



TARPEENMUKAISEN ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄN ENERGIANSÄÄSTÖ- POTENTIAALI

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2023

Jarno Krapa

Tarkastajat: Dosentti, TkT Ahti Jaatinen-Värri

Diplomi-insinööri Marianna Tuomainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Jarno Krapa

Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän energiansäästöpotentiaali

Energiatekniikan diplomityö

2023

59 sivua, 17 kuvaa ja 15 taulukkoa

Tarkastajat: Dosentti, TkT Ahti Jaatinen-Värri ja diplomi-insinööri Marianna Tuomainen

Avainsanat: DCV-järjestelmä, energiansäästöpotentiaali, ilmanvaihto, energiatehokkuus

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tutkia tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän (DCV-järjestelmän) energiansäästöpotentiaalia laskennalliseen vakioilmavirtaiseen ilmanvaihtojärjestelmään (CAV-järjestelmään) verrattuna. Työssä tutkittiin Helsingissä sijaitsevan lasten päiväkoti Yliskylän DCV-järjestelmän toteutunutta energiankulutusta neljän viikon tarkastelujaksolla ja päivän tarkastelujaksolla. Työssä tutkittiin myös DCV-järjestelmän säätötapojen vaikutusta ilmanvaihdon energiankulutukseen sekä säätötapojen vaikutusta hiilidioksidipitoisuuteen.

Tämän työn laskennassa hyödynnettiin Nuuka -järjestelmään tallennettua DCV-järjestelmän mittaustietoa. Mittaustieto kerättiin Excel -taulukkolaskentaohjelmaan, jossa laskettiin ilmanvaihtokoneiden puhaltimien sähköenergiankulutus sekä ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin lämpöenergiankulutus jokaiselle mittaushetkelle.

Diplomityössä tarkastellun neljän viikon tarkastelujakson perusteella muuttuvapaineohjattulla DCV-järjestelmällä voidaan saavuttaa 46–77 % säästö puhaltimien sähköenergiankulutuksessa ja 29–50 % säästö ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin lämpöenergiassa. Päivän tarkastelujaksolla puhaltimien sähköenergiankulutuksen säästöpotentiaali oli 28–76 %. Näiden tulosten perusteella voidaan todeta, että DCV-järjestelmällä voidaan saavuttaa huomattavat säästöt energiankulutuksessa sisäilmaolosuhteista tinkimättä.

DCV-järjestelmän säätötavoissa vertailtiin vakiopainesäätöisen ja muuttuvapainesäätöisen DCV-järjestelmän energiankulutusta. Tarkastelu tehtiin yhden päivän tarkastelujaksolla ja säätötapojen tarkastelu kohdennettiin samalle viikonpäivälle. Tutkimuksen perusteella muuttuvapainesäätöisellä DCV-järjestelmällä voidaan saavuttaa 33 % säästö puhaltimien sähköenergiankulutuksessa vakiopainesäätöiseen järjestelmään verrattuna. Säätötavalla ei todettu olevan vaikutusta tilan hiilidioksidipitoisuuteen.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Engineering Science

Energy Technology

Jarno Krapa

Energy saving potential of demand controlled ventilation

Master's thesis

2023

59 pages, 17 figures and 15 tables

Examiners: Associate Professor Ahti Jaatinen-Värri and MSE Marianna Tuomainen

Keywords: DCV, CAV, energy saving potential, ventilation, carbon dioxide

The purpose of this master's thesis was to study the energy saving potential of the demand controlled ventilation system (DCV). This thesis studied the energy consumption of the DCV system of a kindergarten located in Helsinki over a four-week period and one-day period and compared it to the calculated energy consumption of the constant airflow ventilation (CAV) system. This thesis also studied the effect of the DCV adjustment methods on the energy consumption of the ventilation system and carbon dioxide concentration of the indoor air.

The actual measurement data of the DCV system was obtained from the Nuuka portal. Using the measurement data, the electrical energy consumption of the fans of the ventilation units of the DCV and CAV systems and the thermal energy consumption of the heating coil were calculated.

Based on the four-week review period, the DCV system achieved savings of up to 77 % in electrical energy of fans and up to 50 % in the thermal energy of heating coils. Based on the results of the one-day review, the DCV system achieved savings up to 76 % of the fans energy consumption. Based on this study, the DCV system can achieve considerable savings in electricity and heat energy consumption compared to the CAV system.

The thesis compared two DCV adjustment methods, the constant pressure and variable pressure adjusted DCV systems. The energy consumption data of three consecutive Fridays was assessed. Based on this study, the variable pressure adjusted DCV system can achieve a 33 % energy saving potential of the fans electrical energy consumption compared to the constant pressure adjusted DCV system. The adjustment methods were found to have no effect on the carbon dioxide concentration of the indoor air.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

c_p	ominaislämpökapasiteetti	[J/(kgK)]
n	pyörimisnopeus	[1/s]
P	teho	[W]
q_v	tilavuusvirta	[m ³ /s]
W	energiankulutus	[kWh]
t	lämpötila	[°C]

Kreikkalaiset

ρ	tiheys	[kg/m ³]
Δt	lämpötilaero	[°C, K]

Lyhenteet

CAV	Constant Air Volume
DCV	Demand Controlled Ventilation
LPK	Lasten päiväkot
LTO	Lämmön talteenotto
SFP	Specific Fan Power
IMS	Ilmamääräsäädin
FV	Säätöventtiili
TE	Lämpötilanmittaus
ppm	Parts Per Million

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	5
2	Energiatehokkuus	7
2.1	Energiatehokkuustavoitteet Euroopan Unionissa	7
2.2	Energiatehokkuustavoitteet Suomessa	8
2.3	Energian käyttö rakennuksissa.....	9
3	Ilmanvaihto.....	10
3.1	Poistoilman lämmöntalteenotto.....	11
3.2	Tarpeenmukainen ilmanvaihtojärjestelmä	11
3.3	Vakioilmavirtajärjestelmä.....	12
3.4	Aikaohjelma	12
3.5	Ilmanvaihdon energiankulutus.....	13
3.6	Puhaltimien energiankulutus.....	13
3.7	Ilmanvaihdon lämmityspatterin teho ja lämpöenergia.....	14
4	DCV-järjestelmän ilmavirtojen hallinta	16
4.1	IMS-järjestelmä.....	16
4.2	ON/OFF-tehostusjärjestelmä.....	17
4.3	DCV-järjestelmän painesäätö.....	18
4.4	CAV-järjestelmä	19
5	Aikaisemmat tutkimukset DCV-järjestelmien energiatehokkuudesta.....	20
5.1	Merema et al.....	21
5.2	Mysen et al.	22
5.3	Wachenfeldt et al.....	23
5.4	Ahmed et al.	24
5.5	Bergström.....	25
5.6	Tutkimusten yhteenveto	25
6	Päiväkoti Yliskylä	27

6.1	Ilmanvaihtojärjestelmä.....	28
6.2	Nuuka AI Air.....	29
7	Mittausdata ja energiankulutuksen laskenta.....	30
7.1	Energiankulutuksen lähtötiedot.....	30
7.2	Mittausdata.....	31
7.3	Mittausdatan käsittely.....	33
7.4	CAV-järjestelmän laskenta.....	34
7.5	Tehosta energiaksi.....	34
7.6	Ilmamäärät vuorokauden kokonaisilmamääräksi.....	35
8	DCV-järjestelmän energiansäästöpotentiaali.....	36
8.1	Neljän viikon tarkastelu.....	36
8.1.1	Puhallinenergia.....	36
8.1.2	Ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden energiankulutus.....	38
8.2	Vuorokauden tarkastelu.....	39
8.2.1	CAV- ja DCV-järjestelmien ilmamäärät.....	39
8.2.2	Puhaltimien energiankulutus.....	40
8.3	DCV-järjestelmän säätötapojen vaikutus energiankulutukseen.....	41
8.4	Sähkö- ja lämmitysenergian kustannussäästöt.....	44
9	Huoneilman hiilidioksidipitoisuus.....	46
9.1	Hiilidioksidipitoisuus.....	46
9.2	Sisäilman laatu ilmanvaihtojärjestelmästä riippuen.....	48
10	Rakennuksen toteutunut käyttäjämäärä.....	49
11	Johtopäätökset.....	52
	Lähteet.....	57

Kuvaluettelo

Kuva 1: Energiatohokkuustoimenpiteiden vaikutukset (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2019)

Kuva 2: IMS tehostusalueen periaatekuva

Kuva 3: Halton IMS-säädin ultraäänimittauksella (Halton)

Kuva 4: Halton PTS/A ilmavirran säätöpelti toimilaitteella (Halton)

Kuva 5: ON/OFF tehostusalueen periaatekuva

Kuva 6: Köppen-Geiger -kartta (Kottek, et al., 2006)

Kuva 7: LPK Yliskylä, julkisivu länteen (Helsingin kaupungin rakennusvirasto, 2016)

Kuva 8: LPK Yliskylä, julkisivu etelään (Helsingin kaupungin rakennusvirasto, 2016)

Kuva 9: Ilmanvaihtokone I201TK LPK Yliskylä 9.11.2022

Kuva 10: I201TK tuloilmamäärä neljän viikon tarkastelujaksolla

Kuva 11: I205TK DCV- ja CAV-järjestelmien ilmamäärät 26.10.2022

Kuva 12: I201TK tulokanavapaine 9.9.2022 ja 16.9.2022

Kuva 13: Tila 108 hiilidioksidipitoisuus

Kuva 14: Tila 122 hiilidioksidipitoisuus

Kuva 15: LPK Yliskylä toteutunut käyttäjämäärä 1.-30.9.2022

Kuva 16: LPK Neulanen toteutunut käyttäjämäärä 1.8.2021-30.6.2022

Kuva 17: Tupa 108, hiilidioksidipitoisuus vakio- ja muuttuvapainesäätöisessä DCV-järjestelmässä

Taulukkuuettelo

Taulukko 1: Mysen et al. (2005) tutkimuksen DCV-järjestelmien energiankulutus CAV-järjestelmään verrattuna

Taulukko 2: DCV-järjestelmistä tehtyjen tutkimuksien energiansäästöpotentiaali

Taulukko 3: LPK Yliskylä ilmanvaihtokoneet

Taulukko 4: Ilmanvaihtokoneiden puhaltimien energiakulutus

Taulukko 5: Ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden lämpöenergiankulutus

Taulukko 6: Ilmanvaihtokoneiden vuorokauden kokonaisilmamäärä 26.10.2022

Taulukko 7: DCV-järjestelmän ilmamäärät 26.10.2022 laskennallisen CAV-järjestelmän ilmamääriin verrattuna

Taulukko 8: Ilmanvaihtokoneiden puhaltimien energiankulutus

Taulukko 9: Ilmanvaihtokoneen I201TK kokonaisilmamäärät tarkastelupäivinä

Taulukko 10: Ilmanvaihtokoneen I201TK puhaltimien energiankulutus tarkastelupäivänä

Taulukko 11: DCV-järjestelmien säätötapojen erot I201TK ilmanvaihtokoneen puhaltimien energiakulutuksessa

Taulukko 12: Ilmanvaihtokoneiden puhaltimien sähköenergian kustannussäästö

Taulukko 13: Ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden lämpöenergian kustannussäästö

Taulukko 14: Hiilidioksidipitoisuudet huoneilmassa

Taulukko 15: DCV-järjestelmän energiansäästöpotentiali

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän energiansäästöpotentiaalia vakioilmavirtaiseen järjestelmään verrattuna. Tarpeenmukaisella ilmanvaihtojärjestelmällä voidaan tehostaa ilmanvaihtoa kuormituksen kasvaessa ja pienentää ilmavirtaa tilojen ollessa käyttämättä. Säättämällä ilmanvaihto tarpeenmukaisesti varmistetaan riittävä ilmanvaihto erilaisissa kuormitustilanteissa ja säästetään ilmanvaihtojärjestelmän käyttämää sähkö- ja lämmitysenergiaa, kun tilat ovat käyttämättä. Tässä työssä tarpeenmukaisesta ilmanvaihtojärjestelmästä käytetään lyhennettä DCV-järjestelmä, joka on lyhenne sanoista Demand Controlled Ventilation.

Tässä työssä DCV-järjestelmällä saavutettavia energiasäästöjä verrataan vakioilmavirtaiseen järjestelmään. Vakioilmavirtainen järjestelmä tuottaa tiloihin vakioilmavirran kuormituksesta riippumatta, joten se toimii koko toiminta-ajan suunnitelluilla ja säädetyillä ilmavirroilla. Tässä työssä vakioilmavirtaisesta ilmanvaihtojärjestelmästä käytetään lyhennettä CAV-järjestelmä, joka on lyhenne sanoista Constant Air Volume.

Työssä tarkastellaan DCV-järjestelmän puhaltimien energiankulutusta sekä ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin energiankulutusta. Työn lähtökohtaisena oletuksena on, että vertailtavat DCV- ja CAV-järjestelmien ilmanvaihtokoneet ja kanaviston painehäviöt vastaavat toisiaan, eikä DCV-järjestelmän ilmamääräsäätimien painehäviöitä oteta huomioon. DCV- ja CAV-järjestelmien ilmanvaihtokoneiden ja kanaviston painehäviöiden vastatessa toisiaan, on puhaltimien sähköenergiankulutus laskettavissa ja vertailukelpoinen.

Toisena tarkastelun kohteena on DCV-järjestelmän ohjaustavan vaikutukset ilmanvaihtokoneiden puhaltimien energiankulutukseen. Tutkittavina säätötapoina on vakiopainesäätöinen ja muuttuvapainesäätöinen DCV-järjestelmä. Työssä tarkastellaan DCV-järjestelmän säätötapojen puhallinenergiakulutuksia sekä verrataan niitä CAV-järjestelmän puhaltimien energiankulutukseen.

Työn tilaajan toimi Helsingin kaupungin kaupunkiympäristön toimialan tilat-palvelu. Helsingin kaupungin Tilat-palvelu rakennuttaa vuosittain noin 20 uudisrakennusta sekä peruskorjaa olemassa olevia rakennuksia. Helsingin kaupungin uusien ja peruskorjattavien rakennusten ilmanvaihto suunnitellaan tarpeenmukaiseksi joko tehostuspelleillä tai

ilmamääräsäätimillä (Helsingin kaupunki a, 2022). Rakennushankkeen yhteydessä rakennukseen suunnitellaan ja toteutetaan kattava mittarointijärjestelmä, jonka tarkoituksena on mm. tukea energiakäytön seuranta ja hallintaa, antaa tietoa järjestelmien toimivuudesta sekä mahdollistaa säätötoimenpiteiden ja kulutustottumusten vaikutuksien havainnollistaminen. (Helsingin kaupunki b, 2022). Tässä työssä hyödynnetään tutkittavan rakennuksen ilmastovaihtojärjestelmien toiminnasta kerättyä mittausdataa ja suoritetaan sen avulla laskennallisia vertailuita DCV- ja CAV-järjestelmien energiankulutuksesta.

Tämän työn tavoitteena on selvittää DCV-järjestelmän energiansäästöpotentialiaali sekä verrata työn tuloksia muihin aiheesta tehtyihin tutkimuksiin. Tässä työssä ei oteta kantaa, miten DCV-järjestelmä kannattaisi suunnitella tai onko tutkittavien kohteiden ilmavirrat suunniteltu oikein. Tässä työssä hyödynnetään DCV-järjestelmien mitattua dataa, joka on saatavilla Nuuka -järjestelmästä.

Työ aloitetaan selvittämällä, millaisia tavoitteita energiankulutuksesta on asetettu Euroopassa, Suomessa ja Helsingissä. Työssä käydään läpi aikaisempien samasta aiheesta tehtyjen tutkimuksien tuloksia sekä niiden vertailukelpoisuus tähän työhön. Varsinaisessa tutkimusosuudessa tutkitaan toteutuneen DCV-järjestelmän energiankulutusta CAV-järjestelmään verrattuna. Toisena tarkastellaan DCV-järjestelmän säätötavan merkitystä puhaltimien energiankulutukseen ja tilojen sisäilman hiilidioksidipitoisuuteen. Työn lopuksi pohditaan suunnitellun käyttäjämäärän ja todellisen käyttäjämäärän eroja sekä niiden vaikutuksia ilmanvaihdon energiankulutukseen.

2 Energiatehokkuus

Ilmastonmuutos on yleisesti tiedostettu ongelma, joka uhkaa koko maapalloa. Ilmastonmuutoksen hidastamiseksi eri tahot kuten Euroopan Unioni, Suomi ja kunnat ovat luoneet omia tavoitteitaan energiankulutuksen vähentämiseksi. Jopa yksittäiset yritykset ovat luoneet omia tavoitteitaan vähentää energiakulutusta ja kasvihuonepäästöjä. Yritykset ovat ottaneet energiatehokkuuden omiin arvoihinsa ja mainostavat tuotteitaan energiatehokkaina ja ympäristön kannalta kestävinä. Tästä esimerkkinä ovat ilmanvaihtokonevalmistajat kuten Koja ja Intervent, jotka verkkosivujensa etusivulla mainostavat ilmanvaihtokoneidensa energiatehokkuutta.

2.1 Energiatehokkuustavoitteet Euroopan Unionissa

Joulukuussa 2018 tuli voimaan Euroopan Unionin energiatehokkuusdirektiivi (EU) 2018/2002, johon on päivitetty vuoden 2012 energiatehokkuusdirektiivin säännöksiä sekä lisätty uusia vaatimuksia. Päivitetty energiatehokkuusdirektiivi asetti yleistavoitteeksi vähintään 32,5 % energiatehokkuuden parantaminen vuodesta 2005 vuoteen 2030 mennessä. Päivitettyyn energiatehokkuusdirektiiviin on myös lisätty maininta mahdollisesta energiatehokkuustavoitteen korottamisesta vuoteen 2023 mennessä. (Euroopan komissio, 2018 a.)

Energiatehokkuusdirektiivin mukaan kaikkien maiden on laadittava 10-vuotinen energia- ja ilmastostrategia, jossa kerrotaan, millaisilla toimilla se aikoo parantaa energiatehokkuutta ja uusiutuvien energialähteiden käyttöä sekä kasvihuonepäästöjä koskevia tavoitteitaan vuoteen 2030 mennessä. Heinäkuussa 2021 Euroopan komissio hyväksyi ehdotuksen energiatehokkuusdirektiivin uudelleenlaatimisesta. Uudessa energiatehokkuusdirektiivissä esitettiin sitovaksi tavoitteeksi vähentää energiakulutusta 9 % vuoteen 2030, verrattuna vuoden 2020 vertailuskenaarion ennusteisiin (Euroopan komissio, 2018 a).

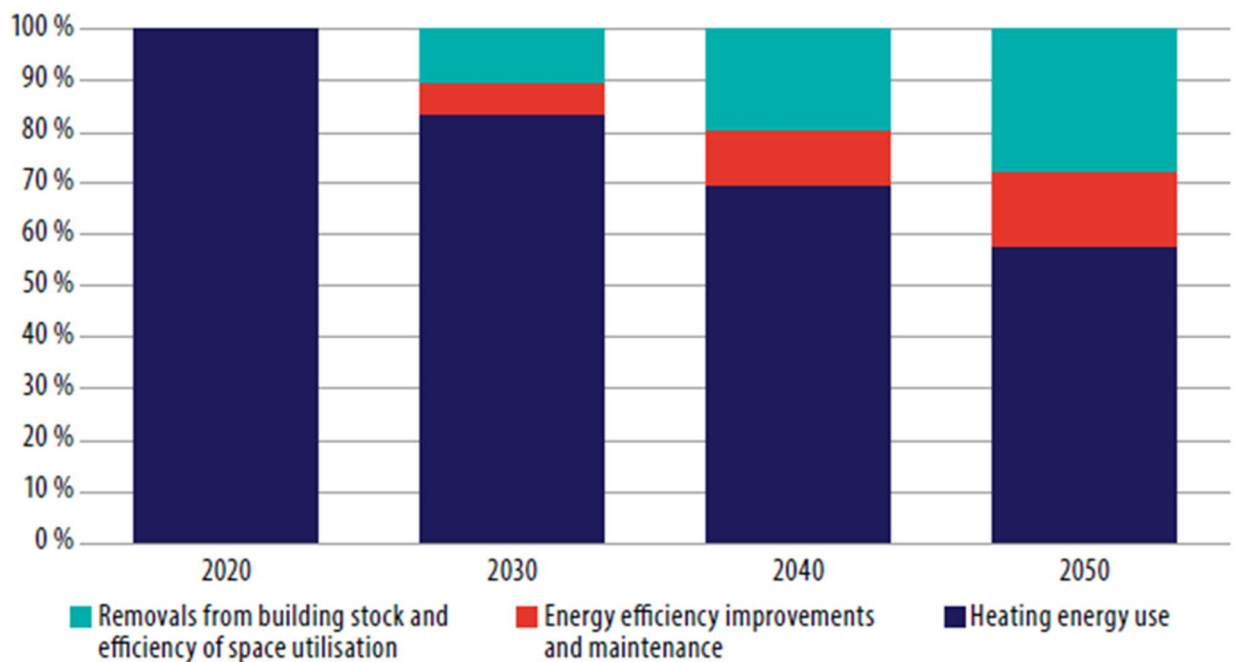
Toukokuussa 2022 Euroopan komissio ehdotti sitovan energiatehokkuustavoitteen nostamista 9 prosentista 13 prosenttiin (Euroopan komissio, 2018 a). Ehdotus on tätä työtä tehdessä Euroopan parlamentin käsittelyssä. Koska suuntana ovat olleet kiristyvät

energiatohokkuustavoitteet, voidaan olettaa, että ehdotus hyväksytään ja sitova tavoite nousee 13 %:iin.

2.2 Energiatohokkuustavoitteet Suomessa

EU:n tavoitteiden mukaan Suomen tulisi vähentää kasvihuonepäästöjä 39 % vuoden 2005 tasosta vuoteen 2030 mennessä, joka vastaa 20,6 Mt CO₂-ekv. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2019, p. 42). Suomen energia- ja ilmastosuunnitelmassa on esitetty arvioita rakennusten lämmitysenergiankäytölle tulevaisuudessa. Energia- ja ilmastostrategian lämmitysenergian tavoitetasot vuodelle 2030 ovat 54 TWh, vuodelle 2040 45 TWh ja vuodelle 2050 37 TWh. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2019.)

Kuvasta 1 on esitetty energiatoimien ja huollon sekä rakennuskannan vähentämisen ja tilankäytön tehokkuuden vaikutukset lämmitysenergian käyttöön. Suomen energia- ja ilmastostrategiassa on arvioitu rakennusmääräysten noudattamisen vähentävän rakennusten energiankäyttöä uusissa rakennuksissa 9,337 GWh ja peruskorjauksissa 3,810 GWh vuonna 2030 (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2019).



Kuva 1 Energiatohokkuustoimenpiteiden vaikutukset (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2019).

2.3 Energian käyttö rakennuksissa

Euroopan komission selvityksen mukaan rakennukset vastaavat yli 40 % energian kokonaiskäytöstä ollen suurin yksittäinen energiakuluttaja. Rakennusten käyttämän energian tuottaminen aiheuttaa yli 36 % energiaan liittyvistä kasihuonepäästöistä (Euroopan komissio, 2018 b). Rakennusten käyttämästä energiasta suuri osa käytetään hyvien sisäilmaolosuhteiden saavuttamiseen (Sandberg, 2016). Rakennuksissa energiaa käytetään mm. rakennuksen lämmittämiseen, ilmanvaihtoon, käyttöveden lämmittämiseen sekä valaistukseen. Lämmitys, jäähdytys ja lämpimän käyttöveden vaatima energia vastaa 80 % kansalaisten käyttämästä energiasta. (Euroopan komissio, 2018 b).

Euroopan komission selvityksen mukaan yli 75 % EU:ssa sijaitsevista rakennuksista eivät ole energiatehokkaita (Euroopan komissio, 2021). Komission selvityksen perusteella voidaan todeta, että rakennuskannassa on huomattava energiasäästöpotentiaali, jota on mahdollista hyödyntää. Rakennusten energiatehokkuutta on pyritty parantamaan lisäämällä lämmöneristyksen paksuutta sekä pienentämällä rakennuksen ilmanvuotolukua. Näiden toimien lisäksi optimoimalla LVI-järjestelmiä voidaan rakennusten energiatehokkuutta parantaa entisestään. (Merema, et al., 2018.) Energiakulutusta optimoidessa on tärkeää määrittää sisäilmaolosuhteiden sekä energiakulutuksen tavoitteet. Rakennuksen energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa arkkitehtonisten, rakenteellisten ja taloteknisten ratkaisuiden avulla. Energiakulutuksen optimoinnissa korostuu suunnittelijoiden välinen yhteistyö ja panostus parhaan kokonaisratkaisun saavuttamiseksi. (Sandberg, 2016.)

3 Ilmanvaihto

Ilmanvaihdon tarkoitus on varmistaa rakennuksen terveellinen ja hyvä sisäilma, poistamalla epäpuhtauksia poistoilmakanaviston kautta sekä tuomalla raitista ulkoilmaa tuloilmakanaviston kautta. Jäteilman sisältämät kaasumaiset ja hiukkasmaiset epäpuhtaudet ovat peräisin rakennusmateriaaleista sekä ihmisen aineenvaihdunnasta ja toiminnasta. Rakennuksen sisäilmaan kantautuu epäpuhtauksia myös rakennuksen ulkopuolelta kuten ulkoilmasta tai maaperästä. (Sisäilmayhdistys, 2008.)

Ilmanvaihto on yksi tärkeimmistä LVI-järjestelmän toiminnoista. Ihmisten viettäessä vuorokaudessa noin 90 % ajastaan sisätiloissa, he hengittävät 15–20 m³ sisäilmaa. Näin ollen puhtaalla sisäilmalla on suuri merkitys ihmisten suojelemiselle epäpuhtauksilta ja terveysriskeiltä. Ilmanvaihdolla tuskin pystytään koskaan poistamaan kaikkia sisäilman epäpuhtauksia, mutta ihmisperäisten epäpuhtauksien poistamiseen ilmanvaihdolla on suuri rooli. Ulkoilman, maaperän ja rakennusmateriaalien aiheuttamien epäpuhtauksissa tulisi kiinnittää huomiota epäpuhtauslähteiden vähentämiseen tai poistamiseen. Poistamalla epäpuhtauksien lähteet ei ilmanvaihtoa tarvitse mitoittaa epäpuhtauksien poistamiseen, joka säästää energiaa. (Sandberg, 2014.)

COVID-19:sta aiheutuneiden kansainvälisten ja kansallisten ohjeistusten mukaisesti rakennusten ilmanvaihto säädettiin Helsingissä ja muualla maailmassa toimimaan mitoitusilmavirralla vuorokauden ympäri. Kun COVID-19 pandemian alusta on nyt kulunut yli 2 vuotta ja ymmärrys leviämisestä ja tartuttavuudesta on lisääntynyt, on energianäkökulma mahdollista ottaa taas huomioon (Franco, et al., 2021).

Puhtaan sisäilman lisäksi ilmanvaihtoa voidaan käyttää tilojen lämmittämiseen lämmittämällä tuloilmaa tilan tavoitelämpötilaan tai sen yli. Ilmanvaihdolla toteutetusta lämmityksestä käytetään nimitystä ilmalämmitys. Vaikka tilojen lämmönjako ei olisikaan toteutettu ilmalämmityksellä, on ilmanvaihdolla olennainen osa lämmön levittymiseen tilassa varsinkin, jos käytetään sekoittavaa ilmanvaihtoa.

3.1 Poistoilman lämmöntalteenotto

1970-luvulla vallinneen energiakriisin aikana rakennusten lämpöenergiakulutukseen alettiin kiinnittämään huomiota. Rakennusten lämmöneristystä lisättiin ja lämmöntalteenottojärjestelmien kehittäminen aloitettiin. Energiakriisin aikana todettiin ilmanvaihdon lämmöntalteenoton säästävän tuloilman lämmittämiseen tarvittavaa energiaa. (Sandberg, 2014.)

Lämmöntalteenottolaitteet (LTO) voidaan jakaa kolmeen erityyppiseen järjestelmään, pyörivä lämmönsiirrin, levylämmönsiirrin ja nestekiertoinen lämmöntalteenotto. Lämmöntalteenoton hyötysuhteesta ja tyypistä riippuen sillä voidaan kattaa 50–80 % ilmanvaihdon lämmitysenergiatarpeesta. Pyörivä LTO käsittää kiekkomaisen roottorin ja käyttölaiteiston, joka pyöriessään siirtää lämpöä lämpimästä poistoilmavirrasta, kylmään tuloilmaan. Pyörivä LTO toimii vastavirtaperiaatteella ilman väliainetta ja näin ollen omaa korkean hyötysuhteen jopa 75–85 %. (Sandberg, 2014.)

Energiatehokkuuden kannalta pyörivä LTO on hyvä, koska hyvän hyötysuhteen ansiosta tuloilman lämmitystarve on hyvin vähäistä ja suuren osan vuodesta tuloilman lämmittämiseen riittää pelkkä LTO:n teho (Sandberg, 2014). Energiatehokkuuden kannalta on järkevää käyttää pyörivää LTO:ta, mikäli se poistoilman laadun kannalta on mahdollista.

3.2 Tarpeenmukainen ilmanvaihtojärjestelmä

Tarpeenmukainen ilmanvaihtojärjestelmä eli DCV-järjestelmä (Demand-Controlled Ventilation) tarkoittaa, että tila- tai vyöhykekohtaista ilmavirtaa voidaan ohjata kuormituksen ja/tai ilmanlaadun mukaan. DCV-järjestelmän ilmavirtojen tehostus voidaan toteuttaa huonekohtaisesti tai vyöhykekohtaisesti. Vyöhykekohtaisella tehostusalueella tarkoitetaan useammasta kuin yhdestä tilasta koostuvaa aluetta, jonka ilmamäärää tehostetaan. Vyöhykekohtaisesti toteutettu DCV-järjestelmä edellyttää, että vyöhykkeen tilojen kuormituksissa ei saa olla suuria eroja. Vyöhykkeet voidaan muodostaa saman julkisivun tiloista tai saman käyttötarkoituksen tiloista. (Sandberg, 2014.)

Vyöhykekohtaisen tehostuksen etuina on pienempi säätölaitteiden määrä ja sitä kautta järjestelmän yksikertaisempi rakenne verrattuna huonekohtaiseen tehostukseen. Vyöhykekohtaista DCV-järjestelmää voidaan kuitenkin ohjata siten, että ilmavirrat säätyvät sen tilan

mukaan, jossa on suurin kuormitus. Tämä tarkoittaa sitä, että koko vyöhykkeen ilmamäärät kasvavat yhden tilan kuormituksen mukaisesti, vaikka muissa vyöhykkeen tiloissa ei olisi tarvetta ilmamäärien tehostukselle.

DCV-järjestelmää voidaan ohjata tilan seinälle asennetun CO₂ -anturin mittaustiedon perusteella, jolloin CO₂ -pitoisuusarvon noustessa ilmanvaihdon ilmamäärä kasvaa. DCV-järjestelmää voidaan ohjata myös lämpötilan mukaan sekä liiketunnistimilla. Liiketunnistimien huonona puolena on, että ilmanvaihto tehostuu liikaa, mikäli tilassa on vähemmän ihmisiä kuin mihin tila on mitoitettu. Tämä saattaa aiheuttaa kylmäntunnetta ja epämiellyttävää ilmapvirran tunnetta sekä tarpeetonta energiankulutusta. (Mysen, et al., 2005.)

Toinen vaihtoehto toteuttaa DCV-järjestelmän ohjaus on asentaa lämpötila- ja/tai CO₂ -anturit vyöhykkeen yhteiseen poistoilmakanavaan. Mikäli CO₂-anturit asennetaan poistoilmakanavaan, saattaa yksittäisen huoneen CO₂-pitoisuus ylittää tavoitellun sisäilmaluokan hiilidioksidipitoisuuden raja-arvon.

3.3 Vakioilmavirtajärjestelmä

Vakioilmavirtaisella ilmanvaihtojärjestelmällä eli CAV-järjestelmällä (Constant Air Volume) tarkoitetaan ilmanvaihtojärjestelmää, jossa tiloihin tuodaan kuormituksesta ja ilmanlaadusta riippumatta vakioilmavirta. CAV-järjestelmän ilmavirrat mitoitetaan henkilömäärän, tilojen käyttötarpeen tai ilmanvaihtokertoimen mukaan. CAV-järjestelmä soveltuu hyvin pieniin tiloihin sekä tiloihin, joiden kuormitus tai lämpökuorma pysyy vakiona ajasta riippumatta. Järjestelmän yksinkertaisuuden ansiosta CAV-järjestelmän investointikustannukset ovat pienemmät DCV-järjestelmään verrattuna.

3.4 Aikaohjelma

Ympäristöministeriön asetuksen 1009/2017 mukaan ilman on vaihdettava kaikissa huonetiloissa myös käyttöajan ulkopuolella (Ympäristöministeriö, 2017). Käyttöajan ulkopuolinen ilmanvaihto voidaan toteuttaa pitämällä ilmanvaihtokoneita osateholla tai jaksoittaisella käytöllä. Jaksoittaisella käytöllä ilman on kuitenkin vaihdettava siten, että käyttöajan ulkopuolinen minimi-ilmavirtavaatimus toteutuu. (Liljeström & Salomaa, 2018.)

Helsingin kaupungin päiväkotien ilmanvaihto ohjataan aikaohjelmalla, joka käynnistää ilmanvaihtokoneet mitoitusteholle 2 tuntia ennen rakennuksen käyttöajan alkamista ja sammuttaa ilmanvaihdon 1–2 tuntia käyttöajan päättymisen jälkeen. Lauantaisin ja sunnuntaisin ilmanvaihto käynnistetään mitoitusteholle tunniksi. (Kuntien sisäilmaverkosto, 2019.)

3.5 Ilmanvaihdon energiankulutus

Ilmanvaihto on yksi koko rakennuksen suurimmista energiaa kuluttavista järjestelmistä. Ilmanvaihdon energiakulutusta tarkastellessa tulee huomioida:

- Tuloilman lämmittäminen ilmanvaihtokoneen lämmityspatterilla
- ilmanvaihtokoneen puhaltimien energiankulutus
- tuloilman ilman jäähdyttämiseen tarvittava energia ja jäähdytysjärjestelmän energiakulutus
- ilman kostuttamiseen tarvittava energia (Sandberg, 2016).

3.6 Puhaltimien energiankulutus

Pumppujen ja puhaltimien energiakulutuksella on merkittävä osuus ilmanvaihtojärjestelmän kokonaisenergiakulutuksesta. Puhaltimien energiankulutus voidaan laskea puhaltimen ominaissähkötehon, käyntiajan ja ilmavirran tulona yhtälöllä 1.

$$W_{ilmanvaihto} = \sum SFP \cdot q_v \cdot \Delta t \quad (1)$$

$W_{ilmanvaihto}$ on ilmanvaihtojärjestelmän energiakulutus, kWh

SFP on ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho, kW/(m³/s)

q_v on ilmanvaihtokoneen ilmavirta, m³/s

Δt on ilmanvaihtokoneen käyttöaika, h. (Sandberg, 2016.)

Ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin lämpötehon laskennassa on syytä ottaa huomioon lämpötilan nousu puhaltimessa, mikäli tuloilmapuhallin sijaitsee lämmityspatterin jälkeen ennen tuloilman lämpötilanmittausta. Lämpötilan nousu puhaltimessa voidaan laskea yhtälöllä 2.

$$\Delta t_{\text{puhallin}} = \frac{SFP \cdot p_s}{\rho_i \cdot c_{pi}} = \frac{P_{\text{puh}} \cdot p_s}{\rho_1 \cdot c_{pi} \cdot q_v} \quad (2)$$

$\Delta t_{\text{puhallin}}$	on lämpötilan nousu puhaltimessa, °C
SFP	on puhaltimen ominaissähköteho, kW/(m ³ /s)
p_s	on ilmaan siirtyvän lämpötehon ja puhaltimen sähkötehon suhde
ρ_i	on ilman tiheys, 1,2 kg/m ³
c_{pi}	on ilman ominaislämpökapasiteetti. 1,0 kJ/(kgK)
P_{puh}	on puhaltimen sähköteho säätölaitteineen, kW
q_v	on puhaltimen ilmavirta, m ³ /s. (Sandberg, 2016.)

Ilmaan siirtyvän lämpötehon ja puhaltimen sähkötehon suhteena, p_s käytetään arvoa 1 mikäli puhallin on sijoitettu ilmavirtaan. Mikäli puhallin ei ole sijoitettuna ilmavirtaan käytetään arvoa 0,6. Mikäli tarvittavia lähtötietoja ei ole saatavissa voidaan lämpötilan nousun oletuksena käyttää 0,5 °C. (Sandberg, 2016.) Tämän työn laskennassa käytetyn mittausdatan mittapisteet sijoittuvat ennen tuloilmapuhallinta, jolloin CAV- ja DCV-järjestelmien ilmavirran lämpötilannousulla puhaltimessa ei ole vaikutusta lämmityspatterin lämpötehon laskentaan.

3.7 Ilmanvaihdon lämmityspatterin teho ja lämpöenergia

Ilmanvaihdon lämmityspatterin tarkoituksena on nostaa tuloilman lämpötila suunniteltuun sisäänpuhalluslämpötilaan. Lämmityspatteri sijaitsee LTO:n jälkeen joko ennen tuloilmapuhallinta tai sen jälkeen. Näin ollen lämmityspatterille virtaava ilma on johdettu lämmöntalteenoton läpi, jossa raitis ulkoilma on lämmennyt poistoilmasta talteen otetun lämpöenergian ansiosta.

$$\Phi_{iv\ patteri} = q_v \cdot c_{pi} \cdot \rho_i \cdot \Delta t \quad (3)$$

$\Phi_{iv\ patteri}$	on ilmavaihdon lämmityspatterin teho, kW
q_v	on ilmavirta, m ³ /s
c_{pi}	on ilman ominaislämpökapasiteetti, 1,0 kJ/kgK
ρ_i	on ilman tiheys, 1,2 kg/m ³
Δt	on lämpötilan muutos lämmityspatterissa

Tässä työssä lämmityspatterin tehon laskennassa lämmityspatterin lämpötilan muutos on laskettu lämpötila-antureiden TE04 (ilman lämpötila lämmityspatterin jälkeen) ja TE02 (ilman lämpötila LTO:n jälkeen) erotuksesta. Ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin energian kulutus lasketaan kertomalla lämmityspatterin teho tarkasteltavan ajanjakson pituudella tunteissa, yhtälö 4.

$$Q_{iv} = \Phi_{iv\ patteri} \cdot t \quad (4)$$

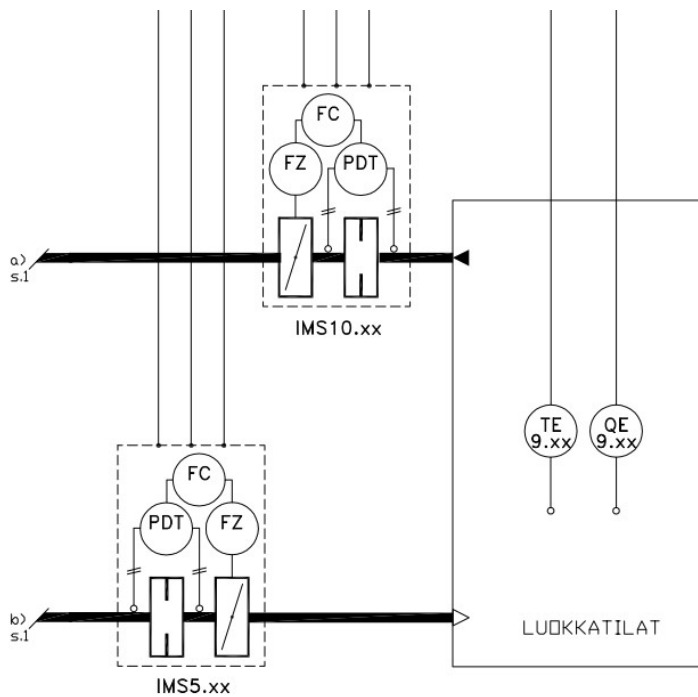
Q_{iv}	on ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin lämpöenergiankulutus, kWh
$\Phi_{iv\ patteri}$	on ilmavaihdon lämmityspatterin teho, kW
t	on aika, h

4 DCV-järjestelmän ilmavirtojen hallinta

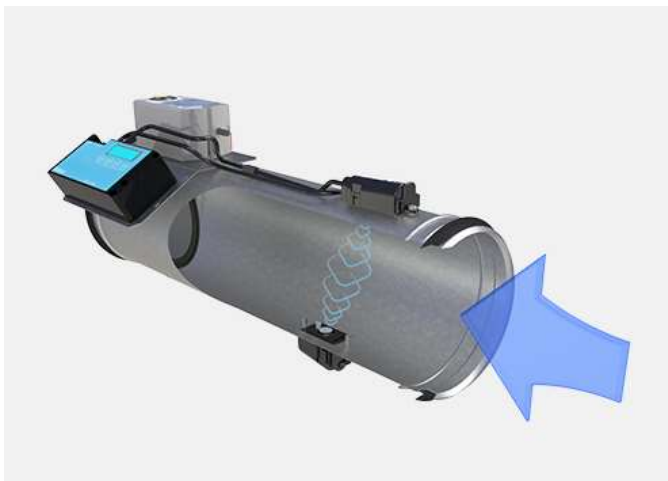
DCV-järjestelmä ilmavirtojen hallintaa varten ilmanvaihtokanavistoon on suunniteltava ja asennettava ilmavirtojen hallintalaitteita sekä hallintaa ohjaavia antureita. DCV-järjestelmän ilmavirtojen ohjaus voidaan jakaa kahteen järjestelmään: IMS-järjestelmät ja ON/OFF-tehostuspelleillä tehostuvat DCV-järjestelmät. IMS- tai ON/OFF-järjestelmät vaativat toimiakseen sen, että ilmanvaihtokoneiden puhaltimien pyörimisnopeutta voidaan muuttaa. Tehostustilanteessa IMS- ja ON/OFF-järjestelmien säätöpellit avautuvat, jolloin kanaviston paine laskee. Mikäli ilmanvaihtokoneen pyörimisnopeutta ei muuteta, saattavat tehostuksen ja koko ilmanvaihtokoneen toiminta-alueen ilmamäärät erota suunnitelluista ilmamääristä. Tämän vuoksi DCV-järjestelmät vaativat joko vakioainesäädön tai muuttuvapainesäädön. Säätötavoista lisää kohdassa 4.3

4.1 IMS-järjestelmä

IMS-järjestelmässä tulo- ja poistokanavistoon asennetaan ilmamääräsäätimet (IMS), joiden tarkoitus on mitata ilmamääräsäätimen läpikulkevaa ilmamäärää ja säätää ilmamäärä vastaamaan säätöviestin mukaista asetusarvoa (kuva 2 ja 3). IMS-säätimien ilmavirran mittaus voidaan toteuttaa paine-eromittauksella mittaristikolla, säätöpellillä tai ultraäänellä. IMS-säätimet pystyvät säätämään ilmamäärää lähes portaattomasti sisäänrakennetun säätöpellin ansiosta. IMS-säätimiä voidaan käyttää myös CAV-järjestelmissä varmistamaan vakioilmavirta ilmanvaihtokanaviston paineenvaihteluista huolimatta.



Kuva 2 IMS tehostusalueen periaatekuva



Kuva 3 Halton IMS-säädin ultraäänimittauksella

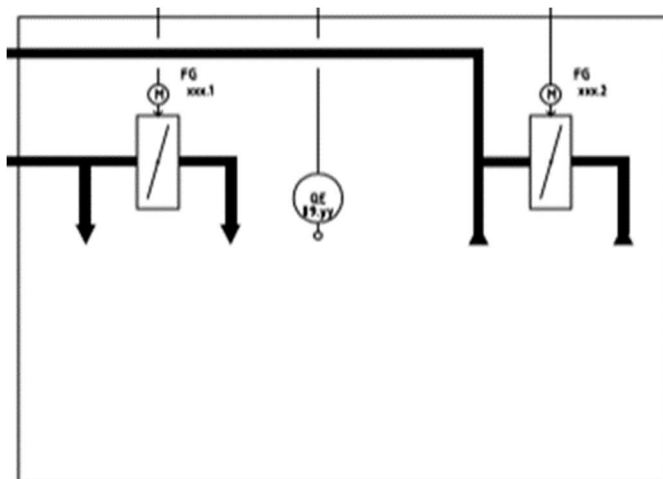
4.2 ON/OFF-tehostusjärjestelmä

ON/OFF-tehostuspelleillä toteutetussa DCV-järjestelmässä ilmavaihtojärjestelmän tulo- ja poistokanavistoon asennetaan ilmavirran toimilaitteellisia säätöpeltejä, kuva 4. Tehostusalueet voidaan määritellä tiloittain tai vyöhykkeittäin rakennuksen käyttötavasta riippuen. ON/OFF-tehostusjärjestelmä voidaan toteuttaa esimerkiksi siten, että tehostusalueelle

tuodaan kaksi tulo- ja poistokanavaa, joista toiseen asennetaan ON/OFF-tehostuspelti, kuva 5. Tehostusalueen kuormituksen ollessa pientä, alueelle tuodaan tuloilmaa sen kanaviston kautta, jossa ei ole tehostuspeltiä. Kun alueen kuormitus kasvaa, toisen kanavahaaran ON/OFF tehostuspelti avautuu ja alueen ilmanvaihto tehostuu.



Kuva 4 Halton PTS/A ilmavirran säätöpelti toimilaitteella (Halton)



Kuva 5 ON/OFF tehostusalueen periaatekuva

4.3 DCV-järjestelmän painesäätö

DVC-järjestelmän painesäätö voidaan toteuttaa joko vakiopainesäätöisenä tai muuttavapainesäätöisenä. Vakiopainesäätöisessä järjestelmässä ilmanvaihtokanaviston paine

pidetään asetusarvossaan ilmamäärästä riippumatta. Kun IMS-säätimen tai ON/OFF-tehostuspellin säätöpelti avautuu, ilmanvaihtokanavan paine laskee, vakiopainesäätöinen järjestelmä nostaa ilmanvaihtokoneen puhaltimen pyörimisnopeutta, kunnes ilmanvaihtokanavan paineen asetusarvo saavutetaan.

Toinen vaihtoehto on säätää DCV-järjestelmän ilmanvaihtokonetta muuttuvapainesäätöisellä järjestelmällä, jossa ilmanvaihtokanavan paineen annetaan muuttua eri tilanteissa. Muuttuvapainesäätöisessä järjestelmässä minimi- ja maksimi -ilmavirtaisissa tilanteissa painemittauksille on määritetty säätökäyrät. Yksi paineenmittaus on aina määräävin, jonka vuoksi toisille paineenmittauksille sallitaan säätökäyrästä poikkeaminen. (Helsingin kaupunki c, 2022.) Säätökäyrästä poikkeamisen ansiosta ja tilanteesta riippuen ilmanvaihtokanaviston paine saattaa olla matalampi vakiopainesäätöiseen järjestelmään verrattuna. Matalamman kanavapaineen ansiosta ilmanvaihtokoneen puhaltimen energiankulutus pienenee.

4.4 CAV-järjestelmä

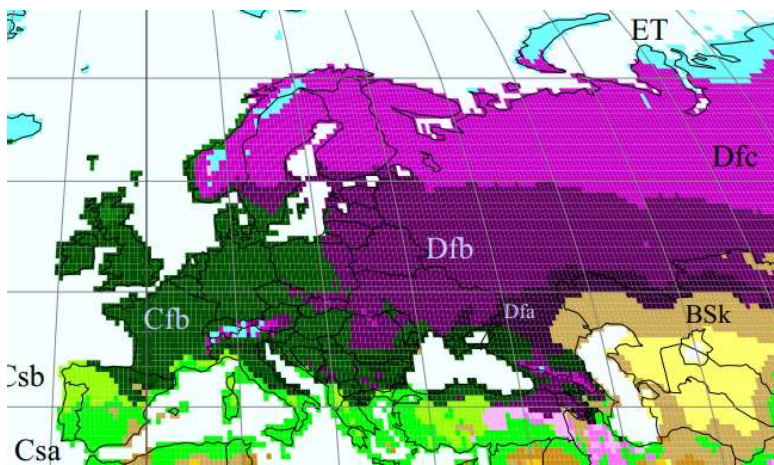
Vakioilmavirtaisella ilmanvaihtojärjestelmällä, CAV-järjestelmällä (Constant Air Volume) tarkoitetaan ilmanvaihtojärjestelmää, jolla tuotetaan tiloihin vakiomäärä ilmaa tilan kuormituksesta riippumatta. Tilojen ilmamäärät voidaan suunnitella henkilömäärän, käyttötarkoituksen, ilmanvaihtokertoimen tai kesäajan jäähdytystarpeen mukaan. Päiväkotitiloissa ilmamäärien suunnitteluperusteena käytetään henkilömääriä (Helsingin kaupunki a, 2022, p. 18).

CAV-järjestelmässä ilmavaihtokoneiden käydessä mitoitusilmavirroilla, voi ilmavirta tuottaa epämiellyttävän kylmän tunteen tilan kuormituksen ollessa pienempi kuin mille ilmamäärät on suunniteltu. Kylmäntunnetta ehkäisemään voidaan CAV-järjestelmän ilmanvaihtokanavaan sijoittaa jälkilämmityspatteri (Sandberg, 2016).

5 Aikaisemmat tutkimukset DCV-järjestelmien energiatehokkuudesta

DCV-järjestelmistä on olemassa useita tutkimuksia, joissa on tutkittu tarpeenmukaisen ilmanvaihdon vaikutusta sisäilman laatuun sekä energiankulutukseen. Tutkimusten mukaan DCV-järjestelmien pienilläkin ilmavirroilla ei ole heikentävää vaikutusta ilmanvaihdon tehokkuuteen. Tarpeenmukainen ilmanvaihtojärjestelmä on tehokas myös minimi-ilmavirroilla. (Merema, et al., 2018.)

Tutkittaessa DCV-järjestelmiä käsitteleviä tutkimuksia, tulee huomioida millä ilmastoalueella tutkimus on tehty. Tutkimuksen kannalta saattaa olla merkittävää, onko tutkimus tehty kylmissä vai lämpimissä olosuhteissa. Tämän työn yhteydessä tarkastelluissa tutkimuksissa on käytetty Vladimir Köppenin -karttaa, joka sittemmin Rudolf Geiger esitteli vuonna 1961. Kartasta käytetään nimitystä Köppen-Geiger Climate Classification. Köppen-Geiger -kartassa maapallo on jaettu Main climates – pääilmaston, Precipitation – sademäärän ja Temperature – lämpötilan mukaan, kuva 6. Köppen-Geiger-kartan mukaan Suomi jakautuu kahteen eri vyöhykkeeseen: aivan eteläinen Suomi Dfb -vyöhykkeeseen (Snow, fully humid, warm summer) ja loput Suomesta Dfc -vyöhykkeeseen (Snow, fully humid, cool summer). (Kottek, et al., 2006.) Tässä työssä tehtävä tutkimus sijoittuu Dfb -vyöhykkeelle.



Kuva 6 Köppen-Geiger -kartta

5.1 Merema et al.

Merema et al. (2018) tekemässä tutkimuksessa tutkittiin DVC-järjestelmän energiatehokkuutta viidessä huoneessa, joissa on suuri ja vaihtuva käyttäjämäärä. Tutkittavat huoneet ovat neljän koulun ja päiväkodin sekä yhden toimistorakennuksen huoneita Belgiassa. Merema et al. (2018) oli ennen tutkimuksen aloittamista todennut, että DCV-järjestelmien energiatehokkuutta on tutkittu suurimmaksi osaksi kylmissä ja lämpimissä ilmastoissa. Merema et al. (2018) tutkivat, eroavatko lauhkean ilmaston (moderate climate) DCV-järjestelmän energiansäästöt kylmissä ja kuumissa ilmastoissa tehdyissä tutkimuksissa esitettyihin energiansäästöihin. Tutkimuksessa vertailtiin DCV-järjestelmän energiatehokkuutta CAV-järjestelmään. Tutkittavista kohteista kolmen DCV-järjestelmät olivat CO₂-pitoisuus- ja lämpötilaohjattuja. Yhden kohteen DCV-järjestelmä oli vain CO₂ -pitoisuusohjattu. Tutkittavista kohteista kolmessa oli koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto ja yhdessä koneellinen poisto, jossa korvausilma tuotiin ikkunoiden korvausilmaventtiileiden kautta. Merema et al. (2018) tutkimuksen rakennukset olivat ilmalämmitteisiä eli ilmanvaihdon tuloilmaa lämmitämällä katettiin rakennuksen lämmitystehontarve. Tutkimuksessa lasketun CAV-järjestelmän tuloilmamäärä laskettiin suunnitelmien mukaiselle käyttäjämäärälle mitoitusarvolla 29 m³/h per henkilö. (Merema, et al., 2018). 29m³/h vastaa Suomen Sisäilmastoluokitus 2018 päiväkotien ja opetustilojen sisäilmaluokan S2 mukaista ilmamäärää 8 l/s (Rakennustieto Oy, 2018).

Tutkimuksessa tehdyt mittaukset olivat kestoltaan yli kaksi viikkoa ja sijoituivat lämmityskaudelle. Merema et al. tekemän tutkimuksen mukaan DCV-järjestelmällä pystyttiin vähentämään ilmanvaihtokoneiden puhaltimien energiankulutusta 50–55 % sekä tuloilman lämmitysenergiaa 34–47 %. Tutkimuksessa havaittiin myös, että käyttöaikana tilojen ilmanvaihto oli minimi-ilmavirralla 20–67 % ajasta. Tämä saattaa tarkoittaa, että ilmavirrat on suunniteltu liian suuriksi, jolloin jo minimi-ilmavirralla saavutetaan tilojen todellinen ilmanvaihdon määrä. (Merema, et al., 2018.)

Merema et al. (2018) vertaa tutkimuksessaan saamiaan tuloksia aikaisemmin tehtyihin tutkimuksiin ja toteaa ettei DCV-järjestelmän puhaltimen energiankulutuksella ole säävyöhykekohtaisia eroja. Tutkimuksessa todetaan myös, että lauhkeassa ilmastossa ilmanvaihdon lämmitysenergiesäästöt ovat 15 % suuremmat kuin kylmässä ilmastossa. (Merema, et al., 2018.)

5.2 Mysen et al.

Mysen et al. (2005) tekemässä tutkimuksessa tutkittiin 157 norjalaisen neljännen luokan luokkahuoneen ilmanvaihtoa sattumanvaraisesti valituissa 81 koulussa. Tutkimuksessa tutkittiin CAV-järjestelmän, CO₂-ohjatun DCV-järjestelmän ja läsnäolotunnistuksella ohjatun DCV-järjestelmän energiankulutusta. (Mysen, et al., 2005.) Tutkittavat kohteet sijaitsivat kylmäksi luokiteltavalla Dfc-vyöhykkeellä.

Mysen et al. (2005) toteaa tutkimuksessaan, että tarkasteltaessa DCV-järjestelmän energiansäästöjen potentiaalia CAV-järjestelmään verrattuna, tulee ottaa huomioon tilojen todellinen käyttäjämäärä sekä käyttöaika (Mysen, et al., 2005). Näiden kahden asian voidaan todeta vaikuttavan siihen, kuinka paljon DCV-järjestelmällä saavutetaan energiansäästöjä. Mikäli käyttäjämäärät ja käyttöaika vastaavat suunnitteluvaiheessa esitettyjä maksimihenkilömääriä ja käyttöaikoja, ei DCV-järjestelmällä saavuteta niin suuria säästöjä kuin suunnitteluvaiheessa ilmoitetuista maksimihenkilömääristä eroavilla käyttäjämäärillä ja käyttöajoilla.

Mysen et al. (2005) tekemässä tutkimuksessa CAV-järjestelmän ilmamääränä käytettiin 7 l/s per henkilö ja 1 l/s per neliometri ja ilmamäärä ylläpidettiin koko käyttöajan. Ilmamäärät oli mitoitettu tilojen suunnitellun käyttäjämäärän mukaan. CO₂-pitoisuusohjatun DCV-järjestelmän ilmamäärät laskettiin todellisen käyttäjämäärän mukaan, joihin lisättiin minimiilmamäärä 1 l/s per neliometri. DCV-järjestelmän ilmamäärät ohjattiin siten, että hiilidioksiditason noustua yli 900 ppm ilmanvaihto tehostui ja piti hiilidioksidipitoisuuden 900 ppm:ssä. Ilmavirran tehostus päättyi, kun hiilidioksidipitoisuus tippui alle 700 ppm ja ilmamäärä siirtyi minimiilmavirralle 1 l/s per neliometri. Ilmavirtojen suuruus 900 ppm arvioitiin vastaavan läsnäolotunnistuksella ohjatun DCV-järjestelmän ja CAV-järjestelmän mitoitussilmavirtoja. (Mysen, et al., 2005.)

Läsnäolotunnistuksella ohjatun DCV-järjestelmän käyttäjämääränä käytettiin tilan suunniteltua 30 henkilön käyttäjämäärää. Ilmavirta ohjattiin mitoitussilmavirralle 7 l/s per henkilö ja 1 l/s per neliometri tilan ollessa käytössä ja tilan ollessa poissa käytöstä ilmavirta oli 1 l/s per neliometri. (Mysen, et al., 2005.)

Tutkimuksessa tehtyjen laskelmien mukaan menee 12 minuuttia ennen kuin CO₂-ohjatun DCV-järjestelmän tehostusraja 900 ppm ylittyy ja käytön jälkeen kestää 6 min että tehostuksen alaraja 700 ppm alittuu. Tämä tarkoittaa, että tehostetun ilmamäärän aika on 6

minuuttia vähemmän kuin luokkatilan käyttöaika. CO₂-ohjatun järjestelmän tehostusilmamääräksi laskettiin 9 l/s, joka oli 1 l/s enemmän kuin CAV- ja läsnäolotunnistuksella ohjatun järjestelmän ilmamäärä. (Mysen, et al., 2005.)

Mysen et al. (2005) Tutkimuksen mukaan CO₂-ohjatun järjestelmän kokonaisilmamäärä oli keskiarvallisesti 43 % CAV-järjestelmän kokonaisilmamäärästä ja 54 % läsnäolotunnistuksella ohjatun järjestelmän ilmamäärästä kuuden tunnin käyttöaikana. Tutkimuksessa havaittiin, että luokkatilojen todellinen käyttäjämäärä erosi suunnitellusta käyttäjämäärästä. Luokkatilat oli suunniteltu 28 oppilaalle ja 2 opettajalle, mutta tutkimuksen mukaan keskimääräinen käyttäjämäärä oli yhteensä 22,2 henkilöä, joka oli 74 % suunnitellusta henkilömäärästä. (Mysen, et al., 2005.)

Taulukossa 1 on esitetty Mysen et al. (2005) tekemän tutkimuksen DCV-järjestelmien ohjaustapojen energiankulutus CAV-järjestelmään verrattuna. Taulukosta voidaan todeta, että CO₂-ohjattu DCV-järjestelmä kuluttaa energiaa vähemmän kuin läsnäolo-ohjattu DCV-järjestelmä. Taulukkoa tarkastellessa tulee muistaa, että CAV-järjestelmän ja läsnäolo-ohjatun järjestelmän energiankulutuslaskennassa käytettiin tilojen suunniteltua käyttäjämäärää 30 henkilöä ja CO₂-ohjatussa järjestelmässä todellista käyttäjämäärää. Tutkimuksessa todetaan, että mikäli kouluissa on täydet luokkatilat ja vähäiset poissaolot on läsnäolo-ohjattu DCV-järjestelmä energiatehokkaampi kuin CO₂-ohjattu DCV-järjestelmä (Mysen, et al., 2005).

Taulukko 1 Mysen et al. (2005) tutkimuksen DCV-järjestelmien energiankulutus CAV-järjestelmään verrattuna

Käyttöaika, h/vrk	CO ₂ -ohjattu	Läsnäolo-ohjattu
6	50 %	73 %
10	38 %	51 %
24	26 %	32 %

5.3 Wachenfeldt et al.

Wachenfeldt et al. (2007) tekemässä tutkimuksessa tutkittiin simuloimalla ja laskemalla paljonko syrjäyttävällä CO₂-ohjatulla DCV-järjestelmällä voidaan käytännössä pienentää ilmanvaihdon energiakulutusta. Tutkimuksessa käytettiin kahta norjalaista koulua, Mediå ja Jaer kouluja. Vertailukohtana käytettiin sekoitettavaa CAV-järjestelmää, jonka ilmamäärät on säädetty maksimi käyttäjämäärän mukaan. Tutkittavien koulujen CAV-järjestelmien

ilmamäärä laskettiin tutkimushetkellä tyypillisen norjalaisen mitoitustavan mukaan. Mitoituksessa käytetty ilmamäärä oli 7 l/s per henkilö ja 1 l/s per neliometri. (Wachenfeldt, et al., 2007.)

Tutkittavat kohteet sijaitsivat kylmällä Dfc-vyöhykkeellä. Tutkittavien kohteiden ilmanvaihto oli toteutettu CO₂-ohjatulla syrjäyttävällä ilmanvaihdoilla. Tutkimuksessa otettiin huomioon arkipäivien käytönaikainen puhaltimien energiankulutus ja lämmitysenergiankulutus. Tutkimuksessa laskettiin CAV-järjestelmän toimivan arkisin klo 7:00 – 17:00 välisenä aikana maksimi-ilmavirralla. Wachenfeldt et al. (2007) tutkimissa kouluissa tilojen todellinen käyttäjämäärä oli 73 % ja 78 % maksimi käyttäjämäärästä (Wachenfeldt, et al., 2007) kun Mysen et al. tekemässä 157 koulun otannassa keskiarvo oli 74 % (Mysen, et al., 2005).

Tutkimuksessa tehdyn simuloinnin perusteella Mediå koulun sekoittavan DCV-järjestelmän ilmamäärien keskiarvo klo 7:00–17:00 välisenä aikana olisi 804 l/s kun CAV-järjestelmällä se olisi 2 321 l/s. Jaer koulussa laskennallinen syrjäyttävän DCV-järjestelmän keskimääräinen ilmamäärä olisi laskentapäivästä riippuen 575–704 l/s ja sekoittavan CAV-järjestelmän 2300 l/s. Näin ollen syrjäyttävän DVC-järjestelmän ilmamäärä on vain 25–35 % sekoittavaan CAV-järjestelmän ilmavirtoihin verrattuna. Tutkimuksen mukaan arkisin klo 7:00–17:00 CO₂-ohjattu syrjäyttävä DCV-järjestelmä säästää puhallinenergiaa 87 % ja lämmitysenergiaa 21 % sekoittavaan CAV-järjestelmään verrattuna. (Wachenfeldt, et al., 2007.)

5.4 Ahmed et al.

Ahmed et al. (2015) tekemässä tutkimuksessa simuloitiin Etelä-Suomessa sijaitsevan toimistorakennuksen DCV-järjestelmän energiankulutusta ja sitä verrattiin CAV-järjestelmän energiakulutukseen. Tutkimuksessa tutkittiin vuonna 2012 valmistuneen toimistorakennuksen puhaltimien, ilmanvaihdon lämmityksen ja jäähdytyspalkkien energiankulutusta vuoden ajalta.

Tutkimuksen mukaan toimistorakennuksen käyttäjämäärässä havaittiin suurta vaihtelua ja toimistorakennuksen todellinen käyttäjämäärä oli 55 % maksimi käyttäjämäärästä (Ahmed, et al., 2005). Tutkimuksen mukaan toimistorakennuksen todellinen käyttäjämäärä eroaa suunnitellusta käyttäjämäärästä vielä enemmän kuin norjalaisten koulujen todelliset käyttäjämäärät.

Tutkimuksen mukaan, CAV-järjestelmä kuluttaa avokonttorialueella vähintään 12–14 % enemmän primäärienergiaa kuin DCV-järjestelmä. Koko kerroksen alueella CAV-järjestelmä kuluttaa 7–8 % enemmän energiaa. Jäähdytetyn toimistorakennuksen energiansäästöpotentiaaliin vaikuttaa se, että mikäli jäähdytystehon tarve ylittää ilmanvaihdon ilmamäärätarpeen, ilmavirtoja ei voida pienentää jäähdytystehon takia. (Ahmed, et al., 2005.)

5.5 Bergström

Bergström (2021) tutki ylemmän ammattikorkeakoulun päättötyössä Etelä-Suomessa sijaitsevan ala-asteen tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän energiatehokkuutta ja elinkaarikustannuksia. Bergströmin opinnäytetyössä tarkasteltiin ilmanvaihdon energiankulutusta alkuvuodesta 2021 kolmella eri tarkastelujaksolla. Työhön käytetyt mittaustulokset oli kerätty rakennuksen automaatiojärjestelmän mittaustalosta. Tarkasteltavassa rakennuksessa DCV-järjestelmää ohjattiin luokkahuoneiden hiilidioksidipitoisuuden perusteella ja ilmavirtoja ohjattiin ultraääni IMS:eillä. Opinnäytetyössä vertailtiin teoreettisella tasolla tehostusalueiden vaikutuksia ilmanvaihdon energiankulutukseen. Opinnäytetyön perusteella DCV-järjestelmällä saavutetaan 40–52 % säästö ilmanvaihtokoneiden lämmitysenergiassa ja 61–83 % säästö puhaltimien sähköenergiassa tehostusalueesta riippuen CAV-järjestelmään verrattuna. (Bergström, 2021.)

Yhteenlaskettuna Bergströmin tutkimuksen mukaan huonekohtaisella DCV-järjestelmällä saavutetaan 59 % euromääräinen säästö CAV-järjestelmään verrattuna. Opinnäytetyön mukaan tarpeenmukaisen ilmanvaihdon tehostusalueilla ei ole elinkaarikustannusten kannalta suurta merkitystä, vaikka huonekohtainen säätö säästää energiaa suurempiin tehostusalueisiin verrattuna, koska sen investointikustannukset suuremmat. Opinnäytetyössä todetaan myös, että luokkahuoneiden hiilidioksidipitoisuudet pysyivät koko tarkastelujakson ajan S2-sisäilmaluokan tasolla. (Bergström, 2021.)

5.6 Tutkimusten yhteenveto

Aiemmistä tutkimuksista on selvästi todettavissa, että tarpeenmukaisella ilmanvaihtojärjestelmällä (DCV-järjestelmällä) voidaan saavuttaa huomattavia energiasäästöjä. Taulukossa 2 on kerätty yhteen aikaisempien tutkimuksien tulokset DCV-järjestelmän

energiansäästöpotentiaaleista. Tutkimuksissa tuotiin selkeästi esiin, että DCV-järjestelmä parantaa energiatehokkuutta tiloissa, joissa kuormitus ja/tai käyttäjämäärän vaihtelu on suurta. Mikäli tiloissa on tarkka käyttöaika ja tasainen kuormitus, pystytään CAV-järjestelmän maksimi-ilmamäärät suunnittelemaan ja säätämään siten, että ne vastaavat kuormitusta. Mutta kuten Mysen et al. (2005), Wachenfelt et al. (2002) ja Ahmed et al. (2015) tutkimuksissaan toteavat, tilojen todelliset käyttäjämäärät eroavat suunnitelluista käyttäjämääristä ja tämän takia DCV-järjestelmillä voidaan saavuttaa huomattavat energiansäästöt.

Taulukko 2 DCV-järjestelmistä tehtyjen tutkimuksien energiansäästöpotentiaali

		Ilmanvaihdon energiansäästöpotentiaali	
		Puhallinenergiassa	Lämmitysenergiassa
Merema et al.	2018	50 - 55 %	34 - 47 %
Mysen et al.	2005		27 - 74 %
Wachenfelt et al.	2002	87 %	21 %
Ahmed et al.	2015		12 - 14 %
Bergström	2021	61 - 81 %	40 - 52 %

Vaikka DCV-järjestelmän voidaan todeta olevan CAV-järjestelmää energiatehokkaampi, Mysen et al. (2005) tekemä tutkimus osoittaa, että DCV-järjestelmän ohjaustavalla merkitystä energiatehokkuudelle. Mysen et al. (2005) tekemän tutkimuksen mukaan liiketunnistimella ohjattu DCV-järjestelmä on energiatehokkaampi kuin CO₂-ohjattu. Pitää kuitenkin huomioida, että mikäli tilojen käyttäjämäärässä on suuria vaihteluita, käynnistyy läsnäolotunnistimella ohjattu DCV-järjestelmä ilmanvaihdon aina täydelle teholle. Tämä saattaa johtaa siihen, että ilmavirta voidaan kokea liian voimakkaaksi ja epämukavaksi mikäli tilaan saapuu vähemmän ihmisiä kuin mille ilmanvaihto on suunniteltu. Läsnäolotunnistusta voidaan parantaa valitsemalla hiljattain kehitettyjä läsnäoloantureita, jotka arvioivat käyttäjämäärän liikemäärän perusteella. (Mysen, et al., 2005.) Bergström (2021) toteaa opinnäytetyössään, että DCV-järjestelmän tehostusalueen koolla on merkitystä ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutukseen, mutta 20 vuoden elinkaarikustannuksissa tehostusalueen koolla ei ole merkitystä huonekohtaisen tehostuksen investointikustannusten takia (Bergström, 2021).

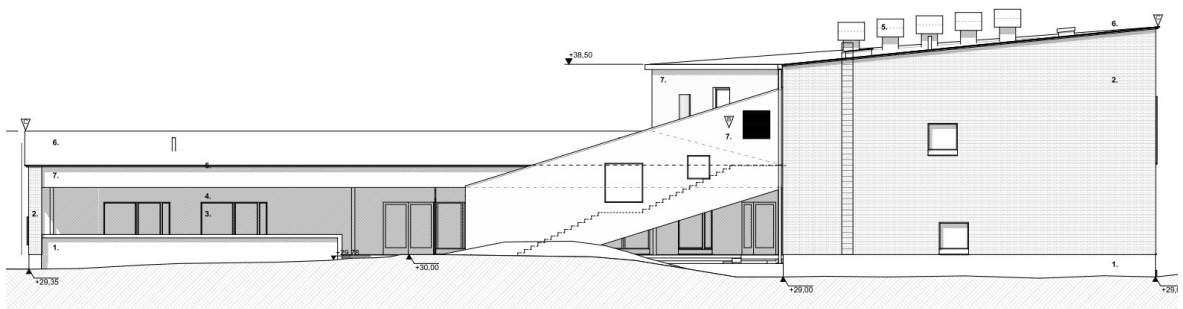
6 Päiväkoti Yliskylä

DVC-järjestelmän energiansäästöpotentiaalia tutkittaessa tarkasteltavaksi kohteeksi valittiin lasten päiväkoti Yliskylä. Vuonna 2018 valmistunut päiväkoti Yliskylä sijaitsee Helsingin Laajasalon kaupunginosassa. 2-kerroksinen päiväkotirakennuksen bruttopinta-ala on 2499 m² ja huoneistoala 1561 m². LPK Yliskylän huoneistoala on noin 1 % kaikkien Helsingin kaupungin 259 päiväkodin 194 115 m² huoneistoalasta (Helsingin kaupunki, 2023).

Rakennuksen julkisivukuvat on esitetty kuvissa 7 ja 8. Rakennuksen yksikerroksisessa osassa sijaitsevat sosiaalitilat, sali ja keittiö. Rakennuksen kaksikerroksisessa osassa sijaitsevat tarpeenmukaisella ilmavaihdolla varustetut lasten toiminta-alueet. Ilmanvaihtokoneet sijaitsevat rakennuksen toisessa kerroksessa sekä kellarissa.



Kuva 7 LPK Yliskylä, julkisivu länteen (Helsingin kaupungin rakennusvirasto, 2016)



Kuva 8 LPK Yliskylä, julkisivu etelään (Helsingin kaupungin rakennusvirasto, 2016)

Päiväkodin toiminta-alueiden ilmanvaihto on toteutettu tarpeenmukaisella ilmavaihdolla. Toiminta-alueet on jaettu tehostusalueisiin ja jokaiseen tehostusalueeseen kuuluu kolme huonetta. Päiväkodin DCV-järjestelmää ohjataan huonekohtaisten hiilidioksidiantureiden mittaustulosten perusteella. Tehostusalueen ilmanvaihtoa tehostetaan, mikäli yhdenkin

huoneen hiilidioksidipitoisuus nousee yli asetusarvon 700 ppm. Tehostusalueiden huoneisiin on asennettu kaksi tulo- ja poistokanavaa päätelaitteineen. Toiseen tulo- ja poistokanavaan on asennettu ON/OFF-tehostuspelti. Hiilidioksidipitoisuuden ollessa alle asetusarvon 600 ppm, ON/OFF-tehostuspelti on kiinni, jolloin tilan tulo- ja poistoilmavirrat kulkevat vain toisen kanavan ja päätelaitteen kautta. (Helsingin kaupunki c, 2022.)

Hiilidioksidipitoisuuden ylittäessä asetusarvon tehostuspelti avautuu ja tilaan ohjataan tuloilmaa kumpaakin tuloilmakanavaa pitkin. Myös tilan poistoilmakanavan tehostuspelti avautuu ja poistoilmavirta tehostuu. Tehostusalueen huoneiden kuormituksen vähentyessä ja hiilidioksidipitoisuuden laskiessa alle asetusarvon tehostusalueen huoneiden tulo- ja poistokanavien tehostuspellit sulkeutuvat. Tehostusalueen ilmanvaihtoa tehostetaan suurimman hiilidioksidipitoisuuden omaavan huoneen mukaan.

6.1 Ilmanvaihtojärjestelmä

LPK Yliskylän ilmanvaihtojärjestelmään kuuluu kuusi tulo- ja poistoilmavaihtokoneita, yksi tuloilmakone ja neljä erillispoistopuhallinta. Tässä työssä tarkasteltiin ilmanvaihtokoneita I201TK/PK, I202TK/PK ja I205TK/PK, mitkä toimivat DCV-ohjauksella. Ilmanvaihtokoneiden ilmamäärät ja SFP-luvut on esitetty taulukossa 3. Tarkasteltavien ilmanvaihtokoneiden SFP-lukuina käytettiin konevalmistajan konekorteissa ilmoitettuja SFP-lukuja. Ilmanvaihtokoneiden SFP-luvut alittavat valtakunnalliset sekä Helsingin kaupungin ilmanvaihtokoneille asettamat SFP-lukutavoitteen $1,8\text{kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ (Helsingin kaupunki a, 2022).

Taulukko 3 LPK Yliskylä ilmanvaihtokoneet

	tuloilmavirta, m^3/s	poistoilmavirta, m^3/s	SFP, tulopuhallin	SFP, poistoilma	SFP-luku	LTO	tarpeenmukaisuus	palvelualue
I201TK/PK	1,3	1,3	0,78	0,81	1,6	pyörivä	tehostuspellit	1. krs toimitilat
I202TK/PK	1,3	1,3	0,78	0,81	1,6	pyörivä	tehostuspellit	2. krs toimitilat
I203TK/PK	1,5	1,5	0,7	0,7	1,41	glykoli	ei	wc ja märkätilat
I204TK/PK	1,3	1,3	0,78	0,78	1,56	glykoli	ei	keittiö
I205TK/PK	1,1	1,1	0,84	0,76	1,6	pyörivä	tehostuspellit	1. krs sali, kerho ja työpajatilat
I206TK/PK	0,04	0,04	0,4	0,4	0,93	pyörivä	ei	porrashuone
I207TK	0,1	-	-	-	0,09	-	-	sähköpääkeskus
I231PK	-	0,08	-	-	1,2	-	-	erillispoisto
I232PK	-	0,1	-	-	6,7	-	-	erillispoisto
I233PK	-	0,1	-	-	1,2	-	-	erillispoisto
I234PK	-	0,1	-	-	1,2	-	-	erillispoisto

LPK Yliskylän ilmanvaihtojärjestelmän ilmamäärät on mitattu ja säädetty 2.6.2022. Mitauspöytäkirjan mukaan ilmamäärät ovat huonekohtaisesti ja koko rakennuksen osalta

lähellä suunniteltuja ilmamääriä. Ilmamäärien mittauspöytäkirjassa säädettyjen ilmanvaihtokoneiden kokonaisilmavirraksi on suunniteltu + 6095 / -6145 l/s. Ilmamäärien mittauspöytäkirjan mukaan mitatut ilmavirrat ovat + 6300 / - 6343 l/s. Koko ilmanvaihtojärjestelmän mitattujen ilmavirtojen ja suunniteltujen ilmavirtojen erot ovat vain noin 3 %. (Ilmamäärien mittauspöytäkirja, 2022.)

6.2 Nuuka AI Air

LPK Yliskylän ilmanvaihtojärjestelmä liitettiin 12.9.2022 Nuuka AI Air -palveluun. Nuuka AI Air -palvelun tarkoituksena on optimoida ilmanvaihtojärjestelmä tekoälyn avulla. Nuuka AI Air tekoäly oppii ilmanvaihtojärjestelmän muutoksista eri käyttötilanteissa ja pystyy ennustamaan sisäilmaolosuhteissa tapahtuvia muutoksia. Nuuka AI Air -palvelun tavoitteena on saavuttaa tavoitellut sisäilmaolosuhteet mahdollisimman energiatehokkaasti antamalla rakennusautomaatiolle optimaaliset asetusarvot tavoitteen saavuttamiseksi. (Nuuka Solutions, 2022.)

Nuuka AI Air ohjaa LPK Yliskylän DCV-järjestelmää tehostamalla ilmanvaihtoa hiilidioksidipitoisuuden mukaan nostamatta ensivaiheessa ilmanvaihtokoneen pyörimisnopeutta. Tehostuksen alkaessa tehostusalueen ON/OFF-tehostuspelti avautuu ja tilaan virtaava ilmamäärä kasvaa. Mikäli DCV-järjestelmää ohjaava hiilidioksidipitoisuus nousee tehostuksesta riippumatta, antaa Nuuka AI Air rakennusautomaatiolle tiedon nostaa IV-koneiden pyörimisnopeutta. Kun IV-koneiden pyörimisnopeutta ei nosteta heti tehostuksen alkaessa säästää muuttuvapaineinen ohjaustapa puhallinenergiaa.

Nuuka AI Air toimii rakennusautomaation päällä ohjaten rakennusautomaatiota. Mikäli raja-arvot ylittyvät kuten esimerkiksi tiedonsiirtokatkosten aikana, antaa Nuuka AI Air ohjauksen rakennusautomaatiolle ja ilmanvaihtoa ohjataan rakennusautomaation asetusarvojen mukaisesti. Hiilidioksidipitoisuus 800 ppm toimii raja-arvona, jolloin Nuuka AI Air antaa ohjauksen rakennusautomaatiolle ja IV-koneet menevät täydelle pyörimisnopeudelle. Hiilidioksidipitoisuuden ollessa alle 800 ppm, Nuuka AI Air ohjaa ilmanvaihtoa.

7 Mittausdata ja energiankulutuksen laskenta

Mittausdatan kerääminen aloitettiin tutkimalla rakennuksen ilmanvaihtosuunnitelmia ja selvittämällä, mitkä ilmanvaihtokoneista toimivat tarpeenmukaisesti. Osa ilmanvaihtokoneista toimivat vakioilmavirralla ja palvelevat yleisiä tiloja, käytäväalueita, keittiötä ja sosiaali-tiloja. Vakioilmavirralla toimivat ilmanvaihtokoneet jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.

7.1 Energiankulutuksen lähtötiedot

Ilmanvaihtokoneiden tarkastelu aloitettiin tutustumalla asennettujen ilmanvaihtokoneiden konekortteihin, jotka ovat saatavilla BEM projektipankista. Ilmanvaihtokoneiden konekortit ovat ilmanvaihtokonevalmistajan tekemiä kohdekohtaisia raportteja, joissa esitetään valittujen ilmanvaihtokoneiden tekniset tiedot ilmanvaihtosuunnitelmien ilmamäärillä ja painehäviöillä. Konekorteista kerättiin tiedot tulo- ja poistopuhaltimien ilmavirroista ja SFP-luvuista. SFP-lukuina käytettiin konekorttien puhallinkohtaisia SFP-lukuja. Suunnitelmanmukaisia ilmavirtoja vastaava sähköverkosta otettu teho laskettiin affiniteettisääntöä käyttäen. Affiniteettisääntöjen mukaan tilavuusvirtojen suhde on suoraan verrannollinen pyörimisnopeuksien suhteeseen, yhtälö 5. Tehojen suhde on suoraan verrannollinen pyörimisnopeuksien suhteen kolmanteen potenssiin, yhtälö 6. Affiniteettisäännöistä voidaan johtaa yhtälö 7, josta saadaan suoraan mitoitusilmavirtaa vastaava teho.

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n}{n_0} \quad (5)$$

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 \quad (6)$$

$$P = \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^3 \cdot P_0 \quad (7)$$

Q	on uusi ilmamäärä
Q ₀	on alkuperäinen ilmamäärä
n	on uusi kierrosnopeus
n ₀	on alkuperäinen kierrosnopeus

P	on uusi puhaltimen verkosta ottama teho
P ₀	on alkuperäinen puhaltimen verkosta ottama teho

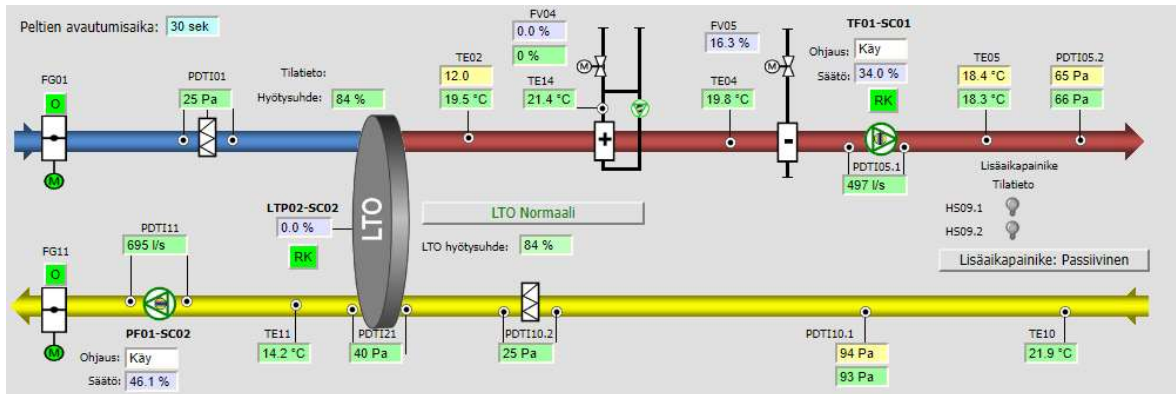
Ilmanvaihtokoneiden puhaltimien tehotietojen lisäksi lähtötiedoiksi tarvittiin ilmantiheys ja ominaislämpökapasiteetti ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin tehon laskentaa varten. Ilman ominaislämpökapasiteettina käytettiin arvoa 1 000 J/kgK. Ilman tiheys saadaan lasketta ideaalikaasun tilayhtälön avulla. Laskennan yksinkertaistamiseksi ilman tiheytenä käytettiin 1,2 kg/m³.

7.2 Mittausdata

Nuuka -järjestelmään kerätään mittausdataa rakennusautomaation kautta. Nuuka Portal -palvelu toimii verkkoselaimen kautta ja sivustolla on mahdollista tutkia mittausdatan trendejä valituilta ajanjaksoilla. Mittausdataa voidaan ladata .xls tiedostona, jolloin eri datapisteiden kerääminen samaan Excel -tiedostoon helpottuu.

Työssä hyödynnettiin Nuukasta saatavia ilmanvaihtokonekohtaisia datapisteitä. Datapisteinä käytettiin:

TE02	tuloilman lämpötila LTO:n jälkeen
TE04	tuloilman lämpötila lämmityspatterin jälkeen
PDTI05	tuloilmamäärä
PDTI11	poistoilmamäärä
FV04	lämmityspatterin venttiilin asento



Kuva 9 Ilmanvaihtokone I201TK LPK Yliskylä 9.11.2022

Kuvassa 9 on esitettyä kuvakaappaus I201TK ilmanvaihtokoneen grafiikasta. Kuvasta nähdään, että anturi TE02 mittaa tuloilman lämpötilaa LTO:n ja ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin välissä. Tässä kohdassa poistoilmasta talteen otettu lämpöenergia on siirtynyt LTO:n välityksellä ulkoilmasta otettuun raitisilmaan ja ilmavirran nimitys vaihtuu tuloilmaksi (Sandberg, 2014, p. 400). Lämpötila-anturi TE04 on sijoitettu lämmityspatterin jälkeen ennen viilennyspatteria. Näin ollen TE04 ja TE02 välinen lämpötilan nousu tapahtuu ilmanvaihtokoneen lämmityspatterissa. Lämmityspatterin teho lasketaan yhtälöllä 3.

Lämmityspatterin säätöventtiilin FV04 säätöarvo kertoo säätöventtiilin asennon. Venttiilin FV04 arvon ollessa 0 % venttiili on kiinni ja lämmityspatterin läpi ei kulje lämmitettyä lämmönsiirtonestettä ja tuloilma ei lämpene patterissa. Lämmityspatterin pumppu P1 saattaa kuitenkin käydä jumiutumisen välttämiseksi, mutta sen aiheuttama lämpöenergia on työssä arvioitu niin pieneksi, ettei sitä oteta tarkastelussa huomioon.

Nuuka -järjestelmästä on saatavilla ilmanvaihtokoneiden aikaohjelma. Aikaohjelman arvo on 0 tai 1. Arvon ollessa 0, ilmanvaihtokone ei käy ja arvon ollessa 1 ilmanvaihtokone on käynnissä. Ilmanvaihtokoneessa voidaan käyttää kevennettyä käynnistystä, jolloin aikaohjelma muuttuessa arvosta 0 arvoon 1 ilmanvaihtokone käynnistyy 30 sekunnin aikana tavoitepyörimisnopeuteen. Kevennetty käynnistys mahdollistaa ilmanvaihtokoneen sulkupeltien ja venttiileiden avautumisen ennen tavoitepyörimisnopeutta. Ilmanvaihtokoneen ilmamääriä mitataan PDTI05 ja PDTI11 -antureilla.

7.3 Mittausdatan käsittely

Nuuka -järjestelmästä haettu mittausdata sijoitettiin Excel-tilukkolaskentaohjelmaan. Ilmanvaihtokoneille I201TK/PK, I202TK/PK ja I201TK/PK luotiin Excel-tilukko, jossa jokaiselle koneelle oli oma välilehti. Nuuka -järjestelmästä haetun mittausdatan mittausväli oli 1 minuutti. Mittausdataa kerättiin seuraavista mittapisteistä:

- Ilmanvaihtokoneen aikaohjelma
- TE02 tuloilman lämpötila LTO:n jälkeen, °C
- TE04 tuloilman lämpötila lämmityspatterin jälkeen, °C
- PDTI05 tuloilmamäärä, m³/s
- PDTI11 poistoilmamäärä, m³/s

Nuuka -järjestelmästä tutkittiin lämmityspatterin säätöventtiilin säätöarvo. Säätöarvon todettiin olevan koko tarkastelujakson suurempaa kuin nolla, joten lämmityspatterin läpi kulki koko tarkastelujakson lämmitetty lämmönsiirtoneste. Mittausdatan lisäksi Excel tilukkoon lisättiin sarakkeet laskennallisia arvoja varten:

- $\Delta t_{\text{lämmityspatteri}}$, (TE04 – TE02) °C
- Laskennallinen ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin teho, kW
- Laskennallinen tuloilmapuhaltimen teho, kW
- Laskennallinen poistoilmapuhaltimen teho, kW

Ilmamäärinä ja lämmityspatterin lämpötilaerona käytettiin mitattua dataa. Lämmityspatterin teho laskettiin jokaiselle mittaushetkelle yhtälöllä 3. Tulo- ja poistopuhaltimien teho laskettiin jokaiselle mittaushetkelle yhtälöllä 6.

Koska ilmanvaihtokoneiden tulo- ja poistoilmavirran mittausdatassa oli mittaustuloksia koneiden ollessa pois päältä, puhaltimien ja lämmityspatterin tehoa laskennassa poissuljettiin koneiden käyttöajan ulkopuolinen mittausdata lisäämällä yhtälöön aikaohjelman arvo 0 tai 1. Aikaohjelman arvolla 0 kerrottaessa koneen käyntiajan ulkopuoliset tulokset ovat 0 ja käyntiajalla tulos ei muutu kerrottaessa arvolla 1. Tämä menettelytapa poistaa laskennasta puhaltimien ja lämmityspatterin tehot käyntiajan ulkopuolelta.

Nuukan mittausdatassa oli tilanteita, jolloin TE04 lämpötila oli suurempi kuin TE02. Ilmanvirran lämpötilan lasku lämmityspatterissa tarkoittaisi negatiivista lämmityspatterin tehoa. Tämän takia $\Delta t_{\text{lämmityspatteri}}$ (TE04-TE02) laskennalle annettiin ehto, että lukeman on oltava suurempi kuin nolla, jolloin negatiiviset luvut saivat arvoksi nolla.

Nuuka -järjestelmästä on saatavissa suoraan kolmen ilmanvaihtokoneen I201TK, I202TK ja I205TK lämmityspatterin laskennallinen teho. Tässä työssä päädyttiin käyttämään laskennallista tehoa, jolloin laskentatapa ja lähtöarvot ovat samat DCV- ja CAV-järjestelmien energiankulutusta laskettaessa. Lämmityspatterin tehon osalta laskennalliset ja Nuukan energiankulutustiedot erosivat IV-koneesta riippuen 3–17 %. Laskennallisten energiankulutusten tulokset olivat suurempia kuin Nuukan -järjestelmästä saatavat energiankulutukset.

7.4 CAV-järjestelmän laskenta

CAV-järjestelmän puhallintehon ja lämmityspatterin tehon laskenta suoritettiin samalla tavalla kuin DCV-järjestelmän tehon laskenta. CAV-järjestelmän ilmamäärinä käytettiin ilmanvaihtosuunnitelmissa olevia mitoitusilmamääriä, I201TK ja I202TK tulo- ja poistoilmavirta oli 1,3 m³/s ja I205TK 1,1 m³/s. IV-koneen lämmityspatterin teho laskettiin mitattujen lämpötilojen TE04 ja TE02 erotuksesta. Lämmityspatterin tehon laskennassa ei otettu huomioon lämmityspatterin hyötysuhteen mahdollista muutosta ilmavirran muuttuessa eli lämpötilan laskettiin nousevan saman verran DCV- ja CAV-järjestelmissä.

CAV-järjestelmästä laskettiin samat arvot kuin DCV-järjestelmästä eli lämmityspatterin teho sekä tulo- ja poistoilmapuhaltimen teho. Lämmityspatterin tehoa laskettaessa ilman ominaislämpökapasiteettina ja ilman tiheytenä käytettiin samoja arvoja kuin DCV-järjestelmän laskennassa. CAV-järjestelmän puhaltimien tehonlaskennassa ei otettu huomioon puhaltimien kevennettyä käynnistystä.

7.5 Tehosta energiaksi

Mittausdatan tietojen perusteella puhaltimien ja lämmityspatterin tehot laskettiin jokaiselle mittauspisteelle. Jokaisella tutkittavalla aikavälillä mittausdataa oli saatavilla minuutin välein, joten neljän viikon tarkastelun aikana laskettiin jokaiselle kolmelle tarkasteltavalle

ilmanvaihtokoneelle 40 320 tehoarvoa. Vuorokauden mittaisilla tarkastelujaksoilla mittauspisteitä oli 1 440.

Yhteenlaskettujen tehojen summa saatiin energiaksi huomioimalla, että mittaukset oli suoritettu minuutin välein eli 1/60 h. Kertomalla tehojen summa 1/60 h saadaan yksiköksi kWh.

7.6 Ilmamäärät vuorokauden kokonaisilmamääräksi

Tulo- ja poistoilmamäärien mittaustulokset ovat minuutin keskiarvolliset mittaukset yksikössä kuutiometriä sekunnissa 60/1 sekuntia. Näin ollen vuorokauden kokonaisilmamäärän laskemiseksi mittaustulosten summa oli kerrottava kuudellakymmenellä.

8 DCV-järjestelmän energiansäästöpotentiaali

Energiansäästöpotentiaalın tarkastelu tehtiin neljän viikon ajanjaksolla 26.9.–23.10.2022 sekä yhden päivän ajanjaksolla 26.10.2022. Näiden lisäksi tarkasteltiin DCV-järjestelmän säätötavan vaikutusta energiankulutukseen. Säätötavan vaikutusta puhaltimien energiankulutukseen tarkasteltiin kolmena perättäisenä perjantaina. Muista tarkasteluista poiketen säätötapojen tarkastelussa CAV-järjestelmän ilmamäärinä käytettiin mitattua dataa. CAV-järjestelmän mittausdata kerättiin perjantailta 2.9.2022, vakiopainesäätöisen DCV-järjestelmän perjantailta 9.9.2022 ja muuttuvapainesäätöisen järjestelmän perjantailta 16.9.2022.

8.1 Neljän viikon tarkastelu

Neljän viikon tarkastelujakso ajoittui maanantai 26.9.2022 klo 0:00 – sunnuntai 23.10.2022 klo 23:59 väliselle ajalle. Tarkastelujakson aikana DCV-järjestelmä oli muuttuvapainesäätöisessä ohjauksessa ja päiväkotı oli käytössä normaalin aikataulun mukaisesti arkisin klo 6:15–17:30 (Sydänmäki, 2022).

8.1.1 Puhallinenergia

Ilmanvaihtokoneiden puhaltimien tehonlaskennan kautta saadut energiakulutukset on esitetty taulukossa 4. Taulukossa on esitetty mitattujen minuuttikohtaisten ilmamäärien perusteella lasketut DCV-järjestelmän puhaltimien energiankulutukset ja laskennallisen CAV-järjestelmän energiankulutukset. Tarkastelujakson aikana DCV-järjestelmän ilmanvaihtokoneiden puhaltimien energiankulutus oli 23–54 % ilmanvaihtokoneesta riippuen laskennallisen CAV-järjestelmän energiankulutuksesta. Neljän viikon tarkastelujakson aikana tarkasteltujen ilmanvaihtokoneiden puhaltimien yhteenlaskettu energiansäästöpotentiaali oli 60 % laskennallisen CAV-järjestelmän energiankulutukseen verrattuna.

Taulukko 4 Ilmanvaihtokoneiden puhaltimien energiakulutus

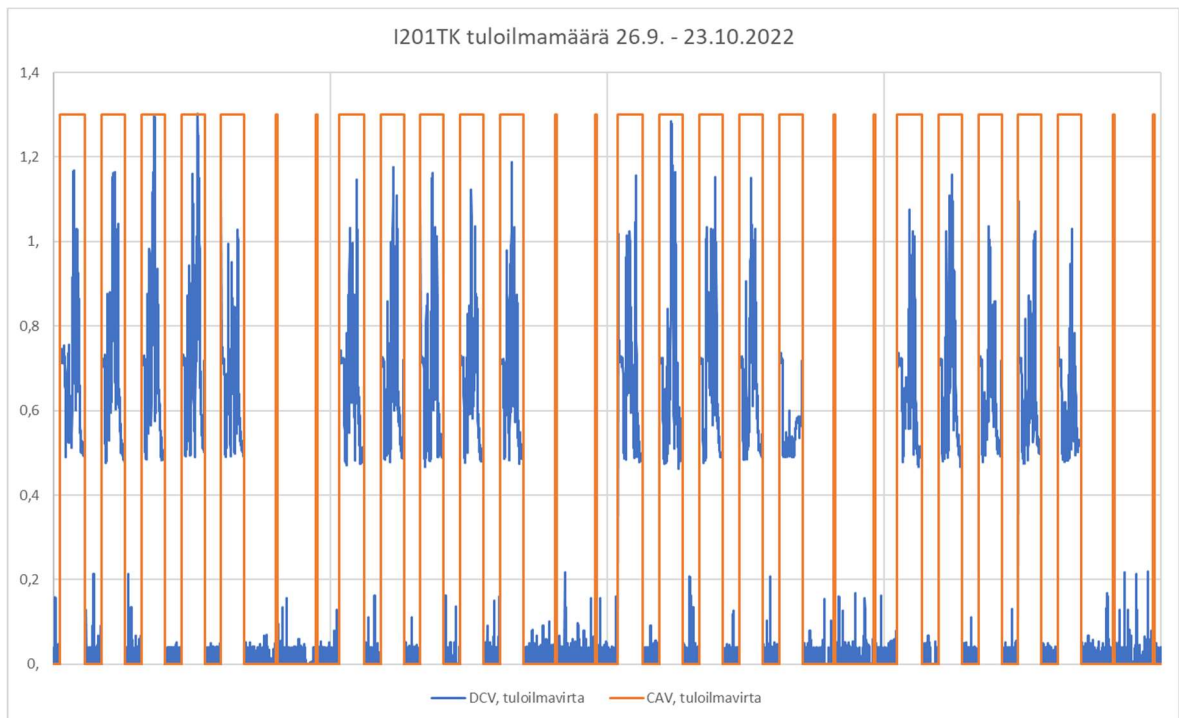
Ilmanvaihtokoneiden puhaltimien energiakulutus, kWh						
	CAV	DCV	DCV/CAV	Energiansäästö, kWh	Energiansäästö, %	
I201TK	1020	236	23 %	784	77 %	
I202TK	1020	491	48 %	529	52 %	
I205TK	622	338	54 %	284	46 %	
Yhteensä	2662	1065	40 %	1597	60 %	

Kuvassa 10 on esitetty ilmanvaihtokoneen I201TK toteutunut DCV-järjestelmän tuloilmamäärä ja CAV-järjestelmän laskennallinen tuloilmamäärä neljän viikon tarkastelujakson ajalta. Ilmanvaihtokoneen I201TK tuloilmamäärä ei joitain poikkeuksia lukuun ottamatta saavuta suunniteltua mitoitusilmavirtaa neljän viikon tarkastelujakson aikana. Toteutunut ilmamäärä on suurimman osan ajasta noin $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$. Tämä saattaa tarkoittaa, että tilojen käyttäjämäärät tai kuormitus ei vastaa suunniteltuja käyttäjämääriä, kuormitusta tai tilojen minimi-ilmamäärät ovat suunniteltu liian suuriksi, jolloin hiilidioksidipitoisuus ei nouse tehosraja-arvon yli.

LPK Yliskylän DCV-järjestelmässä tiloissa on kaksi tuloilman päätelaitetta, joiden välissä on ON/OFF-tehostuspelti. Kahden päätelaitteen DCV-järjestelmässä noin puolet mitoitusilmamäärästä (mini-ilmamäärä) tuodaan toisen päätelaitteen kautta ja tehostusilmavirta mitoitusilmamäärästä toisen päätelaitteen kautta. Kun minimi-ilmamäärä on noin puolet mitoitusilmamäärästä, tarkoittaa se henkilöperustaisessa ilmamäärien mitoituksessa sitä, että tilan kuormituksen ollessa alle 50 % suunnitellusta käyttäjämäärästä, ilmamäärät ovat liian suuret. Jotta minimi-ilmamäärää voidaan laskea alle 50 % mitoitusilmamäärästä, tulee tilaan lisätä päätelaite tai päätelaitteita, jolloin tehostusilmamäärää voidaan ohjata esimerkiksi 25 % portain. Toinen vaihtoehto on toteuttaa DCV-järjestelmä IMS-laittein, jolloin minimi-ilmamäärä voidaan säätää esimerkiksi 30 % mitoitusilmamäärästä ja IMS-laite tehostaa ilmamäärää hiilidioksidipitoisuuden perusteella portaattomasti mitoitusilmamäärään.

Tätä tutkimusta tehdessä ei ollut tiedossa tilakohtaisia käyttäjämääriä, joten ilmanvaihtokonekohtaisen ilmamäärän ja toteutuneen käyttäjämäärän suhdetta ei ollut mahdollista tarkastella. Koko rakennuksen toteutunutta käyttäjämäärää on käsitelty osassa 10.

Puhaltimien energiakulutusta laskettaessa laskennasta poistettiin kuvan 10 alareunassa näkyvät käyntiajan ulkopuoliset ilmapirrat aikaohjelman 0/1 kertoimen avulla.



Kuva 10 I201TK tuloilmamäärä neljän viikon tarkastelujaksolla

8.1.2 Ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden energiankulutus

Taulukossa 5 on esitetty ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin lämpöenergian kulutus neljän viikon tarkastelujaksolla. Ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden lämmitysenergian kulutus on ilmanvaihtokoneesta riippuen 50–83 % laskennallisen CAV-järjestelmän lämmityspatterin lämmitysenergian kulutuksesta. Yhteenlaskettuna kolmen tarkastellun ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin energiansäästöpotentiali on 29 % laskennalliseen CAV-järjestelmään verrattuna.

Taulukko 5 Ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden lämpöenergiankulutus

	Lämmityspatterin lämmitysenergia, kWh			Energiansäästö, kWh	Energiansäästö, %
	CAV	DCV	DCV/CAV		
I201TK	133	67	50 %	66	50 %
I202TK	341	252	74 %	88	26 %
I205TK	151	126	83 %	25	17 %
Yhteensä	625	445	71 %	180	29 %

Energiankulutustiedoista ja laskelmista voidaan todeta, että toteutunut DCV-järjestelmän energiankulutus on huomattavasti pienempi kuin laskennallisen CAV-järjestelmän neljän viikon tarkastelujaksolla.

8.2 Vuorokauden tarkastelu

Vuorokauden mittaiseksi tarkastelupäiväksi valittiin neljän viikon tarkastelujakson ulkopuolinen sattumanvarainen arkipäivä. Päiväksi valikoitu torstai 26.10.2022. Tarkastelua varten haettiin Nuukasta ilmamäärien mittaustietoa DCV-järjestelmään liitetyistä ilmanvaihtokoneista klo 0:00 – 23:59 väliseltä ajalta. Datapisteiden mittaussväli on yksi minuutti ja DCV-järjestelmää ohjattiin Nuuka AI Air tekoälyn avulla muuttuvapainesäätöisesti. Vuorokauden tarkastelujaksossa tarkasteltiin CAV- ja DCV-järjestelmien vuorokauden kokonaisilmamääriä ja puhaltimien energiankulutusta.

8.2.1 CAV- ja DCV-järjestelmien ilmamäärät

Nuuka -järjestelmästä kerätyn minuuttikohtaisen ilmanvaihtokoneiden kokonaisilmamäärien perusteella pystyttiin laskemaan ilmanvaihtokoneen vuorokausikohtainen kokonaisilmamäärä. CAV- ja DCV-järjestelmien kokonaisilmamäärä saatiin laskemalla yhteen minuuttikohtaiset mittaustulokset ja kertomalla luku 60:llä, jolloin tulokseksi saatiin m³/vrk. Laskenta suoritettiin kaikkien kolmen ilmanvaihtokoneen I201TK, I202TK ja I205TK tulo- ja poistoilmamäärille. CAV-järjestelmän ilmamäärät laskettiin olevan suunnitelmien mukaiset.

Taulukko 6 Ilmanvaihtokoneiden vuorokauden kokonaisilmamäärä 26.10.2022

	Ilmamäärä, m ³ /vrk			
	DCV, tulo	DCV, poisto	CAV, tulo	CAV, poisto
I201TK	34643	44190	65520	65520
I202TK	51759	56636	65520	65520
I205TK	46127	45056	50400	50400

Taulukossa 6 on esitetty muuttuvapainesäätöisen DCV-järjestelmän ja CAV-järjestelmän vuorokauden kokonaisilmamäärät ilmanvaihtokoneittain. I201TK ja I202TK mitoitusilmamäärät ovat samat +/- 1,3 m³/s ja I205TK +/- 1,1m³/s. Taulukosta 6 on nähtävissä, että vuorokauden aikana ilmanvaihtokoneiden I201TK ja I202TK ilmamäärät eroavat toisistaan,

vaikka ilmanvaihtokoneiden palvelualueiden käyttötavat ovat samanlaisia. Taulukosta on myös todettavissa että tulo- ja poistoilmavirroilla on eroa, vaikka rakennuksen ilmamäärät on säädetty kesällä 2022. Taulukossa 7 on esitetty DCV-järjestelmän ilmanvaihtokoneiden vuorokauden kokonaisilmamäärä suhteessa laskennalliseen CAV-järjestelmän ilmamäärään.

Taulukko 7 DCV-järjestelmän ilmamäärät 26.10.2022 laskennallisen CAV-järjestelmän ilmamääriin verrattuna

DCV-järjestelmän ilmamäärät			
	Tuloilma	Poistoilma	Keskiarvo
I201TK	53 %	67 %	60 %
I202TK	79 %	86 %	83 %
I205TK	92 %	89 %	90 %

8.2.2 Puhaltimien energiankulutus

Puhaltimien sähköenergiankulutus laskettiin koko vuorokauden ajalle Nuukasta saatuja ilmamääriä sekä ilmanvaihtokoneiden konekorttien SFP-lukuja sekä affiniteettisääntöjä käyttäen. Puhaltimien energiankulutus saatiin laskemalla mittauspisteiden tehojen summa ja jakamalla summa 60:llä.

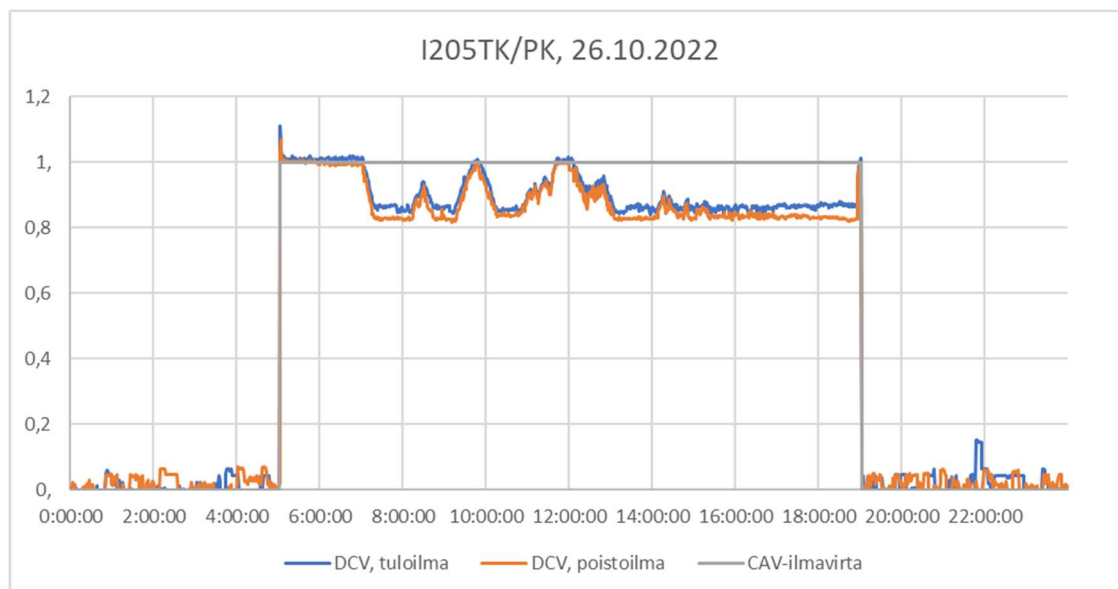
Taulukko 8 Ilmanvaihtokoneiden puhaltimien energiankulutus

Tulo- ja poistopuhaltimien energiankulutus, kWh				
	CAV	DCV	Energiansäästö, kWh	Energiansäästö, %
I201TK	48,9	11,6	37,3	76 %
I202TK	43,1	28,0	15,1	35 %
I205TK	22,4	16,2	6,2	28 %
Yhteensä	114,4	55,8	58,6	51 %

Taulukossa 8 on esitetty 26.9.2022 IV-koneiden DCV- ja CAV-järjestelmien puhaltimien energiankulutukset. Taulukosta 8 voidaan todeta, että I201TK IV-koneen DCV-järjestelmän energiansäästöpotentiaali on 76 % laskennalliseen CAV-järjestelmään verrattuna. I201TK, I202TK ja I205TK yhteenlaskettu puhaltimien energiansäästöpotentiaali vuorokauden tarkastelun perusteella on 51 %.

Taulukosta 7 voidaan todeta, että I205TK ilmamäärä oli vain 10 % vähemmän CAV-järjestelmään verrattuna, mutta affiniteettisäännöillä laskettuna energiansäästö on 28 %. Kuvassa 11 on esitetty I205TK ilmanvaihtokoneen mitattu ilmamäärä sekä laskennallinen

CAV-järjestelmän ilmamäärä. Kuvasta voidaan nähdä, että I205TK IV-koneen mitatut ilmamäärät saavuttavat suunnitelmienmukaisen mitoitusilmavirran tehostustilanteessa. Kuvasta 11 voidaan todeta, että Nuuka AI Air -ohjauksessa olevan I205TK ilmanvaihtokoneen minimi-ilmamäärä on noin $0,82 \text{ m}^3/\text{s}$ eli noin 82 % mitoitusilmavirrasta. Tätä työtä tehdessä ei ole tiedossa onko minimi-ilmamäärä säädetty suunnitelmien mukaisesti.



Kuva 11 I205TK DCV- ja CAV-järjestelmien ilmamäärät 26.10.2022

8.3 DCV-järjestelmän säätötapojen vaikutus energiankulutukseen

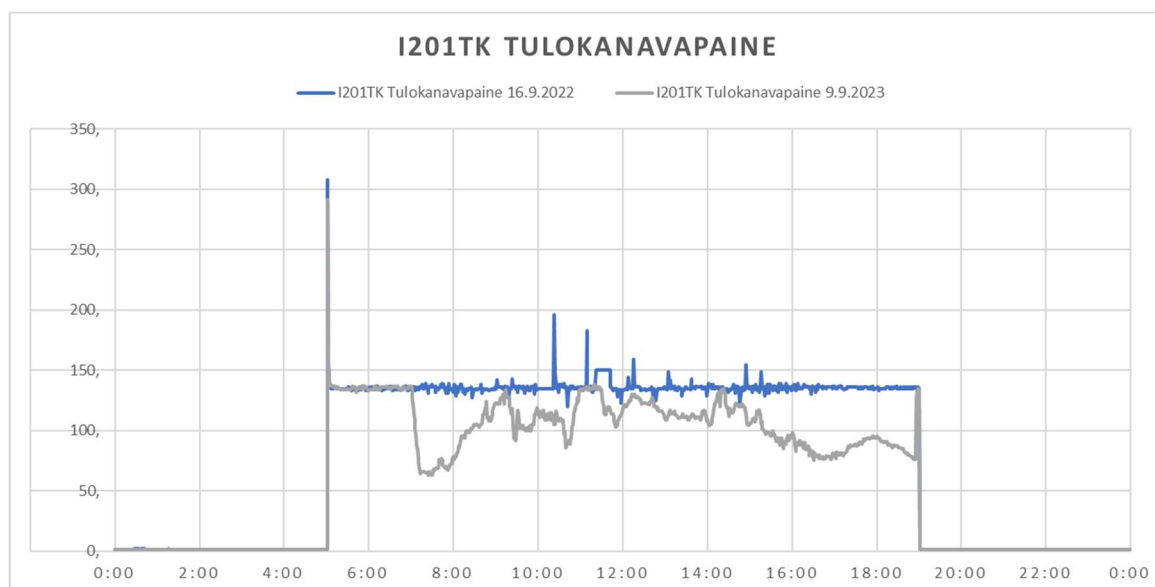
DCV-järjestelmän säätötapojen vertailussa tutkittiin vakiopainesäätöisen ja muuttuvapainesäätöisen DCV-järjestelmän vaikutusta puhaltimien energiankulutukseen. Säätötapojen vertailussa käytettiin muista tarkasteluista poiketen mitattuja CAV-järjestelmän ilmavirtoja. Tarkastelun kohteena käytettiin I201TK ilmanvaihtokonetta. I202TK ja I205TK ilmanvaihtokoneiden ilmamäärät eivät vastanneet suunniteltuja ilmamääriä valittuina tarkastelupäivinä, joten ne suljettiin säätötapojen tarkastelun ulkopuolelle.

LPK Yliskylän ilmanvaihto oli toiminnassa vakioilmavirralla perjantaina 2.9.2022. LPK Yliskylän ilmanvaihto muutettiin toimimaan tarpeenmukaisena 5.9.2022 jolloin DCV-järjestelmä oli vakio paineohjauksella. Vakio paineohjauksen tarkastelupäiväksi valittiin myös perjantai, jolloin pois suljetaan se mahdollisuus, että tilojen käyttäjämäärä vaihtelisi viikonpäivän mukaan. Vakio paineisen säätötavan tarkastelupäiväksi valittiin perjantai 9.9.2022.

LPK Yliskylän DCV-järjestelmä liitettiin 12.9.2022 Nuuka AI Air ohjaukseen, jolloin järjestelmä muutettiin muuttuvapaineohjaukseen. Nukka AI Air -järjestelmään käyttöönoton yhteydessä ilmanvaihtokone I203TK muutettiin myös tarpeenmukaiseen ohjaukseen, mutta jätettiin tässä työssä tarkastelun ulkopuolelle. Muuttuvapainesäätöisen DCV-järjestelmän tarkastelupäiväksi valittiin perjantai 16.9.2022.

Koska ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin teho riippuu ilmamäärän lisäksi ulkolämpötilasta ja tutkittavat päivät eroavat toisistaan, jätettiin lämmityspatterin tehon tarkastelu säätötapatarkastelun ulkopuolelle. DCV-järjestelmien säätötapoja vertailtiin vain ilmanvaihtokoneen puhaltimien energiankulutusta ja verrattiin niitä mitattuun CAV-järjestelmän puhaltimien energiankulutukseen.

Kuvassa 12 on havainnollistettu vakiopainesäätöisen ja muuttuvapainesäätöisen DCV-järjestelmän tulokanavapaineen vaihtelua tarkastelupäivinä. Kuvasta 12 on nähtävissä, miten kahden tunnin mittaisen aamuhuuhtelun jälkeen Nuuka AI Air ohjaama muuttuvapainesäätöinen DCV-järjestelmä antaa kanavapaineen laskea vakiopainetta matalammaksi, mutta kanavapaine kuitenkin nousee asetusarvoon tehostuksen niin vaatiessa.



Kuva 12 I201TK tulokanavapaine 9.9.2022 ja 16.9.2022

Ilmanvaihtokoneiden tulo- ja poistopuhaltimien energiankulutuksen laskentaa varten kerättiin Nuuka -järjestelmästä ilmamäärien mittaustiedot. Ilmamäärien mittaustiedot olivat saatavissa jokaiselta tarkasteltavalta vuorokaudelta minuutin välein. Taulukossa 9 on esitetty

CAV- ja DCV-järjestelmien kokonaisilmamäärät vuorokaudessa. Taulukosta 9 voidaan todeta, että tulo- ja poistoilmamäärät eroavat toisistaan jokaisena tarkastelupäivänä. Taulukosta 9 voidaan myös todeta, että vakioilmavirtaisen järjestelmän vuorokauden tuloilman kokonaisilmamäärä on hyvin lähellä mitoitusilmamäärää 65 520 m³/vrk, joten tuloilmapuhaltimien energiankulutuksista saadaan hyvin tarkka käsitys DCV-järjestelmän energiansäästöpotentiaalista. Taulukosta 9 voidaan todeta, että muuttuvapainesäätöisen DCV-järjestelmän kokonaisilmamäärä on 56 % CAV-järjestelmään verrattuna.

Taulukko 9 Ilmanvaihtokoneen I201TK kokonaisilmamäärät tarkastelupäivinä

	Tuloilmavirta, m ³ /vrk		Poistoilmavirta, m ³ /vrk		Yhteensä	
I201TK vakioilmavirta	65600	100 %	68702	100 %	134302	100 %
I201TK vakiopainesäätöinen	38321	58 %	48464	71 %	86785	65 %
I201TK muuttuvapainesäätöinen	32556	50 %	42780	62 %	75336	56 %

Taulukossa 10 on esitetty puhaltimien energiankulutukset. Vakioilmavirtaisen tarkastelupäivän 2.9.2022 ja muuttuvapainesäätöisen DCV-järjestelmän tarkastelupäivän 16.9.2022 puhaltimien energiankulutuksessa on huomattava ero. Mikäli oletetaan, että tilojen kuormituksen vastaavat tarkastelupäivinä toisiaan on muuttuvapainesäätöisen DCV-järjestelmän energiansäästöpotentiaali 81 % laskennalliseen CAV-järjestelmään verrattuna.

Taulukko 10 Ilmanvaihtokoneen I201TK puhaltimien energiankulutus tarkastelupäivinä

	Tuloilmapuhaltimen energiankulutus, kWh/vrk		Poistoilmapuhaltimen energiankulutus, kWh/vrk		Yhteensä	
I201TK vakioilmavirta	24,1	100 %	28,8	100 %	52,9	100 %
I201TK vakiopainesäätöinen	5,0	21 %	10,2	36 %	15,2	29 %
I201TK muuttuvapainesäätöinen	3,1	13 %	7,2	25 %	10,3	19 %

Taulukossa 11 on vertailtu ilmanvaihtokoneen I201TK kokonaisilmamäärää ja puhaltimien energiankulutusta DCV-järjestelmän vakiopainesäätöisessä ja muuttuvapainesäätöisessä ohjauksessa. Tarkasteltavien päivien perusteella muuttuvapainesäätöisen DCV-järjestelmän kokonaisilmamäärä on 13 % pienempi kuin vakiopainesäätöisen DCV-järjestelmän. Puhaltimien yhteenlasketussa energiankulutuksessa tämä tarkoittaa, että muuttuvapainesäätöinen DCV-järjestelmä kuluttaa 33 % vähemmän puhallinenergiaa kuin vakiopainesäätöinen DCV-järjestelmä.

Taulukko 11 DCV-järjestelmien säätötapojen erot I201TK ilmanvaihtokoneen puhaltimien energiakulutuksessa

	Kokonaisilmavirta, m ³ /vrk		Puhaltimien energiankulutus, kWh/vrk	
I201TK vakiopainesäätöinen	86785	100 %	15,2	100 %
I201TK muuttuvapainesäätöinen	75336	87 %	10,3	67 %

CAV-järjestelmän tarkastelupäivänä 2.9.2022 LPK Yliskylän toteutunut käyttäjämäärä oli 77 % tilapaikkojen määrästä. 9.9.2022 vakiopainesäätöisen DCV-järjestelmän tarkastelupäivänä 79 % ja 16.9.2022 muuttuvapainesäätöisen DCV-järjestelmän aikana 78 %. Tarkastelupäivien koko rakennuksen toteutuneet käyttäjämäärät vastaan toisiaan, joten tarkastelupäiviä voidaan pitää hyvin saman kaltaisina.

8.4 Sähkö- ja lämmitysenergian kustannussäästöt

Energiakustannusten säästöjä tarkasteltaessa energiahintoina käytettiin Helsingin kaupungin Energiategokkaan palvelurakennuksen suunnitteluohjeen elinkaarikustannuslaskennan lähtötietoja. Sähkön hintana käytettiin 100 €/MWh ja kaukolämmön hintana Helen kaukolämmön kausihintaa (Helsingin kaupunki d, 2022). Sähkön hinnassa on mukana sähköenergia, sähkön siirto ja sähköverot. Kaukolämmön hintana käytettiin kauden 1.10.–31.12.2022 hintaa 86,65 €/MWh (Helen, 2022). Laskennassa käytetyt hinnat ovat arvonlisäverottomia.

Ilmanvaihtokoneiden puhaltimien energiankulutuksen kustannusta laskettaessa puhaltimien hyötysuhteen oletettiin pysyvän samana pyörimisnopeudesta riippumatta. Puhaltimien energiakustannuksia tarkasteltaessa käytettiin tässä työssä laskettuja puhaltimien energiankulutustietoja. Taulukossa 12 on esitetty neljän viikon tarkastelujakson DCV-järjestelmän säästöt puhaltimien sähköenergiakustannuksissa CAV-järjestelmään verrattuna. Muuttuvapaineohjatulla DCV-järjestelmällä säästettiin neljän viikon tarkastelujaksolla noin 160 €. Mikäli rakennuksen käyttöprofiili vastaa vuoden ympäri neljän viikon tarkastelujakson käyttöä, voidaan DCV-järjestelmällä säästää noin 2 080 € vuodessa.

Taulukko 12 Ilmanvaihtokoneiden puhaltimien sähköenergian kustannussäästö

	Ilmanvaihtokoneiden puhaltimien sähköenergia			
	CAV, kWh	DCV, kWh	Energiansäästö, kWh	Energiansäästö, €
I201TK	1020	236	784	78 €
I202TK	1020	491	529	53 €
I205TK	622	338	284	28 €
Yhteensä	2662	1065	1597	160 €

26.10.2022 tehdyn vuorokauden tarkastelujaksolla ilmanvaihtokoneiden I201TK, I202TK ja I205TK puhaltimen energiansäätö oli 58,6 kWh. Vuorokauden puhallinenergiankulutuksen perusteella DCV-järjestelmällä voidaan säästää vuodessa noin 2 140 €. Kahden tarkastelujakson perusteella DCV-järjestelmän puhallinenergiankulutuksen säästöpotentiaalit ovat

hyvin lähellä toisiaan. DCV-järjestelmän ollessa monimutkaisempi CAV-järjestelmään verrattuna, on energiansäästöpotentiaalın laskeminen rakennuksen elinkaarelle hankalaa ja sen arvioiminen vaatii tietoa säätö- ja ohjauslaitteistojen ylläpitokustannuksista. Tässä työssä ei oteta kantaa DCV-järjestelmän säätö- ja ohjauslaitteiden ylläpitokustannuksiin.

Ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin lämpöenergiakustannuksia tarkastellessa tulee huomioida, että tarkastelujakso sijoittui syksylle, jolloin ilman lämmittämisen tarve LTO:n jälkeen on pieni LTO:n hyvästä hyötysuhteen ansiosta. Taulukossa 13 on esitetty DCV-järjestelmällä saavutettu ilmanvaihdon lämmitysenergian säästö CAV-järjestelmään verrattuna. Syyskuun neljän viikon tarkastelujaksolla DCV-järjestelmän lämpöenergian kustannus on noin 16 € vähemmän laskennalliseen CAV-järjestelmään verrattuna.

Taulukko 13 Ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden lämpöenergian kustannussäästö

	Ilmanvaihtokoneiden lämmityspatterin lämpöenergian kustannus			
	CAV	DCV	Energiansäästö, kWh	Energiansäästö, €
I201TK	133	67	66	6 €
I202TK	341	252	88	8 €
I205TK	151	126	25	2 €
Yhteensä	625	445	180	16 €

Helsingin kaupungilla on kiinteistönhallintajärjestelmä Siilon mukaan yhteensä 259 lasten päiväkotia, joiden kokonaishuoneistoala on 194 114 m². LPK Yliskylä huoneistoala 1 894 m² on noin 1 % kaikkien Helsingin päiväkotien huoneistoalasta. Huoneistoalan avulla saadaan karkea käsitys paljonko DCV-järjestelmien puhallinenergian säästöpotentiaali, on kaikissa Helsingin päiväkodeissa, kun vertailuna käytetään sitä, että kaikissa päiväkodeissa olisi CAV-järjestelmä. Jakamalla LPK Yliskylän puhallinenergian säästöpotentiaali huoneistoalan osuudella kaikkien päiväkotien yhteenlasketusta huoneistoalasta saadaan DCV-järjestelmän vuosittaiseksi puhaltimien energiansäästöpotentiaaliksi noin 200 000 €.

9 Huoneilman hiilidioksidipitoisuus

DCV-järjestelmän energiatehokkuutta tarkastellessa on tärkeää huomioida huoneilman hiilidioksidipitoisuuden muutokset vertailtavaan tilanteeseen. Helsingin kaupungin palvelurakennukset suunnitellaan siten, että rakennukset täyttävät Sisäilmastoluokitus 2018 S2 luokan mukaisen sisäilman hiilidioksidipitoisuusvaatimukset. Sisäilmastoluokka S2 mukainen hiilidioksidipitoisuuden tavoitearvo on enintään 550 ppm enemmän kuin ulkoilman hiilidioksidipitoisuus ja olosuhteiden pysyvyys on opetustiloissa 90 % käyttäjistä (Rakennustieto Oy, 2018).

Työssä tarkasteltiin kahden 1. kerroksen tilan huoneilman hiilidioksidipitoisuutta kolmena perättäisenä perjantaina. Tarkasteltavat tilat kuuluvat ilmanvaihtokoneen I201TK palvelualueeseen. Tarkasteltavina päivinä tilojen ilmanvaihto toimi vakioilmavirralla sekä tarpeenmukaisena kahdella eri säätötavalla.

- perjantai 2.9.2022, vakioilmavirtainen ilmanvaihto
- perjantai 9.9.2022, vakiopainesäätöinen tarpeenmukainen ilmanvaihto
- perjantai 16.9.2022, muuttuvapainesäätöinen tarpeenmukainen ilmanvaihto

Hiilidioksidipitoisuuden mittausdatana käytettiin Nuuka -järjestelmästä saatavana olevia huonekohtaisia hiilidioksidipitoisuusmittauksia. Tarkastelussa käytetty hiilidioksidipitoisuus ohjaa rakennuksen DCV-järjestelmää. DCV-järjestelmän tehostuksen käynnistysraja on 800 ppm ja tehostuksen sammutusraja 650 ppm.

9.1 Hiilidioksidipitoisuus

Työssä tarkasteltujen tilojen hiilidioksidipitoisuus käyttöajan ulkopuolella oli päivästä ja kellonajasta riippuen 420–460 ppm. Käyttöajan ulkopuolinen sisäilman hiilidioksidipitoisuus vastaa näin ollen ulkoilman hiilidioksidipitoisuutta. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuuteen vaikuttaa vallitseva säätila, joten tarkastelujaksojen vaihtelut kuuluvat normaaliin ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden vaihteluun (Ilmatieteenlaitos, 2022).

Tarkastelujaksojen aikana korkein mitattu sisäilman hiilidioksidipitoisuus 882 ppm oli muuttuvapainesäätöisen DCV-järjestelmän toiminta-aikana ja matalin

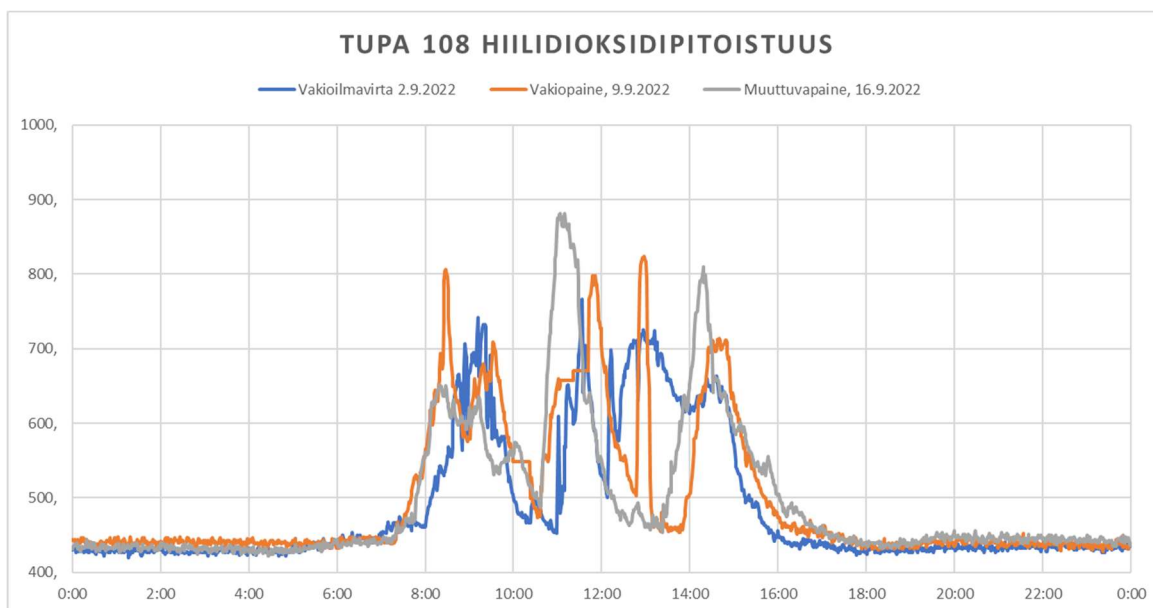
maksimihiiidioksidipitoisuus 767 ppm oli CAV-järjestelmän toiminta-aikana. Hetkellisiä korkeita hiilidioksidipitoisuuksia tärkeämpää on tarkastella korkeiden hiilidioksidipitoisuusarvojen jälkeiset pitoisuudet eli kuinka nopeasti hiilidioksidipitoisuudet alkavat laskea. Kuten kuvista 13 ja 14 nähdään, tehostuksen alkaessa hiilidioksidipitoisuudet kääntyvät nopeaan laskuun. Hiilidioksidipitoisuuden hetkelliseen kohoamiseen saattaa vaikuttaa mittausanturin lähellä oleskelu ja mittausanturin suuntaan kohdistuva keskustelu tai muut toiminta.

Taulukko 14 Hiilidioksidipitoisuudet huoneilmassa

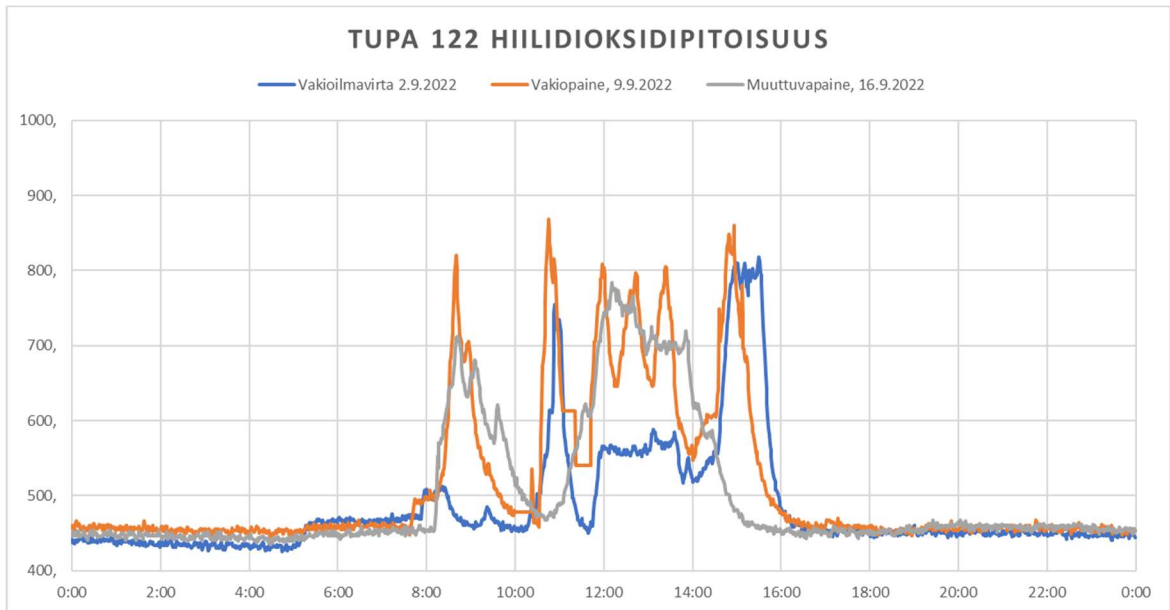
	Tila 108, ppm			Tila 122, ppm		
	CAV 2.9.2022	DCV, vakiop. 9.9.2022	DCV, muuttuvap. 16.9.2022	CAV 2.9.2022	DCV, vakiop. 9.9.2022	DCV, muuttuvap. 16.9.2022
Maksimi hiilidioksidipitoisuus	767	824	882	818	869	784
Hiilidioksidipitoisuuden keskiarvo klo 8:00 - 16:00	589	603	596	554	625	591

Tarkasteltaessa sisäilman hiilidioksidipitoisuuden keskiarvoa klo 8:00–16:00, pitoisuudet vaihtelevat ilmanvaihtojärjestelmästä riippuen 554–625 ppm (taulukko 14). Suurin keskiarvoinen pitoisuus 625 oli vakiopainesäätöisen DCV-järjestelmän toiminta-aikana ja pienin keskiarvoinen hiilidioksidipitoisuus 554 ppm CAV-järjestelmän toiminta-aikana.

Kuvissa 13 ja 14 on esitetty tarkasteltujen tilojen 108 ja 122 hiilidioksidipitoisuudet eri säätötavoilla. Kuvasta 13 on nähtävissä, että hiilidioksidipitoisuus nousee aamulla hyvin samanlaisesti säätötavasta riippumatta. Myös iltapäivällä lasten siirryttyä ulos tilan hiilidioksidipitoisuus laskee samalla tavalla järjestelmästä ja säätötavasta riippumatta.



Kuva 13 Tila 108 hiilidioksidipitoisuus



Kuva 14 Tila 122 hiilidioksidipitoisuus

9.2 Sisäilman laatu ilmanvaihtojärjestelmästä riippuen

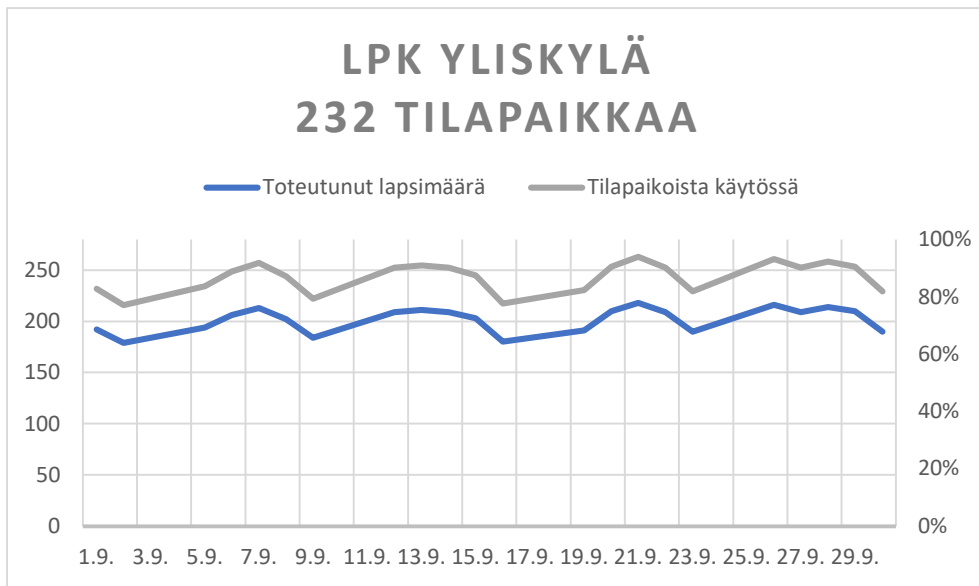
Ilmatieteen laitoksen mittaustulosten mukaan ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden vaihteluväli tarkasteluvälillä syyskuussa 2022 oli noin 410–430 ppm. Tämä tarkoittaa, että sisäilmastoluokka S2 mukainen sisäilman hiilidioksidipitoisuus tulee olla 90 % käyttäjasta alle 960–990 ppm. Kuvista 13 ja 14 voidaan todeta, että sisäilmastoluokkaa S2 ei ylitetty tai ilmanvaihtojärjestelmän säätötavasta riippumatta.

10 Rakennuksen toteutunut käyttäjämäärä

Mysen et al. (2005) tutki norjalaisten koulujen luokkahuoneiden toteutunutta käyttäjämäärää ja vertasi sitä suunniteltuun käyttäjämäärään. 157 luokkahuonetarkastelun perusteella keskimääräinen käyttäjämäärä 30 henkilön luokkahuoneessa oli 22 henkilöä (Mysen, et al., 2005). Toteutuneen ja suunnitellun käyttäjämäärän eron ollessa 27 % tarkoittaa se henkilöperustaisessa ilmamäärien mitoituksessa myös 27 % ylimitoitusta. Ilmamäärien ylimitoitus aiheuttaa ylisuuren ilmanvaihtojärjestelmän rakentamista ja turhia energiakustannuksia myös DCV-järjestelmissä, kun minimi-ilmamäärät suunnitellaan turhan suuriksi.

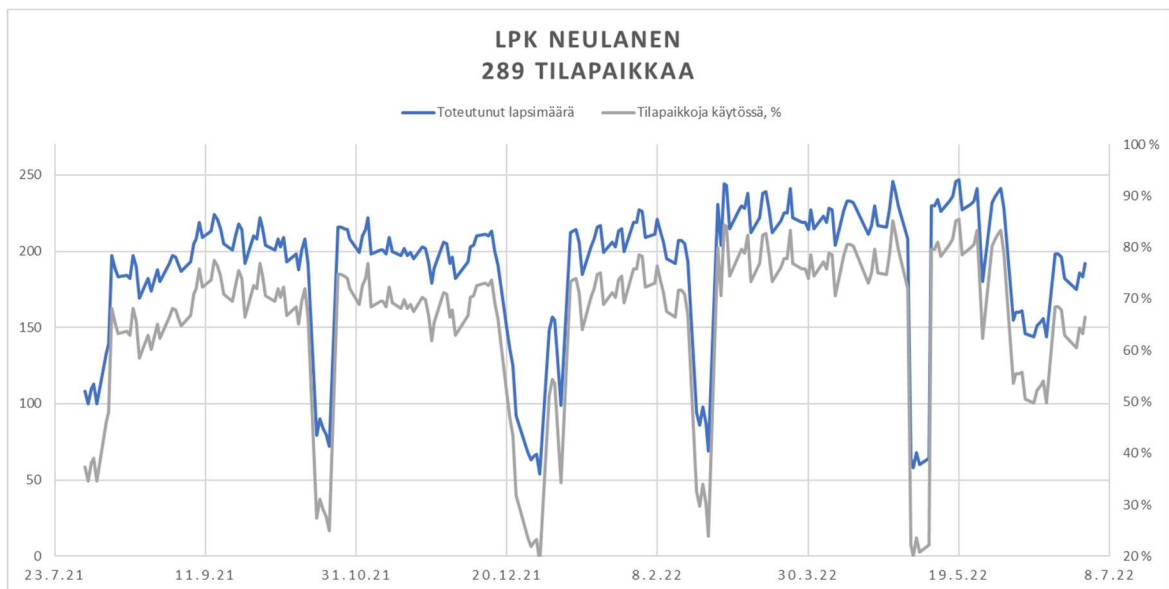
Tässä työssä tutkittiin helsinkiläisten lasten päiväkotien Yliskylän ja Neulasen toteutunutta käyttäjämäärää ja verrattiin sitä suunniteltuun käyttäjämäärään. LPK Neulanen käyttäjämäärä selvitettiin työn aluksi, kun kartoitettiin sopivaa päiväkotia DCV-järjestelmän tarkasteluun. Tiedot käyttäjämääristä saatiin päiväkotien johtajilta. Päiväkodin käyttäjämäärässä ei ole huomioitu aikuisia ja käyttäjämäärää on verrattu tilapaikkojen määrään. Tilapaikkojen määrällä tarkoitetaan maksimilapsimäärää, joka päiväkotiin voidaan sijoittaa. Tilapaikkojen määrä vaikuttaa yksittäisten tilojen käyttäjämäärään ja sen myötä ilmanvaihdon ilmamäärien suunnitteluun.

LPK Yliskylän toteutunutta käyttäjämäärää tutkittiin 1.-30.9.2022 väliseltä ajanjaksolta. LPK Yliskylässä on tilapaikkoja 232 lapselle. Tutkittavalla aikavälillä lapsia oli sijoitettuna 227 eli 98 % tilapaikkojen määrästä. Kuvassa 15 on esitetty LPK Yliskylän toteutunut lapsimäärä tarkastelujaksolla. Tarkastelujaksolla toteutuneen lapsimäärän keskiarvo oli 202 lasta ja mediaani 208. Toteutuneen lapsimäärän keskiarvo oli 87 % ja mediaani oli 89 % kaikista lapsista.



Kuva 15 LPK Yliskylä toteutunut käyttäjämäärä 1.-30.9.2022

LPK Neulasessa toteutunutta lapsimäärää tarkasteltiin 11 kuukauden ajalta aikavälillä 1.8.2021–30.6.2022. LPK Neulasessa on tilapaikkoja 289 lapselle. Kuvassa 16 on esitetty LPK Neulasen tarkastelujaksolla toteutunut lapsimäärä. Kuvasta 16 voidaan nähdä koulujen lomakausien vaikutus päiväkotien lapsimäärään, jolloin käyttäjämäärä on noin 20 % tilapaikkojen määrästä.



Kuva 16 LPK Neulanen toteutunut käyttäjämäärä 1.8.2021-30.6.2022

Tarkastelujaksolla LPK Neulasen tilapaikoista on ollut käytössä enimmillään 85 %. Koulujen lomakaudella tilapaikoista on ollut vähimmillään käytössä 19 %. 11 kuukauden

tarkastelujaksolla käyttäjämäärän keskiarvo oli 190 ja mediaani 204. Toteutuneen lapsimäärän keskiarvo oli 66 % ja mediaani oli 71 % tilapaikoista.

Koska LPK Neulasen tarkastelujaksossa on mukana koulujen lomakausien aikainen pienempi käyttäjämäärä, ei se suoraan ole verrattavissa LPK Yliskylän toteutuneeseen lapsimäärään. Mikäli tarkastellaan LPK Neulasen toteutunutta lapsimäärää syyskuussa 2021, sitä voidaan verrata LPK Yliskylän tarkastelujakson syyskuu 2022 toteutuneeseen lapsimäärään. LPK Neulasen syyskuun 2021 toteutuneen käyttäjämäärän keskiarvo on 72 % tilapaikkojen määrästä, kun Yliskylässä se oli 87 %.

Tarkasteltaessa päiväkotien toteutuneita käyttäjämääriä, on mediaani keskiarvoa parempi tunnusluku, jolloin koulujen lomakausien hiljaisilla ajanjaksoilla ei ole turhan suurta vaikutusta. Mysen et al. (2005) tekemässä tutkimuksessa käyttäjämäärien keskiarvo oli 74 %, joka on lähellä LPK Neulasen toteutunutta käyttäjämäärää.

11 Johtopäätökset

Diplomityön tarkoituksena oli tarkastella tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän (DCV-järjestelmän) energiansäästöpotentiaalia vakioilmavirtaiseen järjestelmään (CAV-järjestelmään) verrattuna. Työn aluksi oli tarkoitus tarkastella toisen Helsingissä sijaitsevan päiväkodin ilmanvaihtojärjestelmää, mutta mittausdatan laadun takia päädyttiin vaihtamaan tarkasteltavaa kohdetta LPK Yliskylään. LPK Yliskylän ilmanvaihtokoneiden ohjauksessa ja säädössä tehtiin muutoksia opinnäytetyön alkuvaiheessa, joka mahdollisti DCV-järjestelmän eri säätötapojen energiankulutuksen tarkastelun.

DCV-järjestelmien energiankulutuksesta aiemmin tehtyjen tutkimusten mukaan DCV-järjestelmällä voidaan tutkimuksesta riippuen vähentää puhaltimien energiankulutusta 50–81 %. Aikaisemmista tutkimuksista maantieteellisesti lähimpänä on Bergström (2021) tekemä tutkimus eteläsuomalaisen ala-asteen DCV-järjestelmän energiankulutuksesta. Bergströmin (2021) tutkimuksen mukaan puhaltimien energiansäästö on tehostusalueen koosta riippuen 61–81 %. Tässä työssä tehdyn neljän viikon tarkastelujakson mittausten perusteella muuttovapainesäätöisellä DCV-järjestelmällä voidaan saavuttaa ilmanvaihtokoneesta riippuen 46–77 % puhallinenergiansäästö laskennalliseen CAV-järjestelmään verrattuna. Yksittäisen päivän 26.9.2022 perusteella muuttovapainesäätöisellä DCV-järjestelmällä voidaan saavuttaa 28–76 % energiansäästö ilmanvaihtokoneiden puhallinenergiassa. Puhallinenergiansäästöjen vaihteluväli riippuu tarkastellusta ilmanvaihtokoneesta sekä ilmanvaihtokoneen palvelualueen käyttötavasta.

Tarkasteltaessa ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin lämmitysenergiankulutusta lämmityspatterin ja LTO:n hyötysuhteen oletettiin pysyvän samana ilmavirrasta riippumatta, jolloin lämpötilaero LTO:n yli pysyi samana laskennallisessa CAV-järjestelmässä ja mitatussa DCV-järjestelmässä. Aiemmin tehdyissä tutkimuksissa DCV-järjestelmän lämmitysenergian säästö oli 21–52 %. Kuten puhallinenergiassa myös lämmitysenergian säästöissä lähimpänä on Bergströmin (2021) tekemä tutkimus. Bergströmin (2021) tutkimuksen mukaan DCV-järjestelmällä voidaan vähentää ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin energiankulutusta 40–52 % tehostusalueesta riippuen. Tässä työssä tehdyn tutkimuksen mukaan neljän viikon tarkastelujakson mittausten perusteella DCV-järjestelmällä voidaan vähentää ilmanvaihtokoneesta riippuen 17–51 % lämmityspatterin lämpöenergiankulutusta.

Taulukko 15 DCV-järjestelmän energiansäästöpotentiaali

Ilmanvaihdon energiansäästöpotentiaali			
		Puhallinenergiasa	Lämmitysenergiasa
Merema et al.	2018	50 - 55 %	34 - 47 %
Mysen et al.	2005		27 - 74 %
Wachenfelt et al.	2002	87 %	21 %
Ahmed et al.	2015		12 - 14 %
Bergström	2021	61 - 81 %	40 - 52 %
Krapi	2023	46 - 77 %	17 - 51 %

Taulukossa 15 on esitetty tehtyjen tutkimusten mukaiset DCV-järjestelmän ilmanvaihtokoneiden puhaltimien sähköenergian ja lämmityspattereiden lämmitysenergiesäästöpotentiaalit. Tämän työn tulokset vastaavat aiemmin tehtyjen tutkimusten tuloksia ja ovat hyvin lähellä Bergström (2021) tekemän tutkimuksen tuloksia. Bergströmin tutkimuksessa tutkittiin ala-asteen luokkatiloja, jotka eroavat käyttötarkoitukseltaan päiväkodin käytöstä. Koulussa oppitunnit toistavat päivästä toiseen samaa aikataulua, kun taas päiväkodeissa aikataulu saattaa kelistä tai päiväohjelmasta riippuen poiketa toisistaan. Ala-asteen luokkatilojen kuormitus voidaan myös olettaa olevan tasaisempaa oppivelvollisuuden takia, jolloin oppilaat ovat koulussa sairaspöissaoloja lukuun ottamatta. Päiväkodissa tilojen kuormitus saattaa vaihdella enemmän vanhempien lomien tai osa-aikaisesti hoidossa olevien lasten takia. Tästä syystä ala-asteiden DCV-järjestelmien energiansäästöt saattavat olla pienemmät kuin päiväkotien.

Työssä tehdyn yhden päivän tarkastelussa tutkittiin muuttuvapainesäätöisen DCV-järjestelmän vuorokauden kokonaisilmamäärää laskennalliseen CAV-järjestelmän ilmamäärään verrattuna. Tarkastelupäivänä 26.10.2022 DCV-järjestelmän ilmamäärät olivat 60–90 % laskennallisen CAV-järjestelmän kokonaisilmamäärästä. Suurin ero 40 % oli I201TK ilmamäärässä. I201TK ilmanvaihtokoneen ilmamäärät ja energiansäästöpotentiaali oli suurin myös neljän viikon tarkastelujakson aikana. Vaikka ilmanvaihtokoneiden I201TK ja I202TK palvelualueet vastaavat toisiaan on ilmanvaihtokoneiden kokonaisilmamäärissä 23 % ero. Työssä ei ollut käytettävissä tilakohtaisia henkilömääriä tai lapsien ikärakennetta tarkasteltavilta päiviltä, joten ilmamäärien erolle ei ole tiedossa syytä.

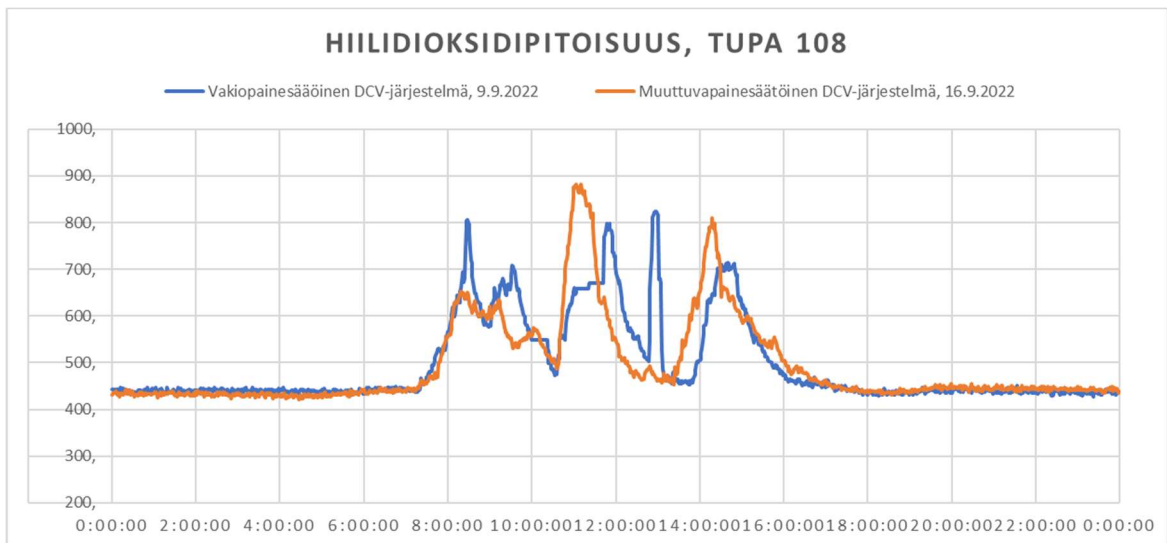
Yhden päivän tarkastelualajalta DCV-järjestelmän puhaltimien energiansäästöpotentiaali oli ilmanvaihtokoneesta riippuen 28–76 %. Energiansäästöpotentiaali vastaa neljän viikon tarkastelujakson tuloksia. Neljän viikon tarkastelujakson ja päivän tarkastelun väli oli kuukausi, joten niiden perusteella ei voida tehdä päätelmiä, onko vuodenajalla vaikutusta

puhallinenergian kulutukseen. Mikäli DCV-järjestelmää ohjataan siten, että ilmavirrat suurenevat huonelämpötilan noustessa raja-arvon yli, on vuoden ajalla merkitystä DCV-järjestelmän puhallinenergian säästöpotentiaaliin, koska huonelämpötilan noustessa ilmamäärät kasvavat. Aikaisemmissa tutkimuksia tutkittaessa ei tullut esiin onko DCV-järjestelmän energiankulutustutkimusta toistettu samassa rakennuksessa samalla kuormituksella eri vuodenaikoina. Eri vuodenaikoina tehdyistä tutkimuksista voitaisiin nähdä vuodenajan vaikutukset DCV-järjestelmän energiankulutukseen.

Kahdella tulo- ja poistoilman päätelaitteella toteutetussa ON/OFF-tehostusjärjestelmässä minimi-ilmamäärä on noin puolet mitoitusilmamäärästä. Tämä saattaa olla tarpeettoman suuri, mikäli tilassa on alle 50 % suunnitellusta käyttäjämäärästä. Suunnittelemalla DCV-järjestelmä IMS-laitteilla, voidaan minimi-ilmamäärää säätää 20–30 % mitoitusilmamäärästä. Toinen vaihtoehto on suunnitella tilaan useampi kuin kaksi tulo- ja poistoilmakanavaa päätelaitteineen sekä useampi ON/OFF-tehostuspelti, jolloin tehostusta voidaan lisätä portaittain. Tämän vaihtoehdon haittana on lisääntyvät investointikustannukset.

LPK Yliskylän neljän viikon tarkastelujakson ja yhden päivän tarkastelujakson perusteella DCV-järjestelmällä saavutetaan noin 2 000 € vuosittainen säästö ilmanvaihtokoneiden puhaltimien sähköenergiakustannuksissa. LPK Yliskylän DCV-järjestelmän puhallinenergian säästöpotentiaalilla ja huoneistoalan osuudella kaikkien päiväkotien huoneistoalasta on DCV-järjestelmällä noin 200 000 € säästövaikutus siihen, mikäli kaikissa päiväkodeissa olisi CAV-järjestelmä.

DCV-järjestelmän säätötapojen energiakulutuseroja tarkasteltaessa muuttuvapainesäätöisen DCV-järjestelmän vuorokauden kokonaisilmamäärä oli 13 % pienempi kuin yleisesti käytössä olevan vakiopainesäätöisen DCV-järjestelmän kokonaisilmamäärä. Kokonaisilmamäärää tarkasteltaessa on tärkeää ottaa huomioon sisäilmaolosuhteiden pysyvyys. Kuvassa 17 on esitetty tuvan 108 hiilidioksidipitoisuus 9.9. ja 16.9.2022. 9.9.2022 DCV-järjestelmä oli vakiopainesäätöisessä ohjauksessa ja 16.9. muuttuvapainesäätöisessä ohjauksessa. Tuvan 108 hiilidioksidipitoisuus pysyi koko vuorokauden sisäilmastoluokka S2:n mukaisissa raja-arvoissa. Kuvasta 17 voidaan todeta, että säätötavasta riippumatta tilan hiilidioksidipitoisuudet lähtivät laskemaan yhtä jyrkästi. Tämän tarkastelun perusteella voidaan todeta, että vaikka muuttuvapainesäätöisen DCV-järjestelmän kokonaisilmamäärä oli 13 % pienempi kuin vakiopainesäätöisen DCV-järjestelmän, sillä saavutettiin vaaditut sisäilmaolosuhteet hiilidioksidipitoisuuden pysyessä alle S2-luokan raja-arvon.



Kuva 17 Tupa 108, hiilidioksidipitoisuus vakio- ja muuttovapainesääöisessä DCV-järjestelmässä

Energiankulutuksen kannalta muuttovapainesääöinen DCV-järjestelmä kulutti 33 % vähemmän puhallinenergiaa vakiopainesääöiseen järjestelmään verrattuna. Mikäli muuttovapainesääöistä DCV-järjestelmää verrataan saman tilan 2.9.2022 mitattuun CAV-järjestelmän energiankulutukseen energiansäästöpotentiaali on 75 %. Vastaavasti vakiopainesääöisen DCV-järjestelmän energiansäästöpotentiaali on 64 %.

Asentamalla muuttovapainesääöisen DCV-järjestelmän yhteiseen poistoilmakanavaan hiilidioksidipitoisuuden mittaus, saataisiin tutkittua järjestelmän toimintaa hiilidioksidipitoisuuden noustessa. Yksittäisten tilojen hiilidioksidipitoisuuksien nousujen ja niiden vertaamisesta tulokanavapaineeseen (paineanturi runkokanavassa), ei saada tarkkaa käsitystä muuttovapainesääöisen DCV-järjestelmän toiminnasta. Sisäilmaolosuhteiden kannalta on kuitenkin tärkeää, että DCV-järjestelmää ohjataan huonekohtaisilla antureilla.

LPK Neulasen ja LPK Yliskylän toteutuneita käyttäjämääriä tarkasteltaessa voidaan todeta, etteivät kaikki päiväkotien tilapaikat olleet käytössä yhtenäkin päivänä tarkastelujaksoilla. LPK Neulasen toteutunut käyttäjämäärä vastaa Mysen et al. (2005) tekemän tutkimuksen tuloksia norjalaisten koulujen toteutuneista käyttäjämääristä. LPK Yliskylässä toteutuneen käyttäjämäärän mediaani 89 % tilapaikkojen määrästä, joka on suurempi kuin LPK Neulasen mediaani, joka oli 71 % tilapaikkojen määrästä. LPK Neulasen toteutuneet käyttäjämäärät vastasivat Mysen et al. (2005) ja Wachenfelt et al. (2002) tekemien tutkimusten käyttäjämääriä.

Mikäli päiväkotien ilmanvaihto haluttaisiin säätää lähemmäksi todellista käyttäjämäärää, vaatisi se koko rakennuksen ilmamäärien mittauksen ja säädön. Ilmanvaihdon mittaus- ja säätötyön kalleuden takia ilmamäärien toistuva säätäminen todellisen käyttäjämäärän mukaan on taloudellisesti kannattamatonta. Koska päiväkotien todellisen käyttäjämäärän arviointi on suunnitteluvaiheessa hankalaa, on tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän suunnittelu päiväkoteissa järkevää. Suunnitteluvaiheessa tulisi kuitenkin arvioida mahdollisimman tarkkaan päiväkodin tuleva käyttäjämäärä, jotta tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän maksimi-ilmamäärät suunnitellaan oikein.

Tämän työn tulosten perusteella DCV-järjestelmällä voidaan saavuttaa huomattavat energiansäästöt CAV-järjestelmään verrattuna. Säätämällä DCV-järjestelmää muuttuvapainesäätöisellä tekoälyä hyödyntävällä automaatiolla, voidaan energiatehokkuutta parantaa vakio-painesäätöiseen DVC-järjestelmään verrattuna. Tässä työssä tarkasteltiin DCV-järjestelmän säätötapoja yhden päivän mittausten perusteella, joten tarkastelu tulisi uusia pidemmällä noin kuukauden mittausjaksoilla.

Lähteet

Ahmed, K., Kurnitski, J. & Sormunen, P., 2015. Demand controlled ventilation indoor climate and energy performance in high performance building with air flow rate controlled chilled beams. *Energy and Buildings*. Vol 109. S. 115-116. ISSN 0378-7788.

Bergström, T., 2021. Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla saavutettava sisäilman laatu ja energiasäästö koulun luokkahuoneissa. Opinnäytetyö YAMK. Metropolia ammattikorkeakoulu. Helsinki. 47 s.

Euroopan komissio, 2018 a. Energy efficiency targets. [verkkoaineisto]. [viitattu 25.10.2022]. Saatavissa: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-targets_fi.

Euroopan komissio, 2018 b. Energy performance of buildings directive [verkkoaineisto]. [viitattu 14.9.2022]. Saatavissa: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en.

Euroopan komissio, 2021. Making our homes and buildings fit for greener future. [verkkoaineisto]. Euroopan komissio. SIBN 978-92-76-39728. Saatavissa: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/869476/Buildings_Factsheet_EN_final.pdf.

Franco, A., Miserocchi, L. & Testi, D., 2021. HVAC energy saving strategies for public buildings based on heat pumps and demand controlled ventilation. *Energies*. Vol 14. <https://doi.org/10.3390/en14175541>.

Helen. Kaukolämmön hinnat [verkkoaineisto]. [viitattu 11.1.2023]. Saatavissa: https://www.helen.fi/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/hinnat?gclid=EAIaIQobChMIk4z1zvC__AIVpkeRBR0bHgPIEAAbHgPIEAAYASA_BwE&gclid=aw.ds.

Helsingin kaupungin rakennusvirasto, 2016. Arkkitehtisuunnitelma, julkisivu länteen, työpöytä. Helsinki: Arkkitehtuoriosasto

Helsingin kaupunki, 2022 a. LVI-suunnitteluohje. Helsinki: Tilat-palvelu. 31 s.

Helsingin kaupunki, 2022 b. Mittaroinnin suunnitteluohje. Helsinki: Helsingin kaupunki, Tilat-palvelu, 20 s.

Helsingin kaupunki, 2022 c. Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän ohje. Helsinki: Helsingin kaupunki, Tilat-palvelu. 41 s.

Helsingin kaupunki, 2022 d. Energiatavokkaan palvelurakennuksen suunnitteluohje. Helsinki: Helsingin kaupunki, Tilat-palvelu. 30 s.

Helsingin kaupunki, 2023. Siilo kiinteistöhallintajärjestelmä. Helsingin kaupunki.

Ilmastointi J. Hakanen, 2022. Ilmamäärien mittauspöytäkirja LPK Yliskylä.

- Ilmatieteenlaitos. Kasvihuonekaasujen pitoisuudet [verkkoaineisto]. [viitattu 9.11.2022]. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kasvihuonekaasujen-pitoisuudet>.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. & Rubel, F., 2006. World maps of Köppen-Geiger climate classification [verkkoaineisto]. [viitattu 12.10.2022]. Saatavissa: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>.
- Kuntien sisäilmaverkosto, 2019. Julkisten palvelurakennusten käytön yleisohje ja Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohjeen perustelumuuisto. 50 s.
- Liljeström, K & Salomaa, R., 2018. Laskentaopas: Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon huomiointi energiatehokkuuden vertailuluvun (E-luvun) laskennassa. Helsinki: Ympäristöministeriö. 23 s.
- Merema, B., Dewati, M., Sourbron, M. & Breesch, H., 2018. Demand controlled ventilation (DVC) in school and office buildings: Lessons learnt from case studies. Energy and Buildings. Vol 172. S. 349-360. ISSN 0378-7788.
- Mysen, M., Berntsen, S., Nafstad, P. & Schild, P., 2005. Occupancy density and benefits of demand-controlled ventilation in Norwegian primary schools. Energy and Buildings. S. 1234-1240. ISSN 0378-7788.
- Nuuka Solutions. Nuuka AI Air – Tekoäly tekee rakennuksesta oppivan [verkkoaineisto]. [viitattu 31.12.2022]. Saatavissa: https://www.nuukasolutions.com/hubfs/PDF/AI_AIR_Q%26A_FIN.pdf?hsLang=fi-fi.
- Rakennustietosäätiö, 2018. Sisäilmaluokitus 2018. Espoo: Rakennustieto Oy. 24 s.
- Sandberg, E., 2014. Sisäilmasto ja ilmastointimenetelmät, ilmastointitekniikka osa 1. toinen painos. Helsinki: Talotekniikan-Julkaisut Oy. 415 s. ISBN 978-952-99770-8-6.
- Sandberg, E., 2016. Ilmastointilaitoksen mitoitus, ilmastointitekniikka osa 2. toinen painos. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy. 647 s. ISBN 978-952-99770-9-3.
- Sisäilmayhdistys, 2008. Ilmanvaihdon vaikutus [verkkoaineisto]. [viitattu 15.8.2022]. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Ilmanvaihdon-vaikutus>.
- Sydänmäki, S., 2022. LPK Yliskylä, päiväkodin johtaja. Haastattelu 9.11.2022.
- Työ- ja elinkeinoministeriö, 2019. Finland's Integrated Energy and Climate Plan. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. 180 s. ISBN 978-952-327-478-5.
- VTT, 2020. SI-mittayksiköt Suomessa, massa ja paine [verkkoaineisto]. [viitattu 18.12.2022]. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/si-mittayksikot-suomessa-massa-ja-paine>.
- Wachenfeldt, B., Myse, M. & Schild, P., 2007. air flow rates and energy saving potential on schools with demand-controlled displacement ventilation. Energy and Buildings. Vol 39. S. 1073-1079. ISSN 0378-7788.

Ympäristöministeriö, 2017. Ympäristöministeriön asetus 1009/2017 uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Helsinki: Oikeusministeriö. 16 s. ISSN 1455-8904.