

Johanna Arola

Ilmastoinnin säätöstrategian vaikutus  
opetustilojen sisäilmasto-olosuhteisiin  
ja opetusrakennuksen energiankul-  
tukseen

Opinnäytetyö  
Talotekniikka


Lokakuu 2013




**MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU**

Mikkeli University of Applied Sciences

## KUVAILULEHTI

 <b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> <small>Mikkeli University of Applied Sciences</small>	<b>Opinnäytetyön päivämäärä</b>  9.10.2013				
<b>Tekijä(t)</b> Arola Johanna	<b>Koulutusohjelma ja suuntautuminen</b> Talotekniikka				
<b>Nimeke</b> Ilmastoinnin säätöstrategian vaikutus opetustilojen sisäilmasto-olosuhteisiin ja opetusrakennuksen energiankulutukseen					
<b>Tiivistelmä</b> Rakennuksissa käytetään energiaa mm. ilmanvaihtoon haluttaessa tuottaa käyttötilanteen vaatimat sisäilmasto-olosuhteet. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää erilaisten ilmastoinnin säätöstrategioiden vaikutuksia luokkatilan sisäilmasto-olosuhteisiin ja opetusrakennuksen energiankulutukseen. Tullevaisuudessa ilmanvaihdon energiankulutukseen tullaan kiinnittämään entistä enemmän huomiota, sillä energiankulutusta tulisi vähentää. Toisaalta tilojen sisäilmasto-olosuhteet halutaan pitää tavoitteiden mukaisina, jotta tilojen käyttäjät kokevat sisäilmasto-olosuhteet viihtyisinä ja työteho säilyy hyvänä.  Tarkastelun kohteena oli todellinen luokkatila, jossa käytettiin todellisia kuormituksia ja ilmanvaihdon käyttöaikoja. Luokkahuoneen simuloinnit tehtiin IDA ICE –simulointiohjelmalla. Simulointijaksona käytettiin teoreettista 1.9.2013-30.4.2014 välistä aikaa. Ilmanvaihdon osalta tutkittiin viittä erilaista säätöstrategiaa: vakioilmavirtailmanvaihto (CAV) jäädytyksellä ja ilman, tarpeenmukainen ilmanvaihto (VAV, DCV) läsnäolo-ohjauksella sekä tarpeen mukainen ilmanvaihto CO <sub>2</sub> - ja lämpötilaohjauksella. Jälkimmäisestä ohjaustavasta tehtiin kaksi erilaista simulaatiota kahdella erisuuruisella minimi-ilmamäärällä.  Työn tulosten perusteella voidaan todeta, että johtamalla oikea määrä ilmaa oikeaan paikkaan ja aikaan voidaan säästää huomattavia määriä energiaa. Käyttämällä tarpeenmukaista ilmanvaihtoa CO <sub>2</sub> - ja lämpötilaohjauksella voitiin energiaa säästää jopa 83 % vakioilmavirtailmanvaihtoon verrattuna. Tavoitellut sisäilmaolosuhteet voidaan koulurakennuksissa saavuttaa useissa tilanteissa huomattavasti mitoitusarvoja alhaisemmilla ilmamäärillä, sillä luokkahuoneiden kuormitukset ovat selvästi mitoituskuormituksia alhaisempia. Kokonaisuutena voidaan todeta, että tarpeenmukainen ilmanvaihto on toimiva ratkaisu silloin, kun kuormitukset vaihtelevat paljon ja tavoitellut sisäilmasto-olosuhteet halutaan silti saavuttaa energia- ja kustannustehokkaasti. Hyvän kokonaisuuden luominen vaatii huolellista ilmanvaihtojärjestelmän suunnittelua, toteutusta, käyttöä ja huoltoa sekä oikeanlaista sisäilmastotavoitteiden asettamista.					
<b>Asiasanat (avainsanat)</b> ilmanvaihto, energiatehokkuus, tarpeenmukainen ilmanvaihto, sisäilmasto					
<b>Sivumäärä</b> 41	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"><b>Kieli</b></td> <td style="width: 33%;"><b>URN</b></td> </tr> <tr> <td>Suomi</td> <td></td> </tr> </table>	<b>Kieli</b>	<b>URN</b>	Suomi	
<b>Kieli</b>	<b>URN</b>				
Suomi					
<b>Huomautus (huomautukset liitteistä)</b>					
<b>Ohjaavan opettajan nimi</b> Martti Veuro Aki Valkeapää	<b>Opinnäytetyön toimeksiantaja</b> Mikkelin ammattikorkeakoulu				

## DESCRIPTION

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>		<b>Date of the bachelor's thesis</b>  9 <sup>th</sup> of October 2013	
<b>Author(s)</b>  Johanna Arola		<b>Degree programme and option</b>  Building services	
<b>Name of the bachelor's thesis</b>  Ventilation control strategy and it's effect on a classroom's indoor climate and energy consumption in the school buildings			
<b>Abstract</b>  <p>Energy is used in buildings for example for ventilation to get the indoor air quality to a desired level. The target of this thesis was to find out how different ventilation control strategies effect indoor climate of the classroom and energy consumption in the school buildings. The use of energy should decrease in the future and that's why the energy used by ventilation should be paid attention to. The circumstances of indoor climate should however stay at a good level.</p> <p>In this thesis a real classroom with real use and ventilation was studied. Simulations were made by IDA ICE program. The period of simulation was theoretical time from 1.9.2013 to 30.4.2014. Five different kinds of ventilation strategy were used: constant air volume ventilation (CAV) with and without cooling, demand controlled ventilation (VAV, DCV) with control based on presence, demand controlled ventilation with the control based on CO<sub>2</sub>-level and temperature. The latter were simulated with two different minimum volume flows.</p> <p>Based on results it can be said that a significant amount of energy can be saved by leading the required volume flow to the correct place at a correct time. By using demand controlled ventilation with the control based on CO<sub>2</sub>-level and temperature it is possible to save energy up to 83 % compared to constant air volume ventilation. Demand controlled ventilation is a workable solution in the circumstances where the loads of classrooms vary a lot. And still it is possible to achieve the desired indoor climate level energy and cost efficiently. It demands careful designing, implementation, use and maintenance and also the right kind of goal setting to create a good ensemble.</p>			
<b>Subject headings, (keywords)</b>  ventilation, energy efficiency, demand controlled ventilation, indoor climate			
<b>Pages</b>  41	<b>Language</b>  Finnish	<b>URN</b>	
<b>Remarks, notes on appendices</b>			
<b>Tutor</b> Martti Veuro Aki Valkeapää		<b>Bachelor's thesis assigned by</b>  Mikkeli University of Applied Sciences	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	2
2	SISÄYMPÄRISTÖ JA SISÄILMASTO .....	3
3	ILMANVAIHTO .....	4
3.1	Vakioilmavirtailmanvaihto .....	4
3.2	Tarpeenmukainen ilmanvaihto .....	5
3.2.1	Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon säätöstrategia .....	5
3.2.2	Suunnittelussa huomioitavaa .....	7
3.2.3	Vaatimukset laitteistolle.....	7
3.3	Ilmanvaihto ja energiankulutus.....	8
3.4	Ilmanvaihdon merkitys työtehoon .....	10
3.5	Ilmanvaihdolle asetetut määräykset ja ohjeet .....	10
4	IDA ICE SIMULOINNIT .....	12
5	SIMULOINTIEN TULOKSET .....	16
5.1	Vakioilmavirtainen ilmanvaihto (CAV) ilman jäähdytyspatteria.....	16
5.2	Vakioilmavirtainen ilmanvaihto (CAV) jäähdytyspatterilla .....	17
5.3	Tarpeenmukainen ilmanvaihto (VAV) läsnäolo-ohjauksella .....	19
5.4	Tarpeenmukainen ilmanvaihto (VAV) CO <sub>2</sub> - ja lämpötilaohjauksella.....	20
5.5	Tarpeenmukainen ilmanvaihto (VAV) CO <sub>2</sub> - ja lämpötilaohjauksella, minimi-ilmavirta .....	22
6	TULOSTEN TARKASTELU .....	24
6.1	Vaikutukset luokkatilan lämpötilaan .....	24
6.2	Vaikutukset luokkatilan hiilidioksidipitoisuuteen .....	26
6.3	Vaikutukset tarvittavaan tuloilmavirtaan.....	28
6.4	Vaikutukset rakennuksen energiankulutukseen.....	29
6.5	Ilmanvaihdon energiansäästön taloudellinen vaikutus .....	31
7	YHTEENVETO .....	34
8	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	37
	LÄHTEET .....	39

## 1 JOHDANTO

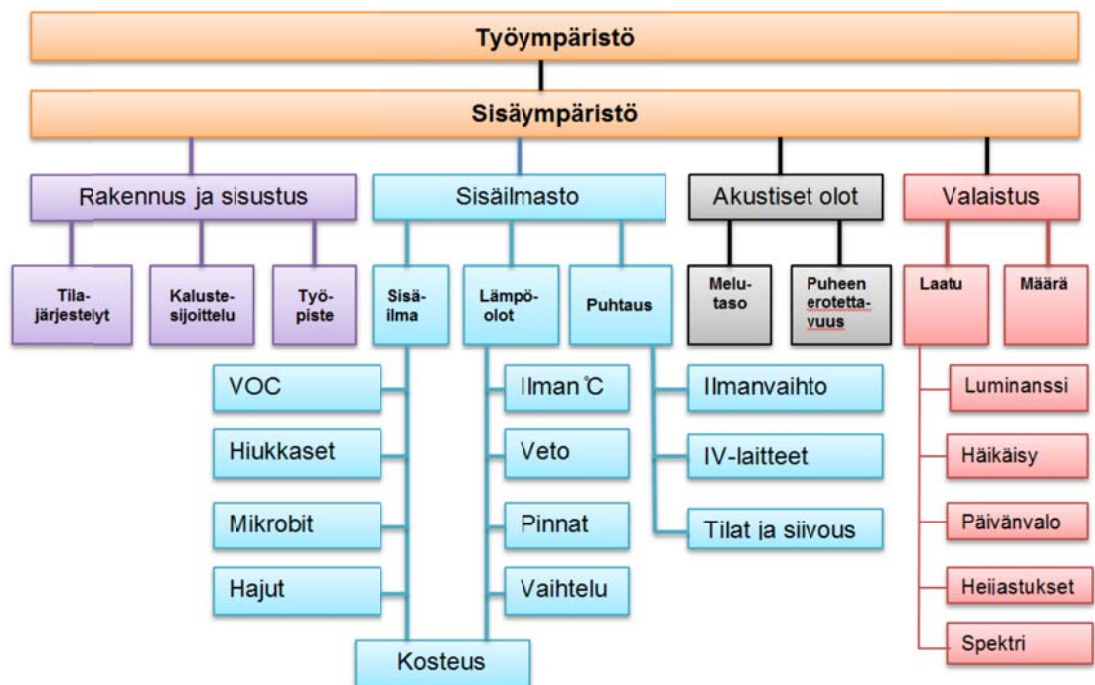
Rakennuksissa kulutetaan energiaa rakennuksen lämmitykseen, lämpimän käyttöveden tuottamiseen, valaistukseen, laitteisiin ja ilmanvaihtoon. Ilmanvaihdon tehtävä on halutun sisäilmaston tuottaminen. Säästettäessä ilmanvaihdon kuluttamaa energiaa on sisäilmaston olosuhteet otettava aina huomioon. Energiaa ei siis kannata säästää sisäilman laadusta tinkimällä, sillä huonon sisäilman kustannukset ovat vuosittain lähes 3 miljardia euroa eli enemmän kuin rakennusten lämmityskustannukset (Säteri 2013.)

Kun ilmanvaihdon kuluttamaa energiamäärää halutaan vähentää, on lähtökohtana se, että oikea määrä ilmaa johdetaan oikeaan paikkaan ja aikaan. Vakioilmavirtaisessa ilmanvaihdossa tilan ilmanvaihto toimii esimerkiksi aikaohjatusti eikä reagoi tilojen käyttökuormaan. Energiatehokkaita ratkaisuja saadaankin aikaan käyttämällä ilmanvaihtoa, joka säätyy tarpeen mukaan. Tarpeenmukainen ilmanvaihto toimii esimerkiksi läsnäolo-ohjauksella eli ilmanvaihdon toiminta tehostuu, kun tilassa on henkilöitä ja laskee pienemmälle teholle, kun tilassa ei ole kuormaa. Muita ohjaustapoja ovat mm. lämpötila ja CO<sub>2</sub>-pitoisuus. Ilmanvaihdon vuosittaisesta energiankulutuksesta lämmöntalteenoton osuus on noin 64 %, lämmityksen 19 % ja sähkönkulutuksen 17 % (Koroleva 2012). Ilmanvaihdon tarpeenmukaisuudella voidaan vaikuttaa ilmanvaihdon sähkö- ja lämpöenergiankulutukseen, sillä tiloihin puhalletaan vain tarvittava ilmamäärä ja siten myös vain tarvittava ilmamäärä tarvitsee lämmittää ja siirtää.

Tämän työn tavoitteena on selvittää erilaisten ilmastoinnin säätöstrategioiden vaikutuksia luokkatilan sisäilmasto-olosuhteisiin ja rakennuksen energiankulutukseen. Tarkastelun kohteena on todellinen luokkatila, jossa käytettiin todellisia kuormituksia ja ilmanvaihdon käyttöaikoja. Ilmanvaihtojärjestelmänä käytettiin koneellista tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmää lämmöntalteenotolla. Tuloksissa on keskitytty lämmitys- ja sähköenergian kulutuksiin eikä lämmöntalteenottoon ole otettu kantaa. Luokkahuoneen simuloinnit tehtiin IDA ICE –simulointiohjelmalla. Simulointijaksona on käytetty 1.9.2013 - 30.4.2014 välistä aikaa.

## 2 SISÄYMPÄRISTÖ JA SISÄILMASTO

Ihmiset viettävät suurimman osan ajastaan sisätiloissa, joten sisäympäristöllä on merkittävä vaikutus ihmisten hyvinvointiin. Laadukas ja tarpeen mukainen sisäympäristö edistää omalta osaltaan tilan käyttäjien hyvinvointia ja sitä kautta tuottavuutta. Sisäympäristö koostuu monista eri osatekijöistä, kuten ilmanlaadusta ja lämpöolosuhteista sekä valaistus- ja ääniolosuhteista. Sisäympäristö on kokonaisuus, jota voidaan pitää laadukkaana silloin, kun edellä mainitut sisäympäristötekijät ovat kunnossa ja tilan käyttäjät kokevat sisäympäristön hyväksi. Kuvassa 1 on esitetty sisäympäristöön kuuluvia tekijöitä. (Työterveyslaitos 2005.)



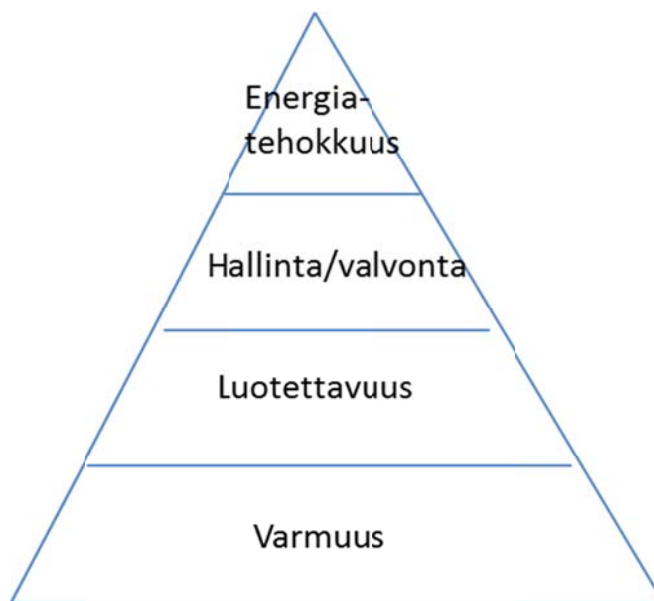
**KUVA 1. Sisäympäristöön vaikuttavat tekijät (Seppänen ym. 2004)**

Sisäympäristön yksi osatekijä on sisäilmasto. Sisäilmasto on kokonaisuus, johon vaikuttavat tilojen sisäilma, lämpöolosuhteet sekä puhtaus. Sisäilmastoon voidaan vaikuttaa mm. ilmanvaihdolla. (Seppänen ym. 2004.)

### 3 ILMANVAIHTO

Ilmanvaihtojärjestelmän tehtävä on luoda sisätiloihin puhdas ja lämpöolosuhteiltaan viihtyisä sisäilma (Seppänen 2004). Ilmanvaihdon suunnittelussa on otettava huomioon monta eri tekijää, joita on kuvattu kuvassa 2.

Varmuudella tarkoitetaan laitteiden toimintavarmuutta eli lähtökohtana on aina suunnitella toimintavarma järjestelmä. Ilmanvaihtojärjestelmän luotettavuudella tarkoitetaan järjestelmän vakautta ja sitä, että järjestelmä toimii vaadituissa olosuhteissa. Hallinnalla/valvonnalla tarkoitetaan mm. järjestelmän osien soveltuvuutta haluttujen ominaisuuksien, kuten lämpötilan, mittaamiseen. Kaikki edellä mainitut ominaisuudet tulisi toteuttaa mahdollisimman energiatehokkaasti. (Mysen 2005.)



**KUVA 2. Ilmanvaihdon suunnittelussa huomioitavat asiat (Mysen 2005)**

#### 3.1 Vakioilmavirtailmanvaihto

Vakioilmavirtailmanvaihto (Constant Air Volume Ventilation, CAV) on järjestelmä, jossa ilmavirrat pysyvät vakiona käyttöaikana (Seppänen 2004). Järjestelmä toimii on/off- tai min/max -periaatteella eli toiminta on yksi- tai kaksipuolainen. Järjestelmän käyttö voi tapahtua esimerkiksi manuaalisesti (on/off) tai ajastetusti. (Fahlén 2010.)

Käytettäessä vakioilmavirtailmanvaihtoa järjestelmä mitoitetaan huonetilojen käytön mukaan, esimerkiksi henkilöperusteisesti. Vakioilmavirtailmanvaihtojärjestelmä on perusjärjestelmä, joka on edullinen ja moneen käyttökohteeseen soveltuva. Se soveltuu hyvin tiloihin, joiden käyttötarkoitus pysyy samana ja kuormitus on tasaista. Järjestelmän haittapuoliksi voidaan katsoa se, että järjestelmä ei reagoi tiloissa tapahtuviin kuormitusten muutoksiin ja siten ilmanvaihto voi ajoittain olla joko liian pientä tai suurta. Tarpeettomasta ilmanvaihdosta seuraa tarpeeton energian kulutus. (Seppänen 2004.)

### **3.2 Tarpeenmukainen ilmanvaihto**

Haluttaessa ilmanvaihdolta mahdollisuutta huonekohtaiseen säätöön voidaan käyttää ilmanvaihtoa, jossa ilmavirtaa voidaan muuttaa (Seppänen 2004). Järjestelmä voi olla muuttuvailmavirtajärjestelmä (Variable Air Volume Ventilation, VAV), jossa ilmavirran säätö on vähintään kolmiportainen tai säätö on jatkuvaa. Jos muuttuvailmavirtajärjestelmään lisätään automaattinen säätö tarpeen mukaan, on kyse tarpeenmukaisesta ilmanvaihtojärjestelmästä (Demand Controlled Ventilation, DCV). (Fahlén 2010.)

Kuten ilmanvaihdolla yleensä, niin myös tarpeenmukaisen ilmanvaihdon tavoitteena on tuottaa hyvä sisäilmasto, jossa ilmanlaatu, lämpötilaolosuhteet ja akustinen ympäristö on otettu huomioon. Edellä mainitut asiat tulisi saavuttaa kustannustehokkaasti ja energiankulutuksen tulisi olla vähäistä. (Maripuu 2011.)

#### **3.2.1 Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon säätöstrategia**

Tarpeenmukaista ilmanvaihtoa voidaan ohjata eri tavoilla ja sen vuoksi se sopii hyvin tiloihin, joiden kuormitus vaihtelee suuresti eri käyttötilanteissa. Säätöä ohjaavana parametrina voi olla esimerkiksi lämpötila, hiilidioksidipitoisuus, kosteuspitoisuus, läsnäolo tai jokin edellä mainittujen yhdistelmä. (Seppänen 2004.)

Käytettäessä ohjaustapana läsnäoloa henkilötunnistin ohjaa ilmanvaihtoa vähimmäis- ja enimmäisilmavirtojen välillä siten, että käytössä on joko vähimmäis- tai enimmäisilmamäärä riippuen siitä, onko tilassa käyttäjiä vai ei. Ohjaustavan hyväksi puoleksi voidaan katsoa se, että se estää tarpeettoman ilmanvaihdon tiloissa silloin, kun



tila on tyhjillään. Toisaalta järjestelmä ei tunnista tilan käyttäjien lukumäärää eli maksimi-ilmavirta on käytössä heti, kun järjestelmä tunnistaa tilassa yhdenkin käyttäjän. (LVI 30-40008 1991.)

Tapauksissa, joissa ilmanvaihdon ohjaustapana käytetään lämpötilaa, huoneen ilmavirta säätyy portaattomasti vähimmäis- ja enimmäisarvojen välillä kulloinkin vallitsevan lämpötilan perusteella. Ohjaustavan hyväksi puoleksi voidaan lukea se, että järjestelmä osaa säätää ilmamäärää portaattomasti olemassa olevan kuormituksen mukaan, jolloin vältetään turha ilmanvaihto ja sitä kautta turha energian käyttö. Tilan lämpötilaa mitataan tarkoitukseen soveltuvalla anturilla, joka lähettää tiedon lämpötilasta ilmavirran säätimelle. (LVI 30-40008 1991.)

Ohjaustapana voidaan käyttää myös hiilidioksidipitoisuutta (CO<sub>2</sub>). Hiilidioksidipitoisuus sopii hyvin ohjaustavaksi tiloihin, joissa henkilökuormituksen vaihtelu on suurta, sillä hiilidioksidipitoisuus kasvaa kuormituksen kasvaessa. Säädettyä ilmamäärää portaattomasti vähimmäis- ja enimmäisilmavirtojen välillä perustuen tilassa vallitsevaan hiilidioksidipitoisuuteen saadaan tilaan luotua jatkuvasti CO<sub>2</sub>-pitoisuudeltaan tavoiteltu sisäilma energiatehokkaasti. Hiilidioksidipitoisuutta voidaan mitata joko huonetilasta tai ilmanvaihtokanavasta poistoilmasta. Huonetilamittaus on luotettava, silloin kun anturi asennetaan oleskeluvyöhykkeelle sellaiseen paikkaan, jossa häiriötekijöitä (suora uloshengitysilmä, ikkuna- ja oviaukot, ilmanvaihdon tulo- ja poistoilman päätelaitteet) on mahdollisimman vähän. (Vaisala 2010.)

Aikaisemmat tutkimukset osoittavat, että toimisto- ja koulurakennusten useat huonetiilat eivät ole juuri koskaan käytössä samanaikaisesti. Myös läsnäolossa on suuria eroja ja on harvinaista, että kaikissa huonetiloissa olisi samanaikaisesti täysi kuormitus. Tutkimusten mukaan toimistorakennuksissa noin 50 %:ssa huoneita on käyttäjiä samanaikaisesti. Koulurakennuksissa on läsnäolijoita tutkimusten mukaan keskimäärin 30 % mitoitettusta arvosta. (Maripuu 2009.) Törnblomin (2013) tutkimuksessa oli selvitetty Metropolia ammattikorkeakoulun Myyrmäen kampuksen luokkien käyttöprofiilia. Laskennassa oli käytetty toteutuneita tilojen varausasteita ja arvioituja, kokemusperäisiä käyttäjämääriä. Tulosten mukaan luokkien käyttöaste oli päivisin keskimäärin 30 % ja iltaisin keskimäärin 22 %. Koska mm. koulurakennuksissa tilojen kuormitukset vaihtelevat paljon ja poikkeavat mitoitusolosuhteista, on tarpeenmukai-

sen ilmanvaihdon käyttö perusteltua energian kulutuksen kannalta. Mitä suurempi on vaihtelu minimi- ja maksimikuorman välillä, sitä enemmän tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla voidaan säästää sähkö- ja lämpöenergiaa. (Maripuu 2009.)

### **3.2.2 Suunnittelussa huomioitavaa**

Tarpeenmukaisia ilmanvaihtojärjestelmiä on ollut käytössä noin 30 vuoden ajan, mutta niiden käyttö ei ole ollut yleistä, niistä saatujen huonojen kokemusten johdosta. Yleensä ongelmia on ollut huonossa sisäilmastossa sekä laitteiden toiminnassa. Ongelmat ovat usein johtuneet vääränlaisten osien käytöstä sekä suunnittelun puutteista. Järjestelmissä on esiintynyt usein melu- ja veto-ongelmia sekä ali- tai ylijäähdystä. Joitakin ongelmia on ollut myös ilmavirtaa säätelevien antureiden toiminnassa. (Maripuu 2011.)

Viimeisen kymmenen vuoden aikana tarpeenmukaiset ilmanvaihtojärjestelmät ovat kehittyneet ja nykyisin on olemassa olevien järjestelmän osien ja teknologian ansiosta mahdollista toteuttaa kustannustehokas ja hyvin toimiva tarpeenmukainen ilmanvaihto (Maripuu 2011).

### **3.2.3 Vaatimukset laitteistolle**

Tarpeenmukainen ilmanvaihto asettaa joitakin vaatimuksia käytettäville laitteille (Maripuu 2011). Tarpeenmukaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä ilmavirran joustavuus tulee huomioida mm. tulo- ja poistoilmalaitteiden sekä ilmavirran säätimien valinnassa. Edellä mainitut järjestelmän osat tulee olla toiminta-alueeltaan riittävän laajoja. (Seppänen 2004.) Tuloilman päätelaitteiden tulee myös olla suunniteltu käytettäväksi alhaisilla lämpötiloilla, jotta tuloilman lämpötila voidaan pitää noin + 15-16 °C:ssa ilman vetoriskiä. Tyypillisesti vakioilmavirtaisessa järjestelmässä tuloilman päätelaitteet on suunniteltu noin + 19 °C:een lämpötilalle, joten ne eivät sovellu käytettäväksi tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa. (Maripuu 2011.) Tuloilman päätelaitteiden valinnassa tulee lisäksi huomioida päätelaitteen heittokuvio erisuuruksilla ilmavirroilla, jotta ei pääse syntymään tilannetta, jossa tuloilma putoaa suoraan oleskeluvyöhykkeelle ja aiheuttaa veto-ongelmia. (Seppänen 2004.)

Tarpeenmukainen ilmanvaihto asettaa vaatimuksia myös ilmanvaihtokanavistoille ja puhaltimille. Kanavissa kulkeva ilmavirta vaihtelee ja ilman lämpötila on alhainen. Kanavistot tulee olla eristettyjä, jotta viileä tuloilma ei lämpene kanavistoissa. Puhaltimien tulee toimia laajalla ilmamääräalueella verrattaessa vakioilmavirtaiseen järjestelmään. Jos puhaltimen toiminta-alueita ei oteta suunnittelussa huomioon, saattaa esiintyä ääniongelmia ja puhaltimet eivät myöskään toimi energiatehokkaasti. (Maripuu 2011.)

Tarpeenmukainen ilmanvaihto asettaa haasteita myös anturitekniikalle. Valittu säätöstrategia määrittelee sen, millaisia suureita antureilla halutaan mitata. Mitattavien ominaisuuksien määrittäminen ei aina ole helppoa, sillä esimerkiksi ilmanlaatua voidaan seurata useiden parametrien avulla. Kaikkien parametrien mittaaminen ei myöskään ole helppoa. Esimerkiksi hiilidioksidin mittaaminen on kohtalaisen helppoa, mutta jos ilmanvaihtoa säätäväksi parametriksi valitaan esimerkiksi haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC), ei mittaaminen olekaan enää niin yksinkertaista. Löydettyessä oikea anturi valitun parametrin mittaamiseen täytyy anturin vielä olla yhteensopiva järjestelmään ja se täytyy sijoittaa oikein. Jos mikä tahansa edellä mainituista asioista ei ole kunnossa, tarpeenmukainen ilmanvaihto ei toimi halutulla tavalla. (Maripuu 2011.)

### **3.3 Ilmanvaihto ja energiankulutus**

Rakennusten energiankulutuksesta suurin osa kuluu halutun sisäilmaston tuottamiseen. Tämän vuoksi sisäilmaston tavoitetasot tulee asettaa oikein ja ilmanvaihto tulee toteuttaa energiatehokkaasti, eli johdetaan oikea määrä ilmaa oikeaan aikaan ja paikkaan. Toisaalta energiaa ei kannata säästää tinkimällä sisäilmastosta, sillä huonon sisäilman kustannukset ovat vuosittain lähes 3 miljardia euroa, eli enemmän kuin rakennusten lämmityskustannukset. Suomessa riittämätön ilmanvaihto aiheuttaa käyttäjille terveysongelmia yli miljoonassa asunnossa. Energiatehokkaita ratkaisuja saadaan aikaan hyödyntämällä tarpeenmukaista ilmanvaihtoa. (Säteri 2013.)

Ilmanvaihdon energiankulutus koostuu sähkö- ja lämpöenergiasta. Sähköenergiaa kuluu puhaltimien toimintaan ja lämpöenergiaa tuloilman lämmittämiseen. Nykyisin käytetyissä koneellisissa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmissä poistoilmasta otetaan

lämpöä talteen ja siirretään se tuloilmaan (lämmöntalteenotto, LTO). Lämmöntalteenotolla ei saada kaikissa tilanteissa tuloilman lämpötilaa halutuksi, vaan sitä täytyy lämmittää lisää joko sähköllä tai lämpimällä vedellä esimerkiksi kaukolämpökohteissa. Korolevan (2012) tekemässä tutkimuksessa selvitettiin ilmanvaihdon lämmöntalteenoton hyötysuhdetta. Tulokset osoittivat, että ilmanvaihdon vuosittaisesta energiankulutuksesta lämmöntalteenoton osuus on noin 64 %, lämmityksen osuus noin 19 % ja sähkön kulutuksen osuus noin 17 %. Tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa järjestelmän ilmavirta on aina tarvetta vastaava. Koska ilmavirtoja voidaan pienentää, tarvitaan vähemmän energiaa puhaltimien toimintaan sekä tuloilman lämmitykseen ja jäädytykseen. (Maripuu 2011.)

Mysenin tekemässä tutkimuksessa (Mysen 2005) tutkittiin 81 alakoulun 157 koululuokkaa Norjassa. Luokkien käytön aikana luokissa oli keskimäärin 74 % oppilaista paikalla verrattaessa suunnitteluarvoihin. Luokkia käytettiin päivittäin neljän tunnin ajan. Käytettäessä luokkatiloissa tarpeenmukaista ilmanvaihtoa CO<sub>2</sub>-ohjauksella, ilmavirrat vähenivät 43 % ja energiankulutus 38 % verrattaessa vakioilmavirtaiseen järjestelmään, joka toimi täydellä ilmavirralla 7-17 välisenä aikana. Kun tarpeenmukaisen ilmanvaihdon ohjaus toteutettiin lämpötilaohjauksella, vähenivät ilmavirrat 54 % ja energiankulutus 51 %. Persilyn ym. tutkimuksen mukaan (Persily ym. 2003) tarpeenmukainen ilmanvaihto CO<sub>2</sub>-ohjauksella vähentää luentosalin ilmanvaihtoon käytettävää energiaa 50-75 % verrattuna vakioilmavirtaisen ilmanvaihtojärjestelmän käyttöön.

Törnblomin (2013) tutkimuksessa on selvitetty tarpeenmukaisen ilmanvaihdon lisäämisellä saavutettavissa olevia säästöjä luokahuoneiden energian kulutuksissa. Tutkimuksen kohteena on ollut koulurakennus, jossa osa vakioilmavirtajärjestelmästä oli muutettu tarpeenmukaiseksi. Energian säästö oli ollut puhaltimien kuluttaman sähköenergian osalta 66 % ja lämmitysenergian osalta 57 %. Tutkimuksessa oli myös laskettu investointikustannukset pilottiluokkien toteutuneiden kustannusten perusteella ja verrattu sitä energian kulutuksen vähenemisestä saavutettuihin säästöihin. Tulosten perusteella investoinnin takaisinmaksuaika oli 21 vuotta.

Myös monissa muissa tutkimuksissa todetaan, että tarpeenmukainen ilmanvaihto säästää energiaa ja sitä kautta rahaa verrattuna vakioilmavirtaiseen ilmanvaihtoon.

Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon on todettu eri tutkimusten mukaan vähentävän energiankulutusta noin 50-75 % vakioilmavirtajärjestelmään verrattuna. (Mysen 2005.)

### 3.4 Ilmanvaihdon merkitys työtehoon

Työterveyslaitos on tutkimuksissaan (Hägglom ym. 2011; Maula ym. 2013) selvittänyt eri sisäilmastotekijöiden vaikutusta työtehoon, viihtyvyyteen ja tilojen käyttäjien kokemiin oireisiin. Hägglomin ym. (2011) tutkimuksessa selvitettiin lämpötilan vaikutusta työsuoriutumiseen 21 °C, 25 °C ja 29 °C lämpötiloissa laboratorio-olosuhteissa. Korkein lämpötila koettiin kahta muuta huonommaksi, mutta alhaisemmissa lämpötiloissa koehenkilöt eivät kokeneet eroja olosuhteiden hyväksyttävyydessä. Tulokset osoittivat, että miehet olivat tyytyväisimpiä 21 °C:n lämpötilaan ja naiset 25 °C:n lämpötilaan, vaikka vaatetus ja aktiivisuustaso olivat samanlaiset.

Maulan ym. tutkimuksessa selvitettiin ilmanvaihdon vaikutusta työstä suoriutumiseen, viihtyvyyteen ja koettuihin oireisiin käyttämällä pientä (2 l/s/hlö, 2 300 ppm) ja suurta (28 l/s/hlö, 650 ppm) ilmanvaihtoa. Tutkimuksen aikana lämpötila pidettiin lähes vakiona, noin 23,5 °C:sta. Koehenkilöiden altistusaika kulloinkin vallitseville olosuhteille oli 4 tuntia. Tulokset osoittivat, että lämpötilan ollessa sopiva ilmanvaihdon pienentäminen tutkimuksessa käytettävälle tasolle ei aiheuttanut merkittävää haittaa ihmisten työsuoriutumiselle tai viihtyvyydelle. Pieni ilmanvaihto koettiin alussa tunkkaisempaan kuin suurempi ilmanvaihto, mutta ero hävisi nopeasti tottumisen myötä. Koehenkilöt kokivat vain pieniä vaikutuksia koettuun energiatasoon ja motivaatioon. (Maula ym. 2013.)

### 3.5 Ilmanvaihdolle asetetut määräykset ja ohjeet

Ilmanvaihdolla on suuri vaikutus rakennuksen energiankulutukseen ja energiankulutusta minimoitaessa käytetään mahdollisimman alhaisia ilmamääriä eli käytännössä niitä, jotka ovat määräysten mukaan sallittuja. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto asettaa määräykset ilmanvaihdolle sekä antaa ohjeita ilmavirtojen suuruuksista. Määräyksissä todetaan, että ” *Huonetilassa tulee olla ilmanvaihto, jolla käyttöaikana taataan terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilman laatu*”, ” *oleskelutiloihin on käyttöaikana johdettava terveellisen,*

*turvallisen ja viihtyisän sisäilman laadun takaava ulkoilmavirta” ja ”ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirtoja on voitava ohjata kuormituksen ja ilman laadun mukaan käyttötilannetta vastaavasti”. (Suomen rakentamismääräyskokoelma osa D2 2012.)*

Määräysten lisäksi D2 antaa seuraavat ohjeet ilmavirtoihin liittyen. Opetustiloissa ulkoilmavirran ohjearvo käyttöaikana on  $6 \text{ dm}^3/\text{s}/\text{hlö}$ . ”Yleensä ulkoilmavirta tulee kuitenkin olla vähintään  $(0,35 \text{ dm}^3/\text{s})/\text{m}^2$ , joka vastaa ilmanvaihtokerrointa 0,5 1/h huoneessa, jonka vapaa korkeus on 2,5 m”. Lisäksi ”muun kuin asuinrakennuksen ilmanvaihto suunnitellaan ja rakennetaan siten, että käyttöajan ulkopuolella rakennuksen ulkoilmavirta on vähintään  $0,15 \text{ dm}^3/\text{s}/\text{m}^2$ , joka vastaa ilmanvaihtokerrointa 0,2 1/h huoneessa, jonka vapaa korkeus on 2,5 m”. (Suomen rakentamismääräyskokoelma osa D2 2012.)

Rakennusten lämpöoloista D2 määrää seuraavasti: ”Rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, että oleskeluvyöhykkeen viihtyisä huonelämpötila voidaan ylläpitää käyttöaikana niin, ettei energiaa käytetä tarpeettomasti.” Ohjeistuksissa todetaan, että ”Oleskeluvyöhykkeen huonelämpötilan lämmityskauden suunnitteluarvona käytetään yleensä lämpötilaa  $21^\circ\text{C}$ .” ja ”Rakennuksen käyttöaikana ei oleskeluvyöhykkeen lämpötila yleensä saa olla korkeampi kuin  $25^\circ\text{C}$ .” (Suomen rakentamismääräyskokoelma osa D2 2012.)

D2 antaa määräyksiä ja ohjeita myös rakennusten ilmanlaadulle. Määräyksessä todetaan, että ”Rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, että sisäilmassa ei esiinny terveydelle haitallisessa määrin kaasuja, hiukkasia tai mikrobeja eikä viihtyisyyttä alentavia hajuja.” Hiilidioksidipitoisuudelle on annettu ohje, jonka mukaan sisäilman hiilidioksidipitoisuus saa tavanomaisissa sääolosuhteissa ja huonetilan käyttöaikana olla yleensä enintään 1 200 ppm. (Suomen rakentamismääräyskokoelma osa D2 2012.)

Rakennusten sisäilmastoa koskevia ohjeistuksia on Suomen rakennusmääräyskokoelman lisäksi myös Sisäilmastoluokituksessa, jossa on esitetty sisäympäristön tavoitearvoja, suunnitteluohjeita ja tuotevaatimuksia. Sisäilmastoluokitusta ja siinä asetettuja tavoitearvoja voidaan käyttää, kun rakennuksesta halutaan rakentaa entistä terveellisempi ja viihtyisämpi. Sisäilmastoluokituksessa on kolme sisäilmastoluokkaa S1, S2

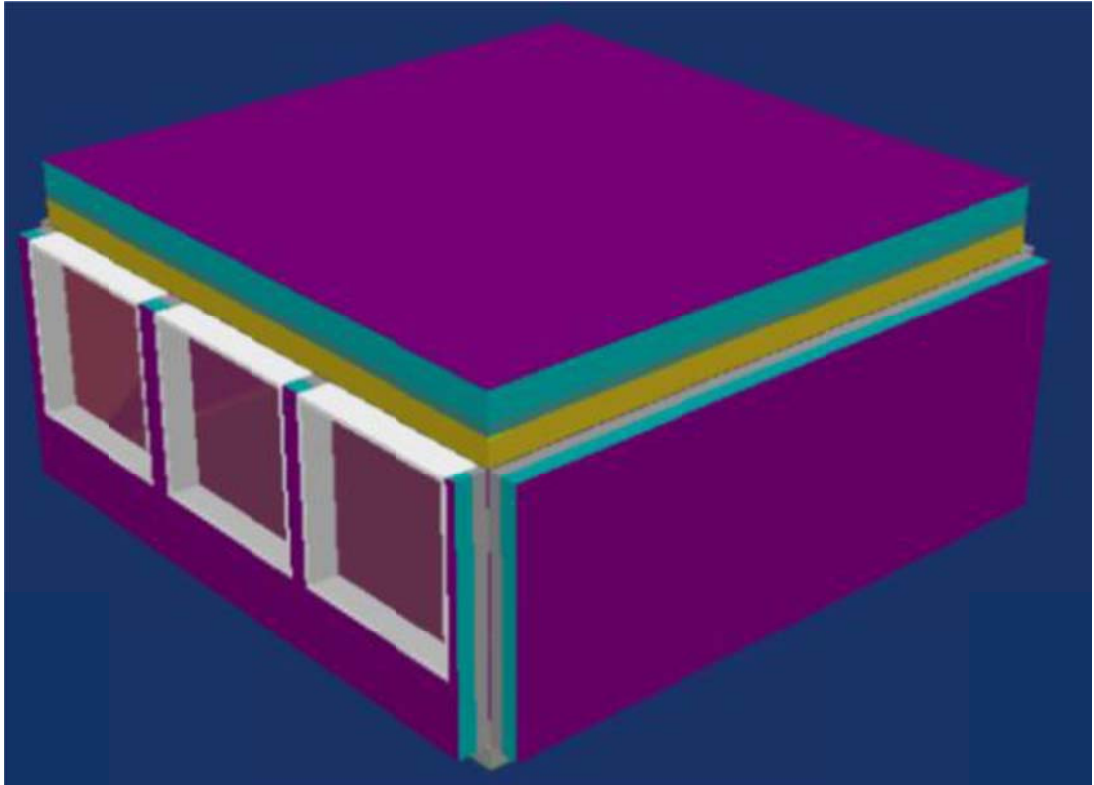
ja S3. S1 vastaa yksilöllistä sisäilmastoa, S2 hyvää sisäilmastoa ja S3 tyydyttävää sisäilmastoa. Edellä mainituista S3 vastaa sisäilmastoa, joka täyttää rakentamismääräysten vähimmäisvaatimukset. (Sisäilmastoluokitus 2008). Taulukossa 1 on esitetty sekä D2:n että Sisäilmastoluokituksen mukaiset ilmamäärät, lämpöolosuhteet että hiilidioksidipitoisuudet opetusrakennuksille.

**TAULUKKO 1. Opetustilan ilmamääräohjeistukset sekä tavoitearvot lämpöolosuhteille ja hiilidioksidipitoisuudelle (Suomen rakentamismääräyskokoelma D2 2012; Sisäilmastoluokitus 2008)**

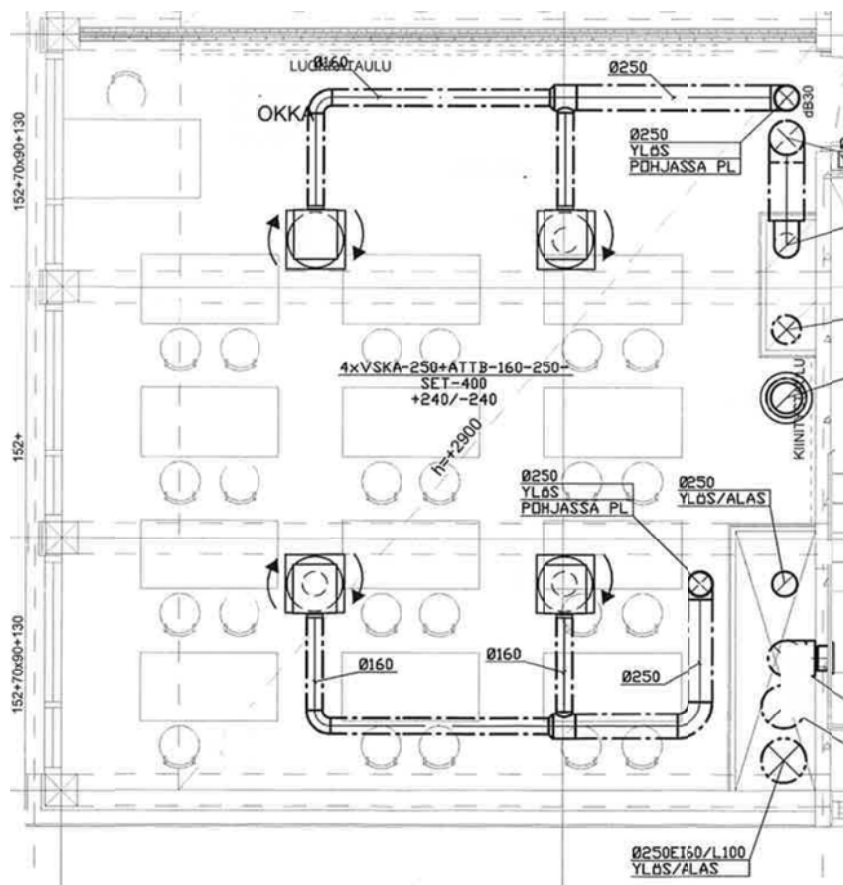
	<b>D2</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>
Opetustilan ilmamäärä, dm <sup>3</sup> /s/hlö	6	11	8	6
Opetustilan lämpöolosuhteet, °C	21/25	21,5	21,5	21
Opetustilan hiilidioksidipitoisuus, ppm	1 200	750	900	1 200

#### 4 IDA ICE SIMULOINNIT

IDA ICE on simulointiohjelma, jolla voidaan simuloida rakennuksen termisiä olosuhteita, sisäilman laatua ja energiankulutusta. Tässä työssä simuloinnin kohteena on ollut luokkahuone (55 m<sup>2</sup> ja 183,15 m<sup>3</sup>), joka on suunniteltu 25 henkilölle. Luokkahuoneen kuva simulointiohjelmassa on esitetty kuvassa 3 ja luokkahuoneen pohjakuva kuvassa 4. Luokkahuoneen kuormituksena on käytetty arvoja, jotka on saatu seuraamalla neljän viikon ajan Mikkelin ammattikorkeakoulun kolmen luokkahuoneen käyttöastetta. Luokkahuoneista kaksi oli teoriaopetukseen tarkoitettuja ja yksi ATK-luokka. Luokkahuoneissa pidetyt tunnit on selvitetty tilavarausjärjestelmästä ja henkilölukumäärät opettajien pitämistä läsnäololistoista. Saaduista tuloksista on laskettu keskimääräiset kuormitusasteet. Luokkahuoneen tarkemmat tiedot sekä kuormitus on esitetty taulukossa 2. Simuloinneissa on käytetty lämmöntalteenotolla varustettua ilmanvaihtokonetta.



**KUVA 3. Simuloidun luokkahuoneen kuva simulointiohjelmassa**



**KUVA 4. Simuloinnissa käytetyn luokkahuoneen pohjakuva**



**TAULUKKO 2. Simuloinnissa käytetyt raja-arvot, luokkahuoneen vaipan tiedot sekä tiedot luokan kuormituksesta**

Lämpötila min/max	21/25 °C	
Tuloilman lämpötila (kun käytössä jäähdytys)	+18 °C	
Ikkunoiden U-arvo	1,0 W/(m <sup>2</sup> /K)	
Ikkunoiden g-arvo	0,41	
Ikkunoiden aurinkosuojaus	sälekaihtimet lasien välissä	
Ulkoseinien U-arvo	0,53 W/(m <sup>2</sup> /K)	
Yläpohjan U-arvo	0,09 W/(m <sup>2</sup> /K)	
Ilmanvuotoluku q <sub>50</sub>	4 m <sup>3</sup> /(h m <sup>2</sup> )	
Hiilidioksidipitoisuus, min/max	400/1200 ppm	
Valaistuksen lämpökuorma	882 W (16,0 W/m <sup>2</sup> )	
Valaistuksen käyttöaika	8-19	
Laitteiden lämpökuorma	120 W (2,2 W/m <sup>2</sup> )	
Laitteiden käyttöaika	8-19	
Henkilökuormitus (100 % = 25 henkilöä = mitoituskuormitus)	Aika	Kuormitus, %
	8-9	5
	9-10	27
	10-11	34
	11-12	34
	12-13	37
	13-14	36
	14-15	21
	15-16	19
	16-17	8
	17-18	2
18-19	2	

Luokkahuoneen termisiä olosuhteita, sisäilman laatua sekä energiankulutusta simuloitiin käyttäen erilaisia ilmanvaihdon säätöstrategioita, jotka on kuvattu taulukossa 3. Taulukossa on myös esitetty ilmanvaihdon ilmamäärät eri säätöstrategioilla sekä ilmanvaihtokoneen käyntiaika.

**TAULUKKO 3. Simuloidut tapaukset ja ilmanvaihdon tiedot eri säätöstrategioissa**

Tapaus	Ohjaustapa	Tuloilmavirta qv, (l/s/m <sup>2</sup> )	Poistoilmavirta, qv, (l/s/m <sup>2</sup> )	IV-koneen käyntiaika
A	CAV ilman jäädytystä	0,462 - 2,727 (25,4 - 150 l/s)	0,462 - 2,727 (25,4 - 150 l/s)	7-19.30
B	CAV jäädytyksellä	0,462 - 2,727	0,462 - 2,727	7-19.30
C	VAV läsnäolo-ohjauksella	0,462 - 2,727	0,462 - 2,727	8-19.30
D	VAV CO <sub>2</sub> - ja lämpötilaohjauksella	0,462 - 2,727	0,462 - 2,727	7-19.30
E	VAV CO <sub>2</sub> - ja lämpötilaohjauksella, vaatimus 0,35 (dm <sup>3</sup> /s)/m <sup>2</sup>	0,35 - 2,727 (19,3 - 150 l/s)	0,35 - 2,727 (19,3 - 150 l/s)	7-19.30

Ilmanvaihdon ilmamäärät ovat määräytyneet Suomen rakentamismääräyskokoelma D2:n antamien määräyksien ja ohjeiden mukaisesti. D2:n ohjeessa sanotaan, että yleensä ulkoilmavirran tulee olla vähintään 0,35 (dm<sup>3</sup>/s)/m<sup>2</sup>, joka simuloitavassa luokkahuoneessa vastaa ilmamäärää 19,3 l/s. Yleisesti on kuitenkin käytössä käytäntö, jonka mukaan ilmanvaihdon miniminä käytetään arvoa, joka vaihtaa tilan ilmamäärän kerran kahdessa tunnissa. Tässä kyseisessä tilassa tämä tarkoittaa, että ulkoilmavirran tulee olla vähintään 0,462 (dm<sup>3</sup>/s)/m<sup>2</sup> eli 25,4 l/s.

Ilmanvaihtokoneen käyntiaika vastaa todellista luokkahuoneita palvelevan ilmanvaihtokoneen käyntiaikaa. Tapauksissa A ja B ilmanvaihtokoneen ilmamäärä on maksimi koko käyntiajan. Tapauksessa C ilmanvaihtokoneen ilmamäärä on maksimi silloin,

kun luokkahuoneessa on joku läsnä. Tapauksissa D ja E ilmanvaihtokoneen ilmamäärä vaihtelee minimi- ja maksimiarvojen välillä portaattomasti tarpeen mukaan käyntiaikana.

Simuloinnit on tehty ajalle 1.9.2013 - 30.4.2014. Laskennassa on käytetty teoreettista säävuotta. Ajankohta on valittu sen perusteella, milloin opetusrakennuksissa on tekniikan alan lähiopetusta. Simulointien tuloksista on tarkasteltu ilmanvaihdon energiankulutusta ja sisäilmanlaatua. Simuloinneissa on myös haluttu selvittää, tarvitsevatko luokkatilat jäähdytystä vai saavutetaanko halutut olosuhteet ilman jäähdytyksen käyttöä. Simuloinneissa tuloksia on tarkasteltu vain rakennuksen käyttöaikana ja sen vuoksi esimerkiksi ilmanvaihto on käyttöajan ulkopuolella ollut kokonaan pois päältä. Todellisuudessa ilman täytyy vaihtua myös käyttöajan ulkopuolella, kuten ilmenee edeltä kohdasta 2.4. Tässä työssä on kuitenkin keskitytty siihen, millaisia eroja energiankulutuksessa on erilaisilla ilmanvaihdon säätöstrategioilla ja, koska käyttöajan ulkopuolinen ilmanvaihto on sama kaikilla säätöstrategioilla, ei se vaikuta tulosten vertailtavuuteen.

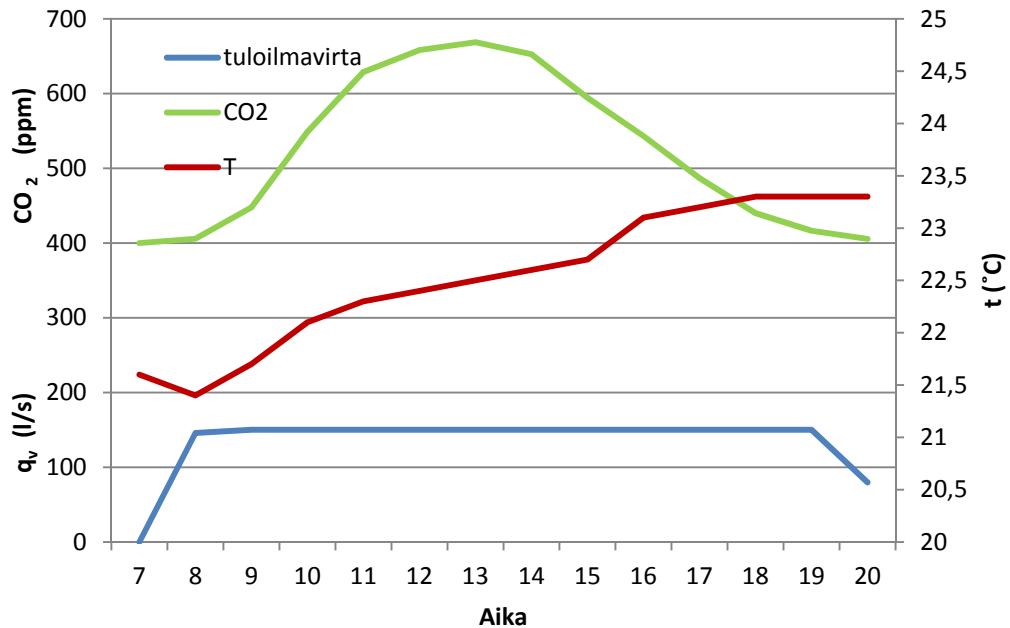
## 5 SIMULOINTIEN TULOKSET

Seuraavissa kappaleissa on esitetty simuloinneista saadut tulokset käytettäessä eri säätöstrategioita.

### 5.1 Vakioilmavirtainen ilmanvaihto (CAV) ilman jäähdytyspatteria

Tapaus A käsitteli vakioilmavirtaista ilmanvaihtojärjestelmää ilman jäähdytystä. Ilmanvaihtokone oli päällä kello 7-19.30 välisenä aikana ja luokassa oli kuormitusta kello 8-19 välisenä aikana. Kuvasta 5 nähdään, että ilmanvaihdon ollessa päällä ilmavirta oli 150 l/s (2,727 l/s/m<sup>2</sup>).

Sisäilman laadusta tarkasteltiin lämpötilaa ja hiilidioksidipitoisuutta. Sisäilman minimilämpötilaksi oli määritetty +21°C ja maksimilämpötilaksi +25 °C. Hiilidioksidin minimiarvoksi oli määritetty 400 ppm ja maksimiarvoksi 1 200 ppm. Kuvasta 5 nähdään, että sisäilman lämpötila pysyi koko seurantajakson ajan alle +23,5 °C:ssa. Sisäilman hiilidioksidipitoisuus oli koko seurantajakson ajan alle 700 ppm.



**KUVA 5. CAV ilman jäähdytystä simuloinnin sisäilmaolosuhteisiin vaikuttavat tulokset esimerkkipäivänä 2.9.**

Taulukossa 4 on esitetty simuloinnin tulokset energiankulutuksen osalta tarkastelujakson 1.9.-30.4. aikana. Ilmanvaihtokoneen puhaltimien sähköenergiankulutus oli 631,8 kWh (11,5kWh/m<sup>2</sup>) ja ilmanvaihtoilman lämmittämiseen kuluva energia määrä 2 049,9 kWh (37,3 kWh/m<sup>2</sup>). Koska jäähdytystä ei ollut, ei ilmanvaihtoilman jäähdytykseen kulunut energiaa. Ilmanvaihdon kokonaisenergiatarve tarkastelujakson aikana oli 2 681,7 kWh (48,8 kWh/m<sup>2</sup>).

**TAULUKKO 4. Ilmanvaihdon energiankulutus, kun käytössä CAV ilman jäähdytystä**

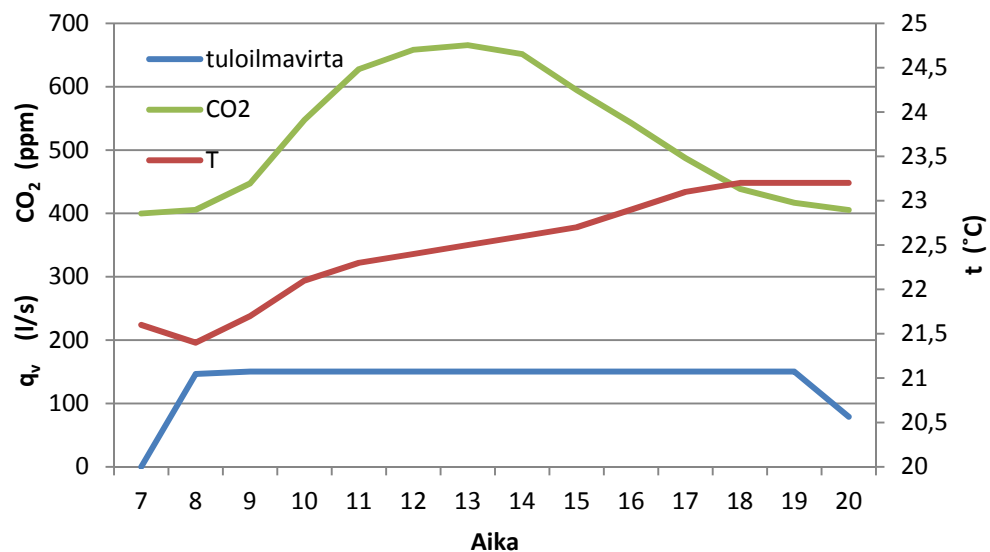
$E_{\text{puhaltimet, kWh}}$	$E_{\text{puhaltimet, kWh/m}^2}$	$E_{\text{lämmitys, kWh}}$	$E_{\text{lämmitys, kWh/m}^2}$	$E_{\text{jäähdytys, kWh}}$	$E_{\text{jäähdytys, kWh/m}^2}$	$E_{\text{kokonais, kWh}}$	$E_{\text{kokonais, kWh/m}^2}$
631,8	11,5	2 049,9	37,3	0	0	2 681,7	48,8

## 5.2 Vakioilmavirtainen ilmanvaihto (CAV) jäähdytyspatterilla

Tapaus B käsitteli vakioilmavirtaista ilmanvaihtojärjestelmää, jossa oli mukana tuloilman jäähdytys. Ilmanvaihtokone oli päällä kello 7-19.30 välisenä aikana ja luokas-

sa oli kuormitusta kello 8-19 välisenä aikana. Kuvasta 6 nähdään, että ilmanvaihdon ollessa päällä ilmavirta oli 150 l/s ( $2,727 \text{ l/s/m}^2$ ).

Sisäilman laadusta tarkasteltiin lämpötilaa ja hiilidioksidipitoisuutta. Sisäilman minimilämpötilaksi oli määritetty  $+21^\circ\text{C}$  ja maksimilämpötilaksi  $+25^\circ\text{C}$ . Hiilidioksidin minimiarvoksi oli määritetty 400 ppm ja maksimiarvoksi 1 200 ppm. Kuvasta 6 nähdään, että sisäilman lämpötila pysyi koko seurantajakson ajan alle  $+23,5^\circ\text{C}$ :ssa. Sisäilman hiilidioksidipitoisuus oli koko seurantajakson ajan alle 700 ppm.



**KUVA 6.** CAV jäähdytyksellä simuloinnin sisäilmaolosuhteisiin vaikuttavat tulokset esimerkkipäivänä 2.9.

Taulukossa 5 on esitetty simuloinnin tulokset energiankulutuksen osalta tarkastelujakson 1.9. – 30.4. aikana. Ilmanvaihtokoneen puhaltimien sähköenergiankulutus oli 631,8 kWh ( $11,5 \text{ kWh/m}^2$ ) ja ilmavaihtoilman lämmittämiseen kuluvan energian määrä 2 050,2 kWh ( $37,3 \text{ kWh/m}^2$ ). Ilmanvaihtoilman jäähdytykseen kului energiaa 1,7 kWh ( $0,03 \text{ kWh/m}^2$ ). Ilmanvaihdon kokonaisenergiatarve seurantajakson aikana oli 2 683,7 kWh ( $48,8 \text{ kWh/m}^2$ ).

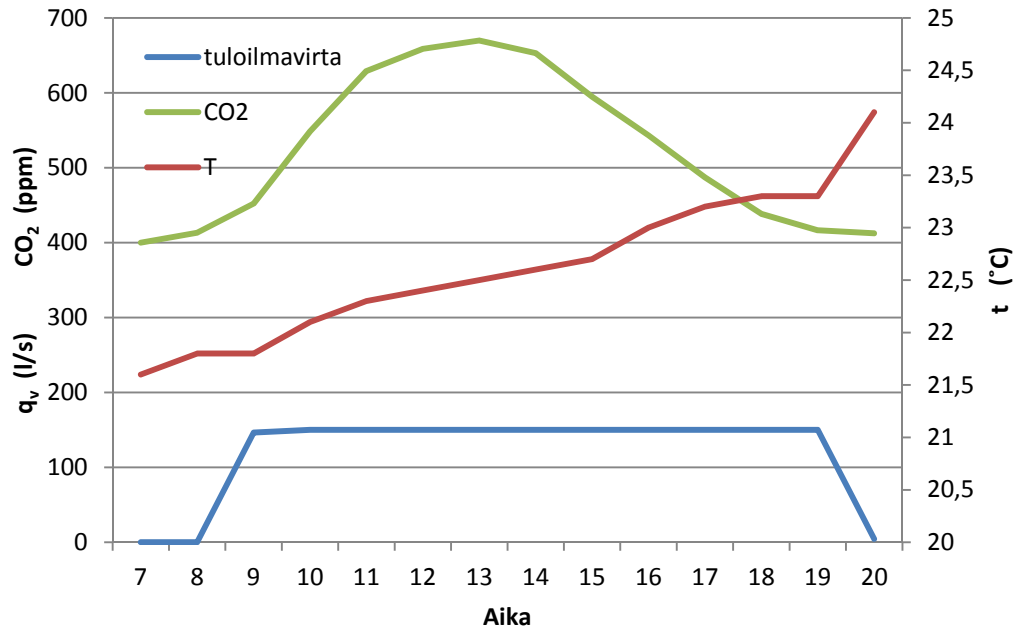
**TAULUKKO 5. Ilmanvaihdon energiankulutus, kun käytössä CAV jäähdytyksellä**

$E_{\text{puhaltimet}}$ , kWh	$E_{\text{puhaltimet}}$ , kWh/m <sup>2</sup>	$E_{\text{lämmitys}}$ , kWh	$E_{\text{lämmitys}}$ , kWh/m <sup>2</sup>	$E_{\text{jäähdytys}}$ , kWh	$E_{\text{jäähdytys}}$ , kWh/m <sup>2</sup>	$E_{\text{kokonais}}$ , kWh	$E_{\text{kokonais}}$ , kWh/m <sup>2</sup>
631,8	11,5	2 050,2	37,3	1,7	0,03	2 683,7	48,8

**5.3 Tarpeenmukainen ilmanvaihto (VAV) läsnäolo-ohjauksella**

Tapaus C käsitteli tarpeenmukaista ilmanvaihtojärjestelmää, jossa säätöstrategiana oli läsnäolo. Läsnäolo-ohjauksessa ilmanvaihto käynnistyy, kun yksikin henkilö menee luokkatilaan ja, sammuu puolen tunnin kuluttua siitä, kun viimeinen henkilö on poistunut tilasta. Ilmanvaihtokone oli siten päällä kello 8-19.30 välisen ajan. Kuvasta 7 nähdään, että ilmanvaihdon ollessa päällä ilmavirta oli 150 l/s (2,727 l/s/m<sup>2</sup>). Kuvasta voidaan myös havaita, että viiveajasta johtuen ilmanvaihto ei ehdi oppituntien välissä ohjautua minimiteholle.

Sisäilman laadusta tarkasteltiin lämpötilaa ja hiilidioksidipitoisuutta. Sisäilman minimilämpötilaksi oli määritetty +21°C ja maksimilämpötilaksi +25 °C. Hiilidioksidin minimiarvoksi oli määritetty 400 ppm ja maksimiarvoksi 1 200 ppm. Kuvasta 7 nähdään, että sisäilman lämpötila ei missään vaiheessa seurantajaksoa noussut yli+ 25°C:een ja oli suurimman osan ajasta alle + 23,5 °C. Sisäilman hiilidioksidipitoisuus oli koko seurantajakson ajan alle 700 ppm.



**KUVA 7.** VAV läsnäolo-ohjauksella simuloinnin sisäilmaolosuhteisiin vaikuttavat tulokset esimerkkipäivänä 2.9.

Taulukossa 6 on esitetty simuloinnin tulokset energiankulutuksen osalta tarkastelujakson 1.9. – 30.4. aikana. Ilmanvaihtokoneen puhaltimien sähköenergiankulutus oli 581,7 kWh (10,6 kWh/m<sup>2</sup>) ja ilmavaihtoilman lämmittämiseen kuluvan energian määrä 1 861,5 kWh (33,9 kWh/m<sup>2</sup>). Ilmanvaihtoilman jäähdytykseen kului energiaa 1,7 kWh (0,03 kWh/m<sup>2</sup>). Ilmanvaihdon kokonaisenergian tarve seurantajakson aikana oli 2 444,9 kWh (44,5 kWh/m<sup>2</sup>).

**TAULUKKO 6.** Ilmanvaihdon energiankulutus, kun käytössä VAV läsnäolo-ohjauksella

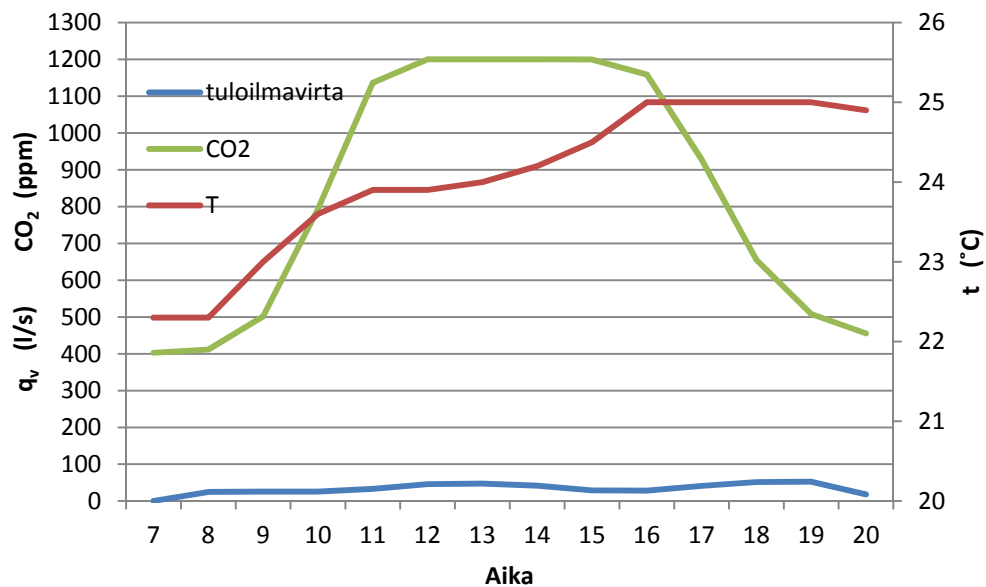
$E_{\text{puhaltimet}}$ , kWh	$E_{\text{puhaltimet}}$ , kWh/m <sup>2</sup>	$E_{\text{lämmitys}}$ , kWh	$E_{\text{lämmitys}}$ , kWh/m <sup>2</sup>	$E_{\text{jäähdytys}}$ , kWh	$E_{\text{jäähdytys}}$ , kWh/m <sup>2</sup>	$E_{\text{kokonais}}$ , kWh	$E_{\text{kokonais}}$ , kWh/m <sup>2</sup>
581,7	10,6	1 861,5	33,9	1,7	0,03	2 444,9	44,5

#### 5.4 Tarpeenmukainen ilmanvaihto (VAV) CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella

Tapaus D käsitteli tarpeenmukaista ilmanvaihtojärjestelmää, jossa säätöstrategiana oli CO<sub>2</sub>- ja lämpötila. Ilmanvaihtokone oli päällä kello 7-19.30 välisen ajan. Ilmanvaihdon ollessa päällä ilmavirta pystyi vaihtelevaan portaattomasti välillä 25,4 - 150 l/s (0,426 - 2,727 l/s/m<sup>2</sup>). Kuvasta 8 kuitenkin nähdään, että ilmavirta oli koko käyttöajan

alle 70 l/s johtuen siitä, että luokan kuormitus oli koko käyttöajan mitoituskuormitusta alhaisempi.

Sisäilman laadusta tarkasteltiin lämpötilaa ja hiilidioksidipitoisuutta. Sisäilman minimilämpötilaksi oli määritetty +21°C ja maksimilämpötilaksi +25 °C. Hiilidioksidin minimiarvoksi oli määritetty 400 ppm ja maksimiarvoksi 1 200 ppm. Kuvasta 8 nähdään, että tarkastelujakson aikana sisäilman lämpötila nousi noin tunnin käytön jälkeen yli + 23 °C:een. Käyttöajan viimeisten tuntien aikana lämpötila oli muutaman kerran muutamasta asteen kymmenyksen yli + 25°C:een. Sisäilman hiilidioksidipitoisuus oli koko seurantajakson ajan alle 1 200 ppm.



**KUVA 8. VAV CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella simuloinnin sisäilmaolosuhteisiin vaikuttavat tulokset esimerkkipäivänä 2.9.**

Taulukossa 7 on esitetty simuloinnin tulokset energiankulutuksen osalta tarkastelujakson 1.9. – 30.4. aikana. Ilmanvaihtokoneen puhaltimien sähköenergiankulutus oli 136,4 kWh (2,5 kWh/m<sup>2</sup>) ja ilmanvaihtoilman lämmittämiseen kuluvan energian määrä 385,6 kWh (7,0 kWh/m<sup>2</sup>). Ilmanvaihtoilman jäädytykseen kului energiaa 1,2 kWh (0,02 kWh/m<sup>2</sup>). Ilmanvaihdon kokonaisenergiatarve seurantajakson aikana oli 523,2 kWh (9,5 kWh/m<sup>2</sup>).



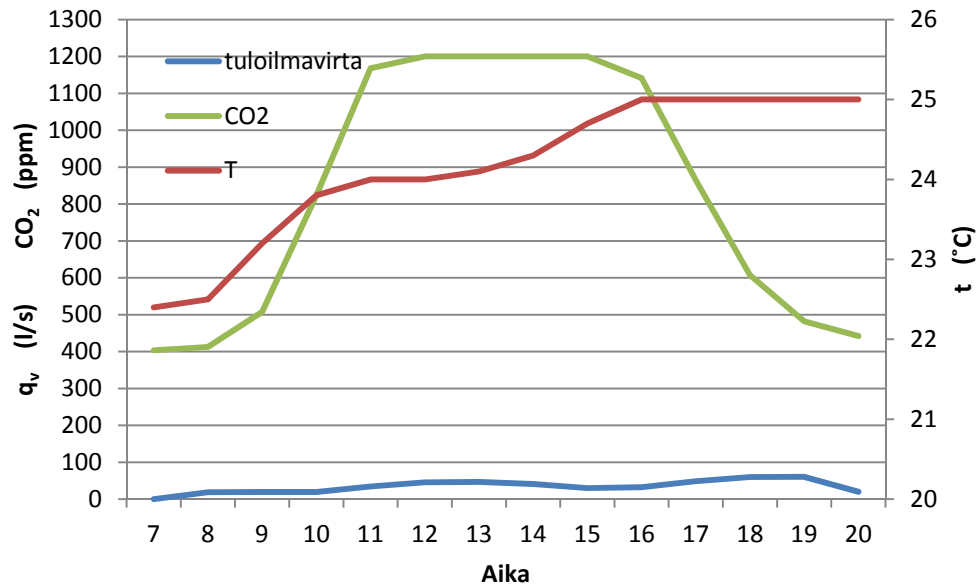
**TAULUKKO 7. Ilmanvaihdon energiankulutus, kun käytössä VAV CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella**

E <sub>puhaltimet</sub> , kWh	E <sub>puhaltimet</sub> , kWh/m <sup>2</sup>	E <sub>lämmitys</sub> , kWh	E <sub>lämmitys</sub> , kWh/m <sup>2</sup>	E <sub>jäähditys</sub> , kWh	E <sub>jäähditys</sub> , kWh/m <sup>2</sup>	E <sub>kokonais</sub> , kWh	E <sub>kokonais</sub> , kWh/m <sup>2</sup>
136,4	2,5	385,6	7,0	1,2	0,02	523,2	9,5

**5.5 Tarpeenmukainen ilmanvaihto (VAV) CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella, minimi-ilmavirta**

Tapaus E käsitteli tarpeenmukaista ilmanvaihtojärjestelmää, jossa säätöstrategiana oli CO<sub>2</sub>- ja lämpötila. Ilmanvaihtokone oli päällä kello 7-19.30 välisen ajan. Ilmanvaihdon ollessa päällä ilmavirta pystyi vaihtelevaan portaattomasti välillä 19,3 - 150 l/s (0,35 - 2,727 l/s/m<sup>2</sup>). Kuvasta 9 kuitenkin nähdään, että ilmavirta oli koko käyttöajan alle 60 l/s, johtuen siitä, että luokan kuormitus oli koko käyttöajan mitoituskorkeutta alhaisempi.

Sisäilman laadusta tarkasteltiin lämpötilaa ja hiilidioksidipitoisuutta. Sisäilman minimilämpötilaksi oli määritetty +21°C ja maksimilämpötilaksi +25 °C. Hiilidioksidin minimiarvoksi oli määritetty 400 ppm ja maksimiarvoksi 1 200 ppm. Kuvasta 9 nähdään, että sisäilman lämpötila nousi yli + 23 °C:een tunnin käytön jälkeen ja oli viimeisten käyttötuntien aikana muutaman kerran muutaman asteen kymmenyksen yli + 25°C:een. Sisäilman hiilidioksidipitoisuus oli koko seurantajakson ajan alle 1 200 ppm.



**KUVA 9. VAV CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella (minimi-ilmavirta) simuloinnin sisäilmaolosuhteisiin vaikuttavat tulokset esimerkkipäivänä 2.9.**

Taulukossa 8 on esitetty simuloinnin tulokset energiankulutuksen osalta tarkastelujakson 1.9. – 30.4. aikana. Ilmanvaihtokoneen puhaltimien sähköenergiankulutus oli 123,8 kWh (2,3 kWh/m<sup>2</sup>) ja ilmavaihtoilman lämmittämiseen kuluvan energian määrä 340,6 kWh (6,2 kWh/m<sup>2</sup>). Ilmanvaihtoilman jäähtyäkseen kului energiaa 1,3 kWh (0,02 kWh/m<sup>2</sup>). Ilmanvaihdon kokonaisenergiatarve seurantajakson aikana oli 465,7 kWh (8,5 kWh/m<sup>2</sup>).

**TAULUKKO 8. Ilmanvaihdon energiankulutus, kun käytössä VAV CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella ja käytössä on minimi-ilmavirta**

$E_{\text{puhaltimet, kWh}}$	$E_{\text{puhaltimet, kWh/m}^2}$	$E_{\text{lämmitys, kWh}}$	$E_{\text{lämmitys, kWh/m}^2}$	$E_{\text{jäähtytys, kWh}}$	$E_{\text{jäähtytys, kWh/m}^2}$	$E_{\text{kokonais, kWh}}$	$E_{\text{kokonais, kWh/m}^2}$
123,8	2,3	340,6	6,2	1,3	0,02	465,7	8,5

## 6 TULOSTEN TARKASTELU

Luokkahuoneen termisiä olosuhteita, sisäilman laatua ja energiankulutusta simuloitiin käyttämällä erilaisia säätöstrategioita. Tapaus B oli perustilanne, jossa käytössä oli vakioilmavirtainen ilmanvaihto jäähdytyksellä. Tämä on hyvin tyypillinen koulurakennuksissa käytetty ilmanvaihtotapa. Tapaus A:ssa ilmanvaihdon säätöstrategia oli samanlainen, mutta siinä kokeiltiin, tarvitseeko kyseinen luokkahuone lainkaan jäähdytystä käyttöaikana vai ovatko termiset olosuhteet luokassa hyväksyttävät ilman jäähdytystä.

Tapaus C:ssä käytössä oli tarpeenmukainen ilmanvaihto, jossa ohjaavana tekijänä oli läsnäolo. Eli ilmanvaihto käynnistyy täydelle teholle, kun luokkahuoneeseen menee sisälle yksikin henkilö, ja ilmanvaihto laskee minimiteholle puoli tuntia sen jälkeen, kun viimeinen henkilö on poistunut tilasta. Tapaus D:ssä oli käytössä myös tarpeenmukainen ilmanvaihto, mutta ohjaavana tekijänä olivat sekä hiilidioksidipitoisuus että lämpötila. Toisin sanoen hiilidioksidipitoisuuden tuli pysyä luokkahuoneessa alle 1 200 ppm:n ja lämpötilan alle +25 °C:ssa. Ilmanvaihdon ilmamäärä sai vaihdella välillä 25,4 - 150 l/s. Tapaus E oli muuten vastaava kuin tapaus D, mutta ilmavirran minimiarvo sai laskea arvoon 19,3 l/s. Tällä haluttiin selvittää, minkä verran koulurakennuksen ilmanvaihdon energiantarpeeseen vaikuttaa se, käytetäänkö minimiilmavirtana D2:n ohjearvoa, jonka mukaan käyttöaikana ilman täytyy vaihtua vähintään 0,35 l/s/m<sup>2</sup>, vai käytetäänkö arvoa, jolla tilan ilma vaihtuu vähintään kerran kahdessa tunnissa.

### 6.1 Vaikutukset luokkatilan lämpötilaan

Simuloinneissa käytetyt lämpötilan raja-arvot ovat olleet Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaiset kaikissa tapauksissa eli lämpötilan tulee olla vähintään 21 °C ja enintään 25 °C. Kaikista tapauksista on lisäksi selvitetty astetuntien ylitykset eli on selvitetty, kuinka monen tunnin ajan seurantajakson aikana sisäilman lämpötila ylittää 25 °C. Asetunti kuvaa raja-arvon ylittävän lämpötilan ja ajan tuloa. Eli esimerkiksi, jos lämpötilaraja on 25 °C ja sisäilman lämpötila on 27 °C kolmen tunnin ajan, on ylitys kuusi astetuntia (°Ch).

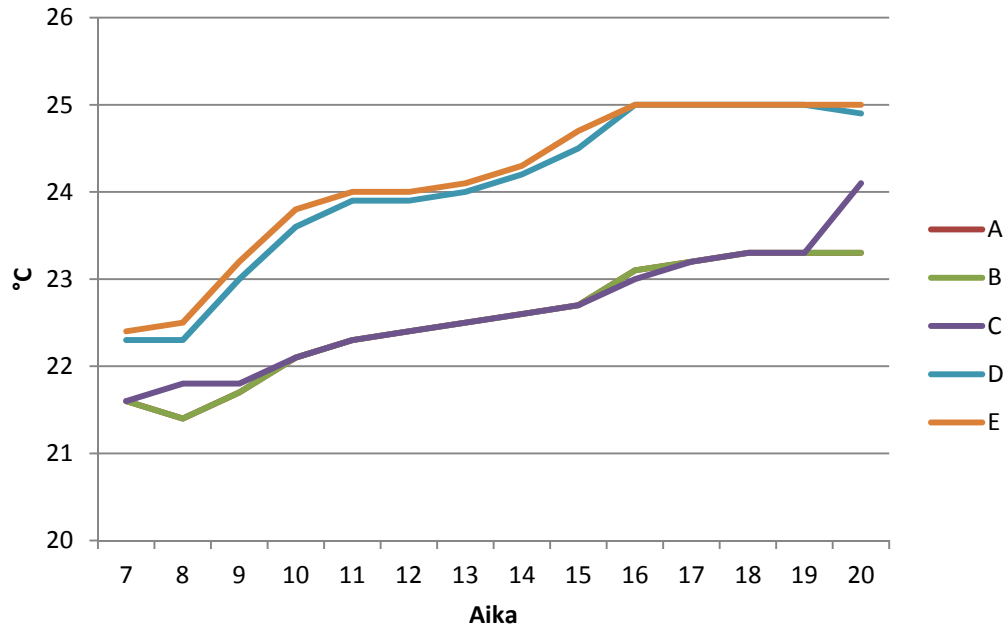
Tapauksissa A, B ja C lämpötila ei missään vaiheessa seurantajaksoa ylittänyt 25 °C. Tapauksessa D 25 °C:n raja-arvo ylittyi 3,8 °Ch ja tapauksessa E 4,6 °Ch seurantajakson aikana. Käytännössä voidaan todeta, että kyseisillä ilmanvaihdon säätöstrategioilla sisäilman lämpötila pysyy sallituissa rajoissa koko ajan.

Jos asiaa halutaan tarkastella siltä kannalta, millaiseksi sisäilman lämpötila kohoaa energiansäästön vuoksi, voidaan tuloksia tarkastella astetuntien ylitysten suhteen myös 21 ja 25 °C:sta välisellä alueella. Taulukossa 9 on esitetty sisäilman astetuntien ylitykset eri lämpötiloilla.

**TAULUKKO 9. Sisäilman astetuntien ylitykset eri lämpötiloilla**

<b>Tapaus</b>	<b>yli +21,5 °C, °Ch</b>	<b>yli + 22 °C, °Ch</b>	<b>yli + 23 °C, °Ch</b>	<b>yli + 24 °C, °Ch</b>
A	708.8	387.6	52.2	1.1
B	676.7	355.7	37.2	0.4
C	730,2	399,9	45,9	0,6
D	2476.7	1783.5	823	254.5
E	2477.9	1784.2	823	254.5

Kuvassa 10 on esitetty luokkahuoneen lämpötila eri ilmastoinnin säätöstrategioilla. Esimerkkipäiväksi on otettu 2.9.



**KUVA 10. Luokkahuoneen lämpötila ilmastonoinnin eri säätöstrategioilla esimerkkipäivänä 2.9.**

Kuvasta nähdään, että tapauksissa D ja E luokan lämpötila nousee käyttöajan viimeisten tuntien aikana noin + 25°C:een. Tapauksissa A (käyrä yhteneväinen käyrän B kanssa), B ja C lämpötila sen sijaan pysyy suurimman osan ajasta alle + 23°C:ssa ja nousee vasta viimeisten käyttötuntien aikana tämän yli.

## 6.2 Vaikutukset luokkatilan hiilidioksidipitoisuuteen

Simuloinneissa käytetty hiilidioksidin raja-arvo on ollut Suomen rakentamismääräyskokoelman mukainen kaikissa tapauksissa, eli hiilidioksidipitoisuuden tulee olla alle 1 200 ppm. Simulointeja on tarkasteltu myös Sisäilmaluokituksen mukaisten hiilidioksidipitoisuuksille asetettujen raja-arvojen mukaisesti eli on tarkasteltu, kuinka usean tunnin ajan luokkatilan hiilidioksidipitoisuus ylittää luokan S1 mukaisen 750 ppm:n rajan sekä, kuinka usean tunnin ajan se ylittää luokan S2 mukaisen 900 ppm:n raja-arvon. Tulokset on esitetty taulukossa 10.

Simulointien tarkastelujaksossa on ollut yhteensä 242 vuorokautta eli 5 808 tuntia. Jos huomioidaan vain arkipäivät (ma-pe) on tarkastelujaksolla ollut yhteensä 178 vuorokautta eli 5 272 tuntia. Arkipäivisin luokkatilaa on käytetty ajalla 8-19 eli yhdentoista

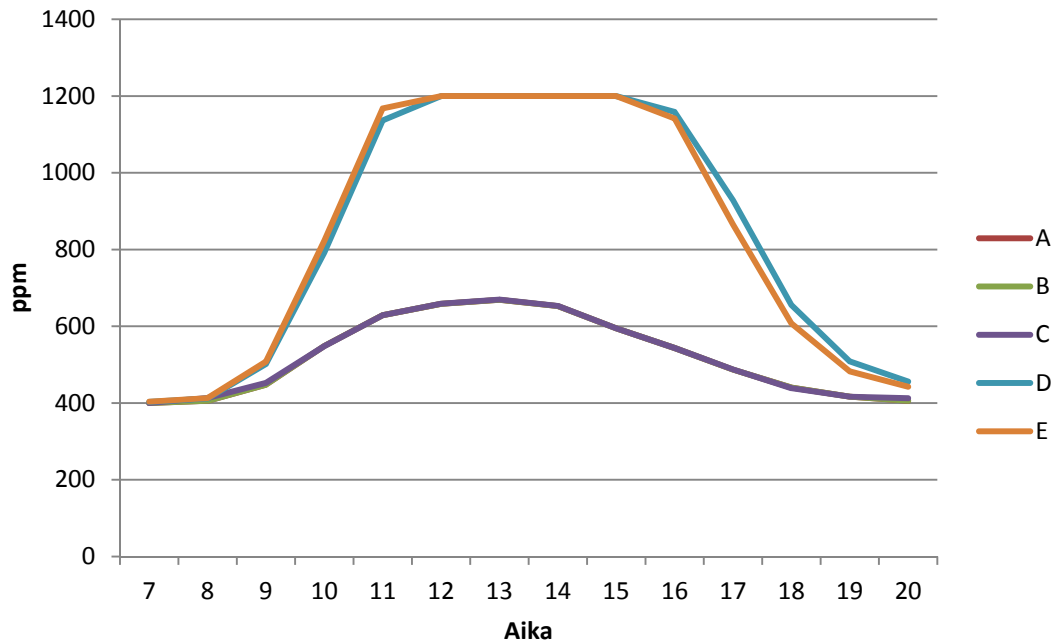
tunnin ajan vuorokaudessa, jolloin tarkastelujaksolla luokkahuone on ollut käytössä 1 958 tuntia.

**TAULUKKO 10. Luokkatilan sisäilman eri hiilidioksidipitoisuusarvojen ylitykset tunteina**

Tapaus	yli 750 ppm, h	yli 900 ppm, h
A	0	0
B	0	0
C	0	0
D	1 525	1 185
E	1 531	1 337

Tulokset osoittavat, että käytettäessä ilmanvaihdon säätöstrategiana vaihtoehtoja A, B tai C pysyy luokkahuoneen hiilidioksidipitoisuus alle 750 ppm:n koko tarkastelujakson ajan. Käytettäessä ilmanvaihdon säätöstrategiana hiilidioksidi- ja lämpötilaohjausta, ylittää luokkahuoneen sisäilman hiilidioksidipitoisuus raja-arvon 750 ppm 1 525 tunnin ajan eli noin 78 % koko käyttöajasta ja raja-arvon 900 ppm 1 185 tunnin ajan eli noin 61 % käyttöajasta. Jos ilmanvaihdon säätöstrategiaksi valitaan tapaus E eli käytetään vielä hieman pienempiä ilmamääriä, ylittää luokkahuoneen hiilidioksidipitoisuus raja-arvon 750 ppm 1 531 tunnin ajan eli 78 % käyttöajasta ja raja-arvon 900 ppm 68 % käyttöajasta. Täytyy kuitenkin muistaa, että luokkahuoneen hiilidioksidipitoisuus säilyy koko tarkastelujakson ajan alle 1 200 ppm:ssa eli luokkahuoneen hiilidioksidipitoisuus täyttää Suomen rakentamismääräysten vaatimuksen.

Kuvassa 11 on kuvattu luokkatilan hiilidioksidipitoisuus käyttöaikana ilmaston eri säätöstrategioita käytettäessä. Esimerkkipäiväksi on otettu 2.9.

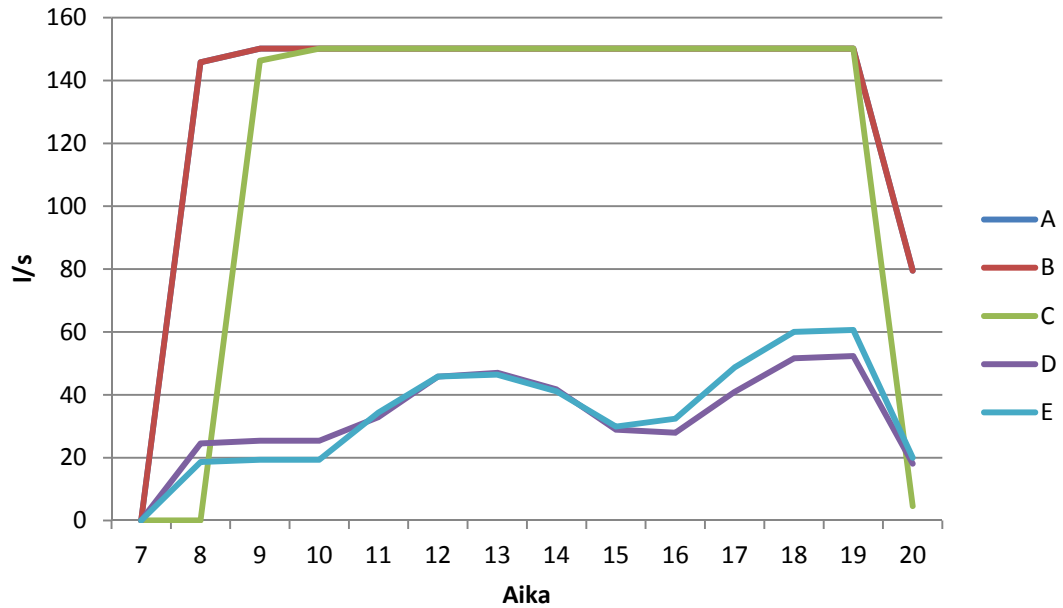


**KUVA 11. Luokkahuoneen hiilidioksidipitoisuus ilmaston eri säätöstrategioilla**

Kuvasta nähdään, että tapauksissa A, B ja C (käyrät yhteneviä) hiilidioksidipitoisuus on koko käyttöajan alle 700 ppm ja suurimman osan ajasta alle 600 ppm. Tapauksissa D ja E, joissa ilmamäärät ovat alhaisempia, hiilidioksidipitoisuus nousee noin kolmen tunnin kuormituksen jälkeen noin 1 200 ppm:n ja pysyy siellä suurimman kuormituksen ajan. Kuormituksen vähentyessä myös hiilidioksidipitoisuus alkaa laskea.

### 6.3 Vaikutukset tarvittavaan tuloilmavirtaan

Energiankulutuksen osalta tuloilmavirta on kiinnostavin, sillä energiaa kuluu juuri tuloilman lämmittämiseen ja ilman liikuttamiseen (puhallinenergia). Eli mitä vähemmän ilmaa tarvitsee siirtää ja lämmittää, sitä vähemmän kuluu energiaa. Kuvassa 12 on esitetty luokkahuoneen tuloilmavirta eri ilmaston säätöstrategioita käytettäessä. Esimerkkipäiväksi on valittu 2.9.



**KUVA 12. Luokkahuoneen tuloilmavirta eri ilmastoinnin säätöstrategioilla 2.9.**

Kuvasta nähdään, että tapauksissa A (käyrä yhteneväinen käyrän B kanssa), B ja C ilmavirta on maksimi, noin 150 l/s, koko käyttöajan tai suurimman osan ajasta. Tapauksissa D ja E tuloilmavirta määräytyy tarpeen mukaan ja on enimmillään, käyttöajan viimeisen tunnin ajan, noin 60 l/s. Suurimman osan ajasta ilmavirta on alle 50 l/s. Erot tuloilmavirroissa ovat todella merkittäviä energian kulutuksen näkökulmasta katsottuna.

#### 6.4 Vaikutukset rakennuksen energiankulutukseen

Taulukossa 11 on kuvattu kaikkien simuloinnissa käytettyjen säätöstrategioiden energiankulutukset jaettuna puhaltimien, lämmityksen ja jäähdytyksen kesken. Lisäksi taulukossa on esitetty ilmanvaihdon kokonaisenergiatarve sekä se, kuinka paljon energiaa säästyy käytettäessä erilaisia säätöstrategioita verrattuna tavanomaiseen tilanteeseen.



**TAULUKKO 11. Energiankulutus eri ilmanvaihdon säätöstrategioilla**

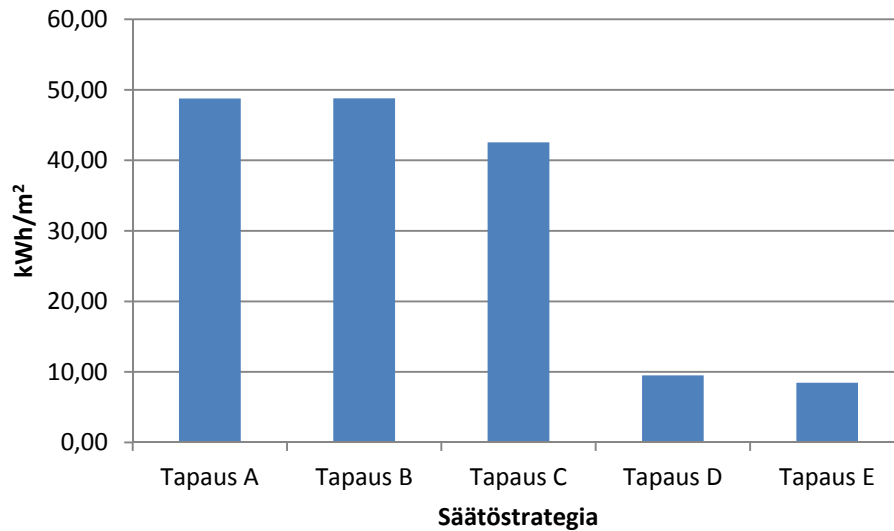
Tapaus	$E_{\text{puhaltimet}}$ kWh/m <sup>2</sup>	$E_{\text{lämmitys}}$ kWh/m <sup>2</sup>	$E_{\text{jäähdytys}}$ kWh/m <sup>2</sup>	$E_{\text{kokonais}}$ kWh/m <sup>2</sup>	Kulutus verrattuna vertailukohteeseen, %
A	11,5	37,3	0,0	48,8	100
B	11,5	37,3	0,03	48,8	vertailukohde
C	10,6	33,9	0,03	44,5	91
D	2,5	7,0	0,02	9,5	21
E	2,3	6,2	0,02	8,5	17

Edellä esitetyt tulokset ilmanvaihdon energiankulutuksista osoittavat, että valitsemalla oikea säätöstrategia, voidaan ilmanvaihdon energiankulutusta pienentää huomattavasti. Ilmanvaihdon kokonaisenergiantarpeet vaihtelevat säätöstrategiasta riippuen välillä 8,5 – 48,8 kWh/m<sup>2</sup>. Suurin energiankulutus (48,8 kWh/m<sup>2</sup>) on tapauksissa A ja B, joissa on käytössä vakioilmavirtainen järjestelmä. Tapauksista B on yleisesti käytössä oleva vakioilmavirtajärjestelmä jäähdytyksellä, ja siksi sitä on käytetty tässä työssä vertailukohteena muille tapauksille.

Tapaus C eli tarpeenmukainen ilmanvaihto läsnäolo-ohjauksella on tarpeenmukaisista ilmanvaihtojärjestelmistä yleisimmin käytössä oleva järjestelmä. Jos läsnäoloa käytetään ilmanvaihtoa säättävänä tekijänä, säästetään energiaa tässä tapauksessa noin 9 %. Energiansäästö tässä tapauksessa tulee siitä, että ilmanvaihto on päällä tunnin vähemmän kuin vertailutapauksessa.

Tapaus D eli tarpeenmukainen ilmanvaihto lämpötila- ja hiilidioksidipitoisuusohjauksella säästää energiaa vertailukohteeseen verrattuna 79 %. Energiansäästö tulee siitä, että ilmamäärät määräytyvät todellisen kuormituksen mukaisesti. Ilmamäärän minimiarvo määräytyy sen mukaan, että luokkahuoneen ilmamäärän tulee vaihtua kerran kahdessa tunnissa. Ilmamäärät määräytyvät myös sen mukaan, että lämpötilan tulee pysyä alle 25 °C:ssa ja hiilidioksidipitoisuuden alle 1 200 ppm:ssa. Jos ilmanvaihdon minimi-ilmamäärän annetaan mennä vielä alhaisemmaksi, eli D2:n asettamaksi minimiarvoksi, voidaan ilmanvaihdon energiankulutusta edelleen pienentää. Tapaus E kuluttaa energiaa 83 % vähemmän kuin vertailukohde. Lisäksi tapauksessa E energian-

kulutus on 11 % alhaisempi kuin tapauksessa D. Eri säätöstrategioiden energiankulutukset on esitetty myös kuvassa 13.



**KUVA 13. Ilmanvaihdon energiankulutus eri säätöstrategioilla**

### 6.5 Ilmanvaihdon energiansäästön taloudellinen vaikutus

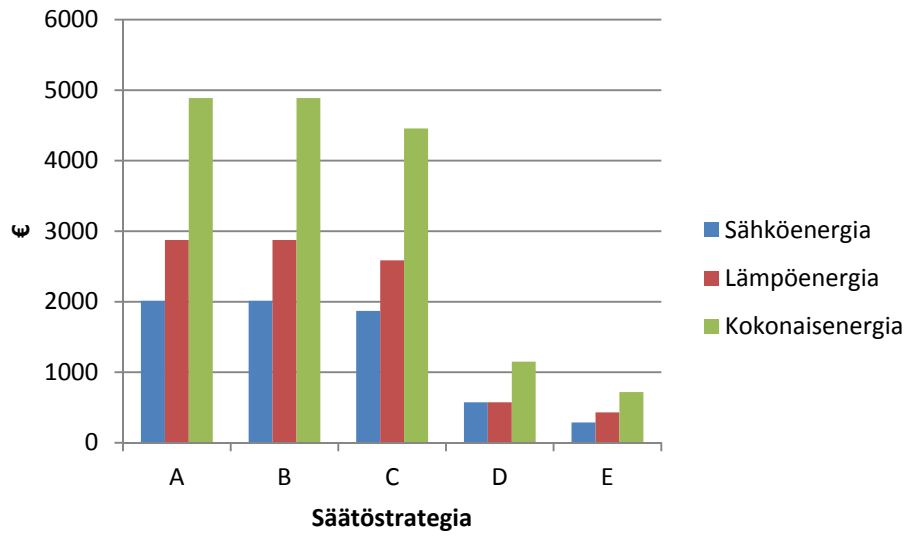
Seuraavassa on laskettu, mitä ilmavaihdon energiankulutus merkitsee taloudellisesti. Laskennassa on vertailtu eri ilmanvaihdon säätöstrategioiden energiankulutuksien merkityksiä taloudellisesta näkökulmasta. Laskennassa ilmanvaihdon lämmitys on ajateltu toteutettavan kaukolämmöllä. Puhaltimet ja mahdollinen jäähdytys kuluttavat sähköenergiaa. Kaukolämmön ja sähkön hintana on käytetty Etelä-Savon Energia Oy:n vuoden 2013 hintoja, jotka kaukolämmön osalta ovat 55,04 €/MWh ja sähkön osalta 119 €/MWh. Kaukolämmön hinta sisältää voimassa olevat verot ja sähkön hinta energiamaksun, siirtomaksun sekä energiaveron. (Etelä-Savon Energia Oy 2013).

**TAULUKKO 12. Ilmanvaihdon sähkö- ja lämpöenergian kulutus ja kustannukset**

Tapaus	sähkö- energian kulutus, MWh/m <sup>2</sup>	Lämpö- energian kulutus, MWh/m <sup>2</sup>	Sähkö- energia, €m <sup>2</sup>	Lämpö- energia, €m <sup>2</sup>	Energian kulutus yhteensä, MWh/m <sup>2</sup>	Energia yhteensä, €m <sup>2</sup>
A	0,012	0,037	1,4	2,0	0,049	3,4
B	0,012	0,037	1,4	2,0	0,049	3,4
C	0,011	0,034	1,3	1,8	0,045	3,1
D	0,003	0,007	0,4	0,4	0,01	0,8
E	0,002	0,006	0,2	0,3	0,008	0,5

Yllä olevasta taulukosta 12 nähdään, että ilmanvaihdon kuluttamalla energiamäärällä on suuria taloudellisia vaikutuksia ja sen vuoksi ilmanvaihto on yksi kohde, johon energiansäästötoimenpiteet rakennuksissa kohdistuvat. Yllä olevia laskelmia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että energiankulutusta on tarkastelu vain ajanjaksolla 1.9. - 30.4. välisenä aikana, ei siis koko vuoden ajalta, eikä tilojen käyttöajan ulkopuolista energiankulutusta ole huomioitu. Edellä mainittujen seikkojen huomioon ottaminen vaikuttaisi vuosikustannuksiin, mutta ei juuri muuttaisi eri säästöstrategioiden suhteita toisiinsa nähden.

Kuvassa 14 on esitetty, millaiset kustannukset ja toisaalta millaiset kustannussäästöt Mikkelin ammattikorkeakoulun Kasarmin kampuksella voitaisiin saavuttaa käyttämällä A-rakennuksen luokkahuoneiden ilmanvaihdossa tässä tutkimuksessa käytettyjä säästöstrategioita. Mikkelin ammattikorkeakoulun A-rakennuksen luokkahuoneiden yhteenlaskettu pinta-ala on 1 437,9 m<sup>2</sup>. Tuloksia tarkasteltaessa täytyy ottaa huomioon, että simuloitu luokkahuone ei ole Mikkelin ammattikorkeakoulun luokkahuone, eivätkä kaikki luokkahuoneet ole samanlaisia mm. lämpöhäviöiden osalta. Siksi tulokset eivät ole absoluuttisia, vaan suuntaa antavia.



**KUVA 14. Ilmanvaihdon energian kulutuksen kustannukset eri säätöstrategioilla luokkahuoneiden pinta-alan ollessa 1 437,9 m<sup>2</sup>**

## 7 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli selvittää erilaisten ilmanvaihdon säätöstrategioiden vaikutuksia luokkatilan sisäilmasto-olosuhteisiin eli lämpöoloihin ja hiilidioksidipitoisuuteen, luokkatiloissa tarvittaviin ilmamääriin sekä opetusrakennusten energiankulutukseen. Lisäksi haluttiin selvittää, tarvitsevatko luokkahuoneet jäähdytystä. Edellä mainittuja asioita tutkittiin simuloimalla todellinen luokkahuone käyttäen todellisia kuormitus- ja ilmanvaihtotietoja. Simuloinnissa käytettiin IDA ICE –simulointiohjelmaa ja simulointien tarkastelujaksona käytettiin ajanjaksoa 1.9.-30.4. eli aikaa, jolloin opetusrakennuksissa on tekniikan opetusta.

Simuloinneissa käytetyt ilmanvaihdon säätöstrategiat olivat vakioilmavirtailmanvaihto ilman jäähdytystä (A) sekä yleisesti koulurakennuksissa käytössä oleva vakioilmavirtailmanvaihtojärjestelmä jäähdytyksellä (B), tarpeen mukainen ilmanvaihto läsnäolo-ohjauksella (C) ja tarpeen mukainen ilmanvaihto CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella (D ja E). Jälkimmäisestä tapauksesta tehtiin kaksi erilaista simulaatiota, joissa toisessa minimi-ilmamääränä käytettiin yleisen käytännön mukaista arvoa, jolloin luokkahuoneen ilmamäärä vaihtuu kerran kahdessa tunnissa (D). Toisessa tapauksessa (E) ilmamäärän minimiarvoksi asetettiin rakentamismääräyskokoelman D2 mukaisesti ulkoilmavirta 0,35 (dm<sup>3</sup>/s)/m<sup>2</sup>, joka kyseisessä luokassa vastasi ilmamäärää 25,4 l/s.

### Vaikutukset sisäilmasto-olosuhteisiin

Simuloinneissa lämpötilan raja-arvoina käytettiin D2:n mukaisia 21 / 25 °C arvoja. Lämpötilan osalta luokkahuoneen lämpötila säilyi kaikissa tapauksissa alle 25 °C:een. Jäähdytystä ei juurikaan tarvittu. Simulointien tuloksissa jäähdytykseen kului pieni määrä energiaa käytettäessä tarpeenmukaista ilmanvaihtoa lämpötila- ja CO<sub>2</sub>- ohjauksella (tapaukset D ja E). Näissä tapauksissa lämpötila pääsi nousemaan 25 °C:een ja joitakin kertoja muutaman kymmenyksen yli, jolloin tuloilma alkoi jäähtyä. Raja-arvolämpötilan pienet ylitykset johtuivat simulointiohjelmasta ja sen reagoinnista. Tapauksissa A ja B selvitettiin, tarvitaanko luokkahuoneissa jäähdytystä. Tulosten perusteella voidaan todeta, että luokkahuoneiden ilmanvaihto voitaisiin toteuttaa ilman jäähdytystä tilanteissa, joissa luokkien todellinen kuormitus jää selvästi mitoituskuormitusta alhaisemmaksi, sillä tapauksissa A ja B luokkahuoneen lämpötila oli ko-

ko ajan alle + 23,5 °C. Käytettäessä luokkahuoneita kesäaikana on tilanne aivan toinen ja jäähdtyystä tarvitaan varmasti. Koska simuloinneissa ei käytetty käyttöajan ulkopuolista ilmanvaihtoa lainkaan, vaikuttaa se hieman luokkahuoneessa vallitsevaan lämpötilaan käyttöajan alussa. Tällä on hieman vaikutusta siihen, millaiseksi lämpötila muodostuu käyttöaikana.

Hiilidioksidipitoisuuden osalta simuloinneissa käytettiin raja-arvoja 400 / 1 200 ppm. Käytettäessä säätöstrategiana vakioilmavirtailmanvaihtoa (A ja B) tai tarpeen mukais- ta ilmanvaihtoa läsnäolo-ohjauksella (C) hiilidioksidipitoisuus säilyi koko käyttöajan alle 700 ppm:ssa, sillä ilmanvaihto oli käyttöaikana näissä tilanteissa aina täydellä teholla. Käytettäessä säätöstrategiana tarpeen mukaista ilmanvaihtoa CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella hiilidioksidipitoisuus nousi 1200 ppm:aan noin kolmen tunnin käytön jälkeen ja pysyi siellä laskien vasta viimeisten käyttötuntien aikana, jolloin luokan kuormitus laski. Hiilidioksidipitoisuuden nousu näillä säätöstrategioilla johtui siitä, että tuloilmavirran oli mahdollista vaihdella minimi- ja maksimiarvojen välillä portaattomasti ja hiilidioksidipitoisuutta käytettiin ohjaustapana. Sillä, että ilmanvaihto ei ollut lainkaan päällä käyttöajan ulkopuolella, ei ollut vaikutusta hiilidioksidipitoisuuksien lähtöarvoihin, vaan käyttöajan alussa hiilidioksidipitoisuus oli jokaisessa tapauksessa 400 ppm.

#### Vaikutukset tarvittaviin ilmamääriin

Tapauksissa, joissa käytettiin vakioilmavirtailmanvaihtoa (A ja B) sekä tarpeenmukaista ilmanvaihtoa läsnäolo-ohjauksella (C) tulo- ja poistoilmavirrat olivat joko minimi-ilmavirta 25,4 l/s tai maksimi-ilmavirta 150 l/s. Käytännössä ilmanvaihto oli käyttöaikana aina maksimiarvossa, sillä läsnäolo-ohjauksessa käytetty viiveaika johtaa siihen, että ilmanvaihto ei ehdi oppituntien välissä laskemaan pienemmälle teholle. Käytettäessä tarpeenmukaista ilmanvaihtoa CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella (tapaukset D ja E) ilmavirrat pystyivät vaihtelevaan portaattomasti välillä 25,4 – 150 l/s (D) tai välillä 19,3 – 150 l/s (E). Johtuen luokkien alhaisesta kuormitusasteesta ja sitä kautta alhaisesta lämpötilasta ja hiilidioksidipitoisuudesta ilmavirrat vaihtelivat näissä tapauksissa luokan käyttöaikana noin 20 – 60 l/s välillä, eli olivat huomattavasti muita ohjaustapoja alhaisempia.

## Vaikutukset energiankulutukseen

Energiankulutuksessa vertailukohteena käytettiin tapausta B eli vakioilmavirtailmanvaihtoa jäähdytyksellä säätöstrategiaa, sillä se on koulurakennuksissa yleisesti käytössä oleva ohjaustapa. Tässä tapauksessa ilmanvaihdon energiankulutus oli 48,8 kWh/m<sup>2</sup>. Energiankulutus oli sama myös tapauksessa A, joka oli muuten vastaava, mutta jäähdytys ei ollut käytössä. Koska jäähdytystä ei tarvittu, olivat nämä tapaukset energiankulutukseltaan identtisiä. Tapauksessa C käytettiin tarpeenmukaista ilmanvaihtoa läsnäolo-ohjauksella, joten ilmanvaihto oli päällä tunnin lyhyemmän ajan verrattuna tapauksiin A ja B. Ilmamäärä oli kuitenkin edellä mainittuja tapauksia vastaava. Yhden tunnin muutos ilmanvaihdon käyntiaikaan säästi hieman energiaa energiankulutuksen ollessa 44,5 kWh/m<sup>2</sup> eli noin 91 % vertailukohteesta.

Tapauksissa D ja E eli tarpeenmukaisissa ilmanvaihdossa CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella saatiin selviä vaikutuksia energiankulutuksiin. Tapauksessa D, jossa minimiilmavirta määräytyi sen mukaan, että luokkahuoneen ilma vaihtui kerran kahdessa tunnissa, energiankulutus oli 9,5 kWh/m<sup>2</sup> eli 21 % vertailukohteesta, ja tapauksessa E, jossa minimiilmavirta määräytyi D2:n asettaman alarajan mukaisesti, energiankulutus oli 8,5 kWh/m<sup>2</sup> eli 17 % vertailukohteesta.

## Energiankulutuksen taloudelliset vaikutukset

Tapausten energiankulutusten hinnat vaihtelivat välillä 3,4 – 0,5 €/m<sup>2</sup> ollen alhaisimmat käytettäessä tarpeenmukaista ilmanvaihtoa CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella ja korkeimmat käytettäessä vakioilmavirtailmanvaihtoa. Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla voidaan päästä todella merkittäviin taloudellisiin säästöihin. Esimerkiksi jos luokkahuoneiden yhteenlaskettu pinta-ala on noin 1 500 m<sup>2</sup>, vaihtelevat ilmanvaihdon energiakustannukset nyt tutkitun ajanjakson aikana (1.9.-30.4. ja käyttöaika klo 7-19) noin 800 €n ja vajaan 5 000 €n välillä. Jos otetaan huomioon ilmanvaihdon kesäaikana kuluttama energia sekä ilmanvaihdon käyttöajan ulkopuolella (19-7) kuluttaman energian määrä ja kustannukset, ovat absoluuttiset euromäärät korkeampia, mutta kustannusten ero eri ohjaustapojen välillä säilyy ennallaan.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tulokset osoittavat, että tarpeenmukaista ilmanvaihtoa käyttämällä voidaan päästä todella merkittäviin energian säästöihin. Suurimmillaan energian säästö oli 83 % tarpeenmukaisen ja vakioilmavirtailmanvaihdon välillä. Taloudellisesti tarkasteltuna energiansäästöt tarkoittavat tuhansien eurojen vuotuisia säästöjä jo pienissäkin koulurakennuksissa valittaessa ilmanvaihdoksi järjestelmä, jossa ilmaa tuodaan vain tarvittava määrä oikeaan paikkaan ja aikaan.

Tarkasteltaessa ilmanvaihdon vaikutuksia sisäilmasto-olosuhteisiin voidaan todeta, että ilmamääriä voidaan laskea ja siitä huolimatta saavuttaa määräysten mukainen sisäilman laatu. Se, että ilmamääriä voidaan merkittävästi laskea mitoitusarvoihin nähden, johtuu siitä, että luokkien kuormitusasteet ovat alhaisia. Varsinkaan korkea-kouluissa on tutkimusten mukaan harvoin tilanne, jossa luokkien kuormitus olisi mitoitusarvossa. Tiloissa, joissa kuormitus vaihtelee runsaastikin, on todella perusteltua käyttää tarpeenmukaista ilmanvaihtoa. Tällöin käytetään kulloisenkin tilanteen vaatimia ilmamääriä ja saavutetaan tavoitellut sisäilmasto-olosuhteet energia- ja kustannustehokkaasti.

Jos sisäilmasto-olosuhteet halutaan määräysten mukaisia olosuhteita paremmiksi, täytyy se ottaa huomioon ilmanvaihdon ohjaustapaa valittaessa ja sisäilmastotavoitteita asetettaessa. Tulosten perusteella tarpeenmukainen ilmanvaihto CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella olisi varteenotettava vaihtoehto koulurakennusten ilmanvaihtojärjestelmäksi. Järjestelmiä ja ohjaustapoja valittaessa on tärkeää muistaa, että sisäilmaolosuhteista ei kannata tinkiä ilmanvaihdon energiankulutuksen vähentämiseksi, sillä alhaisemmasta energiankulutuksesta kertyneet säästöt kuluvat nopeasti, jos tilojen käyttäjien työteho ja viihtyvyys laskevat. Tutkimukset osoittavat, että sisäilmasto-olosuhteilla on vaikutusta työn tuottavuuteen, joten tärkeintä on aina huolehtia siitä, että tiloissa on kulloisenkin käyttötilanteen vaatima sisäilmasto. Kun ilmanvaihtojärjestelmä toimii tarpeenmukaisesti, on edellä mainittu tilanne aina saavutettavissa energia- ja kustannustehokkaasti.

Tarpeenmukainen ilmanvaihtojärjestelmä on haastava sen vuoksi, että ilmamäärät vaihtelevat suuresti. Nyt saaduissa tuloksissa ilmamäärien suurin sallittu vaihtelevuus



oli välillä 19,3 – 150 l/s. Tämä asettaa vaatimuksia sekä päätelaitteille että ilmanvaihdon muille osille, kuten säätöpelleille. Päätelaitteiden toiminta-alueen tulisi olla laaja, jotta ilmanvaihdon ilma tulisi myös pienillä ilmamäärillä oleskeluvyöhykkeelle ja toisaalta suurilla ilmamäärillä oleskeluvyöhykkeelle ei saisi aiheutua vetoa. Ilmanvaihtojärjestelmien valmistajat pyrkivät vastaamaan haasteisiin. Esimerkiksi Oy Swegon Ab:lla on tarpeenmukaiseen ilmanvaihtoon suunniteltuja ratkaisuja, kuten WISE – järjestelmä. WISE- tulo- ja poistoilman päätelaitteilla sisäilmasto-olosuhteet voidaan järjestää energiatehokkaasti. Päätelaitteiden lisäksi voidaan etenkin suuremmilla ilmavirroilla käyttää säätöpeltejä, jotka säätelevät ilmamääriä tarpeen mukaisiksi. Ilmavirtoja voidaan säätää mm. lämpötilan, CO<sub>2</sub>-pitoisuuden tai läsnäolon perusteella. Järjestelmä toimii laajalla ilmamääräalueella ja soveltuu sen vuoksi hyvin tarpeenmukaiseen ilmanvaihtoon. Koska tarpeenmukainen ilmanvaihto toimii hyvin pitkälle erilaisten mittauksien perusteella, täytyy mitattavat suureet eli käytettävät ohjaustavat miettiä tarkoin ja käytettävien laitteiden tulee olla luotettavasti toimivia sekä oikein asennettuja ja huollettuja.

Nykyisin rakennuksissa vallitsevia sisäilmasto-olosuhteita ja energiankulutuksia voidaan simuloida uuden rakennuksen suunnittelun yhteydessä sekä myös korjaustapauksissa. Simulointituloksien perusteella saadaan tärkeää tietoa siitä, miten tilan sisäilmasto-olosuhteet ja energiankulutus tulevat käyttäytymään käytön aikana. Todelliset tulokset ja simuloinnilla saadut tulokset eroavat varmasti hieman toisistaan, mutta esimerkiksi Toivasen tutkimus (2013) osoittaa, että simuloinnilla päästään riittävälle tarkkuudelle, jotta ratkaisuja voidaan tehdä simulointituloksiin pohjautuen.

## LÄHTEET

Etelä-Savon Energia Oy. Kaukolämpöhinnasto 1.1.2013.

Etelä-Savon Energia Oy. Sähkön myyntihinnat 1.1.2013.

Fahlén, Per. 2010. Demand-controlled ventilation dvc – limitations and definitions. CLIMA 2010. Antalya. 9.-12.5.2010.

Hägglom, Henna & Hongisto, Valtteri & Haapakangas, Annu & Koskela, Hannu. 2011. Lämpötilan vaikutus työsuoriutumiseen toimisto-olosuhteissa - laboratoriotutkimus. Työterveyslaitos.

Koroleva, Anastasiia. 2012. Efficiency of heat recovery units in ventilation. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Building services engineering. Bachelor's thesis.

LVI 30-40008. 1991. Muuttuvilmavirtaiset ilmastointijärjestelmät. Rakennuskirja Oy.

Maula, Henna & Haapakangas, Annu & Moberg, Viivi & Hongisto, Valtteri & Koskela, Hannu. Ilmanvaihdon vaikutus työsuoriutumiseen ja viihtyvyyteen toimistotyössä – laboratoriokoe. Työterveyslaitos. Sisäilmastoseminaari 13.3.2013. Helsinki.

Maripuu, Mari-Liis. 2009. Demand controlled ventilation (DCV) systems in commercial buildings -Functional Requirements on Systems and Components. Chalmers university of technology. Building Services Engineering. Thesis for the degree of doctor of philosophy.

Maripuu, Mari-Liis. 2011. Demand controlled ventilation for better IAQ and energy efficiency. Rehva journal march 2011.

Mysen, Mads. 2005. Ventilation systems and their impact on indoor climate and energy use in schools. Studies of air filters and ventilation control. Norwegian university

of science and technology. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor Ingenior.

Persily, Andrew & Musser, Amy & Emmerich, Steve & Taylor, Michael. 2003. Simulations of indoor air quality and ventilations impacts of demand controlled ventilation in commercial and institutional buildings. National Institute of standards and technology. USA.

Seppänen, Olli. 2004. Ilmastoinnin suunnittelu. Forssa: Forssan Kirjapaino Oy/Suomen LVI-liitto.

Seppänen, Olli & Hongisto, Valtteri & Holopainen, Rauno & Kemppilä, Sari & Korhonen, Pirjo & Lahtinen, Marjaan & Lehtovaara, Jorma & Niemelä, Raimo & Palonen, Jari & Penttilä, Jopi & Nykyri, Erkki & Reijula, Kari & Saari, Arto & Siitonen, Tuomo & Takki, Tarja & Tissari, Topi & Tuomainen, Marianna & Valkama, Esko. Tuottava toimisto 2005 loppuraportti. 2004. Teknillinen korkeakoulu. Espoo. Raportti B77.

Sisäilmastoluokitus 2008. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. 2008. Sisäilmayhdistys ry.

Suomen rakentamismääräyskokoelma D2. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 2012. 2011. Helsinki: Ympäristöministeriö, rakennetun ympäristön osasto.

Säteri, Jorma 2013. Energiatehokkaat sisäilmakorjaukset. Korjausrakentaminen 13 – tapahtuma. Helsinki 5.2.2013.

Toivanen, Timo. 2013. Suutinkonvektoreiden ja läsnäolo-ohjatun IMS-järjestelmän toimivuus opetustiloissa. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Ympäristötekniikan koulutusohjelma, kestävä energiatalous. YAMK-lopputyö.

Työterveyslaitos. Laadukas sisäympäristö. www-dokumentti.  
[www.ttl.fi/tyoymparisto/sisailma\\_ja\\_sisaymparisto/Documents/Laadukas\\_sisaymparisto\\_abc.pdf](http://www.ttl.fi/tyoymparisto/sisailma_ja_sisaymparisto/Documents/Laadukas_sisaymparisto_abc.pdf). Luettu 10.9.2013.

Törnblom, Kristian. 2013. Tarpeenmukainen ilmanvaihto luokkatiloissa. Metropolia ammattikorkeakoulu. Talotekniikan koulutusohjelma. Insinöörityö.

Vaisala Oy. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon optimointi alkaa mittausteknologiasta. 2010. Sovelluskuvaus.