

Laura Sivula

**OMAKOTITALON ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄN TOIMINTA –
CASE SIVULA 2011**

**OMAKOTITALON ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄN TOIMINTA –
CASE SIVULA 2011**

Laura Sivula
Opinnäytetyö
Kevät 2014
Talotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Talotekniikka

Tekijä: Laura Sivula

Opinnäytetyön nimi: Omakotitalon ilmanvaihtojärjestelmän toiminta–Case Sivula 2011

Työn ohjaaja: Pirjo Kimari

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2014 Sivumäärä: 43 + 7 liitettä

Tässä opinnäytetyössä tutkimusaiheena oli vuonna 2011 valmistuneen omakotitalon ilmanvaihtokoneen ja -järjestelmän toiminta. Haluttiin selvittää ilmavirtojen tasapainoa ja riittävyttä sekä huonekohtaiset äänitasot. Lisäksi haluttiin selvittää ilmanvaihtokoneen energiatehokkuutta erilaisten hyötysuhteiden ja ominais sähkötehon määrittämisen avulla. Huomiota haluttiin kiinnittää erityisesti kosteudensiirtoon pakkasolosuhteissa, koska aikaisemmin talossa oli havaittu vähäisessä määrin ikkunoiden huurtumista kovilla pakkasilla.

Taloon tehtiin ilmavirta- ja äänimittaukset. Lisäksi jokaiseen kanavaan asetettiin mittausanturit mittamaan ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta viiden minuutin välein noin kahdenkymmenen kolmen vuorokauden ajan. Saaduista arvoista laskettiin ilmanvaihtokoneelle lämpötilasuhde, entalpiahyötysuhde, kosteudensiirron hyötysuhde sekä ilmanvaihtojärjestelmälle kokonaishyötysuhde kyseiselle ajanjaksolle.

Ilmavirrat olivat tasapainossa ja ilmanvaihtuvuus riittävää. Äänitasot olivat alhaisia ja hyvin sallituissa rajoissa. Ainoastaan keittiön äänet ylittivät sallitun ekvivalenttiäänitason liesituulettimen kanavassa humisevan tuulen vuoksi. Lämpötilasuhteen ja entalpiahyötysuhteen todettiin olevan kohtalaisia, vaikka entalpiahyötysuhde jäi hieman lämpötilasuhdetta huonommaksi. Kosteudensiirron hyötysuhteeksi saatiin kuitenkin vain 43,4 %, joka on huomattavasti alhaisempi kuin lämpötilasuhde. Kosteudensiirron hyötysuhde oli kuitenkin suurimmillaan ulkoilman ollessa kuivimmillaan ja kosteuden tarve suurimmillaan. Todettiin myös, että ilmanvaihtokoneen kosteudensiirrosta ei pitäisi aiheutua riskiä kosteusvaurioiden syntymiselle. Ilmanvaihtojärjestelmän energiatehokkuuden todettiin olevan melko hyvä

Asiasanat: Ilmanvaihtojärjestelmän tasapainoisuus, ilmanvaihtokoneen tehokkuus, kosteudensiirron hyötysuhde, ominaissähköteho.

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Building services engineering

Author: Laura Sivula

Title of thesis: Performance of Single-Family House Ventilation System–Case Sivula 2011

Supervisor: Pirjo Kimari

Term and year when the thesis was submitted: Pages: 43 + 7 appendices

The topic of this thesis was to research the balance of the ventilation system and energy efficiency of air-handling unit in a single-family house that has built in 2011. They wanted to know how their ventilation system works. They wanted to know if it is in balance and if there are any problems.

Air flows and noise levels were measured. Furthermore indicators of air temperature and relative humidity were placed to exhaust air, supply air, extract air and open-air ducts. Indicators measured values of air temperature and relative humidity every five minutes about twenty-three days. The results of measurements were calculated by humidity efficiency, enthalpy efficiency, temperature efficiency and annual efficiency. Specific fan power was also calculated.

The results of research were that air flows were balanced and noise levels were good. Only the noises of kitchen were a bit high because of the wind that made noises in the duct of kitchen while measurements. Temperature and enthalpy efficiencies were reasonable even though enthalpy efficiency was even not as good as temperature efficiency. The efficiency of humidity was only 43,4 % that is relatively poor. Anyways humidity efficiency got highest values when outdoor temperature was lowest and the need of humidity was highest. We can say that the humidity efficiency is still so low that probably we don't get risk to moisture damage in the structure in this building. Energy efficiency of the ventilation system was found to be quite good.

Keywords: The balance of the ventilation system, energy efficiency of air-handling unit, humidity efficiency, specific fan power.

ALKULAUSE

Haluan kiittää työn tilaajaa Jouko Sivulaa, että sain käyttää hänen omakotitalo-
aan tutkimuskohteena. Hän antoi minulle mielenkiintoiset puitteet toteuttaa mit-
taukset ja paljon materiaalia opinnäytetyötäni varten. Tahdon kiittää myös LVI-
insinööriä Juuso Sivulaa, joka oli minulla apuna mittauksia tekemässä, ja hänel-
tä sain myös paljon konsultaationeuvoja sekä materiaalia opinnäytetyötäni var-
ten. Lisäksi haluan kiittää opinnäytetyöohjaajaani Pirjo Kimaria, joka auttoi mi-
nua rajaamaan ja kohdentamaan opinnäytetyötäni. Lisäksi sain paljon tukea ja
hyviä neuvoja opinnäytetyötä tehdessäni.

Oulussa 28.4.2014

Laura Sivula

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
1 JOHDANTO	7
2 ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄ	9
2.1 Sisäilmasto	9
2.1.1 Ilmavirrat	10
2.1.2 Kosteus	10
2.1.3 Huonekohtaiset äänitasot	11
2.2 Ilmanvaihtokoneen toiminta	11
2.2.1 Rekuperatiiviset lämmöntalteenottolaitteet	12
2.2.2 Regeneratiiviset lämmöntalteenottolaitteet	14
2.2.3 Ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho	18
3 KOHDE SIVULA	19
3.1 Kuvaus	19
3.2 Mittaukset	20
3.3 Mittaustulokset	20
3.3.1 Ilmavirta- ja äänimittaukset	21
3.3.2 Lämpötila- ja kosteusmittaukset	25
3.3.3 Lämpötilasuhde	29
3.3.4 Entalpiahyötysuhde	30
3.3.5 Kosteudensiirron hyötysuhde	32
3.3.6 Kokonaishyötysuhde mittausajanjaksolle	35
3.3.7 SFP-luku	35
3.4 Johtopäätökset	36
4 YHTEENVETO	39
LÄHTEET	41

1 JOHDANTO

Suomessa on erilaisin laein, säädöksin, ohjein ja suosituksin määritelty, millainen asuinrakennuksen sisäilman ja ilmanvaihtojärjestelmän tulisi olla. Omakotitalon loppukatselmuksessa on esitettävä ilmanvaihtolaitoksen kelpoisuustodistus, jossa rakennusvalvonnan ilmanvaihdon tarkastusinsinööri todentaa, että ilmanvaihtokanavat on asennettu ja eristetty oikein, sekä asentajan tai urakoitsijan tekemä ilmanvaihdon mittauspöytäkirja. Mittauspöytäkirja on allekirjoitettu todistus siitä, että ilmavirrat on säädetty suunnitelmien mukaan ja todennettu mittauksin.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D2 määrittää, että asuinrakennusten ilmanvaihto tulee olla vähintään 0,5 vaihtoa tunnissa (0,5 1/h), enintään 0,7 vaihtoa tunnissa ja tietyissä poikkeustapauksissa enintään 1 vaihto tunnissa. Lisäksi se määrittää huonekohtaiset ilmavirrat, maksimiäänitasot sekä ilman erilaisten epäpuhtauksien sallitut maksimipitoisuudet (1, s. 25.)

Puhtaalle ja riittävälle sisäilmalle asetettuihin kriteereihin voidaan päästä määräysten mukaisella, huolella alusta loppuun toteutetulla järjestelmällä. Järjestelmän tarkoituksenmukaiseen toimintaan ei kuitenkaan riitä pelkästään oikea asennustapa ja hyväksytyt materiaalit, vaan lisäksi on erityisen tärkeää, että järjestelmä on tasapainossa. Mittaus- ja säätötoimenpiteiden tarkoituksena on turvata riittävä ja oikeanlainen ilman vaihtuvuus tilassa.

EU-lainsäädäntöä on laajennettu koskemaan myös rakennusten energiatehokkuutta. Energiatodistus täytyy hankkia kaikille uudisrakennuksille rakennuslupaa haettaessa.

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin vuonna 2011 rakennetun omakotitalon ilmanvaihtojärjestelmän tasapainoisuutta sekä ilmanvaihtokoneen toimintaa erilaisin mittauksin ja laskelmin. Idea tutkimusongelmasta lähti siitä, että usein ilmanvaihtoa ei tutkita käyttöönoton ja ensimmäisen säädön jälkeen. Haluttiin selvittää, ovatko ilmavirrat suunnitelmien sekä äänitasot standardien mukaiset ja järjestelmä tasapainossa.

Lisäksi tarkasteltiin ilmanvaihtokoneen toimintaa erilaisissa kuormitustilanteissa pakkasolosuhteissa. Tutkittiin ilmanvaihtokoneen pyörivän lämmöntalteenotto-laitteen kosteuden siirron hyötysuhdetta, lämpötilasuhdetta ja entalpiahyötysuhdetta sekä ilmanvaihtojärjestelmän kokonaishyötysuhdetta mittausajanjaksolle. Pohdittiin myös ilmanvaihtokoneen sähkönkulutusta ja energiatehokkuutta. Eri-tyistä huomiota haluttiin kiinnittää kosteusasioihin, sillä tässä talossa oli havaittu muutamia kertoja ikkunoiden huurtumista talvella kovilla pakkasilla. Tämän vuoksi erityistä huomiota haluttiin kiinnittää kosteusasioihin. Vastavalmistuneissa taloissa rakennusmateriaalit kuivuvat ja lisäävät merkittävästi sisäistä kosteuskuormaa. Mikäli hetkellisesti muut kosteuskuormat ovat myös suuria, ja lisäksi ilmanvaihtokone on kosteutta siirtävä, voi sisäilman kosteus nousta liian suureksi. Ikkunoiden huurtuminen on yksi merkki liiallisesta sisäilman kosteudesta. Jatkuva liiallinen sisäilman kosteus on riski kosteusvaurion syntymiselle.

2 ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄ

Koneellisessa ilmanvaihtojärjestelmässä puhdistettua ja lämmitettyä ulkoilmaa tuodaan asuinhuoneisiin, kuten makuu- ja olohuoneisiin sekä aulatiloihin, tuloilmaventtiileiden avulla. Vastaavasti likainen poistoilma poistetaan poistoilmaventtiileiden avulla likaisista tiloista, kuten suihku- ja wc-tiloista sekä vaatehuoneista. Ulko- ja poistoilma puhdistetaan suodattimen avulla ennen ilmanvaihtokoneelle menoa. Tuloilma lämmitetään poistoilmasta lämmöntalteenottolaitteen avulla talteen otetulla lämmöllä ja tarvittaessa lisäksi sähkö- tai vesikiertoisella lisälämmityspatterilla (2, s. 216.)

2.1 Sisäilmasto

Asuinrakennus tulee olla suunniteltu ja rakennettu siten, että oleskeluvyöhykkeellä saavutetaan turvallinen, terveellinen ja viihtyisä sisäilmasto kaikissa tavomaisissa sääoloissa. Suomen Rakentamismääräyskokoelman osa D2 antaa ohjeita kaasujen, hiukkasten ja mikrobien pitoisuuksille, ilman kosteudelle, äänitasoille sekä lämpötiloille ja ilmavirroille. Lisäksi on annettu ohjeita valaistuksesta, laitteiden sijoittamisesta sekä ilmanvaihtojärjestelmän tiiviydestä siten, että ne eivät aiheuta haittaa tavoitteelliselle sisäilmastolle.

Ilmanvaihto suunnitellaan siten, että tuloilma virtaa koko oleskeluvyöhykkeelle ja epäpuhtaudet kulkeutuvat suoraan poistoilman päätelaitteisiin eivätkä leviä huonetilaan. Sisäilmassa ei saa esiintyä terveydelle haitallisessa määrin kaasuja, hiukkasia tai mikrobeja eikä viihtyisyyttä alentavia hajuja. Tuloilman suodatus suunnitellaan yleensä siten, että ilmansuodattimien erotusaste on vähintään 80 % 1,0 µm:n hiukkasilla. Tätä vastaava ilmansuodattimen luokka on F7 (1, s. 9–14.) Ilmanvaihtokoneen tasosuodattimet suositellaan vaihdettavan vähintään neljän kuukauden ja pussisuodattimet puolen vuoden välein, tarvittaessa useammin (3).

2.1.1 Ilmavirrat

Ilmanvaihto mitoitetaan asuinrakennukselle ilmoitettujen huonekohtaisten minimi-ilmavirtojen mukaan. Tulopuolella minimi-ilmavirrat mitoitetaan huoneen pinta-alan mukaan (l/s)/m², mutta kuitenkin siten, että ulkoilmavirta on vähintään 6 (l/s)/hlö jokaisessa asuinhuoneessa. Osa poistoilmavirroista mitoitetaan huonekohtaisesti ilmoitetut minimi-ilmavirran mukaan (l/s)/tila ja osa huoneen pinta-alan mukaan (l/s)/m². Ilman tulisi vaihtua kokonaisuudessaan asuinrakennuksessa kerran kahden tunnin aikana. Pienissä asunnoissa poistoilmavirrat mitoitetaan kuitenkin usein ohjearvoja pienimmiksi, siten että käyttöajan ilmanvaihtokerroin on enintään 0,7 vaihtoa tunnissa, ja poistoilmavirtojen tehostusta voidaan ohjata tarpeen mukaan (1, s. 25.) Rakennus suunnitellaan yleensä hieman alipaineiseksi (noin 5–10 %) ulkoilmaan nähden, jotta välttyttäisiin kosteus- ja mikrobivaurioilta. Alipaineisuus ei kuitenkaan yleensä saa olla suurempi kuin 30 Pa (1, s. 14).

2.1.2 Kosteus

Jos sisäilman kosteus ylittää arvon 7g H₂O/kg kuivaa ilmaa, huoneilmaa kostutetaan ainoastaan erityistapauksissa. Tämä vastaa huoneilman tilaa, jossa suhteellinen kosteus on 45 %, lämpötila 21 °C ja ilman paine 101,3 kPa (1, s. 6.) Yli 45 %:n suhteellinen kosteus edistää pölypunkkien, sienten ja muiden mikrobien elinmahdollisuuksia, ja mikäli suhteellinen kosteus ylittää 75–85 %, vastaava materiaalin tasapanokosteus luo hyvät edellytykset sienien kasvulle. Materiaalin tasapainokosteudella tarkoitetaan kosteutta, johon materiaali pyrkii tasaantumaan ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden seurauksena. Liian kuiva sisäilmakaan ei ole hyväksi, ja se saattaa esimerkiksi aiheuttaa hengitysallegi-kolle häiriötä. Erityisesti Suomen talviolosuhteissa liiallinen sisäilman kuivuus saattaa aiheuttaa ongelmia pitkään jatkuvan talven vuoksi (2, s. 24.)

2.1.3 Huonekohtaiset äänitasot

Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D2 määrittää, että rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, että rakennuksessa on viihtyisät ääniolosuhteet. Asuinrakennuksen maksimi- ja ekvivalenttiäänitasot ovat taulukon 1 mukaiset. Äänitasot mitataan LVI-kortin LVI 014-10191 antamien ohjeiden mukaan kolmesta pisteestä oleskeluvyöhykkeeltä vähintään 0,5 metrin päästä toisistaan ja kaikista ääntä heijastavista pinnoista (4, s. 2).

TAULUKKO 1. Huonekohtaiset sallitut äänitasot (1 s. 21)

	Ekvivalentti	Maksimi
	äänitaso	äänitaso
	$L_{A,eq}$	$L_{A,max}$
	dB(A)	dB(A)
Asuinhuoneet	28	33
Keittiö	33	38
Vaatehuone/Varasto	33	38
Kylpyhuone	38	43
WC	33	38
Kodinhoituhuone	33	38
Sauna	33	38

2.2 Ilmanvaihtokoneen toiminta

Ilmanvaihtokoneen toimintaa tarkasteltaessa erityisen tärkeää on kiinnittää huomiota lämmöntalteenottolaitteen tehokkuuteen sekä puhaltimien sähkönkulutukseen. Nämä yhdessä määräävät ilmanvaihtokoneen energiatehokkuuden. Lämmöntalteenottolaitteen tarkoituksena on parantaa ilmanvaihdon energiataloudellisuutta. Rakentamismääräyskokoelman osa D3 määrää, että rakennuksen ilmanvaihdon poistoilmasta on otettava talteen lämpömäärä, joka vastaa vähintään 45 % ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemasta lämpömäärästä. Vastaava lämpöenergian tarpeen pienentäminen voidaan kuitenkin toteuttaa myös muulla tavalla (5, s. 15.) Lämpö otetaan talteen poistoilmasta lämmöntalteenot-

tolaitteen avulla ja siirretään tuloilmaan. Lämmöntalteenottolaitteet voidaan jakaa rekuperatiivisiin ja regeneratiivisiin lämmönsiirtimiin (2, s. 268 – 290.)

2.2.1 Rekuperatiiviset lämmöntalteenottolaitteet

Rekuperatiiviset lämmöntalteenottolaitteet voidaan luokitella suoriin ja epäsuoriin rekuperatiivisiin lämmöntalteenottolaitteisiin. Asuntoilmanvaihtokoneissa yleisimmin käytettyjä ovat suorat rekuperatiiviset lämmöntalteenottolaitteet. Suorat rekuperatiiviset lämmöntalteenottolaitteet voidaan edelleen jakaa vastatai ristivirtauskennoihin (2, s. 286–287.)

Suorassa rekuperatiivisessa lämmöntalteenottolaitteessa lämpö siirtyy konvektion avulla, ja laitteen teho määräytyy erittäin suurelta osin lämmönsiirtopinnan alan mukaan. Talteenottokenno on rakennettu ohuista metallilevyistä, joita pyritään laittamaan mahdollisimman tiuhaan maksimaalisen lämmönsiirtopinta-alan saamiseksi, mutta kuitenkin siten, että mahdolliset epäpuhtaudet eivät pääse tukkimaan välejä. Materiaalilla ei ole niinkään suurta merkitystä lämmönsiirtotehoon, koska virtauksen ja materiaalin välinen konvektiolämmönvastus on suurempi kuin materiaalin lämmönvastus. Materiaalin tulisi olla erityisesti korroosiokestävä ja huonosti likaantuvaa, jotta saavutetaan mahdollisimman korkea käyttöikä. Suoran rekuperatiivisen lämmöntalteenottolaitteen lämpötilasuhde vaihtelee välillä 50–70 % (2, s. 286–287.)

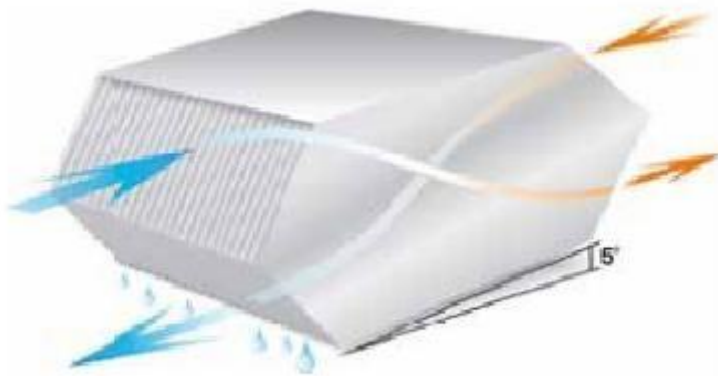
Suorissa rekuperatiivisissa lämmöntalteenottolaitteissa tulo- ja poistoilmat kulkevat omia reittejään väliseinillä erotettuna eivätkä pääse sekoittumaan. Tulo- ja poistoilma eivät siis kohtaa lainkaan, ja näin estetään likaisen poistoilman ja puhtaan tuloilman sekoittuminen sekä muun muassa kosteuden siirtyminen poistoilmasta tuloilmaan. Kenno siirtää ainoastaan lämpöä poistoilmasta tuloilmaan (6, s. 7.)

Poistoilmavirran sisältämä kosteus tiivistyy usein lämpöpinnoille, josta se on johdettava kondenssivesiputken avulla pois. Pakkasolosuhteissa tämä voi aihe-

uttaa kennon jäätymistä ja tukkeutumista. Tämän vuoksi epäsuorat rekuperatiiviset lämmöntalteenottolaitteet on varustettu huurtumisenestoautomatiikalla, joka pienentää tulopuhaltimen nopeutta tai pysäyttää sen hetkellisesti asetetun lämpötila alaraja-arvon (yleensä noin $-5...-10$ °C) alittuessa. Tällöin lämmin poistoilma virtaa kennon läpi lämmittäen kennon ja siihen jo mahdollisesti kertyneen jään. Huurtumisenestotilanteessa poistoilmasta saatu lämpöenergia käytetään kennon sulatukseen ja lämmitykseen tuloilman lämmittämisen sijaan, ja hyötysuhde on hetkellisesti huonompi. Mikäli tulopuhallin pysäytetään, se menee nollassa (6, s. 8–9.)

Vastavirtakenno

Vastavirtakenno on tavallisesti venytetyn vinoneliön muotoinen, ja siinä poisto- ja tuloilmavirta kulkevat vastakkain toisiinsa nähden talteenottokennon läpi. Alla kuvassa 1 on vastavirtakenno, jossa näkyvät myös ilmavirtojen liikeradat.

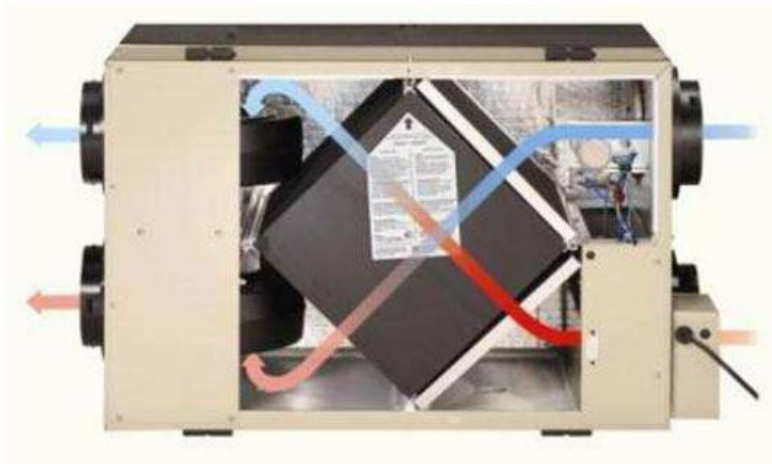


KUVA 1. Vastavirtakenno (7, s. 4)

Vastavirtaus on lämpöteknisesti edullisin virtausgeometria. Vastavirtakennossa ilmavirrat siirtyvät pitemmän matkan samansuuntaisesti ristivirtakennoihin nähden, jolloin lämmönsiirtyminen on täydellisempää (2, s. 286.)

Ristivirtakenno

Ristivirtakennot ovat osittain hyvin samankaltaisia kuin vastavirtakennot, mutta niissä ilmavirrat kulkevat ristikkäin toisiinsa nähden. Ne ovat vinoneliön muotoisia ja materiaaliltaan samankaltaisia kuin vastavirtakennot. Ilmavirrat kulkevat samaan suuntaan vähemmän aikaa, joten lämmönsiirtymisprosessi on lyhyempi ja saatu lämpöteho pienempi (6, s. 8–9.) (Kuva 2.)



KUVA 2. Ristivirtakenno (8)

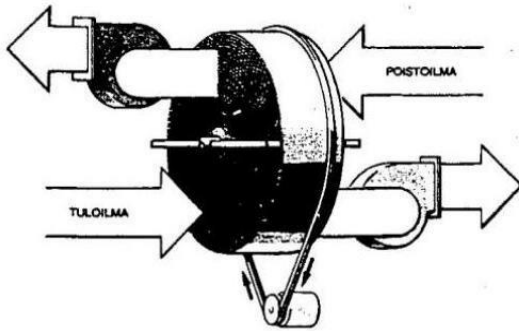
2.2.2 Regeneratiiviset lämmöntalteenottolaitteet

Regeneratiiviset lämmöntalteenottolaitteet ovat lämpöä varaavia lämmöntalteenottolaitteita. Ne voidaan myös jaotella pyöriviin ja virtausta vaihtaviin järjestelmiin (2, s. 288–289). Pyörivä lämmöntalteenotto on näistä tyypeistä kuitenkin yleisimmin käytetty asuntoilmanvaihtokoneissa, joten keskitytään siihen.

Pyörivä lämmöntalteenottolaite koostuu pyörivästä kennomaisesta lämpöä varaavasta kiekosta. Kennon materiaalilla voidaan vaikuttaa oleellisesti lämmönsiirto-ominaisuuksiin, ja materiaali valitaan tilanteeseen sopivimmaksi. Yleisimpiä materiaaleja ovat alumiini ja alumiiniseokset. Kennosto muodostuu yleensä kahdesta päällekkäisestä alumiininauhasta, joista toinen on tasainen ja toinen aaltokuvioinen. Näin muodostuu pieniä suorja ”pillejä”, joiden kautta lämpö ja

kosteus pääsevät siirtymään ilmvirrasta toiseen. Kiekon hyötysuhde ja painehäviö voidaan optimoida pillien aaltojen korkeutta muuttamalla (8.) Hyvän lämmönsiirtymisen aikaansaamiseksi ilmanvirtausreitit tehdään pieniksi ja materiaali ohueksi (2, s. 288).

Kenno pyörii hitaasti tulo- ja poistoilmojen välillä luovuttaen poistoilmasta talteen ottamansa lämmön tuloilmaan. Regeneratiivisessa järjestelmässä tulo- ja poistoilmat pääsevät sekoittumaan jonkun verran keskenään, sillä kennon varattua lämpöä poistoilmasta ja pyörähdettyään sen jälkeen tuloilmapuolelle siihen on jäänyt hiukan poistoilmaa ja siitä irronneita epäpuhtauksia. Tämän seurauksena se voi siirtää myös kosteutta ja muita aineita ilmvirrasta toiseen (2, s. 288.) (Kuva 3.)



KUVA 3. Pyörivä lämmönsiirrin (2, s. 288)

Pyörivän kennon kosteudensiirtoon vaikuttaa kiekon materiaali. Regeneratiivinen lämmönsiirrin, jonka materiaali ei ole kosteutta absorpoiva eli ei sido kosteutta itseensä, siirtää kosteutta vasta veden lauhtuessa poistoilmasta kylmälle lämmönsiirtopinnalle. (2, s. 288) Mikäli kennon lämpötila on alhaisempi kuin poistoilman kastepiste, vesi tiivistyy kennon pintaan ja pääsee näin siirtymään tuloilmaan. Tämä tilanne saavutetaan erityisesti kovilla pakkasilla ja huurtumisenestotilanteessa.

Huurtumisenesto toimii pyörivässä lämmöntalteenottolaitteessa samalla periaatteella kuin rekuperatiivisessa lämmöntalteenottolaitteessa. Koneeseen asetetun raja-arvon alittuessa tuloilmapuhaltimen pyörimisnopeutta pienennetään tai se pysäytetään hetkellisesti kokonaan, jolloin lämmin poistoilma pääsee sulatta-

maan ja lämmittämään kennon. Hyötysuhde laskee tuloilmapuhaltimen pyörimisnopeuden laskiessa, ja jos puhallin pysähtyy, se menee nolllaksi. Pyörivässä lämmöntalteenottolaitteessa kennon jäätyislämpötila on usein alhaisempi kuin rekuperatiivisessa, koska poistoilman sisältämä kosteus otetaan talteen ja siirretään tuloilmaan eikä se pääse kerryttämään huurretta tai jäätä kennon pintaan (9, s. 2.)

Hyötysuhde

Pyörivälle lämmöntalteenottolaitteelle voidaan määrittää kolme erilaista hyötysuhdetta: lämpötilasuhde, entalpiahyötysuhde ja kosteudensiirron hyötysuhde. Nämä ovat lämmönsiirtimen ominaisuuksia. Yleensä hyötysuhde määritellään tuloilmassa tapahtuneen muutoksen suhteena suurimpaan mahdolliseen muutokseen (2, s. 285.) Lisäksi voidaan määrittää ilmanvaihtojärjestelmälle kokonaishyötysuhde. Usein puhutaan vuosihyötysuhteesta, mutta tässä tapauksessa kokonaishyötysuhteella tarkoitetaan ilmanvaihtojärjestelmän hyötysuhdetta tietyllä aikavälillä.

Regeneratiivisen lämmöntalteenottolaitteen lämpötilasuhde on yleensä parempi kuin rekuperatiivisen, koska lämpö siirtyy suoraan lämmöntalteenottolaitteen pinnalta kulkematta aineen eli lämmönsiirtokennomateriaalin läpi. Valmistaja ilmoittaa yleensä laitteelleen lämpötilasuhteen, joka on testattu tilanteessa, jossa tulo- ja poistoilmavirrat ovat yhtä suuret. Lämpötilasuhde ilmaisee lämmönsiirtimen kykyä ottaa lämpöä talteen. Lämpötilasuhde on sama sekä tulo- että poistopuolella, kun ilmavirrat ovat samat. Tulopuolen lämpötilasuhde on tuloilman lämpenemisen suhde poistoilman ja ulkoilman väliseen lämpötilaeroon. Poistopuolen lämpötilasuhde on poistoilman jäähtymisen suhde poistoilman ja ulkoilman väliseen lämpötilaeroon. Mikäli ilmavirrat ovat erisuuruiset, täytyy se huomioida lämpötilasuhdetta määritettäessä (10, s. 20–21). Pyörivän lämmönsiirtimen lämpötilasuhde asettuu välille 60–80 % (11, s. 28).

Entalpiahyötysuhde ilmoittaa, kuinka paljon poistoilman energiasisällöstä saadaan siirrettyä tuloilmaan. Entalpiahyötysuhde saadaan tuloilmassa tapahtu-

neen energiasisältömuutoksen sekä poisto- ja ulkoilman energiasisältöjen erotuksena (2, s. 189 ja s. 197.)

Kosteuden siirtymistä pyörivässä lämmöntalteenottolaitteessa voidaan tarkastella kosteuden siirron hyötysuhteen avulla. Kosteuden siirron hyötysuhde ilmoittaa kuinka tehokkaasti laite siirtää kosteutta poistoilmasta tuloilmaan. Kosteuden siirron hyötysuhde on tuloilmassa tapahtuneen kosteussisältömuutoksen sekä poisto- ja ulkoilman kosteussisältöjen erotuksen suhde (2, s. 286.) Usein pakkasolosuhteissa sisäilma on hyvin kuivaa. Mitä enemmän kosteutta ilmanvaihtokone pystyy siirtämään, sen parempi ilma sisällä on hengittää. Ilmanvaihtokone voi myös kuitenkin joissakin tapauksissa siirtää liikaa kosteutta. Tällainen riski on olemassa erityisesti silloin, kun talo on uusi, ja rakennusmateriaalit luovuttavat kosteutta kuivaessaan. Mikäli samanaikaisesti muita kosteuskuormia, esimerkiksi pyykin kuivatusta tai saunan lämmittämistä on runsaasti, voi sisäilman kosteus nousta niin suureksi, että kosteus alkaa tiivistyä ikkunoiden pinnoille. Tämä aiheuttaa suuren riskin kosteusvaurion syntymiselle nykypäivän tiivisrakenteisissa taloissa.

Huurtumisenestotilanteessa hyötysuhdetta lasketaan hetkellisesti siten, että tuloilmapuhaltimen pyörimisnopeutta pienennetään tai pätkitään, ja poistoilmasta talteen otettua energiaa käytetään joko osittain tai kokonaan kennon sulattamiseen ja lämmittämiseen. Regeneratiivisessa lämmöntalteenottolaitteessa kennon jäätyislämpötila on kuitenkin alhaisempi kuin rekuperatiivisessa, jos regeneratiivisessa lämmöntalteenottolaitteessa kulkenut ilma on sitonut itseensä enemmän kosteutta. Kosteaa ilma sisältää enemmän lämpöenergiaa kuin saman lämpöinen kuivempi ilma, ja siksi kosteutta siirtävä laitteen lämpötilasuhde on keskimääräisesti suurempi. Huurtumisenestotilanteessa lämpötilasuhde, entalpiahyötysuhde ja kosteudensiirron hyötysuhde huononevat.

Vuosihyötysuhde kuvastaa koko rakennuksen ilmanvaihdon energiatehokkuutta. Se on poistoilmasta talteen otetun energian suhde koko ilmanvaihdon tarpeeseen. Ilmanvaihdon energiantarpeella tarkoitetaan energiaa, jolla tulo- ja korvausilma lämmitetään ulkoilman lämpötilasta huonelämpötilaan (10, s. 21.)

2.2.3 Ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho

Ilmanvaihdon energiatehokkuutta laskettaessa ei kuitenkaan riitä pelkkä hyötysuhteen tarkastelu, vaan erittäin tärkeää on myös kiinnittää huomiota ilmanvaihtokoneen sähkönkulutukseen. Ilmanvaihtolaitoksen ominaissähkötehoa kuvataan käsitteellä SFP-luku (Specific Fan Power). Ominaissähköteho on koko ilmanvaihtojärjestelmän ominaisuus, ja sen käyttö ilmanvaihtojärjestelmän energiatehokkuuden arvioinnissa ottaa huomioon koko järjestelmän tehokkuuden (12, s. 1–2.) SFP-luku ilmoittaa rakennuksen koko ilmanvaihtojärjestelmän kaikkien puhaltimien, mahdollisten taajuusmuuttajien ja muiden tehonsäätölaitteiden yhteenlaskettua sähköverkosta ottamaa sähkötehoa jaettuna ilmanvaihtojärjestelmän koko mitoitusjäteilmavirralla tai mitoitusulkoilmavirralla. Laskennassa käytetään näistä suurempaa ilmavirtaa (5, s. 4.) Ominaissähköteho määrittelee ilmanvaihtojärjestelmän tehokkuuden tarvittavan sähkötehon suhteen, eli kuinka paljon tehoa tarvitaan yhden ilmakehän siirtämiseen sekunnissa.

SFP-luku on käytännössä ilmanvaihtojärjestelmän kokonaispainehäviö jaettuna kokonaisyötysuhteella. Ilmanvaihtojärjestelmän painehäviöt vaikuttavat puhaltimen tehon tarpeeseen. SFP-lukua voidaan parantaa pienentämällä kanaviston painehäviötä ja ilmakehäsittelykoneen painehäviötä liitänthäviöineen sekä parantamalla puhaltimien kokonaisyötysuhdetta (12, s. 1–2.)

Koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon ominaissähköteho saa olla enintään 2 kW/(m³s) (5, s. 15). Kirjassa "Desing of energy efficient ventilation and air-conditioning systems" määritellään ominaissähköteho hyväksi, jos se on 1,3 kW/(m³/h). Normaaliarvoksi on annettu 3 kW/(m³/h) ja 6 kW/(m³/h) on huono arvo. (13, s. 17) Itsetarkoituksena ei kuitenkaan ole päästä mahdollisimman alhaiseen SFP-lukuun, vaan löytää optimaalinen arvo jokaiselle järjestelmälle (12, s. 2).

3 KOHDE SIVULA

Tutkimuskohteena on Ylöjärvellä vuonna 2011 valmistunut kaksikerroksinen omakotitalo, jonka huoneistoala on 225m² ja ilmatilavuus 700 m³. Talossa on viisi makuuhuonetta, kaksi aulatilaa, olohuone, keittiö, kaksi vaatehuonetta, kaksi suihkua, sauna, wc sekä kodinhoitohuone. Talossa asuu normaaliolosuhteissa kaksi henkilöä.

3.1 Kuvaus

Talossa on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto pyörivällä lämmöntalteenotto-laitteella. Ilmanvaihtokoneena on Enervent Pandion Eco ECE, ja se sijaitsee alakerran kodinhoitohuoneessa. Ulkoilmakanavaa ei ole eristetty ilmanvaihtokoneelle asti, joten pakkasilla siihen on kertynyt noin kahden senttimetrin paksuinen jääkerros. Ilmanvaihtokoneessa on pyörivä lämmönsiirrin ja sähköinen 800 W:n esilämmityspatteri. Tulopuolella on luokan F7 ja poistopuolella luokan F5 pussisuodatin. Suodattimet on vaihdettu 23.12.2013.

Valmistajan laskennallisessa mitoitusasteessa tuloilmavirta on 96 l/s ja poistoilmavirta 103 l/s, poistopuhallin käy nopeudella 67 % ja poistopuhallin nopeudella 64 %, tulopuhaltimen ottoteho 99 W ja poistopuhaltimen 94 W sekä kanavapaineet molemmilla puolilla 100 Pa. Mitoitusasteessa lämpötilasuhteeksi on ilmoitettu 80,4 %, vuosihyötysuhteeksi 74,8 % ja ilmanvaihtokoneen SFP-luvuksi 1,87 kW/(m³/s). Tutkimuksen aikana tuloilman lämpötilaksi oli asetettu 17 °C, puhallinnopeudeksi 75 % ja puhallinnopeuksien suhde oli poistopuhallin 60 % ja tulopuhallin 50 %.

Ilmanvaihtokoneen huurtumisenestoautomaatiikka käynnistyy, kun ulkoilman lämpötila on -5 °C. Lämpötila tarkistetaan kahden tunnin välein. Mikäli se on tarkastushetkellä alle -5 °C, tulopuhallin pysähtyy ja poistopuhallin käy nopeudella 3. Asento 3 tarkoittaa, että poistopuhaltimen nopeus on 80 %. Sulatustoiminto on päällä maksimissaan 8 % mittausvälistä (120 min) eli 9,6 minuuttia.

3.2 Mittaukset

Mittausajanjakso alkoi 2.1.2014 klo 21:05 ja päättyi 25.1.2014 klo 10:45. Tutkimuksen alussa mitattiin kertamittauksena laitevalmistajien ohjeiden sekä LVI-kortin LVI 014-10190 mukaan ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus jokaisesta päätelaitteesta. Mittaukset tehtiin anemometritorvella sekä Tecnovalor Velosicalc -monitoimimittarilla ja kuumalanka-anturilla. Lisäksi mitattiin paine-eromenetelmällä paine-ero jokaisen venttiilin yli, josta laskettiin ilmavirrat päätelaitteille. Ilmavirrat vakioitiin mittauksen ajaksi. Tarkistusmittauksia tehtiin kaksi kertaa mittausajanjakson aikana. Ilmavirtojen laskennallisiksi arvoiksi on otettu kolmen mittauksen keskiarvo, jonka poikkeama yksittäismittauksista on maksimissaan tulopuolella $\pm 2,87 \%$ ja poistopuolella $\pm 0,30 \%$.

Äänimittaukset tehtiin 6.1. klo 10 LVI-kortin LVI 014-10191 mukaisesti. Mitattiin A-painotuksella ekvivalenttiäänitasoa kolmesta eri kohdasta oleskeluvyöhykkeeltä kustakin huoneesta.

Lisäksi jokaiseen kanavaan asetettiin Lascar EL-USB-2 -mittausanturit, jotka mittasivat viiden minuutin välein ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Lisäksi ne tallensivat myös kastepisteen.

Koko mittausjakson ajan pidettiin päiväkirjaa käyttötilanteesta. Kirjattiin ylös henkilömäärä, pyykin kuivatus, ruoanlaitto sekä saunan, suihkun ja liesituulettimen käyttö.

3.3 Mittaustulokset

Mittaustulokset on jaoteltu ilmavirta- ja äänimittauksiin sekä lämpötila- ja kosteusmittauksiin. Lisäksi on omat lukunsa myös lasketuille hyötysuhteille ja SFP-luvulle. Mittaustuloksista tehtiin erilaisia taulukoita ja kuvaajia mittaustulosten analysointia ja tulkintaa varten.

3.3.1 Ilmavirta- ja äänimittaukset

Mittauksen alkuhetkellä mitattiin ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus sekä paine-ero venttiilin yli jokaisesta päätelaitteesta. Tuloilmaventtiileistä mitatut arvot sekä lasketut ilmavirrat jokaiselle päätelaitteelle nähdään taulukoista 2. Taulukossa on ilmoitettu myös venttiilin koko, sekä S kirjain, mikäli venttiilissä on suuntauslevy, sekä avauma, ja näiden mukaan määräytyvä valmistajan ilmoittama kerroin k.

TAULUKKO 2. Tuloilmaventtiileistä mitatut ja lasketut arvot lähtötilanteessa 2.1. klo 21.05

TULOT							
HUONETILA	KOKO	AVAUMA	k	Δp	q	T	ϕ
		mm		Pa	l/s	°C	%
YK MH1	100+S	13	2,9	3,2	5,2	22,7	28,4
YK AULA	125	14	6,5	4,1	13,2	23,4	27,5
YK MMH	100+S	11	2,7	5,2	6,2	23,4	27,5
AK VIH	100+S	5	1,7	12,9	6,1	22,9	28,5
AK TYÖH	100+S	6,5	2	11,4	6,8	22,7	28,4
AK AULA	125	4	2,2	16,4	8,9	22,6	29,3
AK OH1	125	10	4,6	8,2	13,2	22,8	29,8
AK OH2	125	11	5,1	6,3	12,8	22,1	29,7
AK ÄIMH	125+S	10	3,4	7,4	9,2	24,4	26,3
AK SAUNA	100+S	8	2,2	5,8	5,3	25	27
					yht.	ka	ka
					86,8	23,2	28,24

Ilmavirrat laskettiin kaavalla 1 käyttäen valmistajan antamia korjauskertoimia k kullekin venttiilille (14, s. 1).

$$q = k\sqrt{\Delta p}$$

KAAVA1

q = ilmavirta (l/s)

k = valmistajan määräämä kerroin päätelaitteelle avauksen ja koon mukaan (14, s. 29 - 30 ja s. 45 - 46)

Δp = venttiin yli mitattu paine-ero.

Taulukossa 3 on poistoilmaventtiileistä mitatut arvot sekä lasketut ilmavirrat jokaiselle päätelaitteelle.

TAULUKKO 3. Poistoilmaventtiileistä mitatut ja lasketut arvot lähtötilanteessa 2.1. klo 21.05.

POISTOT							
HUONETILA	KOKO	AVAUMA	k	Δp	q	T	φ
		mm		Pa	l/s	°C	%
YK AULA	125	10	4	13	14,4	23,9	32,7
YK VH1	100	-8	1,2	17,8	5,1	23,7	36
YK VH2	100	-7	1,2	17,6	5,0	24,2	35,3
YK SUIHKU	100	10	2,8	17,2	11,6	23,4	38,7
AK AULA	100	-5	1,4	18,1	6,0	22	33,4
AK WC	100	2	2	20,7	9,1	23,9	38,9
AK VH	100	-3	1,6	7,2	4,3	26,1	38,7
AK K	100	2	2	49,1	14,0	23,2	35,1
AK KHH	125	2	2,9	16,8	11,9	24	40,9
AK SUIHKU	100	10	2,8	12	9,7	23,8	42,5
AK SAUNA	100	10	2,8	7,6	7,7	25,8	33,4
					yht.	ka	ka
					98,8	24,0	36,87

Ilmavirrat mitattiin kolme kertaa mittausajanjakson aikana. Tulopuolen kokonaisilmavirrat olivat $q_{VT1} = 86,8$ l/s, $q_{VT2} = 84,5$ l/s ja $q_{VT3} = 88,0$ l/s, ja poistopuolen kokonaisilmavirrat $q_{VP1} = 98,8$ l/s, $q_{VP2} = 98,8$ l/s ja $q_{VP3} = 99,7$ l/s. Ilmavirtojen laskennallisiksi arvoiksi saatiin näiden keskiarvot $q_{VTulo} = 87$ l/s ja $q_{VPoisto} = 99$ l/s.

Ilmavirrat olivat hiukan pienempiä kuin suunnitellut ilmavirrat. Suunnitellut kokonaisilmavirrat olivat tulopuolella 104 l/s ja poistopuolella 111 l/s. Mitatut ilmavirrat poikkesivat suunnitelluista tulopuolella 16,3 % ja poistopuolella 10,8 %. Ilmavirtojen suhteet olivat pysyneet kuitenkin suunnilleen samana, ja ilmanvaihtoa voidaan pitää tasapainoisena.

Talossa asuu normaaliolosuhteissa vain kaksi henkilöä yhdessä makuuhuoneessa, ja muut huoneet ovat tyhjiä. Tässä makuuhuoneessa ilmavirta oli kuitenkin vain noin 9 l/s, mikä jää reilusti alle mitoitusarvon 12 l/s. Muihin makuu-

huoneisiin puhdasta ilmaa tuodaan kuitenkin noin 6 l/s, vaikka niissä ei asu ketään, joten korvausilmaa asutulle makuuhuoneelle saadaan niistä.

Ilmanvaihtokertoimeksi k saatiin 0,509 vaihtoa tunnissa, joten ilmanvaihtuvuus on riittävää tälle asunnolle. Ilmanvaihtokerroin k saadaan kaavasta 2.

$$k = 3600 \frac{q_{vPoisto}}{V_{Ilma}} \quad \text{KAAVA 2}$$

k = Ilmanvaihtokerroin (1/h)

$q_{vPoisto}$ = Poistoilmavirta (l/s)

V_{Ilma} = Rakennuksen sisäilmatilavuus (l)

Ilmanvaihdon alipaineisuudeksi saatiin 12,12 %, joka on melko suuri. Alipaineisuus laskettiin kaavaa 3 käyttäen.

$$n = \left(1 - \frac{q_{vTulo}}{q_{vPoisto}}\right) * 100\% \quad \text{KAAVA 3}$$

n = Ilmanvaihdon alipaineisuus (%)

q_{vTulo} = Tuloilmavirta (l/s)

$q_{vPoisto}$ = Poistoilmavirta (l/s)

Äänimittaukset suoritettiin ekvivalenttiäänitaso mittauksina käyttäen A-painotusta ohjeiden mukaan, ja mittari kalibroitiin ennen suoritusta. Äänimittausten tulokset löytyvät taulukosta 4.

TAULUKKO 4. Äänimittaukset 6.1.

	ÄÄNITASO 1	ÄÄNITASO 2	ÄÄNITASO 3	KESKIARVO
TILA	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)
YK MH1	25,7	25,7	25,9	25,8
YK AULA	27,1	26,5	26,2	26,6
YK MMH	30,2	29,2	29	29,5
YK VH	26,4	27	26,8	26,7
YK SUIHKU	29,2	27,2	28,4	28,3
AK VIMH	25,9	25,7	25,9	25,8
AK TYÖH	26,3	26,2	26,4	26,3
AK AULA	27,3	26,8	26,5	26,9
AK OH	27,6	30	30,8	29,5
AK ÄIMH	26,7	27,3	27,5	27,2
AK K	36,4	35,6	33,8	35,3
AK WC	25,9	26,5	26,3	26,2
AK VH	25,9	25,9	26,1	26,0
AK KHH	30,3	29,4	29,6	29,8
AK SUIHKU	28,7	28,3	28,5	28,5
AK SA	27,0	26,2	26,4	26,5

Kun verrataan ääniä sallittuihin ekvivalentti- ja maksimiäänitasoihin (ks taulukko 1, s. 12), voidaan todeta, että äänitasot ovat hyvät. Kaikki muut äänet alittavat jopa sallitun ekvivalenttiäänitason rajan lukuun ottamatta keittiön ääniä. Keittiön äänetkin alittavat kuitenkin sallitun maksimiäänitason rajan. Ottaen huomioon liesituulettimen kanavassa humisevan tuulen, voidaan todeta myös keittiön äänien olevan kohtuullisen hyvät.

3.3.2 Lämpötila- ja kosteusmittaukset

Lascar EL-USB-2 -mittausanturien tallentamista tuloksista saatiin Excel-
taulukko, jossa on noin kahdenkymmenenkolmen vuorokauden ajan viiden mi-
nuutin välein mittaustulokset lämpötilasta, suhteellisesta kosteudesta sekä kas-
tepisteestä. Tähän Excel-taulukkoon on laskettu lisäksi vesihöyryn kyllästymis-
paine p_{hs} , vesihöyryn paine p_h , ilman kosteussisältö x , ilman ominaisentalpia h ,
tehot \dot{Q}_{LTO} , \dot{Q}_{Tulo} , \dot{Q}_{LP} ja \dot{Q}_{Poisto} , lämpötilasuhde η_{LT} , entalpiahyötysuhde η_h ja
kosteuden siirron hyötysuhde η_{Kost} kullekin ajanhetkelle erikseen sekä kyseisen
ajan kokonaishyötysuhde η_a . Taulukoituja tuloksia saatiin yhteensä noin kuusi-
sataa sivua, joten liitteeksi on laitettu taulukosta vain kolme ensimmäistä sivua
esimerkiksi. (Liite 2, s. 45 - 47) Taulukon arvot on laskettu seuraavia kaavoja
käyttäen.

Vesihöyryn kyllästymispaine ilmoittaa ilmaan mahtuvan maksimaalisen vesi-
höyryn määrän. Lämpötilan noustessa kyllästymispaine nousee, joten lämpi-
mässä ilmassa voi siis olla enemmän vesihöyryä kun kylmässä. Vesihöyryn kyl-
lästymispaine saadaan kaavasta 4 (2, s. 188.)

$$p_{hs} = e^{\frac{77,345 + 0,0057 \cdot T - \frac{7325}{T}}{T^{8,2}}}$$

KAAVA 4

p_{hs} = Vesihöyryn kyllästymispaine (Pa)

e = Neperin luku $\approx 2,718282$

T = Ilman lämpötila (K)

Vesihöyryn paine ilmoittaa vesihöyryssä vallitsevan paineen (2, s.188). Vesi-
höyryn paine lasketaan kaavalla 5.

$$p_h = \varphi p_{hs}$$

KAAVA 5

p_h = Vesihöyryn paine (Pa)

φ = suhteellinen kosteus (%)

p_{hs} = Vesihöyryn kyllästymispaine (Pa)

Ilman kosteussisältö ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyryn määrän. Kosteussisältö lasketaan kaavalla 6 (2, s.188).

$$x_i = 0,622 \frac{p_h}{p_{ilma} - p_h} \quad \text{KAAVA 6}$$

x_i = Ilman kosteussisältö (kg/kg k.i.)

p_h = Vesihöyryn paine (Pa)

p_{ilma} = Ilmanpaine (Pa)

Tuloilman kosteussisältö lämmöntalteenoton jälkeen saadaan kaavasta 7.

$$x_{LTO} = x_{Ulko} + \frac{q_{vPoisto}}{q_{vTulo}} (x_{Poisto} - x_{Jäte}) \quad \text{KAAVA 7}$$

x_{LTO} = Tuloilman kosteussisältö ennen lämmöntalteenottoa (kg/kg k.i.)

$q_{vPoisto}$ = Poistoilmavirta (l/s)

q_{vTulo} = Tuloilmavirta (l/s)

x_{Poisto} = Poistoilman kosteussisältö (kg/kg k.i.)

$x_{Jäte}$ = Jäteilman kosteussisältö (kg/kg k.i.)

Ilman ominaisentalpia ilmaisee sen lämpösisällön. Ominaisentalpia lasketaan kaavalla 8 (2, s.189).

$$h = 1,006t + x_i(2501 + 1,85t) \quad \text{KAAVA 8}$$

h = Ilman ominaisentalpia (kJ/kg)

t = Ilman lämpötila (°C)

x_i = Ilman kosteussisältö (kg/kg k.i.)

Tuloilman ominaisentalpia lämmöntalteenoton jälkeen saadaan kaavasta 9.

$$h_{LTO} = h_{ulko} + \frac{q_{vPoisto}}{q_{vTulo}} (h_{Poisto} - h_{jäte}) \quad \text{Kaava 9}$$

h_{LTO} = Tuloilman ominaisentalpia ennen lämmöntalteenottoa (kJ/kg)

h_{Ulko} = Ulkoilman ominaisentalpia (kJ/kg)

$q_{vPoisto}$ = Poistoilmavirta (l/s)

q_{vTulo} = Tuloilmavirta (l/s)

h_{Poisto} = Poistoilman ominaisentalpia (kJ/kg)

$h_{Jäte}$ = Jäteilman ominaisentalpia (kJ/kg)

Lämmöntalteenottolaitteen teho lasketaan kaavalla 10 (2, s. 195).

$$\dot{Q}_{LTO} = q_{vPoisto} * \rho_{ilma} (h_{Poisto} - h_{jäte}) \quad \text{KAAVA 10}$$

\dot{Q}_{LTO} = Lämmöntalteenottolaitteen teho (kW)

$q_{vPoisto}$ = Poistoilmavirta (l/s)

ρ_{ilma} = Ilman tiheys (kg/m³)

h_{Poisto} = Poistoilman ominaisentalpia (kJ/kg)

$h_{Jäte}$ = Jäteilman ominaisentalpia (kJ/kg)

Tuloilman lämmitysteho saadaan kaavasta 11 (2, s.195).

$$\dot{Q}_{Tulo} = q_{vTulo} * \rho_{ilma}(h_{Tulo} - h_{Ulko})$$

KAAVA 11

\dot{Q}_{Tulo} = Tuloilman lämmitysteho (kW)

q_{vTulo} = Tuloilmavirta (l/s)

ρ_{ilma} = Ilman tiheys (kg/m³)

h_{Tulo} = Tuloilman ominaisentalpia (kJ/kg)

h_{Ulko} = Ulkoilman ominaisentalpia (kJ/kg)

Lämmityspatterin teho saadaan tuloilman lämmitystehon ja lämmöntalteenotto-
laitteen tehon erotuksena. Se lasketaan kaavaa 12 käyttäen.

$$\dot{Q}_{LP} = \dot{Q}_{Tulo} - \dot{Q}_{LTO}$$

KAAVA 12

\dot{Q}_{LP} = Lämmityspatterin teho (kW)

\dot{Q}_{Tulo} = Tuloilman lämmitysteho (kW)

\dot{Q}_{LTO} = Lämmöntalteenottolaitteen teho (kW)

Poistoilman lämmitysteho lasketaan kaavalla 13 (2, s 195).

$$\dot{Q}_{Poisto} = q_{vPoisto} * \rho_{ilma}(h_{Poisto} - h_{Ulko})$$

KAAVA 13

\dot{Q}_{Poisto} = Poistoilman lämmitysteho (kW)

$q_{vPoisto}$ = Poistoilmavirta (l/s)

ρ_{ilma} = Ilman tiheys (kg/m³)

h_{Poisto} = Poistoilman ominaisentalpia (kJ)

h_{Ulko} = Ulkoilman ominaisentalpia (kJ/kg)

3.3.3 Lämpötilasuhde

Tuloilman lämpötilasuhde lasketaan kaavalla 14 (2, s. 286).

$$\eta_{LT} = \frac{T_{LTO} - T_{Ulko}}{T_{Poisto} - T_{Ulko}} = \frac{q_{vPoisto}}{q_{vTulo}} \left(\frac{T_{Poisto} - T_{Jäte}}{T_{Poisto} - T_{Ulko}} \right) \quad \text{KAAVA 14}$$

η_{LT} = Lämpötilasuhde (%)

$q_{vPoisto}$ = Poistoilmavirta (l/s)

q_{vTulo} = Tuloilmavirta (l/s)

T_{Poisto} = Poistoilman lämpötila (K)

$T_{Jäte}$ = Jäteilman lämpötila (K)

T_{Ulko} = Ulkoilman lämpötila (K)

Mittausajanjakson aikana ulkolämpötila laski alle -5 °C :n 11.1. kello 15.35 ja oli alle -5 °C kokoajan 25.1. kello 10.30 asti. Tehtiin oletus, että jäätymisenestoautomaatiikka lähti toimintaan heti, kun lämpötila laski alle -5 °C ja oli toiminnassa maksimiajan 9,6 minuuttia. Oletettiin myös, että jäätymisenestoautomaatiikka lähti uudelleen toimintaan mittausvälin 120 minuuttia kuluttua ja kesti taas maksimiajan. Jäätymisenestoautomaatiikan aikana 9,6 minuuttia joka sadas kahdeskymmenes minuutti tuloilmapuhallin pysähtyi ja lämpötilasuhde sai arvon nolla. Lämpötilasuhteen keskiarvoksi koko mittausajanjaksolle saatiin 77,4 %. Kun huurtumisenestoautomaatiikka jätettiin huomioimatta, keskiarvoksi saatiin 81,3 %, joka on hiukan suurempi kuin mitoitusasteessa saatu lämpötilasuhde 80,4 %. Lämpötilasuhde ei muuttunut ulko- ja sisäilman lämpötilaeron funktiona, vaan ainoastaan huurteenesto vaikutti lämpötilasuhteeseen.

3.3.4 Entalpiahyötysuhde

Entalpiahyötysuhde laskettiin kaavaa 15 käyttäen (2, s. 197).

$$\eta_h = \frac{h_{LTO} - h_{Ulko}}{h_{Poisto} - h_{Ulko}} \quad \text{KAAVA 15}$$

η_h = Entalpia hyötysuhde (%)

h_{LTO} = Tuloilman ominaisentalpia ennen lämmöntelteenottoa (kJ/kg)

h_{Ulko} = Ulkoilman ominaisentalpia (kJ/kg)

h_{Poisto} = Poistoilman ominaisentalpia (kJ/kg)

Entalpiahyötysuhteiden keskiarvoksi saatiin koko mittausajanjaksolle 73,2 %. Huurtumisenestoautomaatiikan aikana myös entalpiahyötysuhde meni nollassi, ja se on otettu huomioon samalla tavalla kuin lämpötilahyötysuhdetta laskettaessa. Tilanteesta, jolloin huurtumisenestoautomaatiikka ei ollut päällä, entalpiahyötysuhteen keskiarvoksi saatiin 77,1 %. Entalpiahyötysuhdetta tarkasteltiin ulkolämpötilan, poisto- ja ulkoilman energiasisältöjen erotuksen sekä poisto- ja ulkoilman kosteussisältöjen erotuksen suhteen.

Entalpiahyötysuhde poisto- ja ulkoilman välisen ominaisentalpiaerotuksen suhteen

Entalpiahyötysuhdetta sekä poisto- ja ulkoilman energiasisältöjen erotuksen suhdetta tarkasteltaessa tehtiin kuusi erilaista taulukkoa ja piirrettiin niistä kuvaajat. Ensimmäisessä kuvaajassa kaikki tilanteet olivat mukana. Toinen on tilanteista, joissa sekä kosteus- että henkilökuormia ei ole mukana. Kolmas kuvaaja on tehty tilanteista, jossa on vain joko kosteus- tai henkilökuormaa tai molempia yhä aikaa. Lisäksi tehtiin kuvaajat edellä mainituista tilanteista, jolloin huurtumisenestoautomaatiikka ei ollut päällä.

Henkilökuormalla tarkoitetaan tässä opinnäytetyössä tilannetta, kun talossa on enemmän kuin kaksi henkilöä. Kosteuskuormia ei ole jaoteltu niiden kuormittavuuden mukaan, ja mikäli kosteuskuormia on ollut useita samanaikaisesti, niitä ei ole lisätty tai siirretty toiselle ajanhetkelle. Kaikki kosteuskuormat on vain ajallisesti merkitty Excel-taulukkoon.

Kuvaajat on tehty siten, että ensin on laskettu poisto- ja ulkoilman välinen ominaisentalpiaerotus, järjestetty saadut arvot ja niitä vastaavat entalpiahyötysuhteet suuruusjärjestykseen. Tämän jälkeen on laskettu keskiarvo samoja ominaisentalpiaerotuksia vastaaville entalpiahyötysuhteille. Lisäksi on tarkasteltu keskiarvon sekä minimi- ja maksimiarvojen erotusta. Jokaisessa kuvaajassa on siis kolme käyrää, josta voidaan tarkastella saatujen arvojen vaihteluvälejä. Yksi on piirretty minimiarvoista, toinen keskiarvoista ja kolmas maksimiarvoista.

Kuormien ei huomattu merkittävästi vaikuttavan entalpiahyötysuhteeseen ominaisentalpiaerotuksen muuttuessa, joten liitteeksi on laitettu vain kuvaaja, jossa kaikki tilanteet ovat mukana, sekä kuvaaja, jossa huurteenesto ei ollut päällä. Entalpiahyötysuhteen ja ominaisentalpiaerotusten välisestä riippuvuudesta piirretyt kuvaajat löytyvät liitteestä 3 (Liite 3, s. 48). Kuten kuvaajista voidaan huomata, entalpiahyötysuhde paranee ominaisentalpiaerotuksen kasvaessa. Kasvu on melko tasaista, ja poikkeamat keskiarvosta ovat pieniä.

Poisto- ja ulkoilman ominaisentalpian minimierotukseksi saatiin 18 kJ/kg ja keskiarvoiseksi entalpiahyötysuhteeksi tälle arvolle saatiin 74,9 %. Ominaisentalpian maksimierotukseksi saatiin 87 kJ/kg ja sitä vastaavaksi keskiarvoiseksi entalpiahyötysuhteeksi 88,7 %.

Entalpiahyötysuhde poisto- ja ulkoilman välisen kosteussisältöerotuksen suhteen

Entalpiahyötysuhteesta ja kosteussisältöjen erotusten suhteesta piirrettiin kuvaajat samankaltaisista tilanteista ja samalla periaatteella kuin entalpiahyötysuhteesta ja ominaisentalpiaerotuksista (Liite 4, s. 49). Kuten kuvaa-

jista voidaan huomata, entalpiahyötysuhde paranee kosteussisältöerotuksen kasvaessa.

Poisto- ja ulkoilman kosteussisältöjen minimierotukseksi saatiin 0,3 g/kg k.i. ja keskiarvoiseksi entalpiahyötysuhteeksi tälle arvolle saatiin 76,9 %. Kosteussisältöjen maksimierotukseksi saatiin 10,6 g/kg k.i. ja sitä vastaavaksi keskiarvoiseksi entalpiahyötysuhteeksi 88,7 %.

Entalpiahyötysuhde ulkolämpötilan suhteen

Entalpiahyötysuhteesta ja ulkolämpötilasta piirrettiin kaksi kuvaajaa, toinen kaikista tilanteista ja toinen tilanteista, jolloin huurteenestoautomaattikka ei ollut päällä. Kuvaajat on tehty samalla periaatteella kuin entalpiahyötysuhteen ja ominaisentalpiaerotusten kuvaajat. Lämpötilat ja niitä vastaavat entalpiahyötysuhteet on järjestetty pienimmästä suurimpaan ja laskettu keskiarvot kutakin lämpötilaa vastaaville entalpiahyötysuhteille. Kuvaajat löytyvät liitteestä 5. (Liite 5, s. 50) Kuten kuvaajista huomataan, entalpiahyötysuhde huononee lämpötilan kasvaessa. Tämä käyttäytyy siis päinvastoin kuin entalpiahyötysuhde verrattaessa kosteussisältömuutokseen, sillä ulkolämpötilan noustessa poisto- ja ulkoilman välinen kosteussisältömuutos pienenee, koska lämmin ilma sisältää enemmän kosteutta.

3.3.5 Kosteudensiirron hyötysuhde

Kosteudensiirron hyötysuhde saadaan kaavalla 16 (2, s. 286).

$$\eta_{Kost} = \frac{x_{LTO} - x_{Ulko}}{x_{Poisto} - x_{Ulko}}$$

KAAVA 16

η_{Kost} = Kosteudensiirron hyötysuhde (%)

x_{LTO} = Tuloilman kosteussisältö ennen lämmöntalteenottoa (kg/kg k.i.)

x_{Ulko} = Ulkoilman kosteussisältö (kg/kg k.i.)

x_{Poisto} = Poistoilman kosteussisältö (kg/kg k.i.)

Kokonaiskeskiarvoja eri kuormitustilanteille laskettaessa huomattiin, että kosteudensiirron hyötysuhde on parempi, kun talossa on kosteus- ja henkilökuormia. Kosteuskuormat lisäävät poistoilman kosteussisältöä, ja näin poisto- ja ulkoilman välinen kosteussisältöjen erotus suurenee. Lisäksi huurteenesto huonontaa hyötysuhdetta. Merkillepantavaa oli kuitenkin, että poikkeamat hyötysuhdeissa eri tilanteissa olivat melko pieniä. Vertailtaessa tilannetta, jossa oli vain kuormia, sekä tilannetta, jossa ei ollut ollenkaan kuormia, havaittiin kuitenkin ero selvemmin. Kosteudensiirron kokonaishyötysuhteeksi ajalle, jossa oli vain kosteuskuormia, saatiin 54,1 % ja ajalle, jolloin ei ollut kuormia ollenkaan, saatiin 36 %. Taulukosta 5 löytyvät kosteudensiirron hyötysuhteet kullekin tilanteelle.

TAULUKKO 5. Kosteudensiirron hyötysuhteiden keskiarvot eri kuormitustilanteista

KAIKKI KESKIARVOT	
n_{kost} -kaikki	43,4 %
n_{kost} -ei kuormia	36,0 %
n_{kost} -vain kuormat	54,1%
n_{kost} -ei huurteenestoa	45,6 %
n_{kost} -ei huurteenestoa-ei kuormia	38,0 %
n_{kost} -ei huurteenestoa-vain kuormat	57,5 %

Lisäksi kosteudensiirron hyötysuhdetta tarkasteltiin sekä ulkolämpötilan että poisto- ja ulkoilman kosteussisältöjen erotuksen suhteen.

Kosteudensiirron hyötysuhde poisto- ja ulkoilman kosteussisältömuutoksen suhteen

Tehtiin kuusi erilaista taulukkoa samankaltaisista tilanteista kuin entalpiahyötysuhdetta tarkasteltaessa ja piirrettiin niistä kuvaajat (Liite 6 s. 51 - 53). Kosteudensiirron hyötysuhteella sekä poisto- ja ulkoilman kosteussisältöjen erotuksella huomattiin olevan selvä yhteys. Kosteussisältöjen erotuksen kasvaessa kosteudensiirron hyötysuhde paranee.

Poisto- ja ulkoilman kosteussisältöjen minimierotukseksi saatiin 0,3 g/kg k.i. ja keskiarvoiseksi kosteudensiirron hyötysuhteeksi tälle arvolle saatiin jopa -33,8 %. Tässä kohtaa huomataan mittausmenetelmien sekä mittarien virheen olevan suuri, koska laskennalliseksi arvoksi saatiin miinusmerkkinen luku. Kun erotus on pieni, virhemahdollisuus suurenee. Kosteussisältöjen maksimierotukseksi saatiin 10,2 g/kg k.i. ja sitä vastaavaksi keskiarvoiseksi kosteudensiirron hyötysuhteeksi 97,6 %.

Kosteudensiirron hyötysuhde ulkolämpötilan suhteen

Kosteudensiirron hyötysuhteesta ja ulkolämpötilasta piirrettiin myös kuusi kuvaajaa samanlaisista kuormitusilanteista ja samalla periaatteella kuin entalpiahyötysuhteen ja kosteussisältömuutoksen kuvaajat (Liite 7, s. 54 - 56). Kosteudensiirron hyötysuhteen kuvaaja ulkolämpötilan suhteen on melko jyrkästi laskeva, ja poikkeamat keskiarvosta ovat myös suuria. Kuvaajista ja poikkeamien suuruudesta voidaan todeta, että kosteudensiirron hyötysuhteeseen vaikuttavat hyvin selkeästi monet muuttujat, ja on vaikeaa löytää selkeää verrannollisuutta ainoastaan kahden muuttujan välille. Kuvaaja, josta kosteuskuormat sekä huurteeneston vaikutus on poistettu, on kuitenkin selkeämpi, ja siinä ei esiinny yhtä suuria poikkeamia kuin kuvaajassa, jossa on myös kosteuskuormat.

Talossa oli havaittu muutamia kertoja ikkunoiden huurtumista kovilla pakkasilla ennen tätä tutkimusta. Tutkimuksen aikana tällaista tilannetta ei kuitenkaan syntynyt, vaikka pakkasikävi jopa -24 °C:ssa. Kosteudensiirron hyötysuhteen

keskiarvo mittausajanjaksolle oli muutenkin hyvin alhainen, 43,4 %. Tutkittaessa eri lämpötiloja voidaan kuitenkin todeta, että kovimmilla pakkasilla, kun ulkoilma on hyvin kuivaa, kosteudensiirron hyötysuhde on korkeimmillaan.

3.3.6 Kokonaishyötysuhde mittausajanjaksolle

Lämmöntalteenoton poistoilman hyötysuhde kyseiseltä ajanjaksolta on poistoilmasta talteenotetun energian suhde koko ilmanvaihdon energiatarpeeseen. Se lasketaan kaavalla 17.

$$\eta_a = \frac{\sum \dot{Q}_{LTO} t}{\sum \dot{Q}_{Poisto} t} = \frac{q_{vPoisto} \rho_i (h_{Poisto} - h_{Jäte}) t}{q_{vPoisto} \rho_i (h_{Poisto} - h_{Ulko}) t} \quad \text{KAAVA 17)}$$

η_a = Hyötysuhde kyseiseltä ajanjaksolta (%)

$\sum \dot{Q}_{LTO}$ = Lämmöntalteenottolaitteen tehojen summa kyseiseltä ajanjaksolta (kW)

$\sum \dot{Q}_{Poisto}$ = Poistoilman lämmitystehojen summa kyseiseltä ajanjaksolta (kW)

t = aika (s)

Ilmanvaihtojärjestelmän kokonaishyötysuhde mittausajanjaksolle oli 68,7 %. Vuosihyötysuhteeksi ilmanvaihtokoneelle on ilmoitettu 74,8 % Ympäristöministeriön monisteen 122 mukaisesti laskettuna.

3.3.7 SFP-luku

SFP-luku lasketaan kaavalla 18 (15, s. 2).

$$SFP = \frac{P_{Tulo} + P_{Poisto} + P_{Apulaitteet}}{q_{vmax}} \quad \text{KAAVA 18}$$

$SFP =$ Ilmanvaihdon ominaissähköteho (kW/(m³/s))

$P_{Tulo} =$ Tuloilmapuhaltimen ottoteho (kW)

$P_{Poisto} =$ Poistoilmapuhaltimen ottoteho (kW)

$P_{Apulaitteet} =$ Apulaitteiden ottoteho (kW)

$q_{vmax} =$ Suurin ilmavirta, johon on lisäksi huomioitu liesituulettimen ilmavirta (m³/s)

q_{vmax} on tässä tapauksessa laskettu käyttäen Ympäristöministeriön D3 LTO-laskin 2012:ta, josta maksimi-ilmavirraksi saatiin 0,111 (m³/s) (15). SFP-luvuksi saatiin 2,28 kW/(m³/s) käyttäen mitoitustilanteen ottotehoja (ks. luku "Case" -kuvaus) sekä valmistajan ilmoittamaa liesituulettimen puhaltimen tehonkulutusta maksimi-ilmavirralla $\emptyset_{ottotehomax} = 60$ W.

3.4 Johtopäätökset

Mitatut ilmavirrat olivat hieman pienempiä kuin suunnitellut ilmavirrat, mutta huonekohtaisten ilmavirtojen suhteet olivat kuitenkin pysyneet suunnilleen samansuuruisina. Ilmanvaihtokertoimeksi saatiin 0,508 vaihtoa tunnissa, joten ilmanvaihtoa voidaan pitää riittävänä. Alipaineisuudeksi saatiin melko suuri luku, 12,12 %. Tätä voidaan pitää hieman tarpeettoman suurena, joten tuloilmavirtaa voisi hieman lisätä. Ilman epäpuhtauksien pitoisuusmittauksia ei tässä tutkimuksessa tehty, mutta ilmanvaihtokoneen suodattimet oli vaihdettu noin kaksi viikkoa ennen mittauksien aloittamista, joten voidaan olettaa, että sisäilmaan ei tule liian suuria epäpuhtauspitoisuuksia ainakaan ilmanvaihtokoneen kautta.

Äänimittauksia ei ollut tähän taloon aikaisemmin tehty, joten vertailukohtaa saaduille ääniarvoille ei aiemmista mittauksista saatu. Äänet olivat jopa reilusti alle sallittujen ekvivalenttiäänitasojen lukuun ottamatta keittiön ääniä. Keittiössä

kaikki kolme mittausta ylittivät sallitun ekvivalenttiäänitason rajan, ja suurin ylitys oli 3,4 dB. Kaikki arvot pysyivät kuitenkin sallitun hetkellisen maksimiäänitason $L_{A,Max}=38$ dB alapuolella. Olosuhteet mittaushetkellä olivat hyvin tuuliset, ja ulkoilma kohisi liesituulettimen kanavassa aiheuttaen hetkellistä suurempaa äänitasoa. Voidaan todeta, että äänitasot olivat hyvät.

Lämpötilahyötysuhteiden keskiarvoksi mittausajanjakson ajalle saatiin 77,4 %, huurtumisestoautomaatiikan toiminta huomioiden. Tämä arvo jää hiukan mitoitus-tilanteessa ilmoitetun lämpötilasuhteen 80,4 % alapuolelle. Noin 61 % mittausajanjaksosta ulkolämpötila oli alle -5 °C, ja 8 % tästä ajasta huurtumisenestoautomaatiikka oli käytössä, jolloin lämpötilasuhte oli 0 %. Ajanjaksolle, jolloin huurtumisenestoautomaatiikka ei ollut toiminnassa, lämpötilasuhteiden keskiarvoksi saatiin 81,3 %. Lämpötilasuhte näissä mittauksissa on suunnilleen samaa suuruusluokkaa kuin valmistajan ilmoittama lämpötilasuhte mitoitus-tilanteessa.

Kosteuden siirron hyötysuhteiden keskiarvoksi saatiin 43,3 %. Piirrettyjen kuvaajien perusteella huomattiin, että ulkolämpötilan noustessa kosteuden siirron hyötysuhde pienenee. Näin ollen kosteutta siirtyy poistoilmasta tuloilmaan silloin, kun ulkoilma on kaikista kuivinta ja tarve suurin. Korkein kosteudensiirron hyötysuhde oli 99,9 % ulkolämpötilan ollessa -19 °C, ja matalin kosteudensiirron hyötysuhde 0,8 % saavutettiin lämpötilassa $4,5$ °C. Tässä tarkastelussa ei ole huomioitu miinusmerkkisiä eikä yli sadan prosentin kosteudensiirron hyötysuhteita. Kosteudensiirron hyötysuhdetta on kuitenkin kaiken kaikkiaan hyvin alhainen. Huomattiin myös, että kosteus- ja henkilökuormien lisääntyessä kosteudensiirron hyötysuhteen kokonaiskeskiarvo parani, ja kun otettiin tilanne, jossa oli ainoastaan ajanjaksot, jolloin oli joko kosteus- tai henkilökuormaa tai molempia yhtä aikaa, kokonaiskeskiarvo oli jopa 18,1 % parempi. Verrattaessa kosteudensiirron hyötysuhdetta myös lämpötilasuhteeseen, voidaan todeta sen olevan huomattavasti alhaisempi kuin lämpötilasuhte.

Kuormitus-tilanteita ei ohjattu mitenkään, vaan kirjattiin ylös satunnaiset vallitsevat tekijät. Kuormia ei myöskään lajiteltu enemmän tai vähemmän kuormittaviin tekijöihin. Mittareiden sekä mittausmenetelmien virheitä ei myöskään otettu laskennassa huomioon, minkä vuoksi mittaustulokset eivät sisällä virhemarginaalia. Tämän vuoksi tilanteiden variaatiot ovat erittäin suuria, ja tulkinta joiltakin

osin erittäin hankalaa. Tarkempia mittaustuloksia olisi saatu, jos kosteus- ja henkilökuormat olisi ajoitettu tietyille ajanjaksoille ja kosteuskuormat lajiteltu kuormittavuuden tai edes kosteuskuormitusten määrän mukaan. Esimerkiksi jos samaan aikaan olisi ollut monta kosteuskuormaa, ne olisi huomioitu erikseen eikä vain samalla tavalla kuin olisi ollut yksi kosteustekijä.

Entalpiahyötysuhteeksi koko mittausajanjaksolle saatiin 73,2 %. Kun huurteenestoautomaatiikka jätettiin huomioimatta, se oli 77 %. Verrattaessa tätä arvoa lämpötilasuhteeseen huomataan entalpiahyötysuhteen myös jäävän lämpötilasuhteen alapuolelle.

Ilmanvaihdon kokonaishyötysuhteeksi koko ajanjaksolle saatiin 68,7 %. Vuosihyötysuhteeksi ilmanvaihtokoneelle valmistaja on ilmoittanut 74,8 % Ympäristöministeriön monisteen 122 mukaisesti laskettuna. Ottaen huomioon että kyseisellä ajanjaksolla ulkoilman lämpötila oli maksimissaan +5,5 °C ja 65 % mittausajanjaksosta oli alle 0 °C, voidaan todeta kokonaishyötysuhteen olevan melko hyvä.

Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehoksi saatiin 2,28 kW/(m³/h). Valmistajan ilmoittama SFP-luku ainoastaan ilmanvaihtokoneelle oli 1,87 kW/(m³/h). Kun otettiin laskennassa huomioon liesituulettimen ilmavirta ja ottoteho maksimiilmavirralla, SFP-luku nousi melkoisesti. SFP-luku on laskettu valmistajan ilmoittamien ottotehojen mukaan mitoitustilanteessa, joten se ei kuvasta ihan tarkasti kyseistä mittaustilannetta. Saatua arvoa voidaan kuitenkin pitää hyvänä. Ilmanvaihtokoneen sähkönkulutus olisi saatu tarkemmin, mikäli olisi ollut mahdollista mitata ottotehoja tutkimustilanteessa eri olosuhteissa.

4 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin melko uuden omakotitalon ilmanvaihtojärjestelmä ja -koneen toimintaa. Tutkimusongelmaa laadittaessa tarkoituksena oli aluksi keskittyä ilmanvaihtokoneen toiminnan tutkimiseen. Mittausten alkaessa haluttiin kuitenkin kiinnittää huomiota myös ilmanvaihtojärjestelmän ilmanvaihtuvuuden riittävyteen ja tasapainoisuuteen, joten työtä laajennettiin koskemaan myös koko ilmanvaihtojärjestelmää. Lisäksi ilmanvaihtoa ei tehostettu kuormien lisääntyessä, vaan haluttiin tutkia, miten kuormat vaikuttavat talossa yleisesti vallitseviin olosuhteisiin. Usein ilmanvaihtoa ei tutkita käyttöönoton ja ensimmäisen säädön jälkeen, joten haluttiin myös tietää, onko järjestelmä edelleen tasapainoinen.

Omakotitalo oli otettu käyttöön 23.12.2011, ja ilmavirrat oli säädetty ja mitattu suunnitelmien mukaisiksi 16.12.2011. Ilmanvaihtojärjestelmän tasapainoisuutta sekä ilmavaihtuvuuden riittävyttä tutkittiin ilmavirtamittausten avulla. Todettiin, että ilmavirrat olivat hieman suunniteltuja pienemmät, mutta ilmanvaihto on tasapainossa ja ilmanvaihtuvuus 0,508 vaihtoa tunnissa riittävä tälle asunnolle. Asunnon alipaineisuutta voisi kuitenkin hieman pienentää tuloilmavirtaa nostamalla.

Kaikki äänitasot alittivat sallitut ekvivalenttiäänitasot reilusti lukuun ottamatta keittiön ääniä. Keittiön äänet jäivät kuitenkin sallitun hetkellisen maksimin alapuolelle. Ottaen huomioon mittaushetkellä erittäin tuuliset olosuhteet, jotka aiheuttivat selvästi havaittavaa kohinaa liesituulettimen poistoilmakanavassa, äänitasoja voidaan pitää kokonaisuudessaan hyvänä.

Ilmanvaihtokoneen lämpötilasuhde tutkimuksen aikana oli 81,3 %, kun huurtumisenestoautomaatiikka ei ollut ollut päällä. Tämä on jopa hieman parempi kuin valmistajan ilmoittama lämpötilasuhde mitoitusilanteessa 80,4 %. Entalpiahyötysuhteen keskiarvoksi mittausajanjaksolle saatiin 77,1 %, joka jää hieman lämpötilasuhteen alapuolelle. Kosteudensiirron hyötysuhde jäi todella alhaiseksi 45,6 %. Huurtumisenestoa ei ollut ollut päällä myöskään näitä keskiarvoja määritettäessä. Kosteudensiirron hyötysuhde oli kuitenkin suurimmillaan

ulkoilman lämpötilan ollessa alhaisin, jolloin kosteutta sisäilmaan erityisesti tarvitaan. Voidaan todeta, että ilmanvaihtokone ei kuitenkaan todennäköisesti siirrä liikaa kosteutta eikä aiheuta riskiä kosteusvaurioiden syntymiselle. Ilmanvaihtojärjestelmän kokonaishyötysuhteeksi ajanjaksolle saatiin 68,7 %. Verrattaessa tätä valmistajan ilmoittamaan vuosihyötysuhteeseen 74,8 % mitoitustilanteessa ja ottaen huomioon, että 65 % mittausajanjaksosta ulkoilman lämpötila oli alle 0 °C, voidaan sen todeta olevan kohtalaisen hyvä. Pakkasolosuhteet ja ulkoilman alhainen lämpötila koko mittausajanjakson ajan huonontavat hyötysuhteita.

Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehoksi saatiin 2,28 kW/(m³/s), jota voidaan myös pitää hyvänä. Voidaan todeta, että ilmanvaihtojärjestelmä ei kuluta tarpeettomasti energiaa.

LÄHTEET

1. D2 (2012). 2011. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 2012. D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö, rakennetun ympäristön osasto. Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012_Suomi.pdf Hakupäivä 7.4.2014.
2. Seppänen, Olli 2006. Ilmastointiteknikka ja sisäilmasto. Anjalankoski: Solver Palvelut Oy.
3. Enervent. Usein kysytyt kysymykset. Saatavilla: http://www.enervent.fi/faq.asp?menuid=60000&langid=1&countryid=100&id=13#id_13 Haettu 19.3.2014.
4. LVI 014-10191. 1992. Ilmastointi, ilmastointijärjestelmän vastaanottomittaukset, äänimittaukset Saatavissa: <http://www.rakennustieto.fi/tuote.html.stx?RANEget=/index&tuote=/LVI8358> Haettu 7.4.2014.
5. D3 (2012). 2011. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö, rakennetun ympäristön osasto. Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf Haettu 7.4.2014.
6. Kasari, Ilkka 2010. Teollisuusrakennuksen ilmanvaihtokoneen LTO-laitteiston hyötysuhteen parantaminen. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kandidaatintyö.
7. The Bulgarian Houses. ECOZID. Ventilation heating and cooling passive house – Looking to the future. Saatavissa: <http://www.ecozid.com/en.php?p=src&id=138> Haettu 5.3.2014.

8. Rotary Heat Exchanger. Enventus. Saatavissa:
<http://www.enventus.se/products/rotary-heat-exchanger/> Haettu
4.4.2014.
9. Ilman käsittelykone eQ. Maksimaalista energiatehokkuutta Semco-roottorin avulla. 2012. Fläkt Woods. Saatavissa:
<http://www.flaktwoods.fi/54aeac3f-720e-42c6-b6f4-f6b0b3acad10> Haettu
13.4.2014.
10. Kuha, Jouko 2011. Ilmanvaihtokoneen testaus. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, talotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.
11. Tasauslaskentaopas 2012, 2012. Ympäristöministeriö. Rakennusten lämpöhäviöiden määräystenmukaisuuden osoittaminen. Saatavilla:
<http://www.energiatodistuskoulu.fi/images/stories/archive/rakm/tasaus12.pdf> Haettu 13.4.2014
12. LVI 30-10529. 2013. Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho SFP. Rakennustieto Oy. Saatavissa:
<https://www.rakennustieto.fi/bin/get/id/5quoZSL5w%3A%2447%24L10529%2446%24pdf.0.0.5gunJ4yOi%3A%2447%24handlers%2447%24net%2447%24statistics%2495%24download%2495%24pdf%2446%24stato.5qv06pziY%3AC1-109760/L10529.pdf> Haettu 22.4.2014.
13. Seppänen, Olli–Brelh, Nejc–Bertilsson, Thore–Maripuu, Mari-Liis–Lamy–Herve, Vanden–Borre, Alex 2012. Rehva guidebook: Design of energy efficient ventilation and air-conditioning systems. Romania.
14. Ilmavirtojen mittaus- ja säätöopas 2011. Fläkt Woods. Saatavilla
<http://www.flaktwoods.fi/184/0/3/27064aaf-dc88-4665-b00b-12923bdb017b> Haettu 18.3.2014

15.D3 LTO-laskin 2012, version marraskuu 2011. 2013. Ympäristöministeriö. Saatavilla: [http://www.ymp.fi/fi-FI/Maankaytto_ ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ ja_ ohjeet/Rakentamismääräyskokoelma/Suomen_rakentamismääräyskokoelma\(3624\)](http://www.ymp.fi/fi-FI/Maankaytto_ ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ ja_ ohjeet/Rakentamismääräyskokoelma/Suomen_rakentamismääräyskokoelma(3624)) Haettu 22.4.2014

LÄHTÖTIETOMUISTIO

Tekijä Laura Sivula, t0sila00@students.oamk.fi

Tilaaaja Jouko Sivula

Tilaaajan yhdyshenkilö ja yhteystiedot:

Työn nimi Omakotitalon ilmanvaihtokoneen toiminta

Työn kuvaus Työssä selvitetään ilmanvaihtokoneen toiminta tavanomaisessa ja tehostetussa käyttötilanteessa. Selvitetään lämmöntalteenoton lämpötilahyötysuhde ja kosteuden siirron hyötysuhde eri käyttötilanteissa. Selvitetään, missä ulkoilman ja poistoilman oloissa lämmöntalteenottokeino huurtuu. Molemmilla tilanteilla mitataan ilmavirrat ja äänitasot asuinhuoneissa kertamittauksena. Jatkuvana mittauksena seurataan ulkoilman, poistoilman, jäteilman ja tuloilman lämpötilaa sekä kosteutta. Lämpötila- ja kosteusmittaukset tehdään jatkuvien mittauksien aluksi kertamittauksena. Kaikista käyttötilanteista (saunominen, takan käyttö, pyykinpesu, henkilömäärä, liesituulettimen käyttö) pidetään päiväkirjaa.

Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on selvittää omakotitalon ilmanvaihtokoneen energiatehokkuus ja toiminta tavanomaisissa käyttöoloissa.

Tavoiteaikataulu

Mittaukset suoritetaan 22.12.2013 – 31.1.2014

Mittaustulosten käsittely 1.2. – 28.2.2014

Raportointi 1.3. – 30.4.2014

Jouko Sivula

Laura Sivula

	TULO						RAITIS					
	t	rh	p _{hs}	p _h	x	h	t	rh	p _{hs}	p _h	x	h
2.1.2014 21:05	19,5	29,5	2260	667	0,00412	30,07	0,5	85,5	632	540	0,00333	8,85
2.1.2014 21:10	19	29,5	2191	646	0,00399	29,24	0,5	85,5	632	540	0,00333	8,85
2.1.2014 21:15	19	30,5	2191	668	0,00413	29,59	0,5	86	632	543	0,00335	8,89
2.1.2014 21:20	19	30,5	2191	668	0,00413	29,59	0,5	86	632	543	0,00335	8,89
2.1.2014 21:25	19	30,5	2191	668	0,00413	29,59	0,5	86	632	543	0,00335	8,89
2.1.2014 21:30	19	31	2191	679	0,00420	29,76	0,5	86	632	543	0,00335	8,89
2.1.2014 21:35	19	32	2191	701	0,00433	30,10	0,5	86	632	543	0,00335	8,89
2.1.2014 21:40	19	31	2191	679	0,00420	29,76	0,5	86	632	543	0,00335	8,89
2.1.2014 21:45	19	32	2191	701	0,00433	30,10	0,5	86	632	543	0,00335	8,89
2.1.2014 21:50	19	32	2191	701	0,00433	30,10	0,5	86	632	543	0,00335	8,89
2.1.2014 21:55	19	32	2191	701	0,00433	30,10	0,5	86	632	543	0,00335	8,89
2.1.2014 22:00	19	31	2191	679	0,00420	29,76	0,5	86	632	543	0,00335	8,89
2.1.2014 22:05	19	31	2191	679	0,00420	29,76	0,5	86	632	543	0,00335	8,89
2.1.2014 22:10	19	31	2191	679	0,00420	29,76	0,5	85	632	537	0,00331	8,80
2.1.2014 22:15	19	31	2191	679	0,00420	29,76	0,5	85	632	537	0,00331	8,80
2.1.2014 22:20	19	31	2191	679	0,00420	29,76	0,5	85,5	632	540	0,00333	8,85
2.1.2014 22:25	19	30,5	2191	668	0,00413	29,59	0,5	85	632	537	0,00331	8,80
2.1.2014 22:30	19	30,5	2191	668	0,00413	29,59	0,5	85	632	537	0,00331	8,80
2.1.2014 22:35	19	30,5	2191	668	0,00413	29,59	0,5	85	632	537	0,00331	8,80
2.1.2014 22:40	19	30,5	2191	668	0,00413	29,59	0,5	85	632	537	0,00331	8,80
2.1.2014 22:45	19	31	2191	679	0,00420	29,76	0,5	85	632	537	0,00331	8,80
2.1.2014 22:50	19	30,5	2191	668	0,00413	29,59	0,5	85	632	537	0,00331	8,80
2.1.2014 22:55	19	30,5	2191	668	0,00413	29,59	0,5	85	632	537	0,00331	8,80
2.1.2014 23:00	19	30,5	2191	668	0,00413	29,59	0,5	85	632	537	0,00331	8,80
2.1.2014 23:05	19	30,5	2191	668	0,00413	29,59	0,5	85	632	537	0,00331	8,80
2.1.2014 23:10	19	30,5	2191	668	0,00413	29,59	0,5	84,5	632	534	0,00330	8,75
2.1.2014 23:15	19	30,5	2191	668	0,00413	29,59	0,5	84,5	632	534	0,00330	8,75
2.1.2014 23:20	19	30	2191	657	0,00406	29,41	0,5	84,5	632	534	0,00330	8,75
2.1.2014 23:25	19	30,5	2191	668	0,00413	29,59	0,5	84,5	632	534	0,00330	8,75

POISTO						JÄTE					
t	rh	p _{hs}	p _h	x	h	t	rh	p _{hs}	p _h	x	h
22,5	36	2717	978	0,00606	38,05	7,5	78	1034	806	0,00499	20,09
22,5	36	2717	978	0,00606	38,05	7,5	78,5	1034	812	0,00502	20,17
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79	999	789	0,00488	19,32
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	37	2717	1005	0,00623	38,49	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36	2717	978	0,00606	38,05	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36	2717	978	0,00606	38,05	7	79	999	789	0,00488	19,32
22,5	36,5	2717	992	0,00615	38,27	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36	2717	978	0,00606	38,05	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36	2717	978	0,00606	38,05	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36	2717	978	0,00606	38,05	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36	2717	978	0,00606	38,05	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36	2717	978	0,00606	38,05	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36	2717	978	0,00606	38,05	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	36	2717	978	0,00606	38,05	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	35,5	2717	965	0,00598	37,84	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	35,5	2717	965	0,00598	37,84	7	79,5	999	794	0,00491	19,40
22,5	35,5	2717	965	0,00598	37,84	7	79,5	999	794	0,00491	19,40

\emptyset_{LTO}	\emptyset_{TULO}	\emptyset_{LP}	\emptyset_{POISTO}	x_{LTO}	η_{kost1}	h_{LTO}	η_{h1}	η_{LPT2}	HLÖ	KUORMA
2,18	2,26	0,08	3,54	0,004557	0,448	29,283	0,700	0,78	8+K	
2,17	2,17	0,01	3,54	0,004520	0,434	29,191	0,697	0,78	8+K	
2,30	2,21	0,00	3,56	0,004795	0,516	30,462	0,734	0,80	8+K	
2,29	2,21	0,00	3,56	0,004760	0,503	30,372	0,731	0,80	8+K	
2,29	2,21	0,00	3,56	0,004760	0,503	30,372	0,731	0,80	8+K	
2,29	2,22	0,00	3,56	0,004760	0,503	30,372	0,731	0,80	8+K	
2,29	2,26	0,00	3,56	0,004760	0,503	30,372	0,731	0,80	8+K	
2,32	2,22	0,00	3,59	0,004856	0,522	30,619	0,734	0,80	2	
2,29	2,26	0,00	3,56	0,004760	0,503	30,372	0,731	0,80	2	
2,29	2,26	0,00	3,56	0,004760	0,503	30,372	0,731	0,80	2	
2,29	2,26	0,00	3,56	0,004760	0,503	30,372	0,731	0,80	2	
2,29	2,22	0,00	3,56	0,004760	0,503	30,372	0,731	0,80	2	
2,29	2,22	0,00	3,56	0,004760	0,503	30,372	0,731	0,80	2	
2,29	2,23	0,00	3,57	0,004720	0,496	30,274	0,729	0,80	2	
2,29	2,23	0,00	3,57	0,004720	0,496	30,274	0,729	0,80	2	
2,29	2,23	0,00	3,57	0,004740	0,499	30,323	0,730	0,80	2	
2,29	2,22	0,00	3,57	0,004720	0,496	30,274	0,729	0,80	2	
2,26	2,22	0,00	3,55	0,004624	0,476	30,028	0,726	0,80	2	
2,27	2,22	0,00	3,55	0,004659	0,489	30,117	0,729	0,80	2	
2,29	2,22	0,00	3,57	0,004720	0,496	30,274	0,729	0,80	2	
2,26	2,23	0,00	3,55	0,004624	0,476	30,028	0,726	0,80	2	
2,26	2,22	0,00	3,55	0,004624	0,476	30,028	0,726	0,80	2	
2,26	2,22	0,00	3,55	0,004624	0,476	30,028	0,726	0,80	2	
2,26	2,22	0,00	3,55	0,004624	0,476	30,028	0,726	0,80	2	
2,26	2,22	0,00	3,55	0,004624	0,476	30,028	0,726	0,80	2	
2,26	2,22	0,00	3,55	0,004624	0,476	30,028	0,726	0,80	2	
2,26	2,22	0,00	3,55	0,004604	0,473	29,979	0,724	0,80	2	
2,24	2,22	0,00	3,53	0,004507	0,452	29,733	0,721	0,80	2	
2,24	2,20	0,00	3,53	0,004507	0,452	29,733	0,721	0,80	2	
2,24	2,22	0,00	3,53	0,004507	0,452	29,733	0,721	0,80	2	

