ns. säästötilalle ja nostaa lämpötila normaaliksi, kun on odotettavissa, että ihmisiä tulee paikalle.

Nostettaessa tilojen lämpötilaa ennen ihmisten paikalletuloa (nk. palautuslämmitys) olisi syytä huomioida seuraavat asiat:

- Lämpötilaa ei kannata nostaa liian varhain, jotta saavutettaisiin mahdollisimman suuri energiansäästö.
- Lämpötilaa ei kannata nostaa liian myöhään, koska tilat ovat ihmisten tullessa liian kylmät ja viihtyvyys kärsii.

- Viihtyvyys voi myös kärsiä, jos lämmitys toteutetaan esimerkiksi liian lämpimällä ilmavirralla tai huonetilassa pintojen lämpötilat ovat toisiinsa nähden joko epäsymmetriset tai tilassa on suhteettoman kuumia pintoja.

5.6.1 Menetelmän perusidea

Rakennuksen sisälämpötila riippuu

- lämmitystehosta
- sisäisistä ja ulkoisista lämpökuormituksista
- säästötilan sisä- ja ulkolämpötiloista
- halutusta asetusravosta sekä
- rakenteiden lämmönjohtavuudesta ja lämpökapasiteetista.

Energiayhtälön perusmuoto on

$$\begin{aligned} \text{rakennukseen tulevat energiavirrat} - \text{rakennuksesta lähtevät energiavirrat} & \quad (4) \\ = & \\ \text{rakennukseen varastoituva energiavirta} & \end{aligned}$$

Matemaattisin merkinnöin yhtälö voidaan esittää muodossa

$$Q_{\text{läm}} + Q_{\text{kuormat}} - K(T_s - T_u) = C \frac{dT_s}{dt} \quad (5)$$

missä	$Q_{\text{läm}}$	lämmitysteho [kW]
	Q_{kuormat}	lämpökuormien summalämpövirta [kW]
	T_s	sisälämpötila [°C]
	T_u	ulkolämpötila [°C]
	C	lämpökapasiteetti [kJ/K]
	t	aika [s]
	K	rakenteiden lämmönjohtumista kuvaava parametri [kW/K]

K - parametri määritellään yhtälöllä

$$K = \sum_i k_i A_i \quad (6)$$

missä	k_i	rakenteen i lämmönjohtavuus [kW/m ² K]
	A_i	rakenteen i pinta-ala [m ²]

Tarkasteltavassa menetelmässä rakennuksen K - ja C -parametrit määritetään ensin tarkkailemalla rakennuksen käyttäytymistä jollakin ajanjaksolla, minkä jälkeen energiayhtälöä voidaan käyttää lämmityksen aloitusajankohdan arvioimiseen.

K määritetään ensin. Se voidaan antaa joko yhtälöstä (6) laskettuna parametrina, jos rakennuksen ulkoseinien lämmönjohtavuusominaisuudet ja rakennuksen geometria tunnetaan. Jos tätä tietoa ei ole käytettävissä, K voitaneen periaatteessa määrittellä asettamalla testiolosuhteet, joissa rakennukseen tuleva lämpövirta pyritään eliminoimaan mahdollisimman tarkkaan. Tällöin K voidaan laskea stationaaritilassa yhtälöstä (5). Stationaariolosuhteiden saavuttaminen on käytännössä kuitenkin varsin vaikeaa, koska ympäröivät olosuhteet tuskin pysyvät likimain vakioina riittävän pitkää aikaa (useita vuorokausia).

Myös C :n määrittäminen edellyttää testiolosuhteita. Toisin sanoen on tunnettava rakennukseen tulevat ja sieltä lähtevät lämpövirrat. Toimistotyyppisten rakennusten tapauksessa kuormitusten tunnistaminen on periaatteessa mahdollista aikana, jolloin rakennuksessa ei olla paikalla. C määritetään yhtälön (5) perusteella, kun rakennuksen sisällä olevan tarkastelupisteen lämpötilan muutosnopeutta seurataan. Tarkastelupisteen valintaan ei tässä oteta tarkemmin kantaa, vaikka sillä on ilmeistä merkitystä laskelmien tarkkuudelle. Menetelmän perusidean puitteissa tarkastelupisteen oletetaan kuvaavan jollakin tarkkuudella sisäilman lämpötilaa. Se voi olla esimerkiksi poistoilmakanavasta otettu lämpötila.

K :n ja C :n, sisä- ja ulkolämpötilojen sekä lämpövirtojen tunteminen antaa nyt teoreettisen mahdollisuuden arvioida energiayhtälön (5) avulla tarvittavaa palautuslämmityksen aloitusajankohtaa.

5.6.2 Simuloinnit

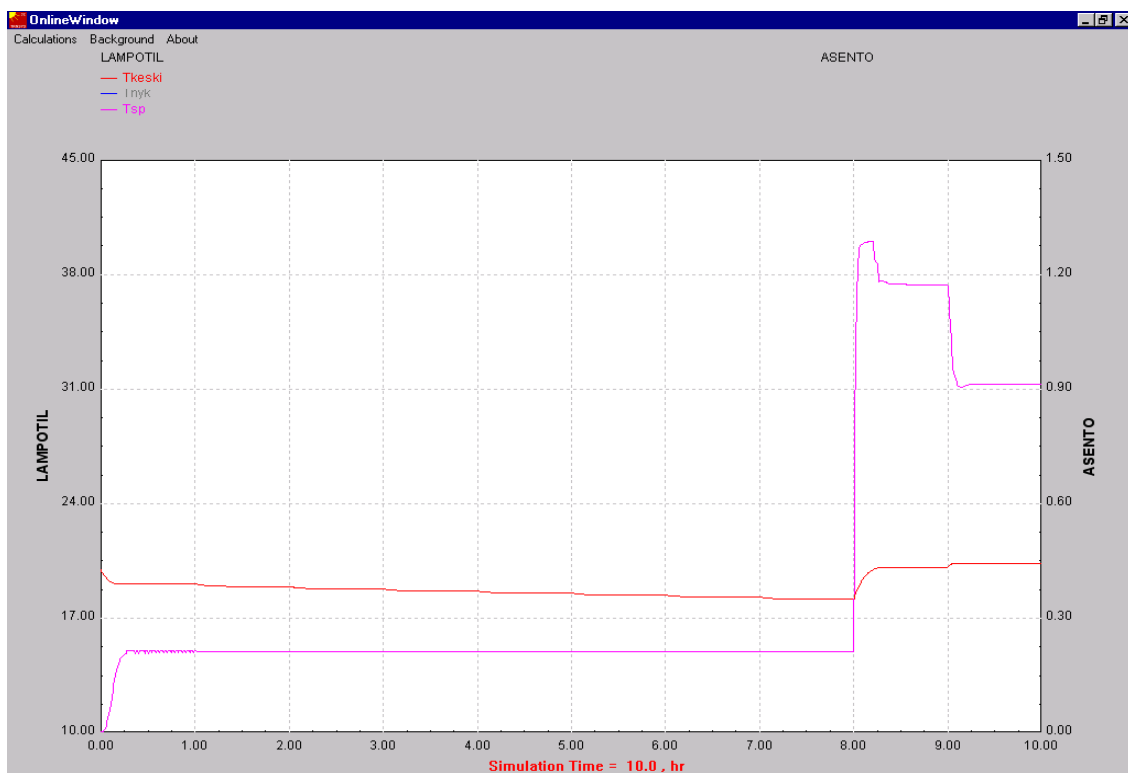
Menetelmästä laadittiin TRNSYS-simulointiohjelmaan soveltuva FORTRAN-koodi. Toimintaperiaate tässä tarkastelussa lyhyesti esitettynä on seuraavanlainen:

1. K -arvo lasketaan rakennuksesta saatavien tietojen ja yhtälön (6) perusteella.
2. Ajetaan ensimmäinen vuorokausi siten, että ilman lämmitys aloitetaan tasan klo 8 ja tutkitaan, kuinka pitkä aika lämmittämiseen kuluu. Tuloilman lämpötila ja ilmavirta lämmitysvaiheessa tunnetaan lämmitystehon määrittämistä varten. Samoin tunnetaan sisä- ja ulkolämpötilat sekä K -arvo lämpöhäviön määrittämistä varten.
3. Lasketaan C yhtälön (5) perusteella.
4. Lasketaan yhtälön (5) perusteella aika, jolloin palautuslämmitys on seuraavan kerran aloitettava.

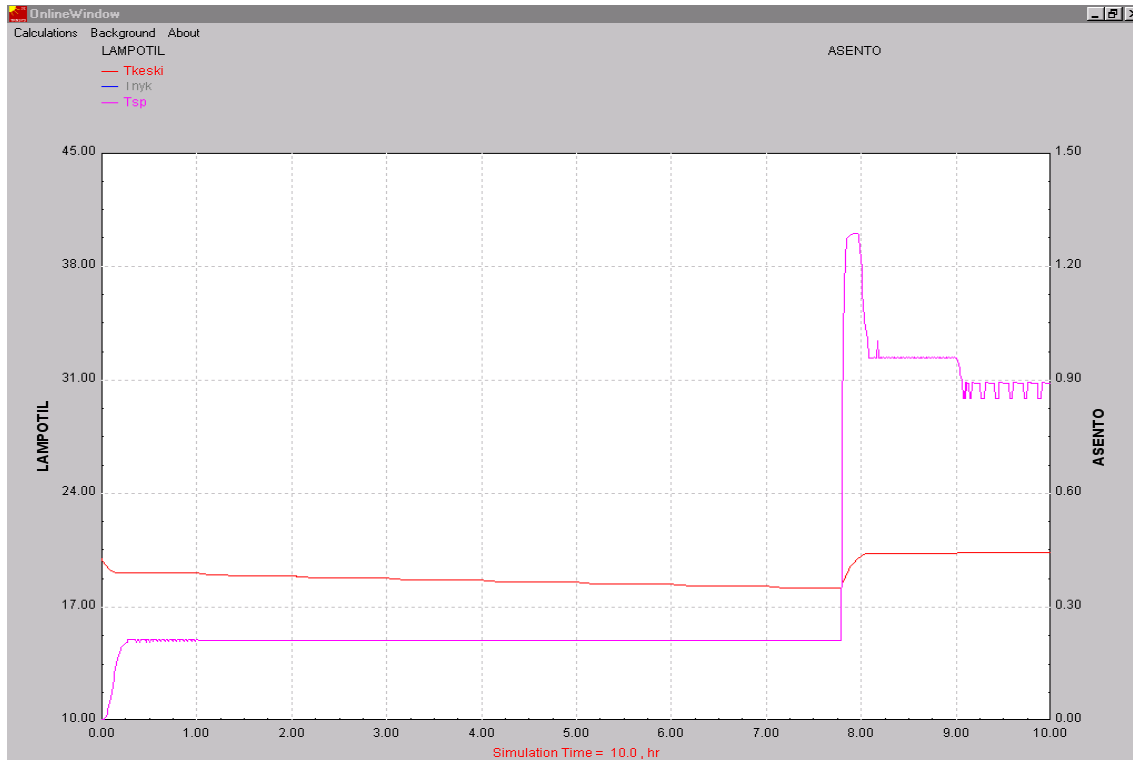
Koodin toimintaa kokeiltiin liitteessä A kuvattuun kerrostalokolmioon ilmalämmityksellä. Seuraavissa kuvissa on esitetty sisäänpuhalluslämpötilan ja sisälämpötilan käyttäytyminen ilman ennustusta (1. vuorokausi, kun C -arvo ei vielä ole selvillä) ja ennustuksella varustetussa tapauksessa (2. vuorokausi, kun C laskettu ensimmäisen vuorokauden tapahtumien perusteella). Tarkastelussa on oletettu, että ihmiset saapuvat paikalle aamulla klo 8.00.

Kuvasta 99 nähdään, että klo 8 huoneiston lämpötila on vielä säästölämpötilassa. Aloitetaan rajua lämmitys, joka nostaa sisäänpuhalluslämpötilan maksimiinsa. Kuvan perusteella tilanteessa on havaittavissa selkeä viihtyvyysongelma.

Kuvasta 100 käy ilmi ennustettu tapaus. Nyt sisälämpötila saavuttaa halutun lämpötilan juuri ihmisten saapuessa paikalle. Halutun sisälämpötilan saavuttaminen on myös palauttanut sisäänpuhalluslämpötilan takaisin viihtyvyyden kannalta optimaaliselle, n. 30–35 °C:n tasolle.



Kuva 99. Sisäänpuhallus- ja sisälämpötilat 1. tarkasteluvuorokauden aikana. (ei ennustusta).



Kuva 100. Sisäänpuhallus- ja sisälämpötilat 2. tarkasteluvuorokauden aikana (ennustus mukana).

5.6.3 Yhteenveto luvusta 5.6

Luvussa tarkasteltiin palautuslämmityksen aloitusajankohdan ennustamista energiayhtälön perustuvan, yksinkertaistetun menetelmän avulla. Menetelmässä rakennuksesta pyritään määrittelemään lämmönjohtavuutta ja lämmönvarauskykyä kuvaavat ominaisuudet (K - ja C -arvot) tarkkailemalla rakennuksen käyttäytymistä erilaisissa olosuhteissa. Tämän jälkeen rakennuksen käyttäytyminen on periaatteessa laskettavissa energiayhtälön avulla.

Menetelmää testattiin TRNSYS-simulointiohjelmalla, sovelluskohteena ilmalämmityksellä varustettu kerrostalokolmio. Menetelmä tarkasteli tilannetta ensimmäisen simulointivuorokauden aikana ilman ennustusta. Toisen vuorokauden aikana voitiin käyttää 1. vuorokauden perusteella laskettua C -arvoa. Esimerkkitapauksen olosuhteissa menetelmä toimi hyvin.

Vaikkakin menetelmä on yksinkertainen ja täten ohjelmakoodiltaan helppo, sen ongelmana on teoreettisuus. Menetelmän sovellettavuus edellyttää, että tarkasteltavan rakennuksen lämpökuormitukset (rakennukseen tulevat ja sieltä lähtevät lämpövirrat) tunnetaan hyvin. Tämä onkin mahdollista esimerkiksi toimistorakennuksissa, joissa kuormi-

tus muodostuu pääasiassa erilaisista sähkölaitteista silloin, kun rakennuksessa ei olla paikalla. Menetelmää ei voida soveltaa tapauksiin, joissa olosuhteet muuttuvat äkillisesti ja rajusti. Lämmönjohtavuus- ja varastointiominaisuuksien määrittelyä varten kuormitusten ja sääolojen tulisi pysyä suhteellisen vakioina ensimmäisen vuorokauden aikana. Mikäli tarkastelussa on dynamiikaltaan hidas rakennus, jolle lämmitys energiansäästötilan lämpötilasta käyttölämpötilaan kestää kauan (yli yhden vuorokauden), menetelmän tarkkuus kärsii, koska vakio-olosuhteiden säilyttäminen on näin pitkäksi aikaa käytännön olosuhteissa jopa mahdotonta.

Menetelmän kehitys on siinä mielessä alkutekijöissään, että testejä on tehty ainoastaan käyttöönottovuorokaudelle (ensimmäiselle tarkasteluvuorokaudelle) ja tätä seuraavalle vuorokaudelle (ensimmäinen ennustettu lämmityksen aloitusajankohta). Jatkossa toimintaa olisi tutkittava pidemmällä ajanjaksoilla, jotta saadaan selville sen toimivuus mahdollisimman monissa olosuhteissa. Toimivuuden perusteella voidaan tehdä mm. johtopäätöksiä siitä, tarvitseeko C -arvoa muuttaa toiminnan aikana ja jos, niin mihin suuntaan. Tässä tehtävässä voisi olla käyttöä mm. sumealle logiikalle, mutta menetelmän yksinkertaisuus ja varmatoimisuus on kuitenkin pidettävä mielessä koko ajan.

6. Ilmanvaihdon säätöön ja ohjaukseen liittyvät ratkaisut

6.1 Ilmanvaihdon optimointi eri kriteerien perusteella

Rakennusten energianhallintajärjestelmien tavoitteena on turvata rakennuksen käyttäjälle mahdollisimman hyvät sisäilmasto-olosuhteet. Se edellyttää, että huoneen lämpötila on sopiva, huoneessa ei esiinny epäsymmetristä lämpösäteilyä eikä lämpötilan voimakasta kerrostuneisuutta. Huoneilman virtausten tulee olla sellaisia, että vedon tunnetta ei esiinny. Rakennuksen energianhallintajärjestelmän toiminta kiinnostaa käyttäjän lisäksi myös rakennuksen omistajaa, viranomaisia ja laajemmassa merkityksessä, ympäristönäkökohtia ajatellen, koko maapallon asukkaita. Nämä intressit ovat kytköksissä rakennuksen energiankulutukseen.

Rakennuksen toiminnalliset vaatimukset luovat tarpeen energianhallintajärjestelmien käytön optimoinnille. Optimoitu järjestelmä takaa mahdollisimman hyvät sisäilmasto-olosuhteet mahdollisimman edullisin kustannuksin. Tämä luku käsittelee ilmanvaihtojärjestelmän energianhallinnan käytönaikaista optimointia matemaattisen optimointimenetelmän avulla. Iv-järjestelmän keskeisiä muuttujia optimaalisen toiminnan kannalta ovat tuloilman lämpötila ja virtaavan ilman määrä. Ilmanvaihtojärjestelmien energiankulutusta voidaan pienentää energiansäästötoimenpiteillä, joita ovat lämmön talteenotto, kierrätysilman käyttö ja mahdolliset matala-arvoisen energian lähteet. Optimaalisesti toimivassa järjestelmässä myös energiansäästötoimenpiteiden maksimaalinen hyödynttäminen on otettava huomioon.

6.1.1 Optimointimalli

Tässä tutkimuksessa optimointiongelma on seuraavanlainen:

Valitse ilmanvaihto-(ilmalämmitys-) järjestelmän

- tuloilmavirta (ilmanvaihtokerroin), $q_{V,sp}$
- sisäänpuhalluslämpötila, T_{sp}
- raittiin ilman osuus tuloilmavirrasta, x

seuraavin ehdoin

- huonelämpötila pysyy asetusarvossaan (lähellä asetusarvoa)
- minimi-ilmanvaihdon tarve tyydyttyy

siten, että

- kustannukset ovat mahdollisimman pienet
- viihtyvyys on mahdollisimman hyvä.

Ilmalämmitysjärjestelmää ajatellen seuraavien ehtojen on täytyttävä:

1. Ilmanvaihtokertoimen tulee olla vähintään 1.
2. Raittiin ilman osuuden tulee täyttää ilmanvaihtokriteerin vaatimus riippuen henkilölukumäärästä ja huonetilavuudesta henkilöä kohti.
3. Ilmavirran tuoman energian täytyy olla riittävä, jotta lämpöhäviöt pystytään kompensoimaan ja huonelämpötila pitämään asetusarvossaan.

Kustannusten ajatellaan tarkasteltavassa mallissa muodostuvan puhaltimien energiankulutuksesta koituvaksi sähkölaskuksi ja ostolämmön hinnasta muodostuvaksi lämpölaskuksi. Tuntikustannukset voidaan laskea yhtälöstä

$$K_{tot} = H_l \Phi_{osto} + H_s P_{puh} \quad (7)$$

missä	K_{tot}	kokonaiskustannukset [mk/h]
	H_l	lämmön hinta [mk/kWh]
	Φ_{osto}	ostettava lämpöteho [kW]
	H_s	sähkön hinta [mk/kWh]
	P_{puh}	puhaltimen tehonkulutus [kW]

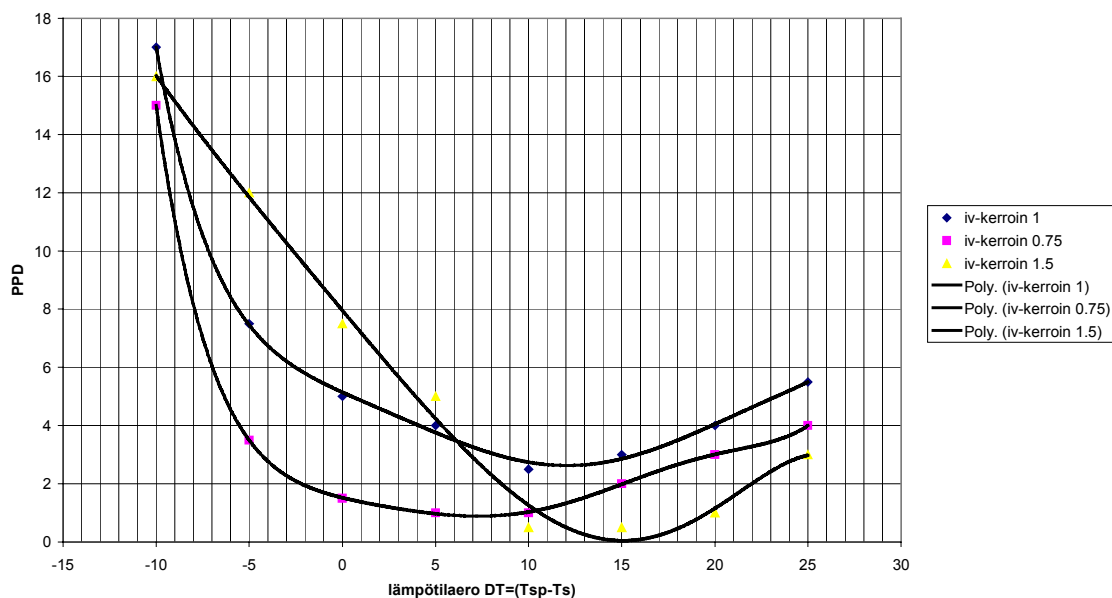
Ostolämmön määrä saadaan yhtälöstä

$$\Phi_{osto} = q_V \rho c_{pi} (T_{sp} - T_{ma}) \quad (8)$$

missä	q_V	ilman tilavuusvirta [m^3/s]
	ρ	ilman tiheys [kg/m^3]
	c_{pi}	ilman ominaislämpökapasiteetti [$kJ/kg^\circ C$]
	T_{sp}	sisäänpuhalluslämpötila [$^\circ C$]
	T_{ma}	lämpötila energiansäästötoimenpiteiden jälkeen [$^\circ C$]

Viihtyvyyden maksimointi tarkoittaa käännettynä tyytymättömyyden minimointia. Tyytymättömyysindeksi (PPD, Predicted Percentage of Dissatisfied) on valittu tarkasteltavan mallin viihtyvyyskriteeriksi kahdesta syystä: ensinnäkin sen asteikon suhdeluku on 100, mikä helpottaa yhteismitallistamista kustannusten kanssa ja toiseksi viihtyvyysindeksille on olemassa korrelaatioita, joista se voidaan suhteellisen helposti laskennallisesti määrittää.

Ilmanvaihtojärjestelmällä ei voida vaikuttaa huoneen säteilyolosuhteisiin, joten viihtyvyytlaskelmat perustuvat pääte-elimestä tulevan ilmasuihkun vaikutuksiin huonetilassa. Aiemmissa tutkimuksissa on osoitettu, että ilmasuihkun viihtyvyyksille KTS-tyyppisen pääte-elimen tapauksessa on olemassa kuvan 101 mukainen, tilavuusvirrasta ja sisäänpuhallusilman yli- tai alilämpöisyydestä riippuva funktio (Kovanen 1989).



Kuva 101. Tyytymättömyyden riippuvuus tuloilmavirrasta ja sisäänpuhalluslämpötilasta.

6.1.2 Optimointimenetelmät

Tutkimuksessa optimoinnin kohteena on kaksi tavoitetta: kustannukset ja viihtyvyys. Helpoin lähestymistapa ongelman ratkaisemiseksi on yksitavoitteinen optimointi. Yksitavoitteinen optimointi ei anna mahdollisuutta etsiä erilaisia "trade-offeja" eli korvaussuhteita kustannusten ja viihtyvyyden välillä, vaan tällöin on valittava jompikumpi ominaisuuksista (kustannukset tai viihtyvyys) tavoitefunktioiksi, jonka perusteella optimointi suoritetaan. Yksitavoitteisen optimoinnin etuna on, että tavoitteiden yhteismitallistamisesta syntyvä epätarkkuus vältetään. Yksitavoitteinen optimointi esitetään perusoptimointiongelmana kaikessa operaatiotutkimusta käsittelevässä kirjallisuudessa, joten siihen ei tässä yhteydessä puututa tarkemmin.

Kun valinta tehdään useiden eri tavoitteiden perusteella ja kustannusten sekä viihtyvyyden välisiä "trade-offeja" halutaan tarkastella erilaisten tärkeys-painotusten valossa, oikea lähestymistapa on ns. monitavoiteoptimointi. Monitavoiteoptimointi (Andresen 1998) perustuu teoriaan, jota kutsutaan nimellä MAUT (Multi Attribute Utility Theory).

Kun yksitavoitteisessa optimoinnissa tavoite (tässä kustannusten minimointi ja viihtyvyyden maksimointi) voidaan tulkita kohdefunktioksi, joka määritetään kullekin vaihtoehdolle, MAUT-teoriassa ongelma palautetaan yksitavoitteiseksi määrittämällä ns. hyötyfunktio. Hyötyfunktion arvo on vaihtoehdon kohdefunktioiden arvojen painokerroimilla painotettu keskiarvo ja se määritellään yhtälöllä

$$U(i) = w_1 f_1(i) + \dots + w_n f_n(i) \quad (9)$$

missä U = hyötyfunktio
 i = tarkasteltava vaihtoehto
 $w_1 \dots w_n$ = painokertoimet kohdefunktioille $1 \dots n$, $\sum w_i = 1$
 $f_1(i) \dots f_n(i)$ = kohdefunktiot $1 \dots n$ vaihtoehdolle i

Monitavoiteoptimoinnissa kohdefunktioiden arvot ilmaistaan useimmiten eri yksikössä. Jotta niitä voitaisiin vertailla, ne täytyy ilmaista asteikossa, joka tekee ne vertailukelpoisiksi toisiinsa nähden. Eräs tapa ratkaista tämä ongelma, on ilmaista muuttujat hyötyä kuvaavina indeksilukuina, esim. asteikolla $0 \dots 5$, jossa 0 edustaa "vähää" ja 5 "paljoa". Tarkasteltavassa mallissa kustannukset ja tyytymättömyys on yhteismitallistettu välille $0 \dots 100$.

Toinen ominaispiirre monitavoiteoptimoinnille on, että päätöksentekijä saattaa arvostaa jotain ominaisuutta enemmän kuin toista. Yhtälössä 9 kohdefunktion f painokerroin ilmaisee, kuinka tärkeänä päätöksentekijä pitää vastaavaa ominaisuutta suhteessa muihin ominaisuuksiin. Painokerroinskaala valitaan yleensä siten, että niiden summa on 1. Mikäli jotain ominaisuutta arvostetaan toista enemmän, ts. painokertoimet ovat erisuurat, optimiratkaisun sanotaan olevan *orientoitunut* sen kohdefunktion suhteen, jota painotetaan eniten. Mikäli muuttujia painotetaan yhtä paljon, optimiratkaisu on *edullisuusorientoitunut* (Seppänen 1996).

Tarkasteltava optimointiongelma voidaan ilmaista muodossa:

$$\text{MIN } U(T_{sp}, q_{V,sp}, x) = w_{kust} K_{tot,y}(T_{sp}, q_{V,sp}, x) + w_{PPD} PPD_y(T_{sp}, q_{V,sp}, x) \quad (10)$$

missä U = hyötyfunktio
 w_{kust} = kustannusten painokerroin
 w_{PPD} = PPD-luvun painokerroin
 $K_{tot,y}(T_{sp}, q_{V,sp}, x)$ = yhteismitallistetut kustannukset
 $PPD_y(T_{sp}, q_{V,sp}, x)$ = yhteismitallistettu PPD-luku

6.1.3 Tietokonesimuloinnin perusteella saatuja tuloksia

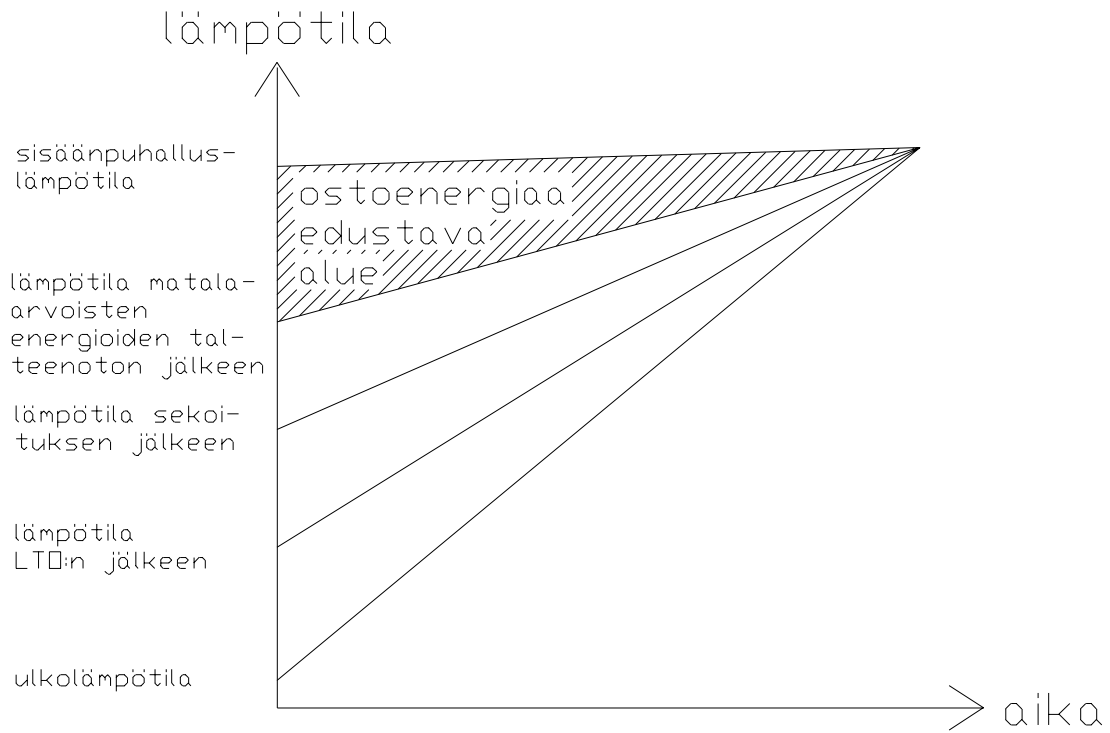
Tässä luvussa esitellään tietokonesimulointien tuloksia talviolosuhteissa, kun sovelletaan yksitavoitteista optimointia. Tarkasteltavat tapaukset olivat seuraavat:

- viihtyvyyssorientoitu tapaus:
minimi-ilmanvaihtokertoimet 0,1, 0,5 ja 1,0 (max.1,5)
sisälämpötilan asetusarvo 21 °C
- kustannusorientoitu tapaus:
minimi-ilmanvaihtokerroin 1,0
sisälämpötilan asetusarvo 21 °C
matala-arvoisten energialähteiden maksimilämpötila: 20, 25, 30 °C (vakio)
Ostolämmön hinta 2,52 snt/kWh (15 p/kWh), sähkön hinta
7,57 snt/kWh (45 p/kWh).

Tarkasteluissa otettiin huomioon myös seuraavat ilmalämmitysjärjestelmän energiansäästötoimenpiteet:

- lämmön talteenotto
- ilman kierrätys
- matala-arvoisen energian hyödyntäminen (patteriverkoston paluueden lämpö).

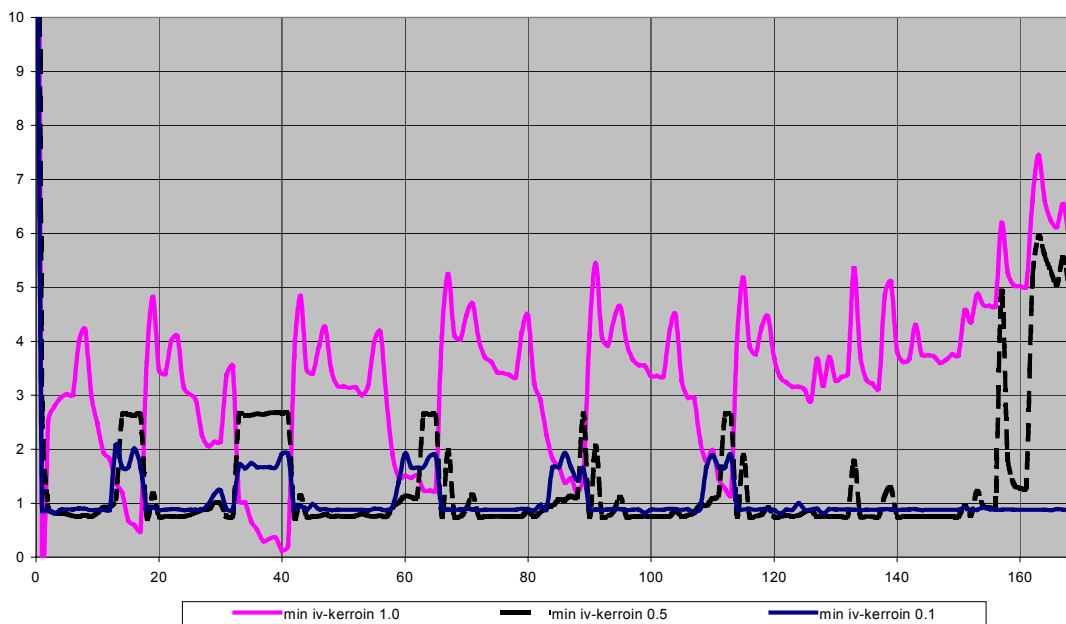
Kun energiansäästötoimien vaikutukset otetaan huomioon, ilman lämmityksen pysyvyys voidaan esittää kuvan 102 mukaisesti.



Kuva 102. Tuloilman lämmityksen pysyvyys.

Huonelämpötilan asetusarvo pysyi simuloinneissa hyvin asetusarvossaan.

Tuloilman lämpötilan pitäminen optimaalisella alueella (kuva 103) merkitsee ilmanvaihtokertoimen pienentämistä huoneiston positiivisten sisäisten kuormien vallitessa.



Kuva 103. Viihtyvyysorientoitu tapaus eri minimi-ilmanvaihtokertoimilla.

Optimointiongelman ratkaisemiseksi voidaan siis haluttaessa hakea joko

- viihtyvyysoptimi, ts. pitää PPD-luku minimissään, jolloin iv-kerroin vaihtelee nollan ja maksimiarvon välillä tai
- toiminnallinen optimi, jolloin iv-kerroin pidetään vähintään minimissään siten, että PPD-luku on mahdollisimman pieni.

Kustannusorientoituneissa tapauksissa tarkasteltu menetelmä suosi selkeästi lämmön tuontia ilmavirtaa lisäämällä. Kustannusorientoidut tapaukset vaativat vielä jatkotarkasteluja. Yleisesti tarkasteltujen optimointimenetelmien kustannuksia alentavaa vaikutusta ei ole toistaiseksi voitu selkeästi osoittaa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että menetelmä toimii hyvin. Epävarmuustekijöitä ovat PPD-luvun määrittelevän funktion oikeellisuus ja soveltuvuus tarkasteltaviin tapauksiin sekä vaikeudet määrittellä matalalämpötilaisten energianlähteiden maksimilämpötila.

6.2 Huonekohtaisten ilmavirtojen automaattinen ohjaus

Kosteus- ja lämpökuormien esiintymisen epäsäännöllisyys ja suuruus asettavat suuria haasteita asuinrakennusten ilmanvaihdolle. Perinteisessä, keskitetyssä kerrostaloasunnossa ilmanvaihto on yleensä tehostustilassa ennalta määrättyinä ajanjaksoina aamupäivästä ja iltapäivästä. Koska nykyajan ihmisten ruoanlaitto-, saunomis- ja suihkussa-käyntitottumukset poikkeavat suuresti, joudutaan monesti tilanteeseen, että riittävää ilmavirtaa ei kuormitusten aikoina ole saatavissa sinne, missä sitä eniten tarvittaisiin.

Vaikkakin nykyään on olemassa jonkin verran myös huoneistokohtaisia ilmanvaihtoratkaisuja, ongelmia esiintyy edelleen. Huoneistokohtaisissa ilmanvaihtoratkaisuissa ainoa, mitä käyttäjä pystyy kuormitustilanteissa tekemään, on puhaltimen pyörimisnopeuden lisääminen. Koska kanavistovastukset pysyvät toisiinsa nähden ennallaan, ilmavirta lisääntyy koko kanavistossa. Tämä voi puolestaan johtaa siihen että tilassa, josta kuormitus on poistettava, ilmavirta ei lisääntynyt riittävästi, kun taas toisessa huoneessa syntyy vedon tunnetta liiallisen ilmavirran vuoksi.

Tässä luvussa pohditaan mahdollisuuksia toteuttaa automaattinen huonekohtaisten ilmavirtojen ohjausmenetelmä, jossa säätöpeltejä ohjaamalla saavutetaan kuhunkin huoneeseen tarpeenmukainen ilmanvaihto.

6.2.1 Toimintaperiaate

Menetelmä soveltuu asuinkerrostalon keskitetyn poistoilmanvaihdon tai huoneistokohtaisen tulo- ja poistoilmanvaihdon ohjaukseen. Se pyrkii varmistamaan riittävän hyvän ilmanlaadun kerrostalohuoneistojen jokaisessa huoneessa tarpeen mukaan ja parantamaan näin huoneistoissa oleskelevien ihmisten viihtyvyyttä.

Menetelmä pyrkii keskittämään ilmanvaihtoa kohteisiin, joissa sitä erityisesti tarvitaan suurta ilmanvaihtoa tarvitsevien tilojen säätöpeltien asentoja suurentamalla ja vastavasti pientä ilmanvaihtoa tarvitsevien tilojen säätöpeltien asentoja pienentämällä.

Puhaltimen pyörimisnopeutta säädetään ilmavirran tarpeen mukaan. Tätä varten puhallin on varustettava taajuusmuuttajalla, jota ohjataan PI-säätimellä pitäen kanavapainetta vakiona.

Ilmavirtojen säätöpeltien asennot määräytyvät huone- (tai huoneisto-)kohtaisten kuormitusten perusteella.

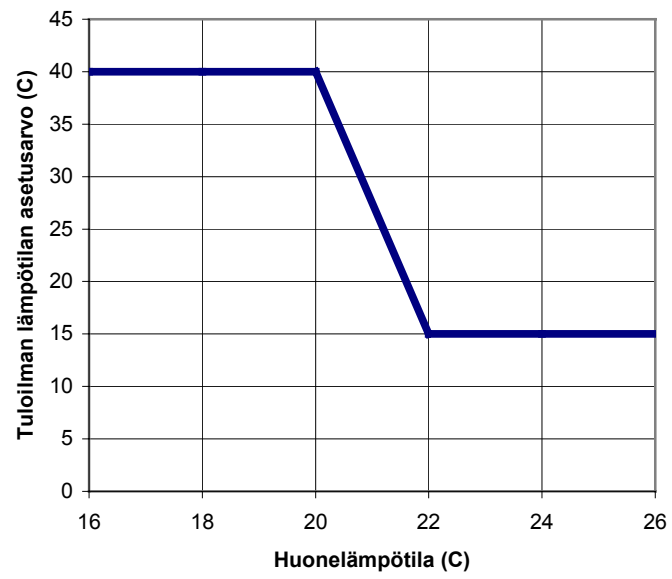
Kuormitukset tunnistetaan tarkkailemalla

- tilojen kosteutta
- tilojen CO₂-pitoisuutta
- kuormituksen kannalta keskeisten laitteiden kuten keittiön liedon ja saunan kiukaan virrankulutusta
- läsnäoloa.

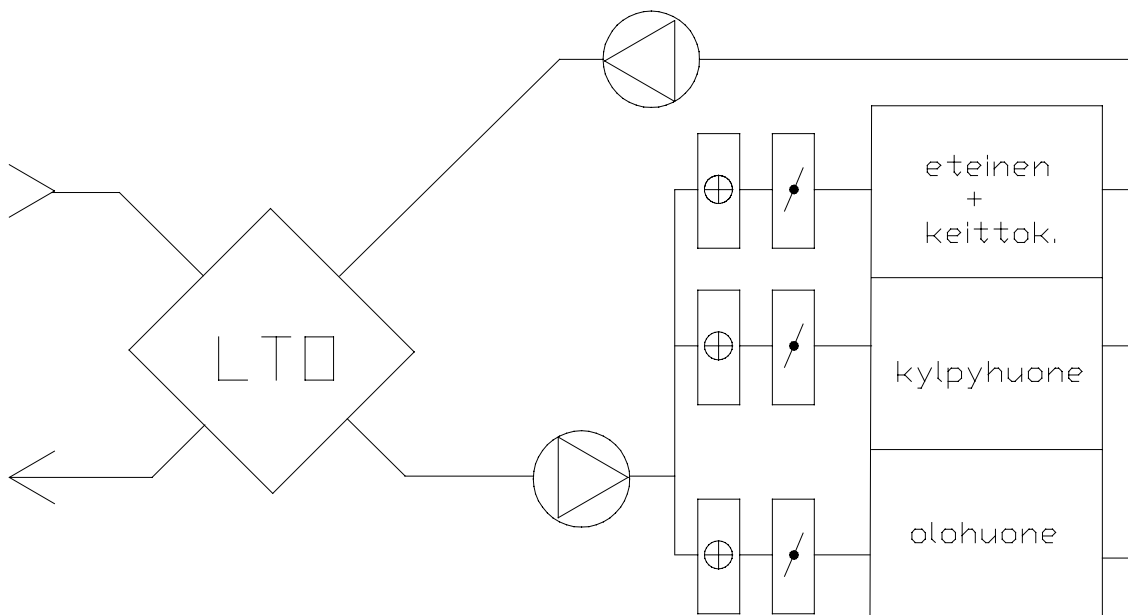
Jos mainituissa muuttujissa ei esiinny poikkeamia, menetelmä pitää yllä suunnitelmien mukaan ennaltamääritellyä perusilmanvaihtoa.

6.2.2 Testitapaus

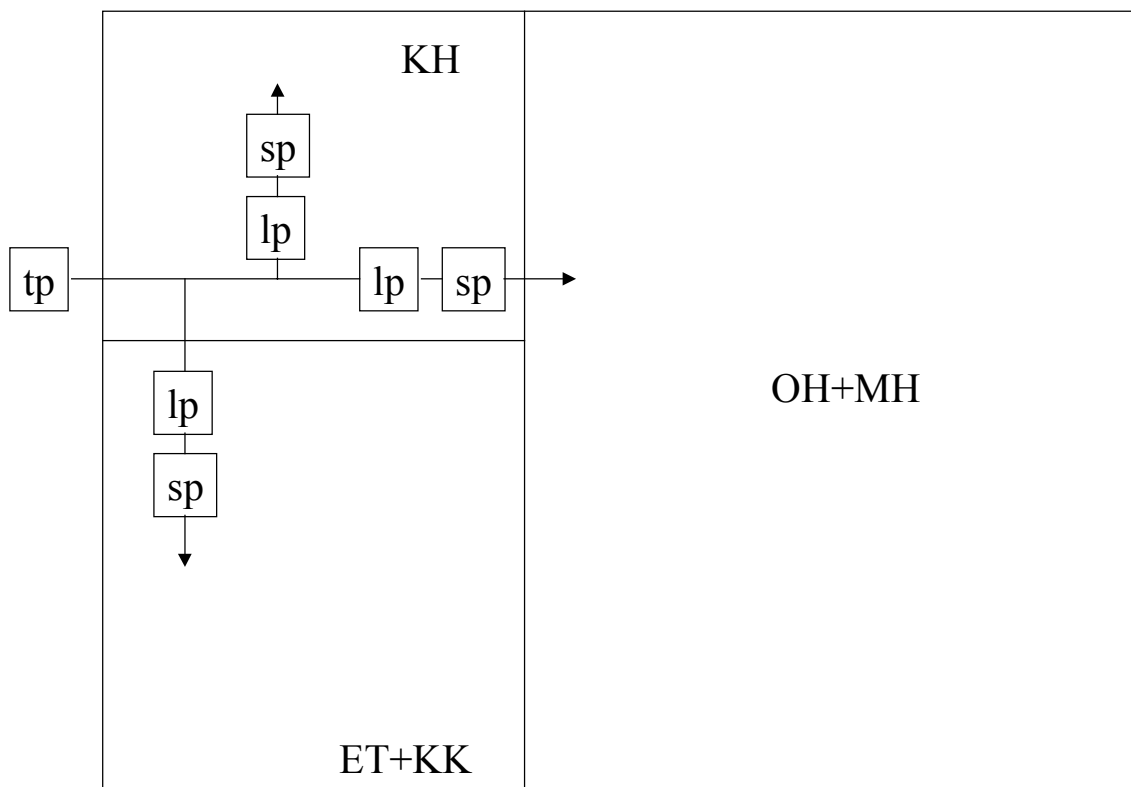
TRNSYS-simuloinnein tarkasteltiin liitteessä B kuvattua LVIS-2000-tyyppirakennuksen kerrostaloyksiota, joka käsittää olohuoneen, eteisen ja keittokomeron yhdistelmän sekä kylpyhuoneen (Lassila 1992). Lämmitys on toteutettu ilmalämmityksenä. Tuloilman lämpötilaa säädetään huonelämpötilan mukaan, antaen asetusarvo kuvan 104 säätökäyrän perusteella. Järjestelmän periaatekaavio on kuvan 105 mukainen. Yksiön pohjapiirros ja ilmanvaihtokanaviston likimääräinen kulku on esitetty kuvassa 106.



Kuva 104. Tuloilman lämpötilan säätökäyrä.



Kuva 105. Simuloitavan järjestelmän periaatekaavio.



Kuva 106. Yksiön pohjapiirros ja tuloilmakanaviston periaatteellinen kulku. KH = kylpyhuone, OH = olohuone, MH = makuuhuone, ET = eteinen, KK = keittokomero, tp = tuloilmapuhallin, sp = säätöpelti ja lp = tuloilman lämmityspatterit.

Yksiolle oletettiin seuraavanlainen käyttöprofiili:

- 1 henkilö paikalla klo 17–09
- aamiainen klo 7–8
- päivällinen klo 17–18
- kylpeminen/suihkussakäynti klo 8–9 ja 20–21
- huoneiden lämpökuormat LVIS-2000-tyyppiüksiön mukaiset (Lassila 1992), esitetty liitteessä B.

Puhaltimina käytettiin Ziehl-Ebm:n mallia KV100M ja säätöpelteinä Haltonin mallia PRA 80, jonka käyrästön mukaiset säätöasetnot vaihtelevat 1–6.

Vertailutapauksena tarkastelussa käytettiin tilannetta, jossa

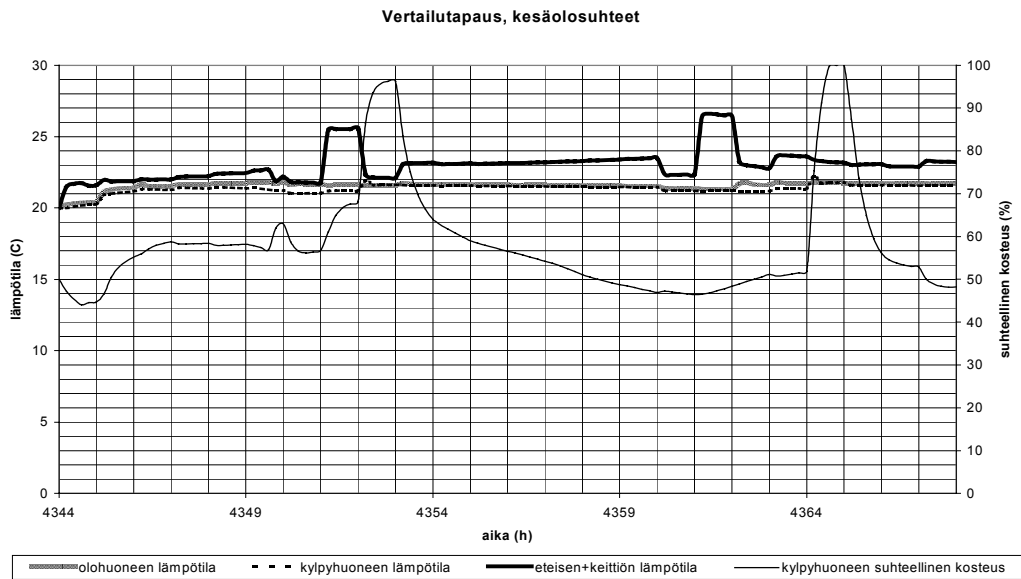
- puhallin toimii maksimi-ilmavirralla klo 6.00–9.00 ja klo 16.00–19.00 ja
- 50 % maksimi-ilmavirrasta muina aikoina
- eri huoneiden säätöpellit olivat koko ajan esisäätötilannetta vastaavissa asennoissa (eteinen–keittokomero: 4,5; kylpyhuone: 3,6; olohuone: 3,3)

6.2.3 Simulointituloksia

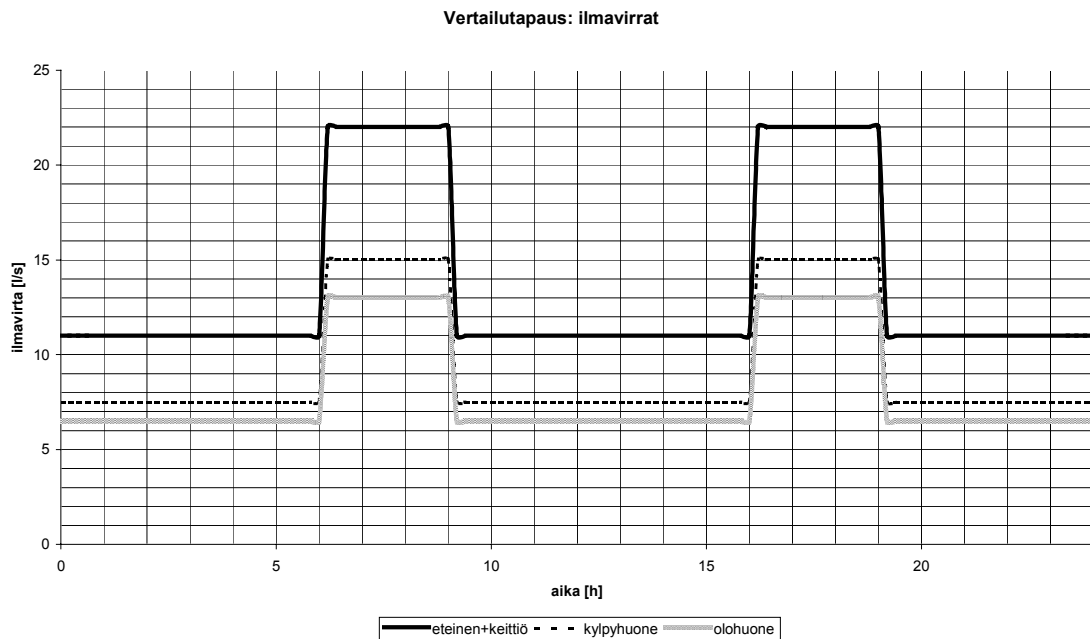
Testejä tehtiin lukuisille eri tapauksille talvi- ja kesäolosuhteissa. Kesäolosuhteissa, jolloin auringon lämpökuorma on suurimmillaan, ulkolämpötila korkeimmillaan ja ilman kosteus suurimmillaan, ilmanvaihtojärjestelmä joutuu suurten sisäisten kuormitusten vallitessa suurimmalle koetukselle. Tässä raportissa esitetään tilan säästämiseksi testituloksia ainoastaan kesäolosuhteissa. (Kuvat 107–108.)

Vertailutapauksessa, jonka tarkoituksena on edustaa mahdollisimman hyvin perinteistä ja usein käytettyä ilmanvaihtotapaa, ongelmana on kuormitusten ja ilmanvaihdon käyttöaikojen yhteensopivuus. Kuormituksia ei saada myöskään poistettua riittävän tehokkaasti kohteista, joissa ne syntyvät. Tästä syystä eri tilojen lämpötiloissa on suurehkoja vaihteluita. Kylpyhuoneen kosteuskuormassa on niinkään havaittavissa piikkejä käytön aikana. Erityisesti tämä näkyy aikana, jolloin ilmanvaihto on 50 %:n teholla. Merkillepantavaa on, että ilmavirrat tässä tutkimuksessa ovat varsin suuret, mikä merkitsee, että tarkastelu jää tältä osin varsin teoreettiseksi.

Kesäolosuhteissa saatiin vertailutapaukselle seuraavat lämpötila- ja kosteuskuvaajat sekä ilmavirrat:



Kuva 107. Huoneiden lämpötilat ja kylpyhuoneen suhteellinen kosteus vertailutapauksessa kesäolosuhteissa (heinäkuun ensimmäinen päivä).



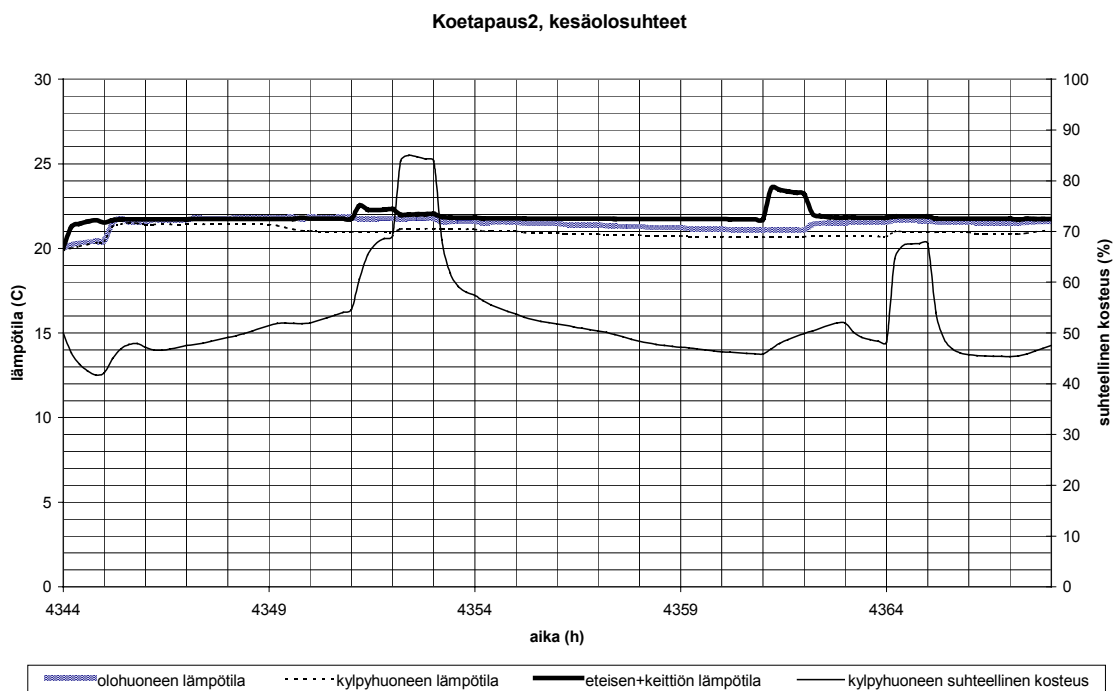
Kuva 108. Huoneiden ilmavirrat vertailutapauksessa.

Uutta menetelmää testattaessa ilmanvaihtoa ohjattiin säätöpeltien asentoja ja puhallinnopeutta tarpeen mukaan muuttamalla. Kuvissa 109–116 on esitelty menetelmän toimivuutta koetapauksissa. Peruslähtökohta testeihin oli seuraavanlainen:

- perusilmanvaihto: säätöpellit esisäätöasentoissa (vertailutapaus)
- puhaltimen paine-ero pidetään vakiona: 20 Pa (mitoitustilanne).

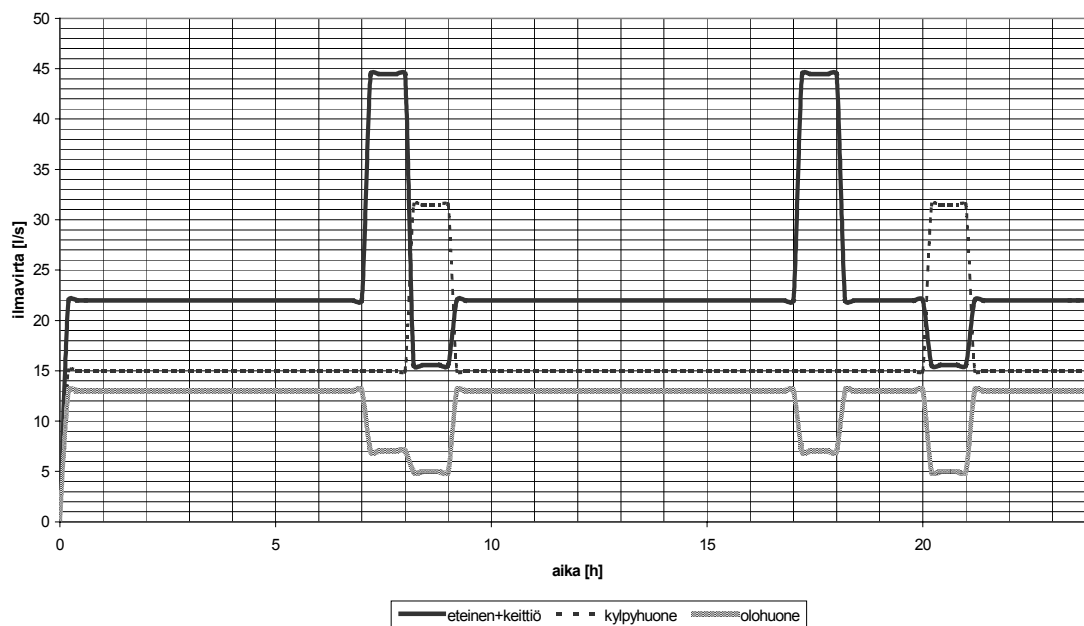
Seuraavassa kuvassa on esitetty huoneiden lämpötilat, kosteudet ja ilmavirrat seuraavassa tilanteessa (koetapaus 2):

- kun kylpyhuoneen kosteus lähtee kohoamaan tai keittiössä esiintyy poikkeava lämpökuorma, kuormituksen alaisessa kohteessa säätöpelti asetetaan asentoon 6 (maksimi)
- olohuoneen säätöpelti pienennetään kuormitustilanteessa asentoon 2 (asentoa 1 ei käytetty, jotta olohuone saisi tuloilmasta riittävän lämmitystehon).



Kuva 109. Huoneiden lämpötilat ja kylpyhuoneen suhteellinen kosteus uutta menetelmää käytettäessä, kesäolosuhteissa (heinäkuun ensimmäinen päivä).

Koetapaus 2: ilmavirrat



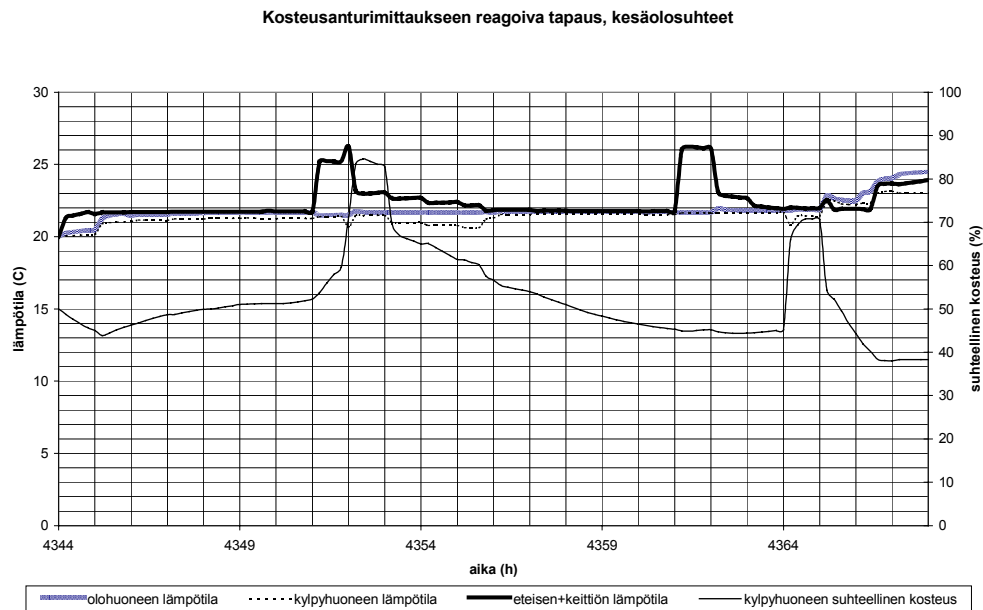
Kuva 110. Huoneiden ilmavirrat.

Kuvasta 100 nähdään, että kuormitukset ovat tasaantuneet merkittävästi. Merkillepantavaa on kuitenkin, että näin selkeän kuormitustasauksen aikaansaamiseksi ilmavirtaa on kuormitukselle alttiissa kohteessa lisättävä selvästi. Ilmanvaihdon lisäys aiheuttaa veto-ongelmia ja vaikeuttaa myös osaltaan lämpötilojen hallintaa tiloissa, joiden kustannuksella yhden tilan ilmavirranlisäys on tehty.

Kesäolosuhteissa, jolloin kosteuskuormitus nousee merkittävämpään rooliin kuin pakassäällä, testattiin myös kahta muuta ilmavirran ohjausvaihtoehtoa:

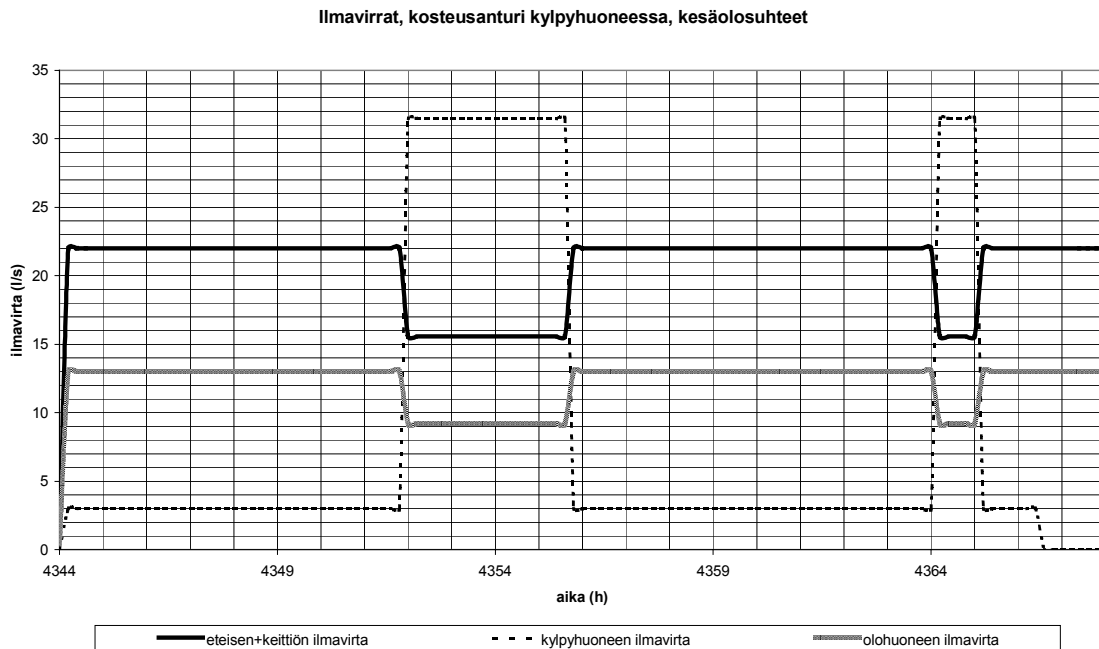
- ohjataan kylpyhuoneen pelti auki (muut pellit ennallaan), kun suhteellinen kosteus ylittää raja-arvon 60 %
- ohjataan eteinen-keittiön pelti auki, kun lämpötila ylittää raja-arvon 23 °C, kosteusohjaus kuten edellä.

Ensiksi mainitussa tapauksessa kosteus- ja lämpötilaolot käyttäytyivät seuraavasti:



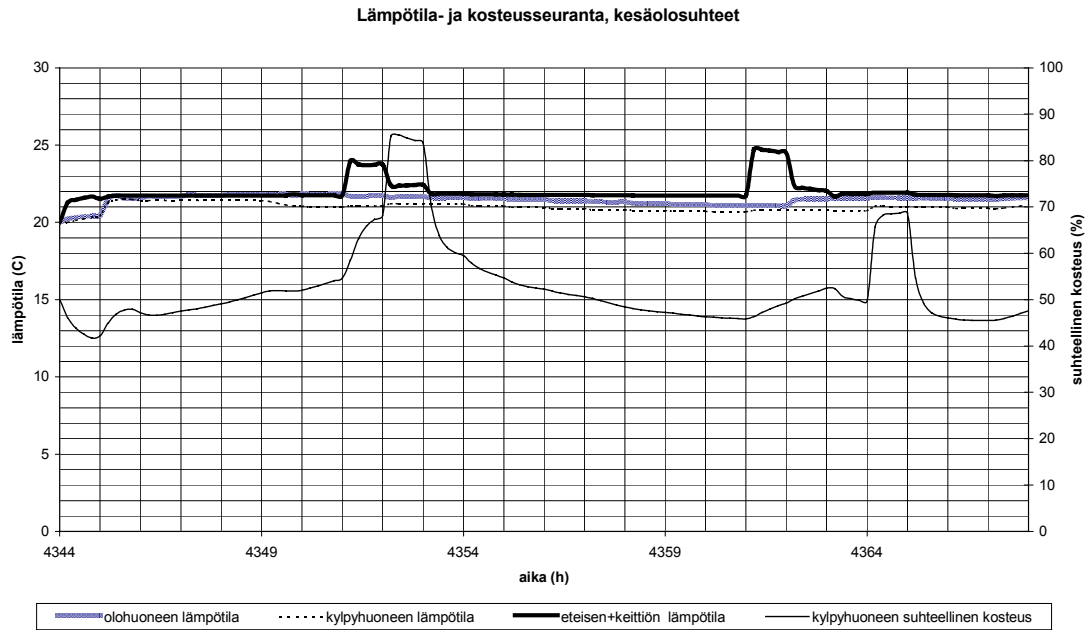
Kuva 111. Huoneiden lämpötilat ja kylpyhuoneen suhteellinen kosteus kesäolosuhteissa (heinäkuun ensimmäinen päivä), kun kylpyhuoneen säätöpeltejä ohjataan rajakosteuden mukaan.

Ilmavirrat eri huoneissa käyvät ilmi kuvasta 112.



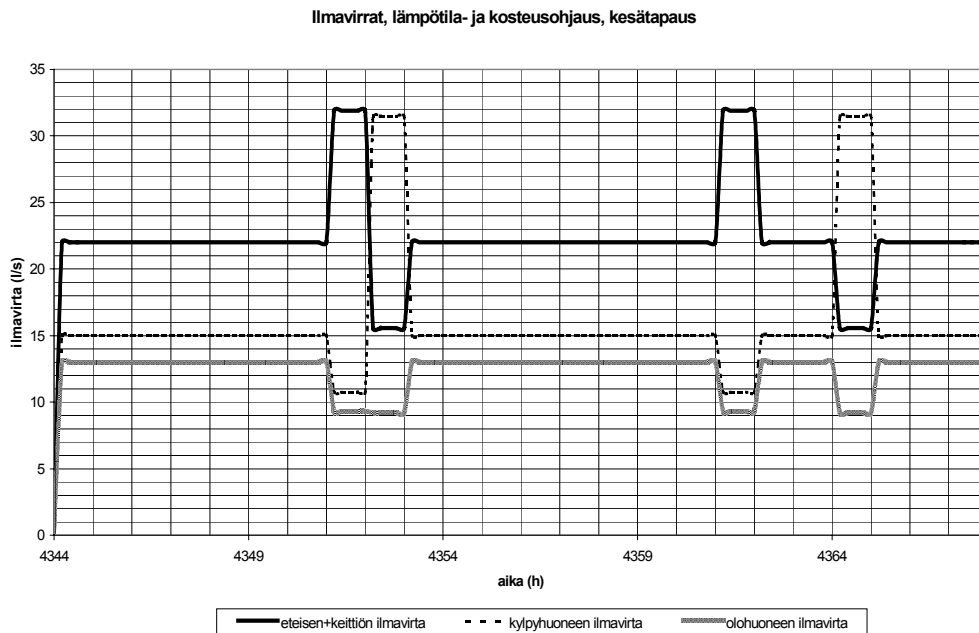
Kuva 112. Ilmavirrat kosteuden raja-arvosäädössä.

Lämpötila- ja kosteusohjatus tapauksessa tilanne on kuvan 113 mukainen:



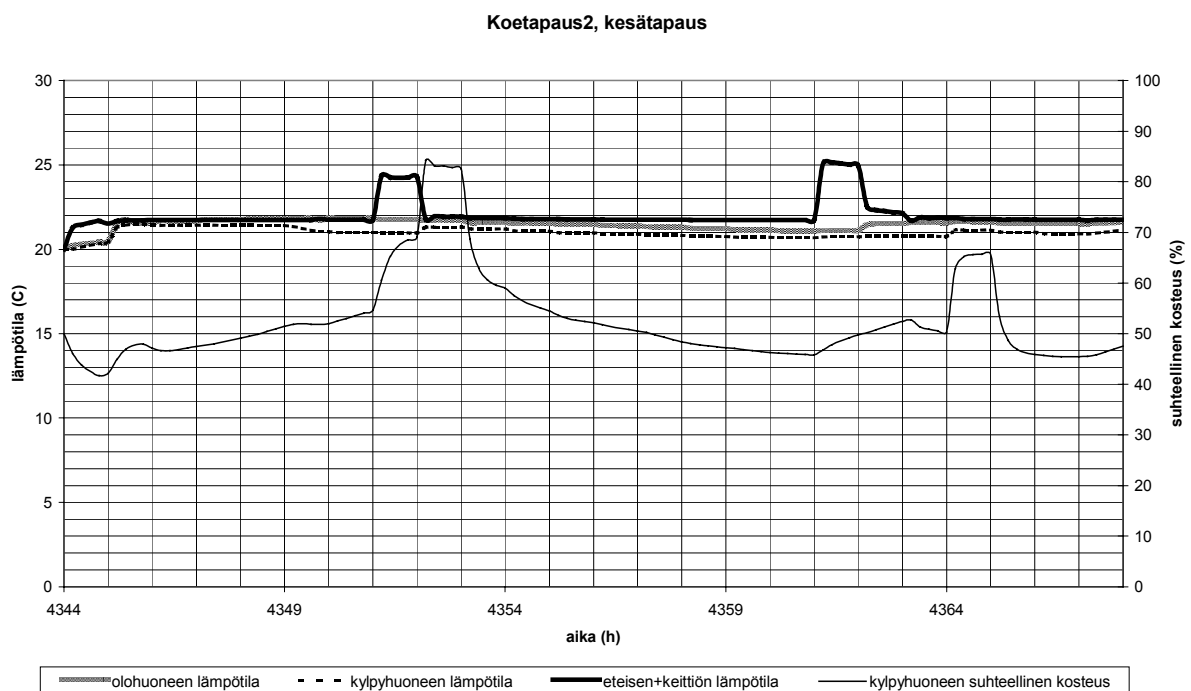
Kuva 113. Huoneiden lämpötilat ja kylpyhuoneen suhteellinen kosteus kesäolosuhteissa, kun eteisen-keittiö-lämpötilan raja-arvo-ohjaus ja läsnäoloon perustuva kosteusohjaus ovat toiminnassa.

Vastaavat ilmavirrat ovat kuten kuvassa 114.

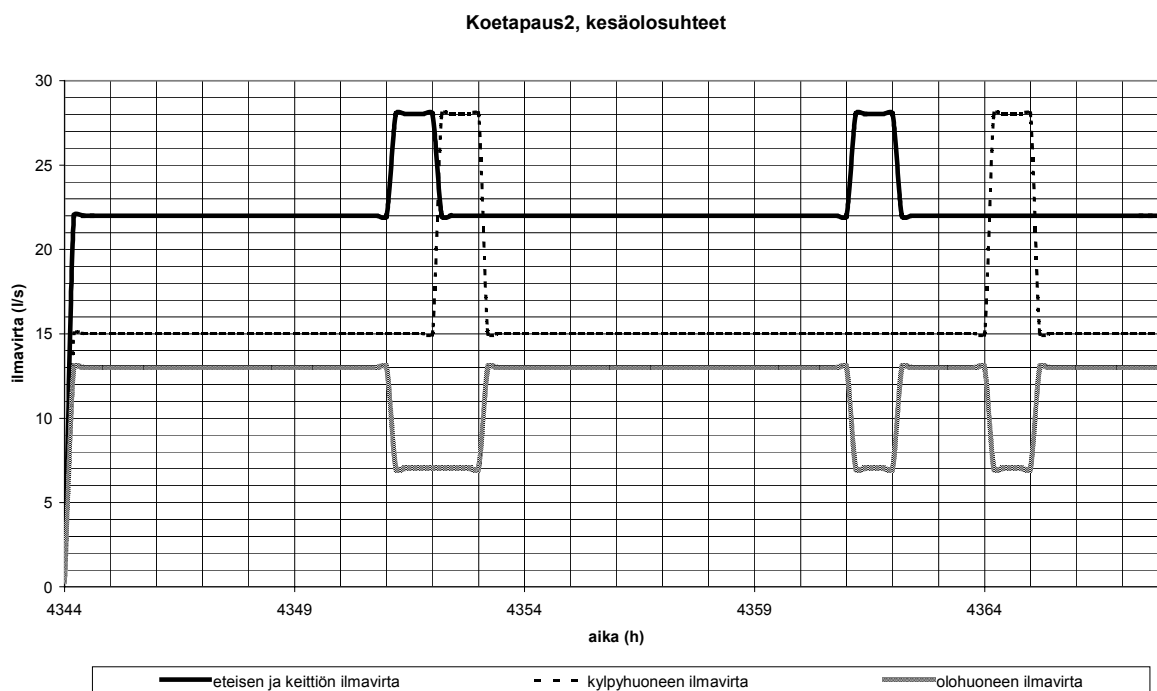


Kuva 114. Ilmavirrat, lämpötilan raja-arvo-ohjaus ja kosteuden läsnäolo-ohjaus.

Kaikkien tarkasteltavien tapausten yhteydessä kävi ilmeiseksi, että erityisesti lämpökuorman tasaaminen ilmanvaihtojärjestelmän avulla vaatii huomattavan suurta huonekohtaista ilmavirtaa tai vastaavasti hyvin kylmää sisäänpuhallusilmaa. Tämä merkitsee veto-ongelmia. Lisäksi tarkasteltavissa tapauksissa tehtiin havainto, että puhallin ei välttämättä edes pysty tuottamaan kaikkiin huoneisiin tarvittavaa ilmavirtaa, mikäli toisessa huoneessa pelti asetetaan auki-asentoon. Kuvassa 115 on koetapaus 2 (vrt. kuvat 100 ja 101) esitettyä, jos peltejä ei avata auki (asento 6), vaan tyydytään avaamaan ne kuormitustilanteissa asentoon 5.



Kuva 115. Huoneiden lämpötilat ja kylpyhuoneen suhteellinen kosteus koetapauksessa 2 kesäolosuhteissa (heinäkuun ensimmäinen päivä), kun pellit avataan kuormitustilanteissa vain osittain.



Kuva 116. Huoneiden ilmavirrat koetapauksessa 2 kesäolosuhteissa (heinäkuun ensimmäinen päivä), kun pellit avataan kuormitustilanteessa vain osittain.

Kuvista 115 ja 116 voidaan heti todeta, että

- Eteisen–keittiön lämpötila on välittömästi ylemmällä tasolla, jos pelti avataan vain osittain.
- Kosteuskuormitus pystytään poistamaan suhteellisen hyvin myös osittaisella avauksella.
- Puhallin kykenee tuomaan paremmin halutun ilmavirran myös niihin huoneisiin, joissa kuormituksia ei esiinny.

6.2.4 Yhteenveto ja jatkotutkimusideat

Luvussa tarkasteltiin edellytyksiä toteuttaa automaattinen ilmanvaihdon ohjausmenetelmä. Jos huonekohtaiset ilmavirrat ovat säädettävissä säätöpellein. Menetelmän avulla voidaan automaattisesti ohjata ilmanvaihtoa niihin kohteisiin, joissa sitä eniten tarvitaan. Tarvittaessa voidaan myös ilmanvaihtoa siirtää tiloista, joissa tarvetta ei ole, tiloihin, joissa tarve on suurimmillaan.

Menetelmän idea itsessään on yksinkertainen, mutta käytännön soveltamisen kannalta ongelmia aiheutuu lämpö-, kosteus-, epäpuhkaus- ja hajukuormituksen luotettavasta tunnistamisesta, jos käytössä on vähän mittauspisteitä kuten yleensä asuinrakennuksissa.

Toimintavarmuuden ja luotettavuuden kannalta on tärkeää, että tiedonkeruupisteitä on vähän ja tieto on saatavissa mahdollisimman yksinkertaisin menetelmin.

Ilmanvaihto, kuten muutkin rakennuksen toiminnot, on tehty ihmistä varten. Sopiva hiilidioksidipitoisuus tai kosteus ei välttämättä takaa käyttäjälle ihanteellisia olosuhteita, jos hän esimerkiksi sattuu pitämään kosteammasta ilmasta. Siksi käyttäjän tulisi voida vaikuttaa myös itse huoneiden ilmajärjestelmään.

Perinteisesti tunnistineliminä on ilmanvaihtolaitteistoissa käytetty

- lämpötila-antureita
- kosteusantureita
- CO₂-antureita
- läsnäoloantureita.

Muita menetelmiä läsnäolon tunnistamiseksi ovat

- vedenkulutuksen seuranta
- sähkönkulutuksen seuranta
- kulunvalvonta (esim. turvalukkojen seuranta).

Ilmanvaihtojärjestelmän optimaalinen toiminta merkitsee paitsi hyvää ilmanlaatua, myös mahdollisimman alhaisia energiakustannuksia. Tällöin

- kustannusten minimoimiseksi ilmajärjestelmän tulee voida pitää mahdollisimman pienenä
- vedon tunteen kannalta ilmajärjestelmän tulee voida pitää mahdollisimman pienenä
- ilmajärjestelmän on toisaalta asetettava siten, että ensisijaisesti taataan hyvä ilmanlaatu, toissijaisesti pidetään huolta kosteusolosuhteista ja kolmanneksi vaikutetaan lämpötilaan sen mukaisesti, mikä on kohtuullisesti ottaen mahdollista.

Kustannusten minimoiminen edellyttäisi tietoa läsnäolosta, jolloin säätöpellit voitaisiin ohjata joko kokonaan kiinni (asento 1) tai johonkin hyvin pieneen asentoon. Tässä luvussa läsnäolotiedon saatavuutta ei ole kuitenkaan pidetty kovin luotettavana, joten on tyydytty pitämään koko ajan yllä perusilmanvaihtoa (mitoitustilanne; joka tapauksessa lähtötilanteessa peltien oletetaan sijaitsevan mitoitusasennossa), johon tehostustarpeen esiintyessä on tehty tarvittavat muutokset. Tehostuksen kesto on ajateltu määrättävän kahdella tavalla: joko sähkövirran esiintyessä tai kosteuden (tai lämpötilan) raja-arvon ylityksen esiintyessä. Tällöin aikakytkintä ei tarvita lainkaan.

Edellä esitetyn pohjalta voidaan johtaa seuraava, käytännössäkin toteutuskelpoinen ajattelutapa.

1. Lähtökohtana on tiettyjen normien mukaan mitoitettu ilmanvaihto, joka vastaa tiettyjä huonekohtaisia virtaamia ja tiettyä puhallinnopeutta (<100 % maksimipyörimisnopeudesta). Käyttönoton yhteydessä älykkäälle järjestelmälle ilmaistaan, missä asennossa säätöpellit ovat mitoitustilanteessa sekä niiden maksimi- ja minimiasennot. Peltien asentotiedon on myös oltava jatkuvasti järjestelmän käytettävissä. Minimiasennon ja mitoitusasennon väli suhteutetaan 100 %:n asteikolle, samoin mitoitusasennon ja maksimiasennon väli, jolloin pelti voi olla *mitoitusasentoon nähden* tietyn prosenttimäärän "auki" tai "kiinni".
2. Käyttäjä ilmaisee on/off-kytkimen avulla (tai läsnäoloanturi ilmaisee läsnäolon), milloin hän haluaa ilmanvaihdon toimintaan. Off-tilassa voidaan joko sulkea pellit kokonaan tai ohjata ne asentoon, joka vastaa 10–20 % mitoitustilanteesta (80–90 % kiinni). On-asennossa pellit ohjataan mitoitustilannetta vastaaviin asentoihin. (0 % auki/kiinni)
3. Järjestelmän ensisijaisena tehtävänä on huolehtia ilmanlaadusta ja kosteusolosuhteista. Tätä varten järjestelmässä on kosteissa tiloissa kosteusanturi, joka antaa tiedon suhteellisesta kosteudesta. Kosteiden tilojen säätöpellin avaus voidaan toteuttaa esimerkiksi seuraavasti:
 - tilan kosteus ylittää raja-arvon 90 % => säätöpelti täysin auki (100 % auki)
 - tilan kosteus ylittää raja-arvon 60 % => säätöpelti puoliksi auki (50 % auki)
 - jos iv on-tilassa ja kosteus alle 60 % => säätöpelti mitoitustilassa (0 % auki)
 - jos iv off-tilassa => säätöpelti lähes kiinni (80–90 % kiinni)

Toinen tunnistettava kohde on liesi-uunin on/off-tila. On-tilassa liesikuvun säätöpelti avataan täysin auki (100 % auki). Muulloin se pidetään mitoitusasennossa tai off-tilassa lähes kiinni. Huomautus: Jos puhaltimen teho ei riitä pitämään painetta vakiona, ilmavirrat pienenevät tasapuolisesti jonkin verran muissa huoneissa tai huoneistoissa. Käyttäjälle on myös luonnollisesti syytä jättää mahdollisuus ohjata manuaalisesti liesikuvun säätöpeltiä.

7. Valaistuksen säätöön liittyvät ratkaisut

Luvussa 7.1 pohditaan kirjallisuuden perusteella keinovalaistuksen ja päivänvalon yhteissäätöön liittyviä tekijöitä. Luvussa 7.2 esitetään ratkaisu integroituun keinovalon ja sälekaihtimien säätöön, joka on toteutettu sumean logiikan säätimellä.

7.1 Keinovalaistuksen ja päivänvalon yhteissäädön peruskysymyksiä

7.1.1 Johdanto

Toimistohuone tutkimuskohteena

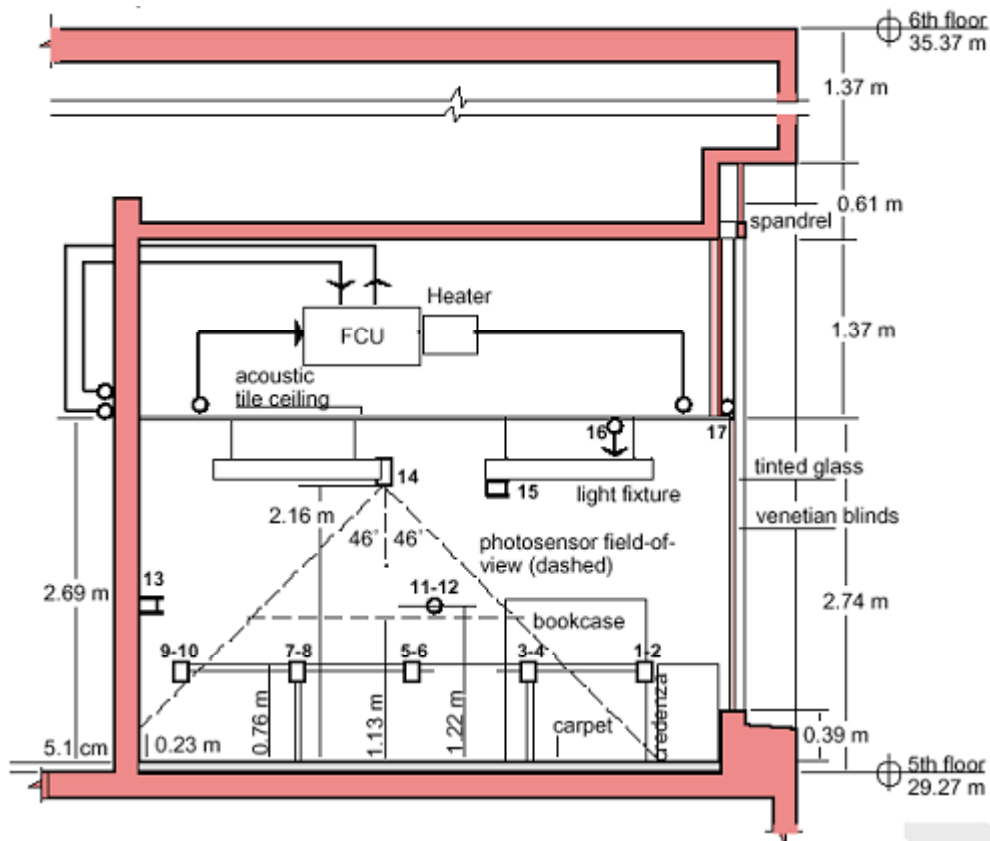
Valaistuksessa sähkövalo ja päivänvalo ovat yleensä toisiaan täydentäviä valonlähteitä. Tällöin yhtenä tutkimuslinjana on ollut tarkastella niiden vuorovaikutusta ja säätöä. Säädön merkitys voidaan kiteyttää kahteen pääasiaan: toisaalta mahdollisuuksiin säästää sähköenergiaa päivänvalon avulla ja toisaalta pyrkimykseen muokata päivänvalon laatua. Nämä näkökohdat myös realisoituvat kahdessa teknisessä ratkaisussa: keinovalon säätöjärjestelmässä sekä ikkunan kaihdin- ym. automatiikassa. Kumpikin vaikuttaa tilan valaistustulokseen ja energian kokonaistaseeseen. Ei siis ole mielekäästä tarkastella pelkästään päivänvalon säätöongelmaa, koska monet keskeiset ongelmat liittyvät säätöongelmien yhdistämiseen.

Suurin osa tutkimuksesta on keskittynyt toimistorakentamiseen, jossa tarkasteltavana on yleensä sivuikkunoitu huone (kuva 117). Säädön tavoitteet määräytyvät pitkälti työympäristön valaistusnormein perusteella. Varsinkin sälekaihtimen säätöä on tutkittu, joten se tarjoaa kiinnostavat lähtökohdan. Järjestelmien toteutus koetaan kuitenkin ongelmalliseksi. Säätöongelma näyttää vaikealta ratkaista samalla luotettavasti ja tuotteistettuna, mitä toimistorakentaminen kuitenkin edellyttäisi.

Säätö tilallisena ongelmana

Valonsäätöjärjestelmien keskeisenä ongelmana on sovittaa yhteen kaksi hyvin erityyppistä valonlähdettä. Sähkövalaistus suunnitellaan yleensä melko homogeeniseksi, ylhäältä suoraan tai epäsuorasti tulevaksi. Päivänvalo tulee suhteellisen rajoitetusta vaipan osasta, yleensä sivuikkunasta, mutta on ajoittain voimakkaasti suunnattua ja voimakkuudeltaan vaihtelevaa. Tilanne on pahin silloin kun aurinko paistaa ikkunaseinään, mutta myös taivaankannen luminanssit vaihtelevat laajasti ja voivat olla suuruudeltaan 10–20 kcd/m². Koska sivuikkunoista tuleva valo vaimenee nopeasti ikkunasta pois päin, valojakauma ja samalla keinovalon himmennystarve on erilainen eri osissa tilaa.

Kun päivänvaloa ohjataan kaihtimilla, vaikutetaan yleensä paitsi valaistusvoimakkuuteen myös valon suuntaominaisuuksiin. Sisätila voi myös muuttua kalustuksen tms. takia niin, etteivät heijastussuhteet ja tilageometria pysy samoina. Tilatekijät yhdessä päivänvalon dynaamisuuden kanssa muodostavat suurimman haasteen valaistuksen säädölle.



Kuva 117. Esimerkki valaistuskötilasta (Lee et al. 1999, s. 3), joka sisämitoiltaan vastaa suunnilleen tyypillistä sivuikkunoitua toimistohuonetta (poikkileikkaus). Huoneen syvyys, 4,57 m ikkunaseinästä vastakkaiseen seinään, on toimistohuoneeksi kohtuullinen. Huoneen leveys on 3,71 m.

7.1.2 Säädön tavoitteet

Tässä tarkastellaan säätöongelman sitä osaa, joka liittyy päivänvalon käyttämiseen säädön perusteena. Esimerkiksi IESNA Lighting Handbook liittää sen osaksi yleisempää valaistuksen ohjausta, jonka aihealueita ovat mm. manuaalinen kytkentä, ajastus, valoanturit sekä läsnäolo- ja liiketunnistimet. Säätöstrategian, teknisen toteutuksen, säätövyöhykkeiden, järjestelmätopologioiden yms. vaihdellessa syntyy monia järjestelmävaihtoehtoja.

Kun säätöongelma rajataan keinovalaistukseen ja ikkunakomponenttiin, yksinkertaisena perusideana on säätää sisätilan valaistusta päivänvalon perusteella. Tällaisen säädön tärkeimmät tavoitteet voidaan pelkistää energiansäästöön sekä näkötehokkuuteen ja -mukavuuteen.

Energiansäästö

Energiansäästöissä tarkastellaan erityisesti työympäristöjä, koska työajat osuvat tavallisesti päivän valoisaan jaksoon ja siksi päivänvaloa on tarjolla. Valaistusenergian osuus sähkön kokonaiskulutuksesta esimerkiksi toimistorakennuksissa voi olla merkittävä. Energiansäästöön perustuvan säädön perusajatuksena on säilyttää valaistusvoimakkuuden tavoitetaso (minimi tai muuten määritelty) ja vähentää vastaavasti sähkövalon määrää. Säästö voi koostua seuraavista osatekijöistä:

- valaistuksen sähkönkulutuksen pieneneminen
- säästön ajoittuminen sähkönkäytön huippukuormiin
- jäähdystarpeen pieneneminen edellyttäen, että muu energiatase hallitaan (osatekijöinä mm. tuotetun päivänvalon energiatehokkuus [lm/W] ja ikkunoiden vaikutus ulkovaippaan).

Potentiaalista energiansäästöä pienentää lamppujen hyötysuhteen laskeminen himmentäessä. Myös toimistorakennuksen syvärunkoiset tilaratkaisut pienentävät sitä. Valaistuksen säätöjärjestelmä on vain yksi lenkki siinä kokonaisuudessa, joka määrittelee säädöstä saatavan ekologisen tai (laskennallisen) taloudellisen hyödyn. Toisaalta myös järjestelmän säätötavoitteet, säätöstrategia ja tekninen toteutus vaikuttavat säästöön merkittävästi, eivätkä suurimmat säästöt välttämättä korreloi käyttäjien viihtyvyyden kanssa (Lee et al. 1998).

Näkötehokkuus ja -mukavuus

Toinen keskeinen säädön perustelu koskee visuaalista ympäristöä. Ilman suoraa auringonvaloakin taivaankannen tuottama valaistusvoimakkuus kohoaa helposti paljon suuremmaksi kuin sähkövalon tuottama. Yksittäisen työpisteen kannalta se ei välttämättä ole ongelmallista, mutta lisäksi on otettava huomioon seuraavat tekijät:

- Syvärunkoisen tilan reunavyöhykkeen valaistusvoimakkuus ja luminanssit voivat olla huomattavasti suuremmat kuin keskitilassa.
- Ikkunasta näkyvät luminanssit voivat olla hyvin suuria (yli 10 kcd/m²).
- Suora auringonvalo on lähes aina eliminoitava.

Erityisesti tältä kannalta kaihdinten säätöongelma tulee ilmeiseksi. Valaistuksen laadun yksiselitteisiä kriteerejä on vaikea määrittellä, etenkin tilakohtaisten olosuhteiden ja käyttäjien mieltymysten vaihdellessa. Säädön yhdeksi perusfilosofiaksi voi kuitenkin valita haittojen eliminoinnin ja sen kannalta mielekkäiden reuna- ja tavoitearvojen määrittelyyn.

Pelkän työtason valaistusvoimakkuuden tarkastelu ei riitä, vaikka nykyisissä järjestelmissä se onkin vallitseva kriteeri. Tähänastinen tutkimustraditio on pyrkinyt pitkälti haarukoimaan valaistusvoimakkuuden luotettavia raja-arvoja keinovalaistukselle, ja voi epäillä sopivatko nämä standardit sellaisenaan päivänvalolle, varsinkin jos toisessa vaakakupissa on ikkunan tarjoama näkymä ulos (Lee & Selkowitz 1998, s. 6). Esimerkiksi tutkimuksessa jossa valaistusvoimakkuus pyrittiin sälekaihdinautomaatiikan avulla pitämään 540–700 lx vakiotasolla, peräti 75 % koehenkilöistä kaipasi enemmän päivänvaloa (Lee et al. 1998).

Tilan aistittuun valaistukseen vaikuttavat myös pystypintojen luminanssit, jotka vaihtelevat eri päivänvalotilanteissa. Kaihtimet tms. ikkunan varusteet muokkaavat luminanssijakaumaa. Mm. tästä syystä tavoite pitää työtason valaistusvoimakkuus vakiona voi olla liian pelkistävä. Lisäksi se on osoittautunut vaikeaksi toteuttaa.

Muita näkökohtia

Esitetty kahtiajako energiansäästöön ja näkötehokkuuteen ei välttämättä kuvaa tyydyttävästi kaikkia tavoitteita, joita valaistuksen säädölle voidaan asettaa. Esimerkiksi Selkowitz (1998) on erottanut päivänvalon käytön (daylighting) tavoitteissa viisi tietyssä mielessä synteettistä näkökulmaa, jotka hieman muunnellen sopivat myös säätöongelmaan (taulukko 25).

Taulukko 25. Päivänvalon käytön näkökulmia.

Arkkitehtoninen määritelmä	Päivänvalon ja rakennuksen vuorovaikutus tuottaa visuaalisesti stimuloivan, terveellisen ja tuottavuutta edistävän sisäympäristön.
Valaistusenergian säästön määritelmä	Sähkövalaistustarpeen korvaaminen päivänvalolla, vähentää vuotuista valaistuksen energiankulutusta.
Rakennuksen energiakulutuksen määritelmä	Ikkunajärjestelmien ja valaistuksen säädön käyttö vähentää rakennuksen kokonaisenergiantarvetta (lämmitys, jäähdytys ja valaistus).
Kuormienhallintamääritelmä	Ikkunoinnin ja valaistuksen dynaamisen säädön avulla hallitaan rakennuksen sähkönkäytön huippukuormaa ja kuormituksen muotoa.
Kustannusmääritelmä	Päivänvalostrategioiden käyttö minimoi käyttökustannukset ja maksimoi tuoton, myynnin tai tuottavuuden.

On kuitenkin vielä syvällisempi kysymys, missä määrin nämä määritelmät kelpaavat strategioiksi, kun rakennussuunnittelussa pyritään yhdistämään erilaiset, osin yhteismittomat tavoitteet toisiinsa. Pitkälle viety tekninen tutkimus edellyttää kuitenkin ongelmien rajaamista käsiteltävään muotoon. Tässä mielessä toimistorakentamisesta lähtöisin oleva sivuikkunoidun huoneen säätöongelma on hyvin määritelty.

7.1.3 Toimistotilan päivänvalonsuunnittelun lähtökohdat

Päivänvalon suunnittelu

Kun päivänvaloa tuodaan rakennukseen, yleisiä tehokkuuden kriteereitä on saada aikaan miellyttäviä päivänvalotiloja ilman häikäisyä, mahdollisimman pitkä päivänvalon käyttöaika ja päivänvaloa mahdollisimman suureen osaan rakennuksen tiloista. Tämä tarkoittaa päivänvalon hyödyntämisen laajentamista sekä ajallisesti että tilassa. Seuraavat tilan visuaaliseen valoisuuteen perustuvat parametrit ovat silloin tärkeitä:

- valon määrä ja sen tasaisuus (päivänvalosuhte)
- pintojen kirkkaus ja kontrastit
- varjot (varjojen luonne ja sijainti)
- heijastukset (heijastusten luonne ja sijainti)
- häikäisy (voimakkuus ja sijainti)
- valon väri (lämmin, kylmä tai neutraali)
- värit (luonnolliset tai vääristyneet).

Hyvän sisävalaistuksen tuottamiseksi päivänvalon määrää tulee voida tarvittaessa rajoittaa. Tämä vaatii edistynyttä ikkuna- ja häikäisynrajoitustekniikka, jotta samalla hyvä päivänvalon hyödyntäminen säilyy. Tarvitaan edistyneitä säätö- ja ohjaustekniikoita ja älykkäitä ohjausstrategioita. Esimerkiksi neuvottelutiloissa on kuitenkin tarpeen audiovisuaalisia laitteita käytettäessä rajoittaa valon sisääntuloa. Tämä voidaan toteuttaa ikkunan pienimmällä läpäisykertoimen arvolla. Yleensä toimistoissa ja muissa tiloissa, joissa ihmiset työskentelevät tietyillä paikoilla, suunnittelukriteerit ovat tiukemmat kuin tiloissa, joissa ihmiset liikkuvat vapaasti.

Päivänvalosuhteeksi, DF (Daylight factor) kutsutaan sisällä olevan pisteen, johon valo tulee ulkoa joko suoraan tai epäsuorasti, ja ulkona vaakatasolla olevan pisteen, johon valo pääsee tasaisesti ilman esteitä, valaistusvoimakkuuksien suhdetta.

$$DF = (E_{in} / E_{out}) \times 100 \% \quad (11)$$

Missä	DF	on keskimääräinen päivänvalosuhte
	E_{in}	on sisätilan valaistusvoimakkuus
	E_{out}	on ulkona esteetön vaakatason valaistusvoimakkuus

Yksi suurimpia päivänvalosuunnittelun haasteita on saada hyvä päivänvalon taso myös kauemmaksi ulkoseinästä, koska päivänvalosuhte laskee sisällä nopeasti mittausetäisyyden ikkunoista kasvaessa. Siten luminanssierot pinnoilla lähellä ikkunaa ja kauempana ovat suuria. Valon tasaisuus on kuitenkin yksi tärkeimmistä sisävalaistuksen tavoitteista ja miellyttävyystekijöistä, koska ihmiset yleensä panevat keinovalot päälle huoneeseen, jonka valaistusvoimakkuuksissa on suuret erot. Rakennuksen ulko- ja sisäpuoliset muodot ja esteet yhdessä ratkaisevat, kuinka hyödyllistä ikkunoiden sisäänpäästämä valo on eli kuinka syvälle huoneeseen päivänvalo pääsee. Yleisesti 2 %:n päivänvalosuhte on suositeltu minimi Pohjois-Euroopan olosuhteissa, jos saatavilla on täydentävää keinovaloa. Hyvä päivänvalon käyttö vaatii kuitenkin hyvän päivänvalosuhteen lisäksi hyvää valaistussuunnittelua.

Sisävalaistuksen energiansäästö

Valaistus on huomattava energiankuluttaja ja merkittävä tekijä käyttökuluissa, erityisesti toimisto- ja liikerakennuksissa. Kansainvälisesti on arvioitu, että valaistus käsittää yli 30 % liikerakennusten vuosittaisesta sähkömenoista. Valaistukseen käytetyn sähkön osuus on toimistoissa noin 30–60 %, sairaaloissa 15–30 %, tehtaissa 10–25 % ja kouluissa 10–25 %. Nämä arvot kuitenkin vaihtelevat maantieteellisesti ilmaston ja päivänvalon saatavuuden mukaan (Slater & Davidson 1993, Anon 1994b). Valaistuksen kulluttama energian määrä riippuu lamppujen tehon kulutuksesta ja niiden vuotuisesta käyttöajasta. Käyttöaika taas riippuu läsnäolosta, päivänvalon saatavuudesta ja käytetystä ohjaussysteemistä. Sähkövaloa tiedetään usein käytettävän tarpeettomasti, sitä on liikaa tarpeisiin nähden, valo jätetään päälle vaikka päivänvalo tarjoaa riittävästi valoa tilaan, valo jää päälle huoneesta poistuttaessa ja jopa työpäivän päättyessä. Tämä johtaa erittäin huonoon energiatehokkuuteen

Päivisin käytetyissä rakennuksissa voidaan saada huomattavia energiasäästöjä pienillä sijoituksilla hyödyntämällä päivänvaloa tiloissa ja käyttämällä päivänvalon ja keinovalon yhdistelmää ohjattuna tehokkaalla päivänvaloon kytketyllä automaattisella ohjausjärjestelmällä. Lisäksi epäsuoria säästöjä saavutetaan pienentyneen jäähdytystarpeen takia, jolloin ilmastointi ei välttämättä ole enää tarpeellinen. Sähkökulutuksen pienentäminen on taloudellista erityisesti päivällä, jolloin energian tuotantohinta kilowattituntia kohden on suhteessa suuri. Merkittävät muutokset päivänvalon hyödyntämiseksi jo olemassa oleviin rakennuksiin ovat vaikeita ja kalliita, joskin kustannustehokkaita. Ra-

kennuksen valaistus tulee miettiä suunnittelun aikaisessa vaiheessa, jolloin päätetään rakennuksen ja ikkunoiden muoto ja muut päivänvaloon vaikuttavat tekijät, myös lämpötehokkuus. Valaistuksen suunnittelulla voi olla merkitystä myös silloin, kun tehdään suuria rakenteellisia muutoksia ja uudistuksia. Päivänvalon hyödyntäminen tulisi nähdä kiinteänä osana yleistä energian optimointisuunnitelmaa, joka sisältää myös lämmityksen ja jäähdytyksen.

Päivänvalon määrä ulkona on yli 10 000 lx jopa talvella useimmissa Euroopan maissa ja ylittää reilusti valaistustason, jota tarvitaan sisällä työskentelyyn. Tämä osoittaa selkeästi päivänvalotekniikoiden tarjoaman potentiaalin. Vain muutama prosentti päivänvalosta tarvitsee johtaa sisälle tyydyttämään valaistustarve, joka yleisvalaistuksen osalta jopa alle 200 lx ja erilaisissa työtehtävissä, kuten toimistotyössä luokkaa 300–750 lx. Toisin sanoen 70–90 % toimistojen valontarpeesta työaikoina voitaisiin tuottaa päivänvalolla merkittävässä osassa Eurooppaa, koska työajat ovat yleensä samat kuin paras aurinkoinen aika (Fontoynt 1995). Esimerkiksi Helsingin korkeudella 3 600 lx:n ulkovaistutusvoimakkuus saavutetaan 80 % vuotuisesta työajasta ja 9 200 lx:n taso 60 % työajasta.

7.1.4 Sähkövalaistuksen säätö

Säädöllä saatavat hyödyt

Täydentävän keinovalon käyttö on Suomen olosuhteissa tarpeen tuomaan ympäri vuoden riittävästi ja hyvälaatuista valoa kaikkialle työtiloihin.

Noin 30 % toimistoissa valaistukseen käytetystä energiasta voi olla turhaa, sillä tarkoituksenmukainen valaistuksen ohjausjärjestelmä voi säästää energian kulutusta 30–50 % ja järjestelmän takaisinmaksu aika on usein vain muutama vuosi (Slater & Davidson 1993). Tehokas ja hyvin hallittu valaistuksen ohjaus vähentäisi energiakuluja ja hiili-diidipäästöjä tehokkaasti. Hyvä ohjausjärjestelmä on tärkeä energian säästön lisäksi ihmisten viihtyvyyden lisääjänä. Parannettu mukavuus taas voidaan kytkeä parempaan terveyteen ja tuottavuuteen. Valaistuksen ohjaus saa kuitenkin harvoin vaatimaansa huomiota rakennuksia suunniteltaessa tai niitä muutettaessa.

Eri tilojen paras ohjausstrategia riippuu päivänvalon saatavuudesta ja tilojen käyttövasta ja läsnäoloista. Energian säästöä voidaan helposti lisätä: käyttämällä tehokkaampia lamppeja ja valaisimia, käyttämällä valaistusta vain tarpeen mukaan ja parantamalla rakennuksen omistajan ja käyttäjien tietoisuutta energian säästöstä. Merkittäviä energiansäästöjä paljon käytetyissä tiloissa voidaan saavuttaa käyttämällä automaattista valaistuksen ohjausta eli vakiovalo- ja läsnäoloantureita.

Säätöongelma

Sähkövalaistuksen säädön tavallisin säätökohde on tilan yleisvalaistus. Säädön lisääminen siihen edellyttää melko vähän lisäkomponentteja. Valaistuksen säätöjärjestelmissä ei yleensä rajoiteta valaisinten tai valaisutapojen valintaa. Tärkeitä valaisinten ominaisuuksia ovat valon säätöalue ja spektri. Järjestelmän fyysisiä osia ovat himmennuksen mahdollistava liitäntälaitte, valoanturi ja ohjauselektronikka; nämä voivat olla myös yhteen integroituja.

Valaistuksen säätöä voi tarkastella klassisen säädön näkökulmasta. Tällöin ovat tärkeitä kysymyksiä mittaussuure, säätöpiirin rakenne ja säätöalgoritmi. Käytössä yleisesti olevat säätöratkaisut perustuvat näiden yhdistelmiin, joten ne voidaan tyypitellä.

Mittaussuure

Mittaussuurena voi olla valaistusvoimakkuus tai luminanssi. Koska anturin sijoitus tilaan on yleensä ongelmallinen, anturi mittaa usein ylhäältä päin työtason luminanssia. Se riippuu valaistusvoimakkuuden lisäksi pinnan heijastussuhteesta mutta myös luminanssijakaumasta ja valon spektristä. Tämä anturiproblematiikka on yhteinen kaihdinten säädön kanssa, joten sitä tarkastellaan erikseen.

Säätöpiiri

Säätöpiirit voidaan jakaa avoimiin ja takaisinkytkettyihin. Avoin piiri mittaa tällöin pelkästään vallitsevaa päivänvaloa, joten sähkövalaistus ei vaikuta mittaussignaaliin. Avoimella piirillä ei siis mitata työtason valaistusvoimakkuutta, joten anturi on joko sijoitettava ulos tai suunnattava niin, että sähkövalo ei käytännössä vaikuta siihen. Suljetussa piirissä vallitsee takaisinkytkentä, koska anturi mittaa yhdistettyä valaistusta.

Käytännössä useat avoimen silmukan säätöjärjestelmätkin sisältävät ainakin jonkin verran takaisinkytkentää. Choin ja Mistrickin (1999) järjestelmävertailussa avoin piiri toteutettiin niin, että anturin maksimiherkkyys oli suunnattu kohti ikkunaa, kun taas suljetussa piirissä se oli suunnattu kohti vastapäistä sisäseinää.

Säätäjän tyyppi

Kolmas säädön kannalta olennainen seikka on säätäjän tyyppi, joka viittaa klassisen säätötekniikan PID-säätäjään ja määrää miten ohjaussignaali riippuu mittaussignaalista ja aikavakioista. Säätäjän asetukset vaikuttavat samalla siihen, miten hyvin ratkaisu toimii todellisissa olosuhteissa. Käytetyt ratkaisut perustuvat yleensä proportionaaliseen

tai integroivaan säätöön – mikäli kyseessä ei ole on/off-tyyppinen kytkentä (esimerkiksi reunavyöhykkeen valaisinten ohjaus).

Vakiovalosäätöinen päivänvalo-ohjaus

Vakiovaloanturin mittaaman päivänvalon määrään perustuva valaistuksen ohjaus voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla, joko yksinkertaisesti on/off-kytkimellä tai himmentimillä. Valoanturi voi olla sijoitettu joko suoraan ulos tai suunnattu ikkunasta ulos, jolloin se mittaa suoraan ulkona olevan valon määrän eikä anna minkäänlaista tietoa huoneen todellisesta valaistustasosta, tai se voi olla sijoitettu sisälle siten, että se mittaa päivänvalon ja keinovalon yhdessä tuottaman valon määrän ja keinovalon määrää säädetään sen tiedon perusteella täydentämään päivänvaloa. Ilman sisäänrakennettua aika-viivettä nopeasti vaihtuvissa valaistusolosuhteissa, kuten Suomessa, on/off-ohjaus voi johtaa toistuviin ja nopeisiin valojen kytkemiseen. Myös muulloin muutokset valaistustasoissa ovat usein nopeita ja huomattavia aiheuttaen ärtymystä. Huomattavasti mukavampaan ja taloudellisempaan tulokseen päästään käyttämällä himmentimillä varustettuja ohjaimia vaikka ne ovat kalliimpia kuin on/off-kytkimet. Ulkoisia päivänvalon muutoksia voidaan käyttää himmentimien ohjaamiseen mutta tällöin kaihtimien ollessa suljettuina tällainen valaistuksen ohjaus on sopimatonta. Eräs tapa on mitata kattoon sijoitetuilla antureilla työtason valaistustaso ja tämän tiedon mukaan ohjatuilla valaisimilla tuoda tarvittava lisävalo halutun valotason saavuttamiseksi. Ihmiset haluavat yleensä lisää valoa sisälle sitä mukaa, kun ulkona oleva valaistustaso kasvaa, mikä sisällä ei ole yllätys kun ajatellaan, kuinka silmä reagoi kontrastiin. Ongelmia on todettu myös himmennyksessä, automaattinen päälle kytkeminen ja automaattinen himmennys etukäteen määrätyille tasoille voi aiheuttaa tyytymättömyyttä, koska ihmiset pitävät usein muutosta epämiellyttävänä.

Monimutkaisen tai kehittyneen päivänvalojärjestelmän kannalta integroitu automaattinen ohjausjärjestelmä, joka synkronoi rakennuksen kaikkien ilmasto-ohjausjärjestelmien säädön, myös lämpötilan ja ilmanvaihdon, voi olla olennainen. Kuitenkaan tämänkaltaiset rakennukset eivät välttämättä ole kaikkein onnistuneimpia. Monimutkaiset energian säästötekniikat voivat tuoda mukanaan useita erilaisia tahattomia seurauksia, kuten esimerkiksi aivan liian paljon ylimääräistä työtä rakennuksen ylläpidossa. Monimutkaisten järjestelmien käyttö voi jopa kuluttaa enemmän energiaa kuin yksinkertaisempien energian säästömenetelmien käyttö (Anon 1993, Bordass et al. 1994).

Rakennukset, joissa on loistava ohjausjärjestelmä, eivät automaattisesti ole mukavia. Monet puutteet johtuvat heikosta taidosta käyttää järjestelmää ja riittämättömistä oikeuksista yksilöille valinnoille. Automaattiset valaistuksenohjausjärjestelmät tapavat olla yleisiä toimistoissa, joissa on myös ilmastointi ja joissa yllättäen myös valot ovat todennäköisesti päällä, vaikka päivänvaloa olisi riittävästi. Syynä voi olla suunnit-

telu, joka mieluummin sulkee ulkopuoliset olosuhteet pois kuin hyväksyy ne. Automaattisten järjestelmien toiminta on liian havaittavaa ja voi ärsyttää sisällä olijoita. Havainto siitä, että on kontrolloidussa ympäristössä ilman mahdollisuuksia vaikuttaa itse yksilöllisesti säätöihin, voi helposti vaikuttaa käyttäjän asenteisiin valaistusta kohtaan ja aiheuttaa vastustusta ja lisääntyneitä valituksia. Hyvän automaattisen ohjausjärjestelmän pitäisi pitää ihmiset tyytyväisinä suurimman osan ajasta, jolloin heillä ei ole tarvetta muuttaa olosuhteita paljoa ja siten heikentää alkuperäistä strategiaa. Käyttäjien tulisi tietää, miten ohjausjärjestelmä toimii, ja kuinka vaikuttaa siihen ja tarvittaessa pystyä helposti ja nopeasti ohittamaan manuaalisesti järjestelmä oman työpisteen välittömässä läheisyydessä ilman, että se häiritsisi muita työntekijöitä. Tämä on mahdollista, jos järjestelmä on jaettu muuttaman valaisimen muodostamiin alueisiin, joita voi ohjata paikallisesti käsin.

7.1.5 Sähköinen valonohjausjärjestelmä

Jotta voidaan saavuttaa mahdollisimman suuri valaistuksen energian säästö rakennuksessa ja silti taata, että joka työpisteessä on riittävästi valoa, automaattinen ohjausjärjestelmä on pakollinen. Koska sekä sähkövalon että päivänvalon käyttö vaihtelee sekä huoneittain että ajan mukaan, jokaisessa työpisteessä pitäisi olla yksilöllinen valaistuksen ohjaus. Päivänvalopohjainen ohjausjärjestelmä koostuu yleensä seuraavista elementeistä:

- valoanturi, joka mittaa valaistustasoa tietyllä alueella (joko ainoastaan päivänvaloa tai alueen kokonaisvalotasoa, joka koostuu päivänvalosta ja keinovalosta)
- elektroninen ohjausyksikkö, joka sisältää mahdollisuuden kalibrointiin, minimi- ja maksimitasojen säädön ja säätöviiveet jne. ja
- yksikkö lamppujen kytkentään tai himmennykseen

Päivänvalo-ohjausjärjestelmissä on kaksi perustapaa:

- valaistuksen tason säätö eli ns. himmennys
- valaistuksen päälle ja pois -ohjaus eli on/off-säätö

Valonsäätimet ohjaavat valojen tasoa laajalla alueella tarjoten näin halutun valotason. Kytkimet vain kytkevät valot päälle tai pois tietyn viiveen jälkeen, kun kynnyсарvo on ohitettu. Nykyaikainen loistelamppujen himmennys vaatii elektroniset himmennettävät liitäntälaitteet. Tämä tekee ne kytkimiä kalliimmiksi, mutta niillä saavutetaan suurimmat säästöt eikä niillä ole epämiellyttäviä muutoksia valotasoissa. Himmentimet soveltuvat parhaiten toimistoihin, kouluihin ja mille tahansa alueelle, jossa tehdään töitä pöydän ääressä. Kytkimiä voidaan käyttää alueilla, joilla on paljon päivänvaloa ja joilla ei tehdä kriittisiä visuaalisia työtehtäviä.

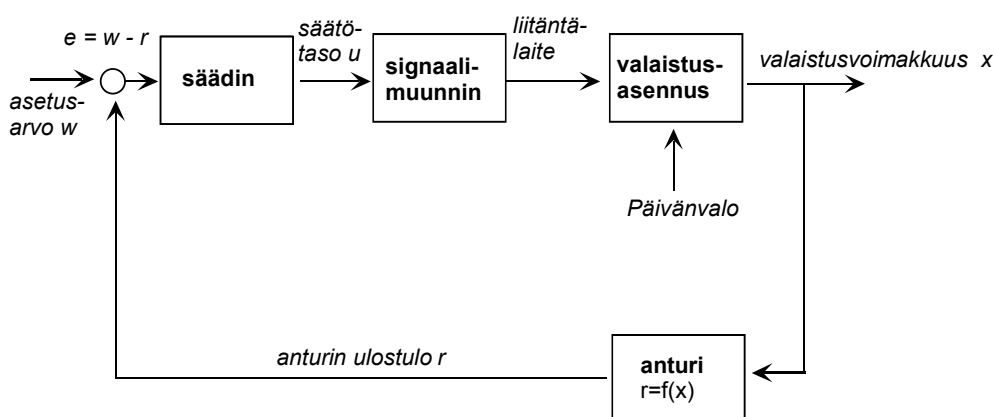
Valaistuksen himmennysjärjestelmä, joka on suunniteltu seuraamaan päivänvalon muutoksia, koostuu kolmesta perusosasta:

1. valoanturi, joka kehittää sähköisen signaalin, joka on suhteessa pintaan tulevaan valoon
2. säädin, joka sisältää algoritmin miten muuttaa valoanturin signaali himmentimiä ohjaavaksi signaaliksi ja
3. himmennin, joka tasaisesti muuttaa valaisimen tuottaman valon määrää säätämällä valaisimeen menevää tehon määrää.

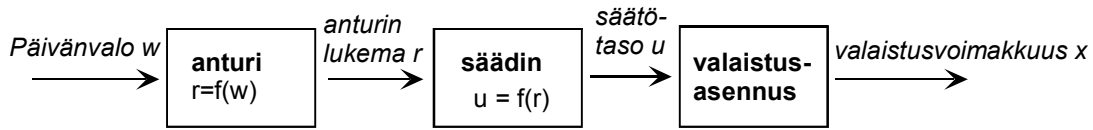
Vaikka himmennin tosiasiallisesti säätää valon määrää, on sen vaikutus ohjausjärjestelmän tavoitteisiin merkityksetön verrattuna valoanturiin ja säätimeen. Siksi keskitymmekin valoanturin ja säätimen ominaisuuksiin.

Jatkuvan säädön perusratkaisut

Sisätilan suurempi päivänvalon määrä johtaa sähkön säästöihin vain, jos keinovalo kytetään pois tai himmennetään sen mukaan, kuinka paljon päivänvaloa tulee huoneeseen. Jotta keinovaloa voidaan ohjata siten, että se reagoi päivänvalon vaihteluihin, täytyy järjestelmässä olla valoanturi, ohjauslogiikka ja säätökomponentteja. Valonsäätöön on olemassa kaksi erilaista perusperiaatetta: takaisinkytketty säätö (suljettu silmukka, kuva 118) ja myötäkytkentäinen ohjaus (avoin piiri, kuva 119) (Rubinstein et al. 1988). Molemmilla ohjausstrategioilla on ongelmia valoanturin sijoittamisessa parhaan tuloksen saavuttamiseksi. Takaisinkytketyssä ohjauksessa valoanturiin ei saa tulla ikkunasta suoraa päivänvaloa eikä myötäkytketyssä saa valoanturiin tulla tilasta keinovaloa. Jälkimmäisessä tapauksessa anturin ihannepaikka olisi ulkona, mutta tällöin kaihtimet tekevät ratkaisusta hyvin ongelmallisen.



Kuva 118. Takaisinkytketty (suljetun silmukan) vakiovalosäätö.



Kuva 119. Myötäkytketty (avoimen silmukan) vakiovalosäätö.

Koska säätöön vaikuttavat monet tekijät ja reunaehdot, tietyt silmukka- ja säädintyyppien yhdistelmät ovat vakiintuneet tarjolla oleviin toimistojen järjestelmiin:

1. suljetun piirin integroiva vakiovalonsäätö
2. avoimen piirin proportionaalinen säätö ja
3. suljetun piirin proportionaalinen säätö.

Ilmeisesti jaottelu on peräisin Rubinsteinin et al. (1989) tutkimuksesta ”Photoelectric control of daylighting systems” (Electric Power Research Institute, Final Report), johon tässä käytetyt sekundaarilähteet viittaavat (Lee et al. 1999, Bierman 2001, Choi & Mistrick 1999).

Jos anturin asetukset ovat riittävät, sama anturi sopii useamman säätötavan toteuttamiseen (kuva 120). Anturin spektriominaisuudet, suuntaavuus ja ohjauselektroniikka vaikuttavat merkittävästi säädön kokonaisratkaisuun.

Integroiva (suljetun piirin) vakiovalonsäätö

Integroiva vakiovalonsäätö on tarkoitettu takaisinkytkettyyn järjestelmään. Siinä valaistusvoimakkuus pyritään pitämään asetusarvossa integroimalla todellisen ja asetusarvon erosignaalia. Rajat, joiden ulkopuolella valaistusvoimakkuus on joko asetusarvoa suurempi tai pienempi, riippuvat valaisinten säätöalueesta ja päivänvalon voimakkuudesta.

Integroivan säädön ongelmana on anturin saama valaistustieto, johon työtason valaistusvoimakkuuden lisäksi vaikuttaa huoneen muihin pintoihin kohdistuva valo. Säädöstä huolimatta työtason valaistusvoimakkuus ei aina säily vakiona, koska lopputulokseen vaikuttavat mm. anturin suuntaominaisuudet.

Proportionaalinen avoimen piirin säätö

Mikäli järjestelmä ei sisällä takaisinkytkentää, anturi voidaan sijoittaa ulkotilaan. Tällöin säädin voi ohjata valaisimia proportionaalisesti suoraan päivänvalon määrän perusteella. Päivänvalon valaistusvoimakkuuden kasvaessa saavutetaan kyllästystaso, jota enempää valaistusta ei himmennetä. Himmentäminen alkaa kuitenkin heti, ts. säätöpiirin asetusarvona on vain himmennyksen jyrkkyys suhteessa valoanturin tuloon.

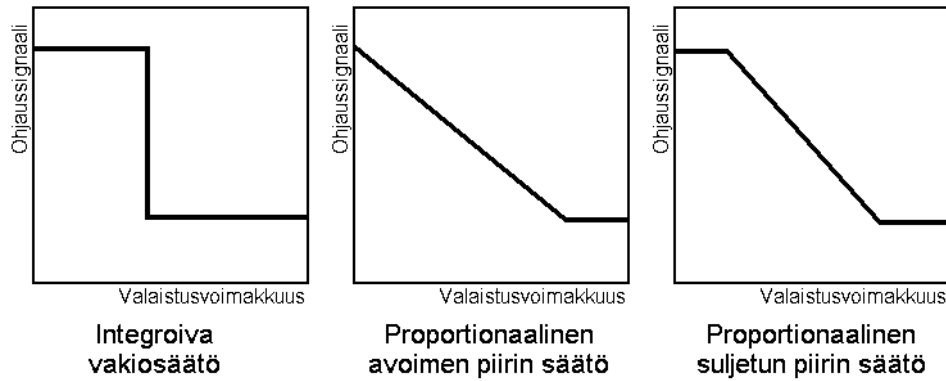
Säädössä voidaan pyrkiä valaistustason säilyttämiseen vakiona tai valita jokin muu riippuvuus asetusten rajoissa. Suurimpana ongelmana on, se etteivät säätöolosuhteet pysy vakiona. Anturin tehtävänä on tarkkailla päivänvalon määrää. Ulos sijoitettuna anturi ei reagoi esimerkiksi sälekaihtimiin, ja sisätilassa sälekaihdinten luminanssi ei välttämättä korreloi työtason valaistusvoimakkuuden kanssa.

Proportionaalinen suljetun piirin säätö

Suljetun piirin sovelluksessa säätimen ominaiskäyrään on lisätty kynnsarvo, jota pienemmällä valaistusvoimakkuudella valaistus pysyy vakiona. Näin pelkän sähkövalon aiheuttama valaistusvoimakkuus ei vielä aiheuta himmentämistä. Säätöpiirin asetusarvoina toimivat siten sekä kynnsarvo että sen jälkeinen himmennyksen jyrkkyys.

Ratkaisu ei teoriassa mahdollista vakiovalonsäätöä, mikäli anturi tarkkailee työtasoa, mutta toisaalta ratkaisu voi kompensoida anturin suhteellista yliherkkyyttä päivänvalolle.¹³

¹³ Kuitenkin Rubinstein, Avery & Jennings 1997, s. 7 tutkimuksessa suljetun silmukan järjestelmien virittäminen osoittautui vaikeaksi pienissä toimistohuoneissa: "The closed-loop, high gain, control systems – [i]n small daylight offices, – proved time-consuming to commission and even after careful adjustment, consistency of illumination levels was difficult to maintain from office to office." Koska kyse oli pienistä huoneista, valojakauma ja anturikykyisyys ovat todennäköinen ongelmien syy.



Kuva 120. Kolmen säätötavan avoimen piirin vasteet (Bierman 2001). Periaatteessa sama anturi voi sopia niihin kaikkiin, mikäli sen ominaisuudet voi asetella riittävän monipuolisesti.

Päivänvalon mukaan tapahtuva päälle/pois-ohjaus

Päivänvaloanturi mahdollistaa energian säästön sammuttamalla keinovalot silloin, kun päivänvalo yksin tuottaa riittävästi valoa. Ongelmana on kuitenkin vaihtelevissa päivänvalo-olosuhteissa jatkuva kytkeminen päälle ja pois, mikä yleensä ärsyttää käyttäjiä. Yksi vaihtoehto vähentää tätä on säätää kytkin niin, että kun valaistus laskee alle kriittisen raja-arvon E_{on} , kytkin kytkee valot päälle, mutta sammuttaa ne pois vasta, kun valaistus on saavuttanut selkeästi suuremman raja-arvon E_{off} . Toinen vaihtoehto on liittää keinovalon pois-kytkentään riittävän pitkä aikaviive.

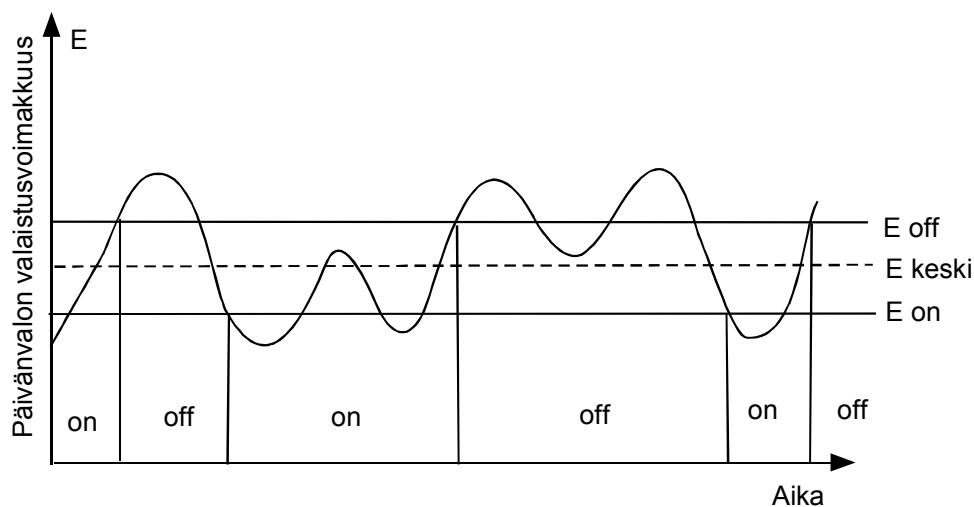
Yksinkertaisen on/off-kytkimen ongelma on käyttäjän reaktio sen toimintaan. Erityisesti tilanteet, joissa automaatio kytkee valot päälle silloin, kun käyttäjä itse kytkisi ne pois, ärsyttävät käyttäjiä. Toimistoissa, luokkahuoneissa, asuintiloissa ja muissa vastaavissa tiloissa pitäisi päälle-kytkemisen tapahtua manuaalisesti, vaikka pois-kytkentä tapahtuisikin automaattisesti päivänvalon mukaan.

On kuitenkin olemassa tietyn tyyppisiä tiloja, joissa käyttäjät eivät oleta itse ohjaavansa valaistusta. Tällaisia tiloja ovat mm. käytävät, portaikot ja atriumit. Jos näihin tiloihin tulee päivänvaloa, valoanturit ja automaattinen päälle- ja poiskytkentä on hyvä vaihtoehto. Kytkemisen ja katkaisun pitää silti olla mahdollisimman huomaamaton eli hidas valon lisääminen ja himmennys.

Vaihteleva kytkennän ohjaus

Valoanturein ohjatussa järjestelmässä valojen nopea päälle- ja poiskytkeminen on erityisesti silloin ongelma, kun päivänvalotaso on lähellä kytkentää ohjaavia raja-arvoja (Littlefair 1996). Jos ohjauksessa on määritelty erilaiset E_{on} ja E_{off} arvot, täytyy päivänvalon valaistusvoimakkuuden muuttua koko niiden välinen ero edestakaisin, jotta se

kytkeytyisi päälle ja sen jälkeen taas pois päältä (kuva 121). Tällöin on todennäköistä, että häiritsevän nopea päälle- ja pois-kytkeytyminen vähenee. Toinen väitetty etu vaihtelevasta ohjauksesta on se, että se tekee kytkemisestä vähemmän huomiota herättävän, koska se toimii silloin, kun päivänvalon valotaso on suurempi, kuin mihin silmä on sopeutunut. Sellaisessa tilanteessa, jossa valoanturi on sijoitettu siten, että se vastaanottaa suoraan tai epäsuorasti valoa ohjaamastaan valaisimesta, on pakko käyttää vaihtelevaa ohjausta. Muulloin anturi kytkisi valot pois heti sen jälkeen, kun se on kytkenyt ne päälle, koska valaisimesta tullut lisävalo aiheuttaisi välittömästi raja-arvon ylityksen.



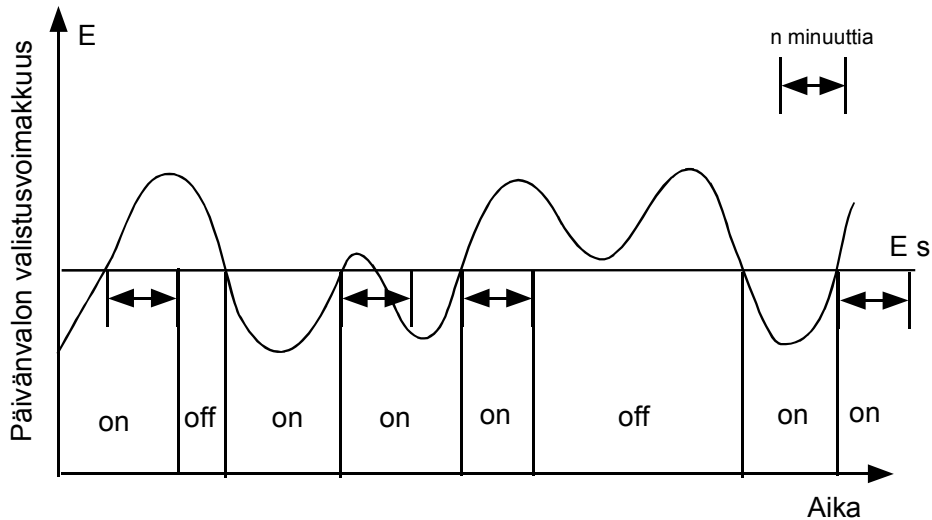
Kuva 121. Vaihteleva päälle/pois-kytkennän ohjaus.

Aikaviiveellinen kytkennän ohjaus

Toinen keino vähentää kytkennän määrää on aikaviive (kuva 122). On olemassa kaksi päästrategiaa, miten aikaviive voidaan toteuttaa:

- kytkentään kytketty aikaviive, jossa sammuttaminen ei voi tapahtua ennenkuin n minuutin kuluttua päällekytkemisestä, missä n on etukäteen määrätty viive ja
- päivänvaloon kytketty viive, jossa sammuttaminen ei voi tapahtua ennen kuin haluttu päivänvalontaso on ylitetty vähintään n minuutin ajan.

Päällekytkennässä ei pidetä viivettä tarpeellisenä etenkin valoputkilla varustetuissa järjestelmissä, koska silloin puolipilvisinä päivinä valaistuksen taso voi pudota paljon alle halutun.



Kuva 122. Aikaviiveellä varustettu päälle/pois-kytkennän ohjaus.

7.1.6 Loistelampun säätöteknologiat

Ohjattava elektroninen liitäntälaite

Ohjattavia elektronisia liitäntälaitteita on saatavilla useimmille loistelampputyypeille, putkimaisille T8-lampuille (halkaisija 26 mm), T5-lampuille (halkaisija 16 mm) ja monille pienloistelampuille. Ohjattava elektroninen liitäntälaite tuottaa loistelampuille, samoin kuin vakio elektroninen liitäntälaite, suuritaajuisen syöttöjännitteen, mikä poistaa lampun välkkymisen (lampun toimintataajuus on 30 kHz:n luokkaa) ja lisää lampun hyötysuhdetta. Muita huomattavia etuja perinteiseen kuristimeen verrattuna ovat vähentynyt valon stroboskooppi-ilmiö, pienempi ääni liitäntälaitteesta ja pienempi häviöteho.

Useimpia ohjattavia elektronisia liitäntälaitteita voidaan käyttää yhdessä valoanturin, läsnäoloanturin, manuaalisen himmentimen (potentiometrin), ajastimen ja energianhallintajärjestelmän kanssa. Yksinkertaisimmillaan säätöjärjestelmä käsittää ainoastaan liitäntälaitteen ja sen ohjauspiirin liittämiin suoraan kytketyn valovastuksen tai säätöpotentiometrin.

Tasajänniteohjaus 1–10 V:n jännitteellä

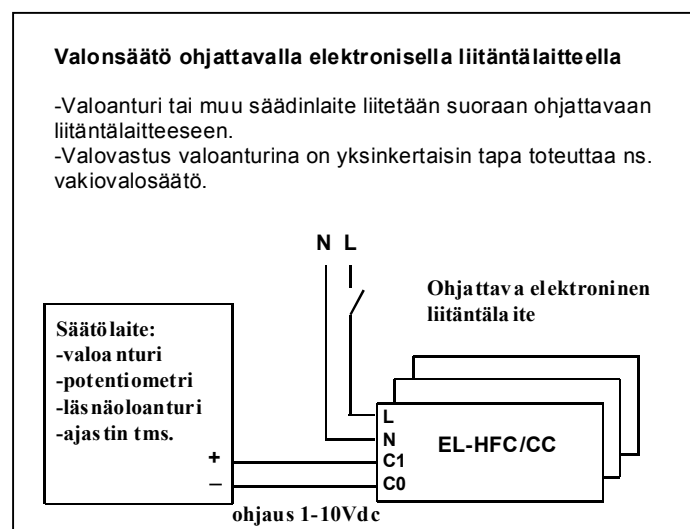
Nykyiset analogiasignaaleilla ohjattavat elektroniset liitäntälaitteet käyttävät yleensä tasajännite- tai tasavirtaohjauspiiriä.

Pääosa ohjattavista liitäntälaitteista on toteutettu standardin EN60929 mukaisesti siten, että liitäntälaitetta ohjataan 1–10 V:n tasajännitesignaaleilla (kuva 123). Liitäntälaite

muodostaa tarvittavan ohjausvirran itse, ja ohjaimeksi riittää yksinkertaisimmillaan pelkkä potentiometri (tavallisesti lineaarinen noin 47 k Ω). Useimpien valmistajien potentiometriohjaimet sisältävät myös elektroniikkaa, koska säätövaikutelmasta saadaan siten lineaarisempi.

Liitälaitte mittaa ohjausvirtapiirin jännitettä ohjausvirtapiirin navoista. Mitä pienempi jännite on, sitä pienempi valaistustaso. Mikäli ohjausvirtapiiri jätetään avoimeksi, valaisin toimii täydellä teholla, myös ei-säädettävä valaisin. Isommissa valonohjausjärjestelmissä ohjain antaa tarvittavan 1–10 V:n ohjausjännitteen. Valovirran minimitaso vaihtelee suorilla loistelampuilla 1–5 % ja pienloistelampuilla 3–10 %. Valaisimeen tuodaan vaihe-, nolla- ja suojajohtimen lisäksi myös kaksi ohjausvirtapiirin johdinta.

Ohjausjohtimet voivat olla myös saman putken tai kaapelivaipan sisällä kuin verkkojännitteen syöttö silloin, kun ohjausjohtimet liittyvät saman laitteen ohjaukseen. Tällöin ohjausvirtapiirin johdinten eristys on mitoitettava verkkojännitteen mukaisesti. Ohjausvirtapiiriä kytkettäessä tulee huolehtia oikeasta napaisuudesta. Ohjausjohtimien lisäksi myös vaihejohdin tulee johdottaa ohjaimen tai potentiometrin yhteydessä olevan kytkimen kautta, koska valaisimet voidaan sammuttaa vain katkaisemalla valaisimille tuleva verkkojännite.



Kuva 123. Ohjattavan elektronisen liitälaitteen ohjaus 1–10 V:n tasajännitesignaali.

Osoitteellinen digitaaliohjaus DALI

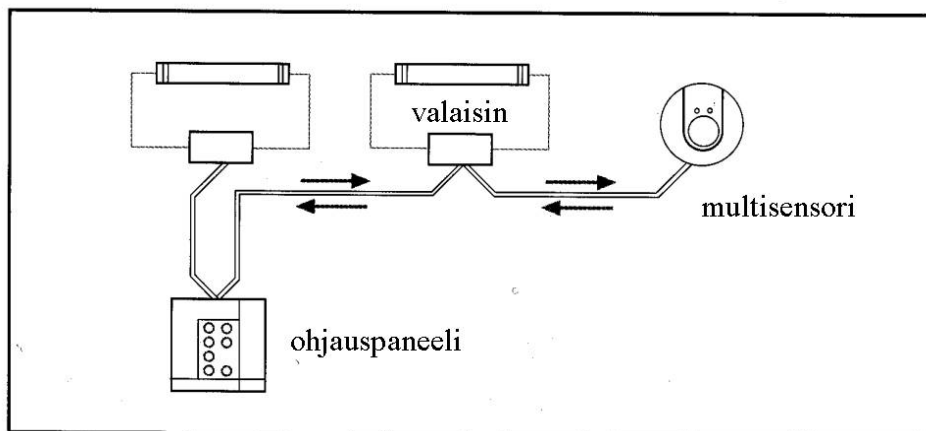
DALI (Digital Addressable Lighting Interface) on uusi standardoitu digitaalinen ohjausperiaate elektronisille liitälaitteille (kuva 124). DALIn taustalla ovat Euroopan johtavat elektronisten liitälaitteiden valmistajat Helvar, Osram, Philips ja Tridonic. Julkistamisensa jälkeen joukko muita valaistusalan yrityksiä on liittynyt DALI-

valmistajien joukkoon.

DALI-tuotteet perustuvat DALI-protokollaan, jonka ominaisuudet tarjoavat tehokkaan valonohjauksen ja energian hallinnan. DALI käyttää yksinkertaista johdotusta, jolla kaksisuuntainen digitaalinen signaali on siirrettävissä kaikkien järjestelmään kuuluvien laitteiden välillä. Elektroniset liitäntälaitteet, ohjauspaneelit, anturit ja ohjelmointilaitteet voidaan liittää toisiinsa ja ne liikennöivät keskenään. Älykkyys on hajautettu järjestelmän eri osiin. Näin saavutetaan parempi luotettavuus ja turvallisuus. Järjestelmä on erittäin joustava, joten asentaminen, käyttö ja ylläpito ovat edullisia. DALI-komponentit ovat yksilöllisesti ohjelmoitavissa eikä uudelleenjohdotusta tarvita, kun järjestelmään tehdään muutoksia.

DALIssa valonsäätötiedot välitetään valaisimen liitäntälaitteelle osoitteellista digitaalisen signaalia käyttäen. Digitaalisen signaalin ansiosta kaikki valaisimet säätävät ohjaimen ja valaisimen välisestä etäisyydestä riippumatta samalla tavalla, ja liitäntälaitteisiin on ohjelmoitu silmän herkkyyttä vastaava logaritminen korjaus. Valaisimeen tuodaan vaihe-, nolla- ja suojajohtimen lisäksi digitaaliväylän kaksi johdinta, jotka välittävät noin 16 V:n digitaalisen signaalin. Ohjausvirtapiirillä ei ole napaisuutta, mikä yksinkertaistaa asennustyötä. Digitaalinen ohjaussignaali on myös immuuni häiriölle. Valot sytytetään ja sammutetaan digitaalisen ohjauskomennon avulla, joten verkkojännite voidaan tuoda keskuksesta suoraan valaisimiin ilman erillistä kytkintä.

Eri valmistajien laitteet poikkeavat ominaisuuksiltaan jonkin verran toisistaan. Samaa liitäntälaitetta voidaan esimerkiksi ohjata DALI-protokollan lisäksi 1–10 V:n tasajännitteellä. Helvar on valinnut ratkaisun, jossa elektroniseen liitäntälaitteeseen on integroitu väylän laitteiden jännitelähde, joka syöttää järjestelmän muille laitteille käyttöjännitteen. Tämä mahdollistaa DALI-järjestelmän toteuttamisen myös ilman ulkoista jännitelähdettä.



Kuva 124. Digitaalisen DALI-järjestelmän periaate.

DALIn teknisiä etuja analogiajärjestelmiin verrattuna ovat:

- Osoitteellisuus, 64 eri osoitetta antaa mahdollisuuden ohjata erikseen samassa ohjausväylässä olevia valaisimia/liitäntälaitteita.
- Tilanneohjaus, mahdollisuus ohjelmoida erilaisia valaistustilanteita tarpeiden mukaisesti. Jokaisessa järjestelmässä voidaan muodostaa jopa 16 ryhmää ja joka ryhmälle voidaan valita 16 eri valaistustilannetta.
- Valaisimien sytyttäminen ja sammuttaminen tapahtuu komennolla väylän kautta.
- Digitaaliväylällä ei ole polariteettia (plus/miinus), joten riski virhekytkennöille on pienempi.
- Digitaalinen ohjaussignaali ei ole herkkä muista johtimista siirtyville häiriöille.
- Kaksisuuntainen tiedonsiirto ohjausväylällä on mahdollista. Näin saadaan esim. tilaja virhetietoja välitettyä ohjausjärjestelmälle.
- Ohjaussignaali välittyy samanlaisena kaikille valaisimille riippumatta ohjausjohtimien pituudesta.
- Digitaalitekniikka mahdollistaa säädön myös tietokoneen avulla.
- Digitaaliohjauksessa voidaan käyttää erilaisia antureita, ilmaisimia, infrapunakauko-ohjausta sekä sovittimia muiden ohjausjärjestelmien välillä.
- Digitaalinen ohjaus on helposti integroitavissa kiinteistöautomaatiojärjestelmiin (esim. EIB tai LON-works) järjestelmäkohtaisia sovitinyksiköitä käyttäen.

7.1.7 Kaihtimen säätö

Säätöongelma

Sälekaihdin toimistoikkunan perusvarusteena

Monikerroksisuuden ja vaippa-alan tehokkaan hyödyntämisen vuoksi toimistorakennuksissa ovat vallitsevia sivuikkunat, joista osa avautuu usein suoran auringonpaisteen ilmansuuntaan. Toimistotilassa tehtävä työ edellyttää kuitenkin suoran auringonvalon rajoittamista. Siten sälekaihtimista on tullut toimistoikkunan standardivarusteita, ja huomio kohdistuu niihin pyrittäessä kehittämään päivänvalon hallintaa toimistotiloissa. Säädettävänä komponenttina on siten moottoroitu kaihdin, jonka lamellien kulmaa voi säätää portaattomasti.

Muunlaisissa rakennuksissa tilanne voi olla varsin toisenlainen. Esimerkiksi museoissa ikkunaratkaisut ovat usein yksilöllisiä, mutta päivänvalon säätö tärkeää. Säätö voi ta-

pahtua esimerkiksi osin läpäisevin kangasverhoin. Toisaalta museoissa on rajoitettu näkymiä ulos, ja ikkunat toteuttavat puhtaammin valaisutehtävää.

Kaihদিনautomatiikan toteutus on paljon monimutkaisempi tehtävä kuin keinovalon valaistusvoimakkuuden säätö. Kaihtimet ovat vakioratkaisu, joka passiivisenakin mutkistaa valaistuksen säätöongelmaa. Ongelmana on myös mahdollinen tarve nostaa sälekaihdin kokonaan ylös tai käyttää kaidinten lisäksi tavanomaisia riippuvia kangasverhoja: tätä kysymystä ei tutkimuksissa juuri ole tarkasteltu. Kaiken kaikkiaan säädön robustius näyttää olevan keskeinen ja osin ratkaisematon ongelma.

Säädön tavoitteet

Kaihtimen säädöllä voidaan pyrkiä seuraaviin tavoitteisiin:

- suoran auringonvalon estämiseen tilassa
- päivänvalon valaistusvoimakkuuden pienentämiseen
- ulkoa näkyvien luminanssien rajoittamiseen
- valojakauman parantamiseen (heijastus katon kautta tms.).

Vuorovaikutus keinovalaistuksen säädön kanssa voidaan järjestää monella tavalla. Yksi periaate on pyrkiä pitämään vaakatason valaistusvoimakkuus asetetuissa rajoissa säätämällä sekä kaihdinta että keinovalaistusta. Tämä tavoite esiintyy valtaosassa tutkimuksia joko suoraan tai epäsuorasti. Esimerkiksi Choi & Mistrick (1999) tarkastelevat valaistusvoimakkuuden ja valoanturin signaalin välistä suhdetta, jonka pysyvyys on keinovalonsäädön perustana.

Yksinkertaisempi tavoite on säätää kaihtimen kulmaa niin, että suora auringonvalo eliminoidaan. Tällöin on tarpeen tietää auringon korkeuskulman projektio julkisivun leikkaustasoon, nk. profiilikulma. Periaatteessa voidaan käyttää auringonvalon suuntaanturia tai laskea auringon suunta ajan perusteella. Lisäksi tarvitaan ilmaisin suoran auringonpaisteen olemassaololle. Nämä toiminnot monimutkaistavat järjestelmää, ja lisäksi laskenta edellyttää tilakohtaisia suunta- yms. parametreja. Lee et al. (1998) pitivät laskentaa kaupallisen järjestelmän osana epärealistisena ajatuksena.

Anturiproblematiikka

Sälekaihdin hajottaa ja heijastaa valoa monimutkaisesti, mikä vaikuttaa keinovalon säätöjärjestelmään. Tilanteeseen vaikuttaa mm. valoanturin suunta- ja spektriherkkyys. Lee et al. (1999) ovat selvittäneet syitä, jotka vaikuttavat siihen, ettei valaistus pysy asetetuissa arvoissa:

- valoanturin spatiaalinen herkkyys erilaisille päivänvalotilanteille
- valojakauman epätasaisuus anturin tarkkaileman työtason alueella ja
- katon, seinien tai lattian kautta heijastuneen päivänvalon vaikutus anturin mittaamaan valaistukseen: tässä säleiden kulmalla oli suuri merkitys.

Tutkimuksissa selvitettiin mm. anturin herkkyys erikseen loistolampun valolle ja päivänvalolle. Suhteutettuna antosignaaliin ero oli merkittävä: päivänvalolle 197 lx/V ja loistevalolle 545 lx/V. Ero voitiin kuitenkin ottaa koejärjestelmän virityksessä huomioon, jolloin työtason valaistusvoimakkuus pysyi 10 %:n rajoissa 98 % vuodesta. Markkinoilla olleissa järjestelmissä tämä ei ollut mahdollista (Lee et al. 1998, s. 14 ja Lee et al. 1999, s. 5, 15).

Anturin suuntaherkkyys

Tutkimuksissa on tuotu hyvin esiin se, miten valoanturin suuntaherkkyys vaikuttaa mittauksiin. Tietyissä tilanteissa anturi voi reagoida ikkunasta näkyvään maan pinnan luminanssiin, tai mikäli anturi on suunnattu takaseinään, siitä heijastuviin luminansseihin. Tällöin anturin vaste riippuu mm. taivaan luminanssijakaumasta ja on erilainen kirkkaalle ja pilviselle taivaalle (Choi & Mistrick 1999¹⁴).

Säleen kulman vaikutus

Lee et al. (1999) selvittivät sälekaihtimen kulman vaikutusta anturin toimintaan: vaikutus oli merkittävä ja riippui lisäksi auringon suunnasta ja säätilasta. Tässä tapauksessa anturi sijaitsi ripustetun valaisimen tasolla alas suunnattuna.

Valonlähteen spektri

Osa herkkyysongelmista liittyy ilmeisesti valonlähteiden erilaiseen spektriin. Erityisesti infrapuna-alueen säteily voi vaikuttaa tuloksiin, jos valoa ei ole suodatettu (Bierman 2001).

¹⁴ Tässä tapauksessa ikkuna oli kirkas eikä siinä ollut kaihtimia.

Muita säätöongelmia

Stabiilius

Kaihtimen säätö voi aiheuttaa stabiiliusongelmia, ts. lamellien kulma muuttuu häiritsevän nopeasti tai usein. Leen et al. (1998) tutkimuksessa syitä olivat

- suuret tilapäiset valaistusvoimakkuusanturin signaalin muutokset, jotka syntyivät puolipilvisellä säällä
- suuret tilapäiset aurinkoanturin signaalin muutokset, jotka aiheutuivat myös pilvisyysvaihteluista ja
- hystereesi (joka voitiin eliminoida teknisin muutoksin).

7.1.8 Säädön toteutus rakentamisprosessin osana

Toimistorakentamisen erityispiirteitä

Toimistorakentamiselle on luonteenomaista nopea rakentamisaikataulu, huomion kiinnittäminen investointikustannuksiin ja hyötyalan maksimointi. Toimistojen rakennustyytit ovat kehittyneet näiden vaatimusten kautta. Perustyyppiä on vähän, niissä on toistuvuutta, ja monikerroksisuus yhdistettynä syvään runkoon on johtanut tyyppilliseen sivuikkunoituun huonetilaan.

Yleistymisen esteet

Valaistuksen säätöjärjestelmien yleistymiselle on nähty mm. seuraavanlaisia esteitä (Lee et al. 1999, s. 1, Selkowitz 1998, Rubinstein et al. 1997, s. 2):

- eri komponenttien yhteensopivuusongelmat
- komponenttien hintataso suhteessa niiden monimutkaisuuteen ja laatuun
- luotettavuusongelmat ja huonot kokemukset järjestelmistä
- valoanturien määrän minimoinnista johtuvat säätöongelmat ja
- huomion kiinnittäminen investointikustannuksiin käyttökustannusten sijasta

Komponenttien yhteensopivuusongelmat johtuvat ainakin Yhdysvaltojen markkinoilla (Rubinstein et al. 1997, s. 2) osaksi siitä, että eri osat ovat usein eri valmistajien toimitamia (ja että tämä on aina aiheuttanut rakennusteollisuudessa ongelmia!).

Järjestelmän toiminnan varmistaminen (commissioning)

Commissioning-sanan merkitys

Englanninkielinen termi *commissioning* tarkoittaa yhden määritelmän mukaan "prosesia jolla varmistetaan, että [rakennuksen] järjestelmät on suunniteltu, asennettu ja testattu ja että niitä voi käyttää ja ylläpitää omistajan käyttötarpeiden mukaisesti."¹⁵ Sille ei ole täsmällistä suomenkielistä vastinetta, eikä se myöskään vastaa mitään suomalaisen rakentamisen käytäntöä sellaisenaan. Kääntämisen vaikeus saattaa osin johtua siitä, että *commissioning* on lähtöisin amerikkalaisesta rakentamiskulttuurista, joten sen taustalla voi olla suomalaisista poikkeavia toiminnallisia, organisatorisia ja juridisia käytäntöjä. Toisaalta *commissioning* ei myöskään Yhdysvalloissa ole vakiomenettely, vaan sitä pyritään tietoisesti edistämään ja sitä varten on myös syntymässä kaupallista palvelutarjontaa. On myös mahdollista, että nämä toimintamallit leviävät Eurooppaan. Asian uutuus merkitsee sitä, että *commissioning* hakee edelleen muotoaan, mikä voi vaikeuttaa sen selkeää määrittelyä.

Commissioning edellä määriteltynä koskee nimenomaan uudisrakentamista. Tällöin sen tärkeänä lähtökohtana ovat suunnittelun tavoitteet, *design intent*. Tällöin tietysti edellytetään, että tavoitteet on kirjattu, mutta ei välttämättä, etteivät ne voisi muuttua suunnittelun aikaisen päätöksenteon mukaisesti.¹⁶

Perusmäärittelyn lisäksi on esitetty termit myös uudisrakentamisen jälkeiselle, rakennuksen elinkaaren aikaiselle menettelylle (*retrocommissioning*), alkuperäisen *commissioning*-menettelyn toistamiselle (*recommissioning*) sekä jatkuvaluonteiselle toiminnalle (*continuous commissioning*).¹⁷

IESNA Lighting Handbook määrittelee *commissioning*in erityisesti päivänvalojärjestelmien kannalta "– – systemaattiseksi menettelyksi joka varmistaa, että päivänvalojärjestelmän kaikki osat toimivat vuorovaikutuksessa ja keskeytyksettä dokumentoitujen suunnittelutavoitteiden ja rakennuksen omistajan tarpeiden mukaisesti. – – [C]ommissioningiin kuuluu yleensä sähköisten ja mekaanisten anturien kalibrointi

¹⁵ Anon 2001, "Definitions": "The process of ensuring that systems are designed, installed, functionally tested, and capable of being operated and maintained according to the owner's operational needs. [Based on ASHRAE Guideline 1–1996]"

¹⁶ Ks. English, M.C., "Design review during commissioning", s. 2, *in*: Anon. 2001.

¹⁷ Anon. 2001, "Definitions"

niin, että ne antavat järjestelmälle sopivan ohjaussignaalin tilalle ominaisissa olosuhteissa ja päivänvalon vaihdellessa laajoissa rajoissa."¹⁸

Käytännössä commissioning voi sisältää sekä toiminnallisia tehtäviä (järjestelmien perusasetukset, kalibrointi yms.) että dokumenttien tarkistamista, koulutusta yms. ja ulottua toteutusketjussa suunnittelusta käytönaikaiseen toimintaan. Toisaalta sen sisältö ei aina näytä olevan täysin kiistaton.¹⁹

Commissioningin suoritusajankohta

Valaistuksen säädön erityispiirteet vaikuttavat siihen, millaisin menettelyin säädön perusasetukset olisi tehtävä. Ajankohdalla taas on vaikutusta siihen, millainen päivänvalo ko. tilanteessa vallitsee. Lee et al. (1999) pyrkivät selvittämään ongelmaa tarkastelemalla valoanturin vastetta erilaisissa sälekaihtimen asennoilla, auringonpaisteen suunnilla ja taivaan olosuhteilla. Tavoitteena oli mm. selvittää, missä tilanteissa järjestelmän viritys pitäisi tehdä.

Niinkin vähän erilaisia muuttujia sisältävässä tilatyypissä kuin tavanomainen toimistotila tilojen ominaisuudet vaihtelevat paljonkin. Erityisesti kaihdinten säätöä on vaikea toteuttaa niin, ettei säädössä jouduttaisi käyttämään kohdekohtaisia parametreja ja lähtötietoja.

Commissioning ja tuotteistus

Commissioningin tyyppisen toiminnan tarpeellisuus on ilmeisesti osin suoraa seurausta rakennusten teknisestä monimutkaistumisesta. Rakennusvolyymit ovat suuria ja sisältävät runsaasti teknisiä järjestelmiä. Lisäksi on alettu vaatia, että nämä järjestelmät toimisivat optimoituna kokonaisuutena, jolloin voidaan esimerkiksi minimoida rakennuksen energiankulutusta. Energiataseen optimointi onkin yksi commissioningin ydinsisällöistä.

Toisaalta kyseessä on oire siitä, että rakennusta ja sen järjestelmiä on vaikea tuotteistaa loppuun asti. Kun tuotteistamisessa pyritään olennaisesti markkinoinnin helpottamiseen, järjestelmistä tehdään usein samalla selkeämpiä ja kompaktimpia, ja myös yhteys käyt-

¹⁸ Anon. 2000, sivut 8-23. "Commissioning can be defined as a systematic process that ensures that all elements of the daylighting system perform interactively and continuously according to documented design intent and the needs of the building owner. -- [C]ommissioning -- typically includes calibration of any electrical or mechanical sensors such that they produce the desired control signal to the system under the specific conditions of the room design and over a wide range of incident daylighting conditions." Tähän määritelmään viittaa myös Bierman 2001.

¹⁹ Esimerkiksi sen suhteen, missä määrin anturin paikan etsiminen sisältyy commissioning-tehtävään näyttää vallitsevan erimielisyyttä, vrt. Bierman 2001 ja Rubinstein, Avery & Jennings 1997, s. 4.

tötarpeen ja järjestelmän ominaisuuksien välillä syntyy tuotekonseptin kautta. Ihanneta-pauksessa järjestelmä sopeutuisi kulloiseenkin asennusympäristöön vähin toimenpitein. Se, ettei järjestelmien keskinäisiä rajapintoja ja vuorovaikutusta ole selkeästi määritelty, lisää suunnittelutyötä ja myös commissioning-tyyppisen toiminnan tarvetta. Kääntäen voisi odottaa, että järjestelmien kehittyminen yksinkertaistaa suunnittelua, käyttöönottoa ja ylläpitoa, etenkin jos commissioning aiheuttaa tilaajalle tai laitevalmistajalle ylimääräisiä kustannuksia.

Päätelmät

Kokonaiskonseptin merkitys

Tutkimuksissa korostetaan sitä, että suunnittelussa pitäisi lähteä kokonaisratkaisusta. Lee et al. (1998) muotoilevat kysymyksen näin:

- a) [I]ntegroitu lähestymistapa täytyy ottaa käyttöön hankkeen alussa, kun on vielä mahdollista vaikuttaa rakennuksen suuntaukseen, pohjapiirrokseen tai ulkoisiin auringosuojausjärjestelmiin – –
- b) [L]opullisen suunnitelman on otettava huomioon inhimilliset tekijät tai miellyttävyys.²⁰

Periaatteessa toimistorakentamisessa pätevät yleiset päivänvalon käytön periaatteet, joihin rakennuksen orientaatio, tilojen perusratkaisut yms. kuuluvat. Todennäköisesti parhaat tulokset saavutetaan sisällyttämällä päivänvalokysymykset jo luonnossuunnitteluun. Jos rakennus suunnataan ideaalisesti, esimerkiksi kaihtimien säätötarve vähenee olennaisesti. Toimistorakentamisen reunaehdot ovat kuitenkin tiukat. Jos toimistorakennuksen kaikki seinät varustetaan ikkunoille, osa tiloista suuntautuu kohti suoraa auringonpaistetta. Kaihtimien säätö tarjoutuu ratkaisuksi nimenomaan silloin kun joudutaan turvautumaan epäedullisiin perusratkaisuihin.

Kaihtimien säädön perusongelma

Keinovalaistuksen säätöjärjestelmiä on ollut markkinoilla pitkään, mutta edelleen niiden käytössä esiintyy ongelmia. Ikkunajärjestelmien säädön ratkaisut ovat vasta muotoutumassa, ja niiden osalta ongelmat ovat paljon suurempia. Kuitenkin molemmissa tapauk-

²⁰ Lee et al. 1998b, s. 8. ”a) [T]he concept of an integrated approach must be introduced at the start of the project when design solutions such as building orientation, articulated floor plans, or exterior shading systems can still be considered – –”; ”b) [T]he final design choice must embed value for human factors or amenity.”

sisä ongelmiensa perussyyinä on kahden tekijän vuorovaikutus. Kun vallitsevan päivänvalon intensiteetti ja suuntaominaisuudet vaihtelevat suuresti ja tämä valo tulee epäsymmetrisesti sivuikkunan kautta huoneeseen, päivänvalon ja tilageometrian yhdistelmä tuottaa monimutkaisen valaistustilanteen. Jos säätöjärjestelmä perustuu yhteen sisätilaan asetettuun anturiin, valaistustilanteen mittaaminen on hyvin hankalaa. Järjestelmän osana oleva kaihdin mutkistaa tilannetta entisestään, koska sekin vaikuttaa kompleksisesti valon suuntaukseen.

Toistaiseksi käytetyt säätömenetelmät perustuvat klassiseen säätötekniikkaan, jossa mitataan useimmiten sisätilan valaistusvoimakkuutta joko suoraan tai luminanssin perusteella epäsuorasti. Tällöin säätö on takaisinkytkettyä. Avoin säätöpiiri, jossa mitattaisiin ulkotilan valaistusvoimakkuutta, on ongelmallinen, koska päivänvalon, kaihtimen ja sisätilan vuorovaikutusta ei siinä voi ottaa kunnolla huomioon. Tavalla tai toisella heuristinen säätö, joka ennakoii erilaisia valaistustilanteita, voi osoittautua käyttökelpoiseksi vaihtoehdoksi. Siinäkin tilan geometrian, suuntauksen ym. tekijöiden vuoksi säätöperusteet jouduttaisiin valitsemaan ratkaisukohtaisesti.

Näistä ongelmista riippumaton kysymys on säätötavoite, joka nykyisin perustuu pääosin vakiovalaistusvoimakkuuteen. Muut mahdollisuudet ovat toistaiseksi vähän tutkittuja ja avoimia. Toisaalta ainakin osa järjestelmien dokumentoiduista ongelmista koskee säädön tarkkuutta, josta mahdollisesti voitaisiin tinkiä subjektiivisesti koetun valaistuksen laadun kärsimättä.

7.2 Integroitu valaistuksen ja kaihtimien sumea säätö

7.2.1 Lähtökohdat

Tässä luvussa on esitetty sumean logiikan säätimellä toteutettu integroitu keinovalon ja sälekaihtimen säätöratkaisu. Valonmittaus perustuu ulkovalaistusta mittaavaan anturiin, joka mittaa ikkunaseinän valaistusvoimakkuutta. Yhdellä anturilla voidaan säätää kaikkia tiloja, joiden päivänvalo-olosuhteet ovat samanlaiset. Muina muuttujina säätimen sisäänmenossa ovat auringon korkeuskulma ja suunta ikkunaseinään nähden. Säädintä on mahdollista simuloida muuttamalla muuttujien arvoja kehitysohjelmassa tai liittämällä se mittausohjelmalla toteutettuun päivänvalon tiedonkeruuseen ja auringon asennon laskevaan Excel-ohjelmaan.

Tutkimuksen lähtökohtana on selvittää sumean logiikan käyttöä sisävalaistuksen ja päivänvalon yhteiskäytössä. Sumealla logiikalla toteutettuja valonsäätimiä tai kaihtimien ohjaimia ei markkinoilla ole saatavilla. Perinteiset valonsäätimet on toteutettu sisäva-

laistusta mittaamalla valoanturilla, säädinyksiköllä ja toimilaitteella, joka ohjaa lampun tehoa.

Perinteisen valonsäädön ongelmia

Yksinkertaisimmillaan valonsäätö voidaan toteuttaa valoa mittaavalla valovastuksella, joka liitetään suoraan ohjattavaan loistelampun elektroniseen liitäntälaitteeseen. Muita komponentteja tai toimilaitteita ei tarvita. Tällainen järjestelmä pyrkii pitämään tietyn rajoitetun alueen valaistuksen vakiona. Jokainen valaisin voidaan varustaa omalla valovastuksella, jolloin päivänvalon jakauman mukaan valaisin säätyy eri valotasolle. Säätimien suurin ongelma on niiden liian nopea reagointi hetkellisiin valaistusmuutoksiin sekä useimmissa tapauksissa rajoittunut säätöalue ja hankala halutun valotason asetus.

Toinen yksinkertainen tapa ohjata keinovalaistusta on päivänvalon mukaan tapahtuva on/off-säätö. Kun päivänvalon määrä ylittää tarvittavan valotason keinovalaistus kytketään pois joko osittain tai kokonaan. Kun taas päivänvalon määrä laskee alle asetetun minimitason, kytketään keinovalaistusta päälle. On/off-säätö toimii huonosti olosuhteissa, joissa päivänvalon määrä vaihtelee paljon ja nopeasti, esim. puolipilvisenä päivänä. Jatkuva valaistuksen kytkeytyminen pois ja päälle koetaan häiritseväksi.

Kehittyneimmissä valonsäätimissä haluttu valotaso voidaan asettaa yleensä joko potentiometrillä tai ylös/alas-painikkeilla. Usein myös valotason säätymisviiveitä voidaan asettaa ja valaisimia voidaan säätää ryhmittäin eri herkkyyksillä. Mukaan voidaan liittää myös kellokytkimiä, läsnäoloantureita jne.

Väyläpohjaisissa järjestelmissä on suurimmat mahdollisuudet toteuttaa erilaisia tila- ja tarvekohtaisia esiaseteltuja tilanteita ja säätötoimintoja.

Vakiovalosäädössä tilan valaistusvoimakkuutta pyritään pitämään vakiona säätöjärjestelmään liitetyn valoanturin avulla. Käytännössä säätö tapahtuu kattoon asennetun valoanturin avulla. Anturi mittaa tietyn avaruuskulman alueelta tulevaa valoa. Anturin näkemä alue ei saa olla liian laaja, jotta se ei mittaisi suoraan ikkunoista tulevaa valoa, eikä myöskään liian pieni, jotta sen mittaama valo edustaisi edes likimain tilan keskimääräistä valaistusvoimakkuutta. Anturin oikea sijoitus ja sopivan kokoinen mittauskulma onkin säädön onnistumiselle ratkaisevaa. Nykyisissä valon säätöjärjestelmissä anturitekniikka onkin käytännössä säädön heikoin lenkki. Anturit ovat rakenteeltaan ja toiminnaltaan yksinkertaisia ja samalla huonosti mukautettavissa erilaisten tilojen vaatimiin tarpeisiin. Yleensä yhdellä keskelle huonetta asennetulla anturilla pyritään säätämään koko tilan valaistusta. Koska päivänvalo jakautuu aina epätasaisesti esimerkiksi eri etäisyyksillä ikkunoista, ei yhdellä anturilla voida saavuttaa optimaalista säätötulosta. Lähellä ikkunoita olevia valaisimia säädetään liian vähän päivänvalon lisääntyessä ja

huoneen takaosassa olevia valaisimia saatetaan säätää liikaa, jolloin huoneen takaosan valaistus jää liian pieneksi.

Hankalasti hoidettavia ovat ripustetut, valoa myös kattoon antavat valaisimet. Niitä käytettäessä valoanturia ei voida sijoittaa kattoon, koska ylöspäin suuntautuva valo sotkee säätöjärjestelmän toiminnan. Anturi joudutaan asentamaan joko valaisimeen, tai se on ripustettava valaisimien korkeudelle. Ripustus pienentää anturin näkemän alueen kokoa, jolloin järjestelmän toiminta huononee. Yksi tapa ratkaista ongelma on käyttää valaisinkohtaista anturia, jolla säädetään vain yhtä tai samalla etäisyydellä ikkunasta olevia valaisimia. Tämä on mahdollista analogisissa säätöjärjestelmissä, joissa käytetään tasajännitteellä ohjattavia elektronisia liitäntälaitteita. Uusissa digitaalisissa säätö- ja ohjausjärjestelmissä (esim. DALI) voidaan ainakin toistaiseksi käyttää vain yhtä valoanturia yhtä järjestelmää kohti. Näissä järjestelmissä on tapana käyttää ns. multisensoria, johon on valoanturin lisäksi yhdistetty myös läsnäolotunnistin ja kaukosäätimen tarvitsema infrapuna-anturi. Läsnäoloanturin sijoitus on luotettavan toiminnan kannalta hyvin kriittinen, etenkin jos tilassa työskentelee useita henkilöitä. Jos multisensori anturi joudutaan asentamaan läsnäoloanturin ehdoilla, valoanturin sijoitus saattaa tulla valonsäädön kannalta huonoksi.

Integroidun säädön tarve

Matalalta paistava aurinko on päivänvalon hyödyntämiselle ongelma, mikäli ikkunoiden suunta on sellainen, että aurinko voi paistaa työtunteina niistä sisään. Ongelma ratkaistaan yleensä sälekaihtimilla tai verhoilla, jotka unohtuvat helposti kiinniasentoon myös niissä olosuhteissa, joissa aurinko ei enää aiheuta häiriötä. Tällöin mahdollisesta valonsäädöstä saatava säästö jää erittäin vähäiseksi, koska valaistus on lähes aina kokonaan päällä. Mikäli kaihtimia kyettäisiin säätämään häiritsemättömästi tarpeen mukaan, tilan valaistusolosuhteet ja päivänvalon käyttö paranisivat ja käyttäjien säätöjärjestelmiä kohtaan tuntema hyväksyntä lisääntyisi. Epätyydyttävästi toimivat järjestelmät eivät saa käyttäjien hyväksyntää, mikä vähentää niiden käyttöä ja saattaa johtaa koko järjestelmän ohittamiseen.

Tarve ohjata kaihtimien asentoa ja keinovalaistuksen määrää riippuu päivänvalon määrästä ja auringon korkeudesta. Matalalta paistava kirkas aurinko aiheuttaa eniten epämiellyttävää kiusahäikäisyä ja samalla estää vaativaa näkötyöskentelyä. Tällöin kaihtimia joudutaan sulkemaan eniten, ja keinovalotason tulee olla tällöin korkea. Korkealta paistava aurinko ei ole yhtä hankala häikäisyn kannalta, vaan kaihtimien kulma voi olla pienempi, jolloin tilaan pääsee myös päivänvaloa ja keinovalon tarve on pienempi.

Ulkoanturin käyttö sisävalaistuksen säädössä

Kehitetyn sumean säätöjärjestelmän lähtökohtana on tutkia valonsäädön toteuttamista pelkästään ulkoa mitatun vertikaalisen valaistusvoimakkuuden avulla. Yhdellä anturilla voidaan säätää kaikkien niiden huoneiden valaistusta, jotka sijaitsevat samaan ilman-suuntaan ja joiden päivänvalo-olosuhteet ovat likimain samanlaiset, esimerkiksi korkeassa toimistorakennuksessa paikalla, jossa ei ole varjostavia muita korkeita taloja. Mikäli tiloja on useisiin ilmansuuntiin itä-etelä-länsi-suunnissa, tulee antureita olla vastaavasti useampia. Valaistusanturin lisäksi säädössä tarvitaan tietoa auringon korkeudesta ja sen suunnasta tutkittavaan ikkunasuuntaan nähden.

Integroidun säädön käyttökohteita

Kaksoisjulkisivurakentaminen on nykyaikaa etenkin toimistorakennuksissa, joissa lasijulkisivulla haetaan rakennukselle arvokkuutta. Näissä rakennuksissa on uloinna yhtenäinen lasiseinä, joka on teräsrakenteilla kiinnitetty sisempään seinään. Näiden välinen tila mahdollistaa erilaisten päivänvaloa rajoittavien kaihdinratkaisujen käytön, mikä ei olisi mahdollista Suomen ilmastossa perinteisissä yksivaippaisissa rakennuksissa. Kaihdinrakenteet voivat olla myös mekaanisesti massiivisempia kuin ikkunoissa käytetyt perinteiset sälekaihtimet. Lisäksi ne voivat olla kooltaan ja laajuudeltaan suurempia, koska huoneiden väliseinät eivät ole esteinä. Yhdellä säätimellä ja säätömoottorilla voidaan hallita isoakin kaihdinaluetta. Kaihtimen mahdollisesti aiheuttama äänihaitta toiminnan aikana on pienempi, jos se sijaitsee kokonaan sisemmän seinän ulkopuolella. Huollettavuus ja kunnossapito on lisäksi helpompaa, koska kaksoisjulkisivurakenteissa käytetään normaalisti huoltotasoja, joista on hyvä pääsy eri rakenteisiin ja laitteisiin.

7.2.2 Kehitetyn järjestelmän kuvaus

Järjestelmän rakenne

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan sumeaa logiikkaan perustuvaa kaihtimien ja keinovalaistuksen integroitua säädintä, joka käyttää sisäänmenoina ulkoa mitattua vertikaalivalaistusvoimakkuutta, auringon laskettua korkeuskulmaa ja auringonsuuntaa eli atsimuuttikulmaa tarkastelusuuntaan nähden. Näiden suureiden avulla on sumealle säätimelle luotu sääntökanta, jonka perusteella ulostulosuureet kaihtimen asentokulma ja keinovalaistuksen valotaso määritetään kussakin päivänvalo-olosuhteessa. Suureiden jäsenyysfunktioilla määritellään lingvististen ominaisuuksien suuruudet eli esimerkiksi milloin valaistusvoimakkuus on pieni, keskimääräinen tai suuri. Kokemusperäisesti tiedetään, että jos vertikaalipinnan valaistusvoimakkuus ulkona on yli 20 klx, niin sää on aurinkoinen, ja jos auringon korkeus on pieni, häikäisy on jo todennäköistä. Tällöin

kaihtimia on suljettava ja tarvittava keinovalon määrä on vähintään keskisuuri tai suuri. Simuloinnilla voidaan tarkemmin testata sääntökantaa ja ulostulojen käyttäytymistä sekä tarvittaessa muuttaa sääntöjä ja jäsenyysfunktioiden määrittämiä.

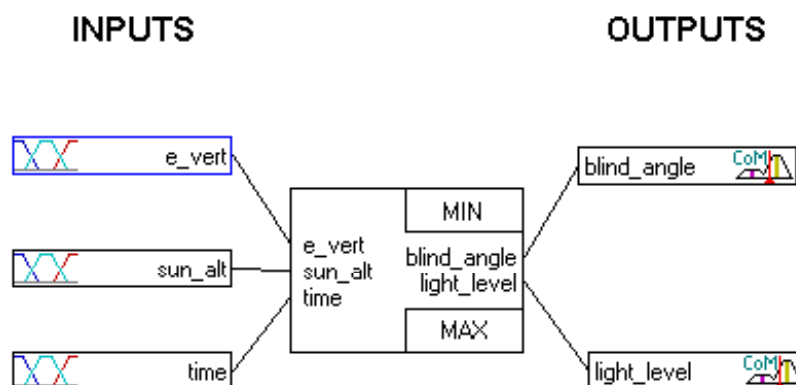
Tässä esitetty sumea säädin on toteutettu FuzzyTech 5.12 -kehitysohjelmalla. Taulukossa 26 on esitetty kehitetyn sumean säätimen lingvististen muuttujien määrä sekä sääntöjen ja jäsenyysfunktioiden lukumäärät.

Taulukko 26. Tilastotietoja järjestelmästä.

Lingvistiset muuttujat sisään	3
Lingvistiset muuttujat ulos	2
Välimuuttujat	0
Sääntökannat	1
Säännöt	54
Jäsenyysfunktiot	19

Kuvassa 125 on esitetty koko sumean järjestelmän perusrakenne, joka koostuu sisäänmenomuuttujista, sääntökannasta ja ulostulomuuttujista. Sisäänmenojen analogiset arvot muutetaan sumeuttamalla sumeiksi arvoiksi, jotka sumean päättelyn jälkeen muutetaan selkeyttämällä analogisiksi ulostulomuuttujien arvoiksi.

Integrated fuzzy control



Kuva 125. Sumean säätöjärjestelmän rakenne. e_vert = valaistusvoimakkuus (lx), sun_alt = auringonkorkeus ($^{\circ}$), $time$ = vuorokaudenaika (h), $blind_angle$ = kaihdin-asento ($^{\circ}$) ja $light_level$ = valotaso (%).

Lingvistiset muuttujat

Lingvistisiä muuttujia käytetään kääntämään todelliset muuttujien arvot lingvistisiksi arvoiksi. Nämä eivät ole numeroarvoja vaan niin sanottuja 'lingvistisiä termejä'.

Esimerkki:

Sisäänmenomuuttujalle 'e_vert' (= vertikaalinen ulkovalaistusvoimakkuus) on määritetty kolme termiä, 'low', 'medium' and 'high'. Jokaiselle näistä määriteltiin oma jäsenyysfunktio (MBF). Kaikille sisäänmenomuuttujan e_vert arvoille määritellään eri termeille vastaava jäsenyysaste, joka voi saada arvoja 0...1.

Lingvistiset muuttujat tulee määritellä kaikille sisäänmeno- ja ulostulomuuttujille. Jäsenyysfunktiot määritellään käyttäen vain muutamia määrittelypisteitä, ja ne ovat tällöin muodoltaan melko yksinkertaisia.

Taulukossa 27 on esitetty kaikkien lingvististen muuttujien nimet ja niiden lingvistiset termit. Muuttujille määritellyt vaihtelualueet on esitetty taulukossa 28.

Taulukko 27. Lingvistiset muuttujat.

Muuttujan nimi	Termit
e_vert	low, medium, high
sun_alt	low, medium, high
time	low, medium, high
blind_angle	very_low, low, medium, high, very_high
light_level	very_low, low, medium, high, very_high

Taulukko 28. Muuttujien vaihtelualue.

Muuttuja	Min	Max	Oletusarvo	Yksikkö
e_vert	0	80000	40000	lx
sun_alt	0	60	30	deg
time	0	24	12	h
blind_angle	0	60	30	deg
light_level	0	100	50	%

Oletusarvoa käytetään niissä tapauksissa, joissa ei millään säännöllä viitata kyseiseen muuttujaan. Selkeytyksessä voidaan käyttää useita eri menetelmiä. Tässä tapauksessa on käytetty CoM (Center of Maximum) -menetelmää, jota voidaan pitää hyvänä kompromissina.

Taulukossa 29 on esitetty eri muuttujien tyypit ja niille käytetyt sumeuttamis- ja selkeyttämismenetelmät.

Taulukko 29. Sumeutus- ja selkeyttämismenetelmät.

Muuttuja	Tyyppi	Sumeutus/Selkeytys
e_vert	sisään	Compute MBF
sun_alt	sisään	Compute MBF
time	sisään	Compute MBF
blind_angle	ulos	CoM
light_level	ulos	CoM

Sääntökanta

Sääntökanta sisältää sumean logiikan järjestelmän säätöstrategian eli miten järjestelmä reagoi sisäänmenosuureisiin ja miten ulostulosuureita muutetaan. Säännön 'JOS' osassa määritellään tilanne, johon sääntö on tarkoitettu. Osassa 'NIIN SITTEN' määritellään sumean järjestelmän vaste kyseisessä tilanteessa. Lisäksi säännölle voidaan antaa painoarvoja (DoS) sen tärkeyden mukaan. Taulukossa 30 on esitetty kehitetyn integroidun säätimen koko sääntökanta.

Taulukko 30. Kehitetyn kaihtimen ja keinovalaistuksen integroidun säätimen sääntökanta.

JOS			NIIN SITTEEN			
e_vert	sun_alt	time	DoS	blind_angle	DoS	light_level
low	low	low	1.00	very_low	1.00	very_high
low	low	medium	1.00	very_low	1.00	very_high
low	low	high	1.00	very_low	1.00	very_high
low	medium	low	1.00	very_low	1.00	high
low	medium	medium	1.00	very_low	1.00	medium
low	medium	high	1.00	very_low	1.00	high
low	high	low	1.00	very_low	1.00	high
low	high	medium	1.00	very_low	1.00	medium
low	high	high	1.00	very_low	1.00	high
medium	low	low	1.00	low	1.00	medium
medium	low	medium	1.00	high	1.00	medium
medium	low	high	1.00	low	1.00	medium
medium	medium	low	1.00	very_low	1.00	medium
medium	medium	medium	1.00	medium	1.00	medium
medium	medium	high	1.00	very_low	1.00	medium
medium	high	low	1.00	very_low	1.00	low
medium	high	medium	1.00	medium	1.00	medium
medium	high	high	1.00	very_low	1.00	low
high	low	low	1.00	low	1.00	low
high	low	medium	1.00	very_high	1.00	medium
high	low	high	1.00	low	1.00	low
high	medium	low	1.00	low	1.00	low
high	medium	medium	1.00	high	1.00	medium
high	medium	high	1.00	low	1.00	low
high	high	low	1.00	low	1.00	very_low
high	high	medium	1.00	medium	1.00	low
high	high	high	1.00	low	1.00	very_low

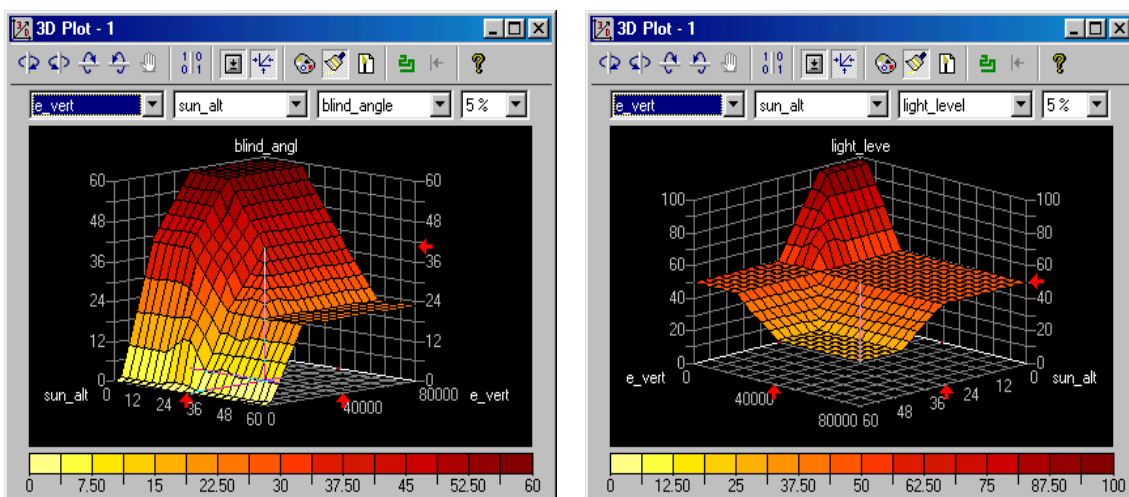
Alustavat simuloinnit

Tärkeä vaihe kehitetyn säätöjärjestelmän simuloinnissa on tutkia, miten hyvin sääntökanta kattaa halutun ulostulopinnan ja onko pinnassa epäjatkuvuuksia tai suorastaan reikiä eli onko sellaisia sisääntulojen arvoja tai jopa sisääntuloja, joille ei ole aktivoitu-

via sääntöjä. Yksinkertaisissa tapauksissa voidaan helposti tarkastella sumean päättelyn ulostulopinnan muotoa eri sisäänmenojen ja ulostulojen arvoilla

Kahden sisääntulon ja yhden ulostulon tapauksessa tämä voidaan esittää yhtenä 3-ulotteisena pintana, jota voidaan käänellä ja katsoa eri kulmista. Useampien muuttujien tapauksissa voidaan tutkia kerrallaan halutun kahden sisäänmenon ja yhden ulostulon määräämää pintaa. Moniulotteisissa tapauksissa on myös hyödyllistä generoida kaikki mahdolliset syöttöarvot ja tutkia niiden vaikutus ulostuloihin ja niiden realistisuuteen. Kuvassa 126 nähdään esimerkkejä ulostulomuuttujien riippuvuuksista sisäänmenoista.

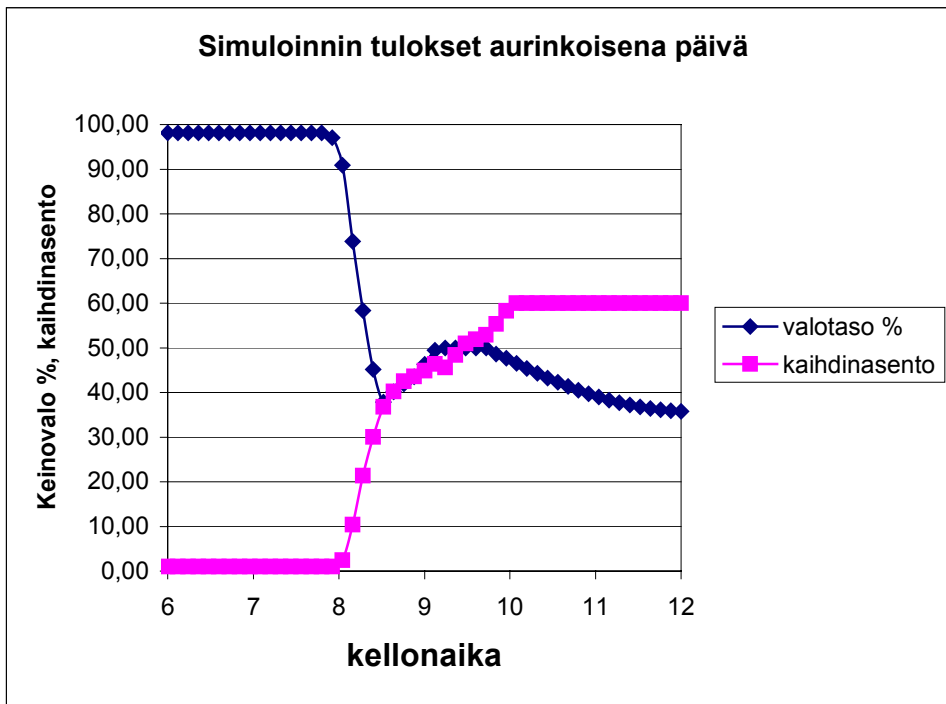
Kehitetyn valonsäätimen valaistussisäänmeno on mahdollista saada suoraan reaaliaikaisen tiedonkeruun valaistusvoimakkuusanturilta tai muuttaa suoraan sen arvoa Fuzzy-Tech-ohjelman sisällä. Mittaustietoa on kerätty DasyLab-ohjelmistolla ja IoTech-tiedonkeruulaitteistoon liitetyillä PCR-Krochmann-ulkovaloantureilla. Auringonkorkeus ja aikatieto saadaan Excelillä tehdyllä ohjelmalla. Tiedonsiirto eri Windows-pohjaisten ohjelmistojen kesken tapahtuu DDE-datalinkillä. Kuvissa 127 ja 128 on esitetty simulointiesimerkki aurinkoisena päivänä ja kuvissa 129 ja 130 pilvisenä päivänä.



Kuva 126. Esimerkki muuttujien kaihdinasento "blind_angle" ja valotaso "light_level" riippuvuudesta ulkovalaistusvoimakkuudesta "e_vert" ja auringonkorkeudesta "sun_alt". Huom! Pinnan muoto riippuu myös muuttujasta aika "time".



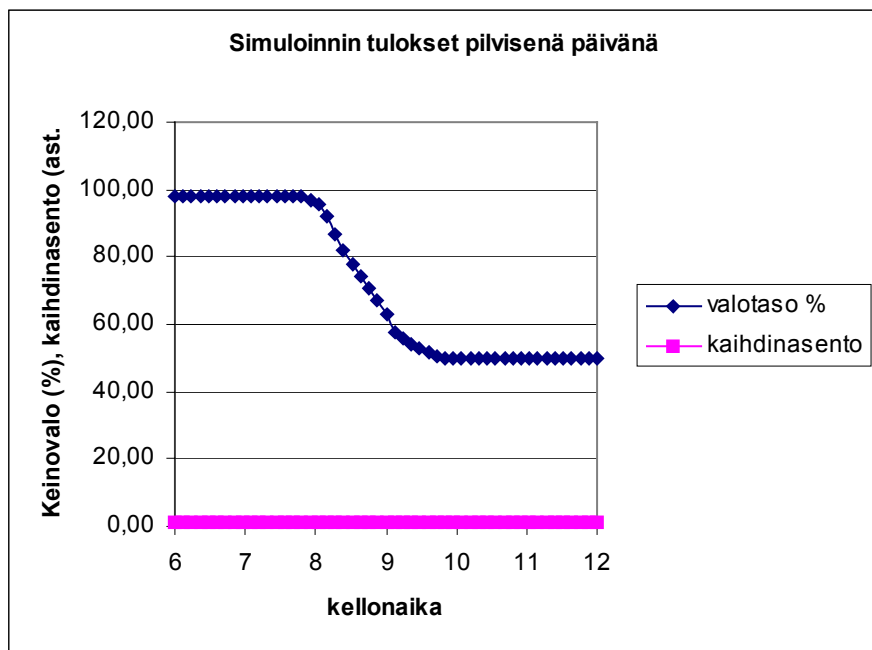
Kuva 127. Ulkovalaistusvoimakkuus aurinkoisena päivänä esimerkksimuloinnissa, kun ikkuna on suunnattu etelään.



Kuva 128. Valotaso ja kaihdinasento kuvan 127 mukaisessa esimerkksimuloinnissa.



Kuva 129. Ulkovalaistusvoimakkuus pilvisenä päivänä esimerkksimuloinnissa, kun ikkuna on suunnattu etelään.



Kuva 130. Valotas ja kaihdinasento kuvan 129 mukaisessa esimerkksimuloinnissa.

7.2.3 Sumean valonsäätimen testaaminen laajemmilla simuloinneilla

Simuloinnin suoritus

Kehitetyn integroidun kaihdin- ja valonsäätimen toimintaa testattiin simuloinnilla todellisilla mitatuilla ja lasketuilla sisäänmenosuureiden arvoilla. Simulointi oli alunperin tarkoitus tehdä reaaliaikaisena mutta Windows-ohjelmistojen DasyLab ja FuzzyTech välinen tiedonsiirto DDE-linkin avulla ei onnistunut pitkäaikaisesti kunnolla, joten simulointi jouduttiin tekemään keräämällä erikseen mittausdataa ja käyttämällä sitä FuzzyTech-ohjelman lähdetiedostona simuloinnissa.

Sisäänmenosuureiden mittaaminen ja laskenta

Sisäänmenosuureen vertikaalivalaistusvoimakkuus ulkona e_{vert} arvot mitattiin tiedonkeruulaitteistoon IoTech DaqBook 216 liitettyllä PRC-Krochmann ulkovalaistusanturilla, jonka mittausalue on 0–200 klx. Mittaus tapahtui kerran 2 sekunnissa ja arvoista laskettiin 5 min:n keskiarvo, joka tallennettiin mittautiedostoon tietokoneen kovalevyille. Suure auringonkorkeus sun_{alt} laskettiin Exceliin tehdyllä ohjelmalla käyttäen hyödyksi yleisiä auringonkorkeuden laskentayhtälöitä. Arvot laskettiin samoin 5 min:n välein. Valaistusmittaukset tehtiin Otaniemessä TKK:n S-osaston katolla 14.4–30.4.2001 päivittäin klo 7–20.

Simuloinnin tulokset ja niiden analysointi

Tulokset eri päivänvalo-olosuhteissa osoittavat säätimen toimivan tyydyttävästi. Täysin odottamattomia ulostulojen arvoja ei esiintynyt. Sumea sääntökanta tuntuu olevan likimain oikea. Säädin reagoi tosin äkillisiin päivänvalomuutoksiin melko voimakkaasti, koska säätöön ei simuloinnissa ole mahdollista saada sisäänmenoille viiveitä toisin kuin todellisissa säätimissä. Mikäli simulointi olisi voitu tehdä reaaliaikaisena, olisi sisäänmenosuureiden muutosnopeutta kyetty säätämään helposti esimerkiksi DasyLab-ohjelmassa.

Kaihtimen asentokulmien ja valotasojen arvot ovat todennäköisesti vain suuntaa-antavia ja todellisessa tilanteessa ja todellisilla järjestelmillä niitä tulisi varmastikin virittää. Muuttujien jäsenyysfunktioiden paikkoja ja jyrkkyyksiä on helppo vaihdella. Sisäänmenosuureen aika $time$ jäsenyysfunktiot oli määriteltä siten, että aurinko paistaa kohtisuoraan eteläikkunaan klo 12. Kesäaika tulisi ottaa huomioon, jotta myöhään iltapäivälläkin kaihdinsäätö toimisi hyvin.

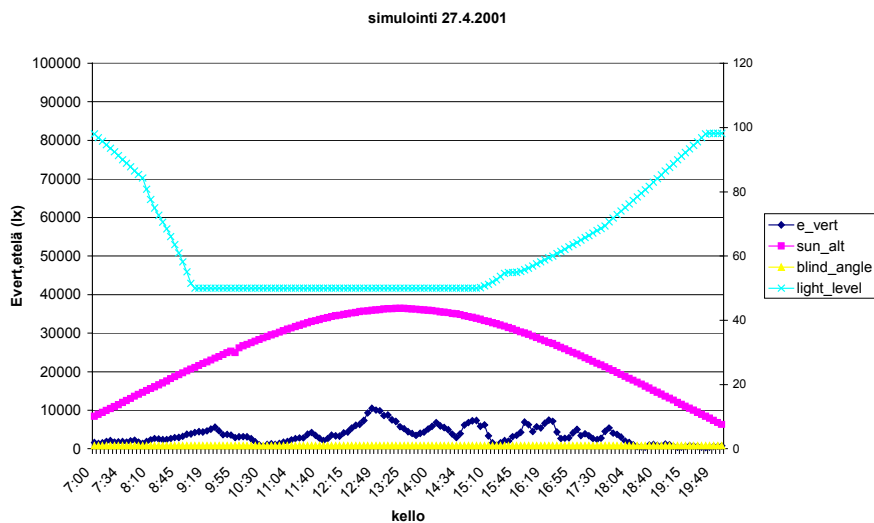
Valaistusvoimakkuus

Valaistusvoimakkuuden suuruutta ja sen vaihtelua eri olosuhteissa on vaikea arvioida, koska kaihtimen läpäisemän päivänvalon määrää ei tiedetä. Voidaan kuitenkin arvioida, että mikäli kaihtimien säädöllä pyritään poistamaan vain suora auringonpaiste, jäljelle jää vielä runsaasti diffuusia valoa. Kun toisaalta keinovaloa ei sammuteta missään olosuhteissa, valaistuksen voidaan olettaa pysyvän riittävänä. Perinteiseen vakiovalojarjestelmään verrattuna valaistus voi olla korkeampi.

Vakiovalojarjestelmien ongelma on heikkolaatuiset valoanturit. Päivänvalon lisääntyessä ne yleensä ylireagoivat valonmäärään ja säätävät keinovalon liian alas. Syynä on se, että ne näkevät herkästi kirkkaita seinä- ja ikkunapintoja ja jopa lattiasta syntyviä heijastuksia. Anturin lukema ei tällöin vastaa huoneen vaakapinnoilla olevaa valaistusvoimakkuutta ja valaistusvoimakkuus laskee alle asetetun pimeän ajan arvon. Sumean säätilman tapauksessa valaistusvoimakkuuden pysyminen riittävänä voidaan varmistaa jäsensyysfunktioita virittämällä ja muuttamalla sääntökantaa ongelmallisissa olosuhteissa.

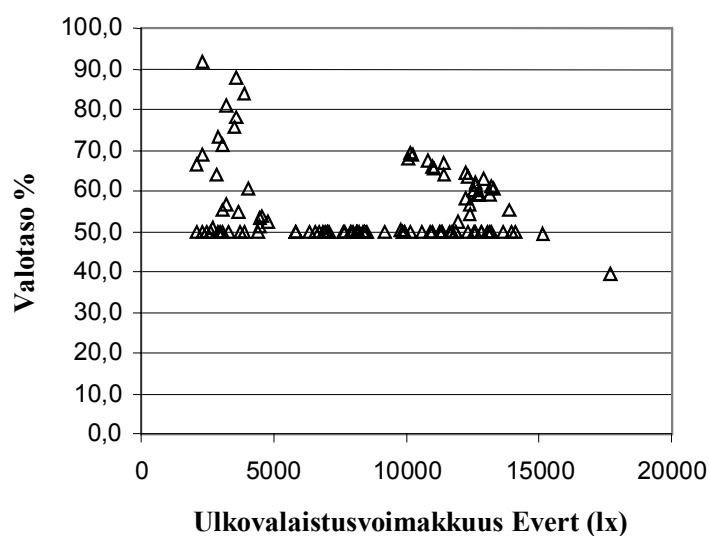
Pilvinen päivä

Esimerkkinä pilvisestä päivästä käy hyvin 27.4. (kuva 131) Vertikaalivalaistus ulkona oli koko päivän alle 10 klx. Kaihtimet ovat auki asennossa koko päivän (kuva 133). Tässä tapauksessa päivänvalolla yksin voitaisiin tuottaa juuri ja juuri riittävä valaistus huoneen ikkunanpuoleisissa osissa. Keinovalaistuksen taso keskipäivän tunteina oli 50 %. Keino- ja päivänvalon yhteisvaikutuksena koko tilaan on varmasti saavutettavissa riittävä ja jopa hyvä valaistus. Keinovalon tasoa olisi ollut varaa jopa hieman pienentää (kuva 132).



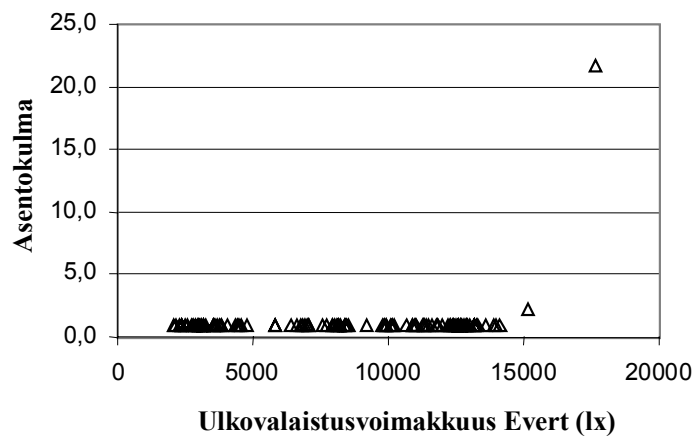
Kuva 131. Pilvisen päivän tulokset.

Keinovalon taso pilvisenä päivänä



Kuva 132. Keinovalon tasot pilvisenä päivänä.

Kaihtimen asento pilvisenä päivänä



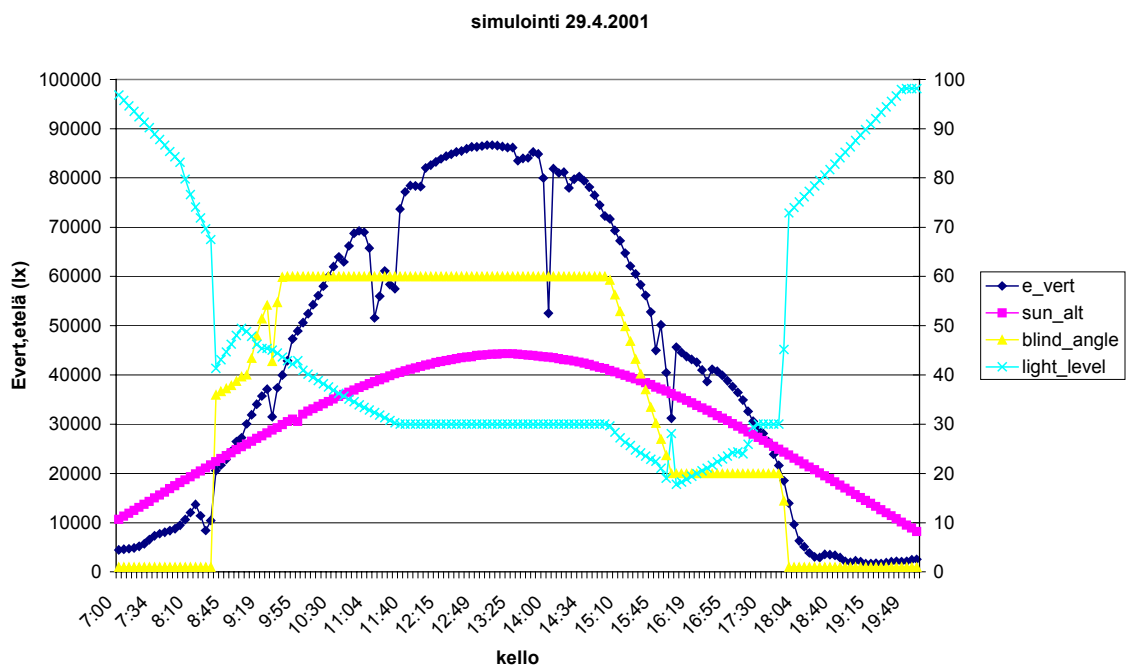
Kuva 133. Kaihtimen asennot pilvisenä päivänä.

Aurinkoinen päivä

Esimerkkinä hyvin aurinkoisesta päivästä on 29.4. (kuva 134). Lyhyitä jaksoja lukuun ottamatta aurinko (kuva 135) on paistanut pilvettömältä taivaalta, mistä kertovat korkeat luksiarvot. Keinovalon taso on aamulla jyrkästi pudonnut ulkoluksien kohoamisen myötä ja pysynyt koko päivän matalana. Kaihtimen toiminta etenkin aamulla on ollut loogista ja kaihtimen asentoa voitaneen pitää riittävänä estämään liiallinen päivänvalo

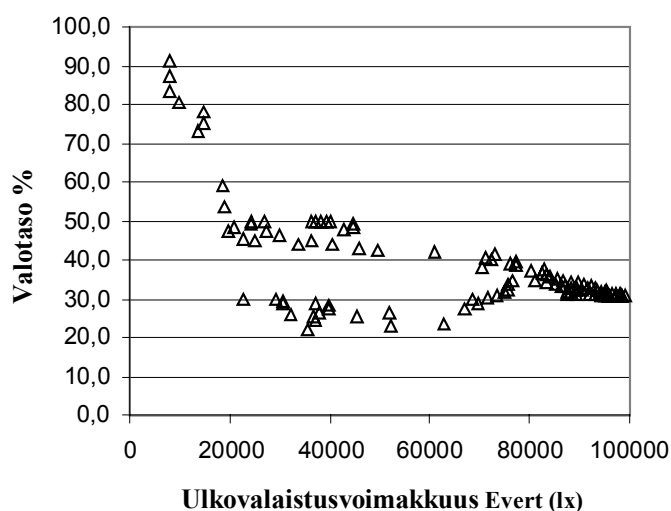
(kuva 136). Iltapäivällä kaihtimen avautumista voidaan pitää liian aikaisena ulkovalaistukseen verrattuna ja suoran auringonpaisteen pääsy sisälle on todennäköistä. Ongelma on mahdollista poistaa muuttamalla ajan jäsenyysfunktioiden muotoa, jolloin aamu- ja iltapäivän osalta kaihtimen toiminta olisi kyseisen päivän tapauksessa mittausarvoihin nähden symmetristä. Keskipäivän määrittäminen tulisi vastata todellista aurinkoaikaa eikä kellonaikaa, koska etenkin kesäaikana näiden välinen ero on suuri.

Yleensä säätimien toimintaa aurinkoisena päivänä voidaan pitää hyvänä. Liiallisia käyttäjää häiritseviä säätötoimenpiteitä ei esiintynyt ja valaistustulos voidaan arvioida hyväksi. Koska kaihtimen asento keskipäivällä on ollut melko suljettu, keinovalotason arvoa 30 % voidaan pitää hyvänä. Riittävällä keinovalolla voidaan tasapainottaa melko kirkkaan ikkunan aiheuttamaa liiallista kontrastia sen ja huonepintojen välillä. Toisaalta keinovalotason pudottaminen sen alle ei tuota lisäsäästöjä energiankulutuksessa, koska loistelampun valotehokkuus putoaa jyrkästi pienillä valotasolla. Lisäksi loistelampun käyttöikä saattaa lyhentyä pienillä valotasolla hehkutusongelmien vuoksi.



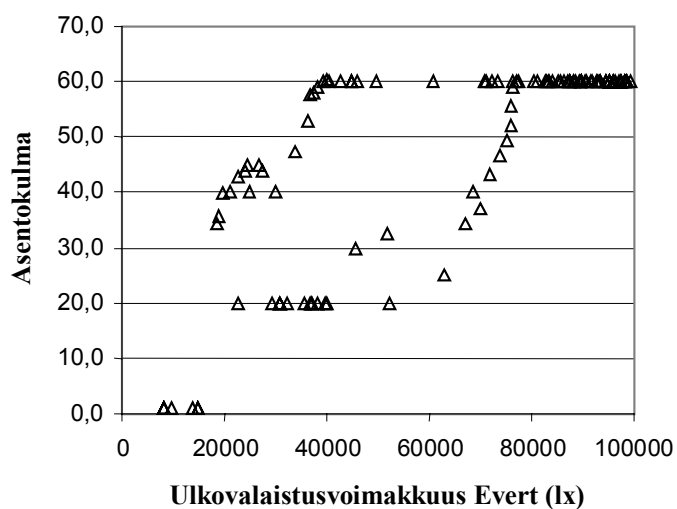
Kuva 134. Aurinkoisena päivän tulokset.

Keinovalon taso aurinkoisena päivänä



Kuva 135. Keinovalon tasot aurinkoisena päivänä.

Kaihtimen asento aurinkoisena päivänä

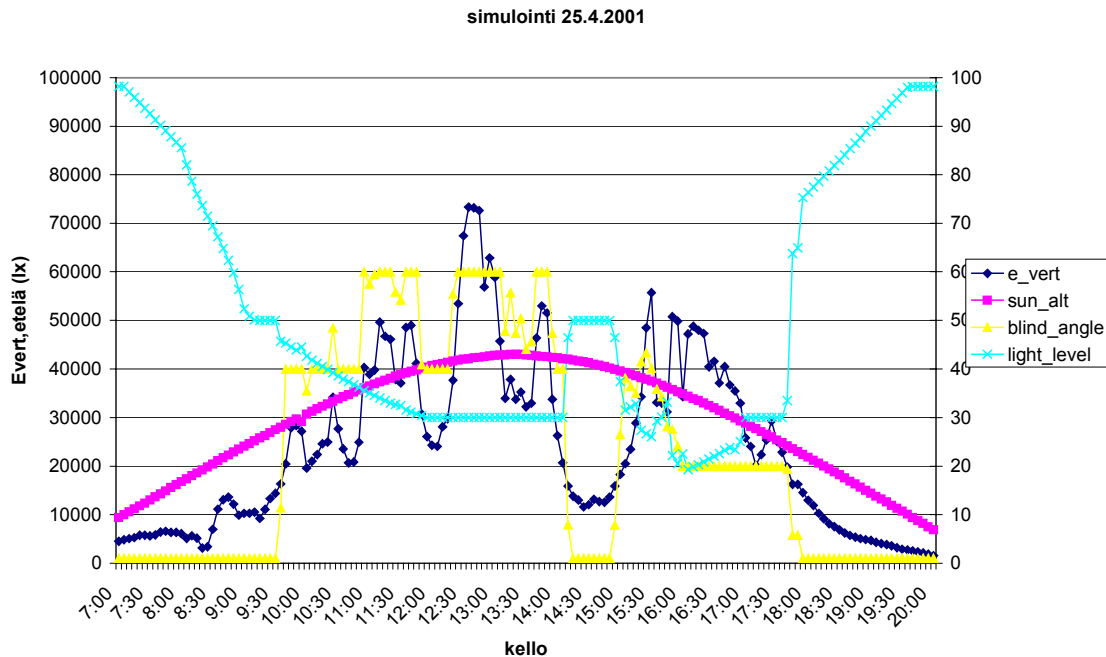


Kuva 136. Kaihtimen asennot aurinkoisena päivänä.

Säätöongelmat puolipilvisenä päivänä

Valonsäädön ja etenkin automaattisen kaihdinsäädön ongelmat korostuvat puolipilvisenä päivänä (kuva 137) ja päivänä, jolloin ulkovalaistuksen vaihtelut ovat nopeita ja useasti toistuvia. Nämä aiheuttavat toistuvasti kaihtimen säätötarvetta, mitä ei voida visuaalisen mukavuuden kannalta pitää suotavana. Päivänvalon nopeasti lisääntyessä on

kaihtimen kiinniohjauksen tapahduttava nopeasti. Aukiohjaukseen tulisi liittää riittävä viive, jotta peräkkäiset nopeat päivänvalon muutokset eivät aiheuttaisi tarvetta muuttaa kaihtimen asentoa. Riittävä viive lienee luokkaa 15–30 min. Kehittyneemmässä säätimessä viiveen pituus määräytyisi mitatun ulkovalodatan mukaan. Nopeat vaihtelut pidentäisivät avausviivettä ja päinvastoin.

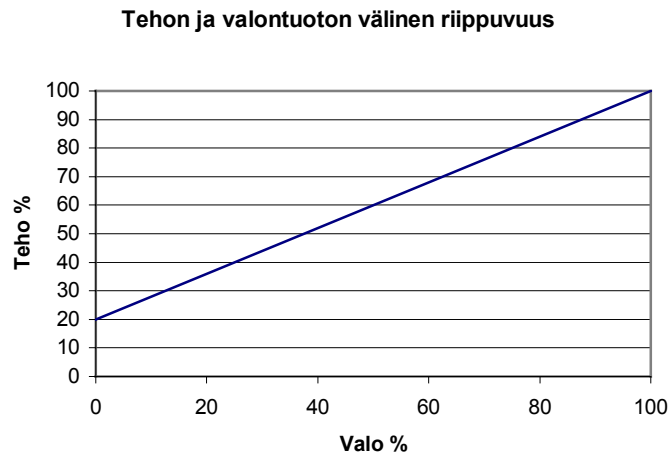


Kuva 137. Puolipilvisen päivän tulokset.

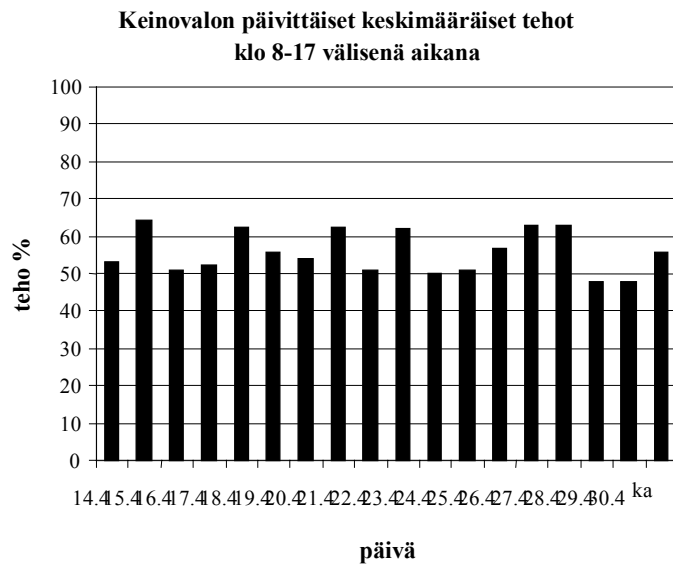
Energiankulutus

Kehitetyllä säätimellä varustetun valaistuksen energiankulutusta on mahdollista arvioida laskemalla simulointijakson eri päivien keskimääräinen valaisimen tehonkulutus. Tehonkulutusta on arvioitu laskemalla kutakin valotasoa vastaava tehonkulutus käyttämällä tyypillistä kuvan 138 mukaista loistevalaisimen kokonaistehon ja valontuoton välistä riippuvuutta. Kun valotaso on käytännössä nolla, loistevalaisin kuluttaa vielä n. 20 % nimellistehostaan. Tehoa kuluu liitántäilaittehäviöihin, lamppuvirran ylläpitoon ja katodien hehkutukseen. Eri laitevalmistajien liitántäilaitteiden väliset erot nimimitehossa ovat melko vähäiset.

Kuvassa 139 on esitetty simulointipäivinä lasketut keskimääräiset tehontarpeet verrattuna tilanteeseen, jossa valaisimet palaisivat nimellistehollaan koko ajan. Tarkastelujaksoksi on valittu päivittäin aika klo 8–17, mikä vastaa tyypillistä toimistotyöaika. Päivittäiset keskitehot vaihtelivat ajanjaksona 47,6 ja 64,4 %:n välillä, keskimääräisen keskitehon ollessa 55,7 %.



Kuva 138. Loistelampun tehon ja valontuoton välinen riippuvuus ohjattavalla elektronisella liitännälaitteella.



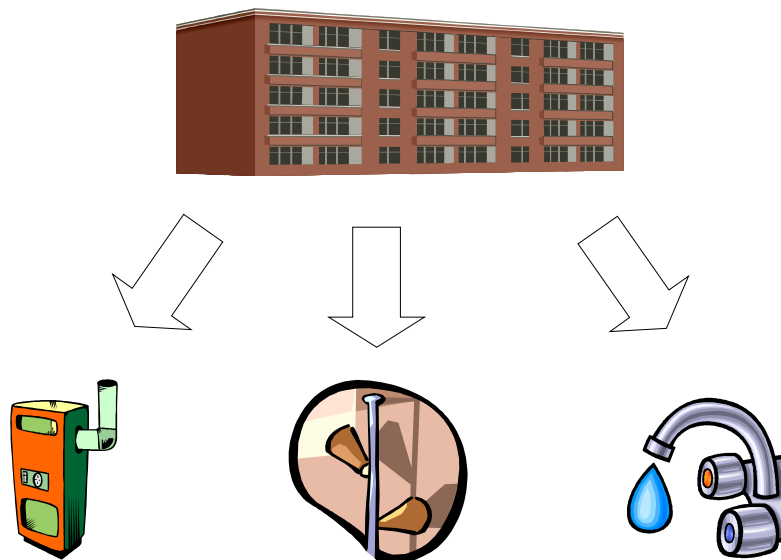
Kuva 139. Keskimääräiset valaistuksen tehot.

8. Rakennuksen kokonaisenergianhallintaan liittyviä tekijöitä

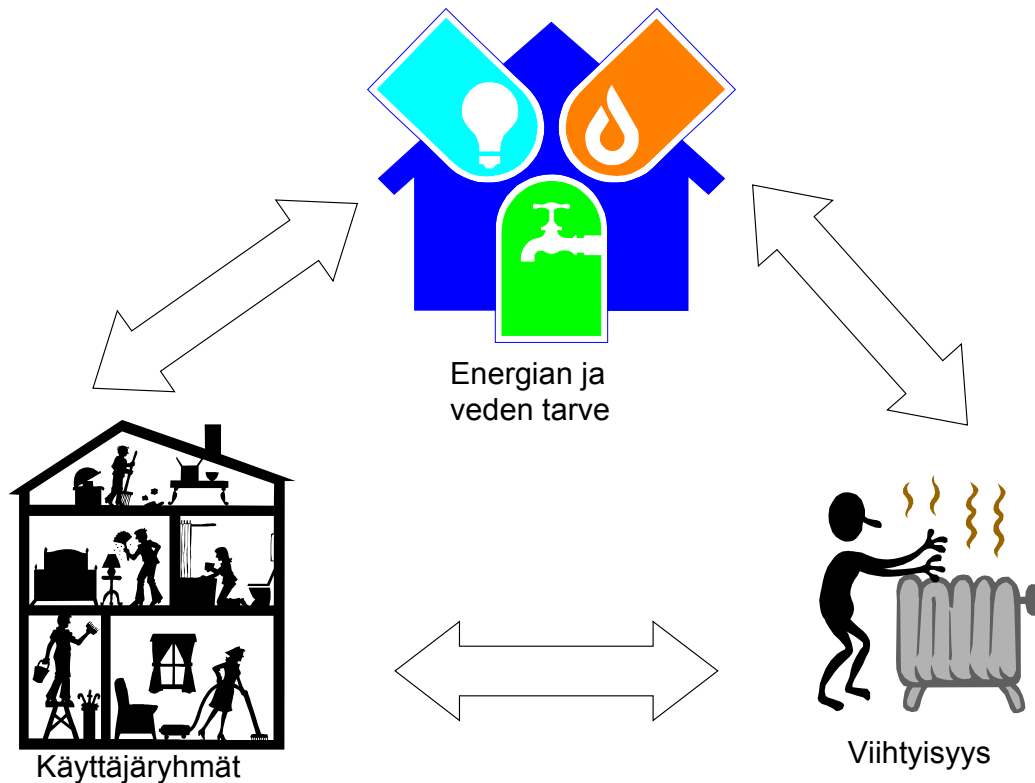
Tässä luvussa käsitellään erilaisia rakennusten kokonaisenergianhallintaan liittyviä tekijöitä. Luvussa 8.1 käsitellään kokonaisenergianhallintaongelmaa yleisesti ja luvussa 8.2 älykkään järjestelmäintegraation piirteitä. Luvussa 8.3 annetaan esimerkki kokonaisenergianhallinta-ajattelun soveltamisesta erääseen asuin kerrostaloon. Luvussa 8.4 etsitään asuinrakennuksen energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä todellisen mittausdatan perusteella. Muuttujien avulla voidaan rakentaa neuroverkkoihin tai sumeaan loogikkaan perustuva malli energiankulutuksen ennustamiseen. Luvussa 8.5 esitetään erilaisia vaihtoehtoja läsnäolon tunnistamiseksi asuinrakennuksissa.

8.1 Kokonaisenergianhallintaongelmasta

Kiinteistöjen ja kiinteistömassojen energianhallinnassa seurataan pääasiassa lämmityksen-, sähkön- ja vedenkulutuksia (kuva 140). Energianhallinnan tavoitteena on ylläpitää kiinteistössä hyvät sisäolosuhteet ja palvelutaso mahdollisimman pienellä energiankulutuksella ja -kustannuksella (Aho et al. 1996). Optimaalisessa energianhallinnassa ei pelkästään seurata kulutustietoja, vaan otetaan huomioon myös käyttäjien erilaiset tarpeet ja tavoiteltava viihtyisyystaso (kuva 141). Käytännössä tämä on toteutettavissa ohjaamalla talotekniikkajärjestelmiä siten, että ne jatkuvasti toimivat kokonaisuuden kannalta optimaalisesti.



Kuva 140. Rakennuksen energianhallinnassa tavallisesti seurattavat tekijät.



Kuva 141. Energiankäyttöön vaikuttavia tekijöitä.

8.1.1 Yksittäisten järjestelmien toiminta

On selvää, että laitteet ja järjestelmät eivät voi toimia kokonaisuuden kannalta optimaalisesti, mikäli ne eivät toimi tarkoituksenmukaisesti yksinäänkään. Energiankulutukseen ja sisäilmastoon vaikuttavia tekijöitä on laitepuolellakin hyvin monia. Yleisesti on tietenkin tärkeää, että valitut laitteet ja järjestelmät ovat laadukkaita, ne on mitoitettu ja asennettu oikein ja niitä osataan käyttää.

Ilmanvaihdon osalta tämä tarkoittaa mm. sitä, että ilmavirrat ovat riittäviä, jolloin rakennusten käyttäjien ei tarvitse tuulettaa ikkunoiden kautta, mikä johtaisi ylimääräiseen energiankulutukseen. Tilapäisten epäpuhtauskuormien poistamiseksi ilmanvaihdon tulisi olla tehostettavissa, ja vastaavasti rakennuksen käyttöajan ulkopuolella ilmavirtojen tulisi olla normaalitasoa pienempiä. Lämmitysjärjestelmän tulisi kyetä pitämään huonelämpötila useimpia rakennuksen käyttäjiä miellyttävällä tasolla, vaikka säätila vaihtelee ja rakennuksessa on sisäisiä lämpökuormia. Parhaassa tapauksessa huonelämpötila on yksilöllisesti valittavissa. Valaisimien tulisi antaa miellyttävää valoa energiataloudellisesti ja olla päällä vain tarpeen mukaan.

8.1.2 Keskitetyt energianhallintatoiminnot

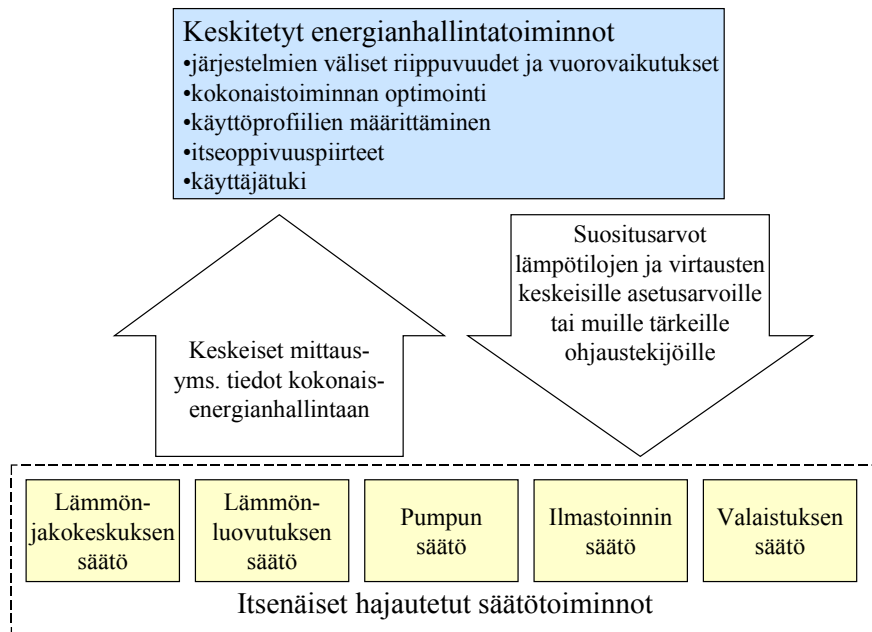
Rakennuksen monien teknisten järjestelmien tai laitteiden säätö ja ohjaus tapahtuu tyyppillisesti itsenäisillä, hajautetuilla säätötoiminnoilla, jotka erikseen tarkasteltuina voivat vaikuttaa hyvinkin ideaalisilta. Useimmiten näiden erillisten järjestelmien säätö ei ota huomioon muita järjestelmiä.

Tiedonsiirto muista järjestelmistä ei ole ollut perinteisesti mahdollista. Markkinoille tulleet (esim. LON) tai tulossa olevat avoimet tiedonsiirtoratkaisut mahdollistavat tiedonsiirron muista järjestelmistä tai laitteista, mutta nekaan eivät sellaisenaan riitä energianhallinnan kokonaisuoptimointiin. Järjestelmäintegrointi ei tarkoita pelkkää bitin siirtymistä, vaan sitä, että tietoa myös käytetään järkevästi.

Kuvassa 142 on havainnollistettu, mitä aito järjestelmäintegrointi voisi olla. Kuvan alaosassa esitetään joitakin taloteknisiä järjestelmiä tai laitteita. Esimerkiksi lämmönjakokeskus ostetaan tavallisesti kompaktina pakettina, johon kuuluvat myös lämmönjakokeskuksen säätöjärjestelmät. Usein kokonaisuus on testattu tehtaalla, ja se voi toimia hyvinkin. Toiminnassaan se ei kuitenkaan yleensä ota huomioon muita järjestelmiä.

Voidaan ajatella, että keskitettyjä energianhallintatoimintoja voisivat olla esimerkiksi järjestelmien välisten riippuvuuksien ja vuorovaikutusten huomioon ottaminen (esimerkiksi siten, että samanaikaisesti ei lämmitetä ja jäähdytetä), kokonaistoiminnan optimointi (esimerkiksi energiakustannusten minimointi), käyttöprofiilien määrittäminen (esimerkiksi vedenkulutusprofiileja voitaisiin hyödyntää lämmityksen tarpeenmukaisessa säädössä), itseoppivuuspiirteet (järjestelmien toiminnasta havaitaan automaattisesti tekijöitä, joita hyödynnetään energianhallinnassa) ja käyttäjätuki (kerätyn tiedon muokkaaminen käyttäjää tukeviksi palveluiksi).

Näiden keskitettyjen energianhallintatoimintojen toteuttamisessa hyödynnetään järjestelmistä kerättävää keskeistä mittaus- yms. tietoa. Palautetietona hajautetut järjestelmät saisivat esimerkiksi suositusarvoja lämpötilojen ja virtausten keskeisille asetusarvoille tai muille tärkeille ohjaustekijöille. Tämän palautetiedon erilliset järjestelmät voisivat optimaalisesti toimiessaan ottaa huomioon.

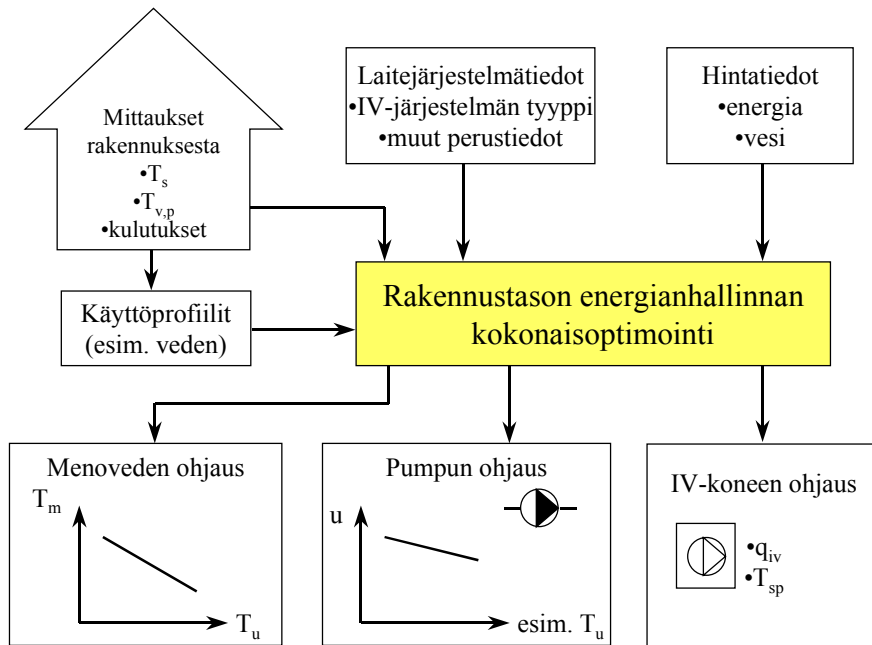


Kuva 142. Keskitettyjen ja hajautettujen energianhallintatoimintojen periaate.

Kuvassa 143 on esimerkki rakennustason energianhallinnan kokonaisoptimoinnista. Rakennuksesta on saatavissa paljon erilaista mittaus- ja ohjaustietoa, jota voitaisiin nykyistä paremmin hyödyntää laitejärjestelmien säädössä ja yhteiskäytössä. Rakennuksesta tehdään esimerkiksi energiaseurantaa tai laiteteknisten järjestelmien toiminnan seuranta varten erilaisia mittauksia. Energian- ja vedenkulutusseuranta tehdään vähintäänkin kuukausitasolla, mutta usein kulutustietoja on mahdollista saada paljon tiheimmälläkin välillä, esimerkiksi tuntitasolla. Kulutustiedoista voidaan muodostaa käyttöprofiileja automaattisesti. Profiileista saataisiin esimerkiksi tieto, milloin tarkasteltavassa rakennuksessa käytetään lämmintä vettä, jota voitaisiin hyödyntää muidenkin järjestelmien ohjauksessa.

Lisäksi rakennuksesta tiedetään sen laitejärjestelmät sekä käytettävissä olevan energian hinta. Kun otetaan huomioon tavoiteltava palvelu- ja viihtyisyystaso, käytettävissä olevia tietoja voitaisiin hyödyntää rakennustason energianhallinnan kokonaisoptimoinnissa, jolloin eri laitejärjestelmille annettaisiin jokaisena hetkenä kokonaisuuden kannalta ideaalinen ohjaustieto. Tyypillisen asuinkerrostalon tapauksessa näitä ohjaustietoja voisivat olla esimerkiksi radiaattoriverkoston menoveden lämpötila, pumpun virtaama ja ilmanvaihdon määrä.

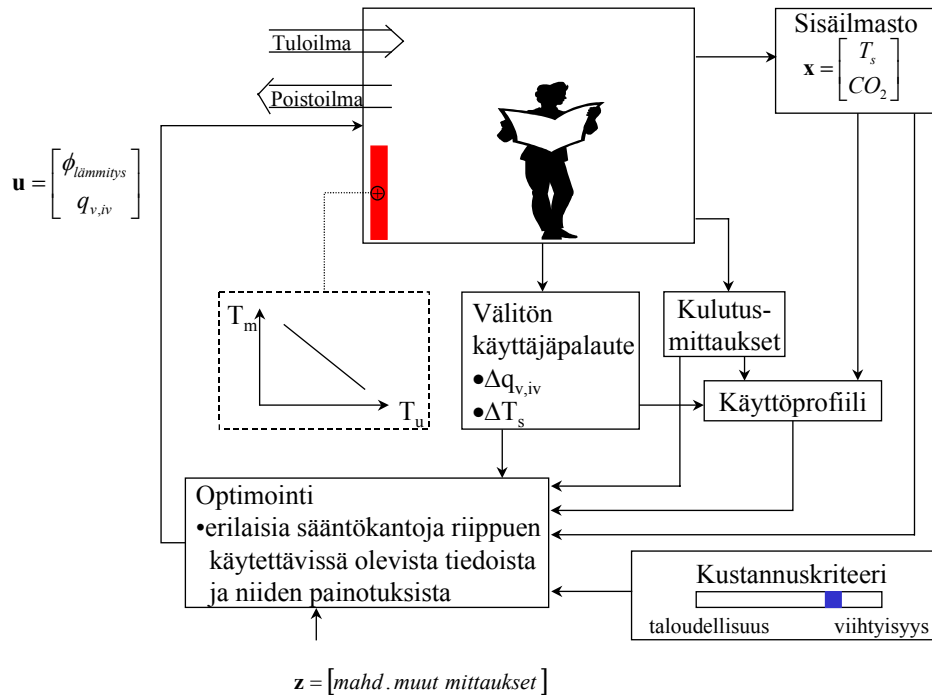
Rakennustason energianhallinnan kokonaisoptimointi on erilainen riippuen laitejärjestelmän mukaan. Itseoppivuutta hyödyntämällä voitaisiin kehittää jokaiseen rakennukseen mukautuva, kokonaisuuden kannalta paras mahdollinen energianhallintaratkaisu. Toinen vaihtoehto on kehittää joihinkin tyyppijärjestelmiin tai -rakennuksiin soveltuvia ratkaisuja.



Kuva 143. Esimerkki rakennustason energianhallinnan kokonaisuoptimoinnista.

Kuvassa 144 esitetään huone- tai huoneistotason optimoinnin mahdollinen periaate asuinkerrostalossa. Sisäoloja tarkkaillaan mittaamalla huoneilman lämpötila ja tarvittaessa myös kosteus- tai hiilidioksidipitoisuus. Asukkaalla on myös mahdollisuus antaa välitöntä käyttäjäpalautetta ja siten vaikuttaa sisäilmastoon. Palaute voisi olla esimerkiksi tieto, että huoneistossa on liian kuuma tai kylmä tai että ilmanvaihtoa pitäisi lisätä tai vähentää. Käyttäjäpalautteen voisi antaa esimerkiksi seinässä olevan paneelin kautta tai vaikka matkapuhelimella.

Khoo & Shimmin (2001) ovat kehittäneet intranetin kautta toimivan palautejärjestelmän toimistokohteisiin, jotka on yhdistetty LI-järjestelmien säätöön. Vastaavaa järjestelmää olisi mahdollista soveltaa myös asuinrakennusten kokonaisenergianhallintaan. Siinä käyttäjä antaa pc:ltään kvalitatiivista tietoa sisäoloista ja fyysisistä oireistaan. Esimerkiksi lämpötila voi olla liian kylmä tai liian kuuma, kosteus liian kuiva tai liian kostea ja käyttäjä voi ilmoittaa kärsivänsä esimerkiksi päänsärystä tai kuivista silmistä. Kun käyttäjä on asettanut valittavissa olevat parametrit, ne siirretään web-palvelimelle toimiston intranetin kautta, jossa ne sumeaa logiikkaa hyödyntäen muunnetaan käyttäjävasteeksi ja edelleen talotekniikkajärjestelmien ohjauksiksi tai asetusarvoiksi. Tällä menetelmällä käytettävien mittausten määrää voidaan pienentää, kun ihmiset toimivat tavallaan antureina.



Kuva 144. Huonetason optimoinnin periaate.

Erityisesti jos asukas itse maksaa käyttämästään energiasta, hänellä voisi olla käytössään myös joku tapa ilmoittaa automaatiojärjestelmälle, haluaako hän käyttää järjestelmiä taloudellisuus- tai viihtyisyystilassa. Nämähän eivät aina välttämättä ole toisilleen vaihtoehtoisia, mutta kytkin voisi olla suuntaa antava.

Käytössä voi olla myös huoneistokohtaiset kulutusmittaukset, ainakin vedenkulutuksen osalta. Sisäilma- ja kulutusmittauksista voidaan muodostaa käyttöprofiileja, joiden avulla saadaan tietoa esimerkiksi huoneiston käyttöajoista.

Kaikkia edellä kuvattuja tietoja ja mahdollisia muita mittauksia voitaisiin hyödyntää huoneistotason laitejärjestelmien ohjauksen optimoinnissa. Käytettävissä olevien tietojen ja niiden välisten painotusten sekä erilaisten laitejärjestelmien mukaan optimoinnissa olisi käytössä vaihtoehtoisia ratkaisuja.

8.2 Älykäs järjestelmäintegraatio

8.2.1 Ominaisuuksia

Teknologiamielessä älykäs säätöjärjestelmä käsittää järjestelmän eri elementtien integroinnin avoimeen järjestelmäarkkitehtuuriin. Tällaisia elementtejä ovat anturit, toimilaitteet, mittaus- ja säätöalgoritmit, ohjelmistot sekä tuote- ja prosessimallit. Tämän li-

säksi integroiduille järjestelmäratkaisuille esitetään *toivottavia ominaisuuksia*, joita on listattu taulukossa 31.

Taulukko 31. Älykkään säätöjärjestelmän toivottavia ominaisuuksia.

Toivottu ominaisuus	Ominaisuuden kuvaus
älykkyys	kyky oppia ja mukautua reaaliaikaisessa dynaamisessa käyttöympäristössä
avoimuus	mahdollisuus integroida uusia tai nykyisiä "kaupan hyllyltä saatavia" laitteisto- ja ohjelmistokomponentteja räätälöidyiksi sovelluksiksi
modulaarisuus	ohjelmisto- ja laitteistokomponenttien liittäminen "plug-and-play"-tekniikalla
skaalattavuus	päivitysten helppo uudelleenkonfigurointi räätälöityihin sovellustarpeisiin
taloudellisuus	suuren hyödyn saavuttaminen pienellä kustannuksella eri vaiheissa (alkuhankinta, järjestelmäintegraatio sekä elinkaaren aikainen ylläpito)
huollettavuus	robusti käyttö, nopea korjattavuus, helppo huolto

8.2.2 Saavutettavissa olevia vaikutuksia

Tässä luvussa arvioidaan integroidulla tai kehittyneellä säädöllä saavutettavissa olevia energiansäästö- ym. vaikutuksia toteutuneiden kansainvälisten hankkeiden perusteella.

ATLAS

Suuressa eurooppalaisessa ATLAS-projektissa kerättiin tietoa eri energiateknologioista (http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/html/introatlas.html). Tiedot kerättiin valituista, innovatiivisista teknologioista kaikilla energian tuotannon (uusiutuvat tuotantomuodot, yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto) ja energian käytön (teollisuus, rakennukset ja liikenne) pääsektoreilla. Tiedot kerättiin seuraavista pääluokista:

- teknologian tai prosessin markkinatilanne
- myötävaikutus EU-tason poliittisiin tavoitteisiin
- teknologian tekninen ja ei-tekninen status
- nykyinen T&K ja tulevaisuuden tarpeet.

ATLAS-hankkeessa arvioitiin myös energianhallinnalla ja säädöllä saavutettavissa olevaa energiansäästöpotentiaalia (Taulukko 32) ja vastaavaa kasvihuonekaasujen päästöjen vähentymistä (Taulukko 33), jos uusia ratkaisuja otettaisiin käyttöön vuoteen 2010 mennessä.

Taulukko 32. Säädön parantamisella saavutettavissa olevat, ATLAS-projektissa arvioit-
 dut energiansäästöpotentiaalit (% loppuenergiankulutuksesta MJ/a).

Sektori	Tilojen lämmitys	Veden lämmitys	Valaistus	Muu
Asuinrakennukset	7	7	-	-
Muut rakennukset	11	10	15	6

Taulukko 33. Säädön parantamisella saavutettavissa olevat kasvihuonekaasujen piene-
 nemiset (T/PJ) ATLAS-projektin mukaan.

Sektori	CO ₂	SO ₂	NO _x
Asuinrakennukset	56	0,18	0,32
Muut rakennukset	64	0,41	0,23

ATLAS-projektin mukaan lupaavimmat uudet, kehitettävät ratkaisut edellä mainittujen
 potentiaalien saavuttamiseksi ovat

- ilmanvaihdon, valaistuksen, lämmityksen ja jäähdytyksen tarpeen mukaiset säätöstrategiat
- laitekuormien säätö ja hallinta
- lämmitys- ja jäähdytysprosessien optimisäätö
- sumeaaan logiikkaan perustuvat järjestelmät käyttäjien tarpeiden joustavaan kuvaamiseen
- neuroverkkopohjaiset asiantuntijajärjestelmät, jotka "älykkäästi" vastaavat käyttäjätarpeisiin
- luotettavat, ei-peukaloitavat, ei-tunkeilevat järjestelmät saman (suuren) liikera-
 kennuksen eri osien energiankulutuksen monitorointiin
- edullinen vian havaitseminen
- adaptiiviset PID-säätimet
- sumeat säätimet.

EDIFICIO

EDIFICIO-projektissa integroitiin toimistohuoneen LI-järjestelmän sekä valaistuksen ja
 kaihtimien säädöt optimaalisen termisen ja visuaalisen viihtyisyyden saavuttamiseksi
 (Priolo et al. 2001). Järjestelmää testattiin simuloinnein sekä eri puolilla Eurooppaa
 kolmessa toimistorakennuksessa, joissa laitetekniikka vaihteli huomattavasti.

Sveitsissä testit saatiin todellisessa kohteessa tehdyksi kattavimmin. Sveitsissä ei ollut
 lainkaan käytössä koneellista ilmanvaihtoa, vaan siellä säädettiin lämmitystä radiaatto-

rein sekä valaistusta keinovalon ja luonnonvalon käytön kautta. Ikkunoissa oli mootto-roidut, säädettävät kaihtimet. Integroidulla säädöllä säästettiin 40 % kokonaisenergiankulutuksesta talvella, 18 % kesällä ja 7 % välikautena verrattuna perinteisen säätöratkaisun käyttöön. Vuoden yli laskettuna säästövaikutus oli 24 %, vaikka sähköenergiankulutus kasvoi. Kun integroitua säätöä verrattiin parannettuun perinteiseen säätöön, jossa oli käytössä lämpötilan yöpudotus, kokonaisenergiansäästö oli silti 18,5 %.

Tuloksissa laskennallinen terminen viihtyisyys oli samalla, hyvällä tasolla kuin perinteiselläkin järjestelmällä säädettynä, mutta visuaalinen viihtyisyys parani. Käyttäjäkyselyissä havaittiin, että käyttäjä on tyytymätön, jos ei pysty riittävästi vaikuttamaan säätöjärjestelmän toimintaan. Havaittiin, että ennakoinnissa pitäisi käyttäjän puuttuminen järjestelmän toimintaan ottaa huomioon pitkäaikaisessa ennustamisessa. Käyttäjäkyselyä tulkittaessa on tosin otettava huomioon, että käyttäjien määrä oli pieni ja toinen puoli oli tyytyväinen uuteen järjestelmään.

Suomessa järjestelmää testattiin ilmalämmitetyssä toimistorakennuksessa, jossa luonnonvalon määrää ei pystytty automaattisesti säätämään. Testijakso oli lämmin syksy, jolloin asettamalla huonelämpötila riittävän korkealle saatiin aikaan lämmitystarvetta. Verrattuna perinteiseen säätöjärjestelmään EDIFICIO-järjestelmällä saavutettiin 14 %:n kokonaisenergiansäästö. Viihtyisyys oli samaa tasoa kuin perinteisellä järjestelmällä vastaavissa olosuhteissa.

SCATS

SCATS-projektissa kehitettiin adaptiivinen algoritmi huonelämpötilan asetusarvon määrittämiseksi, joka perustuu laajaan tutkimukseen termisestä viihtyisyydestä ja hyödyntää ulkolämpötilaa (Nicol & McCartney 2001). Simuloinneissa algoritmilla saavutettiin 17,7 %:n energiansäästö vuositasolla verrattuna tilanteeseen, jossa huonelämpötila pidetään vakiona. Jos huonelämpötilan asetusarvoa muutetaan vuodenaikojen mukaan, saavutetaan sillä vakioasetusarvoon verrattuna aavistuksen suurempi säästö (18,3 %). Mutta *matalaenergiarakennuksissa adaptiivisella algoritmilla saavutetaan suuremmat säästöt kuin vuodenajan mukaisella vakioasetusarvolla.*

Käytössä olleen laitetekniikan mukaan energiankulutus saattoi jopa kasvaa todellisissa rakennuksissa adaptiivista algoritmia käytettäessä. Myös viihtyisyys kasvoi merkittävästi. Tämä viittaa ainakin osittain siihen, että rakennuksissa alun perin käytettiin talvella liian matalaa ja kesällä liian korkeaa huonelämpötilan asetusarvoa.

Kehitetyllä adaptiivisella algoritmilla voidaan siis saavuttaa noin 10–20 %:n energiansäästö vakioasetusarvon käyttöön verrattuna. Lisäksi viihtyisyys paranee ja algoritmi on erityisen käyttökelpoinen myös matalaenergiarakennuksissa.

BYSYS

BYSYS-projektin tavoitteena oli kehittää älykäs rakennusten energianhallintajärjestelmä, joka sisältää helpon ja vaistonvaraisen dialogin käyttäjän, energiankuluttajan, energiantoimittajan ja kehitetyn energianhallintajärjestelmän kesken sekä todellisten energivirtojen ja -kustannusten visualisoinnin (Stadler et al. 2001). Lisäksi tavoitteena oli tutkia kehitetyn järjestelmän energiansäästöpotentiaalia.

Projektin keskeiset tulokset olivat:

1. EIB-väylää käyttävän rakennusautomaatiojärjestelmän liittäminen Internetiin ja energialaskureihin. Tällä rakenteella mahdollistettiin tiedon välittäminen kenelle tahansa loppukäyttäjälle.
2. Käyttäjän mahdollisuus päättää, mitä automaatiovaihtoehtoja sovelletaan yksittäisessä huoneessa.
3. Käyttäjä saa webin kautta tietoa energiankulutuksesta, päästöistä ja kustannuksista. Tietojen avulla käyttäjä voi arvioida energiankulutustaan ja muuttaa käyttötapaan.
4. Kehitetyn paneelin kautta käyttäjä saa tietoa olosuhteista ja järjestelmien käyttöta-voista.

Pilottiasennuksessa lämmitysenergiaa säästettiin noin 10 % (joissakin toimistoissa jopa 50 %) ja valaistusenergiasäästöt olivat 23–56 %.

BUILTECH

BUILTECH-projektissa oli yhtenä tavoitteena kehittää sumea päätöksentekoa algoritmi, jolla säädetään rakennuksen vyöhykkeen energia- ja ympäristöparametreja, jotta energiankulutus pienenee ja sisäolojen viihtyisyys paranee (Kolokotsa & Stavrakakis 2001). Kehitetty energianhallintajärjestelmä säätää ja monitoroi lämmityksen, jäähdytyksen, ilmanvaihdon ja valaistuksen energiankulutusta.

Lisäksi kehitetty säätöalgoritmi implementoitiin siten, että älykortin kautta saatiin tietoa käyttäjän termiseen ja visuaaliseen viihtyisyyteen sekä sisäilman laatuun liittyvistä preferensseistä. Järjestelmä implementoitiin viiteen rakennukseen ja sillä saavutettiin yli 20 %:n energiansäästöt verrattuna olemassa olevien perinteisten säätöstrategioiden käyttämiseen. Järjestelmän takaisinmaksuaika on 7 vuotta.

8.2.3 Vaihtoehtoisia integrointiperiaatteita

INTECOM

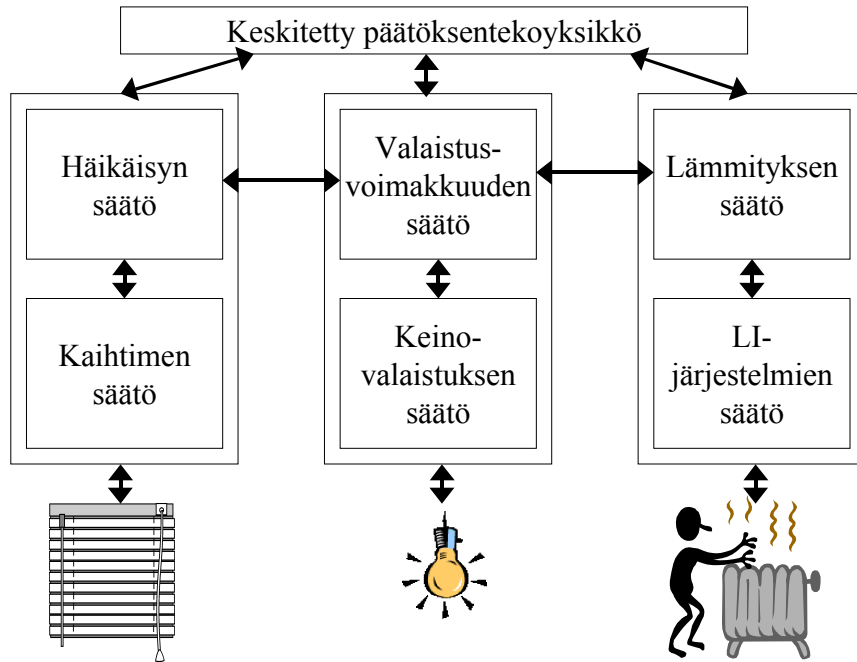
INTECOM-projektissa tavoitellaan säätöjärjestelmien integroimisessa tarvittavien tietojen määrittelyä käytettäessä eri laitetoimittajien säätimiä (Husaunndee et al. 2001). Projektissa tarkastellaan seuraavia säätöstrategioita:

- keinovalaistuksen ja kaihtimien asennon integrointi siten, että optimoidaan luonnonvalon käyttöä
- lämmityksen tai jäähdytyksen ja kaihtimien säädön integrointi siten, että talvella hyödynnetään aurinkokuorma ja kesällä pienennetään auringon aiheuttamaa lämpökuormaa sekä
- lämmityksen tai jäähdytyksen, keinovalaistuksen ja kaihtimien säädön integrointi.

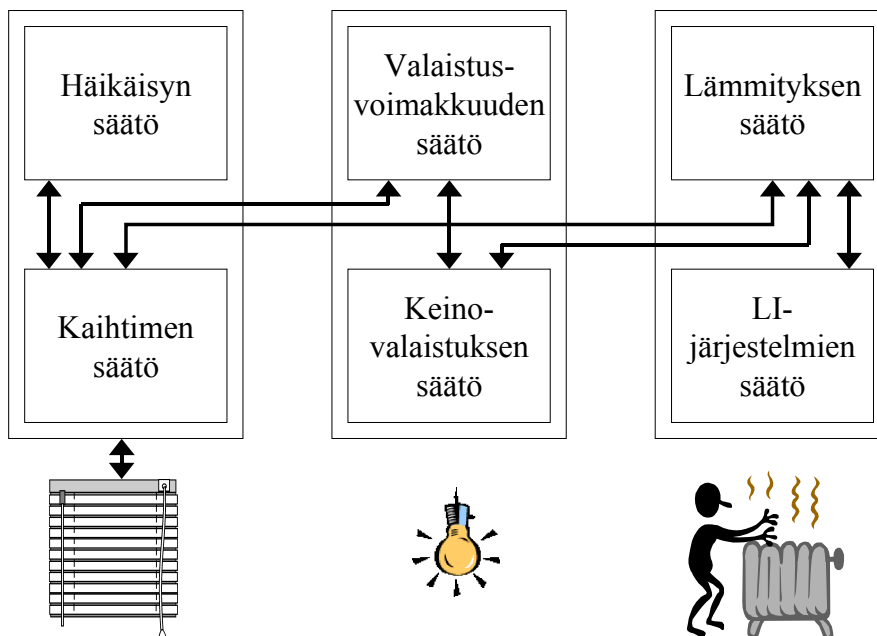
Integroitujen strategioiden implementointi sisältää määrittelyt päätöksenteon arkkitehtuurista ja säätimien sisäisistä uusista toiminnallisista moduuleista, jotta kommunikointi muiden sovellusten säätimien kanssa on mahdollista. Husaunndee et al. (2001) esittävät näiden ongelmien ratkaisuksi konseptit tavoite- ja laiteorientoituneista säätimistä:

- *Tavoiteorientoitunut säädin* on "älykäs säädin", joka käyttää eri sovellusten toimilaitteiden resursseja tietyn tavoitteen saavuttamiseksi. Vyöhyketasolla tavoitteet ovat visuaalinen viihtyisyys (valaistusvoimakkuustaso, häikäisy–kontrasti -rajoitukset) ja terminen viihtyisyys. Tavoiteorientoituneet säätimet ovat nimiltään: lämmityksen säätö, häikäisyn säätö ja valaistusvoimakkuuden säätö.
- *Laiteorientoitunut säädin* on itse asiassa standardisäädin, joka ohjaa yhden sovelluksen toimilaitetta. Näin on järjestelmissä, joissa jokaisella sovelluksella on oma itsenäinen säädin. INTECOM-projektissa laiteorientoituneet säätimet ovat: LI-järjestelmän säädin (esimerkiksi puhallinkonvektorin PI-säädin), keinovalaistuksen säädin ja kaihtimen säädin.

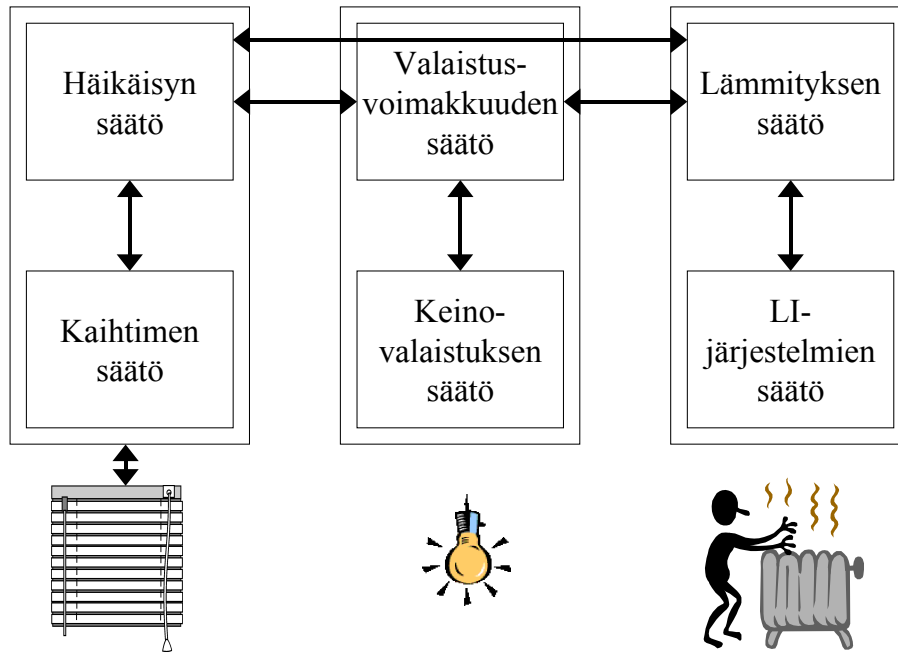
Koska lisäksi toimilaitteita voidaan käyttää eri tavoitteiden saavuttamiseen, tarvitaan toiminnallisia moduuleja, jotka määrittävät eri toimilaitteiden keskinäiset prioriteetit, kun reagoidaan eri tavoitteisiin. Kuvissa 145–147 esitetään erilaisia tapoja ratkaista edellä mainitut asiat.



Kuva 145. Vyöhyke- tai keskuslaitetasolla oleva keskitetty päätöksentekoyksikkö valvoo tavoiteorientoituneita säätimiä ja päättää, millä säätimellä on etusija tiettyyn sovellukseen. Jokainen laiteorientoitunut säädin on kytketty yhteen tavoiteorientoituneeseen säätimeen.



Kuva 146. Jokainen laiteorientoitunut säädin määrittää oman prioriteettinsa ja saa tietoa tarkoituksenmukaisista tavoiteorientoituneista säätimistä.

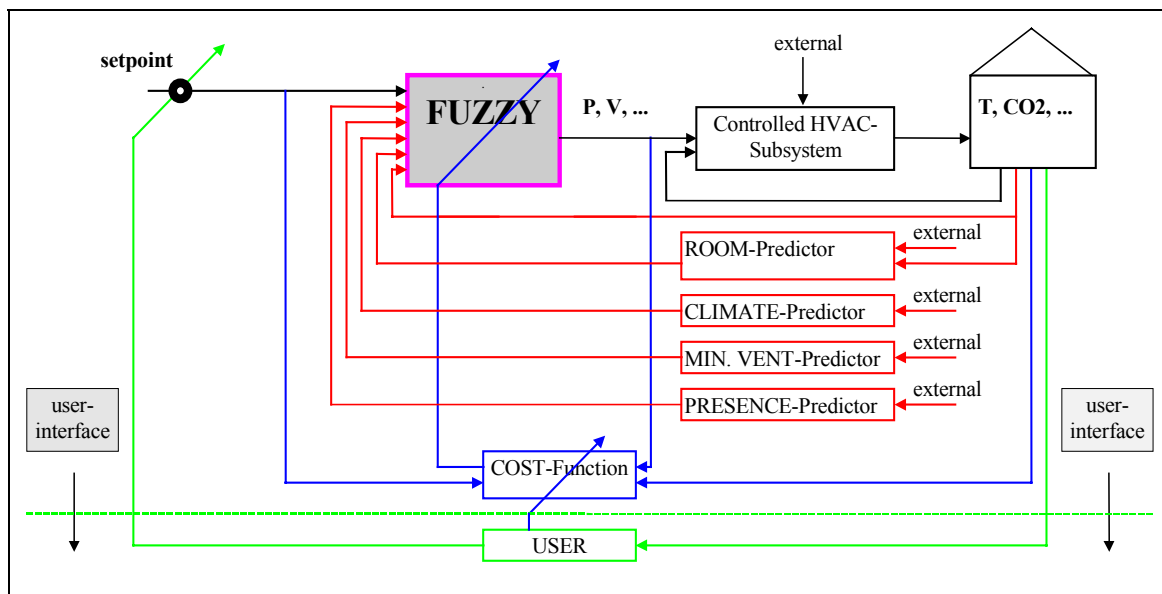


Kuva 147. Päätöksenteko-ominaisuudet ovat tavoiteorientoituneiden säätimien tasolla, jotka ovat yhteydessä toisiinsa ratkaistakseen ristiriitatilanteita. Jokainen tavoiteorientoitunut säädin on yhteydessä vain yhteen laiteorientoituneeseen säätimeen.

INTECOM-projektissa kuvan 147 konfiguraatio valittiin implementoitavaksi, koska se on joustavin eri laitetoimittajien järjestelmiä sisältävässä sovelluksessa. Tavoiteorientoituneet säätimet sisältävät kaikki tiedonsiirtoprotokollat ja kuka tahansa laitevalmistaja voi tehdä ne, kunhan verkossa siirrettävät tiedot on määritelty. Lisäksi tässä vaihtoehdossa kehityskustannus pienentyy, koska säätöstrategiat esiintyvät olemassa olevien standardisäätimien lisäkerroksina ilman, että niiden input-output-tietoja muutetaan.

EDIFICIO

EDIFICIO-projektissa integroitu säätö toimistohuoneen optimaalinen terminen ja visuaalinen viihtyisyys pyrittiin saavuttamaan minimienergiankulutuksella (Priolo et al. 2001). Kuvassa 148 on esitetty perusjärjestelmä yksinkertaistettuna. Kuvassa näkyvät järjestelmän kolme eri tasoa. Sisimmässä piirissä säädetään eri muuttujia asetusarvojen perusteella. Keskimmaisessä piirissä sumea säädin määrittää kulloinkin tarvittavat parametrit (lämmitysteho, ilmamäärä, keinovalon määrä, kaihtimien asento) haluttujen asetusarvojen saavuttamiseksi. Tässä hyödynnetään neuroverkkosovelluksilla ennustettua tietoa huoneen tulevasta lämpötilasta, ulkolämpötilasta, minimi-ilmanvaihdon tarpeesta sekä ihmisten läsnäolosta huoneessa. Uloimmassa piirissä optimoidaan sumean säätimen jäsenyysfunktioiden parametreja ottaen huomioon edellä mainittujen tekijöiden lisäksi myös käyttäjältä saatu palaute.



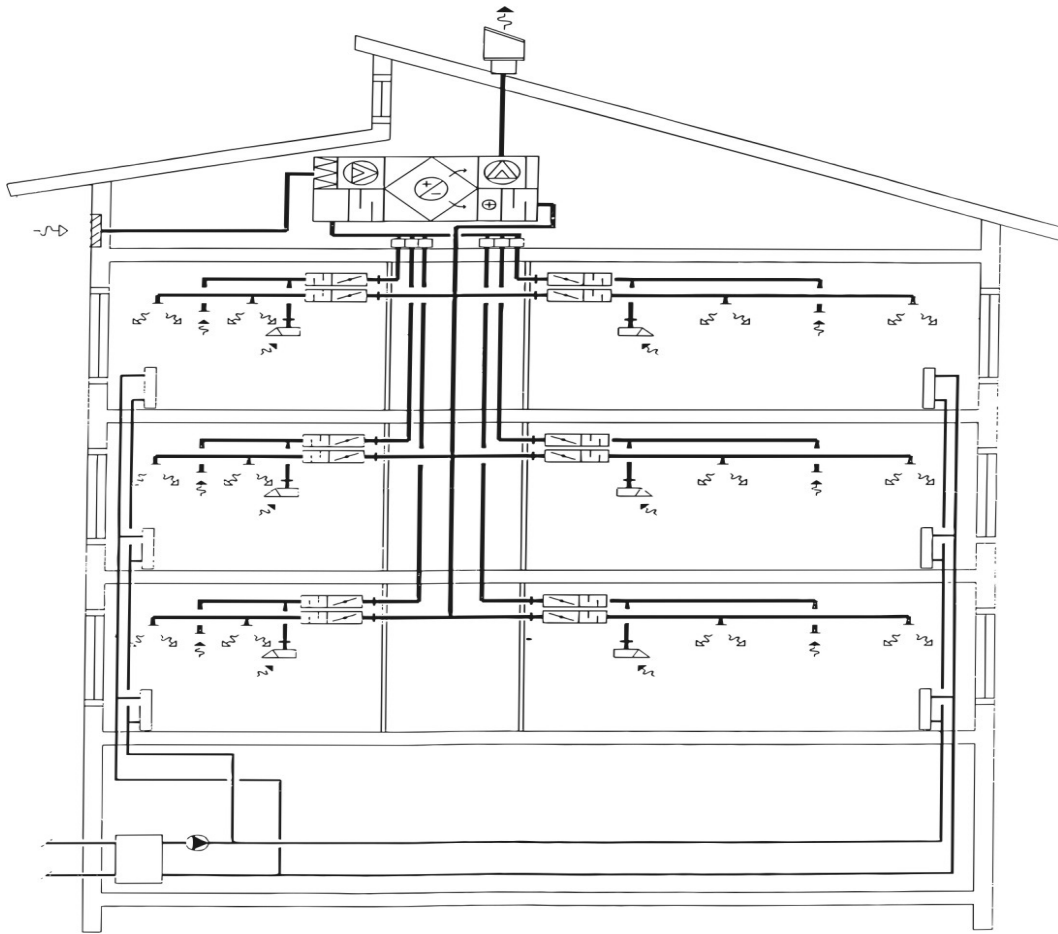
Kuva 148. EDIFICIO-järjestelmä säädön kannalta.

8.3 Esimerkki kokonaisenergianhallintakonseptista

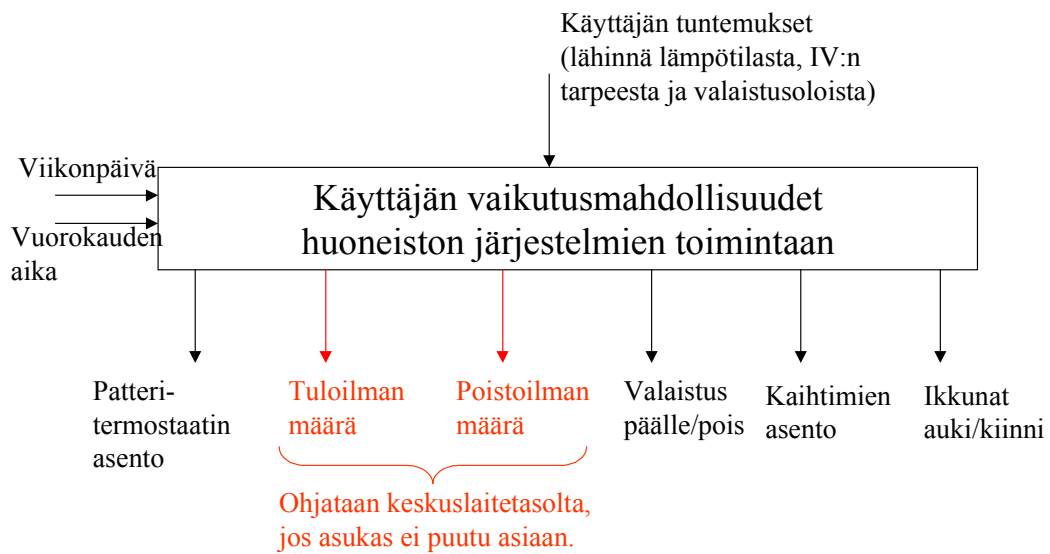
Tässä raportissa kuvataan esimerkki kokonaisenergianhallinnasta, jossa määritellään esimerkkikohteeseen, kuinka projektissa kehitettyjä säätömenetelmiä sovellettaisiin kokonaisenergianhallintaan. Tavoitteena on siis esitellä, mitä vaatimuksia, edellytyksiä ja mahdollisuuksia olisi uusien menetelmien soveltamisessa esimerkkikohteeseen.

8.3.1 Kohteen järjestelmät

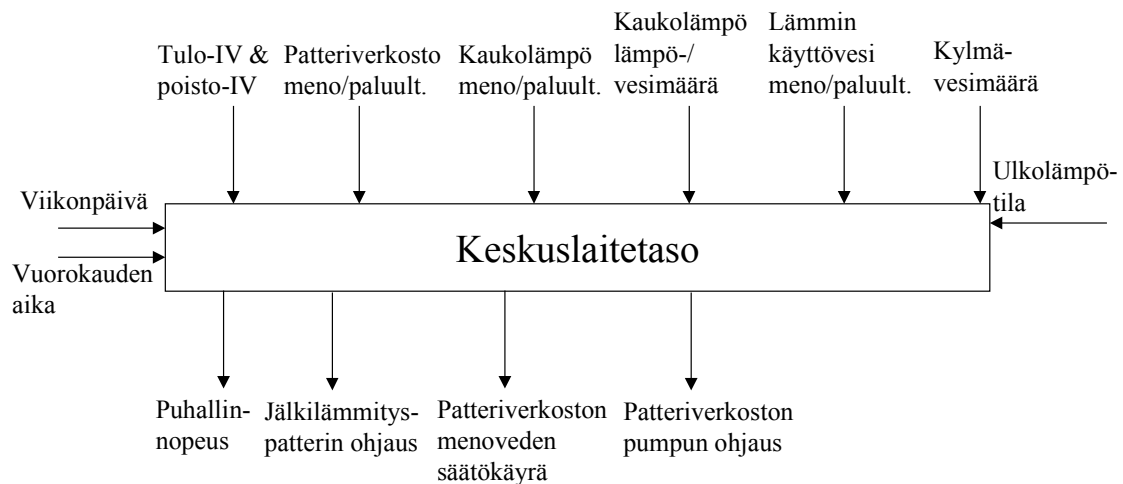
Kuvassa 149 näkyvät esimerkkikohteen perusjärjestelmät. Rakennuksen peruslämmitys hoidetaan kaukolämpöön liitetyillä radiaattoreilla. Lisäksi rakennuksessa on huoneisto-kohtainen tulo-poisto-IV, jossa on keskitetty lämmöntalteenotto ja tuloilman lämmitys. Kussakin huoneistossa on sekä tulo- että poistupuolella säätöpelti. Liesikupu on poistokanavassa ilman virtaussuunnassa ennen huoneiston säätöpeltiä. Toinen poistopiste on kosteissa tiloissa. Siis huoneistoissa voidaan vaikuttaa vain tuloilman määrään, mutta ei sen lämpötilaan. Jokaisen huoneiston poistoilma viedään erillisellä kanavalla lämmöntalteenottolaitteelle.



Kuva 149. Esimerkkikohde järjestelmineen.



Kuva 150. Keskeisimmät huoneistokohtaiset asiat, joihin asukas voi vaikuttaa.



Kuva 151. Keskuslaitetaso keskeisimmät tiedot.

Kuvassa 150 on esitetty huoneistotasolla keskeisimmät käyttäjän vaikutusmahdollisuudet. Huoneistoissa ei ole automaatiojärjestelmään kytkettyjä perusmittauksia, joten käyttäjän toimintaan vaikuttavat eniten tuntemukset (lämpötila, tunkkaisuus, häikäisy jne.) ja jossain määrin ehkä erilliset lämpötilamittaukset. Ensisijaisia toimintoja, joilla asukas vaikuttaa energiankulutukseen, ovat patteritermostaatin asentojen käsisäädöt, valaistuksen kytkeminen päälle ja pois päältä, kaihtimien asentojen manuaaliset muutokset sekä ikkunoiden avaaminen ja sulkeminen. Lisäksi käyttäjä voi vaikuttaa tässä esimerkkikohteessa tulo- ja poistoilmamääriin. Jos hän ei puutu ilmamääriin, niitä ohjataan automaattisesti keskuslaitetasolta esimerkiksi ajastimien avulla.

Kuvassa 151 on esitetty keskeisimmät keskuslaitetasolla vaikuttavat tekijät. Keskuslaitetasolla tiedetään ainakin tulo- ja poistoilmamäärät, patteriverkoston meno- ja paluuv veden lämpötilat, kaukolämmön meno- ja paluuv veden lämpötilat, lämpimän käyttöveden meno- ja paluuv veden lämpötilat, kaukolämmön lämpö- ja vesimäärät sekä kylmävesimäärä. Lisäksi aina on tiedossa viikonpäivä ja kellonaika sekä ulkolämpötila. Esimerkkikohteessa keskeisimpiä energianhallintaan vaikuttavia, edellä mainittujen tietojen perusteella ohjattavia tekijöitä ovat puhallinnopeudet, jälkilämmityspatterin ohjaus, patteriverkoston menoveden säätökäyrän asettelu sekä patteriverkoston pumpun ohjaus.

8.3.2 Kehitettyjen menetelmien soveltaminen esimerkkikohteeseen

Radiaattoriverkosto ja kokonaisenergianhallinta

Radiaattoriverkoston paluuvesi voitaisiin ohjata ilmastointikoneen lämmityspatterille (ks. luku 4.3).

Kompensointikäyrän automaattiseen aseteluun tarvitaan tietoa huonelämpötiloista. Erillisiä huonelämpötilan mittauksia ei välttämättä tarvittaisi, koska poistoilman lämpötila antaa tietoa huoneilman lämpötiloista. Tosin kuvan tapauksessa keittiön poistoilma ohjataan samaan kanavistoon muiden huoneiden poistoilman kanssa, jolloin ruuanlaiton lämpö voi nostaa poistoilman lämpötilaa.

Ilmavirtojen muutokset vaikuttavat lämmöntarpeeseen. Radiaattoreiden pitäisi siis luovuttaa enemmän lämpöä, kun tuloilmavirta kasvaa (tehostustilanne) ja vähemmän, kun ilmavirta pienenee (esim. poissaoloaika) normaalitasosta. Erityisesti ilmavirran muutokset vaikuttavat lämmöntarpeeseen koneellisella poistolla varustetuissa rakennuksissa. Kuvan esimerkkikohteessa on myös koneellinen tuloilmanvaihto, ja mikäli tuloilma lämmitetään likimain huoneilman lämpöiseksi, ilmavirran muutosten vaikutus lämmöntarpeeseen on pieni. Muuttuva tuloilmavirta voitaisiin haluttaessa kompensoida muuttuvalla tuloilman lämpötilalla.

Nykyisin radiaattorit toimivat itsenäisesti, eivätkä saa tietoa ilmavirroista. Kuitenkaan ilmavirran muutokset (ainakaan lyhytaikaiset) eivät juurikaan näy huonelämpötilassa. Viihtyvyyden kannalta saattaisi kuitenkin olla ideaalista, jos tämä kompensoitaisiin ilmavirran muutostilanteissa lämmitysverkostossa esim. muuttamalla patteriventtiilin asentoa tai lämmitysverkoston menoveden lämpötilaa (tai virtaamaa).

Valaistus ja muut lämpökuormat pienentävät lämmitystarvetta (myös kaihtimien asento vaikuttaa). Termostaattiset patteriventtiilit pienentävät radiaattorin virtaamaa lämpötilan noustessa. Mikäli koko talossa on lämpökuormia (tietyt käyttöajat), menoveden lämpötilaa (tai virtaamaa) voitaisiin ehkä alentaa.

Mikäli käytössä on projektissa kehitetty "älykäs sisäolojen säätö" (läsnäolon oppiminen, palautuslämmitys, ks. luku 5), asukkaiden poissaoloaikana kyseisen huoneiston patteriventtiilit voitaisiin ohjata kokonaan kiinni ja avata kokonaan ennen asukkaiden saapumista. Tämä edellyttäisi kauko-ohjattavia venttiileitä.

Älykkään sisäolojen säädön liittäminen kohteeseen

Älykkään sisäolojen säädön liittäminen kuvan 149 mukaiseen esimerkkikohteeseen edellyttää mahdollisuutta säätää rakennuksen kokonaisilmavirtaa sekä huoneistokohtaisia tulo- ja poistoilmapeltejä. Mikäli rakennuksen radiaattoriverkostossa olisi kauko-ohjattavat venttiilit, voitaisiin säätimen kaikki ominaisuudet hyödyntää ohjaamalla sekä radiaattoreiden venttiileitä että huoneistokohtaisia ilmavirtoja "älykkäästi". Huoneistokohtaisten ohjausten perusteella voidaan tehdä päätelmiä keskuslaitetason toiminnan ohjaamisesta.

Säädin käyttää hyväkseen huoneistokohtaisia läsnäolotietoja. Läsnäolon mittaaminen asuinrakennuksissa voi olla vaikeaa eikä luotettavia tuloksia välttämättä saada yksittäisellä mittaustavalla, vaan voidaan joutua yhdistelemään erilaisia mittaustapoja. Säätimen toiminnan kannalta läsnäolotiedon luotettavuus on erittäin kriittinen tekijä. Jokaisen huoneiston läsnäolotiedot tallennetaan järjestelmään, ja säädin ajastetaan päivittämään laskelmansa huoneistokohtaisesti 10 minuutin välein.

Yksinkertaisimmillaan säädin ajaa huoneistokohtaiset tulo- ja poistoilmapelit minimi-ilmavirta-asentoon, kun huoneistossa ei ole kukaan (ns. säästötila). Läsnäolomittausten perusteella tehtävien päätelmien pohjalta huoneisto tuuletetaan tarvittaessa suurella ilmavirralla ennen asukkaiden palaamista. Tuuletusajan pituus voidaan arvioida ilmanlaatumittauksen perusteella, jos sellainen on käytävissä. Mikäli radiaattoriventtiilit olisivat kauko-ohjattavia, voitaisiin säästötilassa pienentää myös huoneiston sisäilman lämpötilan asetusarvoa. Tällöin säätimeen sisältyisi huoneiston dynamiikan oppiminen palautuslämmitysajan arvioinnin muodossa.

Keskuslaitetasolla havaitaan rakennuksen ilmavirran tarpeen pieneneminen, jos jokin huoneisto menee säästötilaan. Puhallinnopeutta voidaan siis pienentää myös keskuslaitetasolla, jotta muissa huoneistoissa ilmavirta säilyy vakiona. Tuloilman lämpötilaa ei kuitenkaan voida muuttaa, mikäli kaikki huoneistot eivät ole säästötilassa, mikä on epätodennäköistä. Jos tuloilman lämpötilaa lasketaan alle huoneistojen sisäilman lämpötilan, täytyy lämmitysverkoston menoveden lämpötilaa (tai virtaamaa) myös pienentää. Muuten radiaattorit käyttävät sen energian, joka säästetään tuloilman lämpötilaa laskemalla. Mikäli radiaattoreiden venttiilit olisivat kauko-ohjattavissa, voitaisiin lämmitysverkoston virtaamaa säätää huoneistokohtaisten venttiilien asentojen perusteella.

Ilmavirtojen automaattinen ohjaus huoneistotasolla

Sovellettaessa ilmavirtojen automaattiseen ohjaukseen kehitettyä menetelmää esimerkiksi lähtökohta on periaatteessa sama kuin huonekohtaisessakin tapauksessa: lähtötilanteena ovat mitoitettut ilmavirrat ja niitä vastaavat säätöpeltien asennot. Menetelmä ohjaa tulo- ja poistupuolen säätöpeltejä. Puhallin on varustettu vakio painesäädöllä.

Läsnäolon tunnistaminen tapahtuu samoin kuin huonekohtaisessa tapauksessa. Lie-den/uunin päällä/pois-tila voidaan tunnistaa sähkön käytöstä ja vastaavasti kosteissa tiloissa on kosteusmittaus. Liesiuunin päällä-tila ja/tai kosteuden raja-arvon ylittyminen aiheuttaa säätöpeltien avauksen. Tulopuolen peltiä avataan 10–15 % vähemmän kuin poistupuolen säätöpeltiä, jotta ilmanvaihdon alipaineisuus säilyisi. Mikäli huoneistossa ei olla paikalla, ilmanvaihto voidaan ohjata säästötilaan.

Menetelmän yhteys muihin järjestelmiin tulee esille lähinnä läsnäolon tunnistamisen kautta. Samaa läsnäolotietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi säästötilaan siirtymisessä ja palautuslämmitysajankohdan oppimisessa.

Menetelmän tavoitteena on parantunut energiatehokkuus ja parantunut viihtyvyys. Energiansäästöä saavutetaan lähinnä, kun ilmanvaihtojärjestelmä on mahdollisuus ohjata säästötilaan automaattisesti, jos ketään ei ole paikalla. Viihtyvyys paranee, koska menetelmän avulla voidaan parantaa ilmanvaihtoa tilanteissa, joissa epäpuhtaus- tai kosteuskuormitus on suurimmillaan.

Integroidun valaistuksen ja kaihtimien säädön mahdollisuudet esimerkikohteessa

Esimerkkikohteeseen sisältyy tavanomaisia, pääosin yhdeltä sivulta valaistuja huonetiloja. Sivulta suuntautuvan suoran auringonsäteilyn osuus on siten merkittävän suuri. Tämä säteily sisältää myös merkittävän lämpösäteilykomponentin.

Näkötehokkuuden ja -mukavuuden kannalta tärkeitä ideaalisia säätökriteerejä olisivat suoran auringonsäteilyn estäminen sekä ikkunapinnan (kaihtimen) luminanssin ja taivaankannen aiheuttaman häikäisyn rajoittaminen.

Näistä kaihtimen aiheuttama häikäisy voidaan olettaa hoidettavaksi rakenteellisesti, käyttämällä oikeanlaista kaihdinratkaisua. Toimistoympäristössä sälekaihdin on hyväksitty osoittautunut ja heti uloimman lasin taakse sijoitettuna se estää myös lämpösäteilyä.

Auringonsuojakulman vuoksi sälekaihtimien perusasennossa säleen kulma on negatiivinen (horisontista alaspäin) julkisivun normaaliin nähden. Valon tulokulma ei ole suoraan auringon korkeuskulma, vaan siitä laskettu profiilikulma. Kullekin profiilikulmalle voidaan laskea kaihtimen säleen rajakulma, jolla suora auringonvalo estyy.

Pienillä tulokulmilla on edullista kääntää säleen kulma vastakkaiseksi, ts. positiiviseksi julkisivun normaaliin nähden, jolloin käytetään paremmin hyväksi taivaalta tuleva valo. Tätä voisi kutsua kaihtimen talviasennoksi. Tosin jos julkisivu ei ole suoraan etelään, profiilikulma voi saada suuria arvoja myös pienillä auringon korkeuskulmilla, mutta tällöin valo tulee yleensä vahvasti sivulta.

Säätimen toteutuksessa auringonsuojakulmaan liittyvä osuus voisi olla deterministinen, koska kaikki geometriset tekijät voidaan laskea täsmällisesti. Sumea osuus koskisi lähinnä suhteutusta ulkotilan valaistusvoimakkuuksiin. Tällöin pääteltäisiin mm. suoran auringonvalon esiintyminen, tarjolla oleva valaistusvoimakkuus ja taivaankannen häikäisyriski. Hyvin toteutettuna järjestelmä voisi valita jopa kaihtimen säleen kulmaksi positiivisen tai negatiivisen.

Sumean järjestelmän etuna on se, ettei kaihdinta ohjaavaa valaistustietoa mitata sisätilasta vaan julkisivusta. Tämän jälkeen sähkövalaistuksen ohjaus voi perustua joko tähän samaan tietoon (sumea järjestelmä), tai sisätilassa voi olla erillinen valoanturi ja säätöpiiri. On mahdollista ajatella myös kokonaan sumeaa säätöjärjestelmää, jossa tällä periaatteella olisi toteutettu myös säleen rajakulman säätö.

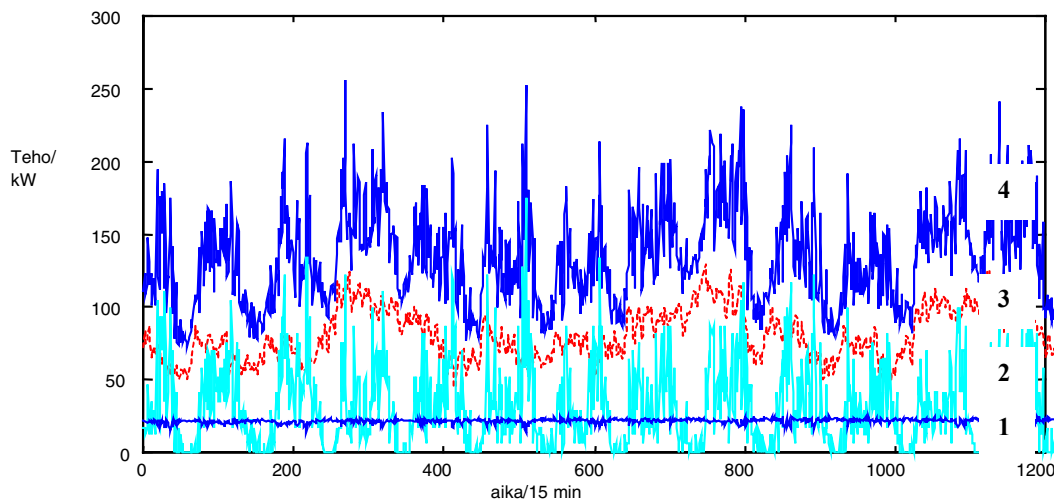
8.4 Tehonkulutukseen vaikuttavat tekijät asuinrakennuksessa

Tässä luvussa on etsitty asuinrakennuksen kokonaisenergiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä energiantarvetta ennustavaa neuroverkko- tai sumean logiikan mallia varten. Käytössä on asuinrakennuksen energiankulutukseen liittyviä mittauksia viidentoista minuutin välein noin 12 vuorokauden ajalta tammikuulta 1997. Mittaukset on saatu VTT:n Helsingin kaupungin asuntotuotantotoimistolle tekemästä asuinkerrostalojen LVI-vertailututkimuksesta. Luvussa on tutkittu mittaussuureiden välisiä riippuvuuksia yleisesti ja korrelaatioanalyysin avulla. Lopuksi on muodostettu lineaarinen regressiomalli ennustamaan tehonkulutusta ja mallin toimivuutta on testattu.

Mittaussuureita ovat lämmitysjärjestelmän vesivirta, lämpimän käyttöveden vesivirta, lämpimän käyttöveden kierron vesivirta, ulkolämpötila, kaukolämmön menoveden lämpötila, kaukolämmön paluueden lämpötila, lämmitysverkon menoveden lämpötila, lämmitysverkon paluueden lämpötila, lämpimän käyttöveden kierron paluueden lämpötila, lämmitysteho, lämpimän käyttöveden lämmitysteho ja lämpimän käyttöveden kierron lämmitysteho.

8.4.1 Yleinen tarkastelu muuttujien välisistä riippuvuuksista

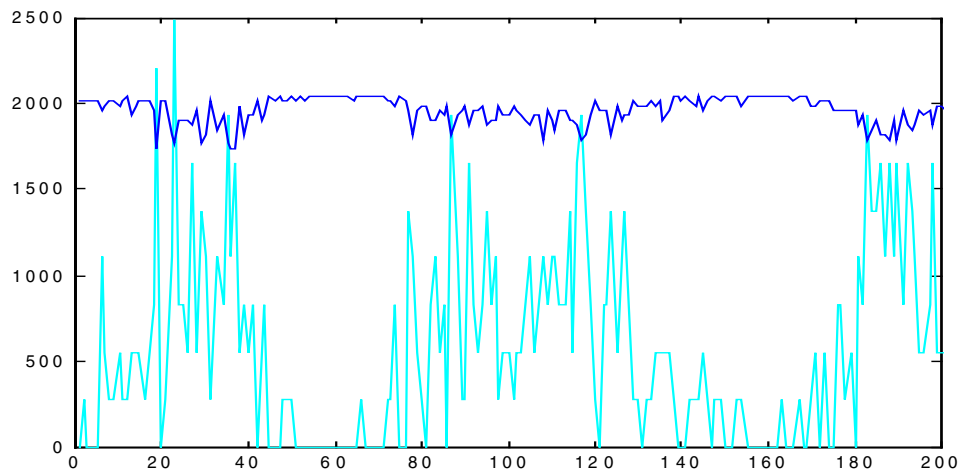
Tarvittava lämmitysteho voidaan jakaa kolmeen eri osaan: lämmitysverkkoon kuluvaan tehoon, lämpimän käyttöveden lämmittämiseen kuluvaan tehoon ja lämpimän käyttöveden kierron lämmittämiseen kuluvaan tehoon. Kuvassa 152 on esitetty tarvittava kokonaisteho ja tehon jakautuminen eri tekijöihin.



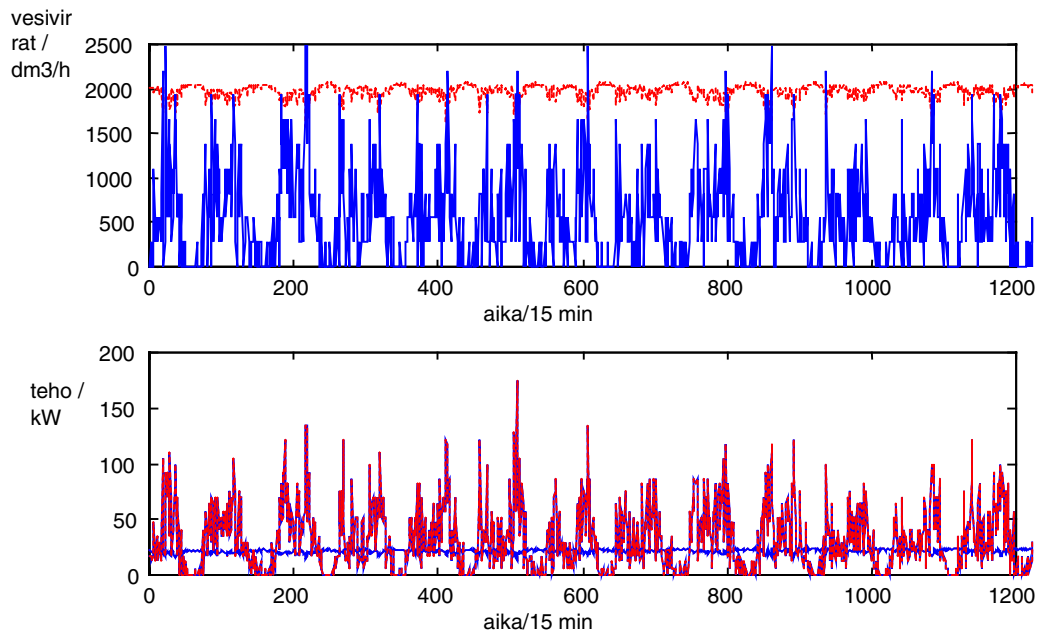
Kuva 152. Energian kulutuksen jakautuminen huoneiden lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden ja lämpimän käyttöveden kierron lämmitykseen. 1: lämpimän käyttöveden kierron lämmitysteho (kW), 2: lämpimän käyttöveden lämmitysteho (kW), 3: lämmitysteho (kW), 4: kokonaisteho (kW).

Kuvasta 152 nähdään, että mittauksen aikana lämpimän käyttöveden kierron lämmitykseen tarvittava teho pysyy suurin piirtein vakiona, kun taas lämpimän käyttöveden lämmitykseen tarvittava teho vaihtelee jaksollisesti ja huomattavan paljon. Lämmitysverkon tarvitsema teho vaihtelee myös jonkin verran, mutta samanlaista jaksollisuutta kuin lämpimän käyttöveden lämmitysteossa ei havaita.

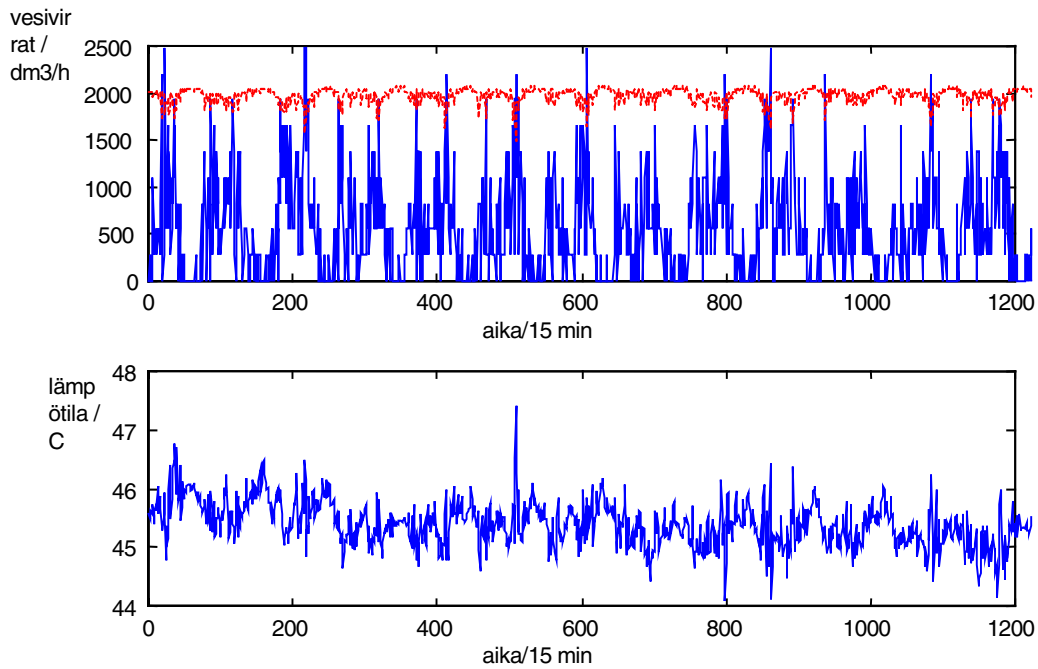
Kuvien 153–155 perusteella havaitaan, että lämpimän käyttöveden kulutus muuttuu vuorokauden ajan mukana ja niin myös lämmitykseen tarvittava teho. Kuvassa 153 on esitetty lämpimän käyttöveden vesivirran ja lämpimän käyttöveden kierron vesivirran 200 ensimmäistä mittauspistettä alkaen 17. tammikuuta klo 13.15. Mittaukset on tehty 15 minuutin välein, joten 20 mittauspistettä vastaavat 5 tuntia ja 96 mittauspistettä vastaavat yhtä vuorokautta. Veden kulutuksessa nähdään selvästi vuorokausittain esiintyvä jaksollisuus. Aamuyön tunteina lämmintä vettä ei käytetä juuri lainkaan ja kulutuspiikit alkavat esiintyä noin klo 18. Kuvassa 154 on esitetty vastaavat suureet 12 vuorokauden ajalta ja lisäksi tarvittavat tehot. Kuvassa 155 on edelleen esitetty mittaukset vesivirroista ja lisäksi lämpimän käyttöveden kierron paluuveden lämpötila kuuden vuorokauden ajalta. Paluuveden lämpötila vaihteluväli on 45 asteesta 47 asteeseen. Suurimmat lämpötilat havaitaan joidenkin lämpimän käyttöveden lämmityspiikkien jälkeen.



Kuva 153. Katkoviiva: lämpimän käyttöveden kierron vesivirta (dm^3/h) 2 vuorokauden ajalta. Kiinteä viiva: lämpimän käyttöveden vesivirta (dm^3/h).



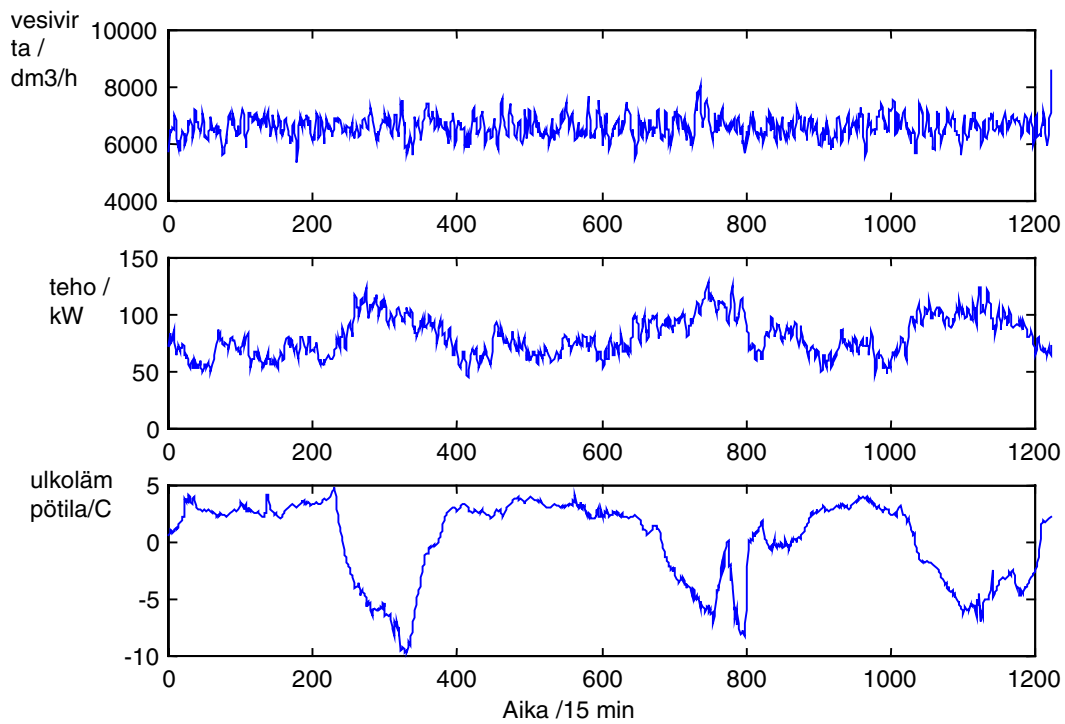
Kuva 154. Yllä: Lämpimän käyttöveden ja lämpimän käyttöveden kierron vesivirrat (dm^3/h). Alla: vastaavat tehot (kW).



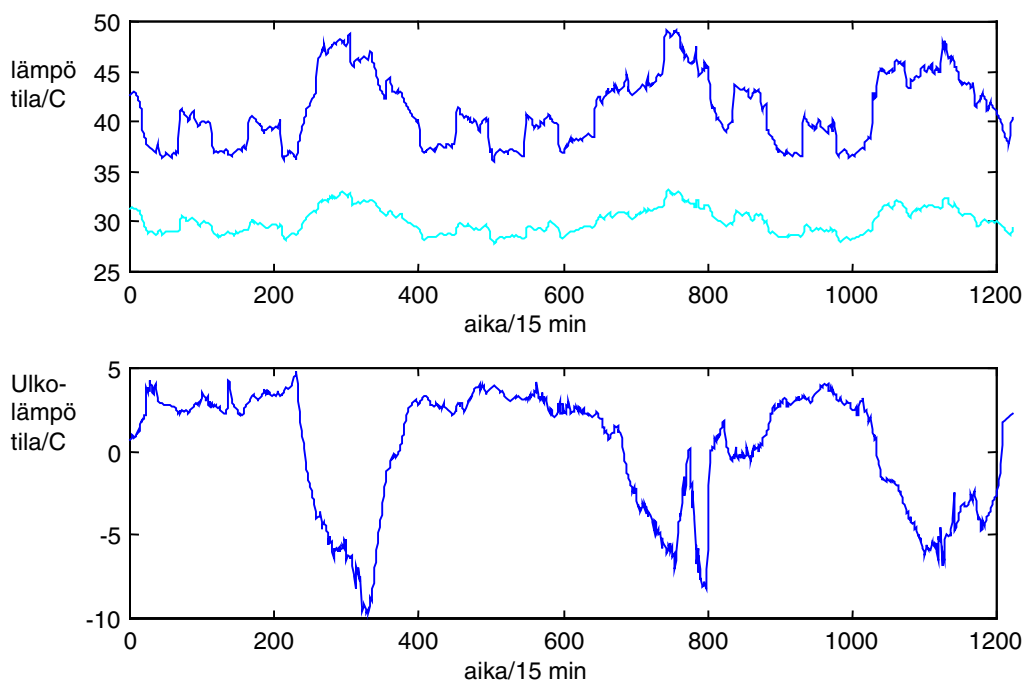
Kuva 155. Yllä: Lämpimän käyttöveden ja lämpimän käyttöveden kierron vesivirrat (dm³/h). Alla: Lämpimän käyttöveden kierron paluueden lämpötila (°C) (6 vrk).

Kuvassa 156 on esitetty ulkoilman lämpötila ja lämmitysverkon tarvitsema teho ja lämmitysverkon vesivirta. Huomataan, että lämmitystehon muutokset johtuvat suurelta osin ulkoilman lämpötilassa tapahtuvista muutoksista. Ulkoilman viilentyessä tarvitaan suurempi lämmitysteho. Lämmitysverkon vesivirta pysyy suhteellisen vakiona. Lämmitystehossa ja varsinkin kuvan 157 lämmitysverkon meno- ja paluuvesien lämpötiloissa on havaittavissa selvä vuorokausirytm. Öiseen aikaan sekä lämmitystehot että vesivirtojen lämpötilat ovat pienempiä kuin päivällä. Tämä johtuu siitä, että mittauskohteessa on energiansäästösyistä pienennetty lämmitysverkon menoveden lämpötilaa öisin noin kolmella asteella.

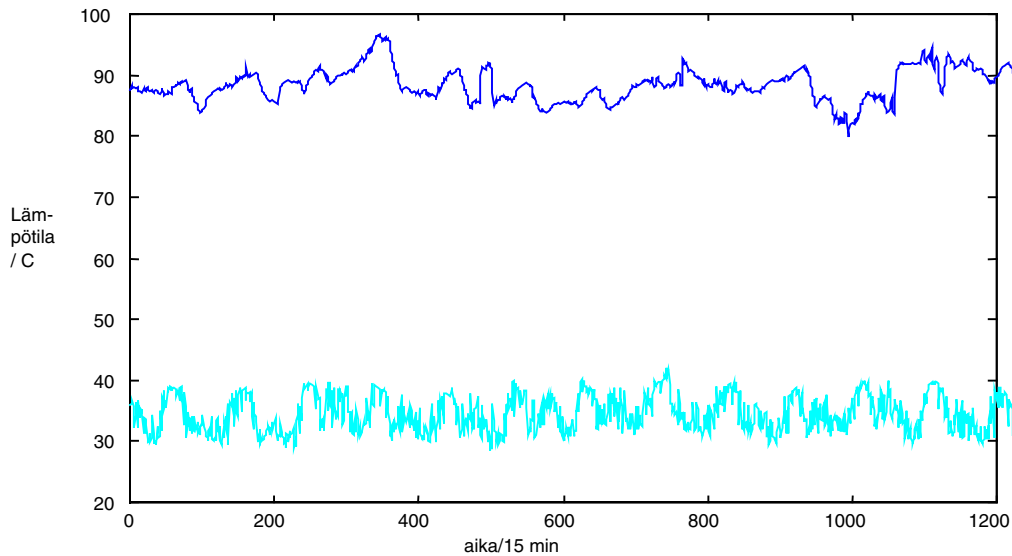
Kuvassa 158 on esitetty kaukolämpöveden meno- ja paluuvesien lämpötilat. Paluueden lämpötilasta havaitaan vuorokausittainen jaksollisuus, mikä johtuu edellä esitetyistä seikoista, mutta kaukolämmön menoveden lämpötilassa ei näytä olevan selvää säännöllisyyttä.



Kuva 156. Ylin: lämmitysverkon vesivirta (dm³/h). Keskellä: lämmitysteho (kW). Alla: ulkoilman lämpötila (°C).



Kuva 157. Yllä: lämmitysverkon meno- ja paluuvesien lämpötilat (°C). Alla: ulkolämpötila (°C).



Kuva 158. Kaukolämmön meno ja paluuviesien lämpötilat ($^{\circ}\text{C}$).

8.4.2 Muuttujien valinta korrelaatioanalyysillä

Korrelaatiokerroin $\rho(X, Y)$ on nollakeskiarvoiseksi ja yksikkövarianssiksi skaalattujen muuttujien X ja Y välinen kovarianssi eli:

$$\rho(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{(\text{Var}(X))^{1/2} (\text{Var}(Y))^{1/2}} = \text{Cov}(X, Y) \quad (12)$$

$$\text{Cov}(X, Y) = E[X, Y] - E[X]E[Y] = E[X, Y] - 0 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} xyf(x, y) dy dx$$

Edellisessä $f(x, y)$ on satunnaismuuttujien X ja Y yhteisjakauman tiheysfunktio. Jos kovarianssin laskemiseen on käytössä n kappaletta havaintoja X :stä ja Y :stä $(x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$ ja jos X ja Y ovat normaalijakautuneita, kovarianssia voidaan approksimoida seuraavasti:

$$\text{Cov}\hat{\text{v}}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (13)$$

Korrelaatiokerroin on aina välillä $[-1, 1]$. Mikäli muuttujat ovat toisistaan käänteisesti riippuvaisia, korrelaatiokerroin on negatiivinen. Korrelaatiokerroin on positiivinen, kun muuttujat ovat toisistaan suoraan riippuvaisia. Toisistaan riippumattomien muuttujien välinen korrelaatiokerroin on nolla.

Muuttujien välinen korrelaatiomatriisi P on laskettu Matlabissa funktiolla *corrcoef*. Funktio skaalaa aikasarjat ennen kovarianssin laskemista. Tulos on seuraava:

P =

1.0000	0.0256	-0.0018	-0.0291	-0.0512	-0.0036	0.0319	0.0177	-0.0753	0.0462	0.0200	0.0083
0.0256	1.0000	-0.8813	-0.0118	-0.0624	-0.7398	0.0547	0.0134	-0.0700	0.0205	0.8763	-0.7258
-0.0018	-0.8813	1.0000	-0.0073	0.0658	0.7486	-0.0200	0.0160	-0.0430	0.0003	-0.9286	0.8377
-0.0291	-0.0118	-0.0073	1.0000	<u>-0.5551</u>	-0.1788	-0.8625	-0.8482	<u>0.3375</u>	-0.8037	-0.0235	-0.0740
-0.0512	-0.0624	0.0658	-0.5551	1.0000	0.0479	<u>0.4356</u>	<u>0.4354</u>	-0.1349	<u>0.3988</u>	-0.0781	0.0307
-0.0036	-0.7398	0.7486	-0.1788	0.0479	1.0000	0.1323	0.1840	0.1440	0.1561	-0.7849	0.6373
0.0319	0.0547	-0.0200	-0.8625	0.4356	0.1323	1.0000	0.9722	<u>-0.4098</u>	0.9118	0.0663	0.0629
0.0177	0.0134	0.0160	-0.8482	0.4354	0.1840	0.9722	1.0000	<u>-0.3205</u>	0.8607	0.0182	0.0578
-0.0753	-0.0700	-0.0430	0.3375	-0.1349	0.1440	-0.4098	-0.3205	1.0000	<u>-0.3768</u>	-0.1065	<u>-0.4002</u>
0.0462	0.0205	0.0003	-0.8037	0.3988	0.1561	0.9118	0.8607	-0.3768	1.0000	0.0370	0.0772
0.0200	0.8763	-0.9286	-0.0235	-0.0781	-0.7849	0.0663	0.0182	-0.1065	0.0370	1.0000	-0.7450
0.0083	-0.7258	0.8377	-0.0740	0.0307	0.6373	0.0629	0.0578	-0.4002	0.0772	-0.7450	1.0000

Tässä muuttujien järjestys on seuraava:

1. Lämmitysjärjestelmän vesivirta
2. Lämpimän käyttöveden vesivirta
3. Lämpimän käyttöveden kierron vesivirta
4. Ulkolämpötila
5. Kaukolämmön menoveden lämpötila
6. Kaukolämmön paluuveden lämpötila
7. Lämmitysverkon menoveden lämpötila
8. Lämmitysverkon paluuveden lämpötila
9. Lämpimän käyttöveden kierron paluuveden lämpötila
10. Lämmitysteho
11. Lämpimän käyttöveden lämmitysteho
12. Lämpimän käyttöveden kierron lämmitysteho

Korrelaatiomatriisissa on alleviivattu korrelaatiokertoimet, jotka kuvaavat heikkoa riippuvuutta tiettyjen muuttujien välillä, ja voimakasta riippuvuutta kuvaavat kertoimet on tummennettu. Nämä ovat:

1. $P(2,3) = P(3,2) = -0.8813$ (lämpimän käyttöveden ja lämpimän käyttöveden kierron vesivirtojen välillä on vahva negatiivinen korrelaatio)
2. $P(2,6) = P(6,2) = -0.7398$ (lämpimän käyttöveden vesivirran ja kaukolämmön paluuveden lämpötilan välillä on vahva negatiivinen korrelaatio)
3. $P(2,11) = P(11,2) = 0.8763$ (lämpimän käyttöveden vesivirran ja lämpimän käyttöveden lämmitystehton välillä on vahva positiivinen korrelaatio)
4. $P(2,12) = P(12,2) = -0.7258$ (lämpimän käyttöveden vesivirran ja lämpimän käyttöveden kierron lämmitystehton välillä on vahva negatiivinen korrelaatio)

5. $P(3,6) = P(6,3) = 0.7486$ (lämpimän käyttöveden kierron vesivirran ja kaukolämmön paluueden lämpötilan välillä on vahva positiivinen korrelaatio)
6. $P(3,11) = P(11,3) = -0.9286$ (lämpimän käyttöveden kierron vesivirran ja lämpimän käyttöveden lämmitystehon välillä on vahva negatiivinen korrelaatio)
7. $P(3,12) = P(12,3) = 0.8377$ (lämpimän käyttöveden kierron vesivirran ja lämpimän käyttöveden kierron lämmitystehon välillä on vahva positiivinen korrelaatio)
8. $P(4,5) = P(5,4) = -0.5551$ (ulkolämpötilan ja kaukolämmön menoveden lämpötilan välillä on heikko negatiivinen korrelaatio)
9. $P(4,7) = P(7,4) = -0.8625$ (ulkolämpötilan ja lämmitysverkon menoveden lämpötilan välillä on vahva negatiivinen korrelaatio)
10. $P(4,8) = P(8,4) = -0.8482$ (ulkolämpötilan ja lämmitysverkon paluueden lämpötilalla on vahva negatiivinen korrelaatio)
11. $P(4,9) = P(9,4) = 0.3375$ (ulkolämpötilan ja lämpimän käyttöveden kierron paluueden lämpötilan välillä on heikko positiivinen korrelaatio)
12. $P(4,10) = P(10,4) = -0.8037$ (ulkolämpötilan ja lämmitystehon välillä on vahva negatiivinen korrelaatio)
13. $P(5,7) = P(7,5) = 0.4356$ (kaukolämmön menoveden ja lämmitysverkon menoveden lämpötilojen välillä on heikko positiivinen korrelaatio)
14. $P(5,8) = P(8,5) = 0.4354$ (kaukolämmön menoveden ja lämmitysverkon paluueden lämpötilojen välillä on heikko positiivinen korrelaatio)
15. $P(5,10) = P(10,5) = 0.3988$ (kaukolämmön menoveden lämpötilan ja lämmitystehon välillä on heikko positiivinen korrelaatio)
16. $P(6,11) = P(11,6) = -0.7849$ (kaukolämmön paluueden lämpötilan ja lämpimän käyttöveden lämmitystehon välillä on vahva negatiivinen korrelaatio)
17. $P(6,12) = P(12,6) = 0.6373$ (kaukolämmön paluueden lämpötilan ja lämpimän käyttöveden kierron lämmitystehon välillä on vahva positiivinen korrelaatio)
18. $P(7,8) = P(8,7) = 0.9722$ (lämmitysverkon meno- ja paluuesien lämpötilojen välillä on vahva positiivinen korrelaatio)
19. $P(7,9) = P(9,7) = -0.4098$ (lämmitysverkon menoveden lämpötilan ja lämpimän käyttöveden kierron paluueden lämpötilan välillä on heikko negatiivinen korrelaatio)
20. $P(7,10) = P(10,7) = 0.9118$ (lämmitysverkon menoveden lämpötilan ja lämmitystehon välillä on vahva positiivinen korrelaatio)
21. $P(8,9) = P(9,8) = 0.3205$ (lämmitysverkon paluueden lämpötilan ja lämpimän käyttöveden kierron paluueden lämpötilan välillä on heikko positiivinen korrelaatio)
22. $P(8,10) = P(10,8) = 0.8607$ (lämmitysverkon paluueden lämpötilan ja lämmitystehon välillä on vahva positiivinen korrelaatio)
23. $P(9,10) = P(10,9) = -0.3768$ (lämpimän käyttöveden kierron paluueden lämpötilan ja lämmitystehon välillä on heikko negatiivinen korrelaatio)

24. $P(9,12) = P(12,9) = -0.4002$ (lämpimän käyttöveden kierron paluueden lämpötilan ja lämpimän käyttöveden lämmitystehon välillä on heikko negatiivinen korrelaatio)
25. $P(11,12) = P(12,11) = -0.7450$ (lämpimän käyttöveden ja lämpimän käyttöveden kierron lämmitystehojen välillä on vahva negatiivinen korrelaatio)

Korrelaatioiden 12 ja 15 perusteella lämmitystehoon vaikuttavia tekijöitä ovat ainakin ulkolämpötila ja kaukolämmön menoveden lämpötila. Lämmitystehon ja lämmitysverkon meno- ja paluuvesien väliset korrelaatiokertoimet ovat suuret (korrelaatiot 20 ja 22), mutta vesien lämpötilat ovat pikemminkin seurausta lämmitystehosta kuin päinvastoin. Lämmitystehon ja lämpimän käyttöveden kierron paluueden lämpötilan välillä on heikko negatiivinen korrelaatio (korrelaatio 22), mutta se johtuu luultavimmin vuorokausijaksottaisuudesta, eikä suureiden välillä ole todellista riippuvuutta.

Korrelaation 3 perusteella lämpimän käyttöveden lämmitystehoon vaikuttaa erityisesti lämpimän käyttöveden vesivirta eli lämpimän veden kulutus. Lämpimän käyttöveden lämmitystehon ja lämpimän käyttöveden kierron vesivirran välinen korrelaatiokerroin on vahvasti negatiivinen (korrelaatio 6). Vastaavasti myös lämpimän käyttöveden lämmitystehon ja lämpimän käyttöveden kierron lämmitystehon välillä on vahvasti negatiivinen korrelaatio (korrelaatio 25). Tämän takia voisi olla järkevää arvioida lämpimän veden lämmittämiseen ja lämpimän veden kierron lämmittämiseen kuluvia tehoja summana eikä erikseen. Korrelaatiosta 16 nähdään vielä, että kaukolämmön paluueden lämpötila ja lämpimän käyttöveden lämmitystehojen välillä on vahva negatiivinen korrelaatio. Tämäkin johtuu luultavasti suureiden vastakkaisesta vaihtelusta eri vuorokauden aikoina eikä todellisesta riippuvuudesta.

Korrelaation 7 perusteella lämpimän käyttöveden kierron lämmitystehoon vaikuttaa lämpimän käyttöveden kierron vesivirta. Kaukolämmön paluueden lämpötilalla ja lämpimän käyttöveden kierron lämmitystehon välillä on positiivinen korrelaatio, mutta edellinen on seuraus jälkimmäisestä (korrelaatio 17). Korrelaatio 24 on hieman yllättävä: lämpimän käyttöveden kierron paluueden lämpötila ja lämpimän käyttöveden kierron lämmitysteho vaihtelevat vastakkaisesti. Ehkä kierron lämpötilan säätö on ollut mittauskohteessa hieman heikko, niin että kierron vesivirran kasvaessa tarvittava lämmitysteho on kyllä kasvanut, mutta veden lämpötila ei kuitenkaan ole saavuttanut haluttua arvoa yhtä hyvin kuin pienempää vesivirtaa lämmitettäessä.

8.4.3 Tehonkulutuksen ennustaminen regressiomallilla

Muodostetaan lineaarinen regressiomalli tehonkulutuksen ennustamiseen edellisessä kappaleessa valituilla muuttujilla ja tutkitaan ennustuksen toteutumista. Lämmitykseen kuluvan tehon ennustavina muuttujina käytetään ulkolämpötilaa ja kaukolämmön me-

noveden lämpötilaa. Lämpimän käyttöveden lämmitystehoa ja lämpimän käyttöveden kierron lämmitystehoa ennustetaan summana ja ennustavina muuttujina käytetään lämpimän käyttöveden ja lämpimän käyttöveden kierron vesivirtoja. Mittausaineisto jaetaan kahteen osaan siten, että ennustevirheen minimoiva regressiomalli lasketaan toisesta osasta ja mallin toimivuutta testataan toisella osalla. Joka toinen havainto koko mittausaineistosta on jaettu testausryhmään. Ennen regressiomallin muodostamista kaikki muuttujat on skaalattu nollakeskiarvoisiksi ja yksikkövarianssisiksi.

Lämmitystehon ennustaminen

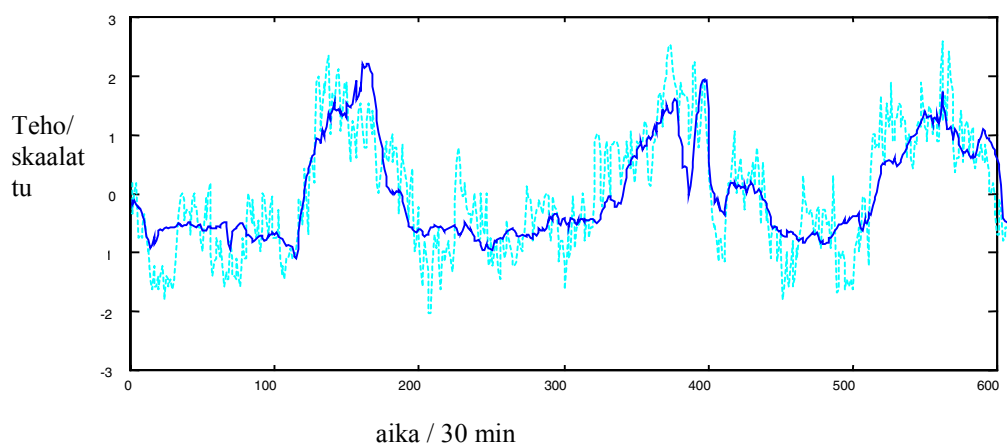
Ennustettu lämmitysteho on siis laskettu seuraavasti:

$$\text{lämmitysteho} = b_1 * \text{ulkolämpötila} + b_2 * \text{kaukolämmön_menoveden_lämpötila} \quad (14)$$

Regressiokertoimet on laskettu pienimmän neliösumman menetelmällä eli:

$$[b_1 \ b_2]^T = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (15)$$

missä X on havaintomatriisi ennustavista muuttujista ja Y havaintomatriisi ennustettavasta muuttujasta. Ulkolämpötilaa vastaavaksi regressiokertoimeksi saadaan $-0,8415$ ja kaukolämmön menoveden lämpötilaa vastaavaksi regressiokertoimeksi $-0,0723$. Kuvas-
sa 159 on esitetty lämmitystehon ennustus, kun mallia on sovellettu testautietoon, sekä toteutunut lämmitysteho. Ennustus näyttää kohtalaisen hyvältä. Suurimmat virheet tulevat lämmitystehossa esiintyvistä vuorokausivaihtelusta, jota regressiomallissa ei ole huomioitu. Toteutuneessa lämmitystehossa tämä vuorokausivaihtelu johtuu kuitenkin lähinnä mittauskohteen erikoispiirteistä.



Kuva 159. Kiinteä viiva: ennustettu lämmitysteho 0-keskiarvoisista ja 1-varianssisista muuttujista laskettuna. Katkoviiva: toteutunut lämmitysteho 0-keskiarvoiseksi ja 1-varianssisiksi skaalattuna.

Lämpimän käyttöveden ja lämpimän käyttöveden kierron lämmitystehon ennustaminen

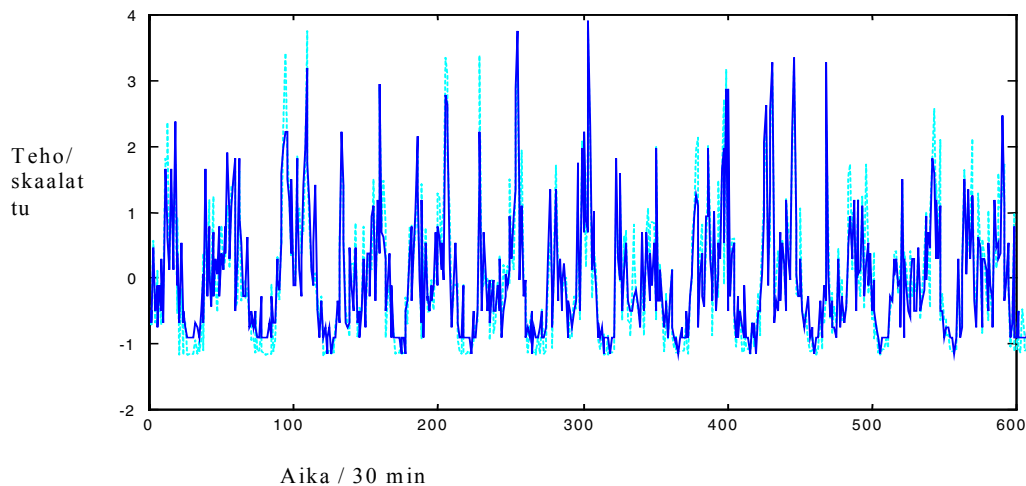
Lämpimän käyttöveden ja lämpimän käyttöveden summan ennustus on laskettu seuraavasti:

$$\text{Lämmitystehojen summa} = b_1 * \text{lämpimän käyttöveden vesivirta} + b_2 * \text{lämpimän käyttöveden kierron vesivirta} \quad (16)$$

Regressiokertoimet on laskettu pienimmän neliösumman menetelmällä eli:

$$[b_1 \ b_2]^T = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (17)$$

missä X on havaintomatriisi ennustavista muuttujista ja Y havaintomatriisi ennustettavasta muuttujasta. Lämpimän käyttöveden vesivirtaa vastaavaksi regressiokertoimeksi saadaan 0,2977 ja lämpimän käyttöveden kierron vesivirtaa vastaavaksi regressiokertoimeksi -0,6606. Jälkimmäinen kerroin on negatiivinen, koska suurin osa ennustettavasta tehosta on lämpimän käyttöveden lämmitystehoa eikä kierron lämmitystehoa ja toisaalta lämpimän käyttöveden lämmitysteho ja kierron vesivirta ovat käänteisesti verrannollisia. Kuvassa 160 on esitetty lämmitystehojen summan ennustus, kun mallia on sovellettu testausdataan, sekä toteutunut lämmitysteho. Ennuste näyttää koko alueella varsin hyvältä.



Kuva 160. Kiinteä viiva: käyttöveden lämmitystehojen summan ennustus 0-keskiarvoisista ja 1-varianssisista ennustavista muuttujista laskettuna. Katkoviiva: toteutunut käyttövesien summan lämmitysteho 0-keskiarvoiseksi ja 1-varianssiseksi skaalattuna.

8.4.4 Yhteenveto luvusta 8.4

Kaukolämpötehon kulutus voidaan jakaa kolmeen osaan: lämmitystehteen, lämpimän käyttöveden lämmitystehteen ja lämpimän käyttöveden kierron lämmitystehteen. Lämmitystehteen eniten vaikuttava ulkoinen muuttuja oli ulkolämpötila. Lämpimän käyttöveden lämmitystehteen ja lämpimän käyttöveden kierron lämmitystehteen todettiin olevan vahvasti korreloituneita ja siksi ne kannattaa ennustaa samanaikaisesti (summana). Näiden lämmitystehtoihin eniten vaikuttavat suureet olivat lämpimän käyttöveden vesivirta (eli lämpimän käyttöveden kulutus) ja lämpimän käyttöveden kierron vesivirta.

Käytössä olleilla tiedoilla suhteellisen hyvät lämmitystehtojen ennusteet oli helppo laskea jopa yksinkertaisella, lineaarisella mallilla. Voidaankin asettaa kyseenalaiseksi, ovatko monimutkaisemmat mallit tarpeellisia. Todellisuudessa suurin ongelma sekä käyttöveden lämmitystehteen ennustamisessa että huoneistojen lämmitystehteen ennustamisessa on ennustavien muuttujien arviointi etukäteen. Ulkolämpötilan tulevaa kehitystä on vaikea arvioida kuten myös tarkkaa lämpimän käyttöveden kulutusta.

Ennustevirheen neliösumman minimoimiseen perustuva regressiomalli voidaan muodostaa myös rekursiivisesti. Jos systeemissä tapahtuu suuria muutoksia esimerkiksi vuodenaikojen vaihtuessa, rekursiivisellä menetelmällä mallin parametrit adaptoituvat sopiviksi, ja lisäksi tarvittava laskentakapasiteetti pienenee huomattavasti. Rekursiivisessä menetelmässä mallia päivitetään ainoastaan uuden havainnon perusteella ja eräänlaisen unohduskertoimen avulla voidaan päättää, kuinka pitkä mittaushistoria mallin muodostamisessa otetaan huomioon. Rekursiivinen menetelmä säästää laskentakapasiteettia myös siinä mielessä, että havaintomatriisin ja sen transpoosin tulon kääntematriisi tarvitsee laskea vain kerran. Kääntematriisin laskeminen on yleensä paljon kapasiteettia vaativaa ja mahdotonta, mikäli käännettävä matriisi on singulaarinen. Rekursiiviseen menetelmään liittyvät parametrien päivityskaavat ovat yksinkertaisia (Liite C) ja todennäköisesti helposti sulautettavissa todelliseen järjestelmään.

8.5 Läsnaolon tunnistaminen asuinrakennuksissa

Tietoa asukkaiden läsnäolosta tarvitaan mm. lämmitys-, ilmastointi- ja valaistusjärjestelmien älykkääseen ohjaamiseen. Olennaista on, että läsnäolo havaitaan luotettavasti, koska virheelliset tiedot vaikuttavat paitsi kyseisen ajankohdan toimintaan, myös oppivien järjestelmien toimintaan pitemmällä aikavälillä.

8.5.1 Menetelmiä läsnäolon tunnistamiseen

Läsnäoloanturit

Läsnäoloanturit perustuvat liikkeen tunnistamiseen. Niitä on hyödynnetty menestyksellisesti mm. hotellien käytävien valaistuksen ohjaamisessa. Asuinrakennusten järjestelmien ohjaamiseen ne soveltuvat huonommin useista syistä. Asuinrakennuksissa ollaan tavallisesti paikallaan pitkiä aikoja, jolloin läsnäoloanturi tulkitsee (viiveajan jälkeen), että ketään ei ole paikalla. Toiseksi monilla on lemmikkieläimiä, joiden liikkeen läsnäoloanturi tunnistaa kuten ihmisten. Läsnäoloantureiden asentaminen sokkeloiseen huoneistoon ei myöskään olisi edullista (vaikka ne eivät enää hinnakkaita olekaan): antureita tarvittaisiin monia, jotta katvealueita ei jäisi.

Veden kulutuksen seuranta

Asukkaiden läsnäolosta voidaan saada tietoa seuraamalla veden kulutusta. Tällainen seuranta soveltuisi erityisesti rakennuksiin, joiden veden kulutusta mitataan huoneisto-kohtaisesti, jolloin erillistä anturointia ei tarvittaisi.

Tällaisen järjestelmän toiminta perustuisi tietoon, että kun asukas ei ole kotona, vettä ei kulu. Mikäli jokin laite, kuten pesukone tai astianpesukone, on jätetty päälle, järjestelmä olettaa (ellei sitä ole konfiguroitu toisin), että joku on kotona. Samoin mahdolliset vuodot ja tippuvat hanat sotkevat järjestelmän toiminnan.

Tällaisen järjestelmän ongelma on, että läsnäolosta ei saada luotettavaa tietoa jatkuvasti. Koska asukas ei käytä kotona ollessaan vettä jatkuvasti, järjestelmässä täytyy olla mukana viive. Järjestelmä siis olettaa asukkaan olevan kotona viiveajan (esim. tunti tai kaksi tuntia) pituisen jakson siitä, kun vettä on viimeksi käytetty. Yöllä vettä ei juuri käytetä, joten tällöin viiveajan tulee olla esim. kahdeksan tuntia. Järjestelmän vaatima pitkä viiveaika vähentää läsnäolon seurannasta saatavia hyötyjä.

Sähkön kulutuksen seuranta

Sähkön kulutuksen seuranta muistuttaa veden kulutuksen seurantaa. Jääkaapit ja pakastimet kuluttavat sähköä, vaikka ketään ei olisi kotona. Sen sijaan monet muut laitteet ja valaistus ovat päällä vain asukkaiden ollessa kotona, mitä tietoa voidaan hyödyntää läsnäolon tunnistamisessa. Tosin monet kodin laitteista jäävät suljettuna valmiustilaan eli ne kuluttavat hieman sähköä jatkuvasti.

Kotona on monia sähkölaitteita, joita ei normaalisti jätetä päälle kotoa poistuttaessa, joten jos joku niistä on käytössä, voidaan asukkaiden olettaa olevan kotona. Tällaisia

laitteita ovat mm. viihde-elektroniikka (radio, televisio, stereot), ruoanlaittoon liittyvät laitteet (esim. uuni, liesi, mikroaaltouuni, kahvinkeitin) ja yleensä myös tietokone. Koska ihminen ei käytä näitä laitteita jatkuvasti, täytyisi tässäkin tapauksessa olettaa viive-aika, jonka asukkaan oletetaan olevan kotona siitä, kun laitteita on viimeksi käytetty. Viiveajan tulisi olla yöllä pidempi kuin päivällä.

Valaistuksen käytön seuraaminen antaisi myös tietoa ihmisten läsnäolosta. Yleensä ihmisten kotona ollessa, öitä ja päivän valoisia hetkiä lukuun ottamatta, valaistusta on päällä. Kotoa poistuttaessa valot tavallisesti katkaistaan, mahdollista koristevalaistusta lukuun ottamatta. Järjestelmä siis voisi olettaa, että jos ei ole yöaika, eikä ulkona ole valoisaa (kello ja päivämäärä), valojen off-tila tarkoittaa, että ketään ei ole kotona. Täysin aukottomasti läsnäoloa ei siis voida tunnistaa pelkästään valaistuksen perusteella: kesäaikana valaistusta ei välttämättä tarvita, joten käyttäjän poissaolosta ei saada varmaa tietoa.

Sähkölaitteiden ja valaistuksen käytön seuranta voidaan hyödyntää paremmin yksittäisten laitteiden ohjauksessa. Kylpyhuoneen tai wc:n ilmanvaihtoa voidaan tehostaa kyseisen huoneen valaistusta käytettäessä. Tosin aina valaistuksen ollessa päällä, esimerkiksi hampaita harjattaessa, tehostus ei olisi tarpeellista.

Vastaavasti keittiön ilmavirtaa voitaisiin tehostaa liedon tai uunin sähkönkulutuksen perusteella, jolloin ruuanlaiton synnyttämät epäpuhtaudet (ja lämpökuormat) voidaan poistaa paremmin.

Sisäilman laadun seuranta

Ihmiset luovuttavat jatkuvasti lämpöä, kosteutta ja hiilidioksidia ympäristöönsä. Tämän lisäksi ihmiset aiheuttavat välillisesti lämpö- ja kosteuskuormia käyttäessään laitteita ja vettä. Rakennuksen lämpöoloihin ja sisäilman laatuun vaikuttaa ihmisen lisäksi moni muukin tekijä, erityisesti sää.

Huoneilman hiilidioksidipitoisuuden mittausta voitaisiin hyödyntää ihmisen läsnäolon tunnistamisessa. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus pysyy jatkuvasti melko samalla tasolla, suurusluokassa 400 ppm. Ihmisten läsnäolo nostaa huoneilman hiilidioksidipitoisuutta nopeasti, ja ihmisten poistumisen jälkeen huoneilman hiilidioksidipitoisuus lähtee alenemaan ilmanvaihdon suuruudesta riippuen.

Hiilidioksidipitoisuutta mittaavia antureita on jo melko yleisesti käytössä ilmastointi-järjestelmissä, joten läsnäolon tunnistamista varten ei välttämättä tarvittaisi lisäinstrumentointeja. Hiilidioksidipitoisuutta olisi ilmeisimmin järkevintä mitata poistoilmasta, jotta antureita ei tarvittaisi moniin huoneisiin.

Yksinkertaisimmillaan hiilidioksidipitoisuutta seuraava järjestelmä päättelisi asunnossa olevan ihmisiä, jos CO₂-pitoisuus ylittää tietyn rajan. Muulloin se olettaisi asunnon olevan tyhjillään. Käytännössä tällainen järjestelmä ei pystyisi arvioimaan kotonaoloaikaa tarkasti, koska hiilidioksidipitoisuus ei muutu heti ihmisten tultua ja poistuttua. Parempaan tulokseen päästäisiin, jos järjestelmään liitettäisiin jonkinlainen laskentayksikkö, joka päättelisi tarkemmin – pienemmistä CO₂-pitoisuuden muutoksista – asukkaiden läsnäolon. Tällaisen laskentayksikön tulisi kyetä tunnistamaan ihmisten läsnäolo luotettavasti, vaikka ilmanvaihtoa tehostettaisiin ja ikkunoita avattaisiin.

Turvajärjestelmien tilan seuranta

Monissa asuinrakennuksissa on erilaisia turvajärjestelmiä, hälyttimiä ym., jotka kytetään päälle rakennuksesta poistuttaessa. Erityisen yleisiä ovat turvalukot. Tällaiset järjestelmät antavat muita edellä mainittuja järjestelmiä luotettavampaa tietoa asukkaiden läsnä- ja poissaolosta, koska niitä tavallisesti käytetään siten, että viimeinen asunnosta poistuja kytkee turvajärjestelmän päälle ja ensimmäinen kotiin saapuja kytkee sen pois.

Turvalukon tai vastaavan siis tulisi kyetä välittämään sähköinen signaali tilastaan talotekniikkajärjestelmille. Koska turvalukot ja vastaavat ovat lukittavissa myös sisäpuolelta, järjestelmän pitäisi tunnistaa, onko lukitus tehty sisältä vai ulkoa.

Erillinen kytkin

Asunnossa voisi olla erillinen kytkin, jolla käyttäjä ilmoittaisi poissaolostaan (ja mahdollisesti paluuaikeensa) taloteknisille järjestelmille. Tämä kytkin siirtäisi järjestelmät seisonatilaan ja mm. katkaisisi valaistuksen, mahdollista koristevalaistusta lukuun ottamatta.

Ongelmana on lähinnä se, muistaako viimeinen asunnosta poistuja vääntää tätä kytkintä. Jos sitä ei muisteta tai viitsitä tehdä, ei järjestelmästä ole hyötyä.

Asukkaiden kannalta erillinen kytkin ei ole ihanteellinen, koska se edellyttää ylimääräisiä toimia. Olisi perusteltua olettaa, että käyttäjän ei tarvitsisi mukautua rakennuksen toimintaan, vaan rakennus käyttäjän.

Ihmisen aktiviteetin tai sijainnin seuranta

Terveyden seurantaan varten on kehitetty rannekkeita, jotka tarkkailevat käyttäjänsä viireystilaa ja hälyttävät muutoksista. Rannekkeita käyttävät erityisesti yksin kotonaan asuvat vanhuksat.

Tällainen ranneke voisi lähettää viestiä myös talotekniikkajärjestelmille, jolloin siihen voisi liittää erityistoimintoja: vanhuksen ei esimerkiksi tarvitsi huolehtia valaistuksen sammuttamisesta ja liesi voisi mennä automaattisesti pois päältä, kun asukas poistuu huoneistosta.

Tällainen järjestelmä soveltuisi erityistarkoituksiin, siis ihmisille, jotka käyttävät ranneketta muutenkin.

Mahdollisesti samaa ideaa voitaisiin soveltaa myös valtaväestölle siten, että kännykkä korvaisi rannekkeen. Kännykkä siis ilmoittasi talotekniikkajärjestelmille sijaintinsa. Mikäli jokainen asukas kantaa kännykkää jatkuvasti mukanaan, tällä tavalla saataisiin luotettava tieto ihmisten läsnäolosta kotona – ja myös siitä onko joku lähellä kotia tai kotiin päin saapumassa.

8.5.2 Yhteenveto luvusta 8.5

Lämmitys-, ilmastointi- ja valaistusjärjestelmien ohjaamiseen kehittyneellä tavalla tarvitaan luotettavaa tietoa asukkaiden läsnäolosta.

Läsnäolosta voidaan saada viitteitä esimerkiksi läsnäoloantureilla, seuraamalla veden tai sähkön kulutusta tai huoneilman hiilidioksidipitoisuutta – tai joidenkin edellisten yhdistelmänä. Olennaista on kuitenkin yksinkertaisuus. Jos järjestelmä on kovin monimutkainen tai käyttäjältä vaaditaan erillisiä toimia, haitat voivat olla hyötyjä suurempia.

Luotettavin tieto asukkaiden läsnäolosta saadaan luultavimmin turvajärjestelmän, esim. turvalukon, tilasta, koska tavallisesti viimeinen asunnosta poistuja kytkee turvajärjestelmän päälle ja ensimmäinen kotiin saapuja kytkee sen pois. Turvalukon tai vastaavan tulisi kyetä antamaan sähköinen signaali tilastaan muille taloteknisille järjestelmille. Tällainen järjestelmä olisi yksinkertainen: läsnäolotieto saataisiin helposti, eikä asukkaan tarvitsisi tehdä erillisiä toimia.

Asukkaalla tulisi myös olla mahdollisuus ilmoittaa järjestelmälle, esim. puhelimella tai Internetin välityksellä, läsnä- tai poissaolostaan pidemmällä jaksolla. Myös kotiintulosta tulisi voida ilmoittaa etukäteen, jolloin talotekniset järjestelmät voisivat palauttaa sisäilmaolot normaaleiksi ennen kuin kotiin saavutaan.

Yksittäisten järjestelmien ohjauksessa, kuten wc:n tai keittiön ilmanvaihdon tehostamisessa, on perusteltua käyttää tietoa (tietyn kalusteen) veden tai (tietyn laitteen tai tietyn huoneen valaistuksen) sähkön kulutuksesta.

9. Kootut tulokset

Taulukoissa 34, 37 ja 38 on listattu projektin keskeiset tulokset sekä viitattu lukuihin, joista niihin liittyvät tarkastelut, selvitykset ja kuvaukset löytyvät.

Taulukko 34. Kehitetyt säätö-, ohjaus- tai energianhallintaratkaisut.

Säätö, ohjaus- tai energianhallintaratkaisu	Esitetty luvussa
Lämmitysverkoston menoveden <u>lämpötilan</u> kompensointikäyrän automaattinen muodostaminen	4.1
Lämmitysverkoston menoveden <u>virtaaman</u> kompensointikäyrän automaattinen muodostaminen	4.2
Radiaattoriverkoston paluuveden hyödyntäminen ilmastointikooneessa	4.3
Älykäs sisälämpötilan säätöalgoritmi vakioilmavirtaiselle järjestelmälle	5.2.1
Älykäs sisälämpötilan ja ilmavirran säätöalgoritmi muuttuvailmavirtaiselle järjestelmälle	5.3.1
Vaihtoehtoinen menetelmä palautuslämmityksen aloitusajankohdan ennustamiselle	5.6
Ilmanvaihdon yksitavoitteinen optimointi	6.1
Huonekohtaisten ilmavirtojen automaattinen ohjaus	6.2
Integroitu valaistuksen ja kaihtimien sumea säätöalgoritmi	7.2
Esimerkki kokonaisenergianhallintakonseptista	8.3

Tarkastelujen perusteella lupaavimmiksi ratkaisuiksi osoittautuivat lämmitysverkoston menoveden kompensointikäyrien automaattinen muodostaminen sekä älykäs sisälämpötilan säätöalgoritmi. Menetelmiä soveltamalla voitaisiin saavuttaa huomattavia energiansäästöjä. Kyseiset menetelmät voisivat soveltua suureen osaan maamme rakennuskannasta.

Esimerkkinä tarkastellaan lämmitysverkoston menoveden lämpötilan ja virtaaman kompensointikäyrien automaattista muodostamista. Seuraavassa arvioidaan, mitä vaikutuksia olisi, jos menetelmää sovellettaisiin Suomen vesikiertoisesti lämmitettyihin asuin-kerrostaloihin. Toki menetelmä on sovellettavissa muunkin tyyppisiin vesikiertoisesti lämmitettyihin rakennuksiin.

Suomen koko rakennuskannan kerrosalasta 22 % on asuinkerrostaloissa. Tästä kannasta 85 % on kytketty kaukolämmitykseen ja 12 % on öljylämmitteisiä (Vikström et al. 2000). Jos lämmitysverkoston kompensointikäyrien automaattista muodostamista sovellettaisiin asuinkerrostalojen siihen osaan, johon se soveltuu, arvioidaan saavutettavan taulukossa 35 esitetyt säästöt. Taulukossa 36 on esitetty vastaavat vähennykset päästöissä ilmakehään. Lisäksi viihtyisyys paranisi. Myös kaukolämmön jäähtymä suurensi, mistä kaukolämpölaitos hyötyy, kun siirtokapasiteetti kasvaa, lämpöhäviöt pienenevät, pumppausenergiantarve pienenee, yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotannon hyötysuhde paranee sekä mahdollisuus hyödyntää teollisuuden jätelämpöjä, aurinko- tai geotermistä energiaa paranee.

Taulukko 35. Säästöpotentiaalit, jos lämmitysverkostojen kompensointikäyrät muodostettaisiin automaattisesti Suomen koko soveltuvassa asuinkerrostalokannassa.

Tekijä	Säästöpotentiaali
lämmitysenergia	5 % \approx 830 GWh/vuosi
sähköenergia	3,5 % \approx 40 GWh/vuosi
ylläpitokustannukset	4 milj. €/vuosi

Taulukko 36. Vältettävät päästöt ilmakehään, jos lämmitysverkostojen kompensointikäyrät muodostettaisiin automaattisesti Suomen koko soveltuvassa asuinkerrostalokannassa.

Päästö	Vähenneminen (kg/vuosi)
CO ₂	220.359.000
CO	325.000
NO _x	443.000
SO ₂	397.000
C _x H _y , VOC	585.000
CH ₄	554.000
hiukkaset	448.000
raskasmetallit	85

Taulukko 37. Muut laskennalliset tai kokeelliset tarkastelut.

Tarkastelu	Esitetty luvussa
Sumeaan logiikkaan perustuva ilmastoinnin lämmityspatterin PI-säätimen automaattinen viritin	3.3
Sumean säätimen ominaisuuksien vaikutus säätöön	3.4
Lämmitysverkoston menoveden <u>lämpötilan</u> kompensointikäyrän automaattisen muodostamisen kustannus- ja muut vaikutukset	4.4
Lämmitysverkoston menoveden <u>virtaaman</u> kompensointikäyrän automaattisen muodostamisen kustannus- ja muut vaikutukset	4.4
Radiaattoriverkoston paluuv veden hyödyntäminen ilmastointikoneissa, kustannus- ja muut vaikutukset	4.4
Älykkään sisälämpötilan säätöalgoritmin testaus todellisessa rakennuksessa	5.2.3
Älykkään sisälämpötilan ja ilmavirran säätöalgoritmin testaus todellisessa rakennuksessa	5.3.3
Tehonkulutukseen vaikuttavat tekijät asuinrakennuksessa	8.4

Taulukko 38. Tehdyt yleiset selvitykset.

Selvitys	Esitetty luvussa
Yleistä oppivien ja älykkäiden järjestelmien kehityksestä ja soveltamisesta	2
Älykkäät järjestelmät säätimien virityksessä	3.2
Selvitys käyttäjän ja LVI-säätöjärjestelmien vuorovaikutuksesta	5.1
Oppivan algoritmin käyttöliittymä	5.4
Älykkään sisäolojen säätöalgoritmin käytännön toteutusratkaisu ja implementoitavissa oleva koodi suureen toimistokiinteistöön	Ei ole esitetty raportissa ²¹
Selvitys keinovalaistuksen ja päivänvalon yhteissäädön peruskysymyksistä	7.1
Kokonaisenergianhallintaongelman kuvaus	8.1
Älykkään järjestelmäintegraation piirteistä	8.2
Läsnäolon tunnistamisesta asuinrakennuksissa	8.5

²¹ Varsinainen implementointi ja toiminnan seuranta tapahtuu projektin päätyttyä.

10. Yhteenveto

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää lähinnä oppiviin ja älykkäisiin menetelmiin perustuvia talotekniikkajärjestelmien säätöratkaisuja sekä rakennusten kokonaisenergianhallintamenetelmiä ja demonstroida jotain kehitettyä sovellusta koekohteessa. Kehitystyön painopiste oli asuinrakennuksissa, mutta monia ratkaisuja voidaan soveltaa myös toimisto- ja liikerakennuksissa.

Tutkimustyön alussa tehtiin kirjallisuusselvitys oppivien ja älykkäiden järjestelmien kehityksestä ja sovelluksista rakennusautomaatioon. Samoin selvitettiin säätimien toiminnan arvioimista yleisesti ja erityisesti lämmitysjärjestelmissä. Lämmitysjärjestelmissä säätimien hyvyyskriteerejä katsottiin olevan asumismukavuus ja energiataloudellisuus. Asumismukavuus toteutuu, kun rakennuksen sisälämpötila pysyy asetusarvossaan hyvin pienin vaihteluin. Energian kulutuksen minimoimiseksi säätöjärjestelmän tulee reagoida nopeasti sisälämpötilan muutoksiin sekä sisälämpötilan asetusarvon muutoksiin.

Lisäksi käsiteltiin älykkäiden järjestelmien käyttöä säätimien virityksessä, eli itsevirityviä ja adaptiivisia säätäjiä sekä sumean logiikan ja neuroverkkojen soveltamista viritämiseen. Projektissa kehitettiin sumeaan logiikkaan perustuva ilmastoinnin lämmityspatterin PI-säätimen automaattinen viritin. Automaattista viritintä kokeiltiin sekä hitaan että nopean järjestelmän yhteydessä ja verrattiin perinteisiin viritysratkaisuihin. Simulointien perusteella todettiin, että sumeaa logiikkaa hyödyntävä viritin on laskennallisesti raskaampi kuin pelkkiin ehtolauseisiin perustuva viritin.

Lisäksi tarkasteltiin yksinkertaisella järjestelmällä sumean säätimen ominaisuuksien vaikutusta säätötulokseen. Tarkastelut toteutettiin tekemällä ennalta määrätty vakiotesti usealle eri tapaukselle. Vaikka testijakso olikin lyhyt, saatiin eri tapausten välille eroja. Keskeisin johtopäätös on, että jäsenyysfunktioiden on katettava tarkasteltava alue riittävän laajasti.

Radiaattoriverkoston säätöön ja kytkentään liittyvät tarkastelut

Projektissa tarkasteltiin vesipatterilämmitteisen rakennuksen lämmityksen säätöä. Työssä kehitettiin menetelmä, joka muodostaa menoveden kompensointikäyrän automaattisesti. Menetelmällä voidaan muodostaa menoveden lämpötilan ulkolämpötilakompensointikäyrä tai vaihtoehtoisesti menoveden virtaaman ulkolämpötilakompensointikäyrä.

Simulointitulosten mukaan kompensointikäyrä löydetään nopeasti, ja huonelämpötilojen keskiarvo pysyy lähellä asetusarvoa. Menetelmä soveltaa sumeaa logiikkaa, mutta työssä havaittiin, että sumea päättely voidaan korvata yhdellä kaavalla.

Kehitetty menetelmä on yksinkertainen ja se vaatii vain vähän laskentatehoa ja muistia. Menetelmä vaatii mittaustietoina ulkoilman lämpötilan ja huoneilman lämpötilojen keskiarvon. Todellisessa tilanteessa huoneilman lämpötilojen keskiarvo voidaan harkinnan mukaan korvata muutamien huonelämpötilan keskiarvolla, lämmitysverkoston paluuv veden lämpötilalla (josta arvioidaan keskimääräinen huonelämpötila) tai poistoilman lämpötilalla.

Lämmitysverkoston paluuv veden lämpötilaa voidaan alentaa rajoittamalla pumpun virtaamaa (menoveden virtaaman ulkolämpötilakompensointi). Samalla saadaan säästöä pumpun sähkönkulutuksessa, mikäli pumppu on kierroslukusäätöinen.

Simulointilaskelmissa rakennuksena oli tyypillinen asuinkerrostalo. Todennäköisesti kompensointikäyrä olisi muodostettavissa vastaavalla tavalla myös muissa rakennustyypeissä, esim. toimistorakennuksissa. Jos kehitetyt menetelmät implementoitaisiin Suomen koko asuinkerrostalokannan soveltuvaan osaan, arvioitiin säästettävän vuositasolla lämmitysenergiana n. 830 GWh, sähköenergiana n. 40 GWh sekä ylläpitokustannuksissa n. 4 milj. €.

Radiaattoriverkoston paluuv edestä on saatavissa lämmitystehoa ilmastointikoneeseen. Suuri osa ilmastointikoneen lämmityspatterin energiantarpeesta voidaan tyydyttää radiaattoriverkoston paluuv veden lämmöllä, kun tuloilman lämpötilan asetusarvo pidetään likimain huonelämpötilan suuruisena. Lämmitysverkoston jäähtymä paranee, kun radiaattoriverkoston paluuv esi ohjataan ilmastointikoneelle. Lämmönjakokeskukseen palaa van veden lämpötila on simulointilaskelmien mukaan luokkaa 15–20 °C.

Kehitetyt ratkaisut ovat melko yksinkertaisia, eivätkä ne ole laajemmin toteutettuna nykyisiä järjestelmiä kalliimpia.

Älykäs sisäolojen säätö

Projektissa kehitettiin ensin älykäs ja oppiva sisälämpötilan säätöalgoritmi vakioilmavirtaiselle järjestelmälle, jota kehitettiin myöhemmin soveltuvaksi muuttuvilmavirtaiselle järjestelmälle. Tämä oppiva algoritmi soveltuu erityisesti epäjatkovasti käytössä oleviin rakennuksiin tai huoneistoihin (jollaisia suurin osa rakennuksista on). Algoritmin toimintaa on testattu simuloinnein ja koekohteessa.

Simulointien mukaan asuinrakennuksessa tai huoneistossa voidaan talviaikaan säästää jopa viidennes lämpöenergiasta, joka muuten kuluisi vastaavaan aikaan. Samoin puhaltimien sähkönkulutuksessa voidaan säästää noin viidennes. Energiankulutus alenee, koska työssä kehitetyn algoritmin avulla huoneilman lämpötilaa pystytään laskemaan normaaliarvostaan ja ilmavirtaa pienentämään, kun rakennuksessa ei oleskella. Lämpö-

tila pystytään nostamaan normaalitasolle ja rakennus tuulettamaan ennen kuin rakennukseen palataan. Algoritmi kykenee adaptoitumaan kyseisen rakennuksen lämpödynamiikkaan ja oppimaan lämpötilan nostoon tarvittavan ajan.

Asukas pystyy kytkimellä valitsemaan, haluaako hän saavuttaa maksimisäästöt energiassa vaiko painottaa viihtyvyyttä, jolloin energiasäästöt jäävät pienemmiksi. Viihtyisyys ei simulointitulosten mukaan kuitenkaan välttämättä heikkene vaikka tähdättäisiinkin maksimaalisiin säästöihin energiankulutuksessa. Epäviihtyisyyttä ilmenee lähinnä silloin, jos rakennukseen saavutaan normaalista poikkeavaan aikaan, kun rakennus on "seisontatilassa".

Kehitettyä oppivaa algoritmia testattiin koekohteessa, matalaenergiatalossa, jonka energiankulutus on selvästi pienempi kuin tavanomaisen nykyaikaisen rakennuksen. Tiiviissä ja hyvin eristetyssä rakennuksessa lämpötilamuutokset ovat hitaita, mikä tarkoittaa myös sitä, että algoritmilla saavutetut säästöt jäävät pienemmiksi. Kuitenkin myös matalaenergiatalon jo ennalta pientä energiankulutusta pystytään pienentämään algoritmin avulla.

Lisäksi älykkäästä sisäolojen säätöalgoritmista laadittiin käytännön toteutusratkaisu suureen toimistokiinteistöön. Algoritmista muokattiin myös kohteeseen implementoitavissa oleva Java-koodi. Algoritmin implementointi tähän kohteeseen sekä sen toiminnan seuranta tapahtuvat vasta projektin päätyttyä.

Ilmanvaihdon säätöön ja ohjaukseen liittyvät ratkaisut

Projektissa tutkittiin ilmanvaihtojärjestelmän energianhallinnan käytönaikaista optimointia matemaattisen optimointimenetelmän avulla. Iv-järjestelmän keskeisiä muuttujia optimaalisen toiminnan kannalta ovat tuloilman lämpötila ja virtaavan ilman määrä. Ilmanvaihtojärjestelmien energiankulutusta voidaan pienentää energiansäästötoimilla, joita ovat lämmön talteenotto, kierrätysilman käyttö ja mahdolliset matala-arvoisen energian lähteet. Optimaalisesti toimivassa järjestelmässä myös energiansäästötoimien maksimaalinen hyödyntäminen on otettava huomioon.

Tutkimuksessa määriteltiin ilmalämmitteiselle järjestelmälle viihtyisyyttä ja kustannuksia kuvaavat, toimintaparametreihin sidonnaiset funktiot; joiden perusteella johdettiin järjestelmän toiminnan hyvyttä kuvaava hyötyfunktio. Optimointimallin toimintaa tarkasteltiin toteuttamalla yksitavoitteisesti kustannus- ja viihtyisyysorientoituneet tarkastelut. Kustannusorientoituneissa tapauksissa menetelmä suosi lämmön tuontia ilmavirtaa lisäämällä. Menetelmä toimii hyvin. Epävarmuustekijöitä ovat PPD-luvun määrittelevän funktion luotettavuus ja soveltuvuus tarkasteltaviin tapauksiin sekä vaikeudet määrittellä matalalämpötilaisista energianlähteistä hyödynnettävissä oleva maksimilämpötila.

Lisäksi tarkasteltiin edellytyksiä toteuttaa automaattinen ilmanvaihdon ohjausmenetelmä asuinkeuhkoston keskitetyn poistoilmanvaihdon tai huoneistokohtaisen tulo- ja poistoilmanvaihdon tapauksissa. Jos huone- tai huoneistokohtaiset ilmavirrat ovat säädettävissä säätöpellein ja puhaltimen pyörimisnopeus on säädettävissä taajuusmuuttajalla, menetelmän avulla voidaan automaattisesti ohjata ilmanvaihtoa niihin kohteisiin, joissa sitä eniten tarvitaan. Tarvittaessa voidaan myös ilmanvaihtoa siirtää tiloista, joissa tarvetta ei ole, tiloihin, joissa tarve on suurimmillaan.

Ilmanvaihtojärjestelmän optimaalinen toiminta merkitsee paitsi hyvää ilmanlaatua, myös mahdollisimman alhaisia energiakustannuksia. Tällöin kustannusten minimoimiseksi ja viihtyvyyden maksimoimiseksi ilmavirta tulee voida pitää mahdollisimman pienenä. Tästä huolimatta olisi pystyttävä takaamaan riittävän hyvä ilmanlaatu sekä hyvät lämpötila- ja kosteusolosuhteet.

Kustannusten minimoiminen edellyttäisi tietoa läsnäolosta. Tällöin säätöpellit voitaisiin ohjata joko kokonaan kiinni tai vain hyvin vähän auki, mikäli huoneessa tai huoneistossa ei olla paikalla. Tarkasteluissa läsnäolotiedon saatavuutta ei pidetty kovin luotettavana, joten tyydyttiin pitämään koko ajan yllä perusilmanvaihtoa, johon tehostustarpeen esiintyessä tehtiin tarvittavat muutokset. Tehostuksen kesto ajateltiin määrättävän kahdella tavalla: joko sähkövirran esiintyessä kuormittavassa laitteessa tai kosteuden (tai lämpötilan) raja-arvon ylittyessä. Tarkastelujen pohjalta johdettiin käytännössä toteutuskelpoinen ohjausratkaisu.

Valaistuksen säätöön liittyvät ratkaisut

Keinovalaistuksen ja päivänvalon yhteissäätöön liittyen selvitettiin säädön tavoitteita, toimistotilan päivänvalosuunnittelun lähtökohtia, sähkövalaistuksen säätöä, sähköistä valonohjausjärjestelmää, loistelamppujen säätöteknologioita, kaihtimen säätöä sekä säädön toteutusta rakentamisprosessin osana.

Lisäksi kehitettiin sumeaa logiikkaan perustuva integroitu keinovalon ja sälekaihtimien säätömenetelmä. Valonmittaus perustuu ulkovalaistusta mittaavaan anturiin, joka mittaa ikkunaseinän valaistusvoimakkuutta. Yhdellä anturilla voidaan säätää kaikkia tiloja, joiden päivänvalo-olosuhteet ovat samanlaiset. Muina muuttujina säätimen sisäänmenossa ovat auringon korkeuskulma ja suunta ikkunaseinään nähden.

Simulointitulokset eri päivänvalo-olosuhteissa osoittivat säätimen toimivan tyydyttävästi. Mitään täysin odottamattomia ulostulojen arvoja ei esiintynyt. Sumea sääntökanta tuntui olevan likimain oikea. Säädin reagoi tosin äkillisiin päivänvalomuutoksiin melko voimakkaasti, koska säätöön ei simuloinnissa ollut mahdollista saada sisäänmenoille viiveitä toisin kuin todellisissa säätimissä.

Rakennuksen kokonaisenergianhallinta

Tutkimuksessa selvitettiin, mitä kokonaisenergianhallintaongelmalla tarkoitetaan. Lisäksi selvitettiin älykkään järjestelmäintegraation piirteitä, älykkäällä järjestelmäintegraatiolla saavutettavissa olevia vaikutuksia ja vaihtoehtoisia integrointiperiaatteita. Oleellista on, että älykäs järjestelmäintegraatio tarkoittaa muutakin kuin tiedonsiirron avoimuutta. Älykäs säätöjärjestelmä oppii ja mukautuu reaaliaikaisessa käyttöympäristössä. Ohjelmisto- ja laitteistokomponenttien sekä päivitysten tekeminen on helppoa. Järjestelmä on taloudellinen ja helposti huollettavissa. Tapauksesta riippuen älykkäällä järjestelmäintegraatiolla voidaan saavuttaa noin 10–40 %:n energiansäästö.

Kokonaisenergianhallintakonseptia lähestyttiin esimerkkitapauksen kautta. Esimerkki-kohteesta selvitettiin ensin laitejärjestelmät, keskeisimmät asiat, joihin asukas voi vaikuttaa, sekä keskuslaitetason keskeisimmät tiedot. Sitten kohteeseen sovellettiin projektissa kehitettyjä säätömenetelmiä siten, että kuvattiin, mitä vaatimuksia, edellytyksiä ja mahdollisuuksia kussakin menetelmässä olisi juuri esimerkkikohteessa.

Lisäksi etsittiin todellisen mittausaineiston avulla asuinrakennuksen kokonaisenergiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä energiantarvetta ennustavaa neuroverkko- tai sumean logiikan mallia varten. Mittaussuureiden välisiä riippuvuuksia tutkittiin yleisesti ja korrelaatioanalyysin avulla. Aineistosta muodostettiin lineaarinen regressiomalli ennustamaan tehonkulutusta ja testattiin mallin toimivuutta. Suhteellisen hyvät lämmitystehojen ennusteet oli helppo laskea jopa yksinkertaisella, lineaarisella mallilla.

Ennustevirheen neliösumman minimoimiseen perustuva regressiomalli voidaan muodostaa myös rekursiivisesti. Jos systeemissä tapahtuu suuria muutoksia esimerkiksi vuodenaikojen vaihtuessa, rekursiivisellä menetelmällä mallin parametrit adaptoituvat sopiviksi, ja lisäksi tarvittava laskentakapasiteetti pienenee huomattavasti. Rekursiivisessä menetelmässä mallia päivitetään ainoastaan uuden havainnon perusteella ja eräänlaisen unohduskertoimen avulla voidaan päättää, kuinka pitkä mittaushistoria mallin muodostamisessa otetaan huomioon. Rekursiiviseen menetelmään liittyvät parametrien päivityskaavat ovat yksinkertaisia ja todennäköisesti helposti sulautettavissa todelliseen järjestelmään.

Lämmitys-, ilmastointi- ja valaistusjärjestelmien ohjaamiseen kehittyneellä tavalla tarvitaan luotettavaa tietoa asukkaiden läsnäolosta. Läsnäolosta voidaan saada viitteitä esimerkiksi läsnäoloantureilla, seuraamalla veden tai sähkön kulutusta tai huoneilman hiilidioksidipitoisuutta – tai joidenkin niiden yhdistelmänä. Olennaista lienee kuitenkin yksinkertaisuus.

Luotettavin tieto asukkaiden läsnäolosta saadaan luultavimmin turvajärjestelmän, esim. turvalukon, tilasta, koska tavallisesti viimeinen asunnosta poistuja kytkee turvajärjestelmän päälle ja ensimmäinen kotiin saapuja kytkee sen pois. Asukkaalla tulisi myös olla mahdollisuus ilmoittaa järjestelmälle, esim. puhelimella tai Internetin välityksellä, läsnä- tai poissaolostaan pidemmällä jaksolla. Myös kotiintulosta tulisi voisi ilmoittaa etukäteen mainituin tavoin. Yksittäisten järjestelmien ohjauksessa, kuten wc:n tai keittiön ilmanvaihdon tehostamisessa, on perusteltua käyttää tietoa (tietyn kalusteen) veden tai (tietyn laitteen tai tietyn huoneen valaistuksen) sähkön kulutuksesta.

Lähdeluettelo

Aho, I., Kosonen, R., Hoving, P., Marttila, M., Pirinen, A., Speeti, T. & Haajanen, J. 1996. Asuinkerrostalojen ja toimistorakennusten energianhallinta. Opas isännöitsijöille ja kiinteistöhoitajille. Espoo: VTT Rakennustekniikka. 52 s. + liitt. 8 s. (VTT Tiedotteita 1737). ISBN 951-38-4891-4.

Alessandri, A., Verona, F. B., Parisini, T. & Torrini, A. 1994. Neural approximations for the optimal control of heating systems. Control Applications, Proceedings of the Third IEEE Conference on 1994, vol. 3. S. 1613–1618.

Anderson, C. W., Hittle, D. C., Katz, A. D. & Kretchmar, R. M. 1997. Synthesis of reinforcement learning, neural networks and PI control applied to a simulated heating coil. Artificial Intelligence in Engineering 11, s. 421–429.

Andresen, I. 1998. Multiple Criterion Decision Analysis. A Survey of Methods, 1st draft. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Architecture, Department of Building Technology. 31 s.

Anon. 1993. Energy efficient Lighting in Offices. Garston, Iso-Britannia: Building Research Establishment. 19 s. (BRECSU-OPET for the Commission of the European Communities).

Anon. 1994a. Best Practice Guidelines for Developing Neural Computing Applications. London.

Anon. 1994b. Daylighting in Buildings. Dublin, Ireland: University College Dublin, Energy Research Group. 24 s. (UCD-OPET for the Commission of the European Communities)

Anon. 2000. *The IESNA lighting handbook*. (9th ed.) New York: The Illuminating Engineering Society of North America.

Anon. 2001. 9th National conference on building commissioning, Cherry Hill, New Jersey, May 9–11. Conference proceedings.

Arima, M., Hara, E. H. & Katzberg, J. D. 1995. A fuzzy logic and rough sets controller for HVAC systems. IEEE.

Bauer, M., Geiginger, J., Hegetschweiler, W., Morel, N., Sejkora, G. & Wurmsdobler, P. 1995. Delta: A blind controller using fuzzy logic. OFEN/BEW Funding No. 50 943.

Bierman, A. 2001. Photosensors tutorial [verkkodokumentti]. Rensselaer Polytechnic Institute, Pacific Gas & Electric Company ja Lighting Research Center. *URL*: www.lrc.rpi.edu/Photosensors [viitattu 2001-03-06].

Boisvert, A. & Rubio, R. G. 1999. Architecture for Intelligent Thermostats That Learn from Occupants' Behaviour. *ASHRAE Transactions*, Volume 105, Part 1, s. 124–130. ISSN 0001-2505

Bordass, B., Leaman, A. & Willis, S. 1994. Control Strategies for Building Services: The Role of the User. Teoksessa: Proceedings of the 1994 BRE Conference on Buildings and the Environment. Garson, Iso-Britannia. Toukokuu 16–20, Building Research Establishment.

Bumjin, S. & Koivo, A. J. 1995. Neural adaptive control of excavators. Teoksessa: 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 95, 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots' Proceedings, Vol. 1. S. 162–167.

Choi, A. S. & Sung, M. K. 2000. Development of a daylight responsive dimming system and preliminary evaluation of system performance. *Building and Environment*, Vol. 35, s. 663–676.

Choi, A.-S. & Mistrick, R. G. 1999. Analysis of daylight responsive dimming systems performance. *Building and Environment*, Vol. 34, s. 231–243.

Cooper, J. T. & Warwick, K. 1994. Performance enhancement for a simplified fuzzy logic controller. *International Conference on Control '94*, Vol. 1. S. 268–271.

Curtiss, P. S. 1997. Examples of Neural Networks Used for Building System Control and Energy Management. *ASHRAE Transactions*, Vol. 103, Part 2, s. 909–913. ISSN 0001-2505

Curtiss, P. S., Brandemuehl, M. J. & Kreider, J. F. 1994. Energy management in central HVAC plants using neural networks. *ASHRAE Transactions* 1994(1), s. 476–493.

Curtiss, P. S. & Brandemuehl, M. J. 1993. Adaptive control of HVAC processes using predictive neural networks. *ASHRAE Transactions*, 99 (1), s. 496–504.

Curtiss, P. S. 1992. Artificial neural networks for use in building systems control and energy management. PhD dissertation, University of Colorado-Boulder, Joint Center for energy management.

Curtiss, P. S., Kreider, J. F. & Brandemuehl, M. J. 1994. Local and Global Control of Commercial Building HVAC Systems using Artificial Neural Networks. American Control Conference 1994, Volume 3. S. 3029–3044.

Curtiss, P. S., Shavit, G. & Kreider, J. F. 1996. Neural networks applied to buildings – a tutorial and case studies in prediction and adaptive control. ASHRAE Transactions, Vol. 102(1), s. 1141–1146.

Dash, P. K., Routray, A., Panda, S. K. & Liew, A. C. 1995. Fuzzy tuning of DC link controllers. Teoksessa: International Conference on Energy Management and Power Delivery, 1995. Proceedings of EMPD '95., Vol. 1. S. 370–375.

de Silva, C. W. 1990. Fuzzy adaptation and control of a class of dynamic systems. Teoksessa: 5th IEEE International Symposium on Intelligent Control, 1990. Proceedings, Vol. 1. S. 304–309.

Dounis, A. I., Santamouris, M. J., Lefas, C. C. & Argiriou, A. 1995. Design of a fuzzy set environment control system. Energy and Buildings 22 , s. 81–87.

EN 60929. 1992. A.C. supplied electronic ballasts for tubular fluorescent lamps. Performance requirements. (Vaihtovirtasyöttöiset elektroniset loistelamppujen virranjohditimet. Toiminnalliset vaatimukset). European Standard. S. 2.

Fargus, R. S. & Chapman, C. 1998. A commercial PI-neural controller for the control of building services plant. UKACC International Conference on Control '98, Conf. Publ. nro 455, vol. 2. S. 1688–1693.

Fischer, M., Nelles, O. & Isermann, R. 1998. Adaptive predictive control of heat exchanger based on a fuzzy model. Control Engineering Practice 6, s. 259–269.

Fontoynt, M. 1995. The Daylighting Choice in Architecture. Teoksessa: Baker, N., Fanchiotti, A. & Steemers, K. (toim.). European Directory of Sustainable and Energy Efficient Building 1995. Lontoo, Iso-Britannia: James & James (Science Publisher). S. 88–93. (Section 4: Solar architecture).

Fraisse, G., Virgone, J. & Roux, J. J. 1997. Thermal control of a discontinuously occupied building using a classical and a fuzzy logic approach. Energy and Buildings 26, s. 303–316.

Funakoshi, S. & Matsuo, K. 1995. PMV-based train air-conditioning control system. ASHRAE Transactions, Vol. 101, Part 1, s. 423–430. ISSN 0001-2505.

- Garg, V. & Bansal, N. K. 2000. Smart occupancy sensors to reduce energy consumption. *Energy and Buildings* 32, s. 81–87.
- Gibson, G. L. & Kraft, T. T. 1993. Electric demand prediction using artificial neural network technology. *ASHRAE Journal*, March, s. 60–68.
- Gibson, G. L. 1997. A Supervisory Controller for Optimization of Building Central Cooling Systems. *ASHRAE Transactions*, Vol. 103, Part 1, s. 486–493. ISSN 0001-2505.
- Hamdi, M. & Lachiver, G. 1998. A fuzzy control system based on the human sensation of thermal comfort. *IEEE*.
- Harju, T. 1999. PID-säätimen käytännön vitysmenetelmät. (Control CAD Oy, esitelmä)
- Heimonen, I. 1998. A Simplified Thermal Simulation Tool For Energy Analyses Of Lightning Control Options. VTT Building Technology. Solar Control, EU Joule III project. Task 4: Smart Control. August 1998. 8 s. (SmartWin-projektin sisäinen työraportti)
- Hepworth, S. J. & Dexter, A. L. 1994. Neural control of non-linear HVAC plant. *Proceedings of the Third IEEE Conference on Control Applications*, Vol. 3, s. 1849–1854.
- Hepworth, S. J., Dexter, A. L. & Willis, S. T. P. 1994. Neural network control of a non-linear heater battery. *Building Services Engineering Research and Technology*, 15(3), s. 119–129.
- Husaunndee, A. M., Jandon, M., Lambert, A., Motte, E., Todtli, J. & Visier, J. C. 2001. Integrated Control of HVAC System, lighting and blinds in a building zone. Teoksessa: 7th REHVA World Congress, CLIMA 2000, Napoli, 15.–18.9.2001. 14 s.
- Isomursu, P., Niskanen, V., Carlsson, Ch. & Eklund, P. 1993. Sumean logiikan mahdollisuudet. Helsinki: Tekes. 101 s. (Julkaisu 34/93.) ISBN 951-47-1930-1.
- Iwasaki, Y., Kobayashi, S., Nagaiwa, A. & Yamada, Y. 1998. Development on District Heating and Cooling Plant Operation Support System. *ASHRAE Transactions*, Vol. 104, Part 1A, s. 4–12, ISSN 0001-2505.
- Jensen, S. Ø., Johansen, J. M. & Mehr, U. 1997. Fuzzy logic styring af solbygninger. DTI Energi. ISBN 87-7756-469-3.

Kajl, S., Malinowski, P., Czogala, E. & Balazinski, M. 1995. Prediction of building thermal performance using fuzzydecision support system. Teoksessa: International Joint Conference of the FourthIEEE International Conference on Fuzzy Systems and The SecondInternational Fuzzy Engineering Symposium., Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Volume 1. S. 225–232.

Karjalainen, S. & Paiho, S. 2001. Sumeiden säätimien testipenkki. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 8 s. (Älyfutuuri-projektin työraportti)

Karray, F., Natarajan, K. & Mansour, S. 1995. A hierarchical rule-based control of a diesel engine system. Teoksessa: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1995. Intelligent Systems for the 21st Century, Vol. 4. S. 3000–3004.

Khoo, I. & Shimmin, J. 2001. Internet occupancy feedback. Building Services Journal, October, s. 61–62.

Kintner-Meyer, M. & Emery, A. F. 1995. Optimal Control of an HVAC system using cold storage and building thermal capacitance. Energy and Buildings 23, s. 19–31.

Koivisto, H., Karttunen, P., Katajisto, K., Pajunen, T., Vaittinen, R., Haavisto, J., Karhunen, I. & Ahvenjärvi, S. 1983. Kiinteistöjen lämmitysjärjestelmien säätö. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto. 192 s. (Säätötekniikan laboratorion raportti 7-83). ISBN 951-720-770-0.

Kolokotsa, D. & Stavrakakis, G. 2001. Combining smart card and local operating network technologies with advanced decision support techniques to develop an intelligent industrial energy management system for buildings. Kreetta, Kreikka: Technical University of Crete. 17 s. (Publishable Final Report).

Kovanen, K. 1989. Sisäseinäpuhalluksen soveltuvuus asuinhuoneiston ilmastointiin. Espoo: Teknillinen korkeakoulu. Tutkimusselostus.

Krauss, J., Bauer, M., Morel, N. & El-Khoury, M. 1998. NEUROBAT, a neuro-fuzzy expert system in building control. Final report. Project No 51'565.

Kreider, J. F. 1994. Neural Networks Applied to Building Energy Studies a Tutorial. Teoksessa: Bloem, J. J. (toim.). Workshop on Application of System Identification in Energy Savings in Buildings, Ispra, Italy 25–27 October, 1993. Brussels & Luxembourg: Commission of the European Communities. S. 243–251. (CL-NA-15566-EN-C).

Kreider, J. F., Blanc, S. L. & Kammerud, R. C. 1997. Operational Data as the Basis for Neural Network Prediction of Hourly Electrical Demand. ASHRAE Transactions, Vol. 103, Part 2, s. 926–934. ISSN 0001-2505.

Kuntze, H.-B. & Bernard, Th. 1998. A new fuzzy-based supervisory control concept for the demand-responsive optimization of HVAC control systems. Teoksessa: Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control, Volume 4. Tampa, Florida, USA. S. 4258–4263.

Kärki, S. & Karjalainen, S. 1999. Ilmastointijärjestelmän vikadiagnostiikka. Menetelmät ja sovellukset. Espoo: VTT Rakennustekniikka. 92 s. + liitt. 2 s. (VTT Tiedotteita 1967). ISBN 951-38-5452-3.

Laine, J. & Saari, M. 1994. METOP. CFC-aineeton matalaenergiatoimistotalo. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 58 s. + liitt. 21 s. (VTT Julkaisuja 795). ISBN 951-38-4503-6.

Laine, J., Karjalainen, S. & Saari, M. 1998. Asuinkerrostalojen LVI-vertailututkimus. Helsinki: Helsingin kaupungin asuntotuotantotoimisto. 60 s. + liitt. 75 s.

Lassila, K. (toim.) 1992. LVIS-2000 tyyppirakennukset. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio. 46 s. + liitt. 5 s. (LVIS-2000 raportti 17). ISBN 952-9601-06-9.

Lee, E. S. & Selkowitz, S. E. 1995. The design and evaluation of integrated envelope and lighting control strategies for commercial buildings. ASHRAE Transactions, Vol. 101, Part 1, s. 326–342. ISSN 0001-2505.

Lee, E. S. & Selkowitz, S. E. 1998. Integrated envelope and lighting systems for commercial buildings: A retrospective. Proceedings of the ACEEE 1998 summer study on energy efficiency in buildings.

Lee, E. S. *et al.* 1998. Integrated performance of an automated venetian blind/electric lighting system in a full-scale private office. Proceedings of the ASHRAE/DOE/BTECC Conference, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII, Clearwater Beach, Florida, December 7–11, 1998.

Lee, E. S., DiBartolomeo, D. L. & Selkowitz, E. S. 1999. The effect of venetian blinds on daylight photoelectric control performance.

Lehto, M. & Karjalainen, S. 1996. Eroaako älytalojen sisäilmasto muiden toimitilojen sisäilmastosta? Teoksessa: Ruotsalainen, R. & Säteri, J. (toim.) Sisäilmastoseminaari 20.3.1996. Teknillinen korkeakoulu, LVI-tekniikan laboratorio. S. 25–30. ISBN 951-97186-4-8.

Lightbody, G. & Irwin, G. W. 1994. Neural model reference adaptive control and application to a BTT-CLOS guidance system. Teoksessa: IEEE International Conference on Neural Networks, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence, Vol. 4. S. 2429–2435.

Ling, K. V. & Dexter, A. L. 1994. Expert Control of Air-Conditioning Plant. *Automatica*, Vol. 30, Nro 5, s. 761–773.

Littlefair, Paul J. 1996. Photoelectric control - The effectiveness of techniques to reduce switching frequency. PD 223/96, BRE, Garston.

Meyne, Ph., Houkari, M., Barret, C., Martinez, J. M., Garassino, A. & Tormo, P. 1993. A neural adaptive controller. Teoksessa: International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1993. 'Systems Engineering in the Service of Humans', Conference Proceedings, Vol. 4. S. 80–84.

Mozer, M. C., Vidmar, L. & Dodier, R. H. 1997. The Neurothermostat: Predictive Optimal Control of Residential Heating Systems. Teoksessa: Mozer, M. C., Jordan, M. I., Petsche, T. (toim.). *Advances in Neural Information Processing Systems 9*. Cambridge, MA: MIT Press.

Myllymäki, P. & Tirri, H. 1998. Bayes-verkkojen mahdollisuudet. Helsinki: Tekes. 110 s. (Teknologiakatsaus 58/98). ISBN 951-53-1391-0.

Nesler, C. G. 1998. Building Controls: Riding the Technology Wave. *Building Systems, Building Intelligence*, January, s. 2–11 & 64.

Nicol, F. & McCartney, K. 2001. Smart controls and thermal comfort. Oxford: Oxford Brookes University. 89 s. (Confidential Final Report).

Pakanen, J. & Möttönen, V. 1999. Puheteknologiaa rakennuksiin. *Talotekniikka*, Nro 3, s. 90–91.

Piao Y.-G., Zhang H.-G. & Zeungnam, B. 1998. A simple fuzzy adaptive control method and application in HVAC. IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of The 1998 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol. 1. S. 528–532.

Pietarinen, P. & Saari, M. 1999. Ilmanvaihtolämmityksen hajautettu automaatio matala-energiatalossa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 43 s. (VTT Tiedotteita 1950). ISBN 951-38-5415-9, 951-38-5416-7.

prEN 832. 1994. Thermal performance of Buildings – Calculation of Energy Use for Heating – Residential Buildings. February 1994. 43 s.

Priolo, C., Sciuto, S. & Sperduto, F. 2001. Efficient Design Incorporating Fundamentals Improvements for Control and Integrated Optimisation. Catania, Italia: Conphoebus SpA. 160 s. (Confidential Final Report).

Pudil, P. & Novovicová, J. 1998. Novel Methods for Subset Selection with Respect to Problem Knowledge. IEEE Intelligent Systems, 1998, Vol. 13, Nro 2, s. 66–74.

Rubinstein, F., Avery, D. & Jennings, J. 1997. On the calibration and commissioning of lighting controls. Proceedings of the Right Light 4 Conference, November 19–21, 1997, Copenhagen, Denmark.

Rubinstein, F., Ward, G. & Verderber, R. 1988. Improving the performance of photoelectrically controlled lighting systems, 1988 IESNA Annual Conference. S. 43–81.

Seem, J. E. 1997. Implementation of a new Pattern Recognition Adaptive Controller Developed Through Optimization. ASHRAE Transactions, Vol. 103, Part 1, s. 494–506, ISSN 0001-2505.

Selkowitz, S. E. 1998. The elusive challenge of daylighted buildings: A brief review 25 years later. Daylighting '98 Conference Proceedings, May 11–13, 1998, Ottawa, Ontario, Canada.

Seppänen, O. 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Helsinki: Kirjapaino Kiitorata Oy. 348 s. ISBN 951-96098-0-6.

Sisäilmastoluokitus 2000. 2001. Sisäilmayhdistyksen julkaisu 5. Espoo. 32 s. ISBN 952-5236-11-0.

- Slater, A. I. & Davidson, P. J. 1993. Energy Efficient Lighting in Buildings. Garston, Iso-Britannia: Building Research Establishment. 16 s. (BRECSU-OPET for the Commission of the European Communities).
- So, A. T. P., Chan, W. L. & Tse, W. L. 1997. Self-tuning fuzzy air handling system controller. *Building Services Engineering Research and Technology*, 18(2), s. 99–108.
- So, A. T. P., Chow, T. T., Chan, W. L. & Tse, W. L. 1995. A neural-network-based identifier/controller for modern HVAC control. *ASHRAE Transactions*, 101 (2), s. 14–31.
- Sousa, J. M., Babuska, R. & Verbruggen, H. B. 1997. Fuzzy predictive control applied to an air-conditioning system., *Control Eng. Practice*, Vol. 5, Nro 10, s. 1395–1406.
- Stadler, I., Doggart, J., Schalamun, H. & Dimoudi, A. 2001. Building energy management with smart systems. Kassel: Universität Gesamthochschule Kassel. 15 s. (Publishable Final Report).
- Sutherland, G., Eftaxias, G., Santamouris, M. & Asimakopoulos, D. 1999. Combined Control of Natural and Forced Ventilation Using Intelligent Control Algorithms. Proceedings of the 8th International Conference on Indoor AirQuality and Climate, Edinburgh, Scotland, 8–13 August, 1999 (CD-rom).
- Taipale, O. & Jurva, E. 1999. Muuttujien valinta ja mittausaineiston muodostaminen. Helsinki: Tekes. 123 s. + liitt. 3 s. (Teknologiakatsaus 66/99). ISBN 951-53-1429-1.
- Tobi, T. & Hanafusa, T. 1991. A practical application of fuzzy control for an air-conditioning system. *International Journal of Approximate Reasoning* 5, s. 331–348.
- Truong, T. T. & Hofmann, W. 1995. A new speed controller with fuzzy tuning. Teoksessa: 21st International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Proceedings of the 1995 IEEE IECON, Vol. 2. S. 1484–1489.
- Tseng, P. C. 1998. Building Commissioning: Benefits and Costs. *Heating, Piping & AirConditioning*, Vol. 70, Nro 4, s. 51–59. ISSN 0017-940X.
- Underwood, C. P. 1999. HVAC control systems – modelling, analysis and design. E&FN Spon.
- Vikström, K., Aho, I. Haakana, M. & Paiho, S. 2000. Inventory data, Finland. Sureuro project. Motiva & VTT Building Technology.

Wang, Q. & Broome, D. R. 1994. A novel neural adaptive controller for robots. *Control '94*, Vol. 1, s. 486–491.

Wu, Q. H., Irwin, G. W. & Hogg, B. W. 1991. A neural network regulator. *Teoksessa: International Conference on Control '91*, Vol. 1. S. 145–150.

Zomaya, A. Y., Suddaby, M. E. & Morris, A. S. 1992. Direct neuro-adaptive control of robot manipulators. *Teoksessa: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Proceedings*, Vol. 3. S. 1902–1907.

Åström, K. J. & Wittenmark, B. 1990. *Computer Controlled Systems – Theory and Design*. New Jersey: Prentice Hall.

Liite A: LVIS-2000-tyyppikerrostalon kolmio

Taulukko 1. Tyyppikerrostalon kolmion tilojen ja rakenteiden mitat sekä tilojen sisältämien kalusteiden peittämä pinta-ala. IA on ilmansiirtoaukko. *) viittaa viereisen huoneiston tilaan.

Tila	Lattian pinta-ala [m ²]	Tilan tilavuus [m ³]	Kalustettu pinta-ala [m ²]	Rakenne	Suuntaus	Rakenteen pinta-ala [m ²]
Makuuhuone 1 KH1	13,8	30,2	7,2	US2 VS1 VS1 VS1 OVI2 IK1	POHJ KH2 KH3 KH6 KH6 POHJ	8,42 11,38 11,54 7,67 2,00 1,08
Makuuhuone 2 KH2	13,9	30,2	5,2	US2 VS1 VS1 VS2 OVI2 IK1	POHJ KH1 KH6 YH1 KH6 POHJ	8,45 11,38 7,53 11,38 2,00 1,08
Olohuone KH3	24,7	52,5	6,5	US2 US2 VS1 VS1 IA OVI2 IK1 IK1	POHJ LÄNSI KH1 KH4 KH6 KH4 POHJ LÄNSI	11,31 12,93 11,54 11,11 2,70 2,00 1,80 1,80
Keittiö KH4	17,3	38,8	7,0	US2 VS1 VS1 VS1 VS2 OVI2 IK1	LÄNSI KH3 KH5 KH6 *)keittiö KH3 LÄNSI	6,27 11,11 7,35 5,48 18,42 2,00 1,08
Kylpyhuone KH5	7,89	18,0	2,0	VS1 VS1 VS2 OVI2	KH4 KH6 *)kylpyhuone KH6	7,35 13,90 8,38 2,00
Eteinen +käytävä KH6	13,1	30,0	0,5	VS1 VS1 VS1 VS1 VS2 VS2 VS2 IA OVI1 OVI2 OVI2 OVI2	KH1 KH2 KH4 KH5 YH3 PK *)eteinen KH3 PK KH1 KH2 KH5	7,67 7,53 5,48 13,90 6,48 2,58 5,34 2,70 2,00 2,00 2,00 2,00

Taulukko 2. Eri tilojen sisäiset kuormat arkipäivinä (W). Makuuhuoneessa KH1 nukkuu kaksi henkilöä ja makuuhuoneessa KH2 yksi henkilö.

klo [h]	Makuuhuoneet			Keittiö (KH4)			Olohuone (KH3)		
	Ihmiset KH1	KH2	Valais-tus	Ihmiset	Valais-tus	Laitteet	Ihmi-set	Valais-tus	Laitteet
0-1	150	75	0	0	0	125	0	0	0
1-2	150	75	0	0	0	125	0	0	0
2-3	150	75	0	0	0	125	0	0	0
3-4	150	75	0	0	0	125	0	0	0
4-5	150	75	0	0	0	125	0	0	0
5-6	150	75	0	0	0	125	0	0	0
6-7	150	75	225	0	0	125	0	0	0
7-8	0	0	0	225	225	375	0	0	0
8-9	0	0	0	0	0	125	0	0	0
9-10	0	0	0	0	0	125	0	0	0
10-11	0	0	0	0	0	125	0	0	0
11-12	0	0	0	0	0	125	0	0	0
12-13	0	0	0	0	0	125	0	0	0
13-14	0	0	0	0	0	125	0	0	0
14-15	0	0	0	0	0	125	0	0	0
15-16	0	0	0	0	0	125	0	0	0
16-17	0	0	0	0	0	125	0	0	0
17-18	0	0	0	225	225	625	0	0	0
18-19	0	0	0	150	225	500	75	300	200
19-20	0	0	0	0	0	125	150	300	200
20-21	0	0	0	0	0	125	150	300	200
21-22	150	75	225	0	0	125	0	0	0
22-23	150	75	225	0	0	125	0	0	0
23-24	150	75	0	0	0	125	0	0	0

Taulukko 3. Eri tilojen sisäiset kuormat viikonloppuna (W). Makuuhuoneessa KH1 nukkuu kaksi henkilöä ja makuuhuoneessa KH2 yksi henkilö.

klo [h]	Makuuhuoneet			Keittiö (KH4)			Olohuone (KH3)		
	Ihmiset KH1	KH2	Valais-tus	Ihmiset	Valais-tus	Laitteet	Ihmiset	Valais-tus	Laitteet
0-1	150	75	0	0	0	125	0	0	0
1-2	150	75	0	0	0	125	0	0	0
2-3	150	75	0	0	0	125	0	0	0
3-4	150	75	0	0	0	125	0	0	0
4-5	150	75	0	0	0	125	0	0	0
5-6	150	75	0	0	0	125	0	0	0
6-7	150	75	225	0	0	125	0	0	0
7-8	150	75	0	0	0	125	0	0	0
8-9	0	0	0	225	225	375	0	0	0
9-10	0	0	0	0	0	125	150	300	100
10-11	0	0	0	0	0	125	150	300	100
11-12	0	0	0	0	0	125	150	300	100
12-13	0	0	0	225	225	625	0	300	100
13-14	0	0	0	0	0	125	150	300	100
14-15	0	0	0	0	0	125	150	300	100

15–16	0	0	0	0	0	125	150	300	100
16–17	0	0	0	0	0	125	150	300	100
17–18	0	0	0	225	225	625	0	300	100
18–19	0	0	0	150	225	500	150	300	200
19–20	0	0	0	0	0	125	225	300	200
20–21	0	0	0	0	0	125	225	300	200
21–22	0	0	0	0	0	125	225	300	200
22–23	150	75	225	0	0	125	0	0	0
23–24	150	75	0	0	0	125	0	0	0

Taulukko 4. Rakenteiden U-arvot.

Rakenne	Kuvaus	U-arvo (W/m²K)
US2	Raskas ulkoseinä	0,25
VS1	Kantava väliseinä	0,44
VS2	Kantava väliseinä	11,04
OVI1	Ulko-ovi	0,66
OVI2	Väliovi	3,50
IK1	Ikkuna	1,8

LÄHDE

Lassila, K. (toim.) 1992. LVIS-2000 tyyppirakennukset. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio. 46 s. + liitt. 5 s. (LVIS-2000 raportti 17). ISBN 952-9601-06-9.

Liite B: Kerrostaloyksiön tietoja

Taulukko 1. Yksiön huoneet, niiden koot ja tilavuudet sekä kalustuksen peittämä ala (Lassila 1992).

Tila	Lattian pinta-ala [m ²]	Huoneen tilavuus [m ³]	Kalustettu pinta-ala [m ²]
Olohuone	20,9	46,0	7,8
Eteinen + Keittokomero	6,41	15,8	3,1
Kylpyhuone	4,96	11,0	1,3

Taulukko 2. Yksiön vuorokautiset, sisäiset lämpökuormat (W) (Lassila 1992).

klo [h]	Olohuone + Makuuhuone		Eteinen + Keittokomero			Kylpyhuone
	Ihmiset	Valaistus	Laitteet	Ihmiset	Valaistus	Ihmiset
0-1	75	0	0	0	0	0
1-2	75	0	0	0	0	0
2-3	75	0	0	0	0	0
3-4	75	0	0	0	0	0
4-5	75	0	0	0	0	0
5-6	75	0	0	0	0	0
6-7	75	0	0	0	0	0
7-8	0	0	0	75	100	0
8-9	0	0	0	0	0	75
9-10	0	0	0	0	0	0
10-11	0	0	0	0	0	0
11-12	0	0	0	0	0	0
12-13	0	0	0	0	0	0
13-14	0	0	0	0	0	0
14-15	0	0	0	0	0	0
15-16	0	0	0	0	0	0
16-17	0	0	0	0	0	0
17-18	0	0	0	75	100	0
18-19	75	300	100	0	0	0
19-20	75	300	100	0	0	0
20-21	75	300	100	0	0	75
21-22	75	300	100	0	0	0
22-23	75	0	0	0	0	0
23-24	75	0	0	0	0	0

Kosteuskuorma:

- Oletetaan, että kylpyhuoneeseen kohdistuu klo 8–9 ja 20–21 kosteuskuorma 0,375 kg/h.

Taulukko 3. Huoneisiin tulevat ilmavirrat vertailutapauksessa.

aika [h]	Ilmavirta [l/s]		
	Olohuone	Eteinen-keittokomero	Kylpyhuone
0.00–6.00	6,5	11	7,5
6.00–9.00	13	22	15
9.00–16.00	6,5	11	7,5
16.00–19.00	13	22	15
19.00–24.00	6,5	11	7,5

Taulukko 4. Huoneisiin tulevat ilmavirrat koetapauksessa 1.

aika [h]	Ilmavirta [l/s]		
	Olohuone	Eteinen-keittokomero	Kylpyhuone
0.00–7.00	13	22	15
7.00–8.00	9	32	11
8.00–9.00	9	15	32
9.00–17.00	13	22	15
17.00–18.00	9	32	11
18.00–20.00	13	22	15
20.00–21.00	9	15	32
21.00–24.00	13	22	15

Taulukko 5. Huoneisiin tulevat ilmavirrat koetapauksessa 2.

aika [h]	Ilmavirta [l/s]		
	Olohuone	Eteinen-keittokomero	Kylpyhuone
0.00–7.00	13	22	15
7.00–8.00	7	44	15
8.00–9.00	5	15	32
9.00–17.00	13	22	15
17.00–18.00	7	44	15
18.00–20.00	13	22	15
20.00–21.00	5	15	32
21.00–24.00	13	22	15

Taulukko 6. Huoneisiin tulevat ilmavirrat koetapauksessa 3.

aika [h]	Ilmavirta [l/s]		
	Olohuone	Eteinen-keittokomero	Kylpyhuone
0.00–7.00	13	22	15
7.00–8.00	7	44	15
8.00–9.00	7	11	44
9.00–17.00	13	22	15
17.00–18.00	7	44	15
18.00–20.00	13	22	15
20.00–21.00	7	11	44
21.00–24.00	13	22	15

Taulukko 7. Huoneisiin tulevat ilmavirrat koetapauksessa 4.

aika [h]	Ilmavirta [l/s]		
	Olohuone	Eteinen-keittokomero	Kylpyhuone
0.00–7.00	13	22	15
7.00–8.00	7	44	15
8.00–9.00	5	15	32
9.00–17.00	7	7	7
17.00–18.00	7	44	15
18.00–20.00	13	22	15
20.00–21.00	5	15	32
21.00–24.00	13	22	15

Taulukko 8. Huoneisiin tulevat ilmavirrat koetapauksessa 5.

aika [h]	Ilmavirta [l/s]		
	Olohuone	Eteinen-keittokomero	Kylpyhuone
0.00–7.00	6,5	11	7,5
7.00–8.00	7	44	15
8.00–9.00	5	15	32
9.00–17.00	6,5	11	7,5
17.00–18.00	7	44	15
18.00–20.00	6,5	11	7,5
20.00–21.00	5	15	32
21.00–24.00	6,5	11	7,5

Taulukko 9. Huoneisiin tulevat ilmavirrat, kun säätö tapahtuu kylpyhuoneen kosteuden raja-arvon mukaan.

aika [h]	Ilmavirta [l/s]		
	Olohuone	Eteinen-keittokomero	Kylpyhuone
0.00–8.00	13	22	15
8.00–11.30	9	15	32
11.30–20.00	13	22	15
20.00–24.00	9	15	32

Taulukko 10. Huoneisiin tulevat ilmavirrat, kun säätö tapahtuu kylpyhuoneen kosteuden ja eteinen-keittokomeron lämpötilan raja-arvon mukaan.

aika [h]	Ilmavirta [l/s]		
	Olohuone	Eteinen-keittokomero	Kylpyhuone
0.00–7.00	13	22	15
7.00–8.00	9	32	11
8.00–9.00	9	15	32
9.00–17.00	13	22	15
17.00–18.00	9	32	11
18.00–20.00	13	22	15
20.00–21.00	9	15	32
21.00–24.00	13	22	15

Taulukko 11. Huoneisiin tulevat ilmavirrat koetapauksessa 2, kun säätöpeltejä avataan osittain.

aika [h]	Ilmavirta [l/s]		
	Olohuone	Eteinen-keittokomero	Kylpyhuone
0.00–7.00	13	22	15
7.00–8.00	7	28	15
8.00–9.00	7	22	28
9.00–17.00	13	22	15
17.00–18.00	7	28	15
18.00–20.00	13	22	15
20.00–21.00	7	22	28
21.00–24.00	13	22	15

LÄHDE

Lassila, K. (toim.) 1992. LVIS-2000 tyyppirakennukset. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio. 46 s. + liitt. 5 s. (LVIS-2000 raportti 17). ISBN 952-9601-06-9.

Liite C: Rekursiivinen pienimmän neliösumman menetelmä

Oletus: Malli on muotoa $y(t) = \varphi^T(t)\theta + e(t)$, missä $e(t)$ on valkoista kohinaa.

Merkinnät:

$\hat{\theta}(t)$	mallin parametrien estimaatit hetkellä t
$\varepsilon(t)$	ennustevirhe hetkellä t
$\varphi(t)$	havainnot ennustavista muuttujista hetkellä t
$y(t)$	havainto ennustettavasta muuttujasta hetkellä t
$0 \leq \lambda \leq 1$	unohduskerroin (Mitä pienempi kerroin on sitä nopeammin aikaisemmin kerätty data unohdetaan parametreja päivitetäessä.)
$P(t)$	parametrien estimaattien kovarianssimatriisi
$K(t)$	vahvistustekijä (ilmentää sitä kuinka voimakkaasti ennustevirhe vaikuttaa uusiin parametrien estimaatteihin).

Parametrien päivitys:

$$\begin{aligned}\hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1) + K(t)\varepsilon(t) \\ \varepsilon(t) &= y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1) \\ K(t) &= P(t)\varphi(t) = \frac{P(t-1)\varphi(t)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)} \\ P(t-1) &= \frac{1}{\lambda} \left\{ P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)} \right\}\end{aligned}$$

P on parametrien estimaattien kovarianssimatriisi. Ilman mitään etukäteistietoa parametrien estimaattien alkuarvoiksi voidaan valita 0 ja matriisin P alkuarvo kannattaa valita siten, että se on diagonaalinen ja diagonaalilla olevat alkiot ovat 'suuria'. Mikäli menetelmää käytetään otettaessa on jo olemassa mittauksia, parametrien estimaatit ja niiden kovarianssi matriisi voidaan laskea seuraavasti:

$$\begin{aligned}\hat{\theta}(0) &= (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \\ P(0) &= (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T R \Phi (\Phi^T \Phi)^{-1}, \quad R = E[ee^T]\end{aligned}$$

Missä Φ on matriisi, joka sisältää havainnot ennustavista muuttujista ja Y sisältää toteutuneet havainnot ennustettavasta muuttujasta. Mikäli virhe e on valkoista kohinaa nollakeskiarvolla ja varianssilla 1 , $R=I$ ja $P(0) = (\Phi^T \Phi)^{-1}$.



Tekijä(t) Paiho, Satu, Karjalainen, Sami, Alanne, Kari, Norvasuo, Markku, Eriksson, Lasse, Pöyhönen, Sanna, Kaartinen, Jani & Lehtovaara, Jorma			
Nimeke Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut			
Tiivistelmä <p>Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää talotekniikkajärjestelmien säätöratkaisuja sekä rakennusten kokonaisenergianhallintamenetelmiä ja demonstroida jotain kehitettyä sovellusta koeobjektissa. Kehitystyön painopiste oli asuinrakennuksissa, mutta monia ratkaisuja voidaan soveltaa myös toimisto- ja liikerakennuksissa.</p> <p>Osatehtävissä käsiteltiin älykkäitä järjestelmiä rakennusten energianhallinnassa yleisesti, ilmastonin, lämmityksen ja valaistuksen säätöä, rakennusten kokonaisenergianhallintaa sekä tulosten demonstrointia. Kehitettiin kymmenen uutta säätö-, ohjaus- tai energianhallintaratkaisua. Lisäksi tehtiin muita laskennallisia tai kokeellisia tarkasteluja sekä yleisselvityksiä.</p> <p>Aluksi selvitettiin oppivien ja älykkäiden menetelmien sovelluksia talotekniikkajärjestelmien säätöön ja rakennusten energianhallintaan. Käsiteltiin älykkäiden järjestelmien käyttöä säätimien virityksessä. Kehitettiin sumeaan logiikkaan perustuva ilmastonin lämmityspatterin PI-säätimen automaattinen viritin. Sumean säätimen ominaisuuksien vaikutusta säätötulokseen tarkasteltiin yksinkertaisella järjestelmällä.</p> <p>Tarkasteltiin vesipatterilämmitteisen rakennuksen lämmityksen säätöä. Kehitettiin yksinkertainen menetelmä, joka muodostaa automaattisesti menoveden lämpötilan tai virtaaman ulkolämpötilakompensointikäyrän. Jos menetelmä implementoitaisiin Suomen koko asuinrakennusalueen soveltuvaan osaan, säästettäisiin vuositasolla lämmitysenergiana n. 830 GWh, sähköenergiana n. 40 GWh sekä ylläpitokustannuksissa n. 4 milj. €. Suuri osa ilmastointikoneen lämmityspatterin energiantarpeesta asuinrakennuksissa voidaan tyydyttää radiaattoriverkoston paluuv veden lämmöllä, kun tuloilman lämpötilan asetusarvo pidetään likimain huonelämpötilan suuruisena.</p> <p>Kehitettiin ensin älykäs ja oppiva sisälämpötilan säätöalgoritmi vakioilmavirtaiselle järjestelmälle ja siitä edelleen sovellus muuttuvilmavirtaiselle järjestelmälle. Algoritmi soveltuu erityisesti epäjatkuvasti käytössä oleviin rakennuksiin tai huoneistoihin. Algoritmin toimintaa testattiin simuloinein ja koeobjektissa.</p> <p>Simulointien mukaan asuinrakennuksessa tai huoneistossa voidaan talviaikaan säästää jopa viidennes sekä lämpöenergiasta että puhaltimien sähkökulutuksessa. Energiankulutus alenee, koska kehitetyn algoritmin avulla huoneilman lämpötilaa pystytään laskemaan normaaliarvostaan ja ilmavirtaa pienentämään, kun rakennuksessa ei oleksella. Lämpötila voidaan nostaa normaalitasolle ja tuulettaa rakennus, ennen kuin rakennukseen palataan. Algoritmi adaptoituu rakennuksen lämpödynamiikkaan ja oppii lämpötilan nostoon tarvittavan ajan. Asukas valitsee kytkimellä, haluaako hän saavuttaa energian enimmäissäästöt vai painottaako hän viihtyvyyttä.</p> <p>Kehitettyä oppivaa algoritmia testattiin matalaenergiatalossa. Kuitenkin myös matalaenergiatalon pientä energiankulutusta pystytään vielä pienentämään algoritmin avulla. Älykkäistä sisäolojen säätöalgoritmita laadittiin käytännön toteutusratkaisu suureen toimistokiteistöön. Algoritmita muokattiin myös kohteeseen implementoitava Java-koodi.</p> <p>Ilmanvaihtojärjestelmän energianhallinnan käytönaikaista optimointia tutkittiin matemaattisella optimointimenetelmällä. Lisäksi tarkasteltiin edellytyksiä toteuttaa automaattinen ilmanvaihdon ohjausmenetelmä asuinrakennuksen keskitetyn poistoilmanvaihdon tai huoneistokohtaisen tulo- ja poistoilmanvaihdon tapauksissa. Jos huonekohtaiset ilmavirrat ovat säädettävissä säätöpellein, menetelmän avulla voidaan automaattisesti ohjata ilmanvaihtoa sitä eniten tarvitseviin kohteisiin. Tarkastelujen pohjalta johdettiin käytännössä toteutuskelpoinen ohjausratkaisu.</p> <p>Valaistuksen säätöön liittyen selvitettiin keinovalaistuksen ja päivänvalon yhteissäädön peruskysymyksiä. Kehitettiin sumeaan logiikkaan perustuva integroitu keinovalon ja sälekaihtimien säätömenetelmä. Simulointitulokset eri päivänvalo-olosuhteissa osoittivat säätimen toimivan tyydyttävästi.</p> <p>Tutkimuksessa käsiteltiin kokonaisenergianhallintaongelmaa esimerkkitapauksen kautta. Lisäksi selvitettiin älykkään järjestelmäintegraation piirteitä. Oleellista on, että älykäs järjestelmäintegraatio tarkoittaa muutakin kuin tiedonsiirron avoimuutta. Tapauksen mukaan älykkäällä järjestelmäintegraatiolla voidaan saavuttaa noin 10–40 %:n energiansäästö.</p> <p>Talotekniikkajärjestelmien kehittyneeseen ohjaamiseen tarvitaan luotettavaa tietoa läsnäolosta. Läsnäolosta voi saada viitteitä esimerkiksi läsnäoloantureilla, seuraamalla veden tai sähkön kulutusta tai huoneilman hiilidioksidipitoisuutta – tai joidenkin edellisten yhdistelmänä. Luotettavin tieto asukkaiden läsnäolosta saataneen turvajärjestelmästä.</p>			
Avainsanat buildings, facilities management, building services, control, energy management, intelligent systems, heating, radiators, lighting, fuzzy logic, automatic tuning, HVAC, room temperatures, simulation, energy economy			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT			
ISBN 951-38-5951-7 (nid.) 951-38-5952-5 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinnumero R9SU00465	
Julkaisu-aika Huhtikuu 2002	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 279 s. + liitt. 9 s.	Hinta F
Projektin nimi Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut		Toimeksiantaja(t) Tekes, VTT, Oy Kolmeks Ab, ABB Fläkt Oy, Vallox, Lonix Oy, Rettig Lämpö Oy	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Author(s) Paiho, Satu, Karjalainen, Sami, Alanne, Kari, Norvasuo, Markku, Eriksson, Lasse, Pöyhönen, Sanna, Kaartinen, Jani & Lehtovaara, Jorma			
Title New control and energy management solutions for buildings			
Abstract <p>The objective of this research was to develop control solutions for building services systems and total building energy management methods as well as to demonstrate some new solutions in a real building. The main focus was in residential buildings but many of the results can also be applied to non-domestic buildings.</p> <p>The subtasks of the research dealt with intelligent systems in building energy management in general, control of air-conditioning, heating and lighting, building total energy management and demonstration of the results. Ten new control and energy management solutions were developed. In addition, other theoretical and experimental examinations as well as general inspections were made.</p> <p>First it was found out how learning and intelligent methods have been used in controlling building services and in building energy management. Also the usage of intelligent systems in tuning of controllers was studied. A fuzzy logic based automatic tuner for a PI controller of a heating coil was developed within the project. Effects of the properties of a fuzzy controller on the control result were examined using a simple system. It was found out that the membership functions need to cover the examined area widely enough.</p> <p>In the project, control of water circulated heating was examined. A method was developed that automatically forms a compensation curve between outdoor air temperature and either supply water temperature or supply water pressure. Simulations showed that the curve is found quickly and that average room temperatures stay close to the setpoint. The method developed is simple and it requires only little computation power and memory. If this method would be implemented into all suitable residential buildings in Finland, this would save about 830 GWh of heating energy, about 40 GWh of electrical energy and about 4 million € in maintenance costs annually.</p> <p>The return water of a radiator network can be used as a main energy source for heating coils of air-handling units when the supply air temperature setpoint is kept close to room temperature.</p> <p>In the project, an intelligent and learning room temperature control algorithm was developed for a constant air volume system and was developed further for a variable air volume system. The algorithm suits especially buildings/apartments that are used periodically. The operation of the algorithm was tested in simulations and in experimental tests in a real building.</p> <p>According to the simulations, up to a fifth of both the heating energy and the electricity consumption of fans can be saved in residential buildings during winter. The energy consumption decreases because by using the developed algorithm the room air temperature can be dropped from its normal value and the air flow rate can be reduced when there is nobody present. The temperature can again be raised to its normal level and the building ventilated before somebody returns to the building. The algorithm is able to adapt to the thermodynamics of the building and to learn the time required for the temperature increase. The occupant can prioritize maximum energy saving or comfort by using a control switch accordingly.</p> <p>The algorithm was tested in a low-energy building where the energy consumption is much lower than in a normal modern building. In a tight and well-insulated building the temperature changes are slow, hence the smaller savings. However, even in the low-energy building the algorithm reduced the already low energy consumption.</p> <p>In addition, an implementation solution of the intelligent indoor control algorithm for a big office complex was made. Also the equivalent Java code was programmed.</p> <p>The optimisation of the energy management of a ventilation system during operation was examined using a mathematical optimisation method. Linear programming was applied in an air heated system for a comfort oriented as well as a cost oriented case. In the cost oriented case, the method clearly favoured heating by increasing the air flow. The method worked well.</p> <p>It was also studied how to implement an automated ventilation control method in a residential building with centralized exhaust ventilation or with separate supply and exhaust ventilation in each apartment. If the air flows in each room can be controlled with control dampers, the method enables the ventilation to be steered into the rooms where it is needed the most. Based on the study, a practically workable control solution was presented.</p> <p>Issues related to integrated control of artificial light and daylight were studied. In addition, a fuzzy logic based algorithm for integrated control of natural daylight and blinds combined was developed. Simulation results in different daylight conditions showed that the controller worked satisfactorily.</p> <p>A total energy management problem was discussed. The total energy management concept was dealt with using a case study. In addition, properties of an intelligent system integration were clarified. It is essential that the intelligent system integration means more than just an open data transfer. Depending on the case, energy savings of about 10–40 % can be reached by using intelligent system integration.</p> <p>Using real measurements, factors affecting the total energy consumption of a residential building were examined to be used in a neural network or a fuzzy logic model predicting the energy need. A linear regression model was formed to predict the power consumption. Relatively good predictions for heating powers were easy to calculate even with a simple linear model.</p> <p>Reliable information on occupancy is needed in advanced control of building services systems. Hints can be received for example from occupancy sensors, by monitoring water or electricity consumption or carbon dioxide concentration, or by a combination of the previous. Security systems are likely to convey the most reliable information in this respect.</p>			
Keywords buildings, facilities management, building services, control, energy management, intelligent systems, heating, radiators, lighting, fuzzy logic, automatic tuning, HVAC, room temperatures, simulation, energy economy			
Activity unit VTT Building and Transport, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-5951-7 (soft back ed.) 951-38-5952-5 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number R9SU00465	
Date April 2002	Language Finnish, engl. abstr.	Pages 279 p. + app. 9 p.	Price F
Name of project Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut		Commissioned by Tekes, VTT, Oy Kolmeks Ab, ABB Fläkt Oy, Vallox, Lonix Oy, Rettig Lämpö Oy	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

VTT TIEDOTTEITA – RESEARCH NOTES

VTT RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka – VTT BYGG OCH TRANSPORT – VTT BUILDING AND TRANSPORT

- 2093 Andstén, Tauno. Käsisammuttimien käyttö ruokaöljypalojen sammutuksessa. Kirjallisuustutkimus. 2001. 28 s.
- 2100 Pakanen, Jouko, Möttönen, Veli, Hyytinen, Mikko, Ruonansuu, Heikki & Törmäkangas, Kaija. Dynaamisten HTML-sivujen ja multimedian hyödyntäminen taloteknisten järjestelmien käytön, huollon ja vikadiagnostiikan opastamiseen. 2001. 20 s. + liitt. 10 s.
- 2101 Toratti, Tomi. Seismic design of timber structures. 2001. 53 p. + app. 16 p.
- 2102 Kolari, Sirpa & Luoma, Marianna. Ilmanvaihtojärjestelmän puhtaan asennusmenetelmän kehittäminen. 2001. 47 s.
- 2103 Koivu, Tapio, Mäntylä, Kaj, Loikkanen, Kaisu, Appel, Mikael & Pulakka, Sakari. Innovaatiotoiminnan kehittäminen kiinteistö- ja rakennusklusterissa. Lähtökohtia ja kokeiluja. 2001. 81 s. + 19 s.
- 2104 Hostikka, Simo, Kokkala, Matti & Vaari, Jukka. Experimental Study of the Localized Room Fires. NFSC2 Test Series. 2001. 49 p. + app. 46 p.
- 2106 Anttila, Virpi & Luoma, Juha. Turvavöiden käyttökokeilu junissa. Käyttö ja matkustajien mielipiteet. 2001. 27 s. + liitt. 9 s.
- 2108 Vares, Sirje. Kerrostalon ympäristövaikutukset. LVIS-2001-tyyppikerrostalo. 2001. 49 s.
- 2109 Ranta-Maunus, Alpo, Fonselius, Mikael, Kurkela, Juha & Toratti, Tomi. Reliability analysis of timber structures. 2001. 102 p. + app. 3 p.
- 2110 Anttila, Virpi. Talvijalankulku, liukastumistapaturmat ja kelitiedottamisen kehittäminen. 2001. 51 s. + liitt. 11 s.
- 2112 Ala-Outinen, Tiina, Myllymäki, Jukka, Baroudi, Djebar & Oksanen, Tuuli. Ruostumaton teräs tulipalolle altistetuissa rakenteissa. 2001. 53 s. + liitt. 9 s.
- 2113 Sipilä, Kari, Kirjavainen, Miikka, Ritola, Jouko & Kivikoski, Harri. Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapito-järjestelmät. Energiatalous ja tekninen toteutus. Kesäkeli-projekti. 2001. 75 s. + liitt. 15 s.
- 2116 Ryytänen, Tiia, Kallonen, Raija & Ahonen, Eino. Palosuojaajat tekstiilit. Ominaisuudet ja käyttö. 2001. 101 s.
- 2118 Kärki, Otto. Alkolukko rattijuopumuksen ehkäisyssä. Esiselvitys. 2001. 85 s. + liitt. 3 s.
- 2119 Tillander, Kati & Keski-Rahkonen, Olavi. Rakennusten syttymistäajuudet PRONTO-tietokannasta 1996–1999. 2001. 66 s. + liitt. 16 s.
- 2120 Koota, Jaana. Construction site safety. Case United States. 2001. 39 p. + app. 3 p.
- 2121 Tervonen, Juha & Räsänen, Jukka. Environmental assessment of strategic transport actions. SEA in CODE-TEN. 2001. 25 p. + app. 7 p.
- 2123 Hietaniemi, Jukka, Baroudi, Djebar, Korhonen, Timo, Björkman, Jouni, Kokkala, Matti & Lappi, Esa. Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen. Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen. 2002. 95 s. + liitt. 51 s.
- 2124 Talja, Asko, Toratti, Tomi & Järvinen, Erkki. Lattioiden värähtelyt. Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. 2002. 51 s. + liitt. 13 s.
- 2125 Riihimäki, Markku & Siekinen, Heidi. Asiakstarpeet kiinteistöliiketoiminnassa. Liike- ja toimistokiinteistöt. 2002. 74 s. + liitt. 10 s.
- 2126 Kauppinen, Anna-Kaisa, Pietilä, Paula, Sundbäck, Liisa & Kaleva, Hanna. Kiinteistöjohtamisen tehostaminen – vaihtoehtona ulkoistaminen. Ulkoistamisen edellytykset ja päätöksenteon mallintaminen. 2002. 73 s. + liitt. 4 s.
- 2128 Hietaniemi, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Korhonen, Timo, Siiskonen, Jaakko & Vaari, Jukka. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla. 2002. 125 s. + liitt. 63 s.
- 2134 Paiho, Satu, Karjalainen, Sami, Alanne, Kari, Norvasuo, Markku, Eriksson, Lasse, Pöyhönen, Sanna, Kaartinen, Jani & Lehtovaara, Jorma. Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut. 2002. 279 s. + liitt. 9 s.