

Juha Pasila

Tarpeenmukainen ilmanvaihto oppilaitoksissa

Energiansäästö ja ilmanlaatu

Opinnäytetyö

Kevät 2013

Tekniikan yksikkö

Rakennustekniikan koulutusohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Koulutusohjelma: Rakennustekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: LVI-suunnittelu

Tekijä: Juha Pasila

Työn nimi: Tarpeenmukainen ilmanvaihto oppilaitoksissa

Ohjaaja: Eero Kulmala DI

Vuosi: 2013

Sivumäärä: 76

Liitteiden lukumäärä: 4

Opinnäytetyössä tutkittiin tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän tuomaa energiasäästöä vakioilmavirta-ilmastointijärjestelmään verrattuna. Energiasäästölaskenta rajattiin käsittämään sähkö- ja lämmitysenergiakulutuksen tarkastelun. Kohteeksi valittiin Vaasan ammattiopiston sähkötalon luokkia palveleva ilmanvaihtokone TK03. Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän energiasäästö laskettiin rakennusautomaation käyttöliittymästä tehtyjen trenditulosteiden perusteella, joita tehtiin kuuden kuukauden ajalta. Mittausajanjakson energiasäästön lisäksi tehtiin laskelmat myös vuosikulutuksesta, johon mittaustulokset antoivat pohjan. Vuosittaisen energiasäästölaskennan lisäksi kohteen ilmanvaihtojärjestelmälle laskettiin takaisinmaksuaika. Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän laskettiin säästävän vuositasolla lämmitysenergiassa 46,8 % ja sähköenergiassa 72,8 %. Kohteen mitatakaavassa energiasäästöt olivat suuruudeltaan edellä mainitussa järjestyksessä 9980 kWh ja 6220 kWh. Rahassa vuosien energiasäästö merkitsi yhteensä 3590 €:n säästöä. Takaisinmaksuajaksi tarpeenmukaiselle ilmanvaihtojärjestelmälle saatiin seitsemän vuotta maltillisella energian eskalaatiolla laskettuna.

Työssä tarkasteltiin myös tarpeenmukaisen ilmanvaihdon ylläpitämiä sisäilmasto-olosuhteita. Sisäilmaston tutkimus rajattiin käsittämään ilmanlaadun ja lämpötilan alueet. Ilmanlaatua ja huonelämpötilaa arvioitiin kyselytutkimuksen avulla eli aistinvaraisesti, kenttämittauksin hiilidioksidimittareilla ja rakennusautomaatiosta saatujen VOC- ja huonelämpötila-trenditulosteiden avulla. Sisäilmastoa tutkittiin rajatusti kaikkien tarpeenmukaisten ilmanvaihtokoneiden palvelualueilla (TK01, TK03 ja TK05), mutta etenkin ennalta tiedossa olevissa ongelmaloissa. Ongelmalojen sisäilmaongelmia pyrittiin selvittämään yhtenä opinnäytetyön tavoitteista. Opinnäytetyöhön koottiin myös hieman havaintoja tarpeenmukaisten ilmanvaihtojärjestelmien käyttöliittymän puutteista sekä järjestelmien toiminnasta yleensä.

Avainsanat: ilmanvaihto, ilmanvaihtojärjestelmät, sisäilma, rakennusautomaatio, LVIS -tekniikka, LVI-ala, LVI-järjestelmät

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Construction engineering

Specialisation: HVAC Engineering

Author: Juha Pasila

Title of thesis: Demand-controlled ventilation in school buildings

Supervisor: Eero Kulmala

Year: 2013

Number of pages: 77

Number of appendices: 4

The aim of the study was to research indoor air quality problems in problematic spaces. The thesis researched the energy savings of demand-controlled ventilation compared to standard ventilation system with cooling. Energy saving calculations were restricted to cover consumption of electrical and warming energy. The subject of the study was a ventilation device TK03 which serves classes of Vaasa Vocational Institute. The energy savings of demand controlled ventilation system were calculated by using building automation trend specifications collected during six months.

The thesis inspected also the microclimate of rooms sustained by demand-controlled ventilation. A questionnaire study was used to evaluate the air quality and room air temperature. The questionnaire study included various methods to evaluate the air quality and room air temperature.

The repayment period of demand-controlled ventilation system was evaluated in addition to annual energy saving calculations. The demand-controlled ventilation system was annualized to decrease heating expenses and consumption up to 46,8 % in heating energy and up to 72,8 % in electrical energy. The repayment time for demand-controlled ventilation system was seven years using moderate energy escalation calculations.

Keywords: Ventilation, ventilation systems, indoor air, building automation system, heating, plumbing, ventilation and electrical installation, HPAC business, HPAC system

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ.....	4
Kuvio- ja taulukkoluetelo.....	7
1 TARPEELLINEN ILMANVAIHTO	9
2 Sisäilmasto	10
2.1 Sisäilmasäädökset	10
2.1.1 Lakisääteiset suositukset	10
2.1.2 Sisäilmastoluokitukset.....	11
2.2 Sisäilman laatuun vaikuttavat tekijät	13
2.2.1 Lämpötila ja kosteus	13
2.2.2 Kaasumaiset epäpuhtaudet	15
2.2.3 Kiinteät ja biologiset epäpuhtaudet	16
2.3 Sisäilmaston tavoitearvot	17
2.3.1 Sisäilmaston tavoitearvot rakennuksen käytön aikana.....	18
2.3.2 Sisäilmaston ilmanlaadun tavoitearvot.....	19
3 Ilmanvaihtojärjestelmät	21
3.1 Ilmanvaihtojärjestelmän valinta	21
3.2 Ilmanvaihto- ja ilmastointitavat.....	22
3.2.1 Painovoimainen ilmanvaihto	22
3.2.2 Vakioilmanvaihtojärjestelmä.....	23
3.2.3 Vakioilmavirta-ilmastointi.....	23
3.2.4 Muuttuvilmavirta-ilmanvaihto eli tarpeenmukainen ilmanvaihto	23
4 Energiakulutus	25
4.1 Energiakulutus Suomessa	25
4.2 Rakennuksen energiakulutuksen muodostuminen.....	26
4.3 Ilmanvaihdon energiakulutuksen muodostuminen	28
5 Kohde – Vaasan ammattiopisto	30
5.1 Yleistä	30
5.2 Tutkittavat ilmanvaihtojärjestelmät	31

5.3 Ilmanvaihtojärjestelmien automaatio	32
6 Vertailtavien ilmanvaihtojärjestelmien energiakulutus	36
6.1 Sähköenergiakulutus.....	36
6.1.1 Sähköenergian kulutus mittausajanjaksolla	36
6.1.2 Sähköenergian vuosikulutus	39
6.2 Lämmitysenergiakulutus	40
6.2.1 Lämmitysenergian kulutus mittausajanjaksolla	40
6.2.2 Lämmitysenergian vuosikulutus	42
7 Energiakulutuksen ja ilmanlaadun mittaukset.....	46
7.1 Rakennusautomaatiojärjestelmän rakenne	46
7.2 Mittausajanjakso	47
7.3 Trendit energialaskelmien perustana	48
7.4 Sisäilmastotutkimus	49
8 Energiakulutuskaskennan tulokset.....	50
8.1 Sähköenergian kulutus.....	50
8.1.1 Mittausajanjakso	50
8.1.2 Vuosikulutuslaskenta	52
8.2 Lämpöenergian kulutus.....	53
8.2.1 Mittausajanjakso	53
8.2.2 Vuosikulutuslaskenta	55
8.3 Vuosikulutukset.....	57
8.4 Järjestelmän takaisinmaksuaika.....	57
8.4.1 Investoinnin muodostuminen	57
8.4.2 Takaisinmaksuajan laskenta ja tulokset.....	60
9 Sisäilmaston tutkimustulokset	62
9.1 Ilmanlaatu yleisesti.....	62
9.2 Ilmanlaatu ongelmatiloiissa.....	63
9.2.1 S115b elektroniikan laboratorio.....	63
9.2.2 S117 luokkahuone.	63
9.2.3 S213 kirjavarasto	66
9.2.4 S210 opettajien huone	66
9.2.5 M127 opettajien huone	67
9.2.6 M132 koneenrakennus.....	67

9.2.7 M133 ATK-luokka	67
9.3 Havaintoja ilmanvaihtojärjestelmän toiminnasta ja käyttöliittymän tilasta ..	68
9.3.1 Käyttöliittymä.....	68
9.3.2 Järjestelmän toiminta	69
10 Johtopäätökset.....	70
11 Pohdinta.....	72
LÄHTEET	74
LIITTEET	1

Kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Suomen energian loppukäyttö vuonna 2007 oli yhteensä 307 TWh (Vehviläinen ym. 2010, 11).	26
Kuvio 2. Energian loppukäyttö rakennustyypeittäin vuonna 2007 (Vehviläinen ym. 2010, 20).....	27
Kuvio 3. Rakennuskannan hyötylämmitysenergian kulutuksen jakaantuminen (Vehviläinen ym. 2010, 24).	28
Kuvio 4. Vaasan ammattiopiston rakennuskannan asemointi Sepänkyläntie 14 - 16:ssa (Granlund Pohjanmaa Oy 2010a).....	30
Kuvio 5. Ilmanvaihtokoneen TK01 käyntiajat (Koivuporras 2013).	32
Kuvio 6. Ilmanvaihtokoneen TK03 käyntiajat (Koivuporras 2013).....	32
Kuvio 7. Swegon Super Wise:n kaaviokuva Modbus-verkosta (Swegon AB 2013) (Kuvaa muokattu).....	34
Kuvio 8. Rakennusautomaatiojärjestelmän rakenne (Granlund Pohjanmaa Oy 2010c).....	46
Kuvio 9. Ilmanvaihtokoneiden sähköenergiakulutus mittausajanjaksolla.	51
Kuvio 10. Ilmanvaihtokoneiden sähköenergiakulutus suhteutettuna mittauspäivien lukumäärään.	52
Kuvio 11. Ilmanvaihtokoneiden vuosittainen sähköenergiakulutus.	53
Kuvio 12. Jälkilämmityspatterin lämpöenergiakulutus mittausjaksolla.	54
Kuvio 13. Jälkilämmityspatterin lämpöenergiakulutus suhteutettuna mittauspäivien lukumäärään.	55
Kuvio 14. Jälkilämmityspatterin vuosittainen energiakulutus.	56
Kuvio 15. Ilmanvaihtojärjestelmien laskennalliset vuosikulutukset.....	57
Kuvio 16. Luokan S117 kenttämittaukset CO ₂ -mittarilla.....	64
Taulukko 1. Sisäilmaston tavoitearvot (RT 07-10946, 5).	19
Taulukko 2. Ilmanlaadun tavoitearvot (RT 07-10946, 8).	20
Taulukko 3. Ilmanvaihtokoneiden mallit ja maksimi-ilmavirrat (Granlund Pohjanmaa Oy 2010b).....	31
Taulukko 4. Ilmanvaihtokoneen TK03 todellinen ja näennäinen käyntiaika 2012.	43

Taulukko 5. Ilmanvaihtokoneen TK03 onnistuneet mittauspäivät.	48
Taulukko 6. Sähköenergiälaskentaan vaikuttavat tekijät.....	50

1 TARPEELLINEN ILMANVAIHTO

Edellisen energiakriisin yhteydessä 1970-luvulla rakennusten tiiviys parani, jolloin ilmanvaihdon vaikutus sisäilmalaatuun alettiin käsittää. Tiiviys esti vuotoilman aiheuttaman ilman luonnollisen vaihtumisen ja epäpuhtauspitoisuudet ilmassa kasvoivat. 1990-luvulla homeongelmat tulivat ihmisten tietoisuuteen ja sen myötä ihmisten kiinnostus sisäilmaan ja sen laatuun on noussut. (Seuri & Palomäki 2000, 18–20.)

Tekniikan kehittyttyä useille epäpuhtauspitoisuuksille on voitu antaa raja-arvot, joiden alittamiseen riittävällä ilmanvaihdolla pyritään. Energiakustannusten eskaloituminen on tuonut paineita lisäenergiasäästölle, johon tarpeenmukainen ilmanvaihto tarjoaa vaihtoehdon. Tarpeenmukainen ilmanvaihto sopii parhaiten tiloihin, joissa ilmamäärät ovat suuria ja käyttöasteet vaihtelevia. Etenkin koulurakennusten tilat ovat hyvä esimerkki tällaisista tiloista.

Työn tavoitteeksi asetettiin tarpeenmukaisen ilmanvaihdon toiminnan ja energiansäästön tutkiminen koulurakennuksessa, Vaasan ammattioppilaitoksessa. Kohteessa oli tiedossa muutama huonetila, joissa oli ongelmia sisäilmalaadun kanssa, joten tutkimukseen otettiin mukaan myös tarpeenmukaisten ilmanvaihtojärjestelmien tuottamat sisäilmasto-olosuhteet sekä ongelmatilojen sisäilmaongelmien selvitys.

Työn energiasäästölaskelmat tarjoavat uutta tietoa tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän takaisinmaksuajasta, sillä energiasäästölaskelmat pohjautuvat kohteen todellisiin energiakulutustietoihin.

Tutkimuksen ulkopuolelle rajattiin kesäajan jäähdytyskäytöstä aiheutuvat energiakulutustarkastelut.

2 Sisäilmasto

Sisäilmaston muodostavat sisätilojen fysikaalisten ja kemiallisten tekijöiden kokonaisuus. Sisäilmastosta puhuttaessa ihmiset käsittävät termin pitävän sisällään lähinnä ilmassa olevia epäpuhtauksia, joita ovat kaasumaiset, kiinteät tai biologiset epäpuhtaudet. Hyvä sisäilmasto on kuitenkin paljon laajempi käsite eikä rajoitu ainoastaan ilmassa oleviin epäpuhtauksiin, vaan pitää sisällään tilatyypikohtaiset lämpö- ja kosteusolosuhteet sekä ääni-, säteily- ja valaistusolosuhteet. (Seppänen 1996, 3.)

Sisäilmaston laadusta on vaikeaa tai jopa mahdotonta muodostaa kokonaiskuvaa yksittäisen mittaustuloksen tai henkilön tuntemuksen kautta, koska ilman laatu aistitaan yksilöllisesti. Hyvässä sisäilmassa on hyvä viihtyvyys ja se merkitsee suurempaa tyytyväisten määrää vallitseviin sisäilmaolosuhteisiin (Seppänen 1996, 4–3; Seppänen 2000, 6). Usein aistittua ilmanlaatua kuitenkin käytetään sisäilmanlaadun mittana. Se voidaan arvioida koulutetulla tai kouluttamattomalla hajupaneelilla, sillä monet ilmanvaihtostandardit perustuvat edelleen ihmisperäisten hajujen laimentamiseen (Seppänen 2000, 37).

Sisäilmaston epäpuhtauspitoisuuksia, lämpö- ja kosteusolosuhteita voidaan hallita ja ilmanvaihdosta aiheutuvan melun syntymistä ehkäistä, kun ilmanvaihto on oikein toteutettu (Seppänen 1996, 3).

2.1 Sisäilmasäädökset

2.1.1 Lakisääteiset suositukset

Suomen laissa ei ole määritelty virallisia rajoja sisäilman laadulle, mutta työterveys- ja työsuojelulaki (763/94) sisältää asuntotarkastusta tai siihen liittyviä säännöksiä. Sisäilmaston terveyden arviointia varten on tehty erilaisia ohjeita, kuten Suomen LVI-liiton julkaisema Sisäilmaston kuntoarvio (RT 07-10946, 3).

2.1.2 Sisäilmastoluokitukset

Sisäilmastoluokitus 2008 (RT 07-10946) on tarkoitettu käytettäväksi rakennus- ja taloteknisen suunnittelun ja urakoinnin sekä rakennustarviketeollisuuden apuna, kun tavoitteena on rakentaa entistä terveellisempiä ja viihtyisämpiä rakennuksia. Sisäilmastoluokitusta voidaan käyttää uudisrakentamisen lisäksi soveltuvin osin myös korjausrakentamisessa. Luokituksen avulla voidaan tarvittaessa arvioida sisäilman laatua valmiissa kohteessa.

Sisäilmastoluokitus antaa sisäilmastolle tavoite- ja suunnitteluarvot. Sisäilmastoluokituksessa on esitetty erillisenä taulukkona tärkeimmät lämmitys-, jäähdytys- ja ilmanvaihtolaitteiden suunnittelussa tarvittavat sisäilmastosuureiden arvot. Luokituksessa on käsitelty myös ääni- ja valaistusolosuhteita sekä ilman epäpuhtauksia, mihin liittyen rakennusmateriaaleille on esitetty päästöluokitus kemiallisille päästöille. Ilmanvaihtotuotteiden puhtausluokituksessa on esitetty yleiset vaatimukset ilmanvaihtotuotteiden puhtaudelle ja yksityiskohtaiset vaatimukset kanavisto-osille. (RT 07-10946, 3.)

Sisäilmastoasiat otetaan rakennushankkeessa huomioon samalla tavalla kuin muutkin toiminnalliset vaatimukset. Rakennuttaja ja tilaaja valitsevat kohteen kannalta sopivan sisäilmaston tavoitetason ja suunnittelijat laativat ratkaisun, jolla tavoitetaso saavutetaan. Sisäilmaston tavoitearvot voidaan valita myös tarkoituksenmukaisesti eri luokista. Urakoitsijat toteuttavat suunnitelmien mukaisen rakennuksen ja tavoitetasojen täyttyminen varmistetaan valvomalla, että toteutus vastaa suunnitelmaratkaisuja. Tarpeen vaatiessa sisäilman laatua voidaan mitata, mutta se on tarpeen vain erityistapauksessa. Sisäilmastoluokitusta ei ole tarkoitettu käytettäväksi rakennuksen terveellisyyden arvioinnissa. (RT 07-10946, 4–5.)

Luokituksen tavoitearvot on pyritty asettamaan siten, että luokka S3 vastaa maankäyttö- ja rakennuslain (LVI YM-00365, RT YM1-21357, KH YM-10488) sekä terveydensuojelulain 309/2006 (LVI STM-00341, RT STM-21319, KHSTM-10460) vaatimuksia. Nykytietämyksen mukaan luokan S3 tavoitearvojen toteutuessa ei terveille henkilöille koidu terveyshaittaa. Yhteensä laatuluokkia on kolme, S1, S2 ja S3. Laatuluokkien S1 ja S2 tavoitearvojen täyttyminen merkitsee vähimmäisvaatimuksia terveellisempiä ja viihtyisämpiä sisäilmasto-olosuhteita. Laatuluokkien S1

ja S2 toteutuminen vaatii sisäilmastoluokituksen ohjeiden noudattamista läpi rakennushankkeen, mutta luokka S3 voidaan toteuttaa tavanomaisen huolellisella rakentamistavalla. Luokan S1 sisäilmaston toteutuminen vaatii hyvän rakennustavan lisäksi merkittävää panostusta talotekniikkaan, kun taas sisäilmastoluokan S2 toteutuminen on mahdollista arkkitehtonisin keinoin. (RT 07-10946, 3.)

Luokka S1. Luokka S1 on paras sisäilmaluokka, jonka suunnitteluarvojen käyttäminen kohteessa merkitsee suurempaa tyytyväisten käyttäjien osuutta sisäilmaan ja pienempää valitusten määrää. S1 -luokassa tilan lämpöolot ovat viihtyisät eikä vetoa tai yllälämpenemistä esiinny. Tilan käyttäjä pystyy yksilöllisesti säätämään lämpöoloja ja valaistusta. Tilassa on erittäin hyvä sisäilman laatu ja käyttötarkoituksen mukaiset erittäin hyvät ääniolosuhteet. (RT 07-10946, 4.)

Luokka S2. Luokassa on hyvä sisäilmasto. Tilan sisäilmanlaatu on hyvä eikä tilassa ole häiritseviä hajuja. Tilassa lämpöolot ovat hyvät; vetoa ei esiinny, mutta tilan yllälämpeneminen on mahdollista kesäpäivinä. Tiloissa on niiden käyttötarkoituksen mukaiset hyvät ääni- ja valaistusolosuhteet. (RT 07-10946, 4.)

Luokka S3. Luokka S3 merkitsee tyydyttävää sisäilmastoa. Tilan sisäilmanlaatu ja lämpöolot sekä valaistus- ja ääniolosuhteet täyttävät rakentamismääräysten vähimmäisvaatimukset. (RT 07-10946, 4.)

Sisäilmaston tavoitearvoja voidaan soveltaa hankkeessa joko valitsemalla kaikki valitun sisäilmaluokan mukaiset tavoitearvot tai asettamalla halutuille ominaisuuksille erikseen harkitut arvot; esimerkiksi rakennustiloissa, joissa käyttäjien oleskeluaika on suhteellisen lyhyt, voidaan sisäilmaston tavoitearvoina käyttää luokan S3 arvoja. Tällaisia tiloja ovat muun muassa käytävät, aulat ja varastot. Parempien sisäilmastoluokkien tavoitearvoja taas voidaan käyttää toimistohuoneiden, liiketilojen, neuvotteluhuoneiden, opetustilojen ynnä muiden sellaisten tilojen suunnittelussa, joissa käyttöaste on korkea. (Seppänen 2004, 46; RT 07-10946, 3.)

2.2 Sisäilman laatuun vaikuttavat tekijät

Epäpuhtauslähteet vaihtelevat ajallisesti. Epäpuhtauslähteiden määrään ja laatuun vaikuttavat monet olosuhdetekijät, rakennuksen ikä sekä ihmisen toiminta. Rakennus- ja sisustusmateriaalit ovat monien epäpuhtauksien lähteitä etenkin uusissa rakennuksissa, kun materiaaleihin absorboituneet epäpuhtaudet tai materiaaleissa käytetyt kemikaalit vapautuvat ajan kuluessa ilmaan. (Seppänen 2004, 20; RT 07-10946, 6). Yksi keskeisimmistä olosuhdetekijöistä on rakennuksen sijainti; saasteet rakennuksen ulkoilmasta kulkeutuvat sisäilmaan, joten saasteiden pitoisuudet ovat suuremmat rakennuksen sijaitessa lähellä teollisuutta, voimaloita tai vilkasta liikenneväylää (Haahtela, Nordman & Talikka 1993, 20). Epäpuhtauspitoisuuksia ja niiden vaikutusta ihmiseen koskevat tiedot ovat viime aikoina parantuneet, ja eräille epäpuhtauspitoisuuksille on voitu antaa raja-arvoja. Näiden epäpuhtauspitoisuuksien raja-arvoja tulee käyttää silloin, kun tarkastellaan täyttääkö rakennuksen sisäilman laatu sille ominaiset kriteerit. Useimmat epäpuhtauspitoisuudet voi haistaa ja usein epämiellyttävää hajua voikin pitää huonon ilmanlaadun osoittajana (Seppänen 2004, 20). Ilmassa olevat epäpuhtaudet voidaan jakaa kolmeen ryhmään: kaasumaisiin, kiinteisiin ja biologisiin epäpuhtauksiin. Lämpötila ja kosteus vaikuttavat merkittävästi ilman epäpuhtauspitoisuuksiin. Mahdollisia epäpuhtauslähteitä on monia, mutta käsittelen työssä vain ilmanvaihdon mitoittamisessa eniten käytettyjä ja työn kannalta olennaisia epäpuhtauslähteitä.

2.2.1 Lämpötila ja kosteus

Oikea lämpötila sisätiloissa on tärkein ilmanvaihtosuunnittelun tavoite. Oikea lämpötila luo perustan terveelliselle ja viihtyisälle sisäilmastolle. Lämpötilan tulee olla optimoitu tilojen käyttötarkoitukseen nähden. Kehon aineenvaihdunta tuottaa lämpöä ja sen on poistuttava ympäristöön ruumiin lämpötilan säilyttämiseksi. (Seppänen 2004, 1.)

Seppäsen (2004, 4) mukaan lämpö siirtyy kehosta kolmella tavalla: konvektiona ilmaan, säteilynä ympäröiviin pintoihin ja vesihöyrynä hengityksen ja hikoilun mukana. Kehon lämmönsiirtymistä voidaan säädellä vaatetuksella, mutta käyttäjän

lämpötilasäädöllä tyytyväisten osuus kasvaa. Tutkimuksissa on todettu, että tyytyväisten käyttäjien osuus on suurimmillaan, kun huonelämpötila tavanomaisissa työ- ja asuintiloissa on 21–23 °C (Seppänen 2004, 1). Käyttäjän säädön on todettu olevan riittävä, kun lämpötilaan voidaan vaikuttaa ± 2 °C (Seppänen 2004, 6). Vanha muistisääntö lämmitysenergian säästämistä viidellä prosenttiyksiköllä alennettua huonelämpötila celsiusastetta kohden kannustaa laskemaan huonelämpötilaa. Huonelämpötilan pitämiseksi viihtyisällä alueella lämpötilaa ei kuitenkaan voida ylettömästi laskea, ja toisaalta liian tarkka lämpötilan säätö johtaa energian tuhlaamiseen (Seppänen 2004, 245). Energiaa kuluu hukkaan, jos ilmanvaihdon ja lämmitysjärjestelmän säätöväli huonelämpötilan suhteen on valittu liian tiukaksi. Tällöin järjestelmät tekevät jatkuvasti säätötyötä ja ilmastointi tuulettaa ”ylilämennyttä” tilaa.

Keho poistaa aineenvaihdunnan tuottamaa lämpöä haihduksella lämpöä diffuusion kautta iholta, vesihöyryn mukana hengityksessä ja hikoilemalla. Optimilämpötilat on ilmoitettu 50 prosentin suhteellisella ilmankosteudella. Optimilämpötila muuttuu kausiluonteisesti, koska ilman suhteellinen kosteus muuttuu lämpötilan mukaan. Talvella lämmitetty tuloilma on suhteellisesti kuivempaa (RH=10–15 %), jolloin lämpö haihtuu herkemmin kehosta ja optimilämpötila on korkeampi (Seppänen 2004, 6.) Matala suhteellinen ilmankosteus siis herkistää vedon tunteelle. Suhteellisesti kuivassa sisäilmassa lämpötilan nostaminen poistaa vedon tunnetta tehokkaasti. Huoneilman kosteutta mitataan tai säädetään harvoin tavanomaisissa asuin-, toimisto- tai liiketiloissa. Viihtyisät olosuhteet luodaan ohjaamalla ilmanvaihtoa lämpötilamittauksen tai ilman epäpuhtausarvojen perusteella. (Kulmala 2011.)

Huoneilman lämpötilalla ja suhteellisella kosteudella on merkitystä myös ilman epäpuhtauksien syntyyn. Lämpötilan kohotessa monien materiaalien epäpuhtauspäästöt lisääntyvät, samoin kuin ihmisten omat hajuemissiot. Ilman lämpötilan kohotessa suhteellinen kosteus alenee, jolloin ilma koetaan kuivemmaksi ja tunkkaiemmaksi. Toisaalta myös liiallinen ilman kosteus heikentää aistittua sisäilman laatua. (Seppänen 2004, 11.)

2.2.2 Kaasumaiset epäpuhtaudet

Kaasumaisten epäpuhtauslähteiden pitoisuuksiin sisäilmassa vaikuttavat merkittävästi rakennuksen sijainti, tiiviys, ilmanvaihto sekä ihmisen toiminta rakennuksessa. Alla on kerrottu opinnäytetyöhön kaikkein tiiviimmin liittyvistä kaasumaisista lähteistä. Muita kaasumaisia epäpuhtauslähteitä näiden lisäksi ovat muun muassa typpioksidit, häkä, radon ja formaldehydi (Seppänen 2004, 23–25).

Hiilidioksidi. Hiilidioksidin pääasiallinen lähde sisätiloissa on uloshengitysilma. Hiilidioksidia syntyy myös kaikessa palamisessa. Hiilidioksidin liian korkea pitoisuus on merkki liian vähäisestä ilmanvaihdosta. Ihmisestä vapautuu ihon kautta ja uloshengitysilman mukana myös muita epäpuhtauksia, joiden määrä on likimain verrannollinen hiilidioksidin tuotantoon. Tämän vuoksi ilmanlaatua voidaan arvioida hiilidioksidipitoisuuden avulla. Työsuojeluvaatimusten mukaan hiilidioksidin haitalliseksi tunnettu pitoisuus on 0,5 % (5000 ppm), mutta sisäilmaluokkien rajat pitoisuuksien suhteen ovat selvästi tiukemmat. Sisäilmastoluokituksen S3 mukainen raja 1200 ppm saavutetaan 7,9 l/s henkilöä kohti, kun ulkoilman hiilidioksidipitoisuus on 350 ppm. Parhaan luokan S1 mukainen 700 ppm raja vastaa 19,1 l/s ilmanvaihtoa henkilöä kohti. Raja-arvot ovat aiemmin perustuneet hajujen aiheuttamaan häiritsevyyteen, mutta myöhemmissä tutkimuksissa sairastuvuuden on huomattu kasvavan merkittävästi ilmanvaihdon alittaessa 10 l/s henkeä kohti ja vähenevän 20–25 l/s ilmamäärällä henkeä kohti toimistorakennuksissa. (Seppänen 2004, 21–22.)

Otsoni. Otsonia syntyy ulkoilmassa valokemiallisissa reaktioissa ja sähköpurkausten yhteydessä. Sisätiloissa lähteitä ovat kaikki laitteet, joissa esiintyy sähköpurkauksia, kuten sähkösuodattimet, lasertulostimet ja kopiokoneet. Otsoni on kemiallisesti kaikkein reaktiivisin hengitysteihin vaikuttava kaasu. Otsoni vaikuttaa useiden veren ja keuhkojen entsyymipitoisuuksiin ja lisää hengitysvastusta. Otsonin vaikutukset tulevat näkyviin infektioherkkyyden kasvamisena. Otsoni kulkeutuu pitkiäkin matkoja aktiivisessa muodossa ja saattaa reagoida huoneilman muiden epäpuhtauksien kanssa, jolloin tuloksena saattaa olla lähtöaineita haitallisempia hiukkasia tai kemiallisia yhdisteitä. (Seppänen 2004, 23.)

Orgaaniset kaasut. Orgaaniset kaasut ovat usein peräisin rakennus- ja sisustusmateriaaleista, liimoista ja lakoista. Sisäilman orgaanisten epäpuhtauksien määrä laskee rakennuksen vanhetessa. Sisäilmassa voi olla kymmeniä yhdisteitä, joiden yksittäiset pitoisuudet ovat pienet. Yhdisteiden yhteisvaikutusta ei vielä täysin tunneta. Yleensä pitoisuus ilmoitetaan haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuutena TVOC (total volatile organic compounds). (Seppänen 2004, 25.)

2.2.3 Kiinteät ja biologiset epäpuhtaudet

Kiinteät hiukkaset. Kiinteät hiukkaset ovat huoneilmassa leijuvia erikokoisia pölyhiukkasia. Pöly laskeutuu sitä hitaammin, mitä pienempiä hiukkaset ovat. Pölyä huoneilmaan tulee rakennuksen ulkoa, mutta sitä muodostuu myös rakennuksen sisällä. Ulkoilman pölylähteitä ovat muun muassa liikenne, teollisuus, lämmön- ja sähköntuotto sekä kasvien siitepölyt. Ulkoa hiukkaset kulkeutuvat sisälle huonetiloihin ilmapvirtausten mukana. Sisällä merkittävin pölylähde on tupakan poltto, jos tiloissa tupakoidaan. Muita merkittäviä epäpuhtauslähteitä ovat esimerkiksi lemmikkieläimet, ruoanvalmistus, iho, vaatteet, paperitavara, sisustustekstiilit ja pintaverhouslevyt. (Seppänen 2004, 25.)

Pölyn terveysvaikutukset riippuvat hiukkasten koostumuksesta ja kiinnittymiskohdasta elimistössä. Suuret yli $2\ \mu\text{m}$:n hiukkaset kiinnittyvät ylempiin hengitysteihin, eivätkä imeydy kudoksiin; pienemmät hiukkaset kulkeutuvat keuhkojen ääreisosiin, joissa myrkyllisetkin aineet imeytyvät helposti. Haitallisinta elimistölle on valkuaisainepitoinen pöly, jolla on allergisoiva vaikutus. Orgaaniselle ja epäorgaaniselle sisäilman pölypitoisuudelle on annettu raja-arvot teollisuudessa. Tavanomaisemille tiloille raja-arvoja ei ole, mutta sisäilmaluokitukseen on esitetty leijuivan pölyn raja-arvoksi luokassa S1 $20\ \mu\text{m}/\text{m}^3$. Esitetty arvo on huomattavasti pienempi kuin ulkoilman keskimääräinen pölypitoisuus $60\ \mu\text{m}/\text{m}^3$. Usein asuntojen ja toimistojen pölypitoisuus alittaa S1 luokan raja-arvon, mutta tiloissa, joissa henkilötiheys on suuri, niissä tupakoidaan tai käsitellään runsaasti paperia tai muuta pölyävää materiaalia, pitoisuus ylittyy. Esimerkiksi koululuokissa on mitattu raja-arvoja korkeampia pölypitoisuuksia. (Seppänen 2004, 27.)

Biologiset epäpuhtaudet. Biologisia epäpuhtauslähteitä ovat allergeenit, pölypunkit, homeet, bakteerit ja virukset (Seppänen 2004, 31).

Allergeenit vaihtelevat elinympäristön mukaan. Yleisimpiä allergian aiheuttajia ovat valkuaisainepitoiset pölyt, joita ovat muun muassa eläinpölyt ja kasvien siitepölyt. Eläinpölyt ovat erityisen vahvoja allergeeneja. Siitepölyt voidaan suuren kokonsa (yli 10 µm) suodattaa pois tuloilmasta (Seppänen 2004, 31).

Punkit ja varastopunkit ovat pieniä alle 0,1 mm mittaisia hyönteisiä, jotka elävät pölyssä ja vuodevaatteissa. Ne käyttävät ravinnokseen muun muassa ihmisen ihon hilsettä. Punkit ovat yleisiä erityisesti asunnoissa, joissa on korkea suhteellinen kosteus (yli 45 %) (Seppänen 2004, 31).

Bakteerien pääasiallinen epäpuhtauslähde sisätiloissa on ihminen itse. Ihosta ja hengityselimistä erkautuvien hiukkasten mukana ilmaan joutuu myös bakteereita. Ilman bakteeripitoisuus ei kuvaa terveydellistä haittaa, vaan bakteerien vaarallisuus riippuu niiden taudinaiheuttamiskyvystä ja -pituudesta. Vain poikkeustapauksissa bakteerien lähde on ollut rakennus tai sen laitteet. Huoneilmassa saattaa olla myös viruksia, jotka ovat lähtöisin ihmisestä. Virukset eivät kuitenkaan elä kauaa huoneilmassa (Seppänen 2004, 33).

Ilmanvaihdon suuruuden ja terveyden välisiä yhteyksiä on selvitetty vuosikymmeniä. Tutkimuksissa, joita on tehty sekä laboratorio- että kenttäkokein, on tutkittu ilmanvaihdon määrän vaikutusta ihmisten terveyteen. Useissa tutkimuksissa (mm. Seppänen & Fisk 2002) on todettu liian pienen ilmanvaihdon olleen yhteydessä bakteerien ja virusten levittämien tautien runsaampaan esiintyvyyteen (Seppänen 2004, 33–34; Lehtinen 2013, 8).

2.3 Sisäilmaston tavoitearvot

Sisäilman laadun todentaminen on vaikeaa siihen vaikuttavien monien tekijöiden vuoksi. Vaikuttavista tekijöistä etenkin ulkoilmaolosuhteet ja käyttäjien toiminta vaihtelevat voimakkaasti ajan ja paikan suhteen. Kaikki sekoittavat tekijät tulisi pystyä ottamaan huomioon todentamismittauksissa. Suunnitelma-asiakirjoissa

esitetään ne suunnittelu- ja takuarvot, joiden toteutuminen voidaan tarvittaessa todentaa (RT 07-10946, 6). Simulointiohjelmalla voidaan todentamisen avuksi laskea sisäilmaston olosuhteet standardin EN 1525 1:2007 liitteen I esittämällä tavalla. Laskennallisia sisäilmaston olosuhteita voidaan todentamisessa verrata sisäilmaston pitkäaikaismittausten tuloksiin. Todentamisolosuhteet on myös yksilöitävä samoin kuin käytettävät mittausten menetelmät mainitsemalla standardi. Mittaustoleranssit on esitettävä RakMK:n osassa D2 esitetyllä tavalla (RT 07-10946, 6).

2.3.1 Sisäilmaston tavoitearvot rakennuksen käytön aikana

Oikea huonetilan lämpötila on tärkein sisäilmastosuunnittelun tavoite. Tyytymättömyys lämpöoloihin saattaa purkautua monella tavalla: vähentyneenä työtehona, purnauksena, lakkoina tai jopa sairautena (Seppänen 1996, 20). Kaikissa tapauksissa menetetään työaika, joka on merkittävä kustannustekijä. Varovastikin laskettuna väärän lämpötilan aiheuttama työpanoksen menetyksen arvo on samaa suuruusluokkaa kuin ilmastoinnin vuotuiset energia- tai investointikustannukset (Seppänen 1996, 21).

Sisäilmastoluokille on annettu lämpötilatavoitteet eri ulkoilmaolosuhteissa, jota havainnollistaa taulukko 1.

Taulukko 1. Sisäilmaston tavoitearvot (RT 07-10946, 5).

	S1	S2	S3
Operatiivinen lämpötila t_{op} [°C]			
$t_u \leq 10$ °C	21,5*	21,5	21
$10 < t_u \leq 20$ °C	$21,5 + 0,3 (t_u - 10)^*$	$21,5 + 0,3 (t_u - 10)$	$21 + 0,4 (t_u - 10)$
$t_u > 20$ °C	24,5*	24,5	25
Sallittu poikkeama tavoitearvosta [°C]	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$
Operatiivisen lämpötilan enimmäisarvo [°C]	$t_{op} + 1,5$	$t_u \leq 10$ °C: $t_{op} + 1,5$	$t_u \leq 15$ °C: 25
		$10 < t_u \leq 20$ °C:	$t_u > 15$ °C: $t_{umax} + 5$
		$23 + 0,4 (t_u - 10)$	
		$t_u > 20$ °C: 27	
Operatiivisen lämpötilan vähimmäisarvo [°C]	20	20	18
Olosuhteiden pysyvyys [% käyttäjäajasta]			
• toimi- ja opetustilat [%]	95	90	
• asunnot [%]	90	80	

Taulukossa on esitetty työhön ja kohteeseen liittyvien keskeisten lämpötilatavoitteiden arvot. Asuinrakennuksille on määritetty omat, hieman toimi- ja opetustiloja lievemmat olosuhteiden pysyvyys-vaatimukset. Alla on esitetty ulkolämpötilan t_u määrittely.

Lämpöolosuhteiden tavoitearvot on sidottu paikkakunnan säähän. Ulkolämpötilalla t_u tarkoitetaan ulkoilman 24 tunnin liukuvaa keskiarvoa lähimmällä säähavaintopaikalla. Ulkolämpötilalla t_{umax} tarkoitetaan ulkoilman lämpötilan vuoden tunnin enimmäisjakson keskiarvoa. Tilan käyttäjän toivomuksesta voidaan tilan lämpötilan antaa laskea alle tavoitetason tai antaa kesällä lämpötilan nousta yli tavoitetason. Lämpötilan tulee olla tavoitearvon sallitun poikkeaman alueella olosuhteiden pysyvyyden edellyttämän ajan laskettuna rakennuksen suunnitellusta käyttäjäajasta. Lämpötilan yhden tunnin liukuva keskiarvo ei saa suunnitellulla käytöllä mitoitussäällä tarkasteluna käyttöaikana alittaa vähimmäis- tai ylittää enimmäisarvoja. (RT 07-10946, 4.)

2.3.2 Sisäilmaston ilmanlaadun tavoitearvot

Sisäilmastoluokituksessa on esitetty monia sisäilmastosuureita. Lämpötilan pysyvyys on sisäilmastosuure, jonka käyttäjät kokevat herkimmin. Tilan yllämeneminen lisää merkittävästi ihmisperäisten hajujen ja orgaanisten VOC-päästöjen määrää, ja ylipäätään lämmin ilma koetaan tunkkaiseksi. Ilman alijäähtyminen puoles-

taan häiritsee keskittymistä ja heikentää työtehoa (Seppänen 2004, 15–16). Muille ilman epäpuhtauksille asetetut rajat toteutuvat käytännössä hiilidioksidi- ja lämpötilaolosuhteiden säilyessä tavoiterajoissa (Seppänen 1996, 50; 2004, 21).

Taulukko 2. Ilmanlaadun tavoitearvot (RT 07-10946, 8).

	S1	S2	S3
Hiilidioksidipitoisuus [ppm]	<750	<900	<1200
Radonpitoisuus [Bq/m ³]	<100	<100	<200
Olosuhteiden pysyvyys käyttöajasta [%]			
Toimi- ja opetustilat [%]	95	90	
Asunnot [%]	90	80	

Hiilidioksidi-pitoisuustavoite koskee ihmisperäistä hiilidioksidia. Hiilidioksiditason noustessa yli 1000 huoneilman miljoonasosan ihmisperäiset hajut muodostavat suurimman ilmanvaihtotarpeen (Seppänen 1996, 50). Tiloissa, joissa ihminen itse on pääasiallinen ilmaston pilaaja, ilmanvaihdon mitoituskriteerinä on ihmisperäinen haju. Ennen ilmanvaihdon VOC-antureiden markkinoille tuloa hiilidioksidipitoisuuden käyttö ilmanvaihdon ohjauksessa on ollut perusteltua, koska hiilidioksidipitoisuuden on todettu olevan lähes suoraan verrannollinen hajupitoisuuteen (Seppänen 1996, 51). Sisäilman VOC-pitoisuudelle ei ole vielä esitetty tavoitearvoa, koska erilaisten orgaanisten yhdisteiden yhteisvaikutusta ei vielä täysin tunneta (Seppänen 2000, 25). Yksittäisille yhdisteille on annettu sisäilman pitoisuusrajoja, jotka ovat kymmenesosa niiden myrkyllisestä arvosta ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Nykytiedon valossa orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuuden raja-arvo $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ on turvallinen.

On huomattava, etteivät yksin suunnitteluarvot riitä hyvän sisäilmaston tuottamisessa, vaan hyvä sisäilmasto on useamman tekijän summa. Lopulliseen sisäilmastoon vaikuttavat muun muassa rakennuksen käyttö, rakenteet, kalustus ja sisustus, ulkoilmaolosuhteet ja taloteknisten järjestelmien säädöt. Esitettyjen tavoitearvojen alittaminen ei myöskään takaa huoneilman terveellisyyttä täydellisesti, sillä tavoitearvoja pienemmätkin pitoisuudet voivat aiheuttaa oireita herkille ihmisille (Seppänen 2004, 13–14; RT 07-10946, 3).

3 Ilmanvaihtojärjestelmät

Ilmanvaihdon tärkein tavoite on ylläpitää hyvää ilmanlaatua rakennuksen tiloissa läpi koko käyttöajan. Ilmanvaihtojärjestelmän valintaa ohjaavat täten moninaiset tekijät, kuten rakennuksen käyttötarkoitus, maantieteellinen sijainti ja sijoitus tontilla. Ne yhdessä määräävät käytettävät ilmavirrat sekä antavat vaatimuksia ilmanvaihtojärjestelmän varustelulle. Uudet energiatehokkuusvaatimukset sanelevat myös järjestelmän ominaisuuksia, kuten lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen (RT RakMK-21504, 6). Lisäksi rakennusten energiatehokkuusluvun eli E-luvun laskennassa käytettävät energiamuotojen kertoimet kannustavat tarpeenmukaisen ilmanvaihdon toteuttamiseen (RT RakMK-21504, 4).

3.1 Ilmanvaihtojärjestelmän valinta

Rakennuksen ja sen tilojen ilmastointitapa valitaan erityyppisten tilojen, kuten aulojen, neuvottelu-, luokka- tai toimistohuoneiden mukaan. Erityyppisten tilojen ilmastointi toteutetaan usein eri tavalla. Rakennus jaetaan vyöhykkeisiin, joissa toimintoiltaan ja sisäilmatavoitteiltaan samanlaiset tilat pyritään sijoittamaan vierekkäin. Ilmastointitapaa valittaessa sovitetaan yhteen ilmastointiin ja sen kustannuksiin liittyvät tehtävät. (Seppänen 2004, 41.)

Seppäsen mukaan (2004,41) ilmastointitavan valintaan vaikuttavat useat ilmastointijärjestelmän ominaisuudet, joita on painotettava kohteen tarpeiden mukaan. Ilmastointitavan valintaan vaikuttavia ilmastointijärjestelmän ominaisuuksia ovat muiden muassa:

- tavoiteltava sisäilmastoluokka
- muuntojoustavuus
- toimintavarmuus
- käytettävyys
- ulkonäkö
- käyttö työaikana ja sen ulkopuolella
- hankinta- ja käyttökustannukset

- elinkaaritavoitteet.

3.2 Ilmanvaihto- ja ilmastointitavat

Ilmanvaihtojärjestelmän valintaan vaikuttavia tekijöitä on monia. Eräs keskeinen ilmanvaihtojärjestelmän valintaan vaikuttava tekijä on ilmastoinnin jäähdytysteho (Seppänen 2004, 42). Ilmanvaihdon suunnittelua ohjaa Sisäilmaluokitus 2008, joten ilmastointijärjestelmää valitessa tavoiteltava sisäilmaluokka tulee olla päätetty. Vaatimattomammilla ilmanvaihtojärjestelmillä kesäkaudella vaadittavaa jäähdytystehoa ei voida tuottaa, jolloin lämpötilan nousu heikentää sisäilmaluokkaa. Koulurakennusten kohdalla on tiedettävä tilojen kesäaikainen käyttö, sillä hyvin usein koulut ovat kiinni kuumimman ajan vuodesta eikä tehokasta jäähdytystä välttämättä tarvita. Pääsääntöisesti käytetään seuraavanlaisia ilmanvaihtotapoja:

- painovoimainen ilmanvaihto
- vakioilmanvaihto
- vakioilmavirta-ilmastointi
 - ilmastointipalkki-ilmastointi
 - puhallinkonvektori-ilmastointi
- muuttuvailmavirta-ilmastointi.

3.2.1 Painovoimainen ilmanvaihto

Painovoimaisella ilmanvaihdolla toteutettuja kohteita on lukumääräisesti vähän (Seppänen 2004, 44). Tuuli ja/tai ilman lämpötilaerojen aiheuttama paine-ero saavat aikaan painovoimaisen ilmanvaihdon. Painovoimaisen ilmanvaihdon heikkoutena on sen toiminnan herkkyys ulkoisiin olosuhteisiin. Korvausilmareittien ja jäteilmakekanavan välinen korkeusero tulee olla riittävä, eikä järjestelmää voi suositella yksikerroksisiin rakennuksiin. Painovoimaisia ilmanvaihtojärjestelmiä on korjattu tehostuspuhaltimilla varmistamaan toiminta myös kesäkaudella. Nykyään määräykset vaativat lämmön talteenottoa poistoilmasta eikä se ole mahdollista painovoimaista ilmanvaihtoa käyttämällä. Poistoilmasta tulisi saada talteen lämpöenergia, joka vastaa vähintään 45 %:a tuloilman lämmitykseen tarvittavasta lämpöenergia-

rästä (RT RakMK-21504, 6). Vastaavan tuloilman lämmittämiseen tarvittavan energiamäärän pienentäminen eri keinoin tai lämmöntalteenoton osoittaminen epätarkoituksenmukaiseksi antaa kuitenkin mahdollisuuden käyttää rakennuksissa edelleen painovoimaista ilmanvaihtoa (RT RakMK-21504, 6–7).

3.2.2 Vakioilmanvaihtojärjestelmä

Vakioilmanvaihtojärjestelmä on yksinkertainen koneellinen ilmanvaihto, jossa on lämmöntalteenotto poistoilmasta, suodatus sekä lämmitystoiminto, mutta ei tuloilman jäähdytystä. Vakioilmanvaihto on edullinen järjestelmä sisäilman kustannuksella, jolloin saavutettava sisäilmalaatu on luokkaa S3 (Seppänen 2004, 44).

3.2.3 Vakioilmavirta-ilmastointi

Vakioilmavirta-ilmastoinnilla on vastaavat ominaisuudet kuin vakioilmanvaihtojärjestelmässä, mutta siinä on lisäksi jäähdytystoiminto. Tiloihin puhallettava tuloilma jäähdytetään ilmastointikoneessa. Vakioilmavirta-ilmastointi on hankintakustannuksiltaan edullinen ratkaisu, jolla saavutetaan kohtuullinen sisäilmasto (S2, S3). Vakioilmavirta-ilmastoinnin jäähdytystä ja samalla tilojen huonekohtaista säädettävyyttä voidaan parantaa lisäämällä järjestelmään ilmastointipalkit tai puhallinkonvektorit. Palkeissa ja konvektoreissa kiertää erillisessä vedenjäähdytyskoneikossa jäähdytetty vesi, joka jäähdyttää joko tuloilmaa tai pelkästään huoneilmaa. Palkkeihin ja konvektoreihin voidaan lisätä myös lämmitys, jolloin huonekohtainen säädettävyys on erinomainen ja sisäilmastoluokitus hyvä (S1, S2). (Seppänen 2004, 48–58.)

3.2.4 Muuttuvilmavirta-ilmanvaihto eli tarpeenmukainen ilmanvaihto

Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän avulla on mahdollista toteuttaa korkeatasoinen huonekohtaisesti säätävä ilmastointi (S1, S2). Järjestelmän keskusyksikkö muodostuu suodatus-, lämmöntalteenotto-, lämmitys- ja jäähdytystoiminnoista. Järjestelmän keskusyksikön jäähdytyksessä käytetään talviaikana ulkoilmaa ja

kesäaikana vedenjäähdytyskoneella tuotettua jäähdytysenergiaa. Järjestelmän huoneyksikölle (kuvio 1.) tulee vakiolämpöistä ilmaa, joka on huoneilmaa kylmempää kaikkina vuodenaikoina. Huonelämpötilaa hallitaan ilmavirtausta muuttamalla, jolloin ilmavirran kasvaessa huoneeseen tuleva jäähdytysteho kasvaa. Järjestelmä soveltuu hyvin tiloihin, joissa lämpökuormat ovat suuret ja/tai joissa tarvitaan suuria ilmamääriä. Erityyppisten tilojen sijaitessa lähekkäin alijäähtymisvaarassa olevan tilan huoneyksikköön voidaan lisätä jälkilämmityspatteri. Huoneen käyttäjä voi kaikkina vuodenaikoina säätää huonelämpötilaa huoneeseen sijoitetun säätöyksikön avulla. (Seppänen 1996, 228–229; 2004, 59–65.)

Huoneen tuloilmavirtaa säätää säätöyksikkö, joka yleensä sisältää ilmavirtasäätimen lisäksi äänenvaimentimen. Kanavisto huoneyksikköön saakka saattaa olla korkeapaineinen ja huoneyksikön jälkeen matalapaineinen. Tuloilmaelinten valintaan on kiinnitettävä huomiota vedon vaaran poistamiseksi. Pienillä ilmavirroilla alilämpöinen tuloilma ei sekoitu riittävästi huoneilmaan ja putoaa liian nopeasti oleskeluvyöhykkeelle, mistä seuraa vedon tunne. Järjestelmään soveltuvat parhaiten rakomaiset hajottajat sekä erityisesti muuttuvailmavirtaista järjestelmää varten suunnitellut tuloilmaelimet. (Seppänen 1996, 228–229; 2004, 59–65.)

Ilmastointijärjestelmää voidaan säätää monipuolisen anturi- ja rakennusautomaatio-ohjelmiston avulla. Muuttuvailmavirtaisessa ilmastointijärjestelmässä ilmamäärien säätöön voivat osallistua ohjelmistopohjainen aikaohjaus, infravalohenkilötunnistin, hiilidioksidi-, ilmanlaatu- ja lämpötila-anturit. (Seppänen 1996, 228–229; 2004, 59–65.)

4 Energiakulutus

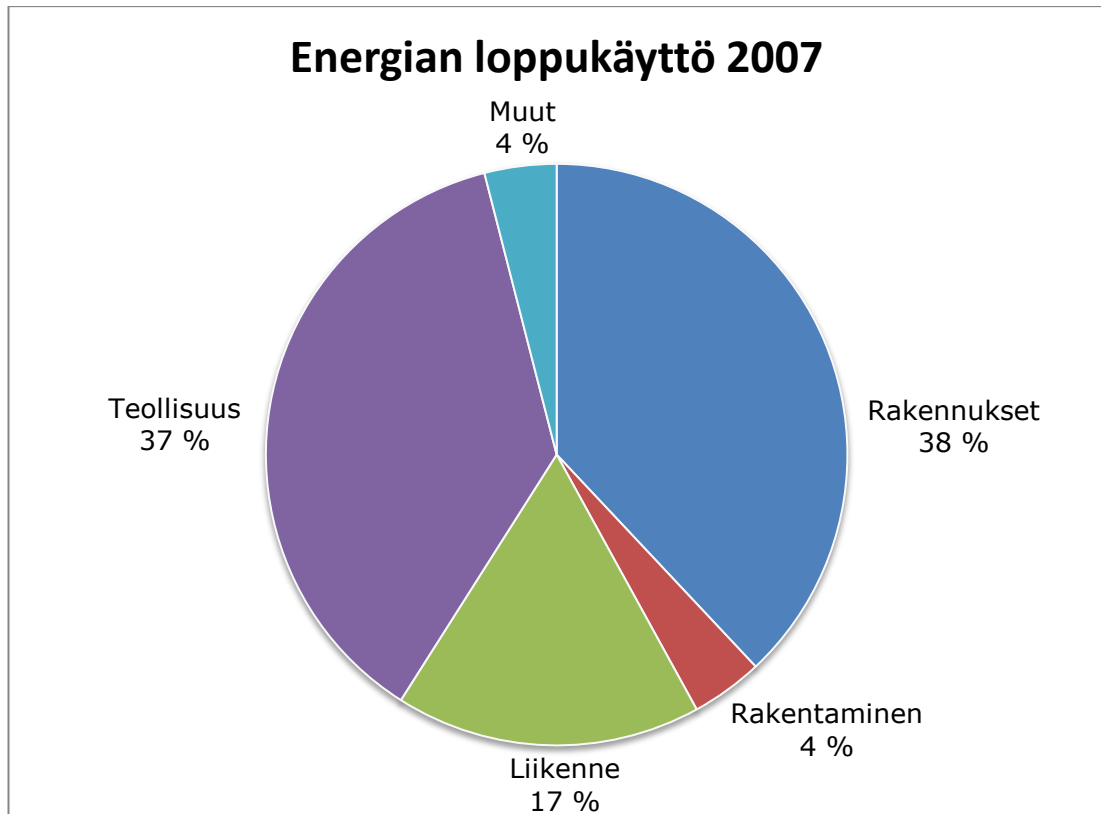
4.1 Energiakulutus Suomessa

Rakennettu ympäristö muodostaa merkittävän osan Suomen energiankulutuksesta. Rakennetun ympäristön kulutustietoja tilastoidaan jatkuvasti, mutta ne antavat vain rajallisen kokonaiskuvan rakennetun ympäristön näkökulmasta. Energian käytön tehostamiseen tähtäävien toimenpiteiden kohdistaminen on haastavaa puutteellisten tilastotietojen ansiosta. (Seppänen 2001, 1–3, 396.)

Energian loppukäyttö oli vuonna 2007 307TWh. Energian loppukäytöllä tarkoitetaan rakennuksiin ostettua energiaa. Loppukäyttö ei sisällä tuotannon, siirron tai jakelun häviöitä eikä kiinteistökohtaisesti tuotettua uusiutuvaa energiaa. (Vehviläinen ym. 2010, 11.)

Kuviossa 1 on esitetty energian käytön jakautuminen sektoreittain eri aloilla. Rakennetusta ympäristöstä rakennukset (38%) ja liikenne (17 %) kuluttavat eniten energiaa. Rakentamisen osuus on suhteellisen pieni (4 %). Energian tuotanto-, siirto- ja jakeluhäviöt mukaan laskettuna suhteet muuttuvat siten, että rakennusten kulutus vastaa 41 prosentin osuutta ja liikenne 15 prosentin osuutta. Sähkön tuotannossa aiheutuu eniten häviöitä, jolloin vaikutus rakennusten sektorilla on suurempi vähän sähköä kuluttavaan liikenteeseen verrattuna. (Vehviläinen ym. 2010, 11.)

Rakennusten lämmitykseen on laskettu mukaan asuin- ja palvelurakennusten, maatalous- sekä teollisuusrakennusten lämmitykseen käytetty energia. Ostoenergia sisältää lämmitykseen käytetyt polttoaineet, kaukolämmityksen ja sähkölämmityksen. Rakennusten sähkönkäyttöön on laskettu mukaan kotitalouksien, kiinteistöjen ja loma-asuntojen sähkönkulutukset. Energian loppukäytön arviointimenetelmät on esitetty tarkemmin Sitran energiaselvityksessä 39. (Vehviläinen ym. 2010, 11.)



Kuvio 1. Suomen energian loppukäyttö vuonna 2007 oli yhteensä 307 TWh (Vehviläinen ym. 2010, 11).

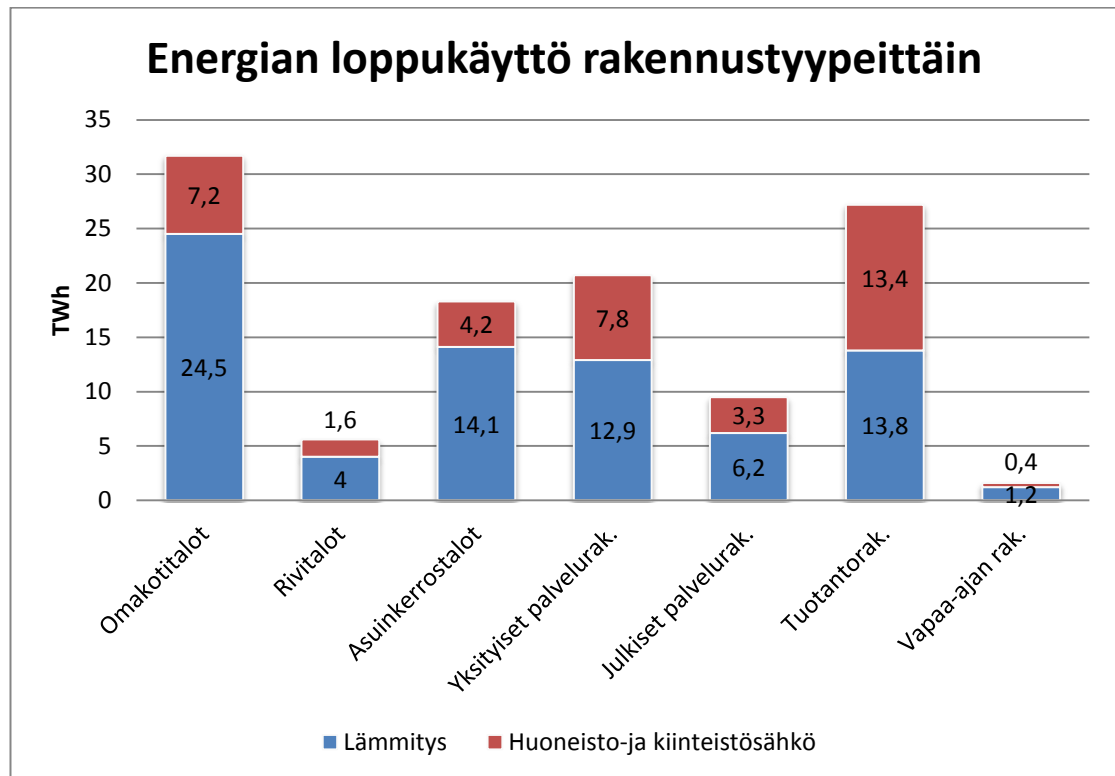
4.2 Rakennuksen energiakulutuksen muodostuminen

Suomen pohjoisesta sijainnista johtuen valtaosa rakennusten energian käytöstä kuluu lämmitykseen. Rakennusten energiakulutuksen jakauma on erilainen rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen. Rakennuskanta voidaan karkeasti jakaa neljään suuruusluokaltaan yhtä suureen osaan (Vehviläinen ym. 2010, 19):

- omakotitalot ja vapaa-ajan asuinrakennukset
- asuinkerrostalot ja rivitalot
- palvelurakennukset (julkiset ja yksityiset)
- tuotantorakennukset (teollisuus, maatalous, varastot).

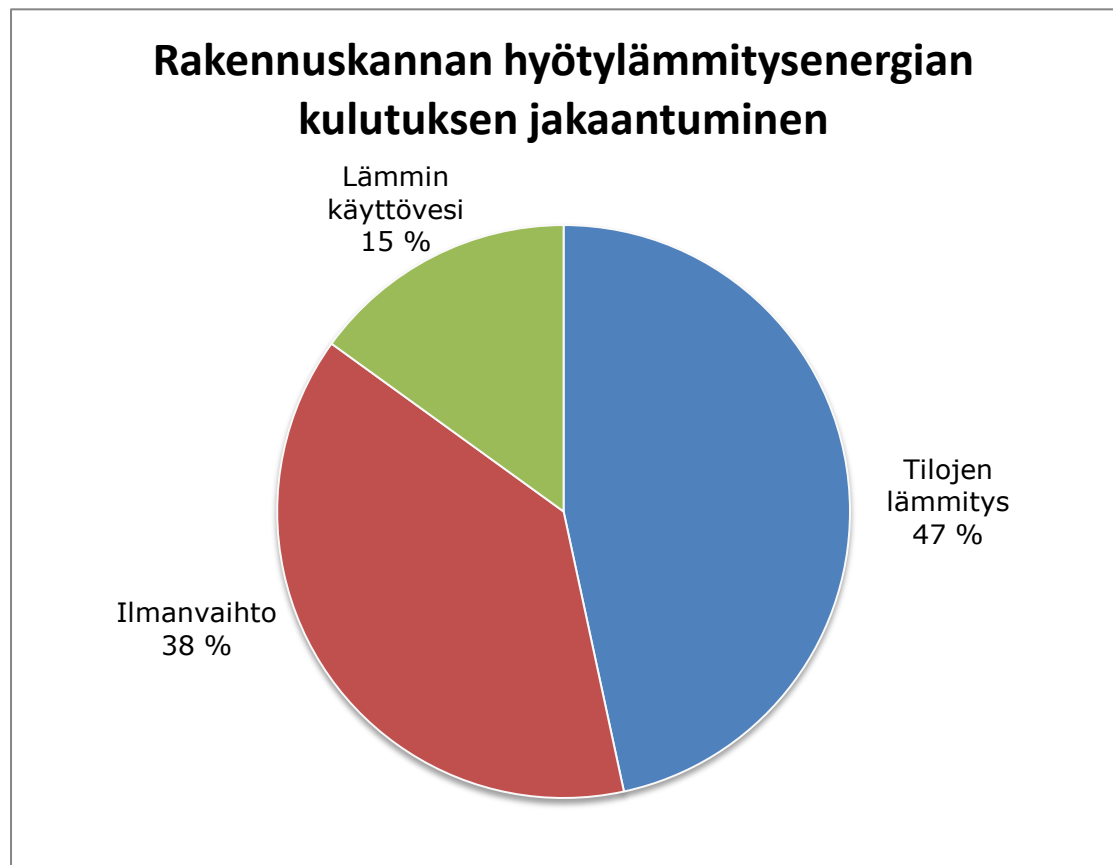
Kuviossa 2 on esitetty rakennuskannan energian loppukäyttö vuonna 2007 tilastoitujen tietojen perusteella (Vehviläinen ym. 2010, 20). Kuvioista on helposti nähtävissä lämmitysenergian merkittävä kulutus, joka on asuinrakennuksissa suhteessa

huoneisto- ja kiinteistösähköenergiankulutukseen korkeampi muihin rakennustyyppisiin verrattuna.



Kuvio 2. Energian loppukäyttö rakennustyypeittäin vuonna 2007 (Vehviläinen ym. 2010, 20).

Lämmitysenergian kulutuksesta suurin osa kuluu tilojen lämmitykseen ja lähes yhtä suuri osa ilmanvaihtoilman lämmittämiseen. Käyttöveden lämmittämiseen kuluu energiaa vähäisempi osa. Kuvio 3 havainnollistaa rakennuskannan hyötylämmitysenergian kulutuksen jakaantumista. Kyseessä olevan kuvion energiakulutuksen jakaantuminen eri sektoreihin edustaa rakennuskannan keskiarvoa, joten kuvio on enemmänkin suuntaa antava. Asuinrakennuksilla käyttöveden lämmitysenergia muodostaa tavallisesti noin kolmasosan kokonaisenergiakulutuksesta ja ilmanvaihdon vaatima lämmitysenergia on vastaavasti pienempi. Suuria ilmä määriä vaativissa rakennustyypeissä, kuten palvelu- ja tuotantorakennuksissa tilanne on päinvastainen asuinrakennuksiin nähden, jolloin esitetystä rakennuskannan keskiarvosta (kuvio 3) lämpimän käyttöveden osuus kokonaisenergiakulutuksesta on pienempi, ja ilmanvaihdon ja tilojen lämmityksen vaatiman energian osuus suurempi. (Vehviläinen ym. 2010, 24.)



Kuvio 3. Rakennuskannan hyötylämmitysenergian kulutuksen jakaantuminen (Vehviläinen ym. 2010, 24).

Ilmanvaihtoilman lämmitysosuutta energian jakaantumisessa on hankalinta arvioida. Ilmanvaihdon lämmityskulutukseen käyttäjätottumukset vaikuttavat helpoimmin; Kasvava tietoisuus sisäilmaan rakennuksesta, ihmisistä ja ihmisen toiminnasta vapautuvista epäpuhtauksista kasvattaa ilmanvaihtomääriä ja lisää energiankulutusta. Lisääntyvä ilmanvaihdon lämmöntalteenotto ja tarpeenmukaisuus eri rakennustyyppien sektoreilla vähentävät ilmanvaihdon lämmitys- tai jäähdytysenergian tarvetta, mutta lisäävät hieman kiinteistösähkön kulutusta. (Vehviläinen ym. 2010, 24)

4.3 Ilmanvaihdon energiakulutuksen muodostuminen

Keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä käyttää toimiakseen ja hyvät sisäilmasto-olosuhteet taatakseen tavallisimmin sähkö- ja lämpöenergiaa. Tarvittaessa ilmanvaihtojärjestelmä varustetaan jäähdytyksellä, jolloin energiaa kuluu myös veden

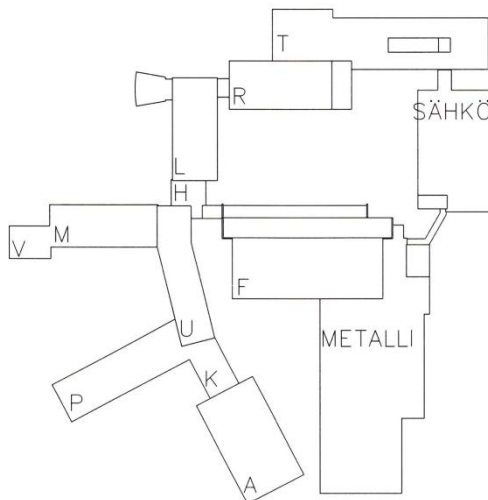
jäähdytykseen. Vesi jäähdytetään yleensä erillisellä kylmäkoneikolla, mutta myös kaukokylmä tai aluekylmä on mahdollinen ratkaisu. Kylmäkoneikko on käytännössä lämpöpumppu, joka sähkön avulla tuottaa kylmää energiatehokkaasti. Kaukokylmä taas tuotetaan kaukolämmön sivutuotteena, ja se on vielä varsin harvinainen keino jäähdytysenergian jakeluun sekä Suomessa että ulkomaissa.

Ilmanvaihtojärjestelmän energiakulutus muodostuu rakennusautomaation mittaus- ja säätölaitteiston tarvitsemasta sähköenergiasta, puhaltimien käyttämästä sähköenergiasta ja ilmapuhaltimien tarkoitettujen lämmittimien, kostuttimien tai jäähdyttimien vaatimasta lämpö- ja jäähdytysenergiasta (Seppänen 2004, 100). Rakennusautomaation sähkön kulutus on suurempi monimutkaisemmissa järjestelmissä mittaus- ja säätötyön ansiosta. Rakennusautomaation käyttämän sähköenergian osuutta muusta kiinteistösähkökulutuksesta on vaikeaa arvioida, eikä sen sähköenergiakulutus ole merkittävä monimutkaisemman tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän aikaansaamaan energiasäästöön suhteutettuna. Rakennusautomaation kuluttama sähköenergia jätetään laskelmissa huomiotta. Ilmanvaihdon lämmitysenergiakulutusta lisää myös rakennuksen vuotoilma, joka jätetään laskelmissa huomiotta. Ilmanvaihtojärjestelmät suunnitellaan tavallisesti siten, että rakennus on vallitsevaan ympäristön ilmanpaineeseen nähden tasapainossa tai hieman ylipaineinen. Vuotoilman aiheuttaman energiakulutuksen laskemista en katso tarkoituksen mukaiseksi, koska se on sama järjestelmästä riippumatta.

5 Kohde – Vaasan ammattiopisto

5.1 Yleistä

Vaasan ammattiopisto on toisen asteen koulutuskeskus, jossa opetetaan 17 erilaista ammatillista perustutkintoa ja yhteensä 34 koulutusohjelmaa. Tutkinnot kattavat ammatteja tekniikasta hoitotyöhön. Koulutusta järjestetään kahdella eri kampuksella: Palvelualojen koulutus järjestetään Hansa -kampuksella Ruutikellarintie 2–4:ssä ja tekniikan koulutus Sampo-kampuksella osoitteessa Sepänkyläntie 16 (Vaasan ammattiopisto 2013). Yhteensä opiskelijoita vuonna 2011 oli 1949, joista 660 opiskeli tekniikan alalla (Suksi & Kytölä 2012, 3).



Kuvio 4. Vaasan ammattiopiston rakennuskannan asemointi Sepänkyläntie 14 - 16:ssa (Granlund Pohjanmaa Oy 2010a).

Sähkö- ja metallikoulutuslinjoille rakennettiin uudet koulutustilat vuosina 2010–2011. Granlund Pohjanmaa Oy sai suunniteltavakseen metalli- ja sähkötalojen LVI-, sähkö- ja automaatio-suunnittelun. Koulurakennuksille on tyypillistä tilojen suuresti vaihteleva käyttöaste, joten rakennusta palvelemaan suunniteltiin vakioilmavirtaisten ilmanvaihtojärjestelmien lisäksi tarpeenmukaisia ilmanvaihtojärjestelmiä. Ammattiopiston pitkät vuorokautiset käyttöajat puolsivat tarpeenmukaisen ilmanvaihdon suunnittelemista. Päivittäisen käytön lisäksi myös vuosikäyttöaste on korkea, sillä oppilaitos on kiinni kesällä poikkeuksellisesti vain kolme viikkoa (Mäntylä 2013). Tämän vuoksi tuloilman jäähdytys on tarpeen. Tavallisesti kouluraken-

nukset ovat kiinni kesän kuumimman ajan, jolloin jäähdytysominaisuutta ei ilmanvaihtokoneissa välttämättä tarvita.

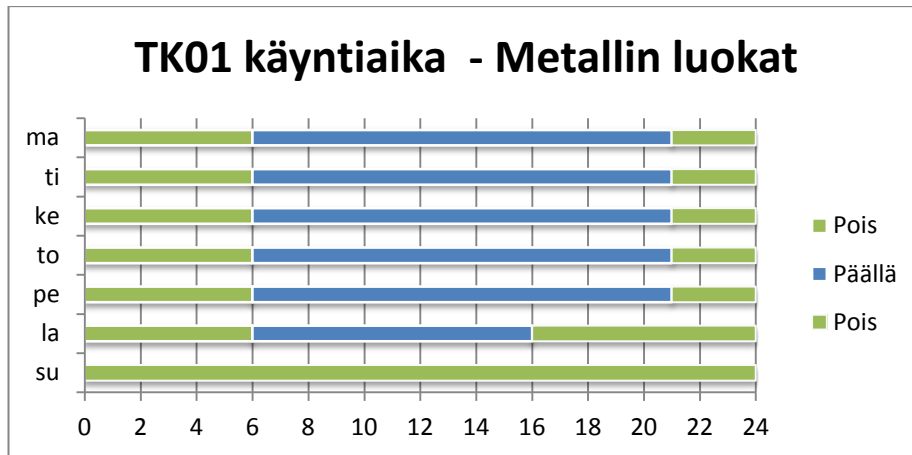
5.2 Tutkittavat ilmanvaihtojärjestelmät

Tämän opinnäytetyön tavoitteeksi asetettiin metallitaloa palvelevien TK01- ja TK05 ilmanvaihtokoneiden ja sähkötaloa palvelevan TK03 ilmanvaihtokoneen energiansäästölaskenta sekä sisäilmaston ongelmalähteiden selvitys niiden tilojen osalta, joissa sisäilmastossa koettiin olevan parantamisen varaa. Metallitalossa ilmanvaihtokone TK01 palvelee käytäviä, luokka- ja toimistotiloja sekä pienempiä työstötiloja. Ilmanvaihtokone TK05 palvelee metallitalossa sosiaalityötiloja sekä vastaa 2. kerroksen WC-tilojen erillispoistosta. Varsinaista työhallia metallitalossa palvelee oma ilmanvaihtokone. Ilmanvaihtokone TK03 palvelee sähkötalon käytävä-, luokka- ja toimistotiloja. Sähkötalon työhallissa on oma vakioilmavirtainen ilmanvaihtokone metallitalon työhallin tapaan. Taulukossa 3 on esitetty ilmanvaihtokoneiden mallit ja maksimi-ilmavirrat.

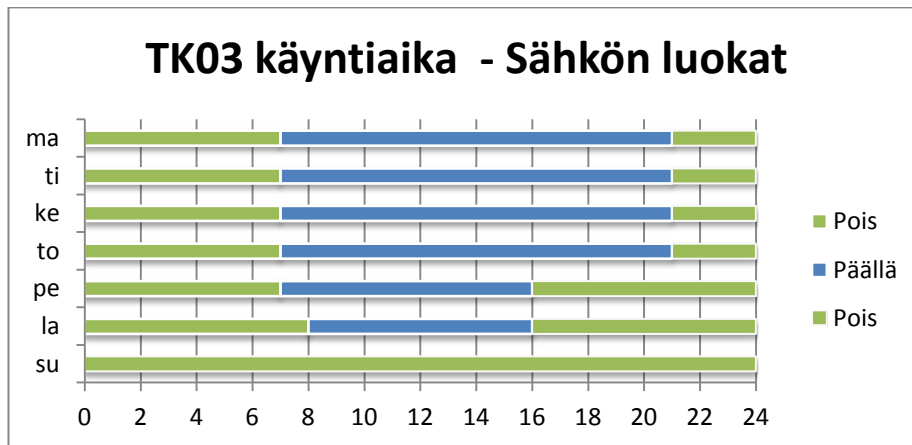
Taulukko 3. Ilmanvaihtokoneiden mallit ja maksimi-ilmavirrat (Granlund Pohjanmaa Oy 2010b).

		TK01	TK03	TK05
Malli		Fläkt Woods EU-2000-32		Swegon GOLD RX 20
Ilmavirrat [m³/s]	Tulo	3,5	3,1	1,5
	Poisto	3,1	2,7	1,5

Mittausteknisistä ongelmista johtuen energiasäästölaskelmat jouduttiin rajaamaan sähkötalon luokkia palvelemaan ilmanvaihtokoneeseen TK03. Ilmanvaihtokoneen TK01 palvelualueet, käyttöajat (kuviot 4 & 5) ja maksimi-ilmavirta ovat kuitenkin lähes yhtenevät, joten TK01:n tarpeenmukaisen ilmanvaihtokoneen tuomaa energiasäästöä voi varauksella arvoida TK03:n laskennan tuloksista.



Kuvio 5. Ilmanvaihtokoneen TK01 käyntiajat (Koivuporras 2013).



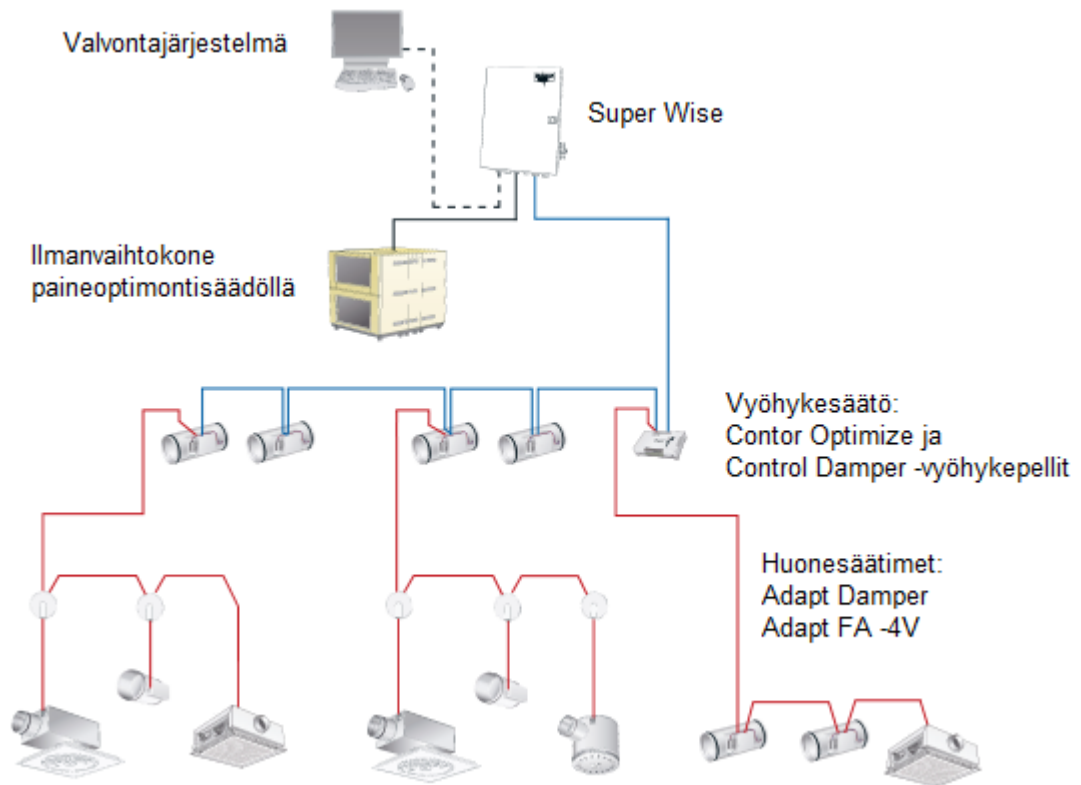
Kuvio 6. Ilmanvaihtokoneen TK03 käyntiajat (Koivuporras 2013).

5.3 Ilmanvaihtojärjestelmien automaatio

Kohteen kaikki tarpeenmukaiset ilmanvaihtojärjestelmät on toteutettu Swegon Wise:n järjestelmätuotteilla. Swegon Wise tarpeenmukainen järjestelmäratkaisu tarjoaa järjestelmäosat, jotka on kalibroitu asennusvalmiiksi tehtaalla. Huonetason ilmavirtasäätimiin tai aktiivisiin päätelaitteisiin tarvitsee vain syöttää suunnitellut ilmamäärät, jolloin järjestelmä säätyy niiden mukaan. Ilmanvaihtojärjestelmissä TK01 ja TK03 on käytetty Super Wise -tiedonsiirtoyksikköä (Mäki 2013), joka kommunikoi Modbus RTU -väylän kautta ilmanvaihtokoneen ja Wise-järjestelmään kuuluvien tuotteiden kanssa. Super Wise -tiedonsiirtoyksikön toiminta perustuu siihen, että se tunnistaa jokaisen Control Damper -vyöhykepellin asennon ja optimoi ilmanvaihtokoneen painetason niin, että vähintään yksi vyöhykepelti on aina

lähes auki (90 %). Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, ettei järjestelmä kurista tarpeettomasti painetta mitoittavan kanavahaaran mukaan, vaan tiedonsiirtoyksikkö optimoi koko järjestelmän painetason. Vyöhykepeltien käyttäminen suuremmissa keskitetyissä ilmanvaihtojärjestelmissä takaa järjestelmän painetasojen nopean säätymisen vaihtelevia ilmamääriä vastaavaksi. Puhaltimet eivät pysty reagoimaan huonepeltien aiheuttamiin pieniin painetasojen muutoksiin isoissa järjestelmissä, jolloin vyöhykepellit tasaavat painevaihteluita ja antavat nopeamman vasteen säädölle. Järjestelmän nopeampi säätyminen myös säästää toimilaitteita.

Paineen optimointi säästää ilmanvaihtokoneen puhaltimien sähkön kulutusta ja alentaa samalla ilmanvaihtojärjestelmän äänitasoa (Swegon AB 2013). Vyöhykepeltinä toimivien Control Damper -peltien jatkona on käytetty huonekohtaisina ilmavirtasäätiminä ADAPT Damper -huonepeltejä ja ADAPT FA sekä ADAPT CA aktiivisia tuloilmalaitteita. Kuvio 7 havainnollistaa Swegon Wise -järjestelmäosien toimintaa järjestelmäkaavion muodossa. Super Wise -järjestelmän avulla järjestelmän ohjausparametreja voidaan muuttaa Web-selaimella. Muita järjestelmän säätötapoja ovat rakennusautomaation käyttöliittymä etäyhteydellä tai käsipäätteet TUNE Ad ja Ca modulaarikaapelin välityksellä. Käsipäätteillä voidaan säätää yksittäisten huonesäätimien ohjausparametreja. Huonepellit ja aktiiviset tuloilmalaitteet vaativat oman käsipäätteensä asetusarvojen säätämiseen.



Kuvio 7. Swegon Super Wise:n kaaviokuva Modbus-verkosta (Swegon AB 2013) (Kuvaa muokattu).

Metallitalon sosiaalitiloja palvelevan Swegon Gold RX20 -ilmanvaihtokoneen järjestelmäkaavio on TK01 ja TK03 ilmanvaihtokoneita suppeampi. Swegonin Gold-luokan ilmanvaihtokoneet sisältävät itsessään sähkö- ja ohjausjärjestelmän (Swegon AB 2013). Sosiaalitilojen huonepellit on kytketty suoraan ilmanvaihtokoneen ohjauskeskukseen. Ilmanvaihtokoneen ohjauskeskus on yhdistetty valvontajärjestelmään Web-kaapelilla.

Huonetason säätimet toimivat isäntä-orja-suhteessa, jolloin tulo- ja poistoilmavirrat seuraavat toisiaan. Poistoilmapelit valitaan järjestelmätasolla isänniksi ohjaamaan tuloilmalaitteiden ilmavirtoja. ADAPT Damper -peltejä käytetään sekä tulo- että poistoilmapelteinä. ADAPT Damper -pelleistä saatavat mittaustiedot ovat erilaiset riippuen niiden käytöstä, onko pelti isäntä- vai orja-käytössä. Orja-moodissa eli tuloilmapelteinä Damper -pelti mittaa ilman tilavuusvirran ja tuloilman lämpötilan. Isäntä-moodissa eli poistoilmapelteinä Damper mittaa poistoilman tilavuusvirran.

Isäntäpeltiin on kytkettävä ulkoiset läsnäolo- ja huonelämpötila-anturit, joiden perusteella poistoilmapeltilä ohjaa tuloilmalaitteita.

Vaasan ammattiopistolla on käytetty luokkien isäntäpelteinä ADAPT Damper CAC -peltiä, joka sisältää integroidun ilmanlaatuanturin. Damper CAC -pelti mittaa poistoilmasta VOC-kokonaispitoisuutta, jota käytetään tulo- ja poistoilmavirtojen säätämiseen yhdessä läsnäolo- ja huonelämpötilamittausten kanssa. CAC-anturi reagoi erilaisiin emissioihin, joiden lähde voi olla hengitys, ihon kosteus tai hiki, ihmisperäiset hajut, kosmetiikka, tulostimet tai epätäydellinen palaminen (hiilimonoksidi). Anturi reagoi myös erilaisten maalien ja muiden liuottimia sisältävien aineiden emissioihin. Anturi mittaa VOC-kaasujen kokonaispitoisuuden ilmassa, minkä mukaan se säättää ilmavirran. Se ei reagoi ilman hiilidioksidipitoisuuteen, joten anturi on kalibroitu siten, että se lähettää kutakin hiilidioksiditasoa vastaavan lähtösignaalin mittaamansa VOC-pitoisuuden perusteella.

Käytävillä poistoilmapelteinä on käytetty tavallisia Damper-peltejä, koska käytävien ilmanlaadun ei katsota olevan tarpeellinen ohjausperuste käytävien vaihtelevasta käyttöasteesta ja suhteellisen lyhyestä käyttöajasta johtuen. Käytävien tuloilmalaitteina on käytetty aktiivisia tuloilmalaitteita, jotka säätyvät integroidun läsnäoloanturin ja ulkoisen huonelämpötilamittauksen mukaan toimien orjalaitteina ADAPT Damper -huonepeltien tapaan. Järjestelmän kytkemisen helpottamiseksi Swegon tarjoaa erityisiä kytkentärasioita, joita on käytetty myös kohteessa: ulkoiset anturit on kytketty huonepelteihin ja aktiivisiin tuloilmalaitteisiin huonekohtaisilla CONNECT Adapt -kytkentärasioilla. (Swegon AB 2013; Granlund Pohjanmaa Oy 2013d.)

6 Vertailtavien ilmanvaihtojärjestelmien energiakulutus

Energiasäästölaskelmat perustuvat saman ilmanvaihtokoneen (TK03) energiakulutuksen laskentaan. Ilmanvaihtokoneelle lasketaan erillisinä toisistaan energiakulutus mittausajanjaksolla ja energiakulutus vuositasolla. Energiakulutusten laskennat poikkeavat toisistaan niiden luonteen vuoksi: mittausajanjakson kulutuslaskenta perustuu trendi-tulosteilta saatuihin arvoihin ja vuosikulutuslaskenta on teoreettinen arvio energiakulutuksesta, jonka laskemisessa on käytetty apuina mittausajanjakson ja suunnitelma-asiakirjojen tietoja. Sähköenergiakulutuksen laskenta mittausajanjaksolla ja vuositasolla on pääpiirteittäin samanlainen, mutta lämmitysenergiakulutuksen laskennassa eroavaisuutta on enemmän. Lämmitysenergiakulutuksen laskennasta hieman monimutkaisemman tekevät lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen huomioiminen ja lämmitysenergiakulutuksen tarkasteleminen ilmanvaihtokoneen näennäisellä käyntiajalla.

6.1 Sähköenergiakulutus

6.1.1 Sähköenergian kulutus mittausajanjaksolla

Puhaltimen sähköteho lasketaan ilmavirran ja paineenkorotuksen tulona, joka jaetaan puhaltimen kokonaishyötysuhteella. Puhallin mitoitetaan ilmanvaihtokoneeseen siten, että puhallin toimii optimaalisella hyötysuhteella suunnitellulla ilmamäärällä ja painehäviöllä. Puhaltimen mitoituspisteessä ottotehoon vaikuttavat tällöin puhaltimen hyötysuhde, hihnakäytön hyötysuhde, moottorin hyötysuhde ja mahdollisen pyörimisnopeussäätimen, esimerkiksi taajuusmuuttajan, hyötysuhde. Ilmanvaihtojärjestelmän paine muodostuu sisäisestä ja ulkoisesta paineesta. Sisäinen paine koostuu ilmanvaihtokoneen osien aiheuttamista painehäviöistä puhaltimen imu- ja painepuolella, ja ulkoisen painehäviön muodostavat ilmanvaihtokoneen liitos-osat kanavistoon, kanavat, kanavisto-osat ja pääte-elimet puhaltimen imu- ja painepuolella. Virtausopin Bernoullin yhtälön mukaisesti painehäviö on verrannollinen ilman nopeuden toiseen potenssiin (Seppänen 2004, 95). Ilman nope-

us taas riippuu tilavuusvirrasta ja virtauksen poikkipinta-alasta. Täten ilmavirran suuruudella on olennainen merkitys paineeseen.

Puhaltimen sähköenergiakulutus voidaan laskea kaavasta 1 (Seppänen 2004, 106):

$$E = \sum \frac{\Delta p \times q_v}{\eta_s} \Delta t \quad (1)$$

, missä E= puhaltimen tai pumpun käyttämä energia ajanjakson Δt aikana, Wh

Δp =puhaltimen tai pumpun paine-ero, Pa

q_v =puhaltimen tai pumpun tilavuusvirta, m³/s

η_s =puhaltimen tai pumpun kokonaishyötysuhde, jossa on mukana pumpun tai puhaltimen, voimansiirron välityksen, sähkömoottorin ja välityssuhteiden hyötysuhteet

Δt =tarkasteltava aika, h

Vakioilmavirtaisen järjestelmän tiedot sähköenergiakulutuksen laskentaan saatiin suunnitelma-asiakirjoista (Granlund Pohjanmaa Oy 2010b). Fläkt Woodsin Aconvalintaohjelmalla mitoitettun ilmanvaihtokoneen TK03 koneajoa ei enää löytynyt projektin tietokannasta (Fläkt Woods Oy), joten loin LVI-laiteluettelon (Granlund Pohjanmaa Oy 2010b) mukaisen ilmanvaihtokoneen uudelleen Aconvalintaohjelmalla. Tarvittavien lähtötietojen syöttämisen jälkeen valintaohjelma las-ki arvot tarpeenmukaiselle ilmanvaihtokoneelle.

Ilmanvaihtokoneen mitoituksessa oli käytetty tulo- ja poistupuolen kanaviston kokonaispainehäviöinä 400 Pa. Kokonaispainehäviö tarkoittaa, että siihen on laskettu mukaan puhaltimen imu- ja painepuolen painehäviöt. Tuloilmapuhaltimen imupuolen eli ulkoilmakanaviston painehäviönä ja poistoilmapuhaltimen painepuolen eli jäteilmakanaviston painehäviönä käytetään tavallisesti 50 Pa, joten tulo- ja poistoilmakanavistojen painehäviöt olivat molemmat 350 Pa. Kanavistot on mitoitettu MagiCAD HPV -suunnitteluohjelmalla. Valintaohjelmalla mitoitettun ilmanvaihtokoneen

tokoneen TK03 tuloilmapuhaltimen kokonaispaineenkorotus on 906 Pa ja poistoilmapuhaltimen 670 Pa. Kokonaispaineenkorotuksessa on summattu ilmanvaihtokoneen sisäinen ja ulkoinen paine. Puhaltimien kokonaishyötysuhteena on laskelmissa käytetty edellä mainitussa järjestyksessä 63 %:a ja 60 %:a.

Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän mitoitusta varten ulko- ja jäteilmakanavistojen painehäviöt laskettiin mittausajanjakson keskimääräisellä tuloilmavirralla, mikä oli suuruudeltaan 1,7 m³/s. Vyöhykepeltilä 0:n poistoilmavirtausmittauksen puuttumisen johdosta poistoilmavirta saatiin uuden tuloilmavirran ja alkuperäisten suunnitelmien ilmavirtojen suhteessa (kaava 2):

$$q_{iv,p,tarp.} = \frac{q_{iv,p,a}}{q_{iv,t,a}} * q_{iv,t,tarp.} \quad (2)$$

,missä $q_{iv,p,tarp.}$ = keskimääräinen tarpeenmukainen poistoilmavirta, m³/s

$q_{iv,p,a}$ = maksimipoistoilmavirta alussa (2,7), m³/s

$q_{iv,t,a}$ = maksimituloilmavirta alussa (3,1), m³/s

$q_{iv,t,tarp.}$ = keskimääräinen tarpeenmukainen tuloilmavirta, m³/s

Poistoilmavirraksi saatiin kaavalla 2 laskien 1,5 m³/s. Painehäviöt ulko- ja jäteilmakanavistoille voitiin laskea kaavalla 3:

$$p_x = \left(\frac{q_{vx}}{q_{v0}}\right)^2 * p_0 \quad (3)$$

, missä p_x = uuden tilanteen painehäviö, Pa

q_{vx} = uuden tilanteen tilavuusvirta, m³/s

q_{v0} = tunnetun tilanteen tilavuusvirta, m³/s

p_0 = tunnetun tilanteen painehäviö, Pa

Ulko- ja jäteilmakanavistojen painehäviöksi saatiin molemmille 14,2 Pa. Ulko- ja jäteilmakanavistojen painehäviöt summattiin mittausajanjakson keskimääräisiin tulo- ja poistoilmakanavistojen painehäviöihin, jotka olivat molemmat suuruudeltaan 160 Pa. Näin laskettuna tulo- ja poistupuolen kokonaispainehäviöiksi saatiin

172 Pa. Uusilla painehäviö- ja ilmavirta-arvoilla tehty Acon-mitoitus antoi puhaltimien kokonaispaineenkorotukset ja puhaltimien kokonaishyötysuhteet tarpeenmukaisen ilmanvaihtokoneen sähköenergiakulutuslaskentaan. Uudet tulo- ja poistoilmapuhaltimien kokonaispaineenkorotukset olivat 410 Pa ja 329 Pa sekä puhaltimien kokonaishyötysuhteet edellä mainitussa järjestyksessä 57,0 % ja 56,7 %.

Mittausajanjakson sähköenergiakulutus on laskettu mittausaikavälillä olevien onnistuneiden mittaustulosten mukaan. Mittauspäivät, joissa mittaustrendeillä ei ole ollut tarvittavia tietoja, kuten vyöhykepeltien ilmamääriä, on jätetty laskelmissa huomiotta. Tuloilmavirta on saatu laskettua vyöhykepeltien 0, 1 ja 2 ilmavirtojen summana. Yksi poistoilmakanaviston vyöhykepelleistä ei näyttänyt mittaustulosta lainkaan, joten poistoilmapuhaltimen ilmavirta laskettiin ilmanvaihtokoneen maksimi-ilmavirtojen suhteessa tuloilmavirran avulla (kaava 4).

$$E_p = \frac{q_{iv,p}}{q_{iv,t}} * E_t \quad (4)$$

,missä E_p = poistoilmapuhaltimen sähköenergiakulutus, kWh

$q_{iv,p}$ = maksimipoistoilmavirta, m³/s

$q_{iv,t}$ = maksimituloilmavirta, m³/s

E_t = tuloilmapuhaltimen sähköenergiakulutus, kWh

6.1.2 Sähköenergian vuosikulutus

Ilmanvaihtokoneen vuosikulutus on laskettu kaavalla 5:

$$W_{puhaltimet} = (P_t + P_p) * \Delta t \quad (5)$$

, missä $W_{puhaltimet}$ = tulo- ja poistoilmapuhaltimien sähköenergiakulutus, kWh

P_t = tuloilmapuhaltimen sähkönottoteho, kW

P_p = poistoilmapuhaltimen sähkönottoteho, kW

Δt = puhaltimien käyttöaika laskenta-ajanjaksolla, h

Puhaltimien sähkönottotehot saatiin alkuperäisistä suunnitelmista sekä uudesta koneajosta. Vakioilmavirtaisen ilmanvaihtokoneen sähkönottotehoina on käytetty

tuloilmapuhaltimelle 4,26 kW ja poistoilmapuhaltimelle 3,15 kW, ja tarpeenmukaisen ilmanvaihtokoneen puhaltimien sähkönottotehoina edellä mainitussa järjestyksessä 1,18 kW ja 0,89 kW.

Puhaltimien käyttöaika on laskettu päivittäisen käyttöajan perusteella vuoden 2012 käyttöpäivien mukaan. Käyttöajasta on vähennetty lomat ja erikoispäivät, jotka on saatu tietoon päivän tarkkuudella (Mäntylä 2013; Koivuporras 2013).

6.2 Lämmitysenergiakulutus

Rakennuksen tuloilmaa on lämmitettävä tilojen viihtyisyyden takaamiseksi. Tuloilman lämmitysenergiatarpeeseen vaikuttavat monet tekijät, kuten ilman kosteus, ilmavirta ja lämpötilan korotus. Tuloilman lämpötilan tulee olla optimaalinen huone-tilan lämpötilatavoitteeseen nähden; ilmavirran riittävä nopeus tuloilmalaitteella on myös huomioitava, mikäli tuloilmalla on tarkoitus jäähdyttää huonetiloja. Muuten huonetiloihin voi syntyä viihtyisyyttä häiritsevää vetoa.

Rakennuksen tuloilman lämpötila on tavallisesti kaksi celsiusastetta huoneen tavoitelämpötilaa matalampi. Lämpötilaeron johdosta tuloilman sekoittuvuus huoneilmaan on parempi, ja jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmien päällekkäinen käyttö estyy. Huonetilojen pääasiallinen lämmitysjärjestelmä, esimerkiksi termostaattiset radiaattorit, lämmittävät huoneilman, jolloin alilämpöinen tuloilma ei jäähdytä huonetta liiaksi. Ilmanvaihdon lämmitysenergiakulutus-tarkasteluissa on ilmanvaihtokoneen tuloilmalämpötilaksi asetettu 18,5 °C. Lämmön talteenotto vähentää ilmanvaihtokoneen lämmitysenergian tarvetta.

6.2.1 Lämmitysenergian kulutus mittausajanjaksolla

Mittaustrendeiltä on saatu lämmitysenergiaskentaan tarvittavat lämpötilatiedot. Näitä ovat vähintään tuloilman lämpötila LTO:n sekä puhaltimen jälkeen. Puhaltimen ja LTO:n välissä sijaitsevat lämmitys- ja jäähdytyspatterit. Ilmanvaihtokoneen kokonaisenergiakulutusta voidaan tarkastella, kun tiedossa on myös ulkolämpötila.

Kuten kaavasta 6 nähdään, ilmanvaihtokoneen lämmitysenergiakulutukseen vaikuttavat lämpötilaerotuksen lisäksi ilmavirta sekä aikajakso, jonka aikana ilmavirta ja sitä vastaavat lämpötilat esiintyvät. Mittauspohjainen energialaskenta antaa tarkan kuvan tarpeenmukaisen ilmanvaihdon mahdollistamalle säästölle, sillä tunti-kohtaiset ilmavirrat sekä lämpötilat ovat tiedossa. Ilmanvaihdon jälkilämmityspatterin tuntikohtainen lämmitysenergiakulutus voidaan laskea kaavasta 6:

$$Q_{JLP} = c_{pi} \sum q_m (t_{TE10} - t_{TE02}) \Delta t \quad (6)$$

, missä Q_{JLP} =ilmanvaihdon jälkilämmityspatterin käyttämä lämmitysenergia, kWh

c_{pi} =ilman ominaislämpökapasiteetti, kJ/KgK

q_m =ajanjaksoa Δt vastaava ilmanvaihdon massavirta, kg/s

t_{TE10} =tuloilman lämpötila puhaltimen jälkeen (18,5), °C

t_{TE02} =tuloilman lämpötila LTO-patterin jälkeen, °C

Δt =aikajakso, jonka aikana ilmavirta ja sitä vastaavat lämpötilat esiintyvät, h

Kaavalla 6 voidaan tarkastella myös ilmanvaihdon kokonaisenergiakulutusta tai lämmöntalteenoton tuomaa säästöä vaihtamalla lämpötilat. Puhaltimen paineenosto ja kanaviston kitkallinen ilmavirtaus nostavat tuloilman lämpötilaa. Paineenkorotuksesta aiheutunut lämpötilanousu on mukana mittapisteesä TE10 (t_{TE10}). Lämpötilan nousuun vaikuttava paineenkorotus on tarpeenmukaisessa ilmanvaihtokoneessa pienempi, mutta toisaalta puhaltimien kokonaishyötysuhde on heikompi. (Seppänen 1996, 126). Paineenkorotuksesta johtuva ilman lämpeneminen vähentää jälkilämmityspatterin energiakulutusta. Puhaltimen lämmitysvaikutus voidaan laskea kaavasta 7:

$$\Delta T = \frac{P_t}{\rho * c_{pi} * \eta_t} \quad (7)$$

, missä ΔT = puhaltimen aiheuttama lämpötilakorotus, K

p_t = tuloilmapuhaltimen paineenkokonaiskorotus, kPa

ρ_i = ilman tiheys, 1,2kg/m³

c_{pi} = ilman ominaislämpökapasiteetti, 1kJ/(kgK)

η_t = tuloilmapuhaltimen kokonaishyötysuhde

Puhaltimien ilman lämpötilakorotuksiksi kaavalla 7 saatiin tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa 0,6 K ja vakioilmavirtaisessa ilmanvaihdossa 1,2 K. Lämpötilanousut on huomioitu laskelmissa vähentämällä lämpötilanousu kaavan 6 tulolämpötilan arvosta. Tarpeenmukaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä lämpötilanousu on vähennetty samalla tavoin, kuin vakioilmavirtaisessa järjestelmässä, ilman painemuutosten huomioimista.

Vakioilmavirtaisen ilmanvaihtojärjestelmän lämmitysenergiakulutus on laskettu käyttämällä suunnitelma-asiakirjojen mukaisia maksimi-ilmavirtoja (3,1m³/s ja 2,7m³/s).

6.2.2 Lämmitysenergian vuosikulutus

Ilmanvaihtokoneen TK03 lämmitysenergiakulutus on laskettu Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 ohjeiden mukaan. Laskelmissa on tarkasteltu ainoastaan jälkilämmityspatterin energiakulutusta eikä LTO:n aikaansaamaa energiasäästöä ole laskettu erikseen.

Ilmanvaihtokoneessa olevan jälkilämmityspatterin energiakulutus voidaan laskea kaavalla 8 (RT RakMK-21360, 24):

$$Q_{JLP} = \rho_i c_{pi} q_{v,poisto} t_d r t_v (T_{tulo} - T_u - \eta_{t,a} (T_s - T_u)) \Delta t \quad (8)$$

, missä Q_{JLP} = ilmanvaihdon jälkilämmityspatterin käyttämä lämmitysenergia, kWh

ρ_i = ilman tiheys, 1,2kg/m³

c_{pi} = ilman ominaislämpökapasiteetti, 1kJ/(kgK)

$q_{v,poisto}$ = poistoilmavirta, m³/s

t_d = ilmanvaihtolaitoksen keskimääräinen käyntiaikasuhde, h/24h

r = muuntokerroin, joka ottaa huomioon ilmanvaihtolaitoksen vuorokautisen käyntiajan

t_v = ilmanvaihtolaitoksen viikoittainen käyntiaikasuhde, vrk/7vrk

T_{TE10} = tuloilman lämpötila, oC

T_u = ulkoilmanlämpötila, oC

η_{ta} = ilmanvaihdon tuloilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde tai keskimääräinen hyötysuhde laskenta-ajanjaksolta.

T_s = sisälämpötila, °C

Δt = ajanjakson pituus, h

Lämpötila T_s määräytyy sen mukaan, tarkastellaanko tuloilman lämmityksen vaatimaa energiaa ilmanvaihtokoneen asetusarvon vai rakennustilan huonelämpötilan mukaan. Tässä työssä lämpöenergian kulutusta tarkastellaan ilmanvaihdon lämmitysenergiakulutuksen kannalta. Tuloilma on huoneeseen saapuessaan hieman alilämpöistä huonetilaan nähden, ja lämmityskaudella ilma lämmitetään lopulliseen huoneen sisälämpötilaan yleensä termostaattisilla radiaattoreilla.

Käyntiaikasuhteet t_d ja t_v on korvattu laskemalla ilmanvaihtokoneen käyttöajat kuukausittain tunnin tarkkuudella (Koivuporras 2013, Mäntylä 2013). Muuntokerroin r , joka ottaa huomioon ilmanvaihtolaitoksen vuorokautisen käyntiajan, on laskettu viikonpäivien käyntiaikojen tarkkuudella jokaiselle kalenterikuukaudelle. Laskelmissa käytetty muuntokerroin r on näennäinen käyntiaikakerroin, joka lasketaan jakamalla RakMK-21360 liitteestä 1 saatava näennäiskäyntiaika todellisella käyntiajalla. Laskettu näennäiskäyntiaikakerroin ottaa paremmin huomioon ilman lämmitystarpeen, varsinkin kun ilmanvaihtokoneen vuorokautinen käyttöaika on poikkeuksellisen pitkä. Taulukko 4 havainnollistaa näennäisen käyttöajan eroavuutta todelliseen käyttöaikaan verrattuna:

Taulukko 4. Ilmanvaihtokoneen TK03 todellinen ja näennäinen käyntiaika 2012.

	Todellinen käyttöaika [h]	Näennäinen käyttöaika [h]
Tammi	320	339
Helmi	306	317
Maalis	323	328
Huhti	275	273
Touko	306	250
Kesä	309	148
Heinä	219	179
Elo	329	225
Syys	300	276
Loka	334	341
Marras	264	274
Joulu	213	219

Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteeseen vaikuttavat lämmöntalteenottosiirtimen tyyppi, tulo- ja poistoilmavirtojen suhde, haluttu tuloilman lämpötila, poistoilman lämpötila sekä kohteen sijainti. Siirtimen tyypillä on eniten merkitystä vuosihyötysuhteen laskennassa. Kohteessakin käytetty regeneratiivinen eli pyörivä lämmönsiirrin on lämpötilahyötysuhteeltaan lämmöntalteenottojen parhaimmasta päästä hyötysuhteella 60–80% (Seppänen 2004, 96). Teho perustuu ohuiden metallilevyjen hyvään lämmönvaraus ja -luovutuskykyyn. Pyörivän lämmöntalteenoton hyötysuhdetta nostaa myös sen kyky siirtää kosteutta poistoilmasta tuloilmaan, jolloin myös poistoilman veteen sitoutunut energia käytetään hyödyksi tuloilman lämmittämisessä. Muissa lämmönsiirrintyypeissä kosteuden siirtyminen poistoilmasta tuloilmaan ei ole mahdollista. Muita lämmöntalteenottosiirrintyyppisiä ovat vastavirtalevylämmönsiirrin (60–80 %), ristivirtalevylämmönsiirrin (50–70 %) ja virtaavan väliaineen välityksellä lämpöä siirtävät lämmönsiirrinyhdistelmät (40–60 %). Kohteen sijainti vaikuttaa lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteeseen, koska ulkolämpötilaa seuraava huurteenesto voimistuu, mitä kylmempää on. Käytännössä kylmimmillä pakkaskeleillä lämpöä ei saada talteen lainkaan huurteenestorajoituksen vuoksi. Toinen lämmöntalteenoton vuosihyötysuhdetta alentava säätötilanne on tuloilman lämpötilarajoitus. Lämmöntalteenoton tuloilman lämpötila säädetään tavallisesti 16 °C:seen, jolloin tuloilman lämpötila ei yllämpene puhaltimen paineenkorotuksen ja kanaviston kitkan tuottaman lisälämmön myötä.

Jälkilämmityspatterin energiakulutuskaskennassa käytettävä lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde on laskettu lämmöntarveluvuilla ulkolämpötilan pysyvyyssarvojen mukaisesti säävyöhykkeellä II (RT RakMK-21360 66). Apuna laskennassa on käytetty ympäristöministeriön monistetta 122 (2003). Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteet laskettiin erikseen tarpeenmukaiselle ja vakioilmavirtaiselle ilmanvaihtojärjestelmälle tuloilman lämpötilahyötysuhteiden avulla. Lämpötilahyötysuhteet olivat tarpeenmukaisella 75,8 % ja vakioilmavirtaisella järjestelmällä 73 %. Vuosihyötysuhdelaskennassa hyötysuhteiksi saatiin edellä mainitussa järjestyksessä 65 % ja 64 %.

Vuosikulutuslaskelmissa ulkolämpötilan T_u arvona on käytetty ulkoilman keskimääräisiä kuukausilämpötiloja säävyöhykkeellä II (RT RakMK-21360, 58). Vuosiener-

giakulutuksen laskennassa ilman lämpenemistä tuloilmapuhaltimen paineenkorotuksesta johtuen ei huomioitu.

Mikäli halutaan tarkastella erikseen lämmöntalteenoton talteen ottaman ja lämmityksessä hyödynnetyn energian määrää, se voidaan laskea kaavalla 9 (RT RakMK-21360, 23):

$$Q_{LTO} = Q_{iv,eiLTO} - Q_{iv} \quad (9)$$

, missä Q_{LTO} = lämmöntalteenottolaitteistolla talteenotettu ja tuloilman lämmityksessä hyödynnetty energia, kWh

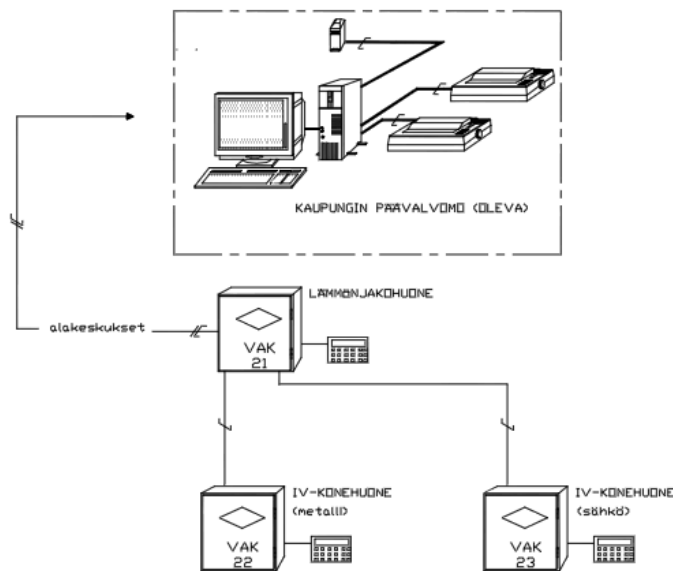
$Q_{iv,eiLTO}$ = ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema energia ilman lämmön talteenottoa, kWh

Q_{iv} = ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema energia, kWh.

7 Energiakulutuksen ja ilmanlaadun mittaukset

7.1 Rakennusautomaatiojärjestelmän rakenne

Vaasan ammattiopiston rakennusautomaatiota valvotaan kaupungin päävalvomosta. Keskusvalvomoon on koottu myös muiden Vaasan kaupungin omistamien kiinteistöjen talotekninen valvonta. Kuvio 8 havainnollistaa rakennusautomaatiojärjestelmän rakennetta. Kohteen järjestelmä on yhdistetty kaupungin sisäiseen verkkoon, mutta se on myös etäkäytettävissä Web-selaimella.



Kuvio 8. Rakennusautomaatiojärjestelmän rakenne (Granlund Pohjanmaa Oy 2010c).

Päävalvomon tietokoneella olevan rakennusautomaatio-ohjelmiston (Siemens Desigo Ensign 4.0) avulla ilmanvaihtojärjestelmien mittauspisteistä luotiin mittaus-trendit, joiden avulla mittauspisteet saatiin jatkuvaan tallennukseen. Tallennukseen valittiin mittauspisteitä ilmanvaihtojärjestelmistä pisteistä, joista voitiin saada tietoa järjestelmien energiakulutuksesta ja rakennuksen tiloissa vallitsevasta ilmanlaadusta. Mittauspisteet koottiin trendiasetustiedostoihin siten, että esimerkiksi yksi asetustiedosto sisälsi yhden luokkahuoneen mittauspisteet. Ohjelmistolla mittausdata tallennettiin suoraan päävalvomon tietokoneen palvelimelle, jolloin mahdollisen sähkökatkon tai ohjelmahäiriön johdosta tapahtuva mittausohjelmiston kaatu-

minen ei johtanut mittausdatan menetykseen. Mittausdata voitiin tuoda erillispisteinä trendinäytölle arkistosta, mikäli tietokone oli syystä tai toisesta jouduttu käynnistämään uudelleen. Trendiasetustiedostojen avulla mittaukset saatiin jälleen nopeasti käyntiin ilman erillispisteiden uudelleenvalitsemista trendeille.

Arkistoon tallennetut trendit olivat trendinäkyvässä niin sanottuja offline-trendejä, jotka sisälsivät mittausajanjakson mittausdatan. Mittauksen päälläoloaikana trendinäkyvät olivat niin sanottuja online-trendejä, jotka olivat yhteydessä mittauspisteisiin ja päivittyivät reaaliajassa. Online-trendimittausten seuraaminen graafisessa muodossa trendinäkyvästä oli vaivatonta, mutta mittausten tulostus numeerisessa muodossa ei ollut mahdollista ohjelman käyttöliittymästä johtuen. Numeeriselle tulostukselle olisi ollut käyttöä mittausdatan purkamisessa, mutta toisaalta graafisesta aineistosta mittausvirheet näkyivät helposti eivätkä ne päässeet laskenta-aineistoon.

7.2 Mittausajanjakso

Mittaukset aloitettiin 15.8.2012 ja niitä jatkettiin tammikuulle 2013. Mittauksen alla olivat kaikki Ammattiopiston tarpeenmukaiset ilmanvaihtojärjestelmät: TK01, TK03 ja TK05. Mittausteknisistä ongelmista ja mittausten purkutyön työllistävyydestä johtuen energiasäästölaskelmat jouduttiin rajaamaan sähkötalon luokkia palvelevaan ilmanvaihtokoneeseen TK03. Mittausteknisillä ongelmilla tässä tarkoitetaan tiedon tallennus- tai lukuvaikeuksia. Suuri osa TK01 ilmanvaihtokoneen trendidatasta oli liian sekavaa käytettäväksi energialaskelmien pohjana (liite 1). TK01 mittausdatan sekavuus oli ilmeisesti yhteyshäiriö tai ohjelmallinen häiriö, sillä mittausajanjakson alku- ja loppupäivät olivat selkeitä. Liitteen 1 trenditulosteessa trendidata on melkoista sekamelskaa, eikä sitä voi käyttää missään muodossa laskelmien hyväksi.

Mittausajanjakson energiakulutyslaskelmissa käytettiin onnistuneiden mittauspäivien tietoja. Onnistuneita mittauspäiviä kertyi taulukon 5 esittämällä tavalla. Mittauspäivistä on vähennetty sunnuntait ja erikoispäivät, jolloin ilmanvaihtokonetta ei ole käytetty.

Taulukko 5. Ilmanvaihtokoneen TK03 onnistuneet mittauspäivät.

Mittauspäivien kertymä	
Elokuu	10
Syyskuu	6
Lokakuu	15
Marraskuu	18
Joulukuu	19
Tammikuu	19
Yhteensä	87

7.3 Trendit energialaskelmien perustana

Mittausdataa kerättiin ilmanvaihtokoneen lämpötiloista (T_u , TE02, TE10, poistoilman lämpötila), paineista ja puhallinten käyttöasteista. Ilmanvaihtojärjestelmästä mitattiin vyöhykelleiltä painearvot ja ilman tilavuusvirrat. Huonekohtaisilta ilma- virtasäätimiltä mitattiin kaikki mittausdata, mitä oli saatavilla: läsnäolo, huonelämpötila, tuloilman lämpötila, tulo- ja poistoilmavirrat sekä VOC-pitoisuus.

Energialaskelmien pohjana käytetyt mittaustiedot jaoteltiin siten, että yhdellä trenditulosteella oli näkyvillä puhaltimien painearvot (Pa) ja käyttöasteet (%). Toiselle trenditulosteelle kerättiin kaikki ilmanvaihtokoneen lämpötilat. Kolmannen trenditulosteen muodostivat kaikkien vyöhykepeltien (0,1 & 2) erilliset trenditulosteet, joissa oli painearvot (Pa) ja tilavuusvirrat (l/s).

Trendidata pyrittiin skaalaamaan siten, että trenditulosteella näkyisi aina kerrallaan vuorokauden tunnit. Näin trenditulosteiden määrä säilyi "kohtuullisena", mutta data oli edelleen hyvin luettavissa. Energiasäästölaskelmien tekeminen vaati yli 435 trenditulosteen analysoinnin. Päävalvomom sijaitessa 100 km:n päässä ja tulosteiden määrästä johtuen tulosteiden tekemisessä vaalittiin huolellisuutta niin pisteiden viennin kuin tulosteiden tallentamisen kanssa. Näin välttyttiin virheiltä ja ylimääräiseltä työltä.

Laskelmien pohjana käytetyistä mittaustrendeistä esimerkkejä liitteissä 2 ja 3.

7.4 Sisäilmastotutkimus

Mittausajanjakson alussa Ammattiopiston sähkö- ja metallitalojen kiinteistöissä tehtiin suullinen kysely tilojen ilmanlaadusta. Samalla luokkatiloihin jaettiin luokka-kohtaiset olosuhdepäiväkirjat (liite 4), johon käyttäjät saattoivat merkitä sisäilmaolosuhteiden puutteellisuuksia. Tilojen käyttäjät ohjeistettiin kokouksen yhteydessä merkitsemään päiväkirjaan vain, kun tunsivat siinä olevan parantamisen varaa. Näin olosuhdepäiväkirjan täyttäminen ei muodostunut taakaksi eikä toisaalta aiheuttanut ylimääräistä työtä sisäilmaongelmien selvitykseen.

Olosuhdepäiväkirjassa oli kolmi-portainen arvosteluasteikko ilmanlaadun arvioimiseksi: 1=huono, 2=kohtalainen ja 3=hyvä sisäilma. Tuntemus ilmanlaadusta voitiin merkitä kolmelle sarakkeelle, josta ensimmäinen arvio oli ilmanlaadun tuntemus luokkahuoneeseen saapuessa, toinen arviosarake oli ilmanlaadun tuntemus tauon jälkeen luokkahuoneeseen saavuttaessa ja kolmas arviosarake tuntemus ilmanlaadusta oppituntien päätyttyä. Arviosarakkeella yksi haluttiin selvittää ilmanvaihdon poissaolo-ilmavirran riittävyys VOC-kaasupitoisuuden pitämiseksi alhaisella tasolla. Toisen sarakkeen (ilmanlaadun tuntemus luokkahuoneeseen saavuttaessa) avulla haluttiin selvittää, oliko ilmanlaatu heikentynyt luokassa oppituntien aikana siinä määrin, että luokkahuoneeseen saavuttaessa tauon jälkeen raittiimmasta ilmasta luokkahuoneen ilma tuntui tunkkaiselta tai lämpimältä. Ihminen ei huomaa jatkuvasti samassa tilassa pysytellessään sisäilmalaadun heikkenemistä, vaan tullessaan raikkaammasta ilmasta huonimpaan on huono sisäilmanlaatu aistittavissa (Seppänen 1996, 51). Mikäli huono sisäilma olisi kuitenkin ollut havaittavissa oppituntien aikana tehdyn muun poistumisen johdosta, olisi toisen arviosarakkeen arvosana kertonut ilmanvaihdon huuhtelun tehokkuudesta luokkatilassa tauon aikana. Kolmannen arviosarakkeen (ilmanlaadun tuntemus oppituntien jälkeen) tarkoitus oli tuoda esille ilmanlaatua oppituntien jälkeen. Koska ihmisen nenä turtuu hajuihin samassa tilassa ollessaan, viimeinen sarake kuvaa lähinnä tuntemusta lämpötilasta.

8 Energiakulutuskannan tulokset

Energiasäästöjen hinnoittelussa on käytetty Vaasan Talotoimelta saatuja vuoden 2012 keskimääräisiä hintatietoja veroineen, perusmaksuineen ja siirtomaksuineen (Tapojärvi 2013). Laskelmissa käytetty sähkön hinta on 11,66 snt/kWh ja kaukolämmön hinta 5,58 snt/kWh.

8.1 Sähköenergian kulutus

8.1.1 Mittausajanjakso

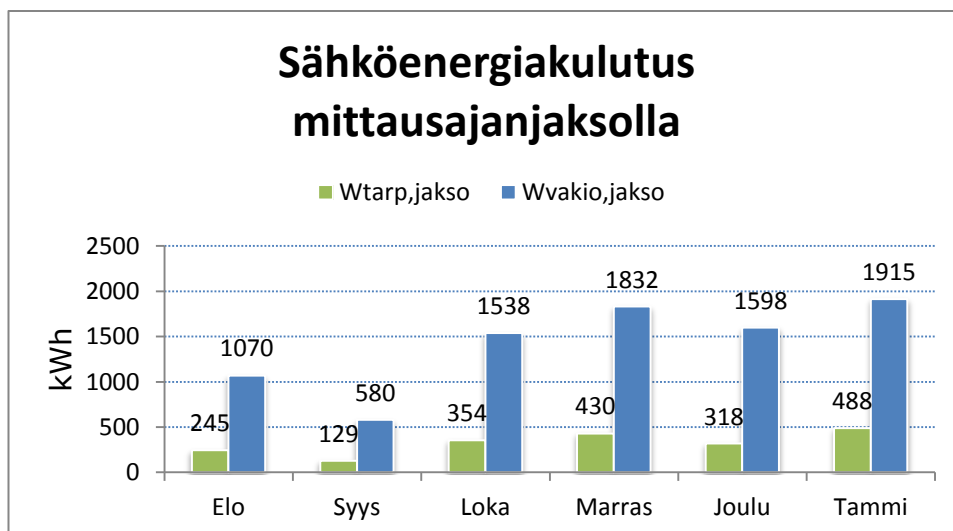
Sähköenergiakulutus mittausajanjaksolla on laskettu ainoastaan onnistuneille mittauspäiville. Mittauskuukaudessa mittauksen ulkopuolelle jääneitä sähkökulutuksia ei ole arvioitu eivätkä ne näin vaikuta tuloksiin. Sähköenergiakulutus on laskettu jokaisena onnistuneena mittauspäivänä jokaiselle käyttötunnille erikseen senhetkisten paine- ja tilavuusvirtaolosuhteiden mukaan. Mittaustrendeiltä on saatu tarpeenmukaisen ilmanvaihtokoneen paineet tulo- ja poistoilmakanavissa, johon on lisätty keskimääräisen painehäviön ja ilmavirran avulla lasketut ulko- ja jäteilmakanavien paineet sekä Acon-ilmanvaihtokoneiden valintaohjelmalla keskimääräisen kanaviston kokonaispainehäviön ja tilavuusvirran avulla laskettu ilmanvaihtokoneen sisäinen painehäviö. Acon-valintaohjelmalla saatiin myös mitoitettua tarpeenmukaiselle ilmanvaihtokoneelle puhaltimien kokonaishyötysuhteet, jotka vaikuttavat merkittävästi sähköenergiakulutukseen. Taulukossa 6 on esitetty sähköenergiakulutuksen laskentaan vaikuttavat tunnusluvut.

Taulukko 6. Sähköenergiakulutukseen vaikuttavat tekijät.

	Vakioilmavirta		Tarpeenmukainen	
	Tuloilma	Poistoilma	Tuloilma	Poistoilma
Ilmavirta [m³/s]	3,13	2,72	1,67	1,45
Kokonaispaineenkorotus [Pa]	906	670	410	329
Kokonaishyötysuhde [%]	63,0	60,0	57,0	56,7
Sähkönottoteho [kW]	4,26	3,15	1,18	0,89

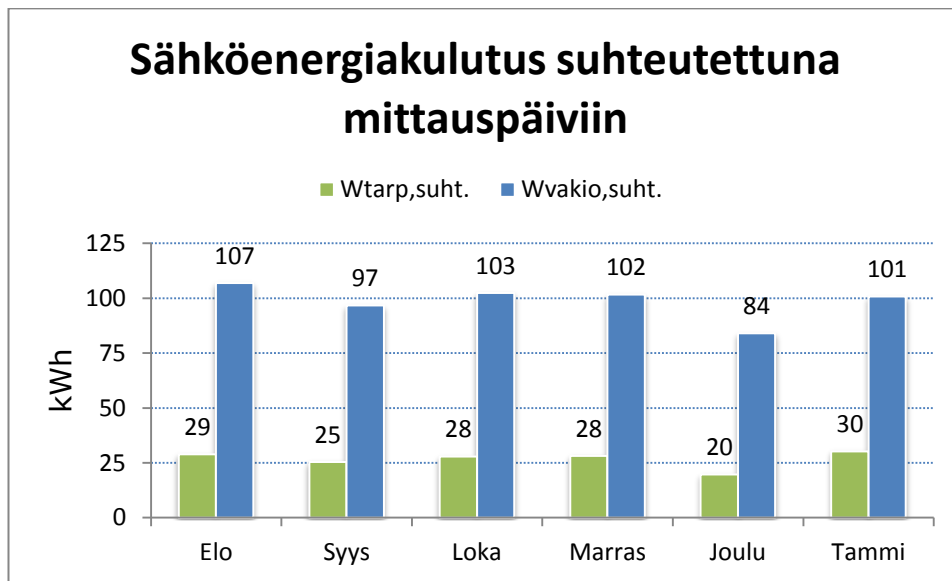
Mielenkiintoinen yksityiskohta taulukon 6 arvoissa on se, että puhaltimien kokonaishyötysuhteet tarpeenmukaisen ilmanvaihtokoneen keskimääräisillä ilmamäärillä laskettuna eivät ole merkittävästi huonommat maksimi-ilmavirtojen hyötysuhteisiin verrattuna; puhaltimien mitoitusta voidaan siis pitää onnistuneena.

Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon tuloilmapuhaltimen sähköteho laskettiin kaikille mittaustunneille kaavan 1 avulla. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon poistoilmapuhaltimen sähköteho laskettiin kaavan 1 avulla siten, että poistoilmavirta laskettiin maksimi-ilmavirtojen suhteessa kaavalla 2. Puhallinten tehot summattiin, jonka jälkeen sähköenergiakulutus saatiin kertomalla teho käyttöajalla (kaava 5). Vakioilmavirtaisen ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergiakulutus laskettiin samalla käyttöajalla ja samoilla lämpötiloilla, mutta maksimikokonaispaineenkorotuksilla ja maksimi-ilmavirroilla. Kuvioissa 9 on esitetty puhallinten sähköenergiakulutus mittausajanjaksolla.



Kuvio 9. Ilmanvaihtokoneiden sähköenergiakulutus mittausajanjaksolla.

Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergiakulutus mittausajalla oli huomattavan alhainen verrattuna vakioilmavirtaiseen ilmanvaihtojärjestelmään. Laskelmien mukaan sähköenergian kulutus mittausajalla oli tarpeenmukaisella järjestelmällä yhteensä 2317 kWh ja vakioilmavirtaisella järjestelmällä 8534 kWh. Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän sähkön säästö oli 72,8 % verrattuna vakioilmavirtaiseen järjestelmään. 6217 kWh sähköenergiesäästö tarkoittaa euroissa mitaten 725 €:n säästöä.



Kuvio 10. Ilmanvaihtokoneiden sähköenergiakulutus suhteutettuna mittauspäivien lukumäärään.

Kuviossa 9 ilmanvaihtojärjestelmien kuukausittaiset energiakulutuspalkit ovat "epätavallisen" erikorkuiset mittauspäivien vaihtelevista lukumääristä johtuen. Kuviossa 10 on ilmaistu sähköenergian kulutus kuukausittain suhteessa mittauspäiviin. Elokuun energiamittausten mukaan ulkolämpötila oli vielä elokuussa muutama päivä lähellä tuloilman lämpötilaa, mutta kuvion 10 perusteella ei voi varmuudella sanoa käyttöasteen kohonneen jäähdytystarkoituksesta. Kuvion 10 tolppien korkeuserot tulevat suoraan ilmanvaihtokoneen käyttöajoista.

8.1.2 Vuosikulutuslaskenta

Sähkön vuosikulutuslaskenta on laskettu mittausajanjakson tuloksiin perustuen. Laskennassa on käytetty hyväksi Acon-valintaohjelmalla laskettuja arvoja, jotka on esitetty taulukossa 6. Vuosikulutus on saatu summaamalla ilmanvaihtokoneiden puhallintehtävät, jonka jälkeen summa on kerrottu ilmanvaihtokoneiden kuukausittaisella todellisella käyntiajalla (kaava 5). Kuviossa 11 on esitetty sähköenergian laskennallinen vuosikulutus ilmanvaihtokoneille.



Kuvio 11. Ilmanvaihtokoneiden vuosittainen sähköenergiakulutus.

Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergiakulutus vuosilaskennan mukaan oli yhteensä 7240 kWh ja vakioilmavirtaisen järjestelmän 25900 kWh. Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla saavutettiin laskelmien mukaan 18700 kWh:n säästö eli 72,1 % säästö. Rahassa energiasäästö merkitsee 2180 €:n säästöä.

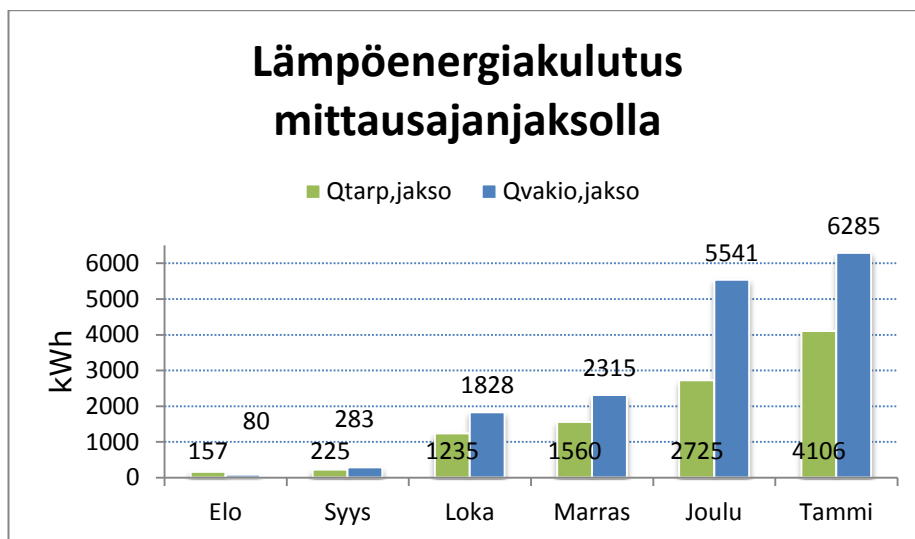
8.2 Lämpöenergian kulutus

8.2.1 Mittausajanjakso

Ilmanvaihtokoneiden lämmitysenergiakulutukseen riippuu etenkin tuloilmavirran suuruudesta. Lämmöntalteenotto vähentää merkittävästi lämmitysenergiatarvetta, joten tuloilman jälkilämmityspatterin energiakulutus riippuu paljon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteesta. Mittausajanjaksolla lämmöntalteenoton lämpötilahyötysuhde välittyy suoraan mittaustrendeille, jolloin sitä ei tarvitse laskea. Mittaustrendeille tallentuivat ulkolämpötila, tuloilman lämpötila LTO:n jälkeen, tuloilman lämpötila sekä poistoilman lämpötila. Lämpötilatrendien perusteella olisi siis voinut tarkastella erikseen lämmöntalteenoton tuomaa säästöä. Tämän työn tarkoituksena oli kuitenkin verrata tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän tuomaa säästöä

vakioilmavirtaiseen ilmanvaihtojärjestelmään verrattuna, joten jätin lämmöntalteenoton tuoman energiasäästön vähemmälle huomiolle.

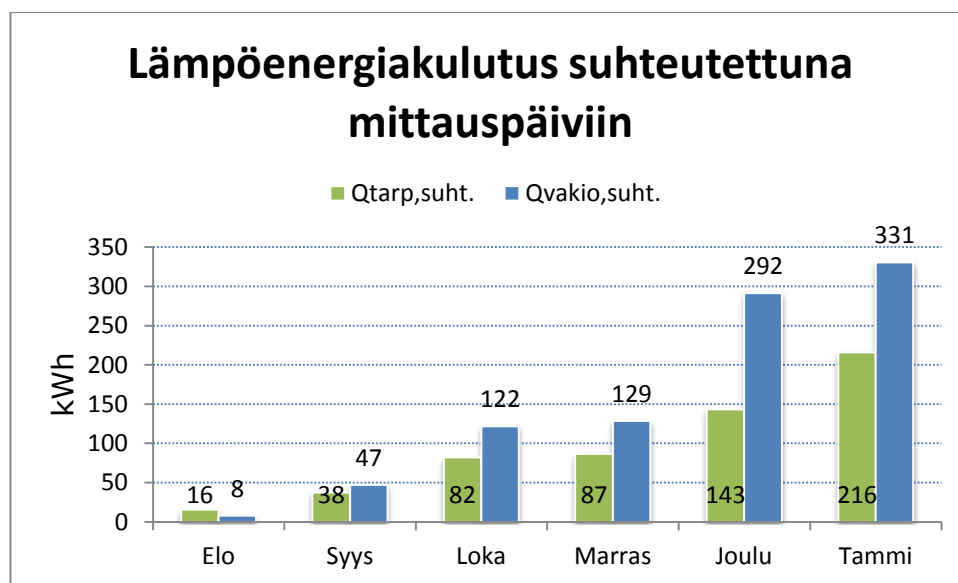
Mittausjakson lämmitysenergiälaskennassa tarpeenmukaisen ilmanvaihtokoneen ilmamäärät kunakin käyttötuntina saatiin summaamalla vyöhykepeltien tilavuusvirramittaukset. Lämmitysenergiälaskennassa on huomioitu tuloilmapuhaltimien lämmitysvaikutus. Lämmitysvaikutus näkyy kuviossa 12 selkeästi kuukausina, jolloin ulkolämpötila on lähellä tuloilman lämpötilaa. Tarpeenmukaisen ilmanvaihtokoneen keskimääräisellä kokonaispainehäviöllä laskettu lämpötilakorotus oli 0,6 K ja vakioilmavirtaisen ilmanvaihtokoneen 1,2 K (kaava 7). Ulkolämpötilasta, lämmöntalteenotosta ja puhaltimen lämpötilakorotuksesta (kaava 6) johtuen lämmitysenergiälaskelmat antoivat negatiivisia tuloksia sekä tarpeenmukaiselle että vakioilmavirtaiselle ilmanvaihdolle, ja nämä tulokset korjattiin laskelmiin nollassi. Toisin sanoen negatiivinen lämmitysenergiakulutus korjattiin laskelmiin nollassi, ettei se vähentäisi lämmitysenergian kokonaiskulutusta.



Kuvio 12. Jälkilämmityspatterin lämpöenergiakulutus mittausajaksolla.

Jälkilämmityspatterin energiakulutus mittausajaksolla oli tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla 38,7 % vähemmän vakioilmavirtaiseen ilmanvaihtoon verrattuna. Laskelmissa huomioitu puhaltimen aiheuttama tuloilman lämpötilakorotus kavensi järjestelmien lämpöenergiakulutusten eroa merkittävästi. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon lämpöenergiakulutus mittausajaksolla oli 10000 kWh, kun vakioilmavirtainen järjestelmä kulutti 16300 kWh. Ilman puhaltimen aiheuttamaa lämpötilakorotusta

tusta energiakulutukset olivat edellä mainitussa järjestyksessä 11400 kWh ja 21300 kWh, joten tarpeenmukainen ilmanvaihto kulutti 46,8 % vakioilmavirtaista vähemmän. Puhaltimen lämmitysvaikutus huomioituna tarpeenmukaisen ilmanvaihdon kaukolämmön energiakulutussäästö 6300 kWh merkitsi rahansäästöä 353 € summaa, kun taas ilman lämpötilan korotuksen huomioimista 9980 kWh energiasäästö merkitsi 557 € summaa. Kuviossa 13 jälkilämmitysenergian tarve on esitetty suhteutettuna mittauspäivien lukumäärään. Kuviosta voidaan havaita pitkänomainen, lauha syysilmasto, joka saattoi kaventaa ilmanvaihtojärjestelmien välistä lämpökulutuseroa.

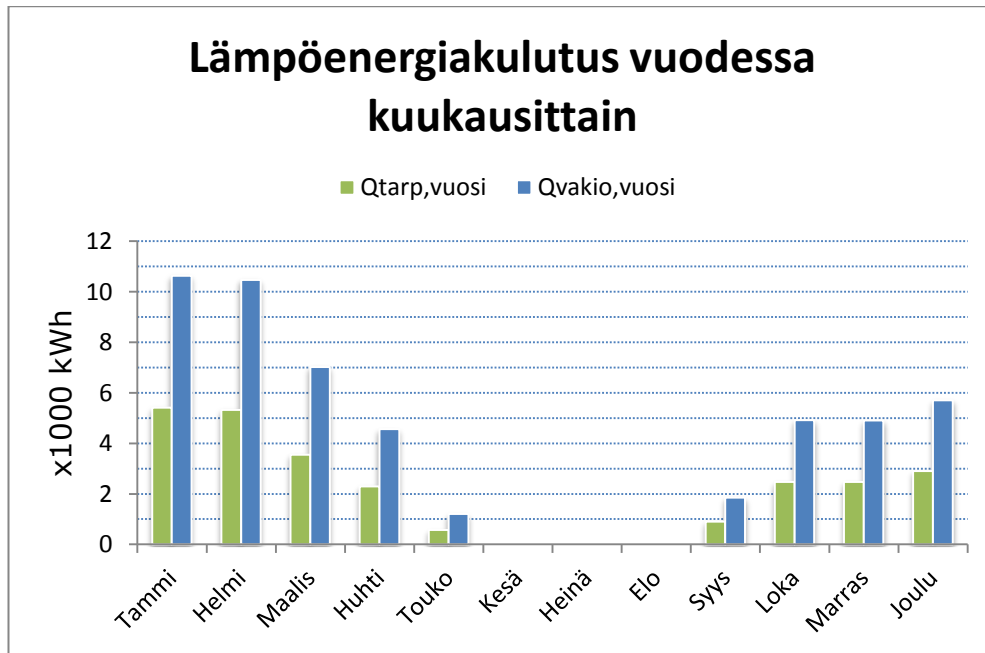


Kuvio 13. Jälkilämmityspatterin lämpöenergiakulutus suhteutettuna mittauspäivien lukumäärään.

8.2.2 Vuosikulutuslaskenta

Jälkilämmityspatterin lämpöenergiakulutuslaskenta on tehty Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D5 mukaisesti. Lämpöenergiakulutus on laskettu kaavalla 8. Poistoilmavirran määrittäminen trendien pohjalta ei ollut mahdollista yhden vyöhykepellin mittauspisteen puuttumisesta johtuen, joten poistoilmavirran suuruus laskettiin tuloilmavirrasta maksimi-ilmavirtojen suhteessa (kaava 2). Ilmanvaihtokoneen pitkistä käyntiajoista johtuen laskelmat tehtiin näennäisellä käyntiajalla, joka ottaa huomioon tuloilman vuorokautisen lämmitystehontarpeen. Sekä tarpeenmu-

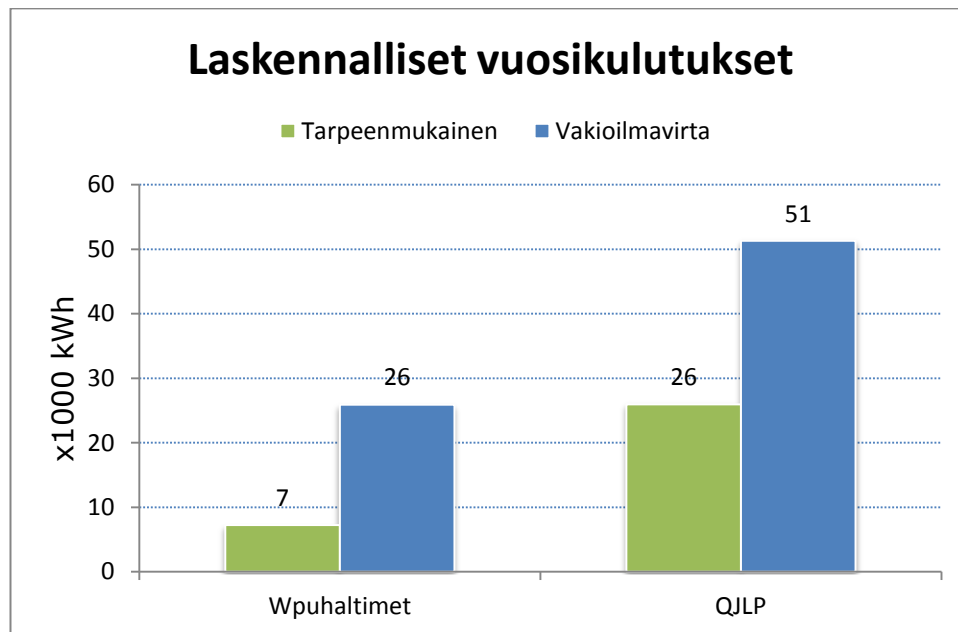
kaisen että vakioilmavirtaisen ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenotolle laskettiin ulkolämpötilan pysyvyydestaulukon ja lämpötilahyötysuhteen avulla vuosihyötysuhde. Vuosihyötysuhteeksi saatiin edellä mainitussa järjestyksessä 65,3 % ja 64,0 % lämpötilahyötysuhteilla 75,8 % ja 73,0 %. Kuviossa 14 on esitetty ilmanvaihtokoneiden jälkilämmityspatterin energiakulutus.



Kuvio 14. Jälkilämmityspatterin vuosittainen energiakulutus.

Kuviosta voi huomata, että toukokuun puolesta välistä syyskuun puoleen väliin tuloilman lämmitykseen riittää pelkkä lämmöntalteenotto. Vuosikulutuslaskennan mukaan tarpeenmukainen ilmanvaihto säästi lämmitysenergiaa 25400 kWh lämmitysenergiakulutusten ollessa 25900 kWh ja 51300 kWh. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon säästöprosentti oli 49,4 % ja säästö rahassa 1416 €.

8.3 Vuosikulutukset



Kuvio 15. Ilmanvaihtojärjestelmien laskennalliset vuosikulutukset.

Ilmanvaihtojärjestelmien laskennalliset kulutuserot muodostuivat prosentuaalisesti erittäin suuriksi. Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergiakulutus oli peräti 72,1 % pienempi kuin vakioilmavirtaisen järjestelmän. Lämpöenergiakulutus puolestaan oli 49,5 % pienempi. Yhteensä tarpeenmukaisella ilmanvaihtojärjestelmällä saavutettiin 3600 €:n säästö vuodessa.

8.4 Järjestelmän takaisinmaksuaika

8.4.1 Investoinnin muodostuminen

Kohderakennuksen ilmanvaihtototeutukseen soveltaen tarpeenmukaisen ja vakioilmavirtaisen ilmanvaihtojärjestelmän perusrakenne on sama niin konekomponentti- kuin rakennusautomaatiosalla (Mäki 2013; Tuominen 2013). Tarpeenmukainen ilmanvaihto asettaa ilmanvaihtojärjestelmälle kesäajan jäähdytystä ajatellen erityisvaatimuksia: tuloilmalaitteiden tulee olla ilmavirtausta tehokkaasti hajottavat myös pienellä ilmavirralla vedon estämiseksi. Tämä erityisvaatimus ei kuitenkaan

tee tarpeenmukaisesta järjestelmästä kalliimpaa rakentaa, sillä vedoton tuloilmaratkaisu pienillä ilmamäärillä voidaan toteuttaa kustannustehokkaasti esimerkiksi rakohajottimilla, joita kohteessa on käytetty runsaasti. Niillä voidaan helposti tuoda tiloihin suuria ilmamääriä tarpeen niin vaatiessa. Rakohajottimien ilmavirtojen mitaus ja säätö voidaan toteuttaa esimerkiksi haarakohtaisilla säätösäleilmavirtasäätimillä, kuten kohteessa on tehty, jolloin ilmavirtojen säätö on nopea toteuttaa ja kustannustehokas myös vakioilmavirtaista järjestelmää ajatellen.

Tarpeenmukaisesta ilmanvaihtojärjestelmästä kalliimman tekevät järjestelmän osat, sekä Wise-järjestelmän erityisvaatimus ilmanvaihtokoneelle: koneen on oltava paineohjattu, mikä tarkoittaa taajuusmuuttajakäyttöä. Vakioilmavirtainen ilmanvaihtojärjestelmä voitaisiin toteuttaa myös puhaltimen hihnakäytöllä ilman taajuusmuuttajaa. Puhaltimien kiilahihnakäyttö on kuitenkin uusissa koneissa hyvin harvinaista; ilmanvaihtokoneiden puhaltimet ovat nykyään aina taajuusmuuttajaohjattuja (Viirimäki 2013). Yksi vaihtoehto voisi olla myös vakioilmavirtaisen ilmanvaihtokoneen puhaltimen varustaminen EC-moottorilla, jota voidaan ohjata suoraan rakennusautomaation ala- tai pääkeskuksesta. Wise-järjestelmän erityisvaatimusta puhallinkäytön suhteen ei ole otettu huomioon takaisinmaksuajan laskennassa, vaan siinä on oletettu käytettävän myös vakioilmavirtaista ilmanvaihtokonetta taajuusmuuttajaohjattuna.

Tarpeenmukainen ilmanvaihtojärjestelmä vaatii omien järjestelmäosien lisäksi myös enemmän kanavaosia, kuten äänenvaimentimet. Ilmavirtasäätimet varustetaan lähes poikkeuksetta äänenvaimentimilla, poikkeuksen tekevät vyöhykesäätimet, joilla ei varsinaisesti rajoiteta ilmavirtoja vaan optimoidaan painetasoja. Osa äänenvaimentimista on sijoitettu ilmavirtojen mittaus- ja kertosäätöpeltien taakse muuttuvailmavirtasäätimen sijasta, miten niiden sijainnin voisi olettaa myös vakioilmavirtaisessa järjestelmässä olevan. Äänenvaimentimien ja säätöpeltien määrä voisi olla jonkin verran pienempi vakioilmavirtaisessa järjestelmässä, mutta näiden osien tarkan kustannuseron laskeminen vaatisi kohteen uudelleensuunnittelun vakioilmavirtaiselle järjestelmälle. Kanavaosien muodostamaa kustannuseroa tarpeenmukaisen ja vakioilmavirtaisen ilmanvaihtojärjestelmän välillä ei ole arvioitu, eikä täten huomioitu laskelmiin.

Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon suunnittelu, asennus ja käyttöönotto vaativat jonkin verran enemmän aikaa vakioilmavirtaiseen järjestelmään verrattuna. Suunnittelussa on huomioitava kanaviston vyöhykkeiden painehäviöiden symmetrisyys järjestelmän oikean toiminnan takaamiseksi. Paineanturit on sijoitettava oikeille paikoilleen, ja suorien kanavaosuuksien pituusvaatimukset ennen ilmavirtasäätimiä ovat joissain tilanteissa suuremmat, kuin tavallisille ilmavirtasäätimille. Muuttuvailmavirtasäädin on itsessäänkin pidempi verrattuna tavalliseen ilmavirtasäätimeen, mikä voi joskus johtaa kiperiin tilanteisiin varsinkin korjauskohteissa niin asennus- kuin suunnittelutilanteessa. Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän suunnittelussa on huomioitava maksimi-ilmamäärien lisäksi järjestelmän taipuminen minimi- ja poissaoloilmamäärien toimittamiseen. Minimi-ilmamäärillä on tehtävä järjestelmän äänitasotarkastelut, ja huonekohtaisten toimilaitteiden on pystyttävä rajoittamaan ilmamäärät poissaoloilmavirralla. Huonekohtaiset ilmavirtasäätimet pystyvät supistamaan ilmavirtaa vain tiettyyn rajaan asti, joten ilmavirtasäätimien määrä ja koko on valittava sekä poissaolo- että maksimi-ilmavirtojen mukaan.

Wise-järjestelmän asennus on työläämpää vakioilmavirtaiseen järjestelmään verrattuna. Muuttuvailmavirtasäätimien asennus vie oman aikansa, samoin Wise-järjestelmäosien välisten väylien johdotus ja asentaminen. Wise-järjestelmän paineoptimoinnin mahdollistamiseksi järjestelmäosat on yhdistettävä väylällä, vaikka ilmavirrat säätävät myös ilman väylää. Asennuksessa huonekohtaisten anturien asennus vie jonkin verran enemmän aikaa verrattuna vakioilmavirtaiseen järjestelmään, vaikka vakioilmavirtaista järjestelmääkin ohjattaisiin huonelämpötilan perusteella; Wise-järjestelmässä toiminta perustuu aina vähintään kahteen mittaus-tietoon: läsnäoloon ja huonelämpötilaan. Antureiden nopeaa liittämistä varten Wise-järjestelmään on kehitetty kytkentärasia CONNECT Adapt.

Käyttöönoton vaatima aika voi tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa olla huomattavasti lyhyempi, kuin vakioilmavirtaisessa. Wise-ilmavirtasäätimien tehdaskalibrointi helpottaa ilmavirtojen säätöä, ja kohteeseen suunnitellut ilmamäärät voi vain syöttää peltien ohjaustietoihin rakennusautomaation käyttöliittymästä.

8.4.2 Takaisinmaksuajan laskenta ja tulokset

Vaasan ammattiopiston TK03 tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän takaisinmaksuaika laskettiin tämän työn vuosisäästön ja Swegonin tekemän järjestelmäkohtaisen tarjouksen avulla (Lindroos 2013). Kohteen TK03 Wise-järjestelmäosat laskettiin tarjouskyselyyn, jonka Swegon hinnoitteli realistisesti tarjoushintaan. Tarjoukseen on laskettu mukaan

- tiedonsiirtoyksikkö (Super Wise)
- huone- ja vyöhykekohtaiset ilmavirtasäätimet (ADAPT Damper, ADAPT Control, ADAPT Fa ja Ca)
- ADAPT -laitteiden sähkөөn ja sisäiseen tiedonsiirtoon tarvittavat RJ45 -kaapelit
- huoneiden kytkentärasiat (CONNECT Adapt)
- läsnäoloanturit
- huonelämpötila-anturit
- etäyhteyden tiedonsiirtoon tarvittavat RJ12 -kaapelit (LINK Modbus)
- käsipäätteet huonepelleille ja aktiivisille tuloilmalaitteille (TUNE Ad ja Ca)
- vyöhykepeltikohtaiset paineanturit (DETECT Pb)
- Wise-järjestelmän käyttöönotto.

Swegon AB sisällyttää kauppaan aina käyttöönoton, jonka kohteen paikallinen koulutettu huolto-organisaatio käy suorittamassa. Käyttöönotossa tehdään asennustarkastus, käydään lävitse asetuksia, annetaan käyttäjäkoulutus sekä otetaan järjestelmä käyttöön. Tarjoukseen ei ole tehty arvioita asennuksista tai muista kustannuksista, vaan kysymyksessä on puhtaasti laitteiden myyntihinta. Ilmanvaihtojärjestelmän hinta on verottomana 25150 € ja verollisena (ALV 24 %) 31186 €. (Lindroos 2013.)

Järjestelmän takaisinmaksuaika laskettiin koronkorko-menetelmällä. Koronkorko laskettiin kaavalla 10 (Karjalainen 2012, 269):

$$K_n = (1 + i)^n * K \quad (10)$$

, missä K_n = kasvanut pääoma

i = korkokanta desimaalimuodossa

n = korkojaksojen lukumäärä

k = alkuperäinen pääoma.

Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän lämpö- ja sähköenergiesäästöä käytettiin koronkorkolaskennan alkuperäisenä pääomana. Laskentajakson korkokanta muodostettiin yleisestä inflaatiosta ja lämpö- ja sähköenergian eskalaatioista. Yleisen inflaation arvona käytettiin 3 %, lämpöenergian eskalaationa 2 % ja sähköenergian eskalaationa 3 % vuodessa. Laskelmissa käytetyt energian eskalaatiot olivat siis hyvin maltilliset ottaen huomioon, että esimerkiksi vuonna 2011 kaukolämmön kuluttajahinnat nousivat 4–8 % edellisvuoteen verrattuna (Energian hinnat 2012). Ja tavallisesti sähköenergian korko on ollut kaukolämpöä suurempi. Kaukolämpöverkostojen ehtiminen saneerausikään ja alati laajenevat verkostot korottavat energiamaksuja myös kaukolämmityksen piirissä.

Koronkorko-menetelmällä järjestelmän takaisinmaksuajaksi saatiin *seitsemän* vuotta.

9 Sisäilmaston tutkimustulokset

Sisäilmasto pitää sisällään moninaisia asioita, joita ovat lämpö-, ääni-, valaistus-, ilmanlaatu-, säteily- ja kosteusolosuhteet. Sisäilmaston tutkimus rajattiin käsittämään ainoastaan lämpö- ja ilmanlaatuolosuhteita. Lämpöolosuhteetkin on itsessään laaja kokonaisuus, johon liittyvät erityisesti lämmön konvektio ja säteily. Olosuhdepäiväkirjan avulla lämpöviihtyvyyden selvittämistä pyrittiin yksinkertaistamaan, eikä esimerkiksi ilman nopeusmittauksia oleskeluvyöhykkeellä tutkittu mahdollisen vedon selvittämiseksi. Valituksia tilojen vetoisuudesta ei tullut, joten vetoisuuden selvittämiseen ei ollut aihettakaan. Tilojen lämpötilaa ja ilmanlaatua tutkittiin pääasiassa mittaustrendein, mutta joissakin ongelmatiloissa suoritettiin mittauksia myös kenttämittauksina.

9.1 Ilmanlaatu yleisesti

Yleisesti tilojen ilmanlaatua pidettiin hyvänä. Olosuhdepäiväkirjat jäivät täyttämättä suurelta osin, koska puutteita ilmanlaadussa ei havaittu. Kenttävierailujen yhteydessä utelin luokkien opettajilta ja heidän oppilailtaan tuntemuksia ilmanlaadusta, ja ne olivat ongelmatiloja lukuun ottamatta positiivisia. Huonelämpötilat koettiin myös sopiviksi ongelmatiloja lukuun ottamatta. Trendi- ja kenttämittaukset osoittavat aistinvaraiset tuntemukset oikeiksi, sillä ilman VOC- ja CO₂-pitoisuudet pysyivät alle tuhannen ppm:n. Huoneilmavirtasäätimien ohjausparametreihin oli säädetty pienimmäksi ilmanvaihdon säätöarvoksi 800 ppm ja maksimiarvoksi 1000 ppm, mikä selittää VOC-mittauksen kohoamisen niinkin korkealle. Ilmanvaihto luokissa on myös mitoitettu niin, että sisäilman hiilidioksidipitoisuus tasapainotilassa asetuu 1000 ppm:n tuntumaan, mikä on tutkimuksien mukaan ihmisperäisten hajujen rajapyykki. Omien kokemusteni mukaan ilmanlaatu myös luokkiin saapuessa oli hyvä eikä häiritseviä (VOC) hajuja ollut tilojen uutuudesta huolimatta. Poissaoloilmavirrat pitivät huoneilman raikkaana myös käytön ulkopuolella.

9.2 Ilmanlaatu ongelmatiloissa

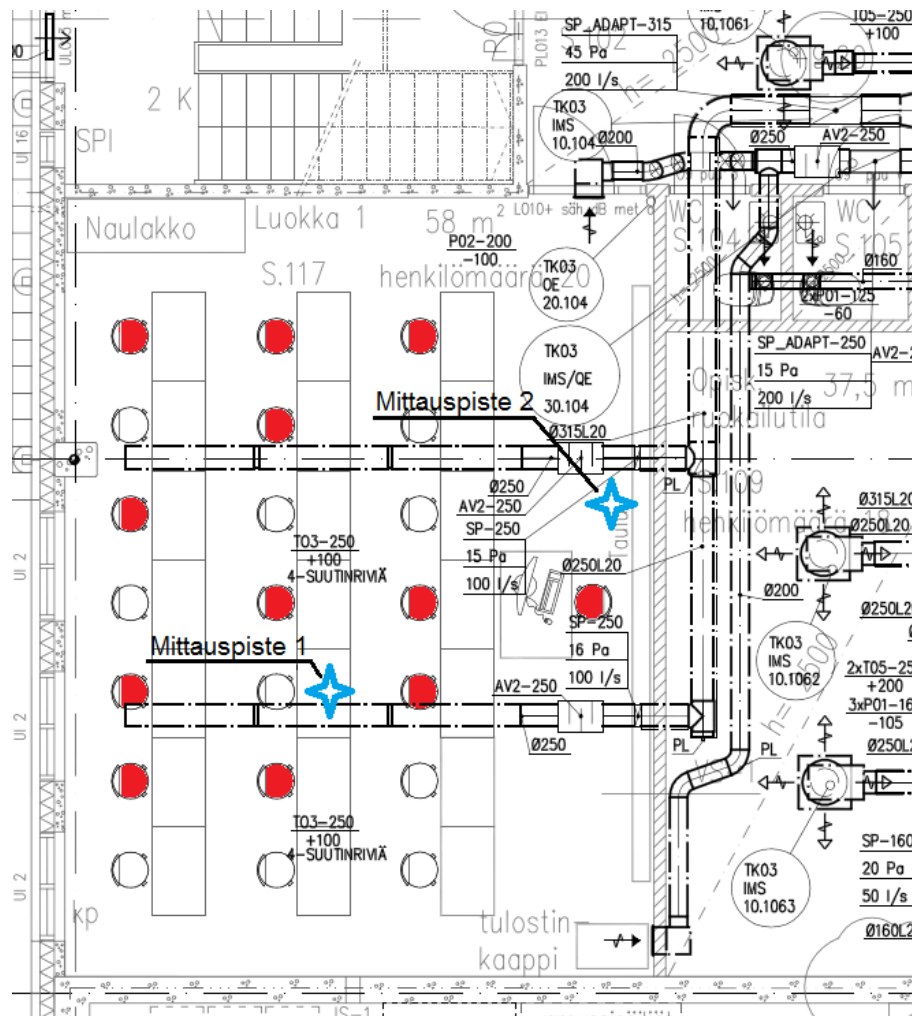
9.2.1 S115b elektroniikan laboratorio

Tila on luokkahuone 20:lle hengelle, jossa on sähkötöiden kaasunpoistoa varten paikallispoistot. Huonetilan ongelma on yllämpeneminen. Luokka ei ollut alunperin ongelmatilojen joukossa, vaan tilan ongelma tuli selville olosuhdepäiväkirjan kautta. Tilan lämpötila on myös lämmityskaudella lähes jatkuvasti yli 23 °C, ajoittain lämpötila kävi yli 25 °C:n. Mittaustrendeistä katsottuna huonelämpötila vaihtelee 23–24 °C:n välillä, eikä putoa 23 °C:n alle edes rakennuksen käyttöajan ulkopuolella. Jatkuva tilan yllämpöisyys myös lämmityskaudella ei täytä edes luokan S3 lämpötilatavoitteita. Tilan ilmanvaihto on läsnäolon aikana aina täysillä, joten ilmastovirran säätö toimii suunnitellusti. Tilan vahva yllämpöisyys viittaa termostaattisten radiaattorien epäsäätöihin tai toimintahäiriöön. Voisiko luokkatilassa olla jopa väärän lämpötilaluokan termostaatit; asiaa ei ole vielä tutkittu tarkemmin. Luokan merkittävän yllämpenemisen ongelmakartoitus kannattaa tehdä, sillä se säästää energiaa sekä tilan lämmitys- että ilmanvaihdon sähköenergiakulutusten muodossa.

9.2.2 S117 luokkahuone.

Luokkahuoneessa kerrotaan olleen pitkään sisäilmaongelmia. Luokka on tavanomainen 20 hengen luokkahuone (58 m²). Suurimmat yksittäiset lämpökuormat huoneessa ovat opettajan pöytämallinen tietokone ja videotykki. Huone sijaitsee rakennuksen länsiseinällä. Tilan kerrottiin yllämpenevän käyttöönoton alussa, mutta tilanne helpotti myöhemmin ikkunoiden sälekaihtimien myötä. Luokkahuoneessa suoritettiin ilmanlaatumittausta sekä kentällä että mittaustrendien avulla.

Kenttämittaus 1. Luokassa S117 tehtiin kenttämittaus CO₂-mittarilla 20.8.2012 klo 13:30–14:30. Sää oli ulkona oli lämmin ja aurinkoinen. Kuvio 9 havainnollistaa mittaustilannetta: värjätyt istumapaikat olivat käytössä ja mittari sijaitsi mittauspisteessä 1 pöydälle asetettuna.



Kuvio 16. Luokan S117 kenttämittaukset CO₂-mittarilla.

Ilma mittauksen aikana oli raikas ja viileä ulkona olevasta lämpimästä säästä huolimatta. Hiilidioksidipitoisuus tunnin alussa oli 560 ppm ja tunnin lopussa 640 ppm. Huonelämpötila pysyi oppitunnin ajan 22,8 °C:ssa ja suhteellinen kosteus oli noin 30 %.

Kenttämittaus 2. Luokkahuoneessa suoritettiin kenttämittausta Lufft Opus 20 TCO -dataloggerilla, joka mittasi luokkahuoneen hiilidioksidi-, kosteus- ja lämpötila-arvoja. Mittausta suoritettiin 5.9.2012–24.9.2012. Mittari oli kiinnitettynä luokan etuosassa olevaan johtokiskoon noin 2,5 m:n korkeudelle. Kuviossa 16 mittauspiste 2 kuvaa mittarin sijaintia luokkahuoneessa. Koska mitattavien arvojen pitoisuudet muuttuvat suhteellisen hitaasti huoneilmassa, mittarin tallennusväliksi asetettiin 10 minuuttia. Näin tiheä tallennusväli ei myöskään muodostunut ongelmaksi mittarin hyvän muistikapasiteetin ja akkukeston johdosta.

Huonelämpötilan pysyvyys oli hyvä mittausajanjaksolla. Lämpötila oli pääsääntöisesti 21,5–22 °C. Kahtena päivänä mittausjakson aikana lämpötila kohosi 23 °C:seen, mutta juuri ennen rakennuksen varsinaista käyttöaikaa. Nämä päivät olivat 21.9. ja 22.9.2012. Luokkahuoneen ilmanvaihdon käynnistyttyä lämpötila laski neljän tunnin kuluessa hieman alle 22 °C:n. Mittaustrendit olivat valitettavalla tavalla pois päältä kyseisten päivien aikaan, joten huonelämpötilan heittoa ei voi arvioida myöskään ulkolämpötilan perusteella. Luokkahuoneen lämpötila säilyi heilahduksen jälkeen aiempaa korkeammalla tasolla, 22 °C:ssa, joten heilahdukset viittaisivat lämmitysjakson alkamiseen. Huonelämpötilan nousun ei voi varmuudella sanoa johtuvan lämmityskäytöstä, koska mittari oli heilahdusten jälkeen luokkahuoneessa vain vajaat kaksi päivää. Lokakuun mittaustrendit kuitenkin osoittavat tilan olevan yllämmennyt lämmitysjakson alkamisesta johtuen. Huonelämpötila-termostaatin mittaustrendit kertovat lämpötilan olleen yli 23 °C ennen rakennuksen käyttöajan alkamista. Käytön aikana huonelämpötila on pysynyt ainakin lokakuun loppupuoliskon ajan yli 23 °C:ssa, ja huonelämpötila on käynyt ajoittain 24 °C:ssa. Tilan yllämpöisyys alkutalvesta viittaisi liian loivaan lämmitysjärjestelmän säätökäyrään tai termostaattien toimimattomuuteen (Seppänen 2001, 186).

Myöhemmin (5.9.2012 alkaen) luokkaan "ilmaantui" selvä määrän betonin haju. Haju on ollut voimakas luokkaan saapuessa, mutta on laimentunut selvästi ilmanvaihtomäärän voimistuttua läsnäolon ja ilman lämpötila- tai ilmanlaatumuutosten vuoksi. Poissaoloilmavirta luokassa on 30 l/s, minimi-läsnäoloilmavirta 60 l/s ja maksimi-läsnäoloilmavirta 200 l/s. Huoneen pinta-ala on 58 m², jolloin huoneen tilavuus on 162,4 m³ 2,8 m keskimääräisellä huonekorkeudella laskettuna. Ilmanvaihtokerroin on poissaoloilmavirralla 0,67 kertaa tunnissa, kun minimivaatimus käyttöajan ulkopuolella on 0,2 kertaa tunnissa (RakMK-21503 2011). Ilmanvaihto on talviaikana ohjelmallisesti sammutettu yön yli, mutta kesäaikana yötuuletustoiminto käynnistyy, mikäli sisä- ja ulkoilmaolosuhteiden vaatimukset täyttyvät ja yötuuletus on otettu käyttöön. Aikaohjelma käynnistää ilmanvaihtokoneen tuntia ennen tilojen käyttöönottoa, joten luokan ilma on ehtinyt vaihtua lähes 3,4-kertaisesti yli vaaditun määrän; siitä huolimatta haju vaivaa luokkahuonetta. Ilmanvaihdon toiminta tilassa on tarkastettu painemittauksin ja järjestelmä on todettu toimivaksi. Alkusyksyn hajuttomuus viittaisi vahvasti luokkahuoneen yötuuletukseen, mutta trendien ja

järjestelmän pääkäyttäjän M. Koivuportaan (2013) mukaan yötuuletustoiminto ei ole käytössä. Ainoaksi vaihtoehdoksi jää rakennusvirhe.

9.2.3 S213 kirjavarasto

Alunperin kirjavarastoksi suunniteltuun tilaan on siirretty iso laser-kopiokone. Ongelmana on tilan lämpeneminen varsinkin kesäaikana. Huone sijaitsee rakennuksen länsi-seinällä. Tulostimen lämmitysvaikutus on koettu jopa niin voimakkaaksi isoja määriä tulostettaessa, että ovi on pidetty suljettuna muun tilan yllälämpenemisen estämiseksi. Kirjavarasto on kooltaan 11 m². Suunniteltu poistoilmamäärä on 20 l/s, mikä tarkoittaa noin 1,8 l/s/m². Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 mukaan tulostushuoneen poistoilmamäärä mitoitetaan 4 l/s/m², joten varaston ilmamäärä on tämän hetkiseen käyttöön nähden liian pieni. Huoneessa on yksi URH-125 poistoilmaventtiili, jonka säädettävyys riittää uudelle poistoilmamäärälle 44 l/s. Huoneen korvausilma johdetaan oviraon kautta, joten opettajahuoneen S210 tuloilmaa voidaan korottaa huonepellillä painetasapainon ylläpitämiseksi. Ovi on piirustuksen mukaan varustettu kynnyksellä eikä oveessa ole siirtoilmasäleikköä, joten oviraon riittävyys on varmistettava ja tarvittaessa asennettava oveen tai seinään siirtoilmasäleikkö. Poistoilmanvaihdosta huolehtiminen tulostinhuoneessa on erittäin suositeltavaa (ks. kohta 2.2.2 - Otsoni). Poistoilmamäärän nostaminen auttaa myös yllälämpenemisongelmaan, muttei poista sitä täysin.

9.2.4 S210 opettajien huone

Opettajahuoneen suurin yksittäinen ongelma on tiloja kesäaikaan lämmittävä kopiokone. Rakennusautomaatiojärjestelmän käyttöliittymästä puuttuu ilmanlaadun oloarvo -mittaus. Mittauspiste ei yhdistä tai sen osoite on väärä. Oletus mittauspisteen puuttumisesta on se, että ilmanlaatuarvoa ei käytetä järjestelmän säätöön. Huonelämpötilamittaus toimii, ja järjestelmä säätää ilmavirtasäätimiä sen perusteella. Ilmanlaadun oloarvo on korjattava käyttöliittymään, että järjestelmä säätyy myös VOC-pitoisuuden mukaan ja ilmanlaatu pysyy hyvänä.

9.2.5 M127 opettajien huone

Opettajien huoneen poistoilmavirran mittauspiste (IMS30.106) ei yhdistä tai mittauspisteen osoite on väärä. Mittauspisteeseen ei ole saanut yhteyttä moneen kuu-kauteen, vaikka ilmanlaatututkimuksen alkutaipaleella mittauspiste oli vielä toiminnassa (24.9.2012). Rakennusautomaation käyttöliittymän ja Super Wisen etäyh-teyden mukaan järjestelmä ohjaa poistoilmapellin täysin auki, koska tilavuusvirta-mittausta ei ole. Järjestelmän toimintaa ei ole varmistettu ilmamäärämittauksin tai painekokein. Mittauspisteen osoite tai yhdistysvirhe on korjattava rakennusauto-maatioon järjestelmän toiminnan varmistamiseksi.

9.2.6 M132 koneenrakennus

Tilan ongelmia tutkimuksen alussa olivat tilan yllämpeneminen ja hajuongelmat. Huonetilassa suoritetaan erilaisten koneiden ja laitteiden purkua ja kasausta ope-tus ja osaamisennäyttötöinä. Työstökohteista haihtuu jonkin verran öljypohjaisia kaasuja, jotka heikentävät nopeasti sisäilmalaatua. Ilmanlaatu koettiin olosuhde-päiväkirjan ja haastattelun perusteella paremmaksi läsnäolon aikana jonkin aikaa oppitunnin alusta laskettuna. Työstökohteiden luonteen eli hajuemissioiden vuoksi tilan poissaolo- ja minimi-läsnäoloilmamääriä nostettiin merkittävästi. Ilmavirrat alussa olivat 50 l/s ja 75 l/s, ja säädön jälkeen 150 l/s ja 300 l/s. Käyttäjien mukaan ilmanlaatu koheni hyvälle tasolle ja tilan yllämpeneminen väheni huomattavasti.

9.2.7 M133 ATK-luokka

Tilan ongelma on yllämpeneminen. Tilassa on yhteensä 15 kpl pöytämallisia tieto-koneita, mutta luokkatiloissa ei ole erillistä jäähdytystä. Luokan lämpötilan kohoami-nen on ongelmana enemmänkin kesäaikana, mutta huonelämpötila saattaa ko-hota myös lämmityskaudella 23 °C:seen. Luokan maksimi-ilmavirraksi on säädetty 232 l/s, mikä tarkoittaa tuloilman lämpötilan (18,5 °C) ja huonelämpötilan (23 °C) välillä lasketun ilmanvaihdon jäähdytystehon olevan 1,25 kW (kaava 6), mikä on aika nimellinen jäähdytysteho monien kilowattien lämpökuormalle. Huone on idän

puolella rakennusta, joten se kärsii myös auringon aiheuttamasta lämpökuormasta. Ilmanvaihdon jäähdytysteho kasvaa muiden tilojen ja ulkolämpötilan lämpenemisen myötä. Tuloilman maksimiarvolla 16 °C huonelämpötilan ollessa 23 °C ilmanvaihdon jäähdytysteho on 2 kW, ja samalla tuloilman lämpötilalla huonelämpötilan ollessa 25 °C ilmanvaihdon jäähdytysteho on 2,5 kW. Tilan ylikämmenemisen estämiseksi sinne on järjestettävä erillinen jäähdytys esimerkiksi puhallinkonvektoreilla. Toinen vartenotettava vaihtoehto on viedä tietokoneet tavalliseen luokkaan S215a - sähkötekniikan laboratorio, jossa on jo erillinen jäähdytys järjestettynä.

9.3 Havaintoja ilmanvaihtojärjestelmän toiminnasta ja käyttöliittymän tilasta

9.3.1 Käyttöliittymä

Mittausten alkaessa käyttöliittymästä uupui täysin ilmanlaatumittausten oloarvot sekä tavoitearvot. Swegonin Super Wise -yksikössä ilmanlaatuarvot ja tavoitearvot kuitenkin olivat, ja järjestelmä osasi ohjata ilmavirtoja myös ilmanlaadun oloarvojen perusteella. Ilmanlaadun oloarvot ja säätöarvot päivitettiin käyttöliittymään mitausjakson aikana, sen alkutaipaleella. Edelleen on kuitenkin arvoja, jotka eivät yhdistyshäiriön tai väärän osoitteen vuoksi näy käyttöliittymässä. Tärkeimmät puuttuvat arvot on lueteltu ongelmatilojen yhteydessä. Käyttöliittymän käytettävyyden parantamiseksi tulisi huonekohtaisten ilmavirtasäätimien tunnuksiin lisätä huonetunnukset. Käyttöliittymässä on muutama pelti, joilla ei ole huonetunnusta, ja häiriön sattuessa ilmavirtasäätimien sijainti on selvittelyn takana. Osa olevista huonetunnuksista on myös väärä. Kaksi ilmavirtasäädintä myös sijaitsee väärän huonetunnuksen alla. Itse jouduin turvautumaan ilmanvaihtosuunnitelmiin ilmavirtasäätimien sijainteja tutkiessani, muuten olisi jäänyt epäselväksi ilmavirtasäätimien sijainti.

9.3.2 Järjestelmän toiminta

Järjestelmä toimii pääosin suunnitellulla tavalla. Tarpeenmukainen ilmanvaihto ohjaa ilmamääriä käytön, huonelämpötilan ja ilmanlaadun mukaan. Käyntiajat mitausjaksolla kuitenkin hieman ihmetyttivät, koska ilmanvaihtokone TK03 käynnistyi kaikkien trendimittausten mukaan arkisin tuntia ennen varsinaisen käyntiluvan saamista. Lauantaisin ilmanvaihtokone toimi tarkasti aikaohjelman mukaisesti.

Paineiden optimointia tarkasteltiin TK03 ilmanvaihtokoneen vyöhykkeellä kaksi, jossa sähkötekniikan labra S115a pyysi lisää ilmaa kohonneen huonelämpötilan vuoksi ja sekä tulo- että poistopellit olivat 100-%:sesti auki. Maksimaalisesta avautumisestaan huolimatta tulo- ja poistoilmavirrat eivät saavuttaneet säädettyä maksimiarvoa 340 l/s, vaan tuloilmavirta jäi 203 l/s:aan ja poistoilmavirta 322 l/s:aan. Järjestelmä ei 1,5 tunnin aikana optimoinut vyöhykepeltiä eikä nostanut ilmanvaihtokoneen käyttöastetta. Saman ilmanvaihtokoneen järjestelmässä oli toinenkin pelti, luokan S117 pelti, joka oli 100-%:sesti auki. Luokan S117 poistoilmapelti kuitenkin saavutti maksimi-ilmamääränsä. Kyseiset ilmavirtasäätimet sijaitsevat eri vyöhykkeillä, mikä rajaa ongelman lähteen pois vyöhykkeen yksi vyöhykepelistä. Ongelma saattaisi johtua myös paineoptimoinnin väyläkaapelin kosketushäiriöstä.

10 Johtopäätökset

Opinnäytetyön tutkimustulokset osoittavat, että tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla voidaan toteuttaa energiaa säästävää, mutta hyvät sisäilmaolosuhteet takaava ilmanvaihto. Tilojen käyttäjätyytyväisyys oli korkea, ja sitä saatiin tutkimuksen tuloksena myös nostettua. Käyttäjätyytyväisyyttä varjostivat yksittäisten tilojen lämpötilaongelmat, mitkä osin johtuivat tilojen väärästä käytöstä ja osin mahdollisesti lämmitysjärjestelmän epäsäädöistä. Ongelmat sisäilmanlaadussa lankesivat ilmanvaihdon syyksi, koska yllämmennyt ilma koettiin tunkkaiseksi ja sen myötä ilmanvaihto riittämättömäksi. Yleisesti ilmanlaatua tarpeenmukaisen ilmanvaihdon palvelualueilla kiiteltiin, minkä puolesta myös mittaustulokset puhuvat.

Mittausjakson ajalle 87 onnistuneelle mittauspäivälle laskettu energiasäästö antaa käsityksen ilmanvaihdon tarpeenmukaisuuden tuomasta todellisesta säästöstä. Samalla mittausjakso antaa viitteitä myös vuosilaskennan paikkansapitävyydestä. Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän lämpö- ja sähköenergisäästökseen mittausajanjaksolla saatiin edellä mainitussa järjestyksessä 9980 kWh ja 6220 kWh. Prosentuaalisesti ilmanvaihdon tarpeenmukaisuus säästi 46,8 % lämpöenergiaa ja 72,8 % sähköenergiaa. Vaasan ammattiopiston vuoden 2012 keskimääräisillä hinnoilla (kaukolämpö 5,58 snt/kWh ja sähkö 11,66 snt/kWh) lämmitysenergiassa säästettiin 557 € ja sähköenergiassa 725 €. Laskelmissa kokeiltiin ottaa huomioon myös puhaltimen lämmitysvaikutus, joka oli tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla 0,6 Kelviniä ja vakioilmavirtaisella 1,2 Kelviniä, jolloin tarpeenmukaisen ja vakioilmavirtaisen järjestelmän lämmitysenergiakulutuksen ero kapeni huomattavasti. Vakioilmavirtaisen järjestelmän puhaltimen korkean lämmitysvaikutuksen vuoksi tarpeenmukaisen järjestelmän säästö oli 6300 kWh ja rahassa 353 €. Prosentuaalinen säästö oli 38,7 %, mikä on sekin korkea säästöprosentti.

Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän vuosienergiakulutus laskettiin mittausjakson keskimääräisten ilmavirtojen ja painehäviöiden perusteella. Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän lämpöenergisäästö oli 25400 kWh, mikä tarkoittaa rahassa 1420 €:n säästöä. Tarpeenmukaisuus säästi lämmityskustannuksissa lähes puolet, 49,4 %. Sähköenergisäästö oli laskelmien mukaan 18700 kWh, 2180 €. Sähkönsäästöprosentti oli varsin korkea myös vuositasolla, 72,1 %.

Yhteensä tarpeenmukaisella ilmanvaihtojärjestelmällä saavutettiin 3600 €:n säästö vuodessa verrattuna vakioilmavirtaiseen ilmanvaihtojärjestelmään. Tulokset osoittavat, että tarpeenmukainen ilmanvaihto soveltuu erinomaisesti kouluympäristöön koulujen vaihtelevan käyttöasteen vuoksi.

Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon takaisinmaksuaika laskettiin järjestelmän vuosikulutussäästön ja Swegonin tekemän tarjouksen perusteella. Järjestelmän takaisinmaksuajaksi saatiin yleinen inflaatio (3 %) ja energiamuotojen eskalaatiot (lämpö 2 %, sähkö 3 %) huomioituina seitsemän vuotta.

Tarpeenmukaisten ilmanvaihtojärjestelmien käyttöliittymässä havaittiin paljon virheitä, joista osa heikensi järjestelmän käytettävyyttä merkittävästi. Järjestelmä ei kaikilta osin myöskään näyttänyt toimivan suunnitellun tai järjestelmätoimintakuvaksen mukaisesti. Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän käyttöönottoon on varattava enemmän aikaa kuin kohteessa on käytetty.

11 Pohdinta

Työn alkuperäinen laajuus väheni huomattavasti rakennusautomaation käyttöliittymästä tehtyjen mittausten epäonnistuttua ilmanvaihtokoneilla TK01 ja TK05. Käyttöliittymästä oli mittauksen alla kaikki kohteen Wise-järjestelmäosat, ja juuri se saattoi aiheuttaa käyttöliittymän ylikuormittumisen ja tallennus- tai lukuvirheet trendimittaustiedostoihin. Kirjoitusvirheiden syytä ei kuitenkaan voi tietää varmasti, sillä kirjoitusvirheen alkaminen ja päättyminen ovat tapahtuneet itsestään. Kysymys on pitkästä yksittäisestä kirjoitusvirheestä, mikä tosin viittaisi ohjelmapohjaiseen virheeseen. Kaikkien ilmanvaihtokoneiden järjestelmien mittaus oli osittain mittausaineiston saannin varmistelua, että saataisiin edes joitain mittauksia kohteesta. Tutkimuksen perustuessa mittauksiin on hyvä mitata myös asioita, joita ei vielä tiedä tarvitsevana. Ilmanvaihtokoneen TK03 trendimittaukset onnistuivat hyvin yhden poistoilman vyöhykepellin tilavuusvirtamittauksen puuttumista lukuun ottamatta. Laskelmissa sähköenergiakulutuksen laskennassa käytetty ilmavirtojen suhteessa laskettu poistoilmavirta ei vaikuta tuloksiin merkittävästi, koska tuloilmavirta seuraa poistoilmavirtaa, ja toisinpäin; Wise-järjestelmän huonekohtaiset ilmavirtasäätimet toimivat isäntä-orja suhteessa.

Energiasäästölaskelmien tuloksiin vaikuttavat merkittävästi etenkin sähköenergielaskennassa käytetyt vakioilmavirtaisen ilmanvaihtokoneen puhaltimien kokonaispaineenkorotukset. Kohteen vastaanottotarkastuksen mittauspöytäkirjat olivat haun alla, mutta tietoja tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän painehäviöistä maksimi-ilmavirroilla, ei löytynyt. Tämä tieto olisi parantanut oleellisesti energiakulutuskalkelmien luotettavuutta. Energiasäästölaskelmissa ei ole otettu huomioon kesäajan jäähdytyskäyttöä. Kesäajan jäähdytys lisää jonkin verran ilmanvaihdon energiakulutusta, sillä vedenjäähdytyskone sekä vedenjäähdytyskoneen pumppuryhmä kuluttavat sähköä. Ilmanvaihtojärjestelmä itsessään kuluttaa myös enemmän sähköä kesäajan kasvaneen jäähdytystarpeen vuoksi: läsnäolon havaitessaan ilmanvaihto asettuu nopeasti maksimi-läsnäoloilmavirralle, mikäli huonelämpötila on ylärajalla tai lähellä sitä. Opinnäytetyön mittausajanjakso ei ulottunut kesäkuukausille asti, joten jäähdytyskäytöstä aiheutuvaa energiakulutusta ei voitu trenditulosteiden avulla tarkastella. Tarpeenmukainen ilmanvaihto säästää myös-

kin jäädytyskustannuksissa, joten jäädytysenergiakulutuksen säästötieto olisi ollut aivan mielenkiintoista laskea käytännön kulutustietojen pohjalta.

Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän takaisinmaksuaika oli laskelman mukaan todella lyhyt, vain seitsemän vuotta. Tämä siitä huolimatta, että laskelmat tehtiin hyvin maltillisilla korkokannoilla. Takaisinmaksuajan laskentatuloksessa on kuitenkin huomioitava, että investoinnin kuolettamiseen kuluva aika riippuu rakennuksen ja sen myötä ilmanvaihdon käyttöasteesta. Laskelman investointiin ei ole myöskään arvioitu kaikkia kuluja, kuten vaativamman suunnittelun, väyläkaapeloinnin, työlämmän asennuksen, kanavaosien tai korjausinvestointien tuomia lisäkustannuksia. Järjestelmän tuotto takaisinmaksuajan laskennassa käytetyillä korkokannoilla on 10 vuoden käytön jälkeen 17700 € ja 15 vuoden jälkeen 54400 €, jolloin viimeistään voisi kuvitella järjestelmästä aiheutuneiden lisäkustannusten olevan katettu. Tällaisen takaisinmaksuajan laskennan heikkoutena on kuitenkin korkolaskennan monet epävarmuustekijät sekä rakennuksen ajan saatossa mahdollisesti muuttuva käyttöaste. Oikeastaan vain yksi asia on varmaa: energian hinta ei tule laskemaan.

Ilmanvaihdon määrän terveysvaikutuksista on kiistelty niin pitkään, kun erillistä ilmanvaihtoa on tiloihin jouduttu järjestämään. Ilmamäärien kasvattamisen aiheuttamien terveyshyötyjen on todettu tutkimuksissa kasvavan aina arvoon 20–25 l/s henkeä kohden. Bakteeriperäisten tartuntojen aiheuttaman sairastuvuuden on todettu kasvavan merkittävästi ilmanvaihtomäärän ollessa alle 10 l/s henkilöä kohden toimistohuoneissa. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon aiheuttamien terveysriskien tutkimus on eittämättä uusi ja haastava tutkimusalue, joka saattaa myöhemmin määrittää uudestaan esimerkiksi minimi-ilmamääriä henkilöiden läsnä ollessa. Tarpeenmukainen ilmanvaihtojärjestelmä, etenkin helppokäyttöinen Swegon Wise on nopeasti muunnettavissa uusien määräysten mukaiseksi ilmapvirtamuutosten osalta.

LÄHTEET

- Energian hinnat. 20.3.2012. 4. Vuosineljännes 2011. [Verkkajulkaisu]. Helsinki: Tilastokeskus. [Viitattu 11.4.2013].
- Fläkt Woods Oy. ACON valintaohjelma Fläkt Woodsin ilmankäsittelykoneiden mitoittamiseen. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 31.3.2013]. Saatavana: <http://www.flaktwoods.fi/valintaohjelmat/acon/>. Vaatii käyttöoikeuden.
- Granlund Pohjanmaa Oy. 2010a. Vaasan ammattiopiston rakennusten sijainti.
- Granlund Pohjanmaa Oy. 2010b. LVI-laiteluettelo.
- Granlund Pohjanmaa Oy. 2010c. Järjestelmäkaavio.
- Granlund Pohjanmaa Oy. 2010d. Ilmanvaihtosuunnitelmat.
- Haahtela, T. Nordman, H. & Talikka, M. 1993. Sisäilma ja terveys. Toinen uudistettu painos. Loimaa: Allergialiitto.
- Karjalainen, L. 2012. Liiketalouden matematiikka. Toinen, uudistettu painos. Keuruu: Pii-Kirjat Ky.
- Koivuporras, M. 2013. Järjestelmän pääkäyttäjä. Vaasan Talotoimi: Vaasan kaupungin päävalvomo. Haastattelu 19.3.2013.
- Kulmala, E. 2011. LVI-lehtori. Opintokokonaisuus: ilmastointitekniikka. Muistiinpanot. Seinäjoki.
- Leander, T. 2012. Markkinointipäällikkö. Swegon. Sähköposti 18.4.2012.
- Lehtinen, J. 2013. Lisäilma ei paranna työtehoa. Rakennuslehti 47 (11), 8.
- Lindroos, H. 2013. Aluepäällikkö. Swegon. Sähköposti 10.4.2013.
- Mäki, T. 2013. Rakennusautomaation projektipäällikkö. Granlund Pohjanmaa Oy. Haastattelu 3.4.2013.
- Mäntylä, O. 2013. Toiminnanjohtaja. Vaasan ammattiopisto. Sähköposti 22.3.2013.
- RT RakMK-21360. 2007. D5 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehon tarpeen laskenta: Ohjeet 2007. Helsinki: Rakennustieto Oy.

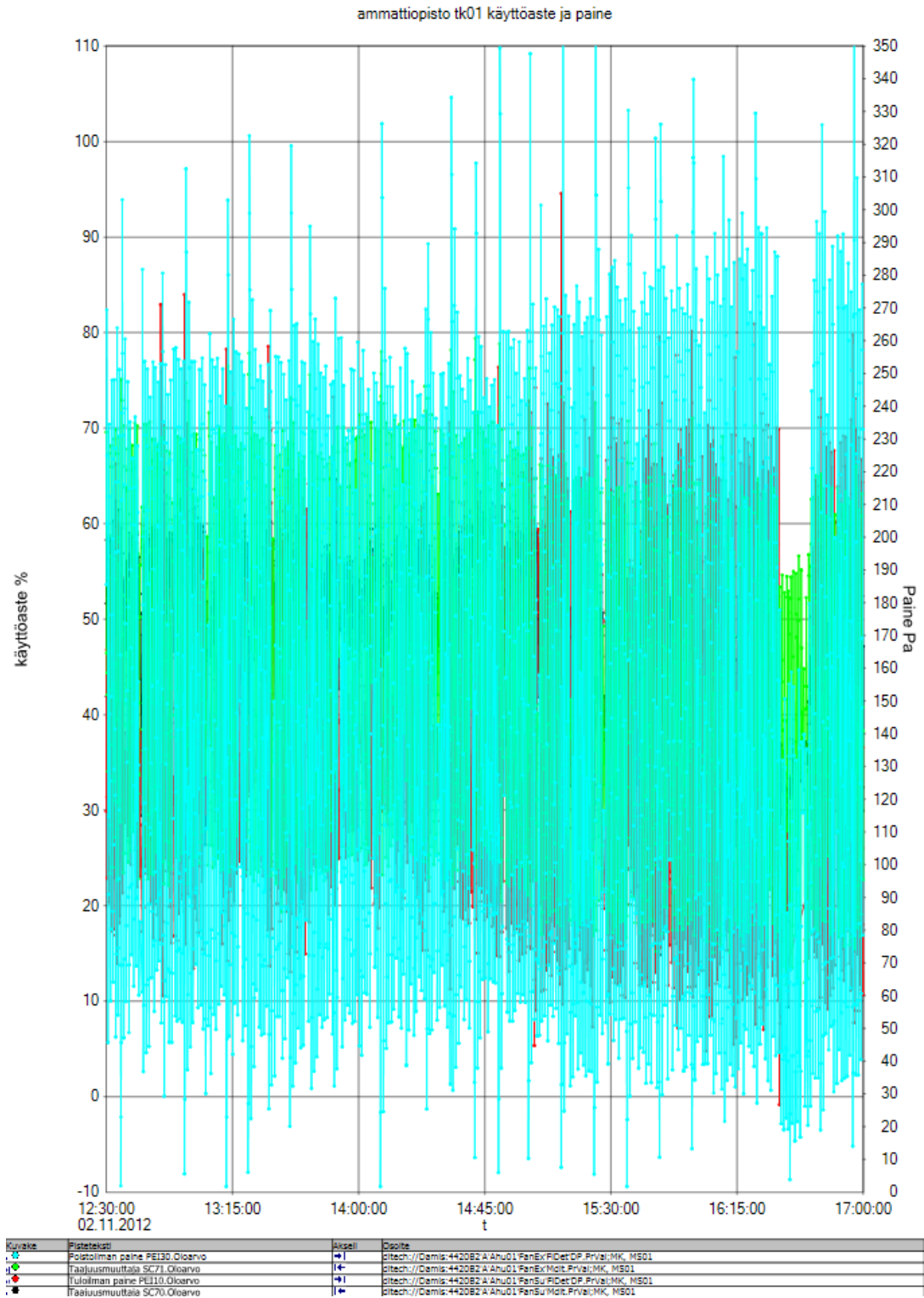
- RT RakMK-21503. 2011. D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto: Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- RT RakMK-21504. 2011. D3 Rakennusten energiatehokkuus: Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- RT 07-10946. 2009. Sisäilmastoluokitus 2008: Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- Seppänen, O. 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Lisäpainos. Espoo: Suomen LVI-yhdistysten liitto.
- Seppänen, O. 2001. Rakennusten lämmitys. 2. päivitetty painos. Jyväskylä: Suomen LVI-liitto Ry
- Seppänen, O & Fisk, WJ. 2002. Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers. *International Journal of Indoor Environment and Health*, (12): 98–112.
- Seppänen, O. 2004. Ilmastoinnin suunnittelu. Forssa: Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- Seuri M & Palomäki E. 2000. Haasteellinen sisäilma: Riskianalyysi sisäilmaongelmissa. Tampere:Rakennustieto Oy.
- Suksi, I. & Kytölä, A. (toim.) 2012. Ruostumatonta ammattitaitoa. [Verkkojulkaisu]. Vaasan ammattiopisto: Vuosikirja 2011–2012. [Viitattu 31.3.2013]. Saatavana: <http://www.vaasa.fi/graaafisetpalvelut/>
- Swegon AB. 2013a. [Verkkojulkaisu]. Järjestelmätuotteet Swegonin tarpeenmukaiseen ilmanvaihtojärjestelmään: Super WISE. [Viitattu 3.4.2013]. Saatavana: <http://www.swegon.com/fi/Tuotteet/>
- Swegon AB. 2013b. [Verkkojulkaisu]. Järjestelmätuotteet Swegonin tarpeenmukaiseen ilmanvaihtojärjestelmään: ADAPT Damper. [Viitattu 3.4.2013]. Saatavana: <http://www.swegon.com/fi/Tuotteet/>
- Tapojärvi, M. 2013. Energiainsinööri. Vaasan talotoimi. Sähköposti 4.4.2013.
- Vaasan ammattiopisto. 2013. [Verkkojulkaisu]. Kotiväelle. [Viitattu 31.3.2013]. Saatavana: <http://www.vao.fi/fi/kotivaelle>
- Vehviläinen, I. Pesola, A. Heljo, J. Vihola, J. Jääskeläinen, S. Kalenoja, H. Lahti, P. Mäkelä, K. & Ristimäki, M. 2010. Rakennetun ympäristön energiankäyttö ja kasvihuonekaasupäästöt. Helsinki: Suomen itsenäisyyden juhlarahasto. Energiaviisaan rakennetun ympäristön aika 2017. Sitran selvityksiä 39.

Viirimäki, J. 2013. Piirimyyjä. Fläkt Woods. Sähköposti 11.4.2013.

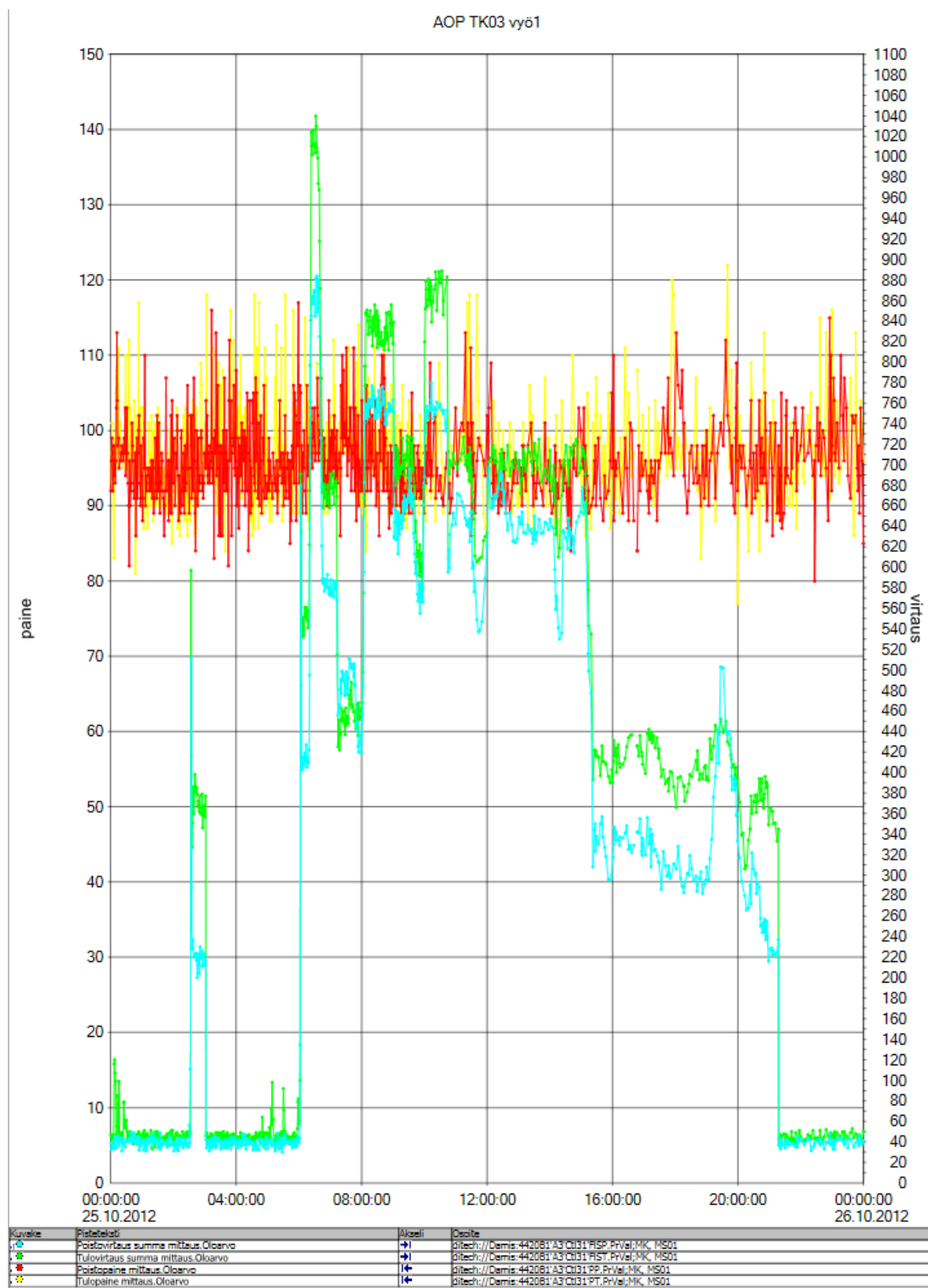
Ympäristöministeriön moniste 122. 2003. Helsinki. Asunto- ja rakennusosasto.
Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden tasauslaskennassa.

LIITTEET

Liite 1

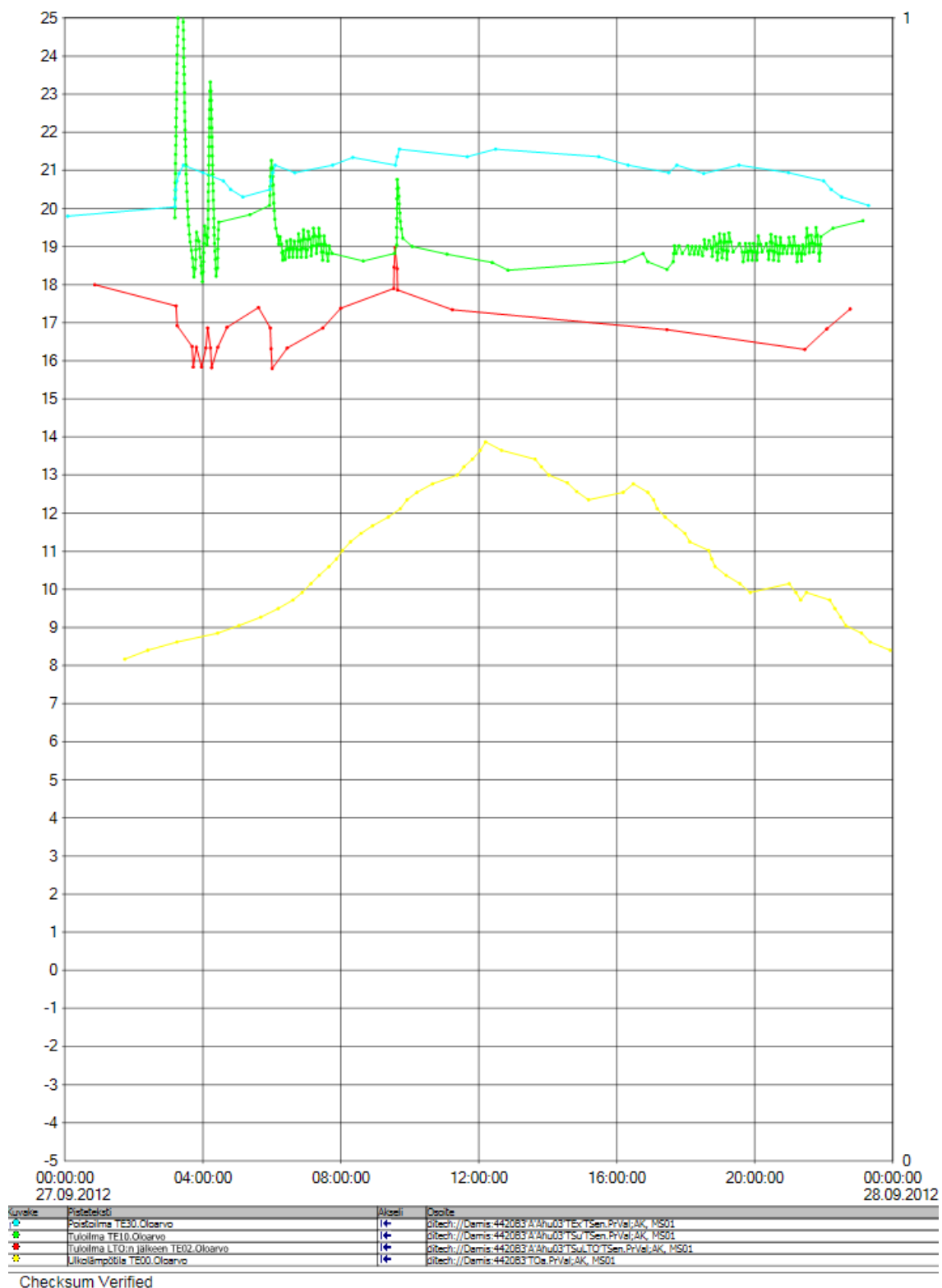


Liite 2



Liite 3

AOP TK03 lämpötilat



Liite 4

Opetustila _____



1 (4)

Olosuhdepäiväkirja

16.8.2012

Ole hyvä ja arvioi opetustilan ilmanlaatua alla olevan ohjeen mukaisesti.

- Merkitse opetustilassa olevien henkilöiden lukumäärä sarakkeelle Lkm.
- Merkitse nimikirjaimesi sarakkeelle Opettaja.
- Merkitse tuntemuksesi ilmanlaadusta Arvio-sarakkeille:
 - Arvio 1: Tuntemus ilmanlaadun raikkaudesta luokkahuoneeseen ensimmäistä kertaa saavuttaessa
 - Arvio 2: Tuntemus ilmanlaadun raikkaudesta välitunnin jälkeen luokkahuoneeseen saavuttaessa
 - Arvio 3: Tuntemus ilmanlaadun raikkaudesta oppitunnin/-tuntien päätyttyä.

Huomautus:

Arvio 2 -sarakkeelle ei tule merkintää, mikäli esimerkiksi kaksoistunti pidetään yhteen ilman välituntia. Saman opettajan jatkaessa opetusta tilassa eri ryhmän kanssa hän voi merkitä tuntemukset ilmanlaadusta uudelle riville.

Ilmanlaatua voit arvioida asteikolla 1-3 seuraavasti:

- 3=hyvä
- 2=kohtalainen, jonkin verran hajuja
- 1=huono, paljon hajuja ja vireystila selkeästi heikentynyt

Tärkeää:

Järjestelmän oikean toiminnan varmistamiseksi ja mittausten onnistumiseksi parhaalla mahdollisella tavalla tulee luokkahuoneiden ovien ja ikkunoiden olla aina suljettuina.

	Pvm	Klo-klo	Lkm	Opettaja	Arvio 1	Arvio 2	Arvio 3	Muuta kommentoitavaa
esim.	17.8.	9 - 11	15	JMK	3	2	2	kohonnut lämpötila