

Joni Solakuja

Ilmankäsittelykoneen ominaissähkötehon optimointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Talotekniikan koulutusohjelma
Opinnäytetyö
2.6.2011

Tekijä	Joni Solakuja
Otsikko	Ilmankäsittelykoneen ominaissähkötehon optimointi
Sivumäärä	43 sivua + 8 liitettä
Aika	2.6.2011
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkösuunnittelu
Ohjaajat	suunnittelupäällikkö Markku Tanhola lehtori Jorma Säteri
<p>Insinöörityön tavoitteena oli selvittää, voidaanko erilaisilla käyntiajoilla ja -tehoilla toimiville ilmankäsittelykoneille määrittää laskennallisesti eriarvoisia ominaissähkötehon tavoitetasoja. Lisäksi tavoitteena oli tuottaa selvitystyön laskelmien pohjalta käyttökelpoinen ja yleispätevä ominaissähkötehon optimointiohje Espoon kaupungin valvojen ja suunnittelijoiden käyttöön.</p> <p>Käyntiaikojen ja -tehojen vaikutuksia ilmankäsittelykoneiden kokonaiskustannusten muodostumiseen tarkasteltiin kolmella eri käyttöprofiililla ja kolmella eri arviolla sähköenergian hinnan kehityksestä. Koneiden keskinäinen vertailu suoritettiin muodostamalla pääsääntöisesti viiden koneen vertailuryhmiä erisuuruisilla mitoitusilmavirroilla.</p> <p>Insinöörityössä ilmeni, että käyttöprofiilin vaikutus kokonaiskustannusten muodostumiseen on merkittävä ja nykyisellä energian hinnan kehityksellä määräysten mukainen ominaissähkötehon suositusarvo $2,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ on auttamatta aikaansa jäljessä.</p> <p>Oikeilla ominaissähkötehon tavoitearvoilla voidaan järjestelmän elinkaaren aikana saavuttaa merkittäviä säästöjä ja välttyä niin konehuoneiden, kuin ilmankäsittelykoneidenkin yli- ja alimitoittamiselta.</p>	
Avainsanat	ominaissähköteho, SFP, optimointi, kustannusvertailu

Author	Joni Solakuja
Title	Optimizing the specific fan power of an air handling unit
Number of Pages	43 pages + 8 appendices
Date	2 June 2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation	Electrical Engineering for Building Services
Instructors	Markku Tanhola, Design Manager Jorma Säteri, Senior Lecturer
<p>The main target of this final year project was to find out whether it is possible to determine the specific fan power (SFP) of an air handling unit on the basis of its operating profile. A secondary objective was to produce a universally applicable SFP optimization guide, based on the calculations and outcome of this study.</p> <p>Three operating profiles as well as possible developments in the price of electricity were used to measure the effect in total costs during a 50 year period. Five comparison groups mainly consisting of five air handling units with same nominal current of air were formed to include large scale of air handling units in this study.</p> <p>This study shows that the operating profile of an air handling unit plays a major role in the total costs and is, therefore, not to be ignored. It is also noteworthy that the current recommendation for the specific fan power of an air handling unit, i.e. 2,5 kW/(m³/s), seems to have fallen short of today's needs.</p> <p>Great savings in both operating costs and investment costs can be achieved by setting the desired SFP values for air handling units and systems according to the designed operating profile. This might also prevent designers from selecting air handling units either too powerful or not powerful enough or too big or too small machine rooms.</p>	
Keywords	specific fan power, sfp, optimization, life cycle cost

Sisälllys

1	Johdanto	1
2	Määräykset ja ohjeet	2
3	Ominaissähkötehon laskenta	2
3.1	Yksittäinen puhallin	2
3.2	Ilmankäsittelykone	4
3.3	Ilmanvaihtojärjestelmä	5
3.4	Epäkohdat ominaissähkötehon laskentamenetelmissä	7
3.4.1	Ominaissähkötehon käytettävyys suunnittelussa	7
3.4.2	Muuttuvan ilmavirran järjestelmä	7
3.4.3	Ilmankäsittelykoneen käyntiaika	8
4	Ilmankäsittelykojeiston määrittely	8
4.1	Kojeiston rakenne	8
4.1.1	Ilmankäsittelykoneen rakenne	8
4.1.2	Kanaviston rakenne	9
4.2	Koneajot	10
4.2.1	Simulointiohjelma ja lähtötiedot	10
4.2.2	Koneajojen tulosten käsittely	12
4.3	Laitevalinnat ja vertailu	13
4.4	Osatehojen laskenta	15
4.4.1	Käyttöprofiili	15
4.4.2	Kokonaispainetuotto osatehoilla	16
4.4.3	Moottorin hyötysuhde	17
4.4.4	Taajuusmuuttajan hyötysuhde	19
5	Elinkaarikustannusten laskentamenetelmät	22
5.1	Ilmankäsittelykoneen investointikustannukset	22
5.1.1	Investoinnin kannattavuus	22
5.1.2	Hankintahinta	23
5.1.3	Uusimiskustannukset	24
5.1.4	Huoltotilan hinta	25
5.2	Ilmankäsittelykoneen käyttökustannukset	26
5.2.1	Sähköenergian kulutus	26
5.2.2	Sähköenergian hinta	27
5.2.3	Kaukolämmön kulutus	30
5.2.4	Huoltokustannukset	30
6	Tulokset	31
6.1	Vakioilmavirtaiset ilmankäsittelykoneet	31
6.1.1	Virka-aikoina käyvät koneet	31
6.1.2	Jatkuvasti käyvät koneet	34
6.2	Muuttuvailmavirtaiset koneet	37
7	Loppupäätelmät	40

Liitteet

Liite 1: Esimerkkikoneajo

Liite 2: Vakioilmavirtaisten virka-aikoina käyvien koneiden kokonaiskustannukset

Liite 3: Vakioilmavirtaisten jatkuvasti käyvien koneiden kokonaiskustannukset

Liite 4: Vakioilmavirtaisten koneiden vertailuryhmien koontitaulukot

Liite 5: Vakioilmavirtaisten koneiden energiatehokkuus ja elinkaarilaskelmien
esimerkkitaulukko

Liite 6: Muuttuvailmavirtaisten koneiden kokonaiskustannukset

Liite 7: Muuttuvailmavirtaisten koneiden vertailuryhmien koontitaulukot

Liite 8: Muuttuvailmavirtaisten koneiden energiatehokkuus ja elinkaarilaskelmien
esimerkkitaulukko

Lyhenteet ja määritelmät

COP	Coefficient Of Performance. Lämpöpumppujen yhteydessä käytetty suorituskerroin, joka kuvaa kyseisen kojeiston kykyä tuottaa lämmitys- tai jäähdytysenergiaa suhteessa käytettyyn sähköenergiaan.
IMS	Ilmamääränsäädin. Elektronisesti ohjattu virtaussäädin, joka koostuu pellintoimilaitteesta ja ilmavirtausta laskevasta paine-eroanturista.
LTO	Lämmöntalteenotto. Ilmanvaihtokoneen laitteisto, jolla siirretään lämpöä poistoilmasta tuloilmaan.
SFP	Specific Fan Power. Ilmanvaihtokoneen, -järjestelmän tai yksittäisen puhaltimen ominaissähköteho, joka kuvastaa kyseisen koneen tai järjestelmän ottaman sähkötehon suhdetta siirrettyyn ilmamäärään nähden.

1 Johdanto

Suomessa voimassa olevien määräysten mukaan ilmanvaihtojärjestelmän on täytettävä sille asetetut ominaissähkötehon vaatimukset tinkimättä kuitenkaan hyvästä sisäilman laadusta ja ihmisten hyvinvoinnista. Määräysten ollessa ympäröivä ja tulkinnanvaraisia pakottavat taloudellinen tilanne ja jatkuva energian hinnan korotuspaine rakentamaan entistä energiataloudellisempia ilmanvaihtojärjestelmiä.

Ilmankäsittelykoneen ominaissähköteho, josta usein käytetään lyhennettä SFP (Specific Fan Power), määräytyy kojeistoon liittyvien puhaltimien tehojen ja suurimman mitoitusilmavirran mukaan. Usein kojeistot toimivat kuitenkin osatehoilla tai verrattain harvoin ja lyhyen ajan, jolloin kokonaiskustannusten näkökulmasta energiataloudellisin ilmankäsittelykone ei olekaan välttämättä kannattavin vaihtoehto. Käyttäjän kannalta paras lopputulos saatetaan saavuttaa valitsemalla ominaissähköteholtaan vaatimattomampi ja investointikustannuksiltaan edullisempi kojeisto sen sijaan, että tavoiteltaisiin näennäisiä säästöjä energiatehokkuuden nimissä.

Insinööriyön tarkoituksena on selvittää, miten erilaiset käyttöprofiilit vaikuttavat ilmankäsittelykoneiden kokonaiskustannusten muodostumiseen. Lisäksi työssä tutkitaan mahdollisuutta määrittää erilaisten ilmanvaihtojärjestelmien ominaissähkötehon tavoitetasoja käyttöprofiilin mukaan.

Työn yhteydessä kehitetään Espoon kaupungille ominaissähkötehon optimointiohje. Optimointiohjeen tarkoituksena on helpottaa yhtenäistämään Espoon kaupungin energiatehokkuusvaatimuksia ja asettaa laskennallisesti perusteltuja yleistettävissä olevia ominaissähkötehon tavoitearvoja suunnittelijoille.

2 Määräykset ja ohjeet

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2 on kuitattu kahdella virkkeellä rakennuksen ilmanvaihdon energiatehokkuuteen liittyvät kansalliset määräykset, joissa tiivistetyksi vaaditaan, että ilmanvaihtojärjestelmä suunnitellaan ja rakennetaan energiatehokkaaksi ja energiatehokkuus varmistetaan tarkoituksenmukaisilla keinoilla tinkimättä terveellisestä, turvallisesta ja viihtyisästä sisäilmastosta. Samassa yhteydessä annetaan ilmanvaihtojärjestelmille ohjearvoja, joiden mukaan koneellisen tulo- ja poistoilmajärjestelmän ominaissähköteho saa olla yleensä enintään $2,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ ja koneellisen poistoilmajärjestelmän ominaissähköteho vastaavasti $1,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$. (1, s. 23.)

Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho saa kuitenkin olla ohjearvoja korkeampi, mikäli rakennuksen sisäilman hallinta edellyttää tavanomaisesta poikkeavaa ilmastointia (1, s. 23). Tämä lisäys koskee lähinnä laboratorioden, teollisuuden tuotantotilojen ja muiden vastaavien erityistilojen ilmanvaihtojärjestelmiä. Tyypillisesti erityistilojen ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehon lisäys ohjearvoon on $0,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$. (2, s. 3.)

Ilmanvaihtokoneet, joiden mitoitusilmavirta on yli $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, tulee määräysten mukaan varustaa kiinteillä ilmavirran mittausantureilla. Määräyksissä todetaan myös, että ilmanvaihtojärjestelmä on asennettava ja toteutettava niin, että sen ottama sähköteho voidaan helposti mitata. Kun edellä mainitut vaatimukset täytetään ja mittaukset suoritetaan laadukkailla laitteilla oikeaoppisesti, voidaan yksittäisen kojeen ja koko järjestelmän ominaissähköteho laskea helposti ja nopeasti.

3 Ominaissähkötehon laskenta

3.1 Yksittäinen puhallin

Yksittäisen puhaltimen ominaissähkötehon määrittäminen tulee usein vastaan perusparannuskohteissa, joissa uusitaan koneellisen poistoilmajärjestelmän puhaltimia. Yksittäisen puhaltimen tapauksessa korostuu oikean puhallintyyppin valinnan ja puhaltimen mitoituksen merkitys.

Puhallinmoottorin verkosta ottama sähköteho muodostuu puhaltimen akselitehon suhteesta puhaltimen kokonaishyötysuhteeseen. Moottorin sähköteho voidaan laskea seuraavasti:

$$P_E = \frac{P_{\text{puhallin}}}{\eta_{\text{käyttö}} \times \eta_{\text{moottori}} \times \eta_{\text{säätö}} \times 1000} \quad (1)$$

P_E on moottorin ottama sähköteho [kW]

P_{puhallin} on puhaltimen akseliteho sisältäen laakerihäviöt [kW]

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

η_{moottori} on moottorin hyötysuhde

$\eta_{\text{säätö}}$ on pyörimisnopeuden säätimen hyötysuhde. (3, s. 5.)

Oikean puhallintyyppin valinta vaikuttaa merkittävästi voimansiirron hyötysuhteeseen. Usein vanhat kiilahihnakäyttöiset puhaltimet voidaan moottorin pyörimisnopeuden säädön ansiosta korvata suoravetoisilla puhaltimilla, jolloin voimansiirron hyötysuhdetta ei tarvitse ottaa huomioon.

Pyörimisnopeuden säätimen hyötysuhde otetaan huomioon vain, jos puhaltimen pyörimisnopeutta säädetään jollakin tavalla. Puhaltimen pyörimisnopeuden säätöön voidaan käyttää esimerkiksi taajuusmuuttajaa, tyristorisäädintä tai puhallinmoottoriin integroitua säätöelektroniikkaa. Tehonsäätölaitteen sähköteho sisältyy puhaltimen sähköverkosta ottamaan sähkötehoon. (3, s. 8.)

Suunnitteluvaiheessa puhaltimen teho määritellään usein yksinkertaistetulla kaavalla:

$$P_E = \frac{q_v \times \Delta P_F}{\eta_{\text{kok}}} \quad (2)$$

P_E on moottorin ottama sähköteho [kW]

q_v on puhaltimen ilmavirta [m^3/s]

ΔP_F on puhaltimen paineenkorotus [Pa]

η_{kok} on puhallinkäytön kokonaishyötysuhde

Kaavalla 2 voidaan nopeasti määrittää puhallinmoottorin suuruusluokka, kun tiedetään tarvittava paineentuotto, haluttu ilmavirta ja hyötysuhteena käytetään puhallintyyppiin perustuvaa valistunutta arvausta. Yksittäisen puhaltimen tapauksessa on yleensä

kyseessä hyvin yksinkertainen kojeisto, jolloin puhaltimen sisäinen painehäviö voi olla merkityksettömän pieni ilmanvaihtokanaviston painehäviöön verrattuna.

Kun puhallinmoottorin sähköteho on laskettu joko kaavan 1 tai kaavan 2 avulla, voidaan puhaltimen ominaissähköteho laskea seuraavasti:

$$SFP = \frac{P_E}{q_v} \quad (3)$$

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

P_E on puhaltimen ottama sähköteho [kW]

q_v on puhaltimen ilmavirta [m³/s].

Ilmankäsittelykoneen ominaissähkötehoon vaikuttavat vain liikutettava ilmavirta ja suoraan sen liikuttamiseen tarvittava sähköenergia. Jos koneessa on esimerkiksi vesikiertoinen lämmityspatteri, patterin lamellien aiheuttama painehäviö lasketaan muun kojeiston ja kanaviston aiheuttamaan painehäviöön mukaan, mutta esimerkiksi lämmityspumpun ottama sähköteho ei ole osa puhaltimen SFP-luvun laskentaa. (3, s. 9)

3.2 Ilmankäsittelykone

Ilmankäsittelykoneen, joka käsittää tulo- ja poistoilmapuhaltimet, ominaissähkötehon laskenta noudattaa samaa periaatetta kuin yksittäisen puhaltimen ominaissähkötehon laskenta. Ilmankäsittelykoneen ominaissähköteho voidaan laskea seuraavasti:

$$SFP = \frac{P_{tulo} + P_{poisto}}{q_{vmax}} \quad (4)$$

SFP on ilmankäsittelykoneen ominaissähköteho

P_{tulo} on tuloilmapuhaltimen ottama sähköteho

P_{poisto} on poistoilmapuhaltimen ottama sähköteho

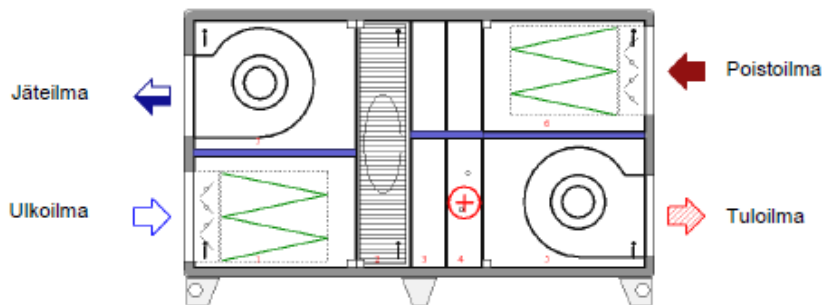
q_{vmax} on koneen ilmavirroista suurempi (tulo tai poisto)

Puhaltimien ottamat sähkötehot sisältävät kaikki moottoreihin, puhaltimiin ja voimansiirtoon liittyvät hyötysuhteet aivan kuten yksittäisen puhaltimen tapauksessakin.

Ilmavirroista otetaan laskennassa huomioon vain mitoitukseltaan suurempi ilmavirta (3, s. 8). Esimerkiksi tilassa, jonka tilavuus on 1 000 m³ ja ilmanvaihtuvuus on 0,5 1/h,

täytyy ilmaa vaihtua tunnissa 500 m^3 . Tämä tarkoittaa tulo- ja poistoilmavirtaa $140 \text{ dm}^3/\text{s}$. Ominaisähkötehoa ei kuitenkaan lasketa virtaamalla $280 \text{ dm}^3/\text{s}$, koska se ei vastaa tilan todellista ilmanvaihtuvuutta.

Ilmankäsittelykone on yleensä monipuolisempi laitteisto kuin yksittäinen puhallin, ja siksi laskennassa on osattava ottaa huomioon myös koneen sisäiset painehäviöt, jotka voivat olla huomattavasti ilmanvaihtokanaviston painehäviöitä suuremmat. Kuvan 1 mukaisessa ilmanvaihtokoneessa painehäviöitä aiheuttavat puhaltimien lisäksi ulko- ja poistoilmapellit, suodattimet, lämmityspatteri sekä LTO-kiekko. Edellä mainittujen komponenttien lisäksi kojeiston sisäiseen painehäviöön lasketaan usein mukaan myös tarvittavat äänenvaimentimet.



Kuva 1. Perinteinen ilmankäsittelykone pyörivällä LTO:lla (4, s. 7)

Eri valmistajien käyttäessä erilaisia kokoonpanoja ja komponentteja on suunnitteluvaiheessa tärkeämpää tietää kanaviston painehäviö ja arvioida kojeiston sisäinen painehäviö suuntaa antavasti, ellei tuleva kojeisto ole jo tiedossa. Lopullinen painehäviö ja kojeiston koko saadaan usein laskettua valmistajan omalla simulointiohjelmalla, josta saadaan lopputulokseksi "koneajo" eli tuloste, joka sisältää kojeiston tekniset tiedot kuten ilmavirrat, puhallintehot ja koneen fyysiset mitat.

3.3 Ilmanvaihtojärjestelmä

Ilmanvaihtojärjestelmä tarkoittaa kaikkia rakennuksen ilmavaihtoon käytettäviä puhaltimia. Rakennuksen ilmanvaihtoon liittyviä puhaltimia ovat pääasiassa

- ilmankäsittelykoneiden tulo- ja poistoilmapuhaltimet
- erilliset tulo- ja poistoilmapuhaltimet.

Laskennassa ei oteta huomioon puhaltimia, jotka eivät osallistu varsinaiseen ilmanvaihtoon. Tällaisia puhaltimia ovat esimerkiksi

- kiertoilmalämmittimien ja -jäähdyttimien puhaltimet
- puhallinkonvektorit
- kiertoilmapuhaltimet
- yksittäiset tuotantoprosessin koneiden paikallispoistot
- laboratorioden vetokaapit
- lämpökuorman poistopuhaltimet
- takkaimurit ja liesituulettimet.

Kaikkien laskentaan liittyvien puhaltimien ottaman sähkötehon ja siirretyn ilmavirran ollessa tiedossa voidaan koko järjestelmän ominaissähköteho laskea seuraavalla kaavalla:

$$SFP = \frac{P_{tuloilmapuhaltimet} + P_{poistoilmapuhaltimet}}{q_{vmax}} \quad (5)$$

SFP on ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho

$P_{tuloilmapuhaltimet}$ on tuloilmapuhaltimien ottama sähköteho yhteensä

$P_{poistoilmapuhaltimet}$ on poistoilmapuhaltimien ottama sähköteho yhteensä

q_{vmax} on mitoitettava jäte- tai ulkoilmavirta.

Kuten ilmankäsittelykoneen tapauksessa myös koko järjestelmän laskennassa otetaan huomioon mitoitusilmavirroista vain suurempi. Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho on ilmanvaihdon energiataloudellisuuden laskennan lähtökohta. Yksittäisten ilmankäsittelykoneiden tai puhaltimien ominaissähkötehot voivat poiketa merkittävästi koko järjestelmän ominaissähkötehosta, kunhan ilmavirrat ovat kokonaisuuteen nähden pieniä. Esimerkiksi perusilmanvaihtoa hoitavia SFP-arvoltaan yli 2,5 kW/(m³/s) koneita tai puhaltimia ei tavallisessa toimisto- tai koulurakennuksessa pitäisi tulla vastaan, sen sijaan erityispuhaltimien kuten hitsauspisteiden kohdepoistopuhaltimen, ominaissähköteho voi korkeiden painehäviöiden takia helposti ylittää yleisen ohjearvon 2,5 kW/(m³/s).

3.4 Epäkohdat ominaissähkötehon laskentamenetelmissä

3.4.1 Ominaissähkötehon käytettävyys suunnittelussa

Ominaissähkötehon määrittelyn on tarkoituksena toimia helppona ja yksinkertaisena ilmanvaihdon energiatehokkuuden mitoitustyökaluna. Pitkälle yksinkertaistettu laskentamenetelmä toimiikin hyvin sähkötehokkuuden tavoitteiden asettamiseen ja suurpiirteiseen laskentaan. Samalla loppuun asti yksinkertaistettu laskentamenetelmä syö kuitenkin sen käytettävyyttä todellisena suunnittelutyökaluna, josta olisi jotain käytännön hyötyä ilmankäsittelykoneita ja kanavia suunniteltaessa. Usein ominaissähkötehon laskentaa käytetään jälkeinpäin toteamaan, osuiko suunniteltu järjestelmä annettuihin rajoihin.

Laskentamenetelmä toimii kuitenkin hyvänä työkaluna suunniteltujen ja asennettujen koneiden väliseen vertailuun. Suunnitteluvaiheessa järjestelmälle ja ilmankäsittelykoneille asetetaan ominaissähkötehotavoitteet, joihin urakoitsijan pitää pyrkiä pääsemään niin laitevalinnoilla kuin asennustavallakin. Mikäli ilmankäsittelykone on rakennettu yleisten ohjeiden mukaisesti, voidaan sen ominaissähkötehon laskentaan tarvittavat suureet mitata helposti ja todeta, vastaako toteutus suunnitelmaa.

3.4.2 Muuttuvan ilmavirran järjestelmä

Ilmankäsittelykoneiden elektronisen tehonsäädön yleistyessä ja syrjäyttäessä perinteisen tavan käyttää 1- ja 2-nopeuspuhaltimia syntyy tarve tarkastella ilmankäsittelykoneiden ja puhaltimien ominaissähkötehoa myös osatehoilla.

Tavallisesti ilmankäsittelykoneen ominaissähkötehon laskentaan käytetään koneen mitoitusilmavirroista suurempaa ottamatta huomioon muuttuvaa ilmavirtaa. Usein kuitenkin nykyiset taajuusmuuttajaohjatut ilmankäsittelykoneet käyvät aina osateholla ja joskus jopa puhallinmoottorille haitallisen vähillä kierroksilla. Teoriassa tällainen ylirajoittaminen voi näyttää hyvältä ominaissähkötehoa tarkasteltaessa, sillä kokonaispainehäviö pienenee neliöllisesti, kun siirrettävän ilman määrä puolittuu. Samalla puhaltimen ottama sähköteho laskee yhteen kahdeksasosaan alkuperäisestä (4, s. 125). Laskennallisesti kojeiston ominaissähköteho saattaa jopa parantua kojeiston toimiessa osateholla, mutta tällaisiin laskelmiin ei missään tapauksessa pidä

sokeasti luottaa, koska ominaissähkötehon laskentaa ei ole tarkoitettu arvioimaan kojeistojen tai järjestelmien energiatehokkuutta osatehoilla. Taajuusmuuttajan osatehojen hyötysuhteisiin palataan myöhemmin tässä työssä.

3.4.3 Ilmankäsittelykoneen käyntiaika

Yksittäinen ilmankäsittelykone tai puhallin saa ylittää järjestelmälle asetetun ominaissähkötehon tavoitteen sillä ehdolla, että ylitys kompensoidaan muilla koneilla. Edellä mainittu menettelytapa johtuu siitä, että ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehon laskenta on raakaa keskiarvolaskentaa eikä se ota lainkaan huomioon käytännössä esiintyviä muuttujia.

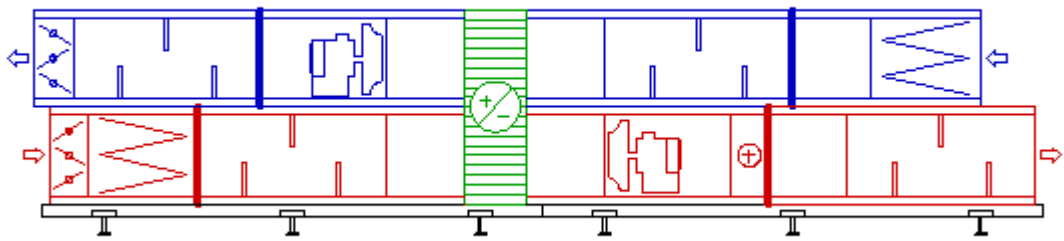
Harvoin ja lyhyen aikaa käyvien puhaltimien ja kojeiden laskeminen mukaan järjestelmän ominaissähkötehoon vääristää lopputulosta ja pitäisi siitä syystä jättää laskennan ulkopuolelle. On tulkinnanvaraista, osallistuvatko muutamia tunteja viikossa käyvät pienehköt puhaltimet rakennuksen ilmanvaihtoon lainkaan. Järjestelmän ominaissähköteho ei ota huomioon muuttuvan ilmamäärän vaikutusta puhaltimien ottamaan sähkötehoon eikä sen liiemmin puhaltimien todellista käyntiaikaa. Ilmankäsittelykoneiden käyttöprofiilien vaikutuksesta tavoiteominaissähkötehon määrittämiseen palataan myöhemmin tässä työssä.

4 Ilmankäsittelykojeiston määrittely

4.1 Kojeiston rakenne

4.1.1 Ilmankäsittelykoneen rakenne

Ilmankäsittelykoneen komponentit ja rakenne määräytyvät sisäilman laatuvaatimusten ja käytettävissä olevan tilan mukaan. Modulaarisiin koneisiin voidaan liittää lämmitys- ja jäähdytyspattereita, ilmankostuttimia ja -kuivaimia, mekaanisia suodattimia sekä muita vastaavia komponentteja aina tarpeen mukaan. Useimmissa kohteissa päästään kuitenkin sisäilman laadulle asetettuihin tavoitteisiin kuvan 2 mukaisilla peruskoneilla.



Kuva 2. Koneajoissa käytettävä konerakenne (5)

Tämän työn kaikki koneajot ja laskelmat on tehty kuvassa 2 esitetyllä kojeiston kokoonpanolla. Ilmankäsittelykoneen komponenttien minimoinnilla pyritään eliminoimaan energiankulutuksen laskennasta turhat muuttujat ja sitä kautta saamaan elinkaarilaskelmista mahdollisimman selkeitä ja yleispäteviä tuloksia.

4.1.2 Kanaviston rakenne

Ilmanvaihtokanaviston todellisten painehäviöiden arvioiminen on suunnitteluvaiheessa täysin mahdotonta. Kanaviston painehäviöiden laskemiseen on suunnitteluohjelmissa kuten MagiCadissa helppokäyttöisiä työkaluja, joilla tulos saadaan muutamaa nappia painamalla. Toteutusvaiheessa kanaviston kriittiset kohdat saatetaan kuitenkin tehdä täysin eri tavalla ja erilaisilla komponenteilla. Esimerkiksi väärin toteutetut liitokset tai kanaviston nousut ja laskut voivat aiheuttaa ei-toivottuja ilmanpyörteitä ja sitä kautta merkittäviä painehäviöitä. Tästä syystä suunnitteluvaiheessa kanavistolle usein ilmoitetaan hieman yläkanttiin laskettu likiarvo, jolla koneajot tehdään.

Tavanomaiset vakioilmavirtaisen kojeiston ilmanvaihtokanavistot, joissa ei ole jälkilämmityspattereita, jäähdytyspalkkeja tai muita painehäviötä kasvattavia lisäkomponentteja, pyritään usein suunnittelemaan siten, ettei kanavistosta aiheutuva painehäviö kasva yli 200 Pa:n. Muuttuvilmavirtaisen järjestelmän vastaava kanaviston aiheuttaman painehäviön tavoitearvo on 300 Pa. (3, s. 14.)

Kaikissa selvitystyötä varten tehtävissä koneajoissa ja laskelmissa käytetään ilmanvaihtokanaviston painehäviönä 200 Pa. Vakioilmavirtaisissa kojeistoissa voidaan loogisesti päättelemällä olettaa, ettei kanaviston painehäviö muutu kojeiston käydessä. Muuttuvilmavirtaisen kojeiston kanavistoa on lähestytty tavanomaisen IMS-

järjestelmän näkökulmasta, missä kanaviston painehäviö pysyy vakiona. Tavanomaisella IMS-järjestelmällä tarkoitetaan kojeistoa, jossa tilakohtaisten IMS-yksiköiden muuttaessa asentoaan kanaviston paine muuttuu sen mukaisesti. Kanaviston painetta pyritään pitämään asetusarvossaan nostamalla tai laskemalla puhaltimen pyörimisnopeutta. Todellisuudessa painehäviön muutoksen suhde ilmavirran muutokseen riippuu paine-eroanturin sijainnista kanavistossa. Kanaviston vaikeimman haaran loppupäähän sijoitetun anturin pitäisi kuitenkin säätöjen oikein toimiessa näyttää kaikilla ilmamäärillä samansuuruista painetta. Uudenaikaiset IMS-yksiköt eivät uskomusten vastaisesti vaadi suurta paine-eroa toimiakseen oikein, ja kaikki edellä mainitut seikat huomioon ottaen voidaan muuttuvilmavirtaisen kanaviston painehäviön olettaa pysyttelevän samassa 200 Pa:ssa vakioilmavirtaisen kojeiston kanssa. (6)

4.2 Koneajot

4.2.1 Simulointiohjelma ja lähtötiedot

Tätä työtä varten tehtävät koneajot tehdään Recairin mitoitusohjelman versiolla 2010.5.1. Ohjelma on ilmainen ja ladattavissa Recairin kotisivuilta. Mitoitusohjelmaan syötetään projektin perustiedot, mitoitusarvot ja määritellään koneen komponentit, minkä jälkeen ohjelma antaa tulokset koneista, jotka täyttävät käyttäjän asettelemat kriteerit.

Tässä työssä kohteen mitoitusarvoina käytetään kuvan 3 mukaisia arvoja, jotka ovat suurelta osin myös ohjelman oletusarvoja. Ulkolämpötilan arvot vastaavat Etelä-Suomen lämpötiloja ja lämmityspatterin arvot vastaavasti yleisiä lämmitysverkoston lämpötiloja.

Recair Oy Ilmastointikoneen mitoitus - Versio 2010.5.1 - D:\Koulutyöt\Insinööri\Insinööri\optimointi\koneajot\1,0m3/s...

Tiedosto Kone Osa Mitoita kone Näytä Kotelointi Asetukset Ohje

1: 1,0m3/s AC

Projekti Kohteen mitoitusarvot Kone Tulokset

Ilman tila		Kesällä	Talvella
Ulkoilma			
Lämpötila	25.0 °C	-26.0 °C	
Suhteellinen kosteus	50 %		
Poistoilma			
Lämpötila	25.0 °C	22.0 °C	
Suhteellinen kosteus	50 %	30 %	

Moottori

Moottorin tyyppi

- 1-nopeusmoottori termistoreilla, taajuusmuuttajakäyttö
- Integroitu taajuusmuuttaja (konekoot 2A-5C)
- EC-moottori (konekoot 2A-4B)
- 1-nopeusmoottori, ei taajuusmuuttajaa (hinnakäyttöinen puhallin)
- 2-nopeusmoottori, 2-käämikone (hinnakäyttöinen puhallin)

Moottorin ylimitoitus 20 %

Puhallin energian kulutusarvot	
Käyttöaika tuntia päivässä	24
Käyttöaika päivää vuodessa	365
Sähkön hinta, €/kWh	0.080

Patterien oletusarvot

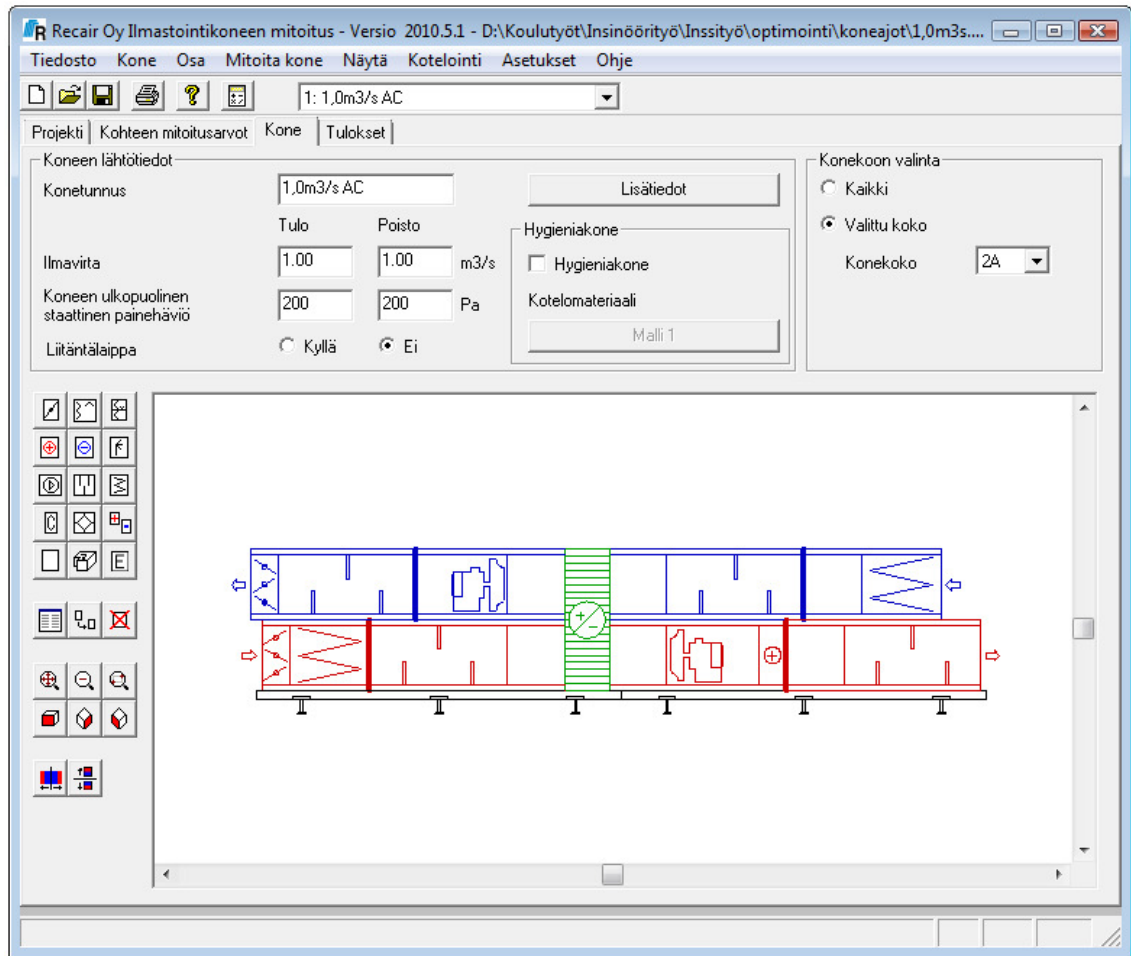
Lämmitysosa	
Tulevan nesteen lämpötila	60 °C
Lähtevän nesteen lämpötila	40 °C
Lähtevän ilman lämpötila	20.0 °C
Limitys	5.0 °C
Max. painehäviö	15 kPa

Jäähdytysosa	
Tulevan nesteen lämpötila	7 °C
Lähtevän nesteen lämpötila	12 °C
Lähtevän ilman lämpötila	15.0 °C
Max. painehäviö	25 kPa

Lämmön talteenotto	
Roottorin hyötysuhde	75 %
Neste LTO:n hyötysuhde	50 %
Nesteen maksimi painehäviö	70 kPa

Kuva 3. Kohteen mitoitusarvot (5)

Kohteen mitoitusarvojen jälkeen ohjelmaan määritellään ilmapuhaltimen komponentit ja rakenne. Lopuksi täytetään kenttiin halutut ilmavirrat ja koneen ulkopuolisen staattisen painehäviön eli kanavapainehäviön arvot kuvan 4 mukaisesti ja tarkastellaan tuloksia.



Kuva 4. Koneen rakenteen määrittely (5)

4.2.2 Koneajojen tulosten käsittely

Laitetoimittajien omat simulointiohjelmat ovat verrattain helppoja ja nopeita käyttää, ja vaikka taustalla ei ole kovinkaan monimutkaista laskentaa, on niiden tuloksiin silti syytä suhtautua hieman kriittisesti. Erityisesti muuttuvilmavirtaisia kojeistoja simuloimassa on tärkeää huomioida kaikki pyörimisnopeuden säätöön liittyvät muuttujat, joita ovat esimerkiksi kokonaispainehäviön muutos, puhaltimien toimintapisteet eri osakuormilla ja puhallinmoottoreiden ja taajuusmuuttajien hyötysuhteet. Vastaavia ongelmia ei kuitenkaan ilmene, kun simuloidaan vakioilmavirtaisia kojeistoja, mihin käytössä ollut ohjelma ilmeisesti on tarkoitettukin.

Käytetty mitoitusohjelma antaa koneajon tulokset yksiselitteisenä ja hyvin jäsenneltynä PDF-tulosteena. Tulosteesta käyvät ilmi ilmankäsittelykoneen tärkeimmät ominaisuudet joita ovat

- koneajon lähtötiedot

- koneen fyysinen koko sisältäen graafisen kuvauksen koneen kokoonpanosta
- koneen komponentit
- puhaltimien tiedot sisältäen muun muassa painetuotot, pyörimisnopeudet, ottotehot ja hyötysuhteet.

Liitteessä 1 on esitetty erään tässä työssä tarkastelussa olleen ilmankäsittelykoneen koneajotuloste.

4.3 Laitevalinnat ja vertailu

Suunnitteluvaiheen laitevalinnat voivat perustua useisiin erilaisiin näkemyksiin ja suunnittelun lähtökohtiin. Tilaaja voi asettaa suunnittelulle tiettyjä kriteerejä esimerkiksi ilmankäsittelykoneiden ominaissähkötehoihin liittyen. Rajoituksia suunnittelulle voivat asettaa myös ahtaat tilat ja jopa museoviraston erityisvaatimukset. Jotkut suunnittelijat voivat suosia tietyn laitetoimittajan koneita vain siksi, että ovat mieltyneet kyseisen laitetoimittajan mitoitusohjelmaan. Harvoin laitevalintoja joudutaan kuitenkaan tekemään niin tiukoilla kriteereillä, ettei urakoitsijalla ole toteutusvaiheessa muita vaihtoehtoja kuin valittu kojeisto.

Ilmankäsittelykoneiden vertailu suoritetaan Recair Oy:n vakiokoon koneilla ja budjettihinnoilla, joita ei laitetoimittajan toiveesta julkaista tässä työssä eikä liitteissä. Koneajot ja laitevalinnat on tehty seuraavan menetelmän mukaisesti:

1. Määritetään tarkasteltava ilmamäärä.
2. Valitaan vertailun lähtökohdaksi fyysisesti pienin kojeisto, jolla otsapintanopeuden ja LTO:n hyötysuhdekriteerit täyttyvät.
3. Valitaan neljä muuta fyysisesti erikokoista ja SFP-arvoiltaan riittävän erilaista kojeistoa.

Erikokoisten ilmankäsittelykoneiden keskinäinen vertailu rajataan siten, että se koskee vain yleisimpiä konekokoja ja ilmamääriä. Tarkasteluun valitut ilmamäärät 1, 2, 4, 6 ja 10 m³/s määräytyvät useiden erilaisten projektien pohjalta tehtyihin havaintoihin ja tarpeelliseksi nähtyyn rajaukseen. Rajaus perustuu konekokojen yleisyyteen tavanomaisissa suunnittelukohteissa ja riittävän suuriin keskinäisiin ilmamääräeroihin, jolloin ei sorruta samojen konerunkojen toistuvaan vertailuun erikokoisilla puhallinmoottoreilla.

Tämän työn yhtenä lähtökohtana käytetään hypoteesia, että huonomman ominaissähkötehon omaava investointikustannuksiltaan halvempi ilmankäsittelykone tulee elinkaarensa aikana halvemmaksi kuin energiatehokkaampi ja investointikustannuksiltaan selvästi kalliimpi kone. Tämän oletuksen vuoksi eri koneiden vertailun lähtökohtana käytetään konetta, jolla täyttyvät seuraavat ehdot:

- Otsapintanopeus on maksimissaan 3,5 m/s.
- LTO:n hyötysuhde on minimissään 75 %.

Näillä ehdoilla voidaan varmistaa koneen vesikiertoisen lämmityspatterin oikea toiminta ja ennaltaehkäistä mahdollista jäätymistä kylmillä keleillä. Näillä ehdoilla valittu kone on myös todennäköisesti fyysiseltä kooltaan vertailun pienin ja ominaissähköteholtaan huonoin.

Vertailuun valitaan pienimmän mahdollisen koneen lisäksi neljä muuta konetta, joiden fyysinen koko ja SFP-luku poikkeavat merkittävästi pienimmästä koneesta. Vertailussa pyritään käyttämään vakiokokoisia koneita ja välttämään niin kutsuttuja erikoiskoneita, joilla tässä yhteydessä tarkoitetaan fyysisiltä mitoiltaan poikkeavia koneita. Tällaisia koneita voivat olla esimerkiksi ahtaisiin tiloihin suunnitellut kapeammat ja korkeammat koneet. Erikoiskoneet karsitaan pois hyödyntäen mitoitusohjelman tulokset-välilehdelle aukeavaa konevertailua. Kuvassa 5 on esitetty mitoitusilmavirralla 1 m³/s tehtyjen koneajojen tiivistetty konevertailu. Kuvasta on nähtävissä muun muassa koneiden ominaissähkötehot, suhteelliset hinnat sekä fyysiset mitat.

Koko	v. t	SFP	Qe/a [€]	zl	hs	Lw. t	Lw. p	Hinta	Päämitat
2A	3.42	2.68		2	76.8	56	41	100.0	1200 x 1240 x 6400
2B	2.31	1.94		2	76.8	50	39	115.3	1200 x 1240 x 6400
2C	1.72	1.75		2	76.8	50	39	124.9	1400 x 1240 x 6400
3A	2.73	1.93		2	76.8	47	33	105.7	1200 x 1540 x 6700
3B	1.85	1.52		2	76.8	45	34	115.9	1200 x 1540 x 6700
3C	1.38	1.34		1	76.8	44	34	121.5	1400 x 1540 x 6700
3D	1.12	1.28		1	76.8	43	33	133.3	1700 x 1540 x 6700
4B	1.16	1.29		1	76.8	43	33	127.9	1200 x 2200 x 6700
1B									0 x 0 x 0
1C									0 x 0 x 0
4C									0 x 0 x 0
4D									0 x 0 x 0
4E									0 x 0 x 0

Huomautukset: Valitse Tulosta
 Konekoko 2A Mitoitus suoritettu

Kuva 5. Mitoitusohjelman tiivistetty konevertailu (5)

4.4 Osatehojen laskenta

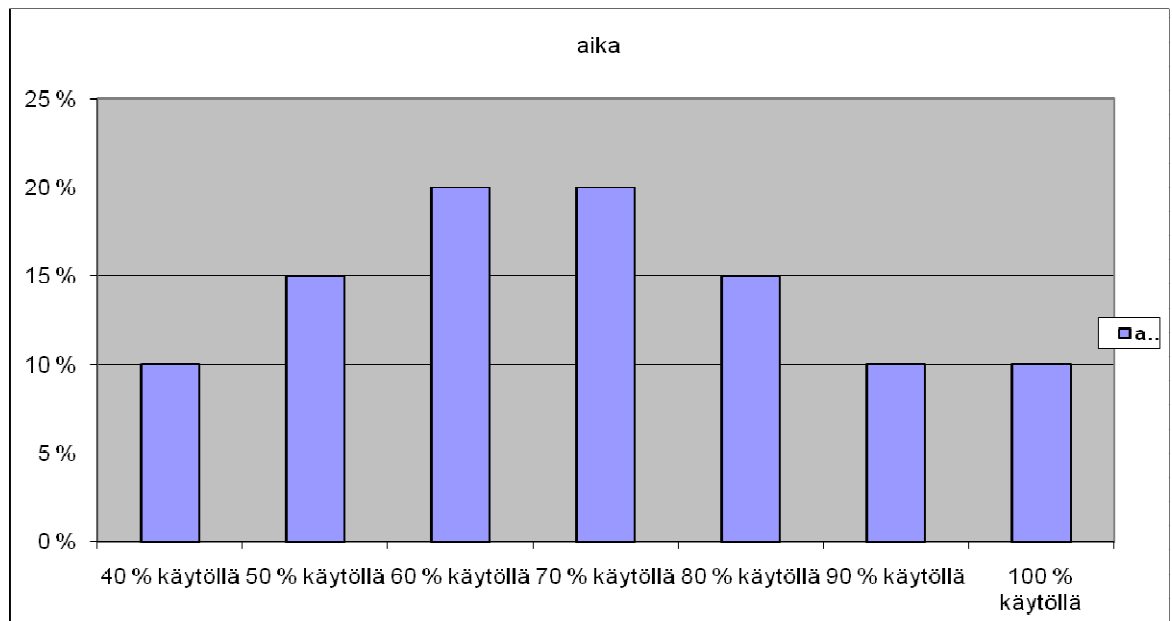
4.4.1 Käyttöprofiili

Selvitystyön yhtenä päätavoitteena on määrittää käyntiajan ja -tehon vaikutus kojeiston käyttökustannuksiin 50 vuoden tarkastelujakson aikana. Vaikka nämä muuttujat voitaisiinkin huomioida yhdellä kattavalla vertailulaskelmalla, on tässä työssä päädytty laskennan ja tulosten selkeyttämisen vuoksi eriyttämään käyntiajan ja osatehojen vaikutus toisistaan.

Käyntiajan vaikutusta kokonaiskustannuksiin selvitetään vertailemalla kojeistojen elinkaarikustannuksia kahdella eri käyntiajalla. Toinen valituista käyntiajoista on jatkuvasti käyvä, millä tarkoitetaan kojeistoa, joka toimii 24 tuntia vuorokaudessa seitsemänä päivänä viikossa. Vastaavasti toinen käyntiajoista on valittu normaalin

virka-ajan mukaan, eli kojeisto käy yhdeksän tuntia päivässä viitenä päivänä viikossa. Niin sanottu ylimääräinen yhdeksäs tunti perustuu havaintoihin ilmanvaihdon tarpeellisuudesta vakioilmamääräisellä koneella ennen ja jälkeen varsinaisen työajan.

Osateholla toimivan ilmapuhdistuskoneiston käyttökustannuksia arvioidaan Espoon kaupungilta saadun muuttuvilmavirtaisen järjestelmän käyttöprofiilin perusteella. Kuvassa 6 esitetystä käyttöprofiilista ilmenee kojeiston osatehot ja prosentuaalinen käyntiaika kokonaiskäyntiajasta. Kokonaiskäyntiaikana tässä työssä käytetään kahdeksaa tuntia. (12)



Kuva 6. Muuttuvilmavirtaisen kojeiston käyttöprofiili

Tulosten vertailukelpoisuuden vuoksi sekä käyntiajan että osatehon vaikutusten laskennassa käytetään samoja kojeistoja samoilla lähtötiedoilla.

4.4.2 Kokonaispainetuotto osatehoilla

Ilmanvaihtokoneiston kokonaispainehäviö on monien tekijöiden summa, mutta kahteen pääkomponenttiinsa jaettuna se koostuu ilmapuhdistuskoneen sisäisestä painehäviöstä ja koneen ulkopuolisesta häviöstä. Ulkopuolisella painehäviöllä tarkoitetaan ilmanvaihtokanaviston niin kutsuttua vaikeinta haaraa komponentteineen. Koska työssä on sovittu käytettäväksi myös muuttuvilmavirtaisessa järjestelmässä vakiokanavapainetta, ainoaksi muuttujaksi jää ilmapuhdistuskoneen sisäinen paine.

Muuttuvaimavirtaisia ilmapöytäilykoneita vertailtaessa on syytä kiinnittää huomiota mitoitushjelman antamien tulosten uskottavuuteen. Puhallinlakien mukaan paine pienenee neliöllisesti pyörimisnopeuden puolittuessa (4, s. 131). Tässä työssä on tietysti otettava huomioon vakiona pysyvä kanaviston paine. Koneen sisäisen paineen pitäisi kuitenkin noudattaa edellä mainittua sääntöä, mutta näin ei mitoitushjelman tekemissä koneajoissa käy, vaan painehäviö tipahtaa vain joitakin kymmeniä pascaleja pyörimisnopeuden puolittuessa.

Mitoitushjelman epäloogisuuksien vuoksi laskelmissa on päädytty noudattamaan yleisesti hyväksytyjä affiniteetti- eli puhallinlakeja ja lähtöarvona kokonaispainetuotoille on käytetty mitoitushjelmalla tehtyjen koneajojen arvoja. Ilmapöytäilykoneen kokonaispainehäviö eri osatehoille voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 \times \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (6)$$

ΔP_1 on puhaltimen nykyinen paineenkorotus [Pa]

ΔP_2 on puhaltimen uusi paineenkorotus [Pa]

n_1 on puhaltimen nykyinen pyörimisnopeus [rpm]

n_2 on puhaltimen uusi pyörimisnopeus [rpm]

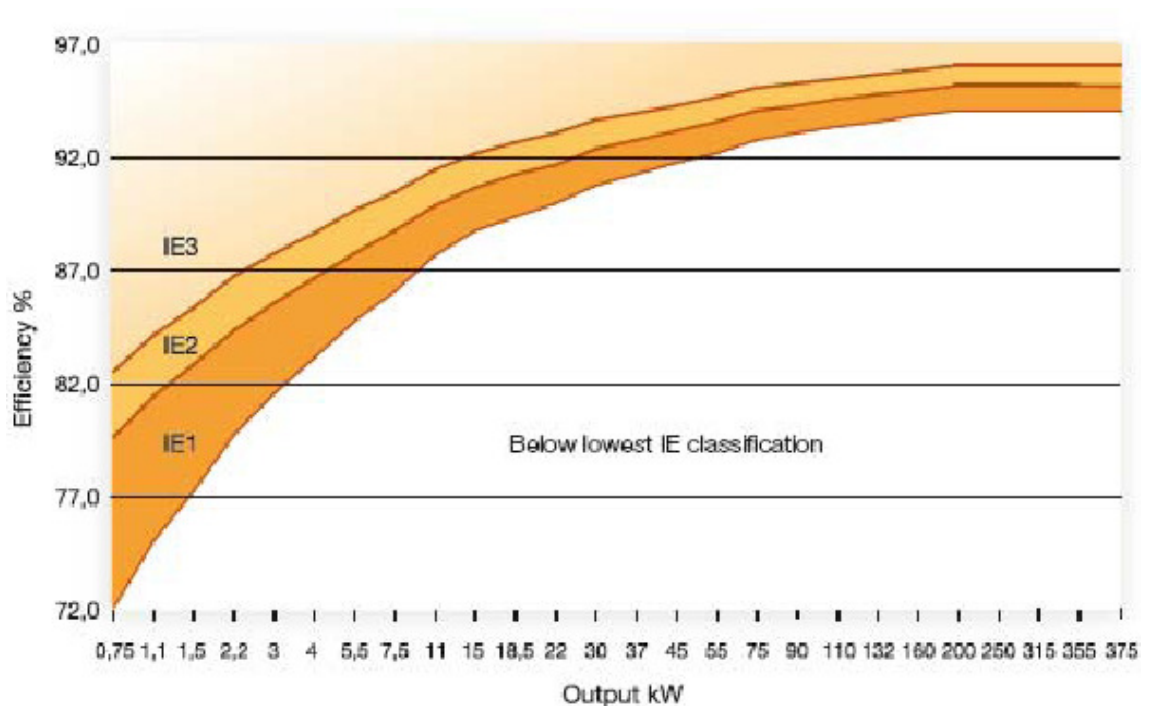
4.4.3 Moottorin hyötysuhde

Laajalti talotekniikan sovelluksissa käytetyt oikosulkumoottorit ovat oikein käytettyinä toimintavarmoja ja hyötysuhteeltaan hyviä. Moottorin kuormituksesta ja pyörimisnopeudesta riippumatta esiintyy siinä aina häviöitä, jotka voidaan jakaa neljään luokkaan:

- kuparihäviöt
- rautahäviöt
- pyörrevirtahäviöt
- kitkahäviöt.

Puhallinmoottoreina käytettyjen IE1 (vanha EFF2) hyötysuhdeluokitusten omaavien moottorien vähimmäishyötysuhdevaatimus riippuu moottorin nimellistehosta kuvan 7 mukaisesti. Kuvasta 7 nähdään myös IE2- ja IE3-hyötysuhdeluokitusten verrattain tiukat hyötysuhdevaatimukset. Tämän työn kaikissa laskelmissa käytetään

hyötysuhdeluokituksen IE1 mukaisia moottoreita aina 1,1 kW:n moottoreista 11 kW:iin. Tällöin huomioidaan huonoin vaihtoehto, jolla urakoitsija voi järjestelmän toteuttaa.

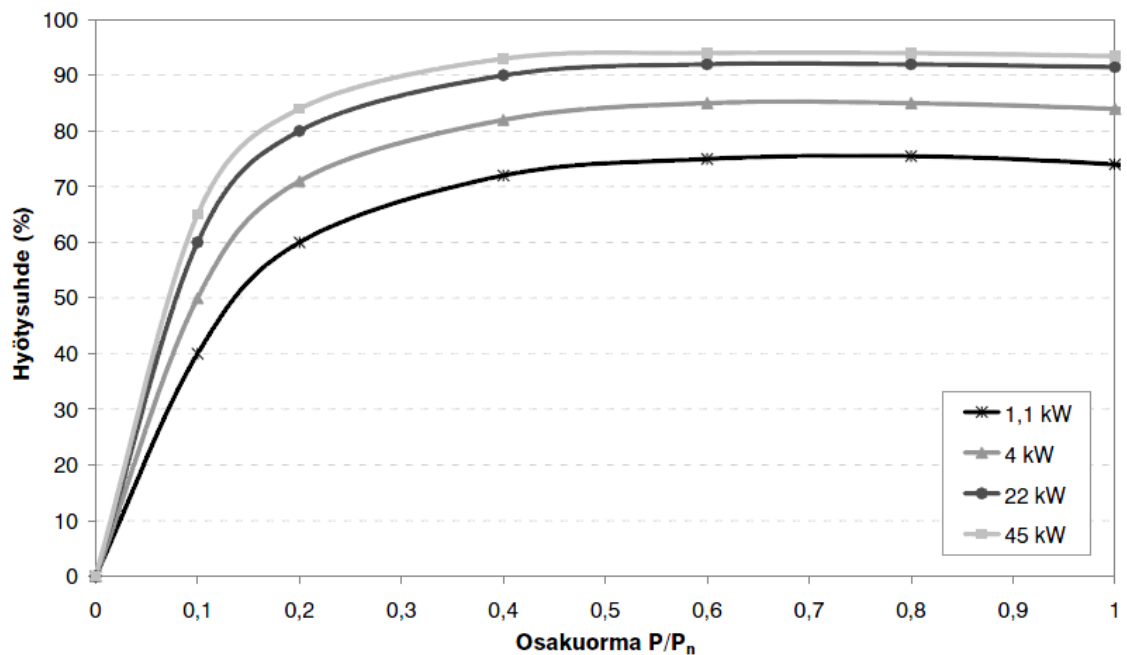


Kuva 7. IE-standardin mukaiset hyötysuhdeluokitukset (20, s. 1)

Täydellä kuormalla toimiessa IE1-luokituksen moottoreilla hyötysuhde pysyttelee jopa pienillä moottoreilla 70 %:n ja suuremmilla 80 %:n paremmalla puolella. Kuvasta 8 voidaan kuitenkin nähdä, että tilanne muuttuu melko radikaalisti, kun moottori toimii alle 40 %:n osakuormalla. Suurin osa moottorissa syntyvistä muuttuu moottorin sisällä lämmöksi. Samalla kun moottorin pyörimisnopeutta pudotetaan, heikkenee myös moottorin akselilla olevan jäähdytyspuhaltimen jäähdytysteho. Yhdessä nämä kaksi asiaa johtavat nopeasti moottorin ylikuumentumiseen lyhentäen samalla moottorin elinikää huomattavasti. (7, s. 21–22.)

Moottorin ottotehoa määritettäessä täytyy ottaa huomioon koko järjestelmän toiminta. Puhallinlakien mukaan moottorin ottoteho laskee yhteen kahdeksasosaan pyörimisnopeuden puolittuessa. Samaisten lakien mukaisesti pyörimisnopeuden muutos on suoraan verrannollinen ilmamäärän muutokseen. Näin voitaisiinkin olettaa, jos kokonaispaineentuotto käyttäytyisi puhallinlakien mukaisesti. Tässä työssä puhallinlakien käytettävyyden romuttaa vakiona pysyvä kanavapaine, minkä takia ilmavirran puolittuessa moottorin ottoteho laskee vain noin 30 %:iin mitoitusilmavirran

tilanteesta. Jokaiselle osateholle erikseen lasketun kokonaispainetuoton ja ilmavirran avulla voidaan puhaltimen ottoteho laskea luvussa 3.1 esitetyn kaavan 2 avulla.



Kuva 8. Korkeahyötysuhteisen moottorin hyötysuhteen alenema osakuormilla (8, s. 9)

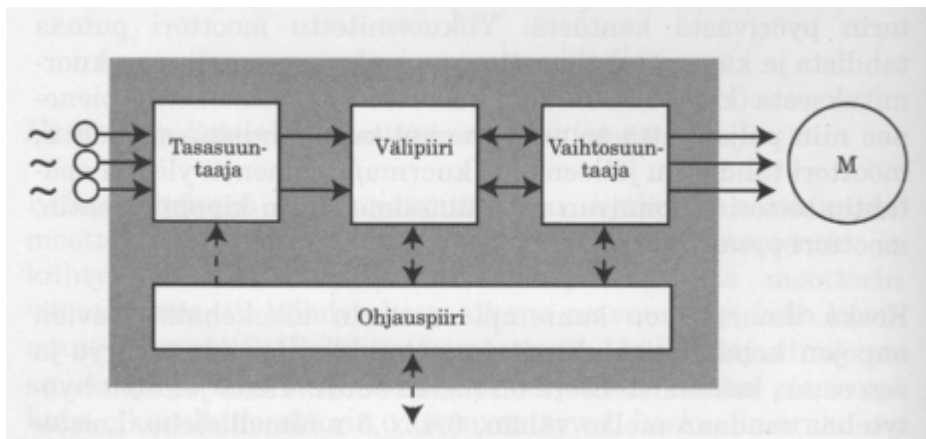
4.4.4 Taajuusmuuttajan hyötysuhde

Taajuusmuuttajat yhdistetään usein energiatehokkuuteen ja säästöihin, mutta tavat sen saavuttamiseksi voivat joskus olla jopa kyseenalaisia. Säästöjä tietysti syntyy, kun puhaltimien kierrosnopeuksia lasketaan ja ilmaa liikutetaan vähemmän. On myös helppoa puhua energiansäästöistä, kun elinkaarensa loppupäässä oleva hyötysuhteeltaan vaatimaton kiilahihnakäyttöinen puhallin korvataan uudella korkeahyötysuhteisella suorakäyttöisellä taajuusmuuttajaohjatulla kammio puhaltimella. Tämänkaltaisessa tapauksessa mahdollinen sähköenergian säästö ei missään tapauksessa ole taajuusmuuttajan vaan uuden moottorin paremman hyötysuhteen ansiota. Tällainen vertailu on täysin harhaanjohtavaa ja yhtä hyödyllistä kuin 50-luvulla valmistetun henkilöauton polttoaineen kulutuksen vertaamista nykyaikaisen hybridi-auton kulutukseen. Mikäli puhaltimen tehoa ei ole tarpeen säätää, on taajuusmuuttaja itse asiassa täysin turha investointi ja ylimääräinen häviön aiheuttaja.

Laitevalmistajat ja -tomittajat jättävät tarkoituksenmukaisesti kertomatta taajuusmuuttajakäyttöön liittyviä ongelmia ja todellista tietoa hyötysuhteista. Asioista

kyselevä hukutetaan helposti turhaan tekniseen lätinään ja vaikeilta vaikuttaviin sähkötekniisiin laskentakaavoihin. Mainospuheiden 97 %:n hyötysuhteeseen on vaikea edes hyväuskoisimman suunnittelijan luottaa varsinkin, kun laitetoimittajat eivät suostu kertomaan, mihin kyseinen lukema perustuu ja mitkä muuttujat siihen vaikuttavat.

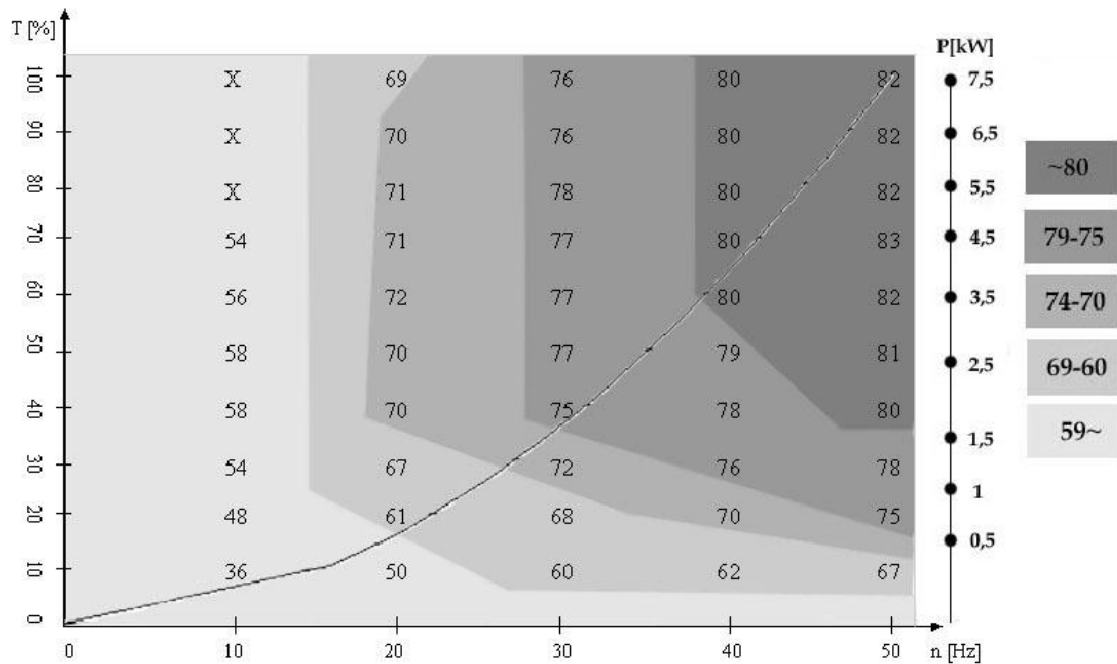
Taajuusmuuttaja on toimintaidealtaan varsin yksinkertainen laite, joka koostuu neljästä peruskomponentista, joita ovat tasasuuntaaja, vaihtosuuntaaja, välipiiri ja ohjauspiiri, joka kommunikoi muiden komponenttien kanssa. Taajuusmuuttajien ominaisuudet määräytyvät edellä mainittujen komponenttien perusteella ja siitä syystä eri käyttötarkoituksiin tehdään taajuusmuuttajia eri komponenteista. Kaikille taajuusmuuttajille on kuitenkin yhteistä nimen mukainen ominaisuus eli vakio verkkovirran tai -jännitteen taajuuden muuttaminen haluttuun taajuuteen. Koska oikosulkumoottorin roottorin pyörimisnopeus on sidoksissa staattorin käämien taajuuden mukaiseen magnetoitumiseen ja demagnetoitumiseen, voidaan taajuutta muuttamalla muuttaa suoraan roottorilla olevan akselin pyörimisnopeutta. Roottorin pyörimisnopeus kasvaa, kun taajuutta kasvatetaan ja vastaavasti pienenee taajuuden pienenessä. (9, s. 52–68.) Kuvassa 9 on esitetty kolmivaiheisen taajuusmuuttajan periaatekaavio.



Kuva 9. Taajuusmuuttajan periaatekuva (9, s. 52)

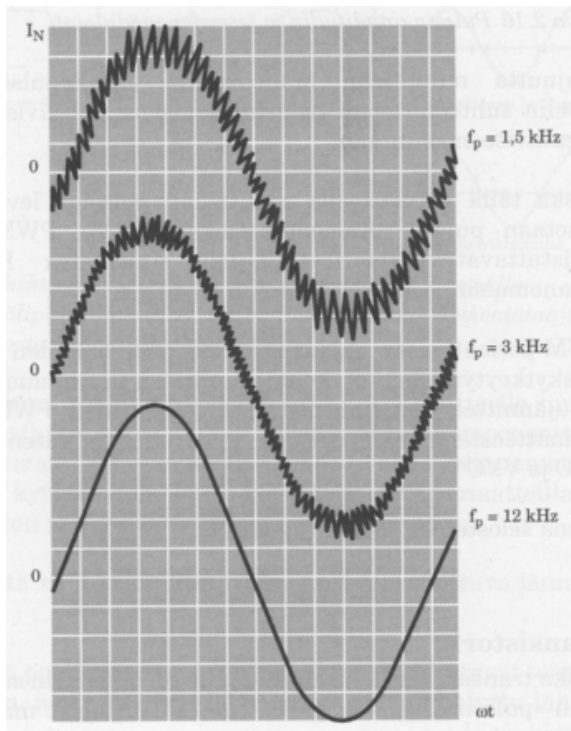
Taajuusmuuttajassa tapahtuvan tasasuuntauksen, signaalin suodatuksen ja vaihtosuuntauksen takia syntyy myös häviöitä. Häviöitä aiheutuu erityisesti tasa- ja vaihtosuuntaustoimenpiteissä, kun signaalia rikotaan ja rakennetaan uudelleen. Yleisesti laitetoimittajat väittävät, että taajuusmuuttajien hyötysuhteet pysyvät erittäin korkealla jopa pienilläkin osakuormilla. Tällaisiin lupauksiin ei ole syytä uskoa ilman pitävää näyttöä väitteiden tueksi. Taajuusmuuttajan hyötysuhde on sidoksissa niin

syöttötaajuuteen kuin akselin kuormaankin, ja hyötysuhde voi pudota huonoimmillaan jopa alle 60 %:n. Kuvassa 10 on esitetty erään taajuusmuuttajan hyötysuhteen muutos eri osakuormilla ja syöttötaajuuksilla. Tämän työn muuttuvailmavirtaisten koneiden taajuusmuuttajien osatehojen hyötysuhteiden arvioimisen pohjana käytetään kuvassa 10 esitetyn taajuusmuuttajan tuloksia. (10, s. 61–76.)



Kuva 10. Erään taajuusmuuttajan hyötysuhteen muutos eri osakuormilla ja syöttötaajuuksilla (10, s. 62)

Sen lisäksi, että taajuusmuuttaja itse aiheuttaa häviöitä, se lisää myös moottorin häviöitä. Tavallinen kolmivaiheinen oikosulkumoottori toimii ideaalisesti, kun sitä syötetään puhtaan sinikäyrän muotoisella jännitteellä ja virralla. Taajuusmuuttajan komponenttien laadusta riippuen laitteelta ulos lähtevän jännitteen ja virran muodot voivat olla hyvinkin säröytyneitä ja vain etäisesti sinikäyriä muistuttavia. Kuvassa 11 on esitetty vaihtosuuntaajan kolmen eri kytkentätaajuuden vaikutus moottorivirtaan. Kuvasta nähdään, että moottorin virta näyttää sitä sinimuotoisemmalta mitä suurempi kytkentätaajuus on. Todellisuudessa kuvan 11 kaltainen säröytynyt aalto muodostuu suorakaiteen muotoisista pulsseista, joiden leveyttä moduloidaan. Pienillä kytkentätaajuuksilla aikaansaatu epäsinimuotoinen jännite ja virta aiheuttavat moottorissa kuparihäviöitä, rautahäviöitä ja pyörrevirtahäviöitä. Vastaavasti kuitenkin kytkentätaajuuden nostaminen lisää moottorin rautahäviöitä ja taajuusmuuttajan sisäisiä häviöitä ja optimi kytkentätaajuuden suhde perustaajuuteen onkin kompromissi näiden kahden ääripään väliltä. (7, s. 24–25.)



Kuva 11. Vaihtosuuntaajan kytkentätaajuuden vaikutus moottorivirtaan (9, s. 66)

5 Elinkaarikustannusten laskentamenetelmät

5.1 Ilmankäsittelykoneen investointikustannukset

5.1.1 Investoinnin kannattavuus

Investoinnilla tarkoitetaan yleisesti jonkin asian hankintaa tuotantoa varten. Investoinnin ansiosta lisääntyneen tai parantuneen tuotannon odotetaan tekevän myös tulosta, jolla investointikustannukset katetaan. Aikaa, jossa investointi on kyennyt tuottamaan siihen sijoitetun pääoman takaisin, sanotaan takaisinmaksuajaksi. Mikäli investoinnin kannattavuutta arvioidaan myös siltä kannalta, olisiko käytetty raha tuottanut muualle sijoitettuna enemmän, joudutaan laskelmissa ottamaan huomioon myös odotettu korko tuotolle. Jos investointi ei kykene lainkaan maksamaan itseään takaisin tai tuottamaan odotettua tulosta, on investointi kannattamaton. (11, s. 1–4.)

Ilmankäsittelykoneen investoinnin kannattavuutta on itsessään vaikeaa arvioida. Rakennusten täytyy joka tapauksessa täyttää niille asetetut sisäilmaston laadun tavoitteet ja useimmiten siihen tarvitaan koneellista ilmanvaihtoa. On siis selvää, että

suurempiin rakennuksiin tarvitaan ilmapölykoneita, jolloin ajatus investoinnin kannattamattomuudesta voidaan unohtaa. Kustannusvertailu on kuitenkin kohdallaan, kun vertaillaan useita erilaisia ilmapölykoneita keskenään.

Investoinnin kannattavuutta voidaan mitata lukuisilla eri laskentamenetelmillä, mutta tässä työssä investointikustannusten laskentaan käytetään Espoon kaupungin laskentamenetelmiä ja siitä syystä ilmapölykoneiden keskinäiseen vertailuun käytetään korota takaisinmaksuaikaa. Espoon kaupunki ei odota tämän kaltaisilta investoinneilta tuottoa, ja siitä syystä laskennassa ei voida käyttää tuotto prosentteja. Investointikustannuksiin on sisällytetty ilmapölykoneen hankintahinta, uusimiskustannukset ja huoltotilan hinta. Koroton takaisinmaksuaika voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$t = \frac{IK_2 - IK_1}{KK_1 - KK_2} \quad (7)$$

t on investoinnin takaisinmaksuaika [a]

IK_1 on vertailuryhmä halvimmän koneen investointikustannukset [€]

IK_2 on vertailtavan koneen investointikustannukset [€]

KK_1 on vertailuryhmän halvimmän koneen käyttökustannukset [€/a]

KK_2 on vertailtavan koneen käyttökustannukset [€/a].

5.1.2 Hankintahinta

Tilaajan kannalta ilmapölykoneen elinkaari alkaa vasta koneen hankinnasta. Hankintaa ennen on tietysti tehtävä asianmukaiset suunnitelmat, joiden pohjalta hankinta tehdään, mutta suunnittelukustannuksien voidaan olettaa olevan koneesta riippumattomia. Hankintatapahtumasta käyttöönottoon on kuitenkin pitkä matka, jonka varrelle kertyy huomattava määrä muita kustannuksia, jotka täytyy ottaa huomioon. Osa laitetoimittajista ilmoittaa koneilleen niin kutsutut budjettihinnat, jotka sisältävät varsinaisen koneen lisäksi esimerkiksi rahdin ja asennuksen. Budjettihinnat eivät ole tarkkoja vaan pikemminkin suuntaa antavia, ja todellisessa kilpailutilanteessa hinnat voivat olla huomattavasti alhaisempia. (12)

Tämän työn laskelmissa käytetään Recair Oy:ltä saatuja budjettihintoja. Hinnat sisältävät IE1-hyötysuhdeluokituksen puhaltimilla varustetun ilmapölykoneen

lisäksi rahdin, urakoitsijan katteen ja asennuksen. Hinnat eivät sisällä taajuusmuuttajia, turvakytkimiä, kaapelointeja, sähköjä tai automatiikkaa. Edellä mainittujen kustannusten voidaan arvioida olevan samansuuruisia keskenään hyvin samankokoisten koneiden välillä, eikä niitä ole siitä syystä vertailtu lainkaan. Ilmankäsittelykoneiden euromääräisiä hintoja ei laitetoimittajan toivomuksesta julkaista tässä työssä eikä sen liitteissä.

5.1.3 Uusimiskustannukset

Ilmanvaihtojärjestelmän komponenttien käyttöikä on ympäristön lisäksi riippuvainen käyttöprofiilista. Kahdesta edellä mainitusta tekijästä ympäristön vaikutus on merkittävämpi, mutta jatkuvasti käyvän kojeiston komponentit kuluvat ja likaantuvat selvästi nopeammin kuin jaksoittain käyvän koneen. Tässä työssä vertaillaan eri koneita samassa ympäristössä, jolloin ympäristön vaikutusta kojeiston käyttöikään ei oteta laskelmissa huomioon. Ympäristön vaikutuksen laskentaan lisääminen olisi myös kohtuuttoman vaikeaa, sillä työ ei liity mihinkään todelliseen kohteeseen. Tässä työssä käytettävät koneiden käyttöprofiilit on esitelty luvussa 4.4.1.

Ilmankäsittelykoneen komponenttien keskimääräinen tekninen elinikä voidaan jakaa kolmeen eri rasisluokkaan viikoittaisten käyttötuntien perusteella

- vaikea (24 h/d, 7d/vk)
- normaali (9...10 h/d, 5d/vk)
- kevyt (10...20 h/vk).

Vaikealla rasisluokalla komponenttien tekninen käyttöikä asettuu 10...15 vuoden välille, normaalilla rasisluokalla tekninen käyttöikä pitenee 20...25 vuoteen ja kevyellä rasisluokalla 30...40 vuoteen. Tässä työssä käytetään laskelmien yksinkertaistamiseksi olettaa, että kaikki komponentit uusitaan yhtäaikaaisesti, jolloin uusimiskustannukset vastaavat koko kojeiston hankintahintaa. Elinkaaritarkastelun jakson ollessa 50 vuotta voidaan laskea, että jatkuvasti käyvän kojeiston komponentit täytyy uusida kahdesti tarkastelujakson aikana. Vastaavasti virka-aikoina ja satunnaisesti käyvien koneiden komponentit uusitaan vain kerran tarkastelujakson aikana. (13, s. 23–24.)

Työssä käytettyjen Espoon kaupungin laskentamenetelmien vuoksi uusimiskustannuksia ei lasketa nykyarvomenetelmän mukaan eikä hinnoissa oteta

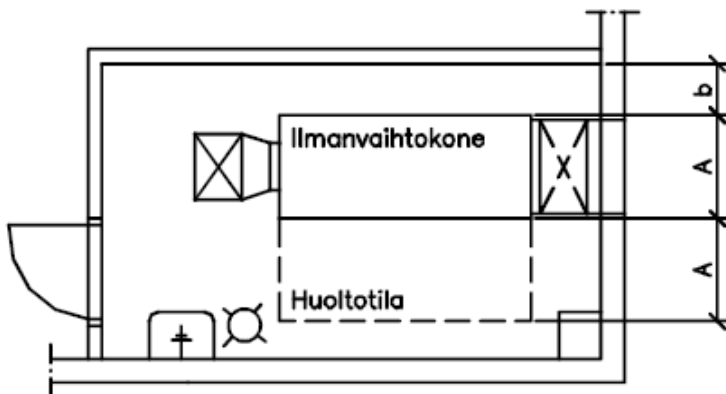
inflaatiota tai muita rahan arvon muutokseen vaikuttavia mahdollisia tekijöitä huomioon. Uusimiskustannuksina käytetään täysin samoja euromääräisiä arvoja kuin hankintahintoina. Tämä menettelytapa vääristää laskennasta saatavia lopputuloksia jossain määrin, mutta koska samaa menetelmää on käytetään kaikkien koneiden kohdalla ja kaikilla eri käyttöprofiileilla, kokonaiskustannusten vertailukelpoisuus säilyy.

5.1.4 Huoltotilan hinta

Rakentaminen ei koskaan ole ilmaista, ja jokaisella rakennetulla neliöllä on hintansa. Yleensä turhia neliöitä pyritään karsimaan tiloista, joissa ei oleskella tai työskennellä usein. Erityisesti tekniset tilat tuntuvat aina olevan suurennuslasin alla, kun puhutaan hukkaneliöistä. Ilmankäsittelykoneet kuitenkin vaativat huoltoa ja siten myös huoltotilaa. Määräykset asettavat vaaditulle huoltotilalle minimiarvot, mutta käytännössä tilaa ei voi koskaan olla liikaa. Kuvassa 12 on esitetty konehuoneeseen sijoitettavan koteloidun ilmankäsittelykoneen huoltotilan mitoitus esimerkki. Kuvassa A on koneen leveys ja b koneen korkeus kertaa 0,4 tai vähintään 400 mm. Suodattimien ja muiden leveiden komponenttien vaihtamisen helpottamiseksi huoltotilaa on syytä varata leveyssuunnassa 200 mm lisätilaa. Espoon kaupunki laskee konehuoneiden ja muiden teknisten tilojen neliöhinnaksi 2 000 €/m², ja samaa neliöhintaa käytetään myös tämän työn laskelmissa. Koteloidun ilmankäsittelykoneen kokonaistilavaatimus voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$A = l \times (w + (w + 0,2 \text{ m}) + (0,4 \times h)) \quad (8)$$

- A on tarvittu kokonaispinta-ala
w on koneen leveys
l on koneen pituus
h on koneen korkeus



Kuva 12. Ilmankäsittelykoneen huoltotilan mitoitus esimerkki (1, s. 21)

Alla on esitetty esimerkkilaskelma ilmapuhdistuskoneesta, jonka mitat ovat

- leveys 900 mm
- pituus 6 400 mm
- korkeus 1 240 mm

kokonaistilavaatimuksesta laskettuna kaavan 8 avulla.

$$A = l \times (w + (w + 0,20 \text{ m}) + (0,40 \times h))$$

$$A = 6,40 \text{ m} \times (0,90 \text{ m} + (0,90 \text{ m} + 0,20 \text{ m}) + (0,40 \times 1,24 \text{ m}))$$

$$A = 6,40 \text{ m} \times (0,90 \text{ m} + 1,10 \text{ m} + 0,50 \text{ m})$$

$$A = 6,40 \text{ m} \times 2,50 \text{ m}$$

$$A = 16 \text{ m}^2$$

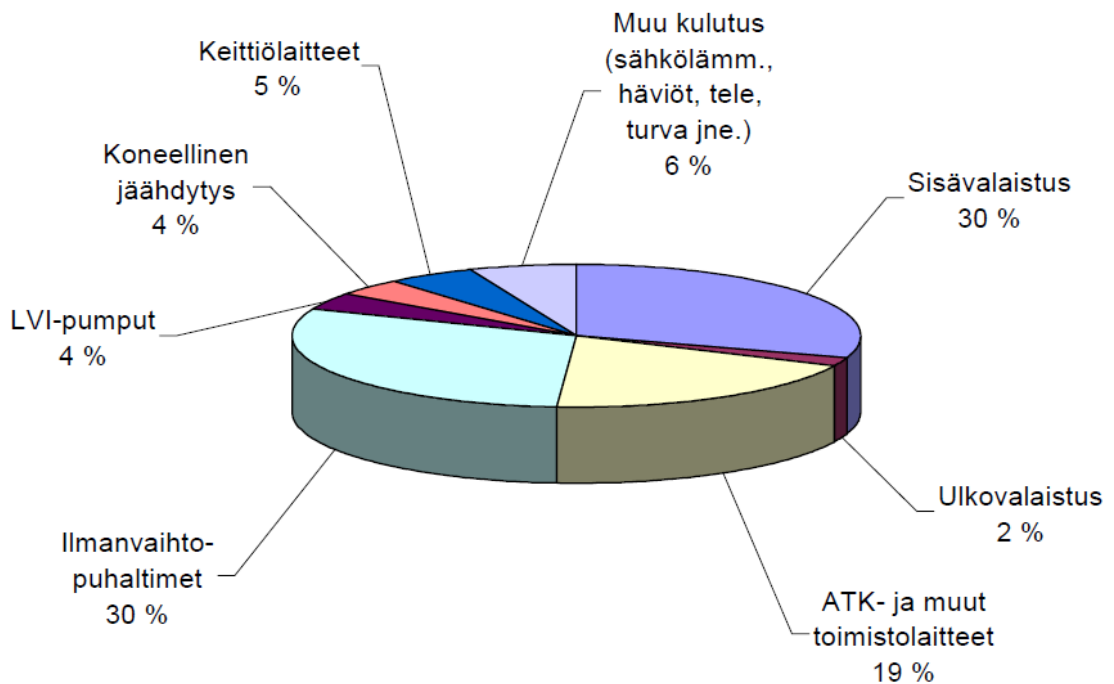
Kun kaavasta laskettu tulos kerrotaan neliöhinnalla 2 000 €/m², saadaan koneen tarvitseman tilan hinnaksi 32 000 €, joka kyseisen koneen tapauksessa on 7 000 € enemmän kuin koneen budjettihinta. Esimerkkilaskelma todistaa, että koneen vaatiman tilan hinta on merkittävän suuri ja saattaa jopa olla suurin yksittäinen menoerä 50 vuoden tarkastelujakson aikana.

5.2 Ilmapuhdistuskoneen käyttökustannukset

5.2.1 Sähköenergian kulutus

Ilmapuhdistuskoneelle määritelty SFP-luku kertoo suoraan, kuinka paljon kone käyttää sähköä siirtääkseen kuution ilmaa. Lämpöpumppukojeistojen yhteydessä kuulee puhuttavan COP-luvusta, joka vastaavasti kertoo, kuinka paljon lämmitys- tai jäädytysenergiaa tuotetaan yhtä otettua sähköenergiayksikköä kohden. Molemmat edellä mainituista suureista pyrkivät yksiselitteisesti määrittelemään kojeiston kokonaishyötysuhteen. Muille taloteknisille kojeistoille tai järjestelmille ei kuitenkaan ole asetettu samanlaisia pakotteita kuin ilmanvaihdolle. Kenties osasy tähän on ilmanvaihtopuhaltimien suuri osuus koko rakennuksen sähkönkulutuksesta. Hieman rakennuksen käyttötarkoituksesta, sisäilmastotavoitteista ja lämmitysmuodosta riippuen ilmanvaihtopuhaltimien käyttämän sähkön osuus kokonaiskulutuksesta voi kasvaa jopa 30 %:iin. Kuvassa 13 on esitetty tyypillisen toimistorakennuksen sähköenergian kulutusjakauma. Kuvasta voidaan nähdä, että toisen vähintään yhtä suuren menoerän aiheuttaa sisävalaistus. Silloin kun puhutaan energiasäästöistä, on helpointa saada niitä aikaan sillä sektorilla, jossa kulutus on suurinta. Onkin täysin

perusteltua ajatella, että tilassa, jossa ei oleskele ketään, ei myöskään pidetä valoja ja ilmanvaihtoa päällä. (14, s. 10–14.)



Kuva 12. Tyypillisen toimistorakennuksen sähköenergian kulutusjakauma (14, s. 13)

Tässä työssä ilmankäsittelykoneiden sähköenergian kulutus on merkittävässä asemassa koneiden keskinäisessä vertailussa. Tarkastelujakson sähköenergian kokonaiskulutus muodostuu ilmanvaihtopuhaltimien hyötysuhteiden ja käyntiprofilien perusteella. Muuttuvilmavirtaisten koneiden kohdalla jokaiselle osateholle lasketaan oma vuosittainen kokonaiskulutus. Kaikkien käytettyjen osatehojen yhteenlaskusta saadaan tulokseksi koneen vuosittainen kokonaiskulutus.

5.2.2 Sähköenergian hinta

Sähköenergian hinnan ja energiaverojen jatkuvat korotukset aiheuttavat niin teollisuudelle kuin yksittäisille kuluttajillekin jatkuvasti lisämenoja. Suomessa sähkö on pitkään ollut muihin Euroopan maihin verrattuna edullista, vaikka suuri osa siitä joudutaankin ostamaan rajojen ulkopuolelta. Hintojen aidot ja välillä jopa teennäiset korotuspaineet johtavat väistämättä siihen, että hintaero muun Euroopan ja Suomen välillä on kaventumassa.

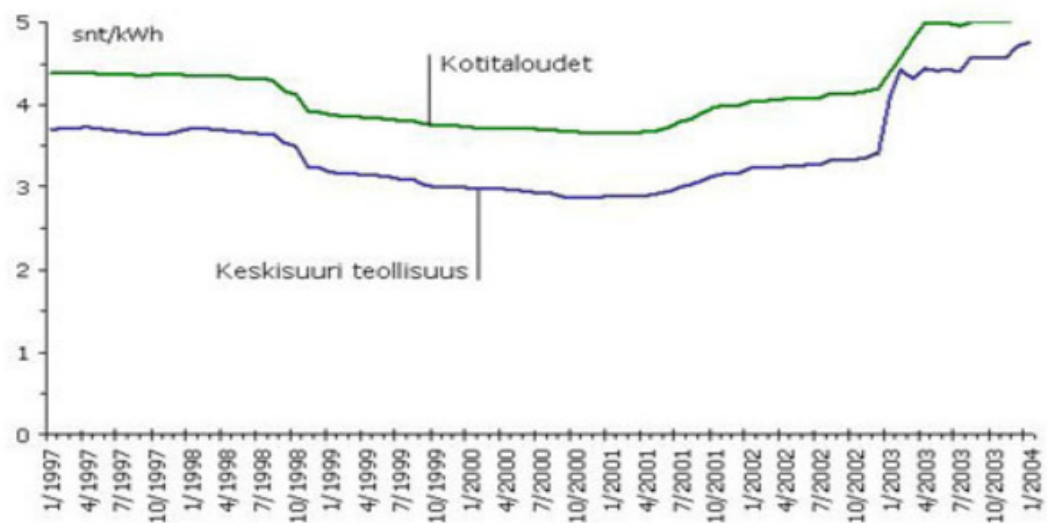
Sähkön jatkuva kallistuminen on tarkoituksenmukaista, ja sitä käytetään muun muassa pakotteena pientalorakentajille siirtymään suorasta sähkölämmityksestä muihin lämmitysmuotoihin. Toistaiseksi kuluttajat ovat saaneet nauttia kiinteästä sähköenergian hinnasta, mihin esimerkiksi sähkön hetkelliset pörssihinnan muutokset eivät vaikuta. Näin ei kuitenkaan tule jatkossa olemaan, vaan etäluettavat energiamittaukset mahdollistavat tuntikohtaisen hinnan käytön, jolloin pörssihinnan muutokset ujutetaan loppukäyttäjän maksettavaksi. Tällaisen laskutusmetodin mahdollistaa valtioneuvoston asetus, jonka mukaan vuoden 2013 loppuun mennessä jakeluverkon haltijan täytyy varustaa kaikki kiinteistöt tunnin välein etäluettavilla mittareilla joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta. (15, s. 6–14.)

Sähkön hinnan kehitystä voi tarkkailla Tilastokeskuksen sivuilta eri kuluttajatyypeittäin vaihtelevien aikavälien mukaan. Taulukossa 1 on esitetty kuluttajahintatyyppin L1 mukaisen kiinteistön sähkön hinnan prosentuaalisia vuosimuutoksia tarkasteluvälillä 2000–2010. Tätä hintatyyppiä on tarkasteltu siitä syystä, että tilastokeskuksen sivuilta ei ole saatavissa teollisuuden kuluttajahintatyyppien hintatietoja kuin viimeiseltä kolmelta vuodelta. Taulukossa on vertailun vuoksi esitetty myös saman ajanjakson elinkustannusindeksin prosentuaaliset vuosimuutokset. Elinkustannusindeksi sisältää muun muassa inflaation ja mittaa peruselinkustannusten hintojen nousua tai laskua suhteessa kuluttajien ostovoimaan. Taulukosta on nähtävissä, että vuosina 2003 ja 2008 sähkön hinta on noussut erittäin voimakkaasti ja aiheuttanut pysyvän muutoksen sähköenergian kuluttajahintoihin. Sähköenergian reaalin hinnan nousu on laskettu vähentämällä 10 vuoden tarkastelujakson sähköenergian prosentuaalisesta hinnannoususta elinkustannusten prosentuaalinen nousu ja jaettu jäljelle jäänyt nousu tarkastelujakson vuosilla. 5,5 %:n keskimääräinen reaalin hinnan nousu voi kuulostaa äkkiseltään pieneltä, mitä se ei missään tapauksessa ole. Samaa vauhtia jatkuva nousu tuplaa sähköenergian hinnan 13 vuoden välein ja moninkertaistaa tässä työssä käytetyn 50 vuoden tarkastelujakson käyttökustannukset. Kuvassa 13 on esitetty kotitalouksien ja keskisuuren teollisuuden sähköenergian hinnan kehitys aikavälillä 1997–2003. Kuvasta on selvästi nähtävissä vuoden 2000 jälkeen tapahtunut hyvin jyrkkä nousu sähköenergian hinnoissa. (18)

Taulukko 1. Sähkön hinnan ja elinkustannusindeksin muutokset vuosina 2000–2010 (16; 17)

Sähkön hinnan vuosimuutokset		Elinkustannusindeksin vuosimuutokset	
Kuluttajahintatyyppi L1			
Suorasähkölämmitteinen pientalo			
	Vuosimuutos %		Vuosimuutos %
2000	-1,5	2000	3,4
2001	5,9	2001	2,5
2002	2,7	2002	1,6
2003	14,4	2003	0,9
2004	-2,3	2004	0,2
2005	1,5	2005	0,9
2006	9,2	2006	1,8
2007	0,5	2007	2,5
2008	19,2	2008	4,1
2009	1,8	2009	0,0
2010	8,7	2010	1,2
Yht:	75,9	Yht:	20,6
Reaalinen hinnannousu vuosittain (%):			
	5,5		

Sähköenergian hinnan kehitys



Kuva 13. Sähköenergian hinnan kehitys vuosina 1997–2003 (18)

Tämän työn laskelmissa pyritään huomioimaan sähköenergian mahdollinen reaalinen korotus tulevaisuudessa ja siitä syystä kaikille ilmankäsittelykoneille on laskettu vertailua varten käyttökustannukset kolmella eri reaalilla vuosittaisella hinnankorotuksella:

- sähköenergian hinta nousee 0 %
- sähköenergian hinta nousee 2 %
- sähköenergian hinta nousee 4 %.

Vertailun tarkoituksena on selvittää, kuinka paljon sähköenergian hinnan mahdollinen nousu vaikuttaa investoinnin kannattavuuteen määrättyllä tarkastelujaksolla. Tässä työssä sähköenergian hintana käytetään Espoon kaupungin laskentakäytäntöjen mukaista sähköenergian hintaa 80 €/MWh. Hinta pitää sisällään kaikki sähkön ostamiseen liittyvät kustannukset pois lukien arvonlisäveron.

5.2.3 Kaukolämmön kulutus

Ilmankäsittelykoneessa kaukolämpöä käytetään yleensä vain lämmityspatterissa kiertävän veden lämmittämiseen. Mikäli lämmityspatterin rakenne ja teho pysyvät samana, voidaan olettaa, että ilmankäsittelykoneen rungon ja puhallinkokojen vaikutus tarvittuun kaukolämmön määrään on merkityksettömän pieni eikä sitä tarvitse ottaa huomioon vertailtaessa keskenään hyvin samankokoisia ilmankäsittelykoneita. Tämän vuoksi tässä työssä ei tarkastella mahdollisesti hyvin marginaalisia eroja kaukolämmön kulutuksessa eikä kaukolämpöä ole otettu millään tavalla huomioon käyttökustannuksissa. (6)

5.2.4 Huoltokustannukset

Ilmankäsittelykoneet vaativat määräaikaista huoltoa ja komponenttien puhdistamista. Yleisimpiä huoltotoimenpiteitä ovat suodattimien ja kiilahihnojen vaihdot. Yleensä ilmanvaihtojärjestelmien vuosittaisiksi huoltokustannuksiksi arvioidaan 0,5–1,5 % hankintahinnasta (19, s. 4). Kun vertaillaan keskenään hyvin samankaltaisia kojeistoja samoilla käyntiajoilla, voidaan olettaa niiden huoltokustannusten olevan erittäin lähellä toisiaan. Koska tässä työssä ei vertailla eri käyntiaikoja tai -profieileja omaavia koneita keskenään, on määräaikaishuoltojen vaikutusta turha vertailla, sillä niiden erot ovat merkityksettömän pieniä ja erittäin vaikeita arvioida. Komponenttien kulumisista ja

likaantumisista aiheutuvat kustannukset lasketaan uusimiskustannusten yhteydessä investointikustannuksiin eikä huoltokustannusten vaikutusta oteta tämän työn laskelmissa lainkaan huomioon. (6)

6 Tulokset

6.1 Vakioilmavirtaiset ilmankäsittelykoneet

6.1.1 Virka-aikoina käyvät koneet

Virka-aikoina käyvien vakioilmavirtaisten koneiden energiatehokkuus- ja elinkaarilaskelmissa on käytetty tässä työssä aiemmin esiteltyjä lähtötietoja, laskentamenetelmiä ja -kaavoja. Laskelmista saatiin erittäin laajoja ja käyttökelpoisia tuloksia, joista käyvät ilmi eri kustannusten keskinäiset suhteet. Tämän työn kaikki laskelmissa käytetyt euromääräiset summat ovat arvonlisäverottomia hintoja.

Laskelmien yksittäisistä koneista johtuvia poikkeamia pyrittiin välttämään ottamalla mahdollisimman laaja otanta koneita vertailuun mukaan. Vertailuun sisällytettiin yhteensä 23 eri konetta viidellä eri ilmamäärällä. Kaikilla muilla ilmamäärillä on vertailu viittä fyysisiltä mitoiltaan erikokoista ja SFP-luvuiltaan eriarvoista ilmankäsittelykonetta pois lukien koneet, joiden mitoitusilmavirta on $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Niitä on vertailussa vain kolme erilaista vaihtoehtoisten koneiden puutteen vuoksi.

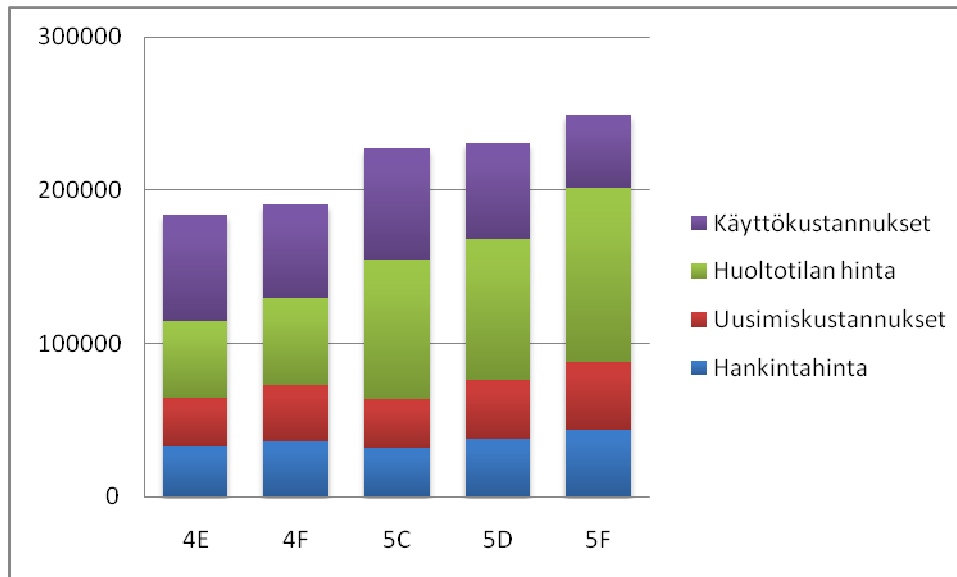
Taulukossa 2 on esitetty erään vertailuryhmän ilmankäsittelykoneiden osakustannusten suhteet ja korottomat takaisinmaksuajat. Taulukossa kustannuksiltaan pienimmälle on annettu arvo 100 ja muille prosentuaalinen suhteellinen vastaava arvo. Laskelmien tulokset joudutaan esittämään tässä muodossa, koska ilmankäsittelykoneiden euromääräisiä hankintahintoja ei tässä työssä voida julkaista. Koroton takaisinmaksuaika on laskettu hankintahinnaltaan halvimpaan koneeseen verrattuna, joka tässä tapauksessa on kojeisto 5C.

Taulukko 2. Vakioilmavirtaisten virka-aikoina käyvien mitoitusilmavirraltaan 4 m³/s koneiden osakustannusten suhteet sähkön hinnan pysyessä tarkastelujakson ajan samana.

Kojeisto	4E	4F	5C	5D	5F
SFP (kW/m ³ /s)	1,8	1,6	2	1,7	1,3
Hankintahinta (€)	102	114	100	119	138
Huoltotilan hinta (€)	100	114	181	184	227
Investointikust. (€)	100	113	134	146	175
Käyttökust. 50a (€)	144	126	153	132	100
Kokonaiskustannukset 50a (€)	100	104	124	126	136
Koroton takaisinmaksuaika	1	91	-	457	205

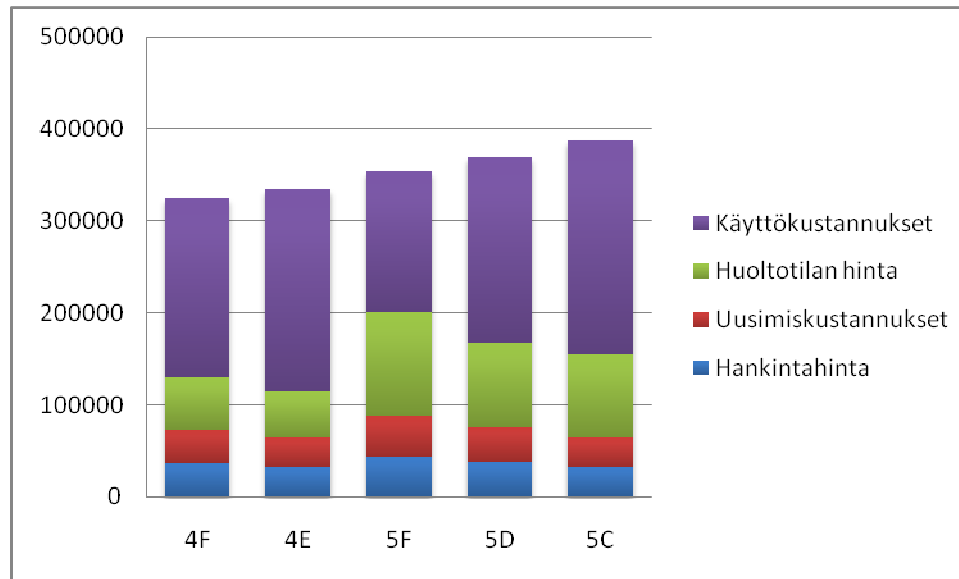
Laskelmien yhteydessä huomattiin, että alussa käytetty oletamus siitä, että halvin kone olisi aina myös pienin ja SFP-luvultaan huonoin ei läheskään kaikissa vertailuryhmissä pitänyt paikkaansa. Taulukosta 2 voidaan nähdä, että SFP-luvultaan huonoin kone 5C on selkeästi koneita 4E ja 4F suurempi. Asia selviää vertailtaessa huoltotilojen hintoja, jotka ovat suoraan sidoksissa koneen fyysiseen kokoon. Myös koneen tunnuksen kirjain- ja numeroyhdistelmä kertoo koneen fyysisen koon. Numerojen ja kirjainten suurentuessa kasvaa myös koneen fyysiset mitat.

Työn yhtenä tavoitteena oli selvittää eri kustannusten väliset optimaaliset suhteet ja niiden muutokset eri käyttöprofiileilla. Laskelmista saatiin erittäin selkeitä ja johdonmukaisia tuloksia, joiden perusteella voidaan tehdä hyvin yleispäteviä päätelmiä. Kuvassa 14 on esitetty erään vertailuryhmän 50 vuoden tarkastelujakson kokonaiskustannusten koostumus eri osakustannuksista. Kuvasta nähdään, että vertailun selvästi edullisimman koneen kustannukset koostuvat kolmesta lähes yhtä suuresta osuudesta käyttökustannuksista, huoltotilan hinnasta ja uusimiskustannusten sekä hankintahinnan yhteissummasta. Kuvasta nähdään myös, miten mahdollisimman energiataloudellista ratkaisua haettaessa voidaan mennä pahasti pieleen, sillä koneen 5F hankintahinta, uusimiskustannukset ja huoltotilan hinta ovat suurempia kuin koneen 4E kokonaiskustannukset. Nämä kaksi sääntöä toistuvat kaikissa eri ilmamäärien vertailuryhmissä. Kaikkien vakioilmavirtaisten virka-aikoina käyvien koneiden vertailuryhmien kokonaiskustannusten vertailukuvaajat esitetään liitteessä 2.



Kuva 14. Vakioilmavirtaisten virka-aikoina käyvien mitoitusilmavirrallaan 4 m³/s koneiden kokonaiskustannusten koostumus sähkön hinnan pysyessä samana

Nämä säännönmukaisuudet eivät kuitenkaan päde, kun huomioon otetaan mahdollinen sähkön hinnan vuosittainen nouseminen. Tässä työssä kaikkien koneiden käyttökustannukset laskettiin kolmella eri mahdollisella sähkön hinnan reaalilla vuosikasvulla 0 %, 2 % ja 4 %. Laskelmista huomattiin, että sähkön hinnan kehitys vaikuttaa merkittävästi eri koneiden hankinnan kannattavuuteen. Kuvassa 15 on esitetty kuvan 14 vertailuryhmän koneiden kokonaiskustannusten muodostuminen, kun sähkön hinnan oletetaan nousevan 4 % vuosittain koko tarkastelujakson ajan. Kuvasta nähdään, kuinka käyttökustannukset aiheuttavat lähes kaikissa koneissa suurimman osan tarkastelujakson kustannuksista. Poikkeuksen muodostaa SFP-arvoltaan vertailun paras kone 5F, jonka käyttökustannukset jäävät edelleen pienemmiksi kuin muut kustannukset yhteenlaskettuna. Edellisen vertailun paras kone 4E putoaa tässä vertailussa toiseksi, mutta vain pienellä erolla hieman kookkaampaan ja energiatehokkaampaan 4F-koneeseen verrattuna.



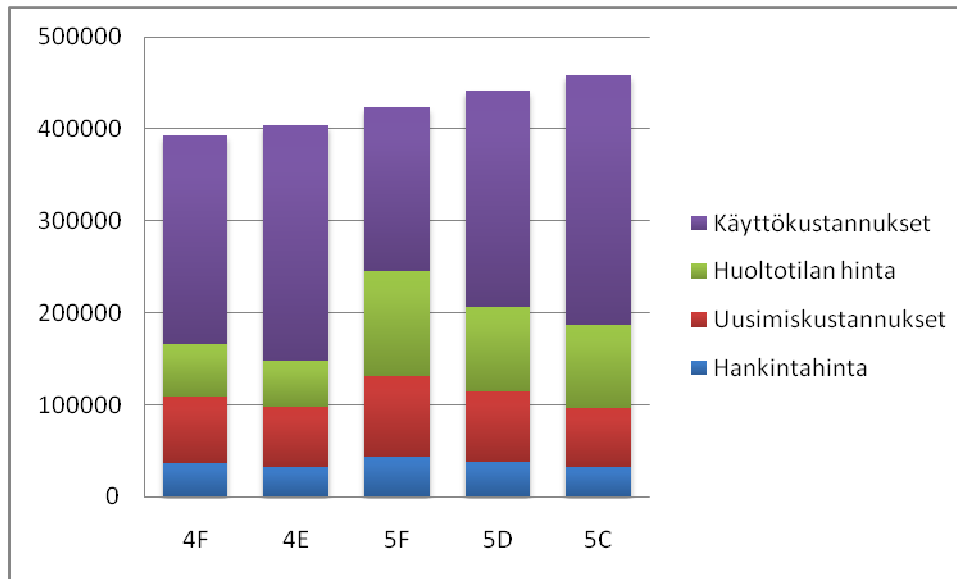
Kuva 15. Vakioilmavirtaisten virka-aikoina käyvien mitoitusilmavirrallaan 4 m³/s koneiden kokonaiskustannuksien koostumus sähkön hinnan noustessa 2 % vuosittain

Kaikkien eri vertailuryhmien yhtäläisyyksien vuoksi voidaan muodostaa sääntö, jonka mukaan SFP-luvuiltaan 1,5–2,3 kW/(m³/s) välille asettuvat koneet soveltuvat parhaiten käytettäväksi vakioilmavirtaisissa virka-aikoina käyvissä järjestelmissä.

6.1.2 Jatkuvasti käyvät koneet

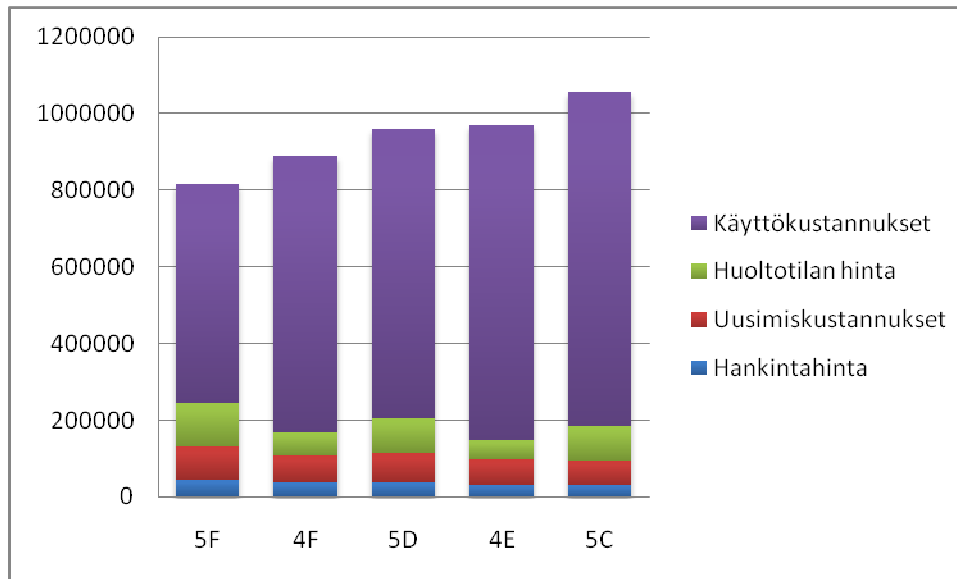
Jatkuvasti käyvien koneiden energiatehokkuus ja -elinkaarilaskelmissa on käytetty tässä työssä aiemmin esiteltyjä lähtötietoja, laskentamenetelmiä ja -kaavoja. Laskelmien tulokset ovat yksiselitteisiä ja puolestaan puhuvia. Vertailussa käytettiin samoja koneita ja vertailuryhmäkoonpanoja kuin virka-aikoina käyvien koneiden vertailuissa.

Koneiden vertailut suoritettiin täysin samoilla menetelmillä ja mitoitusarvoilla, kuin virka-aikoina käyvien vakioilmavirtaisten koneiden laskelmat. Ainoiksi muuttujiksi virka-aikana käyviin koneisiin verrattuna jäivät uusimiskustannukset ja käyntiaika, joka aiheuttaa myös käyttökustannusten kasvun. Kuvassa 16 on esitetty mitoitusilmavirrallaan 4 m³/s koneiden kokonaiskustannusten koostumus sähkön hinnan pysyessä koko tarkastelujakson ajan samana. Kuvasta voidaan havaita, että virka-aikoina käyviin koneisiin verrattuna käyttökustannukset ovat kokonaiskustannuksien suurin yksittäinen menoerä lähes jokaisen koneen kohdalla.



Kuva 16. Vakioilmavirtaisten jatkuvasti käyvien mitoitusilmavirraltaan 4 m³/s koneiden kokonaiskustannuksien koostumus sähkön hinnan pysyessä samana

Kuvassa 17 on esitetty kuvan 16 kanssa sama vertailuryhmä laskettuna sähköenergian hinnan 4 %:n vuosittaisella kasvulla. Kuvasta nähdään käyttökustannusten voimakas kasvu, joka nolaa lähes täysin muiden kustannusten merkityksen vertailussa. Vertailuryhmän ylivoimaisesti suurin ja hankintahinnaltaan kallein kone 5F päihittää vertailun huonoimman koneen yli 200 000 €:lla. Laskelmista havaittiin myös, että erot vertailuryhmien koneiden välillä kasvavat konekokojen kasvaessa. Pienempien koneiden kokonaiskustannusten erot 50 vuoden tarkastelujaksolla voivat jäädä muutamiin tuhansiin euroihin, kun taas mitoitusilmavirraltaan 10 m³/s koneiden vertailussa huonoimman ja parhaan koneen välinen ero on noin 800 000 euroa.



Kuva 17. Vakioilmavirtaisten jatkuvasti käyvien mitoitusilmavirraltaan 4 m³/s koneiden kokonaiskustannusten koostumus sähkön hinnan noustessa 4 % vuosittain

Kaikissa eri jatkuvasti käyvien koneiden vertailuryhmissä esiintyy samankaltaisia säännönmukaisuuksia, kuin virka-aikoina käyvillä koneilla. Vertailuryhmien kokonaiskustannuksiltaan edullisimman koneen kustannukset koostuvat, sähkön hinnan pysyessä samana, poikkeuksetta kahdesta lähes yhtä suuresta menoerästä käyttökustannuksista ja huoltotilan, uusimiskustannusten ja hankintahinnan yhteissummasta. Sähkön hinnan noustessa nousevat myös käyttökustannukset noin kahteen kolmasosaan kokonaiskustannuksista. Näiden kustannusten suhteet ovat erittäin vahvasti sidoksissa koneen ominaissähkötehoon ja siten muodostuu myös sääntö, joka suosii SFP-luvuiltaan 1,2–1,7 kW/(m³/s) välille asettuvia koneita vakioilmavirtaisissa jatkuvasti käyvissä järjestelmissä. Kaikkien vakioilmavirtaisten jatkuvasti käyvien koneiden vertailuryhmien kokonaiskustannusten kuvaajat on esitetty liitteessä 3.

Vakioilmavirtaisten koneiden vertailu paljastaa selviä säännönmukaisuuksia, jotka ovat sidoksissa niin käyntiaikaan kuin sähkön hinnan muutokseenkin. Taulukossa 3 on koottu esitys mitoitusilmavirraltaan 4 m³/s koneiden laskelmien tuloksista. Taulukossa on esitetty koneiden kokonaiskustannukset siten, että edullisimman arvo on 100 ja muut prosentuaalisia vertailuarvoja. Taulukosta on selvästi nähtävissä, että kokonaisuus suosii SFP-luvultaan lähimpänä 1,5:tä olevaa konetta 4F. Kyseinen kone on kaikilla muuttujilla joko paras tai toiseksi paras ja ero vertailun parhaaseen pysyttelee hyvin minimaalisena. Tulosten perusteella voidaankin päätellä, että

vakioilmavirtaista konetta mitoittaessa ja valitessa on melko turvallista pysytellä SFP-luvultaan lähellä 1,5:tä olevissa koneissa, mikäli konehuoneen tila antaa myöden. Kaikki vakioilmavirtaisten koneiden vertailuryhmien koontitaulukot on esitetty liitteessä 4.

Taulukko 3. Vakioilmavirtaiset mitoitusilmavirrallaan 4 m³/s koneiden tulokset eri käyntiajoilla ja energian hinnoilla

	Kojeisto SFP	5F 1,3	4F 1,6	5D 1,7	4E 1,8	5C 2,0
Käyntiaika	Energian hinta					
9/5	+ 0 %	136	104	126	100	124
9/5	+ 2 %	121	100	118	100	120
9/5	+ 4 %	109	100	114	103	120
24/7	+ 0 %	108	100	112	103	117
24/7	+ 2 %	100	101	111	107	119
24/7	+ 4 %	100	109	117	119	130

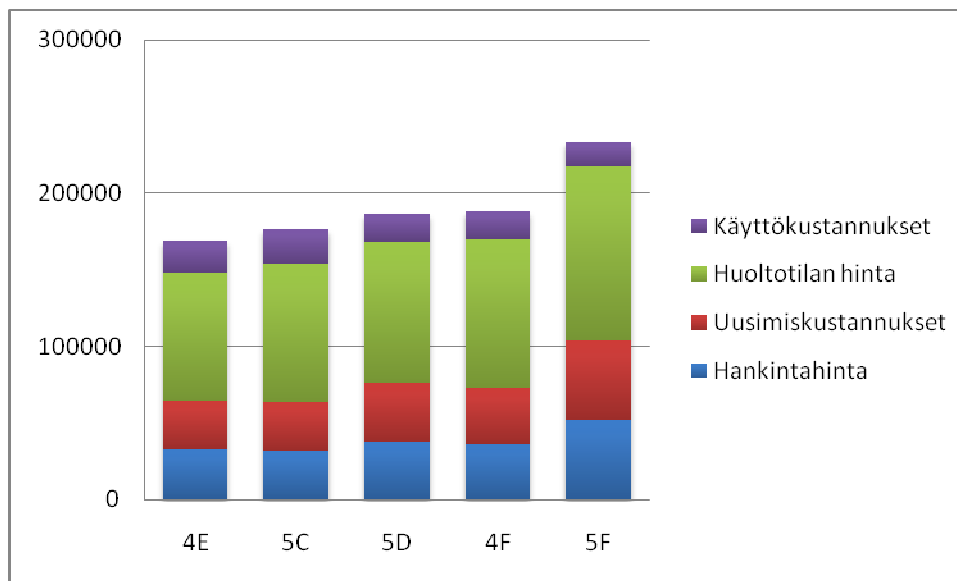
Erään tämän työn vertailuryhmän ilmkäsittelykoneiden energiatehokkuus- ja elinkaarilaskelmien tulokset on esitetty liitteessä 5.

6.2 Muuttuvailmavirtaiset koneet

Muuttuvailmavirtaisten koneiden energiatehokkuus ja -elinkaarilaskelmissa on käytetty tässä työssä aiemmin esiteltyjä lähtötietoja, laskentamenetelmiä ja -kaavoja. Käytössä olleen Recairin mitoitusohjelman puutteiden ja ongelmien vuoksi ilmkäsittelykoneiden osatehot on laskettu itse käyttäen luvussa 4.4 esiteltyjä osatehojen laskentamenetelmiä. Osatehojen käyttöprofiilina on käytetty Espoon kaupungin muuttuvailmavirtaisen järjestelmän käyttöprofiilia, joka on esitelty luvussa 4.4.1. Laskelmat ovat hyvin teoreettisia ja perustuvat usean eri teoksen tuloksiin ja päätelmiin. Tässä työssä on tarkasteltu vain taajuusmuuttajakäyttöisten puhaltimien osatehoja toteutustavan yleisyyden vuoksi. Taajuusmuuttajien hyötysuhteiden määrittely osoittautui tämän osa-alueen haastavimmaksi muuttujaksi, sillä laitetoimittajat eivät ole lainkaan yhteistyökykyisiä hyötysuhteista keskusteltaessa. Todellisuudessa taajuusmuuttajien hyötysuhteet voivat olla jopa laskelmissa käytettyjä hyötysuhteita huonompia.

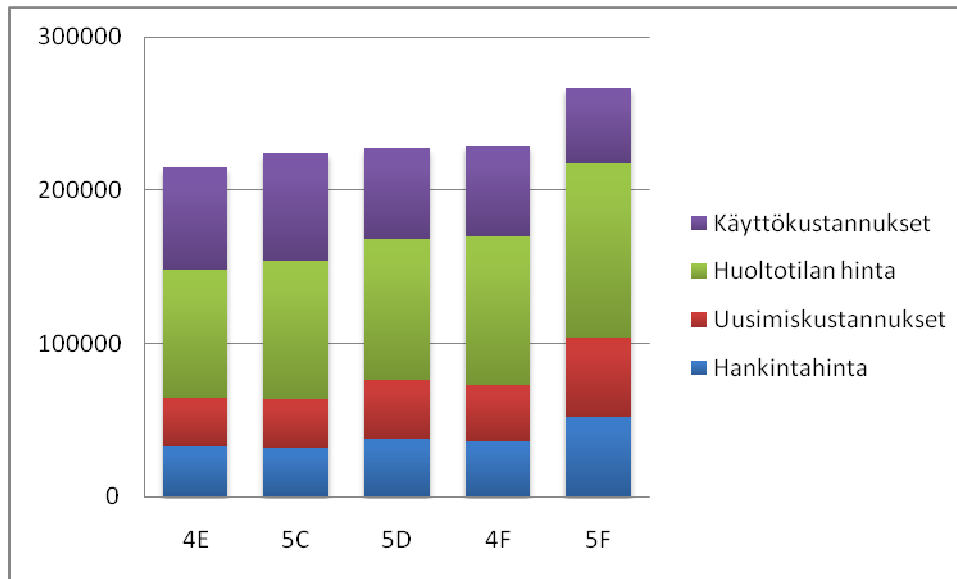
Muuttuvailmavirtaisten koneiden vertailulaskelmissa on käytetty samoja koneita ja mitoitusarvoja, kuin vakioilmavirtaisten koneiden laskelmissa. Tällä menettelytavalla on säilytetty konekohtaisten laskelmien vertailukelpoisuus eri käyntiprofiilien kesken.

Käyntiajan ja -tehon muutos maksimista osateholle pienentää ilmankäsittelykoneen käyttökustannuksia ja sitä kautta myös muuttaa eri osakustannusten suhteita. Kuvassa 18 on esitetty mitoitusilmavirraltaan 4 m³/s vertailuryhmän koneiden kokonaiskustannusten koostumus eri osakustannuksista. Kuvasta on havaittavissa, että käyttökustannukset muodostavat erittäin pienen osan koneiden kokonaiskustannuksista. Erot SFP-luvultaan erisuuruisten koneiden välillä on merkityksetön ja johtuu isompien koneiden alhaisista toimintapisteistä, mikä johtaa huonontuneeseen hyötysuhteeseen osatehoilla.



Kuva 18. Muuttuvilmavirtaisten mitoitusilmavirraltaan 4 m³/s koneiden kokonaiskustannusten koostumus sähkön hinnan pysyessä samana

Kuten vakioilmavirtaisten koneiden vertailussa myös muuttuvilmavirtaisten koneiden käyttökustannukset laskettiin kolmella eri sähköenergian hinnalla. Vaikka sähkön hinnan kehitys vaikuttaa käyttökustannuksiin merkittävästi, jäivät erot eri koneiden käyttökustannusten välillä hyvin vähäisiksi eikä hinnan nousu pääsääntöisesti vaikuta koneiden keskinäiseen paremmusjärjestykseen. Kuvassa 19 on esitetty kuvan 18 kanssa saman vertailuryhmän kokonaiskustannusten koostumus. Kuvasta on nähtävissä, että suurimman yksittäisen menoerän aiheuttaa edelleen koneen viemä tila konehuoneesta. Kaikki muuttuvilmavirtaisten koneiden kokonaiskustannusten koostumuskuvaajat on esitetty liitteessä 6.



Kuva 19. Muuttuvailmavirtaisten mitoitussilmavirrallaan 4 m³/s koneiden kokonaiskustannusten koostumus sähkön hinnan noustessa 4 % vuosittain

Muuttuvailmavirtaisten koneiden vertailu osoittaa niiden eroavuuden vakioilmavirtaisiin koneisiin. Suurin eron syy on selkeästi käyttökustannusten pieneneminen suhteessa muihin kuluihin. Tämä aiheuttaa kustannusten pääpainon siirtymisen huoltotilan hinnalle ja hankintakustannuksille. Investointikustannusten kattaessa suurimman osan kokonaiskustannuksista parantuu fyysisesti pienempien ja SFP-luvultaan heikompien koneiden kilpailukyky. Taulukossa 4 on esitetty mitoitussilmavirrallaan 4 m³/s koneiden kootut vertailulaskelmien tulokset siten, että vertailun edullisimman kokonaiskustannusten arvo on 100 ja muut ovat prosentuaalisia vertailuarvoja. Taulukon tuloksista on nähtävissä, että koneiden väliset kokonaiskustannusten erot kaventuvat vain hieman sähköenergian hinnan noustessa. Kaikkien muuttuvailmavirtaisten kokonaiskustannusten koontitaulukot löytyvät liitteestä 7.

Taulukko 4. Muuttuvailmavirtaisten mitoitussilmavirrallaan 4 m³/s koneiden tulokset

Muuttuva ilmavirta ilmamäärä 1,6 - 4 m ³ /s		5F	4F	5D	4E	5C
Kojeisto SFP		1,0	1,3	1,3	1,5	1,6
Käyntiaika	Energian hinta					
8/5	+ 0 %	138	112	110	100	104
8/5	+ 2 %	132	110	109	100	104
8/5	+ 4 %	124	106	106	100	104

Muuttuvailmavirtaisten koneiden vertailulaskelmat eivät paljasta minkäänlaisia yllätyksiä. Laskelmat todistavat, että erikokoisten koneiden käyttökustannusten erot

laskemissa käytetyn profiilin mukaisella käytöllä jäävät hyvin pieniksi. Kustannusten pääpainon levätessä investointikustannuksilla noudattaa vertailusta saatavat tulokset seuraavia päätelmiä: Mitoitusilmavirrastaan alle $4 \text{ m}^3/\text{s}$ koneiden SFP-luvun tavoitearvo asettuu välille $1,8\text{--}2,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$, kun taas konekokojen kasvaessa tavoitearvo löytyy väliltä $1,3\text{--}1,8 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$. Varman päälle pelatessa voidaan ilmentäjäkoneiden ominaissähkötehon tavoitearvoiksi asettaa pienemmillä ilmavirroilla $2,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ ja suuremmilla $1,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$, jolloin ei sorruta tarpeettoman suuren koneen hankintaan. Liitteessä 8 on esitetty erään tässä työssä käytetyn muuttuvilmavirtaisen koneen laskentataulukon tulokset.

7 Loppupäätelmät

Insinöörityössä selvitettiin ilmentäjäkoneiden osakustannuksia ja niiden muutoksia kolmella erilaisella käyttöprofiililla. Lisäksi tavoitteena oli selvittää, miten eri vertailuryhmien koneiden keskinäinen järjestys muuttuu sähkön hinnan noustessa. Työn päätavoitteena oli kuitenkin selvittää, voidaanko laskelmien perusteella määritellä yleispäteviä ilmanvaihtojärjestelmien ominaissähkötehojen tavoitearvoja eri käyttötilanteiden mukaan.

Työn merkittävimmiksi ongelmiksi osoittautuivat laskentaan sisällytettävien muuttujien rajaus ja tulosten esittäminen ymmärrettävästi käyttämättä euromääräisiä hintoja. Työssä käytetyt laskentamenetelmät ovat erittäin yksinkertaistettuja ja monia vaikeasti mukaan laskettavia muuttujia on jätetty pois. Työn tuloksia voitaisiin laajentaa yleispätevimmiksi, mikäli samankaltainen kattava vertailu suoritettaisiin useamman eri laitevalmistajan koneille.

Insinöörityötä varten suoritettujen elinkaarilaskelmien tulokset ovat johdonmukaisia ja niistä voidaan tehdä selviä seuraavia johtopäätöksiä kaikille kolmelle tarkastelussa ollelle käyttöprofiilille:

- vakioilmavirtaisten virka-aikoina käyvien koneiden SFP-tavoitetaso on $1,5\text{--}2,3 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ koneen mitoitusilmavirrasta riippuen
- vakioilmavirtaisten jatkuvasti käyvien koneiden SFP-tavoitetaso on $1,2\text{--}1,7 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ koneen mitoitusilmavirrasta riippuen
- muuttuvilmavirtaisten virka-aikoina käyvien koneiden SFP-tavoitetaso on $1,5\text{--}2,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ koneen mitoitusilmavirrasta riippuen.

Vastaavasti tuloksista voidaan määritellä eri käyttöprofiilin mukaisille ilmanvaihtojärjestelmille SFP-tavoitetasot:

- vakioilmavirtaisen virka-aikoina toimivan tavoitetaso on $1,8 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$
- vakioilmavirtaisen jatkuvasti toimivan tavoitetaso on $1,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$
- muuttuvilmavirtaisen virka-aikoina toimivan tavoitetaso on $2,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$.

Tuloksista voidaan päätellä, että nykyinen määräysten mukainen ominaissähkötehon tavoitetaso $2,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ on auttamatta aikaansa jäljessä ja käyttökelpoinen vain pienemmillä koneilla ja lyhyillä käyntiajoilla. Nykyinen sähkön hinnan kehitys antaa selviä viitteitä tulevasta ilmanvaihdon suunnittelutrendistä, missä energiatehokkuus on avainasemassa. Työn tulokset osoittavat kuitenkin, ettei liialliseen energiatehokkuudella ilakointiin ole syytä lähteä mukaan.

Tässä insinööriyössä kyettiin sekä itseni että työn tilaajan mielestä saavuttamaan selvitystyölle asetetut tavoitteet. Työtä varten tehdyt laskelmat osoittivat alkuperäiset epäilyt koneen käyttöprofiilin ja tavoiteominaissähkötehon yhteydestä oikeiksi. Työstä saadut tulokset helpottavat jatkossa Espoon kaupunkia määrittelemään erilaisille ilmanvaihtojärjestelmillä perusteltuja ominaissähkötehon vaatimuksia ja raja-arvoja. Työn tuloksia tullaan tulevaisuudessa käyttämään laajalti Espoon kaupungin toimesta muun muassa erilaisten uudis- ja perusparannuskohteiden suunnittelun apuvälineenä.

Lähteet

- 1 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. 2010. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 2 Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho SFP, LVI 30-10349, 2002.
- 3 Mäkinen Pekka & Railio Jorma. SFP-opas: Opas ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehon määrittämiseen, laskentaan ja mittaamiseen. 2009. Verkkodokumentti. Teknologiateollisuus.
<http://www.teknologiateollisuus.fi/file/5965/sfpopas3_060709.pdf.html>. Luettu 17.1.2011.
- 4 Seppänen Olli, 2008. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Espoo: Suomen LVI-yhdistysten liitto.
- 5 Recair Oy. Ilmastointikoneen mitoitus. 2010. Mitoitusohjelma versio 2010.5.1. <<http://www.recair.fi/ilmalampopumput/ohjelmat>>. Ladattu 8.1.2011.
- 6 Bremer Tom. 2011. LVI-insinööri, valvoja. Espoon kaupunki. Espoo. Keskustelu 1.3.2011.
- 7 Malinen Jukka, 2005. Induktiomootorin hyötysuhdemittaukset verkko- ja taajuusmuuttajasyötössä. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- 8 Kuusinen Katri & Bovellan Kari. Korkeahyötysuhteisten sähkömoottorien hankinta. 2004. Verkkodokumentti. Motiva Oyj.
<http://www.motiva.fi/files/1666/Korkeahyotysuhteisten_sahkomoottorien_hankinta.pdf>. Luettu 8.3.2011.
- 9 Tietämisen arvoista asiaa taajuudenmuuttajista. 2000. Danfoss Drives A/S.
- 10 Aranto Niina, 2008. Competitor comparison: Variable speed drives in pumping applications. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- 11 Investointilaskentamenetelmät, LVI 02-10384, 2005.
- 12 Bremer Tom. 2011. LVI-insinööri, valvoja. Espoon kaupunki. Espoo. Keskustelu 7.12.2010.
- 13 Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot, LVI 01-10424, 2008.
- 14 Reinikainen Erja. Ilmanvaihtojärjestelmän käyttöikäsuunnittelu ja elinkaarikustannukset. 2002. Verkkodokumentti. Recair Oy.
<<http://www.recair.fi/pdf/Elinkaariesitelma.pdf>>. Luettu 1.4.2011.

- 15 Lehtinen Suvi. Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta – mikä muuttuu? 2009. Verkkodokumentti.
<http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Lehtinen_Suvi_200903.pdf>. Luettu 5.4.2011.
- 16 Energian hankinta, kulutus ja hinnat. 2011. Verkkodokumentti. Tilastokeskus.
<<http://www.stat.fi/til/ehkh/index.html>>. Luettu 5.4.2011.
- 17 Elinkustannusindeksi. 2011. Verkkodokumentti. Tilastokeskus.
<http://www.stat.fi/til/khi/2011/02/khi_2011_02_2011-03-14_tau_002_fi.html>. Luettu 5.4.2011.
- 18 Sähkön hinta. 2011. Verkkodokumentti. Energiateollisuus.
<<http://www.energia.fi>>. Luettu 8.4.2011.
- 19 Energiansäästötoimenpiteiden kannattavuuslaskelmat, LVI 02-10018, 1985.
- 20 Pakollinen EuP-direktiivi pienjännitemoottoreille Euroopassa. 2009.
Verkkodokumentti. ABB Oy.
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/2bf949c614986429c125784f0030fd95/\\$file/pm318%20fi%20rev%20a%202009_highres.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/2bf949c614986429c125784f0030fd95/$file/pm318%20fi%20rev%20a%202009_highres.pdf)>. Luettu 10.4.2011

Liite 1: Esimerkkikoneajo

Projektitiedot																
Projekti	Insinööriyö															
Käsitteittäjä	Joni Solakuja															
Lisätiedot	Koneajot Vakiolimavirta Jatkuvasti käyvät															
Konetunnus	Koko	qT m3/s	qP m3/s	LTO-osa			Patterit			Äänet			Moottori		Ominaisähköteho	
				LTO	etaTs %	etaT %	v m/s	qLP l/s	qJP l/s	qLTO l/s	LWP dB(A)	LWI dB(A)	PN kW	IN A	SFPv kW/(m³/s)	SFP kW/(m³/s)
1: 4,0m3/s AC	5F	4.00	4.00	LR	75.3	75.3	1.33	0.86			54	52	4.00	10.2	0.63	
1: 4,0m3/s AC	5F		4.00	LR							55	51	4.00	10.2	0.59	1.22
Yhteensä		4.00	4.00											8.00		

Kokonais sähköteho verkosta, puhtaata suodattimet 4.90 kW

Koneiden yhteinen SFP-luku, puhtaata suodattimet 1.22 kW/(m³/s)

Käytetyt lyhenteet:	Yksikkö
qT	m3/s
qP	m3/s
LL	
LR	
LG	
LR	
etaTs	%
etaT	%
v	m/s
qLP	l/s

Käytetyt lyhenteet:	Yksikkö
qJP	l/s
qLTO	l/s
LWP	dB(A)
LWI	dB(A)
PN	kW
IN	A
SFPv	kW/(m³/s)
SFP	kW/(m³/s)

Kone: 4,0m³/s AC

Projektitiedot

Projekti	Insinööryö
Käsittelijä	Joni Solakuja
Lisätiedot	Koneajot Vakioilmavirta Jatkuvasti käyvät

Kone : 1 4,0m³/s AC

Yhteenvetotiedot

Korkeusasema	0	m
Ilmanpaine	1013	mbar
Ilman tiheys	1.20	kg/m ³

	Tulokone		Poistokone	
Konekoko	Recair 5F		Recair 5F	
Ilmavirta	4.00	m ³ /s	4.00	m ³ /s
Koneen ulkopuolinen staattinen painehäviö	200	Pa	200	Pa
Moottoriteho verkosta	2.68	kW	2.43	kW
Patterin otsapintanopeus	1.3	m/s		
Koneen otsapintanopeus	1.3	m/s	1.3	m/s
SFP, ominaistehontarve	1.22	kW/(m ³ /s)		

SFP-luvun laskennassa on mukana taajuusmuuttajan hyötysuhde 97%

Äänitekniset suoritusarvot standardien ISO 3741, ISO 5136 ja ISO 7235 mukaisesti

Äänen tehotasot oktaavikaistoittain koneen liitännäukoissa

Tulokone										Kok.	
Taajuuskaista	Hz	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k		
Koneen painepuoli		55	69	51	40	35	32	39	39	dB	54 dB(A)
Koneen imupuoli		59	67	45	31	21	14	8	6	dB	52 dB(A)
Vaipan läpi		54	69	59	53	52	47	38	28	dB	58 dB(A)
Poistokone										Kok.	
Taajuuskaista	Hz	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k		
Koneen painepuoli		56	70	52	42	37	35	43	44	dB	55 dB(A)
Koneen imupuoli		59	67	45	31	21	14	8	6	dB	51 dB(A)
Vaipan läpi		54	69	59	53	52	47	38	28	dB	58 dB(A)

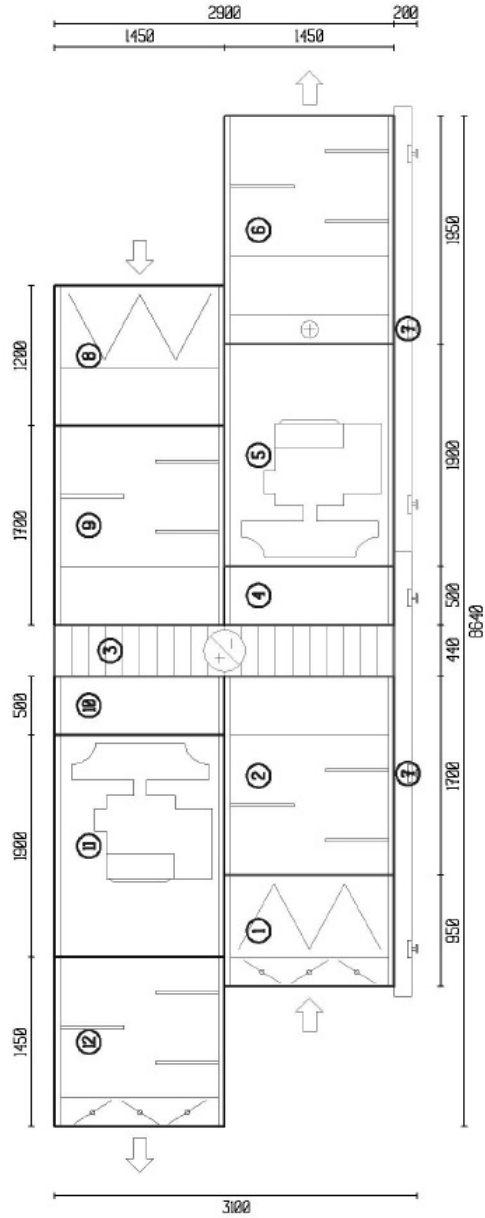
Kone: 4,0m³/s AC
 Lisätiedot
 Konetunnus
 Konekoko
 Tuloilmavirta
 Poistoilmavirta
 Kokonais(kuiva)paino
 Lisätiedot
 Kanavaliitännät ilman liitântälaippaa

Insinööriyö
 4,0m³/s AC
 5F
 4.00 m³/s
 4.00 m³/s
 4764 kg

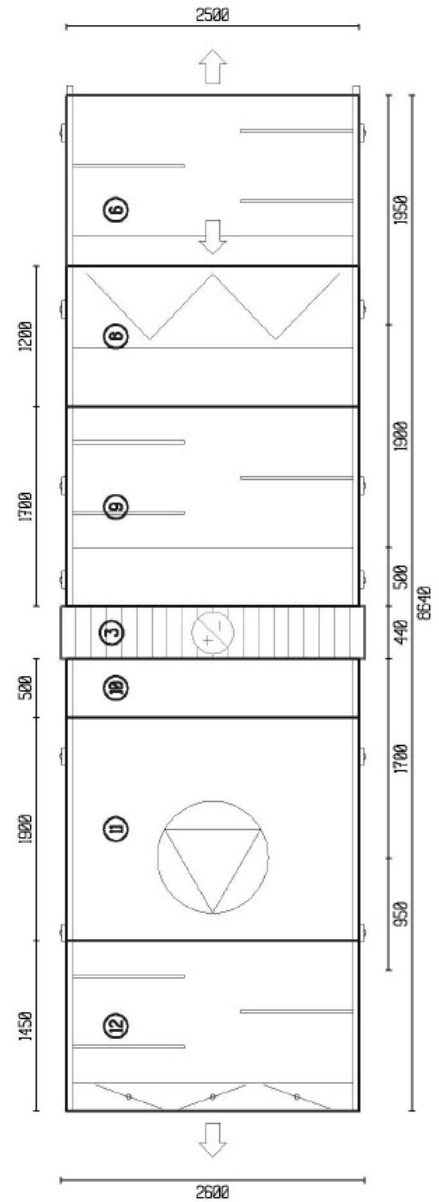
Käsittelijä
 Mittakaava

Joni Solakuja
 Ei mittakaavaa

Kuvanto huoltopuolelta



Kuvanto päältä



Kone: 4,0m³/s AC

Koneen osat ja tekniset tiedot

Tulokone

① KOTELO 5F L=950				
Mitat (leveys x korkeus x pituus)		2500 x 1450 x 950	mm	
Paino, sisältää kotelon ja osat		314	kg	
SULKUOSA 5F L=250				
Tiiviysluokka		TL 4		
Painehäviö		3	Pa	
Vääntömomentin tarve		17	Nm	
SUODATUSOSA 5F L=700				
Suodatusluokka		F7		
Alkupainehäviö		47	Pa	
Mitoituspainehäviö		71	Pa	
Loppupainehäviö		94	Pa	
Suodattimien määrä ja koko		8x[592x592]		
Varasuodatinsarja		1	kpl	
② KOTELO 5F L=1700				
Mitat (leveys x korkeus x pituus)		2500 x 1450 x 1700	mm	
Paino, sisältää kotelon ja osat		564	kg	
ÄÄNENVAIMENNUSOSA SUORA 5F L=1200				
Painehäviö		12	Pa	
HUOLTO-OSA 5F L=500				
Painehäviö		0	Pa	
③ PYÖRIVÄ LÄMMÖNSIIRRINOSA 5F D=1920				
Ei hygroskooppinen roottorimateriaali				
Mitat (leveys x korkeus x pituus)		2600 x 2900 x 440	mm	
Paino		390	kg	
Sähköliitäntä (max)		230V/1-v/50Hz / 400	W	
Ulkopuolinen etusulake		6.3	A	
Ohjausviesti		0-10	V	
		Tulo	Poisto	
Ilmavirta	4.0	m ³ /s	4.0	m ³ /s
Painehäviö	100	Pa	137	Pa
Lämmitysteho	193.3	kW		
Tuloilman lämpötilahyötysuhde	75	%		
Tuloilman kosteushyötysuhde	33	%		
Tuleva ilma: lämpötila / kosteus	-26.0 °C / 50	%	22.0 °C / 30	%
Lähtevä ilma: lämpötila / kosteus	10.1 °C / 23	%	-14.6 °C / 95	%
Ilman vesisältö, tuleva / lähtevä	0.23 / 1.76	g/kg	5.06 / 1.17	g/kg
④ KOTELO 5F L=500				
Mitat (leveys x korkeus x pituus)		2500 x 1450 x 500	mm	
Paino, sisältää kotelon ja osat		87	kg	
HUOLTO-OSA 5F L=500				
Painehäviö		0	Pa	
⑤ KOTELO 5F L=1900				
Mitat (leveys x korkeus x pituus)		2500 x 1450 x 1900	mm	
Paino, sisältää kotelon ja osat		575	kg	
PUHALLINOSA 5F 800 ASENTO1 SUORAKÄYTTÖ				
Suoritusarvojen toleranssi DIN 24166				
Laitevalmistaja			GP	
Siipityyppi/koko			Taaksepäin kaartuva / D800	
Ilmavirta			4.0	m ³ /s
Liitântätapa			Kammioon	

Kone: 4,0m³/s AC

Puhaltimen kokonaispaine	440	Pa
Puhaltimen hyötysuhde	80	%
Sähköinen kokonaishyötysuhde	66	%
Pyörimisnopeus	829	1/min
Maksimi pyörimisnopeus	993	1/min
Puhaltimen akseliteho	2.19	kW
Puhaltimen maksimi teho	14.22	kW
Ilmavirran mittauksen paine-ero / k-arvo	$q = k \sqrt{\Delta p}$	546 Pa / 0.171

PUHALLIN GPEB0800

Virtalaji	400V/3-v/50Hz	
Moottorin akseliteho	2.19	kW
Nimellisteho	4.00	kW
Nimellisvirta	10.20	A
Nimellinen pyörimisnopeus (50 Hz)	730	1/min
Hyötysuhde	84	%
Moottorin verkosta ottama sähköteho toimintapisteessä	2.68	kW
Moottorin taajuus toimintapisteessä	57	Hz
Moottorin sallittu maksimitaajuus	68	Hz
Tarkastusikkuna vakiovarusteena		
Valaisin IP 44		
Kytkin ja johdotus valaisimelle		
Ilmavirtamittari, analoginen		

⑥ KOTELO 5F L=1950

Mitat (leveys x korkeus x pituus)	2500 x 1450 x 1950	mm
Paino, sisältää kotelon ja osat	640	kg

LÄMMITYSOSA VESI 5F TV1

Ilmavirta	4.0	m ³ /s
Lämmitysteho	71.3	kW
Putkirivit / lamelijako	1 / 2.0	mm
Otsapintanopeus / painehäviö	1.3 m/s / 8	Pa
Ilman lämpötila, tuleva / lähtevä	5.1 / 20.0	°C
Lämmönsiirtoneste	Vesi	
Tuleva / lähtevä neste	60 / 40	°C
Nestevirta / nopeus / painehäviö	0.86 l/s / 1.05 m/s / 9.9	kPa
Nestetilavuus	11	l
Putkiyhteet, kierreltiös	DN32	

HUOLTO-OSA 5F L=500

Painehäviö	0	Pa
------------	---	----

ÄÄNENVAIMENNUSOSA SUORA 5F L=1200

Painehäviö	12	Pa
------------	----	----

Poistokone

⑧ KOTELO 5F L=1200

Mitat (leveys x korkeus x pituus)	2500 x 1450 x 1200	mm
Paino, sisältää kotelon ja osat	241	kg

SUODATUSOSA 5F L=700

Suodatusluokka	F5	
Alkupainehäviö	25	Pa
Mitoituspainehäviö	38	Pa
Loppupainehäviö	50	Pa
Suodattimien määrä ja koko	8x[592x592]	
Varasuodatinsarja	1	kpl

HUOLTO-OSA 5F L=500

Painehäviö	0	Pa
------------	---	----

⑨ KOTELO 5F L=1700

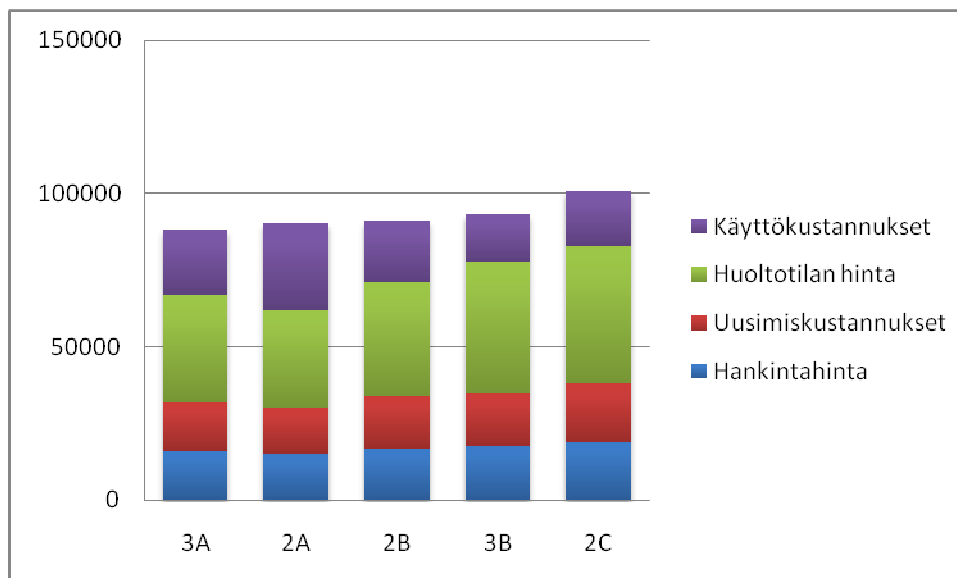
Mitat (leveys x korkeus x pituus)	2500 x 1450 x 1700	mm
Paino, sisältää kotelon ja osat	564	kg

Kone: 4,0m3/s AC

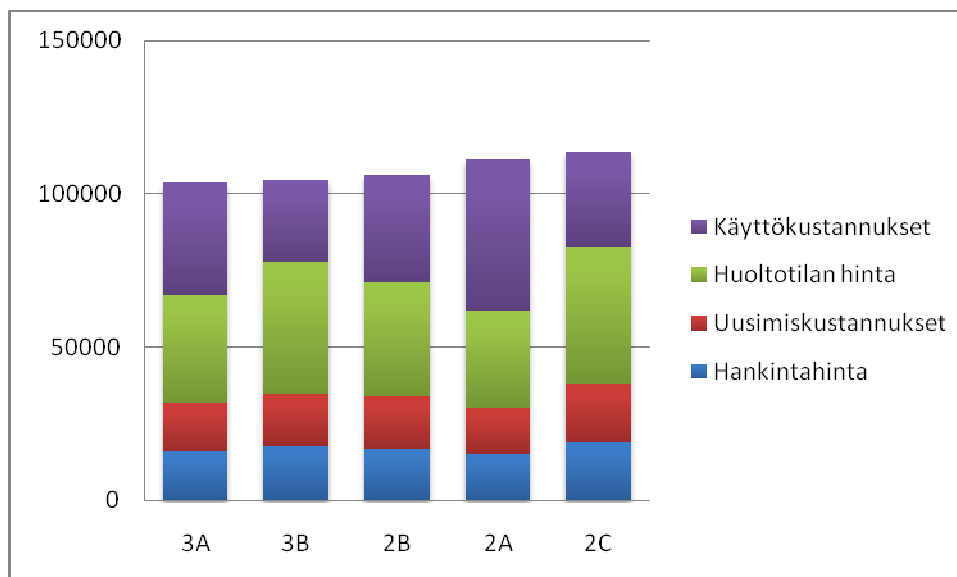
ÄÄNENVAIMENNUSOSA SUORA 5F L=1200			
Painehäviö		12	Pa
HUOLTO-OSA 5F L=500			
Painehäviö		0	Pa
③ PYÖRIVÄ LÄMMÖNSIIRRINOSA 5F D=1920			
Tulokset tulokoneen yhteydessä			
⑩ KOTELO 5F L=500			
Mitat (leveys x korkeus x pituus)	2500 x 1450 x 500		mm
Paino, sisältää kotelon ja osat	87		kg
HUOLTO-OSA 5F L=500			
Painehäviö		0	Pa
⑪ KOTELO 5F L=1900			
Mitat (leveys x korkeus x pituus)	2500 x 1450 x 1900		mm
Paino, sisältää kotelon ja osat	575		kg
PUHALLINOSA 5F 800 ASENTO1 SUORAKÄYTTÖ			
Suoritusarvojen toleranssi DIN 24166			
Laitevalmistaja			GP
Siipityyppi/koko	Taaksepäin kaartuva / D800		
Ilmavirta	4.0		m3/s
Liitântätapa	Kammioon		
Puhaltimen kokonaispaine	398		Pa
Puhaltimen hyötysuhde	80		%
Sähköinen kokonaishyötysuhde	66		%
Pyörimisnopeus	805		1/min
Maksimi pyörimisnopeus	993		1/min
Puhaltimen akseliteho	1.98		kW
Puhaltimen maksimi teho	14.22		kW
Ilmavirran mittauksen paine-ero / k-arvo	$q = k \sqrt{\Delta p}$	546 Pa / 0.171	
PUHALLIN GPEB0800			
Virtalaji	400V/3-v/50Hz		
Moottorin akseliteho	1.98		kW
Nimellisteho	4.00		kW
Nimellisvirta	10.20		A
Nimellinen pyörimisnopeus (50 Hz)	730		1/min
Hyötysuhde	84		%
Moottorin verkosta ottama sähköteho toimintapisteessä	2.43		kW
Moottorin taajuus toimintapisteessä	55		Hz
Moottorin sallittu maksimitaajuus	68		Hz
Tarkastusikkuna vakiovarusteena			
Valaisin IP 44			
Kytkin ja johdotus valaisimelle			
Ilmavirtamittari, analoginen			
⑫ KOTELO 5F L=1450			
Mitat (leveys x korkeus x pituus)	2500 x 1450 x 1450		mm
Paino, sisältää kotelon ja osat	626		kg
ÄÄNENVAIMENNUSOSA SUORA 5F L=1200			
Painehäviö		12	Pa
SULKUOSA 5F L=250			
Tiiviysluokka	TL 4		
Painehäviö	3		Pa
Vääntömomentin tarve	17		Nm
⑦ KONEALUSTA 4F-8F L=3800 B=2500 H=200			
Säätöjalat synteettisin kumitalloin			
Konealustojen lukumäärä		2	kpl
Paino		51	kg

Liite 2: Vakioilmavirtaisten virka-aikoina käyvien koneiden kokonaiskustannukset

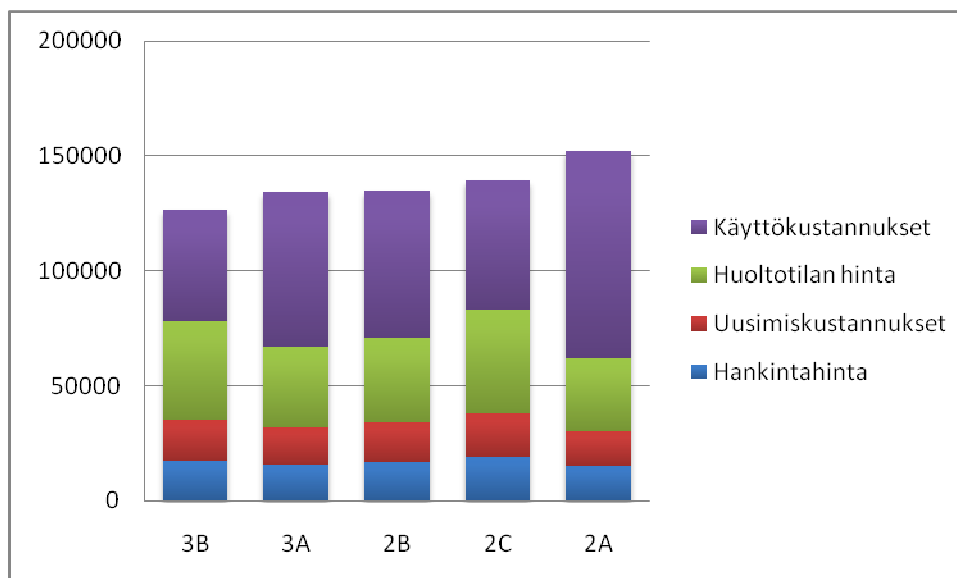
Mitoitusilmavirralla 1 m³/s:



Kuva 1. Mitoitusilmavirta 1 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana

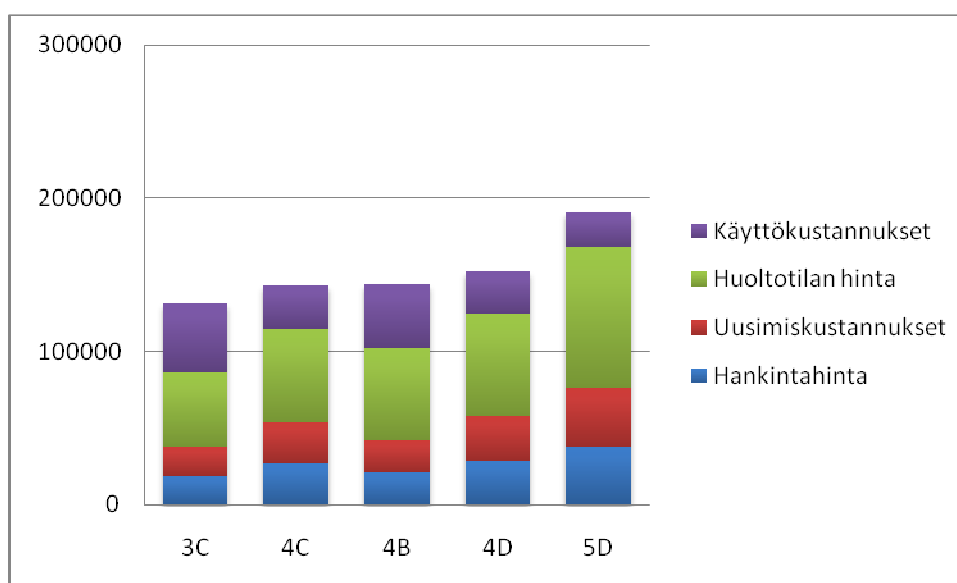


Kuva 2. Mitoitusilmavirta 1 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain

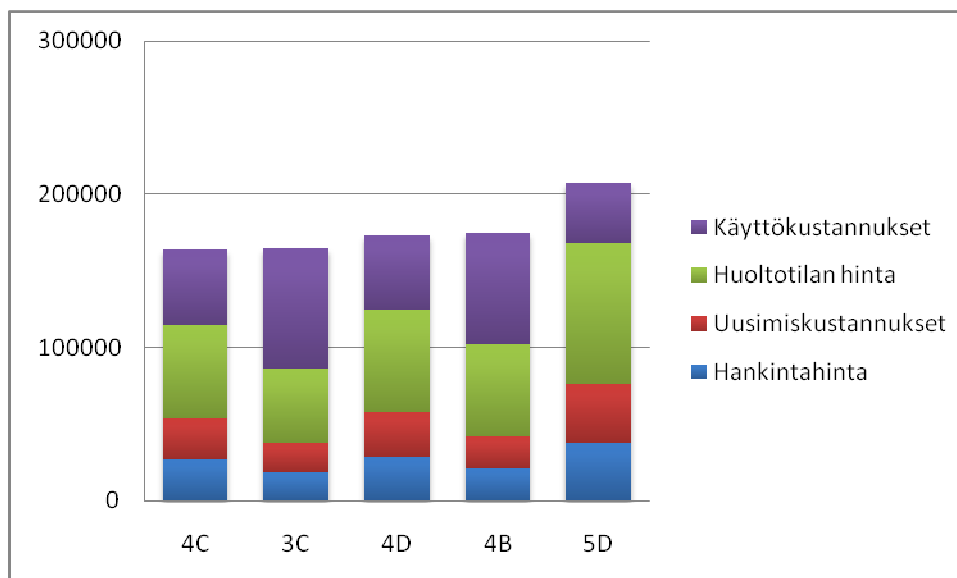


Kuva 3. Mitoitusilmavirta 1 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

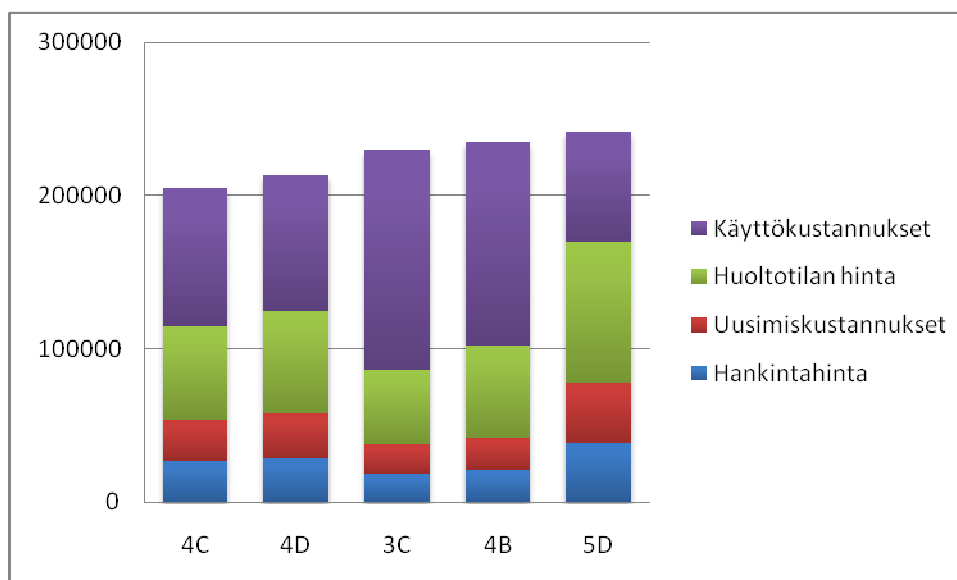
Mitoitusilmavirralla 2 m³/s:



Kuva 4. Mitoitusilmavirta 2 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana

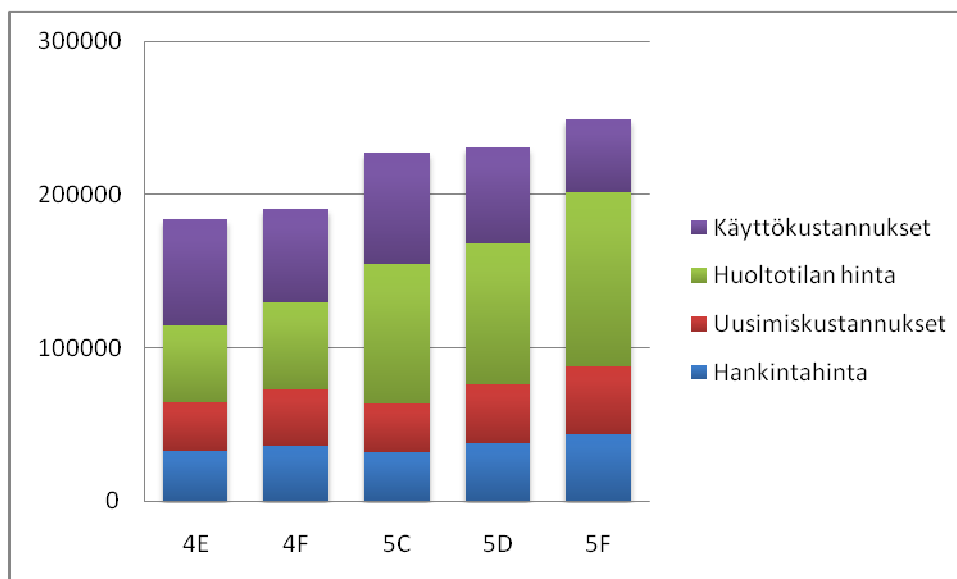


Kuva 5. Mitoitusilmavirta 2 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain

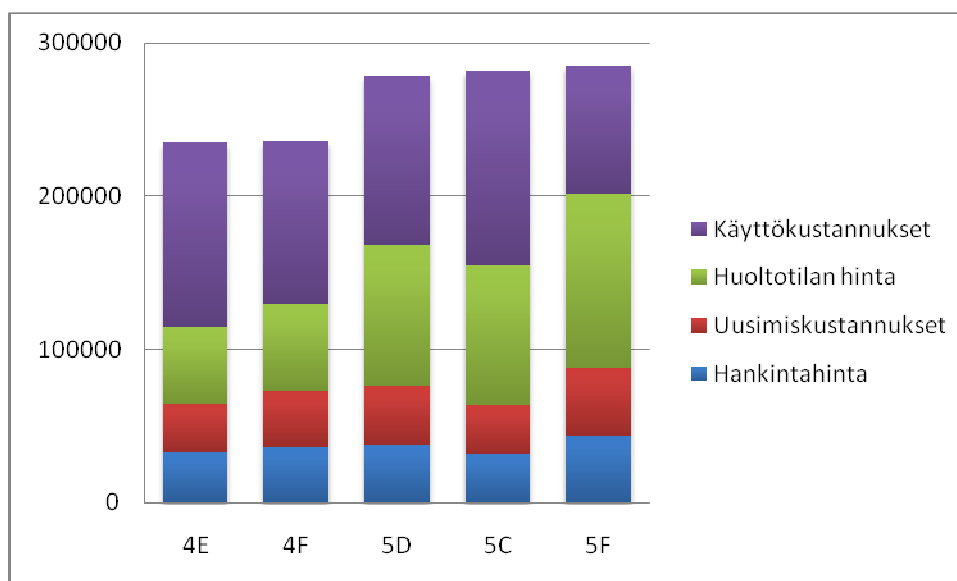


Kuva 6. Mitoitusilmavirta 2 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

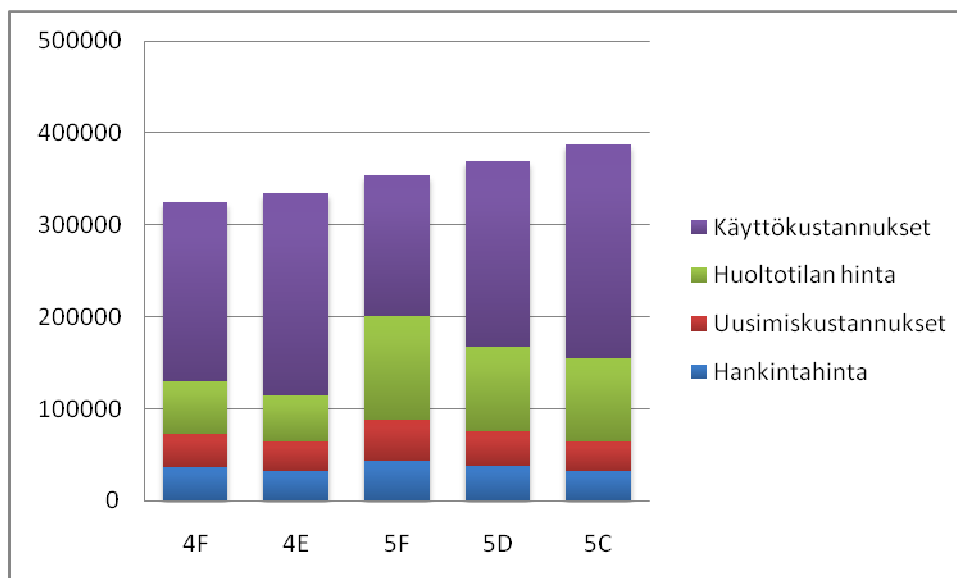
Mitoitusilmavirralla 4 m³/s:



Kuva 7. Mitoitusilmavirta 4 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana

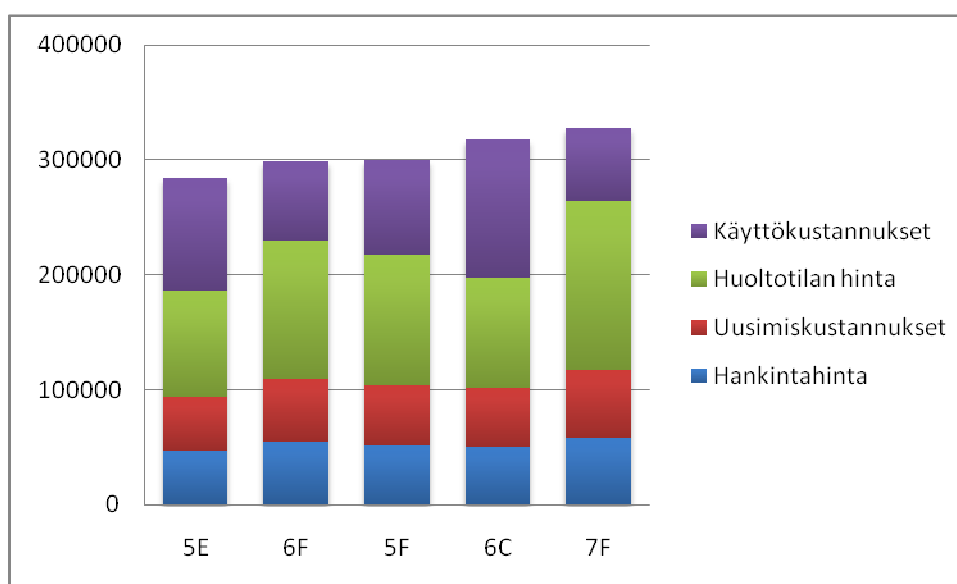


Kuva 8. Mitoitusilmavirta 4 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain

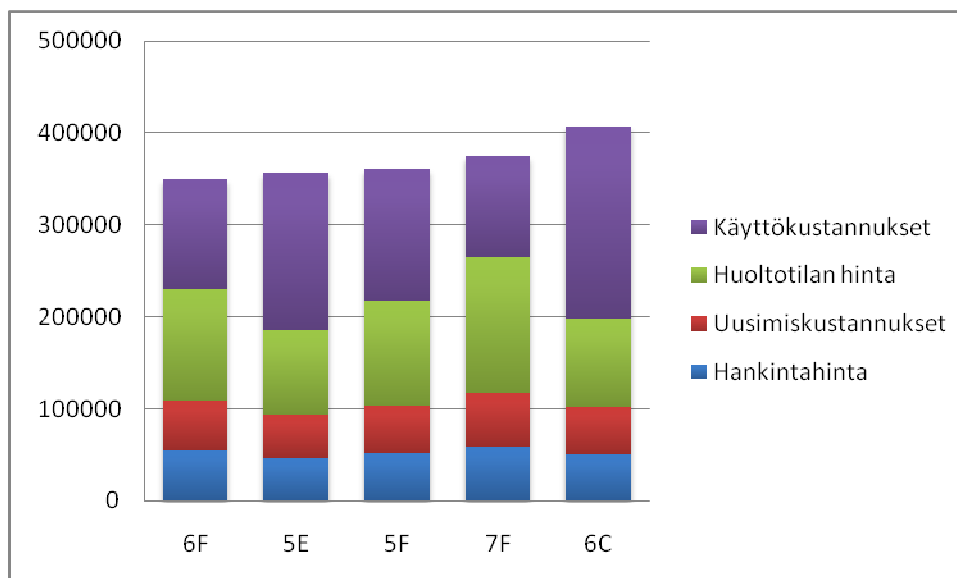


Kuva 9. Mitoitusilmavirta 4 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

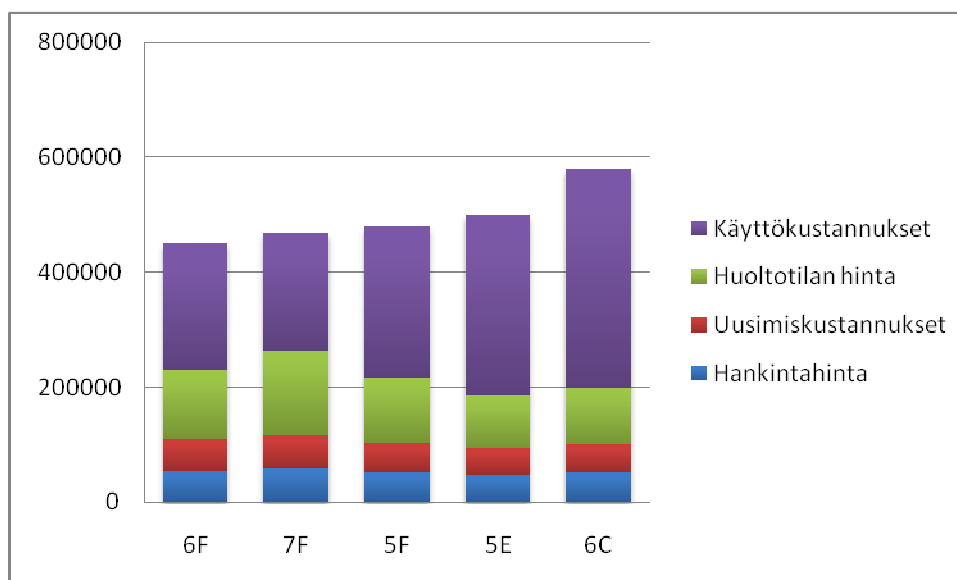
Mitoitusilmavirralla 6 m³/s:



Kuva 10. Mitoitusilmavirta 6 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana

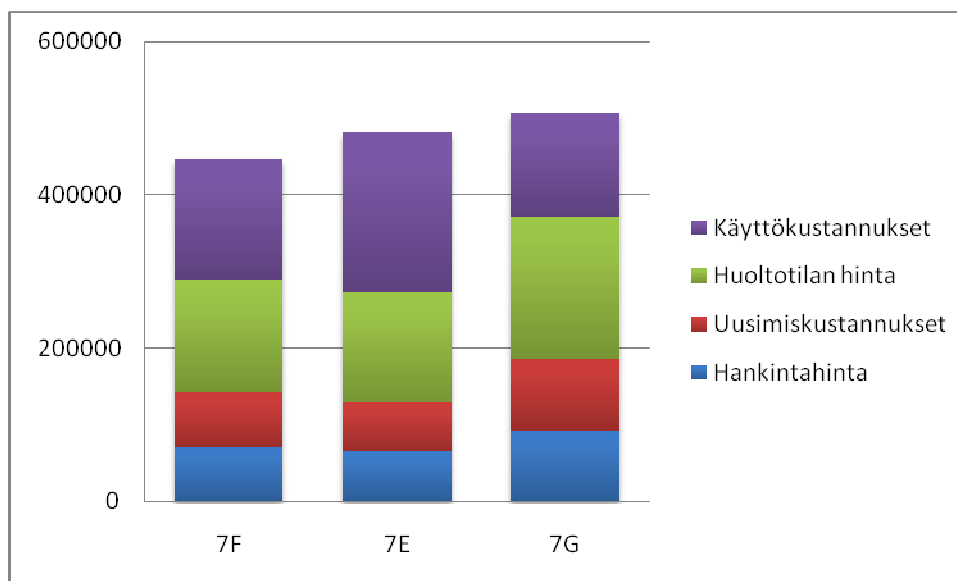


Kuva 11. Mitoitusilmavirta 6 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain

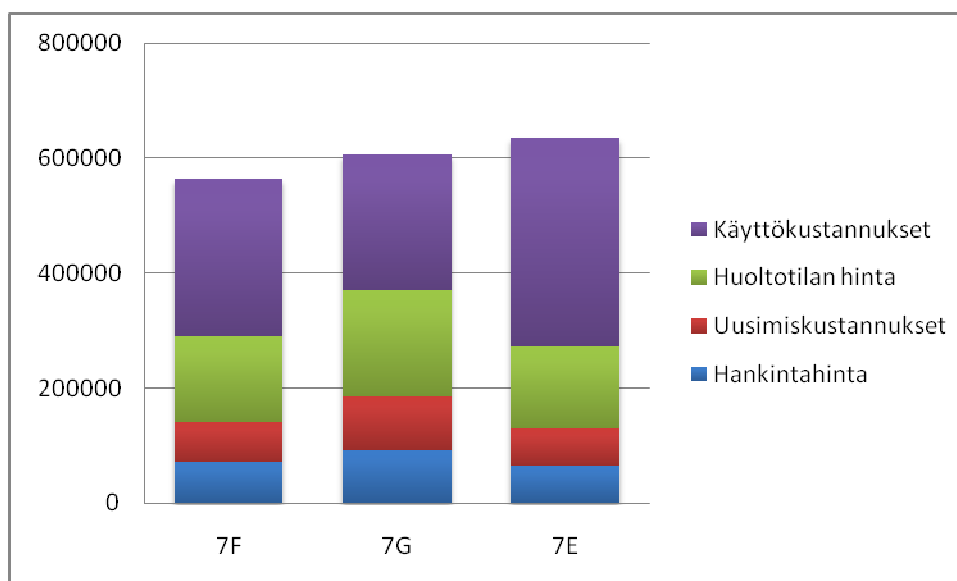


Kuva 12. Mitoitusilmavirta 6 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

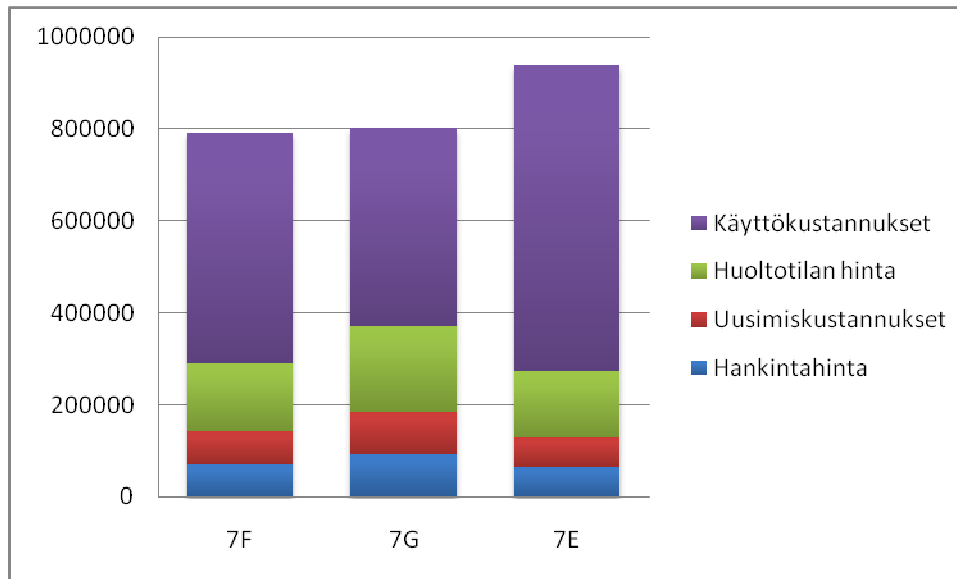
Mitoitusilmavirralla 10 m³/s:



Kuva 13. Mitoitusilmavirta 10 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana



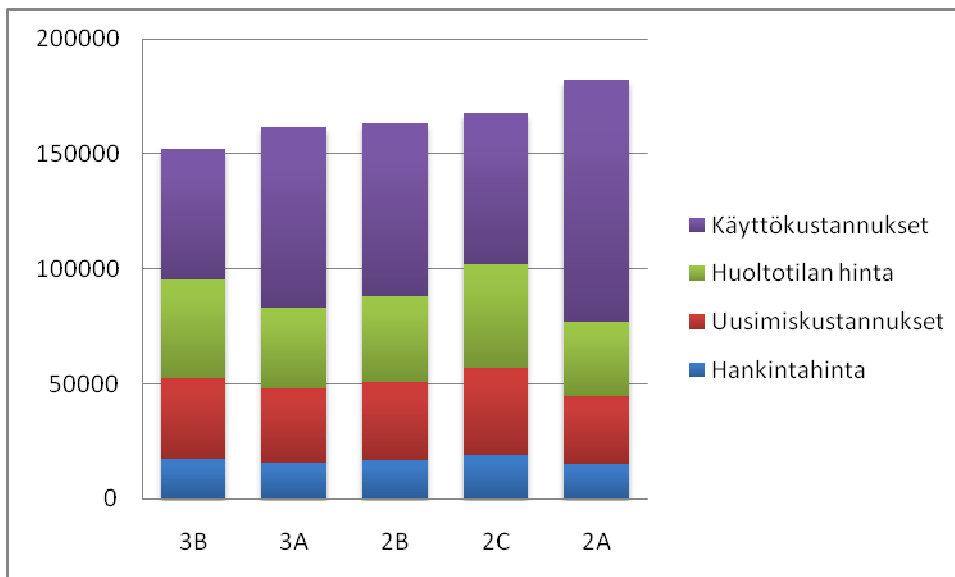
Kuva 14. Mitoitusilmavirta 10 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain



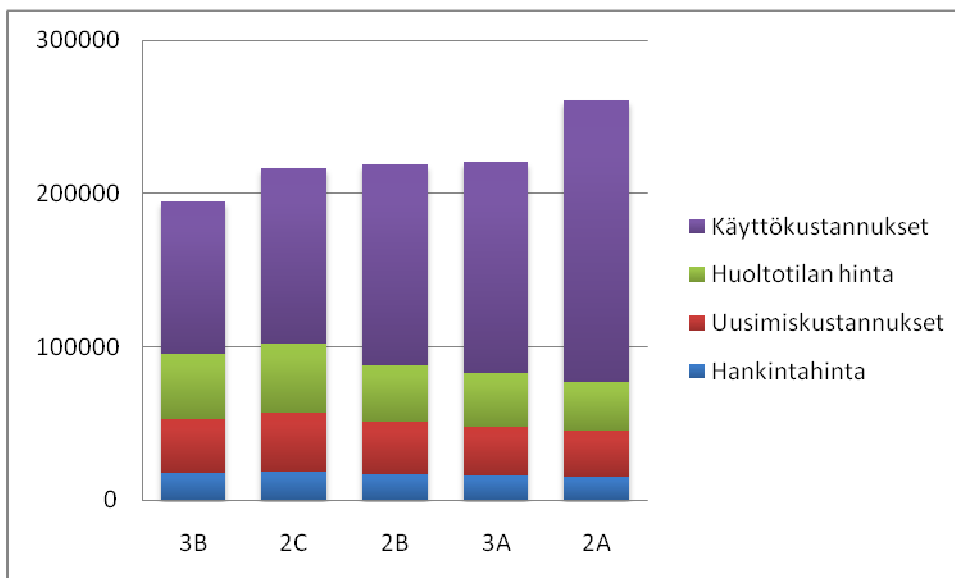
Kuva 15. Mitoitusilmavirta 10 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

Liite 3: Vakioilmavirtaisten jatkuvasti käyvien koneiden kokonaiskustannukset

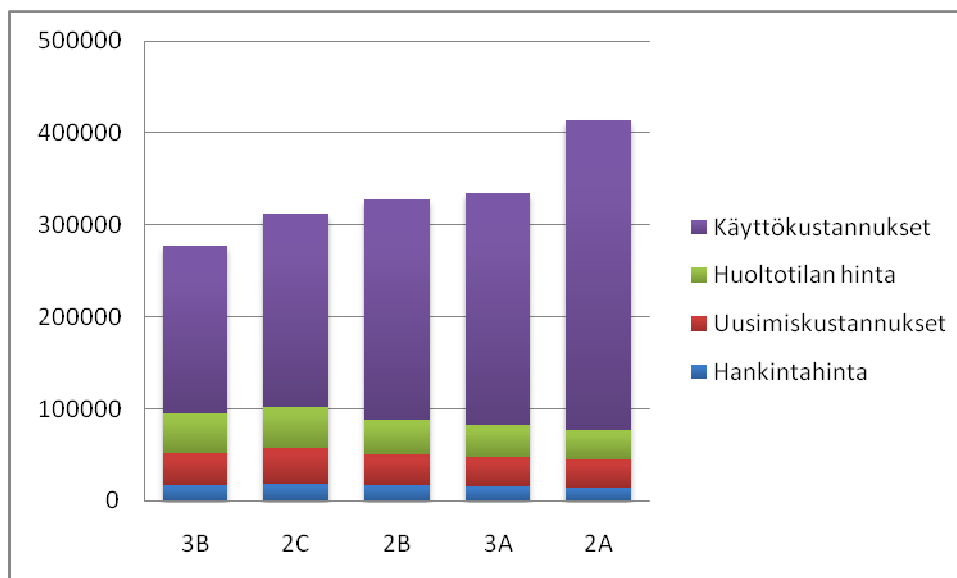
Mitoitusilmavirralla 1 m³/s:



Kuva 1. Mitoitusilmavirta 1 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana

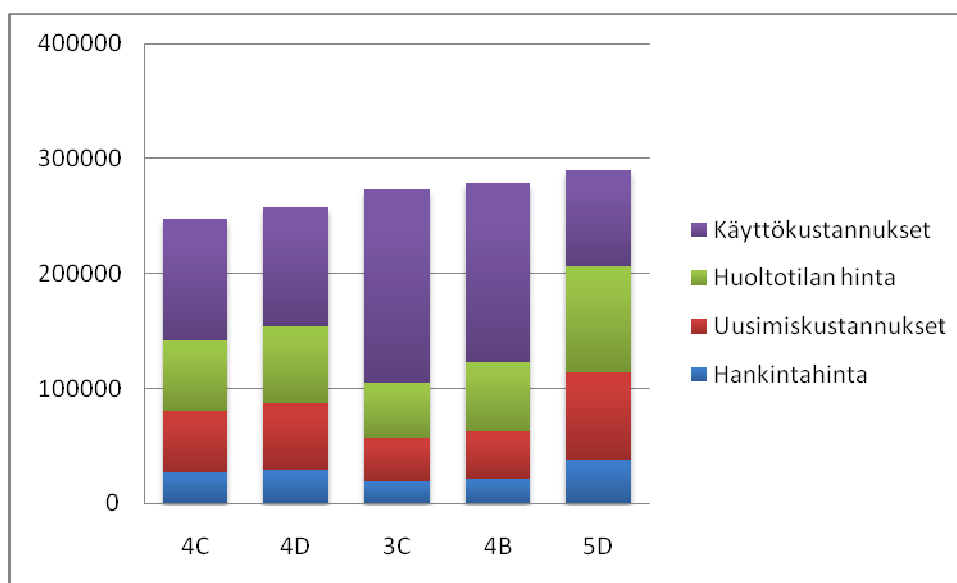


Kuva 2. Mitoitusilmavirta 1 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain

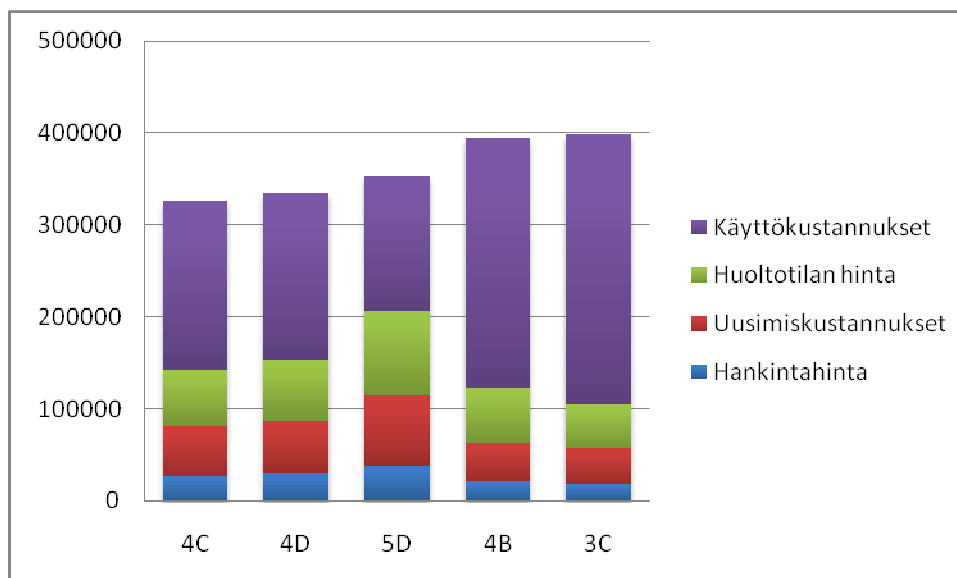


Kuva 3. Mitoitusilmavirta 1 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

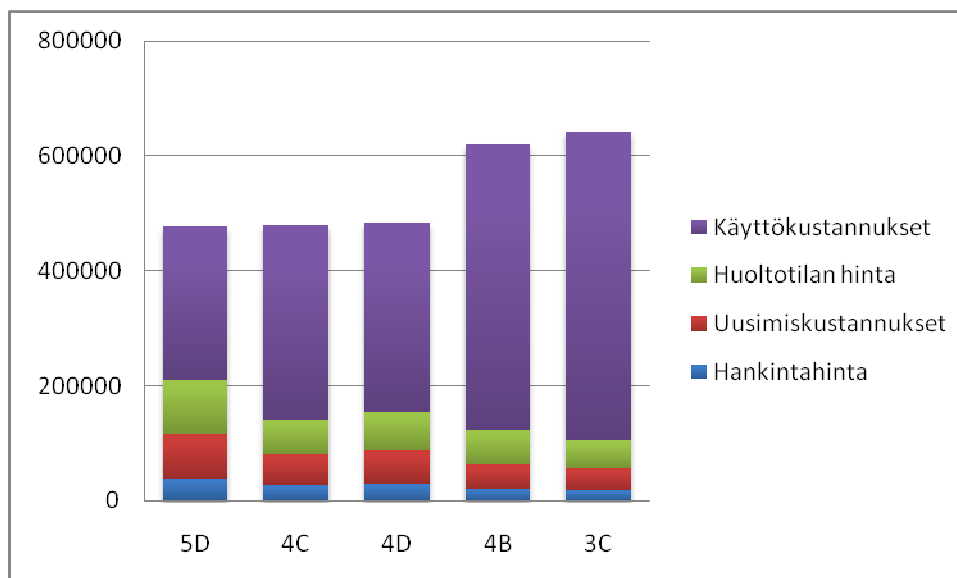
Mitoitusilmavirralla 2 m³/s:



Kuva 4. Mitoitusilmavirta 2 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana

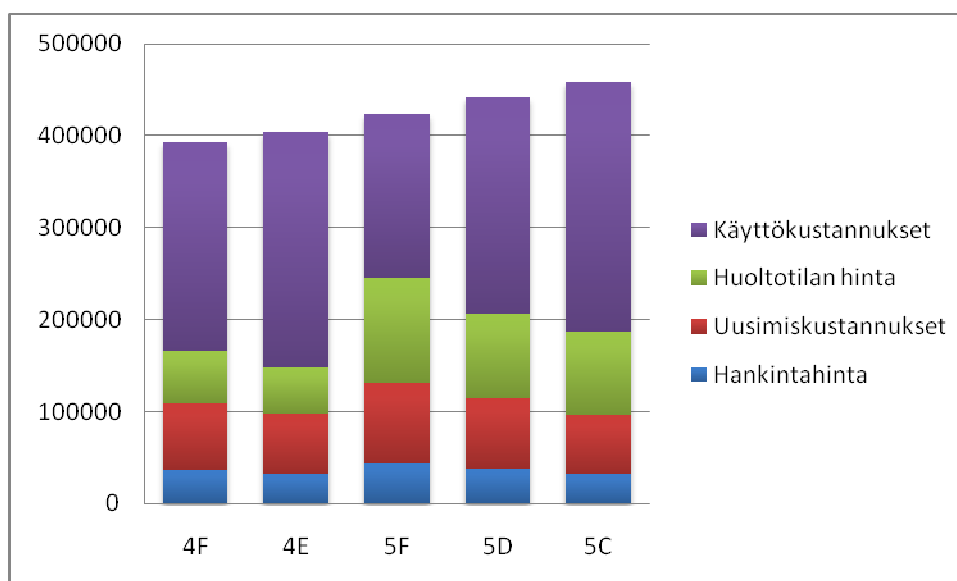


Kuva 5. Mitoitusilmavirta 2 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain

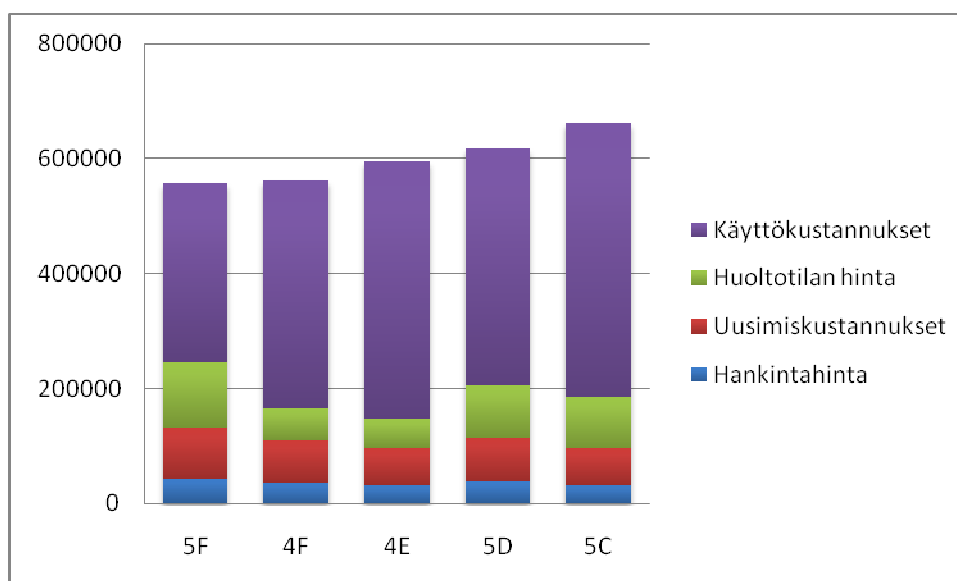


Kuva 6. Mitoitusilmavirta 2 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

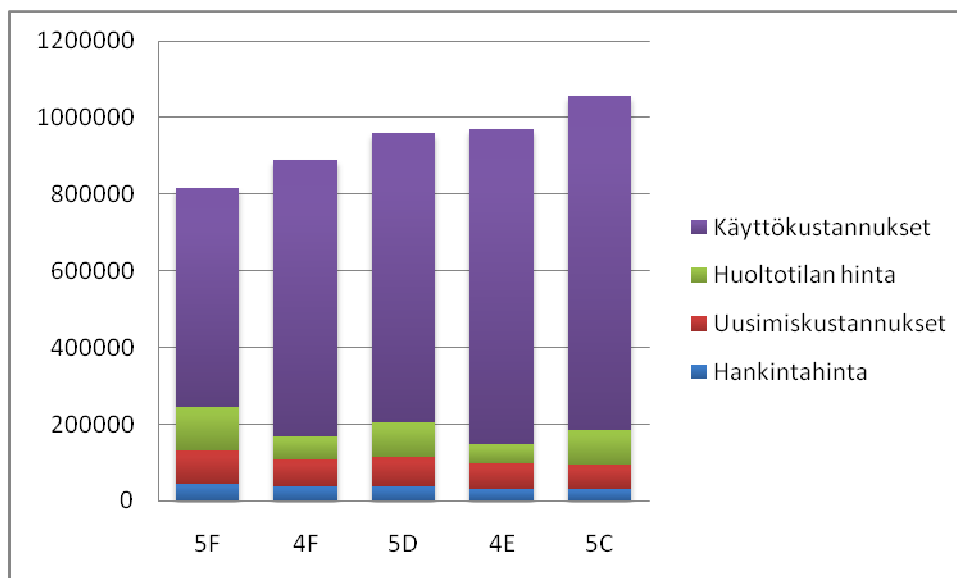
Mitoitusilmavirralla 4 m³/s:



Kuva 7. Mitoitusilmavirta 4 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana

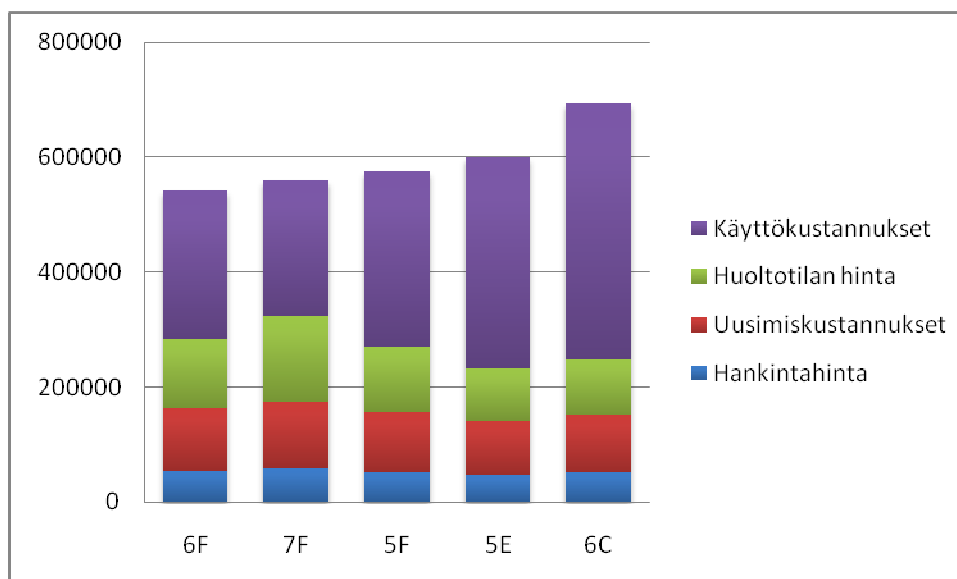


Kuva 8. Mitoitusilmavirta 4 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain

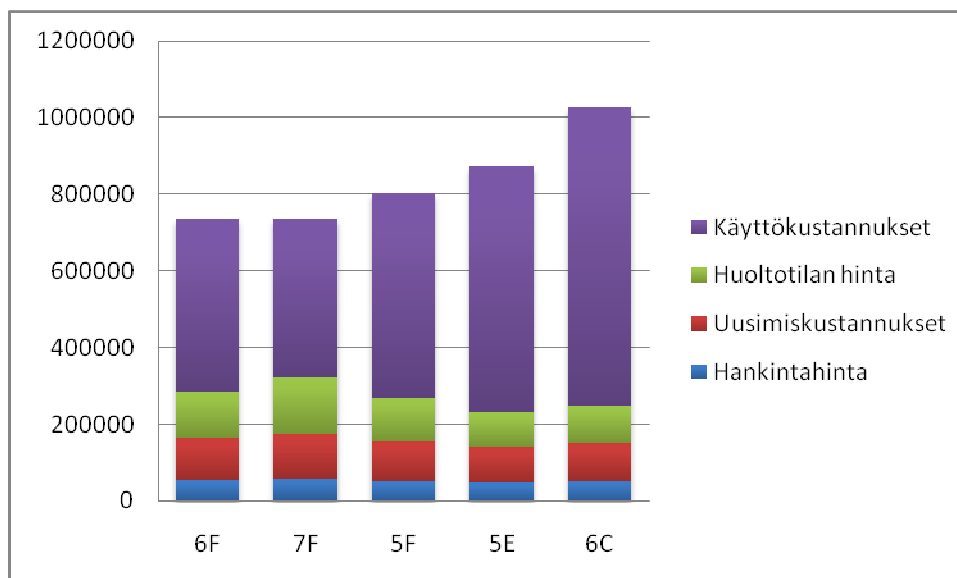


Kuva 9. Mitoitusilmavirta 4 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

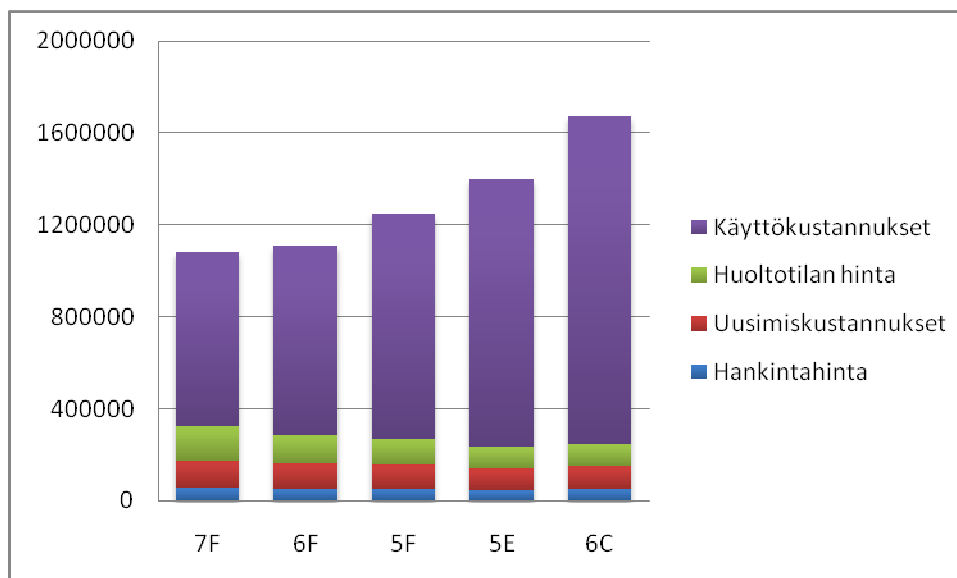
Mitoitusilmavirralla 6 m³/s:



Kuva 10. Mitoitusilmavirta 6 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana

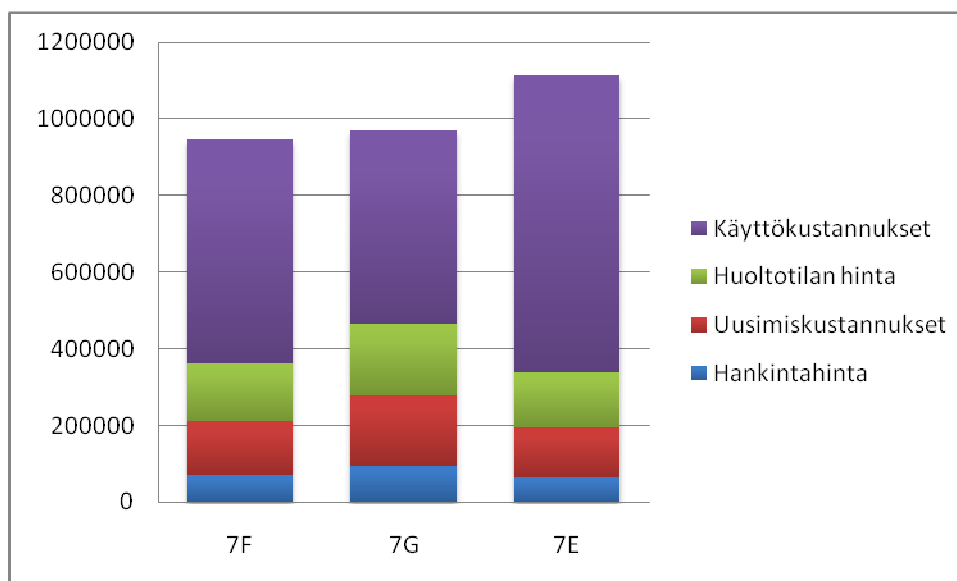


Kuva 11. Mitoitusilmavirta 6 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain

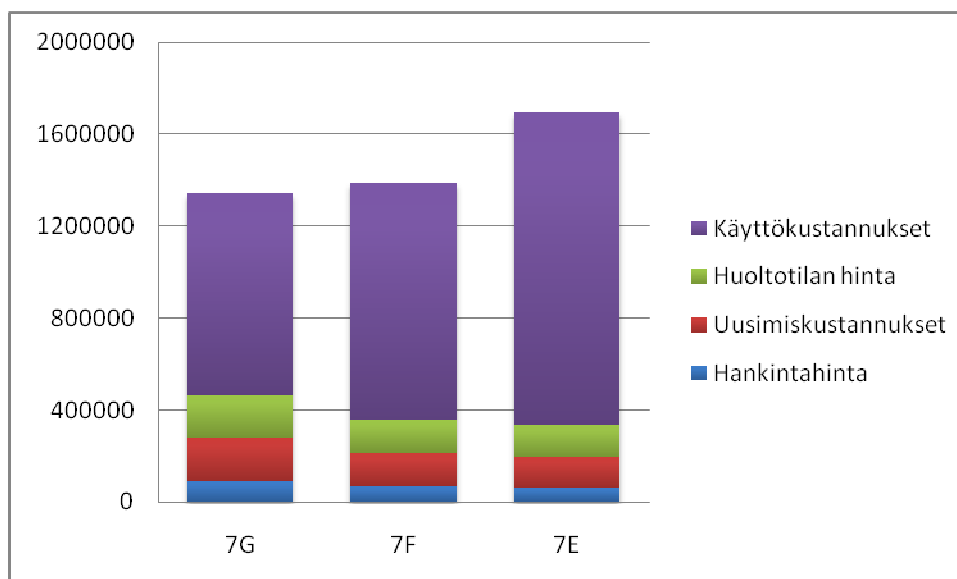


Kuva 12. Mitoitusilmavirta 6 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

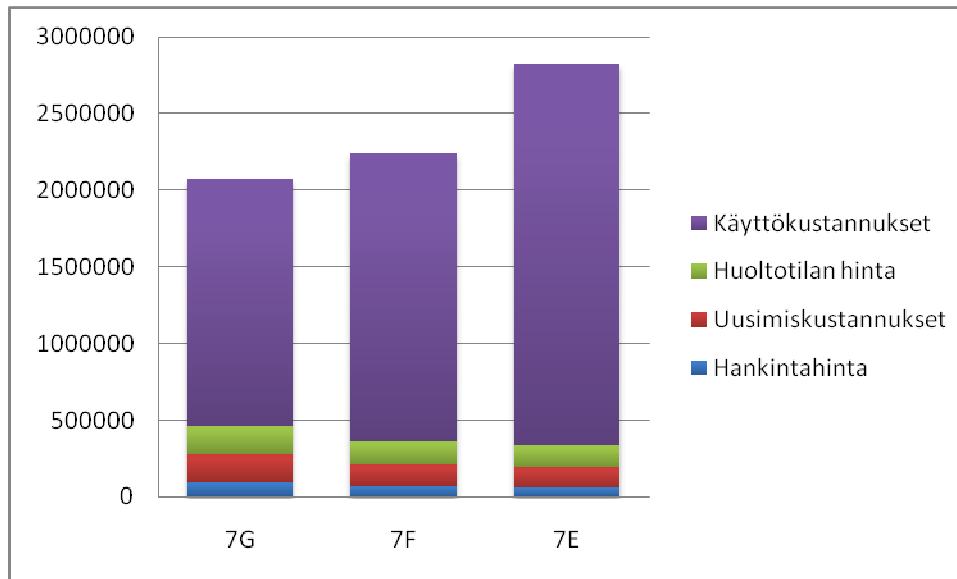
Mitoitusilmavirralla 10 m³/s:



Kuva 13. Mitoitusilmavirta 10 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana



Kuva 14. Mitoitusilmavirta 10 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain



Kuva 15. Mitoitusilmavirta 10 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

Liite 4: Vakioilmavirtaisten koneiden vertailuryhmien koontitaulukot

Vakioilmavirta ilmamäärä 1 m ³ /s			Kojeisto	3B	2C	2B	3A	2A
			SFP	1,6	1,9	2,1	2,3	3,0
Käyntiaika	Energian hinta							
9/5	+ 0 %		106	114	103	100	102	
9/5	+ 2 %		101	110	102	100	107	
9/5	+ 4 %		100	110	107	106	120	
24/7	+ 0 %		100	110	107	106	120	
24/7	+ 2 %		100	111	113	113	134	
24/7	+ 4 %		100	113	118	121	149	

Vakioilmavirta ilmamäärä 2 m ³ /s			Kojeisto	5D	4D	4C	4B	3C
			SFP	1,2	1,5	1,5	2,2	2,4
Käyntiaika	Energian hinta							
9/5	+ 0 %		145	116	109	109	100	
9/5	+ 2 %		126	105	100	106	100	
9/5	+ 4 %		117	104	100	115	112	
24/7	+ 0 %		117	104	100	113	110	
24/7	+ 2 %		108	102	100	121	122	
24/7	+ 4 %		100	102	101	131	135	

Vakioilmavirta ilmamäärä 4 m ³ /s			Kojeisto	5F	4F	5D	4E	5C
			SFP	1,3	1,6	1,7	1,8	2,0
Käyntiaika	Energian hinta							
9/5	+ 0 %		136	104	126	100	124	
9/5	+ 2 %		121	100	118	100	120	
9/5	+ 4 %		109	100	114	103	120	
24/7	+ 0 %		108	100	112	103	117	
24/7	+ 2 %		100	101	111	107	119	
24/7	+ 4 %		100	109	117	119	130	

Vakioilmavirta ilmamäärä 6 m ³ /s			Kojeisto	7F	6F	5F	5E	6C
			SFP	1,1	1,2	1,5	1,7	2,1
Käyntiaika	Energian hinta							
9/5	+ 0 %		116	105	105	100	112	
9/5	+ 2 %		107	100	103	102	116	
9/5	+ 4 %		104	100	106	111	129	
24/7	+ 0 %		103	100	106	110	128	
24/7	+ 2 %		100	100	109	119	140	
24/7	+ 4 %		100	103	116	130	155	

Vakioilmavirta ilmamäärä 10 m ³ /s		Kojeisto	7G	7F	7E
		SFP	1,4	1,7	2,2
Käyntiaika	Energian hinta				
9/5	+ 0 %	113	100	108	
9/5	+ 2 %	108	100	113	
9/5	+ 4 %	101	100	118	
24/7	+ 0 %	102	100	118	
24/7	+ 2 %	100	103	126	
24/7	+ 4 %	100	108	136	

Liite 5: Vakioilmavirtaisten koneiden energiatehokkuus ja elinkaarilaskelmien esimerkkitaulukko

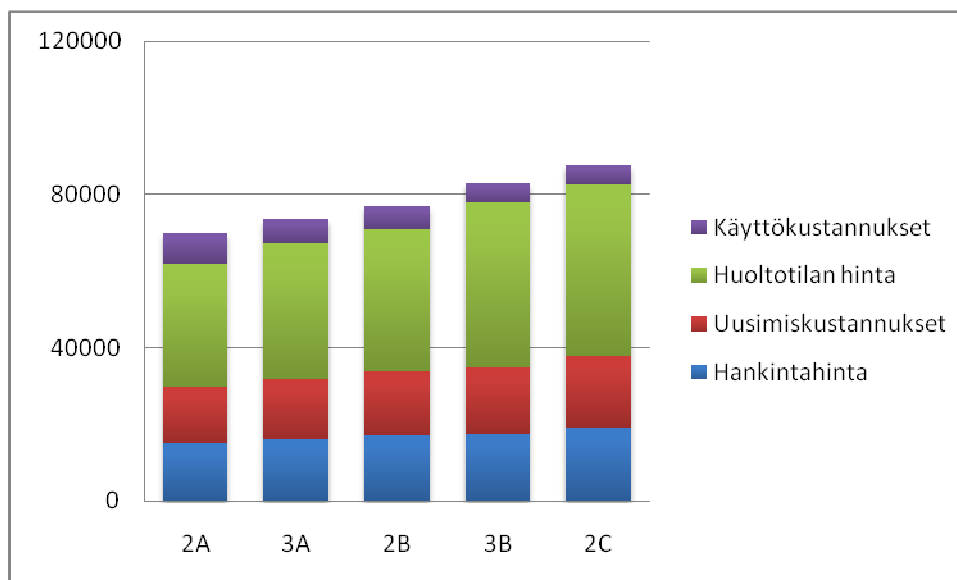
Alla olevan taulukon arvot on laskettu tässä työssä esiteltyjen kaavojen ja lähtötietojen pohjalta. Taulukosta on tarkoituksenmukaisesti poistettu hankintahinnat ja muut arvot, joista hankintahinnat ovat suoraan pääteltävissä. Taulukossa on jaoteltu käyttökustannukset kahteen ryhmään käyntiajan mukaan. Ryhmä 1 tarkoittaa virka-aikoina käyvää konetta ja ryhmä 2 jatkuvasti käyvää. Lisäksi käyttö- ja kokonaiskustannukset on jaoteltu vielä kolmeen erilliseen alaryhmään sähkön hinnan muutoksen mukaan.

Kojeisto	4E	4F	5C	5D	5F
TK qv (m3/s)	4	4	4	4	4
TK pk (Pa)	200	200	200	200	200
TK pkok (Pa)	673	565	727	597	440
TK n (%)	68	66	68	64	66
TK Pe (kW)	3,97	3,44	4,28	3,75	2,68
TK Pnim (kW)	5,5	4	5,5	4	4
TK SFP (kW/m3/s)	1,0	0,9	1,1	0,9	0,7
TK toimintapiste (%)	72	86	78	94	67
PK qv (m3/s)	4	4	4	4	4
PK pk (Pa)	200	200	200	200	200
PK pkok (Pa)	556	492	580	492	398
PK n (%)	60	65	66	66	66
PK Pe (kW)	3,39	3,05	3,52	2,99	2,43
PK Pnim (kW)	4	4	4	4	4
PK SFP (kW/m3/s)	0,8	0,8	0,9	0,7	0,6
PK toimintapiste (%)	85	76	88	75	61
Koneen SFP	1,8	1,6	2,0	1,7	1,3
Koneen toim.piste (%)	77	81	82	84	64
Käyttöaika 1 (h/d)	9	9	9	9	9
Käyttöaika 2 (h/d)	24	24	24	24	24
Käyttöpäivät 1 (d/vk)	5	5	5	5	5
Käyttöpäivät 2 (d/vk)	7	7	7	7	7
	52	52	52	52	52
Käyttökust. 1 (€/a)	1377,79	1214,93	1460,16	1261,73	956,59
Käyttökust. 2 (€/a)	5143,76	4535,73	5451,26	4710,45	3571,28
Hankintahinta (€)	-	-	-	-	-

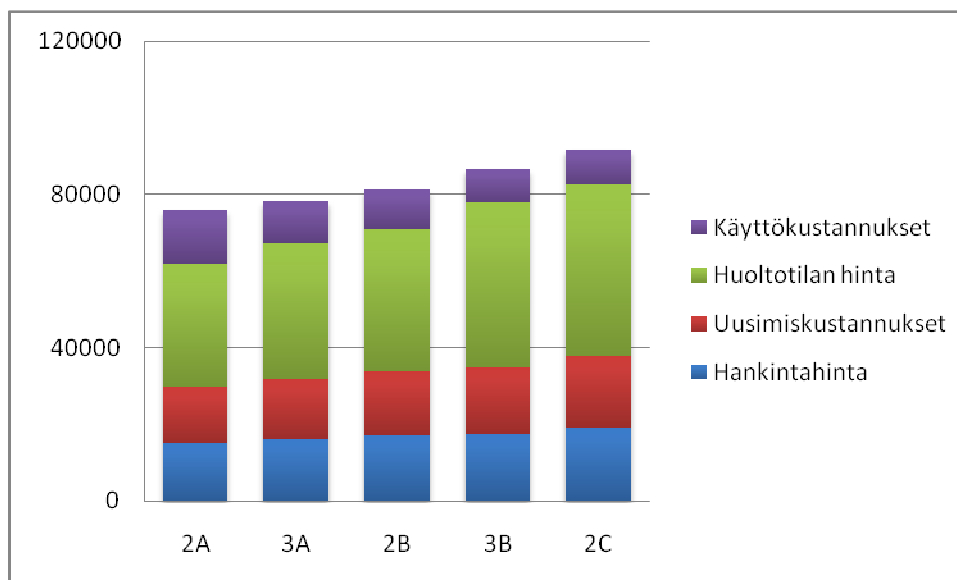
Huoltotilan hinta (€)	50000	57000	90500	92000	113500
Käyttökust. 1 säh +0%/a	68900	60700	73000	63100	47800
Käyttökust. 1 säh. +2%/a	120300	106000	127400	110100	83500
Käyttökust. 1 säh. +4%/a	220200	194100	233300	201600	152900
Käyttökust. 2 säh +0%/a	257200	226800	272600	235500	178600
Käyttökust. 2 säh. +2%/a	448900	395900	475700	411000	311600
Käyttökust. 2 säh. +4%/a	821900	724700	870900	752500	570600
Uusimiskust. 1 (1 uusiminen)	= hankintahinta				
Uusimiskust. 2 (2 uusimista)	= 2 x hankintahinta				
Investointikust. 1	115000	130000	154500	168000	201500
Investointikust. 2	147500	166500	186500	206000	245500
Kokonaiskust. 1 (+0%/a)	183900	190700	227500	231100	249300
Kokonaiskust. 1 (+2%/a)	235300	236000	281900	278100	285000
Kokonaiskust. 1 (+4%/a)	335200	324100	387800	369600	354400
Kokonaiskust. 2 (+0%/a)	404700	393300	459100	441500	424100
Kokonaiskust. 2 (+2%/a)	596400	562400	662200	617000	557100
Kokonaiskust. 2 (+4%/a)	969400	891200	1057400	958500	816100

Liite 6: Muuttuvilmavirtaisten koneiden kokonaiskustannukset

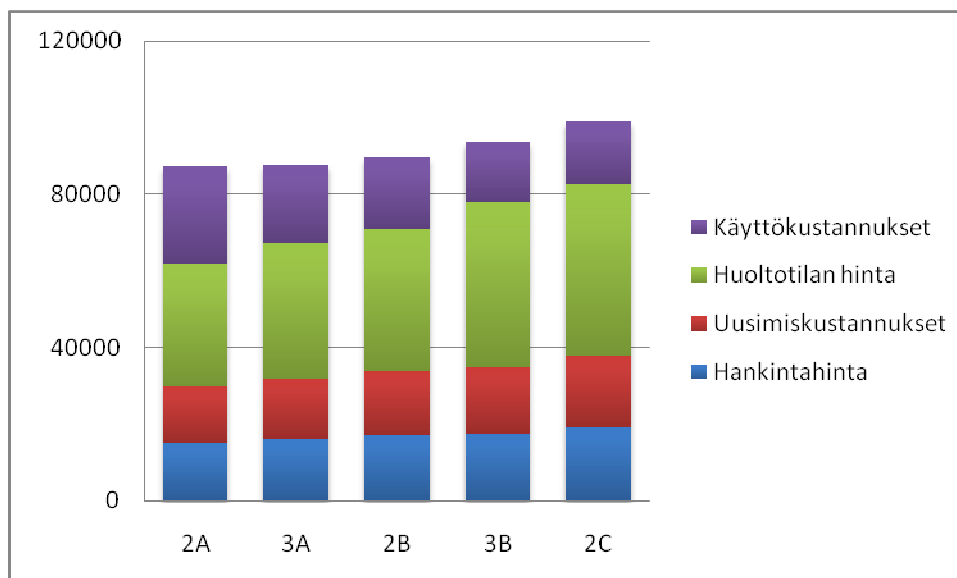
Mitoitusilmavirralla 1 m³/s:



Kuva 1. Mitoitusilmavirta 1 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana

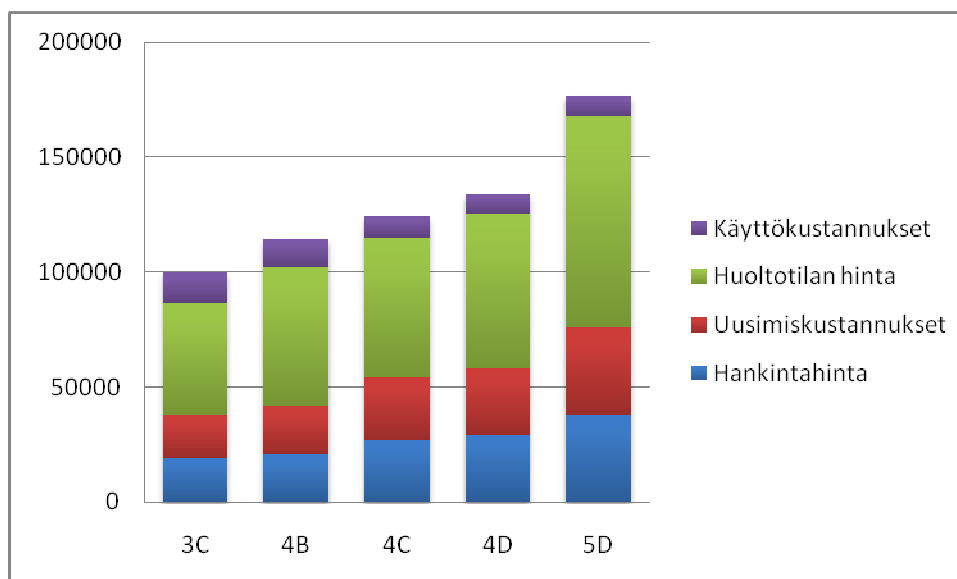


Kuva 2. Mitoitusilmavirta 1 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain

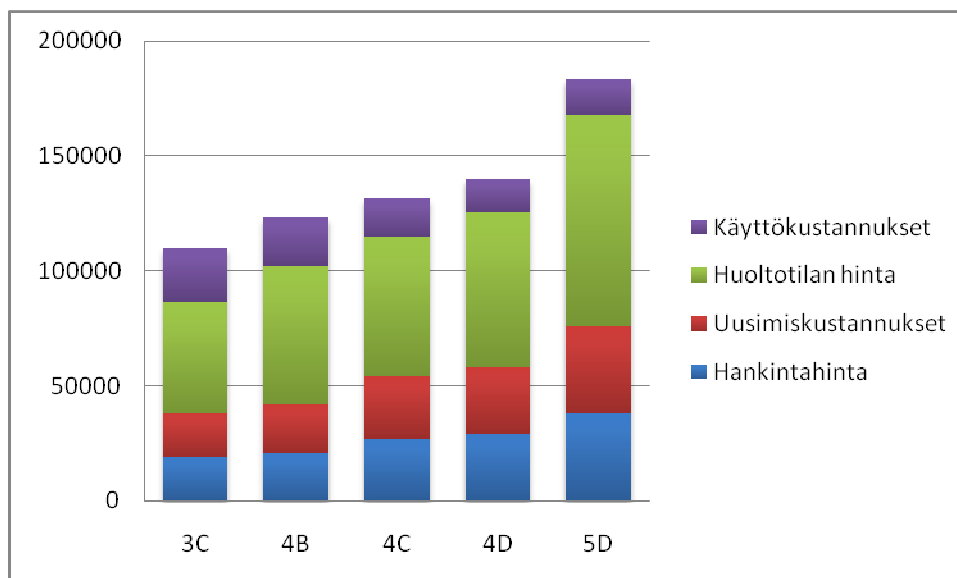


Kuva 3. Mitoitusilmavirta 1 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

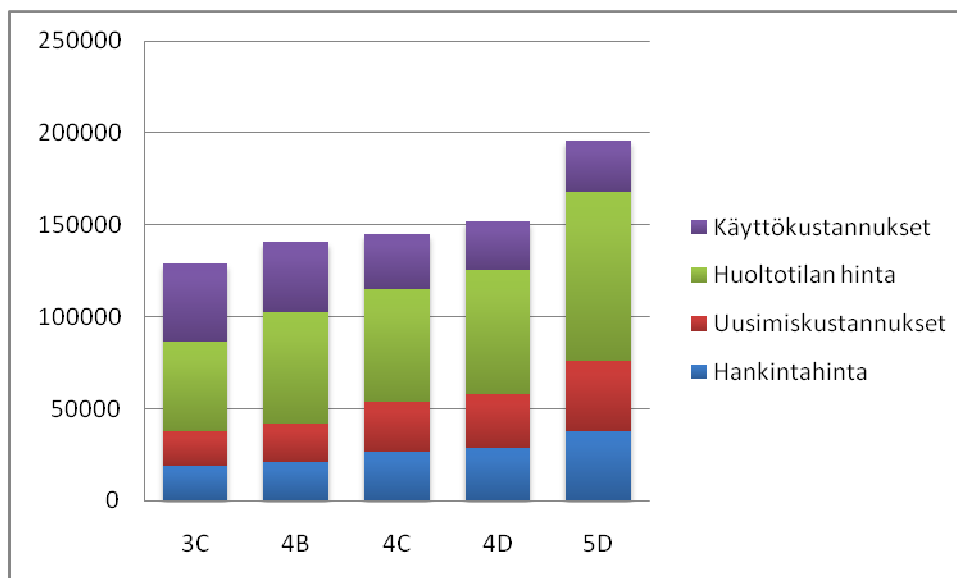
Mitoitusilmavirralla 2 m³/s:



Kuva 4. Mitoitusilmavirta 2 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana

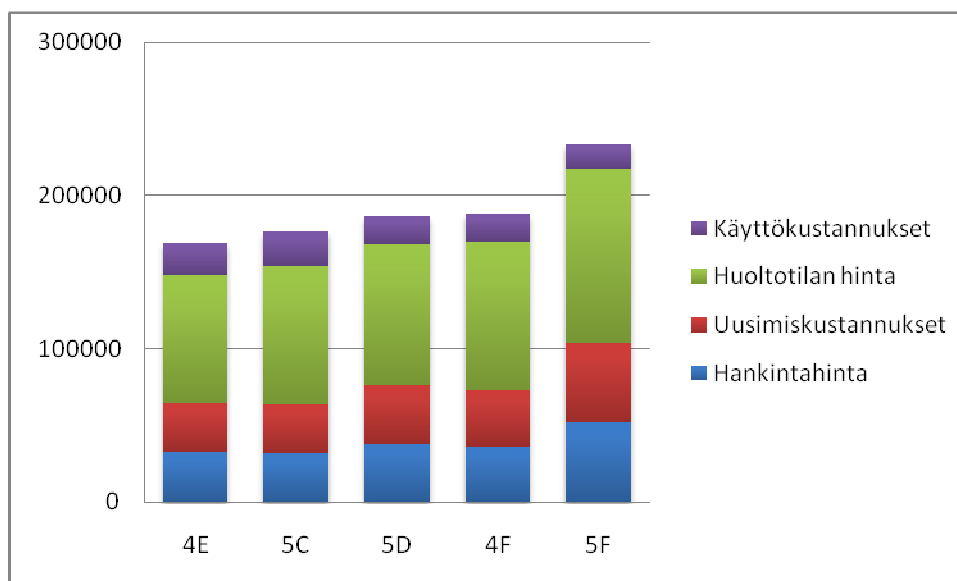


Kuva 5. Mitoitusilmavirta 2 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain

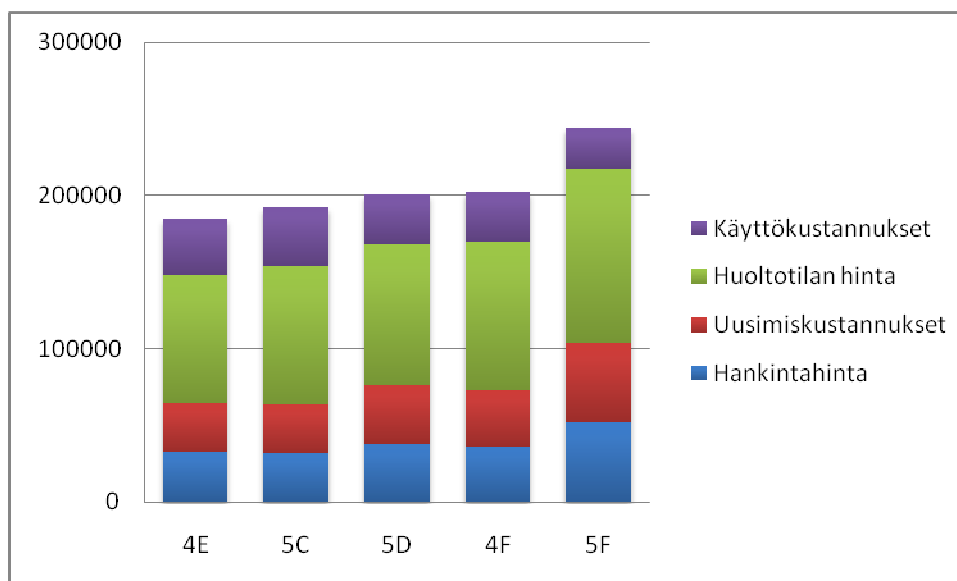


Kuva 6. Mitoitusilmavirta 2 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

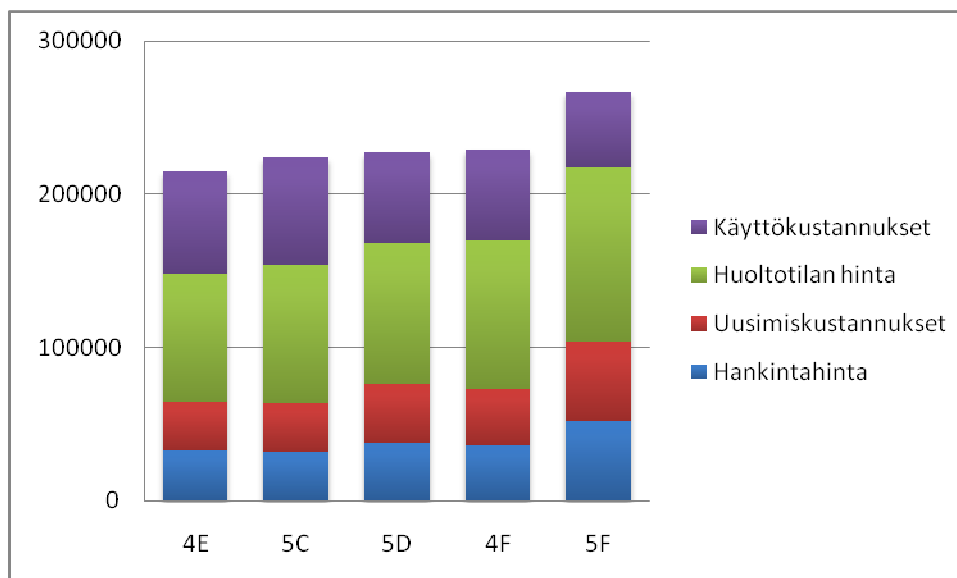
Mitoitusilmavirralla 4 m³/s:



Kuva 7. Mitoitusilmavirta 4 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana

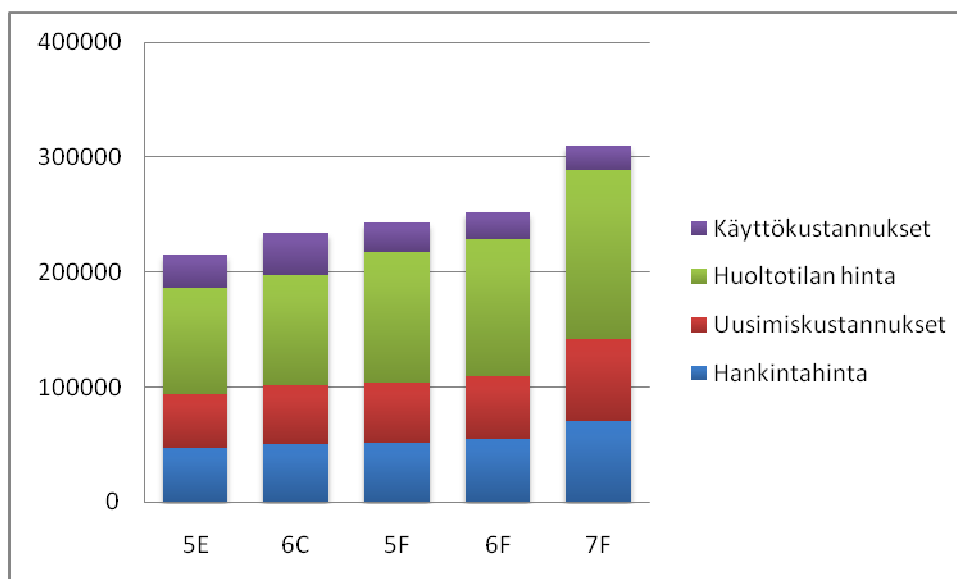


Kuva 8. Mitoitusilmavirta 4 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain

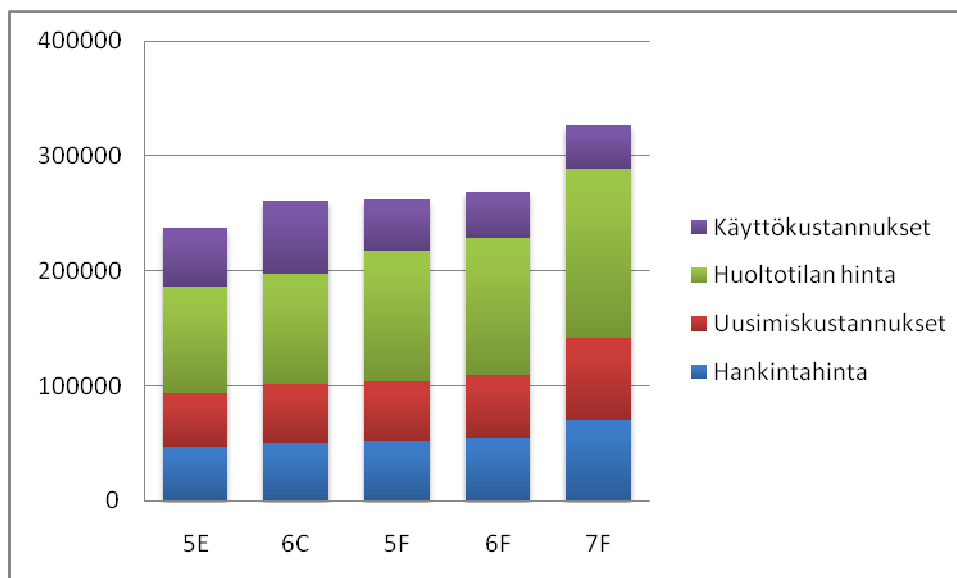


Kuva 9. Mitoitusilmavirta 4 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

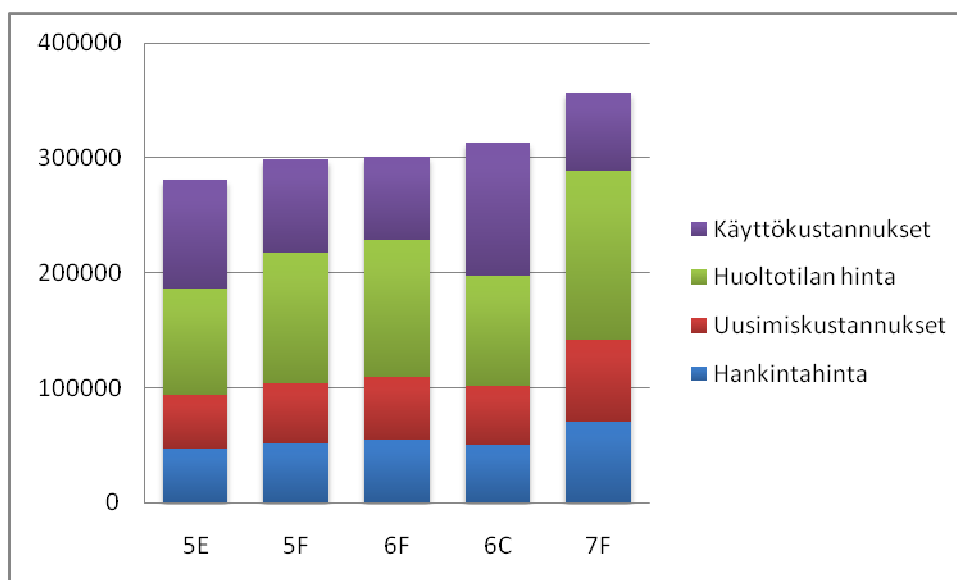
Mitoitusilmavirralla 6 m³/s:



Kuva 10. Mitoitusilmavirta 6 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana

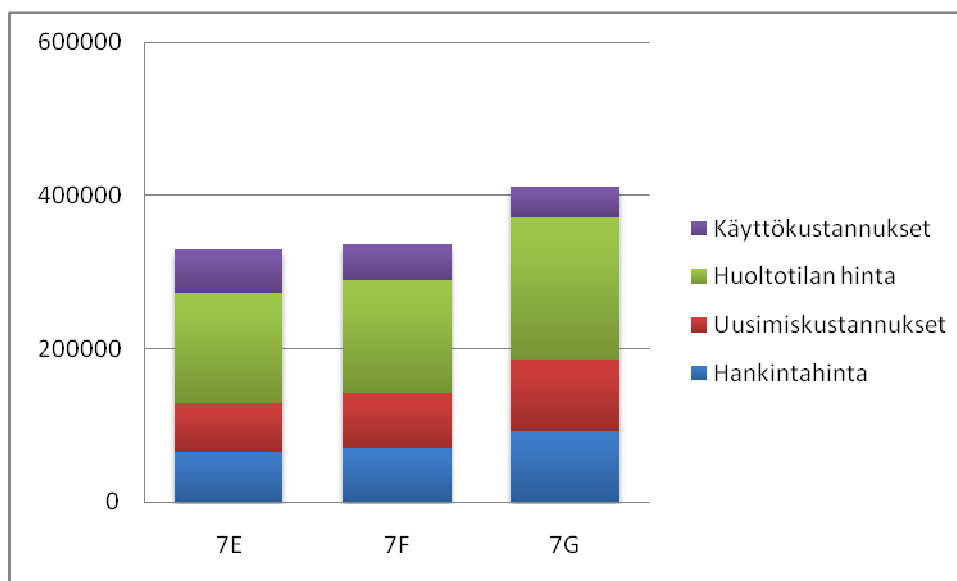


Kuva 11. Mitoitusilmavirta 6 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain

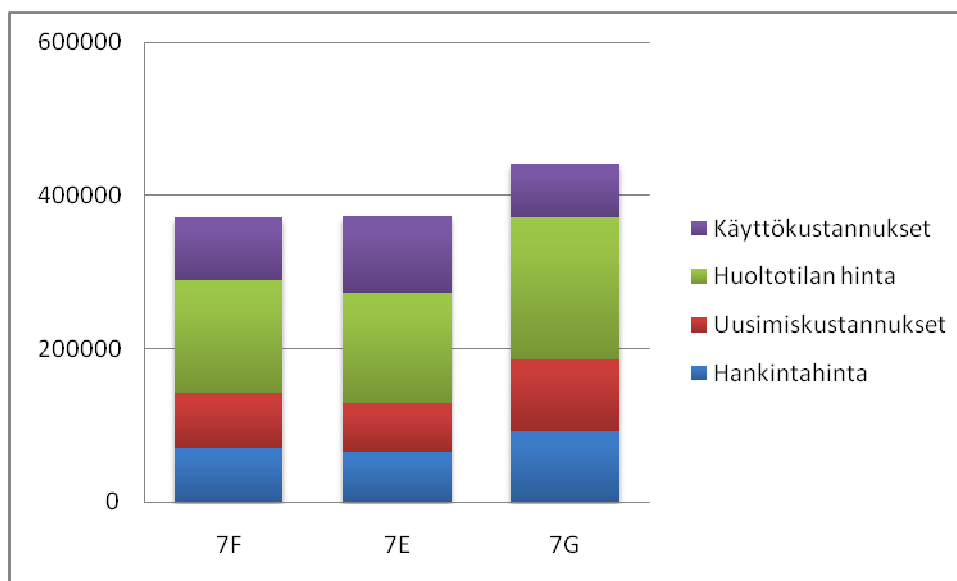


Kuva 12. Mitoitusilmavirta 6 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

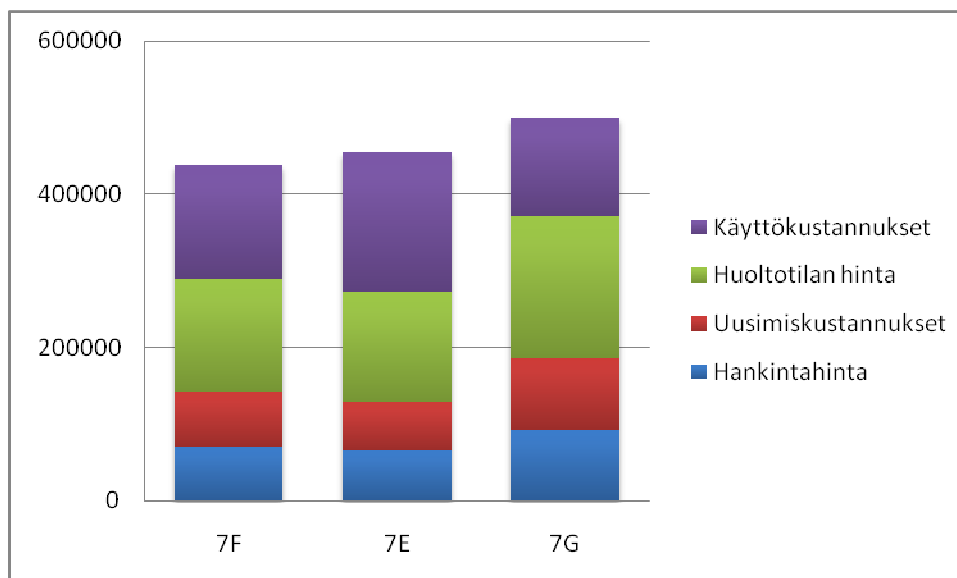
Mitoitusilmavirralla 10 m³/s:



Kuva 13. Mitoitusilmavirta 10 m³/s, sähköenergian hinta pysyy samana



Kuva 14. Mitoitusilmavirta 10 m³/s, sähköenergian hinta nousee 2 % vuosittain



Kuva 15. Mitoitusilmavirta 10 m³/s, sähköenergian hinta nousee 4 % vuosittain

Liite 7: Muuttuvilmavirtaisten koneiden vertailuryhmien koontitaulukot

Muuttuva ilmavirta ilmamäärä 0,4 - 1 m ³ /s							
		Kojeisto	3B	2C	2B	3A	2A
		SFP	1,3	1,5	1,7	1,9	2,5
Käyntiaika	Energian hinta						
8/5	+ 0 %	119	126	110	105	100	
8/5	+ 2 %	114	121	107	103	100	
8/5	+ 4 %	107	113	103	100	100	

Muuttuva ilmavirta ilmamäärä 0,8 - 2 m ³ /s							
		Kojeisto	5D	4D	4C	4B	3C
		SFP	1,1	1,2	1,3	1,8	2,0
Käyntiaika	Energian hinta						
8/5	+ 0 %	154	134	125	115	100	
8/5	+ 2 %	146	127	120	112	100	
8/5	+ 4 %	134	118	112	109	100	

Muuttuva ilmavirta ilmamäärä 1,6 - 4 m ³ /s							
		Kojeisto	5F	4F	5D	4E	5C
		SFP	1,0	1,3	1,3	1,5	1,6
Käyntiaika	Energian hinta						
8/5	+ 0 %	138	112	110	100	104	
8/5	+ 2 %	132	110	109	100	104	
8/5	+ 4 %	124	106	106	100	104	

Muuttuva ilmavirta ilmamäärä 2,4 - 6 m ³ /s							
		Kojeisto	7F	6F	5F	5E	6C
		SFP	0,9	1,0	1,2	1,4	1,8
Käyntiaika	Energian hinta						
8/5	+ 0 %	144	117	113	100	109	
8/5	+ 2 %	137	113	110	100	110	
8/5	+ 4 %	127	107	106	100	112	

Muuttuva ilmavirta ilmamäärä 4 - 10 m ³ /s				
	Kojeisto	7G	7F	7E
	SFP	1,1	1,3	1,7
Käyntiaika	Energian hinta			
8/5	+ 0 %	125	102	100
8/5	+ 2 %	119	100	100
8/5	+ 4 %	114	100	104

Poistoilmapuhallin:							
Sisäiset painehäviöt (Pa)	292	237	187	143	105	73	47
Kokonaispaine (Pa)	492	437	387	343	305	273	247
Puhaltimen hyötysuhde (1/100)	1	1	1	1	1	1	1
Moottorin hyötysuhde (1/100)	0,85	0,83	0,82	0,78	0,75	0,7	0,66
Taajuusmuuttajan hyötysuhde (1/100)	0,95	0,94	0,93	0,92	0,9	0,89	0,87
Moottorin ottoteho PE (kW)	2,4	2,0	1,6	1,3	1,1	0,9	0,7
Moottorin nimellisteho (kW)	4	4	4	4	4	4	4
Puhaltimen SFP (kW/(m3/s))	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
Puhaltimen toimintiste (%)	61	50	41	33	27	22	17
Koko kojeisto							
Kojeiston SFP (kW/(m3/s))	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9
Kojeiston toimintapiste (%)	65	53	43	35	28	23	18
Kustannukset:							
Hankintahinta (€)	-						
Huoltotilan hinta (€)	97200						
Uusimiskustannukset (€)	= hankintahinta						
Investointikustannukset yht. (€)	170200						

Käyttökustannukset (€/a)	87,13	70,68	67,60	64,76	44,72	22,61	9,37
Käyttökust. 50a seh +0 %/a	4356,28	3533,84	3379,90	3238,07	2236,02	1130,31	468,42
Käyttökust. 50a seh +2 %/a	7603,54	6168,04	5899,35	5651,80	3902,80	1972,87	817,59
Käyttökust. 50a seh +4 %/a	13920,38	11292,31	10800,39	10347,18	7145,16	3611,88	1496,82
Kokonaiskust. seh +0 %/a (€)	188543						
Kokonaiskust. seh +2 %/a (€)	202216						
Kokonaiskust. seh +4 %/a (€)	228814						