

Jaakko Aaltonen

Ilmanvaihdon energiankulutus ja hiilijalanjälki pientalossa

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma

2019

ILMANVAIHDON ENERGIANKULUTUS JA HIILIJALANJÄLKI PIENTALOSSA

Aaltonen, Jaakko
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma
toukokuu 2019
Ohjaaja: Heinonen, Jarkko
Sivumäärä: 56
Liitteitä: 4

Asiasanat: ilmanvaihto, vuotoilma, energiankulutus, hiilijalanjälki

Tässä opinnäytetyössä arvioitiin ilmanvaihtoon liittyvien tekijöiden vaikutusta energiankulutukseen ja hiilijalanjälkeen kolmessa Porissa sijaitsevassa pientalossa. Talot mallinnettiin ja eri tekijöiden vaikutusta energiatehokkuuteen tutkittiin käyttämällä dynaamista IDA-ICE simulointiohjelmaa. Vertailuja suoritettiin säätämällä ilmanvaihdon nopeutta, rakennusten vaipan ilmapuotoa ja lämmön talteenoton tehokkuutta ilmanvaihtokoneissa. Vertailu perustui luoduissa talojen malleissa tehtyihin muutoksiin. Käytetyt muuttujien arvot eivät perustuneet mittauksiin, vaan olivat vertailua varten luotuja oletusarvoja.

Taloissa oli tasapainoon säädetty ilmanvaihtojärjestelmä, jossa oli lämmöntalteenotto. Kaikissa kolmessa talossa oli erilaiset lämmitysjärjestelmät, rakennusmateriaalit ja lämmitetty pinta-ala, jotka vaikuttivat ostoenergian määrään.

Eri simulaatioiden tuloksissa korostui ostoenergiankulutuksen, rakennusten lämmön tuottotavan ja ilmanvaihdon lämmitysenergian riippuvuus. Erilainen rakennusten lämmöneristys vaikutti vähän tuloksiin, kun verrattiin ilmanvaihdon tai vuotoilman variaatioita kohteiden välillä. Kasvanut vuotoilma johti kaikissa kohteissa huomattavaan energiahäviöön. Vaikutus hiilijalanjälkeen oli suurin kohteessa, jossa lämpöpumpulla tuotettua energiaa ei käytetty ilmanvaihdon tuloilman lämmityksessä. Koko rakennuksen elinkaaren CO₂-päästöjen kannalta kaikilla tarkastelluilla muuttujilla oli suuri vaikutus kokonaisuuteen. Verrattaessa tilalämmityksen kulutusta ero huonoimman ja parhaan vaihtoehdon ero yksittäisessä kohteessa oli lähes 30 %. Rakennusten tiiviyteen sekä ilmanvaihdon energiatehokkuuteen panostamiseen kannattaa niin energian säästön kuin hiilidioksidipäästöjenkin näkökulmasta.

ENERGY CONSUMPTION OF VENTILATION AND CARBON FOOTPRINT IN DETACHED HOUSE

Aaltonen, Jaakko

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Construction and Municipal Engineering

May 2019

Supervisor: Heinonen, Jarkko

Number of pages: 56

Appendices: 4

Keywords: ventilation, infiltration, energy consumption, carbon footprint

The purpose of this thesis was to estimate the effects of different factors on energy consumption and carbon footprint in three single family houses. All the factors related on ventilation of the houses. The examined houses were a single storey detached houses which located in Pori. The houses were modeled and the effect of factors on energy consumption was studied using a dynamic simulation tool IDA-ICE. The factors were compared by adjusting ventilation rate, infiltration leakage of building envelope and efficiency of heat recovery in mechanical ventilation. A comparison between results was based only on models of the houses and the used values of factors were hypothetical. No measured values were used.

Houses had mechanical balanced ventilation system with heat recovery. There were different heating systems, building materials and heated area in all three houses which effected on purchasing energy consumption.

The variety of different simulation combinations lead results in purchasing energy consumption were highly related on heating energy use in mechanical ventilation and heating system. The value of thermal insulation in houses had minor influence in energy use when it was depended on ventilation or infiltration. High air leakage rate in building envelope causes remarkable energy loss in all houses and the greatest effect in carbon footprint was in the house where heating energy was produced without heat pump.

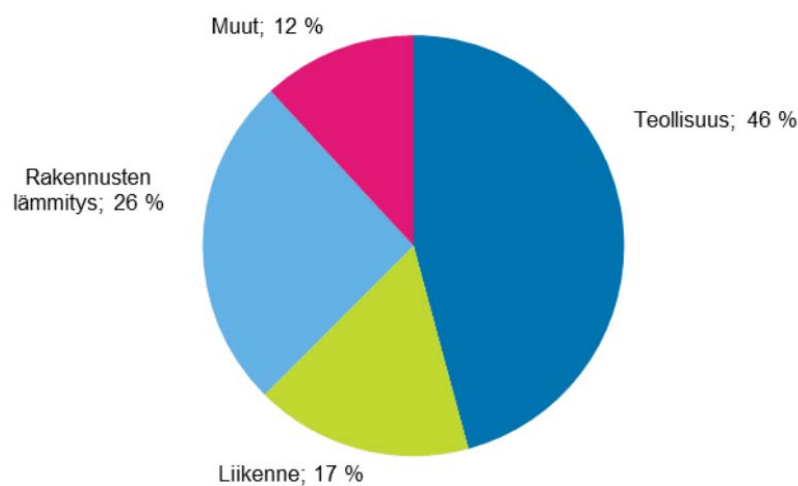
All the migrants examined had a major impact on CO₂ emissions. When comparing heat consumption, the difference between the worst and the best option in a single site was almost 30%. Investing in the tightness of buildings and the energy efficiency of ventilation is worthwhile from the point of view of both energy savings and CO₂ emissions.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	PIENTALOJEN ILMANVAIHTO	8
2.1	Normit ja ohjeet	8
2.2	Ilmanvaihdon toteutuminen rakennuksissa.....	10
2.3	Rakennuksen tiiviys ja vuotoilma.....	11
2.4	Hormivaikutus.....	13
2.5	Tuulen aiheuttama ilmanvaihto.....	14
2.6	Koneellinen ilmanvaihto.....	16
2.7	Lämmöntalteenotto ilmanvaihtokoneissa energialaskennan näkökulmasta	17
2.8	Koneellisen ja vuotoilmanvaihdon yhteisvaikutus	21
2.9	Kokonaisilmanvaihdon energiankulutus.....	22
2.10	Ilmanvaihdon hiilijalanjälki	23
3	RAKENNUSTEN SIMULOINTI	25
3.1	Simuloinnista yleisesti	25
3.2	Simulointiohjelman käyttö energiankulutuksen laskentavälineenä.....	25
3.3	Simulointiin perustuva energianlaskenta	26
4	TUTKIMUSKOHTEET JA LASKENTATAPAUKSET	29
4.1	Tutkimuskohteet	29
4.2	Kohteiden perusasetusarvot simuloinneissa	32
4.3	Lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmien asetusarvot simuloinneissa.....	33
4.4	Vuotoilman simulointi rakennuksissa.....	34
5	SIMULOINTIEN TULOKSET, ENERGIANKULUTUS JA HIILIJALANJÄLKI	36
5.1	Yleistä tuloksista.....	36
5.2	Ilmanvaihdon ja vuotoilman yhteisvaikutus	36
5.3	Rakennus A.....	37
5.4	Rakennus B	40
5.5	Rakennus C	43
5.6	Tulosten vertailu kohteiden välillä.....	45
5.7	Vaikutukset hiidioksidipäästöihin.....	48
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET	51
	LÄHTEET	55
	LIITTEET	

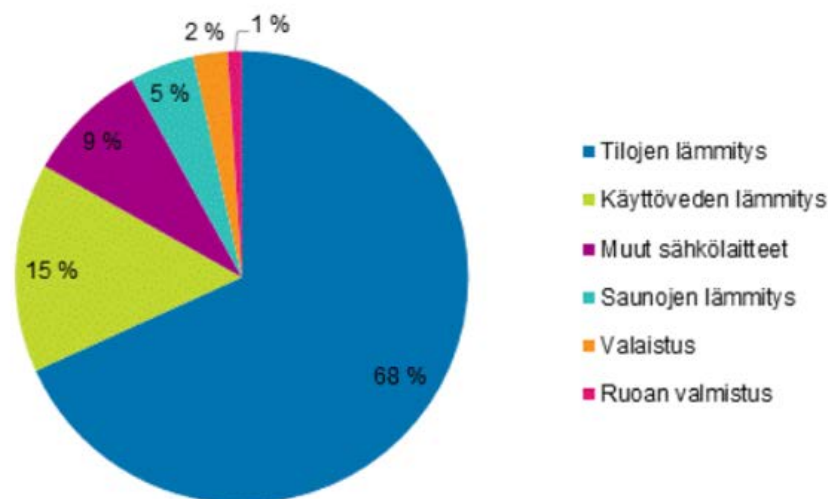
1 JOHDANTO

Huoli ilmastosta on synnyttänyt useampia kansainvälisiä sopimuksia, joilla pyritään vähentämään päästöjä ympäristöön. Vuoden 2016 Pariisin ympäristösopimuksessa Suomi on yhtenä osapuolena tavoittelemassa koko taloutensa laajuisia ehdottomia päästövähennyksiä. Täällä teollisuus ja asuminen kuluttavat paljon energiaa osittain maantieteellisen sijainnin takia. Vuonna 2016 energiahuollon kasvihuonepäästöt olivat hiilidioksidiekvivalentteina (CO₂-ekv.) 17 269 384 tonnia (Suomen virallinen tilasto 2018 a).



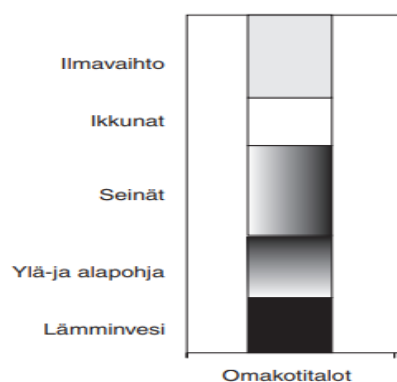
Kuva 1. Energian loppukäyttö sektoreittain 2017 (SVT 2018 b)

Noin neljännes Suomen energian loppukäytöstä kuluu rakennusten lämmitykseen (kuva 1). Tilastokeskuksen mukaan vuonna 2017 asuntojen tilalämmitykseen osuus oli 68 % asuntojen yhteenlasketusta energiankulutuksesta (Kuva 2). Tästä erillisten pientalojen osuus oli noin kolmeviidesosaa, joka merkitsi 27 504 GWh:n lämpöenergiankulutusta (SVT 2018 b).



Kuva 2. Asumisen energiankulutus käyttökohteittain vuonna 2017 (SVT 2018 c)

Rakennusten energiankulutus koostuu pääosin lämmityksestä, jäähdytyksestä, ilmanvaihdosta, valaistuksesta ja muiden kuluttajalaitteiden käytöstä. Omakotitalojen lämpötaseesta ilmanvaihdon osuus on noin neljännes (Seppänen 1995, 467). Uusissa pientaloissa panostus rakennusten tiivyyteen ja ilmanvaihdon lämmöntalteenottoon ovat pienentäneet lämmityksen energiankulutusta. Energiansäästön ja päästöjen vähentämisen kannalta ilmanvaihtoon panostaminen on edelleen yksi keskeinen elementti parannettaessa asuntojen energiatehokkuutta ja asumisviihtyvyyttä.



Kuva 3. Omakotitalojen hyötylämmitysenergiankulutuksen jakautuminen häviötyypeittäin (Seppänen 1995, 467)

Energiaselvitysten vaatiminen rakennuksista rakennuslupavaiheessa on osa kehitystä, jolla pyritään ohjaamaan rakentamista ja korjaamista kohti vähäpäästöisempää tulevaisuutta. Asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta määrittelee, miten eri

tekijät on huomioitava rakennuksen energiatehokkuuden osoittamisessa (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017, 1 luku 2§). Rakennusten energiaselvityksessä annetaan kullekin rakennukselle energiatodistus, jonka perusteella voidaan ennakoida jossain määrin energiakulutuksen tasoa. Todellinen kulutus määräytyy itse rakennuksen käytöstä ja selviää ainoastaan mittaamalla ja keräämällä kulutustiedot pidemmältä ajalta.

Mittaaminen ei ole aina mahdollista, mutta energiakulutuksesta on saatavissa arvio. Esimerkiksi suunnitteluvaiheessa olevan rakennuksen materiaalien ja talotekniikan optimoinnin kannalta energiakulutuksen ennakoiminen on tärkeää. Tähän tarkoitukseen on tehty laskentamalleja ja -ohjelmia, jotka huomioivat laaja-alaisesti energiakulutukseen vaikuttavat tekijät.

Rakennuksen energiatehokkuuden tarkastelukohteena ovat lämpöolosuhteet, sisäilman laatu, lämmin käyttövesi, valaistus ja käyttäjälaitteet. Tämä opinnäytetyö keskittyy rakennuksen ilman vaihtuvuuteen ja sen vaikutukseen rakennuksen energiankulutuksessa. Lisäksi tarkastellaan kohteiden sisäilmaolosuhteita simulointitulosten perusteella ja arvioidaan simuloinnin käyttökelpoisuutta suunnittelun tukena.

Tämän opinnäytetyön kohteena on ilmanvaihtojärjestelmän ja vuotoilman vaikutukset rakennuksen energiankulutukseen ja hiilijalanjälkeen. Tavoitteena on selvittää, millä tavalla vaikutus erilaisilla ilmanvaihdon ilmamäärillä, ilmanvaihtokoneen hyötysuhteella ja vuotoilmamäärillä on tavallisen yksikerroksisen pientalon energiankulutukseen ja sitä kautta rakennuksen käytöstä johtuvaan hiilijalanjälkeen. Lisäksi pyritään arvioimaan mahdollisuuksia leikata ilmanvaihdon energiankulutusta erilaisilla toimenpiteillä. Tarkastelu perustuu IDA-ICE laskentaohjelman avulla tehtyihin variaatioihin kohderakennuksissa. Yhtenä tavoitteena on perehtyä laskentaohjelman käyttöön ja tehdä huomioita sen mahdollisuuksista pientalon suunnittelun apuvälineenä.

2 PIENTALOJEN ILMANVAIHTO

2.1 Normit ja ohjeet

Pientalon suunnitelmien perusteella ilmanvaihto on tavallisesti säädetty alipaineiseksi ulkoilmaan verrattuna. Vuodenvaihteessa 2018 voimaantulleessa asetuksessa rakennusten ilmanvaihdosta ohjeistetaan asunnon tulo- ja poistoilmamäärät asettamaan yhtä suuriksi. Tällä pyritään tasapainoiseen painesuhteeseen rakennuksissa, joissa ei ole erityistä tarvetta yli- tai alipaineisuuteen. Ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta määrätään seuraavasti: ” Ilmanvaihdon on toteutettava terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilman laatu oleskelutiloissa. Ilmanvaihtojärjestelmän on tuotava rakennukseen riittävä ulkoilmavirta ja poistettava sisäilmasta terveydelle haitallisia aineita, liiallista kosteutta, viihtyisyyttä haittaavia hajuja sekä ihmisistä, rakennustuotteista ja toiminnasta sisäilmaan aiheutuvia epäpuhtauksia.” Tämä edellyttää asetuksen mukaan ulkoilmavirraksi vähintään $6 \text{ dm}^3/\text{s}$ henkilöä kohti suunniteltuna käyttöaikana, jos tilan käytössä ei aiheudu lisäilmavirran tarvetta. Koko rakennuksen ulkoilmavirraksi on mitoitettava kuitenkin vähintään $0,35 (\text{dm}^3/\text{s})/\text{m}^2$ lattian pinta-alaa kohden suunniteltuna käyttöaikana, jos rakennuksen tilan käyttötarkoituksen erityisluonteesta ei aiheudu lisäilmavirran tarvetta. Asuinhuoneiston ulkoilmavirraksi on mitoitettava kuitenkin vähintään $18 \text{ dm}^3/\text{s}$. Käyttöajan ulkopuolella ilmanvaihtoa voidaan pudottaa enintään 60 prosenttia suunnitellun käyttöajan ilmavirroista. (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017, 8 - 10 §)

Asetuksessa on määritelty, miten ulospuhallus on järjestettävä ja miten palautus-, siirto ja kierrätysilmaa voidaan käyttää rakennuksen ilmanvaihdossa. Edelleen ilmavirtojen suunnittelu on toteutettava siten, ettei rakenteisiin aiheudu ylipaineen vuoksi rakenteita vaurioittavaa pitkäaikaista kosteusrasitusta eikä alipaineen vuoksi epäpuhtauksien siirtymistä sisäilmaan. Suunnittelussa on huomioitava rakennuksen vaipan ja sisä rakenteiden ilmanpitävyys ja hormivaikutuksen hallinta siten, että edellytykset ilmanvaihdon toiminnalle voidaan varmistaa ja vältetään rakenteissa olevien epäpuhtauksien, maaperässä olevien epäpuhtauksien ja radonin siirtymistä sisäilmaan ja

vältetään kosteuden siirtymistä rakenteisiin. (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 2017, 9 -18 §)

Käytännössä asetuksen mukaisen rakennuksen ilmanvaihdon saavuttamiseksi ilmanvaihdon suunnittelun avuksi on laadittu ohjeet, joissa määritellään tilakohtaiset tulo- ja poistoilmavirrat. Finvac ry:n julkaisemassa oppaassa asuinrakennuksen ilmanvaihdon mitoitukseen sisältää esimerkit eri kokoisten asuntojen huoneiden ilmamääristä. Ilmanvaihto suunnitellaan rakennuksessa niin että tulo- ja poistoilmavirrat ovat tasapainossa. Taulukossa 1 on esitetty 120 m² 1-kerroksisen asunnon tilakohtaiset ilmamäärät. (FINVAC, 11)

Taulukko 1. 1-kerroksisen asunnon ilmanvaihto, 4 H+KT+KPH+S, 120 m² (FINVAC s.11)

	Olohuone 30 m ² dm ³ /s	Makuuhuone 1 (suurin) dm ³ /s	Makuuhuoneet 2 ja 3 dm ³ /s	Ulkoilma yhteensä dm ³ /s	Keittiö dm ³ /s	Kylpyhuone dm ³ /s	WC dm ³ /s	Sauna dm ³ /s	Kodinhoituhuone dm ³ /s	Vaatehuone dm ³ /s	Poisto yhteensä dm ³ /s
Ohjeelliset ilmavirrat	+8	+12	2x8= +16	+36	-8	-10	-7	+6	-8	-6	-39
Suunnittelu- ilmavirrat käyttö- tilanteessa	+8	+12	2x10= +20	+40	-8	-11	-7	+6	-8	-6	-40
Suunnittelu- ilmavirrat tehostus- tilanteessa	+10	+16	2x13 = +26	+52	-10	-15	-9	+8	-10	-8	-52
Tehostus ruoanlaitto- tilanteessa	+11	+17	2x14 = +28	+56	-25	-10	-7	+6	-8	-6	-56

Asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta ohjaa rakennuksen suunnittelua ja rakentamista niin ettei sen normaalikäyttö ylitä tavoiteltavaa energiankulutusta. Asetus sisältää määräykset, miten energiatehokkuuden laskenta on toteutettava ja mitkä ovat hyväksyttävät rajat energiankulutukselle eri tyyppisissä rakennuksissa. Vaatimuksena on, että rakennuksen ilmanvuotoluku on enintään 4,0 m³/h rakennusvaipan

neliometriä kohti ja koko ilmanvaihtojärjestelmän lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde on vähintään 55 % (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 2017, 4 §, 25 §, 33 §)

2.2 Ilmanvaihdon toteutuminen rakennuksissa

Ilman vaihtuminen rakennuksissa tapahtuu koneellisesti ja paine-eroihin perustuvien ilmavirtausten kautta. Usein puhutaankin koneellisesta- ja luonnollisesta ilmanvaihdosta. Luonnollista ilmanvaihtoa tapahtuu rakennuksissa jatkuvasti, hallitusti tai hallitsemattomasti. Ikkunoita, ovia tai muita aukkoja avaamalla tai sulkemalla ilmavirtausten määrää voidaan säännellä. Hallitsemattomasta, ei toivotusta, luonnollisesta ilmanvaihdosta käytetään tässä työssä nimitystä vuotoilmanvaihto. Vuotoilma kulkeutuu rakennuksen sisään tai sieltä ulos rakennuksen vaipassa olevien vuotoilma-aukkojen kautta tai rakennusmateriaalien ominaisuuksien takia. Vaipan läpi kulkevan ilman saa liikkeelle tuuli, sisä- ja ulkolämpötilan eron aiheuttama paine-ero tai koneellisen ilmanvaihdon aiheuttama paine.

Koneellisessa ilmanvaihdossa ulkoilma puhalletaan mekaanisesti haluttuihin huoneti-loihin ilmamäärää säätelevien päätelaitteiden kautta. Poistoilmapuhallin vastaavasti imee rakennuksessa käytetyn ilman ja puhalttaa sen ulos. Vanhemmissa rakennuksissa koneellinen ilmanvaihto toteutettiin pelkän poistoilmapuhaltimen kautta ja korvaus-ilma tuotiin huoneisiin tuloilma-aukkojen kautta. Nykyiset vaatimukset poistoilman lämmön talteenotosta ovat johtaneet siihen, että uusien pientalojen ilmanvaihto toteutetaan lähes aina lämmöntalteenotolla varustetulla tulo-poistoilmakoneella.

Pientalon kokonaisilmanvaihdon laatu ja määrä johtuvat monen tekijän yhteisvaikutuksesta. Vaikka koneellisen ilmanvaihdon ilmavirrat pysyvätkin vakioina, vuotoilman vaikutus muuttaa kokonaisilmavirtoja. Vuorovaikutus on muutenkin merkittävää. Hallitsematon ilmanvaihto vaikeuttaa ilmanvaihdon säätöjä ja toisaalta tiivis rakennus vaatii ilmavirtojen riittävän tarkkaa säätöä, jotta välttyään liian suurilta paine-eroilta rakennuksessa.

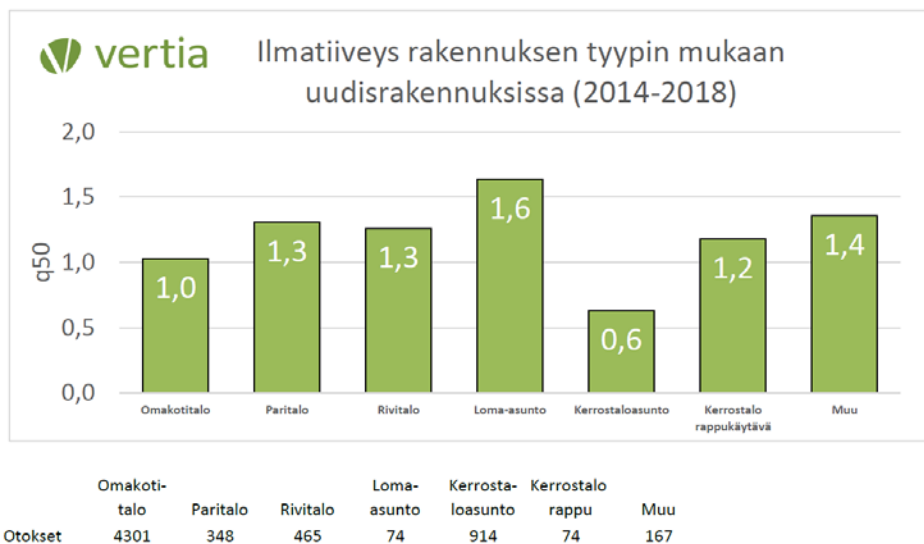
Pientalojen ilmanvaihdon ongelmat liittyvät usein liian pieneen ilman vaihtuvuuteen. Tutkimuksessa, jossa oli 102 pientaloa, keskeiset puutteet liittyivät rakennusten liian vähäiseen ilmanvaihtoon. Ilmanvaihtolaitteisto oli mitoitettu liian pieneksi tai käyttäjät olivat rajoittaneet sen toimintaa liian alhaiselle tasolle. (Eskola ym. 2007, 20)

2.3 Rakennuksen tiiviys ja vuotoilma

Rakennuksen tiiviyn merkitys korostuu monella eri rakennustekniikan osa-alueella. Rakennusten ilmanvuoto ilmaistaan kirjallisuudessa ja raporteissa ilmanvuotolukuna. Yleisimmät ovat tavat on ilmoittaa ilmavuoto suhteena rakennuksen sisätilavuuteen tunnissa n_{50} (yksikkö 1/h) ja vuoto kuutiometreinä tunnissa suhteessa rakennuksen vaipan alaan q_{50} (yksikkö m^3/hm^2). Tässä opinnäytetyössä käytetään jälkimmäistä määrittelyä.

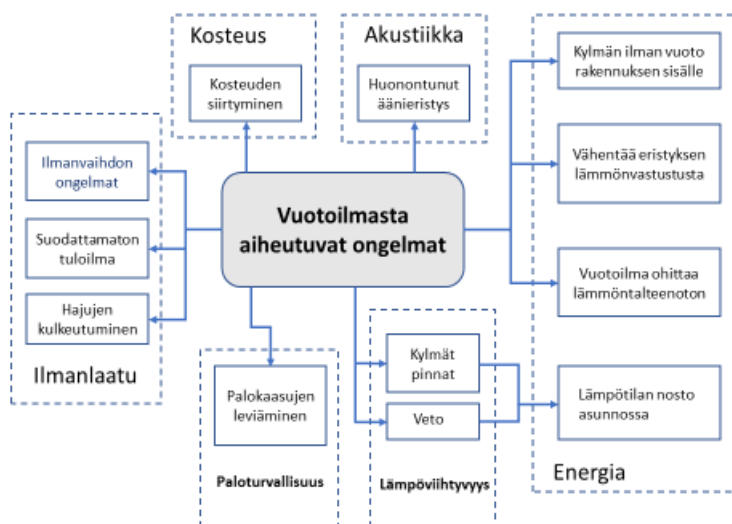
Alue on ollut pitkään tutkimusten kohteena niin Suomessa kuin ulkomaillakin. Vuonna 2009 julkaistiin tutkimusraportti Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampereen teknillisen yliopiston eri laitosten yhteistyöhankkeessa tutkittiin mittauksen, mallinnuksen ja laboratoriokokeiden avulla ilmanvaihtoa asunnoissa, vuotoilmavaihtuvuutta ja läpivientien ilmanpitävyyttä. Tutkimuksen kohteena oli 126 asuinrakennusta. Asunnot olivat eri vuosikymmeniltä ja eri tyyppisiä. Kivitaloissa keskimääräinen ilmanvuotoluku n_{50} oli 2,3 1/h, hirsitaloissa 6,0 1/h, puutaloissa 3,9 1/h. Tutkimuksessa lämpökameralla havaittiin tavallisimmat ilmanvuotokohdat, jotka olivat ulkoseinän ja yläpohjan liitoksissa, ovien ja ikkunoiden liitoksissa sekä ovissa ja ikkunoissa itsessään, ulkoseinän ja välipohjan liitoksissa sekä läpivientien liitoksissa. (Vinha ym. 2009, 1-3)

Kuvassa 4 on esitetty uudempien asuntojen ilmanvuotolukuja, jotka ovat edellisen tutkimuksen lukuja huomattavasti pienempiä. Omakotitaloissa keskiarvo on $q_{50}=1,0 m^3/(hm^2)$. Taulukko perustuu Vertia Oy:n tekemiin mittauksiin tilauskohteissa. (Vertia 2018)



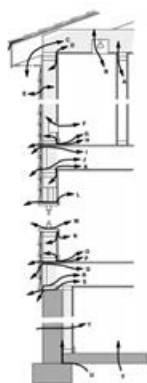
Kuva 4. Ilmatiivevyys rakennuksissa Vertia oy:n tekemissä mittauksissa 2014 -2018 (Ilmatiivevyys ja vuotokohdat uusissa rakennuksissa, 2018)

Alla olevassa kaaviossa (kuva 5) on esitetty vuotoilmaan liittyviä ongelmia (Berge 2011, 3). Tarkasteltava ilmiö on tutkimuksen kannalta laaja ja monipuolinen. Lämmitysenergian kulutuksen näkökulmasta vuotoilman vaikutus on yksinkertainen. Mitä tiiviimpi rakennus on, sitä vähemmän lämmitysenergiaa karkaa. Tämän opinnäytteen näkökulmasta kiinnostavin kysymys liittyy siihen, kuinka paljon rakennusvaipan tiivevyys eri olosuhteissa vaikuttaa lämpötaseeseen.



Kuva 5. Vuotoilmasta aiheutuvia ongelmia rakennuksissa (Berge 2011, 3)

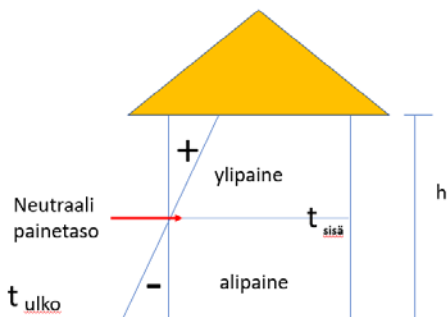
Lämmön siirtyminen rakenteissa, jossa on sekä johtumiseen että konvektioon perustuvaa lämmönsiirtymistä, saattaa olla hyvin hankalasti laskettavissa. Tässä työssä ei syvennyt varsinaiseen fysikaaliseen ilmiöön, vaan keskitytään laskentaohjelman avulla tuotettuihin laskentatuloksiin ja niiden tulkintaan. Vuotoilmalle ei anneta määrättyjä kulkureittejä tai vuotoaukkojen kokoa. Vuotoilman oletetaan jakautuvan tasaisesti koko rakennusvaipan alueelle. Todellisuudessa näin ei ole, vaan tavallisimmat vuotokohtat ovat rakenteiden liitoskohdissa ja erilaisissa läpivienneissä (kuva 6).



Kuva 6. Tyypillisiä vuotokohtia rakennuksen vaipassa (Wolf, Tyler 2013)

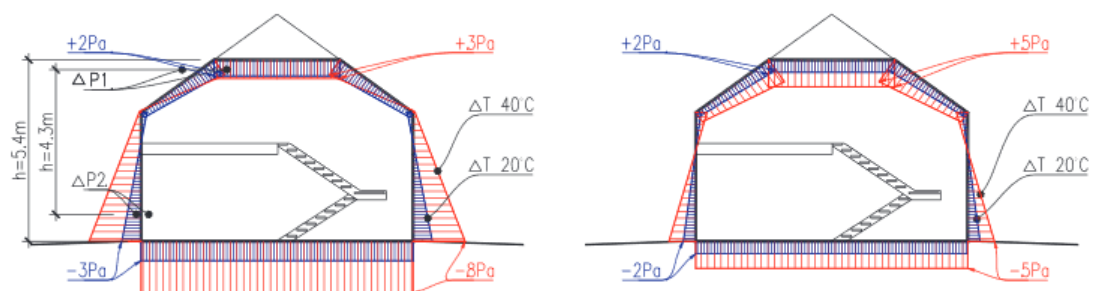
2.4 Hormivaikutus

Lämpötilaerot eri ilmassojen välillä aiheuttavat paine-eroja, joka aikaansaavat ilmavirtauksia. Ilmiö korostuu korkeissa tiloissa, rakennuksissa, hormeissa ja piipuissa silloin kun lämpötilaero ulko- ja sisäilman välillä on suuri. Yleisesti puhutaankin hormi- tai savupiippuvaikutuksesta. Paine-ero on riippuvainen, sekä lämpötilaerosta että rakennuksen korkeudesta. Energiatalouden ja asumisviihtyvyyden kannalta merkitys on suurin talvella. Rakennuksen alipaineiseen alaosaan ulkoa vuotava ilma saa aikaan vetoa. Kuvassa 7 rakennuksen keskellä on neutraali painetaso ja ylimmissä osissa ylipaine. Ylipaineisista yläosista ilma vuotaa ulos.



Kuva 7. Painejakauma ja hormivaikutus rakennuksessa

Opinnäytetyön kannalta on tärkeintä tunnistaa ilmiön olemassaolo ja ymmärtää sen taustavaikutus simuloinneissa. Syvällisemmin teoriaa ei käsitellä, koska malleissa ei anneta määrättyjä vuoreittejä. Kuvassa 8 on esitetty erään keskiverto pientalon painesuhteiden vaihtelua $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ulkolämpötiloissa.



Kuva 8. Hormivaikutuksen aiheuttama painesuhteen vaihtelu keskiverto pientalossa ulkolämpötiloissa $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vasemmalla mitattu ja oikealla laskettu. (Kurnitski 2007, 422)

2.5 Tuulen aiheuttama ilmanvaihto

Tuulen aiheuttama paine-ero ilmenee rakennuksen tuulenpuoleisissa osissa ylipaineena. Sivuseinissä ja tuulen suojanpuoleisille seinille syntyy alipaine, jos tuulenpuoleinen seinä on yhtä tiivis kuin muut seinät. Tuulenpuoleisen seinän päästäessä ilmaa enemmän lävitseen kuin muut seinät, syntyy muille seinille ylipainetta. Paine-eron määrä on riippuvainen tuulen nopeudesta, suunnasta, ympäristöstä, seinien ja kattojen muodoista. (Sisäilmayhdistys 2019)

Rakennuksen osien muotoja ilmaistaan niin sanotuilla muotokertoimilla. Ympäristön mukaan on vuotoyhtälöissä omat kertoimet. Tässä työssä käytetään oletuksena osittain suojatun kaupunkiympäristön kertoimia, jotka ovat käytetyssä simulointiohjelmassa oletusarvoina. Esimerkkinä vuotoyhtälöstä on kaavassa 1 esitetty vuotokäyrän yhtälö rakennuksen ilmanpitävyysmittauksissa (Vinha 2009, 20)

$$q = C\Delta p^n \quad \text{kaava (1)}$$

q vuotoilmavirta [m^3/h]

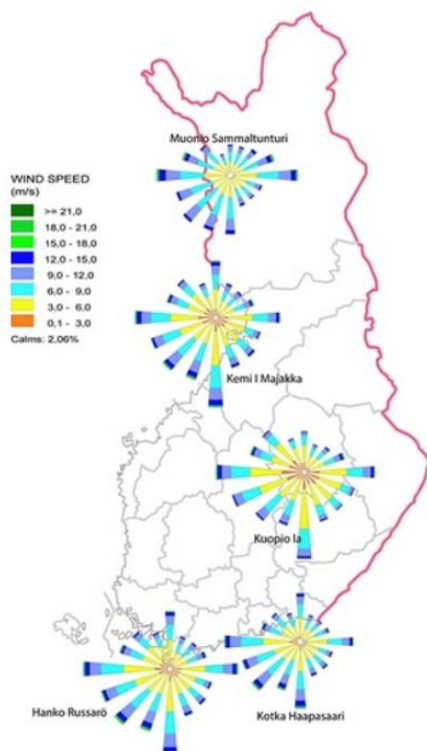
C vuotokerroin [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{Pa})^n$]

Δp paine-ero rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välillä [Pa]

n eksponentti (virtaustyypistä riippuva) [-]

Kaavan eksponentilla on merkittävä vaikutus vuotokertoimen arvoon. Eksponentti määräytyy virtaustyypin mukaan, joka on taas sidoksissa ilmapuorakojen kokoon ja tyyppiin. Vuotokertoimeen vaikuttavat edelleen korjauskertoimet, jotka vaihtelevat rakennuksen sijainnin, kerrosten lukumäärän, vuotojakauman, ilmanvaihdon tasapainon ja tuuliolojen mukaan. Liitteessä 1 on esitetty erään tutkimuksen käyttämiä korjauskertoimia vuotoilmakertoimen laskentamalliin (Vinha 2009, 115).

Rakennuksen sijoittumisella ilmansuuntien suhteen on merkitystä. Julkisivun suunnituksen, tilajärjestelyjen ja ikkunoiden sijoittumisen vaikuttaa auringon valon määrään rakennuksessa ja tuulikuorman määrään. Kuvassa 9 on esitetty eri tuulensuuntien yleisyys eräillä havaintoasemilla Suomessa. Vallitsevat tuulensuunnat ovat painottuneet Etelä-Suomessa etelään ja länteen.



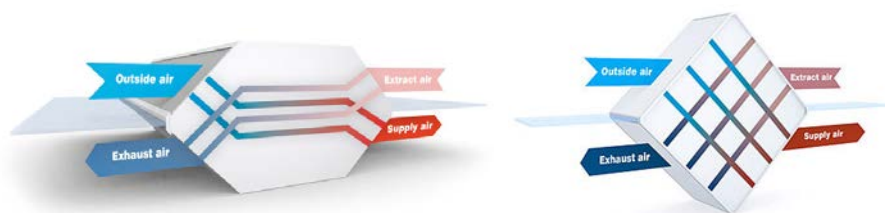
Kuva 9. Tuulen suunnan ja nopeuden jakauma eräillä sääasemilla tuuliruusulla kuvattuna. Tarkastelujakso 1999 – 2008 (Suomen tuuliatlas www-sivut)

2.6 Koneellinen ilmanvaihto

Nykyinen koneellinen ilmanvaihto toteutetaan pientaloissa normaalisti lämmöntalteenotolla varustetulla tulopoistoilmakoneella. Energiatehokkuuden kannalta ilmanvaihtokoneiden oleelliset ominaisuudet ovat puhaltimien käyttämä energia suhteessa tuotettuun paineenkorotukseen ja lämpöenergian talteenotto poistoilmasta. Ilmanvaihtolaitteiston energiankäyttöä määrittelemään on otettu käyttöön SFP-luku (Specific Fan Power), joka ilmaisee ilmanvaihtojärjestelmän kaikkien puhaltimien yhteenlasketun sähköverkosta otetun sähkötehon [kW] jaettuna ilmanvaihtojärjestelmän koko mitoitusjäteilmavirralla tai mitoitusulkoilmavirralla [m^3/s] (suurempi näistä) (LVI 30-10529 2013, 2). Pientalon ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho on puhaltimen sähköverkosta ottama sähköteho jaettuna puhaltimen mitoitusilmavirralla.

Ilmanvaihtojärjestelmissä lämpöenergian talteenottoon on useita tekniikoita. Pientalojen ilmanvaihtokoneiden lämmöntalteenotto on toteutettu tavallisesti joko levylämmönsiirtimillä tai pyörivällä lämmönsiirtimellä. Levylämmönsiirtimissä lämpöenergia

siirtyy ohuiden metallilevyjen välityksellä poistoilmasta tuloilmaan. Itse ilmavirrat eivät sekoitu. Pyörivässä lämmönsiirtimessä kennostoon varautunut lämpö siirtyy roottorin pyöriessä poistoilmasta tuloilmaan. Tällaisella ns. regeneratiivisella lämmönsiirtimellä voidaan päästä jonkin verran parempaan hyötysuhteeseen. Lämmöntalteenotto on mahdollista toteuttaa myös poistoilmalämpöpumpun avulla, jolloin päästään korkeaan hyötysuhteeseen, koska talteen otettua energiaa voidaan käyttää helposti myös muuhun lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden tuottamiseen. Käytetyissä malleissa pitäydytään levylämmönsiirtimissä, koska kiinnostuksen kohteena on lämmöntalteenoton hyötysuhteen tason vaikutus energiankulutukseen, eikä niinkään laitteiden tekniset ominaisuudet. Kuva 10 havainnollistaa lämmön siirtymistä levylämmönsiirtimissä poistoilmasta tuloilmaan.



Kuva 10. Ilmavirtojen kulku ilmanvaihtokoneen levylämmönsiirtimissä (Klingenburg [www-sivut](http://www.klingenburg.com))

2.7 Lämmöntalteenotto ilmanvaihtokoneissa energialaskennan näkökulmasta

Lämpöä talteen ottavan ilmanvaihtokoneen energiatehokkuus määräytyy pitkälti sen mukaan, kuinka hyvin se pystyy siirtämään poistoilmasta lämpöenergiaa sisään puhallettavaan ilmaan. Ilmanvaihtokoneen tulo- ja poistoilmahyötysuhteet voidaan määrittää, kun tiedetään ulkoilman, rakennuksen sisäilman, rakennuksesta ulospuhallettavan ja rakennukseen sisälle puhallettavan ilman lämpötilat. Poistoilman lämpötilahyötysuhde on sisä- ja jäteilman lämpötilan erotuksen suhde sisä- ja ulkoilman lämpötilan erotukseen (Kaava 2). Tuloilman lämpötilahyötysuhde on lämmöntalteenoton jälkeisen tuloilman ja ulkoilman lämpötilan erotuksen suhde sisä- ja ulkoilman lämpötilan erotukseen (Kaava 3).

$$\eta_p = \frac{(t_s - t_j)}{(t_s - t_u)} \quad (2)$$

η_p poistoilman lämpötilahyötysuhde

t_s sisäilman lämpötila [°C]

t_j jäteilman lämpötila [°C]

t_u ulkoilman lämpötila [°C]

$$\eta_t = \frac{(t_{tLTO} - t_u)}{(t_s - t_u)} \quad (3)$$

η_t tuloilman lämpötilahyötysuhde

t_{tLTO} tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen [°C]

t_u ulkoilman lämpötila [°C]

t_s sisäilman lämpötila [°C]

Aikaisemman ohjeen mukaan asunnot piti suunnitella hieman alipaineiseksi, jolloin poisto- ja tuloilmavirtojen keskinäinen ero vaikutti ilmanvaihtokoneen lämpötilahyötysuhteisiin ja sitä kautta koko ilmanvaihtokoneen hyötysuhteeseen. Ilmavirtojen ollessa tasapainossa poisto- ja tuloilmahyötysuhteet ovat yhtä suuret (kaava 4).

$$\eta_p = \eta_t \quad (4)$$

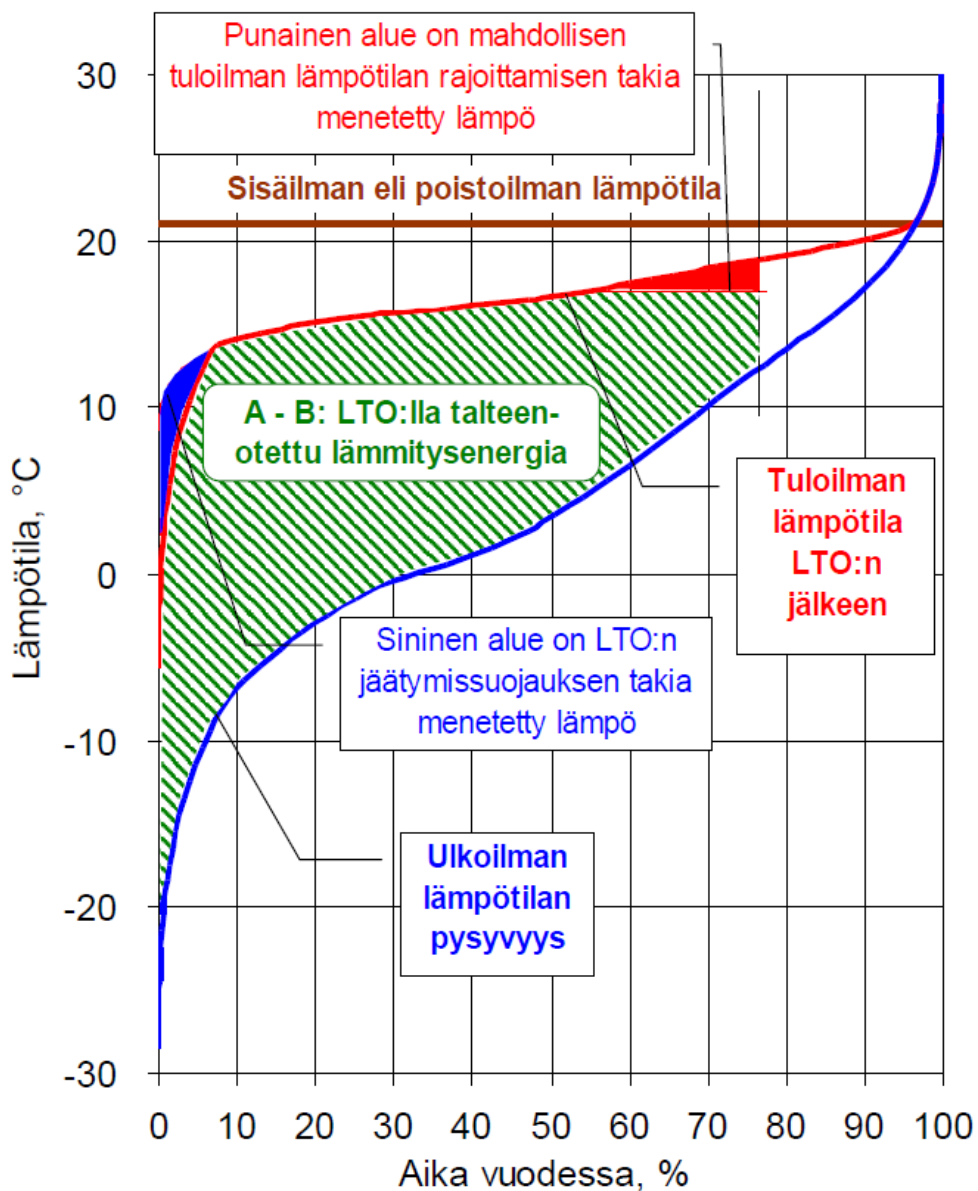
η_p poistoilman lämpötilahyötysuhde

η_t tuloilman lämpötilahyötysuhde

Ilmanvaihtokoneessa oleva jäätymissuojauksella rajoitetaan poistoilman lämpötilaa. Poistoilman lämpötilahyötysuhteen yhtälöstä (kaava 2) voidaan tällöin päätellä, että mitä alemmas jäätymissuorauslämpötila voidaan asettaa, sitä parempaan lämpötilahyötysuhteeseen päästään talvipakkasilla.

Ilmanvaihtokoneen vuotuinen lämmöntalteenoton hyötysuhde on sidoksissa sisä- ja ulkolämpötiloihin, ilman kosteuteen ja tiheyteen sekä tulo- ja poistoilmavirtoihin. Nämä tekijät vaihtelevat säätilan ja haluttujen sisäilmaolosuhteiden mukaan. Sään muutoksilla on jatkuva vaikutus myös ilmanvaihtokoneen energiatalouteen, jota

havainnollistetaan kuvassa 11. Siinä lämpötilan pysyvyyttä kuvataan prosenttiosuuk-
silla vaaka-akselilla ja lämpötilaa pystyakselilla. Kaaviossa siniseksi väritetyllä alue
ilmaisee ilmanvaihtokoneen jäätymissuojauksen takia menetettyä lämpöenergiaa ja
punainen alue tuloilman lämpötilan rajoittamisen takia menetettyä energiaa. Kaaviossa
jäteilman lämpötila on rajoitettu 0 °C:een ja rakennukseen puhallettavan tuloilman
lämpötila 17 °C:een.



Kuva 11. Poistoilmasta tuloilmaan talteen otettu lämpöenergia vuodessa (Tasauslas-
kentaopas 2012 2011, 56).

Rakennuksen ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde voidaan lakea, kun tiedetään talteen otetun lämpöenergian määrä ja kaikkien lämmöntalteenoton piiriin kuuluvien poistoilmavirtojen lämpöenergian määrä. Vuosihyötysuhde ilmaistaan näiden suhteena (kaava 5).

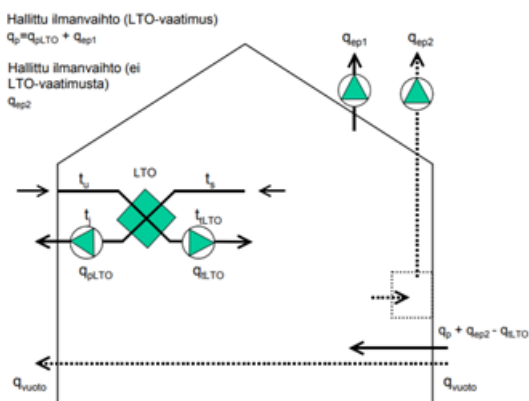
$$\eta_a = \frac{Q_{LTO}}{Q_{iv}} \quad (4)$$

η_a rakennuksen ilmanvaihdon vuosihyötysuhde

Q_{LTO} talteen otettu lämpöenergia

Q_{iv} poistoilmavirtojen mukana poiskulkeva lämpöenergia

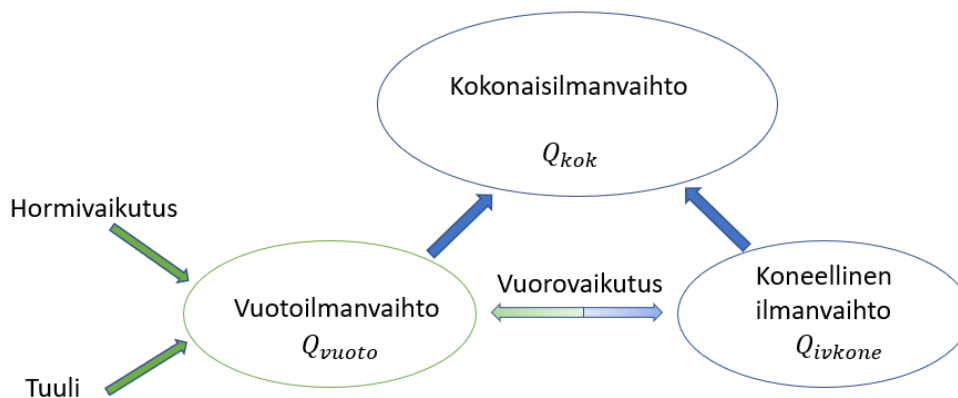
Alla oleva kuva (kuva 12) havainnollistaa koko rakennuksen ilmavirtoja, jossa lämmöntalteenottovaatimus kohdistuu itse lämmöntalteenotolla varustettuun ilmanvaihtokoneeseen ja toiseen erillispoistoon (q_{ep1}), joka tavallisesti on liesituuletin. Tässä työssä ei erillispoistojen vaikutusta energiankulutukseen tutkittu.



Kuva 12. Poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen määrittämisessä käytetyt ilmavirrat (Tasauslaskentaopas 2012 2011, 47).

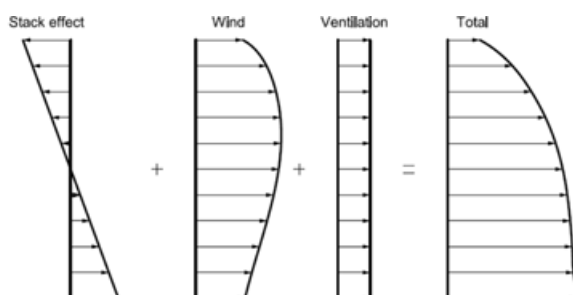
2.8 Koneellisen ja vuotoilmanvaihdon yhteisvaikutus

Koneellinen ja luonnollinen ilmanvaihto on vuorovaikutuksessa keskenään. Säässä tapahtuvat muutokset vaikuttavat niin koneelliseen ilmanvaihtoon kuin erilaisiin vuotoihin rakennukseen ja sieltä ulos. Vuotoilman määrä vaikuttaa huomattavasti siihen, kuinka hyvin rakennuksen ilmanvaihtoa pystytään hallitsemaan. Kuvassa 13 havainnollistetaan vuorovaikutusta, josta kokonaisilmanvaihto muodostuu.



Kuva 13. Kokonaisilmanvaihdon muodostuminen

Tuulen, hormivaikutuksen ja koneellisen ilmanvaihdon yhteisvaikutusta paine-eron näkökulmasta on käsitelty useassa tutkimuksessa. Esimerkiksi Berge (2013, 11) käytti ilmiön havainnollistamisessa alla olevaa kuvaa (kuva 14), jossa kokonaispaine-ero esitetään hormivaikutuksen, tuulen ja koneellisen ilmanvaihdon yhdistelmänä. Koneellisen ilmanvaihdon tulo- ja poistoilmavirrat tasapainolla pyritään tilanteeseen, jossa rakennus ei olisi yli- tai alipaineinen. Painesuhteet muuttuvat kuitenkin helposti tiloissa, joissa ulkoseinissä on ilmapuotoja. Tämä vaikeuttaa taas hallitun ilmanvaihdon toimintaa ja sitä kautta myös rakennuksen energiankulutuksen määrään.



Kuva 14. Kokonaispaine-eron muodostuminen rakennuksessa (Berge 2013, 11)

Kokonaispaine-ero on hormivaikutuksen, tuulen ja koneellisen ilmanvaihdon paine-erojen summa (kaava 6). Tästä kokonaispaine-erosta riippuu, kuinka paljon ja kuinka nopeasti ilmaa virtaa rakenteissa olevien reikien, rakojen ja aukkojen kautta. Sillä taas on suora yhteys vuodosta johtuvaan energiankulutukseen

$$\Delta P_{kok} = \Delta P_s + \Delta P_w + \Delta P_v \quad (6)$$

ΔP_{kok} kokonaispaine-ero [Pa]

ΔP_s hormivaikutuksen aiheuttamapaine-ero [Pa]

ΔP_w tuulen aiheuttama paine-ero [Pa]

ΔP_v ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero [Pa]

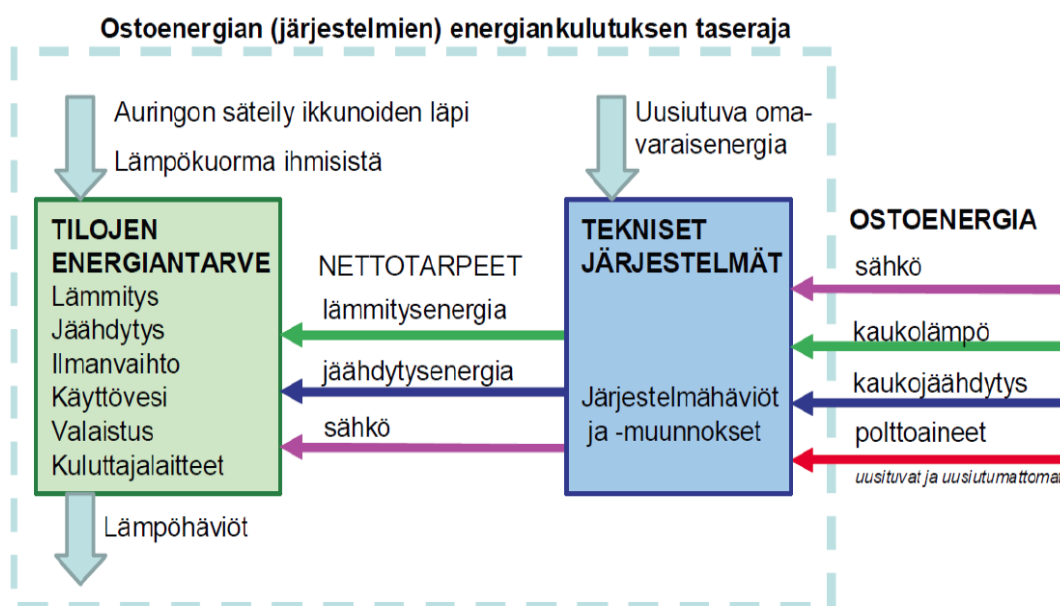
2.9 Kokonaisilmanvaihdon energiankulutus

Vuotoilmanvaihdon ja koneellisen ilmanvaihdon yhteenlasketusta energiankulutuksesta käytetään tässä yhteydessä nimitystä kokonaisilmanvaihdon energiankulutus. Vuotoilman energiankulutus syntyy rakenteiden epätiiviyksien kautta tulevan vuotoilman lämmittämisen tarpeesta. Siihen vaikuttavat vuodon ajanjakson pituus, vuotoilmavirta, ilman tiheys ja ominaislämpökapasiteetti sekä sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero.

Koneellisen ilmanvaihdon energiankulutus koostuu puhaltimien, ilman tuloilman lämmittämisen ja jäähdyttämisen vaatimasta energiasta. Puhaltimien energiankulutus riippuu siitä, kuinka hyvin laitteisto pystyy tuottamaan vaaditun ilmanvaihdon rakennuksessa suhteessa sähköverkosta otettuun energiaan. Merkittävä energiankulutukseen vaikuttava tekijä on tuloilman lämmitys tai jäähdytys. Suomen ilmastossa valtaosa energiasta kulutetaan lämmitykseen. Osa ilman lämmityksestä tapahtuu ilmanvaihtokoneessa ja osa huonetiloissa. Ilmanvaihtokoneessa lämmitysenergiantarve riippuu sisään puhallettavan ilman ja ulkolämpötilan erosta, ilman tiheydestä ja ominaislämpökapasiteetista, tuloilmavirrasta, ajanjakson pituudesta ja erityisesti poistoilmasta talteen otetusta lämpöenergian määrästä. Tilassa tapahtuva tuloilman lämmityksen energiankulutus riippuu sisään puhallettavan ilman ja sisälämpötilan erosta, ilman tiheydestä ja ominaislämpökapasiteetista ajanjakson pituudesta.

Osa koneessa tarvittavasta lämmitysenergiasta saadaan poistoilmasta lämmöntalteenoton kautta ja osa lämmitetään ulkopuolisella energialla. Ulkopuolinen energia voi olla suoraa sähköenergiaa tai lämmitysjärjestelmän välityksellä tuotua lämpöä.

Siitä osasta energiaa, joka tuodaan rakennuksen taserajan ulkopuolelta, käytetään tässä työssä nimitystä ostoenergia (kuva 15). Siihen ei kuulu esimerkiksi lämpöpumpun avulla tuotettu uusiutuva omavaraisenergia.



Kuva 15. Rakennuksen ostoenergian ja taseraja (Energiatehokkuusohje 2017, 6)

2.10 Ilmanvaihdon hiilijalanjälki

Tässä opinnäytetyössä käsitellään ilmanvaihdon energiankulutusta ja sen vaikutuksia rakennuksen käytön hiilijalanjälkeen. Siten ilmanvaihtokoneiden, kanavien, päätelaitteiden ja muiden niihin liittyvien rakennusosien materiaaliin liittyvät päästöt on jätetty tarkastelun ulkopuolelle.

Koska kohderakennusten lämmitysjärjestelmät poikkeavat omavaraisenergian suhteen toisistaan, vaihtelevat tulokset niin energian kuin hiilijalanjäljen suhteen toisistaan eri rakennusten välillä merkittävästi.

Energiamuotojen osalta tarkastellaan vain sähköenergiaa. Siten esimerkiksi puun käyttöä lämmityksessä ei huomioida. Tämä yksinkertaistaa energiankulutuksen hiilijalanjalan laskentaa. Energiantuotolle asetetaan tietty kerroin, jolla sähkönkäyttö muutetaan hiilidioksidikuormaksi. Mitenkään yksiselitteistä tuon kertoimen määrittäminen ei ole. Sähköä pystytään tuottamaan hyvin monella tavalla, joiden hiilijalanjälki poikkeaa huomattavasti toisistaan. Sähkön ostaminen eri yhtiöiltä tai eri tuotteen valitseminen yhtiöiden tarjonnasta vaikuttaa siihen, kuinka paljon hiilidioksidipäästöt kasvavat kulutuksen kautta. Tässä opinnäytetyössä käytetään Motivan ilmoittamaa Suomen sähköntuotannon viiden vuoden keskimääräistä hiilidioksidipäästökerrointa megawattituntia kohti, joka on $164 \text{ kgCO}_2\text{-ekv/MWh}$ (Motiva 2019).

Kuten aikaisemmin on todettu, ilmanvaihdon energiatehokkuus määräytyy pääasiassa sen mukaan, kuinka paljon itse ilmanvaihto kuluttaa energiaa ilman lämmittämiseen, siirtämiseen ja järjestelmän ohjaukseen. Puhaltimien kuluttamasta energiamäärästä saadaan suoraan niiden aiheuttama hiilidioksidipäästö, kun tiedetään sähkön tuoton päästökerroin. Kohteiden lämmityksen hiilidioksidipäästöt riippuvat taas siitä, kuinka paljon sähköenergiaa tarvitaan tuottamaan tarvittava lämmitysenergia. Osa tuloilman lämmityksestä tapahtuu ilmanvaihtokoneessa ja osa huonetiloissa.

3 RAKENNUSTEN SIMULOINTI

3.1 Simuloinnista yleisesti

Simulointiohjelmat, jotka ottavat huomioon itse rakennuksen materiaali- ja olosuhdetietojen lisäksi ympäröivät sääolosuhteet, ovat yleisesti käytössä suurten rakennusten suunnittelussa. Pientalojen energiatehokkuuteen liittyviä mallinnuksia simulointiohjelmissa tehdään Suomessa vähemmän. Tyypillisesti käytetään laskentaohjelmia, jotka perustuvat yksinkertaisempaan laskentaan, jolloin esimerkiksi säätietojen käyttö perustuu pitempiin periodeihin. Käytettävien tietojen määrä tai laatu eivät välttämättä takaa tulosten oikeellisuutta verrattuna valmistuneen rakennuksen todelliseen energiankulutukseen. Esimerkiksi asukkaan kulutustottumukset, huonelämpötilat ja asunnon käyttöaste määrittelevät pitkälti toteutuneen energiankulutuksen tason. Simuloinneissa päästään lähemmäs toteutuvaa kulutusta, mitä enemmän toteutuvasta käytöstä on tietoa. Usein joudutaan käyttämään oletusarvoja, jotka perustuvat esimerkiksi tilastollisiin aineistoihin. Simuloinnissa saadaan kuitenkin käyttökelpoista tietoa eri tekijöiden vaikutuksista rakennuksen energiankulutuksesta suunnittelun tueksi.

Simulointiohjelmissa voidaan tehdä muutoksia mallin tasolla tekijöihin, jotka vaihtelevat luonnollisessakin rakennuksessa ja ympäristössä. Malli tulisi vastata mahdollisimman hyvin tarkasteltavan rakennuksen rakenneosia, pinta-aloja, tilavuuksia ym. tekijöitä. Muuttujien määrä kasvaa väistämättä hyvin suureksi, kun kiinnostuksen kohteena on rakennuksen sisäilmasto. Käytetyltä ohjelmalta vaaditaan monipuolisuutta ja tietokoneelta riittävää laskentatehoa. Laskennan kannalta on rajataan käytettävien muuttujien määrä sopivaksi.

3.2 Simulointiohjelman käyttö energiankulutuksen laskentavälineenä

Rakennusten suunnittelun apuna on jo pitkään käytetty ohjelmistoja, joilla pyritään optimoimaan ennakoita erilaisia rakennusteknisiä ratkaisuja. Vaatimukset rakennusten sisäilmaston ja energiakäytön suunnittelun suhteen ovat kasvaneet. Ilmiöt, jotka aiheutuvat rakennuksen ja ympäristön vuorovaikutuksesta sekä vaihtuvista sisäisistä kuormituksista, ovat monien osatekijöiden aiheuttamia. Tietokoneiden laskentakyvyn

parantuessa yhä useampien muuttujien samanaikainen sisällyttäminen laskentaprosessiin on helpottunut.

Kehittyneet rakennusten energia- ja olosuhdesimulointeihin erikoistuneet ohjelmistot ovat laskentaohjelmia, jotka käyttävät laskennassaan tietoja mm. tilastollisista säätiedoista, maantieteellisestä sijainnista, rakennuksen lämmityksestä, ilmanvaihdosta, rakennusmateriaaleista sekä sisäisistä ja ulkoisista kuormista. Ohjelmat suorittavat muuttujien avulla määritetyille ajanjaksolle periodista tai dynaamista laskentaa. Tuloksena saadaan ennusteita esimerkiksi rakennuksen ilman laadusta, ilmanvaihdosta, lämpötiloista, energiankulutuksesta ja kustannuksista. Periodinen laskenta käyttää pidemmän jakson keskiarvoa säätiedoista ja ympäristötekijöistä. Dynaamisessa laskentaprosessissa käytetään lyhyitä, jopa minuuttien mittaisia, aikajaksoja.

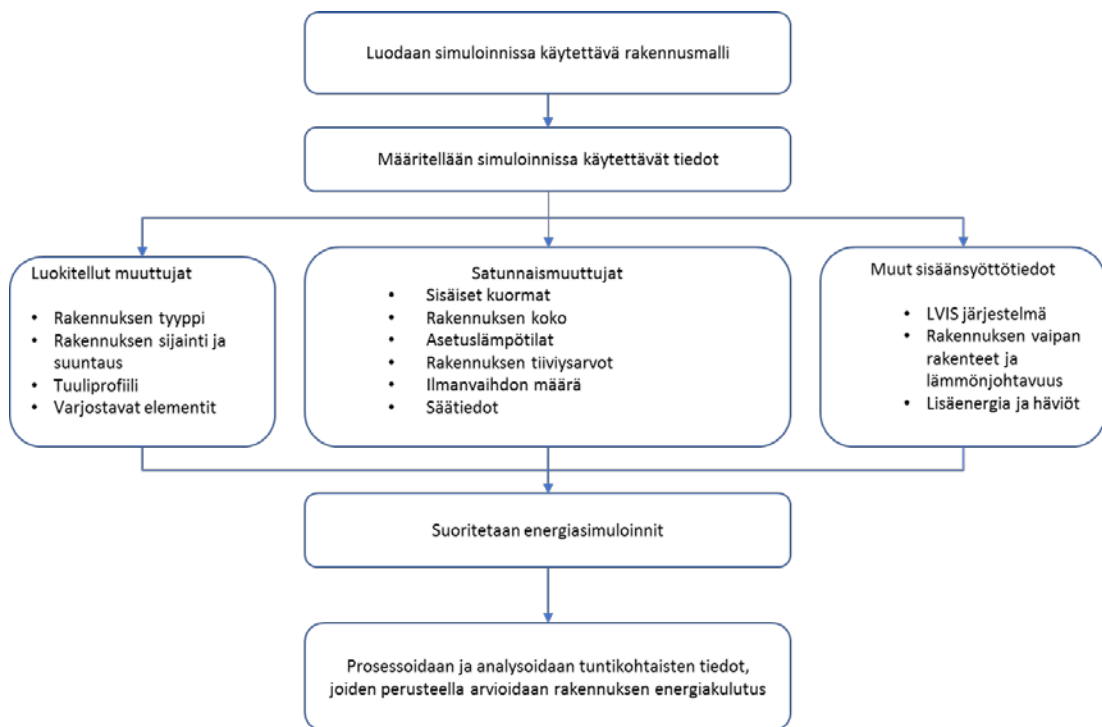
IDA ICE (Indoor Climate and Energy) on rakennusten simulaatio-ohjelma, jonka avulla voidaan ennakoida ja analysoida rakennusten sisäilmaa ja energian käyttöä. Sen avulla luodaan matemaattinen malli rakennuksesta, ilmavirroista ja lämmönsiirtymisistä ja lasketaan jaksoittaisesti, annettuun säädätään pohjautuen, rakennukseen kohdistuvat jäähdytys ja lämmityskuormat sekä rakennuksen lämpötase ja energiatarve.

Malli ratkaisee annettujen lähtötietojen ja ohjaustietojen perusteella tulostiedot. Ohjelmaan voidaan syöttää hyvin yksityiskohtaisia tietoja tarkasteltavasta kohteesta. Käytön helpottamiseksi ohjelmassa on tiettyjä valmiiksi annettuja tietoja ja tietokantoja. Tässä työssä käytetään osittain hyväksi ohjelman sisältämiä asetusarvoja, jotka perustuvat asetuksiin rakennusten energiatehokkuudesta ja sen laskennasta (Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta 1048/2017, liite 1).

3.3 Simulointiin perustuva energianlaskenta

Simuloinnin perusteella saadaan laskennallinen arvio käsiteltävien muuttujien vaikutuksista. Arvio perustuu vertailuun tehtyjen muutosten vaikutusta asetettuun lähtötasoon. Tässä opinnäytetyössä laskenta perustuu kokonaan rakennusten mallien käyttöön, eikä sisällä todellisissa kohteissa tehtyjä mittauksia. Annettujen rakennusten lähtötietojen perusteella luodaan mallit, joiden perusteella ajetaan simulaatiot

energiankulutuksesta. Simuloinnin käytön kannalta on oleellista tunnistaa ohjelmaan syötettävien tietojen ominaisuudet. Tässä työssä käytettiin vain pientä osaa ohjelman mahdollisuuksista ja suuri osa ohjelman oletustiedoista pidettiin muuttumattomina. Kuviossa 16 on jaoteltu simuloinnin kulkua ja jaoteltu käytettäviä muuttujia.



Kuvio 16. Simuloinnin kulku ja muuttujien jaottelu

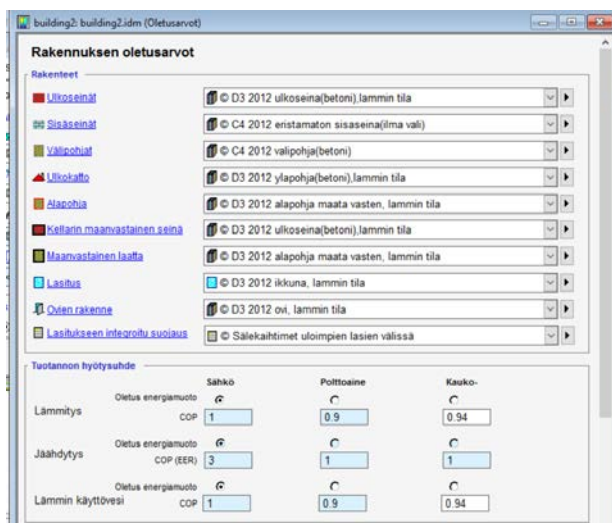
Tarkasteltaessa ohjelmaan syötettäviä tietoja, havaitaan että niillä on laskennan kannalta erilaisia ominaisuuksia. Kaaviossa vasemmalla on luokittelevia muuttujia, jotka omien määrittystensä kautta vaikuttavat laskentaan, mutta eivät itsessään ole laskennallisia suureita. Keskellä olevat muuttujat sen sijaan ovat tyypillisiä matemaattisissa kaavoissa käytettäviä muuttujia, jotka saavat lineaarisesti muuttuvia numeerisia arvoja. Oikealla kaaviossa on muita muuttujia, joiden ominaisuudet voivat olla edellä mainittujen kaltaisia tai esimerkiksi tietyn järjestelmän määritelyihin ominaisuuksiin.

Ohjelman käytettävyyttä energialaskennassa on helpotettu valmiilla tiedostoilla, kun tietyt perusasiat valitaan simuloitavalle rakennukselle. Tällaisista aloitusvaiheen muuttujien valintaan liittyvistä muuttujista ovat tiettyjen rakennuste energialaskennassa käytettävien arvojen valinta oletustietoina. Ohjelman avausvaiheessa voidaan

tehdä valinta rakennustyyppistä, jolloin tietyt muuttujat siirtyvät oletusarvoina simuloitavan kohteiden arvoiksi.

Ohjelmaan syötettävät sijainti- ja suuntaustiedot määrittelevät kausittaiset maantieteelliset olosuhteet, joita rakennukseen kohdistuu. Säätiedoista on kerätty tiedostoja, joihin on pääsy IDA ICE-ohjelman kautta. Kohteiden simuloinneissa käytettiin Porin sää-tietoja, jotka otettiin ASHRAE IWEC2 tietokannasta.

Tutkittavista kohteista luotiin MagiCAD ohjelmalla IFC-tietomallit, jotka tuotiin IDA ICE-ohjelmaan. Tässä yhteydessä käytettiin yksikerroksisen pientalon esivalintaa, jolloin tietyt arvot tulivat suoraan asetuksen mukaisina. Tilojen mitta- ja vyöhyketiedot seurasivat MagiCAD:sta tuodun mallin mukana, mutta varsinaisia rakenteita ja niiden arvoja muokattiin vielä IDA ICE- ohjelmassa vastaamaan mallin pohjana olevaa rakennusta. IFC-mallin tuonnin jälkeen varmistettiin ja muokattiin materiaalien ja lämmönjohtavuus kohteiden mukaisiksi. Eri kohteiden tiedot esitetään jäljempänä tutkimuskohteiden erittelytiedoissa. Keskeisten rakennusten oletusarvojen muokkaus simulointiohjelmassa tapahtuu yleislomakesivulta avautuvassa valikossa (kuva 16). Samassa yhteydessä valitaan oletusenergiamuoto lämmitykselle, jäähdytykselle ja lämpimälle käyttövedelle. Kaikissa kohteissa energia edellisiin tuotetaan sähköllä verkon kautta, jolloin tuotannon hyötysuhde on 1.



Kuva 16. Simulointiohjelman rakennuksen oletusarvojen valikko

4 TUTKIMUSKOHTEET JA LASKENTATAPAUKSET

4.1 Tutkimuskohteet

Tutkimuksessa käytetyt mallit luotiin kolmesta olemassa olevasta rakennuksesta samalta pientaloalueelta Porissa. Rakennusalue on tiivis pientalotaajama, jonka kaikilla tonteilla on asuinrakennus. Tarkasteltavat rakennukset sijaitsevat tuuliolojen kannalta osittain suojaisessa kaupunkimaisessa ympäristössä. Rakennukset ovat kaikki yksikerroksia yhden perheen pientaloja, joissa on lämmöntalteenotolla varustettu koneellinen ilmanvaihtojärjestelmä. Kohteiden peruslämmitysjärjestelmät poikkeavat toisistaan. Simuloinnit suoritettiin perustuen päälämmitysjärjestelmän energiankulutukseen, jossa kohteissa olleita tulisijoja ja lisä lämpöpumppuja huomioitu. Taulukossa 2 on esitetty kohteiden tekniset perustiedot, joilla simuloinnit on suoritettu.

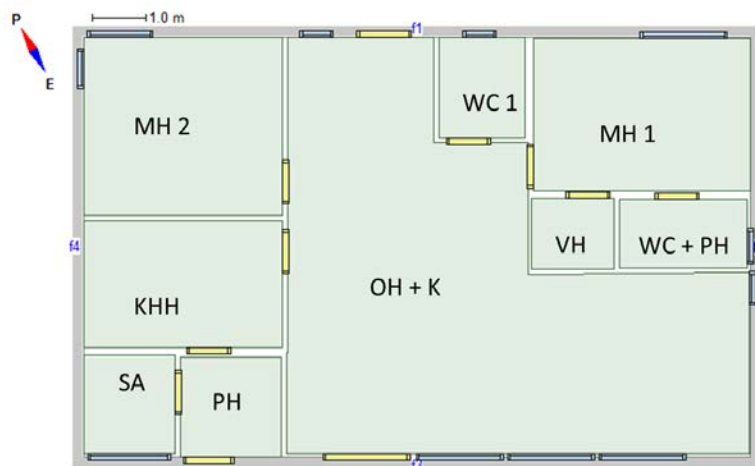
Kohteiden ilmanvaihdon tuloilma puhalletaan makuuhuoneisiin, olohuoneeseen ja saunaan. Ilman siirtyminen eri tilojen välillä tapahtuu ovien alapuolella olevien rakojen kautta. Poisto tapahtuu pesutiloista, vaatehuoneesta, WC:stä, keittiöstä ja saunasta. Keittiöistä on erillispoisto liesituulettimella, jonka käyttöä ei energiasimuloinneissa huomioitu.

Taulukko 2. Rakennusten tekniset tiedot

	Talo A	Talo B	Talo C
Rakennuksen pinta-ala [m ²]	95,9	114,5	124,6
Rakennuksen tilavuus [m ³]	268,2	296,6	382,5
Rakennuksen vaipan pinta-ala [m ²]	302,9	343,2	399,8
Ikkunoiden osuus vaipasta [%]	6,5	7,1	6,3
Mallin keskim. U-arvo [W/(m ² *K)]	0,21	0,24	0,38
Ulkoseinien U-arvo [W/(m ² *K)]	0,1	0,16	0,41
Yläpohjan U-arvo [W/(m ² *K)]	0,09	0,08	0,08
Alapohjan U-arvo [W/(m ² *K)]	0,09	0,13	0,18
Ikkunoiden U-arvo [W/(m ² *K)]	0,65	0,82	1
Ulkoovien U-arvo [W/(m ² *K)]	0,83	1	1
Lämmönjako	lattialämmitys (vesi)	lattialämmitys (sähkö)	lattialämmitys (vesi)
Päälämmöntuottotapa	maalämpö	sähkölämmitys	ilma-vesilämpöpumppu
Muu lämmöntuotto	varaava tulisija	ilmalämpöpumppu/varaava tulisija	ilmalämpöpumppu/varaava tulisija
Ilmanvaihtojärjestelmä	koneellinen tulo/poisto +LTO	koneellinen tulo/poisto +LTO	koneellinen tulo/poisto +LTO

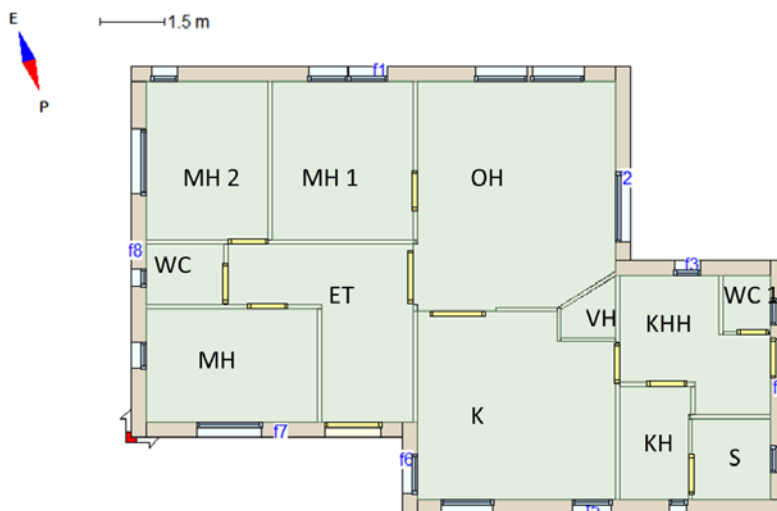
Talo A:n runko on valmistettu valamalla betoni polystyreeni harkkojen sisään. Päälämmitysjärjestelmä on maalämpö. Maalämpöpumpun lämmitysteho on 6 kW ja COP 3,1. COP arvo ilmaisee, kuinka paljon lämpöenergiaa lämpöpumpulla pystytään tuottamaan yhtä sähköverkosta otettua kWh:a kohti. Rakennuksessa on kaksi makuuhuonetta, kaksi pesuhuonetta, kodinhoitohuone, sauna, vaatehuone, keittiö ja olohuone. Keittiö ja olohuone ovat yhtenäistä tilaa. Tila on muita huoneita korkeampi ja eteläpuoleisella seinällä on suuri ikkunapinta-ala. Huoneiden sijoittelu ja rakennuksen

suuntaus ilmenee kuvasta 17. Talossa olevaa tulisijaa ei simuloinneissa huomioitu. Lämmönjako on toteutettu vesikiertoisella lattialämmityksellä. Lämpimän käyttöveden lämmityksessä käytetään maalämpöä ja sähkövastusta. Ilmanvaihdon tuloilman jälkilämmitys on kytketty vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään.



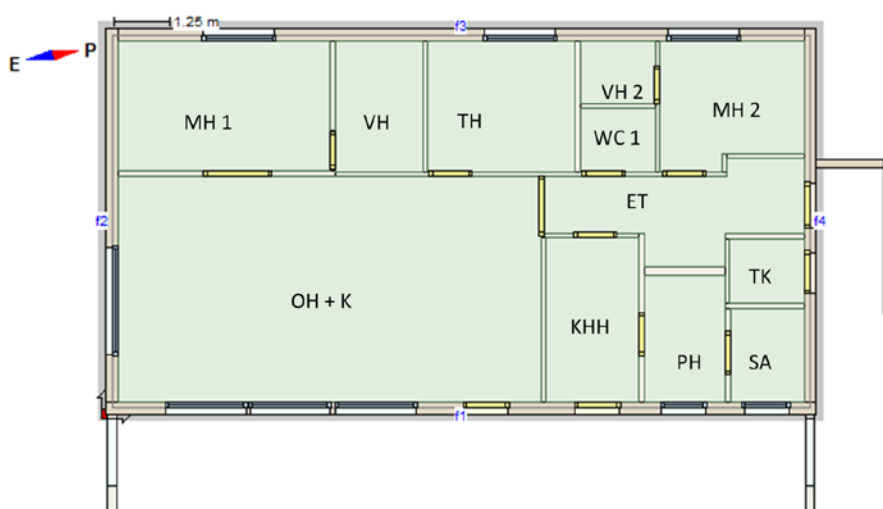
Kuva 17. Talon A simulointimallin pohjapiirustus

Rakennus B on puurunkoinen ja puuverhoiltu kolmen makuuhuoneen talo, jonka päälämmitysjärjestelmä on sähköinen lattialämmitys. Olohuoneen ja keittiön huonekorkeus on normaalia huonekorkeutta korkeampi. Suurin ikkunapinta-ala suuntautuu etelään (Kuva 18). Talossa on myös varaava uuni ja ilmalämpöpumppu, joiden vaikutusta ei simuloinneissa huomioitu. Lämmin käyttövesi tuotetaan varaajassa sähkövastuksella. Ilmanvaihdon tuloilman jälkilämmitys toteutetaan sähköllä.



Kuva 18. Talon B simulointimallin pohjapiirustus

Rakennus C on lamellihirsirakenteinen, jonka useimmat huoneet ovat normaalia (2,5 m) huonekorkeutta korkeampia. Suurin ikkunapinta-ala olohuoneessa itäseinällä (Kuva 19). Rakennus on sekä pinta-alaltaan että tilavuudeltaan tutkimuskohteista suurin. Rakennuksen päälämmitysjärjestelmänä on vesi-ilmalämpöpumppu, jolla tuotetaan myös osa käyttöveden lämmitysenergiasta. Vesi-ilmalämpöpumpun lämmitysteho oli 7,95 kW ja COP 3,62. Talossa on puulämmitteinen uuni ja lähinnä jäähdytykseen käytettävä ilmalämpöpumppu. Uunin ja ilmalämpöpumpun käyttöä ei huomioitu simuloinneissa. Ilmanvaihdon tuloilman jälkilämmitys on kytketty vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään.



Kuva 19. Talon C simulaatiomallin pohjapiirustus

4.2 Kohteiden perusasetusarvot simuloinneissa

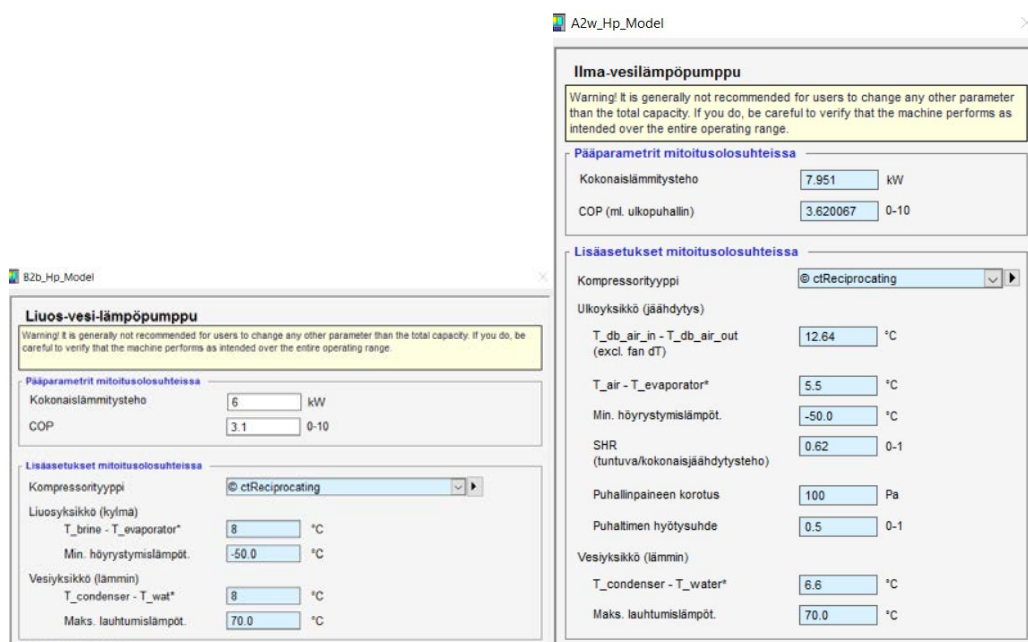
Kohteiden oletusarvot muokattiin vastaamaan todellisia rakenteita taulukon 2 mukaisesti. Rakennukset suunnattiin edellä esitettyjen pohjakuvista mukaisesti, eikä ulkopuolisia varjostavia elementtejä käytetty.

Kylmäsillat oli määritetty ohjelman alkuasetusten mukaisesti, jotka määrittyvät asetuksesta rakennusten energiatehokkuudesta. Rakennusten sisäisinä kuormina käytettiin ohjelmassa olevia pinta-alapohjaisia arvoja, jotka olivat asetuksen uuden rakennuksen energiatehokkuudesta mukaisia. Kuormat koostuivat asukkaiden kevyen aktiiviteetin toiminnasta, laitekuormista ja valaistuksen käyttöaikataulun mukaisista

kuormista. Ihmisistä kuorma oli 2 W/m^2 , valaistuksen 6 W/m^2 ja laitteiden 3 W/m^2 . (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017, 11§)

4.3 Lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmien asetusarvot simuloinneissa

Kaikkien kohteiden huoneiden huonelämpötiloiksi asetettiin 21°C ja jäähdytyksen käynnistämisen asetusarvoksi 27°C . Järjestelmien jäähdytystoiminta kytkettiin pois eikä jäähdytystarvetta huomioitu energiankulutuksessa. Lämpimän käyttöveden kulutus asetettiin kaikissa kohteissa 50 litraksi henkilöä kohti vuorokaudessa ja sen käyttöä simuloitiin tasaisen käytön mukaan kolmelle henkilölle. Ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmien jakeluverkoston häviöt asetettiin nolnaan, koska niitä ei tiedetty eikä häviöillä ollut vertailun kannalta suurta merkitystä. Kohteiden A ja C lämpöpumppujen asetusarvot olivat kuvan 20 mukaiset.



Kuva 20. Rakennusten A (vasemmalla) ja C lämpöpumppujen asetusarvot

Ilmanvaihdon tuloilman lämpötila asetettiin $+17^\circ \text{C}$ ja tulo ja poistoilmamäärät asetettiin taulukon 1 mukaisesti siten, että kokonaisilmamäärät tulo- ja poistoilmoille olivat yhtä suuret ja kaikkien huoneiden ilmamäärät olivat vähintään ohjeen mukaiset. Perustapausten ilmamäärät kohteittain olivat rakennuksissa B ja C 47 litraa tulo- ja

poistoilmaa ja kohteessa A 57 litraa. Kohteen A korkeampi ilmamäärä johtui kahdesta pesuhuoneesta.

Simuloinnit suoritettiin ilmanvaihtokoneen asetusarvoja muuttamalla seuraavasti. Simuloinneissa käytettiin oletusilmanvaihtokonetta, johon vaihdettiin muuttujien arvot tuloilman lämpötilahyötysuhteeseen, enimmäispaineenkorotukseen ja jäteilman alimpaan ulospuhalluslämpötilaan. Ylin paineenkorotus puhaltimissa asetettiin 240 Pascaliin ja alin jäteilman ulospuhalluslämpötila -2 Celsius-asteeseen.

Ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilahyötysuhdesuhde oli perustapauksissa 0,75. Tutkittaessa hyötysuhteen vaikutusta energiankulutukseen lämmöntalteenoton tuloilman lämpötilasuhteen arvoina käytettiin 0,60; 0,70; 0,80. Saatuja energiakulutuksia verrattiin perustapaukseen. Vertailuissa ilmanvuotoluku asetettiin kaikissa tapauksissa 1,0 m³/h neliometriä kohden ja ilmamäärät pidettiin taulukon 1 ohjearvojen mukaisina.

Tutkittaessa ilmanvaihdon määrän vaikutusta energiankulutukseen, korotettiin huonekohtaisesti määriteltyjä tulo- ja poistoilmavirtoja 20 ja 30 prosentilla. Aikataulutettua ilmanvaihdon pudotuksen vaikutusta energiankulutukseen pudotettiin ilmanvaihdon tulo- ja poistoilmavirtojen määrää 60 prosenttia kello 8.00 ja 16.00 välillä, jolloin ilmamäärät rakennuksissa lähellä alinta hyväksyttävää tasoa.

4.4 Vuotoilman simulointi rakennuksissa

Vuotoilman vaikutusta simuloitiin ohjelmalla asettamalla perustapauksen ilmavuotoluku (q_{50}) arvoon 1,0 m³/h ulkovaipan neliometriä kohti laskettuna rakennuksen kokonaissisämittojen mukaan (Kuva 21). Vuotoreittejä ei määritelty ja simulointi perustui keskimääräiseen ilmavuotoon. Ilmanpitävyys oli perustapauksessa 50 Pascalin paineerolla 0,27778 l/s ulkovaipan nelimetriä kohti. Ilmamäärät pidettiin alkuperäisten asetusten mukaisina ja ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilahyötysuhde 0,75:ssä. Ilmanvuotolukua muutettiin simulaatioissa variaatioissa arvoihin 0,3; 2,0 ja 4,0 m³/h ulkovaipan neliometriä kohti. Seinien painekertoimina käytettiin ohjelman oletusarvoja, jotka perustuivat osittain suojaamattomaan ympäristöön.

Vuotoilma

Menetelmä

Vuotoilmayksiköt ▼

☉ Tuulesta johtuva ilmavirta

Ilmatiiviyys m3/(h.m2 ulkovaippa)

paine-erolla Pa
[Painekertoimet](#)

○ Vakio vuotoilmavirta

Vuotoilmavirta m3/(h.m2 ulkovaippa)

Jakautuminen vyöhykkeissä

Jaa suhteessa ▼

Tuulesta johtuva ilmap

Ilmanpitävyys (vyöhykkeessä) L/(s.m2 ulkovaippa)

paine-erolla Pa

Vakio vuotoilmavirta

Vakiovuotoilmavirta L/(s.m2 ulkovaippa)

Rakennuksen vuotoilma voidaan mallintaa joko todellisen tuulen paineen tai vakiovuotoilmavirran avulla.

Vakiovuotoilmavirran tapauksessa valitse Vakiovuotoilmavirta ja syötä sille arvo.

Tuulesta riippuvan vuotoilmavirran tapauksessa valitse Tuulen paineesta riippuva vuotoilmavirta, aseta rakennuksen vaipan ilmatiiviyys ja [anna ulkopintojen painekertoimet](#). Sisäiset vuotoilmareitit vyöhykkeiden välillä tulee määrittellä erikseen. Lisää ovet tai sisäseinien vuotoilma-aukot.

Vuotoilmadata päivittyy automaattisesti vyöhykkeille ja korvaa sen hetkisen vyöhykkeen "Vuoto-alan ...". Kuitenkaan erikseen määritellyjä pintojen vuotoja ei korvata.

ACH = ilmanvaihtuvuus (huonetilavuus tunnissa)

Kuva 21. Vuotoilman määrittely IDA ICE-ohjelmalla

5 SIMULOINTIEN TULOKSET, ENERGIANKULUTUS JA HIILIJALANJÄLKI

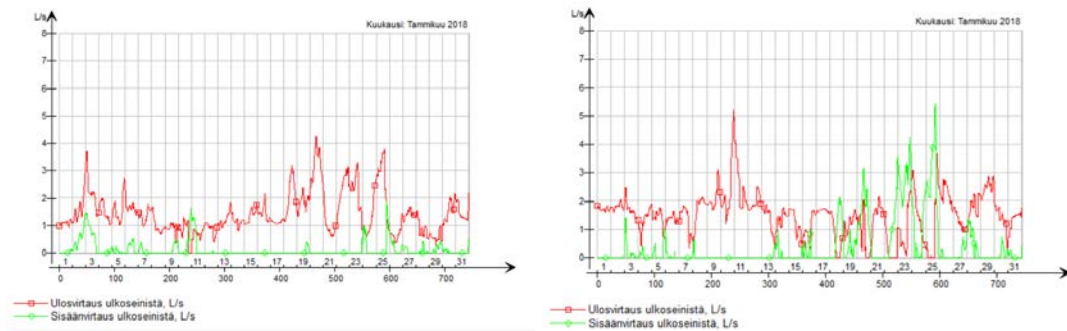
5.1 Yleistä tuloksista

Laskennan tuloksina saatiin järjestelmien energiamäärät tilalämmitykselle, tilajäähdytykselle, ilmanvaihtokoneen lämmitykselle ja lämpimälle käyttövedelle. Tuloksissa tarkastelu kohdistui kiinteistösähkön ostoenergiakulutuksen vertailuun eri variaatioissa ja kuluttajalaitteiden osuutta ei huomioitu. Rakennusten simuloinnin vuotuista energiankulutusta verrattiin perustapaukseen.

Ostoenergia määrä muunnettiin vastaamaan tuotettua hiilidioksidi määrää sähkötuotannon päästökertoimella 164 kgCO₂-ekv/MWh. Samoin kuin energiankulutuksessa, vertailutapauksen ja perustapauksen hiilidioksidimäärän erotuksesta saatiin muutetun tekijän vaikutus CO₂-päästöihin hiidioksiekvivalentteina.

5.2 Ilmanvaihdon ja vuotoilman yhteisvaikutus

Vuotoilman ja koneellisen ilmanvaihdon yhteisvaikutuksesta tilojen painetaso vaihtelee. Sanaikaisesti voi eri puolilla rakennusta olla eri suuntaista vuotoa ulkoseinärakenteen läpi. Simulointituloksista esimerkkinä tähän on valikoitu rakennuksen B keittiön ja olohuoneen ulkoseinien vuotoilmakaavio tammikuulta (kuva 22). Ilman ulosvirtaus keittiössä vaihtelee 0 ja 4,3 l/s välillä ja olohuoneessa 0 ja 5,2 välillä. Ilman sisäänvirtaus vaihtelee 0 ja 1,9 l/s välillä ja olohuoneessa 0 ja 5,3 l/s välillä. Olohuoneessa koneellinen tuloilma on 20 l/s ja keittiön poistoilma 8 l/s.

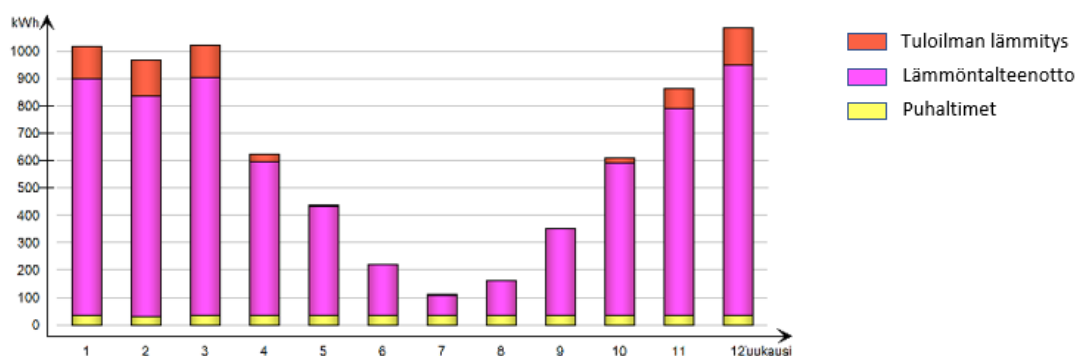


Kuva 22. Ulos- ja sisäänvirtaus keittiön (vasemmalla) ja olohuoneen ulkoseinistä rakennuksessa B tammikuussa ilmantiivisyysluvulla (q_{50}) $1,0 \text{ m}^3/\text{h m}^2$

Vaikutusta energiakulutuksen tuloksiin vuotojen ja ilmanvaihdon yhteyttä ei tarkemmin analysoitu. Kuvaajista voi kuitenkin helposti päätellä, että asialla on merkitystä myös lämpötaseeseen, kun ilma virtaa seinien läpi sisään ja ulos.

5.3 Rakennus A

Ilmanvaihtokoneen kuukausittainen energiajakauma on perustapauksessa kuvan 22 mukainen. Lämmöntalteenoton osuus on 6450 kWh ja jälkilämmitetyn tuloilman energiankulutus 623 kWh vuodessa. Puhaltimien energiankulutus on 426 kWh vuodessa. Ostoenergian osuus kuvassa koostuu palkkien ylä- ja alaosista, keskiosan kuvatessa poistoilmasta talteen otettua ilmaisenergiaa. Ilmanvaihdon tuloilman (17°C) lämmittäminen huonelämpötilaan (21°C), vaatii lisäksi huonetiloissa tapahtuvan lämmityksen.



Kuva 22. Kohteen A ilmanvaihtokoneen energiajakauma perustapauksessa

Kohteen A vertailutilanteen perusilmanvaihdon taso oli tulo- ja poistoilmalle 57 l/s. Perusasetusarvoilla ilmanvaihtokoneen vuotuinen hyötysuhde oli 73%.

Kiinteistösähkön ostoenergian kulutus vuodessa oli vertailutilanteessa 5151 kWh, joka aiheutti 845 kgCO₂-ekv vuotuisen hiilidioksidipäästön sähköntuotannon keskimääräisellä 164 kgCO₂-ekv/MWh päästöarvolla. Koneellisen ilmanvaihdon jatkuva tehostaminen yhdellä prosentilla lisäsi ostoenergian kulutusta keskimäärin 15,3 kWh:lla vuodessa. Esimerkiksi 20 prosentin lisäys ilmamääriin aiheutti ostoenergian 307 kWh:n hiilidioksidipäästöjen 50 kgCO₂-ekv:n lisäyksen hiilidioksidipäästöihin vuodessa (Taulukko 3).

Taulukko 3. Rakennuksen A ilmanvaihdon ilmamäärien muutoksen vaikutus ostoenergiankulutukseen ja hiilidioksidipäästöihin vuodessa

	Kiinteistösähkö ostoenergia [kWh/a]	Ero lähtötilaan [kWh/a]	Suhteellinen ero [%]	Kiinteistösähkö ostoenergia [(kWh/m ²)/a]	Hiilidioksidipäästöjen muutos [kgCO ₂ -ekv/a]
Vertailutilanne	5151			53,7	
Koneellinen ilmanvaihto +20%	5458	307	6,0	56,9	50
Koneellinen ilmanvaihto +30%	5611	460	8,9	58,4	75
Aikataulutettu ilmanvaihdon vähennys	4889	-262	-5,1	50,9	-43

Pienentämällä ilmanvaihtoa 60 prosentilla maanataista perjantaihin kello 8.00 – 16.00 rakennuksen kokonaisostoenergian määrä väheni 262 kWh vuodessa, jolloin CO₂ päästö supistuu 43 kgCO₂-ekv.

Ilmavuotoluku oli vertailutilanteessa 1,0 m³/h ulkovaipan neliometriä kohden. Ilmavuodon kasvaminen vertailutasoon nähden 100 %:lla lisäsi ostoenergiankulutusta 212

kWh ja hiilidioksidipäästöä 34 kgCO₂-ekv vuodessa. Ilmavuotoluvulla (q₅₀) 4,0 lisäykset olivat 606 kWh ja 100 kgCO₂-ekv. Ilmavuodon vähentäminen arvoon (q₅₀) 0,3 leikkasi ostoenergiankulutusta 134 kWh hiilidioksidipäästöjä 21 kgCO₂-ekv vuodessa (Taulukko 4).

Taulukko 4. Rakennuksen A ilmavuodon vaikutus ostoenergiankulutukseen ja hiilidioksidipäästöihin vuodessa

Ilmanvuotoluku q ₅₀ [m ³ /h m ²]	Kiinteis- tösähkö os- toenergia [kWh/a]	Ero läh- töta- soon [kWh/a]	Suh- teelli- nen ero [%]	Kiinteis- tösähkö os- toenergia [(kWh/m ²)/a]	Hiilidi- oksi- päästö- jen muu- tos [kgCO ₂ - ekv/a]
Vertailulähtötilanne q ₅₀ = 1,0	5151			53,7	
q ₅₀ = 0,3	5019	-132	-2,6	52,3	-21
q ₅₀ = 2,0	5362	212	4,2	55,9	34
q ₅₀ = 4,0	5757	606	11,3	60,0	100

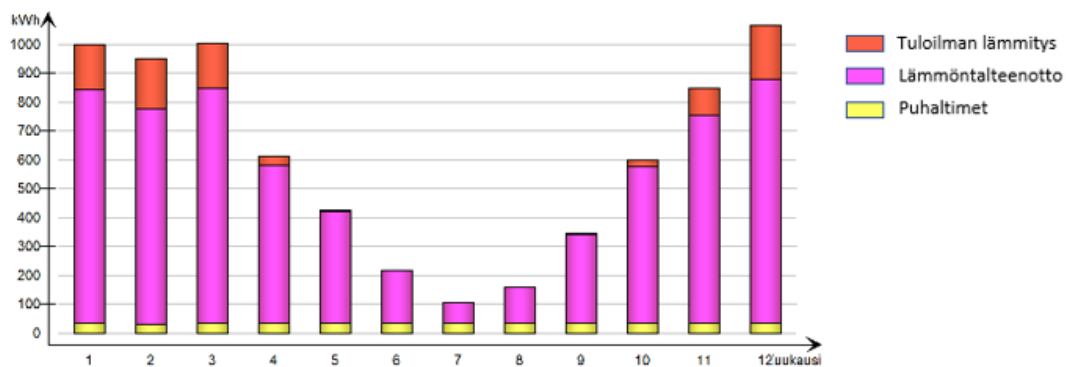
Ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilasuhteen parantaminen 0,75:stä 0,80:en vähensi ostoenergian kulutusta 102 kWh vuodessa. Vertailutasoa huonommilla, 0,60 ja 0,70 suhteilla, ostoenergian kulutus kasvoi 431 kWh ja 128 kWh sekä CO₂-ekv tuotto 71 kg ja 21 kg vuodessa (Taulukko 5).

Taulukko 5. Rakennuksen A ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilasuhteen muutoksen vaikutus vuotuisen ostoenergiankulutukseen ja hiilijalanjälkeen

IV-koneen tuloilman lämpötilahyötysuhde	Kiinteistösähkö ostoenergia [kWh/a]	Ero lähtötasoon [kWh/a]	Suhteellinen ero [%]	Kiinteistösähkö ostoenergia [(kWh/m ²)/a]	Hiilidioksidipäästöjen muutos [kgCO ₂ -ekv/a]
Vertailulähtötilanne (0,75)	5151			53,7	
0,60	5582	431	8,4	58,1	71
0,70	5279	128	2,5	55,0	21
0,80	5049	-102	-2,0	52,6	-17

5.4 Rakennus B

Ilmanvaihtokoneen kuukausittainen energiajakauma on perustapauksessa kuvan 23 mukainen. Lämmöntalteenoton kokonaisenergiamäärä on 6085 kWh ja jälkilämmitetyn tuloilman energiankulutus 829 kWh vuodessa. Puhaltimien energiankulutus on 418 kWh. Ostoenergian jakautuminen ja lisälämmityksen tarve määräytyy samoin perusteiden kuin kohteessa A.



Kuva 23. Kohteen B ilmanvaihtokoneen energiajakauma perustapauksessa

Kohteen B vertailutilanteen perusilmanvaihdon taso oli tulo- ja poistoilmalle 47 l/s. Kiinteistösähkön ostoenergian kulutus oli vertailutilanteessa 13 593 kWh vuodessa,

joka aiheutti 2229 kgCO₂-ekv hiilidioksidipäästön sähköntuotannon keskimääräisellä 164 kg/MWh päästöarvolla.

Koneellisen ilmanvaihdon jatkuva tehostaminen yhdellä prosentilla lisäsi ostoenergian kulutusta keskimäärin 38,0 kWh:lla vuodessa. Esimerkiksi 20 prosentin lisäys ilmamääriin aiheutti 759 kWh:n lisäyksen kiinteistösähkön ostoenergiankulutukseen ja 124 kgCO₂-ekv lisäyksen hiilidioksidipäästöihin vuodessa (Taulukko 6).

Taulukko 6. Rakennuksen B ilmanvaihdon ilmamäärien muutoksen vaikutus ostoenergiankulutukseen ja hiilidioksidipäästöihin vuodessa

	Kiinteistösähkö ostoenergia [kWh/a]	Ero lähtötasoon [kWh/a]	Suhteellinen ero [%]	Kiinteistösähkö ostoenergia [(kWh/m ²)/a]	Hiilidioksidipäästöjen muutos [kgCO ₂ -ekv/a]
Vertailu lähtötalanne	13593			119,8	
Koneellinen ilmanvaihto +20%	14352	759	5,6	126,4	124
Koneellinen ilmanvaihto +30%	14735	1142	8,4	129,8	187
Aikataulutettu ilmanvaihdon vähennys	12914	-679	-5,0	113,8	-111

Pientämällä ilmanvaihtoa 60 prosentilla maanataista perjantaihin kello 8.00 – 16.00 rakennuksen kokonaisostoenergian määrä väheni 679 kWh vuodessa, jolloin CO₂ päästö supistui 111 kgCO₂-ekv vuodessa. Tilalämmityksen osuus vähentyneestä energiankulutuksesta oli 550 kWh.

Ilmavuodon kasvaminen vertailutasosta (q_{50}) 1,0 m³/hm² 100 %:lla lisäsi ostoenergiankulutusta 397 kWh ja hiilidioksidipäästöjä 65 kgCO₂-ekv vuodessa. Ilmavuotoluvulla 4,0 m³/hm² lisäykset olivat 1248 kWh ja 204 kgCO₂-ekv vuodessa. Ilmavuodon vähentäminen arvoon q_{50} 0,3 m³/hm² leikkasi ostoenergiankulutusta 147 kWh ja vähensi hiilidioksidipäästöjä 24 kgCO₂-ekv vuodessa (Taulukko 7).

Taulukko 7. Rakennuksen B ilmapuodon vaikutus ostoenergiankulutukseen ja hiilidioksidipäästöihin vuodessa

Ilmanpitävyys [m ³ /hm ²]	Kiinteis- tösähkö os- toenergia [kWh/a]	Ero läh- tötasoon [kWh/a]	Suh- teelli- nen ero [%]	Kiinteis- tösähkö os- toenergia [(kWh/m ²)/a]	Hiilidi- oksidi- päästö- jen muutos [kgCO ₂ - ekv/a]
Vertailulähtö- tilanne q ₅₀ = 1,0	13593			119,8	
q ₅₀ = 0,3	13446	-147	-1,1	118,5	-24
q ₅₀ = 2,0	13990	397	2,9	123,3	65
q ₅₀ = 4,0	14841	1248	9,2	130,8	204

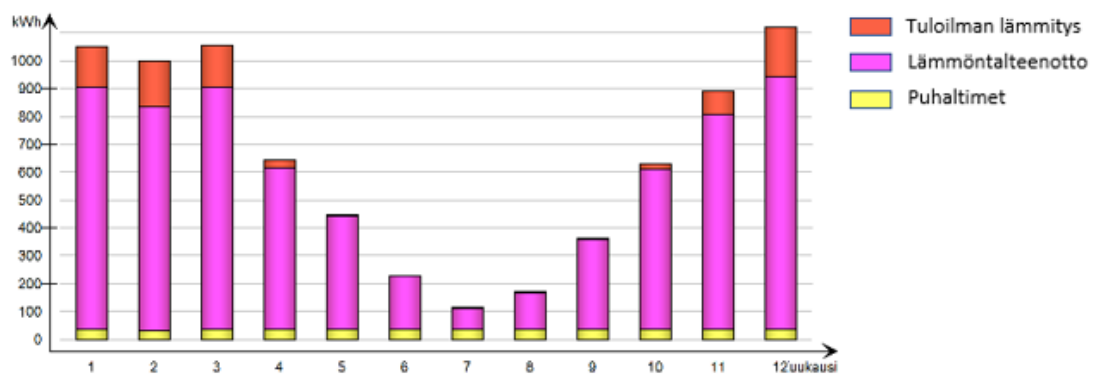
Ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilasuhteen parantaminen 0,75:stä 0,80:en vähensi ostoenergian kulutusta 221 kWh vuodessa. Vertailutasoa huonommilla, 0,60 ja 0,70 suhteilla, ostoenergian kulutus kasvoi 926 kWh ja 267 kWh vuodessa sekä CO₂ tuotto 152 kgCO₂-ekv ja 48 kgCO₂-ekv vuodessa (Taulukko 8).

Taulukko 8. Rakennuksen B ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilasuhteen muutoksen vaikutus vuotuisen energiankulutukseen ja hiilijalanjälkeen

IV-koneen tu- loilman lämpö- tilahyötysuhde	Kiinteis- tösähkö os- toenergia [kWh/a]	Ero läh- tötasoon [kWh/a]	Suh- teelli- nen ero [%]	Kiinteis- tösähkö os- toenergia [(kWh/m ²)/a]	Hiilidi- oksidi- päästö- jen muutos [kgCO ₂ - ekv/a]
Vertailulähtö- tilanne (0,75)	13593			119,8	
0,60	14519	926	6,8	127,9	152
0,70	13860	267	2,0	122,1	44
0,80	13372	-221	-1,6	117,8	-36

5.5 Rakennus C

Ilmanvaihtokoneen kuukausittainen energiajakauma on perustapauksessa kuvan 24 mukainen. Lämmöntalteenoton kokonaisenergiamäärä on 6506 kWh ja jälkilämmitetyn tuloilman energiankulutus 777 kWh vuodessa. Puhaltimien energiankulutus on 431 kWh. Ostoenergian jakautuminen ja lisälämmityksen tarve määräytyy samoin perustein kuin kohteessa A.



Kuva 24. Kohteen C ilmanvaihtokoneen energiajakauma perustapauksessa

Kohteen C vertailutilanteen perusilmanvaihdon taso oli tulo- ja poistoilmalle 57 l/s. Kiinteistösähkön ostoenergian kulutus vuodessa oli vertailutilanteessa 8721 kWh, joka aiheutti vuodessa 1430 kgCO₂-ekv hiilidioksidipäästön sähköntuotannon keskimääräisellä 164 kg/MWh päästöarvolla.

Koneellisen ilmanvaihdon jatkuva tehostaminen yhdellä prosentilla lisäsi ostoenergian kulutusta keskimäärin noin 14,5 kWh:lla vuodessa. Esimerkiksi 20 prosentin lisäys ilmamääriin aiheutti 289 kWh:n lisäyksen tilalämmityksen energiankulutukseen ja 47 kgCO₂-ekv/a lisäyksen hiilidioksidipäästöihin (Taulukko 9).

Taulukko 9. Rakennuksen C ilmanvaihdon ilmamäärien muutoksen vaikutus ostoenergiankulutukseen ja hiilidioksidipäästöihin vuodessa

	Kiinteistö­sähkö os- toenergia [kWh/a]	Ero läh- tötasoon [kWh/a]	Suh- teelli- nen ero [%]	Kiinteis- tösähkö os- toenergia [(kWh/m ²)/a]	Hiilidi- oksidi- päästö- jen muu- tos [kgCO ₂ - ekv/a]
Vertailulähtötilanne	8721			69,8	
Koneellinen il- manvaihto +20%	9010	289	3,3	72,1	47
Koneellinen il- manvaihto +30%	9156	435	5,0	73,2	71
Aikataulutettu ilmanvaihdon vähennys	8461	-260	-3,0	67,7	-43

Ilmavuodon kasvaminen vertailutasosta (q_{50}) 1,0 m³/hm² 100 %:lla lisäsi ostoenergiankulutusta 166 kWh ja hiilidioksidipäästöjä 27 kgCO₂-ekv vuodessa. Ilmavuotolu-
vulla q_{50} 4,0 lisäykset olivat 561 kWh ja 92 kgCO₂-ekv vuodessa. Ilmavuodon vähen-
täminen arvoon 0,3 kgCO₂-ekv leikkasi ostoenergiankulutusta 111 kWh ja vähensi
hiilidioksidipäästöjä 18 kgCO₂-ekv vuodessa (Taulukko 10).

Taulukko 10. Rakennuksen C ilmavuodon vaikutus ostoenergiankulutukseen ja hiilidioksidipäästöihin vuodessa

	Kiinteis- tösähkö os- toenergia [kWh/a]	Ero läh- tötasoon [kWh/a]	Suhteel- linen ero [%]	Kiinteis- tösähkö os- toenergia [(kWh/m ²)/a]	Hiilidi- oksidi- päästö- jen muutos [kgCO ₂ - ekv/a]
Vertailulähtötilanne $q_{50} = 1,0$	8721			69,8	
$q_{50} = 0,3$	8610	-111	-1,3	68,9	-18
$q_{50} = 2,0$	8887	166	1,9	71,1	27
$q_{50} = 4,0$	9282	561	6,4	74,3	92

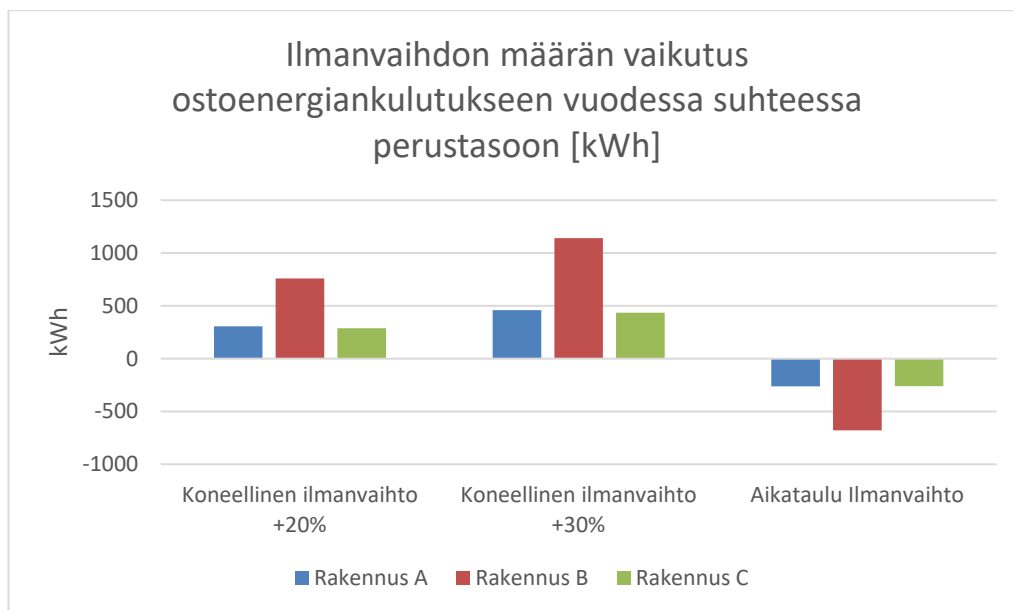
Ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilasuhteen parantaminen 0,75:stä 0,80:en vähensi ostoenergian kulutusta 103 kWh vuodessa. Vertailutasoa huonommilla, 0,60 ja 0,70 suhteilla, ostoenergian kulutus kasvoi 440 kWh ja 134 kWh sekä CO₂ tuotto 72 ja 22 kgCO₂-ekv (Taulukko 11).

Taulukko 11. Rakennuksen C ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilasuhteen muutoksen vaikutus vuotuiseseen energiankulutukseen ja hiilijalanjälkeen

IV-koneen tuloilman lämpötilahyötysuhde	Kiinteistösähkö ostoenergia [kWh/a]	Ero lähtötasoon [kWh/a]	Suhteellinen ero [%]	Kiinteistösähkö ostoenergia [(kWh/m ²)/a]	Hiilidioksidipäästöjen muutos [kgCO ₂ -ekv/a]
Vertailulähtötilanne (0,75)	8721			69,8	
0,60	9161	440	5,0	73,3	72
0,70	8855	134	1,5	70,8	22
0,80	8618	-103	-1,2	68,9	-17

5.6 Tulosten vertailu kohteiden välillä

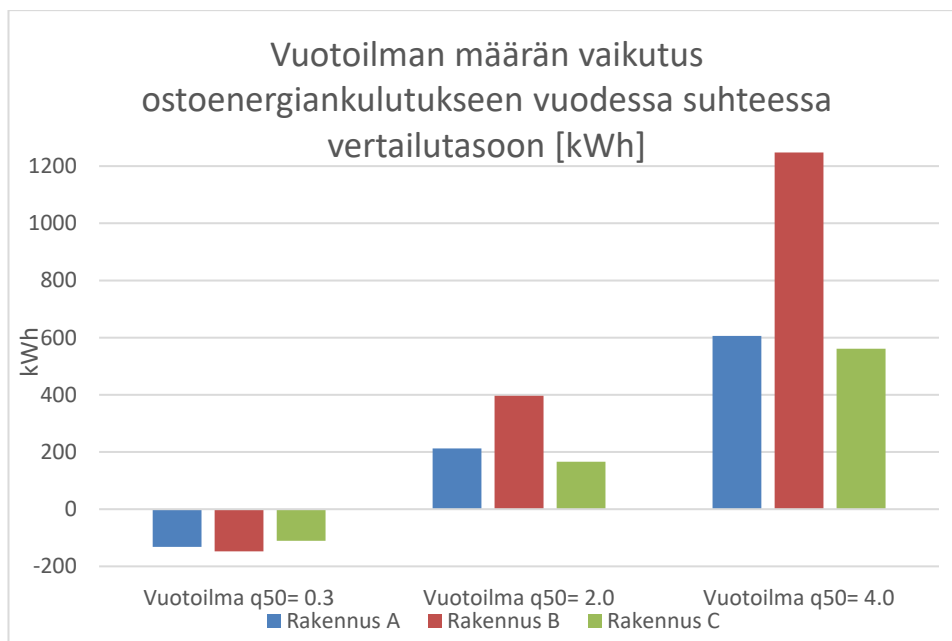
Edellisen luvun taulukkoista (taulukot 3, 6 ja 9) havaitaan, että ostoenergian suhteellinen osuus kasvoi eniten kohteessa A. Lisäys oli 8,9 prosenttia, ilmanvaihdon ilmamäärien kasvaessa 30 prosenttia. Kuvasta 25 nähdään, että rakennuksen C oli kWh:na mitattuna lähes yhtä suurta. Kohteen A perustapauksen kiinteistösähkön ostoenergian kulutus 5151 kWh oli tutkittujen rakennusten pienin. Korkein energiakulutuksen kasvu oli kohteessa B. Ilmamäärien kasvaessa 30 % ostoenergiankulutus kasvoi 1016 kWh (Kuva 25).



Kuva 25. Ilmanvaihdon tehostuksen vaikutus ostoenergian määrään vuodessa

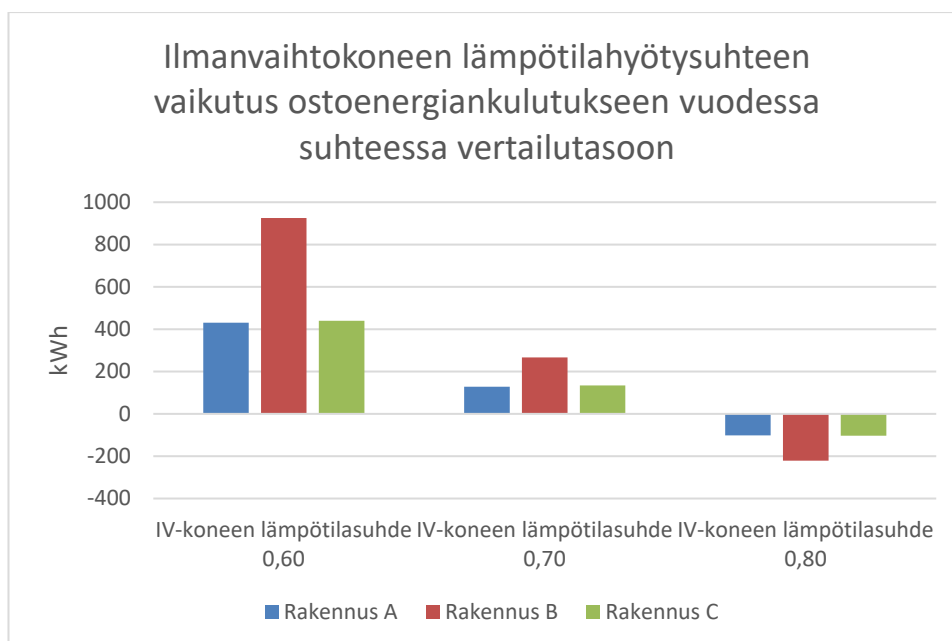
Ilmanvaihdon ilmamäärien pienentämisellä käyttöaikataulun mukaan voidaan ostoenergian määrää pienentää. Suurin säästö saavutetaan suoraa sähkölämmitystä käyttävässä kohteessa (kuva 25).

Vuotoilman määrän muutoksella vaikutukset olivat merkittäviä vuodon kasvaessa. Energiankulutus muuttui lähes samassa suhteessa vuodon kanssa. Tiiviimmällä rakenteella erot kohteiden välillä olivat energiamäärissä varsin pienet. Suhteellisesti eniten tiiviimmästä rakenteesta hyötyi kohde A. Vuodon kasvaessa eniten ostoenergiaa joutuu käyttämään rakennus B (Kuva 26).



Kuva 26. Vuotoilmamäärän muutoksen vaikutus ostoenergiankulutukseen vuodessa

Lämmöntalteenotosta suurin hyöty on kohteessa, jonka lämmitykseen käytettävä ostoenergian määrä on suurin. Lämpöpumppua käyttävissä kohteissa vaikutus on vuodessa jokseenkin yhtä suuri (Kuva 27).



Kuva 27. Ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilahyötysuhteen muutoksen vaikutus ostoenergiankulutukseen vuodessa

5.7 Vaikutukset hiidioksidipäästöihin

Tehtyjen toimenpiteiden vaikutuksen arviointi hiilidioksidipäästöihin on mielekästä ulottaa pidemmälle aikajaksolle kuin vuodeksi. Tehdyt ratkaisut voi ulottaa periaatteessa koko rakennuksen elinkaaren mittaiseksi. Tässä työssä tarkastelujakso asetettiin viideksikymmeneksi vuodeksi, jota voitaneen pitää sopivana pientalon hiilijalanjäljen tarkastelujaksona.

Taulukossa 12 on esitetty eri simulointien tulokset suhteessa vertailutasoon, kun ilmamäärät olivat kohteittain aiemmin esitettyjen mukaiset. Vuotoilma oli vertailutasossa ilmatiiviysluvulla (q_{50}) ilmaistuna $1,0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ja ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton tuloilmasuhde oli 0,75.

Taulukko 12. Vaihtoehtojen vaikutus $\text{kgCO}_2\text{-ekv}$ 50 vuodessa suhteessa vertailutasoon

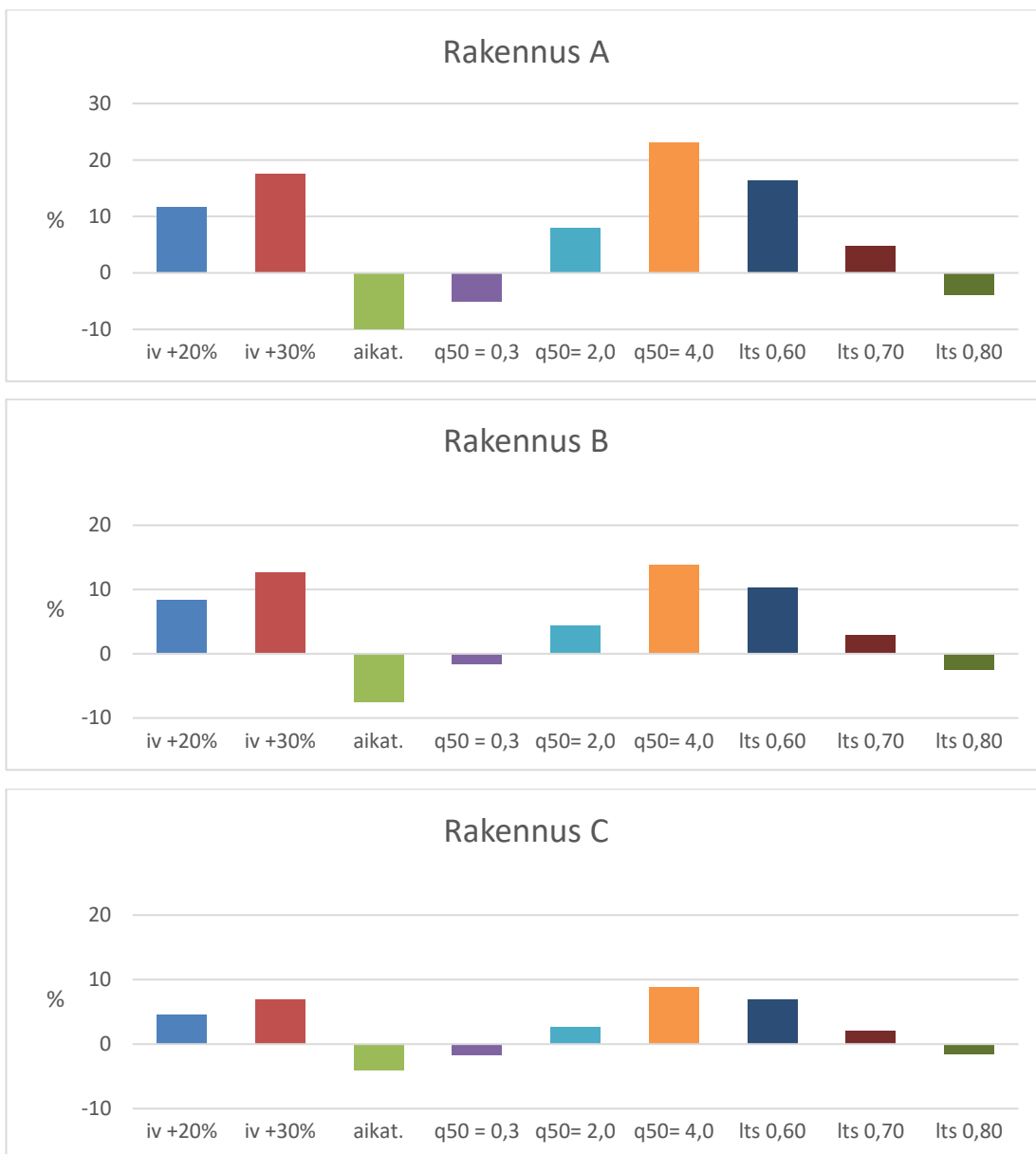
	Talo A	Talo B	Talo C
Koneellinen ilmanvaihto +20%	2517	6224	2370
Koneellinen ilmanvaihto +30%	3772	9364	3567
Ilmanvaihdon vähennys 8 -16	-2148	-5568	-2132
Vuotoilma $q_{50}= 0.3$	-1082	-1208	-906
Vuotoilma $q_{50}= 2.0$	1741	3255	1361
Vuotoilma $q_{50}= 4.0$	4970	10230	4603
IV-koneen tuloilman lämpötila-hyötysuhde 0,60	3530	7589	3604
IV-koneen tuloilman lämpötila-hyötysuhde 0,70	1050	2189	1101
IV-koneen tuloilman lämpötila-hyötysuhde 0,80	-836	-1814	-845

Tuloksissa korostuu edelleen lämmitystavan osuus. Lämpöpumpun käyttö kohteissa A ja C vaikuttaa merkittävästi tuloksiin, kun niitä verrataan kohteen C vastaaviin arvoihin.

Vertailu koko rakennuksen CO₂-päästöihin suhteuttaa tuloksia paremmin ymmärrettäväksi. Kohteista laskettiin materiaalien hiilijalanjälki Satakunnan ammattikorkeakoulun Vähä0-hankkeessa (Tulevaisuuden rakentaminen 2019). Seuraavassa on muutama esimerkki, joiden avulla energiankäytön vaikutusta voi suhteuttaa materiaalien aiheuttamiin CO₂-päästöihin. Materiaalien CO₂-päästöt on poimittu rakennuksista luoduista kohdekorteista (Liite 1-3).

Rakennuksessa A koko rakennuksen materiaalien hiilidioksidipäästöt ovat 17 906 kgCO₂-ekv, josta esimerkiksi alapohjan osuus on 8316 kgCO₂-ekv. Simuloinneissa heikoimman hyötysuhteen omaavan ilmanvaihtokoneen energiankulutuksen tuottama hiilidioksidipäästön ero suhteessa vertailutasoon on vuodessa 71 kgCO₂-ekv ja 50 vuodessa 3530 kgCO₂-ekv. Rakennuksen B vuotoilmamäärän kaksinkertaistaminen suhteessa vertailutasoon lisää hiilidioksidipäästöjä 50 vuoden aikana 3 255 kgCO₂-ekv. Se on noin kolmannes koko alapohjan rakennusmateriaalien hiilidioksidipäästöistä, jotka ovat 9 449 kgCO₂-ekv. Rakennuksen C ilmanvaihdon kasvattaminen 30 % lisää CO₂ kuormaa 3567 kgCO₂-ekv 50 vuoden aikana. Se on 65 % alapohjan materiaalien CO₂ päästöistä, jotka ovat 5 450 kgCO₂-ekv. Rakennuksen hirsirakenteinen runko toimii elinkaaren ajan hiilidioksidia varastoivana rakenteena.

Vaikutusta hiilijalanjälkeen suoritettiin myös vertaamalla eri vaihtoehtoja suhteessa yhteen ostoenergian merkittävään osatekijään. Eri tekijöiden suhteellinen vertailu rakennusten tilojen lämmityksen aiheuttamaan hiilijalanjälkeen on esitetty seuraavalla sivulla olevassa kuvassa prosentiosuuksina (kuva 27). Suhteellisesti eniten hajontaa oli kohteessa A, jonka perustapauksen tilalämmityksen hiilijalanjälki oli 50 vuodessa 21 557 kgCO₂-ekv. Kohteen B hajonta oli jonkin verran pienempi, mutta perustapauksen tilalämmityksen vertailutaso 74378 kgCO₂-ekv 50 vuodessa, johti merkittävästi suurempiin kokonaismääriin absoluuttisissa päästöissä (ks. taulukko 12). Pienintä suhteellinen vaihtelu oli kohteessa C, jonka perustapauksen tilalämmityksen hiilijalanjälki oli 50 vuodessa 52 235 kgCO₂-ekv. Kohde C oli tilavuudeltaan suurin ja vaipan lämmöneristävyydeltään heikoin, mutta vähän ostoenergiaa kuluttava lämmitysmuoto kompensoi vaikutuksia hiilijalanjäljen suhteen.



Kuva 27. Eri simulointitapausten vertailu suhteessa rakennusten vertailutilanteen tilalämmityksen hiilidioksidipäästöihin.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET

Pitkän aikavälin tarkastelu osoittaa, että ilmanvaihdon lämmöntalteenoton hyötysuhteella ja vuotoilman määrällä on huomattava vaikutus energiankulutukseen ja rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Vertailutaso oli valittu vastaamaan nykyaikaisen pientalon tyypillisiä arvoja ilmanvaihtokoneen ja vuotoilman osalta. Heikoimmat vertailutapaukset, joissa ilmanvaihtokoneen tuloilman lämmöntalteenoton vuotuinen hyötysuhde oli 0,60 tai vuotoilman (q_{50}) arvo $4,0 \text{ m}^3/\text{h m}^2$ aiheuttavat huomattavat lisäykset energiankulutukseen ja CO_2 -päästöihin rakennuksen elinkaaren aikana, kun niitä verrataan simulointien parhaimpiin tapauksiin (taulukko 12 ja kuva 27).

Koska ilmanvaihdon käyttämän energia tuotettiin kohteissa suoraan sähköllä tai sähköä käyttävillä lämpöpumpuilla, hiilijalanjälki on riippuvainen sähkön tuotannossa syntyneistä hiilidioksidipäästöistä. Sähköä tuotetaan tavoilla, joiden päästöt vaihtelevat huomattavasti. Yksinkertainen tapa asumisen hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen olisi tietenkin vähentää sähkön keskimääräistä päästöä. Tässä opinnäytetyössä tavoitteena ei ollut tuotantotapojen vertailu, joten tarkastelussa päädyttiin käyttämään Suomen keskimääräistä CO_2 päästöä megawattituntia kohti, joka on 164 kg/MWh-ekv .

Suoritetuilla simulaatioilla saatiin tuloksia, jotka olivat ennakko odotusten mukaisia. Ilmanvaihdon määrän lisääminen nostaa suorassa suhteessa energiankulutusta. Suuruus kuitenkin vaihteli kohteissa, koska tuloilman lämmitykseen käytettiin kahdessa kohteessa apuna vähemmän ostoenergiaa käyttäviä lämpöpumppuja. Samasta syystä vaikutukset ilmanvaihdon ilmavirtojen lisäyksestä aiheuttavat eri suuruisen hiilijalanjäljen. Ilmanvaihdon rajoittaminen alle suositusten ei kuitenkaan ole oikea tapa asumisen energiankulutuksen pienentämiseksi. Simuloinnilla yksinkertaista rakennuksen käyttöaikatauluun perustuvaa tapausta eri kohteissa havaittiin, että energiankulutuksen vähennyksiin voidaan päästä myös pientaloissa. Rakennusten käyttöön perustuvan ohjausteknologian kehittymisen voi vähentää energiankulutusta. Käytön tulisi olla kuitenkin helppoa ja kustannuksiltaan edullista. Sisäilman laatu riippuu pitkälti rakennuksen sisäisistä ja ulkoisista kuormista ja ilmanvaihdon tehostamiselle on ajoittain tarvetta. Opinnäytettä varten olisi ilmamäärien vaihtelun variaatioita voinut tehdä useampia. Tässä työssä käytetyt ilmamäärien lisäykset antoivat jonkinlaisen käsityksen siitä

tasosta, joka energiankulutuksessa tapahtuu ilmamäärien lisäyksen myötä. Energiankulutuksen kasvu oli luonnollisesti suurinta lämmityskaudella, jolloin tuloilman lämmityksen tarve oli suurin.

Rakennusten ilmatiiviyys korostuu sekä rakenteiden rakenneominaisuuksien että energiankulutuksen näkökulmasta. Ilmatiiviyteen on helppo vaikuttaa rakennusvaiheessa ja tehdyt ratkaisut vaikuttavat koko rakennuksen elinkaaren ajan. Ilmanpitävyyden parantamisen kustannukset ovat pieniä ja vaativat lähinnä huolellisuutta eri rakennusvaiheissa. Riittävät suunnitelmat ohjeineen ovat luonnollisesti tärkeässä asemassa tiiviin rakennuksen toteutuksessa. Suoritetuissa simuloinneissa energiankulutusta tarkasteltiin keskimääräisen ilmapuodon avulla, eikä eri virtaustyyppien vaikutusta esimerkiksi erilaisten aukkojen kautta mallinnettu. Simuloinneilla saatiin käsitys tiiviiden merkityksestä energiankulutukseen ja sitä kautta myös hiilijalanjälkeen. Aikaisempien tutkimusten perusteella oli melko hyvä käsitys ilmapuotojen yhteydestä kasvaneeseen energiankulutukseen. Opinnäytetyöhön tehdyt simuloinnit tulokset vastasivat kohtuullisen hyvin aikaisempia tutkimuksia. Ilmanvaihdon ilmamäärät olivat kohteiden kesken lähellä toisiaan. Suhteellisesti eniten ilmapuodosta johtuva energiankulutus kasvoi pienimmässä asunnossa, joka käytti vähiten lämmitysenergiaa. Energiamäärässä mitattuna suurin vaikutus oli suoraa sähkölämmitystä käyttävässä rakennuksessa.

Ennakolta oli selvää, että ilmanvaihtokoneen hyötysuhteen vaikutus energiankulutuksen määrään tiedetään melko tarkasti ilman simulointia, kun säätiedot ovat kattavasti käytössä. Simuloinnit antoivat lisäinformaatiota mm. ilmavirtojen käyttäytymisestä ja vuotoilman ja koneellisen ilmanvaihdon yhteyksistä. Alue on jatkotutkimusten kannalta mielenkiintoinen, mutta vaatii rinnalleen mittauksia todellisissa kohteissa, joissa pystytään vertaamaan mittauksia simulointien tuloksiin. Varsinkin siirtoilman kulku eri tilojen välillä saattaa poiketa tavoitellusta, jos rakenteissa esiintyy vuotoja ulkoviipä läpi ja huoneet ovat koneellisen ilmanvaihdon takia yli- tai alipaineisia.

Ilmanvaihdon ja lämpöpumpun tuottaman edullisemman lämmöntuoton yhdistämisellä saavutettiin hyötyä tuloilman lämmityksessä. Hyvän lämmöntalteenoton hyötysuhteen omaavissa ilmanvaihtolaitteissa tuloilman lisälämmityksen osuus on Etelä-Suomen sääoloissa varsin vähäinen. Suuria lisäsäästöjä ei talteenoton parantamisella ei ole saavutettavissa kohteissa, joissa lämmityksessä käytetään lämpöpumppuja ja

lämmön talteenotto on vertailun perustason mukainen. Suoran sähkölämmityksen rakennuksissa korkean hyötysuhteen omaavista ilmanvaihtokoneista on eniten hyötyä. Ilmanvaihtolaitteet ovat pitkäikäisiä ja mahdollisimman energiatehokkaan laitteen valinta uudisrakennukseen on aina suotavaa. Asunnon koon ja kulutuksen kasvaessa lämmöntalteenoton hyöty luonnollisesti kasvaa. Hiilijalanjälkitarkastelun näkökulmasta paremman hyötysuhteen laitteet eivät juuri materiaalimäärältään poikkea keskitason laitteista, ja ovat siinäkin mielessä perusteltuja valintoja.

Lämpöpumpputekniikkaa käytettäviä ilmanvaihtokoneita, joilla jäteilmasta saadaan lähes kaikki lämpöenergia talteen, on myös pientaloissa käytössä. Rajoittavaksi tekijäksi muodostuu lähinnä ulos puhallettavan jäteilman liian alhainen lämpötila. Lämpö on mahdollista siirtää muun kulutuksen, kuten lämpimän käyttöveden, tarpeisiin. Lähes nollaenergiatalojen tilalämmitys vaatii huomattavan vähän energiaa. Jos ilmanvaihdon lämmöntalteenoton hyötysuhde on korkea, lämpimän käyttöveden osuus lämmityskuluista korostuu. Varsinkin kesäaikaan, jolloin tilalämmityksen ja tuloilman lisälämmityksen tarvetta ei ole, olisi järkevää käyttää ns. ilmanvaihdon hukkalämpöä käyttöveden lämmitykseen.

Laitteistoinvestoinnit suhteutetaan kulutuksen vaatimukseen ja käytettävissä olevaan rakennusbudjettiin. Energiansäästö saavutetaan usein pitkän ajanjakson kuluessa ja laiteinvestoinnit energiaa säästävimmissä ratkaisuissa voivat olla investointeina kalliimpia. Tästä syystä on hyödyllistä saada vertailuarvio, jolla voidaan perustella riittävän selvästi tehdyn ratkaisun kannattavuus. Vertailu on hyvä tehdä myös hiilidioksidikuorman näkökulmasta. Tässä yhteydessä materiaalit ja valmistukseen liittyvät tekijät huomioidaan.

Tässä opinnäytetyössä käytetty simuloitu energiankäytön vertailu vallitsevissa sääoloissa on yksi tapa arvioida eri tekijöiden vaikutuksia. Menetelmä mahdollistaa yksityiskohtaisen tietojen analysoinnin, jolla on mahdollista löytää tekijöitä energiakulutuksen leikkaamiseen. Tämän työn puitteissa lopputuloksena saatiin varsin karkea arvio joidenkin muuttujien vaikutuksista. Yhtenä tavoitteena oli perehtyä pientalon simulointiin liittyviin tekijöihin. Työn edetessä huomio kiinnittyi ohjelman todella laajaan muokkausmahdollisuuteen, joka ei kaikilta osiltaan ollut käyttäjän näkökulmasta helppoa. Erityisesti rakennusmallien geometrian muokkaus vastaamaa

kohderakennuksia oli paikoitellen hankalaa. Lisäksi huomattiin joidenkin tekijöiden muutoksilla olevan hidastava vaikutus ohjelman suorittaman laskennan nopeuteen.

Rakennusosat olivat materiaalien suhteen muokattavissa simulointiohjelmassa hyvin yksityiskohtaisesti. Työmääränä tämä muokkausprosessi vie suhteellisen pitkän ajan, kun rakennus sisältää paljon erilaisia rakennusosia. Käytettävyyden kannalta olisi varmasti suuri helpotus, jos materiaalit siirtyisivät tietomallien mukana ohjelmasta toiseen ja tavallaan saman asian tekemiseltä välttyttäisiin vaiheessa, jolloin IFC-malli on tuotu simulointiohjelmaan.

Ohjelman ilmanvaihtokoneet ja lämmitysjärjestelmät olivat muokattavissa. Asetusarvot oli valikoista löydettävissä, mutta vaativat jonkin verran paneutumista, ennen kuin tarpeelliset muokkaukset oli tehty. Ohjelman käytettävyyden kannalta valmiiden laitteistokokopanojen olemassaolo tyypillisistä pientaloratkaisuista olisi saattanut nopeuttaa ohjelman käyttöä.

LÄHTEET

Berge, Axel. Analysis of Methods to Calculate Air Infiltration for Use in Energy Calculations. Göteborg 2011. Viitattu 8.4.2019. <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/147421.pdf>

Energiatohokkuusohje. Helsingin kaupunki. 2017. Viitattu 20.5.2019 https://www.hel.fi/static/liitteet/att/20170821_Energiatohokkuusohje.pdf

Eskola, L., Kurnitski, J., Jokisalo, J., Jokiranta, K., Palonen, J., Vinha, J. Room Airflow Rates in Finnish Houses. Tampere 2007. Viitattu 8.5.2019. <http://www.ir-bnet.de/daten/iconda/CIB7149.pdf>

Ilmatiiveys ja vuotokohdat uusissa rakennuksissa 2018. Viitattu 20.5.2019. <https://vertia.fi/wp-content/uploads/2018/06/Ilmatiiveys-ja-vuotokohdat-uusissa-rakennuksissa-2018-1.pdf>

Klingenburg USA. Counterflow plate heat exchangers. Verkkoaineisto. Viitattu 20.4.2019 <http://www.klingenburg-usa.com/products/plate-heat-exchangers/counter-flowplate-heat-exchangers/>

Kurnitski, Jarek. Pientalojen ilmanvaihto ja ilmanpitävyys. Viitattu 8.5.2019 <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK070304.pdf>

LVI 30-10529. Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho SFP. 2013. Helsinki. Rakennustieto.

Motivan www-sivut. Viitattu 20.5.2019 <https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian-kaytto-suomessa/co2-laskentaohje-energiankulutuksen-hiilidioksidipaastojen-laskentaan/co2-paastokertoimet>

Opas asuinrakennusten ilmanvaihdon mitoitukseen. FINVAC ry. Viitattu 8.5.2019 https://asiakas.kotisivukone.com/files/finvac.kotisivukone.com/tiedostot/Opas_asuinrakennusten_ilmanvaihdon_mitoitukseen.pdf

Seppänen Olli. Lämmitystekniikka. Suomen LVI-yhdistysten liitto ry. Jyväskylä 1995. 467 s.

Sisäilmayhdistys 2019. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Ilmavirtaukset-rakennuksessa>

Suomen tuuliatlas. Viitattu 20.5.2019 <http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/>

Suomen virallinen tilasto (SVT): Ilmapäästöt toimialoittain [verkojulkaisu]. ISSN=2323-7589. 2016, Liitetaulukko 1. Kasvihuonekaasupäästöt (CO₂-foss, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆) toimialoittain hiilidioksidiekvivalentteina (CO₂-ekv.) 2008-2016, tonnia. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 5.5.2019]. Saantitapa: http://www.stat.fi/til/tilma/2016/tilma_2016_2018-09-26_tau_001_fi.html

Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus [verkkójulkaisu].ISSN=1799-795X. 4. Vuosineljännes 2017, Liitekuvio 14. Energian loppukäyttö sektoreittain 2017. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 27.5.2019]. Saantitapa: http://www.stat.fi/til/ehk/2017/04/ehk_2017_04_2018-03-28_kuv_014_fi.html

Suomen virallinen tilasto (SVT): Asumisen energiankulutus [verkkójulkaisu]. ISSN=2323-3273. 2017, Liitekuvio 2. Asumisen energiankulutus käyttökohteittain vuonna 2017. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 5.5.2019]. Saantitapa: http://www.stat.fi/til/asen/2017/asen_2017_2018-11-22_kuv_002_fi.html

Suomen virallinen tilasto (SVT): Asumisen energiankulutus [verkkójulkaisu]. ISSN=2323-3273. 2017, Liitetaulukko 1. Asumisen energiankulutus vuosina 2010-2017, GWh. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 5.5.2019]. Saantitapa: http://www.stat.fi/til/asen/2017/asen_2017_2018-11-22_tau_001_fi.html

Tasauslaskentaopas 2012. 2011. Helsinki: Ympäristöministeriö. Viitattu 7.4.2019. <https://www.edilex.fi/rakentamismaaraykset>

Tulevaisuuden rakentaminen. 2019. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Viitattu 28.5.2019 <https://tulevaisuudenrakentaminen.samk.fi/>

Wolf, D., Tyler, F. Characterization of Air Leakage in Residential Structures— Part 1: Joint Leakage. 2013. Viitattu 20.5.2019 https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/2013%20B12%20papers/097-P1_Wolf.pdf

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Helsinki. Ympäristöministeriö 1010/2017.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Helsinki. Ympäristöministeriö 1009/2017.

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta. Helsinki. Ympäristöministeriö 1048/2017.

Liite 1. Vuotoilmanvaihtoon liittyviä korjauskertoimia tutkimuksessa Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilma ja energiatalous (Vinha 2009, 115)

$$n_v = \frac{n_{50}}{L \cdot W \cdot D \cdot H \cdot E \cdot B} \quad (3)$$

missä

L	ilmasto-oloista riippuva korjauskerroin [-]
W	tuulioloista riippuva korjauskerroin [-]
D	rakennuksen vuotojakaumasta riippuva korjauskerroin [-]
H	rakennuksen korkeudesta riippuva korjauskerroin [-]
E	vuotoyhtälön eksponentista riippuva korjauskerroin [-]
B	ilmanvaihdon tasapainosta riippuva korjauskerroin [-]

Taulukko 3.2.3 Korjauskertoimet suomalaisen pientalon keskimääräisen vuotoilmanvaihtokertoimen (3.2.2) laskentamalliin.

Korjauskerroin	Korjauskertoimen arvo			
Ilmastovyöhyke	I-III	IV		
L	27	25		
Tuuliolot	suojaton	maaseutu	suojainen	
W	0,5	0,7	1	
Vuotojakauma	YP/AP-vetoinen	tyypillinen	YP-vetoinen	AP-vetoinen
D	0,8	1	1,1	1,2
Kerrosten lkm.	1	2		
H	1.6	1		
Vuotoyhtälön eksponentti	suurempia rakoja	tyypillinen	pienempiä rakoja	
E	0,7	1	1,4	
Ilmanvaihdon tasapaino	tasapainoinen	yli- tai alipaineinen		
B	1	0.8		

Liite2. Kohteen A rakennusmateriaalien hiilijalanjälki

Hiilijalanjälki rakennusmateriaaleista.

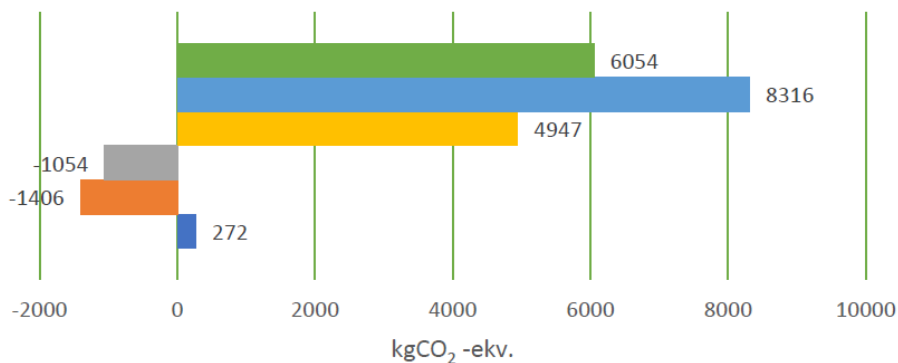
Ulkoseinät on rakennettu valuharkkoista.

Kevyt harkko kootaan seinäelementiksi ja betoni valetaan

harkkojen sisään. Sisäseinärakenteisiin on käytetty kevytbetoniharkkoa.

Rakennuksen paalutusta ei ole huomioitu laskennassa. Hiilijalanjälki laskettu rakennuksessa olevaan materiaaliin.

Rakennusmateriaalit
17 906 kgCO₂ -ekv.
178 kgCO₂ -ekv./hum²



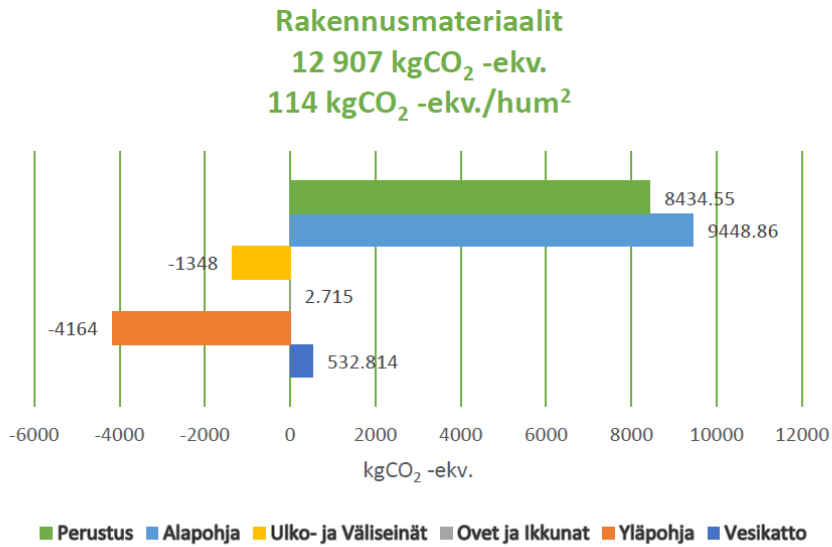
■ Perustus ■ Alapohja ■ Ulko- ja väliseinät ■ Ikkunat + Ovet ■ Yläpohja ■ Vesikatto

Liite 3. Kohteen B rakennusmateriaalien hiilijalanjälki

Hiilijalanjälki rakennusmateriaaleista.

Kohde on suomalaisen talotehtaan pakettitalo.

Hiilijalanjälki laskettu rakennuksessa olevaan materiaaliin. Rakennuksen mahdollista paalutusta ei ole huomioitu laskennassa.



Liite 4. Kohteen C materiaalien hiilijalanjälki

Hiilijalanjälki rakennusmateriaaleista.

Ulkoseinärakenteena on massiivihirsi, myös yläpohjan rakenteessa on paljon puuta. Sisällä väliseinien runko on puuta, eristeenä mineraalivillaa ja verhoiluna kipsilevy. Hiilijalanjälki on laskettu rakennuksessa olevista materiaaleista. Mahdollista paaluperustusta ei huomioitu.

Rakennusmateriaalit
-10 296 KgCO₂ -ekv.
-80 KgCO₂ -ekv/hum²

