



Tom Bergström

Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla saavutettava sisäilman laatu ja energiansäästö koulun luokkahuoneissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Talotekniikka

Opinnäytetyö

12.11.2021

Tiivistelmä

Tekijä:	Tom Bergström
Otsikko:	Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla saavutettava sisäilman laatu ja energiansäästö koulun luokkahuoneissa
Sivumäärä:	42 sivua
Aika:	12.11.2021
Tutkinto:	insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma:	talotekniikka
Ammatillinen pääaine:	LVI-tekniikka
Ohjaajat:	yliopettaja Rauno Holopainen asiakkuuspäällikkö Jyrki Lönnström

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää Etelä-Suomessa sijaitsevan koulun tarpeenmukaisen ilmanvaihdon toimintaa ja energiatehokkuutta sekä tarkastella tarpeenmukaisen ilmanvaihdon vaihtoehtoisia toteutustapoja ja elinkaarikustannuksia.

Koulun tarpeenmukainen ilmanvaihto on toteutettu asentamalla luokkien ilmanvaihtokanaviin huonekohtaiset ilmavirtasäätimet, jotka ohjaavat luokan ilmavirtaa luokan hiilidioksidipitoisuuden perusteella. Koulussa tehtiin rakennusautomaatiojärjestelmään liitetyillä antureilla trendiseuranta, joilla mitattiin kuuden luokan osalta ilmavirtasäätimien toimintaa, ilmavirtoja sekä luokkien hiilidioksidipitoisuutta ja lämpötiloja kolmen viikon ajan. Tulosten perusteella selvitettiin, luokkien sisäilmaolosuhteet asetetuissa tavoitearvoissa.

Mitattujen arvojen perusteella laskettiin teoreettisesti, minkä verran lämmitys- ja sähköenergiaa olisi kulunut, mikäli ilmanvaihto olisi toteutettu vakioilmavirtaisella järjestelmällä tai luokkien ilmavirtoja olisi ohjattu yhden tai kahden ilmavirtasäädinparin avulla.

Eri säätötapojen energia- ja investointikustannusten perusteella tehtiin nykyarvolaskelmat, joista pystyttiin määrittämään, mikä tarpeenmukaisen ilmanvaihdon toteutustavoista tulisi laitteiston elinkaaren aikana kustannustehokkaimmaksi. Laskenta tehtiin käyttämällä yhden luokkahuoneen ilmanvaihdon investointi- ja energiakustannusten tietoja. Laskennassa oletettiin, että tarpeenmukaisen ilmanvaihdon huolto- ja ylläpitokustannukset ovat samat kuin vakioilmavirtaisessa järjestelmässä.

Tehtyjen nykyarvolaskelmien perusteella, tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla elinkaarikustannuksissa säästetään noin 40 % vakioilmavirtaiseen järjestelmään verrattuna, kun käytössä on ilmavirtasäätimet luokkahuoneissa. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon eri säätötapojen elinkaarikustannusten ero oli nykyarvolaskelmien mukaan kuitenkin hyvin pieni.

Avainsanat: Tarpeenmukainen ilmanvaihto, ilmavirtasäätimet, luokkahuone, energiatehokkuus, elinkaarikustannus

Abstract

Author: Tom Bergström
Title: Indoor Air Quality and Energy Gain in Classrooms
Achieved with Demand Controlled Ventilation
Number of Pages: 42 pages
Date: 12 November 2021

Degree: Master of Engineering
Degree Programme: Building Services Engineering
Professional Major: Name of the professional major
Supervisors: Rauno Holopainen, Principal Lecturer
Jyrki Lönnström, Account manager

The goal of this final year project was to determine the energy efficiency of a demand-controlled ventilation system of a school, in Southern Finland and to study alternative ways to execute a demand controlled ventilation system and calculate their life cycle costs.

The school ventilation system had room based variable air volume dampers, operated by the room carbon dioxide concentration. The air volume and temperature, amount of carbon dioxide, outside temperature and the efficiency of the air treatment unit of six classrooms was trend monitored for a three-week period. The data was compared to target values for indoor air quality.

The electric energy consumed by heating and fans was calculated with the collected data and compared to the consumption of a standard air ventilation system and of a solution with one or two pairs of variable air volume dampers. Furthermore, current value calculations for the different air ventilation systems were done and compared.

The current value calculations showed a 40% saving in life cycle cost with a demand controlled air ventilation system with variable air volume dampers compared to a standard air ventilation system. The differences in life cycle costs of one, two or six pairs of variable air volume dampers to achieve a demand controlled air ventilation system were, however, small.

Keywords: demand controlled ventilation, variable air volume damper, classroom, energy efficiency, life cycle cost

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tarpeenmukainen ilmanvaihto	2
2.1	Yleistä tarpeenmukaisesta ilmanvaihdosta	2
2.2	Tarpeenmukaisen ilmavirran säätö ultraäänitekniikalla toimivalla ilmavirtasäätimillä	2
3	Ilmavirtasäätimillä varustettujen luokkien ilmanvaihdon energiankulutus	3
3.1	Lähtötiedot luokkien ilmanvaihdon energialaskelmiin	3
3.2	Ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus perustuen mittauksiin	5
3.2.1	Ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutuksen laskenta	5
3.2.2	Luokkien ilman hiilidioksidipitoisuuksien tarkastelu	7
3.3	Ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus vakioilmavirtaohjauksella	15
3.4	Ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus yhdellä ilmavirtasäädinparilla	17
3.5	Ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus kun säätö kahdella ilmavirtasäädinparilla	20
3.6	Puhaltimen käyttämä sähköenergiankulutus	22
3.6.1	Sähköenergiankulutus huonekohtaisilla ilmavirtasäätimillä	22
3.6.2	Sähköenergiankulutus vakioilmanvaihdolla	25
3.6.3	Sähköenergiankulutus yhdellä tai kahdella IMS-parilla	25
3.7	Yhteenveto tarpeenmukaisen ilmanvaihdon energiankulutuksesta	26
3.8	Ilmanvaihdon energiakustannukset mittaussajanjakson aikana	27
3.8.1	Energiakustannuslaskelmat	27
3.8.2	Energiakustannusten analysointi	28
4	Elinkaarikustannukset kun käytössä tarpeenmukainen ilmavirtasäätö luokkahuoneissa	29
4.1	Lähtötiedot laskelmiin	29
4.1.1	Ilmanvaihdon säätötapojen ilmavirrat	29
4.1.2	Ilmanvaihdon säätötapojen lämmitysenergiankulutus	30
4.1.3	Lämmitysenergian normitus	31
4.1.4	Puhaltimien sähköenergian kulutus	33
4.1.5	Ilmanvaihdon säätötapojen investointikustannukset	33
4.2	Nykyarvolaskelmat ilmanvaihdon säätötavoille	36
4.2.1	Yhteenveto elinkaarilaskelmista	38

4.2.2 Herkkyysanalyysi, energiahinnan nousu	39
5 Yhteenveto	41
Lähteet	42

1 Johdanto

Opinnäytetyön aiheena on tarpeenmukainen ilmanvaihto ja sillä saavutettava sisäilman laatu ja energiasäästö koulun luokkahuoneissa. Ajatus aiheesta syntyi, kun olen aikanaan suunnitellut kouluihin tarpeenmukaisesti ohjattuja ilmanvaihtojärjestelmiä, jotka toimivat ilmavirransäätöpelleillä. Kouluissa ei kuitenkaan ole seurattu, minkä verran toteutettujen ilmavirransäätöpeltien ansiosta on saatu todellisuudessa energiasäästöjä, eikä aiheesta ole juurikaan tehty tutkimuksia.

Ympäristöministeriön asetuksen (1009/2017) mukaan uuden rakennuksen ilma-
virtojen ohjaus on voitava ohjata kuormituksen tai ilmanlaadun mukaan. Koulun tiloissa on muihin rakennuksiin nähden paljon käyttäjiä pinta-alaa kohden. Koska tilojen tulo- ja poistoilmavirrat mitoitetaan lähtökohtaisesti henkilömäärien mukaan, suunnitellaan koulujen maksimi-ilmavirrat moneen muuhun rakennukseen nähden suuremmiksi. Koulun tilojen käyttöasteet vaihtelevat, ja välillä luokat ovat täysin tyhjillään, esimerkiksi välituntien aikana. Koulun tiloissa järjestetään yleensä ilta- sekä viikonloppukäyttöä ja lomien aikana tilat ovat vajaakäytöllä. Kun tilat ovat vajaakäytöllä, voidaan ilmavirtoja pienentää huomattavasti, jolla saadaan ylläpidettyä sisäilmasto-olosuhteet tavoitearvojen mukaisina. Tämä vaatii kuitenkin sen, että ilmanvaihtoa ohjataan tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla. Pienempien ilmavirtojen ansiosta saadaan ilmanvaihdon lämmitysenergian ja ilmanvaihdon puhaltimien sähköenergian käytössä kustannussäästöjä.

Tarpeenmukainen ilmanvaihto voidaan rakennuksessa toteuttaa usealla eri tavalla. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on verrata ilmavirransäätöpelleillä varustettua tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutusta ja elinkaarikustannuksia vakioilmavirtaiseen järjestelmään nähden. Tavoitteena oli myös tutkia ilmanvaihdon energiankulutusta ja elinkaarikustannuksia, mikäli ilmavirtasäätimiä ei olisi sijoitettu luokkakohtaisesti, vaan yhden ilmavirtasäätimen takana olisi useampi luokka. Työhön valittiin Etelä-Suomessa sijaitsevan

ala-asteen luokkatiloja, joissa on käytössä huonekohtaiset ultraäänitekniikalla toimivat ilmavirtasäätimet.

2 Tarpeenmukainen ilmanvaihto

2.1 Yleistä tarpeenmukaisesta ilmanvaihdosta

Tarpeenmukainen ilmavaihto tarkoittaa lähtökohtaisesti ilmanvaihtojärjestelmää, jonka ilmavirtoja voidaan säätää tilojen epäpuhtaus- ja/tai lämpökuorman mukaan, jolloin rakennukseen saadaan hyvät sisäilmasto-olosuhteet käyttämättä tarpeettoman suurta ilmanvaihtoa. Tulo- ja poistoilmavirrat mitoitetaan rakentamismääräysten mukaan pinta-ala- tai henkilömääräkohtaisesti tiloihin, jolla voidaan varmistaa tilojen käyttäjille hyvä sisäilmanlaatu. Kun tilat ovat vajaakäytöllä, voidaan niiden ilmanvaihtoa pienentää, kunhan varmistetaan, että sisäilmanlaatu pysyy tavoitearvojen mukaisena. Sisäilman laatua voidaan mitata esimerkiksi tilakohtaisilla antureilla, jolla mitataan hiilidioksidipitoisuutta, lämpötilaa tai läsnäoloa. Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla varmistetaan hyvät sisäilma-olosuhteet ja saavutetaan energiasäästöjä.

Tilojen ilmavirtoja voidaan ohjata tarpeenmukaisesti usealla eri tavalla. Tämän opinnäytetyön osalta tarkastellaan tarpeenmukaista ilmanvaihtoa, joka toteutetaan ilmanvaihtokanaviin sijoitetuilla ilmavirrantsäätöpelleillä.

2.2 Tarpeenmukaisen ilmavirran säätö ultraäänitekniikalla toimivalla ilmavirtasäätimillä

Ilmavirtasäätimiä kutsutaan usealla eri nimellä. Esimerkiksi ilmavirrantsäädin, ilmamääräsäädin ja yleisimmät lyhenteet IMS- tai IMS-pellillä tarkoitetaan samaa laitetta. Kyse on ilmanvaihtokanavaan asennettavasta laitteista, joka mittaa laitteen läpi kulkevaa ilmavirtaa ja säätää pellin asentoa niin, että siitä saadaan haluttu ilmavirta läpi.

Ilmavirtasäätimiä on ollut käytössä pitkään, mutta niiden käyttöä on vältetty. Suurin syy tähän on vanhan tekniikan peltien mittayhteen tukkeutuminen pölystä, joka saattoi aiheuttaa pahimmillaan koko säätöosan vaihtamisen. Säätimien mittaussyhteiden puhdistuksesta aiheutuu ja kiinteistön omistajalle kustannuksia. Viime vuosina markkinoille on tullut ilmavirtasäätimiä, joiden ilmavirranmittaus toimii ultraäänitekniikalla toimivilla antureilla. Laitevalmistajan mukaan ultraäänitekniikalla toimivat anturit toimivat vaikka niihin kerääntyisi vuosien mittaan pölyä ja likaa. Anturit toimivat ilma ilmavirtaa häiritseviä komponentteja, joten ne aiheuttavat huomattavasti vähemmän painehäviöitä ja ääntä kanaviin kuin vanhempien ilmavirtasäätimien mittalaitteet. [9, s. 26–27.]

3 Ilmavirtasäätimillä varustettujen luokkien ilmanvaihdon energiankulutus

3.1 Lähtötiedot luokkien ilmanvaihdon energialaskelmiin

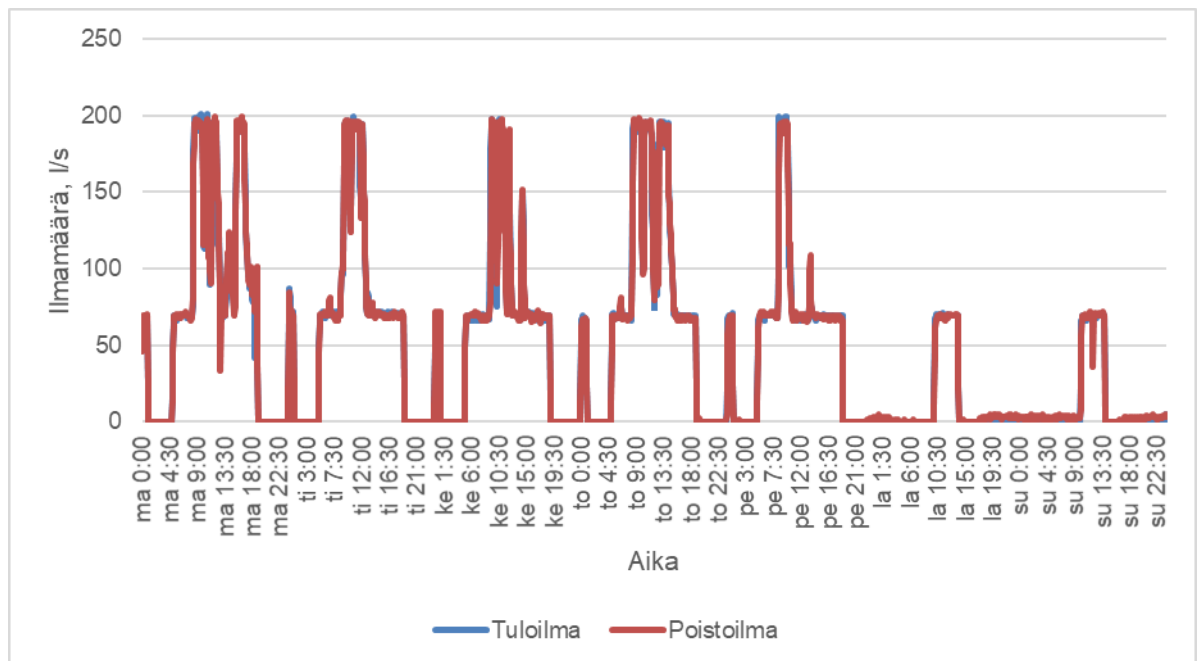
Opinnäytetyön laatijalla oli pääsy Etelä-Suomessa sijaitsevan ala-asteena toimivan koulun rakennusautomaatiojärjestelmään (RAU-järjestelmään). Kouluun on asennettu vuonna 2020 luokkakohtaiset ilmavirtasäätimet, joita ohjataan tilakohtaisesti tilan hiilidioksidipitoisuuden mukaan. Koulun RAU-järjestelmän kautta on mahdollista saada mittaustietoja luokkien hetkellisistä ilmavirroista, lämpötiloista, hiilidioksidipitoisuuksista, sekä ilmanvaihtokoneen hyötysuhteista ja ulkolämpötilasta. Näiden arvojen perusteella voidaan tilakohtaisesti laskea tulo- ja poistoilmavirrat sekä laskea, minkä verran ilman lämmitykseen on käytetty lämmitysenergiaa ja puhaltimien käyttöön sähköenergiaa.

Lähtötiedot laskelmiin on otettu RAU-järjestelmästä 5 minuutin välein tallennetusta datasta. RAU-järjestelmien tiedot on otettu vuoden 2021 viikoilta 5, 7 ja 9. Koulussa on tehty ilmavirtojen mittaus ja tasapainotus loppuvuodesta 2020. Ilmavirtamittausten perusteella on todennettu, että ilmanvaihtojärjestelmä ja ilmavirtasäätimet toimivat suunnitellun mukaisesti. Luokkahuoneiden energialaskelmat päätettiin tehdä kuudelle luokkahuoneelle. Luokkahuoneiden lähtötiedot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Ilmanvaihdon energialaskentaan valittujen luokkien lähtötiedot.

Luokka	Koko [m ²]	Henkilömäärä [kpl]	Ilmavirtavirta min/max [l/s]
R2	54	23	±69 / ±195
R3	62	21	±78 / ±220
R4	41	13	±52 / ±150
R5	54	23	±70 / ±200
R6	63	21	±78 / ±220
R7	66	21	±70 / ±200

Luokkien ilmavirtaa ohjataan tilan hiilidioksidipitoisuuden mukaan. Tällöin luokkien ilmavirrat ovat suurimmillaan, kun luokissa on paljon ihmisiä, ja pienimmillään, kun luokat ovat tyhjillään. Kuvassa 1 on esitetty luokan R2 ilmavirrat ensimmäisellä mittausviikolla.



Kuva 1. Luokan R2 tulo- ja poistoilmavirrat mittausviikon 5 aikana.

Kuvasta 1 voidaan nähdä, että luokassa R2 ilmavirrat ovat olleet suurimmillaan arkisin keskipäivällä. Aamulla ja iltaisin ilmavirrat ovat olleet pienemmällä. Viikonloppuisin luokan käyttö on ollut myös vähäisiä. Luokkien ilta- ja viikonloppukäyttöön ovat mahdollisesti myös vaikuttaneet voimassa olleet koronarajoitukset, jolloin koulutilojen ulkopuolinen käyttö on ollut hyvin rajattua.

Mittaukset tehtiin kolmen viikon aikana osalta alkuvuodesta 2021. Mittausviikot olivat seuraavat:

- Viikko 5, ma 1.2.2021 kello 00.00 – su 7.2.2021 kello 23.55
- Viikko 7, ma 15.2.2021 kello 00.00 – su 21.2.2021 kello 23.55
- Viikko 9 ma 1.3.2021 kello 00.00 – su 7.3.2021 kello 23.55.

Mittausviikot olivat alun perin viiden viikon ajalta, mutta viikot 6 ja 8 poistettiin laskelmista, koska viikolla 8 oli Etelä-Suomen kouluissa hiihtoloma eikä koulu ollut käytössä. Viikolla 6 koulun ilmanvaihtokoneet olivat pysähtyneenä useamman tunnin ajan, ja hiilidioksidipitoisuudet nousivat luokkatiloissa tavanomaista suuremmaksi. Pysähtymisen syyksi epäiltiin väärää palohälytystä.

3.2 Ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus perustuen mittauksiin

3.2.1 Ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutuksen laskenta

Opinnäytetyössä laskettiin, minkä verran koulun kuuden luokkahuoneen ilmanvaihdon lämmitykseen on käytetty lämmitysenergiaa.

Tehdään esimerkkilaskelma luokkatilaan, jossa on käytössä portaaton tilakohmainen ilmavirtasäätö ja joka on toteutettu ilmavirtasäätimillä. Esimerkkilaskelmassa käytetty ajanjakson pituus on 5 minuuttia.

Yhden mittausjakson aikana ilmanvaihdon käyttämän lämmitysenergia lasketaan kaavalla 1. [2, s. 24.]

$$Q_{iv} = \rho_i \cdot c_{pi} \cdot q_{v\ tulo} (1 - \eta_a) (T_s - T_u) \cdot \Delta t \quad (1)$$

jossa

Q_{iv}	on ilmanvaihdon tarvitsema energia, kWh
ρ_i	on ilman tiheys, 1,2 kg/m ³
c_{pi}	on ilman ominaislämpökapasiteetti, 1 kJ/kg°C
$q_{v, tulo}$	on tuloilmavirta, m ³ /s
η_a	on ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton hyötysuhde, %
T_s	on tuloilman sisäänpuhalluslämpötila, °C
T_u	on ulkolämpötila, °C
Δt	on ajanjakson pituus, h.

Laskentaesimerkin mittausdata on luokkahuoneesta R2. Ajankohtana on 1.2.2021 kello 12.00–12.05. Mittausajanjakso on 5 minuuttia (5/60 h). Kyseisenä mittausajankohtana ulkolämpötila on –7,4 °C, tuloilman lämpötila 18,1 °C, ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton hyötysuhde 77,59 % ja luokan tuloilmavirta on 0,195 m³/s.

Ilmanvaihdon lämmittämiseen käytettiin kyseisenä mittausajankohtana lämmitysenergiaa.

$$Q_{iv} = 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot 1 \frac{kJ}{kg^\circ C} \cdot 0,195 \frac{m^3}{s} (1 - 0,7759)(18,1^\circ C - (-7,4^\circ C)) \cdot \frac{5}{60} h = 111 Wh$$

Vastaavat laskelmat tehtiin Excelillä kolmen viikon ajalta kaikkiin kuuteen valittuun luokkatilaan. Kolmen viikon aikana 5 minuutin välein tehtäviä mittausajankohtia tulee yhteensä 6 048 kpl, jolloin laskentataulukko-ohjelma on välttämätön laskelmien tekemiseen. Kaikki tarvittavat lähtöarvot saatiin poimittua mittausajanjaksolta RAU-järjestelmästä. Laskelmat tehtiin jokaisen viikon osalta erikseen ja tulokset on koottu taulukkoon 2.

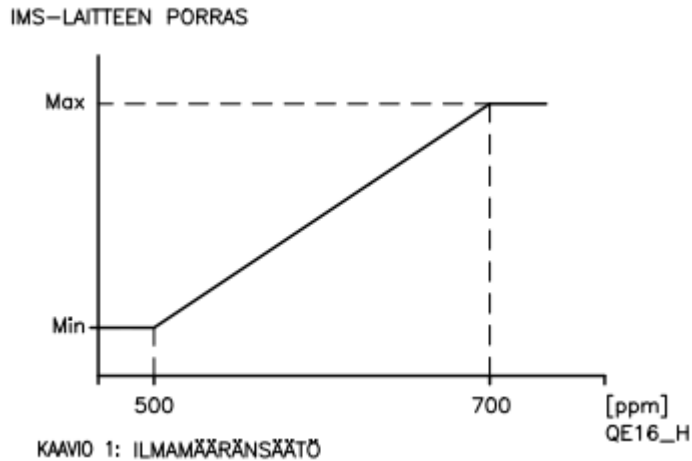
Taulukko 2. Toteutunut energiankulutus ilmanvaihdon osalta luokissa mittaus-
ajanjakson aikana.

Luokka	Viikko 5 1.–7.2.2021 [kWh]	Viikko 7 15.–21.2.2021 [kWh]	Viikko 9 1.–7.3.2021 [kWh]	Yhteensä [kWh]
R2	61	56	36	153
R3	68	66	41	175
R4	38	34	21	94
R5	69	64	36	169
R6	69	61	40	170
R7	61	55	38	154

3.2.2 Luokkien ilman hiilidioksidipitoisuuksien tarkastelu

Luokkien tarpeenmukaista ilmavirtaa ohjataan tiloissa olevan hiilidioksidianturin perustella. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus on noin 400 ppm. Sisätiloissa tätä arvoa nostava lähde on ihmisten hengitysilma. Mitä enemmän tilassa on ihmisiä ja heistä aiheutuvaa hiilidioksidikuormaa, sitä enemmän tarpeenmukainen ilmanvaihto vaihtaa tilan ilmaa. Puhaltamalla tilaan ulkoilmaa ja poistamalla samalla tilasta ilmaa saadaan tilan hiilidioksidipitoisuutta laimennettua lähemmäs ulkoilman pitoisuusarvoja.

Luokkien ilmavirtaa ohjataan tilojen hiilidioksidipitoisuuden perusteella kuvan 2 mukaisesti. Kuva on laadittu kohteen RAU-suunnitelmissa määritetyn huone-säädön perusteella.



Kuva 2. Luokkien IMS-laitteiden ilmavirtaa ohjataan tilan hiilidioksidianturin QE16 antaman arvon mukaisesti.

Sisäilman laadun tavoitearvot jaetaan hiilidioksidin osalta sisäilmastoluokkiin S1, S2 ja S3 [1, s. 5]. Tavoitearvo on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Tavoitearvot hiilidioksidin osalta sisäilmastoluokissa [1, s. 7].

Sisäilmastoluokka	S1 [ppm]	S2 [ppm]	S3 [ppm]
Hiilidioksidipitoisuuslisä (suurempi kuin ulkoilman)	< 350	< 550	< 800

Luokkien hiilidioksidipitoisuus laskettiin yhden tunnin keskiarvona kolmen viikon mittausajanjakson ajalta, kun luokkien ilmanvaihtokone oli käynnissä. Ilmanvaihtokoneen käyntiajat olivat arkisin kello 5:00–9:00 ja viikonloppuisin 10:00–14:00. Kun mittausajanjakso on 3 viikkoa ja mittaukset tehdään 5 minuutin välein, saadaan yhteensä 2 808 mittausarvoa siltä ajalta, kun ilmanvaihtokone on päällä. Lasketut arvot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Excelin avulla lasketut keskiarvot luokkien hiilidioksidipitoisuuksista.

Hiilidioksidi [ppm]	R2 [ppm]	R3 [ppm]	R4 [ppm]	R5 [ppm]	R6 [ppm]	R7 [ppm]
< 400	0	0	0	0	0	0
400–600	2110	2081	2719	1944	2087	2075
600–800	577	615	89	846	721	724
800–950	119	112	0	18	0	9
>950	2	0	0	0	0	0
Mittauspisteet yhteensä	2808	2808	2808	2808	2808	2808

Luokkien saavutetun sisäilmastoluokka hiilidioksidipitoisuuden osalta määritettiin vertailemalla taulukon 4 arvoja Sisäilmastoluokituksen 2018 tavoitearvoihin. Koska ulkoilman hiilidioksidipitoisuutta ei ollut RAU-järjestelmän trendiseuranasta saatavilla, oletettiin sen olevan 400 ppm. Tällä oletuksella saadaan taulukon 5 mukainen 5 minuutin pituisten mittausjaksojen määrä luokkahuoneissa, jolloin hiilidioksidipitoisuudet olivat sisäilmastoluokkien S1 ja S2 tavoitearvojen mukaiset.

Taulukko 5. Luokkien mitatut hiilidioksidipitoisuudet verrattuna Sisäilmastoluokituksen 2018 tavoitearvoihin.

Hiilidioksidi [ppm]	R2	R3	R4	R5	R6	R7
< 750 (S1)1)	2557	2577	2808	2728	2754	2764
< 950 (S2)1)	2806	2808	2808	2808	2808	2808
Mittausarvot yhteensä [kpl]	2808	2808	2808	2808	2808	2808
S1 täyttyy ajasta [%]	91,1	91,8	100	97,2	98,1	98,4
S2 täyttyy ajasta [%]	99,9	100	100	100	100	100

1) kpl määrä mittausarvoja, jotka mitattu 5 minuutin välein, kun ilmanvaihtokone on ollut käynnissä.

Koulun ilmanvaihdon suunnittelussa on ollut lähtökohtana S2-luokan tavoitearvot. Taulukon 5 tuloksista voidaan nähdä, että sisäilman hiilidioksidipitoisuus ei ylitä S2-luokan enimmäisarvoa muissa kuin luokassa R2, jossa hiilidioksidipitoisuus on yli tavoitearvon kolmen viikon mittausajanjakson aikana yhteensä 10 minuutin ajan. Tämä poikkeama ei ylitä sisäilmastoluokan S2 olosuhteiden pysyvyydelle annettua tavoitearvoa 90. [1, s. 7.]

Luokkien hiilidioksidipitoisuuden osalta voidaan todeta, että luokissa on tavoitearvojen mukainen sisäilman laatu kolmen viikon mittausajanjakson aikana.

Mittausajanjakson luokkien sisälämpötiloja verrattiin sisäilmastoluokkiin S1 ja S2, jotka on määritetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Sisäilmastoluokkien S1 ja S2 mukaiset sisäilman lämpötilan tavoitearvot [1, s. 6.].

	S1-sisälämpötila [°C]	S2-sisälämpötila [°C]
Lämpötilan sallittu vaihteluväli [°C] poikkeama ylöspäin		
$tu \leq 0 \text{ °C}$	$< 22,5$	< 23
$0 \text{ °C} < tu \leq 15 \text{ °C}$	$< 22,5 + 0,1666 \times tu$	$< 23 + 0,2 \times tu$
$tu > 15 \text{ °C}$	< 25	< 26
Lämpötilan sallittu vaihteluväli [°C] poikkeama alaspäin	S1-sisälämpötila [°C]	S2-sisälämpötila [°C]
$tu \leq 0 \text{ °C}$	$> 20,5$	$> 20,5$
$0 \text{ °C} \leq tu \leq 20 \text{ °C}$	$> 20,5 + 0,075 \times tu$	$> 20,5 + 0,025 \times tu$
$tu > 20 \text{ °C}$	> 22	> 21

Luokissa mitatut sisälämpötilat siirrettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmaan, jolla laskettiin, miten 5 minuutin välein RAU-järjestelmästä otetut sisälämpötilat vastaavat S1- ja S2-luokkien tavoitearvoja. Tulokset on esitetty taulukossa 7 ja 8.

Taulukko 7. Luokkien sisälämpötilan sallitun vaihteluvälin sisällä poikkeama ylöspäin.

Luokka	R2	R3	R4	R5	R6	R7
S1 Lämpötilan sallittu vaihteluväli ylöspäin[kpl] ¹⁾	2808	2808	2808	2806	2808	2803
S2 Lämpötilan sallittu vaihteluväli ylöspäin[kpl] ¹⁾	2808	2808	2808	2808	2808	2808
Mittauspisteet yhteensä [kpl] ¹⁾	2808	2808	2808	2808	2808	2808
S1 täyttyy ajasta [%]	100 %	100 %	100 %	99,9 %	100 %	99,9 %
S2 täyttyy ajasta [%]	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

1) kpl-määrä luokkien sisälämpötilan mittausarvoja, jotka mitattu 5 minuutin välein, kun ilmanvaihtokone ollut käynnissä.

Kolmen mittausviikon aikana luokkien sisälämpötilat eivät olleet liian korkeita ja täyttävät suurelta osin, myös S1-tavoitearvot. Suunnittelun lähtökohtana hankkeessa on sisäilmastoluokka S2. Koska mittausviikot sijoittuvat talvi- ja kevät-kuukausille, jolloin ulkolämpötila oli lähes koko ajan pakkasen puolella, nämä tulokset eivät yllätä. Vastaava tarkastelu olisikin mielenkiintoista tehdä toukuun tai elokuun osalta, kun ulkolämpötilat ovat huomattavasti korkeammat, jolloin auringon säteily aiheuttaa luokkatiloihin huomattavasti suuremman lämpökuorman. Luokkia ei ole varustettu erillisellä jäähdytyslaitteistolla, jolloin sisälämpötilat saattavat nousta sisälämpötilan tavoitearvojen yläpuolelle.

Taulukko 8. Luokkien sisälämpötilan sallitun vaihteluvälin sisällä poikkeama alaspäin.

Luokka	R2	R3	R4	R5	R6	R7
S1 Lämpötilan sallittu vaihteluväli alaspäin täyttyy [kpl] ¹⁾	2677	2603	2799	2650	2419	2622
S2 Lämpötilan sallittu vaihteluväli alaspäin täyttyy [kpl] ¹⁾	2677	2603	2799	2650	2454	2622
Mittausarvot yhteensä [kpl] ¹⁾	2808	2808	2808	2808	2808	2808
S1 täyttyy ajasta [%]	95,3	92,7	99,7	94,4	86,1	93,4
S2 täyttyy ajasta [%]	95,3%	92,7	99,7	94,4	87,4	93,4

1) kpl määrä mittausarvoja, jotka mitattu 5 minuutin välein, kun ilmanvaihtokone ollut käynnissä.

Taulukosta 8 voidaan todeta, että Sisäilmamastoluokituksen 2018 tavoitearvoihin ei mittausviikoilla ole täysin päästy ja on mittausjaksoja, jolloin luokkien lämpötilat laskevat alle tavoitearvojen. Mitattujen lämpötilojen pysyvyys täyttää sisäilmastoluokkien S1- ja S2-luokan tavoitearvot lukuun ottamatta yhtä luokkatilaa. Nämä erot muodostuivat, kun ulkoilma on yli 0 °C, jolloin S2-luokan sallittu poikkeama alaspäin on lukuarvona pienempi kuin S1-luokan tavoitearvo (taulukko 6). Kolmen viikon mittausajanjaksolla oli viimeisellä mittausviikolla 5 minuutin ajanjaksoja yhteensä 477 kpl, jolloin ulkoilman lämpötila oli yli 0 °C. Näinä ajanjaksoina ulkolämpötila oli vain muutaman asteen yli 0 °C, jolloin sisäilmastoluokkien S1 ja S2 tavoitearvojen täyttymisen välille ei muodostu juurikaan eroja.

Taulukossa 9 on esitetty prosentuaaliset osuudet ajasta, jolloin luokkien sisälämpötilat ovat olleet tavoitearvojen alapuolella.

Taulukko 9. Luokkatilojen sisälämpötilat, jotka ovat olleet tavoitearvojen alapuolella.

Luokka	R2 ¹⁾ [%]	R3 ¹⁾ [%]	R4 ¹⁾ [%]	R5 ¹⁾ [%]	R6 ¹⁾ [%]	R7 ¹⁾ [%]
Sisälämpötila <20,0 °C	0	0	0	0	4 (14)	0
Sisälämpötila <20,1 °C	0	0	0	0	4,5 (16)	0
Sisälämpötila <20,2 °C	0	4,4 (9)	0	0,6 (1)	13,3 (47)	1
Sisälämpötila <20,3 °C	0	17,6 (36)	0	26,6 (42)	19,8 (70)	23
Sisälämpötila <20,4 °C	30,5 (40)	41,5 (85)	0	38 (60)	28,8 (102)	50
Sisälämpötila <20,5 °C	69,5 (91)	36,6 (75)	100 (9)	34,8 (55)	27,7 (98)	112
Sisälämpötila >20,5 °C	0	0	0	0	2 (7)	0
Yhteensä	100 (131)	100 (205)	100 (9)	100 (158)	100 (354)	100 (186)
Keskimääräinen alituslämpötila	20,4 °C	20,4 °C	20,5 °C	20,4 °C	20,3 °C	20,4 °C

1) Soluissa esitetty % kuinka monta 5 minuutin välein otettua mittausarvoa on toteutunut kyseisellä sisälämpötilalla verrattuna kaikkiin S2-luokan tavoitearvojen alituksiin, () esitetty mittausarvojen lukumäärä.

Taulukosta 9 voidaan nähdä, että kun luokissa on alitettu sisälämpötilan tavoitearvo 20,5 °C, on alitus ollut keskimäärin noin 0,1–0,2 °C, mikä on melko pieni lämpötilaero.

Taulukossa 10 on vuorokauden ajat, jolloin sisälämpötilat olivat tavoitearvojen alapuolella.

Taulukko 10. Aika vuorokaudesta, jolloin luokkatilojen sisälämpötilat ovat olleet sisäilmastoluokan S2 tavoitearvojen alapuolella.

Ilmanvaihtokoneen käyntiajat	R2 ¹⁾ [%]	R3 ¹⁾ [%]	R4 ¹⁾ [%]	R5 ¹⁾ [%]	R6 ¹⁾ [%]	R7 ¹⁾ [%]
5.00–7.00	22,1 (29)	11,7 (24)	33,3 (3)	32,3 (51)	2 (7)	9
7.00–9.00	26,7 (35)	0	22,2 (2)	23,4 (37)	0	4
9.00–11.00	16 (21)	0	0	4,4 (7)	0	8
11.00–13.00	19,8 (26)	0	0	0	0	7
13.00–15.00	0	0	0	0	3,1 (11)	0
15.00–17.00	0	12,2 (25)	0	7,6 (12)	32,8 (116)	9
17.00–19.00	15,3 (20)	76,1 (156)	44,4 (4)	32,3 (51)	62,1 (220)	149
Yhteensä	100 (131)	100 (205)	100 (9)	100 (158)	100 (354)	100 (186)
Keskimääräinen alituspötila	20,4 °C	20,4 °C	20,5 °C	20,4 °C	20,3 °C	20,4 °C

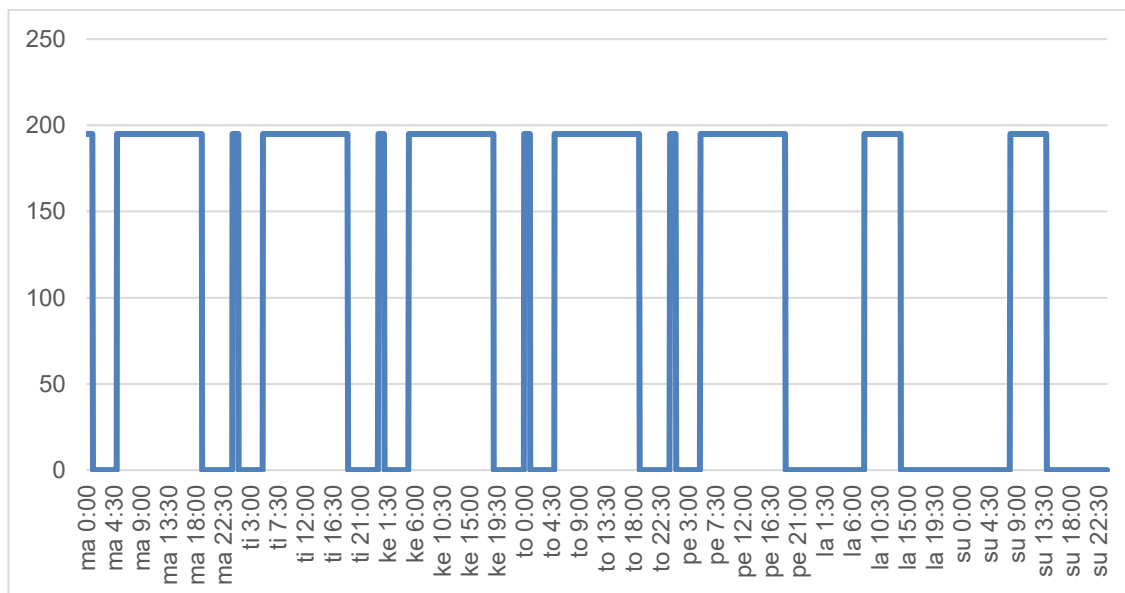
- 1) Soluissa esitetty, mihin aikaan luokan sisälämpötila alitus S2-luokan tavoitearvoista on tapahtunut. % kertoo, kuinka monta toteutunut kyseisenä ajankohtana verrattuna kaikkiin luokansisälämpötilan alituksiin, () oleva mittausarvojen lukumäärä.

Taulukosta 10 voidaan nähdä, että suurin osa luokkien sisäilman lämpötilan S2-luokan tavoitearvojen alituksista on tapahtunut aamulla tai illalla, jolloin luokat ovat olleet hyvin vähäisellä käytöllä. Mikäli sisäilman lämpötilojen alitukset koetaan ongelmalliseksi, voidaan luokkien lämmityspattereiden termostaattien säätöarvoa nostaa. Koulun käyttäjiltä ei ole tullut kiinteistön ylläpitoon palautetta liian kylmästä sisäilman lämpötilasta.

3.3 Ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus vakioilmavirtaohjauksella

Vaikka mittauksen alla olleiden luokkien ilmavirta on tarpeenmukaisesti säädetty, voidaan arvioida, minkä verran lämmitysenergiaa luokkien ilmanvaihtoon olisi kulunut, mikäli käytössä olisi vakioilmavirtaohjaus.

Vakioilmavirtaisen ilmanvaihtojärjestelmän energialaskennassa on oletettu, että kaikissa luokissa on maksimi-ilmavirta aina, kun ilmanvaihtokoneet ovat käynnissä. Kuvassa 3 esitetty luokan R2 ilmavirrat, kun käytössä vakioilmanvaihto.



Kuva 3. Luokan R2 ilmavirrat viikon ajalta vakioilmanvaihdolla.

Laskelmat vakioilmanvaihdon energiankulutuksesta tehdään vastaavalla tavalla kuin luvussa 3.2.1, jossa laskettiin toteutuneen ilmanvaihdon energiankulutusta. Erona on, että kaavassa (1) käytetään $q_{v, \text{tulo}}$ -arvona aina luokan maksimi-ilmavirtaa, kun ilmanvaihtokone on ollut päällä.

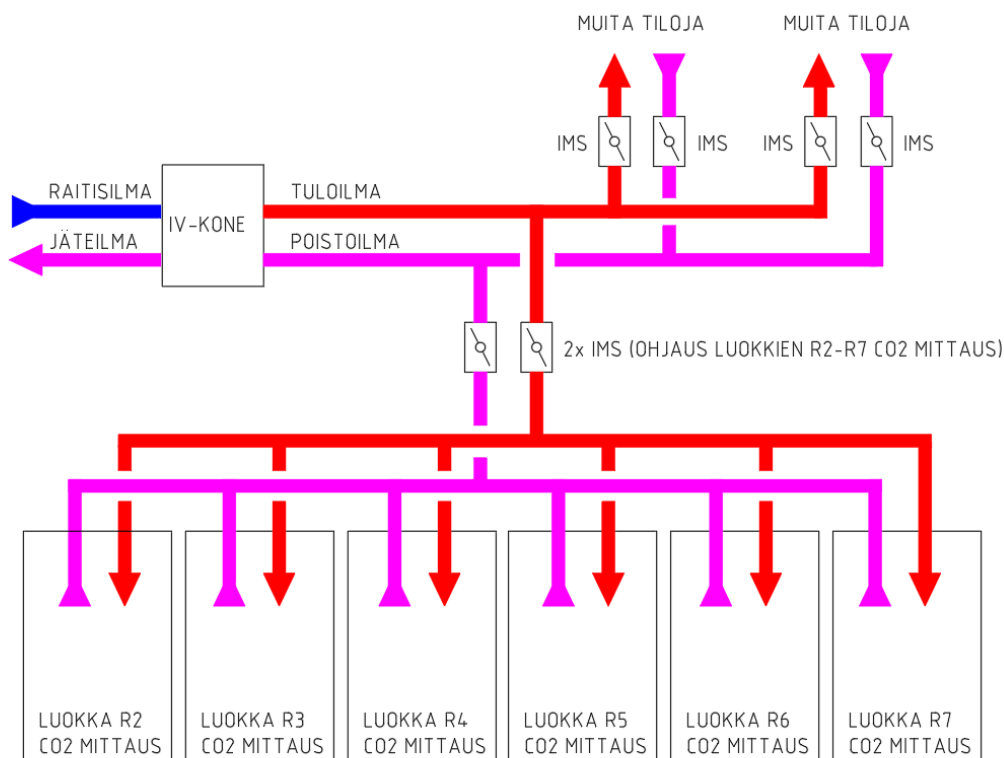
Laskelmat vakioilmanvaihdon energiankulutuksesta tehtiin Excelillä jokaisen viikon osalta erikseen ja laskelmien tulokset on koottu taulukkoon 11.

Taulukko 11. Luokkien laskennallinen lämmitysenergiankulutus ilmanvaihdon osalta, mikäli luokissa olisi vakioilmanvaihto.

Luokka	Viikko 5 1.–7.2.2021 [kWh]	Viikko 7 15.–21.2.2021 [kWh]	Viikko 9 1.–7.3.2021 [kWh]	Yhteensä [kWh]
R2	125	112	76	313
R3	141	127	85	354
R4	96	86	58	241
R5	128	115	78	321
R6	141	127	85	354
R7	128	115	78	321

3.4 Ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus yhdellä ilmavirtasäädinparilla

Koska mittausajanjakson ajalta oli käytössä luokkien hetkelliset hiilidioksidipitoisuudet, laskettiin teoreettisella tasolla, minkä verran luokkien ilmanvaihtoon kului lämmitysenergiaa, mikäli käytössä olisi vyöhykekohtainen säätö. Koska mittauksen alla olleiden luokkien ilmanvaihtokoneen takana oli myös muita luokkia, tehtiin laskelmat siten, että kaikkia kuutta luokkaa ohjattaisiin yhdellä ilmavirtasäädinparilla kuvan 4 mukaisesti. Tässä tapauksessa kaikki kuusi luokkaa olisivat yhden säätövyöhykkeen ohjauksessa.



Kuva 4. Teoreettinen tilanne: mittauksen alla olevia luokkia ohjataan yhdellä il-mavirtasäädinparilla.

Kun käytössä on yhteinen il-mavirtasäätö, ohjataan luokkien il-mavirtoja sen mu-kaan, missä luokassa on suurin hiilidioksidipitoisuus. Taulukossa 12 on esitetty mittaustilanne luokkien hiilidioksidipitoisuuden osalta esimerkkimittauspis-teessä.

Taulukko 12. Luokkien hiilidioksidipitoisuus mittauspisteessä 1.2.2021 kello 10.20–10.25.

Luokka	R2	R3	R4	R5	R6	R7	Suurin arvo
Hiilidioksidipitoisuus [ppm]	628	671	494	667	546	599	671

Kun luokissa on käytössä huonekohtaiset il-mavirtasäätimet ja -säätö, tilojen il-mavirtoja ohjataan taulukon 12 luokkakohtaisten hiilidioksidipitoisuuksien

muukaan. Mikäli kaikki luokat olisivat yhden ilmavirtasäätimen takana, ohjattaisiin kaikkien luokkien ilmavirtaa luokkien suurimman hiilidioksidipitoisuuden mukaan. Taulukosta 12 voidaan nähdä, että mittaushetkellä tämä arvo olisi luokan R2 hiilidioksidipitoisuus, joka on 671 ppm.

Kun mittaushetkellä ohjaava hiilidioksidipitoisuusarvo on kaikille luokille sama, lasketaan luokkakohtaisesti ilmavirrat kuvan 2 kuvaajan mukaan. Kuvaaja voidaan myös määrittää kaavoista (3), (4) ja (5) laskemalla ilmavirta luokkien suurimman hiilidioksidipitoisuudesta.

Jos $CO_2 \leq 500$ [ppm], käytetään kaavaa, $q_{v\ tulo} = q_{v\ tulo\ min}$ (3)

Jos 500 [ppm] < CO_2 < 700 [ppm], käytetään kaavaa

$$q_{v\ tulo} = \frac{CO_{2\ max} - 500[ppm]}{200 [ppm]} (q_{v\ tulo\ max} - q_{v\ tulo\ min}) + q_{v\ tulo\ min} \quad (4)$$

Jos $CO_2 \geq 700$ [ppm], käytetään kaavaa $q_{v\ tulo} = q_{v\ tulo\ max}$ (5)

joissa

$CO_{2\ max}$ on mittaushetken suurin/ohjaava hiilidioksidipitoisuus luokissa, ppm

$q_{v\ tulo}$ on luokan tuloilmavirta mittauspisteessä, m^3/s

$q_{v\ tulo\ min}$ on luokan minimi-tuloilmavirta, m^3/s

$q_{v\ tulo\ max}$ on luokan maksimi-tuloilmavirta, m^3/s

Alla on esimerkkilaskelma luokan R2 tuloilmavirrasta mittauspisteessä 1.2.2021 kello 10.20–10.25, kun luokkien ohjaus on yhdeltä IMS-parilta. Koska $CO_{2\ max} = 671$ ppm ja 500 ppm < $CO_{2\ max}$ < 700 ppm, käytetään laskennassa kaavaa (4). Luokan R2 osalta $q_{v\ tulo\ min} = 0,069$ m^3/s ja $q_{v\ tulo\ max} = 0,195$ m^3/s , taulukon 1 mukaisesti.

$$q_{v\ tulo\ L2} = \frac{CO_{2\ max} - 500[ppm]}{200 [ppm]} (q_{v\ tulo\ max} - q_{v\ tulo\ min}) + q_{v\ tulo\ min}$$

$$= \frac{671 \text{ [ppm]} - 500 \text{ [ppm]}}{200 \text{ [ppm]}} \left(0,195 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} - 0,069 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) + 0,069 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,150 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

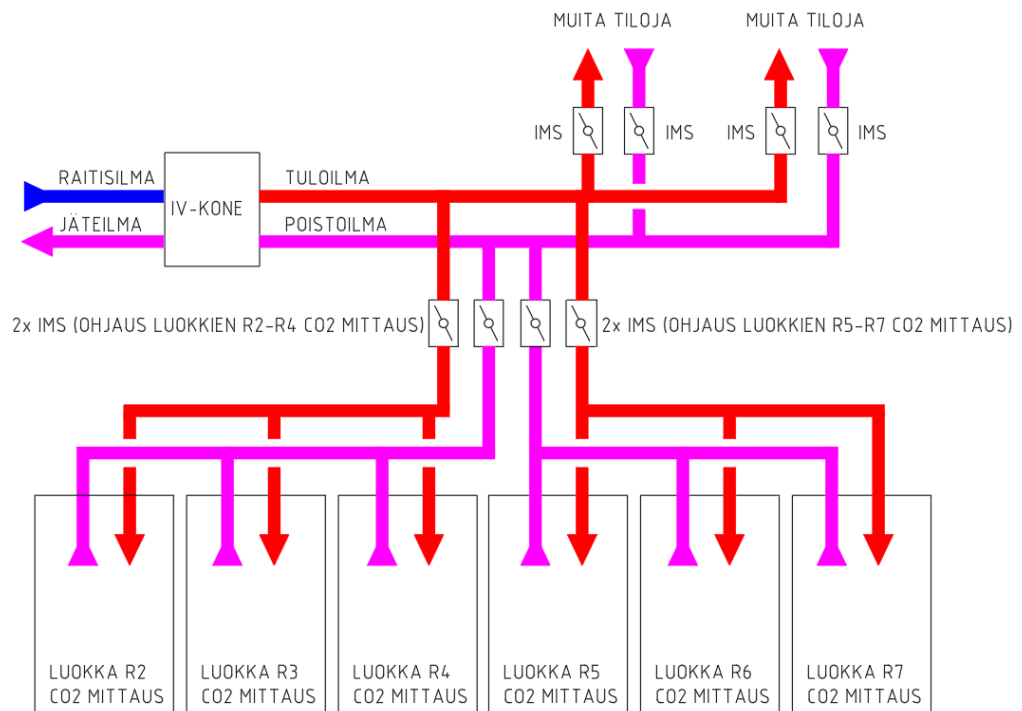
Kun kaikkien luokkien hetkelliset ilmavirrat on laskettu tilanteessa, jossa luokkien ilmanvaihtoa ohjattaisi yhden ilmavirtasäätimen avulla, laskettiin myös luokkien teoreettinen lämmitysenergian kulutus kaavan (1) avulla. Laskelmat tehtiin Excelillä, ja tulokset on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Luokkien ilmanvaihdon käyttämä teoreettinen lämmitysenergiankulutus, mikäli luokkien ilmavirtaa säädettäisiin yhden ilmavirtasäädinparin avulla

Luokka	Viikko 5 1.-7.2.2021 [kWh]	Viikko 7 15.-21.2.2021 [kWh]	Viikko 9 1.-7.3.2021 [kWh]	Yhteensä
R2	78	69	42	189
R3	88	78	48	214
R4	60	52	32	145
R5	80	70	43	192
R6	88	78	48	214
R7	80	70	43	192

3.5 Ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus kun säätö kahdella ilmavirtasäädinparilla

Luokkien ilmavirtaa voitaisiin myös ohjata myös kahdella ilmavirtasäädinparilla, jolloin kuuden luokan ilmavirtaohjaus toimii kahdella vyöhykkeellä kuvan 5 mukaisesti.



Kuva 5. Teoreettinen tilanne: mittauksen alla olevia luokkia ohjataan kahdella ilmavirtasäädinparilla.

Taulukosta 14 nähdään, millä hiilidioksidipitoisuudella luokkien ilmavirtaa ohjattaisiin 5 minuutin aikana (1.2.2021 kello 10.20–10.25). Luokkien R2, R3 ja R4 ilmavirta määräytyy kyseisten luokkien suurimman hiilidioksidipitoisuuden 671 ppm mukaan, joka on luokassa R3. Luokkien R5, R6 ja R7 ilmavirrat määräytyvät hiilidioksidipitoisuuden 667 ppm mukaan, joka on luokassa R5. Ilmavirta lasketaan kaavoilla (3), (4) ja (5). Ilmanvaihdon hetkelliset ilmavirrat kolmen mittausviikon viikon ajalta laskettiin Excelin avulla.

Taulukko 14. Luokkien mitattu ja ilmavirtaa ohjaava hiilidioksidipitoisuus mitaushetkellä 1.2.2021 kello 10.20–10.25.

Luokka	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Hiilidioksidipitoisuus mitattu [ppm]	628	671	494	667	546	599
Hiilidioksidipitoisuus ohjaava [ppm]	671	671	671	667	667	667

Hetkellisistä ilmajirroista mukaan laskettiin ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema lämmitysenergiankulutus viikkotasolla. Tulokset esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Luokkien ilmanvaihdon käyttämä teoreettinen lämmitysenergian kulutus, mikäli luokkien ilmajirtaa säädettäisiin kahden ilmajirtasäädinparin avulla.

Luokka	Viikko 5 1.–7.2.2021 [kWh]	Viikko 7 15.–21.2.2021 [kWh]	Viikko 9 1.–7.3.2021 [kWh]	Yhteensä [kWh]
R2	67	62	39	167
R3	75	69	44	189
R4	51	47	30	127
R5	76	67	40	183
R6	84	74	45	204
R7	76	67	40	183

3.6 Puhaltimen käyttämä sähköenergiankulutus

3.6.1 Sähköenergiankulutus huonekohtaisilla ilmajirtasäätimillä

Kun ilmanvaihtoa ohjataan tarpeenmukaisesti, saadaan tilojen ilmanvaihdon määrää pienennettyä vakioilmavirtaiseen järjestelmään nähden. Kun tilojen ilmajirtaa pienennetään, säästetään ilmanvaihdon lämmitysenergian lisäksi myös ilmanvaihdon puhaltimen sähköenergian tarpeessa. Puhaltimien käyttämä sähköenergiaa ei saada suoraan RAU-järjestelmästä, mutta se voidaan laskea kaavalla (6) ja puhaltimen sähköenergian kulutus kaavalla (7). Kaavalla (8) voidaan laskea ilmanvaihtokoneen puhaltimien sähköteho.

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{q_{v1}}{q_{v2}}\right)^3 \Rightarrow P_2 = \frac{P_1}{\left(\frac{q_{v1}}{q_{v2}}\right)^3} \quad (6)$$

jossa

P_1	on puhaltimen alkuperäinen tehontarve, kW
P_2	on puhaltimen muutettu tehontarve, kW
q_{v1}	on puhaltimen alkuperäinen ilmavirta, m ³ /s
q_{v2}	on puhaltimen muutettu ilmavirta, m ³ /s

$$E = P \cdot t \quad (7)$$

jossa

E	on puhaltimen käyttämä sähköenergia, kWh
P	on puhaltimen teho, kW
t	on aika, h

$$P_{IV-kone} = SFP \cdot q_{max} \quad (8)$$

jossa

SFP	on ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho, kW/(m ³ /s)
$q_{v \max}$	on mitoittava tulo- tai poistoilmavirta, m ³ /s
$P_{IV-kone}$	on iv-koneen puhaltimien yhteenlaskettu sähköteho, kW

Luokkien R2–R7 ilmanvaihtokone palvelee myös muita tiloja. Jotta tilojen ilmanvaihdon käyttämä sähköenergia voitiin määrittää laskennallisesti, oletettiin että, luokkia R2–R7 palvelisi yksi ilmanvaihtokone, jonka maksimi-ilmavirta on luokkien yhteenlaskettu ilmavirta. Luokkien maksimi-ilmavirrat on esitetty taulukossa 1. Ilmanvaihtokoneen maksimi-ilmavirta ($q_{v \max}$) saadaan laskemalla luokkien ilmavirrat yhteen.

$$q_{\max(IV-kone)} = 195 \frac{l}{s} + 220 \frac{l}{s} + 150 \frac{l}{s} + 200 \frac{l}{s} + 220 \frac{l}{s} + 200 \frac{l}{s} + 1185 \frac{l}{s} = 1,185 \frac{m^3}{s}$$

Koulun ilmanvaihtokoneet on mitoitettu SFP-luvulla $1,8 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$, joka voidaan olettaa myös luokkien ilmanvaihtokoneen SFP-luvuksi. Luokkien ilmavaihtokoneen puhaltimien sähköteho saadaan laskettua kaavan (8) avulla.

$$P_{IV-kone} = SFP \cdot q_{max} = 1,8 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \cdot 1,185 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 2,13 \text{ kW}$$

Kun ilmanvaihtokoneen puhaltimien tarvitsema sähköteho ($P_{IV-kone}$) maksimi-ilmavirralla on tiedossa, voidaan kaavan (6) avulla laskea puhaltimien tarvitsema sähköteho, kun tarpeenmukainen ilmanvaihto ohjaa puhaltimia pienemmillä ilmavirroilla.

Alla esimerkkilaskelma luokkien teoreettisen ilmanvaihtokoneen puhaltimien tarvitsemasta tehosta mittauspisteessä 1.2.2021 kello 10.20–10.25. Tehontarve saadaan laskettua kaavalla (6), jossa $q_{v1} = 1185 \text{ l/s}$, $P_1 = 2,13 \text{ kW}$ ja mittaushetkellä luokkien R2–R7 yhteenlaskettu ilmavirta.

$$q_{v2} = 115 \text{ l/s} + 206 \text{ l/s} + 55 \text{ l/s} + 128 \text{ l/s} + 111 \text{ l/s} + 110 \text{ l/s} = 724 \text{ l/s}$$

$$P_2 = \frac{P_1}{\left(\frac{q_{v1}}{q_{v2}}\right)^3} = 2,13 \text{ kW} / \left(\frac{1,185 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,724 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}\right)^3 = \frac{2,13 \text{ kW}}{4,38} = 0,49 \text{ kW}$$

Laskelmien mukaan 1.2.2021 kello 10.20–10.25 puhaltimien sähkötehotarve on $0,93 \text{ kW}$. Ilmanvaihtokoneen puhaltimien käyttämä sähköenergian määrä kyseisen 5 minuutin ($5/60 \text{ h}$) ajanjakson aikana saadaan laskettua kaavalla (7).

$$E = P \cdot t = 0,49 \text{ kW} \cdot \frac{5}{60} \text{ h} = 0,04 \text{ kWh}$$

RAU-järjestelmästä otettiin luokkien R2–R7 ilmavirrat 5 minuutin välein koko kolmen viikon mittausajanjaksojen osalta. Ilmavirtojen perusteella laskettiin aiemmin esitetyllä tavalla ilmanvaihtokoneen puhaltimien käyttämä sähköenergiankulutus ja tulokset on esitetty taulukossa 16.

3.6.2 Sähköenergiankulutus vakioilmanvaihdolla

Mikäli luokkia ohjattaisiin vakioilmavirtaisella ilmanvaihdolla, olisi ilmanvaihtokoneen ilmavirta koneen ollessa päällä luokkien maksimi-ilmavirta eli $1,185 \text{ m}^3/\text{s}$, jolloin puhaltimien tehontarve on $2,13 \text{ kW}$. Puhaltimien sähköenergiantarve laskemalla kaavalla (7), jossa t on puhaltimien käyntiaika kolmen viikon ajalta. IV-koneen käynti aika on arkisin (ma–pe) 00.00–01.00 ja 5.00–19.00 (1 h + 14 h) sekä viikonloppuisin (la–su) 10.00–14.00 (4 h), jolloin viikon käyntiaika ja sähköenergiantarve voidaan määrittää alla esitettyjen laskemien mukaisesti.

$$t_{(IV \text{ 1 vk})} = 15h \cdot 5 + 4h \cdot 2 = 83 h$$

$$E_{(IV \text{ sähkö vk})} = P \cdot t = 2,13 \text{ kW} \cdot 83h = 177 \text{ kWh}$$

3.6.3 Sähköenergiankulutus yhdellä tai kahdella IMS-parilla

Teoreettisessa tilanteessa, jossa luokkien ilmavirtoja säädettäisi yhden tai kahden IMS-parin avulla, voidaan puhaltimien tarvitsema sähköenergian kulutus laskea samalla tavalla kuin luvussa 3.6.1. Poikkeuksena kuitenkin on, että 5 minuutin ajanjakson aikana käytetään ilmavirtana luokkien R2–R7 yhteenlaskettua ilmavirtaa, mikäli luokkien tarpeenmukaiset ilmavirrat ohjattaisiin yhdellä tai kahdella IMS-parilla. Laskelmat tehtiin Excelin avulla, ja lopputulokset on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Puhaltimien tarvitsema sähköteho eri ilmavirtojen säätötavoilla.

Puhaltimien tarvitsema sähköenergia eri säätötavoilla	Viikko 5 1.–7.2.2021 [kWh]	Viikko 7 15.–21.2.2021 [kWh]	Viikko 9 1.–7.3.2021 [kWh]	Yhteensä [kWh]
Huonekohtainen säätö	29	31	27	88
Vakioilmanvaihto	177	177	177	530
Luokat ohjaus 1 IMS-pari	73	69	65	208
Luokat ohjaus 2 IMS-paria	53	55	48	156

3.7 Yhteenveto tarpeenmukaisen ilmanvaihdon energiankulutuksesta

Taulukossa 17 on esitetty kaikkien luokkien osalta, minkä verran eri ilmanvaihdon säätötavat kuluttaisivat energiaa kolmen viikon mittausajanjakson aikana.

Taulukko 17. Energiankulutus eri säätötavoilla mittausajanjakson ajalta.

	Lämmitysenergia		Puhaltimien sähköenergia	
	[kWh]	[%]	[kWh]	[%]
Huonekohtainen	915	100	88	100
Vakioilmanvaihto	1904	208	530	602
Luokat 1-IMS	1146	126	208	236
Luokat 2-IMS	1052	116	156	177

Taulukon 17 arvoista nähdään, että huonekohtaisella säädöllä saadaan pienimmät energiankulutukset, niin lämmitys- kuin sähköenergian osalta. Mikäli luokkien ilmanvaihto toteutetaan vakioilmavirtaisella ilmanvaihdolla, kuluu energiaa huomattavasti enemmän kuin muilla vaihtoehdoilla. Erot ovat suurimmat puhaltimien sähköenergiankulutuksessa. Koska puhaltimen teho on suoraan verrannollinen ilmavirran kolmanteen potenssiin, saadaan pienemmällä ilmavirralla huomattavia säästöjä puhaltimien sähköenergiankulutuksessa.

3.8 Ilmanvaihdon energiakustannukset mittausajanjakson aikana

3.8.1 Energiakustannuslaskelmat

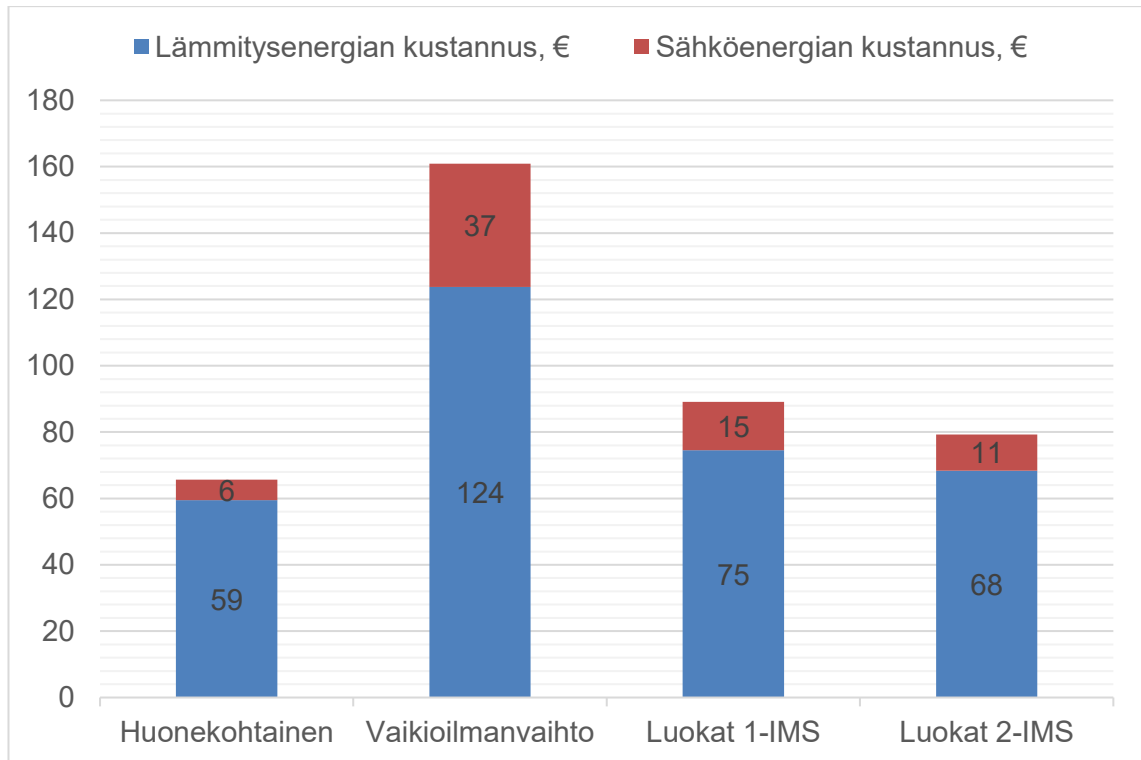
Seuraavassa tarkastellaan, minkä suuruisia kustannuksia ilmanvaihdon eri säätötavoista muodostui mittausajanjakson aikana. Kustannuslaskennassa otettiin huomioon ilmanvaihdon käyttämä lämmitysenergia sekä ilmanvaihtopuhaltimien käyttämä sähköenergia

Ilmanvaihdon käyttämä lämmitysenergia toteutetaan kaukolämmön avulla ja sen kustannukset laskettiin käyttämällä kaukolämmön hintana 65 €/MWh. Sähköenergian hintana käytettiin lukemaa 70 €/MWh. Eri säätötapojen tarvitsemat energiankulutukset ja kustannukset on esitetty taulukossa 18 ja kuvassa 6.

Taulukko 18. Ilmanvaihdon lämmitys- ja sähköenergian kulutustarpeet sekä kustannukset mittausajanjakson ajalta.

	Lämmitysenergia		Sähköenergia		Yhteensä	Kustannusten vertailu
	[kWh]	[€]	[kWh]	[€]		
Huonekohtainen	915	59	88	6	66	41
Vakioilmanvaihto	1904	124	530	37	161	100
Luokat 1-IMS	1146	75	208	15	89	55
Luokat 2-IMS	1052	68	156	11	79	49

1) Kustannusten suhde vakioilmavirtaiseen ilmanvaihdon säätöön nähden



Kuva 6. Energiakustannukset eri ilmanvaihdon säätötavoille kolmen viikon mittausajanjakson aikana.

3.8.2 Energiakustannusten analysointi

Kolmen viikon mittausajanjakso sijoittui helmi- ja maaliskuun viikoille, jotka osuivat vuoden kylmempään vuodenaikaan. Vastaavat mittaukset kesäaikaan pienentäisi ilmanvaihdon tarvitsemaa lämmitysenergian kulutusta. Ulkolämpötilan muutokset eivät vaikuta puhaltimien tarvitsemaan sähköenergiaan kulutukseen, joten ne pysyvät samana, mikäli ilmanvaihdon käyttöaika ei muutu.

Kuten taulukosta 18 ja kuvasta 6 voidaan todeta, saavutetaan toimivalla huonekohtaisella ilmavirtasäädöllä mittausajanjakson aikana pienimmät energiakustannukset. Vakioilmavirtaisen ilmanvaihdon energiakustannukset saadaan likimain puolitettua, kun luokat varustetaan tarpeenmukaisella säädöllä. Laskentatulosten perusteella voidaan todeta, että mikäli ilmanvaihdon energiakustannuksissa halutaan säästää, kannattaa ilmanvaihto varustaa tarpeenmukaisella ilmanvaihdoilla, siitä riippumatta miten se toteutetaan.

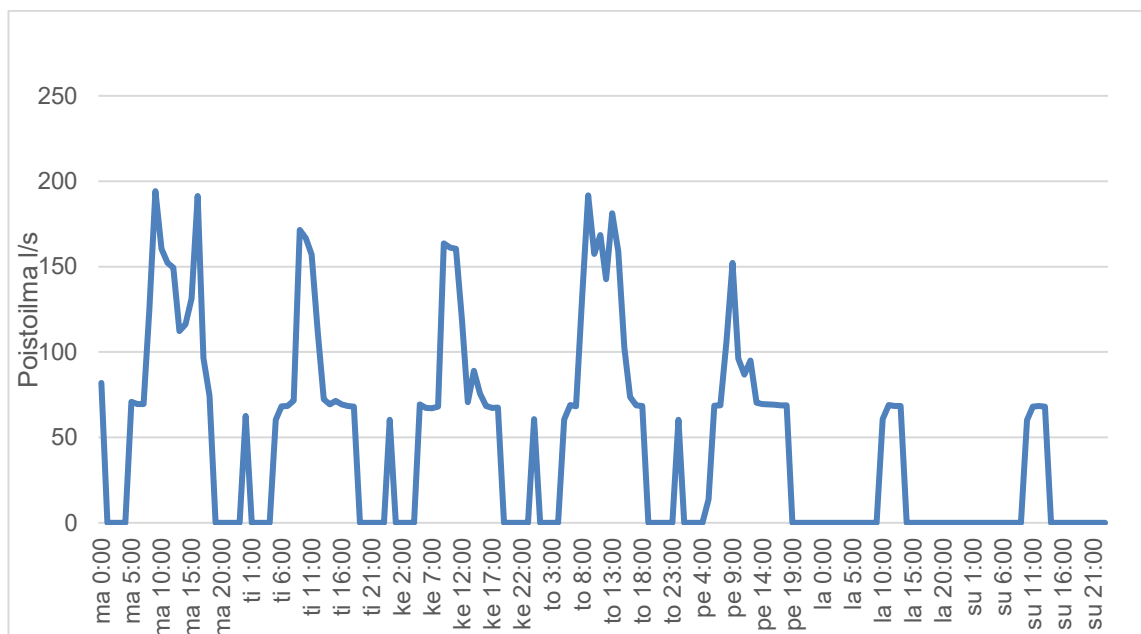
4 Elinkaarikustannukset kun käytössä tarpeenmukainen ilmavirtasäätö luokkahuoneissa

4.1 Lähtötiedot laskelmiin

4.1.1 Ilmanvaihdon säätötapojen ilmavirrat

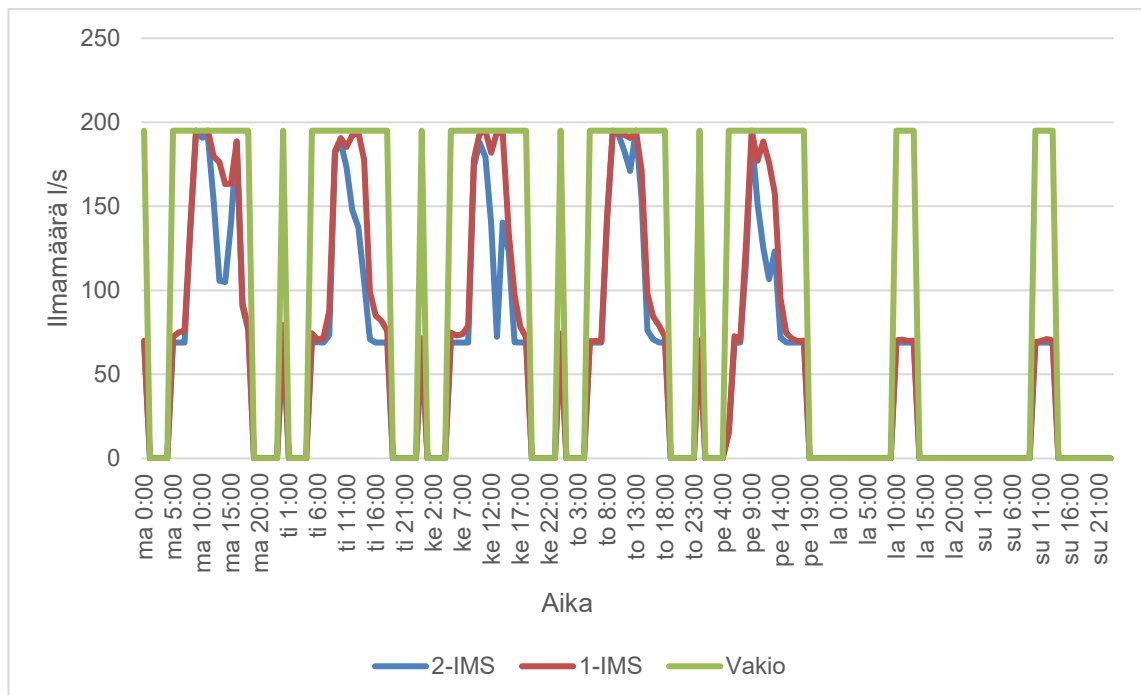
Jotta pystyttiin vertaamaan eri säätötapojen elinkaarikustannuksia, tuli määrittää eri ilmanvaihdon säätötapojen aiheuttamat lämmitys- ja sähköenergian kustannukset vuositasolla. Koska luokkien tarpeenmukaiset ilmavirrat ja ulkolämpötila vaihtelevat jatkuvasti, on lämmitysenergian laskelmat tehtävä koko vuodelle vähintään tuntikohtaisesti.

Kuvassa 7 on esitetty luokan R2 viikon tuntikohtaiset ilmavirrat, jotka on laskettu kolmen viikon mittauksen keskiarvojen perusteella. Mitattujen ilmavirtojen luokissa oli huonekohtaiset IMS-parit. Laskelmat tehtiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla.



Kuva 7. Luokan R2 viikon tuntikohtainen poistoilmavirta, perustuen mittaustulosten keskiarvoihin.

Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon säätötavoille, joissa luokkien ilmavirrat ohjataan yhden tai kahden IMS-parin avulla, laskettiin myös tuntikohtaiset keskimääräiset ilmavirrat. Laskelmat tehtiin luvussa 3.4 ja 3.5 määritetyillä ilmavirroilla. Kyseiset ilmavirrat luokassa R2 on esitetty kuvassa 8. Vakioilmavirtaisen ilmanvaihdon osalta luokkien ilmavirrat ovat maksimissa aina kun ilmanvaihtokone käy. Luokan R2 viikon tuntikohtaiset keskimääräiset ilmavirrat vakioilmavaihdon osalta on esitetty kuvassa 8. Tuntikohtaiset laskelmat tehtiin jokaiselle luokalle erikseen.



Kuva 8. Luokan R2 viikon tuntikohtainen keskimääräinen tulo- ja poistoilmavirta, mikäli kuutta luokkaa ohjataan yhdellä tai kahdella IMS-parilla tai käytössä on vakioilmavirtainen järjestelmä.

4.1.2 Ilmanvaihdon säätötapojen lämmitysenergiankulutus

Jotta ilmanvaihdon käyttämä lämmitysenergiämäärä pystyttiin laskemaan vuositasolla, tarvittiin vielä tuntikohtaiset ulkolämpötilat koko laskentavuodelle. Ilmatieteen laitoksen avoimesta datasta saatiin koulun sijaintipaikkakunnan vuoden 2019 ulkolämpötilat [7].

Kun luokkien eri ilmanvaihdon säätötavoille oli saatu määritettyä viikkokohtaiset ilmanvirrat tunneittain, voitiin ilmanvaihdon lämmitysenergiatarve laskea vuositasolla kaavalla (2) vastaavalla tavalla kuten luvussa 3.2.1.

Vuoden 2019 osalta kouluissa oli yhteensä 70 lomapäivää, jotka sijoittuvat arkipäiville, jolloin koulu oli kiinni. Näiden lomapäivien osalta laskettiin siten, että ilmanvaihtoa ohjattiin viikonlopun keskimääräisten ilmavirtojen mukaisesti.

Ilmanvaihdon tarvitsema lämmitysenergiankulutus vuositasolla laskettiin Excelin avulla. Taulukossa 19 on esitetty eri säätötavoilla saadun tulokset luokkahuoneittain eri ilmanvaihdon säätötapojen mukaisesti.

Taulukko 19. Luokkahuoneiden R2–R7 ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus laskettuna, vuoden 2019 tuntikohtaista ulkolämpötiloista.

Luokka	Huonekohtainen [kWh]	2-IMS [kWh]	1-IMS [kWh]	Vakio [kWh]
R2	1127	1232	1387	2388
R3	1279	1392	1567	2694
R4	687	938	1059	1837
R5	1235	1334	1410	2449
R6	1235	1485	1567	2694
R7	1107	1334	1410	2449
Yhteensä	6675	7716	8399	14511

4.1.3 Lämmitysenergian normitus

Jotta vuoden 2019 ulkolämpötilan mukaan lasketut ilmanvaihdon tarvitsemat lämmitysenergiankulutukset olisivat vertailukelpoisia, tulee ne normeerata normaalivuoden ulkolämpötiloihin. Normaalivuosi tarkoittaa energialaskennassa alueen lämpötilojen keskiarvoa vuosien 1981 ja 2010 välillä. Normitettu lämmitysenergiankulutus lasketaan kaavalla (9). [3, s. 3.]

$$Q_{norm} = \frac{S_{N\ vpkunta}}{S_{toteutunut\ vpkunta}} \cdot Q_{toteutunut} + Q_{lämmin\ käyttövesi} \quad (9)$$

jossa

Q_{norm} on rakennuksen normitettu lämmitysenergiankulutus

$Q_{toteutunut}$ on rakennuksen tilojen lämmittämiseen kuluva energia

$Q_{lämmin\ vesi}$ on käyttöveden lämmittämisen vaatima energia. Laskelmissa arvoa ei oteta huomioon, koska normeeraamme vain ilmavaihdon lämmitysenergiaa.

$S_{N\ vpkunta}$ on normaalivuoden (1981–2010) lämmitystarveluku vertailupaikkakunnalla. Laskelmissa käytetään paikkakunnan arvoa 3878 [4].

$S_{toteutunut\ vpkunta}$ toteutunut lämmitystarveluku vuositasolla vertailupaikkakunnalla. Laskelmissa käytetään paikkakunnan vuoden 2019 arvoa 3419 [5].

Alla laskelma huonekohtaisen ilmavirransäädön normitetusta ilmanvaihdon tarvitsemasta lämmitysenergiasta luokkien R2–R7 osalta. Laskussa käytetään kaavaa (9).

$$Q_{norm} = \frac{S_{N\ vpkunta}}{S_{toteutunut\ vpkunta}} \cdot Q_{toteutunut} + Q_{lämmin\ käyttövesi} = \frac{3879}{3419} \cdot 6675\ kWh + 0\ kWh = 7572\ kWh$$

Laskelma on yhteenlaskettu lämmitysenergiantarve kaikille kuudelle luokalle, kun käytössä on huonekohtainen ilmavirtasäätö. Vastaava laskelma tehtiin kaikille ilmanvaihdon säätötavoille ja tulokset on esitetty taulukossa 20.

Taulukko 20. Vuoden 2019 ulkolämpötilojen mukaiset ja normeerattu ilmanvaihdon tarvitseman lämmitysenergian määrä eri säätötavoille.

	Huonekohtainen [kWh]	2-IMS [kWh]	1-IMS [kWh]	Vakio [kWh]
R2–R7 (2019)	6675	7716	8399	14511
R2–R7 normeerattu	7572	8752	9526	16459

4.1.4 Puhaltimien sähköenergian kulutus

Ilmanvaihdon eri säätötapojen elinkaarikustannuksissa tulee huomioida puhaltimien sähköenergiankulutus. Puhaltimien sähköenergian kulutus laskettiin yhdelle vuodelle tuntikohtaisesti. Luokkien tulo- ja poistoilmapuhaltimien yhteisenä SPF-lukuna käytetään arvoa $1,8 \text{ kW(m}^3/\text{s)}$, kuten luvussa 3.6.1, jossa laskettiin puhaltimien sähköenergiankulutus kolmen viikon mittausajanjaksolta. Puhaltimien sähköenergiankulutus vuositasolla laskettiin Excelillä luokkien R2–R7 yhteisestä ilmavirrasta. Laskelmat tehtiin Excelin avulla ja tulokset on esitetty taulukossa 21.

Taulukko 21. Luokkien tulo- ja poistoilma puhaltimien sähköenergiankulutus vuositasolla.

	Huonekohtainen [kWh]	2-IMS [kWh]	1-IMS [kWh]	Vakio [kWh]
R2–R7	1064	1851	2476	5266

4.1.5 Ilmanvaihdon säätötapojen investointikustannukset

Mikäli luokat varustetaan tarpeenmukaisella ilmanvaihdon säädöllä, joka toteutetaan IMS-peltien avulla, pitää ilmanvaihtojärjestelmä varustaa erillisillä komponenteilla. Näiden komponenttien hankinta ja asennus aiheuttavat investointikustannuksia rakentamisvaiheessa. Myös komponenttien huolto ja mahdolliset rikkoutumiset aiheuttavat kustannuksia ilmanvaihtojärjestelmän elinkaaren aikana.

Ilmavirtasäätimien hintaan vaikuttaa laitteen koko, joka määräytyy sen mukaan, minkä verran ilmaa virtaa säätimen läpi. Mikäli kuutta luokkaa ohjataan yhdellä, kahdella tai huonekohtaisilla IMS-pareilla, muuttuvat peltien ilmavirrat ja koko. Investointilaskelmissa huomioitiin tarvittavien IMS-peltien koko- ja hintaerot.

Jokainen IMS-pari tarvitsee oman muuntajan, joiden hinta huomioitiin investointilaskelmissa.

Koska IMS-peltejä ohjataan luokkien hiilidioksidipitoisuuden mukaan, tarvitaan jokaisen luokkaan oma hiilidioksidianturi. Helsingin kaupungin uusimmassa mit-taroinnin suunnitteluohjeessa on luokkien hiilidioksidipitoisuusmittaus määritetty pakolliseksi [6, s. 19]. Koska luokat varustetaan hiilidioksidipitoisuuden mittauksella riippumatta ilmanvaihdon säädön toteutuksesta, ei antureiden kustannuksia oteta huomioon tarpeenmukaisen ilmanvaihdon investointikustannuksissa.

Investointikustannukset laskettiin siten, että IMS-peltejä ei ohjattaisi huonesäätimillä, vaan lähimmän valvonta-alakeskuksen kautta. Yhden IMS-parin liitännäishinnaksi arvoitiin 150 €.

Ilmanvaihdon eri säätötapojen hankintakustannuksissa ei huomioitu mahdollisesti tarvittavien äänenvaimentimien kustannuksia. Ilmavirtasäätimien ja luokan väliin asennetaan yleensä äänenvaimennin. Mikäli käytössä on vakioilmavirtainen ilmanvaihtojärjestelmä, varustetaan luokat mahdollisesti myös äänenvaimentimilla. Koska äänenvaimentimien käyttö vaihtelee tapauskohtaisesti, ei laskelmissa otettu huomioon mahdollisten äänenvaimentimien aiheuttamia hankintakustannuksia.

Eri ilmanvaihdon säätötapojen hankintakustannuksissa oletettiin, että luokahuoneissa olisi ilmanvaihdon päätelaitteet, jotka on varustettu mittaus- ja säätöominaisuudella. Näillä luokkien väliset kanavistojen paine-erot saadaan tasapainotettua. Kaikkiin ilmanvaihtotapoihin tulee vastaavanlaiset ilmanvaihdon päätelaitteet, ja ne tulee säätää. Koska kustannukset ovat kaikissa ilmanvaihdon säätötavoissa, ei ilmanvaihdon päätelaitteita tai niiden säätöjen kustannuksia otettu huomioon laskelmissa.

Huoltokustannuksien osalta kaikkien ilmanvaihdon säätötapojen osalta pitää kanavistot puhdistaa noin viiden vuoden välein. Elinkaarilaskelmissa ei otettu huomioon kanavien ja kanavaosien puhdistuksesta aiheutuvia kustannuksia, koska ne pitää tehdä kaikkien säätötapojen kanavaosille.

Huoltokustannuksien osalta oletettiin, että kaikkien laitteiden pitoaika on 20 vuotta. Huoltokustannuksissa ei huomioitu eri komponenttien mahdollisia rikkoutumisia.

Taulukoissa 22–24 on esitetty investointikustannukset, mikäli kuuden luokkahuoneen ilmanvaihto varustetaan tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla. Komponenttien ja niiden asennusten hinnat käytiin läpi laitevalmistajan edustajan kanssa.

Taulukko 22. Investointikustannukset, kun kuusi luokkaa varustetaan huonekoh-
taisella tarpeenmukaisella ilmavirransäädöllä.

Komponentti	Tuotekoodi	€/kpl	kpl	Yhteensä [€]
IMS-160	ULSA-5-160-1	420	12	5040
Muuntaja	STRX-23-1	90	6	540
VAK liitännät + ohjelmointi		150	6	900
Yhteensä [€]				6480

Taulukko 23. Investointikustannukset kun kuusi luokkaa varustetaan tarpeen-
mukaisella ilmavirransäädöllä, joita ohjataan kahden IMS-parin avulla.

Komponentti	Tuotekoodi	€/kpl	kpl	Yhteensä [€]
IMS-315	ULSA-5-315-1	460	4	1840
Muuntaja	STRX-23-1	90	2	180
VAK liitännät + ohjelmointi		150	4	900
Yhteensä [€]				2320

Taulukko 24. Investointikustannukset, kun kuusi luokkaa varustetaan tarpeenmukaisella ilmvirransäädöllä, jota ohjataan yhden IMS-parin avulla.

Komponentti	Tuotekoodi	€/kpl	kpl	Yhteensä [€]
IMS-400	ULSA-5-400-1	550	2	1100
Muuntaja	STRX-23-1	90	1	90
VAK liitännät + ohjelmointi		150	1	150
Yhteensä [€]				1340

4.2 Nykyarvolaskelmat ilmanvaihdon säätötavoille

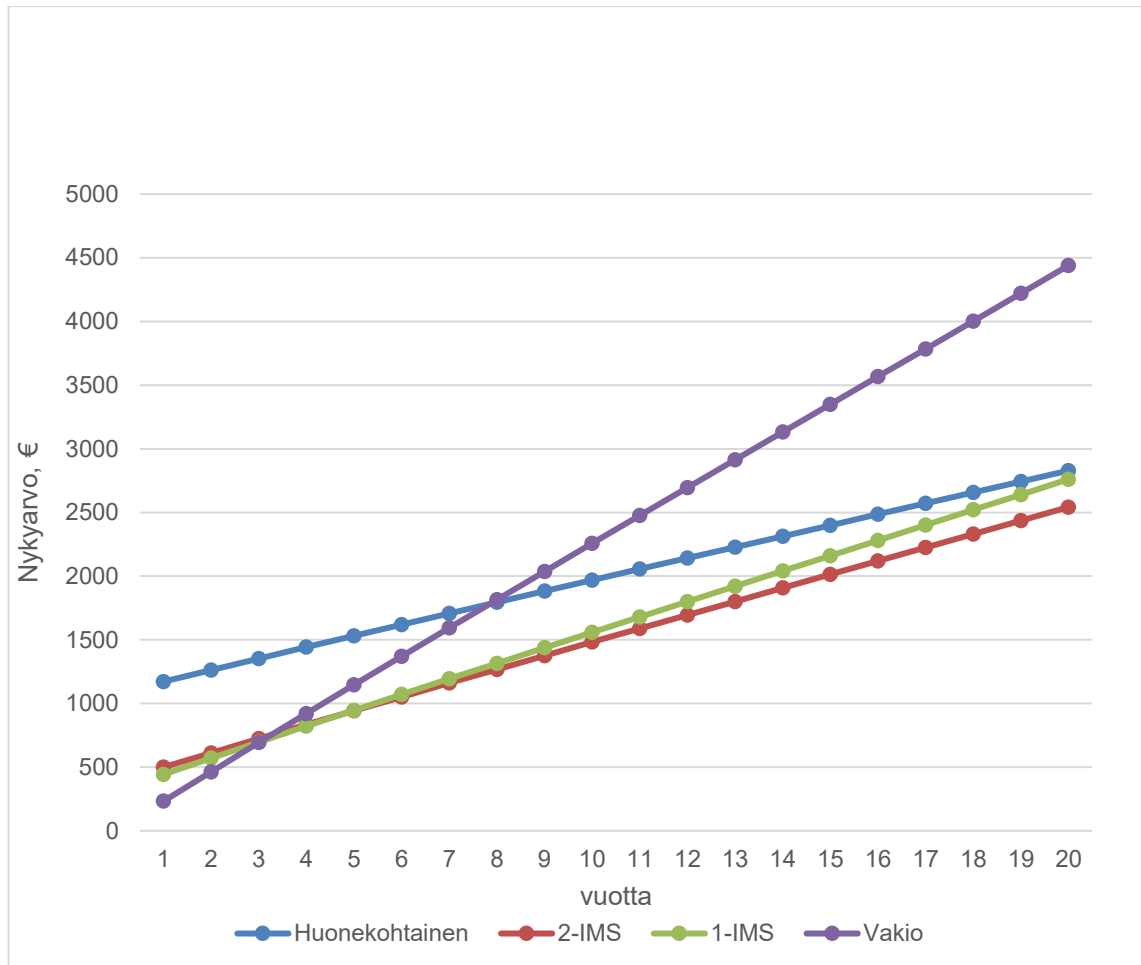
Nykyarvolaskelmissa otettiin huomioon eri ilmanvaihdon säätötapojen käyttämä lämmitysenergian kulutus ja ilmanvaihdon puhaltimien sähköenergian kulutus. Ilmanvaihdon eri säätötavoille laskettiin investointikustannukset, jotka otettiin huomioon nykyarvolaskelmissa. Tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa käytettävien komponenttien elinkaareksi arvioitiin 20 vuotta. Vaikka aikaisemmin energia ja investointilaskelmat ovat tehty kuudelle luokkahuoneelle, nykyarvolaskelmat tehtiin yhdelle luokkahuoneelle. Lähtöarvot elinkaarikustannusten nykyarvolaskelmiin on esitetty taulukossa 25. Nykyarvolaskelmien lopputulokset on esitetty kuvassa 9.

Taulukko 25. Lähtöarvot ilmanvaihdon energiakustannukset nykyarvolaskelmiin.

	Huone- kohtainen	2-IMS	1-IMS	Vakio
Tarkastelujakso [vuotta]	20	20	20	20
Reaalinen laskentakorko [%]	5	5	5	5
Sähkön hinta [€/MWh]	70	70	70	70
Kaukolämmön hinta [€/MWh]	65	65	65	65
Kaukolämmön reaalihinnan nousu [%]	2	2	2	2
Sähköenergian reaalihinnan nousu [%]	2	2	2	2
Lämmitysenergia R2–R7 [MWh] ¹⁾	7,572	8,752	9,526	16,459
Lämmitysenergia 1-luokka [MWh] ²⁾	1,262	1,459	1,588	2,743
Sähköenergia R2–R7 [MWh] ¹⁾	1,064	1,851	2,476	5,266
Sähköenergia 1-luokka [MWh] ²⁾	0,177	0,309	0,413	0,878
Investointikustannukset R2–R7 [€] ¹⁾	6480	2320	1340	0
Investointikustannukset 1-luokka [€] ²⁾	1080	387	223	0
Huoltokustannukset [€]	0	0	0	0

1) Arvo kaikille kuudelle luokille

2) Arvo yhdelle luokalle, jonka mukaan nykyarvolaskelma tehtiin



Kuva 9. Ilmanvaihdon elinkaarikustannukset yhdelle luokahuoneelle.

4.2.1 Yhteenveto elinkaarilaskelmista

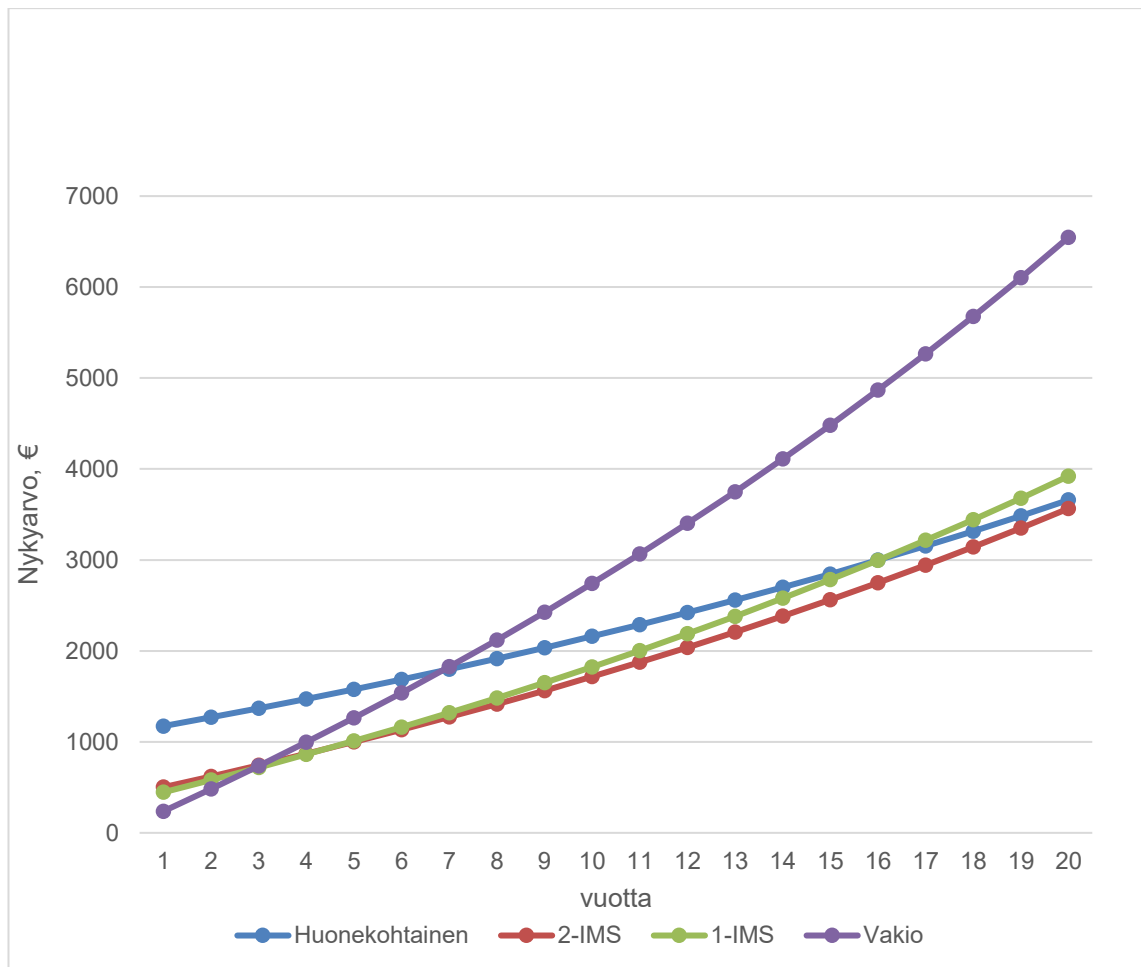
Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon säätötapojen elinkaarikustannuksista ei muodostu kuvan 9 mukaisesti kovinkaan suuria eroja. Kuvasta 9 voidaan nähdä, että nykyarvolaskelmien mukaan vakioilmavirtaisen ilmanvaihdon elinkaarikustannukset ovat 4 400 € ja tarpeenmukaisen ilmanvaihdon keskimääräiset kustannukset 2 700 €. Jos luokkien ilmanvaihto varustetaan tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla, säästetään laskelmien mukaan yhden luokan osalta elinkaarikustannuksissa noin 1 700 €. Tämä tarkoittaa noin 40 %:n säästöä yhden luokan ilmanvaihdon elinkaarikustannuksissa.

Vaikka energiankulutuslaskelmissa todettiin, että huonekohtaisella ilmavirran-säätimellä varustetut järjestelmät kuluttavat vähiten energiaa, ovat kuutta tai kolmea luokkaa säättävät IMS-parit kuitenkin nykyarvolaskelmien mukaan hyvin lähellä toisiaan. Vaikka huonekohtainen IMS-säätö kuluttaa vähintään energiaa, on sillä myös suurimmat investointikustannukset. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon elinkaarikustannukset ovat investointikustannusten takia hyvin lähellä toisi-aan huonekohtaisella yhdellä ja kahdella IMS-säädinparilla.

Mikäli luokissa olisi enemmän loma-, ilta- ja viikonloppukäyttöä ja tilojen olisi käyttö vaihtelevampaa, poikkeaisivat ilmanvaihdon säätötapojen elinkaarikus-tannukset enemmän toisistaan.

4.2.2 Herkkyysanalyysi, energiahinnan nousu

Ilmanvaihdon säätötavoille tehdyistä elinkaarikustannusten nykyarvolaskelmista tutkittiin herkkyysanalyysin avulla, miten laskelmat muuttuvat, mikäli energian-hinta nousee enemmän kuin laskelmissa käytetty 2 %:n vuosittainen reaalihin-nankorko. Herkkyysanalyysissä lämmitys- ja sähköenergian reaalihinnankorko laskettiin 4 %:n mukaisesti ja lopputulokset on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Ilmanvaihdon elinkaarikustannukset yhdelle luokkahuoneelle, kun energian reaalihinnan nousu on 4 %.

Mikäli energian reaalihinnan nousu lasketaan kasvavan 4 % vuodessa, tasoittuu ero tarpeenmukaisen ilmanvaihdon eri säätötapojen elinkaarikustannuksissa. Kuvasta 10 voidaan nähdä, että nykyarvolaskelmien mukaan vakioilmavirtaisen ilmanvaihdon elinkaarikustannukset ovat 6 500 € ja tarpeenmukaisen ilmanvaihdon keskimääräiset kustannukset 3 700 €. Mikäli ilmanvaihto varustetaan tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla, säästetään elinkaarikustannuksissa 2 800 € eli noin 40 % yhden luokan ilmanvaihdon elinkaarikustannuksissa. Energiakustannusten noususta tehdyn herkkyysoanalyysin perusteella voidaan todeta, että mikäli energian reaalihintaa nousee, kasvavat myös tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla saavutettavat säästöt.

5 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää Etelä-Suomessa sijaitsevan koulun tarpeenmukaisen ilmanvaihdon toimintaa ja energiatehokkuutta sekä tarkastella tarpeenmukaisen ilmanvaihdon vaihtoehtoisia toteutustapoja ja elinkaarikustannuksia.

Kuudelle luokalle tehtyjen hiilidioksidipitoisuus- ja lämpötilamittauksien perusteella saatiin selvitettyä, että luokkien sisäilmaolosuhteet pysyivät kolmen viikon mittausjakson aikana sisäilmastoluokan S2 tavoitearvoissa. Tämän perusteella voidaan todeta, että luokkien huonekohtaiset ilmapirtasäätimet ovat toimineet mittausjakson aikana suunnitelman mukaisesti.

Elinkaarilaskentatulosten mukaan tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla säästetään 45–69 % ilmanvaihdon energiakustannuksissa verrattuna vakioilmavirtaiseen vaihtoon nähden, riippuen tarpeenmukaisen ilmanvaihdon säätötavasta. Laskentatulokset on tehty talvella mitatuista lämmitysenergiankulutuksista, jolloin ilmanvaihdon lämmityksen energiakustannukset ovat suurimmillaan.

Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon eri säätötapojen elinkaarikustannukset ovat hyvin lähellä toisiaan. Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla säästetään 20 vuoden elinkaaren aikana yhden luokan elinkaarikustannuksissa noin 1 700 €. Tämä tarkoittaa noin 40 % säästöä verrattuna vakioilmavirtaiseen ilmanvaihtoon nähden yhden luokan ilmanvaihdon elinkaarikustannuksissa. Laskennassa oletettiin, että tarpeenmukaisen ilmanvaihdon huolto- ja ylläpitokustannukset ovat samat kuin vakioilmavirtaisessa järjestelmässä. Saavutettava säästö on pieni, jos huolto- ja ylläpitokustannukset ovat tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa oletettua suuremmat.

Opinnäytetyössä tehtyjen mittausten ja laskelmien perusteella voidaan todeta, että kun luokkien ilmanvaihto varustetaan tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla, joka toteutetaan ilmapirrinsäätimillä, saadaan ilmanvaihdon energiankulutuksesta ja elinkaarikustannuksista säästöjä.

Lähteet

- 1 Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. RT 07-11299. Helsinki. Rakennustieto Oy.
- 2 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma D5, Helsinki: Ympäristöministeriö
- 3 Kulutuksen normitus. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/files/16105/Motiva_Kulutuksennormitus_laskentakaavat-ja-ohjeet_12-2016.pdf>12-2016. Luettu 26.10.2021
- 4 Lämmöntarveluku. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>> Luettu 26.10.2021
- 5 Lämmöntarvelukujen kuntakertoimet. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/files/8741/Lammitystarvelukujen_kuntakertoimet_1981-2010.csv> Luettu 26.10.2021
- 6 Mittaroinnin suunnitteluohje. 2021. Julkiset palvelurakennukset. Helsingin kaupungin ohje 07.07.2021.
- 7 Havaintojen lataus. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>> Luettu 20.5.2021
- 8 Puhallintekninen käsikirja. 2010. Turku. FläktGroup Oy
- 9 Optivent® ultra käyttöopas. Verkkoaineisto. FläktGroup Oy <<https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/a904b97b-8b3c-4a22-83de-71d63e9dd014?search=0>> Luettu 1.11.2021