

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Talotekniikan koulutusohjelma

Marko Ojala

Hyötysuhteen vaikutus SFP-lukuun eri toimintapisteissä

Insinööriyö 1.12.2010

Ohjaava opettaja: Yliopettaja Torsti Viilo

Tekijä	Marko Ojala
Otsikko	Hyötysuhteen vaikutus SFP-lukuun eri toimintapisteissä
Sivumäärä	97 sivua
Koulutusohjelma	talotekniikka
Tutkinto	insinööri (AMK)
Ohjaava opettaja	yliopettaja Torsti Viilo
<p>Työssä perehdytään SFP-lukuun eli rakennuksen ilmanvaihdon tehokkuuden määrittämiseen suhteessa sen käyttämään sähkötehoon.</p> <p>Tarkoituksena oli selvittää erään pääkaupunkiseudulla sijaitsevan koulun yhden ilmanvaihtokoneen SFP-luku sen eri käyttönopeuksilla sekä selvittää, kuinka siihen liittyvien laitteiden hyötysuhteet vaikuttavat tulokseen. Työhön kuului myös pohtia, olisiko tällaisen työn teettäminen oppilastyönä mielekäästä ja kuinka se olisi käytännössä järkevä toteuttaa.</p> <p>Mittaukset suoritettiin sähkötehomittarilla, joka kykenee mittaamaan tehon kolmesta vaiheesta samanaikaisesti sekä ilmanpainemittarilla käyttäen viiden pisteen menetelmää. Mittaukset saatiin tehtyä vain yhdellä ilmanvaihdon nopeudella, koska rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän automatiikka ei ollut kunnossa. Eri toimintapisteiden tulokset selvitettiin laskemalla.</p> <p>Saatujen mittaus- ja laskutulosten perusteella tutkittu ilmanvaihtolaitteisto toteuttaa helposti asetetut vaatimukset. Tulosten perusteella voidaan myös todeta, että SFP-luvun osoittama sähkötehokkuus paranee ilmavirran pienentyessä, vaikka laitteiden hyötysuhteet huononevat.</p> <p>Tällaisen työn teettäminen oppilastyönä on järkevää, koska siinä joudutaan soveltamaan sekä sähkö- että ilmanvaihtopuolen opintoja.</p>	
Hakusanat	SFP-luku, sähköteho, ilmavirta, painehäviö, hyötysuhde

Author Title	Marko Ojala The effect of efficiency on SFP at in different utilization rates.
Number of Pages Date	97 1st December 2010
Degree Programme	Building Services Engineering
Degree	Bachelor of Engineering
Supervisor	Torsti Viilo, Principal Lecturer
<p>This study explored the Specific Fan Power, i.e. the definition of ventilation efficiency in buildings in proportion to the energy used.</p> <p>The target was to calculate the SFP value for a ventilation machine in a school in the Helsinki metropolitan area, as the unit was run at different utilization rates. Another target was to determine the effects of the efficiencies of the system in relation to the SFP value. Furthermore, it was discussed whether this kind of study would be reasonable and practically feasible for a student to do.</p> <p>The measurements were done with a power metre capable of three-phase power measurements and an air pressure metre with the five point-method. In practice, it was only possible to conduct the measurements at one speed because the building automation did not function. The results for other operating points were then calculated.</p> <p>The results show that the tested ventilation machine achieves the requirements easily. The results also affirm that the energy efficiency indicated by the SFP value improves as the airflow decreases, despite the fact that the system efficiency deteriorates.</p> <p>To have this kind of a study conducted as a final year project proved to be reasonable, because the student needs to apply both the electrical and ventilation theory studies. To avoid any risks, the use of special appliances, planned for this purpose, is recommended.</p>	
Keywords	SFP, three-phase power, air pressure, air current, efficiency, pressure loss

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenteet, käsitteet ja määritelmät

1	Johdanto	8
1.1	Tausta	8
1.2	Energian kulutuksen jakautuminen	9
1.3	Työn tarkoitus	11
2	Ilmanvaihto ja energia	12
2.1	Ilmanvaihdon muodot	12
2.2	Miksi ilmanvaihdon suunnittelu on tärkeää	17
2.3	Energiatehokas ilmanvaihto	19
3	SFP-luku ja sen määrittäminen	28
3.1	SFP -luku	28
3.2	SFP-luvun määrittely	30
3.2.1	SFP-luvun määrittäminen teoreettisesti laskemalla	31
3.2.2	SFP-luvun määrittäminen mittaamalla	32
3.2.2.1	Ilmavirran mittaus	33
3.2.2.2	Sähkötehon mittaus	34
3.2.3	Kaavat	38
3.2.4	Liian suuri SFP-luku	41
4	SFP-luvun määrittäminen mittausten avulla	42
4.1	Mitattavan ilmanvaihtojärjestelmän esittely	42
4.2	Mittausjärjestelyt	43
4.2.1	Sähkötehon mittaus	44
4.2.2	Ilmanpainehäviön mittaus	46
4.3	Mittaustulokset	49
4.4	Laskelmat	52
4.4.1	Virhetarkastelu	55
4.4.2	Teoreettinen tarkastelu	57
5	Tulosten analysointi	65
6	Työn teettäminen oppilastyönä	71
7	Yhteenveto	72

Liitteet

- Liite 1: Puhaltimen liitäntä kanavaan
- Liite 2: Sähkönsyötössä esiintyvät yliaallot
- Liite 3: Ilmavirran mittausmenetelmät
- Liite 4: Ilmavirran mittauksen tarkkuuden arviointi
- Liite 5: Pyörivän LTO-kiekon puhtaaksipuhallus
- Liite 6: Ilmanvaihtokojeiston T75 laitteisto
- Liite 7: RK402-jakokeskuksen pääkaavio
- Liite 8: Ilmanvaihtokojeiston T75 ohjauskaavio
- Liite 9: Ilmanvaihtokoneen T75 tekniset tiedot

Lyhenteet, käsitteet ja määritelmät

direktiivi	Euroopan unionin jäsenmailleen tarkoitettu lainsäädäntöohje
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i> , eli sähkömagneettinen yhteensopivuus, jolla tarkoitetaan kykyä toimia moitteetta sähkömagneettisessa ympäristössä
epäharmoninen yliaalto	Häiriö joka ei ole sähköverkon perustajuuden kerrannainen
ET-luku	Vertailukelpoinen energiatehokkuusluku
harmoninen yliaalto	Sähköverkon perustajuuden kerrannainen häiriö
induktiovariaattori	Magneetikenttään perustuva portaaton vaihteisto
IVL	Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmä, jossa ilmanvaihto huolehtii myös rakennuksen lämmityksestä
LED-lamppu	Lamppu, joka on toteutettu loistediodeilla eli ledeillä (<i>Light-Emitting Diode</i>). Ne ovat puolijohdekomponentteja jotka säteilevät valoa, kun niiden läpi johdetaan sähkövirta.
loisteho	Jännitteen ja virran välisestä vaihe-erosta syntyvä ero pätö- ja näennäistehon välillä eli loisteho ² = näennäisteho ² - pätöteho ²
LVI-järjestelmä	Lämpö-, vesi- ja ilmajärjestelmä
näennäisteho	Vaihtosähköverkossa se teho, joka tarvitaan sähköverkosta, oli kuorma lineaarinen tai epälineaarinen eli näennäisteho ² = pätöteho ² + loisteho ² + säröteho ²
PDS-käyttö	Power Drive System eli sähköinen järjestelmä, joka on EMC-suojattu
puhallinkonvektori	Ilmanjäähdytin, joka imee ja suodattaa huoneilmaa, kierrättää sen jäähdytyspatterin lamellien läpi ja puhaltaa jäähdytetyn ilman takaisin huonetilaan.
puhtaaksipuhallus	Ominaisuus pyörivässä LTO:ssa, joka pitää pyörivän lämmönsiirtokennoston puhtaana pölystä
pyörivä-LTO	Laite, jossa on pyörivä lämmön talteenottokeho

pätöteho	Sähkötehon se osa, joka saadaan sähkölaitteissa käytettyä hyödyksi
RakMK C3	Suomen Rakentamismääräyskokoelma osa C3, joka sisältää Rakennuksen lämmöneristyksen määräykset
RakMK D2	Suomen Rakentamismääräyskokoelma osa D2, joka sisältää Rakennusten sisäilmaston ja ilmanvaihdon määräykset ja ohjeet
RakMK D3	Suomen Rakentamismääräyskokoelma D3, joka sisältää Rakennusten energiatehokkuuden ja siihen liittyvät määräykset sekä ohjeet
SFP-luku	Ilmanvaihdon sähköenergian tehokkuusluku, joka kertoo sen sähkötehon määrän, joka tarvitaan siirtämään tietty ilmamäärä yhden sekunnin aikana. Yksikkönä on kW/m ³ /s.
särövirta	Virran sinimuotoiseen aallon ja virran yliaallon summa
säröteho	Vaihtosähköverkossa se tehon osa, joka syntyy yliaaltojen vaikutuksesta eli säröteho ² = näennäisteho ² – pätöteho ² - loisteho ²
taajuusmuuttaja	Sähkölaitte, jolla voidaan muuttaa moottorille syötettävää jännitteen taajuutta portaattomasti ja siten säätää moottorin akselin pyörimisnopeutta
TN-S	Kolmivaiheinen vaihtosähköjärjestelmä, jossa on erillinen nolla- ja suojajohdin
yliaalto	Epälineaarisen kuorman sykäyksellisesti ottamasta virrasta johtuva häiriö sähköverkossa

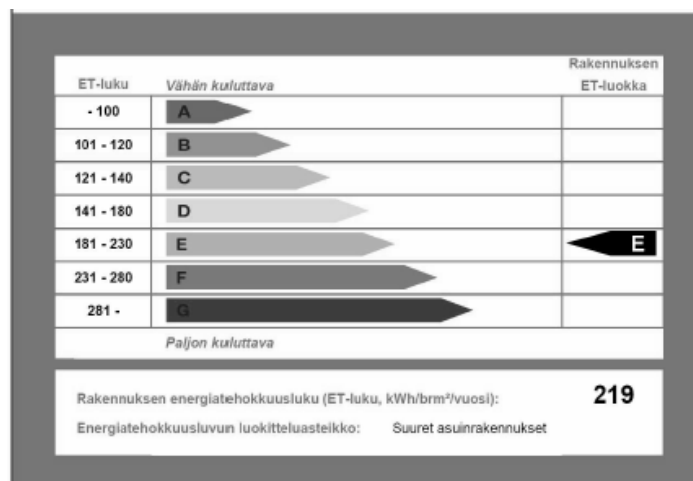
1 Johdanto

1.1 Tausta

Teollisissa maissa on totuttu halpaan energiaan, joten sen tehokkaaseen käyttöön ei ole panostettu eikä sitä ole nähty edes tarpeelliseksi. Viimeisten vuosien aikana energian tuottajaintojen kehitys sekä energian kulutuksen verotus on kasvanut huomattavasti enemmän, kuin yleinen hintataso [1]. Tätä suuntausta on perusteltu energiankulutuksen jatkuvalla kasvulla, öljyvarojen loppumisella ja ilmaston muutoksella sekä sen vaikutuksesta aiheutuvilla ympäristötuhoilla.

Energiankulutuksen hillitsemiseksi on laadittu tapoja, joilla voidaan vertailla samaan tuoteryhmään ja kategoriaan liittyvien laitteiden energiankulutusta. Näin kuluttajat voivat käyttää halutessaan energiankulutustietoa kodinkoneitaitai jopa asuntoja hankkiessaan. Samalla viranomaisille on muodostunut tehokas keino ohjata energiankulutusta mm. rakentamisessa.

Kuva 1 esittää asuinrakennuksen energiatehokkuusluokitusta, jossa kuvan rakennus kuuluu suuriin asuinrakennuksiin ja sen energiankulutus on 219 kWh/brm²/vuosi. Tällä energiankulutuksella rakennus kuuluu energialuokkaan E. Kaikki rakennukset, jotka kuluttavat 181—230 kWh/brm²/vuosi, kuuluvat tähän samaan luokkaan.



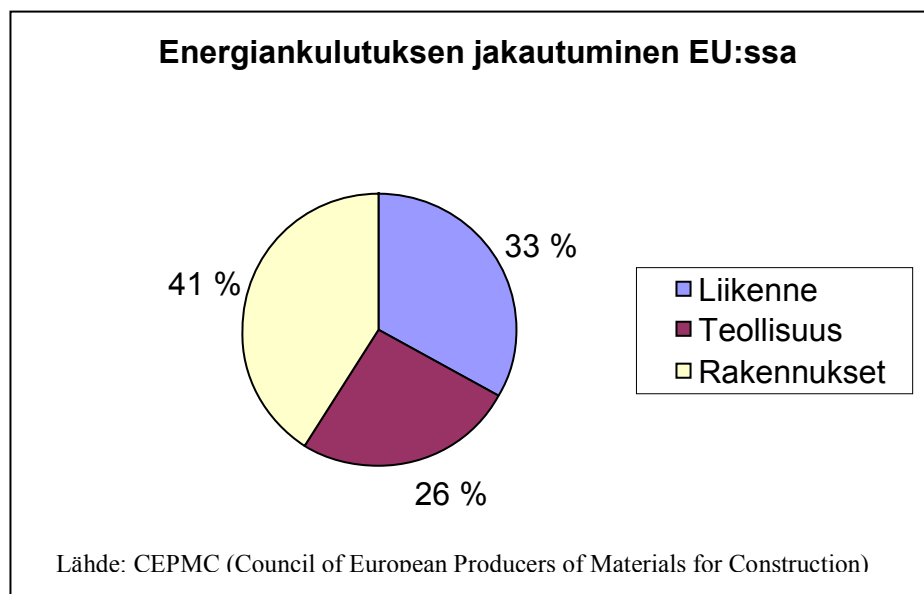
Kuva 1. Energiankulutusluokat, suuret rakennukset [2]

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa annetaan monia rakennusteknisiä määräyksiä, jotka tulee toteuttaa rakentamisessa. Tällä halutaan varmistaa, että rakennusten energiatehokkuus täyttää asetetut minimivaatimukset.

1.2 Energian kulutuksen jakautuminen

Kasuvat energiakustannukset näkyvät suoraan teollisuuden käyttämän energian ja liikenteen tarvitseman polttoaineen hinnoissa sekä rakennusten käyttökustannuksissa. Nämä kaikki yhdessä vaikuttavat tuotteiden ja palveluiden kuluttajahintoihin.

Kuvassa 2 on Euroopan unionin jäsenvaltioiden energiakulutuksen jakauma. Tästä näkee hyvin, että energiasta käytetään 41 % rakennuksissa, 33 % kuluu liikenteessä ja teollisuus kuluttaa loput 26 %. [3]



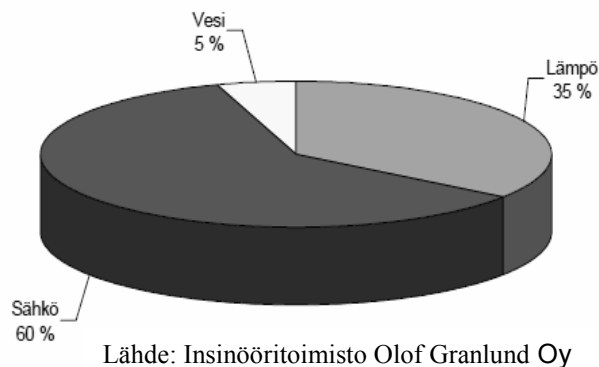
Kuva 2. EU:n energiakulutuksen jakaantuminen vuonna 2006

Euroopan unionissa energian kulutuksen vähentämiseksi on laadittu uusia direktiivejä, jotka antavat määräyksiä jäsenvaltioille rajoittaa energiankäyttöä. Tällaisten päätösten johdosta on esimerkiksi rakennusten energiakulutuksen leikkaamiseksi tehty uusia rakentamismääräyksiä, jotka ohjaavat energiatehokkaampaan rakentamiseen.

Pyrkimyksenä on uusien rakennusten käyttökustannuksien pudottaminen ja sitä kautta myös kokonaisenergiankulutuksen pienentäminen.

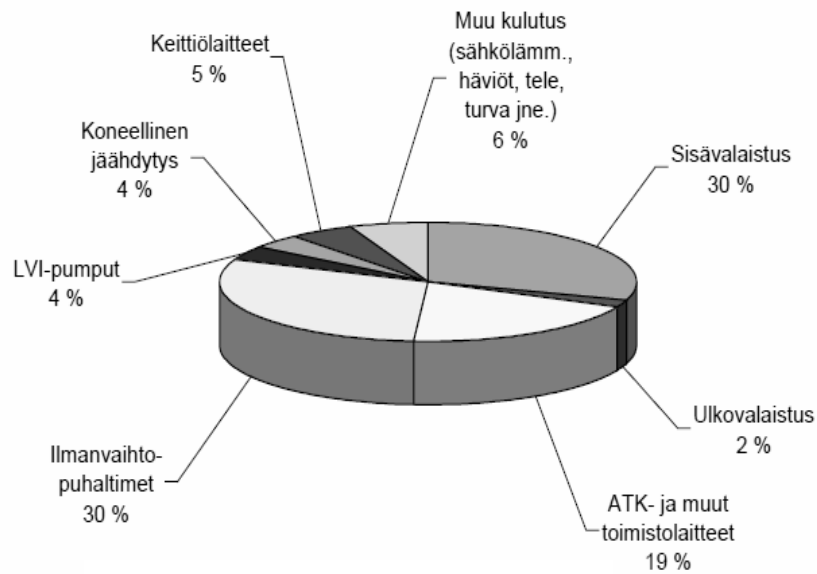
Suomen Rakentamismääräyskokoelmaa (RakMK) on päivitetty viimeksi vuoden 2010 alussa, jolloin tehtiin muutoksia osiin C3 (Rakennuksen lämmöneristys, määräykset), D2 (Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet) ja D3 (Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet). Seuraava päivitys rakennusmääräyksiin on tulossa 2012, jolloin energiankulutuksen vaatimukset kiristyvät entisestään.

Rakennuksissa energiaa kuluu veteen, lämmitykseen ja sähkөөn. Eri rakennustyyppit kuluttavat energiamuotoja eri suhteessa. Kuva 3 esittää tyypillisen toimistorakennuksen käyttökustannusten jakaantumisen. Siitä nähdään, että valtaosa kustannuksista eli 60 % menee sähkөөn, 35 % lämpөөn ja loput 5 % veteen.



Kuva 3. Energian kulutus toimistorakennuksissa [4].

Kuvassa 4 on tyypillisen toimistorakennuksen sähköenergian kulutus jaettu osiin. Suurin osa sähköstä kuluu sisävalaistukseen (30 %) sekä ilmanvaihdon puhaltimiin (30 %). Kolmanneksi suurin kulutusryhmä on ATK- ja muut toimistolaitteet (19 %).



Lähde: Insinööritoimisto Olof Granlund Oy

Kuva 4. Sähkönkulutus toimistorakennuksessa.[4]

Insinööritoimisto Olof Granlund Oy:n tekemän tutkimuksen mukaan toimistorakennuksien sähkönkulutus on kasvanut 20 % sekä 80- että 90-luvuilla ja jatkaa kasvuaan edelleen. Valaistukseen kulutettu energiamäärä on tosin vähentynyt koko ajan ja se tulee vähentymään jatkossakin kun siirrytään käyttämään enenevässä määrin energiansäästölamppuja sekä LED-lamppuja.

Ilmanvaihtopuhaltimet tulevat siis jäämään toimistorakennusten suurimmaksi sähköenergian kuluttajaryhmäksi.

1.3 Työn tarkoitus

Opinnäytetyössä oli tarkoitus selvittää, täyttääkö erään pääkaupunkiseudulla sijaitsevan koulun yhden ilmanvaihtopiirin koneet Suomen RakMK:ssa D2 asetetun sähkönkulutuksen vaatimuksen. Tarkoitus oli myös tutkia pysyykö SFP-luku em. vaatimuksissa ilmanvaihdon toimintapistettä muutettaessa, jolloin ilmanvaihdon eri komponenttien hyötysuhteet eivät ole enää ideaaliset. Lisäksi tuli pohtia, olisiko vastaavan työn teettäminen oppilastyönä mielekästä ja miten se olisi järkevä toteuttaa.

2 Ilmanvaihto ja energia

2.1 Ilmanvaihdon muodot

- Painovoimainen poisto

Ensimmäinen tapa jolla rakennusten ilmanvaihto toteutettiin. Tätä ilmanvaihtojärjestelmää on edelleen kehitetty vastaamaan nykyisiä energiatehokkuusvaatimuksia.

Ilmanvaihto perustuu termiseen voimaan, joka syntyy sisä ja ulkoilman lämpötilaerosta syntyneestä paine-erosta. Lämmin sisäilma pyrkii kevyempänä rakennuksesta ulos rakennuksen katolla olevan poistohormin kautta ja raskaampi viileä ulkoilma työntyy rakennuksen sisään erillisistä ilmanvaihtohormeista ja muista rakennuksen vaipassa olevista raoista.

Termisen voiman suuruuteen vaikuttaa ulko- ja sisäilman lämpötilaero (mitä suurempi tämä ero on sitä voimakkaampi termisen voima) sekä rakennuksen korkeus (suurempi voima mitä korkeampi rakennus). Myös tuulen nopeus lisää voiman suuruutta. Ilmanvaihtoa voidaan tehostaa myös ikkunoita avaamalla.

Painovoimaisen ilmanvaihdon hyödyt:

- äänettömyys
- vähäinen tai olematon sähkönkäyttö (poistopuhallin)
- lähes huoltovapaa
- ei ilmastointikonetta/konehuonetta
- ei vaakakanavoiteja.

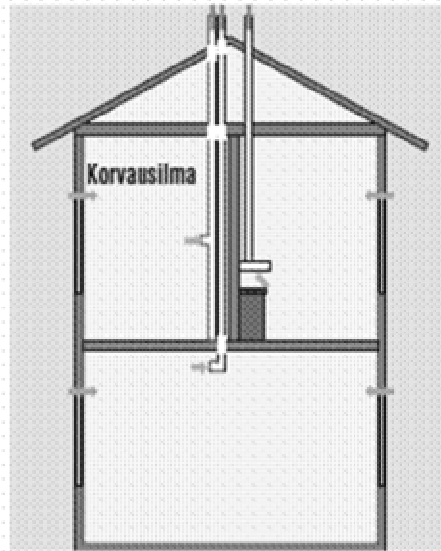
Painovoimaisen ilmanvaihdon haitat:

- riittävää ilmanvaihtoa ei voida taata kaikissa olosuhteissa
 - ilmanvaihdon energiatalous heikko (ei lämmöntalteenottoa, joten RakMK D2:n määräämä energiansäästö tulee toteuttaa muulla tavalla)
 - tuulisissa olosuhteissa yli-ilmanvaihtoa ja vetoisuutta
 - vaatii vesikiertoisen patterilämmityksen ja tuloilmaventtiilien sijoituksen niiden yläpuolelle (muutoin ilmenee vetoisuutta tai sähköpattereita käytettäessä energiankulutus lisääntyy)
 - ilman puhtautta ei voida taata. [5; 6]
- Painovoimainen poisto tehostettuna liesituulettimella

Parannusta edelliseen on ruuanlaitossa syntyvien ilman epäpuhtauksien parempi poistuminen huoneilmasta.

Saattaa aiheuttaa ilman virtauksen kääntymisen muissa poistoilmahormeissa, jolloin ilmanvaihto ei toteudu tarkoituksenmukaisesti. Tämän välttämiseksi on varmistettava riittävän korvausilman saanti.

Kuvassa 5 on esitetty periaatekuva painovoimaisesta ilmanvaihdosta, jossa liesituuletin on mukana.



Kuva 5. Painovoimainen ilmanvaihto + liesituuletin [7]

- Koneellinen poisto

Huoneilmasta imetään koneellisesti poistoilma ja korvausilma tulee raitisilmaventtiileistä ja rakennuksen vaipan vuotokohdista.

Parannuksia edellisiin tapoihin:

- lämpötilat ja tuuliolosuhteet eivät vaikuta ilmanvaihtoon
- ilmavirtaus on säädettävissä ja se pysyy vakiona asetetussa arvossaan.

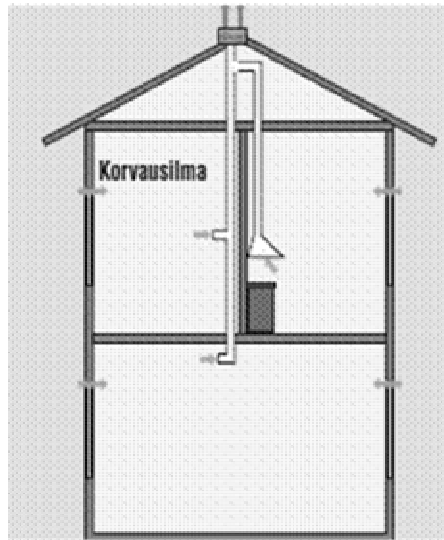
Haitat

- ei poista vedontunnetta, koska tuloilmaa ei ole lämmitetty
- ilman puhtautta ei voida taata.

- Koneellinen poisto tehostettuna liesituulettimella

Ei muuta parannusta edelliseen, kuin parempi ruuanlaitossa syntyvien ilman epäpuhtauksien poisto. Tässäkin vaihtoehdossa liesituulettimen käyttö saattaa kääntää ilmavirran suunnan muissa poistoilmaventtiileissä.

Kuvassa 6 on esitetty periaatekuva koneellisesta poistoilmanvaihdosta, jossa on lisäksi liesituuletin.

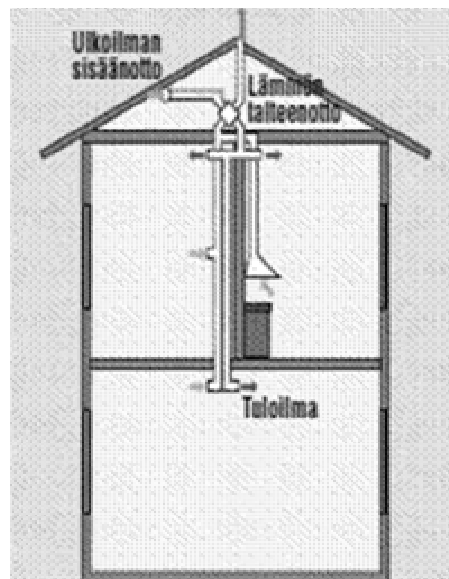


Kuva 6. Koneellinen poistoilmanvaihto + liesituuletin [7]

- Koneellinen ilmanvaihto sisään ja ulos lisättynä lämmön talteenotolla (LTO)

Tässä vaihtoehdossa poisto- ja tuloilma siirretään koneellisesti. Ilmavirrat kulkevat suodattimien läpi puhdistuen ilmavirtojen epäpuhtaudet. Sisäilma johdetaan lämmön siirtimelle, joka lämmittää/viilentää ulkoa tulevan raittiin ilman. Näin saadaan lämpöenergian kannalta puhdas ja raitis ulkoilma energiatehokkaasti rakennuksen sisään. Ilmanvaihdon tehokkuutta sähköenergian kannalta pohditaan myöhemmin.

Kuvassa 7 on esitetty periaatekuva koneellisesta tulo- ja poistoilmanvaihdosta.



Kuva 7. Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto + LTO [7]

Tämän vaihtoehdon hyödyt:

- Poisto- ja tuloilmavirrat ovat säädettävissä huonekohtaisesti
- Ei vedontunnetta, koska tuloilma on lämmitetty lähelle huoneilman lämpötilaa
- Tuloilma on puhdasta (RakMK D2:n vaatimukset täyttävää), koska sisään tuleva ilma voidaan suodattaa tehokkaammalla suodattimella, kuin edellisissä vaihtoehdoissa.

Tämän vaihtoehdon haitat:

- Laitteiden asennus vaatii enemmän tilaa
- Ratkaisu on kalliimpi.

- Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmä (IVL)

Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmä on tarkoitettu matalaenergia ja passiivitaloihin. Tällaisia kohteita voivat olla pientalot, rivitalot, kerrostalot, koulu- sekä toimistorakennukset.

Lisäksi se sisältää pieniä määriä muita kaasuja kuten hiilidioksidia (0,034 %) ja argonia (0,934 %).

Ilmassa esiintyvistä kaasumaisista epäpuhtauksista tavallisimpia ovat savu ja typen sekä rikin oksidit. Lisäksi muita yleisiä epäpuhtauksia ovat otsoni (O₃), ammoniakki (NH₃), metaani (CH₄) sekä muut hiilivedyt sekä maaperästä purkautuva radon (Rn). Näiden lisäksi ilmassa esiintyy hiukkasepäpuhtauksia, kuten hiili-, asbesti, hiekka-, hilse- ja multahiukkasia, siitepölyä, itiöitä, pölyä, bakteereja sekä homeitiöitä. [9]

Iso osa ihmisistä viettää rakennusten sisällä suurimman osan elämästään, jolloin he siis hengittävät rakennuksien sisäilmaa. Jos rakennuksen ilmanvaihto ei toimi kunnolla, ihmisten riski sairastua hengityselinsairauksiin kasvaa, koska sisäilmaan kertyy ulkoa epäpuhtauksia. Myös rakennuksen elinkaari voi tästä syystä lyhentyä, johtuen pääasiassa kosteuden lisääntymisestä.

Ilmanvaihdon suunnittelun lähtökohtana on ensisijaisesti rakennuksen käyttötarkoitus. Rakennuksiin valitaan käyttötarkoitusta vastaava ilmanvaihtolaitteisto.

Kun haluttu ilmanvaihtotapa on tiedossa, se tulee suunnitella ja toteuttaa hyvin. Samankin ilmanvaihtotavan voi toteuttaa monella eri tavalla. Huonosti suunnitellun käyttökustannukset voivat olla jopa keksikertaiset hyvin suunniteltuun vaihtoehtoon verrattuna. Myös huonosti toteutettu ilmanvaihto lisää huomattavasti käyttökustannuksia. [4]

Ei ole siis yhdentekevää minkälainen ilmanvaihto rakennuksissa on ja miten ne on suunniteltu sekä toteutettu. Tästä syystä rakennusviranomaiset ovat laatineet ohjeita mitä tulee noudattaa.

Suomen RakMK:n osassa D2 asetetaan Rakennusten sisäilmastolle ja ilmanvaihdolle seuraavia vaatimuksia:

”Rakennuksen sisäilman tulee olla kaikissa tavanomaisissa sääoloissa ja käyttötilanteissa terveellinen, turvallinen ja viihtyisä.” [10]

Tämä tarkoittaa seuraavaa:

- Rakennuksen oleskelutiloihin ei saa kerääntyä terveydelle haitallisia määriä kaasuja, hiukkasia, mikrobeja eikä viihtyisyyttä alentavia hajuja
- Sisälämpötilaa ja ilmankosteutta voidaan ylläpitää energiatehokkaasti
- Ilmanvaihdon toteuttaminen pitää säilyttää viihtyisät ääniolosuhteet
- Sään vaihtelut tai rakennuksen tavanomainen käyttö ei saa heikentää ilmanvaihtoa tai muuttaa merkittävästi huoneiden ilmanpaineita. [10]

”Rakennuksen ilmanvaihto on toteutettava energiatehokkaasti tinkimättä terveellisestä, turvallisesta ja viihtyisästä sisäilmastosta.” [10]

Tämä tarkoittaa seuraavaa:

- Koneelliset ilmanvaihtojärjestelmät eivät saa kuluttaa liikaa energiaa (koneellinen tulo- ja poistoilmajärjestelmä saa kuluttaa enintään 2,5 kW/(m³/s) ja koneellinen poistoilmajärjestelmä saa kuluttaa enintään 1 kW/(m³/s))
- Ilmanvaihdon mukana poistuva energiamäärä, joka on 45 % sisäilman ja ulkoilman erotuksesta, on korvattava joko lämmön talteenotolla tai muulla tavoin. [10]

2.3 Energiatehokas ilmanvaihto

Puhuttaessa rakennuksen energiatehokkaasta ilmanvaihdosta täytyy sen suunnittelussa huomioida kaikki se energia, jolla tarvittavan suuri ilmavirta saadaan kulkemaan ilmanvaihtohormeissa. Tämän lisäksi on huomioitava poistoilman mukanaan kuljettaman lämpöenergian määrä sekä ilmanvaihdon käyttöaika ja ohjaus. Kun kaikki

tämä on huomioitu suunnittelussa ja sen toteuttamisessa saavutetaan, energiatehokas ilmanvaihto.

Koska tässä työssä perehdytään vain ilmanvaihdon sähköenergian tehokkaaseen käyttöön, lämpöenergia jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Seuraavaksi paneudutaan tarkemmin asioihin, jotka vaikuttavat ilmanvaihdon sähkönkulutukseen:

- Ilmavirta
 - pieni
 - suuri
 - vakio
 - vaihteleva

Kun ilmavirta on pieni, pysyy ilmanvaihtokanavan painehäviöt pienenä ja äänitekniset ongelmat hallittavissa. Tällöin myös sähkönkulutus on pieni. Mikäli ilmavirta on suuri, aiheuttaa se päinvastaisen tilanteen.

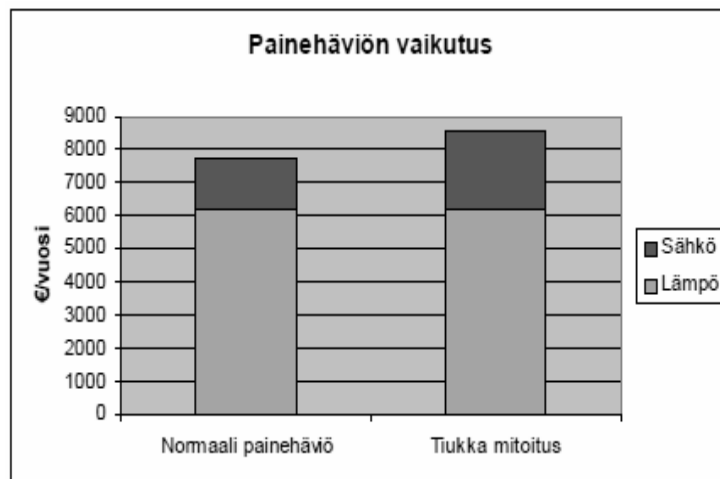
Rakennuksessa, jossa käyttötilanteet vaihtelevat, on järkevää laittaa ilmanvaihtojärjestelmä, jonka ilmavirran nopeutta voidaan ohjata käyttötilanteen mukaan. Tässä tapauksessa energiaa säästyy verrattuna vakionopeudella pyörivään ilmanvaihtoon (ks. kohta Käyntiaika).

- Puhaltimen paineenkorotus
 - Ilmanvaihtokoneen sisäinen painehäviö:
 - koneen häviöt
 - liitänthäviöt (puhaltimen liitos koteloonsa).
 - Ilmanvaihtokoneen ulkoinen painehäviö:
 - liitänthäviöt (koneen ja kanavan välinen liitos)
 - kanavistohäviöt (kanavan haarat, mutkat, supistukset ja laajennukset sekä kanaviston epätasapaino lisäävät painehäviöitä)

- ulkosäleikkö (poisto- ja tuloilma)
- päätelaitteet (tulo- ja poistoilmaventtiilit)
- häiriöt (mm. ilmansuodattimien tukkeutuminen).

Ilmanvaihtojärjestelmän sähkönkulutus kasvaa dramaattisesti, mikäli ilmanvaihtolaitteistoa ei suunnitella kokonaisuutena ja oteta kaikkia em. asioita huomioon. Esimerkkinä ilmanvaihtokoneen liitäntä kanavaan: asennus on mahdollista toteuttaa monilla eri tavoin, ks. liite 1, mutta epäedullisesti asennettuna se aiheuttaa suuremman painehäviön, jolloin käyttökustannukset nousevat. Standardi SFS 5148 ohjeistaa kuinka ilmanvaihtokone tulee liittää kanavistoon, jolloin painehäviöt saadaan tältä osin optimoitua.

Kuvassa 9 on esitetty käyttökustannusten vertailu hyvin suunnitellun ja tiukasti suunnitellun järjestelmän välillä. Tiukasti suunnitellussa mallissa on suurempi painehäviö, kuin normaalimitoituksessa. Tiukka mitoitus tarkoittaa esimerkiksi pienempää ilmanvaihtokanavaa, kuin on käytetty normaalissa mitoituksessa. [4;14]



Kuva 9. Paineenkorotuksen vaikutus käyttökustannuksiin [4]

- Järjestelmän hyötysuhteet
 - puhallin
 - voimansiirtotapa (mm. kiilahihnakäyttö)
 - moottori
 - säätötapa (mm. taajuusmuuttaja).

Puhaltimen hyötysuhde kertoo kuinka, hyvin puhaltimen akselille tuotu teho saadaan muutettua ilmavirraksi. Hyötysuhde vaihtelee ilmavirran ja paine-eron funktiona. Ilmanvaihdossa tyypillisesti käytetyn radiaalipuhaltimen hyötysuhde on 40—80 % riippuen puhaltimessa käytettävien siipien mallista. Siipimallien valinta perustuu mm. siirrettävän ilman puhtaudesta ja ilmavirran säätötarpeesta. [13]

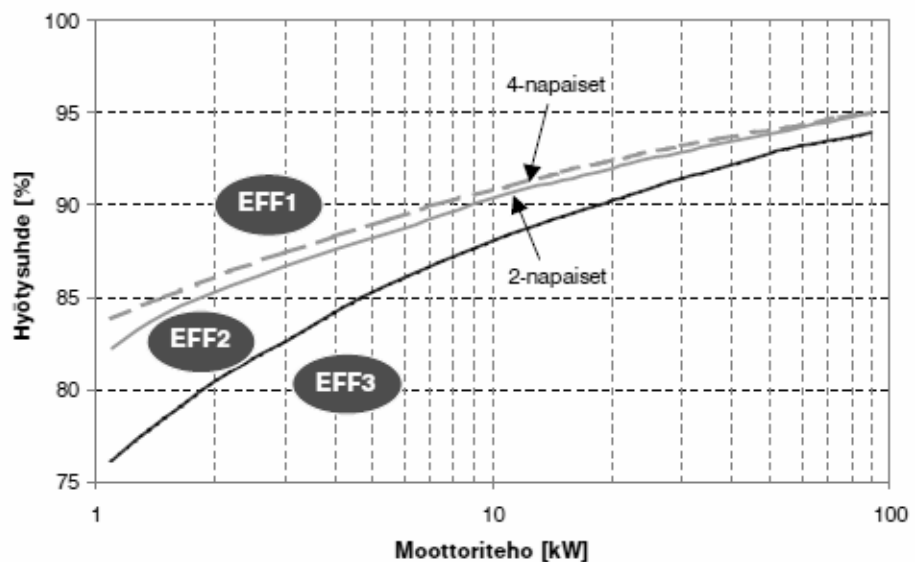
Voimansiirron eli kiilahihnakäytön hyötysuhteesta nähdään, kuinka hyvin moottorin akselilta saadaan teho siirrettyä puhaltimen akselille. Tässä huomioidaan esim. kiila- tai lattahihnan käyttöön, hydrauliseen kytkimeen tai induktiovariaattoriin kuluva energia. Hyötysuhde on tyypillisesti 70—85 %. Puhallin voidaan kytkeä myös suoraan moottorin akselille, jolloin voimansiirto on häviötön. Tällöin saatetaan menettää puhaltimen kierrosnopeuden säätömahdollisuus. Jotkin valmistajat ovat saaneet kehitettyä puhallinmoottori - järjestelmän, jossa on mukana kierrosluvun säädin. Tämä mahdollistaa siis kierrosnopeuden säädön ilman kiilahihnaa, jolloin myös ilmanvaihtolaitteiston kokonaishyötysuhde paranee.

Moottorin hyötysuhteella tarkoitetaan sitä, kuinka hyvin sähkömoottori muuttaa siihen syötetyn sähköenergian moottorin mekaaniseksi energiaksi eli akselin pyörimiseksi. Hyötysuhteeseen vaikuttaa moottorin rakenteelliset seikat:

- laakeroinnin ja tuulettimen koko
- moottorin sisällä olevan staattorin käämitys ja siihen käytetyn kuparilangan laatu

- staattorin rakentamiseen käytettyjen rautalevyjen laatu.

Sähkömoottorin rakenteesta aiheutuvien häviöiden optimoinnilla kyetään parantamaan isojen ja keskikokoisten ilmanvaihtokoneissa käytettävien moottoreiden hyötysuhdetta mutta pienempien moottoreiden hyötysuhteen parantaminen on haastavaa, niiden pienen fyysisen koon takia. Tästä voikin vetää johtopäätöksen, että mitä suurempi oikosulkumoottori on, sitä parempaan hyötysuhteeseen päästään. Moottorit luokitellaan hyötysuhteen mukaan eri luokkiin, jotka ovat EFF1 – EFF3. Ensin mainittu on hyötysuhteeltaan paras. Kuvassa 10 on oikosulkumoottoreiden hyötysuhdekäyrästä 1,1 – 90 kW:n luokassa. [11; 12; 15]



Kuva 10. Oikosulkumoottoreiden (1,1–90 kW) hyötysuhteet

Säädön hyötysuhde kertoo, kuinka tehokas säätötapahtuma on eli paljonko energiaa häviää säätötapahtumassa. Ilmavirtaa voidaan säätää kuristus-, johtosiipi-, ja pyörimisnopeussäädöllä sekä puhaltimen siipikulmia muuttamalla (aksiaalipuhaltimet). Säätövaihtoehdot on lueteltu yllä paremmuusjärjestyksessä huonoimmasta alkaen. Pyörimisnopeussäätö ja aksiaalipuhaltimen siipikulman säätö ovat miltei yhtä hyvät. Niiden haittana on laitteiden kallis hankintahinta. Pyörimisnopeussäätö voidaan toteuttaa portaattomasti mm. taajuusmuuttajalla tai jännitteensäädöllä. Taajuusmuuttajalla toteutetun ilmavirran säädön

hyötysuhde on 95–97 % nimelliskuormitusoloissa. Siinä huomioidaan taajuusmuuttajan lämpenemiseen kuluva energia sekä sen sähkömoottorille aiheuttama hyötysuhteen alenema (jännitteen sinimuotoiseen aaltoon muodostuneet häiriöt kuten eri harmoniset, ks. liite 2). [14; 15]

Taajuusmuuttajaa pienempitehoiset moottorit pudottavat säätölaitteen hyötysuhdetta, kun taas taajuusmuuttajaa suurempitehoiset moottorit puolestaan kasvattavat sitä. Tehohäviöt saattavat kasvaa merkittävästi, jos kytkentätaajuutta muutetaan taajuusmuuttajan nimellistaajuutta suuremmaksi. [17]

- Sähkön laatu

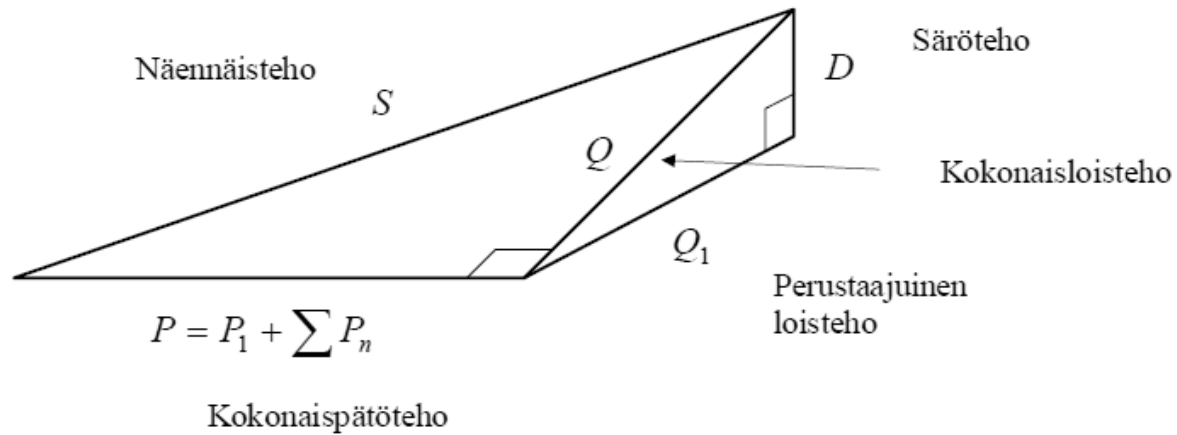
Heikko sähkönlaatu huonontaa yleensä ottaen sähkölaitteen kykyä toimia suunnitellusti. Sähkön laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat

- taajuus
- jännitteen taso
- jännitteen vaihtelut
- jännitepiikit
- yliaallot
- jännitteen ja virran vaihesiirtymä
- kolmivaihejärjestelmän epäsymmetria
- tasajännitekomponentti
- keskeytykset
- käyttöoikeuden rajoitukset.

Edellä mainituista laatutekijöistä ilmanvaihdon tehohäviöihin vaikuttaa eniten yliaallot, kolmivaihejärjestelmän epäsymmetria sekä jännitteen ja virran vaihesiirtymä.

Kuvassa 11 on esitetty sähköverkossa esiintyvät tehot vektoridiagrammi-muodossa. Tästä nähdään selkeästi, kuinka yliaaltojen aiheuttama säröteho (D)

sekä jännitteen ja virran vaihesiirtymästä aiheutuva loisteho (Q) vaikuttaa kokonaistehon eli näennäistehon (S) kasvuun.



Kuva 11. Tehojen vektoridiagrammi harmonisia yliaaltoja sisältävässä verkossa [20]

Harmonisten yliaaltojen synnyttämä säröteho (D) muuttuu lämmöksi sähköjohdoissa ja sähkölaitteissa. Toisin sanoen johdot ja laitteet lämpenevät enemmän sähköpiirissä, jossa on harmonisia yliaaltoja, kuin sellaisessa, jossa niitä ei ole. Myös loisteholla (Q) on samanlainen vaikutus. Säröloistehoa ja loistehoa saadaan pienennettyä erilaisilla yliaaltosuodattimilla ja estokelaparistoilla (ks. liite 2).

Kolmivaihejärjestelmässä mahdollisesti esiintyvä epäsymmetria syntyy, kun yhtä kolmesta vaiheesta kuormitetaan erisuurella kuormalla, kuin muita vaiheita. Tämä suurentaa sähkömoottoreiden roottorihäviöitä ja pienentää niiden momenttia. Epäsymmetria voidaan välttää huolehtimalla, että kaikkia vaiheita kuormitetaan yhtä paljon.

- Käyntiaika
 - jatkuvasti päällä
 - päivä-/yökäyttö
 - tarvittaessa.

Huoneissa, jotka ovat jatkuvasti käytössä (mm. sairaalat), tarvitaan ilmanvaihtoa, joka on jatkuvasti päällä.

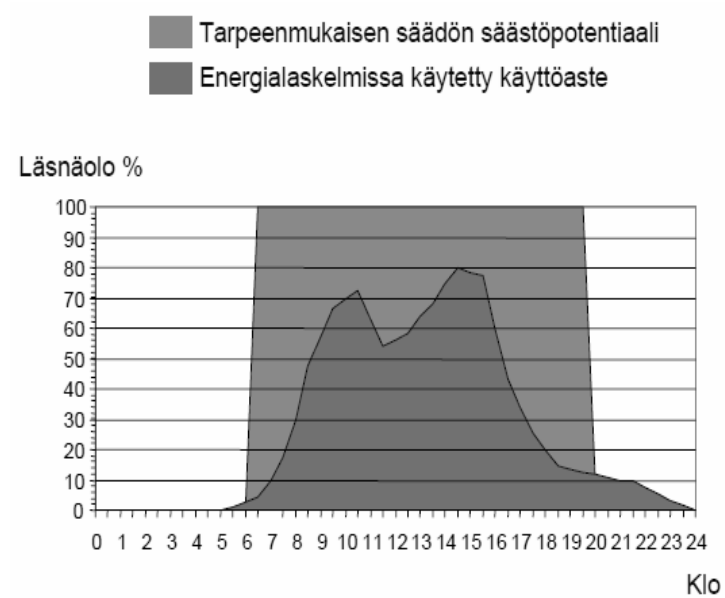
Päivä-/yökäyttö on käytössä tiloissa, jossa tilojen käyttö jaksottuu tiettyihin aikoihin ja on säännöllistä (mm. toimistot). Päiväkäytöllä ilmanvaihto pyörii nimellisa nopeudellaan ja yökäytöllä ilmanvaihdon ilmavirta pudotetaan esim. puoleen nimellisa nopeudestaan.

Ilmanvaihdon käyntiaikaa voidaan myös ohjata siten, että se toimii käyttötilanteen vaatimalla nopeudella. Tällöin se on energiatehokkainta. Tällainen ohjaus on tarpeen rakennuksissa, joissa on paljon tiloja ja ne ovat epäsäännöllisessä käytössä, esimerkiksi koulu- ja toimistorakennukset.

Käyntiajan ohjaustapoja ovat:

- käynnistuspainikkeet (epäsäännöllisesti käytetyt tilat)
- lisäaikapainikkeet (käytössä satunnaisesti normaaliajan ulkopuolella)
- aikaohjelma-ohjaus (päivä- / yökäyttö)
- läsnäolo-ohjaus (liiketutka ja hiilidioksidianturi)
- yhteinen ohjaus valaistuksen kanssa. [4]

Kuvassa 12 on esimerkki säästöpotentiaalista, kun ilmanvaihtoa ohjataan tarpeen mukaan, eli ilmanvaihto on päällä ja tarvittavalla teholla vain silloin, kun sitä tarvitaan. Kuvan osoittamassa tilanteessa ilmanvaihdon säätöä tarvittaisiin välillä klo 6–20. Ohjausjärjestelmäksi sopisi parhaiten läsnäolo-ohjaus. Muuna aikana ilmanvaihto voisi pyöriä miniminopeudellaan.



Kuva 12. Ilmanvaihdon ohjauksen säästöpotentiaali [4]

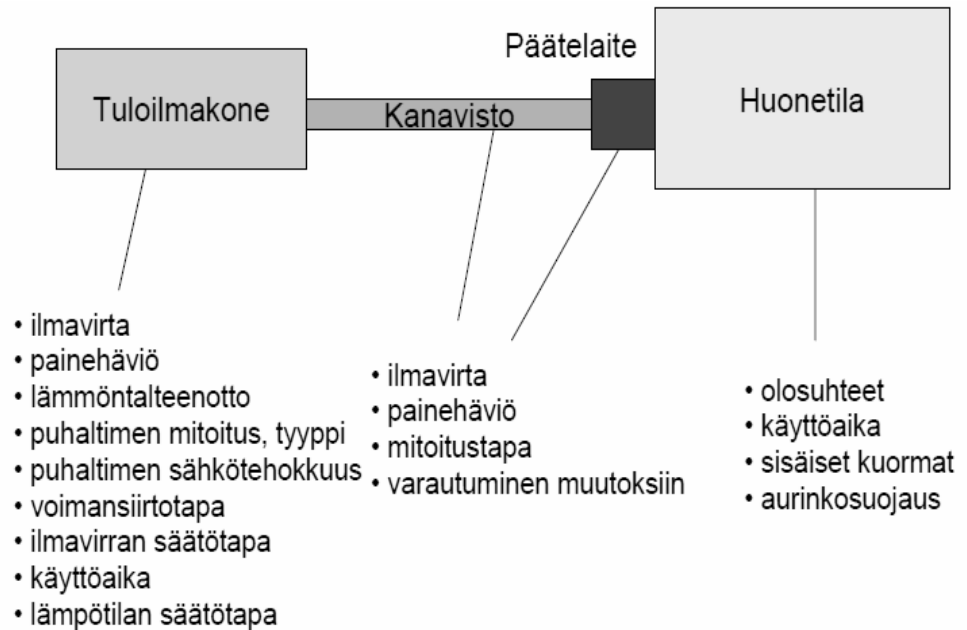
- Moottorin koko
 - tarvittava ilmamäärä ja sen virtausnopeus
 - järjestelmän ilmanvastus.

Liian tarkasti mitoitettu moottori tarpeeseen nähden kuluttaa sähköä enemmän, kun kokoa isompi. Tämä johtuu moottorin lämpenemisestä koska se joutuu pyörimään ääriarajoillaan. Tällöin myös sen käyttöikä lyhenee. Moottoriksi kannattaa siis valita hieman suurempi, kuin juuri ja juuri tavoitteet täyttävä moottori.

- Ilman jälkilämmitys/jäähdytys
 - olosuhteet huoneissa, jotka kuuluvat ilmanvaihtojärjestelmän piiriin .

Huoneen olosuhteet vaikuttavat siihen, täytyykö sisään puhallettavaa ilmaa jäähdyttää vai lämmittää.

Ilmanvaihdon sähkönkulutukseen vaikuttavat asiat on vielä esitetty pelkistetyssä kuvassa 13 (päätelaitte tarkoittaa tässä yhteydessä tulo- ja poistoilmaventtiiliä), joka esittää rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmää.



Kuva 13. Ilmanvaihdon energiatalouteen vaikuttavat tekijät [4]

3 SFP-luku ja sen määrittäminen

3.1 SFP -luku

SFP-luvulla (Specific Fan Power) tarkoitetaan ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehoa. Tämä kertoo, kuinka paljon ilmanvaihtojärjestelmä kuluttaa sähköenergiaa yhden ilmakeuutiometrin siirtämiseen sekunnissa. Yksikkönä on siis $\text{kW}/(\text{m}^3/\text{s})$. SFP-luvun ansiosta nähdään heti rakennuksen ilmanvaihdon energiatehokkuus. Sitä hyödynnetään mm. ilmanvaihdon suunnittelussa sekä rakennuslupamenettelyssä. [15]

Käytössä on ollut myös SFPI -termi (Specific Fan Power, Individual Fan), jolla tarkoitetaan yksittäisen puhaltimen tehontarvetta sen läpi kulkevaa ilmavirtaa kohti. Sillä on sama yksikkö, kuin SFP:llä. Termi on jäänyt vähemmän käytetyksi. [16]

SFP-luvulle on annettu Suomen RakMK:n osassa D2 raja-arvot, jotka on esitetty taulukossa 1:

Taulukko 1. SFP-luvun raja-arvot

Ilmanvaihtotapa	SFP-luvun raja-arvo (kW/m³/s)
Koneellinen poistoilma	1,0
Koneellinen tulo- ja poistoilma	2,5

Raja-arvo 2,5 kW/m³/s voidaan ylittää, jos tilan sisäilmaston hallinta sitä vaatii. Tällaisia kohteita voi löytyä mm. sairaaloista (leikkaussalit) sekä teollisuudesta (puhdashuoneet). Em. kohteissa tarvitaan erityisen puhdasta tuloilmaa, joten rakennuksen tuloilman hormissa täytyy käyttää lisäsuodattimia. Ne nostavat ilmanvaihtokanavan painehäviötä, josta seuraa sähköenergiatarpeen kasvu, vaikka ilmavirta pysyy samana. [10]

Eurooppalaisessa standardissa EN 13779 annetaan suunnitteluohjeita/suosituksia kuinka paljon erityissuodattimet tai muut lisäkomponentit vaikuttavat SFP-lukuun, taulukko 2.

Taulukko 2. Tiettyjen ilmankäsittelykomponenttien sallitut SFP-luvun perustason ylitykset

Komponentti	Sallittu ylitys (kW/m³/s)
mekaaninen lisäsuodatusosa	+ 0,3
HEPA-suodatin	+ 1,0
kaasusuodatin	+ 0,3
korkean (yli 70%) hyötysuhteen LTO-osa	+ 0,3
suurtehojäähdyn	+ 0,3

3.2 SFP-luvun määrittely

SFP-luku määritellään SFP-oppaassa seuraavasti:

”Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho eli SFP-luku on rakennuksen koko ilmanvaihtojärjestelmän kaikkien puhaltimien yhteenlaskettu sähköverkosta ottama sähköteho jaettuna ilmanvaihtojärjestelmän koko mitoitusjäteilmavirralla tai mitoitusulkoilmavirralla (suurempi näistä).”

Ilmanvaihtojärjestelmän sähköverkosta ottamaan sähkötehoon lasketaan

- ilmanvaihtokoneiden tuloilmapuhaltimet
- ilmanvaihtokoneiden poistoilmapuhaltimet
- erilliset tuloilmapuhaltimet
- erilliset poistoilmapuhaltimet (huippumurit)
- taajuusmuuttajat ja/tai muut tehonsäätölaitteet.

Sähkötehon laskennassa ei huomioida

- tuulikaappien ilmanlämmittimien puhaltimia
- muita paikalliseen lämmitykseen käytettäviä ilmalämmittimien puhaltimia
- puhallinkonvektoreita
- muita ilman kierrättämiseen käytettyjä puhaltimia
- yksittäisten tuotantoprosessien koneiden paikallispoistoja ja laboratorioden vetokaappeja
- teknisten tilojen yllämmön poistoon tarkoitettuja puhaltimia
- takkaimureita
- liesituulettimia
- tuloilmapuhaltimessa mahdollisesti olevan lämmityspatterin tai talteenottopiirin pumppuja
- pyörivän lämmönsiirtimen käyttömootoria.

Ilmavirraksi valitaan poisto- ja tuloilmavirrasta vain se, kumpi näistä on suurempi, koska sen arvo kertoo rakennuksen todellisen ilman vaihtuvuuden. Esimerkiksi, jos rakennuksen tuloilmavirta on $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ja poistoilmavirta on $4,3 \text{ m}^3/\text{s}$, jälkimmäinen arvo kertoo todellisen ilman vaihtuvuuden. Pienempi arvo ei vaikuta tähän, sillä näiden erotuksesta syntyvä ilmavirta tulee rakennuksen vaipassa olevista raoista. [15]

3.2.1 SFP-luvun määrittäminen teoreettisesti laskemalla

SFP-lukua määriteltäessä teoreettisesti, ilmanvaihtojärjestelmästä tulee tietää puhaltimien ilmavirrat ja paineenkorotukset sekä ilmanvaihtojärjestelmään kuuluvien laitteiden hyötysuhteet.

- Ilmavirta, q_{puhallin}

Ilmavirta kertoo, kuinka monta kuutiometriä ilmaa siirretään ilmanvaihtokanavassa yhden sekunnin aikana.

Ensin määritellään jokaiseen huoneeseen erikseen haluttu ilman vaihtuvuus.

Nämä eivät saa alittaa RakMK D2:ssa määrättyjä minimivaatimuksia.

Seuraavaksi lasketaan huoneiden tilavuus, jonka tiedon pohjalta saadaan huoneiden nimellisilmavirta. Huonekohtaisien nimellisilmavirtojen

yhteenlaskemisen jälkeen tiedetään koko rakennukseen tarvittava ilmavirta.[10]

- Puhaltimen paineenkorotus, $\Delta p_{\text{puhallin}}$

Puhaltimen paineenkorotus $\Delta p_{\text{puhallin}}$ muodostuu ulkoisen painehäviön Δp_{ulk} ja koneen sisäisen painehäviön Δp_{kone} summasta

Ulkoinen painehäviö Δp_{ulk} syntyy koneen imu- ja painepuolella olevasta

kanavistosta ja muista ilmanjakojärjestelmän osista sekä puhaltimen ja kanavan

liitoksesta. Tämä tieto löytyy LVI-suunnittelijan tekemistä

suunnitteluasiakirjoista.

Sisäinen painehäviö Δp_{kone} muodostuu ilmankäsittelykoneen komponenttien synnyttämästä painehäviöstä ja puhaltimen koteloon asentamisessa syntyvästä liityntähäviöistä. Liityntähäviössä huomioidaan sekä imu- että painepuoli. Tämän tiedon saa laitetoimittajalta [15]

- Ilmanvaihtojärjestelmään liittyvien laitteiden hyötysuhteet

Laitteiden valmistajilta saadaan joko diagrammi-muodossa esitetyt hyötysuhteet tai laskentaohjelmalla lasketut hyötysuhteet tietyssä toimintapisteessä. Hyötysuhteet katsotaan diagrammeista moottorin kierrosnopeudelta tai ilmavirran mukaan.

- SFP-luvun laskeminen

Kun nämä em. arvot ovat tiedossa jokaisesta ilmanvaihtokoneesta, voidaan laskea kunkin ilmanvaihtokoneen sähköverkosta tarvitsema teho kaavan 5 (s. 40) avulla. Kaikkien ilmanvaihtokoneiden tehot lasketaan yhteen. Saatu tehojen summa jaetaan ilmavirroista suuremmalla, kuten edellä on mainittu. Jos koko rakennuksen poistoilmavirta on suurempi, kuin tuloilmavirta, sähköverkosta otettu teho jaetaan poistoilmavirralla. [15]

3.2.2 SFP-luvun määrittäminen mittaamalla

Mittaukset suoritetaan aina puhallinkohtaisesti. Ennen ilmavirran tai sähkötehon mittausta varmistetaan seuraavat asiat:

- Puhallin pyörii mitoitusnopeudellaan eli nimelliskojeella, jolloin ilmavirran nopeus on sama, kuin mitoitusilmavirta (eli nimellisilmavirta)
- Kanaviston suodattimet ovat puhtaat (tässä työssä käytössä oli vanhat suodattimet)
- Lämmönsiirtimet ja ilmankostutin ovat kuivat.

3.2.2.1 Ilmavirran mittaus

Ensimmäinen tehtävä ilmavirran mittaamisessa on valita kohteeseen soveltuva ilmavirran mittausmenetelmä.

Standardissa SFS 5512 kerrotaan, millaisia mittausmenetelmiä ja mittaustapoja tulee käyttää missäkin kohteessa sekä selostaa miten mittaukset tulee suorittaa. Tästä on lyhyesti kerrottu liitteessä 3.

Mittausmenetelmän valintaan vaikuttaa myös haluttu mittaustarkkuus, johon puolestaan vaikuttaa mittauspisteen ja häiriötekijöiden välinen etäisyys. Em. standardista SFS 5512 saadaan liitteen 4 mukainen mittaustarkkuuden arviointikäyrästä.

Toinen tehtävä on valita ilmavirran mittauspaikka.

Mittaustavasta riippuen ilmavirta voidaan mitata suoraan pääte-elimeltä tai ilmanvaihtokanavassa olevasta mittausreiästä (tarvittaessa tehdään poraamalla, johon tarvitaan kiinteistön omistajan lupa).

Käytettäessä sellaista mittausmenetelmää, jossa ilmanvaihtokanavaan täytyy tehdä mittausreikä kiinteästi asennettavaa mittauselintä tai erillistä mittausinstrumenttia varten, tulee reiän sijaintia valitessa huomioida mahdolliset häiriötekijät. Mittauspisteen ja häiriötekijöiden tulee olla riittävän etäällä toisistaan, jotta mittaustuloksien virhemarginaali olisi mahdollisimman pieni. Häiriötekijöitä on mm. kanavistossa olevat mutkat, haarat, kanavan supistukset/laajennukset ym.

Hyvän mittauspisteen sijainti saadaan laskemalla suojaetäisyydet mittauspisteestä häiriölähteisiin Standardissa SFS 5512 on kerrottu tarkemmin , kuinka etäisyydet lasketaan sekä ohje, kuinka ilmavirtaus mitataan.

Kolmas tehtävä on laskea ilmavirta mitattujen tulosten avulla.

Mikäli mittauksissa ei ole käytössä laitetta, jolla saataisiin suoraan ilmavirran lukema tai sitä ei haluta käyttää, joudutaan turvautumaan laskentaan. Standardissa SFS 5147 on kerrottu laskentakaavat, joiden avulla ilmavirta saadaan laskettua. Siinä on myös kerrottu tarkemmin käytössä olevista mittausmenetelmistä.

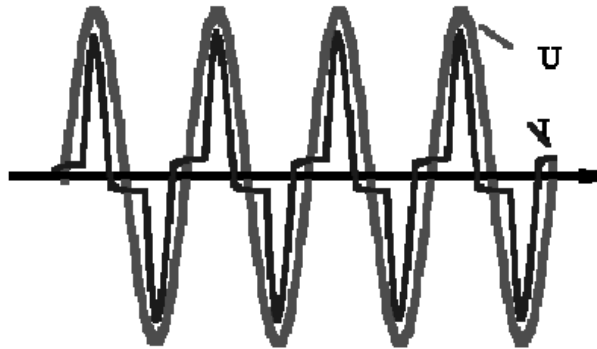
3.2.2.2 Sähkötehon mittaus

Mittauksessa tarvittavan mittarin tulee kattaa seuraavat vaatimukset:

- Sähkötehomittari on ns. True-RMS pihtimittari, joka mittaa todellisen tehollisarvon, vaikka esim. taajuusmuuttaja aiheuttaisi sähköön siniaaltoon vääristymiä.
- Kykenee mittaamaan virran ja jännitteen samanaikaisesti.
- Muotokerroin (CF) on vähintään 3, joka kertoo, kuinka korkeita jännitteen ja virran käyrämuodossa esiintyviä huippuja mittari sietää toimiakseen ilmoitetulla tarkkuudella.
- Mittausalue vastaa mitattavaa tehoa, jotta mittaustarkkuus on riittävä.

Perustelut True–RMS pihtimittarin käytölle syntyvät taajuusmuuttajakäytöstä.

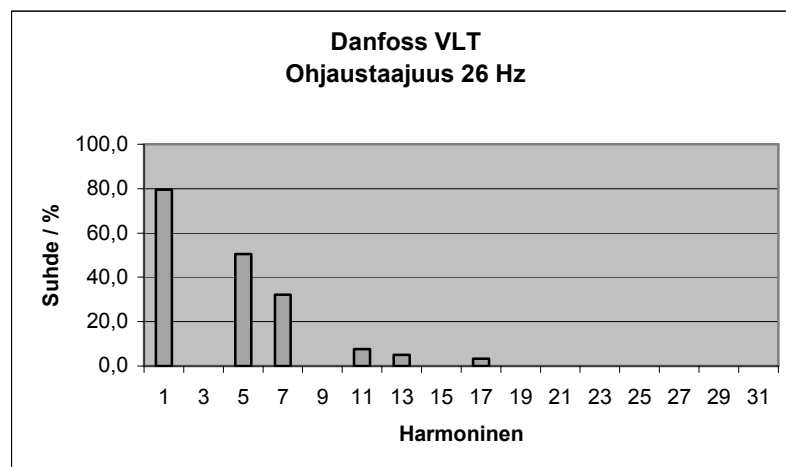
Taajuusmuuttajissa tehdään verkkojännitteen tasasuuntaus tasajännitteeksi ja lopuksi vaihtosuunnataan halutun taajuiseksi vaihtojännitteeksi. [21] Tässä tekniikassa käytetään puolijohdekomponentteja, jotka aiheuttavat virtaan yliaaltoja. Yliaaltojen summautuessa virran siniaaltoon puhutaan säröytyneestä virrasta, josta on esimerkki kuvassa 14.



Kuva 14. Tietokoneen ottama säröytynyt virta [22]

Tavallinen tehomittari ei kykene mittaamaan todellista tehoa säröytyneestä aaltomuodosta vaan näyttää aalloista mitattua keskiarvoa, jolloin tulos on liian pieni.

Yliaaltojen mittaus ei kuulu SFP-luvun mittaukseen, mutta voidaksemme havainnollistaa taajuusmuuttajan synnyttämiä yliaaltoja mittasimme ne Fluken 41B Power Meter & Power Harmonics Analyzer -mittarilla kahdesta eri taajuusmuuttajasta kahdella eri ohjaustaajuudella. Kuvassa 15 on yksi esimerkki taajuusmuuttajan synnyttämistä yliaalloista, josta nähdään, että 1. harmonisen yliaallon eli virran perustaajuuden (50 Hz) osuus on n. 80 % virran tehollisarvosta, 5. harmoninen yliaalto on n. 50 % virran tehollisarvosta jne. Tässä kokonaissäröksi on saatu 83,4 %. Liitteessä 2 on kerrottu yliaalloista ja niiden mittaustuloksista enemmän.



Kuva 15. Taajuusmuuttaja Danfoss VLT:n synnyttämät yliaallot ohjaustaajuudella 26 Hz

Ennen sähkötehon mittaamista on selvitetävä ilmanvaihtojärjestelmään liittyvät laitteet, jotta saataisiin selville, mistä mittausta tulee suorittaa, sekä millaisia lisätoimenpiteitä tulee suorittaa ennen tehonmittausta.

Mikäli järjestelmässä on pyörivä lämmönsiirrin, on se huomioitava sähkötehoa mitattaessa. Jos se saa sähkönsyöttönsä samasta piiristä, kuin puhallin, se täytyy pysäyttää mittausten ajaksi, ettei sen sähköverkosta otettava teho vääristä tuloksia. Mikäli pyörivä lämmönsiirrin joudutaan pysäyttämään, täytyy poistoilmavirtaan lisätä lämmönsiirtimen puhtaaksipuhallukseen kuuluva ilmavirta sekä pyörivän lämmönsiirtimen tiivisteiden välistä, tuloilmapuolelta poistopuolelle, tuleva vuotoilmavirta, liite 5. Tarvittaessa poistoilmapuolelle laitetaan lisäpainehäviö, jotta poistopuoli säilyisi alipaineisena tulopuoleen nähden. Tapauksessa, jossa pyörivän lämmönsiirtimen moottori ja sen mahdollinen ohjauslaite saavat sähkönsyötön eri virtapiiristä, kuin puhaltimet voidaan nämä järjestelyt jättää tekemättä.

Jos puhallinta ohjataan taajuusmuuttajalla tai jännitteensäätäjällä, tehon mittausta suoritetaan sen tulopuolelta.[15; 19]

Sähkötehon mittaukseen sopivassa mittauspisteessä on virtapiirin sähköjohdot sen verran väljästi asennettu, että pihtimittarin pihdit saadaan johdon ympäri virran mittausta varten ja jännitteen mittausta onnistuu yhtäaikaaisesti samasta pisteestä. Yleensä tällainen paikka löytyy helpoiten sähkökaapista.

RakMK D2:ssa on ohjeistettu, että ilmanvaihtojärjestelmä on suunniteltava ja rakennettava siten, että sähkötehon mittausta onnistuisi helposti. Käytännössä tätä ei useinkaan huomioida vaan mittausta suoritettaessa joudutaan tekemään ylimääräistä työtä.

Ilmanvaihtolaitteet, jotka ovat ns. yksivaiheisia eli niitä syöttää vain yksi vaihejännite (1N), tehon mittausta on yksinkertaista. Tällaisessa tapauksessa riittää, kun yhdestä vaihejohtimesta mitataan sähkötehomittarilla virta ja jännite samanaikaisesti. Tällainen mittari on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Metrix MX 240 -sähkötehomittari

Mikäli ilmanvaihtokone on suurempi eli se saa käyttöjännitteensä kolmesta vaiheesta (3N), on koneen ottaman tehon mittaaminen hieman monimutkiskkaampaa. Tässä tapauksessa virta ja jännite täytyy mitata jokaisesta vaiheesta.

Mittaus voidaan suorittaa myös em. mittarilla, kun kaikki kolme jännitettä mitataan samanaikaisesti ja jokaisen johdon läpi kulkeva virta mitataan vuoronperään. Näin mittari kykenee huomioimaan myös jännitteen ja virran välisen vaihesiirron, jolloin se kykenee näyttämään pätötehon ko. vaihejohtimesta. Todellinen kokonaispätöteho saadaan laskemalla kaikkien kolmen vaihejohtimen tehoista keskiarvo. [15]

Tässä työssä käytettiin kahta kuvassa 17 näkyvää Fluke 435-kolmivaiheista sähkönlaatuanalysointilaitetta. Tällaisella mittalaitteella saatiin mitattua kaikista kolmesta vaiheesta sekä nollajohtimesta virta ja jännitearvot samanaikaisesti. Virran mittauksessa käytettiin kaapelisilmukoita, jotka ajoivat saman asian, kuin Metrix MX 240 –mittarin virtapihdit. Kaapelisilmukoissa oli liitin, josta ne saatiin avattua kytkennän ajaksi. Kaapelisilmukoita asennettaessa oli huomioitava, että ne kytkettiin aina mitattavassa virtajohdossa kulkevan virran suunnan mukaisesti. Virran suunta oli merkittävä kaapelisilmukoihin. Lisäksi Fluke 435-mittaria käytettäessä maadoituskaapeli tuli kytkeä sähköverkon maapotentiaaliin. [18]



Kuva 17. Fluke 435

3.2.3 Kaavat

Ilmavirran mittauspisteen ja häiriötekijöiden välisensuojaetäisyyden laskeminen pyöreässä ilmanvaihtokanavassa, kaava 1.

$$L = N_1 * D \quad (1)$$

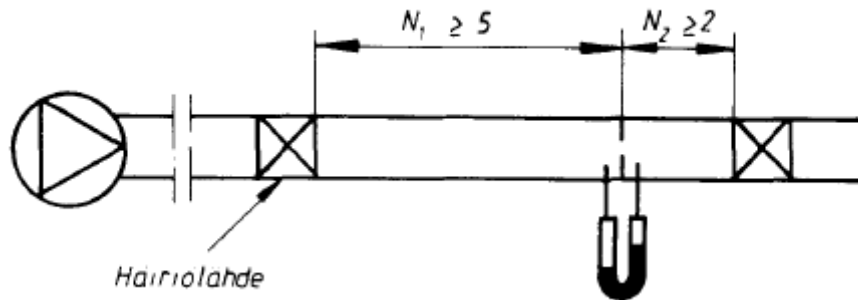
L on mittauskohdan ja häiriökohdan välinen etäisyys

D on kanavan halkaisija

N_1 on suojaetäisyyskerroin virtaussuunnassa ennen mittauskohtaa

N_2 on suojaetäisyyskerroin virtaussuunnassa mittauskohdan jälkeen

Kuvasta 18 nähdään suojaetäisyyskerroimet, jotka liittyvät kaavaan 1. Ympyrä jonka sisällä on kolmio, kuvaa puhallinta, joten kanavan mitta N_1 tulee mitata aina puhaltimen puoleisesta päästä.



Kuva 18. Kanavasta mitattava ilmavirta

Ilmanvaihtokanavassa oleva dynaaminen paine saadaan kaavan 2 avulla.

$$P_{\text{dynaaminen}} = P_{\text{koko}} - P_{\text{staattinen}} \quad (2)$$

$P_{\text{dynaaminen}}$ on dynaaminen paine [Pa]

P_{koko} on kokonaispaine [Pa]

$P_{\text{staattinen}}$ on staattinen paine [Pa]

Ilmavirran nopeus kanavassa saadaan dynaamisen paineen avulla kaavalla 3.

$$v = \sqrt{\frac{2 * P_{\text{dynaaminen}}}{\rho_0}} \quad (3)$$

v on ilmavirran nopeus [m/s]

$P_{\text{dynaaminen}}$ on dynaaminen paine [Pa]

ρ_0 on ilman tiheys; 1,293 kg/m³

Ilmavirta saadaan laskettua, kun tiedetään ilmavirran nopeus ja ilmanvaihtokanavan pinta ala, kaava 4.

$$Q = v * A \quad (4)$$

Q on ilmavirta [m³/s]

v on ilmavirran nopeus [m/s]

A on ilmanvaihtokanavan pinta-ala [m²]

Puhaltimen moottorin sähköverkosta ottama teho saadaan kaavalla 5.

$$P_{\text{sähkö}} = \frac{q_{\text{puhallin}} * \Delta p_{\text{puhallin}}}{\eta_{\text{puhallin}} * \eta_{\text{käyttö}} * \eta_{\text{moottori}} * \eta_{\text{sääto}}} \quad (5)$$

$P_{\text{sähkö}}$ on puhallinmoottorin sähköverkosta ottama teho [kW]

q_{puhallin} on puhaltimen tuottama ilmavirta [m^3/s]

$\Delta p_{\text{puhallin}}$ on puhaltimen paineenkorotus [kPa]

η_{puhallin} on puhaltimen hyötysuhde

$\eta_{\text{käyttö}}$ on hihnakäytön hyötysuhde

η_{moottori} on moottorin hyötysuhde

$\eta_{\text{sääto}}$ on taajuusmuuttajan hyötysuhde

Puhaltimen painehäviöt ovat verrannollisia pyörimisnopeuden toiseen potenssiin tai vaihtoehtoisesti ilmavirran toiseen potenssiin, kaava 6.

$$\frac{\Delta p_x}{\Delta p_o} = \left(\frac{n_x}{n_o} \right)^2 = \left(\frac{q_x}{q_o} \right)^2 \quad (6)$$

Δp_o on alkuperäinen painehäviö

Δp_x on uusi painehäviö

n_o on alkuperäinen kierrosluku

n_x on uusi kierrosluku

q_o on alkuperäinen ilmavirta

q_x on uusi ilmavirta

Puhaltimen tehontarve vastaavasti kasvaa pyörimisnopeuden kolmanteen potenssiin tai vaihtoehtoisesti ilmavirran kolmanteen potenssiin, kaava 7.

$$\frac{\Delta P_x}{\Delta P_o} = \left(\frac{n_x}{n_o} \right)^3 = \left(\frac{q_x}{q_o} \right)^3 \quad (7)$$

ΔP_o on alkuperäinen tehontarve

ΔP_x on uusi tehontarve

n_o on alkuperäinen kierrosluku

n_x on uusi kierrosluku

q_o on alkuperäinen ilmavirta

q_x on uusi ilmavirta

SFP-luku saadaan selville kaavan 8 avulla:

$$\text{SFP} = \frac{P_{\text{tuloilmakone}} + P_{\text{poistoilmakone}}}{q_{\text{max}}} \quad (8)$$

SFP on ilmanvaihdon ominaissähköteho [kW/(m³/s)]

$P_{\text{tuloilmakone}}$ on tuloilmapuhaltimien verkosta ottama sähköteho [kW]

P_{ilmakone} on poistoilmapuhaltimien verkosta ottama sähköteho [kW]

q_{max} on ilmavirroista suurempi (nimellinen tulo- tai poistoilmavirta) [m³/s]

3.2.4 Liian suuri SFP-luku

Haettaessa rakennuslupaa uuteen rakennukseen viranomaiset haluavat tietää, kuinka paljon energiaa kuluu ilmanvaihtoon. SFP-luvun avulla he pystyvät nopeasti tarkastamaan, että uudet rakennukset täyttävät RakMK D2:n vaatimukset. Näin ollen LVI-suunnittelijan tulee laskea ilmanvaihdon SFP-luku etukäteen. Käytännössä LVI-suunnittelija määrittelee tavoitetaso rakennuttajan/tilaajan kanssa, paljonko rakennuksen ilmanvaihto saa kuluttaa energiaa. Tämän lähtökohdan pohjalta LVI-suunnittelija suunnittelee ja määrittelee tarvittavat ilmanvaihtojärjestelmän komponentit.

Kun rakennus on teknisesti valmis, tehdään käyttöönottotarkastukset myös taloteknisille laitteille. Näiden testien aikana tarkistetaan myös ilmanvaihtolaitteiden energiankulutus ja lasketaan mittausten antamien tietojen avulla todellinen SFP-luku. Tämän tulee täyttää RakMK D2:n vaatimukset.

Mikäli näin ei tapahdu, ilmastointijärjestelmän komponentteja täytyy muuttaa. Usein isoissa järjestelmissä ensimmäisenä keinona on puhaltimen kierrosnopeuden muuttaminen hihnapyöriä vaihtamalla edellyttäen, että moottorista löytyy tarpeeksi tehoa. Toisena vaihtoehtona on valita paremmalla hyötysuhteella toimiva puhallin, puhaltimen moottori tai säätölaite.

4 SFP-luvun määrittäminen mittausten avulla

4.1 Mitattavan ilmanvaihtojärjestelmän esittely

Mittauskohteeksi oli valittu erään pääkaupungin alueella olevan koulurakennuksen yksi ilmanvaihtokojeisto T75, joka huolehtii rakennuksen toisen kerroksen opetus- ja hallintotilojen ilmanvaihdosta. Tähän piiriin kuuluu koneellinen tulo- (TF1) ja poistoilmanvaihto (PF1). Ilmanvaihtokoneita ohjataan omilla taajuusmuuttajilla (SC1 ja SC2). Kojeistossa on mukana myös taajuusmuuttajalla (SC3) ohjattu pyörivä lämmön talteenotto (LTO2), kanavien moottoriohjatut sulkupellit (FZ1 ja FZ22), ilmanvaihtosuodattimet sekä tuloilman lämmitin LP4.

Liitteessä 6 on kaaviokuva ilmanvaihtokojeiston laitteistosta. Siinä on myös lueteltu kaikki laitteet tarkemmin. Taulukkoon 3 on kerätty tätä työtä koskien oleelliset laitteet. Ilmanvaihtokojeiston T75 laitteiston kuvassa (liite 6) lyhenteillä PF1 ja TF1 merkityt puhaltimet sisältävät myös moottorit, joiden malli ja tyyppi on myös kerrottu ao. taulukossa.

Taulukko 3. Laitteiden mallit

Laite	Lyhenne	Malli	Tyyppi
Poistoilmapuhallin	PF1	Flexomix	HIFEK-03-4/8
Tuloilmapuhallin	TF1	Flexomix	050C-E1-0220
Puhallin moottori	-	Brook crompton	WP-DF100LRF
Taajuusmuuttaja	SC1	Danfoss VLT HVAC Drive	FC-102P2K2
Taajuusmuuttaja	SC2	Danfoss VLT HVAC Drive	FC-102P2K2

Loppupiirustuksista luetut laitteiden nimellisarvot on esitetty taulukossa 4. Teho- sarakkeesta näkee mainittujen laitteiden nimellistehot, ilmavirta- sekä painehäviö- sarakkeesta näkee puhaltimien tuottaman nimellisilmavirran ja siitä kanavaan syntyneen painehäviön.

Taulukko 4. Loppupiirustuksesta kerätyt arvot

Laite	Teho, kW	Ilmavirta, m ³ /s	Painehäviö, Pa
TK7-TF1	2	1,6	650
TK7-PF1	2	1,4	600
SC1	2,2	-	-
SC2	2,2	-	-

4.2 Mittausjärjestelyt

Ennen mittausten aloittamista selvisi, että rakennuksen ilmanvaihdon automaatio ei toimi, koska talotekniikan automaatiota koskeva urakka oli kesken. Puhaltimen kierrosnopeuksia ei siis päästy säätämään haluttuihin toimintapisteisiin. Kaikki ilmanvaihtolaitteet olivat kytketty pakko-ohjauksella päälle. Tästä johtuen työssä ei voitu havainnoida SFP-luvun muuttumista ilmanvaihdon eri toimintapisteissä, joka olisi ollut kaikkein mielenkiintoisin osa tätä työtä. Tämä osuus jäi pelkän teorialaskelmien varaan.

Mittaukset siis tehtiin puhaltimien ollessa pakko-ohjauksessa eli käyttökytkimet olivat asennossa 1 (muut käyttökytkimen asennot olivat 0 ja A).

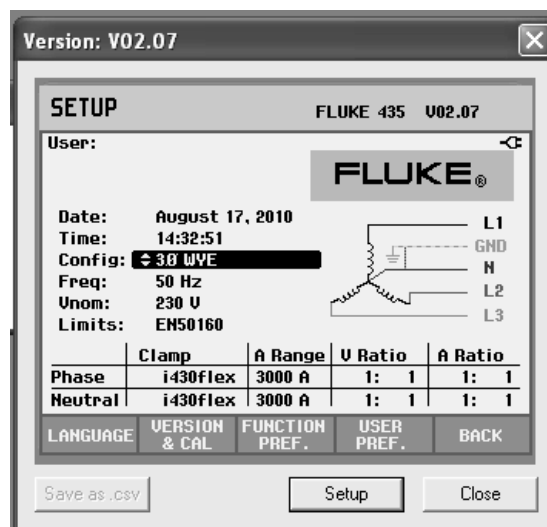
Ilmanvaihtosuodattimierkunto ei ollut tiedossa. Mittausolosuhteet olivat muutoin normaalit ja vakaat.

4.2.1 Sähkötehon mittaus

Käytössä oli kaksi Fluke 435 –sähkönlaatuanalysointilaitetta, joilla saatiin mitattua mm. kulutetun sähkötehon. Mittareista tarkistettiin perusasetukset, että ne olivat olosuhteisiin sopivat. Tällaisia asetuksia olivat

- nimellisjännite (230 V)
- nimellistaajuus (50 Hz)
- johdoituskytkentä (TN-S).

Perusasetuksien jälkeen mittarin asetusnäyttö on kuvan 19 mukainen. Tästä näkee päivämäärän (August 17, 2010), kellonajan (14:32:51), vaiheiden määrä ja kytkentä mittaauksessa (30 WYE: kolme vaihetta ja tähtikytketty TN-S -sähkölaitteeseen), mittausten referenssinä käytettävä nimellisjännite (230 V) sekä nimellistaajuus (50 Hz) ja käytettyjen raja-arvojen nimi sähkönlaadun mittaauksille (EN50160). Lisäksi kuvasta näkee vaihe- sekä nollamittausjohdon malli (i430flex), sallittu virran mittausalue (3000 A asti) sekä virran ja jännitteen mittaussuhde (1:1). [18]



Kuva 19. Fluke 435 Setup-ikkuna

Myös päivämäärän ja kellonajan näyttö päivitettiin. Kuva 19 ei ole otettu mittauspäivänä.

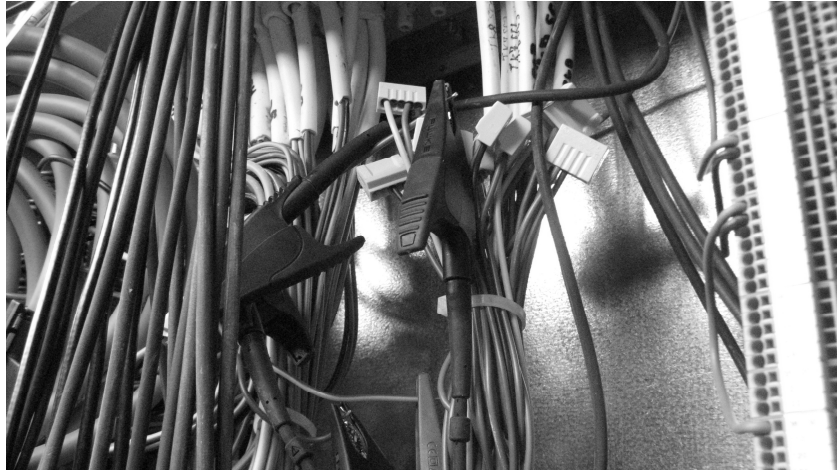
Tehon mittaukseen soveltuva mittauspiste, SFP-lukua ajatellen, on sulakkeiden ja ilmanvaihtokonetta ohjaavan taajuusmuuttajan välissä. Tällainen paikka löytyi sähkökeskuksesta, tarkemmin sanottuna RK402-jakokeskuksesta. Varmistimme vielä mittauspisteen käyttökelpoisuuden em. sähkökeskuksen pääkaaviosta, liite 7. Siitä näkee, että ilmanvaihtolaitteiston puhaltimia ohjaavilla taajuusmuuttajilla ja pyörivällä lämmönsiirtokiekolla sekä lämminvesipumpulla oli omat sähkönsyöttönsä. Näin ollen pyörivälämmönsiirrin ei häirinnyt sähkötehon mittausta, jolloin sitä ei tarvinnut kytkeä pois päältä (ks. luku 3.2.2.2 Sähkötehon mittaus). Liitteestä 8 näkee, kuinka em. laitteiston ohjaus on toteutettu.

Ennen Fluke 435-mittareiden mittapäiden kytkemistä puhaltimet pysäytettiin manuaalisesti ja varotoimenä sulakkeet irrotettiin sulakepesistään. (Tulo- ja poistoilmapuhaltimella oli kummallakin kolme sulaketta, koska kyseiset laitteet olivat kolmivaiheisia). Oikeiden laitteiden pysähtyminen vielä varmistettiin katsomalla fyysisesti, että ko. laitteet olivat sammuneet. Tämä siitä syystä, että sähkökaapin laitemerkinnät eivät kaikilta osiltaan pitäneet paikkaansa, johtuen automaatiourakan keskeneräisyydestä.

Ensimmäisenä kytkettiin virranmittaukseen tarkoitetut johdinsilmukat jokaisen vaiheen ja nollajohtimen ympäri siten, että silmukka A laitettiin vaihejohtimen L1 ympäri, silmukka B johtimen L2 ja silmukka C johtimen L3 sekä silmukka N nollajohtimen ympäri. Tämä vaati sähkökaapissa olevien johtojen levittämistä, jotta johdinsilmukoiden pujottaminen yleensä onnistui. Virran kulkusuunta huomioitiin kytkentää tehdessä eli johdinsilmukoissa olevat nuolet osoittivat virran kulkusuuntaan.

Seuraavaksi kytkettiin mittarin hauenleualla varustettu maadoitusjohdin sähkökaapissa olevaan maadoituskiskoon. Jännite en mittausta varten käytössä oli myös hauenleualliset mittausjohtimet. Nämä kytkettiin samaan järjestykseen virtamittauksen kanssa eli mittausjohdin A kytkettiin vaihejohtimeen L1, johdin B vaiheeseen L2 ja

johdin C vaiheeseen L3 sekä nollajohdin N-kiskoon. Kaikki hauenleuoilla varustetut johtimet jouduttiin kytkemään mittauspisteisiinsä lyhyiden apujohtimien avulla, kuva 20. Apujohtimet kiinnitettiin samojen syöttö- (L1, L2, L3), nolla- (N) ja maadoitusrimissa (GND) olevien ruuvien alle, joihin mitattavan laitteiston syöttökaapelit oli kytketty.



Kuva 20. Jännitteen mittausta

Toinen mittalaitteista kytkettiin tuloilmalaitteiston ja toinen poistoilmalaitteiston virtapiiriin.

Kytkenät teki kaupungin oma sähköasentaja vastuusasioiden selkeyden vuoksi. Kun mittausjärjestelyt oli tehty, sulakkeet laitettiin paikoilleen ja laitteet käynnistettiin manuaalisesti vääntäen käyttökytkin asentoon I. Kun puhaltimien nopeudet tasaantuivat ja ne asettuivat pyörimään sen hetkisen ohjauksen määräämään nopeuteen, mittarista luettiin sähkötehon arvot ja ne tallennettiin samalla mittarin muistiin.

4.2.2 Ilmanpainehäviön mittausta

Mittauksessa käytettiin TSI Velocicalc Plus 8386-M-FI -monitoimimittaria, jolla saa mitattua tarkoitukseen sopivaa mittapäätä käyttäen mm. ilmavirran, ilmanpaineen, lämpötilan ja ilman nopeuden. A-tikkaita tarvittiin, jotta päästiin käsiksi oikeaan

ilmanvaihtokanavaan. Mittapäinä olivat teleskooppimittapää, jossa mittaustekniikkana oli ns. kuumalankamittaus ja toinen mittapää oli ns. pitot-putki.

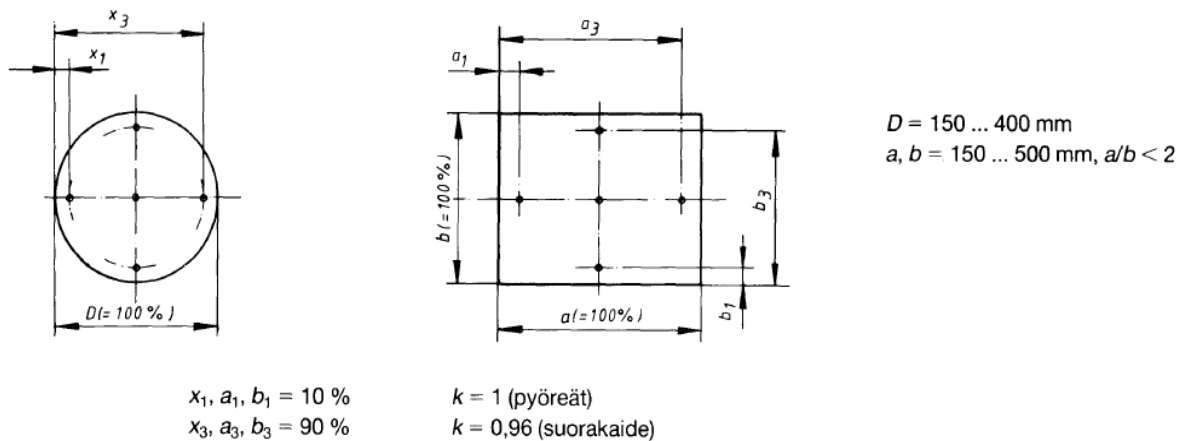
Mittaria ei käytetty ilmavirran suoraan mittaamiseen vaan se haluttiin selvittää ilman dynaamisen paineen ja ilmavirran nopeuden avulla.

Mittauksiin soveltuvat mittauspisteet oli jo etsitty ja tehty valmiiksi, joten siihen ei tarvinnut käyttää aikaa. Mittauspisteiden päälle oli laitettu suojateippi estämään vuotoilmavirtaa. Teippi poistettiin ja mittapää työnnettiin kanavaan.

Mittaukset suoritettiin puhaltimien käyttökytkimen ollessa asennossa 1, jolloin myös taajuusmuuttajien näytöt luettiin.

Mittarin mittapääksi laitettiin pitot-putki ilmanpaineen mittaamiseksi. Mittasimme ensin kummassa kanavassa on suurempi painehäviö työntämällä mittapää kanavan keskikohtaan mittauspisteeksi valitusta reiästä. Suurempi painehäviö tarkoittaa samalla suurempaa ilmavirtaa, joten tämän tiedon perusteella tiedämme oikean kanavan, josta ilmavirta tulee mitata SFP-lukua varten.

Varsinaisen ilmanvaihtokanavassa olevan painehäviön mittaukseen käytimme viiden pisteen menetelmää, joka soveltuu ilmavirran mittaamiseen pyöreistä ja suorakaiteen muotoisista kanavista, jos ilmavirran tasainen nopeus on vähintään 3 m/s. Mittaus suoritettiin työntämällä mittapää mittaureiästä sisään ja mittarista luettiin painehäviö kanavan viidestä eri kohdasta kuvan 21 mukaisesti.



Kuva 21. Viiden pisteen menetelmän mittauspisteet

Mittariin vaihdettiin teleskooppimittapää, ilmavirran nopeuden ja lämpötilan mittaamiseksi. Mittapäässä oleva anturin ikkuna suunnattiin ylävirtaa kohti. Tämä pystyttiin varmistamaan mittapään kahvassa olevasta ikkunan suuntaa osoittavasta kuviosta. Lämpötilan mittausta tehdessä varmistettiin, että mittapäästä vähintään kolme tuuma oli ilmanvaihtokanavan ilmavirrassa, jotta lämpötila-anturikin olisi kokonaan ilmavirrassa. Ilman lämpötilan mittaus suoritettiin kanavan keskeltä yhden kerran. Ilmavirran nopeus mitattiin kanavan eri kohdista neljä kertaa. Mittaustulokset kirjattiin ylös.

Ilmanvaihtokanavan mittausreikä peitettiin mittausten jälkeen ilmastointiteipillä ja ympärysmitta mitattiin rullamitalla. Mikäli mittausreikä olisi jäänyt tukkimatta, ei sillä olisi ollut merkittävää vaikutusta ilmavirtaan tai kanavassa olevaan ilmanpaineeseen.

Mittaustulokset kirjattiin kaikista mittauksista ylös.

Ilmanpainehäviön mittaukset suoritti Talotekniikan LVI –opiskelijoiden ryhmä.

Tehon ja ilmanpainehäviön mittaukset suoritettiin samalla kertaa, jolloin ilmanvaihtokoneen toimintapiste ja mittausolosuhteet olivat samat molempien mittausten aikana.

4.3 Mittaustulokset

Kun em. ilmanvaihtolaitteistot oli käynnistetty kytkemällä käyttökytkin asentoon 1 eli pakko-ohjaukselle, saimme seuraavat mittaustulokset.

Taulukosta 5 näkee puhaltimen ja sitä ohjaavan taajuusmuuttajan kuluttamasta sähkötehosta pätötehon (kW), näennäistehon (kVA) ja loistehon (kVAR) vaihekohtaisesti (sarakkeet L1, L2 ja L3) sekä niiden kokonaiskulutuksen (Total-sarake). Lisäksi taulukosta näkee vaihekohtaisen jännitteen sekä sähköverkosta otetut vaihekohtaiset virrat. PF kertoo tehokertoimen, jonka suhteessa näennäistehosta saadaan pätötehoa hyötykäyttöön. Fluken 435-mittarilla mitattaessa Teho & Energia -moodia käyttäen näkyy vaihekohtaisissa tehojen ja virran luvuissa epätarkkuuksia pyöristysvirheiden takia. Työn kannalta kiinnostava kokonaistehonkulutus saadaan riittävällä tarkkuudella Total-sarakkeen ylimmältä riviltä.

Taulukko 5. Tehon mittaustulokset

Puhallin	Mit.yksik	L1	L2	L3	Total
TF1	kW	0,3	0,3	0,3	0,9
	kVA	0,5	0,5	0,5	1,4
	kVAR	0,4	0,4	0,4	0,4
	PF	-	-	-	0,60
	Arms	2	2	2	
	Vrms	233,17	234,76	235,32	
PF1	kW	0,3	0,3	0,3	0,8
	kVA	0,4	0,4	0,4	1,2
	kVAR	0,3	0,3	0,3	0,2
	PF	-	-	-	0,69
	Arms	2	2	2	
	Vrms	233,37	234,81	235,75	

Taajuusmuuttajissa oli omat digitaaliset näyttötaulut, kuva 22, joista pystyi lukemaan käyntinopeuden prosenteissa, kierrosluvun, ohjausjännitteen taajuuden, tehon- sekä energiankulutuksen. (Tällaiset taajuusmuuttajat säästävät työkuksannuksia, kun ei tarvitse kutsua sähkömiestä erikseen mittaamaan tehoja.)



Kuva 22. Taajuusmuuttajan Danfoss VLT:n näyttötaulu

Taajuusmuuttajan SC1 ohjaama tuloilmapuhallin TF1:n käyntinopeus asettui 100 %:iin, mikä osoittaa, että puhallin pyöri sen hetkisten asetusten mukaisella maksiminopeudellaan eikä suunnitellulla nimellinopeudellaan. Tällöin kierrosluku oli 1710 kierrosta minuutissa. SC1:n ja TF1:n tehonkulutus oli 0,81 kW yhteensä. Taajuusmuuttajan puhaltimen moottorillesyöttävän jännitteen taajuus oli 57 Hz.

Taulukkoon 6 on koottu molempien taajuusmuuttajien näyttötaulun arvot.

Taulukko 6. Taajuusmuuttajan osoittamat arvot

Taajuusmuuttaja	käyntinopeus, %	kierrosluku, rpm	teho, kW	taajuus, Hz	energia, kWh
TK7-SC1	100	1710	0,81	57	2396
TK7-SC2	94	1610	0,75	53,9	2633

Ilmanvaihtokoneiden kyljissä olevat kiinteämittarit näyttivät, että tuloilmakone synnytti ilmanvaihtokanavaan 1,4 m³/s ilmavirran ja 1100 Pa painehäviön. Käytössä olleella TSI Velocicalc Plus 8386-M-FI –mittarilla mittasimme kanavan painehäviöksi 835 Pa. Poistoilmakanavan vastaavat tiedot on myös mainittu taulukossa 7.

Taulukko 7. Ilmanpainehäviön suuruus eri kanavissa

Tuloilmanvaihtokone TK7-TF1		
Mittari	ilmavirta, m³/s	painehäviö, Pa
Puhaltimen oma mittari	1,4	1100
TSI Veloci Calc Plus 8386-M-FI	-	835
Poistoilmanvaihtokone TK7-PF1		
Mittari	ilmavirta, m³/s	painehäviö, Pa
Puhaltimen oma mittari	1,15	700
TSI Veloci Calc Plus 8386-M-FI	-	740

Koska SFP-luvun laskennassa huomioidaan vain tulo- ja poistoilmalaitteistjen synnyttämistä ilmavirroista suurempi, on seuraavat ilman virtausnopeuden mittaustulokset otettu vain tuloilmakoneesta.

Tuloilmakoneen läpi kulkevan ilman nopeudeksi mitattiin taulukon 8 osoittamat nopeusarvot.

Taulukko 8. Virtausnopeus tuloilmakanavassa

Ilman virtausnopeus, m/s
4,08
4,07
4,06
3,85

Taulukossa 9 on esitetty tuloilmakoneen kanavasta viiden pisteen menetelmällä mitatut kokonaispaineet ja staattiset paineet.

Taulukko 9. Kokonaispaine ja staattinen paine

P_{koko}, Pa	P_{staattinen}, Pa
78	67
80	66
84	68
80	67
78	68

Pyöreän ilmanvaihtokanavan halkaisija oli 630 mm.

4.4 Laskelmat

Mittausten perusteella tiedämme, että tuloilmakanavassa on suurempi paine-ero, kuin poistoilmakanavassa, joten siellä on myös suurempi ilmavirta. Jotta saisimme tuloilmavirran suuruuden selville, täytyy ensin laskea ilmanvaihtokanavan poikkipinnan pinta-ala ja ilmavirran nopeus. Se voidaan laskea kahdella eri tavalla em. mittaustietoja hyväksikäyttäen.

Kanavan poikkipinnan pinta-ala

$$\begin{aligned}
 A &= \pi * r^2 \\
 &= \pi * \left(\frac{0,630\text{m}}{2}\right)^2 \\
 &= 0,312\text{m}^2
 \end{aligned}$$

Ilmavirran nopeus

Tapa 1

Kuumalankamittausten avulla saatujen ilmavirran nopeusarvoista lasketaan keskiarvo:

$$v = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}{4}$$

$$v = \frac{4,08 \text{ m/s} + 4,07 \text{ m/s} + 4,06 \text{ m/s} + 3,85 \text{ m/s}}{4}$$

$$v = 4,02 \text{ m/s}$$

Tapa 2

Ilmavirran nopeus voidaan laskea perustuen mitattuihin paine-eroihin kaava 3 (s. 39). Tämä on luotettavampi, kuin tapa 1, koska se perustuu suhteellisen ilmanpaineen mittaukseen, jossa lasketaan kahden eri mittaustuloksen erotus. Tätä ennen täytyy kuitenkin laskea kokonaispaineen ja staattisen paineen mittaustuloksista niiden keskiarvot:

Mitattujen kokonaispaineiden keskiarvo:

$$\begin{aligned} P_{\text{koko,ka}} &= \frac{P_{\text{koko1}} + P_{\text{koko2}} + P_{\text{koko3}} + P_{\text{koko4}} + P_{\text{koko5}}}{5} \\ &= \frac{78\text{Pa} + 80\text{Pa} + 84\text{Pa} + 80\text{Pa} + 78\text{Pa}}{5} \\ &= 80\text{Pa} \end{aligned}$$

Mitattujen staattisten paineiden keskiarvo:

$$\begin{aligned} P_{\text{staat,ka}} &= \frac{P_{\text{staat1}} + P_{\text{staat2}} + P_{\text{staat3}} + P_{\text{staat4}} + P_{\text{staat5}}}{5} \\ &= \frac{67\text{Pa} + 66\text{Pa} + 68\text{Pa} + 67\text{Pa} + 68\text{Pa}}{5} \end{aligned}$$

$$= 67,2\text{Pa}$$

Dynaaminen paine, kaavan 2 avulla (s. 39):

$$P_{\text{dynaaminen}} = P_{\text{koko,ka}} - P_{\text{staat,ka}}$$

$$= 80\text{Pa} - 67,2\text{Pa}$$

$$= 12,8\text{Pa}$$

Ilmavirran nopeus, kaava 3 (s. 39):

$$v = \sqrt{\frac{2 * P_{\text{dynaaminen}}}{\rho_0}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 * 12,8 \text{ Pa}}{1,293 \text{ kg/m}^3}}$$

$$= 4,4 \text{ m/s}$$

Ilmavirta

Ilmavirta saadaan laskettua kaavan 4 avulla (s. 39):

$$Q = v * A$$

$$= 4,4 \text{ m/s} * 0,312 \text{ m}^2$$

$$= 1,39 \text{ m}^3/\text{s}$$

SFP-luku

SFP-luku mittaustietojen perusteella laskien käyttäen kaavaa 8 (s. 41):

$$\begin{aligned} \text{SFP} &= \frac{P_{\text{tuloilmakone}} + P_{\text{poistoilmakone}}}{q_{\text{max}}} \\ &= \frac{0,9\text{kW} + 0,8\text{kW}}{1,39\text{m}^3/\text{s}} \\ &= 1,22\text{kW}/\text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

4.4.1 Virhetarkastelu

Taulukkoon 10 on kerätty dokumenteissa ilmoitetut virhemarginaalit. Dokumentteina on käytetty standardia SFS 5512, joka määrittelee ilmavirran mittausmenetelmästä johtuvan virhemarginaalin sekä Fluken sähkönlaatuanalysointilaitteen käyttöohjetta, jossa puolestaan ilmoitetaan mittarin virhemarginaalin tehomittauksessa. Pätötehon virhemarginaali saadaan, kun mitattuun arvoon lasketaan $\pm 2\%$ ja saatuun tulokseen lisätään tai vähennetään 10 näytön lukemaa. [18]

Taulukko 10. Virhemarginaalit

Virhelähde	Virhemarginaali
Pätöteho [kW]	$\pm 2\%$ ± 10 lukemaa
Ilmavirran mittausmenetelmä	$\pm 10\%$

Pätöteho:

Tuloilmalaitteiden ottama teho:

$$0,9\text{kW} * 2\% = 18\text{W}$$

$$18\text{W} + 10\text{W} = 28\text{W}$$

$$P_{\text{TFI}} = 0,9\text{kW} \pm 28\text{W}$$

Poistoilmalaitteiden ottama teho:

$$0,8\text{kW} * 2\% = 16\text{W}$$

$$16\text{W} + 10\text{W} = 26\text{W}$$

$$P_{\text{PFI}} = 0,8\text{kW} \pm 26\text{W}$$

Ilmavirta:

$$1,4\text{m}^3/\text{s} * 10\% = 0,14\text{m}^3/\text{s}$$

$$Q = 1,4\text{m}^3/\text{s} \pm 0,14\text{m}^3/\text{s}$$

SFP-luku

$$\text{SFP}_{\text{MIN}} = \frac{0,9\text{kW} - 28\text{W} + 0,8\text{kW} - 26\text{W}}{1,4\text{m}^3/\text{s} + 0,14\text{m}^3/\text{s}}$$

$$= 1,05\text{kW}/\text{m}^3/\text{s}$$

$$\begin{aligned} \text{SFP}_{\text{MAX}} &= \frac{0,9\text{kW} + 28\text{W} + 0,8\text{kW} + 26\text{W}}{1,4\text{m}^3/\text{s} - 0,14\text{m}^3/\text{s}} \\ &= 1,38\text{kW}/\text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

SFP-luku virherajoinen:

$$\text{SFP} = 1,22\text{kW}/\text{m}^3/\text{s} \pm 0,16\text{kW}/\text{m}^3/\text{s}$$

4.4.2 Teorettinen tarkastelu

Tarkastelu 1 SFP-luvun laskenta, ilmanvaihtolaitteiston omien mittaustietojen perusteella. Ilmavirta on katsottu tuloilmanvaihtokoneen mittarista ja sähköverkosta otettu teho on luettu taajuusmuuttajien näytöiltä.

Laskemisessa käytetään kaavaa 8 (s. 41).

$$\begin{aligned} \text{SFP} &= \frac{P_{\text{tuloilmakone}} + P_{\text{poistoilmakone}}}{q_{\text{max}}} \\ &= \frac{0,81\text{kW} + 0,75\text{kW}}{1,4\text{m}^3/\text{s}} \\ &= 1,11\text{kW}/\text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Tarkastelu 2 SFP-luvun laskeminen, kun puhaltimen nimellisteho määritellään ensin laskennallisesti. Tarkastelussa käytetään mitattuja sähkötehoja sekä teknisistä tiedoista löytyviä maksimi-ilmavirtoja, liite 9.

Ensin täytyy suhteuttaa mitatut osatehot maksimitehoiksi. Tämä tapahtuu kaavan 7 (s. 41) avulla.

$$\frac{\Delta P_x}{\Delta P_o} = \left(\frac{n_x}{n_o} \right)^3 = \left(\frac{q_x}{q_o} \right)^3$$

Tuloilmakoneen ottama teho:

$$\begin{aligned} \Delta P_{TP} &= \left(\frac{q_x}{q_o} \right)^3 * \Delta P_o \\ &= \left(\frac{1,6 \text{ m}^3/\text{s}}{1,39 \text{ m}^3/\text{s}} \right)^3 * 0,9 \text{ kW} \\ &= 1,37 \text{ kW} \end{aligned}$$

Poistoilmakoneen ottama teho:

$$\begin{aligned} \Delta P_{PP} &= \left(\frac{q_x}{q_o} \right)^3 * \Delta P_o \\ &= \left(\frac{1,4 \text{ m}^3/\text{s}}{1,15 \text{ m}^3/\text{s}} \right)^3 * 0,8 \text{ kW} \\ &= 1,44 \text{ kW} \end{aligned}$$

SFP-luvun laskenta, kaava 8 (s. 41):

$$\begin{aligned} \text{SFP} &= \frac{P_{TP} + P_{PP}}{q_{TP}} \\ &= \frac{1,37 \text{ kW} + 1,44 \text{ kW}}{1,6 \text{ m}^3/\text{s}} \end{aligned}$$

$$= 1,76 \text{ kW/m}^3/\text{s}$$

Taulukossa 11 on esitetty em. tavoin lasketut tuloilmapuhaltimen tehonkulutukset eri toimintapisteissä. Kierrosluku kertoo puhaltimen suhteellisen nopeuden. Ilmavirtasarakkeesta nähdään puhaltimen aikaansaaman ilmavirran ja sähköverkosta otettu teho määrittelee, kuinka paljon sähkötehoa tarvitaan ko. ilmavirran saavuttamiseksi.

Taulukko 11. Tuloilmapuhaltimen sähköverkosta ottama teho

Tuloilmapuhallin		
Kierrosluku	Ilmavirta, m³/s	Sähköverkosta otettu teho, W
100,0 %	1,60	1373
87,0 %	1,39	900
66,0 %	1,06	399
50,0 %	0,80	172

Taulukossa 12 on esitetty vastaavat tehonkulutukset poistoilmapuhaltimelle.

Taulukko 12. Poistoilmapuhaltimen sähköverkosta ottama teho

Kierrosluku	Ilmavirta, m³/s	Sähköverkosta otettu teho, W
100,0 %	1,40	1443
76,0 %	1,15	800
66,0 %	0,93	423
50,0 %	0,75	222

Taulukossa 13 on esitetty em. tavoin lasketut SFP-luvut eri toimintapisteissä.

Taulukko 13. SFP-luku eri kierrosnopeuksilla

Kierrosnopeus	SFP, kW/m ³ /s
100,0 %	1,76
87,0 %	1,22
66,0 %	0,78
50,0 %	0,49

Tarkastelu 3 Tässä tarkastelussa perehdytään SFP-luvun riippuvuuteen hyötysuhteesta.

Taulukoihin 14 ja 15 on poimittu puhaltimien ja niiden moottoreiden hyötysuhteet. Puhaltimien käyttökytkinten ollessa asennossa 1, kierrosnopeudet asettuivat tuloilmakoneessa 87 %:iin ja poistoilmakoneessa 76 %:iin. Hyötysuhteet näissä pisteissä on laskettu interpoloimalla. Taajuusmuuttajan valmistajan mukaan käytössä olevan laitteen hyötysuhde pysyy vakiona olosuhteissa, jotka vastaavat tässä työssä olleita. Muita kierrosnopeuksia koskevat tiedot on luettu järjestelmän teknisistä tiedoista, jotka löytyvät liitteestä 9. Tässä järjestelmässä puhaltimet oli liitetty suoraan moottorin akselille, joten siinä ei ollut kiilahihnaa tai muuta voimansiirtoa. [17]

Taulukossa 14 on kerrottu tuloilmalaitteiston hyötysuhteet tietyillä puhaltimen käyntinopeuksilla. Samasta taulukosta nähdään myös puhaltimen kierrosnopeutta vastaavan ilmavirran suuruus.

Taulukko 14. Tuloilmakoneen hyötysuhteet

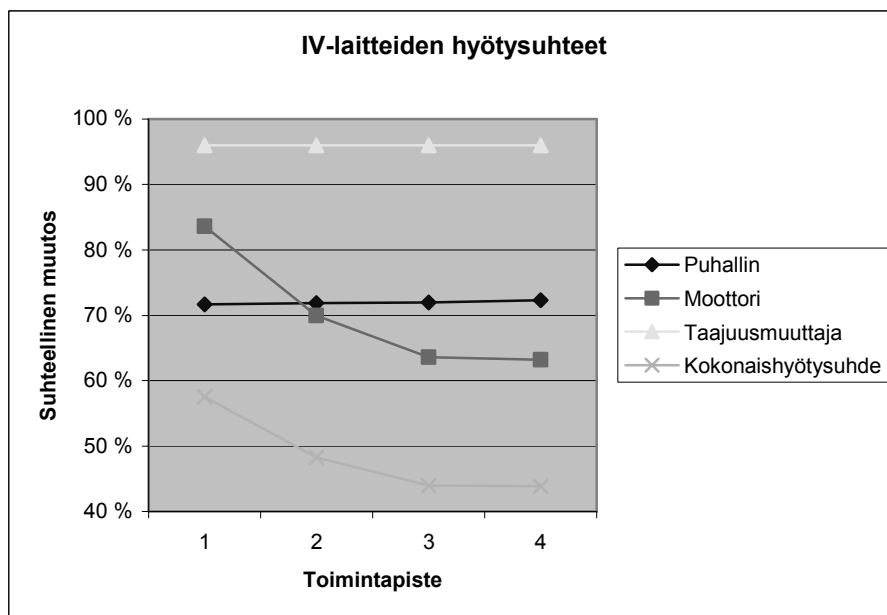
Tuloilmapuhallin					
Kierros-luku	Ilmavirta, m ³ /s	Hyötysuhde, puhallin	Hyötysuhde, moottori	Hyötysuhde, taajuusmuuttaja	Kokonais- hyötysuhde
100,0 %	1,60	0,717	0,836	0,96	0,575
87,0 %	1,39	0,719	0,700	0,96	0,483
66,0 %	1,06	0,720	0,636	0,96	0,440
50,0 %	0,80	0,723	0,632	0,96	0,439

Taulukossa 15 on kerrottu poistoilmalaitteiston hyötysuhteet puhaltimen eri käyntinopeuksilla sekä niitä vastaavat ilmavirrat.

Taulukko 15. Poistoilmakoneen hyötysuhteet

Poistoilmapuhallin					
Kierrosluku	Ilmavirta, m ³ /s	Hyötysuhde, puhallin	Hyötysuhde, moottori	Hyötysuhde, taajuusmuuttaja	Kokonaishyötysuhde
100,0 %	1,40	0,712	0,819	0,96	0,560
76,0 %	1,15	0,723	0,674	0,96	0,468
66,0 %	0,93	0,729	0,602	0,96	0,421
50,0 %	0,75	0,739	0,631	0,96	0,448

Kuvasta 23 näkee havainnollisesti, että sähkömoottorin hyötysuhde heikkenee eniten, kun kierrosluku pienenee. Puhaltimen hyötysuhde puolestaan jopa paranee hieman, kun ilmavirta pienenee. Hyötysuhteet muuttuvat samalla tavalla tulo- ja poistupuolen puhaltimissa.



Kuva 23. Hyötysuhteiden muutos puhaltimen kierrosnopeuden suhteen

Kun tiedetään ilmavirrat kaikissa toimintapisteissä ja niiden tehot sekä hyötysuhteet voimme laskea puhaltimen paineenkorotukset vastaavissa pisteissä, kaavaa 5 (s. 40) soveltamalla. Tätä tietoa tarvitaan, jotta voimme laskea SFP-luvun vakiohyötysuhteella.

$$P_{\text{sähkö}} = \frac{q_{\text{puhallin}} * \Delta p_{\text{puhallin}}}{\eta_{\text{puhallin}} * \eta_{\text{käyttö}} * \eta_{\text{moottori}} * \eta_{\text{sääto}}}$$

Tuloilmapuhaltimen paineenkorotus:

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{TP}} &= \frac{P * \eta_{\text{puhallin}} * \eta_{\text{käyttö}} * \eta_{\text{moottori}} * \eta_{\text{sääto}}}{q} \\ &= \frac{1373 \text{ W} * 0,717 * 0,836 * 0,96}{1,60 \text{ m}^3/\text{s}} \\ &= 494 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Poistoilmapuhaltimen paineenkorotus

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{PP}} &= \frac{P * \eta_{\text{puhallin}} * \eta_{\text{käyttö}} * \eta_{\text{moottori}} * \eta_{\text{sääto}}}{q} \\ &= \frac{1443 \text{ W} * 0,712 * 0,819 * 0,96}{1,40 \text{ m}^3/\text{s}} \\ &= 577 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Taulukoista 16 ja 17 näkyy yhteenvetona tulo- ja poistoilmapuhaltimien ilmavirta ja sähköverkosta otettu teho eri toimintapisteissä sekä puhaltimen paineenkorotus.

Taulukko 16. Tuloilmapuhaltimen hyötysuhde ja sen ottama sähköteho eri toimintapisteissä

Tuloilmapuhallin			
Kierrosluku	Ilmavirta, m ³ /s	Puhaltimen paineenkorotus Pa	Sähköverkosta otettu teho, W
100,0 %	1,60	494	1373
87,0 %	1,39	313	900
66,0 %	1,06	166	399
50,0 %	0,80	94	172

Taulukko 17. Poistoilmapuhaltimen hyötysuhde ja sen ottama sähköteho eri toimintapisteissä

Poistoilmapuhallin			
Kierrosluku	Ilmavirta, m ³ /s	Puhaltimen paineenkorotus Pa	Sähköverkosta otettu teho, W
100,0 %	1,40	577	1443
76,0 %	1,15	325	800
66,0 %	0,93	192	423
50,0 %	0,75	132	222

Seuraavaksi lasketaan SFP-luku vakiohyötysuhteella kaavan 5 (s. 40) avulla. Hyötysuhteena käytetään nimellinopeudella olevaa kokonaishyötysuhdetta.

$$P_{\text{sähkö}} = \frac{q_{\text{puhallin}} * \Delta p_{\text{puhallin}}}{\eta_{\text{puhallin}} * \eta_{\text{käyttö}} * \eta_{\text{moottori}} * \eta_{\text{säätö}}}$$

Tulopuhaltimen tarvitsema teho

$$P_{\text{TPsähkö}} = \frac{q_{\text{puhallin}} * \Delta p_{\text{puhallin}}}{\eta_{\text{koko}}}$$

$$= \frac{1,60 \text{ m}^3/\text{s} * 496 \text{ Pa}}{0,575}$$

$$= 1373\text{W}$$

Poistoilmapuhaltimen tarvitsema teho

$$P_{\text{PPsähkö}} = \frac{q_{\text{puhallin}} * \Delta p_{\text{puhallin}}}{\eta_{\text{koko}}}$$

$$= \frac{1,40\text{m}^3/\text{s} * 577\text{Pa}}{0,560}$$

$$= 1443\text{W}$$

Taulukkoon 18 on kerätty yhteenveto SFP -lukuista muuttuvalla ja vakiohyötysuhteella laskettuna eri toimintapisteissä. Ensimmäisessä SFP –luku sarakkeessa vasemmalta lukien arvot on laskettu normaalisti muuttuvalla hyötysuhteella. Toisen SFP -sarakkeen arvot on laskettu muuttumattomalla, vakiohyötysuhteella. Muutos sarakkeesta nähdään kuinka paljon nämä SFP -luvut eroavat toisistaan.

Taulukko 18. SFP-luvun muutos kierrosnopeuden muuttuessa ja vertailuarvona SFP-luku, joka on laskettu vakiohyötysuhteella

Kierrosnopeus	SFP, kW/m³/s	SFP, kW/m³/s vakiohyötysuhteella	Muutos %
100,0 %	1,76	1,76	0,00
78,0 %	1,22	1,02	16,22
66,0 %	0,78	0,59	24,19
50,0 %	0,49	0,44	11,30

5 Tulosten analysointi

Tiedossa oli jo ennen mittauksia, että ilmanvaihtolaitteiston automatiikka ei ollut kunnossa.

Lähtökohtana oli olettaus, että laitettaessa ilmanvaihtolaitteisto ns. käsikäytölle eli käyttökytkin laitetaan asentoon 1, niin puhaltimet alkaisivat pyöriä nimellispoiveudellaan, jolloin SFP-luku tulee myös mitata.

Ilmanvaihtokoneita ohjaavien taajuusmuuttajien osoittamat käyntinopeudet olivat 100 % ja 94 %. Tämä herätti epäilyjä olivatko kaikki taajuusmuuttajan säädöt tässäkin toimintapisteessä kohdallaan, koska käyntinopeudet kuuluisivat olla molemmissa taajuusmuuttajissa 100 %, kun puhaltimet pyörisivät nimellispoiveudellaan.

Saatujen mittaustulosten perusteella, tuloilmavirran laskettu tulos ja ilmanvaihtokoneen kiinteä mittari näyttivät samaa arvoa. Näin ollen voitiin olettaa, että molempiin tuloksiin saattoi luottaa. Tästä vedettiin johtopäätös, että myös poistoilmapuhaltimen kiinteän mittarin lukema piti paikkansa. Sen ilmavirtaa ei mitattu erikseen. Tosin mitatut ja kiinteästä mittarista luetut puhaltimien painehäviöiden arvot erosivat aivan liikaa, varsinkin tuloilmapuhaltimen osalta. Taajuusmuuttajien näyttämä tehonkulutus oli samansuuntaisia, kuin mittauksissa saamamme arvot.

Loppupiirustuksiin oli merkitty suurimmat mahdolliset ilmavirrat. Samat arvot löytyivät ilmanvaihtokoneiden kyljissä olleista lapuista. Nämä poikkesivat mitatuista ja kiinteiden mittareiden osoittamista arvoista joten ilmanvaihtokoneet eivät käyneet nimellispoiveudellaan silloin, kun käyttökytkimet olivat asennossa 1.

SFP-luku mittaustulosten avulla laskettuna

Ilmanvaihtokoneen TK7 sähkötehokkuusluku oli $1,22 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s}) \pm 0,16 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$
Tämä alittaa reilusti RakMK D2:n asettaman vähimmäisvaatimuksen, joka on 2,5

$\text{kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ Mittaustulosten perusteella saatu SFP -luku oli järkevän oloinen mutta epäilyjä herätti sen erinomaisuus, kun kyseessä oli kuitenkin kunnan koulurakennus. Mikäli oletus laitteiston toimintapisteestä olisi pitänyt paikkansa ilmanvaihtojärjestelmälle asetettu tavoite olisi ollut erittäin tiukka. Tällöin myös suunnittelu sekä toteutus olisivat onnistuneet erinomaisesti energiatehokkuuden osalta.

Ensimmäinen teoreettinen tarkastelu

Ensimmäisessä teoreettisessa tarkastelussa kiinnitettiin huomiota ilmanvaihtolaitteiston omien kiinteiden mittalaitteiden paikkansapitävyyteen. Tämän tarkastelun yhteydessä taajuusmuuttajista katsottiin sähköverkosta otetut tehot ja ilmanvaihtokoneen kyljessä olevasta ilmavirtamittarista sen antama lukema. Näiden tietojen avulla saatu SFP-luku oli samaa luokkaa mittaustulosten avulla laskettuun tulokseen nähden mahtuen virhemarginaaliin. Näin ollen em. kiinteiden mittalaitteiden tulokset olivat käyttökelpoiset.

Huomiota herättävää oli kuitenkin se, että poistoilmalaite vei enemmän tehoa, vaikka sen tuottama ilmavirta oli pienempi, kuin tuloilmapuhaltimen vastaavat lukemat. Hyötysuhteet olivat laitteiden välillä likipitään samat. Syy saattaa olla joko poisto- tai tuloilmakanavassa. Poistoilmakanavassa voi olla jotain joka estää ilmavirran vapaan kulkemisen. Tämä este voisi olla esimerkiksi väärässä asennossa oleva säätöpelti tai kanavistoa ei ole onnistuttu rakentamaan suunnitelmien mukaisesti. Mikäli syy olisi tuloilmakanavassa, se tarkoittaisi, että siellä on suunniteltua pienempi painehäviö. Tämä voisi johtua mm. säätämättömistä ilmanvaihtoventtiileistä.

Toinen teoreettinen tarkastelu

Tässä lähdettiin laskemaan SFP-lukua, kun tiedettiin puhaltimien oikea nimellisoikeus. Tulokseksi saatiin $1,76 \text{ kW}/\text{m}^3/\text{s}$. Tämäkin arvo on reilusti alle RakMK D2:n asettaman vähimmäisvaatimuksen. Tulos perustuu olettamukseen, että poistoilmapuhaltimen kiinteä ilmavirtamittari pitää paikkansa kuten tuloilmakoneen vastaava mittari. Poistoilmakoneen ilmavirran suuruutta ei ole mitattu erikseen.

Poisto- ja tuloilmapuhaltimien toimintapisteet olivat aikaisempia mittauksia tehdessä seuraavat:

Poistoilmapuhallin	76 %
Tuloilmapuhallin	87 %

Näistä toimintapisteistä päätellen ilmavirrat ovat epätasapainossa suunniteltuun toimintaan nähden. Kun järjestelmä toimii suunnitellusti niin toimintapisteen ollessa 100 %, tuloilmapuhallin puhaltaisi 1,6 m³/s ilmavirran ja poistoilmapuhallin antaisi vastaavasti 1,4 m³/s ilmavirran.

Poistopuhallin ottaa enemmän tehoa ilmavirtaan nähden, kuin tuloilmapuhallin. Poistopuolella on myös suurempi painehäviö, kuin tulopuolella. Teknisten tietojen mukaan tehonkulutus pitäisi olla juuri päinvastoin. Tämä viittaa siihen, että poistopuolen kanavistossa on jotain joka estää ilmavirran vapaan kulkemisen. Kanavisto on joko rakennettu epäedullisemmin kuin tulopuolen vastaava taisiellä oleva säätöpelti on virheellisessä asennossa.

Kun ilmavirta pienenee puoleen, tehontarve putoaa kuudesosaan ja SFP luku laskee melkein neljäsosaan.

Taulukkoon 19 on poimittu teknisestä dokumentista, liite 9, sekä laskelmista saaduista arvoista tulo- ja poistopuhaltimen ilmavirrat, tehonkulutukset sekä SFP-luvut. Tulokset vastaavat nimellinopeudella toimivaa ilmanvaihtolaitetta. Tuloilmapuhaltimen tehonkulutus on *Lasketut arvot* -sarakeessa huomattavasti pienempi, kuin vastaava arvo *Tekniset arvot* -sarakeessa. Ero saattaa tulla siitä, että tuloilmapuolella ilmanvaihtoventtiilit ovat täysin auki tai jostain vastaavasta syystä mikä pienentää kanavan painehäviötä. On myös mahdollista, että tuloilmapuoli on saatu asennettua energiataloudellisesti paremmin, kuin suunnitteluvaiheessa on ajateltu pystyttävän.

Saadut tulokset poikkeavat toisistaan. SFP-luku mahtuu virherajoihin, kun ne lasketaan edellä näytetyllä tavalla. Tällöin virhemarginaali olisi +/- 0,23 kW/m³/s.

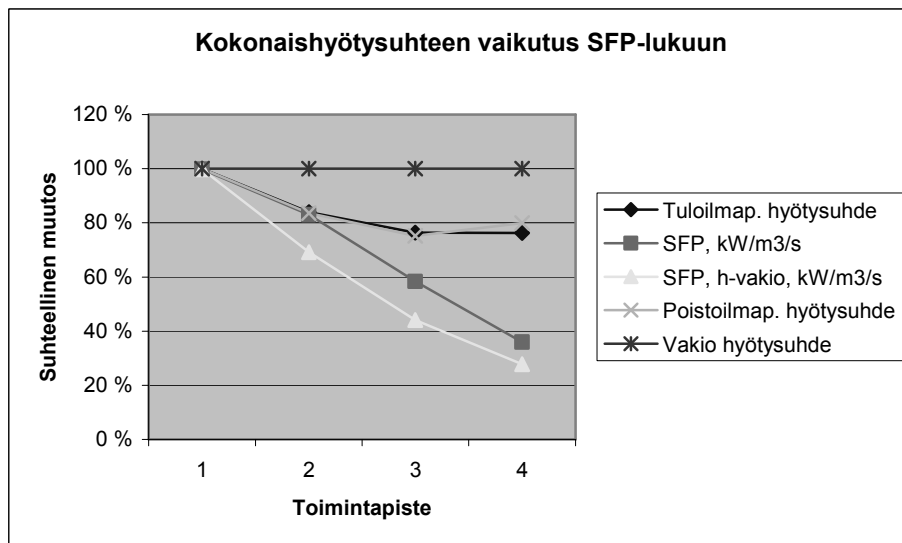
Taulukko 19. Teoreettisten tulosten vertailu teknisiin arvoihin

Tulosten vertailu nimellisnopeudella				
	Tekniset arvot		Lasketut arvot	
	Tuloilmapuhallin	Poistoilmapuhallin	Tuloilmapuhallin	Poistoilmapuhallin
Ilmavirta, m ³ /s	1,60	1,40	1,60	1,40
Sähköteho, kW	1,77	1,46	1,37	1,44
SFP-luku, kW/m ³ /s	1,89		1,76	

Kolmas teoreettinen tarkastelu

Tarkastellaan taulukossa 18 (s. 64) esitettyjä tuloksia. Näiden arvojen perusteella tehdystä kuvasta 24 nähdään kuinka kokonaishyötysuhteet ja SFP -luvut muuttuvat toisiinsa nähden, kun ilmavirta pienenee. Kuvasta voidaan havaita, että SFP-luku putoaa koko ajan pienemmäksi, kun taas hyötysuhteiden muuttuminen tasaantuu lähestyttäessä toimintapisteitä 3 ja 4. Näissä toimintapisteissä ilmavirta on pudonnut 66 %:iin (toimintapiste 3) ja 50 %:iin (toimintapiste 4) nimellisestä ilmavirrasta. Kuten olettaa saattaa tulo- ja poistoilmalaitteistojen kokonaishyötysuhteet muuttuvat samassa tahdissa. Ainoastaan neljännen toimintapisteen kohdalla poistoilmapuhaltimen hyötysuhteessa näyttää tapahtuvan outo muutos, hyötysuhde näyttäisi paranevan.

Kuvasta voidaan myös todeta, että tulo- sekä poistoilmapuhaltimen hyötysuhteiden ja vakiohyötysuhteen välinen ero aiheuttaa SFP-luvuille niiden välisen eron.



Kuva 24. Hyötysuhteiden ja SFP lukujen muutos puhaltimen kierrosnopeuden suhteen

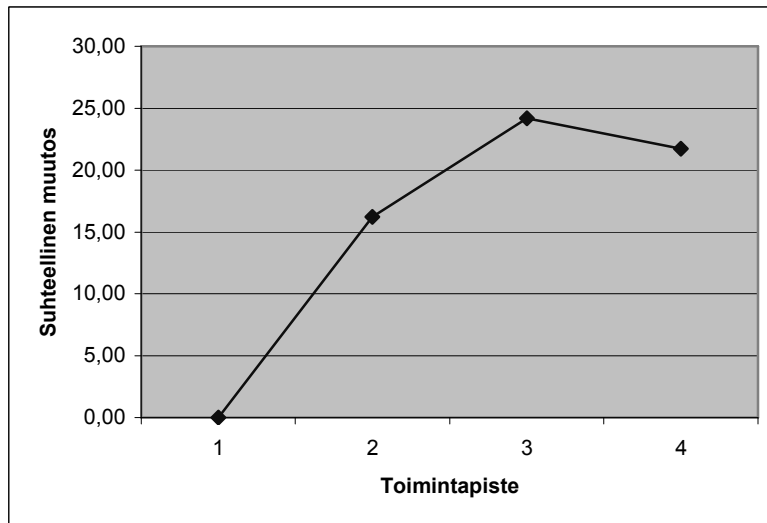
Kuvasta 25 voidaan suoraan nähdä, kuinka paljon tehokkaampi vakiohyötysuhteella toimiva ilmanvaihtolaite olisi verrattuna normaaliin, heikkenevällä hyötysuhteella toimivaan ilmanvaihtolaitteeseen.

Toimintapisteessä 1 on nimellinen ilmavirta. Tällöin SFP-luvuissa ei ole mitään eroa, koska molemmissa laitteistoissa kokonaishyötysuhde on sama.

Toimintapisteessä 2 ilmavirta on 87 % nimellisestä ilmavirrasta. Tässä pisteessä vakiohyötysuhteella toimiva ilmanvaihtolaite olisi noin 16 % tehokkaampi, kuin muuttuvalla hyötysuhteella toimiva ilmanvaihtolaite.

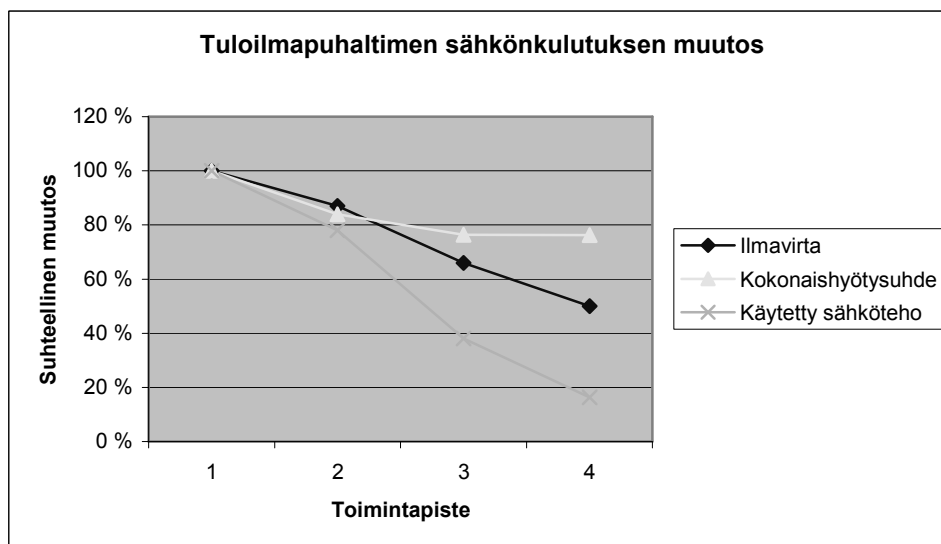
Toimintapisteessä 3 ilmavirta on 66 % nimellisestä ilmavirrasta ja hyötysuhteen vaikutus SFP-lukuun on parhaimmillaan eli melkein 25 %.

Neljännän toimintapisteen poistopuhaltimen moottorin hyötysuhde paranee jostain syystä, aiheuttaen muuten nousevan käyrän putoamisen. Tämä ei ole normaalia, joten tässä kohdin täytyy olla virhe. Tieto ilmenee teknisistä tiedoista (liite 9).



Kuva 25. Muuttuvalla ja muuttumattomalla hyötysuhteella laskettujen SFP-lukujen suhteellinen ero toisiinsa nähden

Ilmavirran, kokonaishyötysuhteen ja tehontarpeen muutokset eri käyttöasteissa on havainnollistettu kuvassa 26. Siitä näkee myös hyvin, kuinka ilmavirran pudotessa puoleen, tehontarve putoaa kuudesosaan, mittauspiste 4. Tämä johtuu fysiikan laeista, jotka on kerrottu kaavan 7 (s 41) muodossa.



Kuva 26. Sähkökulutuksen ja ilmavirran muuttuminen toisiinsa nähden

Hyötysuhteen vaikutus on merkittävä, kun tarkastellaan tilannetta, jossa on ilmanvaihtolaitteisto, jonka hyötysuhteet muuttuvat, normaalisti ja toinen

ilmanvaihtolaitteisto jonka hyötysuhteet ovat vakiot. Suurempi vaikutus on kuitenkin em. fysiikan lailla, jolla viitataan kaavaan 7 (s. 41)

6 Työn teettäminen oppilastyönä

Työ on talotekniikan opiskelijoille käytännönläheinen ja mielenkiintoinen, koska siinä sovelletaan niin ilmanvaihto- kuin sähkötekniikkaakin. Tehtävä sopii hyvin opiskelijoille, jotka ovat suorittaneet ilmanvaihdon ja sähkötekniikan alkuopinnot.

Kustannustehokkainta olisi suorittaa työ siten, että sähköteho luetaan suoraan taajuusmuuttajan näytöltä (lähes kaikissa taajuusmuuttajissa alkaa olla näyttö, josta voi lukea hetkellisen tehonkulutuksen) ja ilmavirta luetaan ilmanvaihtokanavan kyljessä olevasta ilmavirtamittarista (näiden tulisi näyttää oikeita arvoja). Tämä ei ole kuitenkaan opettavaista, joten suositeltavaa olisi, että ainakin toinen asiaan liittyvistä muuttujista (ilmavirta tai sähköteho) selvitetäisiin mittaamalla.

Ilmavirran mittausta varten tarvitaan ilmanvaihtokanavaan mittausreikä, jota varten kiinteistön omistajalta on kysyttävä lupa. Sähkötehon mittaukseen tarvitaan muutakin, kuin kiinteistön omistajan lupa. Henkilöltä, joka kytkee tehomittarin sähkökeskukseen, vaaditaan sähköalan ammattipätevyys. Mikäli tehon mittaukseen käytettävää mittaria ei saada 1,5 m varoetäisyyden ulkopuolelle sähkökeskuksesta niin mittausta tekevät henkilöt täytyy vähintäänkin opastaa tehtävään. Muiden, kuin opastettujen henkilöiden pääsy tälle alueelle on estettävä.

Jotta sähkötehon mittauksiin ei tarvittaisi jatkuvasti sähköalan ammattipätevyiden omaavaa henkilöä eikä täytyisi huolehtia 1,5 m varoetäisyydestä, voitaisiin sähkökeskukseen kiinnittää läpinäkyvä mittauspisteillä varustettu suojalevy. Virran mittausta varten suojalevyn läpi olisi vedetty virtajohtojen lenkit siten, että niiden ympärille olisi helppo asettaa tehomittarin virtapihdit. Virtajohtojen lenkit tulisi olla vahvistetut, jotta ne kestäisivät mekaanista rasitusta ilman sähköiskun vaaraa. Lisäksi levyssä olisi kosketussuojatut jännitteiden mittauspisteet. Lisäksi suojalevyssä tulisi olla

maadoituspiste, jota tarvitaan joitakin sähkötehomittalaitteita varten. Levyn läpinäkyvyys mahdollistaisi mittauskytkennän näkemisen oppimistarkoituksessa.

Suojalevy parantaisi sähköturvallisuutta ja nopeuttaisi työn sujuvuutta. Tässä ei tarvitsisi myöskään miettiä vastuukysymyksiä vahingon sattuessa.

7 Yhteenveto

Tarkastelussa olleen ilmanvaihtokoneen TK7 automatiikka oli täysin epäkunnossa. Sen toimintakunto ei sallinut suorittaa sähkötehokkuusmittausta niin, kuin se virallisissa dokumenteissa määritellään, joten mittaukset suoritettiin puhaltimien osatehoilla. Näiden tulosten perusteella laskettiin lopullinen SFP-luku teoreettisten laskujen avulla.

Kaikilla laskentatavoilla saadut SFP-luvut alittivat RakMK D2:n asettaman vaatimuksen selvästi. Tulokset olivat myös samansuuntaiset teknisistä asiakirjoista löytyviin tietoihin nähden. Näin ollen voidaan olettaa, että myös viralliset mittaukset tulevat osoittamaan tämän.

Mittaus- ja laskentatulosten sekä teorian perusteella voidaan sanoa, että järjestelmään kuuluvien laitteiden hyötysuhteet, vaikuttavat SFP-lukuun huomattavasti. Vaikutus kasvaa aluksi nopeasti hiipuen myöhemmin vakaaksi. Vaikutus näyttäisi olevan suurin, eli noin 25 % silloin, kun ilmavirta on pudonnut puoleen nimellisvirrasta. SFP-lukuun vaikuttaa kuitenkin eniten fysiikan laki, jonka mukaan ilmavirran pudotessa puoleen, tehontarve putoaa kuudesosaan (ks. kaava 7, sivu 41).

Ilmanvaihtolaitteiden energiatehokkuuden parantamiseksi kannattaa laitteiden hyötysuhteita pyrkiä parantamaan. Myös laitteiden hyötysuhteiden pysyminen muuttumattomina parantaisi oleellisesti ilmanvaihdon energiatehokkuutta. Kuten tiedämme ilmanvaihtolaitteet käyvät yleensä alle nimellisnopeutensa, jolloin hyötysuhteiden pysyminen muuttumattomina olisi ihanteellista. Askel tähän suuntaan voisi olla vaihteisto moottorin ja puhaltimen välillä, joka toimisi hyvällä hyötysuhteella.

Vaihteiston tarkoitus olisi estää kokonaishyötysuhteen putoamisen, kun käyttönopeutta pudotetaan alle nimellinopeuden.

Tutkimusta voisi jatkaa, kun rakennuksen ilmanvaihtolaitteistot ovat toimintakunnossa myös automaation osalta. Tällöin olisi mielenkiintoista selvittää koko rakennuksen ilmanvaihdon SFP-luku ja se, että ilmatasapaino on oikein. Nyt tutkitussa laitteistossa tulo puolen ilmavirta oli suurempi kuin poisto. Koko rakennuksen ilmanvaihto pitää olla jonkin verran alipaineinen, jottei kosteus tunkeutuisi rakenteisiin. Tämän tutkimuksen valossa jäi toteamatta onko rakennus yli- vai alipaineinen.

Jatkotutkimuksen voisi suorittaa myös oppilastyönä, kuten edellä on mainittu.

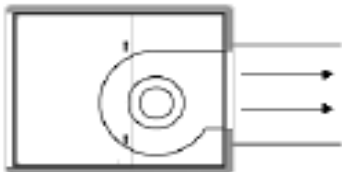
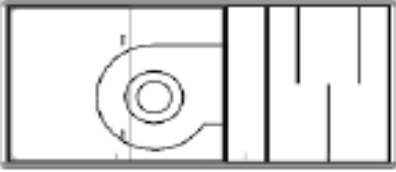
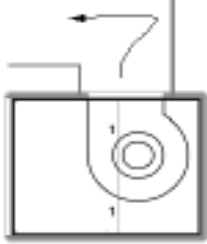
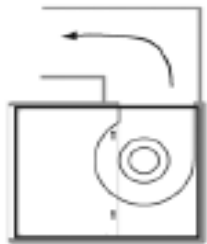
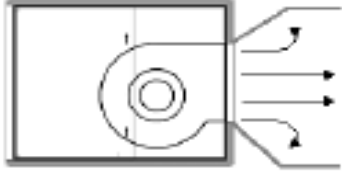
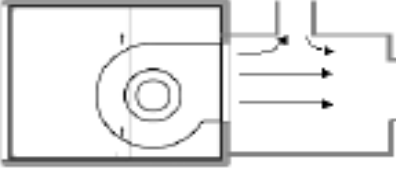
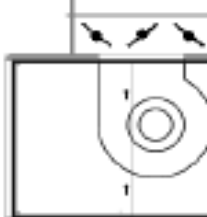
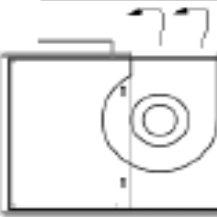
Toinen jatkotutkimuksen paikka olisi tutkia voisiko ilmanvaihtojärjestelmään asentaa sellaista vaihteistoa, jolla parannettaisiin hyötysuhdetta ja millä edellytyksillä tämä olisi järkevää.

Lähteet

- 1 Energia hintaindekseissä. (WWW-dokumentti) Tilastokeskus.
<http://www.stat.fi/ajk/tapahtumia/2006-05-09_lehtinen.pdf>. Luettu 07.07.2010.
- 2 Energialuokitus. (WWW-dokumentti) valtion ympäristöhallinnon verkkopalvelu.<<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=105735&lan=fi>>ttu 07.07.2010.
- 3 Kiinteistöistä yhteisötason ratkaisuihin. (WWW-dokumentti) Tekes.
<http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/Yhdyskunta/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ ja_aktivointi/Esitysaineisto/Juha_Kostiainen.pdf>. Luettu 10.07.2010.
- 4 Ilmanvaihtojärjestelmän käyttöikäsuunnittelu ja elinkaarikustannukset. (WWW-dokumentti) Recair Oy. <www.recair.fi/download/Elinkaariesitelma.pdf>. Luettu 17.08.2010
- 5 Painovoimainen_ilmastointi. (WWW-dokumentti) Econo.
<http://www.econo.fi/tutkimukset/documents/painovoimainen_ilmastointi.pdf>. Luettu 09.08.2010.
- 6 Painovoimainen ilmanvaihto. (WWW-dokumentti) Talotori.
<<http://www.talotori.net/matilainen.php>>. Luettu 10.08.2010.
- 7 Terveellisen rakennuksen ilmanvaihto. (WWW-dokumentti) Hengitysliitto Heli.
<<http://www.sisailma.info/tiedostot/Oppaat/Ilmanvaihto%202002.pdf>>. Luettu 10.08.2010.
- 8 Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmä. (WWW-dokumentti) RCL Climecon.
<<http://www.rcl.fi/index.php?k=15706>>. Luettu 11.08.2010.
- 9 Fysiikka ja kemia - luku 8. (WWW-dokumentti) Oulun yliopisto.
<<http://cc.oulu.fi/~ljalonen/Kurssit/Fysiikka%20ja%20kemia/Fysiikka%20ja%20kemia%20-%20luku%208.pdf>>. Luettu 10.08.2010.
- 10 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Suomen Rakentamismääräyskokoelma, osa D2. Helsinki: ympäristöministeriö, 2010.
- 11 Sähkömoottorin hyötysuhde. (WWW-dokumentti) Tekniikka&Talous.
<<http://www.tekniikkatalous.fi/metalli/metallitekniikka/article400931.ece>>. Luettu 12.08.2010.
- 12 Korkeahyötysuhteisten sähkömoottorien hankintasuositus. Motiva Oy, Helsinki: 2004
- 13 Ilmanvaihtokone. Systemair Oy, Vantaa
- 14 Ilmastointikoneen SFP-luku ja sen laskenta. (WWW-dokumentti) Recair Oy
<http://www.recair.fi/pdf/sfp-luku_recair-netissa.pdf>. Luettu 08.07.2010

- 15 SFP-opas. (WWW-dokumentti) LVI-talotekniikkateollisuus ry.
<<http://www.flaktwoods.fi/476d6be3-be6e-42e9-bd82-6152ff71a7aa>>.
Luettu 07.07.2010
- 16 Rakennuksen sähköenergiankulutuksen tavoitearvot. (WWW-dokumentti) VTT.
<<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1996/T1756.pdf>>. Luettu 13.08.2010
- 17 VLT® HVAC -taajuusmuuttajan suunnitteluopas. Danfoss Oy. 2007
- 18 F435_UM_Finnish. FLUKE. 2007
- 19 Taniplan-roottorit. (WWW-dokumentti) Taniplan Oy.
<<http://www.taniplan.fi/userData/taniplan-ky/pyorivat-regeneraattorit/Taniplan-roottorit.pdf>>. Luettu 07.09.2010.
- 20 Teollisuussähköverkon yliaallot ja loistehon kompensointi. (WWW-dokumentti) Tampereen Teknillinen Yliopisto.< http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dyot/Toppinen_Tarmo_julk.pdf >. Luettu 28.10.2010.
- 21 ACS800 taajuusmuuttajien vikapuuanalyysi. (WWW-dokumentti) Satakunnan Ammattikorkeakoulu <https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/1051/Viitanen_Elina.pdf?sequence=1>. Luettu 8.11.2010
- 22 Yliaalto-opus. (WWW-dokumentti) Leenakorpinen.
< www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf >. Luettu 28.10.2010.
- 23 Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. (WWW-dokumentti) ABB.
< [http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/\\$File/Tekninen_opas_nro_6.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/$File/Tekninen_opas_nro_6.pdf)>.
Luettu 28.10.2010.
- 24 Sähkön laatu. (WWW-dokumentti) Oulun seudun Ammattikorkeakoulu
< http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/04_0_S%84hk%94n%20laatu.pdf >. Luettu 29.10.2010.
- 25 PDS-käyttöjen asennus ja kokoonpano EMC-vaatimusten mukaan.
(WWW-dokumentti) ABB.<[http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/bb3f0dff646d5948c1256d2800411386/\\$File/TechnicalGuideNo_3FI.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/bb3f0dff646d5948c1256d2800411386/$File/TechnicalGuideNo_3FI.pdf)>. Luettu 29.10.2010.

LIITE 1: Puhaltimen liitäntä kanavaan

	
<p>Kun ilmanvaihtokoneen puhallin valitaan ja mitoitetaan kanavaliitäntäisenä, laskee mitoitusohjelma liitäntähäviön käyttäen tiettyä, puhaltimeen liittyvää kanavakokoa. Asennuksessa tulee noudattaa puhaltimen valmistajan suositusta kanavakoon ja esteettömän pituuden suhteen.</p>	<p>Kun ilmanvaihtokoneen puhallin mitoitetaan samaan tuotesarjaan kuuluvan äänenvaimentimen kanssa, ottaa mitoitusohjelma automaattisesti huomioon tarvittavat painehäviökorjaukset. Vaimentimen jälkeen ilman nopeus on niin tasainen, että liitäntävällä ei ole käytännön merkitystä.</p>
	
<p>Mikäli puhaltimen paineaukko liitetään käyrään, joka kääntyy väärään suuntaan puhaltimen pyörimissuuntaan nähden, aiheutuu tästä suuri liitäntähäviö, koska puhaltimesta suurella nopeudella tuleva ilmavirta joutuu vaihtamaan suuntaa pienessä tilassa.</p>	<p>Kun käyrä kääntyy samaan suuntaan puhaltimen pyörimissuunnan kanssa, saadaan virtausteknisesti edullinen liitäntä. Puhaltimen pyörimissuunta tuleeikin mahdollisuuksien mukaan aina valita tämän tapauksen mukaisesti.</p>
	
<p>Kanavan laajentaminen jyrkällä 'diffusorilla' ei ole suositeltavaa. Kanavaliitäntäessä pitää kanavan yläreunan jatkaa suoraan pitkin puhaltimen ulospuhallusaukon yläreunaa. Vaihtoehtoisesti kanavan pitää olla kaukana puhallusaukon yläreunasta (= puhallus kammioon -tilanne).</p>	<p>Mikäli puhaltimen painepuoli on liitetty kammioon, josta lähtee kanavaliitäntöjä eri suuntiin, joudutaan ejektorivaikutuksen takia kuristamaan eteenpäin lähtevää kanavaa kohtuuttoman paljon, jotta ilma saataisi menemään ylöspäin olevaan liitäntään.</p>
	
<p>Puhaltimen paineaukkoon ei ilman suojaetäisyyttä pidä asentaa mitään osia, kuten esimerkiksi sälepeitä. Sälepeiti estää virtauksen tasaantumisen ja aiheuttaa näin suuren törmäyshäviön. Samalla peitti joutuu voimakkaasti pyörtelleeseen ilmavirtaan, jolloin sen elinikä lyhenee ratkaisevasti.</p>	<p>Lilän pieni kanavakoko puhaltimen jälkeisessä käyrässä aiheuttaa voimakkaan törmäyshäviön ja virtaushäiriön. Tällöin puhaltimen ilmavirta tulee epästabiiliksi eli puhallin alkaa 'pumpata'. Puhallin pitää voimakasta ääntä ja vaurioituu ennen pitkää. Kanavamitoissa pitää noudattaa valmistajan ohjeita.</p>

Kuva 3. Puhaltimen liitäntä kanavistoon

LIITE 2: Sähkösyötössä esiintyvät yliaallot

1(7)

Lyhyt teoriaosuus yliaalloista

Yliaallot syntyvät sähkösyöttöön kytketyistä epälineaarista kuormista. Näitä ovat puolijohdekomponentteja sisältävät laitteet esim. tasa- ja vaihtosuuntaajat, joita esiintyy mm. tietokoneissa ja taajuusmuuttajissa. Epälineaariset kuormat ottavat virtaa sykäyksittäin, jolloin virta säröytyy. [22, 23]

Syntyneet häiriöt aiheuttavat sähkölaitteisiin

- toimintahäiriöitä (esim. tietokoneet)
- johtojen sekä laitteiden ylikuumentumista
- automaattisulakkeiden laukeamisia
- tehohäviöitä
- moottoreiden palamisia
- moottoreiden tärinä ja ääni-ilmiöitä
- moottoreiden heilurimomenteja

Esiintyvistä ongelmista suurin on kuitenkin resonanssi, joka aiheuttaa yliaaltovirtojen tai jännitteiden moninkertaistumista. Resonanssi syntyy, jos jokin yliaallon taajuus on lähellä sähköverkon resonanssitaajuutta. [22]

Harmoniset yliaallot luokitellaan kolmella eri tavalla ominaisuuksiensa mukaan:

- järjestysluku: harmoniset yliaallot ovat perustaajuuden kerrannaisia, joten järjestysluku kertoo kuinka mones ko. yliaalto on
- taajuus
- luokitus: kertoo mihin suuntaan ko. harmonisen yliaallon magneettikenttä pyörii

Kuvassa 1. on esitetty perustaajuus ja yhdeksän ensimmäistä harmonista yliaaltoa. Perustaajuus on siis 50 Hz ja sen järjestysluku on 1. Toinen harmonisen yliaallon taajuus on 100 Hz ja sen magneettikenttä pyörii vastapäivään perustaajuuteen nähden.

LIITE 2: Sähkönsyötössä esiintyvät yliaallot**2(7)**

Yliaallot, joiden magneettikenttä pyörii vastapäivään perustaaajuuteen nähden, voivat polttaa induktiomoottorin. Kolmannen yliaallon taajuus on 150 Hz ja sen magneettikenttä ei pyöri ollenkaan. Seuraavien yliaaltojen ominaisuuden jatkuvat tästä eteenpäin loogisesti.[22]

No.	perus	2	3	4	5	6	7	8	9
Taajuus	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Komp.	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Kuva 2. Harmonisten yliaaltojen luokitus [22]

Parittomat yliaallot ovat yleisimpiä harmonisista yliaalloista.

Parilliset yliaallot sisältävät aina tasavirtakomponentin ja mikäli niitä esiintyy useita samanaikaisesti, on se yleensä merkki verkossa olevasta viallisesta laitteesta.

Kolmella jaolliset harmoniset yliaallot summautuvat nollajohtoon, koska niiden magneettikenttä ei pyöri ja näin ollen ne eivät sisällä vaihesiirtoa keskenään jolloin ne voisivat kumoutua. Nollajohtoihin voi muodostua huomattavasti suurempi virta, kuin itse vaihejohtoihin, jolloin ne kuormittuvat hallitsemattomasti. Tämä voi aiheuttaa palovaaran tai laitteiden vikaantumisen. Siitä voi aiheutua myös jännitehäviön nousu nollajohdon ja suojamaan välille, jolloin suojalaitteet eivät enää toimi riittävän nopeasti.

Yliaallot saattavat kulkeutua pitkiäkin matkoja sähköverkossa. Ne voivat tulla galvaanista yhteyttä pitkin tai indusoitumalla. Yliaaltojen leviämisen estämiseksi on laadittu ohjeita sähkölaitteiden suunnittelemiseen ja niiden asentamiseen.

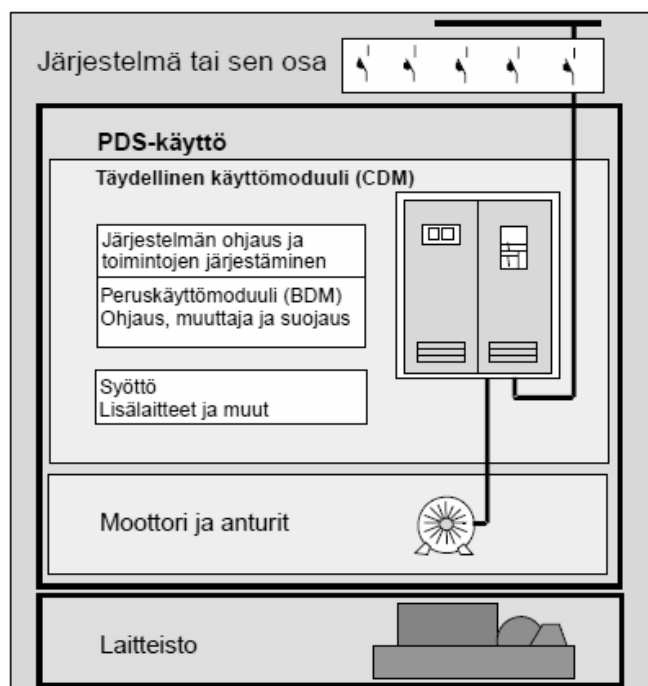
Ohjeissa kiinnitetään huomiota sähkölaitteiden EMC –ominaisuuksiin (**E**lectromagnetic **C**ompatibility), jolla tarkoitetaan laitteen kykyä toimia moitteetta

LIITE 2: Sähkönsyötössä esiintyvät yliaallot

3(7)

sähkömagneettisessa ympäristössä. Se edellyttää myös, että laite ei itse tuota häiriötä ympäristöönsä.

Tässä yhteydessä tähän työhön liittyen on syytä mainita myös PDS-käyttö, koska järjestelmät joissa on nopeussäädettyjä käyttöjä, katsotaan aiheuttavan myös sähkömagneettisia häiriöitä. PDS-käytöllä (Power Drive System) tarkoitetaan siis kuvassa 3 esitettyä järjestelmää, johon kuuluu taajuusmuuttaja, syöttöyksikkö, moottori(t), anturi(t), kaapeloinnit, suotimet, kojeistot ja muut komponentit, joita tarvitaan em. kaltaisen järjestelmän tehokkaaseen käyttöön.



Kuva 3. PDS käytön osat [25]

EMC-vaatimukset koskevat siis koko PDS-käyttöä eli koko ilmanvaihtojärjestelmää. Tämä tarkoittaa, että siinä käytettävät laitteet aina sähkökaapeleita myöden tulee olla suojattuja sähkömagneettisia häiriöitä vastaan.

LIITE 2: Sähkönsyötössä esiintyvät yliaallot**4(7)**

Yliaalloilta suojaudutaan suodattamalla niitä passivisilla tai aktiivisilla laitteilla.

Tällaisia ovat:

- rinnakkaiskondensaattoriparisto
- automatiikkaparisto
- estokelaparisto
- yliaaltosuodatin
- tyristorikytketty kondensaattoriparisto
- staattinen kompensattori
- aktiivisuodatin
- pyörivät kompensointilaitte (tahtimoottori)

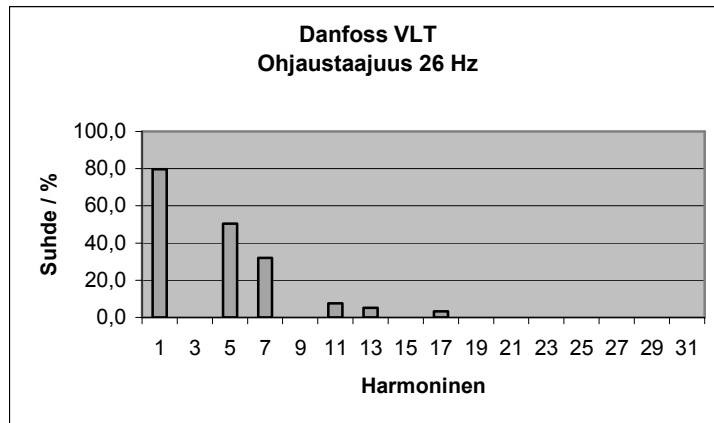
Taajuusmuuttajan aiheuttamat harmoniset yliaallot

Tässä mittauksessa käytössä oli nykyaikainen Danfoss VLT –taajuusmuuttaja sekä vanha ABB Strömberg Drives –taajuusmuuttaja. Tällä testillä halusimme todeta millaisia harmonisia yliaaltoja taajuusmuuttaja synnyttää.

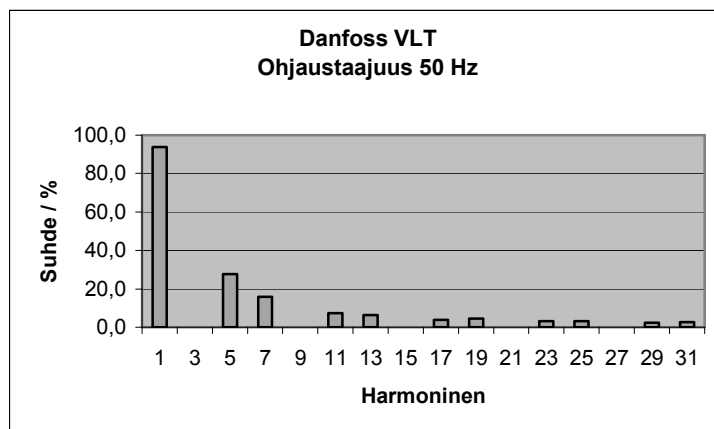
Mittasimme harmoniset yliaallot taajuusmuuttajan sähkönsyötön puolelta. Mittaus suoritettiin yhdestä vaiheesta. Suoritimme mittauksen kahdella eri taajuusmuuttajan moottorille syöttämällä jännitteen taajuudella ja toistimme mittaukset toisella taajuusmuuttajalla. Tulokset on esitelty kuvissa 4 – 7.

LIITE 2: Sähkönsyötössä esiintyvät yliaallot

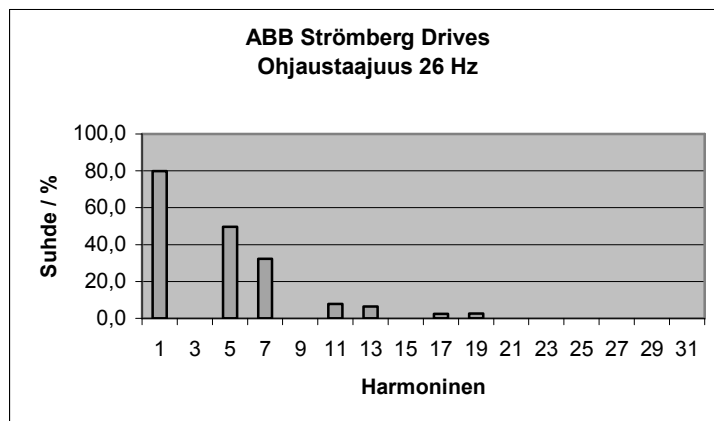
5(7)



Kuva 4. Danfoss VLT, ohjaustaajuudella 26 Hz



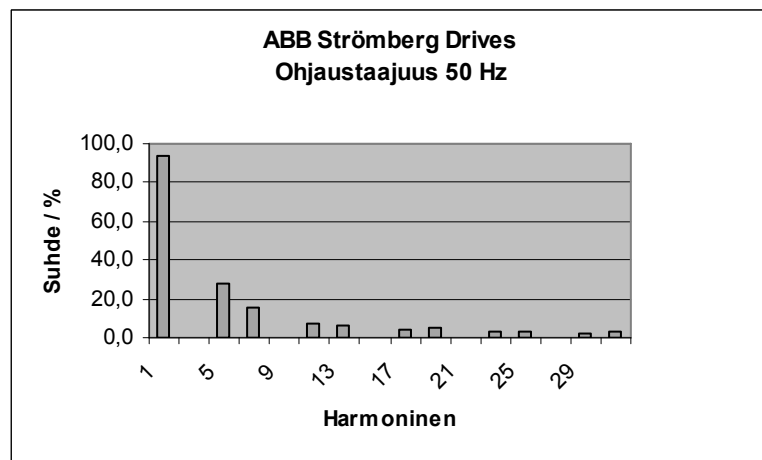
Kuva 5. Danfoss VLT, ohjaustaajuudella 50 Hz



Kuva 6. ABB Strömberg Drives, ohjaustaajuudella 26 Hz

LIITE 2: Sähkönsyötössä esiintyvät yliaallot

6(7)



Kuva 7. ABB Strömberg Drives, ohjaustaajuudella 50 Hz

Kokonaissärön (THD) määrittäminen

Kaavalla 1 saadaan laskettua virran kokonaissärö. Kaavaa soveltamalla voidaan laskea myös jännitteen kokonaissärö.[23, 24]

$$\text{TDH} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1)$$

TDH = virran kokonaissärö

I_1 = perustaajuusvirran rms-arvo (tehollisarvo)

I_n = virran n:nen harmonisen komponentin rms-arvo (tehollisarvo)

Seuraavaksi lasketaan taajuusmuuttajan Danfoss VLT:n ottaman virran harmoonisien yliaaltojen aiheuttama kokonaissärö, kun taajuusmuuttajan ohjaustaajuus oli 26 Hz.

$$\text{TDH} = \frac{\sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{17}^2}}{I_1}$$

LIITE 2: Sähkönsyötössä esiintyvät yliaallot**7(7)**

$$\text{TDH} = \frac{\sqrt{79,6^2 + 50,5^2 + 32,1^2 + 7,6^2 + 5,1^2 + 3,3^2}}{1,2}$$

$$\text{TDH} = 83,4\%$$

Virran kokonaissärö on esitetty taulukossa 1 molemmille taajuusmuuttajille sekä 26 Hz, että 50 Hz syöttötaajuudella. Arvoista voidaan päätellä, että eri valmistajien taajuusmuuttajissa on hyvin samantapaiset tasasuuntaajat, koska kokonaissäröissä ei ole juurikaan eroa valmistajien välillä.

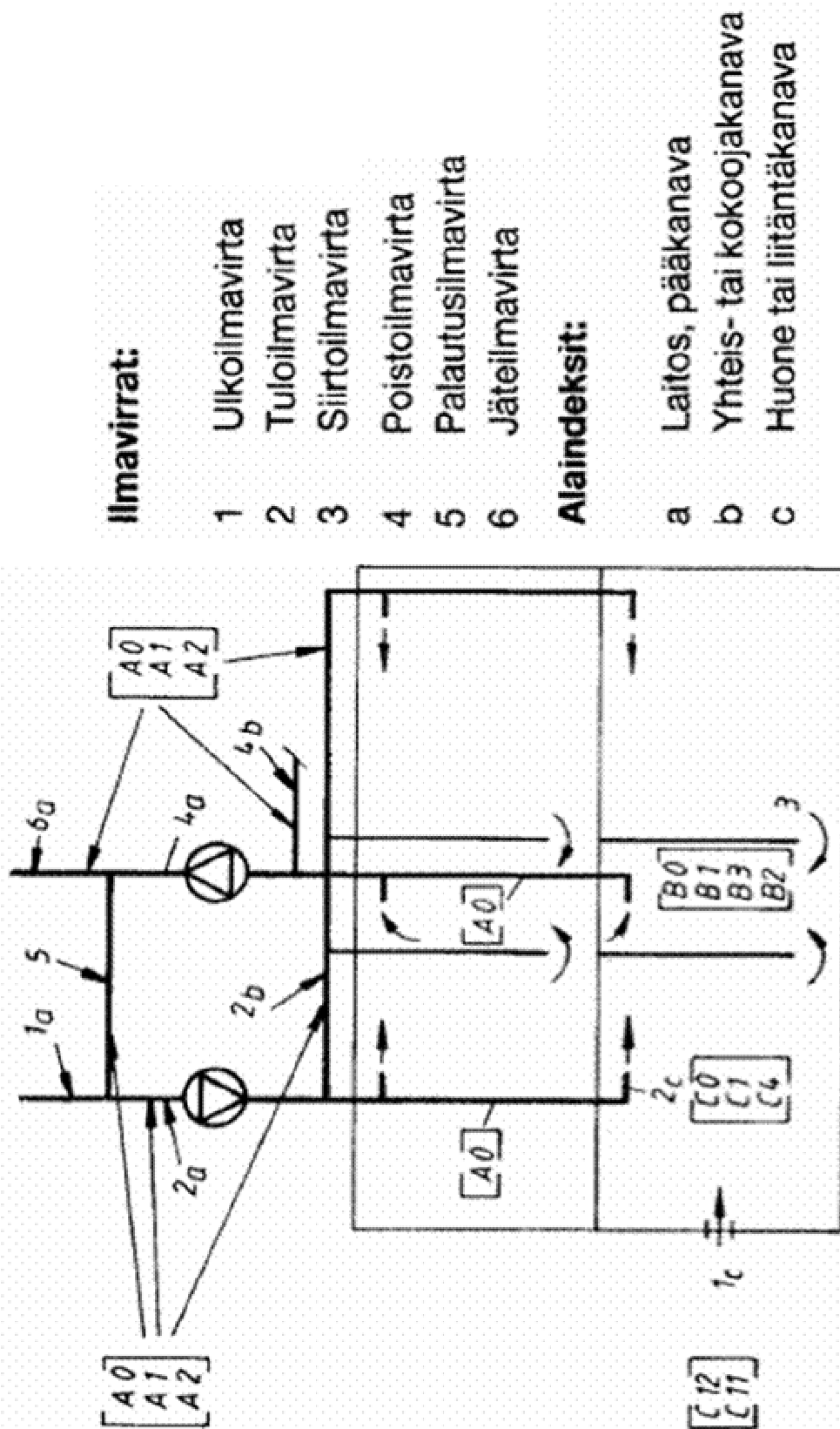
Taajuusmuuttaja	Taajuus / Hz	TDH / %
Danfoss VLT	26	83,4
	50	17,6
ABB Strömberg Drives	26	83,3
	50	17,5

Taulukko 1. Kokonaissärön määrä eri syöttötaajuuksilla

Virran kokonaissäröjen määrästä voi myös todeta, että harmonisia yliaaltoja on runsaasti, joten sähkötehoa mitattaessa täytyy käyttää True-RMS mittalaitetta, jotta mittaustulokseksi saataisiin oikea tehollisarvo.

LIITE 3: Ilmavirran mittausmenetelmät

1(2)



LIITE 3: Ilmavirran mittausmenetelmät

2(2)

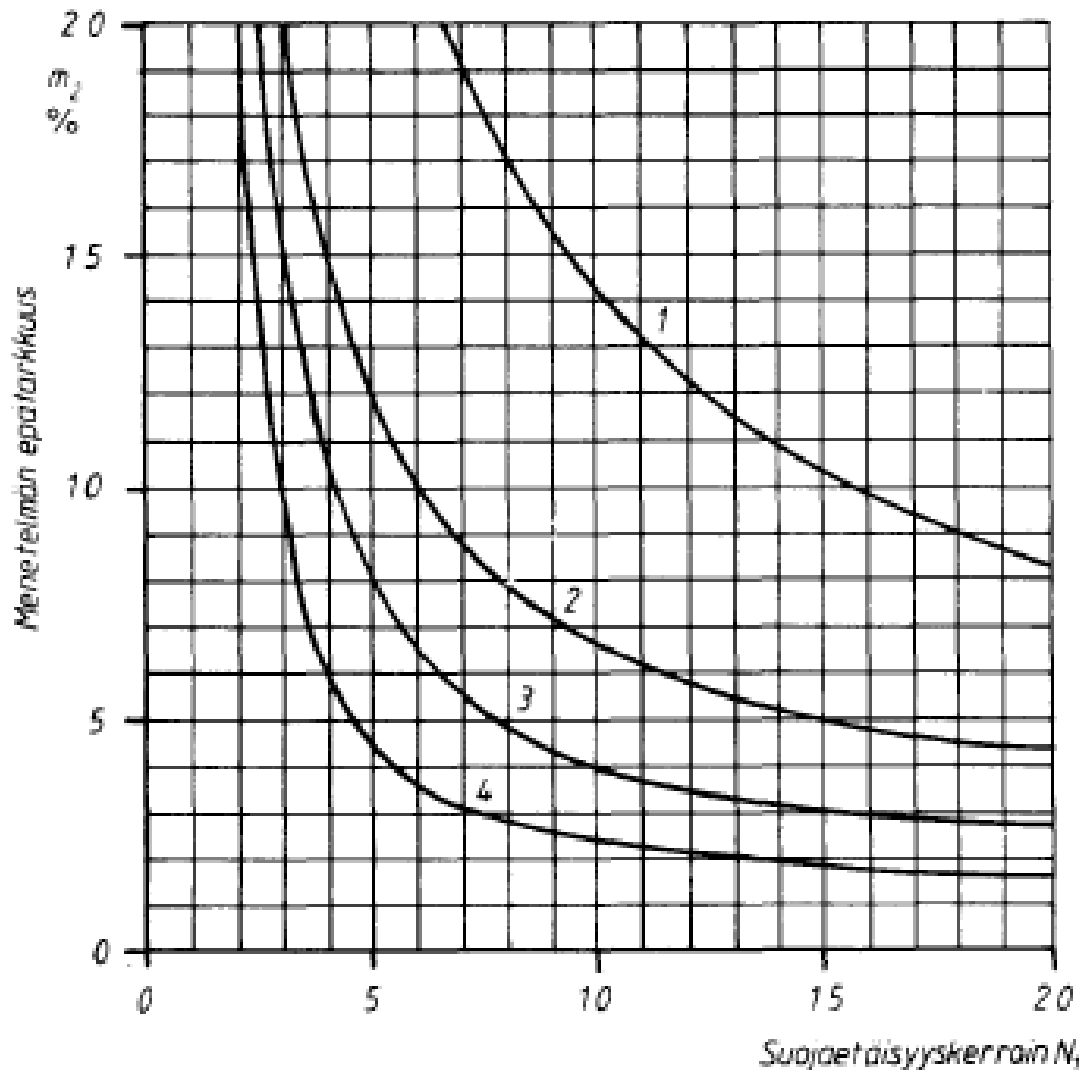
KANAVA A	Mittauspaikka tai kohde POISTOILMAELIN B	TULO- JA ULKOILMAELIN C
A0 Kiinteästi asennetut mittauselimet	B0 Kiinteästi asennetut mittauselimet	C0 Kiinteästi asennetut mittauselimet
A1 Kiinteät mittauselimet	B1 Paine- eromittaus B11 mittaus- anturilla B12 kiinteällä mittauseli- mellä tai -yhteellä/ yhteillä	C1 Paine- eromittaus C11 mittaus- anturilla C12 kiinteällä mittauseli- mellä tai -yhteellä/ yhteillä

A2 Monipiste-
mittausB2 Keskinopeus-
menetelmä
suorakaiteen
muotoiset elimet

A21 pyöreä kanava

A22 suorakaide-
kanava(A3 Merkkiaine-
mittaus)B3 Mittaus
anemometri-
torvella(C3 Mittaus
anemo-
metritorvella)C4 Pussimene-
telmä

LIITE 4: Ilmavirran mittaustarkkuuden arviointi



- 1 = keskipistemenetelmä
- 2 = viiden pisteen menetelmä
suorakaidemenetelmä, kun $n = 4$
- 3 = log-linear-menetelmä, 12 pisteen
suorakaidemenetelmä, kun $n = 6 \dots 10$
- 4 = log-linear-menetelmä, 24 pisteen
suorakaidemenetelmä, kun $n \geq 12$

Kaikissa tapauksissa on vaatimuksena $N_2 \geq 2,0$

LIITE 5: Pyörivän LTO-kiekon puhtaaksipuhallus

VUOTO JA PUHTAAKSIPUHALLUS

Huhteluvaikutus perustuu tulo- ja poistupuolen väliseen paine-eroon. Paineen tulopuolella on oltava vähintään 200 Pa poistupuolella vallitsevaa painetta suurempi, jotta huhtelu tapahtuisi mahdollisimman täydellisesti. Puhaltimet on asennettava roottoriin nähden siten, että po. paineero saavutetaan. Huhtelusektorin vuotoilmavirta voidaan painesuhteita järjestämällä saada tapahtumaan aina puhtaasta likaiseen ilmavirtaan. Vuoto ja puhtaaksipuhallus sektorin ilmavirta vaikuttaa puhaltimien mitoittamiseen seuraavasti:

Suure: Puhaltimen sijoituspaikka:

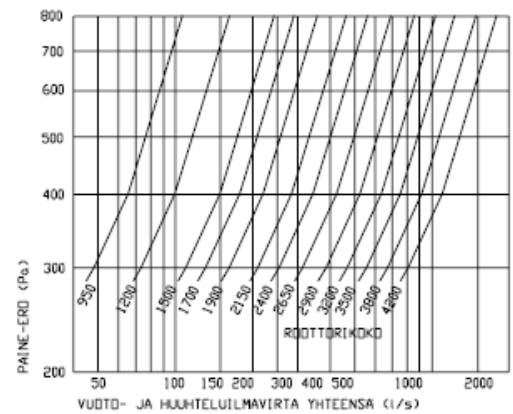
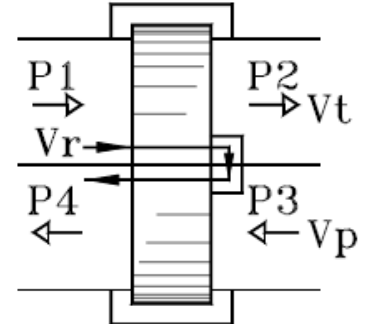
Vt = nimellinen tuloilmavirta	P1:	$V_d = V_t + V_r$
Vp = nimellinen poistoilmavirta	P2:	$V_d = V_t$
Vr = puhtaaksipuh.+vuotoilmavirta	P3:	$V_d = V_p$
Vd = mitoitusilmavirta	P4:	$V_d = V_p + V_r$

HUUHTELU- JA VUOTOILMAVIRRAN SUURUUS

Oikealla olevan diagrammin avulla saadaan ohjearvot huhtelu ja tiivistevuotoilmavirralla yhteensä poisto ja tulopuolen paine-eron funktiona. Huhteluilmavirrasta käytetään myös nimitystä puhtaaksipuhallusilmavirta.

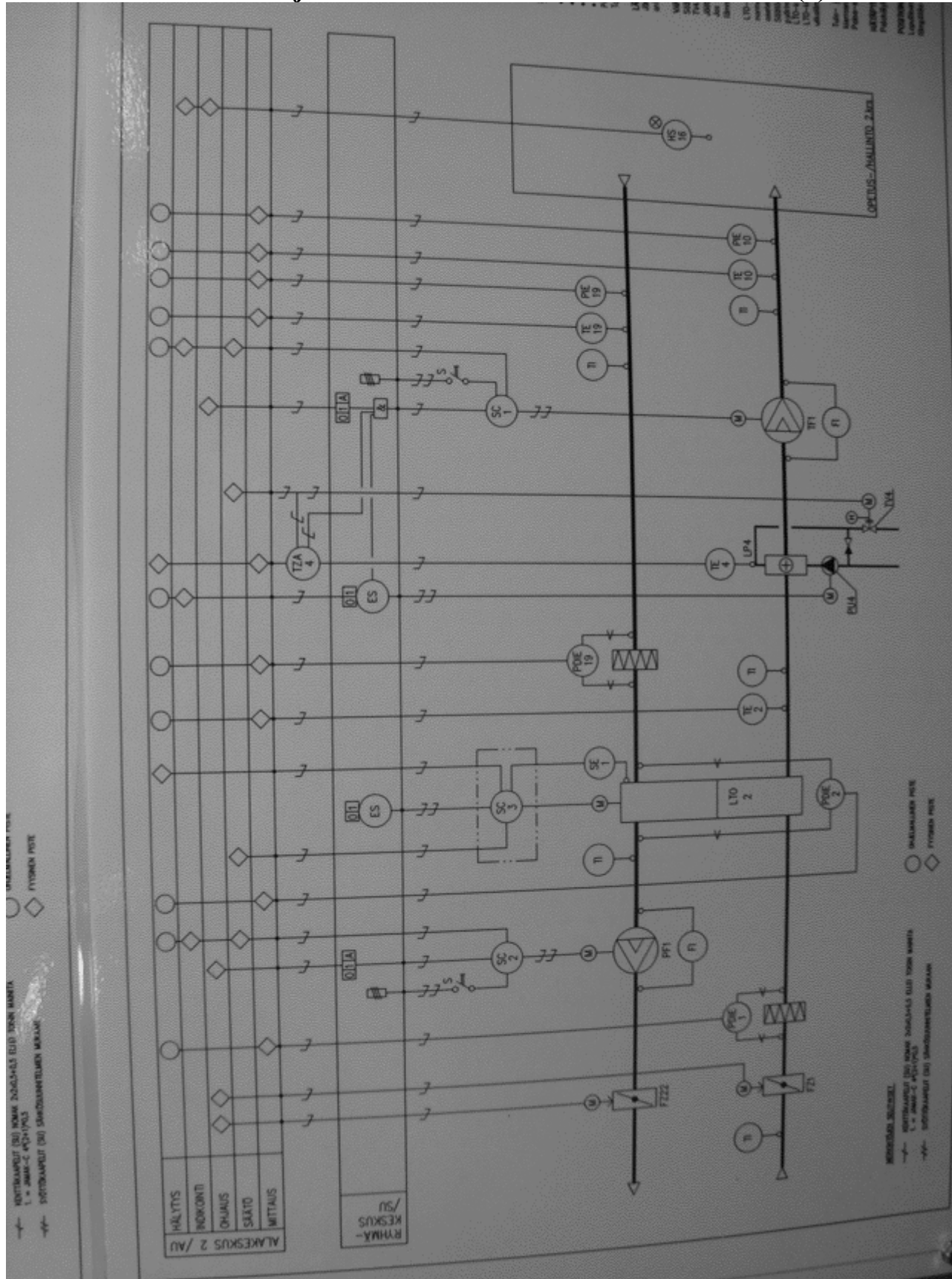
Huom ! Erikoistapauksissa, kun puhaltimia ei voida sijoittaa siten, että tarvittava paine-ero saadaan aikaan, käytetään erotusilmapuhallinta. Vuotovirran arvot antaa silloin roottorin valmistaja.

Roottorin ohjeellinen vuoto + puhtaaksipuhallusilmavirta kaksoihuhtelusektorilla (2 x 5°) paine-eron P1 - P4 funktiona.



LIITE 6: Ilmanvaihtokojeiston T75 laitteisto

1(2)



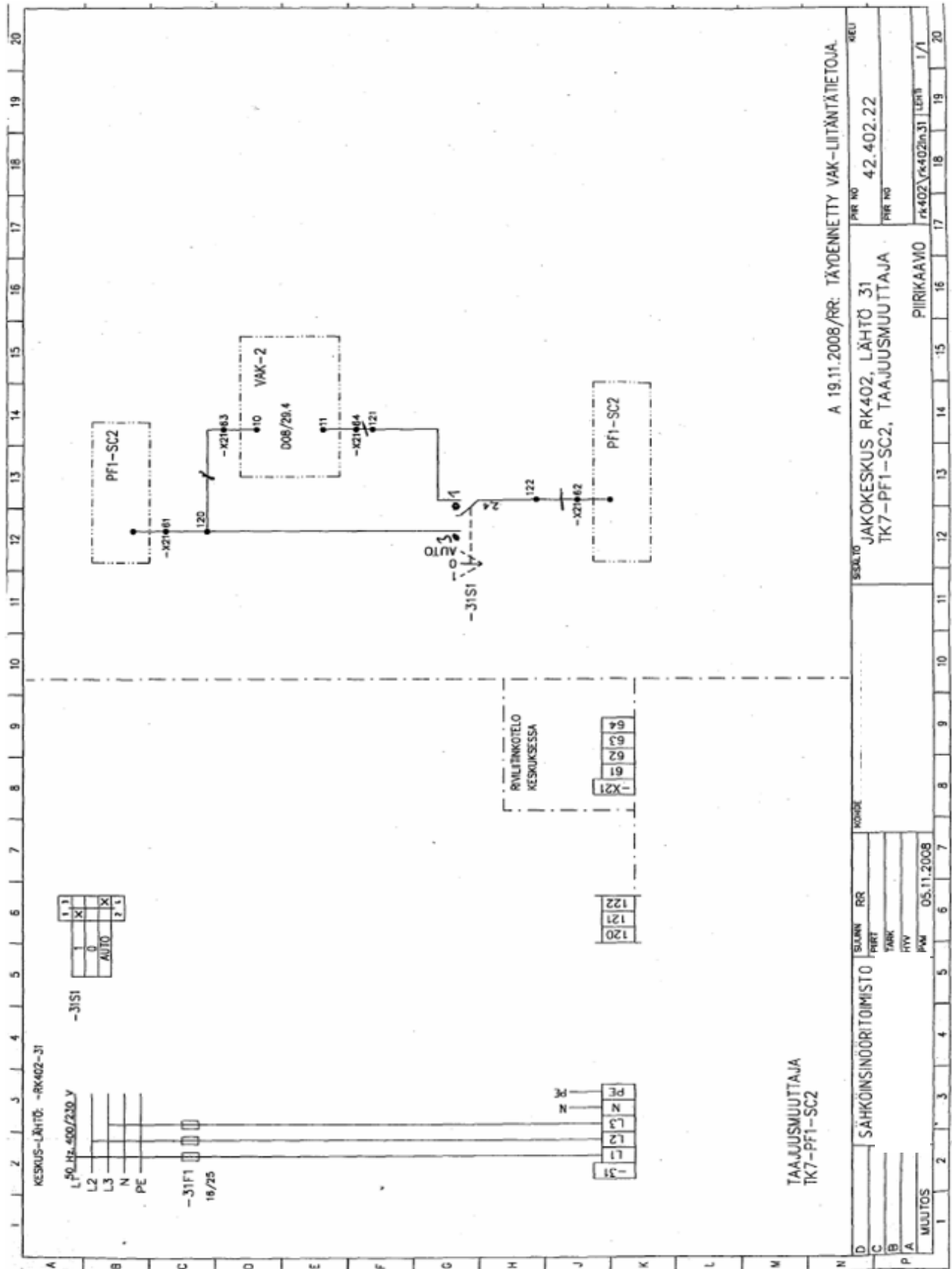
LIITE 6: Ilmanvaihtokojeiston T75 laitteisto

2(2)

TK7	FZ1	Tulopelti	AF24	Belimo	vak 2.1	N2	
TK7	FZ22	Poistopelti	AF24	Belimo	vak 2.1	N2	
TK7	SC1	Taajuusmuuttaja 2,2 KW, 5,6A	VLT FC-102P2K2	Danfoss	vak 2.2	J4	indikointi
TK7	SC2	Taajuusmuuttaja 2,2 KW, 5,6A	VLT FC-102P2K2	Danfoss	vak 2.2	J4	indikointi
TK7	SC1	Taajuusmuuttaja 2,2 KW, 5,6A	VLT FC-102P2K2	Danfoss	vak 2.1	J4	ohjaus, säätö
TK7	SC2	Taajuusmuuttaja 2,2 KW, 5,6A	VLT FC-102P2K2	Danfoss	vak 2.1	J4	ohjaus, säätö
TK7	PDIE1	Paine-erolähetin näytöllä	PEL 1000-N	Produal	vak 2.2	N2	
TK7	PDIE2	Paine-erolähetin näytöllä	PEL 1000-N	Produal	vak 2.2	N2	
TK7	PDIE19	Paine-erolähetin näytöllä	PEL 1000-N	Produal	vak 2.2	N2	
TK7	TZA4	Jäätymissuoja (alakeskuksessa)	JVS24	Produal			
TK7	TE2	Keskiarvoanturi 3m	MWF Ni1000	HK Instruments	vak 2.2	N2	
TK7	TE4	Lämpötila-anturi (putki PN10)	TEV PT 1000	Produal	vak 2.1	N2	
TK7	TE10	Tuloilman lämpötila	TEK NTC 10	Produal	vak 2.2	N2	
TK7	PIE10	Kanavapaine, tulo	PEL 1000-N	Produal	vak 2.2	N2	
TK7	TE19	Poistoilman lämpötila	TEK NTC 10	Produal	vak 2.2	N2	
TK7	PIE19	Kanavapaine, poisto	PEL 1000-N	Produal	vak 2.2	N2	
TK7	TV4	LP:n venttiili	R212	Belimo	vak 2.1	N2	
TK7	TI	Kanavalämpömittari -30..50 C	WIKA A4802.100-30/+50°C	WIKA			
TK7	TI	Tulo/Poistoilman kanavalämpömit	WIKA A4802.100/60°C	WIKA			
TK7	HS16	Käsikytkin	Hankinta SU		vak 2.2	N2	
TK7	SC3	LTO	Hankinta IU		vak 2.1	J4	
TK7	PU4	LP:n pumppu	Hankinta PU		vak 2.2	N2	

LIITE 8: Ilmanvaihtokojeiston T75 ohjauskaavio

2(4)



LIITE 9: Ilmanvaihtokoneen TK7 tekniset tiedot

1(3)



Flexomix		Tekniset tiedot	
Projekti		Væ	
Ilmastointikone		TK7	
Koko		190	



Tämän koneen sähkötehokkuusluku (SFPv) on laskettu puhtailla suodattimilla, roottorin puhtaaksipuhallus ja lisäpainehäviö huomioiden

SFP-LUKU

Laskelma	Ilmastointikone	1,89	kW/m ³ /s
----------	-----------------	------	----------------------

MITAT JA PAINOT

Leveys	1360	mm
Korkeus	1585	mm
Pituus	3740	mm
Paino	1038	kg

PAINEHÄVIÖ

		Tuloilma	Poisto
Alkutiedot	Ilmavirta	1,60	1,40 m ³ /s
	Roottorin puhtaaksipuhallus		0,11 m ³ /s

Laskelma	Sulkupelti	6	Pa
	Suodatinsarja	108	Pa
	Alkupainehäviö	(68)	Pa
	Loppupainehäviö	(148)	Pa
	LTO-roottori	140	122 Pa
	Lämmityspatteri, vesi	44	Pa
	Äänenvaimennin	30	Pa
	Suodatinsarja		88 Pa
	Alkupainehäviö		(48) Pa
	Loppupainehäviö		(128) Pa
	Äänenvaimennin		22 Pa
	Liitäntähäviöt	34	31 Pa
	Koneen painehäviöt	362	263 Pa
	Kanavapaine	300	300 Pa

Puhaltimet

		Tuloilma	Poisto
Laskelma	Kokonaispainehäviö	662	563 Pa
	Kierrosnopeus	2187	2041 r/m
	Puh. hyötysuhde	71,7	71,2 %
	Puh. akseliteho	1,48	1,19 kW
	Moottorin hyötysuhde	83,6	81,9 %
	Kokonaishyötysuhde	59,9	58,3 %
	Sähköteho mitoitusp.	1,77	1,46 kW
	Sähköteho puhtailla suod.	1,67	1,36 kW
	Moottoriteho	2,20	2,20 kW
	Virta	7,8/4,5	7,8/4,5 A
	Motor voltage	230/400	230/400 V
	Max. kierrokset	2435	2435 r/m
	Max. taajuus	85	85 Hz
	K-factor for air flow measuring	23,4	23,4

LIITE 9: Ilmanvaihtokoneen TK7 tekniset tiedot

2(3)



Flexomix	Tekniset tiedot
Projekti	\
Ilmastointikone	TK 7
Koko	Tuloilma: 190, Poisto: 190



Tämän koneen sähkötehokkuusluku (SFPv) on laskettu puhtailla suodattimilla, roottorin puhtaaksi puhallus ja lisäpainehäviö huomioiden

SFP-LUKU

Laskelma sisältää taajuusmuuttajan 1,17 kW/m³/s

MITAT JA PAINOT

	Tuloilma	Poisto
Leveys	1360	1360 mm
Korkeus	695	695 mm
Pituus	930	930 mm
Paino	168	168 kg

PAINEHÄVIÖ

	Tuloilma	Poisto
Alkutiedot Ilmavirta	1,06	0,93 m ³ /s
Laskelma Built-in loss	21	18 Pa
Koneen painehäviöt	21	18 Pa
Kanavapaine	279	236 Pa

Puhaltimet

	Tuloilma	Poisto
Laskelma Kokonaispainehäviö	300	254 Pa
Kierrosnopeus	1461	1314 r/m
Puh. hyötysuhde	72,0	72,9 %
Puh. akseliteho	0,44	0,32 kW
Moottorin hyötysuhde	63,6	60,2 %
Kokonaishyötysuhde	45,8	43,9 %
Sähköteho mitoitusp.	0,70	0,54 kW
Sähköteho puhtailla suod.	0,70	0,54 kW
Moottoriteho	2,20	2,20 kW
Virta	4,7	4,7 A
Jännite	400	400 V
Max. kierrokset	2435	2435 r/m
Ylikapasitetti	78	84 %
Max. taajuus	85	85 Hz
Puhallintyyppi	040C-F1-0220	040C-F1-0220
K-arvo ilmamäärämittaukselle	23,40	23,40

ÄÄNITIEDOT

Taajuus	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Kokon
	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Tuloilma:									79 dB
Ympäristöön	62	61	60	45	40	35	26	17	53 dB(A)
Ulkoilma	64	67	77	71	69	65	59	54	74 dB(A)
Tuloilma	66	69	79	73	71	67	61	56	76 dB(A)
Poistoilma									77 dB
Ympäristöön	60	59	57	42	37	33	23	14	50 dB(A)
Poisto	62	65	74	68	66	63	56	51	71 dB(A)
Jäteilma	64	67	76	70	68	65	58	53	73 dB(A)

LIITE 9: Ilmanvaihtokoneen TK7 tekniset tiedot

3(3)



Flexomix	Tekniset tiedot
Projekti	\
Ilmastointikone	TK7
Koko	Tuloilma: 190, Poisto: 190



Tämän koneen sähkötehokkuusluku (SFPv) on laskettu puhtailla suodattimilla, roottorin puhtaaksipuhallus ja lisäpainehäviö huomioiden

SFP-LUKU

Laskelma	Ilmastointikone	0,78	kW/m ³ /s
----------	-----------------	------	----------------------

MITAT JA PAINOT

	Tuloilma	Poisto
Leveys	1360	1360 mm
Korkeus	695	695 mm
Pituus	930	930 mm
Paino	174	174 kg

PAINEHÄVIÖ

	Tuloilma	Poisto
Alkutiedot Ilmavirta	0,80	0,75 m ³ /s
Laskelma Built-in loss	16	14 Pa
Koneen painehäviöt	16	14 Pa
Kanavapaine	160	175 Pa

Puhaltimet

	Tuloilma	Poisto
Laskelma Kokonaispainehäviö	176	189 Pa
Kierrosnopeus	1111	1100 r/m
Puh. hyötysuhde	72,3	73,9 %
Puh. akseliteho	0,19	0,19 kW
Moottorin hyötysuhde	63,2	63,1 %
Kokonaishyötysuhde	45,7	46,6 %
Sähköteho mitoitusp.	0,31	0,31 kW
Sähköteho puhtailla suod.	0,31	0,31 kW
Moottoriteho	2,20	2,20 kW
Virta	7,8/4,5	7,8/4,5 A
Jännite	230/400	230/400 V
Max. kierrokset	2435	2435 r/m
Ylikapasitetti	91	91 %
Max. taajuus	85	85 Hz
Puhallintyyppi	040C-E1-0220	040C-E1-0220
K-arvo ilmamäärämittaukselle	23,40	23,40

ÄÄNITIEDOT

Taajuus	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Kokon
Tuloilma:	--	--	--	--	--	--	--	--	73 dB
Ympäristöön	56	55	53	38	33	28	19	9	46 dB(A)
Ulkoilma	58	61	70	64	62	58	52	46	67 dB(A)
Tuloilma	60	63	72	66	64	60	54	48	69 dB(A)
Poistoilma									72 dB
Ympäristöön	56	55	53	38	32	28	19	9	46 dB(A)
Poisto	58	61	70	64	61	58	52	46	67 dB(A)
Jäteilma	60	63	72	66	63	60	54	48	69 dB(A)