

Pekka Toivanen

KOULUN ILMASTOINTIJÄRJESTELMIEN SIMULOINTI JA
PUHALLINENERGIAN LASKENTATYÖKALU

Rakennustekniikan koulutusohjelma
2012

KOULUN ILMASTOINTIJÄRJESTELMIEN SIMULOINTI JA PUHALLIN-ENERGIAN LASKENTATYÖKALU

Toivanen, Pekka
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Toukokuu 2012
Ohjaaja: Sandberg, Esa
Sivumäärä: 46
Liitteitä: 16

Asiasanat: ilmastointi, ilmanvaihto, puhaltimet, koulurakennukset, energiankulutus

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia Fläkt Woods Oy:n uuden VAV-ilmastointijärjestelmän vuosittaisia käyttökustannuksia englantilaisessa koulukohteessa ja vertailla sitä toisiin potentiaalisiin ilmastointiratkaisuihin. Uutuutena järjestelmässä on kanavapaineen jatkuva optimointi ja tuloilmapuolella päätelaitteina olevat aktiivihajottajat. Tutkimus kohdistui lämmitysenergian, jäähdytyksen sähköenergian ja LVI-laitteiden sähköenergian kulutukseen.

Lämmitystä ja jäähdytystä sekä tiettyjen LVI-laitteiden sähkönkulutusta tutkittiin IDA Indoor Climate and Energy -rakennussimulointiohjelmalla. Koulurakennus mallinnettiin saatujen pohjapiirustusten mukaisesti ohjelmalla. Sen rakenteiden ja yleisten järjestelmien mallinnuksen lähtökohtana oli, että kyseessä on olemassa oleva, peruskorjattava kohde. Mallinnettuun rakennukseen valittiin kolme erilaista käyttötapausta, joissa tilojen sisäiset kuormat eroavat toisistaan. Näihin käyttötapauksiin suunniteltiin yhteensä kuusi erilaista ilmastointivaihtoehtoa, joista kolme on toteutettu Fläkt Woodsin VAV-järjestelmällä ja kolme on vertailujärjestelmiä. Järjestelmien simulointi tapahtui vuoden mittaisena dynaamisena simulointina aidoilla säätiedoilla.

Ilmanvaihdon puhaltimien sähkönkulutusta tutkittiin Excel-mallinnuksella hyödyntäen MagiCADin ja Fläkt Woodsin Acon-valintaohjelman simulointiominaisuuksia. Tarkoitusta varten koulun ilmanvaihdosta tehtiin suunnitelmat MagiCADilla ja myös VAV-järjestelmiin kuuluvat aktiivihajottajat mallinnettiin. MagiCADin avulla simuloitiin koulun ilmanvaihtokanaviston painesuhteita erilaisissa virtaustilanteissa, jotka pohjautuivat VAV-järjestelmien IDA-mallinnuksen tuloksiin. Simulointi vastasi tilannetta, jossa kanavapainetta optimoidaan. Saatujen tulosten pohjalta määritettiin myös vertailutilanteet, joissa VAV-järjestelmän kanavapainetta ohjataan joko keskuskoneessa tai jossain kanavassa sijaitsevalla paineensäätöanturilla. Aconin avulla tutkittiin edelleen koko ilmanvaihtolaitoksen painehäviöitä ja puhaltimien kokonaisyötysuhteita eri virtaustilanteissa. Tuloksista laadittiin laitoskäyrät ja hyötysuhdekäyrät kullekin vertaillulle säätövaihtoehdolle. Nämä tulokset yhdistettiin yhdeksi puhallinenergian laskentatyökaluksi, jolla voi laskea periaatteessa minkä tahansa aktiivisin päätelaittein varustetun kohteen puhaltimien vuotuisen energiankulutuksen.

Tutkimuksen tuloksista voidaan sanoa, että VAV-ilmastointi puoltaa paikkaansa käyttökustannukiltaan parhaana ilmastointijärjestelmänä tutkitun kaltaisessa koulukohteessa. Kanavapaineen optimointi sen sijaan ei ole omimmillaan tutkitussa kohteessa, vaan sopii paremmin esimerkiksi toimistorakennukseen, jossa ilmanvaihtoon riittää suurimman osan vuotta 20-40 % järjestelmän mitoitusilmavirrasta.

SCHOOL AIR-CONDITIONING SYSTEMS SIMULATION AND FAN ENERGY CALCULATION TOOL

Toivanen, Pekka

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in construction engineering

May 2012

Supervisor: Sandberg, Esa

Number of pages: 46

Appendices: 16

Keywords: air-conditioning, ventilation, fans, school buildings, energy consumption

The purpose of this thesis was to investigate the annual operating costs of Fläkt Woods' new VAV system in an English school building and to compare it to other potential solutions for air-conditioning. The new system has continuous duct pressure optimization and active supply air diffusers. The study focused on heating energy, cooling electricity and HVAC equipment electricity.

Heating and cooling were studied with IDA Indoor Climate and Energy building simulation program. The school building was modeled with three different cases in which the internal loads of the classrooms varied. For these cases a total of six different air-conditioning options were designed, three of which used the Fläkt Woods VAV system and three other systems to compare them with.

The electricity consumption of fans was modelled with Excel using the simulation properties of MagiCAD and Fläkt Woods' Acon. For this purpose, new ventilation plans for the school building were made with MagiCAD. The active diffusers were also modelled. MagiCAD was used to simulate different flow situations in order to study the duct pressures of the VAV system. The total pressure losses and fan efficiencies with different air flows were then examined using Acon. These results were combined into a single fan energy calculation tool. With the tool it is possible to estimate the annual fan energy consumption of any normal building with Fläkt Woods' active supply air diffusers.

The results clearly show that VAV is the best modern air conditioning system in a school building such as the one studied. Duct pressure optimization on the other hand was not at its best in a building like this, but is better suited, for example, for an office building, where 20-40% of system's rated maximum air flow is sufficient for most part of the year.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Työn tausta.....	6
1.2	Työn tavoitteet	7
2	MALLINNETUT ILMASTOINTIJÄRJESTELMÄT	7
2.1	Vakioilmavirta, CAV	7
2.2	Muuttuva ilmavirta, VAV	9
2.2.1	Säätö keskuskoneessa	12
2.2.2	Säätö kanavistossa	12
2.2.3	Kanavapaineen optimointi.....	12
2.3	Puhallinkonvektori, fan coil.....	13
3	MALLINNUSPROSESSIN KULKU	15
4	KOHTEEN MALLINNUS.....	16
4.1	Rakennus.....	16
4.2	Tilojen käyttöprofiili	20
4.3	Tilojen käyttötapaukset.....	21
5	ILMASTOINTIJÄRJESTELMIEN IDA-SIMULOINTI.....	22
5.1	Simuloidut järjestelmät	22
5.2	Simulointiprosessi.....	26
5.2.1	Lämmitys, jäädytys ja LVI-laitesähkö	26
5.2.2	Ilmavirrat ja IV-koneiden käyttöprofiilit.....	28
6	PUHALLINSÄHKÖN KULUTUKSEN MALLINNUS.....	29
6.1	VAV-järjestelmän painehäviöiden ja kokonaishyötysuhteiden mallinnus	30
6.1.1	Kanaviston mallinnus MagiCADilla	30
6.1.2	Aktiivisten päätelaitteiden mallinnus Excelillä.....	30
6.1.3	Simuloidut käyttötilanteet	32
6.1.4	MagiCAD-simulointien tulokset ja vertailutilanteiden määrittäminen	33
6.1.5	Koneiden mallinnus Aconilla	34
6.2	Mallinnuksen tuloksia.....	35
6.3	CAV-järjestelmän painehäviöt ja kokonaishyötysuhteet.....	40
6.4	Puhallinenergian laskentatyökalu	41
7	YHTEENVETO SIMULOINTIEN TULOKSISTA	42
8	PUHALLINENERGIAN LASKENNAN SOVELTAMINEN TOIMISTORAKENNUKSEEN	44
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	45
	LÄHTEET	46
	LIITTEET	

ALKUSANAT

Kovan urakan jälkeen on helppo hymyillä. Kun sain aiheen opinnäytetyölleni viime joulukuussa, olin hieman sekavissa tunnelmissa. Aihe oli kyllä kiinnostava, mutta sen raamit oli määritelty todella väljästi. Kestikin useamman kuukauden, ennen kuin aloin hahmottaa, mistä työssä on oikeastaan kyse. Työn aikataulu kiristyi loppua kohden, toisaalta samalla näkemys työn tavoitteesta alkoi ratkaisevasti selkiytyä. Näin työ muuttui tehdessä oikeastaan koko ajan mielekkäämmäksi ja kiinnostavammaksi, vaikka työmäärä oli suuri ja aikaa lopulta vähän. Lopputulos on tässä.

Haluan kiittää työni ohjaajaa Esa Sandbergia monien käytännön asioiden hoitamisesta sekä huomattavasta avusta vaikeahkon aiheen hahmottamisessa. Fläkt Woodsilta haluan kiittää Timo Kaasalaista hyvistä, motivoivista keskusteluista työhöni liittyen sekä Marjo Lahtimoa, Jari Hokkasta ja Pirjo Valkosta, jotka ovat muulla tavoin edesauttaneet työni etenemistä. Andy Cardy Fläkt Woods UK:lta toimitti koulun piirustukset, kiitokset hänelle. Ystävääni Jere Urpoa haluan kiittää työssä käytetyn MaggiCAD-mallin alkuperäisen version piirtämisestä. Equa Simulation Finland Oy:ltä kiitän Mika Vuolletta IDA ICE:n määräaikaissenssin toimittamisesta sekä Jouko Niemelää, jolta sain käyttöön työssä case-tapauksena esiintyvän toimistorakennuksen IDA-mallit. Satakunnan ammattikorkeakoululta haluan kiittää Mikko Tapiolaa väsymättömästä IT-tuesta.

Porissa 30.5.2012

Pekka Toivanen

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Ilmanvaihto kuluttaa asuinrakennuksen käyttämästä energiasta noin kolmanneksen riippuen käytetystä tekniikasta ja rakennuksen muista ominaisuuksista. Muissa rakennustyypeissä ilmanvaihdon energiantarve vaihtelee. Nyrkkisääntönä voidaan sanoa, että mitä enemmän ihmisiä tietyssä tilassa mahdollisesti oleilee yhtä aikaa, sitä enemmän sen ilmanvaihto kuluttaa energiaa. Ongelmaksi tämä muodostuu erityisesti kokoontumistiloissa, joiden käyttö on epäsäännöllistä. Esimerkiksi koulun luokkatiilan ilmanvaihto on mitoitettava tilan enimmäisopiskelijamäärän mukaan, vaikka tila saattaa olla tyhjillään suuren osan käyttöajastaan.

Ongelman ratkaisuksi on kehitetty järjestelmiä, jotka havaitsevat, milloin tehostettua ilmanvaihtoa tarvitaan ja säätävät tilojen ilmavirtoja näiden havaintojen perusteella. Tekniikkaa kutsutaan tarpeenmukaiseksi ilmanvaihdoksi, kansainvälisemmin DCV (demand controlled ventilation) tai VAV (variable air volume).

Työn aihe tuli Fläkt Woods Oy:ltä, heidän tarpeestaan tutkia uudentyyppisen VAV-järjestelmänsä vaikutusta kiinteistön energiankulutukseen. Erityisesti heitä kiinnosti järjestelmän soveltaminen Englannissa sijaitsevaan koulukohteeseen. Myös yleisempi vertailu muihin olemassa oleviin VAV-tekniikoihin nähtiin tarpeelliseksi uuden järjestelmän markkinoinnin edistämiseksi.

Fläkt Woods toimitti englantilaisen koulun pohjapiirustukset ja niihin liittyvät ilmanvaihtosuunnitelmat, joiden pohjalta työtä alettiin tehdä. Koulua päädyttiin mallintamaan IDA Indoor Climate and Energy -ohjelmalla, josta saatiin käyttöön versio 4.5. Koulun ilmanvaihtokanaviston painehäviöitä päätettiin tutkia MagiCAD-mallin ja Fläkt Woodsin Acon-valintaohjelman avulla. Työn ohjaaja Esa Sandberg laati työn alkuvaiheessa Fläkt Woodsille Excel-työkalun puhaltimien energiankulutuksen laskemiseksi. Tätä työkalua käytettiin pohjana, johon päätettiin simuloimalla selvittää puhaltimien todelliset suoritusarvot eri ilmavirroilla.

1.2 Työn tavoitteet

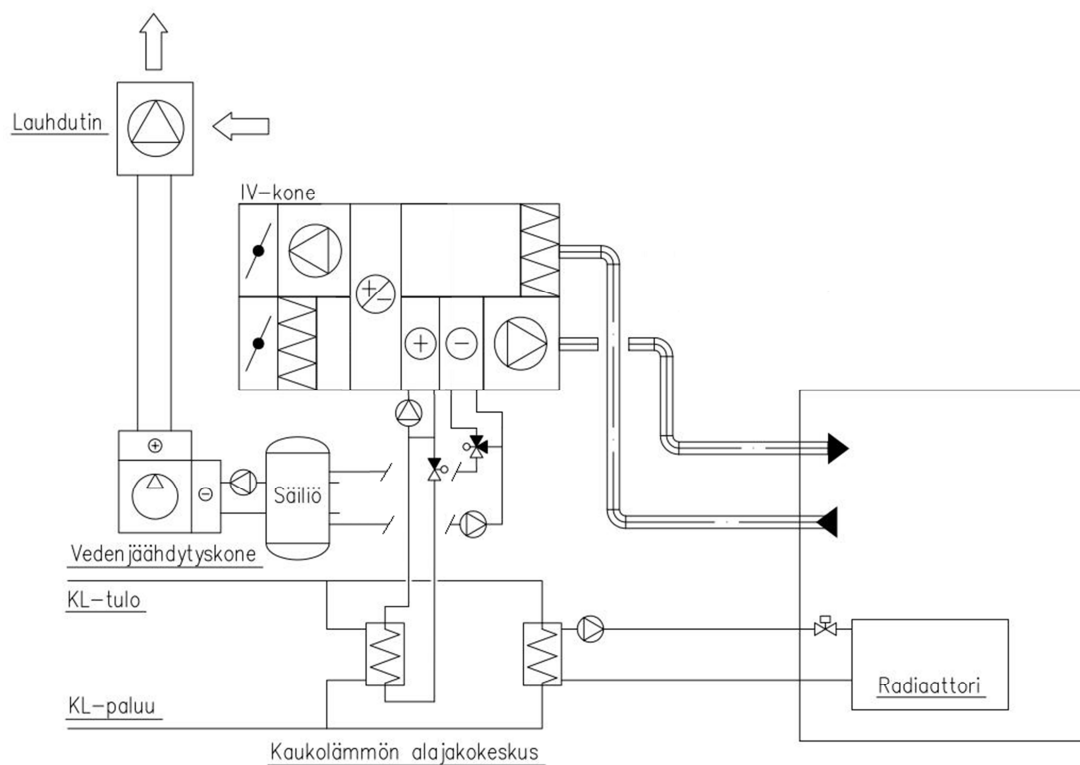
Työn tavoitteena oli mallintaa rakennussimulointiohjelman avulla erilaisia, mahdollisimman realistisia ilmastointivaihtoehtoja, joita tutkittuun koulukohteeseen voitaisiin ajatella asennettavan. Pyrkimyksenä oli selvittää ja vertailla eri vaihtoehtojen energiankulutuksia ja käyttökustannuksia, sekä niiden vaikutusta luokkatilojen sisäilmastoon. Energiankulutuksista tavoitteena oli selvittää lämmitysenergian, jäähdytyksen sähköenergian ja LVI-laitteiden, kuten pumppujen ja puhaltimien, sähköenergian vuotuiset kulutukset.

Toinen tavoite oli tutkia koulun mallinnusten avulla Fläkt Woodsin kehittämää tuloilman aktiivihajottajaa ja siihen liittyen järjestelmää, joka pyrkii optimoimaan VAV-kanaviston kanavapainetta. Tavoitteena oli laatia laskentatyökalu, jolla voisi laskea periaatteessa minkä tahansa aktiivihajottajin varustetun kohteen puhaltimien vuotuisen energiankulutuksen. Työkalulla voisi myös vertailla kanavapaineen optimoinnin tuomaa säästöä kahteen perinteiseen VAV-säätömenetelmään nähden, joissa paineanturi on keskuskoneella tai jossain kanavahaarassa.

2 MALLINNETUT ILMASTOINTIJÄRJESTELMÄT

2.1 Vakioilmavirta, CAV

Vakioilmavirta-ilmastoinnissa eli CAV:ssa (constant air volume) ilmavirta huonetilassa pysyy periaatteessa vakiona. Sitä voidaan säädellä muuttamalla keskuskoneen pyörimisnopeutta esimerkiksi kellonajan mukaan, mutta tilakohtaista ilmavirtojen säätöä ei ole. Ilmavirta mitoitetaan riittäväksi sisäilman puhtauden ja lämpöolojen kannalta, tavallisesti kesäajan jäähdytystarpeen mukaan. Ilmavirran kasvattamista rajoittaa tilakohtaisen säädön puuttuminen, jolloin tila saattaa suuria ilmavirtoja käytettäessä ajoittain jäähtyä liikaa. Tällöin tilan tuloilmakanavaan on asennettava jälkilämmityspatterit. (Ripatti 2004, 48-49) Kuvassa 1 on esitetty CAV-ilmastoinnin periaatekaavio.



Kuva 1. CAV-ilmastoinnin periaatekaavio

CAV on edullinen ilmastointijärjestelmä, joka sopii kohteisiin, joiden lämpökuormat ovat suhteellisen pieniä, eikä eri tilojen lämpökuormien välillä ole merkittäviä poikkeamia. Se on hiljainen, eikä sisällä huoneissa olevia huoltoa tarvitsevia laitteita. Kesäaikaista jäähdytystä voidaan tehostaa käyttämällä ilmanvaihtoa tarpeen mukaan myös yöaikaan. (Mäki 1996, 34-35)

Koulukohteen mallinnuksessa CAV valittiin kolmeen kuudesta ilmastointivaihtoehdosta, yhdessä tosin puhallinkonvektorien rinnalle. Kaikissa kolmessa vaihtoehdossa ilmavirrat olivat samat ja ne perustuivat Englannista saatuihin koulun ilmanvaihtosuunnitelmiin. MagiCAD-mallissa CAV-kanaviston tuloilmalaitteiksi valittiin RHKB-hajottajat ja poistoilmalaitteiksi USR-säleiköt TGE-tasauslaatikoilla. Käytetyt laitteet näkyvät kuvassa 2. Kaikissa työn mallinnuksissa on käytetty vain Fläkt Woodsin tuotteita.

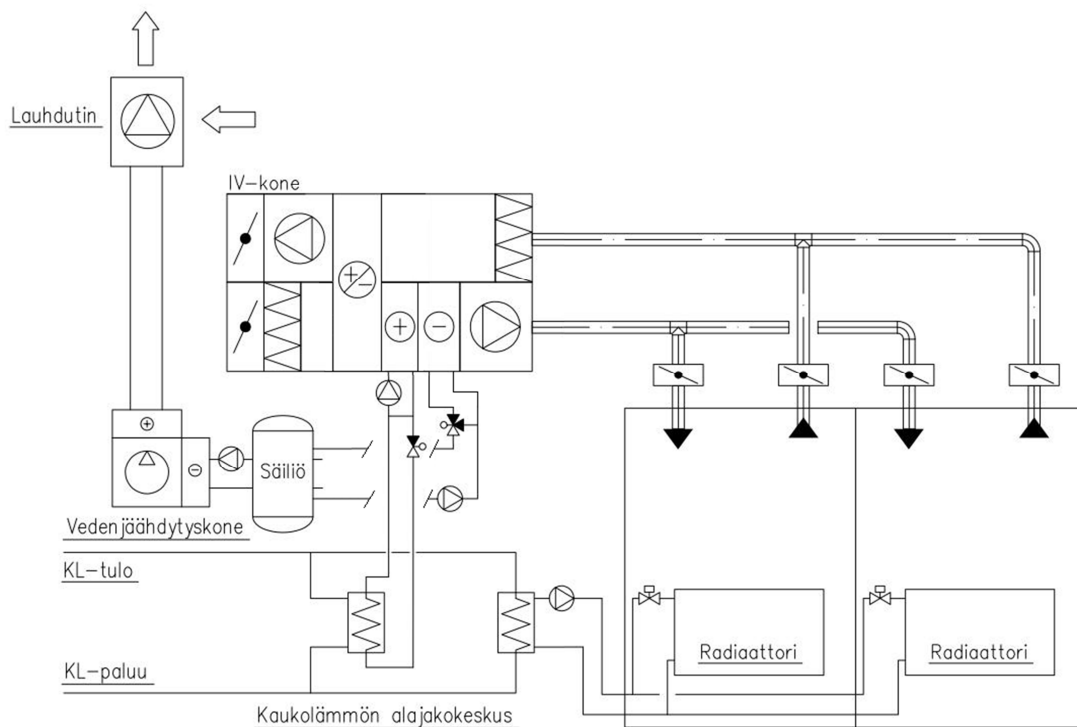


Kuva 2. Vasemmalla RHKB-tuloilmahajottaja, oikealla USR-säleikkö ja TGE-tasauslaatikko poistoilmalle (Fläkt Woods 2012, 2009, 2010)

2.2 Muuttuva ilmavirta, VAV

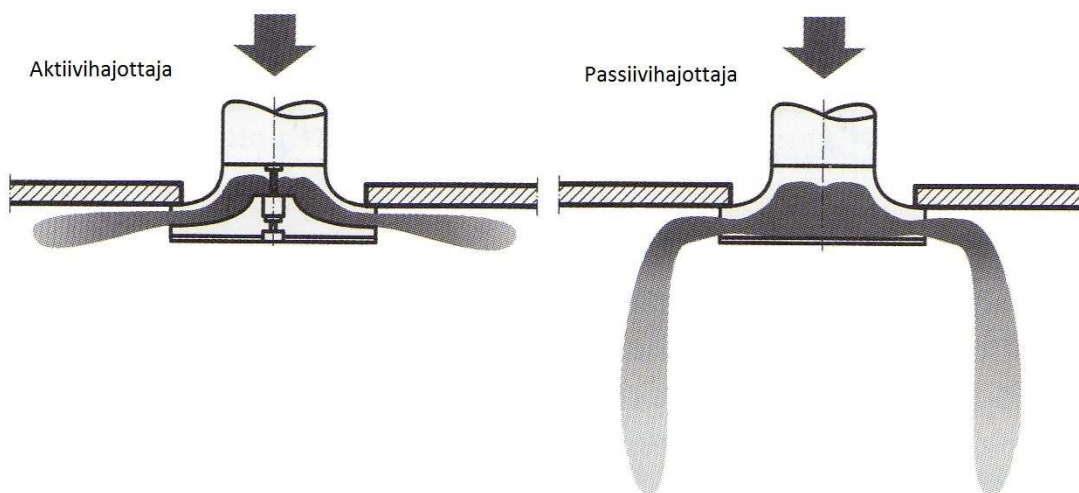
Muuttuvan ilmavirran järjestelmässä eli VAV:ssa tuloilmaa käytetään huoneilojen jäähdyttämiseen. Tuloilman lämpötila pidetään huoneilmaa kylmempänä ympäri vuoden ja jäähdytystehoa muutetaan säätämällä ilmavirtoja niin, että huonelämpötila pysyy haluttuna. Ilmavirtoja voidaan säätää myös huoneilman laadun, esimerkiksi hiilidioksidipitoisuuden mukaan. Ilmavirtojen säätö tapahtuu tila- tai vyöhykekohtaisilla, kanavistoon asennettavilla virtaussäätimillä. Kanavistossa pidetään tavallisesti yllä tiettyä painetasoa, jotta säätö toimii luotettavasti. VAV sopii parhaiten kohteisiin, joissa on suuria, vaihtelevia lämpökuormia ja tarvetta suurille ilmavirroille. Tyypillisiä kohteita ovat esimerkiksi kokous- ja opetustilat. (Vilkki 1996, 100-101)

Kuvassa 3 on esitetty VAV-ilmastoinnin periaatekaavio.



Kuva 3. VAV-ilmastoinnin periaatekaavio

Koulukohteen mallinnuksessa VAV valittiin kolmeen kuudesta ilmastointivaihtoehdosta. Tuloilmalaitteina MagiCAD-malleissa käytettiin Fläkt Woodsin uusia aktiivihajottajia. Aktiivihajottaja on erityisesti VAV-järjestelmään suunniteltu laite, joka pyrkii pitämään tuloilman ilmasuihkun pituuden vakiona ilmavirrasta riippumatta. Sääto tapahtuu muuttamalla rakoa, jonka läpi ilma puhalletaan. Tarkoituksena on välttää vetoa oleskeluvyöhykkeellä. Tavallisilla, passiivisilla päätelaitteilla ilmasuihku kääntyy alas ilmavirtojen ollessa pieniä, jolloin vedon vaara kasvaa (Ripatti 2004, 64). Kuva 4 havainnollistaa molempia tilanteita.



Kuva 4. Aktiivihajottajassa puhallusaukko pienenee ilmavirran vähentyessä, passiivihajottajalla se pysyy vakiona. Periaatekuva. (Ripatti 2004, 64)

Poistoilmalaitteina käytettiin samoja USB-säleikköjä ja TGE-tasauslaatikkoja kuin CAV-mallissa. Virtaussäätiminä sekä poisto- että tulokanavissa käytettiin EMS-virtaussäätimiä, kuva 5. EMS on kanavapaineesta riippumaton virtaussäädin, joka mittaa jatkuvasti lävitseen kulkevaa ilmavirtaa ja pyrkii säätämään sen halutun suuruiseksi esimerkiksi huoneanturilta tulevan signaalin perusteella (Fläkt Woods 2011).



Kuva 5. EMS-virtaussäätimet, eristetty EMSD ja eristämätön EMSS. Alemman säätimen sisäpuolella näkyy mittalaippa, jonka avulla säädin mittaa lävitseen kulkevaa ilmavirtaa. (Fläkt Woods 2011)

2.2.1 Sääto keskuskoneessa

Yksinkertaisin tapa säätää VAV-järjestelmän painetasoja on paineensäätöanturien sijoittaminen keskusilmanvaihtokoneen yhteyteen. Tällöin staattinen paine koneelta lähtevien tulo- ja poistokanavien alussa pidetään jatkuvasti vakiona säätämällä puhalltimien pyörimisnopeuksia taajuusmuuttajalla. (Vilkki 1996, 103)

Säätötavan ongelmana on, että keskuskoneessa ylläpidettävät staattisen paineen tasot on valittava niin, että paine riittää täydellä ilmapirralla, jolloin kanaviston kitka- ja kertavastukset ovat merkittäviä. Osailmapirralla kanaviston häviöt pienenevät ja yhä suurempi osuus painehäviöstä joudutaan kuristamaan virtaussäätimillä. Tämä aiheuttaa tarpeetonta puhallinsähkön kulutusta.

2.2.2 Sääto kanavistossa

Edellistä parempi tapa VAV-järjestelmän painetasojen hallitsemiseksi on paineensäätöanturin sijoittaminen kanaviston osaan, jossa staattinen paine on alhaisin verrattuna paineeseen puhaltimen jälkeen. Tyypillinen sijoituspaikka on kauimmainen haarakanava ennen virtaussäädintä, ei kuitenkaan vyöhykepelin takana. Jos pienin staattinen paine esiintyy useammassa pääkanavassa eri käyttötilanteissa, on kaikkiin kriittisiin kanaviin sijoitettava anturi. Nyrkkisääntönä on kuitenkin, että sääto tulee aina suorittaa mahdollisimman yksinkertaisesti.

Kanavistossa tapahtuvan säädön ongelmana on paineensäätöanturin paikan valitseminen. Jos painehäviöitä ei analysoida erilaisissa käyttötilanteissa, voi olla vaikeaa päätellä, mihin osaan kanavistoa paineanturi tulisi sijoittaa. Yleisin syy VAV-järjestelmien toimimattomuuteen onkin väärin sijoitettu paineensäätöanturi. (Vilkki 1996, 103-104)

2.2.3 Kanavapaineen optimointi

Kanavapaineen optimointi on VAV-järjestelmän säätötapa, jossa haluttuja ilmapirtoja pyritään pitämään yllä mahdollisimman pienillä puhalltimien pyörimisnopeuksilla.

Virtausreittiä, jonka painehäviöt keskuskoneelta päätelaitteelle ovat kussakin käyttötilanteessa suurimmat, kutsutaan kriittiseksi reitiksi. Kanavapaineen optimoinnilla pyritään siihen, että kriittisen reitin virtaussäädin on aina maksimiasennossa. Näin koko kanaviston yli- tai alipaine asettuu mahdollisimman alhaiseksi ja siten myös puhaltimen kierrosnopeus. Virtaussäätimet eivät yleensä ole täysin auki, vaan niille on määritelty tietty minimipainehäviö, jotta vältetään säätimen moottoria kuormittavalta 'huojunnalta'. (Mysen & Schild 2011, 15-16)

Nykyaikaisessa kanavapaineen optimointijärjestelmässä ei välttämättä tarvita paineensäätöantureita, vaan virtaussäätimet kommunikoivat suoraan säätöyksikölle (Mysen & Schild 2011, 16). Säätöyksikön tehtävänä on toisaalta huolehtia, että kanavistossa on riittävästi painetta ilmavirtojen aikaansaamiseksi ja toisaalta, että jokin virtaussäätimistä on maksimiasennossaan. Jos se havaitsee, että mikään virtaussäätimistä ei ole maksimiasennossaan, se alkaa alentaa puhaltimen kierroksia ja siten kanaviston painetta. Tällöin virtaussäätimet, jotka itsenäisesti pyrkivät pitämään lävitseen virtaavan ilmavirran haluttuna, alkavat avautua. Säätöyksikkö laskee kanaviston painetta, kunnes joltain virtaussäätimeltä tulee tieto, että se on saavuttanut maksimiasentonsa. Vastaavasti jos jokin virtaussäädin havaitsee, ettei se saavuta haluttua ilmavirtaa maksimiasennossaan, se antaa tästä tiedon säätöyksikölle. Yksikkö alkaa nostaa puhaltimen kierroksia ja siten kanaviston painetta, kunnes haluttu ilmavirta saavutetaan.

Kanavapaineen optimointi vaatii monimutkaisempaa tekniikkaa kuin kaksi aiempaa säätötapaa. Niinpä se on mahdollisesti myös herkempi erilaisille häiriöille. Monimutkaisempi tekniikka nostanee myös investointikustannuksia. (Mysen & Schild 2011, 16)

2.3 Puhallinkonvektori, fan coil

Puhallinkonvektori eli fan coil on ilmastointilaitte, joka huolehtii huonetilan jäähdytyksestä ja mahdollisesti myös lämmityksestä. Se sisältää lamellipatterin, jonka läpi laitteessa oleva puhallin kierrättää huoneilmaa. Patterissa kiertää jäähdytystapauksessa kylmä vesi, jota jäähdytetään keskitetysti kylmävesiasemassa. Tehonsäätö tapah-

tuu automaattisesti vesivirtaa tai puhaltimen nopeutta säätämällä. Tilan ilmanvaihto on joko erillinen tai tuloilma voidaan puhaltaa puhallinkonvektorin läpi. Kesällä ilmanvaihdon tuloilmaa yleensä kuivataan keskusilmanvaihtokoneella. Tällä ehkäistään ilmankosteuden kondensoitumista puhallinkonvektorin sisällä. Toinen vaihtoehto on varustaa laite kondenssiveden viemäröinnillä, mikä on epähygieenisempi vaihtoehto.

Puhallinkonvektori sopii parhaiten kohteisiin, joissa on suuria lämpökuormia, mutta joissa ei tarvita suuria ilmavirtoja. Tällaisia ovat esimerkiksi toimistot ja erilaiset tekniset tilat. Puhallinkonvektori sopii kondenssiongelman vuoksi huonosti tiloihin, joissa on suuria kosteuskuormia, kuten auditoriot. (Saaristo 1996, 128-129)

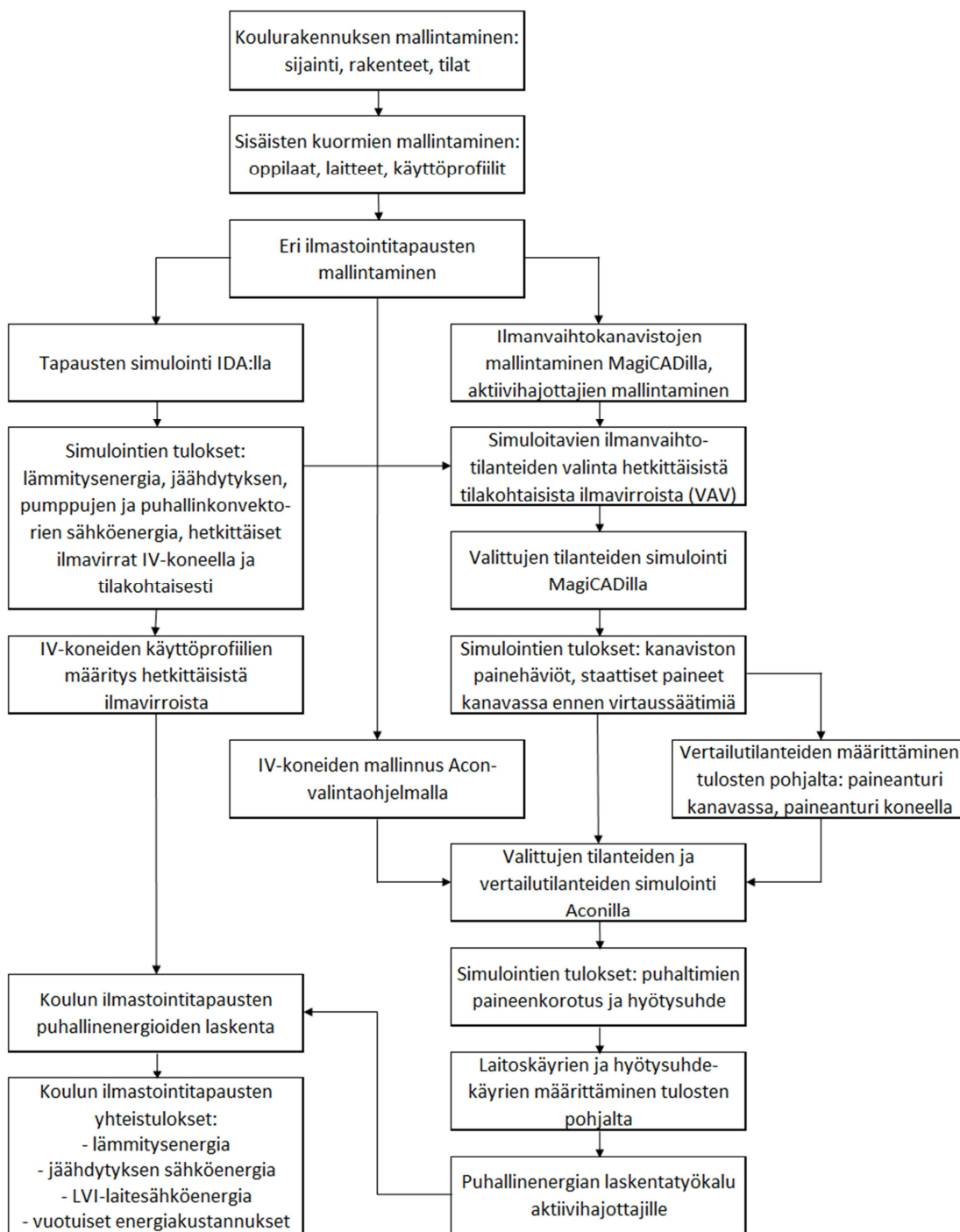
Koulukohteen mallinnuksessa fan coil -ilmastointi otettiin vertailujärjestelmäksi, jonka avulla pyrittiin selvittämään VAV-ilmastoinnin kustannushyötyjä. Järjestelmä valittiin, koska kohde sijaitsee Englannissa, jossa fan coil on paljon käytetty ilmastointimenetelmä. Laitteiksi valittiin QFDK-puhallinkonvektorit, kuva 6. Ilmanvaihto hoidetaan Fan coil -mallissa CAV-järjestelmällä.



Kuva 6. QFDK-puhallinkonvektori (Fläkt Woods 2005)

3 MALLINNUSPROSESSIN KULKU

Kaaviossa 1 on esitetty työn vaiheet ja niiden keskinäinen järjestys. Kaaviosta lienee apua raportoitujen tulosten hahmottamisessa.



Kaavio 1. Mallinnusprosessin kulku

4 KOHTEEN MALLINNUS

4.1 Rakennus

Liitteessä 1 on esitetty koulurakennuksen pohjapiirustus sellaisena, kuin se saatiin Englannista. Lähtökohtana mallinnuksessa oli, että rakennus on olemassa oleva, peruskorjattava kohde. Rakennus mallinnettiin IDA:lla seuraavin perustiedoin:

Sijainti: Lontoo, Heathrow (51,48°N, 0,45°W)

Säätiiedot: Lontoo, Gatwick (ASHRAE)

Tuuliolosuhteet: Default urban

Yleistä:

- 2-kerroksinen, mallinnetut tilat 2. kerroksessa
- Huonekorkeus 3,0 m, ikkunakorkeus 1,8 m

Rakenteet:

- Ulkoseinät: betonielementti, U-arvo 0,31 W/m²°C
 - betoni 0,15 m
 - kevyt eriste 0,1 m
 - ilmarako 0,02 m
 - betoni 0,08 m
- Väliseinät: tiili 0,14 m
- Välipohja: betonilaatta
 - lattian pinnoite 0,005 m
 - kevytbetonivalu 0,02 m
 - betoni 0,175 m
- Katto: betonilaatta, U-arvo 0,17 W/m²°C
 - kevyt eriste 0,2 m
 - betoni 0,15 m
- Alapohja: betonilattia (ei käytössä mallissa)
 - lattian pinnoite 0,005 m
 - betoni 0,25 m

- Ikkunat: 3-lasiset (4-12-4-12-4), U-arvo 1,9 W/m²°C, sälekaihtimet sisempien lasien välissä
- Ovia ei tiloihin mallinnettu

Järjestelmien hyötysuhteet:

- Lämmitys 0,9 (kaasu)
- Jäähdytys, kylmäkerroin 3 (sähkö)

Kylmäsilat: Kaaviossa 2 on esitetty mallinnuksissa käytetyt kylmäsiltojen arvot.

Thermal bridges



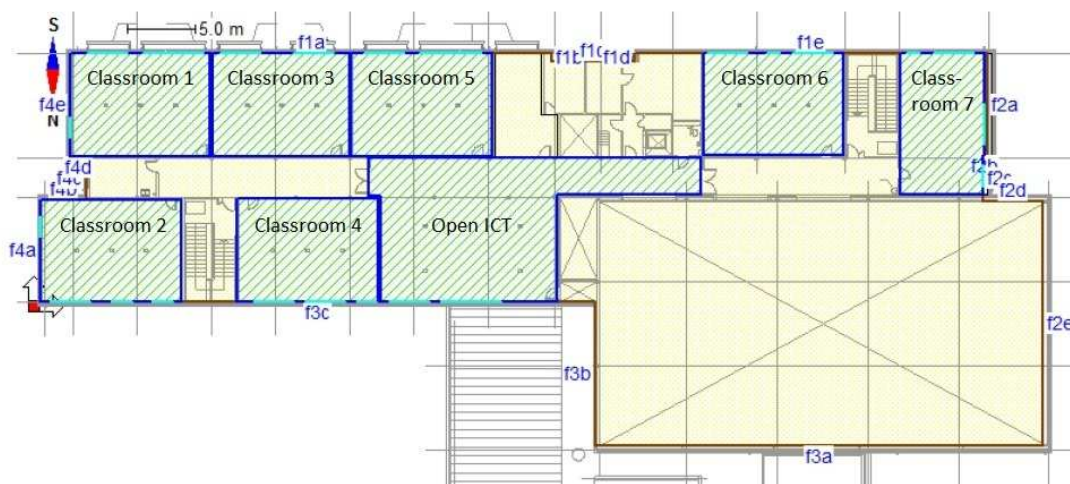
Kaavio 2. Mallinnuksissa käytetyt kylmäsiltojen arvot (IDA ICE 2012)

Vuotoilma: Ei käytössä

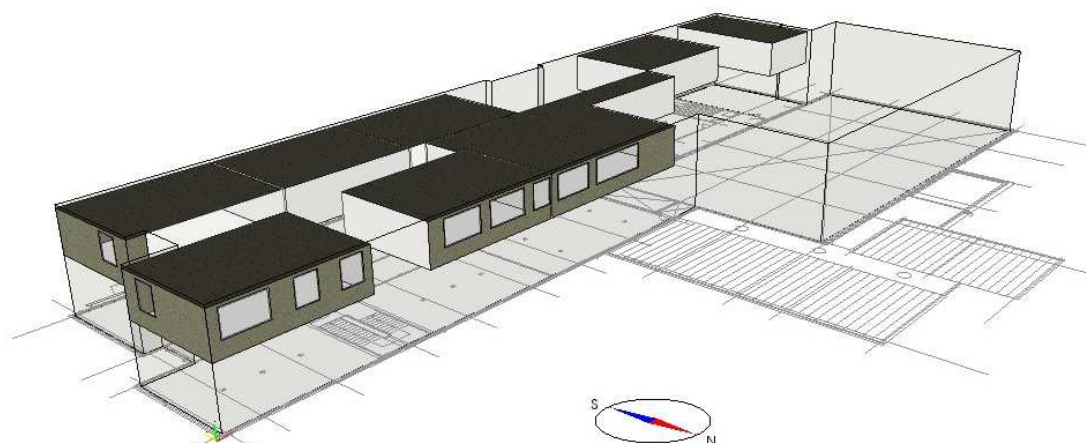
Jakeluhäviöt:

- Lämmityksen jakeluhäviöt 5,2 % kokonaislämmöntuotannosta (tasoa typical-poor), mistä 50 % saadaan mallinnettuihin tiloihin.
- Jäähdytyksen jakeluhäviöt $0 \text{ W/m}^2_{\text{lattia}}$ (vedenjäähdytin IV-koneen yhteydessä), paitsi Fan coil -järjestelmässä $0,21 \text{ W/m}^2_{\text{lattia}}$ (tasoa good), mistä 50 % saadaan mallinnettuihin tiloihin.
- Ilmanvaihdon vuotohäviöt $0,26 \text{ W/m}^2_{\text{lattia}}$ (tasoa good) tuloilman ja huoneilman lämpötilaeron ollessa $7 \text{ }^\circ\text{C}$, paitsi alkuperäistä ilmanvaihtoa mallintavassa CAV0-järjestelmässä $2,6 \text{ W/m}^2_{\text{lattia}}$ (tasoa typical-poor). Kummassakin tapauksessa 50 % häviöistä saadaan mallinnettuihin tiloihin.

Mallinnetut tilat: Koulurakennuksesta mallinnettiin yhteensä 8 toisen kerroksen tilaa, joista 7 oli luokkatiloja ja yksi ICT-aulatila. Mallinnetut tilat näkyvät kuvassa 7. Kukin tila mallinnettiin IDA:ssa omana vyöhykkeenään. Kuvassa 8 mallinnetut tilat on havainnollistettu kolmiulotteisena. Tilojen perustietoja on kerätty taulukkoon 1.



Kuva 7. Mallinnetut tilat sinertävällä pohjalla, koko rakennuksen runko kellertävällä pohjalla. Ikkunat näkyvät tummansinisissä seinissä vaaleammalla sinisellä. Kuvassa myös rakennuksen oletettu suuntaus. (IDA ICE 2012)



Kuva 8. Koulun malli kolmiulotteisena (IDA ICE 2012)

Taulukko 1. Mallinnettujen tilojen perustietoja (IDA ICE 2012)

Nimi	Lattian korkeus [m]	Huonekorkeus [m]	Pinta-ala [m ²]	Tilavuus [m ³]	Ulko-seinien pinta-ala [m ²]	Ikkunoiden pinta-ala [m ²]	Ulko-vaipan lämpöhäviöt [W/°C]	Lämpöhäviöt kylmä-silloista [W/°C]	Valot [W]
Classroom 1	4.0	3.0	78.4	235.3	41.1	16.3	64.9	7.6	800
Classroom 2	4.0	3.0	76.8	230.5	49.6	13.7	63.1	8.6	800
Classroom 3	4.0	3.0	76.3	228.9	19.4	10.8	44.0	4.3	800
Classroom 4	4.0	3.0	78.7	236.2	17.6	13.6	49.5	4.6	800
Classroom 5	4.0	3.0	78.3	234.8	17.5	13.5	49.2	4.5	800
Classroom 6	4.0	3.0	77.8	233.4	18.3	12.6	47.6	4.6	800
Open ICT	4.0	3.0	169.2	507.5	25.6	13.5	67.9	5.2	1700
Classroom 7	4.0	3.0	64.7	194.1	35.0	15.4	58.7	7.4	700
Yhteensä			700.3	2100.7	224.1	109.4	444.9	46.8	7200

- Kaikissa mallinnetuissa tiloissa on tulo-poistoilmanvaihto. Tulo- ja poistoilmavirratt ovat yhtä suuret, eikä siirtoilmavirtoja ole tilojen välillä.
- Kaikissa tiloissa on lämmityslaite. Tilakohtaiset jäähdytyslaitteet on vain Fan coil -järjestelmässä.
- Valot ovat kaikissa tiloissa päällä arkisin 8-17.
- Kaikki tiloissa käytetyt laitteet ovat tietokoneita, joiden normiteho on 125 W. Niiden määrä vaihtelee luokittain riippuen tilojen käyttötapauksesta. Poikkeuksena Open ICT -aulatila, jossa on 30 tietokonetta kaikissa tapauksissa.

4.2 Tilojen käyttöprofiili

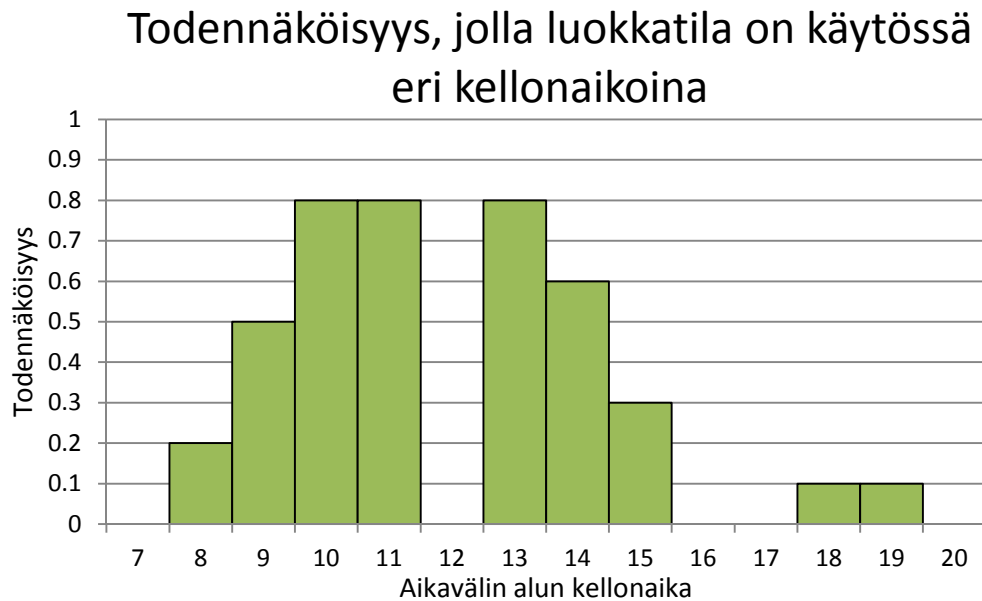
Simulointitulosten luotettavuuden kannalta oleellisena asiana pidettiin luokkatilojen käyttöprofiilin määrittämistä. Luokkatilat ja Open ICT -aulatila on alkuperäisissä suunnitelmissa mitoitettu 32 ihmiselle, mutta tätä määrää ei haluttu suoraan käyttää, koska se käytännössä harvoin toteutuu.

Norjassa on luokkahuoneiden käyttöasteeseen liittyen tehty tutkimus, jossa keväällä 2002 tutkittiin 157 neljäsluokkalaisten käyttämää luokkahuonetta 81 koulussa Oslon ympäristössä. Tutkimuksen mukaan oppilaat viettävät luokassa keskimäärin 4,0 tuntia päivässä ja keskimääräisenä koulupäivänä luokassa on 23,6 ihmistä opettajat mukaan lukien. (Mysen, Berntsen, Nafstad & Schild 2005, 1237)

Mallinnuksen lähtöarvona päätettiin käyttää 4,2 tuntia päivässä, joka sisältää 0,2 tunnin iltakäyttöosuuden. Luokkatilassa on 24 ihmistä, kun se on käytössä päiväsaikaan ja 12 ihmistä sen ollessa käytössä illalla. Vastaavasti luokkatilan tietokoneista on käytössä 75 %, kun se on käytössä päivällä ja 37,5 % iltakäytön aikana. Muulloin tietokoneet ovat sammutettuina.

Mallinnusta varten laadittiin todennäköisyysjakauma sille, että jokin luokka on käytössä tiettyinä kellonaikana. Jakauman odotusarvo on 4,2 tuntia päivässä ja se on esitetty kaaviossa 3. Englantilaiskouluissa on tunnin mittainen lounastauko, tällöin kaikkien luokkien oletettiin olevan tyhjillään. Todennäköisyysjakauman pohjalta jokaiselle luokkatilalle arvottiin käyttöaikataulu tunneittain käyttäen Excelin satunnaislukutoimintoa. Aikataulut arvottiin maanantaista perjantaihin; viikonloppuisin koulun oletettiin olevan pääsääntöisesti tyhjillään. Tiloissa käytetyt aikataulut on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 2.

Open ICT -aulatilan käyttöaikataulu valittiin niin, että siellä on arkisin klo 8-12 ja 13-16 jatkuvasti 16 ihmistä ja 50 % tietokoneista käytössä. Lounastauon aikaan klo 12-13 tilassa on 32 ihmistä ja 100 % tietokoneista käytössä.



Kaavio 3. Todennäköisyysjakauma sille, että satunnaisessa luokassa on oppilaita tietyn oppitunnin aikaan. Esim. klo 10-11 satunnaisessa luokassa on 80 % todennäköisyydellä oppitunti.

4.3 Tilojen käyttötapaukset

Erilaisten ilmastointivaihtoehtojen tutkimiseksi laadittiin kolme erilaista tapausta, joissa luokkien käyttötarkoitukset ja siten lämpökuormat poikkesivat toisistaan.

Tapauksessa 1 kaikki luokat ovat tavallisia opetustiloja, joissa on lisäksi viisi tietokonetta. Lämpökuormia syntyy lähinnä oppilaista ja auringon säteilystä. Tapauksesta laadittiin kolme erilaista ilmastointivaihtoehtoa, joita tutkittiin:

- CAV0 mallintaa kohteen alkuperäistä, vakioilmavirtaista ilmanvaihtoa, jossa on vain tuloilman lämmitys.
- CAV82 mallintaa uudistettua, vakioilmavirralla toimivaa ilmanvaihtoa, johon sisältyy myös tuloilman jäähdytys ja lämmön talteenotto.
- VAV2 mallintaa muuttuvaimavirtaista ilmanvaihtoa, jossa jokaisessa tilassa on kaksi aktiivihajottajaa.

Tapauksessa 2 luokat 1-6 ovat ICT-luokkia, joissa on 25 tietokonetta kussakin. Luokka 7 on tavallinen opetustila, jossa on 5 tietokonetta. Lämpökuormia syntyy op-

pilaista, tietokoneista ja auringon säteilystä. Tapauksesta laadittiin kaksi eri ilmastointivaihtoehtoa:

- VAV1 mallintaa muuttuvailmavirtaista järjestelmää, jossa jokaisessa tilassa on neljä aktiivihajottajaa.
- Fan coil mallintaa järjestelmää, jossa tilojen ilmanvaihto hoidetaan vakioilmavirralla ja lisjäähdytystä saadaan puhallinkonvektoreista, joita on yksi per tila.

Tapaus 3 laadittiin VAV-järjestelmän lisätarkastelua varten, eikä siitä laadittu muita ilmastointivaihtoehtoja. Tapauksessa luokat 2,4 ja 7 ovat ICT luokkia, joissa on 25 tietokonetta. Luokat 1,3,5 ja 6 ovat tavallisia opetustiloja, joissa on 5 tietokonetta. Tapaus kuvaa tilannetta, jossa suurin osa tietokoneluokista on sijoitettu rakennuksen pohjoisseinustalle, millä on pyritty tasoittamaan tilojen välisiä lämpökuormia.

- VAV3-järjestelmässä ICT-luokissa ja -aulassa on neljä aktiivihajottajaa ja tavallisissa opetustiloissa kaksi aktiivihajottajaa.

5 ILMASTOINTIJÄRJESTELMIEN IDA-SIMULOINTI

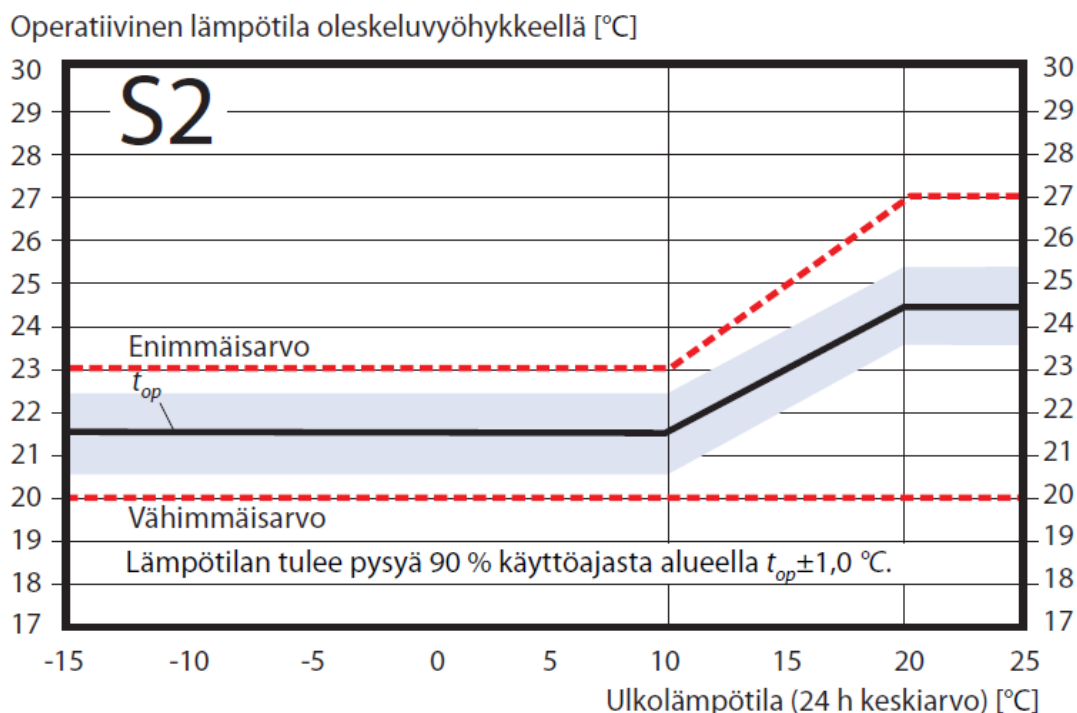
5.1 Simuloidut järjestelmät

Koulukohteen erilaisten ilmastointijärjestelmien energiankulutusten vertailemiseksi laadittiin kuusi eri IDA-mallia, jotka eroavat ilmastointiratkaisujensa ja sisäisten kuormiensa osalta toisistaan. Taulukossa 2 on eritelty mallien erot IDA:ssa.

Taulukko 2. Simuloitujen ilmastointijärjestelmien IDA-malleissa toisistaan poikenevat asetusravot. Samaa käyttötapausta mallintavat järjestelmät samalla värillä.

Tutkitut tapaukset	CAV0	CAV82	VAV1	VAV2	VAV3	Fan coil
Ilmanvaihtojärjestelmän tyyppi	CAV	CAV	VAV, temp + CO2 control	VAV, temp + CO2 control	VAV, temp + CO2 control	CAV
Asetuslämpötilat lämmitys - jäähdytys [°C]	21 - (25)	21 - (25)	20,5 - 21,5/23	20,5 - 21,5/23	20,5 - 21,5/23	20,5 - 21,5/23
Tilakohtainen ilmavirta CAV [l/s]	256	256				256
Maksimi-ilmavirta VAV [l/s,m2]			6,44 Open ICT 2,96	3,86 Open ICT 1,78	3,86 - 6,44 Open ICT 2,96	
Minimi-ilmavirta VAV [l/s,m2]			1,25 Open ICT 0,53	1,25 Open ICT 0,53	1,25 Open ICT 0,53	
Maksimi CO2-pitoisuus VAV [ppm]			1000	1000	1000	
Minimi CO2-pitoisuus VAV [ppm]			380	380	380	
Tuloilman lämpötila [°C]	≥ 16	18	18	18	18	18
LTO [%]	0	82	82	82	82	82
Ilmanvaihdon käyntiajat	arkisin klo 8-16 100 %, klo 7-8, 16-21 50 %	arkisin klo 8-16 100 %, klo 7-8, 16-21 50 %	päivittäin klo 7-21	päivittäin klo 7-21	päivittäin klo 7-21	arkisin klo 8-16 100 %, klo 7-8, 16-21 50 %
Sisäiset kuormat luokahuoneissa	luokat 1-7: oppilaat + 5 tietokonetta	luokat 1-7: oppilaat + 5 tietokonetta	luokat 1-6: oppilaat + 25 tietokonetta, luokka 7: oppilaat + 5 tietokonetta	luokat 1-7: oppilaat + 5 tietokonetta	luokat 2,4,7: oppilaat + 25 tietokonetta, luokat 1,3,5,6: oppilaat + 5 tietokonetta	luokat 1-6: oppilaat + 25 tietokonetta, luokka 7: oppilaat + 5 tietokonetta
Huoneyksiköt tiloissa	Ideal heater	Ideal heater	Ideal heater	Ideal heater	Ideal heater	Ideal heater, VAV cooling fan coil

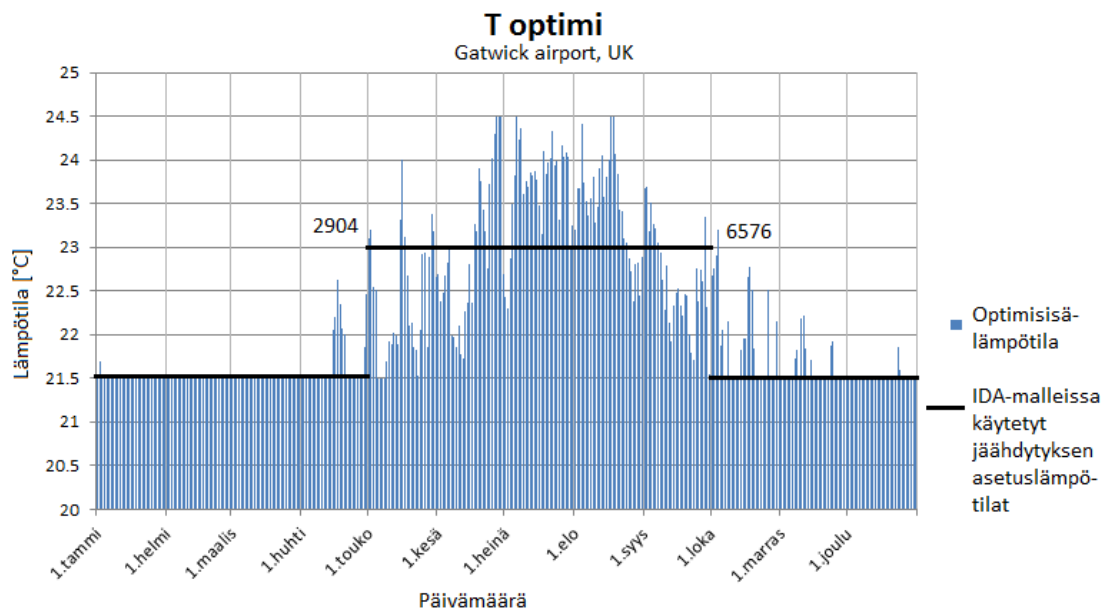
Niissä ilmastointivaihtoehdoissa, joissa jäähdytystehoa voitiin säätää, asetettiin tavoitteeksi Sisäilmastoluokituksen 2008 mukaisen sisäilmastoluokan S2 sisälämpötilat. S2:n optimaalinen sisälämpötila vaihtelee keskimääräisen ulkolämpötilan mukaan kaavion 4 osoittamalla tavalla.



Kaavio 4. Sisäilmastoluokan S2 tavoitelämpötilat (LVI 05-10440 2009, 6)

Ongelmaksi muodostui, ettei IDA:an saanut ohjelmoitua esitetyn kaltaista, liukuvaa tavoitelämpötilaa. Jäähdytyksen asetustemperatura määräsi pitkälti, mihin sisälämpötilat asettuivat, mutta asetustemperatura, joka olisi toiminut ympäri vuoden, ei tahtonut löytyä. Jos sen asetteli kesäaikaan sopivaksi, luokkien lämpötilat nousivat talvella liikaa. Jos jäähdytyksen taas säätö talvitilanteen mukaan, se piti kesällä luokkia tarpeettoman viileinä tuhlaten energiaa. Kumpikin vaihtoehto vääristi tuloksia mielestäni liikaa.

Virhettä pyrittiin vähentämään simuloimalla järjestelmät, joissa jäähdytystehoa voitiin säätää, kahdella eri jäähdytyksen asetustemperatuurilla ja yhdistämällä simulointien tulokset. Sopivat asetustemperatuurit haettiin kokeilemalla. Kaikille järjestelmille pyrittiin löytämään yhteiset kesä- ja talviasetukset. Kaavio 5 havainnollistaa tilannetta.



Kaavio 5. Optimaalinen sisälämpötila Lontoossa päivittäin, laskettuna mallinnuksessa käytetyistä säätiedoista sisäilmastoluokan S2 mukaan. Järjestelmien VAV1-3 ja Fan coil IDA-simuloinneissa käytettiin jäähdytyksen asetustemperatuurina loka-huhtikuussa 21,5 °C:tta ja touko-syyskuussa 23,0 °C:tta. Lukemat kuvaajassa ovat raja-kohtien tuntimääriä vuoden alusta laskien.

VAV-järjestelmissä ilmavirtoja säädellään tilakohtaisilla lämpötila- ja hiilidioksidiantureilla. Maksimi- ja minimi-ilmavirrat valittiin huomioiden aktiivihajottajien toiminta siten, ettei maksimitilanteessa synny vetoa oleskeluvyöhykkeelle, eikä minimitalanteessa aktiivihajottajan painehäviö ole yli 50 Pa. Aktiivihajottajan painehäviö kasvaa ilmavirran pienentyessä, koska hajottajan puhallusrako pienenee suhteessa nopeammin kuin ilmavirta.

Lämmön talteenoton hyötysuhde perustuu e³CO-Crown -ilmanvaihtokoneen LTO:n hyötysuhteisiin. Konetyyppiä oli käytetty esimerkkilaskelmissa, joita Fläkt Woods UK oli tehnyt kohteesta. Mallinnettuihin VAV-järjestelmiin kyseinen kone on liian pieni. Hyötysuhdetta ei katsottu kuitenkaan tarpeelliseksi muuttaa, koska se ei olisi tuonut vertailuun merkittävää lisäarvoa ja lisäksi suurempien koneiden pyöri- villä lämmönsiirtimillä päästään hyötysuhteissa sangen lähelle.

Ilmanvaihdon käyntiajat pyrittiin valitsemaan sellaisiksi, kuin ne todennäköisesti aseteltaisiin käytännön kohteessa. Optimitalanteessa rakennuksessa on jatkuvasti päällä minimi-ilmanvaihto, jotta sen rakenteet pysyvät kunnossa. Käytännössä ilmanvaihto usein sammutetaan öisin ja viikonloppuisin. VAV-järjestelmissä on haluttu huomioi-

da myös mahdollinen viikonloppukäyttö. CAV-järjestelmissä sitä ei vastaavasti ole ohjelmoitu aikatauluun, koska niissä ilmanvaihtoa viikonloppuisin ohjattaneen lisäaikakytkimellä.

Fan coil -järjestelmän tilakohtaisten puhallinkonvektorien asetusarvot perustuvat QFDK-20 (luokat 1-6, Open ICT) ja QFDK-10 (luokka 7) -malleihin jäähdytysveden lämpötiloilla 7/12 °C (Fläkt Woods 2005).

5.2 Simulointiprosessi

Ilmastointivaihtoehtojen simulointiin käytettiin IDA:n Energy-simulointitoimintoa, joka laskee vuosittaista energiankulutusta. Asetusarvoiksi sisäisten kuormien vaikutukselle valittiin laitteille 60 %, ihmisille 100 % ja valoille 75 %. Laitteiden sisäisten lämpökuormien vaikutus valittiin normiarvoaan pienemmäksi, koska kaikki mallien laitteet ovat tietokoneita, jotka eivät yleensä toimi koko aikaa normitehollaan. Valojen lämpökuormissa on huomioitu kesäaika, jolloin valoja ei aina käytetä.

Energy-simulointitoiminnoissa IDA laskee mallin tehot, lämpötilat, ilmavirrat ym. dynaamisesti vuoden ajalta. Dynaamisuus tarkoittaa, ettei laskennalle aseteta kiinteää aikaväliä, vaan ohjelma laskee automaattisesti kussakin tilanteessa sopivan tarkasteluvälin pituuden.

5.2.1 Lämmitys, jäähdytys ja LVI-laitesähkö

Energiasimulointien tuloksina saatiin kuukausittaiset lämpö- ja sähköenergian kulutukset, joissa oli otettu huomioon järjestelmien hyötysuhteet. Toisin sanoen kyseessä olivat rakennuksen kuukausittaisen ostoenergian määrät. Esimerkkinä näistä tuloksista on taulukko 3. Ostoenergian kulutuksista lopullisiin tuloksiin otettiin suoraan lämmitysenergia ja jäähdytyksen sähköenergia, sekä Fan coil -järjestelmässä puhallinkonvektorien sähköenergia.

Simulointien tuloksina saatiin myös mallien sisältämien LVI-järjestelmien todelliset energiankulutukset, joissa hyötysuhteita ei ole huomioitu. Esimerkkinä näistä tulok-

sista on taulukko 4. Lopullisiin tuloksiin otettiin pumppujen sähköenergian kulutus. Puhaltimien sähköenergian kulutusta ei näistä tuloksista voitu käyttää, koska IDA ei huomioi ilmanvaihtolaitoksen painehäviön muuttumista ilmavirran mukaan, vaan puhaltimien energiankulutus on laskettu vakiopainehäviöllä. Simulointien lopputuloksissa käytetyt tulokset kuukausittain ovat liitteessä 3.

Taulukko 3. Kuukausittaiset ostoenergian kulutukset CAV0-järjestelmässä. Näistä huomioitiin lopullisissa tuloksissa Cooling ja Heating. (IDA ICE 2012)

Monthly Delivered Energy

Month	Facility electric				Facility fuel (heating value)	
	Lighting, facility	Equipment, facility	Cooling	HVAC aux	Heating	Domestic hot water
	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)
1	1069.0	416.5	0.0	658.1	11221.0	405.2
2	1021.0	397.1	0.0	628.5	10748.0	379.1
3	1069.0	414.8	0.0	656.7	7048.0	405.2
4	1021.0	397.1	0.0	626.3	4318.0	392.2
5	1118.0	435.3	0.0	684.9	1461.0	405.2
6	1021.0	395.9	0.0	625.2	798.7	392.2
7	1069.0	416.5	0.0	654.2	195.3	405.2
8	1118.0	433.9	0.0	684.2	339.1	405.2
9	972.1	378.0	0.0	595.3	997.5	392.2
10	1118.0	435.6	0.0	685.4	3828.0	405.2
11	1069.0	414.8	0.0	656.6	7277.0	392.2
12	1021.0	397.1	0.0	628.0	10363.0	405.2
Total	12686.1	4932.6	0.0	7783.4	58594.6	4784.3

Taulukko 4. Eri LVI-järjestelmien kuukausittaiset energiankulutukset CAV0-järjestelmässä. Lopullisissa tuloksissa huomioitiin Pumps (IDA ICE 2012)

Systems Energy

kWh (sensible and latent)

Month	Zone heating	Zone cooling	AHU heating	AHU cooling	AHU heat recovery	AHU cold recovery	Humidification	Fans	Pumps	Dom. hot water
1	3542.0	0.0	6557.0	0.0	0.0	0.0	0.0	653.4	4.7	364.7
2	3060.0	0.0	6613.0	0.0	0.0	0.0	0.0	623.8	4.7	341.2
3	1728.0	0.0	4615.0	0.0	0.0	0.0	0.0	653.3	3.3	364.7
4	680.1	0.0	3206.0	0.0	0.0	0.0	0.0	623.8	2.4	352.9
5	13.2	0.0	1302.0	0.0	0.0	0.0	0.0	683.8	1.1	364.7
6	8.3	0.0	710.5	0.0	0.0	0.0	0.0	624.5	0.7	352.9
7	0.0	0.0	175.8	0.0	0.0	0.0	0.0	654.0	0.2	364.7
8	0.0	0.0	305.2	0.0	0.0	0.0	0.0	683.9	0.3	364.7
9	91.5	0.0	806.3	0.0	0.0	0.0	0.0	594.5	0.8	352.9
10	908.0	0.0	2537.0	0.0	0.0	0.0	0.0	683.4	2.1	364.7
11	2177.0	0.0	4372.0	0.0	0.0	0.0	0.0	653.4	3.2	352.9
12	3642.0	0.0	5685.0	0.0	0.0	0.0	0.0	623.9	4.1	364.7
Total	15850.1	0.0	36884.8	0.0	0.0	0.0	0.0	7755.7	27.7	4305.7

Työkalulla laskettiin kuuden ilmastointivaihtoehdon keskuskoneiden käyttöprofiilit koko vuoden toteutuneista ilmavirroista. VAV- ja Fan coil -järjestelmissä kokonaisilmavirtataulukot yhdistettiin ensin kahdesta simuloinnista katkaisemalla taulukot rajakohdiksi määritetyistä ajanhetkistä, jotka ilmenevät kaaviosta 5. Eri ilmastointivaihtoehtojen käyttöprofiilit on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Keskuskoneiden käyttöprofiilit eri ilmastointijärjestelmissä vuoden tarkastelujaksolla. Vasemmassa sarakkeessa osailmavirran osuus laitoksen mitoitusilmavirrasta ja oikeassa sarakkeessa sen käyttöajan osuus koko vuoden tunneista.

Käyttöprofiili CAV		Käyttöprofiili VAV1		Käyttöprofiili VAV2		Käyttöprofiili VAV3	
0.2	0.000	0.2	0.237	0.2	0.001	0.2	0.185
0.3	0.000	0.3	0.056	0.3	0.175	0.3	0.069
0.4	0.000	0.4	0.042	0.4	0.075	0.4	0.043
0.5	0.179	0.5	0.039	0.5	0.047	0.5	0.042
0.6	0.000	0.6	0.041	0.6	0.047	0.6	0.040
0.7	0.000	0.7	0.043	0.7	0.047	0.7	0.043
0.8	0.000	0.8	0.044	0.8	0.046	0.8	0.045
0.9	0.000	0.9	0.047	0.9	0.061	0.9	0.060
1	0.238	1	0.033	1	0.086	1	0.056

6 PUHALLINSÄHKÖN KULUTUKSEN MALLINNUS

Puhallinsähkön kulutuksen mallinnusta lähestyttiin hieman eri lähtökohdasta kuin muiden energiankulutusten mallinnusta. Erilaisten ilmastointijärjestelmien sijaan mallinnuksen pääpaino oli eri VAV-säätötapojen vertailussa käytettäessä Fläkt Woodsin uusia aktiivihajottajia. Tärkeimpänä pyrkimyksenä oli selvittää, paljonko kanavapaineen optimointi säästää puhaltimen sähkönkulutuksessa perinteisiin säätötapoihin nähden. Perinteisillä säätötavoilla tarkoitetaan kanaviston paineensäätöä joko keskuskoneella tai jossain kanaviston haarassa olevalla paineanturilla.

Mallinnus tehtiin laskennallisesti Excelillä hyödyntäen MagiCADin ja Fläkt Woodsin Acon-mitoitusohjelman simulointiominaisuuksia.

6.1 VAV-järjestelmän painehäviöiden ja kokonaishyötysuhteiden mallinnus

6.1.1 Kanaviston mallinnus MagiCADilla

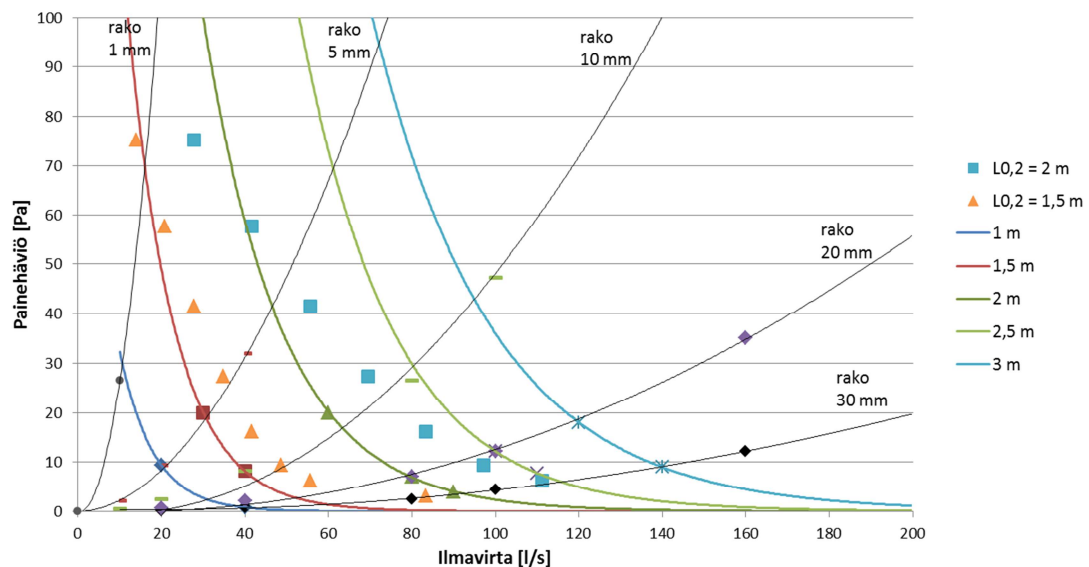
Kanaviston painehäviöiden tutkimiseksi tehtiin MagiCADilla koulun ilmanvaihdesta uudet suunnitelmat, joissa oli huomioitu VAV-järjestelmien suuremmat ilmavirrat ja kanavakoot. Jotta tehtävä vertailu olisi yleispätevämpi, päätettiin mallintaa kahden kerroksen kanavisto, jota palvelee yksi konehuoneeseen katolle sijoitettu keskusko-
ne. Koulun ensimmäinen kerros oletettiin ilmanvaihtoa suunniteltaessa pohjaratkai-
sultaan samanlaiseksi kuin toinen kerros.

Suunnitelmat tehtiin sekä kahdelle että neljälle aktiivihajottajalle tilaa kohden ja ne on esitetty liitteissä 4 ja 5. Kaksi hajottajaa tilaa kohden vastaa VAV2-järjestelmää ja siinä tilakohtaiset mitoitusilmavirrat ovat 300 l/s. Neljä hajottajaa tilaa kohden vastaa VAV1-järjestelmää ja sen mitoitusilmavirrat ovat 500 l/s kaikissa tiloissa paitsi molempien kerrosten luokissa 7, joissa ne ovat 400 l/s. Mitoitusilmavirtoja käytettiin valittaessa kanavakokoja.

6.1.2 Aktiivisten päätelaitteiden mallinnus Excelillä

Aktiivihajottaja on uusi tuote, eikä sen toiminnasta ollut työtä tehtäessä vielä saatavilla paljoakaan mittaustietoja. Fläkt Woods toimitti joitain tuloksia tekemistään mit-
tauksista ja näiden tulosten pohjalta laadittiin yksinkertainen Excel-malli aktiiviha-
jottajan painehäviöistä eri ilmavirroilla ja heittopituuksilla. Kaaviossa 6 on esitetty
laadittu malli graafisesti. Fläkt Woodsin toimittamat mittaustulokset ovat liitteessä 6.

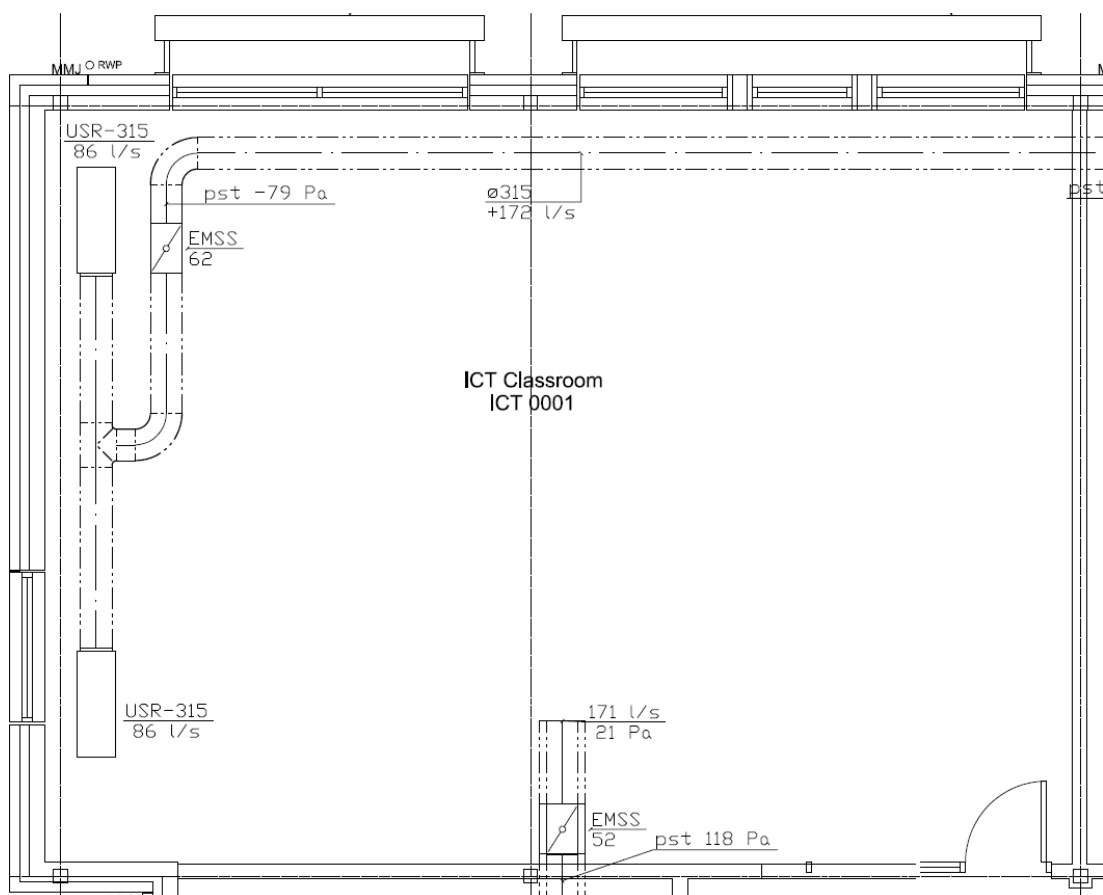
Aktiivihajottajan painehäviö ilmavirran, heittopituuden ja puhallusraon funktiona, painehäviöt eri säätöasunnoissa ilmavirran funktiona



Kaavio 6. Aktiivihajottajan mittauksista laskennallisesti määritetyt vakioheittopituudet, sen toiminta säätöasunnossa $L0,2 = 2$ m, jota käytettiin kahden hajottajan järjestelmässä, ja säätöasunnossa $L0,2 = 1,5$ m, jota käytettiin neljän hajottajan järjestelmässä. Jälkimmäinen säätöasento ei perustu suoriin mittauksiin, vaan se on arvioitu hyödyntäen laskennallisia heittopituuksia.

Ongelmaksi muodostui, ettei MagiCADiin voi ohjelmoida päätelaitetta, jonka painehäviö kasvaa ilmavirran pienentyessä, vaan ohjelman oletuksena on, että päätelaitteiden painehäviö kasvaa suhteessa ilmavirran neliöön.

Ongelma ratkaistiin korvaamalla tulokanavistossa virtaussäätimen jälkeiset osat MagiCADin toiminnolla Connection node: none, johon voidaan syöttää vapaasti halutut ilmavirrat ja painehäviöt. Kuva 9 havainnollistaa ratkaisua. Tätä ennen oli määritetty eri ilmavirroilla ja kanavistotyypeillä, mikä on pelkkien kanavien painehäviö virtaussäätimeltä hajottajalle. Kanavien painehäviöistä ja aktiivihajottajan painehäviöistä laadittiin taulukko, jonka avulla määritettiin kokonaispainehäviö virtaussäätimen jälkeen. Laadittu taulukko on liitteenä 7. Näitä ilmavirtakohtaisia kokonaispainehäviöitä käytettiin Connection nodien painehäviöinä tutkittaessa eri virtaustilanteita.



Kuva 9. Luokkahuoneen 1 MagiCAD-malli muutettuna. Tuloilmakanavisto virtaus-
säätimen jälkeen on korvattu Connection nodella tyyppiä none, johon voidaan va-
paasti asettaa virtaama ja painehäviö. Kuvassa näkyvät myös virtaussäädinten asen-
not kyseisessä virtaustilanteessa sekä staattiset paineet kanavissa ennen virtaussää-
dintä. (MagiCAD 2011)

6.1.3 Simuloidut käyttötilanteet

Järjestelmien VAV1 ja VAV2 IDA-simuloinneista saatiin tuloksena hetkelliset tila-
kohtaiset ilmavirrat koko vuoden ajalta. Tuloksista valittiin tarkasteltavaksi yksi tal-
vi- ja yksi kesäviikko. Kummaltakin viikolta valittiin erilaisia, toisistaan poikkeavia
käyttötilanteita pyrkien kattamaan kummankin VAV-järjestelmän koko toiminta-
alueen. VAV1-järjestelmästä valittiin käyttötilanteet malliin, jossa joka tilassa oli
neljä aktiivihajottajaa ja VAV2-järjestelmästä vastaavasti kahden aktiivihajottajan
malliin.

Koska IDA-mallinnus oli yksikerroksinen ja MagiCADilla mallinnettu kanavisto
kaksikerroksinen, valittiin kumpaankin kerrokseen oma käyttötilanteensa IDA:n tu-

loksista. Valinta tehtiin kuitenkin niin, että kokonaisilmavirrat kummassakin kerroksessa olivat aina keskenään samaa luokkaa. Yhteensä käyttötilanteita mallinnettiin kahden hajottajan mallissa 27 ja neljän hajottajan mallissa 14 kappaletta. Kahden hajottajan mallia haluttiin painottaa lopputuloksissa, koska siinä olevien aktiivihajottajien painehäviöt perustuvat suoriin mittauksiin, kun neljän hajottajan mallissa ne on arvioitu muista mittauksista.

6.1.4 MagiCAD-simulointien tulokset ja vertailutilanteiden määrittäminen

Kanaviston painehäviöiden simulointi tapahtui siten, että kunkin käyttötilanteen ilmavirrat ja tuloilman osalta myös painehäviöt syötettiin MagiCAD-malliin tilakohtaisesti kumpaankin kerrokseen. Tämän jälkeen järjestelmä tasapainotettiin ohjelman Flow summation and balancing -toiminnolla ja tulokset kirjattiin ylös. Tuloksista kirjattiin kokonaispaineet ja staattiset paineet kanavistojen alussa keskuskoneella, sekä tilakohtaisesti staattiset paineet tulo- ja poistokanavassa ennen virtaussäädintä. Koska MagiCAD pyrkii aina järjestelmiä tasapainottaessaan minimoimaan kanavapaineen, simulointien tulokset vastaavat toimivaa kanavapaineen optimointijärjestelmää. Tutkitut käyttötilanteet ja niiden tulokset on koottu taulukoihin, jotka ovat liitteinä 8 ja 9.

Koska tavoitteena oli vertailla eri VAV-säätötapoja, tulosten perusteella määritettiin myös tilanteet, joissa kanavapainetta säädetään keskuskoneessa tai kanavistossa olevalla staattisen paineen anturilla. Keskuskoneen paineensäätöanturin asetusarvoiksi valittiin täydellä ilmavirralla vallitsevat staattiset paineet, joihin lisättiin 5 Pa. Kokonaispainehäviöt osailmavirroilla saatiin lisäämällä valittuun paineen asetusarvoon kunkin osailmavirran dynaaminen paine keskuskoneelta lähtevässä kanavassa.

Kanavissa sijaitsevien paineensäätöanturien sijoituspaikkojen päättämiseksi määritettiin tiloittain staattisen paineen maksimiarvo tulo- ja poistokanavassa ennen virtaussäädintä. Pääteltiin, että niissä kanavissa, joissa maksimi on alhaisin, on staattinen paine eri käyttötilanteissa keskimäärin matalin. Edelleen pääteltiin, että jos näissä kanavissa pidetään jatkuvasti staattinen paine yli niiden simuloitujen maksimiarvon, riittää paine kaikissa tilanteissa myös muihin kanaviin. Paineensäätöanturien sijoit-

tuspaikoiksi valittiin siis tulo- ja poistokanavat, joiden staattisen paineen simuloitu maksimi oli matalin. Kunkin anturin asetusarvoksi valittiin sijoituskanavan staattisen paineen maksimi, johon lisättiin säätövarana 5 Pa. Kanaviston kokonaispainehäviöt eri käyttötilanteissa saatiin vähentämällä anturiin asetellusta paineesta sijoituskanavan simuloitu staattinen paine ja lisäämällä erotus kanaviston simuloituun kokonaispainehäviöön. Esimerkki valottanee laskentaa:

Tulokanaviston paineensäätöanturin sijoituspaikka Classroom 22:

- tulokanavan staattisen paineen maksimi simuloinneissa 79 Pa

- anturin asetusarvo 79 Pa + 5 Pa = 84 Pa

MagiCADilla simuloitu käyttötilanne (kanavapaineen optimointi):

- staattinen paine tulokanavassa 64 Pa

- kanaviston kokonaispainehäviö 145 Pa

Sama käyttötilanne, kun painetta ohjailaan anturilla:

- staattinen paine tulokanavassa (anturilla) 84 Pa

- kanaviston kokonaispainehäviö 145 Pa + (84 Pa – 64 Pa) = 165 Pa

6.1.5 Koneiden mallinnus Aconilla

Ilmanvaihtolaitosten kokonaispainehäviöiden ja puhaltimien kokonaishyötysuhteiden selvittämiseksi valittiin Fläkt Woodsin Acon-mitoitusohjelmalla sopivat ilmanvaihtokoneet kumpaankin tutkittuun kanavistomalliin. Koneiden tyyppi on eQ ja niissä on pyörivä lämmön talteenotto. Mallinnettujen koneiden kuvat ja perustiedot löytyvät liitteistä 10 ja 11. Koneiden valinnan lähtökohtana oli, että laitoksen sähkötehoa kuvaavan SFP-luvun tulisi olla mitoitustilanteessa alle 2,0 kW/(m³/s). Mitoituksen lähtöarvoina käytettiin tulo- ja poistokanavistossa vaativimman vertailutilanteen mukaisia painehäviöitä täydellä ilmapirralla.

Jäteilmalaitteiksi valittiin EYMA-hajottajat, joiden painehäviöksi lyhyen jäteilmakanavan kanssa määritettiin 75 Pa täydellä ilmapirralla kummassakin tutkitussa kanavistossa. Ulkoilmalaitteiksi valittiin DYMA-päätelaitteet, joiden painehäviöksi

määritettiin ulkoilmakanavan kanssa 58 Pa kummassakin kanavistossa. Jäte- ja ulkoilman painehäviöiden osailmavirroilla oletettiin muuttuvan suhteessa ilmavirran neliöön.

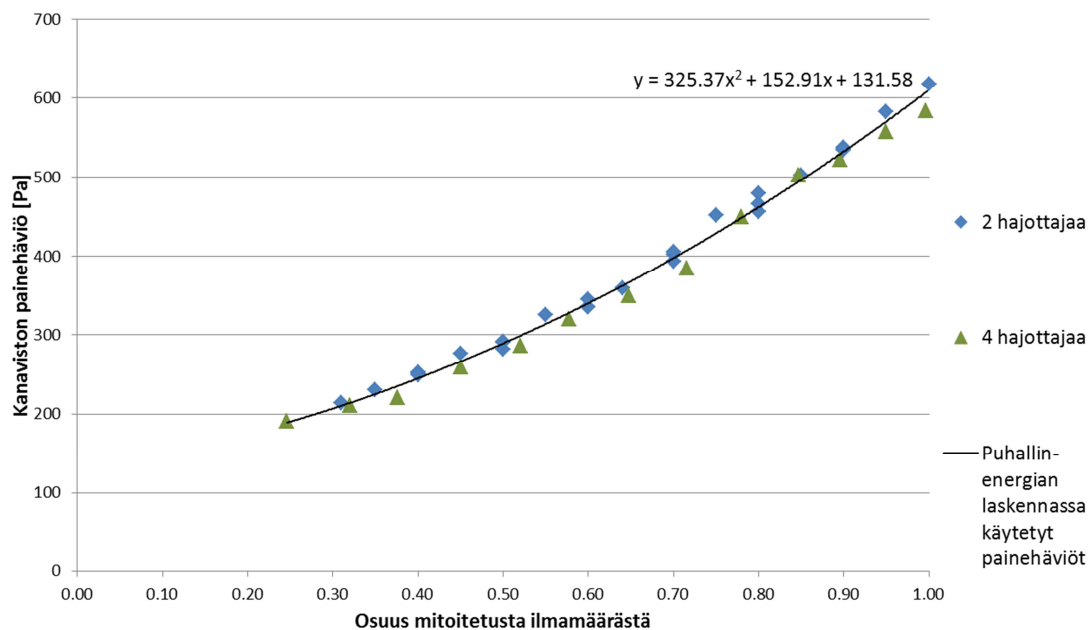
6.2 Mallinnuksen tuloksia

Simulointi Aconilla tapahtui siten, että kokonaisilmavirrat sekä tulo-, poisto-, ulko- ja jäteilman painehäviöt kussakin tutkitussa käyttötilanteessa syötettiin ohjelman Ilmavirta-tietoihin. Ohjelma laskee automaattisesti järjestelmän toimintapisteet asetelussa tilanteessa. Tuloksina kirjattiin ylös molempien puhaltimien paineenkorotus ja kokonaishyötysuhde talvioloissa. Puhaltimen paineenkorotus on yhtä suuri kuin laitoksen kokonaispainehäviö. Simulointien tulokset eri säätömenetelmillä ovat liitteissä 12-14. Tulokset on esitetty graafisesti kaavioissa 7-15.

Excelin trendiviiva-toiminnolla painehäviöistä laadittiin toisen asteen käyrät puhallinenergian laskentatyökalua varten. Käyrät perustuvat kahden ja neljän hajottajan järjestelmien yhdistettyihin simulointituloksiin. Kaikkia tuloksia päätettiin käyttää yhdessä, koska puhallinenergian laskentatyökalusta haluttiin tehdä mahdollisimman yleispätevä ja käytännön kohteissa aktiivihajottajiin säädetyt heittopituudet vaihtelevat tilan mukaan.

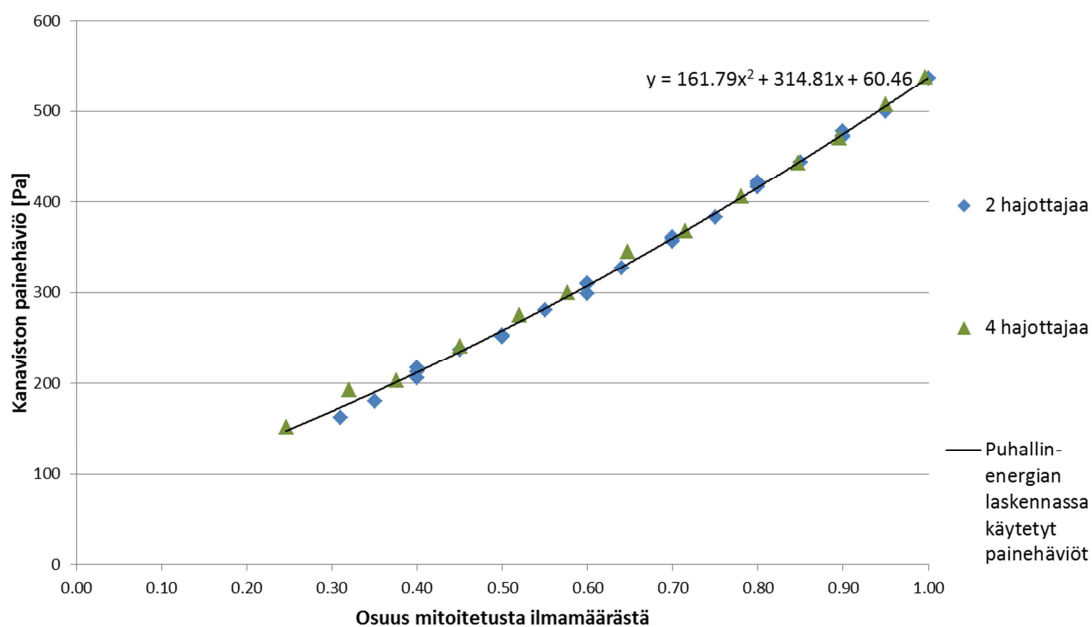
Vastaavanlaisten käyrien laatiminen puhaltimien hyötysuhteille ei onnistunut Excellissä, niinpä laskentatyökalussa käytetyt hyötysuhdekäyrät on määritetty silmämääräisellä approksimoinnilla.

Ilmastointilaitoksen tulopuolen painehäviöt simuloinneissa: aktiivihajottimet ja kanavapaineen optimointi

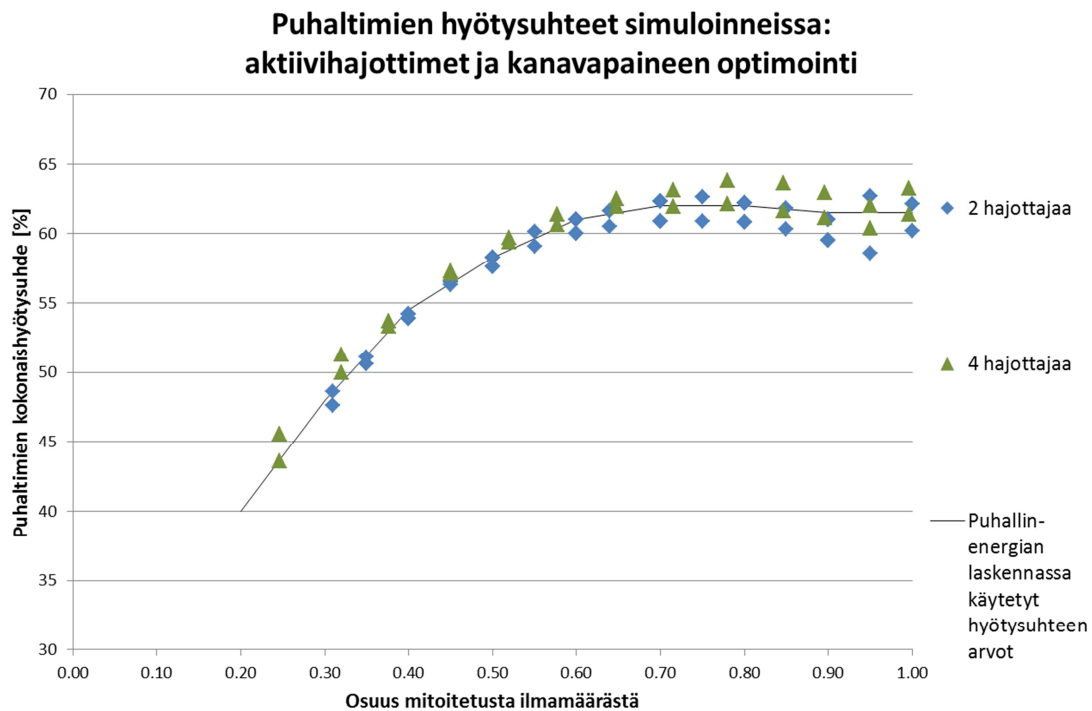


Kaavio 7. Tulokanaviston painehäviöt ilmavirran funktiona kanavapaineen optimointijärjestelmässä

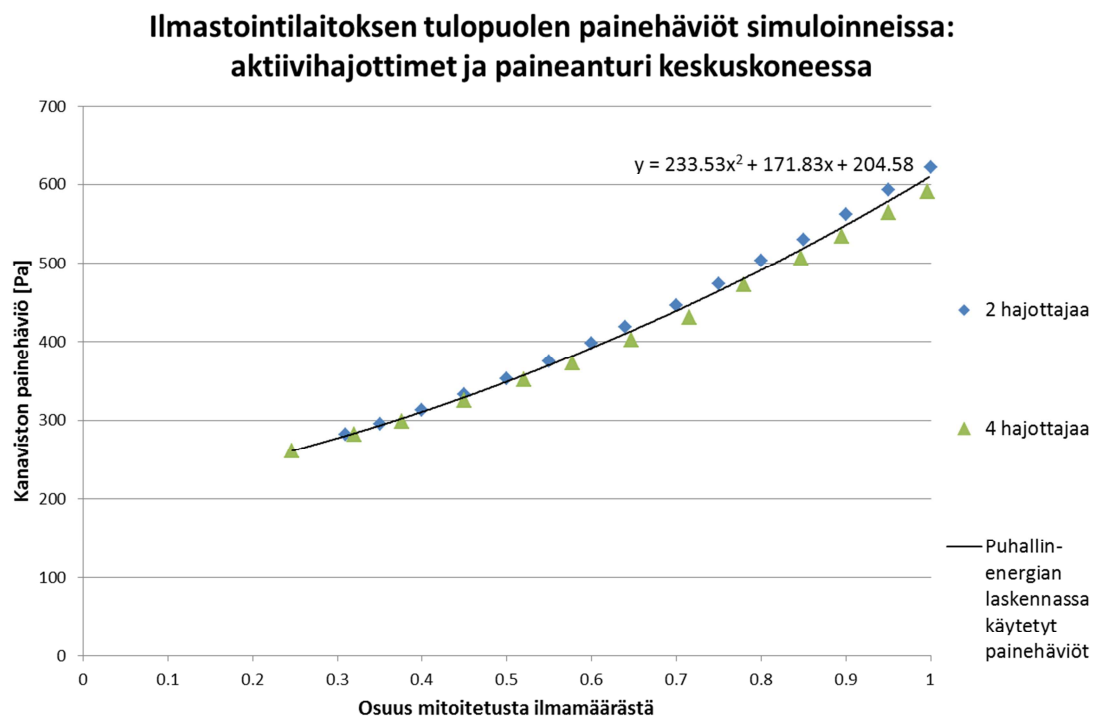
Ilmastointilaitoksen poistupuolen painehäviöt simuloinneissa: aktiivihajottimet ja kanavapaineen optimointi



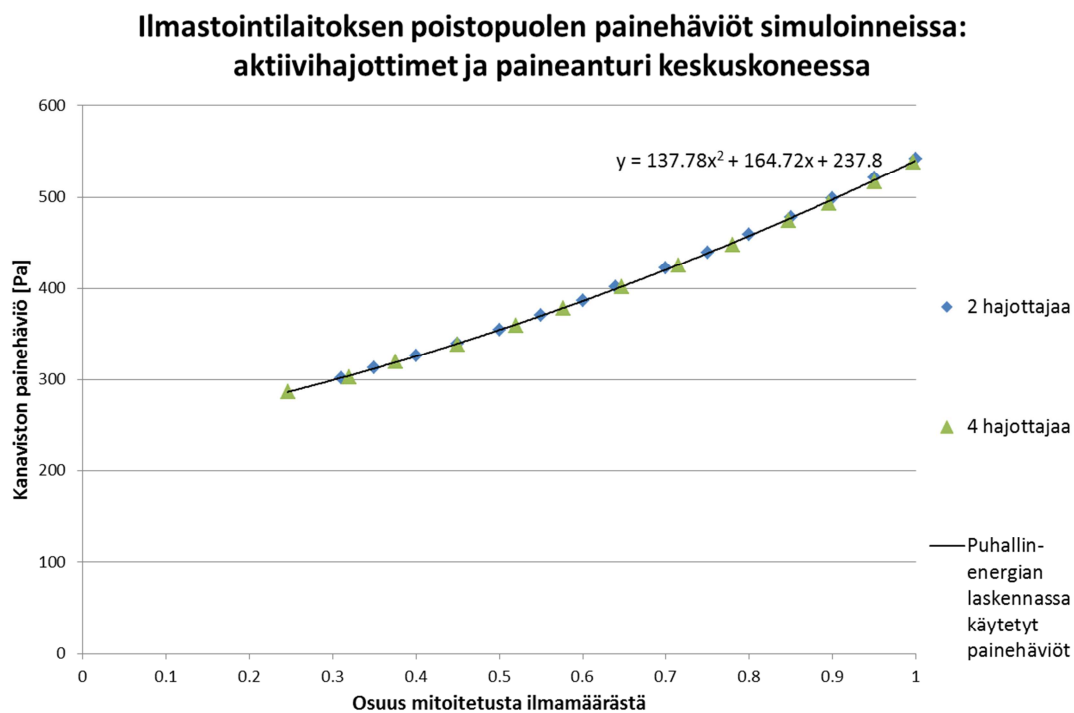
Kaavio 8. Poistokanaviston painehäviöt ilmavirran funktiona kanavapaineen optimointijärjestelmässä



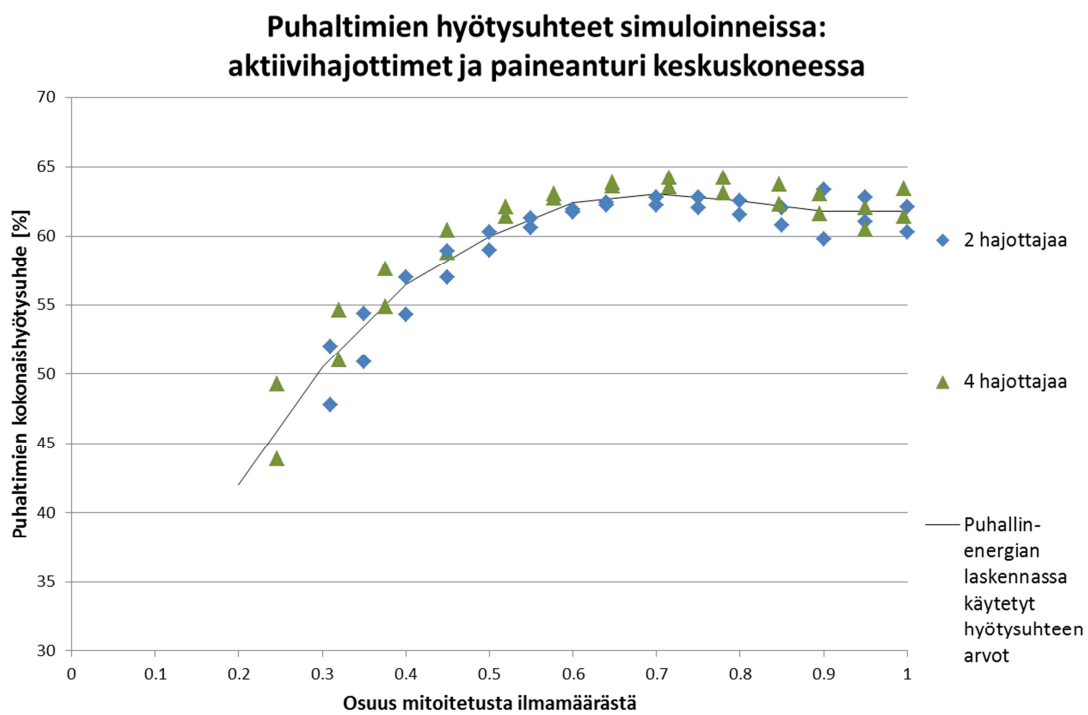
Kaavio 9. Puhaltimien kokonaishyötysuhteet ilmavirran funktiona kanavapaineen optimointijärjestelmässä



Kaavio 10. Tulokanaviston painehäviöt ilmavirran funktiona järjestelmässä, jossa paineensäätönturi sijaitsee keskuskoneessa

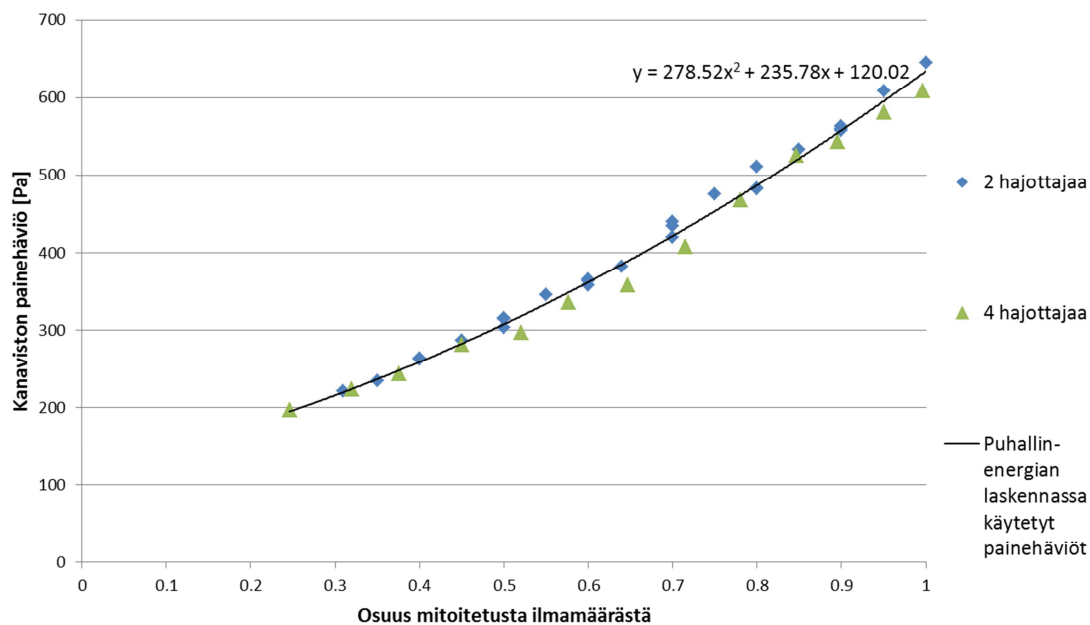


Kaavio 11. Poistokanaviston painehäviöt ilmavirran funktiona järjestelmässä, jossa paineensäätönturi sijaitsee keskuskoneessa



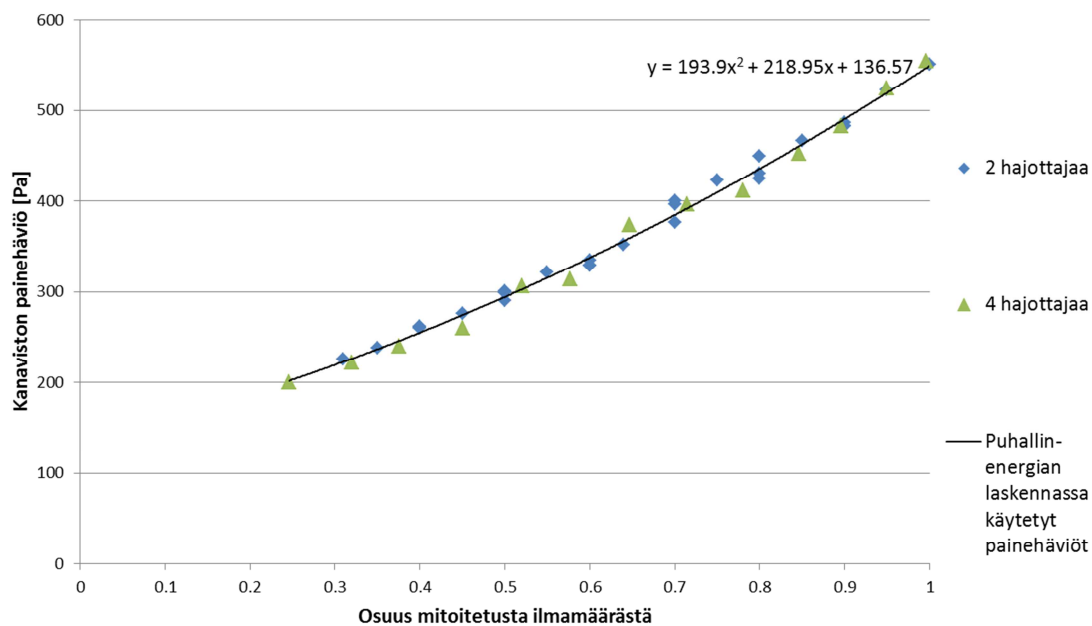
Kaavio 12. Puhaltimien kokonaishyötysuhteet ilmavirran funktiona järjestelmässä, jossa paineensäätönturi sijaitsee keskuskoneessa

Ilmastointilaitoksen tulopuolen painehäviöt simuloinneissa: aktiivihajottimet ja paineanturi kanavassa

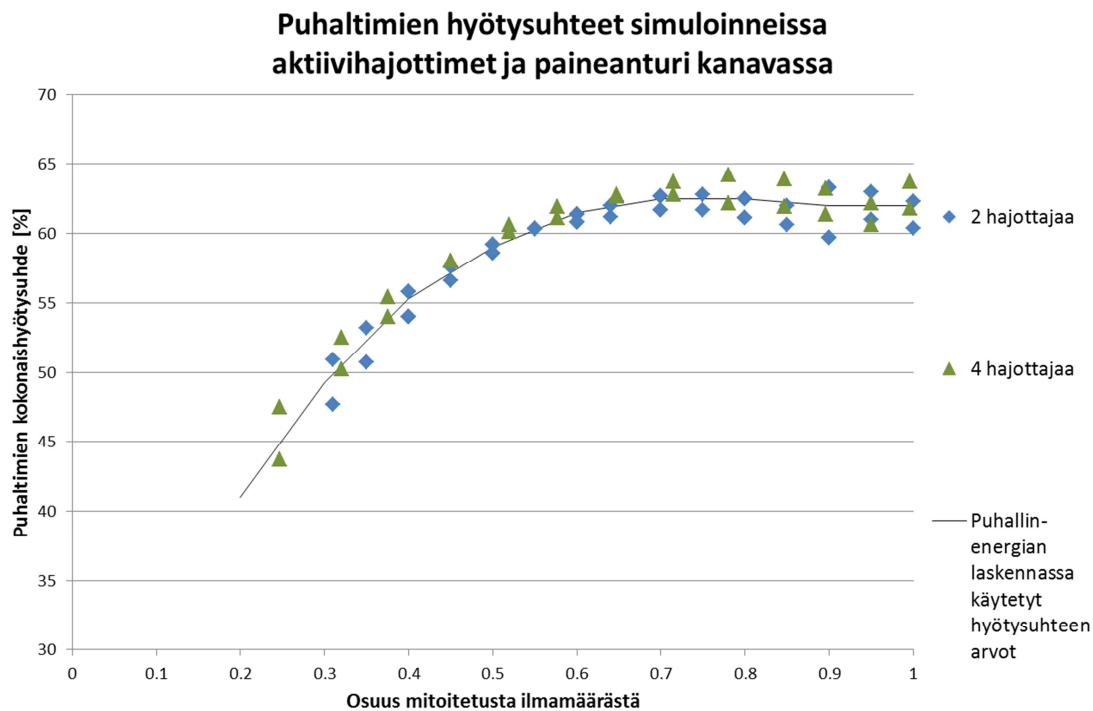


Kaavio 13. Tulokanaviston painehäviöt ilmavirran funktiona järjestelmässä, jossa paineensäätöanturi sijaitsee kanavistossa

Ilmastointilaitoksen poistupuolen painehäviöt simuloinneissa: aktiivihajottimet ja paineanturi kanavassa



Kaavio 14. Poistokanaviston painehäviöt ilmavirran funktiona järjestelmässä, jossa paineensäätöanturi sijaitsee kanavistossa



Kaavio 15. Puhaltimien kokonaishyötysuhteet ilmavirran funktiona järjestelmässä, jossa paineensäätönturi sijaitsee kanavistossa

6.3 CAV-järjestelmän painehäviöt ja kokonaishyötysuhteet

Laadittua MagiCAD-mallia, jossa on neljä hajottajaa tilaa kohden, käytettiin CAV-ilmanvaihdon laitoskäyrän ja hyötysuhdekäyrän määrittämiseksi. Näitä tarvittiin puhallinenergian laskentatyökalussa. Tarkastelua varten aktiivihajottajat korvattiin RHKB-hajottajilla ja tulopuolen virtaussäätimet poistettiin. Poistopuolelle virtaussäätimet jätettiin, koska ohjelma ei muuten saanut poistokanavistoa tasapainoon.

MagiCAD-simulointi suoritettiin kolmella ilmavirralla: 100 %, 70 % ja 50 %. Tuloksina kirjattiin kanaviston kokonaispainehäviöt, jotka sitten syötettiin Aconiin vastavien ilmavirtojen kanssa. Jäte- ja ulkoilman painehäviöinä käytettiin samoja arvoja kuin VAV-järjestelmissä. Näin saatiin CAV-laitoksen kokonaispainehäviöt ja puhaltimien hyötysuhteet noissa kolmessa pisteessä. Laitoskäyrä laadittiin Excelin trendiviiva-toiminnolla toisen asteen käyränä ja hyötysuhdekäyrä approksimoitiin VAV-simulointien hyötysuhdekäyriä mukailien. CAV-järjestelmän tarkastelu oli huomattavasti VAV-järjestelmää suppeampi ja karkeampi. Se onkin laskentatyökalussa tar-

koitettu vertailujärjestelmäksi, jonka avulla saa käsityksen VAV-järjestelmän tuoman puhallinsähkön säästön suuruusluokasta. Simulointitiedot ovat liitteessä 15.

6.4 Puhallinenergian laskentatyökalu

Eri VAV-säätötavoilla saadut simulointitulokset yhdistettiin yhdeksi Excel-pohjaiseksi laskentatyökaluksi, jolla on mahdollista laskea periaatteessa minkä tahansa aktiivihajottajilla varustetun kohteen vuotuiset puhallinenergian kulutukset. Työkaluun on syötettävä mitoitusilmavirta sekä osailmavirtojen käyttöprofiili. Tuloksena saadaan, paljonko sähköenergiaa puhaltimet kuluttavat, kun järjestelmän säätötapana on paineanturi keskuskoneella (AHU), paineanturi kanavistossa (DUCT) tai kanavapaineen optimointi (OPT). Laskuri toimitetaan tiedostona työn tilaajalle, mutta siitä on näköisversio liitteenä 16.

Työkalua laadittaessa on hyödynnetty muutamia puhallinlaskennan perusyhtälöitä. Puhaltimien yhteenlaskettu teho P eri ilmavirroilla laskettiin yhtälöstä:

$$P = \frac{dp * q_v}{\eta * 1000} \quad (1)$$

P = puhaltimien sähköteho [kW]

dp = laitoksen painehäviöiden summa [Pa]

q_v = kanaviston ilmavirta [m^3/s]

η = puhaltimien kokonaishyötysuhde

Vuosittainen energiankulutus laskettiin seuraavasti:

$$Q = \sum_{n=0,2}^1 (P_n * t_n * 8760 \text{ h/a}) \quad (2)$$

Q = vuotuinen puhallinsähkön kulutus [kWh/a]

P_n = puhaltimien yhteenlaskettu teho osailmavirralla n [kW]

t_n = käyttöprofiilissa määritetty osailmavirran n osuus vuotuisesta käyttöajasta

7 YHTEENVETO SIMULOINTIEN TULOKSISTA

Taulukkoon 8 on koottu kuuden tutkitun ilmastointivaihtoehdon perustietoja sekä simulointien tulokset. VAV-järjestelmissä puhallinenergian kulutus on ilmoitettu kanavapaineen optimointia käyttävästä järjestelmästä. Taulukossa 7 on listattu myös muiden säätötapojen vuosittaiset kulutukset tutkituissa kolmessa VAV-järjestelmässä.

Taulukon 8 loppuun kootut tiedot korkeimmista mallinuksissa ilmenneistä operatiivisista lämpötiloista ja CO₂-pitoisuuksista kuvaavat hyvin eri ilmastointivaihtoehtojen tehokkuutta. Vaikka ilmanvaihto on selkeästi kaikissa malleissa riittävä, loppuu jäähdytysteho kuumina kesäpäivinä auttamatta kesken malleissa, joissa jäähdytystehoa ei voi säätää.

Taulukko 7. Eri säätötapojen vaikutus vuosittaiseen puhallinsähkön kulutukseen koulukohteessa

Tutkitut tapaukset	VAV1	VAV2	VAV3
Säätö keskuskoneessa, AHU [kWh/a]	13019	10500	11903
Säätö kanavassa, DUCT [kWh/a]	11916	9972	11122
Kanavapaineen optimointi [kWh/a]	11198	9490	10527
[% AHU]	86	90	88
[% DUCT]	94	95	95

Taulukko 8. Ilmastointivaihtoehtojen perustietoja, simuloimalla saadut vuosittaiset energiankulutukset ja niistä lasketut vuosittaiset käyttökustannukset. Alimmaisena korkeimmat operatiiviset lämpötilat ja hiilidioksidipitoisuudet vuoden aikana. Samaa käyttötapausta mallintavat järjestelmät samalla värillä.

Tutkitut tapaukset	CAV0	CAV82	VAV1	VAV2	VAV3	Fan coil
Ilmanvaihdon käyntiajat	arkisin klo 8-16 100 %, klo 7-8, 16-21 50 %	arkisin klo 8-16 100 %, klo 7-8, 16-21 50 %	päivittäin klo 7-21	päivittäin klo 7-21	päivittäin klo 7-21	arkisin klo 8-16 100 %, klo 7-8, 16-21 50 %
Sisäiset kuormat luokka-huoneissa	luokat 1-7: oppilaat + 5 tietokonetta	luokat 1-7: oppilaat + 5 tietokonetta	luokat 1-6: oppilaat + 25 tietokonetta, luokka 7: oppilaat + 5 tietokonetta	luokat 1-7: oppilaat + 5 tietokonetta	luokat 2,4,7: oppilaat + 25 tietokonetta, luokat 1,3,5,6: oppilaat + 5 tietokonetta	luokat 1-6: oppilaat + 25 tietokonetta, luokka 7: oppilaat + 5 tietokonetta
Ilmanvaihtokoneet	Alkuperäinen IV-kone	E3CO-Crown	eQ pyörivällä lämmön talteenotolla	eQ pyörivällä lämmön talteenotolla	eQ pyörivällä lämmön talteenotolla	E3CO-Crown
Ilmavirta, max [m ³ /s]	2.05	2.05	3.92	2.35	3.12	2.05
Ilmanvaihdon päätelaitteet tulo/poisto	Säleiköt luokkien käytäväseinällä	RHOB / USR	Aktiivihajotin / USR	Aktiivihajotin / USR	Aktiivihajotin / USR	RHOB / USR
Muut ilmastoinnin laitteet			EMSS-virtaus-säätimet	EMSS-virtaus-säätimet	EMSS-virtaus-säätimet	QFDK-puhallin-konvektorit
Lämmitysenergia [kWh/a]	58595	12102	9520	10061	9711	9020
Jäähdytyksen sähköenergia [kWh/a]	0	1675	4029	3072	3567	7193
Laitesähkö LVI [kWh/a]	9198	9185	11233	9517	10558	10708
Kulut yhteensä [£/a]	4436	1812	2097	1863	1995	2331
Operatiivinen lämpötila, max [°C]	32.5	30.3	25.7	26.9	26.3	25.3
CO ₂ -pitoisuus, max [ppm]	939	938	1000	1000	1006	942

Lämmön hinta: 0.06 £/kWh
Sähkön hinta: 0.1 £/kWh

8 PUHALLINENERGIAN LASKENNAN SOVELTAMINEN TOIMISTORAKENNUKSEEN

Equa Oy on laatinut Fläkt Woodsille IDA-mallin nelikerroksisesta toimistorakennuksesta käytettäväksi erilaisissa ilmastointisimuloinneissa. Malli ei sinällään ole mistään olemassa olevasta kohteesta. Puhallinenergian laskentatyökalua päätettiin soveltaa kahteen mallin versioon, joista toisessa on CAV-ilmastointi ja toisessa VAV, jota käytetään talvisin osittain myös tilojen lämmittämiseen. Kummastakin IDA-mallista selvitettiin ilmanvaihtokoneiden vuotuiset käyttöprofiilit kappaleessa 5.2.2 kuvatulla menetelmällä. VAV-järjestelmässä keskuskoneen mitoitusilmavirraksi valittiin IDA-simulointien perusteella 2,0 m³/s, joka on noin 80 % teoreettisesta maksimiilmavirrasta. Taulukossa 9 on esitetty puhallinlaskennan tulokset. Merkillepantavaa on, että VAV-laitoksen mitoitusilmavirta on 25 % CAV-laitoksen maksimiilmavirtaa suurempi ja VAV on käytössä 80 % ajasta verrattuna CAV:n 35 %:in, mistä huolimatta ero puhallinenergioissa on VAV:n hyväksi huomattava.

Taulukko 9. Puhallinenergian laskentatyökalu sovellettuna Equan laatimaan toimistorakennuksen malliin

VAV-laitos aktiivihajottajilla				CAV-laitos			
Ilmavirta	2.0	m ³ /s		Ilmavirta	1.6	m ³ /s	
SFP (tulo=poisto)	1.9	kW/(m ³ /s)		SFP (tulo=poisto)	1.8	kW/(m ³ /s)	
Tehontarve yht.	3.8	kW		Tehontarve yht.	2.9	kW	

Käyttöprofiili: osuus koko käyttöajasta 8760 h/a	Energiantarve koko aika			qv %-max	CAV-laitos, normaali mitoitus	
	AHU	DUCT	OPT		Käyttö- profiili	kWh/a
	Q kWh/a	Q kWh/a	Q kWh/a			
0.611	2670	1914	1632	0.2	0.003	5
0.072	429	333	295	0.3	0.008	20
0.028	224	185	167	0.4	0.008	30
0.027	274	239	220	0.5	0.005	26
0.022	294	268	251	0.6	0.002	17
0.019	318	301	285	0.7	0.001	10
0.014	295	287	275	0.8	0.000	3
0.007	184	184	179	0.9	0.000	9
0.001	35	35	35	1	0.326	8319
0.800					0.353	
yhteensä	4724	3748	3337		yhteensä	8440
% AHUsta	100	79.3	70.6			
% CAVsta	56.0	44.4	39.5			

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tulosten perusteella voidaan sanoa, että VAV-ilmastointi puoltaa paikkaansa käyttökustannuksiltaan parhaana ilmastointijärjestelmänä, joka englantilaiseen koulurakennukseen voidaan asentaa. Sen vuosittaiset kustannukset ovat samaa luokkaa kuin tilojen henkilömäärän mukaan mitoitettussa CAV-ilmastoinnissa, mutta saavutettu sisäilmasto on huomattavasti parempi varsinkin kesäaikaan. Jäähdytystarpeen ollessa suurempi, esimerkiksi ICT-luokissa, VAV-ilmastointi on käyttökustannuksiltaan huomattavasti erillistä tilakohtaista jäähdytystä halvempi. Tämä johtuu siitä, että suurimman osan vuotta VAV käyttää hyödyksi viileästä ulkoilmasta saatavaa ilmaista jäähdytysenergiaa. Muissa ilmastointijärjestelmissä jäähdytysenergia taas tuotetaan yleensä ympäri vuoden kylmäprosessin kautta.

Verrattuna tavanomaiseen, vakioilmavirtaiseen ilmanvaihtoon aiheutuu VAV-järjestelmää rakennettaessa kustannuksia suuremmasta ilmanvaihtokoneesta ja kanavista sekä virtaussäätimistä ja niiden automatiikasta. On kuitenkin muistettava, että myös muista ilmastointijärjestelmistä aiheutuu lisäkustannuksia, esimerkiksi puhallinkonvektori-järjestelmä vaatii tilakohtaiset laitteet ja niiden kylmävesiverkoston.

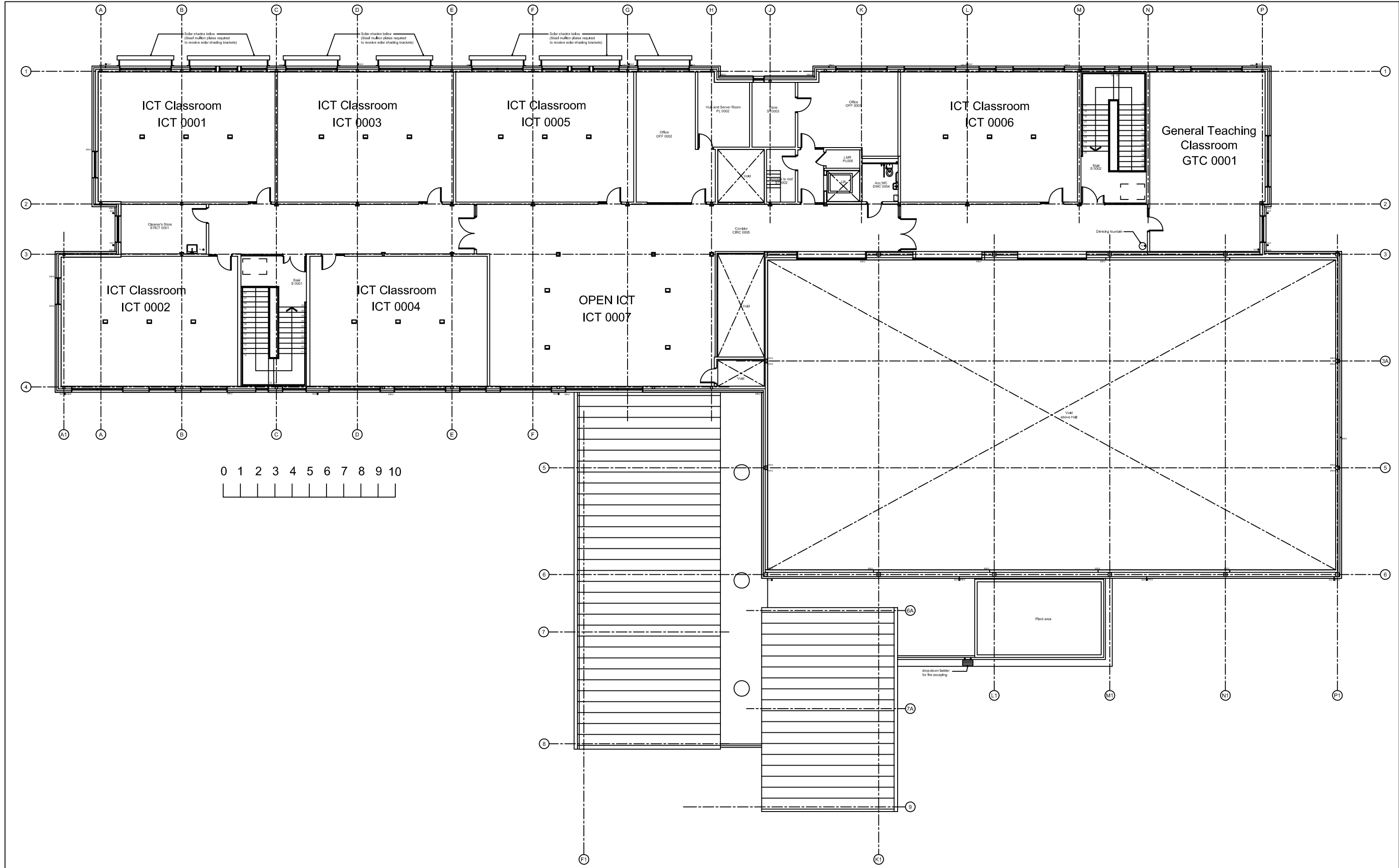
VAV-järjestelmän kanavapaineen optimoinnin vuosittaiset säästöt tutkimuksessa koulukohteessa jäivät melko pieniksi ollen 5-14 % vertailujärjestelmästä riippuen. Optimoinnin edut tulevat tutkimuksen mukaan selkeimmin esille pienimmillä osailmavirroilla. Suuremmilla osailmavirroilla keskuskoneen painehäviöt nousevat määrääviksi, jolloin optimoinnin suhteellinen hyöty pienenee. Koulun ilmanvaihtoa käytetään melko tasaisesti eri osailmavirroilla, mikä vähentää optimoinnista saatavaa hyötyä.

Toisin on toimistokohteessa, johon puhallinlaskentaa sovellettiin. Siinä optimoinnin hyöty on 11-30 % vertailujärjestelmiin nähden, mitä voidaan pitää jo merkittävänä säästönä. Ero koulukohteeseen johtuu siitä, että toimiston ilmanvaihto käy suurimman osan vuotta pienillä ilmavirroilla. Voidaankin vetää johtopäätös, että VAV-järjestelmä kanavapaineen optimoinnilla on parhaimmillaan kohteessa, jossa on satunnaisesti tarvetta suurille ilmavirroille, mutta pääsääntöisesti pärjätään kevyellä ilmanvaihdolla.

LÄHTEET

- Fläkt Woods. 2005. Kasettimallinen puhallinkonvektori QFDK – Tekninen esite. Viitattu 23.5.2012. <http://www.flaktwoods.fi/4306d05f-03bc-4a2a-ac4b-6255faf73db6>
- Fläkt Woods. 2009. USR Säleikkö – Tekninen esite. Viitattu 22.5.2012. <http://www.flaktwoods.fi/c1c4d0dd-7ef0-4ad4-b19d-1bc63d35f37b>
- Fläkt Woods. 2010. Tasauslaatikko TG, TGE – Tekninen esite. Viitattu 22.5.2012. <http://www.flaktwoods.fi/588ef5ac-4acf-4c3a-93aa-f7743320a82c>
- Fläkt Woods. 2011. Virtaussäädin EMSS, EMSD – Tekninen esite. Viitattu 23.5.2012. <http://www.flaktwoods.fi/c3b6f449-f8f0-41a2-85bc-db9aeca577b5>
- Fläkt Woods. 2012. Tuloilmalaite RHKB, RHOB – Tekninen esite. Viitattu 22.5.2012. <http://www.flaktwoods.fi/79da28ad-e3fc-42d7-9843-ea91c17db3d8>
- IDA Indoor Climate and Energy (versio 4.5). 2012. Equa Simulation AB.
- LVI 05-10440. Sisäilmastoluokitus 2008, sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. 2009. Helsinki: Rakennustieto.
- MagiCAD (versio 2011.4). 2011. Progman Oy.
- Mäki, H. 1996. LVIS-2000 Ilmastointi: Rakennuksen ilmastointijärjestelmän valinta. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö.
- Mysen M., Berntsen S., Nafstad P. & Schild P. 2005. Occupancy density and benefits of demand-controlled ventilation in Norwegian primary schools. *Energy and Buildings* 37, 1234-1240. Viitattu 24.5.2012. <http://www.sciencedirect.com>
- Mysen M. & Schild P. 2011. Requirements for well functioning Demand Controlled Ventilation. *REHVA Journal* – October 2011, 14-18.
- Ripatti, H. 2004. Ilmastointijärjestelmät. Teoksessa Seppänen O. (toim.) Ilmastoinnin suunnittelu. Helsinki: Suomen LVI-liitto, 41-72.
- Saaristo, P. 1996. Puhallinkonvektoriopas. Teoksessa LVIS-2000 Ilmastointi: Ilmastointipalkkiopas, Kanavisto-opas, Muuttuvailmavirtajärjestelmät, Puhallinkonvektoriopas. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö, 127-157.
- Vilkki, P. 1996. Muuttuvailmavirtajärjestelmät. Teoksessa LVIS-2000 Ilmastointi: Ilmastointipalkkiopas, Kanavisto-opas, Muuttuvailmavirtajärjestelmät, Puhallinkonvektoriopas. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö, 99-125.

LIITE 1
 KOULURAKENNUKSEN POHJAPIIRUSTUS, 1:200



IDA-SIMULOINTIEN TULOKSET KUUKAUSITTAIN ERI ILMASTOINTI-JÄRJESTELMILLÄ

CAV0				CAV82			
Month	Facility electric		Facility fuel	Month	Facility electric		Facility fuel
	Cooling	Pumps	Heating		Cooling	Pumps	Heating
	(kWh)	(kWh)	(kWh)		(kWh)	(kWh)	(kWh)
1	0	4.7	11221	1	0	0.1	2995
2	0	4.7	10748	2	0	0.1	2598
3	0	3.3	7048	3	0	0	1091
4	0	2.4	4318	4	9.2	0.1	305.6
5	0	1.1	1461	5	210	1.8	3
6	0	0.7	798.7	6	432	3.7	0
7	0	0.2	195.3	7	570	4.9	0
8	0	0.3	339.1	8	400	3.4	0
9	0	0.8	997.5	9	44.9	0.4	27.5
10	0	2.1	3828	10	8.9	0.1	444.4
11	0	3.2	7277	11	0	0	1513
12	0	4.1	10363	12	0	0.1	3124
Total	0	27.7	58595	Total	1675	14.7	12102

VAV1				20,5 - 23				Yhdistetty			
Month	Facility electric		Facility fuel	Month	Facility electric		Facility fuel	Month	Facility electric		Facility fuel
	Cooling	Pumps	Heating		Cooling	Pumps	Heating		Cooling	Pumps	Heating
	(kWh)	(kWh)	(kWh)		(kWh)	(kWh)	(kWh)		(kWh)	(kWh)	(kWh)
1	0	0.1	2321	1	0	0.1	1906	1	0	0.1	2321
2	0	0.1	2021	2	0	0.1	1600	2	0	0.1	2021
3	0	0	835.2	3	0	0	442	3	0	0	835.2
4	19	0.2	376.9	4	9.7	0.1	129	4	19	0.2	376.9
5	479	4.1	22.4	5	393	3.4	0.6	5	393	3.4	0.6
6	984	8.5	4.6	6	884	7.6	0	6	884	7.6	0
7	1959	16.9	0	7	1555	13.4	0	7	1555	13.4	0
8	1303	11.2	0	8	1038	8.9	0	8	1038	8.9	0
9	164	1.4	58.2	9	122	1.1	3.6	9	122	1.1	3.6
10	17.1	0.2	400.2	10	13.3	0.1	147.4	10	17.1	0.2	400.2
11	0	0	1087	11	0	0	662.2	11	0	0	1087
12	0	0.1	2474	12	0	0.1	2033	12	0	0.1	2474
Total	4925	42.7	9601	Total	4016	34.8	6924	Total	4029	35	9520

VAV2

Month	20,5 - 21,5		Facility fuel	Month	20,5 - 23		Facility fuel	Month	Yhdistetty		Facility fuel
	Facility electric		Heating		Facility electric		Heating		Facility electric		Heating
	Cooling	Pumps			Cooling	Pumps			Cooling	Pumps	
	(kWh)	(kWh)	(kWh)		(kWh)	(kWh)	(kWh)		(kWh)	(kWh)	(kWh)
1	0	0.1	2503	1	0	0.1	2359	1	0	0.1	2503
2	0	0.1	2155	2	0	0.1	2018	2	0	0.1	2155
3	0	0	866.2	3	0	0	655.6	3	0	0	866.2
4	12.3	0.1	343.9	4	6.8	0.1	181.4	4	12.3	0.1	343.9
5	301	2.6	13.5	5	280	2.4	0.8	5	280	2.4	0.8
6	663	5.7	1.8	6	638	5.5	0	6	638	5.5	0
7	1295	11.1	0	7	1235	10.6	0	7	1235	10.6	0
8	881	7.6	0	8	806	6.9	0	8	806	6.9	0
9	117	1	45.2	9	89.7	0.8	6.5	9	89.7	0.8	6.5
10	10.4	0.1	378	10	8.9	0.1	225.8	10	10.4	0.1	378
11	0	0	1151	11	0	0	949.2	11	0	0	1151
12	0	0.1	2657	12	0	0.1	2536	12	0	0.1	2657
Total	3280	28.6	10115	Total	3065	26.7	8932	Total	3072	27	10061

VAV3

Month	20,5 - 21,5		Facility fuel	Month	20,5 - 23		Facility fuel	Month	Yhdistetty		Facility fuel
	Facility electric		Heating		Facility electric		Heating		Facility electric		Heating
	Cooling	Pumps			Cooling	Pumps			Cooling	Pumps	
	(kWh)	(kWh)	(kWh)		(kWh)	(kWh)	(kWh)		(kWh)	(kWh)	(kWh)
1	0	0.1	2400	1	0	0.1	2106	1	0	0.1	2400
2	0	0.1	2069	2	0	0.1	1781	2	0	0.1	2069
3	0	0	839.7	3	0	0	502.7	3	0	0	839.7
4	15.4	0.1	354.1	4	7.5	0.1	134.3	4	15.4	0.1	354.1
5	390	3.4	18.4	5	341	2.9	0.6	5	341	2.9	0.6
6	821	7.1	3.5	6	770	6.6	0	6	770	6.6	0
7	1638	14.1	0	7	1408	12.1	0	7	1408	12.1	0
8	1092	9.4	0	8	915	7.9	0	8	915	7.9	0
9	138	1.2	47.7	9	103	0.9	3	9	103	0.9	3
10	13.6	0.1	371.5	10	10.7	0.1	143.9	10	13.6	0.1	371.5
11	0	0	1116	11	0	0	757.3	11	0	0	1116
12	0	0.1	2557	12	0	0.1	2275	12	0	0.1	2557
Total	4108	35.7	9777	Total	3556	30.9	7704	Total	3567	31	9711

Fan coil

20,5-21,5

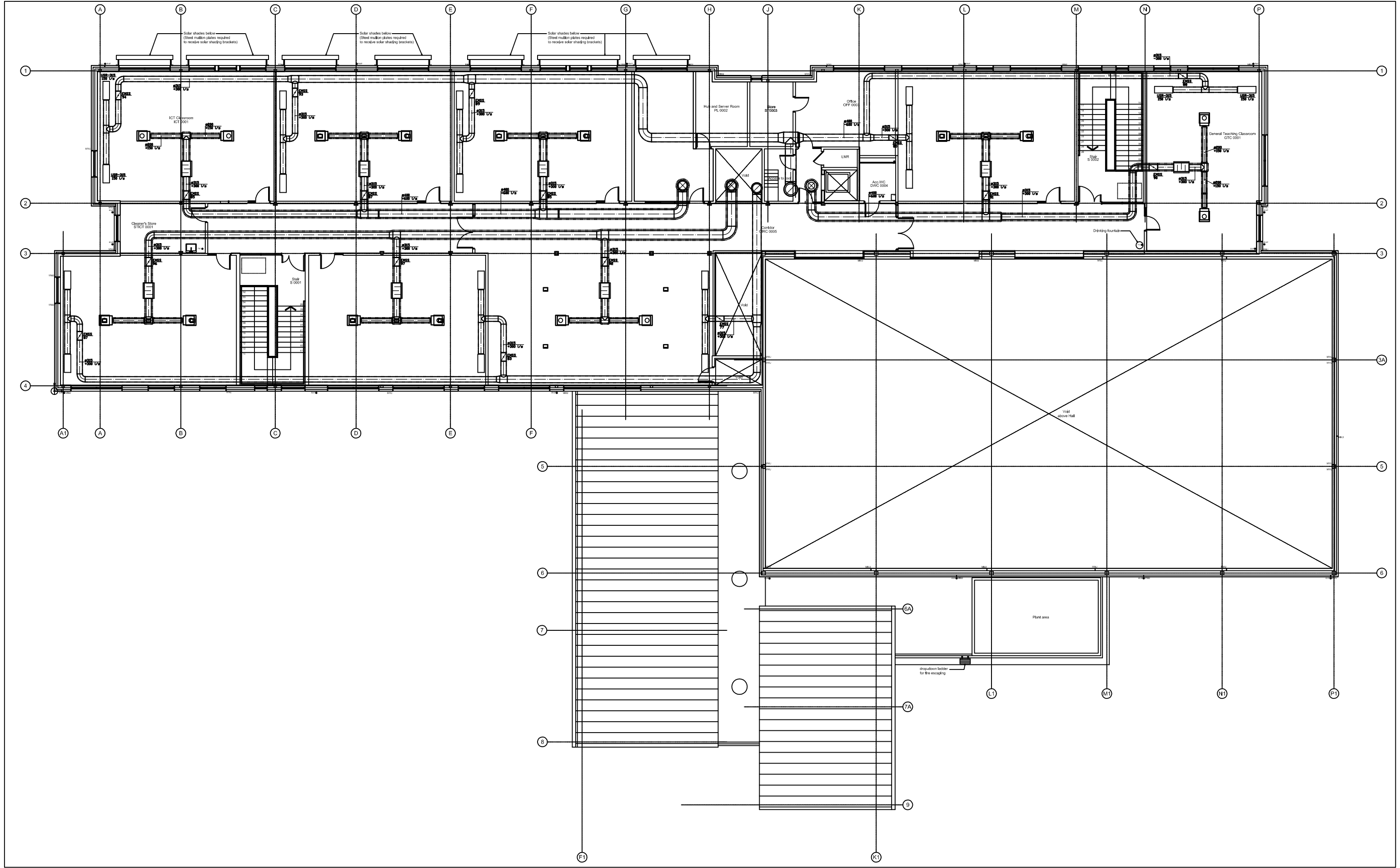
Month	Facility electric			Facility fuel
	Cooling	Pumps	Fan coil electricity	Heating
	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)
1	99.6	10.4	23.5	2277
2	124	10.5	28.1	1975
3	276	13.4	88.8	744.1
4	521	15.3	149	292.3
5	1233	24.7	211	13.9
6	1500	28.1	212	1.2
7	2035	37.4	229	0
8	1754	32.7	226	0
9	888	19.2	193	36.6
10	479	15.4	138	354.1
11	198	12	65.4	1044
12	60.3	9.2	17.4	2330
Total	9168	228	1581	9068

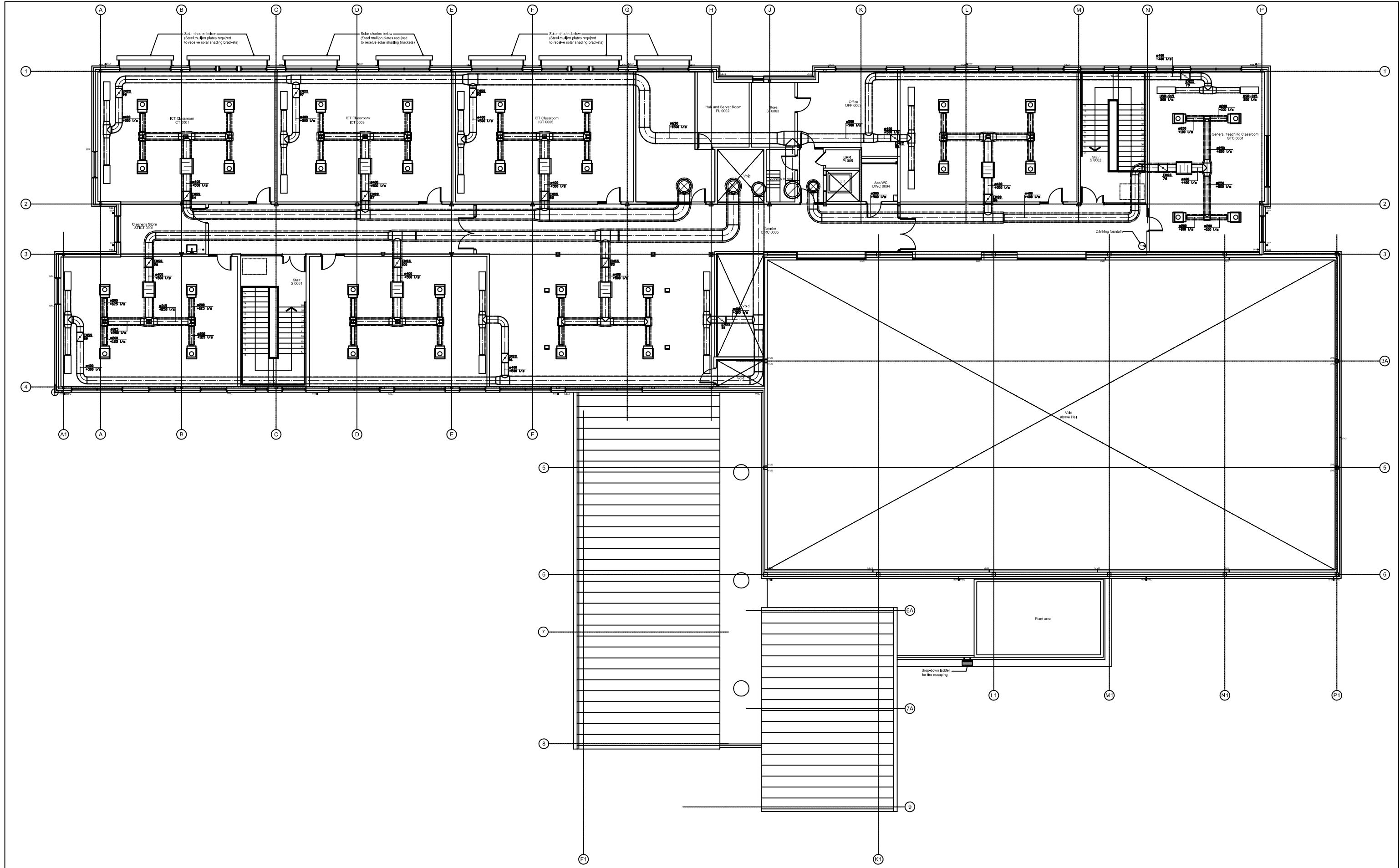
20,5-23

Month	Facility electric			Facility fuel
	Cooling	Pumps	Fan coil electricity	Heating
	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)
1	4.9	1.3	0.5	2083
2	8	1.3	0.9	1766
3	23.4	3	5.7	469.3
4	146	9.1	42.2	103.4
5	804	16.3	155	0
6	1135	18.1	170	0
7	1645	23.3	198	0
8	1345	20.9	191	0
9	505	12.4	137	3.8
10	152	7.6	41.6	157.8
11	8.3	1.6	0.9	725.7
12	0.3	0.1	0	2197
Total	5778	115	943	7506

Yhdistetty

Month	Facility electric			Facility fuel
	Cooling	Pumps	Fan coil electricity	Heating
	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)
1	99.6	10.4	23.5	2277
2	124	10.5	28.1	1975
3	276	13.4	88.8	744.1
4	521	15.3	149	292.3
5	804	16.3	155	0
6	1135	18.1	170	0
7	1645	23.3	198	0
8	1345	20.9	191	0
9	505	12.4	137	3.8
10	479	15.4	138	354.1
11	198	12	65.4	1044
12	60.3	9.2	17.4	2330
Total	7193	177	1361	9020





LIITE 6

AKTIIVIIHAJOTTAJAN MITTAUSTULOKSET

qv [l/s]	dp [Pa]	L0,2 [m]	Gap [mm]	Säätöasento L0,2 = 2 m			
10	26.5	0.9	1	Air flow	dp	Gap	
20	110	1.6	1	[m ³ /h]	[Pa]	[mm]	
40	315	2.3	1	100	75.2	3	
				150	57.6	4	
10	2.1	0.4	5	200	41.5	6	
20	9.4	1	5	250	27.3	10	
40	32	1.8	5	300	16.1	15	
80	105	3.3	5	350	9.4	22	
100	182	3.6	5	400	6.3	29	
				450	4.7	30	Fully open
10	0.5	0.3	10	500	3.8	30	Fully open
20	2.4	0.7	10	550	3.2	30	Fully open
40	8.2	1.5	10				
80	26.5	2.3	10				
100	47.3	2.7	10				
160	134	4.3	10				
20	0.6	0.5	20				
40	2.1	1.2	20				
80	7.1	2	20				
100	12.2	2.5	20				
160	35	3.9	20				
20	0.23	0.4	30				
40	0.8	1	30				
80	2.5	1.8	30				
100	4.4	2.1	30				
160	12.2	3.3	30				

LIITE 7

KANAVISTOMALLINNUKSESSA KÄYTETYT PAINEHÄVIÖT VIRTAUS- SÄÄDINTEN JÄLKEEN

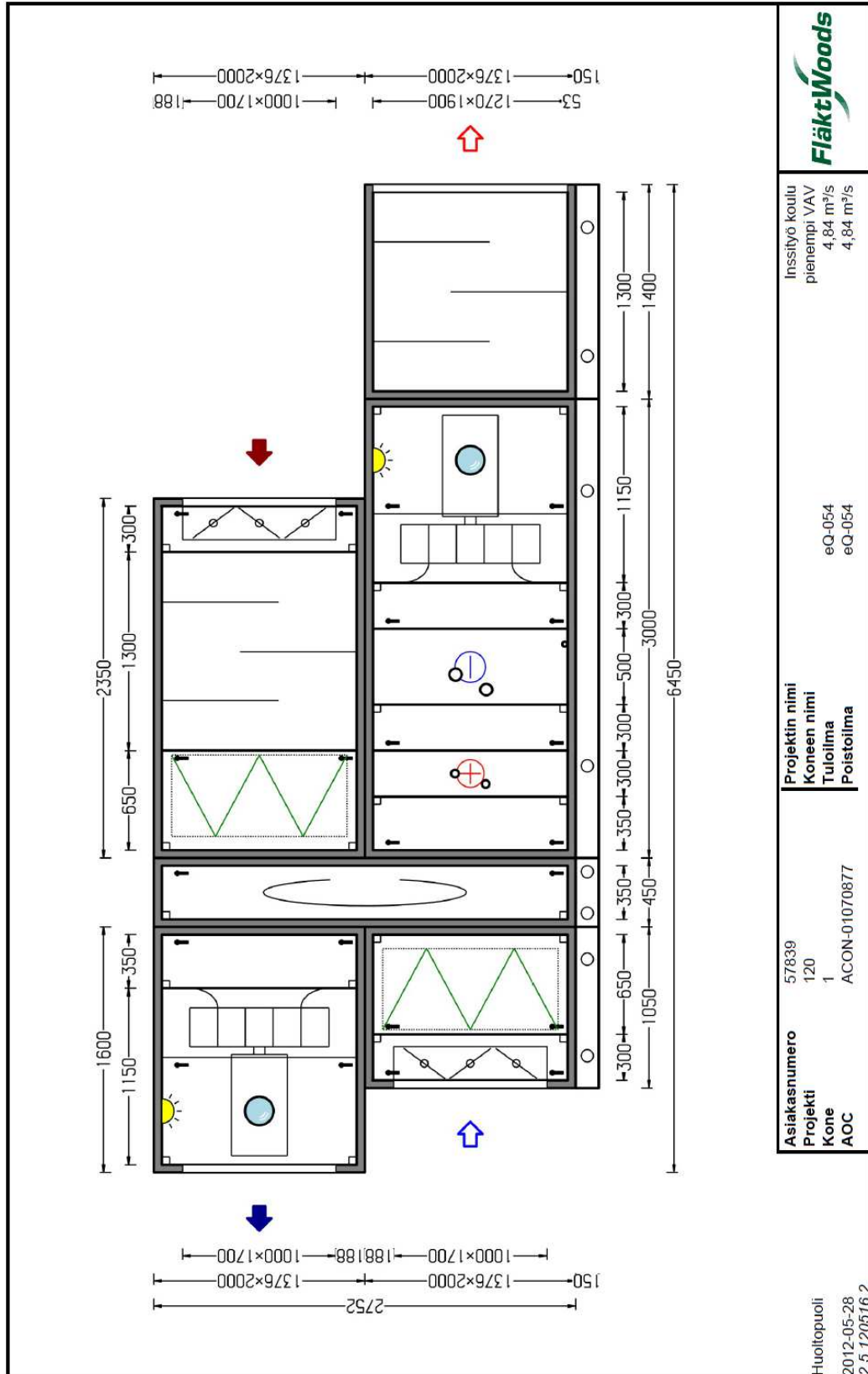
L0,2 = 2,0 m		2 hajotinta, L0,2 = 2,0 m			
qv, hajotin l/s	dp, hajotin Pa	qv yhteensä l/s	dp kanavisto Pa (MagiCAD)	dp yhteensä Pa	qv maksimista %
38	62	75	1.2	63	25
42	57	83	1.4	58	28
50	47	100	2.0	49	33
56	40	111	2.5	43	37
60	36	120	2.8	39	40
70	27	140	3.8	31	47
75	23	150	4.4	27	50
80	19	160	5.0	24	53
83	17	167	5.4	22	56
90	13	180	6.2	19	60
97	9	194	7.2	17	65
100	8	200	7.6	16	67
110	6	220	9.2	15	73
120	7	240	10.9	18	80
125	7	250	11.8	19	83
130	8	260	12.8	21	87
140	10	280	14.8	24	93
150	11	300	16.9	28	100

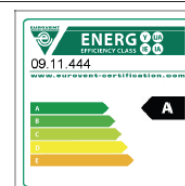
 = paine säätöpellin
jälkeen yli 50 Pa

 = hajottimet täysin
auki

L0,2 = 1,5 m		4 hajotinta, L0,2 = 1,5 m, luokat 1-6 + Open ICT				4 hajotinta, L0,2 = 1,5 m, luokka 7			
qv, hajotin l/s	dp, hajotin Pa	qv yhteensä l/s	dp kanavisto Pa (MagiCAD)	dp yhteensä Pa	qv maksimista %	qv yhteensä l/s	dp kanavisto Pa (MagiCAD)	dp yhteensä Pa	qv maksimista %
20	59	80	0.7	60	16	80	1.0	60	20
28	42	111	1.3	43	22	111	1.9	43	28
30	37	120	1.5	39	24	120	2.2	39	30
35	28	139	1.9	30	28	139	2.9	31	35
38	24	150	2.2	26	30	150	3.4	27	38
42	18	167	2.7	21	33	167	4.2	22	42
50	8	200	3.9	12	40	200	6.0	14	50
56	4	222	4.8	8	44	222	7.4	11	56
60	2	240	5.6	7	48	240	8.6	10	60
70	2	280	7.5	10	56	280	11.8	14	70
75	2	300	8.6	11	60	300	13.5	16	75
80	3	320	9.8	13	64	320	15.4	18	80
83	3	333	10.6	14	67	333	16.7	20	83
90	4	360	12.3	16	72	360	19.4	23	90
97	4	389	14.3	19	78	389	22.7	27	97
100	5	400	15.2	20	80	400	24.0	29	100
110	6	440	18.3	24	88				
120	7	480	21.7	29	96				
125	7	500	23.6	31	100				

ACON-SIMULOINNEISSA KÄYTETTY IV-KONE KAHDEN HAJOTTAJAN
JÄRJESTELMÄSSÄ





ILMANKÄSITTELYKONE eQ

Projekti	120 () / Inssityö koulu	2.5.120516.2
AOC	ACON-01070877	
Kone	1 () / pienempi VAV	2012-05-28
Konekoko	054	Sivu 2
Asiakas		
Asiakkaan viite		
Oma viite	Pekka Toivanen	
Tuloilmavirta	4,84 m ³ /s	Poistoilmavirta 4,84 m ³ /s
Ulkoisen painehäviö	253 Pa	Ulkoisen painehäviö 247 Pa
Jännite	3 x 400V + N, 50 Hz	Paino 3128 kg
SFP _v	1,88 kW/m ³ /s	Designed for wet conditions
Ilman tiheys	1,2 kg/m ³	Korkeus mpy 0 m

YHTEENVETO

Toiminto-osat ilmavirran suunnassa	v0 (m/s)	Et (%)	tw (°C)	ts (°C)	dP (Pa)
Tuloilma:					
Peltiosa/liitântäosa	3,0				4
Suodatin	2,3				126
Lämmönsiirrin	2,2	78,4	-5,0 / 16,2		126
Rakenneosia					0
Ilmanlämmitin	2,3		16,2 / 17,2		16
Rakenneosia					0
Ilmanjäähdytyn	2,5			26,0 / 17,1	104
Rakenneosia					0
Kammio puhallin		75,0	17,2 / 18,0	17,1 / 18,0	689
Äänenvaimennin	2,0				31
Poistoilma:					
Peltiosa/liitântäosa	2,9				4
Äänenvaimennin	2,0				31
Suodatin	2,3				124
Lämmönsiirrin	2,3		22,0 / 0,8		125
Rakenneosia					0
Kammio puhallin		72,1			560

ÄÄNEN TEHOTASOT

(standardi: EN13053 ISO/CD 13347-2)

Oktaavikaista (Hz)	Lw oktaavikaistoittain (dB)								LwA
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	dB(A)
Ulkoilmaliitântä	66	77	66	62	60	55	48	44	66
Tuloilmaliitântä	64	75	57	50	47	51	52	51	62
Poistoilmaliitântä	65	69	45	42	40	39	39	39	54
Jäteilmaliitântä	68	86	84	83	79	75	71	67	84
Koneen vaipan läpi	66	74	61	51	52	50	45	39	61

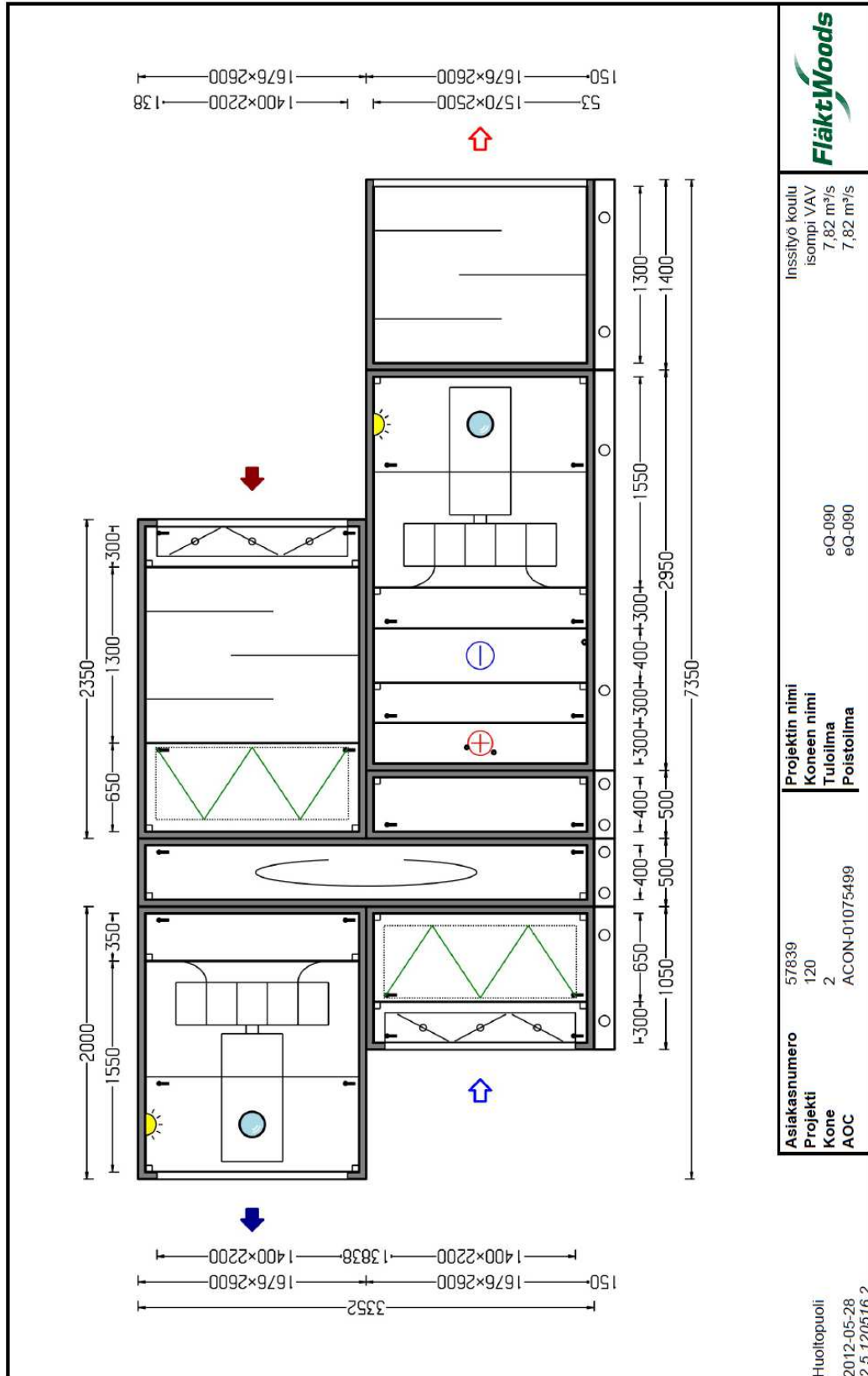
TOLERANSSI

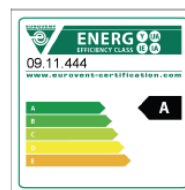
Standardin EN 13053 mukaan kokonaistason LwA toleranssi on 4dB. Oktaavikaistojen toleranssit on annettu taulukossa

Oktaavikaista (Hz)	Lw oktaavikaistoittain (dB)								LwA
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	dB(A)
Toleranssi	8	6	6	6	6	4	4	7	4

Taajuusmuuttajat ja mahdolliset koneen ulkopuolelle asennetut moottorit eivät sisälly äänitasoihin

ACON-SIMULOINNEISSA KÄYTETTY IV-KONE NELJÄN HAJOTTAJAN JÄRJESTELMÄSSÄ





ILMANKÄSITTELYKONE eQ

Projekti	120 () / Inssityö koulu	2.5.120516.2
AOC	ACON-01075499	
Kone	2 () / isompi VAV	2012-05-28
Konekoko	090	Sivu 2
Asiakas		
Asiakkaan viite		
Oma viite	Pekka Toivanen	
Tuloilmavirta	7,82 m ³ /s	Poistoilmavirta 7,82 m ³ /s
Ulkoisen painehäviö	255 Pa	Ulkoisen painehäviö 254 Pa
Jännite	3 x 400V + N, 50 Hz	Paino 4681 kg
SFP _v	1,79 kW/m ³ /s	Designed for wet conditions
Ilman tiheys	1,2 kg/m ³	Korkeus mpy 0 m

YHTEENVETO

Toiminto-osat ilmavirran suunnassa	v0 (m/s)	Et (%)	tw (°C)	ts (°C)	dP (Pa)
Tuloilma:					
Peltiosa/liitäntäosa	2,9				4
Suodatin	2,3				123
Lämmönsiirrin	2,3	78,1	-5,0 / 16,1		130
Rakenneosa					0
Ilmanlämmitin	2,3		16,1 / 17,2		22
Rakenneosa					0
Ilmanjäähdytin	2,3			26,0 / 17,2	54
Rakenneosa					0
Kammiopuhallin		73,2	17,2 / 18,0	17,2 / 18,0	643
Äänenvaimennin	2,0				26
Poistoilma:					
Peltiosa/liitäntäosa	2,8				4
Äänenvaimennin	2,0				27
Suodatin	2,2				121
Lämmönsiirrin	2,4		22,0 / 0,9		129
Rakenneosa					0
Kammiopuhallin		70,8			565

ÄÄNEN TEHOTASOT

(standardi: EN13053 ISO/CD 13347-2)

Oktaavikaista (Hz)	Lw oktaavikaistoittain (dB)								LwA dB(A)
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
Ulkoilmaliitäntä	70	81	68	64	62	59	48	44	69
Tuloilmaliitäntä	67	75	62	54	49	54	53	52	63
Poistoilmaliitäntä	68	72	47	44	41	42	40	40	57
Jäteilmaliitäntä	71	86	89	87	80	78	72	68	88
Koneen vaipan läpi	69	77	63	53	53	53	45	40	63

TOLERANSSI

Standardin EN 13053 mukaan kokonaistason LwA toleranssi on 4dB. Oktaavikaistojen toleranssit on annettu taulukossa

Oktaavikaista (Hz)	Lw oktaavikaistoittain (dB)								LwA dB(A)
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
Toleranssi	8	6	6	6	6	4	4	7	4

Taajuusmuuttajat ja mahdolliset koneen ulkopuolelle asennetut moottorit eivät sisälly äänitasoihin

ACON-SIMULOINNIN TULOKSET KANAVAPAINEN OPTIMOINNILLA

2 hajottajaa, kanavapainen optimointi

Simulointien tulokset: Kanaviston painehäviö				Jäte- ja raitisilma- laitteiden paine- häviöt				Acon: IV-laitoksen painehäviöt ja puhaltimien hyötysuhteet			
%-max	m ³ /s	dp in-flow, Pa	dp out-flow, Pa	dp fresh air, Pa	dp exhaust, Pa	dp tulo talvi, Pa	η tulo talvi, %	dp poisto talvi, Pa	η poisto talvi, %		
0.31	1.50	87	46	6	7	214	47.6	162	48.6		
0.35	1.69	89	53	7	9	230	50.6	180	51.1		
0.40	1.94	95	76	9	12	253	53.9	218	54.2		
0.40	1.94	94	71	9	12	252	53.9	213	54.2		
0.40	1.94	91	64	9	12	249	53.9	206	54.2		
0.45	2.18	99	79	12	15	276	56.5	237	56.3		
0.50	2.42	96	77	15	19	292	58.3	251	57.6		
0.50	2.42	86	79	15	19	282	58.3	253	57.6		
0.50	2.42	95	77	15	19	291	58.3	251	57.6		
0.55	2.66	109	90	18	23	326	60.1	281	59.1		
0.60	2.90	97	92	21	27	336	61.0	299	60.0		
0.60	2.90	97	103	21	27	336	61.0	310	60.0		
0.60	2.90	107	102	21	27	346	61.0	309	60.0		

2 hajottajaa, kanavapaineen optimointi

Simulointien tulokset: Kanaviston painehäviö				Jäte- ja raitisilmalaitteiden painehäviöt		Acon: IV-laitoksen painehäviöt ja puhaltimien hyötysuhteet			
%-max	m ³ /s	dp in-flow, Pa	dp out-flow, Pa	dp fresh air, Pa	dp exhaust, Pa	dp tulo talvi, Pa	η tulo talvi, %	dp poisto talvi, Pa	η poisto talvi, %
0.64	3.10	102	103	24	31	360	61.6	327	60.5
0.70	3.39	109	113	28	37	394	62.3	359	60.9
0.70	3.39	117	110	28	37	402	62.3	356	60.9
0.70	3.39	121	115	28	37	406	62.3	361	60.9
0.75	3.63	142	118	33	42	452	62.6	383	60.9
0.80	3.87	142	135	37	48	479	62.2	422	60.8
0.80	3.87	119	132	37	48	456	62.2	419	60.8
0.80	3.87	129	130	37	48	466	62.2	417	60.8
0.85	4.11	139	136	42	54	502	61.8	444	60.3
0.90	4.36	146	141	47	61	538	61.0	472	59.5
0.90	4.36	143	142	47	61	535	61.0	473	59.5
0.90	4.36	144	147	47	61	536	61.0	478	59.5
0.95	4.60	162	145	52	68	583	62.7	500	58.6
1.00	4.84	168	159	58	75	618	62.1	537	60.2

4 hajottajaa, kanavapaineen optimointi

Simulointien tulokset: Kanaviston painehäviö			Jäte- ja raitisilmalaitteiden painehäviöt			Acon: IV-laitoksen painehäviöt ja puhaltimien hyötysuhteet			
%-max	m ³ /s	dp in-flow, Pa	dp out-flow, Pa	dp fresh air, Pa	dp exhaust, Pa	dp tulo talvi, Pa	η tulo talvi, %	dp poisto talvi, Pa	η poisto talvi, %
0.25	1.93	86	50	4	5	191	43.6	152	45.6
0.32	2.51	86	73	6	8	210	50.0	193	51.3
0.38	2.95	78	66	8	11	220	53.3	203	53.7
0.45	3.53	93	83	12	15	259	57.3	241	57.1
0.52	4.08	95	95	16	20	286	59.7	275	59.4
0.58	4.52	111	101	19	25	320	61.4	300	60.6
0.65	5.07	113	119	24	32	350	62.5	345	61.9
0.72	5.61	120	116	30	39	385	63.1	368	61.9
0.78	6.12	145	130	36	46	450	63.8	406	62.1
0.85	6.64	166	137	42	54	502	63.6	443	61.6
0.90	7.02	162	143	47	61	522	62.9	470	61.1
0.95	7.45	168	149	53	68	557	62.0	507	60.4
1.00	7.81	171	157	58	75	584	63.2	538	61.4

ACON-SIMULOINNIN TULOKSET KANAVASSA OLEVALLA PAINEEENSÄÄTÖANTURILLA

2 hajottajaa, anturi kanavassa

Simulointien tulokset: Kanaviston painehäviö			Anturien sijainti: Classroom 22		Kanaviston painehäviö		Jäte- ja raittisilmlaitteiden painehäviöt		Acon: IV-laitoksen painehäviöt ja puhaltimeiden hyötysuhteet				
%-max	m ³ /s	dp in-flow, Pa	dp out-flow, Pa	Inflow static pressure, Pa	Outflow static pressure, Pa	dp in-flow, Pa	dp out-flow, Pa	dp fresh air, Pa	dp exhaust, Pa	dp tulo talvi, Pa	η tulo talvi, %	dp poisto talvi, Pa	η poisto talvi, %
0.31	1.50	87	46	75	38	92	109	6	7	221	47.7	226	50.9
0.35	1.69	89	53	75	44	94	110	7	9	235	50.7	238	53.2
0.4	1.94	95	76	70	60	105	117	9	12	263	54.0	260	55.8
0.4	1.94	94	71	70	54	104	118	9	12	262	54.0	261	55.8
0.4	1.94	91	64	66	46	105	119	9	12	263	54.0	262	55.8
0.45	2.18	99	79	70	62	109	118	12	15	287	56.6	276	57.6
0.5	2.42	96	77	70	62	106	116	15	19	303	58.6	290	59.2
0.5	2.42	86	79	47	53	119	127	15	19	316	58.6	301	59.2
0.5	2.42	95	77	58	53	117	125	15	19	314	58.6	299	59.2
0.55	2.66	109	90	61	60	128	131	18	23	345	60.3	322	60.4
0.6	2.90	97	92	52	65	125	128	21	27	365	61.4	335	60.8
0.6	2.90	97	103	60	82	117	122	21	27	357	61.4	329	60.8
0.6	2.90	107	102	64	81	123	122	21	27	363	61.4	329	60.8
0.64	3.10	102	103	58	76	124	128	24	31	382	62.0	352	61.2
0.7	3.39	109	113	55	84	134	130	28	37	419	62.7	376	61.7

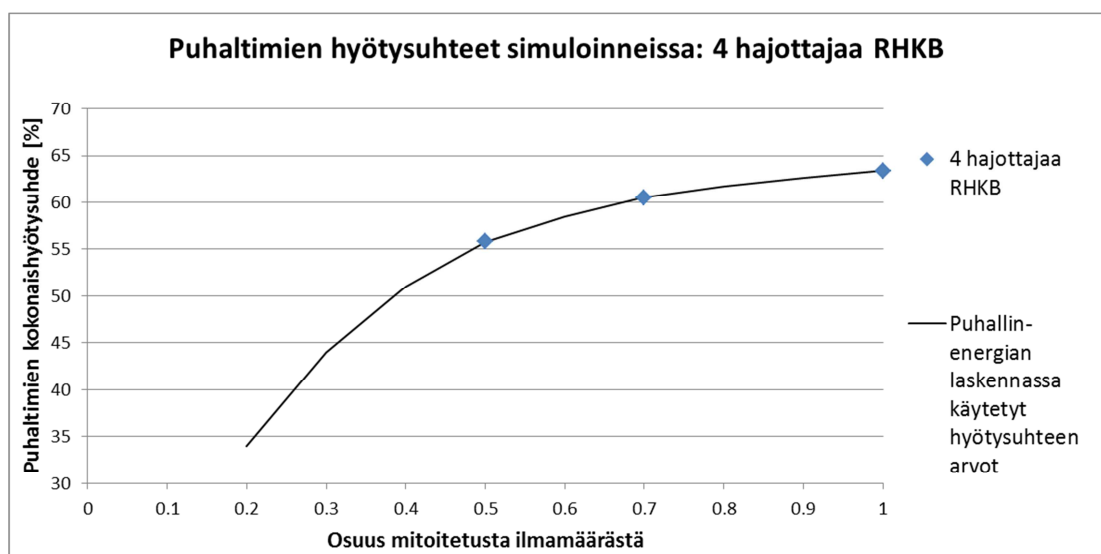
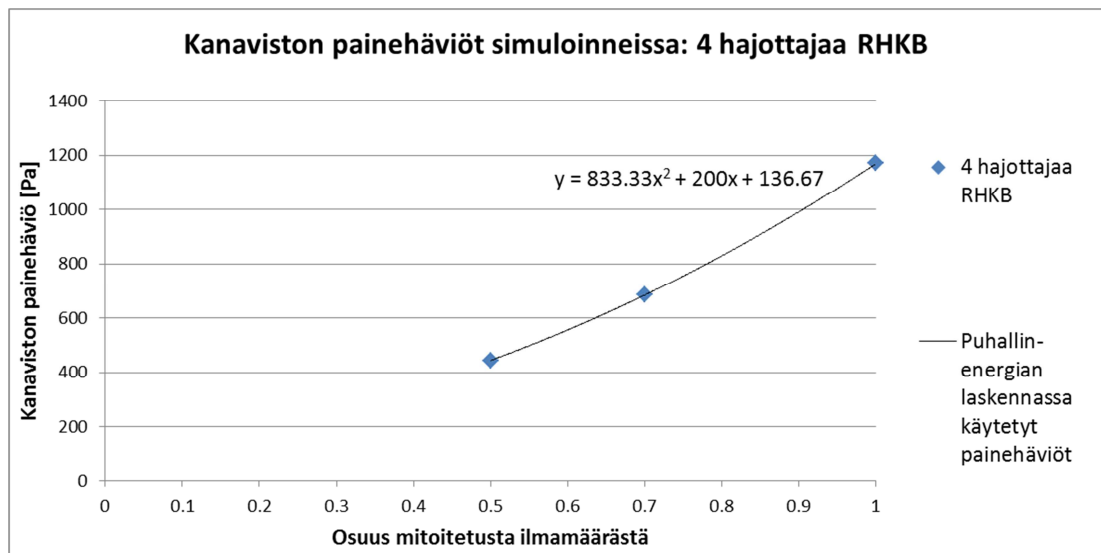
4 hajottajaa, anturi kanavassa

Simulointien tulokset: Kanaviston painehäviö		Anturin sijainti: Classroom 21	Anturin sijainti: Classroom 22	Kanaviston painehäviö		Jäte- ja raitisilmalaitteiden painehäviöt		Acon: IV-laitoksen painehäviöt ja puhaltimeiden hyötysuhteet			
%-max	m ³ /s	dp in-flow, Pa	dp out-flow, Pa	dp in-flow, Pa	dp out-flow, Pa	dp fresh air, Pa	dp exhaust, Pa	dp tulo talvi, Pa	η tulo talvi, %	dp poisto talvi, Pa	η poisto talvi, %
0.25	1.93	86	50	91	98	4	5	197	43.7	200	47.5
0.32	2.51	86	73	97	102	6	8	223	50.2	222	52.5
0.38	2.95	78	66	101	103	8	11	243	54.0	240	55.4
0.45	3.53	93	83	115	102	12	15	281	58.0	260	58.0
0.52	4.08	95	95	106	127	16	20	297	60.1	307	60.6
0.58	4.52	111	101	126	114	19	25	335	61.9	314	61.1
0.65	5.07	113	119	121	148	24	32	358	62.7	374	62.8
0.72	5.61	120	116	143	145	30	39	408	63.7	397	62.8
0.78	6.12	145	130	163	135	36	46	468	64.2	412	62.2
0.85	6.64	166	137	189	147	42	54	525	63.9	453	61.9
0.90	7.02	162	143	183	156	47	61	543	63.2	483	61.4
0.95	7.45	168	149	192	172	53	68	581	62.2	525	60.6
1.00	7.81	171	157	195	179	58	75	609	63.7	555	61.8
max			77	89							
anturi (+5 Pa)			82	94							

CAV-JÄRJESTELMÄN MALLINNUKSEN TULOKSET JA KÄYRÄT

4 hajottajaa RHKB

Simulointien tulokset: Kanaviston painehäviö				Jäte- ja raitisilma-laitteiden painehäviöt		Acon: IV-laitoksen painehäviöt ja puhaltimien hyötysuhteet					
%-max	m3/s	dp inflow, Pa	dp outflow, Pa	dp fresh air, Pa	dp exhaust, Pa	dp tulo talvi, Pa	η tulo talvi, %	dp poisto talvi, Pa	η poisto talvi, %	dp total	η
0.5	3.9	69	78	7	9	223	56	222	55.6	445	55.8
0.7	5.46	96	104	28	37	346	60.6	339	60.4	685	60.5
1	7.8	170	156	58	75	616	64.4	554	62.4	1170	63.4



PUHALLINENERGIAN LASKENTATYÖKALU, ESIMERKKITAPPAUS

Ilmavirta **2.1** m3/s
 SFP (tulo=poisto) 1.9 kW/(m3/s)
 Tehontarve yht. 4.0 kW

Ilmavirta **2.1** m3/s
 SFP (tulo=poisto) 1.8 kW/(m3/s)
 Tehontarve yht. 3.8 kW

qv %-max	Hyötysuhteet			Painehäviöt yhteensä			Sähkötehot yhteensä			SFP-luvut yhteensä			Käyttöprofiili: osuus koko käyttöajasta 8760 h/a	Energiantarve koko aika			CAV-laitos, normaali mitoitus						
	AHU η	DUCT η	OPT η	AHU dp Pa	DUCT dp Pa	OPT dp Pa	AHU P kW	DUCT P kW	OPT P kW	AHU SFP	DUCT SFP	OPT SFP		AHU Q kWh/a	DUCT Q kWh/a	OPT Q kWh/a	qv %-max	η	dp Pa	P kW	SFP	Käyttö- profiili	kWh/a
0.2	0.42	0.41	0.40	524	367	305	0.52	0.38	0.32	1.2	0.9	0.8	0.185	849	608	518	0.2	0.34	210	0.25	0.6	0.000	0
0.3	0.51	0.49	0.48	576	436	376	0.72	0.56	0.49	1.1	0.9	0.8	0.069	436	338	299	0.3	0.44	272	0.38	0.6	0.000	0
0.4	0.57	0.55	0.55	636	515	457	0.95	0.78	0.70	1.1	0.9	0.8	0.043	360	297	268	0.4	0.51	350	0.56	0.7	0.000	0
0.5	0.60	0.59	0.58	703	603	548	1.23	1.07	0.99	1.2	1.0	0.9	0.042	456	397	365	0.5	0.56	445	0.82	0.8	0.179	1282
0.6	0.62	0.62	0.61	778	700	648	1.57	1.43	1.34	1.2	1.1	1.1	0.040	554	506	472	0.6	0.59	557	1.17	1.0	0.000	0
0.7	0.63	0.63	0.62	860	807	758	2.01	1.90	1.80	1.4	1.3	1.2	0.043	754	713	675	0.7	0.61	685	1.63	1.1	0.000	0
0.8	0.63	0.63	0.62	949	923	878	2.55	2.48	2.38	1.5	1.5	1.4	0.045	1007	980	940	0.8	0.62	830	2.21	1.3	0.000	0
0.9	0.62	0.62	0.62	1046	1049	1008	3.20	3.20	3.10	1.7	1.7	1.6	0.060	1686	1686	1633	0.9	0.63	992	2.92	1.6	0.000	0
1.0	0.62	0.62	0.62	1150	1184	1147	3.91	4.01	3.92	1.9	1.9	1.9	0.056	1911	1961	1915	1.0	0.63	1170	3.78	1.8	0.238	7887
													0.5838	8012	7486	7086	yhteensä				0.42	9170	
														100.0	93.4	88.4	% AHUsta						
														87.4	81.6	77.3	% CAVsta						

