

Tuomo Korpi

Vastavirtakennoinen levylämmöntalteenotto asuinrakennuksen keskusilmanvaihtokoneessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Talotekniikan koulutusohjelma
Insinöörityö
29.05.2012

| | |
|--|---|
| Tekijä(t) Otsikko | Tuomo Korpi Vastavirtakennoinen levylämmönsiirrin asuinrakennuksen keskusiilmanvaihtokoneessa |
| Sivumäärä Aika | 24 sivua 29.05.2012 |
| Tutkinto | insinööri (AMK) |
| Koulutusohjelma | talotekniikka |
| Suuntautumisvaihtoehto | LVI-suunnittelupainotteinen |
| Ohjaaja(t) | insinööri Ari Västinsalo lehtori Jorma Säteri |
| <p>Insinöörityön tavoitteena on selvittää korkean lämpötilahyötysuhteen vastavirtakennoisen levylämmönsiirtimeen vuosihyötysuhde esilämmityksellä, eri esilämmitysvaihtoehtojen vaikutus E-lukuun sekä esilämmityspatterin hyödyntäminen raitisilman viilennykseen kesäajanlämpötilatasojen hallitsemiseksi. Työssä tarkasteltavina esilämmitysvaihtoehtoina oli kaukolämpö, maaperästä saatava lämpöenergia porakaivosta tai vaakaputkistosta.</p> <p>Rakennuksen ilmanvaihdon tarvitsemaa lämpö määrää voidaan vähentää käyttämällä ulkoilman esilämmityksessä ratkaisua, joka vähentää rakennuksen energian kulutusta esimerkiksi maalämmityspiirin esilämmityspatteria. Tuloksista käy ilmi, että maaperää hyödynnettäessä esilämmityksessä voidaan esilämmityksellä parantaa järjestelmän vuosihyötysuhdetta muutamalla prosentilla riippuen ilmanvaihtokoneen ilmamäärän ja maaperän keruupiirin suhteesta.</p> <p>Tuloksista käy ilmi, että lämpökaivoa hyödynnettäessä kesäaikana viilennykseen voidaan saavuttaa muutaman asteen lämpötilan pudotus raitisilmassa. Raitisilman lämpötilan pudotus on riippuvainen lämpökaivon syvyyden suhteesta ilmanvaihtokoneen ilmamäärään. Lämpökaivosta saatava viilennysteho yhdistettynä hyvään auringonsuojaukseen esimerkiksi auringonsuojalaseilla voidaan kesäajan lämpötilatasoja hallita sekä lisätä asuinviihtyvyyttä.</p> | |
| Avainsanat | lämmöntalteenotto, asuinrakennus, maalämpö |

| | |
|--|---|
| Author(s) Title Number of Pages Date | Tuomo Korpi Counter flow plate heat exchanger in the central air handling unit of residential buildings 24 pages 29.May.2012 |
| Degree | Bachelor of Engineering |
| Degree Programme | Building Services Engineering |
| Specialisation option | HVAC Engineering, Design Orientation |
| Instructor(s) | Ari Västinsalo, Bachelor of Engineering Jorma Säteri, Senior Lecturer |
| <p>The objective of this thesis was to establish the annual efficiency of counter flow heat recovery with high-temperature efficiency with pre heating, and the effect of alternative pre-heating options on energy efficiency rating. Also, the utilization of a pre-heating coil for the cooling of supply air during the summer period to manage temperature levels was looked into. The alternative pre-heating options reviewed in the Bachelors's thesis were thermal energy from the soil trough either horizontal or vertical loops, and district heating.</p> <p>The quantity of heat needed for the ventilation of a building can be reduced with a pre-heating solution which reduces the energy consumption of the building, e.g. pre-heating with thermal energy. The results showed that the use of thermal energy in preheating can improve the annual efficiency with a few percent, depending on the relationship between the air volume of the air handling unit and the collector circuit in the soil.</p> <p>The results showed that with the use of a thermal well for cooling the supply air in the summer, a temperature drop of a few degrees in supply air can be achieved. The temperature drop of the supply air depends on the ratio of heat well depth to the air volume of the air handling unit. If the cooling power of the thermal well is combined with good sun protection, the temperature levels can be managed and living comfort increased.</p> | |
| Keywords | heat recovery, residential building, thermal energy |

Sisällys

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Rakennusten energiatehokkuuden kiristyvät määräykset | 2 |
| 2.1 | Taustaa | 2 |
| 2.2 | Vaatimustaso tulevaisuudessa | 2 |
| 3 | Ilmanvaihtojärjestelmän energiatehokkuus | 3 |
| 3.1 | Lämmöntalteenotto | 3 |
| 3.2 | Asuinrakennuksissa käytettyjä lämmöntalteenottolaitteistoja | 3 |
| 3.2.1 | Virtaavan väliaineen välityksellä lämpöä siirtävä lämmöntalteenotto | 3 |
| 3.2.2 | Ristivirtalevylämmönsiirrin | 4 |
| 3.2.3 | Vastavirtakennoinen levylämmönsiirrin | 4 |
| 4 | Maaperä esilämmityksen lämmönlähteenä | 5 |
| 4.1 | Vaakaputkisto | 5 |
| 4.2 | Lämpökaivo | 5 |
| 5 | Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen määrittäminen | 7 |
| 6 | Ympäristöministeriön monisteen 122 mukaisen laskennan kulku | 8 |
| 6.1 | Ilmanvaihdon lämmityksen energiantarve | 8 |
| 6.2 | Poistoilmasta talteenotettu lämpöenergia | 9 |
| 6.3 | Vuosihyötysuhteen laskenta | 13 |
| 7 | Lämmöntalteeottojärjestelmän vuosihyötysuhde | 14 |
| 7.1 | Laskennan lähtötiedot | 14 |
| 7.2 | Vuosihyötysuhde perustilanteessa ilman esilämmitystä | 16 |
| 7.3 | Vuosihyötysuhde esilämmityspatterilla varustettuna | 17 |
| 7.4 | Esilämmityksellä korkeampi vuosihyötysuhde | 18 |
| 8 | Vaihtoehtoisten esilämmitysmuotojen vaikutus E-lukuun tyypillisessä asuinkerrostalossa | 19 |
| 8.1 | Esilämmityksen tehon ja energiankulutuksen laskenta | 19 |
| 8.2 | Vaikutus E-lukuun | 21 |

| | | |
|-----|--|----|
| 9 | Maaperän hyödyntäminen kesäajan lämpötilatasojen hallitsemiseksi | 22 |
| 9.1 | Maaperästä saatava viilennysenergia | 22 |
| 10 | Johtopäätökset | 23 |
| | Lähteet | 24 |

Lyhenteitä

| | |
|--------------|---|
| C_p | ilman ominaislämpökapasiteetti, J/kgK, (= 1006 J/kgK) |
| Q_{iv} | ilmanvaihdon tarvitsema lämmitysenergia lämmityskaudella, kWh |
| Q_{LTO} | poistoilmasta talteenotettu energia lämmityskaudella, kWh |
| q_p | lämmöntalteenottovaatimuksen piiriin kuuluvien poistoilmavirtojen summa, m ³ /s |
| $q_{p,i}$ | lämmöntalteenottovaatimuksen piiriin kuuluva poistoilmavirta (i), m ³ /s |
| q_{pLTO} | lämmöntalteenoton läpi kulkeva poistoilmavirta, m ³ /s |
| q_{ep1} | lämmöntalteenottovaatimuksen piiriin kuuluvan erillispoiston ilmavirta, m ³ /s |
| q_{ep2} | lämmöntalteenottovaatimuksen piiriin kulumattoman erillispoiston ilma virta, m ³ /s |
| q_{iLTO} | lämmöntalteenoton läpi kulkevan tuloilmavirran tilavuusvirta, m ³ /s |
| R_T | ilmanvaihtokoneen tuloilmavirran ja lämmöntalteenottovaatimuksen piiriin kuuluvien poistoilmavirtojen summan suhde, - |
| R_P | ilmanvaihtokoneen poistoilmavirran ja lämmöntalteenottovaatimuksen piiriin kuuluvien poistoilmavirtojen summan suhde, - |
| R_{LTO} | lämmöntalteenoton läpi kulkevan tuloilmavirran ja poistoilmavirran suhde, - |
| S_s | sisäilman lämpötilan t_s ja ulkoilman lämpötilan t_u välinen lämmöntarveluku, Kd |
| S_T | tuloilman lämpötilan t_{LTO} (LTO:n jälkeen) ja ulkoilman lämpötilan t_u välinen lämmöntarveluku, Kd |
| S_J | jäteilman lämpötilan t_j (poistoilma LTO:n jälkeen) ja sisäilman lämpötilan t_s välinen lämmöntarveluku, Kd |
| t_s | sisäilman lämpötila, °C (on tässä monisteessa sama kuin t_p eli poistoilman lämpötila) |
| t_j | jäteilman lämpötila (poistoilma LTO:n jälkeen), °C |
| t_{LTO} | tuloilman lämpötila LTO:n jälkeen, °C |
| t_u | ulkoilman lämpötila, °C |
| η_a | ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde, - |
| η_p | lämmöntalteenoton poistoilman lämpötilahyötysuhde, - |
| η_t | lämmöntalteenoton tuloilman lämpötilahyötysuhde, - |
| ρ | ilman tiheys, kg/m ³ , (= 1,2 kg/m ³) |
| $\Delta\tau$ | aikajakso, jolloin ko. lämpötilaero esiintyy, d |

1 Johdanto

Kiristyvien energiamääräysten johdosta rakentamisessa tulee entistä enemmän kiinnittää huomiota muun muassa ilmanvaihtokoneiden lämmön talteenoton vuosihyötysuhteeseen. Asuinrakennuksissa ei saa tapahtua ilmapurtojen sekoittumista, minkä vuoksi keskitetyissä ilmanvaihtojärjestelmissä lämmöntalteenottovaihtoehdot ovat olleet virtaavan väliaineen välityksellä lämpöä siirtävä lämmöntalteenotto tai ristivirtalevylämmöntalteenotto. Markkinoille on tullut perinteisten lämmöntalteenottovaihtoehtojen rinnalle korkean lämpötilahyötysuhteen vastavirtakennoinen levylämmöntalteenotto.

Vastavirtakennoinen levylämmöntalteenotto on kuitenkin Suomen olosuhteissa varustettava raitisilman esilämmityksellä huurteeneston hallinnan vuoksi.

Insinööriyön tavoitteena on selvittää korkean lämpötilahyötysuhteen vastavirtakennoisen levylämmönsiirtimen vuosihyötysuhde esilämmityksellä varustettuna ympäristöministeriön monisteen 122 mukaisella laskennalla, eri esilämmitysvaihtoehtojen vaikutus E-lukuun sekä esilämmityspatterin hyödyntäminen raitisilman viilennykseen kesäajan lämpötilatasojen hallitsemiseksi.

Työssä tutkittavia vaihtoehtoisia esilämmitysmuotoja ovat maaperästä saatava ilmaislämpö sekä kaukolämpö.

Ilmaislämmöllä tarkoitetaan maaperästä maaliuosta kierrättämällä saatavaa lämpöä, jolloin rakennuksen lämmitysenergian kulutus vähenee. Järjestelmässä kiertopumppu lisää hieman sähköenergian kulutusta, mutta sähköenergian kulutuksen lisäys on murto-osa saatavaan ilmaislämpöön nähden.

2 Rakennusten energiatehokkuuden kiristyvät määräykset

2.1 Taustaa

Energiatehokkuusvaatimukset pohjautuvat kansainväliseen Kioton sopimukseen, jossa on päätetty päästötasot valtioittain. Päästötasojen täyttämiseksi Suomessa on myös rakennusten energiatehokkuutta tiukennettava.

Koskaan aikaisemmin ei Suomessa ole näin aktiivisesti ja systemaattisesti parannettu rakennusten energiatehokkuutta. Vuoden 2010 alussa vaatimuksiin tehtiin edellisen kerran 30 prosentin tiukennus, 2012 voimaan tulevilla vaatimuksilla tavoitellaan 20 prosentin parannusta vuoden 2010 tasosta. [3.]

2.2 Vaatimustaso tulevaisuudessa

Suomi etenee johdonmukaisesti kohti energiatehokkaampaa rakentamista. Energiatehokkuuden systemaattinen parantaminen ei silti näy pelkästään vuoden 2012 uudistuksessa. Jatkossakin on odotettavissa tiukkenevaa lainsäädäntöä, sillä rakennusten energiatehokkuusdirektiivin ohjaamana kaikkialla EU:ssa siirrytään lähes nollaenergiarakentamiseen vuosina 2019–2021. [8.]

3 Ilmanvaihtojärjestelmän energiatehokkuus

3.1 Lämmöntalteenotto

Rakentamismääräyskokoelman osan D3 mukaan ilmanvaihdon poistoilmasta on otettava lämpöä talteen lämpömäärä, joka vastaa vähintään 45 % ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemasta lämpömäärästä. Ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemalla lämpömäärällä tarkoitetaan sitä lämpömäärää, joka tarvitaan ilmapirran lämmittämiseksi ulkoilman lämpötilasta huonelämpötilaan. Tässä ei oteta huomioon rakennukseen tulevia tai rakennuksessa syntyviä ilmaislämpöjä, joten lämpömäärän lämpötilaerona käytetään sisälämpötilan ja ulkolämpötilan välistä erotusta ja sisälämpötilan oletetaan olevan koko vuoden ajan vakio. [9, s. 15.]

Rakennuksen ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemää lämpömäärää voidaan vähentää muulla tavalla kuin poistoilman lämmöntalteenotolla käyttämällä esimerkiksi ulkoilman esilämmityksessä ratkaisua, joka vähentää rakennuksen energian kulutusta. Tällainen on esimerkiksi nestekiertoinen maalämmityspiirin esilämmityspatteri. [9, s. 15.]

3.2 Asuinrakennuksissa käytettyjä lämmöntalteenottolaitteistoja

3.2.1 Virtaavan väliaineen välityksellä lämpöä siirtävä lämmöntalteenotto

Ilmanvaihtokoneen poistoilma puolella olevassa patterissa kiertävä jäätymätön neste lämpenee, ja lämmennyt neste pumpataan tuloilma puolella olevaan patteriin, jossa kylmä tuloilma jäädyttää nesteen. Jäätymissuojauksena lämmöntalteenoton tehoa säädetään kolmitieventtiilillä. Nesteenä yleensä käytetään vesietyleeniglykoliliuosta. Lämpötilahyötysuhde tyypillisesti 40–60 %. [12, s. 97.]

Asuinrakennuksien keskusilmanvaihtokoneiden ilmapirrat ovat yleensä alle 2,5 m³/s. Tässä kokoluokassa nestelämmöntalteenotolla päästään jopa hieman yli 60 %:n lämpötilahyötysuhteeseen, jolloin vuosihyötysuhde on noin 55 %.

3.2.2 Ristivirtalevylämmönsiirrin

Ristivirtalevylämmönsiirrin koostuu useista levyistä, jotka erottavat ilmavirrat toisistaan. Lämmönsiirtyminen tapahtuu levyjen läpi lämpimästä ilmavirrasta kylmempään ilmavirtaan. Jäätymissuojauksena on yleensä ohituspellit, joilla lämmöntalteenoton tehoa säädetään. Lämpötilahyötysuhde on tyypillisesti 50–60 % [12, s. 97.]

Asuinrakennuksien keskusilmanvaihtokoneiden ilmavirrat ovat yleensä alle 2,5 m³/s. Tässä kokoluokassa ristivirtalevylämmönsiirtimellä lämpötilahyötysuhde jää alle 60 %:n, jolloin vuosihyötysuhde on noin 52 %.

3.2.3 Vastavirtakennoinen levylämmönsiirrin

Lämpö siirtyy ristivirtalevylämmönsiirtimen tapaan levyjen läpi suoraan, mutta vastavirtakennoisen levylämmönsiirtimen suuremmasta lämmönsiirtopinta-alasta johtuen lämpötilahyötysuhde on ristivirtaa korkeampi. Lämpötilahyötysuhde on tyypillisesti 60–85 % [2.]

Tyypillisesti asuinrakennusten keskusilmanvaihtokoneissa on käytetty joko neste- tai ristivirtalämmöntalteenottoa. Vastavirtakennoisella levylämmöntalteenotolla saavutetaan korkeampi lämpötilahyötysuhde verrattuna muihin asuinrakennuksissa käytettyihin lämmöntalteenottolaitteisiin nähden, joka johtaa myös korkeampaan vuosihyötysuhteeseen.

Vastavirtakennoinen levylämmöntalteenotto on kuitenkin varustettava raitisilman esilämmityspatterilla, huurteeneston hallinnasta johtuen. Esilämmityspatterilla tulisi raitisilma lämmittää vähintään –20 °C:seen, jolla varmistetaan lämmöntalteenoton huurteenpoiston hallinta.

4 Maaperä esilämmityksen lämmönlähteenä

4.1 Vaakaputkisto

Vaakaputkistolla tarkoitetaan tontin pintakerrokseen asennettavaa lämmönkeruuputkistoa, jolla kerätään lämpöenergiaa.

Vaakaputkisto asennetaan 1–1,5 metrin syvyyteen maanpinnasta. Vaakasuunnassa lämmönkeruuputkien etäisyys tulee olla vähintään 1,5 metriä, joten 400 metrin vaakaputkisto vaatii noin 600 neliometriä pinta-alaa, joka monesti rajoittaa vaakaputkiston rakentamisen mahdollisuuksia.

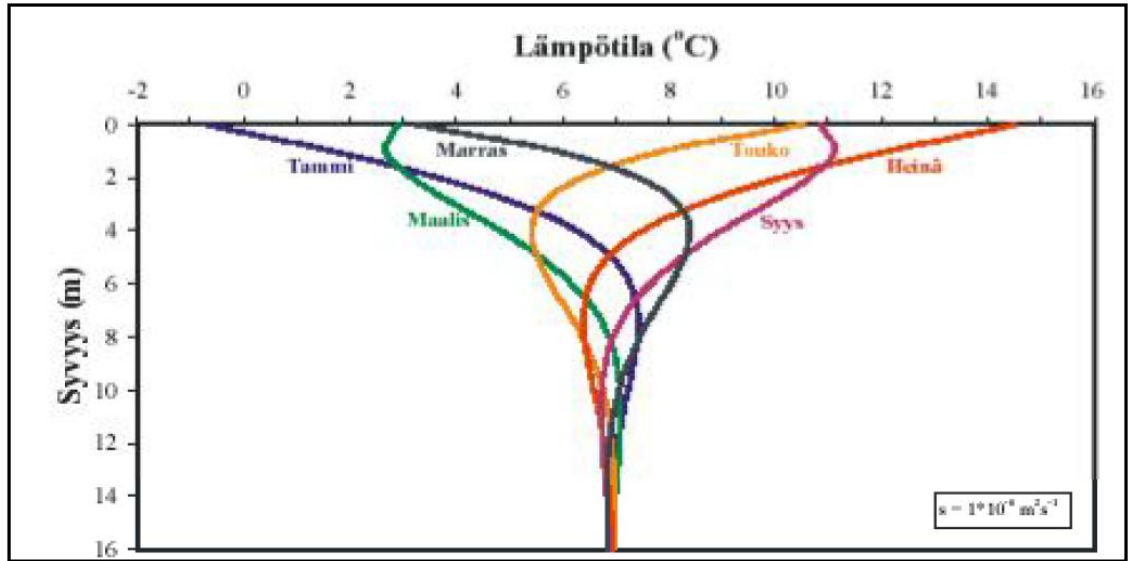
Vaakaputkistolla saatava teho putkimetriä kohden riippuu säävyöhykkeestä sekä maaperästä, säävyöhykkeellä 1 maksimiteho on noin 10–17 W/m, kun vastaava teho säävyöhykkeellä 4 on noin 10–12 W/m, jolloin eteläisessä Suomessa 400 metrin vaakaputkistosta saatava jatkuva teho on maksimissaan noin 7 kilowattia. [4.]

4.2 Lämpökaivo

Lämpökaivolla tarkoitetaan kallioon porattavaa porakaivoa, jota käytetään lämmönlähteenä. Lämpökaivon käyttö lämmönlähteenä perustuu pohjaveden ja peruskallion lämmönsiirtoon. Lämpökaivo tulee mitoittaa siten, että jäätymistä ei tapahdu. Lämpökaivosta saatava energian määrä riippuu kaivon veden tuotosta eli siitä, kuinka runsaasti vesi siirtää lämpöenergiaa peruskalliosta.

Vuodenajan lämpötilavaihtelut eivät vaikuta maaperän lämpötilaan juurikaan 20–200 metrin syvyydessä, jossa lämpötila pysyy noin 6–7 °C:ssa läpi vuoden, kuten kuvasta 1 käy ilmi.

Lämpökaivosta saatava jatkuva maksimiteho kaivometriä kohden on noin 30–43 W/m, jolloin 200 metriä syvästä lämpökaivosta saatava jatkuva teho on noin 8,6 kilowattia. Hetkellistä huipputehoa 200 metrin lämpökaivosta saadaan noin 12 kilowattia. [4, s. 18; 10.]



Kuva 1. Vuodenajan vaikutukset maaperän lämpötilaan [7].

5 Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen määrittäminen

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 kohdan 4.1.2.1 ohjetekstissä on esitetty, että laskelmissa käytetään lämmöntalteenottolaitteen vuosihyötysuhteena lämmönsiirtimen tuloilman lämpötilahyötysuhdetta kerrottuna 0,6:lla, jollei selvityksin toisin osoiteta. Laskennassa käytetään esimerkiksi valmistajan ilmoittamaa standardin EN 308 mukaan mitattua tuloilman lämpötilahyötysuhdetta (tulo- ja poistoilman massavirrat yhtä suuret) tai voimassa olevan tyyppihyväksyntäohjeen mukaisella tavalla mitattua hyötysuhdetta. [13, s. 23.]

Ympäristöoppaassa 106 Lämmöneristysmääräysten täyttäminen on esitetty lyhyesti perusteet vuosihyötysuhteen määrittämiseksi pysyvyyssäyrätarkastelulla. Ympäristöministeriön monisteessa 122 esitetään yksityiskohtaisemmat ohjeet, miten ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde voidaan laskea tuloilman lämpötilahyötysuhteen ja ulkolämpötilan pysyvyystietojen avulla. Tässä insinööriyössä vuosihyötysuhteen laskenta perustuu ympäristöministeriön monisteeseen 122. [1, s. 6.]

6 Ympäristöministeriön monisteen 122 mukaisen laskennan kulku

6.1 Ilmanvaihdon lämmityksen energiantarve

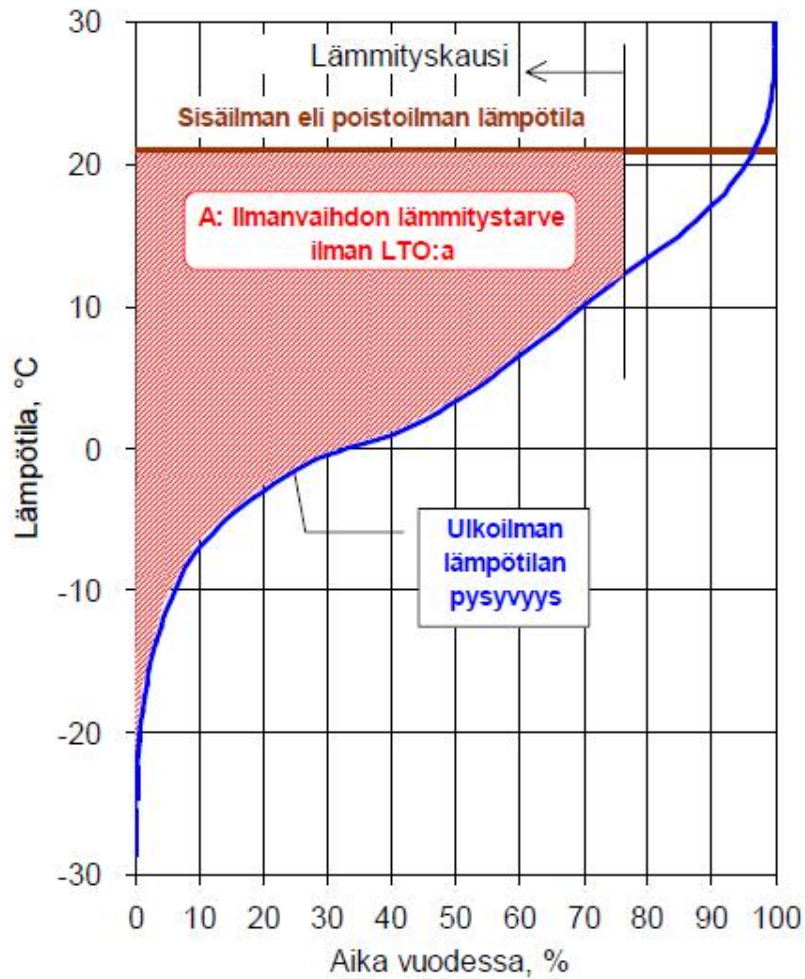
Ilmanvaihdon tarvitsema lämmitysenergia lämmityskaudella Q_{iv} määritellään rakennuksen ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen määrittämistä varten *osan D2* mukaisesti kaikkien lämmöntalteenottovaatimuksen piiriin kuuluvien poistoilmavirtojen tarvitsemana lämmitysenergiana siinä tapauksessa, että lämmöntalteenottoa ei ole, eli

$$Q_{iv} = \sum_i Q_{iv,i} = Q_{iv,1} + Q_{iv,2} + Q_{iv,3} + \dots \quad (1)$$

$$Q_{iv,i} = c_p \rho q_{p,i} \sum (t_s - t_u) \Delta \tau \quad (2)$$

Yhtälössä (2) summalausekkeen sisä- ja ulkoilman lämpötilaeron ja aikajakson tulo vastaa sisäilman ja ulkoilman lämpötilan välistä lämmöntarvelukua S_S

$$S_S = \sum (t_s - t_u) \Delta \tau \quad (\text{pinta-ala } A \text{ kuvassa 2}) \quad (3)$$



Kuva 2. Ilmanvaihdon lämmitystarve. Ympäristöministeriön moniste 122, kuva 4 [1, s. 19]

Kuvassa 2 esitetty ulkoilman ja sisäilman välinen viivoitettu alue (A) on ilmanvaihdon vuotuinen lämmitystarve, kun LTO:a ei ole. Pinta-ala A vastaa lämmöntarvelukua S_S . Lämmitystarvelaskelmat tehdään lämmityskaudelle, joka päättyy, kun ulkoilman lämpötila ylittää 12 °C.

6.2 Poistoilmasta talteenotettu lämpöenergia

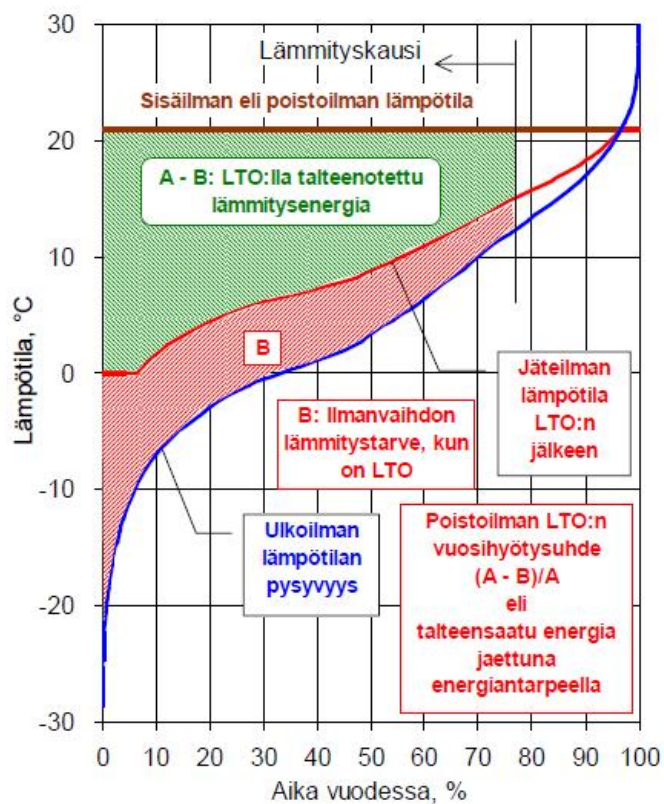
Poistoilmasta talteenotettu lämpöenergia lämmityskaudella Q_{LTO} voidaan esittää poistoilmavirtakohtaisesti yhtälöitä (1) ja (2) muistuttavissa muodoissa, eli

$$Q_{LTO} = \sum_i Q_{LTO,i} = Q_{LTO,1} + Q_{LTO,2} + Q_{LTO,3} + \dots \quad (4)$$

$$Q_{LTO,i} = c_p \rho q_{p,i} \sum (t_z - t_j) \Delta \tau \quad (5)$$

Yhtälössä (7) summalausekkeen sisälämpötilan ja jäteilman lämpötilan erotuksen ja aikajakson tulo vastaa sisäilman ja jäteilman välistä lämmöntarvelukua S_J .

$$S_J = \sum (t_s - t_j) \Delta \tau \quad (\text{pinta-ala A - B kuvassa 2}) \quad (6)$$



Kuva 3. Talteenotettu lämmitysenergia. Ympäristöministeriön moniste 122, kuva 5 [1, s. 21]

Kuvassa 3 jäteilman ja sisäilman välinen viivoitettu alue (A - B) on ilmanvaihdon poistoilmasta talteenotettu vuotuinen lämpöenergia. Pinta-ala A - B vastaa lämmöntarvelukua S_J . Ulkoilman ja jäteilman välinen viivoitettu alue (B) on ilmanvaihdon vuotuinen lämmitystarve, kun on LTO. LTO:n huurtumisenesto on toteutettu rajoittamalla jäteilman lämpötila 0 °C:seen. Tuloilman lämpötilaa kuvan tapauksessa ei ole rajoitettu.

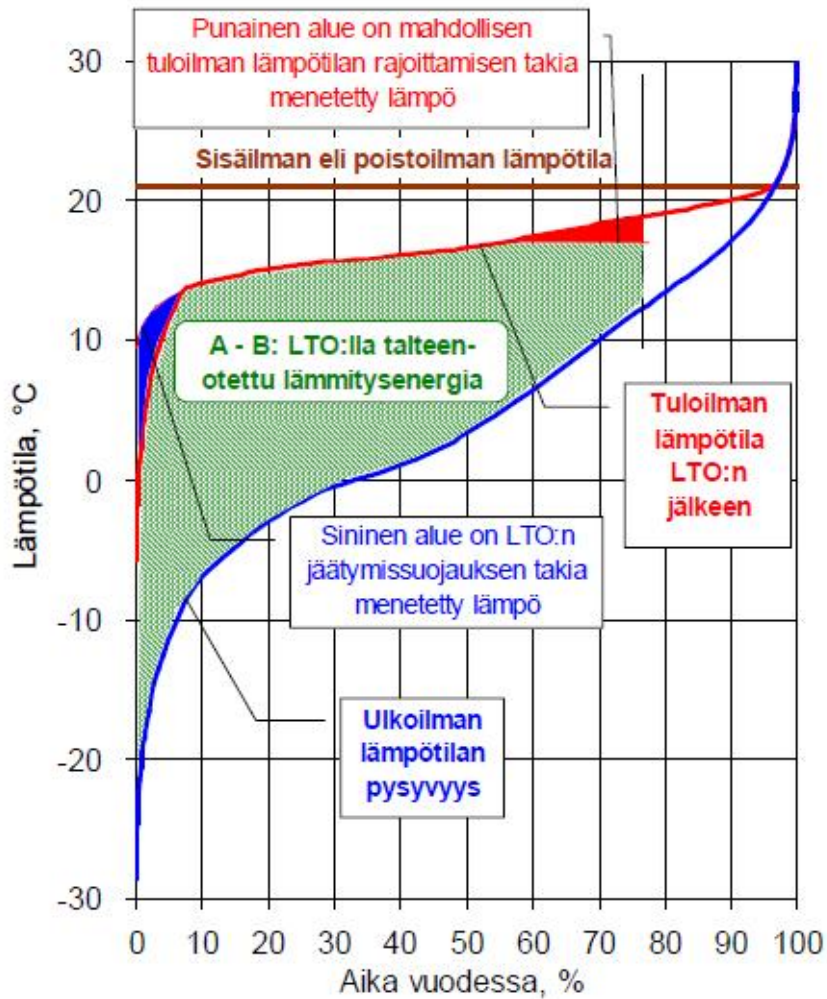
Yksittäiselle tulo- ja poistoilmanvaihtokoneelle lämmöntalteenoton lämmönsiirtimessä toteutuvan lämpötaseen perusteella talteenotetun lämpöenergian $Q_{LTO,i}$ laskenta voidaan tehdä myös tuloilmapuolelle, mikä on ilmastointialalla yleisemmin käytetty tapa kuin poistoilmapuolelle tehty tarkastelu. Tarkastelun perusteet on esitetty useissa oppikirjoissa. Poistoilmasta talteenotettu lämpöenergia voidaan esittää myös tuloilman lämmitysenergiana eli

$$Q_{LTO,i} = c_p \rho q_{LTO,i} \sum (t_{LTO} - t_u) \Delta \tau \quad (10)$$

Yhtälössä (10) summalausekkeen tuloilman ja ulkoilman lämpötilan erotuksen ja aikajakson tulo vastaa tuloilman ja ulkoilman välistä lämmöntarvelukua lämmityskaudella S_T

$$S_T = \sum (t_{LTO} - t_u) \Delta \tau \quad (\text{pinta-ala A - B kuvassa 3}) \quad (11)$$

jossa S_T on LTO:n jälkeisen tuloilman lämpötilan t_{LTO} ja ulkoilman lämpötilan t_u välinen lämmöntarveluku lämmityskaudella, Kd



Kuva 4. Jäätymissuojauksen takia menetetty lämpö. Ympäristöministeriön moniste 122, kuva 6 [1, s. 23]

Kuvassa 4 esitetty ulkoilman ja tuloilman välinen viivoitettu alue (A – B) on ilmanvaihdon poistoilmasta tuloilmaan talteenotettu vuotuinen lämpöenergia. Pinta-ala A – B vastaa lämmöntarvelukua S_T . LTO:n jäätymisenesto on toteutettu rajoittamalla jäteilman lämpötila 0 °C:seen. Sininen alue vastaa jäätymiseneston vuoksi menetettyä energiaa. Tuloilman lämpötila on kuvan tapauksessa rajoitettu 17 °C:seen. Punainen alue vastaa tuloilman lämpötilarajoituksen vuoksi menetettyä energiaa. Tuloilman lämpötilaa ei ole syytä rajoittaa LTO:a heikentämällä, jos rakennuksessa on lämmitystarvetta.

6.3 Vuosihyötysuhteen laskenta

Rakennuksen ilmanvaihdon lämmöntalteeeton vuosihyötysuhde määritellään talteenotetun lämpöenergian Q_{LTO} ja kaikkien lämmöntalteenottovaatimusten piiriin kuuluvien

$$\eta_a = \frac{Q_{LTO}}{Q_{iv}} \quad (14)$$

poistoilmavirtojen mukana rakennuksesta poiskulkeutuvan lämpöenergian Q_{iv} suhteena

eli

$$\eta_a = \frac{c_p \rho \sum_i q_{LTO,i} S_{T,i}}{c_p \rho \sum_i q_{p,i} S_{S,i}} = \frac{c_p \rho \sum_i q_{p,i} S_{J,i}}{c_p \rho \sum_i q_{p,i} S_{S,i}} \quad (15)$$

eli

$$\eta_a = \frac{c_p \rho \sum_i q_{LTO,i} S_{T,i}}{c_p \rho q_p S_S} = \frac{c_p \rho \sum_i q_{p,i} S_{J,i}}{c_p \rho q_p S_S} \quad (16)$$

Koska ilmavirtojen ominaislämpökapasiteettien ja tiheyksien oletetaan olevan yhtä suurat, yhtälö saa muodon

$$\eta_a = \frac{\sum_i q_{LTO,i} S_{T,i}}{q_p S_S} = \frac{\sum_i q_{p,i} S_{J,i}}{q_p S_S} \quad (17)$$

Yhtälö (17) voidaan kirjoittaa muotoon

$$\eta_a = \frac{\sum_i R_{T,i} S_{T,i}}{S_S} = \frac{\sum_i R_{p,i} S_{J,i}}{S_S} \quad (18)$$

jossa $R_{T,i}$ on ilmanvaihtokoneen (i) tuloilmavirran ja kaikkien lämmön talteenotto vaatimuksen piiriin kuuluvien poistoilmavirtojen suhde.

$R_{p,i}$ on ilmanvaihtokoneen (i) poistoilmavirran ja kaikkien lämmön talteenotto vaatimuksen piiriin kuuluvien poistoilmavirtojen suhde. [1.]

7 Lämmöntalteeottojärjestelmän vuosihyötysuhde

7.1 Laskennan lähtötiedot

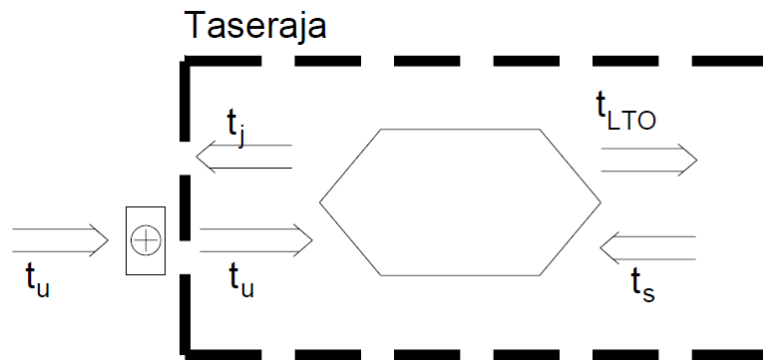
Hyötysuhteen esimerkkilaskelmassa on käytetty seuraavia lähtötietoja:

- Laskennassa vastavirtakennoisen levylämmöntalteenoton lämpötilahyötysuhteenä on käytetty 86 prosenttia, perustuen Fläktwoods Oy:n Acon ilmankäsittelykoneiden mitoitusajoon. [6.]
- Ympäristöministeriön monisteen 122 mukaisesti asuinrakennuksissa tulee käyttää jäteilman minimilämpötilana 5:tä astetta.
- Tulo- ja poistoilmavirtojen suhde on 95 prosenttia.
- Lämmöntalteenottolaitteiston jälkeinen tuloilman lämpötila on laskelmissa rajoitettu 18 asteeseen.
- Vuosihyötysuhde on luvussa 7.2 laskettu ilman esilämmitystä.
- Vuosihyötysuhde on luvussa 7.3 laskettu tilanteessa, jossa raitisilma lämmitetään -20 asteeseen, joka on raja-arvo vastavirtakennoisen lämmöntalteenottolaitteiston omalle huurteen hallinnalle.
- Vuosihyötysuhde on luvussa 7.4 laskettu esilämmittimen 7 kilowatin keskimääräisellä teholla saavutettavalle raitisilman lämpötilalle -5 asteen ulkolämpötilaan saakka.
- Vuosihyötysuhde on laskettu Helsingin ulkolämpötilojen pysyvyystiedoilla. [1, s. 33.]

Tehon ja energiankulutuksen laskenta on suoritettu käyttäen ilmanvaihtokoneen keskimääräisenä ilmamääränä 1000 l/s. Ilmamäärä vastaa mitoitusilmavirralla $0,5 \text{ l/sm}^2$ noin 2 000 m^2 :n asuinkerrostalon keskitettyä ilmanvaihtokonetta.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 2012 kohdassa 2.6.2 on mainittu, että ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemaa lämpömäärää voidaan vähentää muulla tavalla kuin poistoilman lämmöntalteeotolla käyttämällä esimerkiksi ulkoilman esilämmityksessä ratkaisua, joka vähentää rakennuksen energiankulutusta. Tällainen ratkaisu on nes-

tekiertoinen maalämmityspiirin esilämmityspatteri. Ilmanvaihdon lämmityksen tarvitseman lämpömäärän pienentyessä nousee järjestelmän vuosihyötysuhde. [9, s. 15.]



Kuva 5. Taseraja ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen laskennasta esilämmitysatterilla varustettuna.

7.2 Vuosihyötusuhte perustilanteessa ilman esilämmitystä

Luvussa 6 kuvatun laskennan tuloksena edellä mainituilla lähtötiedoilla saadaan lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteeksi perustilanteessa ilman esilämmitystä noin 65,7 prosenttia. Tiedot esitetään taulukossa 1.

Taulukko 1. Vuosihyötusuhte ilman esilämmitystä.

| t_{u_i} °C | Aika vuodesta % | $t_{k,TO}$ °C maks | t_i °C min | t_e °C | t_i °C | $t_{k,TO}$ °C | $R_{k,TO}$ | n_r | n_p | S_s, K_d ($t_e - t_i$) | S_T, K_D ($t_{k,TO} - T_{ij}$) | S_j, K_d ($t_e - t_i$) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------|----------|----------|---------------|------------|-------|-------|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| -30 | 0,011 | 18 | 5 | 21 | 5 | -13,16 | 0,95 | 0,33 | 0,31 | 2,0 | 0,7 | 0,6 |
| -29 | 0,034 | 18 | 5 | 21 | 5 | -12,16 | 0,95 | 0,34 | 0,32 | 4,2 | 1,4 | 1,3 |
| -28 | 0,057 | 18 | 5 | 21 | 5 | -11,16 | 0,95 | 0,34 | 0,33 | 4,1 | 1,4 | 1,3 |
| -27 | 0,137 | 18 | 5 | 21 | 5 | -10,16 | 0,95 | 0,35 | 0,33 | 14,0 | 4,9 | 4,7 |
| -26 | 0,217 | 18 | 5 | 21 | 5 | -9,16 | 0,95 | 0,36 | 0,34 | 13,7 | 4,9 | 4,7 |
| -25 | 0,297 | 18 | 5 | 21 | 5 | -8,16 | 0,95 | 0,37 | 0,35 | 13,4 | 4,9 | 4,7 |
| -24 | 0,365 | 18 | 5 | 21 | 5 | -7,16 | 0,95 | 0,37 | 0,36 | 11,2 | 4,2 | 4,0 |
| -23 | 0,514 | 18 | 5 | 21 | 5 | -6,16 | 0,95 | 0,38 | 0,36 | 23,9 | 9,2 | 8,7 |
| -22 | 0,799 | 18 | 5 | 21 | 5 | -5,16 | 0,95 | 0,39 | 0,37 | 44,7 | 17,5 | 16,6 |
| -21 | 1,164 | 18 | 5 | 21 | 5 | -4,16 | 0,95 | 0,40 | 0,38 | 56,0 | 22,4 | 21,3 |
| -20 | 1,461 | 18 | 5 | 21 | 5 | -3,16 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 44,4 | 18,3 | 17,3 |
| -19 | 1,678 | 18 | 5 | 21 | 5 | -2,16 | 0,95 | 0,42 | 0,40 | 31,7 | 13,3 | 12,7 |
| -18 | 2,203 | 18 | 5 | 21 | 5 | -1,16 | 0,95 | 0,43 | 0,41 | 74,7 | 32,3 | 30,7 |
| -17 | 2,568 | 18 | 5 | 21 | 5 | -0,16 | 0,95 | 0,44 | 0,42 | 50,6 | 22,4 | 21,3 |
| -16 | 3,219 | 18 | 5 | 21 | 5 | 0,84 | 0,95 | 0,46 | 0,43 | 87,9 | 40,0 | 38,0 |
| -15 | 3,79 | 18 | 5 | 21 | 5 | 1,84 | 0,95 | 0,47 | 0,44 | 75,0 | 35,1 | 33,3 |
| -14 | 4,6 | 18 | 5 | 21 | 5 | 2,84 | 0,95 | 0,48 | 0,46 | 103,5 | 49,8 | 47,3 |
| -13 | 5,913 | 18 | 5 | 21 | 5 | 3,84 | 0,95 | 0,50 | 0,47 | 162,9 | 80,7 | 76,7 |
| -12 | 6,903 | 18 | 5 | 21 | 5 | 4,84 | 0,95 | 0,51 | 0,48 | 126,5 | 64,5 | 61,3 |
| -11 | 7,831 | 18 | 5 | 21 | 5 | 5,84 | 0,95 | 0,53 | 0,50 | 101,4 | 53,4 | 50,7 |
| -10 | 8,893 | 18 | 5 | 21 | 5 | 6,84 | 0,95 | 0,54 | 0,52 | 120,2 | 65,3 | 62,0 |
| -9 | 10,22 | 18 | 5 | 21 | 5 | 7,84 | 0,95 | 0,56 | 0,53 | 145,3 | 81,6 | 77,5 |
| -8 | 11,63 | 18 | 5 | 21 | 5 | 8,84 | 0,95 | 0,58 | 0,55 | 149,2 | 86,7 | 82,3 |
| -7 | 12,91 | 18 | 5 | 21 | 5 | 9,84 | 0,95 | 0,60 | 0,57 | 130,8 | 78,7 | 74,8 |
| -6 | 14,74 | 18 | 5 | 21 | 5 | 10,84 | 0,95 | 0,62 | 0,59 | 180,3 | 112,5 | 106,9 |
| -5 | 16,62 | 18 | 5 | 21 | 5 | 11,84 | 0,95 | 0,65 | 0,62 | 178,4 | 115,6 | 109,8 |
| -4 | 18,82 | 18 | 5 | 21 | 5 | 12,84 | 0,95 | 0,67 | 0,64 | 200,8 | 135,2 | 128,5 |
| -3 | 21,35 | 18 | 5 | 21 | 5 | 13,84 | 0,95 | 0,70 | 0,67 | 221,6 | 155,5 | 147,8 |
| -2 | 23,44 | 18 | 5 | 21 | 5 | 14,84 | 0,95 | 0,73 | 0,70 | 175,5 | 128,5 | 122,1 |
| -1 | 27,02 | 18 | 5 | 21 | 5 | 15,84 | 0,95 | 0,77 | 0,73 | 287,5 | 220,1 | 209,1 |
| 0 | 32,04 | 18 | 5 | 21 | 5 | 16,84 | 0,95 | 0,80 | 0,76 | 384,8 | 308,6 | 293,2 |
| 1 | 38,84 | 18 | 5 | 21 | 5 | 17,84 | 0,95 | 0,84 | 0,80 | 481,8 | 405,7 | 385,4 |
| 2 | 43,6 | 18 | 5 | 21 | 5,8 | 18,00 | 0,95 | 0,84 | 0,80 | 344,0 | 289,7 | 275,2 |
| 3 | 47,73 | 18 | 5 | 21 | 6,8 | 18,00 | 0,95 | 0,83 | 0,79 | 271,3 | 226,1 | 217,1 |
| 4 | 51,43 | 18 | 5 | 21 | 7,4 | 18,00 | 0,95 | 0,82 | 0,78 | 229,6 | 189,1 | 183,7 |
| 5 | 54,66 | 18 | 5 | 21 | 8,2 | 18,00 | 0,95 | 0,81 | 0,77 | 188,6 | 153,3 | 150,9 |
| 6 | 57,16 | 18 | 5 | 21 | 9 | 18,00 | 0,95 | 0,80 | 0,76 | 136,9 | 109,5 | 109,5 |
| 7 | 59,26 | 18 | 5 | 21 | 9,8 | 18,00 | 0,95 | 0,79 | 0,75 | 107,3 | 84,3 | 85,8 |
| 8 | 61,37 | 18 | 5 | 21 | 10,6 | 18,00 | 0,95 | 0,77 | 0,73 | 100,1 | 77,0 | 80,1 |
| 9 | 64,09 | 18 | 5 | 21 | 11,4 | 18,00 | 0,95 | 0,75 | 0,71 | 119,1 | 89,4 | 95,3 |
| 10 | 66,84 | 18 | 5 | 21 | 12,2 | 18,00 | 0,95 | 0,73 | 0,69 | 110,4 | 80,3 | 88,3 |
| 11 | 69,43 | 18 | 5 | 21 | 13 | 18,00 | 0,95 | 0,70 | 0,67 | 94,5 | 66,2 | 75,6 |
| 12 | 72,49 | 18 | 5 | 21 | 13,8 | 18,00 | 0,95 | 0,67 | 0,63 | 100,5 | 67,0 | 80,4 |
| Yhteensä | | | | | | | | | | 5504,7 | 3807,1 | 3698,6 |

Vuosihyötysuhteeksi saadaan:

$$\eta_a = \frac{R_T S_T}{S_S} = \frac{0,95 * 3807,1}{5504,7} = 65,7\%$$

7.3 Vuosihyötysuhde esilämmityspatterilla varustettuna

Luvussa 6 kuvatun laskennan tuloksena saadaan vuosihyötysuhteeksi 65,9 %, kun esilämmityksellä raitisilmaa lämmitetään siten, että raitisilman lämpötila ei laske alle -20 asteen, jolla varmistetaan huurteeneston hallinta. Tiedot esitetään taulukossa 2.

Taulukko 2. Vuosihyötysuhde, kun esilämmityksellä raitisilma lämmitetään -20 asteeseen.

| t_w , °C | Aika vuodesta % | t_{LTO} , °C maks | t_i , °C min | t_s , °C | t_i , °C | t_{LTO} , °C | R_{LTO} | n_t | n_p | S_s , Kd ($t_s - t_w$) | S_T , KD ($t_{LTO} - T_w$) | S_J , Kd ($t_s - t_w$) |
|------------|-----------------|---------------------|----------------|------------|------------|----------------|-----------|-------|-------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| -20 | 0,011 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,2 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 1,6 | 0,7 | 0,6 |
| -20 | 0,034 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,2 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 3,4 | 1,4 | 1,3 |
| -20 | 0,057 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,2 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 3,4 | 1,4 | 1,3 |
| -20 | 0,137 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,2 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 12,0 | 4,9 | 4,7 |
| -20 | 0,217 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,2 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 12,0 | 4,9 | 4,7 |
| -20 | 0,297 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,2 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 12,0 | 4,9 | 4,7 |
| -20 | 0,365 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,2 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 10,2 | 4,2 | 4,0 |
| -20 | 0,514 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,2 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 22,3 | 9,2 | 8,7 |
| -20 | 0,799 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,2 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 42,7 | 17,5 | 16,6 |
| -20 | 1,164 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,2 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 54,6 | 22,4 | 21,3 |
| -20 | 1,461 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,2 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 44,4 | 18,3 | 17,3 |
| -19 | 1,678 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -2,2 | 0,95 | 0,42 | 0,40 | 31,7 | 13,3 | 12,7 |
| -18 | 2,203 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -1,2 | 0,95 | 0,43 | 0,41 | 74,7 | 32,3 | 30,7 |
| -17 | 2,568 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -0,2 | 0,95 | 0,44 | 0,42 | 50,6 | 22,4 | 21,3 |
| -16 | 3,219 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 0,8 | 0,95 | 0,46 | 0,43 | 87,9 | 40,0 | 38,0 |
| -15 | 3,79 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 1,8 | 0,95 | 0,47 | 0,44 | 75,0 | 35,1 | 33,3 |
| -14 | 4,6 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 2,8 | 0,95 | 0,48 | 0,46 | 103,5 | 49,8 | 47,3 |
| -13 | 5,913 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 3,8 | 0,95 | 0,50 | 0,47 | 162,9 | 80,7 | 76,7 |
| -12 | 6,963 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 4,8 | 0,95 | 0,51 | 0,48 | 126,5 | 64,5 | 61,3 |
| -11 | 7,831 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 5,8 | 0,95 | 0,53 | 0,50 | 101,4 | 53,4 | 50,7 |
| -10 | 8,893 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 6,8 | 0,95 | 0,54 | 0,52 | 120,2 | 65,3 | 62,0 |
| -9 | 10,22 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 7,8 | 0,95 | 0,56 | 0,53 | 145,3 | 81,6 | 77,5 |
| -8 | 11,63 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 8,8 | 0,95 | 0,58 | 0,55 | 149,2 | 86,7 | 82,3 |
| -7 | 12,91 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 9,8 | 0,95 | 0,60 | 0,57 | 130,8 | 78,7 | 74,8 |
| -6 | 14,74 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 10,8 | 0,95 | 0,62 | 0,59 | 180,3 | 112,5 | 106,9 |
| -5 | 16,62 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 11,8 | 0,95 | 0,65 | 0,62 | 178,4 | 115,6 | 109,8 |
| -4 | 18,82 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 12,8 | 0,95 | 0,67 | 0,64 | 200,8 | 135,2 | 128,5 |
| -3 | 21,35 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 13,8 | 0,95 | 0,70 | 0,67 | 221,6 | 155,5 | 147,8 |
| -2 | 23,44 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 14,8 | 0,95 | 0,73 | 0,70 | 175,5 | 128,5 | 122,1 |
| -1 | 27,02 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 15,8 | 0,95 | 0,77 | 0,73 | 287,5 | 220,1 | 209,1 |
| 0 | 32,04 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 16,8 | 0,95 | 0,80 | 0,76 | 384,8 | 308,6 | 293,2 |
| 1 | 38,64 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 17,8 | 0,95 | 0,84 | 0,80 | 481,8 | 405,7 | 385,4 |
| 2 | 43,6 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 18,0 | 0,95 | 0,84 | 0,84 | 344,0 | 289,7 | 289,7 |
| 3 | 47,73 | 18 | 5 | 21 | 6,8 | 18,0 | 0,95 | 0,83 | 0,79 | 271,3 | 226,1 | 214,0 |
| 4 | 51,43 | 18 | 5 | 21 | 7,7 | 18,0 | 0,95 | 0,82 | 0,78 | 229,6 | 189,1 | 179,6 |
| 5 | 54,66 | 18 | 5 | 21 | 8,7 | 18,0 | 0,95 | 0,81 | 0,77 | 188,6 | 153,3 | 145,6 |
| 6 | 57,16 | 18 | 5 | 21 | 9,6 | 18,0 | 0,95 | 0,80 | 0,76 | 136,9 | 109,5 | 104,0 |
| 7 | 59,26 | 18 | 5 | 21 | 10,6 | 18,0 | 0,95 | 0,79 | 0,75 | 107,3 | 84,3 | 80,1 |
| 8 | 61,37 | 18 | 5 | 21 | 11,5 | 18,0 | 0,95 | 0,77 | 0,73 | 100,1 | 77,0 | 73,2 |
| 9 | 64,09 | 18 | 5 | 21 | 12,5 | 18,0 | 0,95 | 0,75 | 0,71 | 119,1 | 89,4 | 84,9 |
| 10 | 66,84 | 18 | 5 | 21 | 13,4 | 18,0 | 0,95 | 0,73 | 0,69 | 110,4 | 80,3 | 76,3 |
| 11 | 69,43 | 18 | 5 | 21 | 14,4 | 18,0 | 0,95 | 0,70 | 0,67 | 94,5 | 66,2 | 62,9 |
| 12 | 72,49 | 18 | 5 | 21 | 15,3 | 18,0 | 0,95 | 0,67 | 0,63 | 100,5 | 67,0 | 63,7 |
| Yhteensä | | | | | | | | | | 5491,5 | 3807,1 | 3630,4 |

Vuosihyötysuhteeksi saadaan:

$$\eta_a = \frac{R_T S_T}{S_S} = \frac{0,95 * 3807,1}{5491,5} = 65,9\%$$

7.4 Esilämmityksellä korkeampi vuosihyötysuhde

Ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemaa lämpömäärää voidaan vähentää muulla tavalla kuin poistoilman lämmöntalteeotolla käyttämällä esimerkiksi ulkoilman esilämmityksessä ratkaisua, joka vähentää rakennuksen energiankulutusta. Tällainen ratkaisu on nestekiertoinen maalämmityspiirin esilämmityspatteri. Tiedot esitetään taulukossa 3. [9.]

Taulukko 3. Laskennassa on huomioitu keskimääräinen esilämmittimen teho 7 kilowattia –5 asteen ulkolämpötilaan saakka.

| $t_{u,}$ °C | Aika vuodesta % | $t_{e,TO,}$ °C maks | $t_i,$ °C min | $t_e,$ °C | $t_j,$ °C | $t_{e,TO,}$ °C | $R_{L,TO}$ | n_i | n_p | $S_s,$ Kd ($t_e - t_u$) | $S_T,$ KD ($t_{e,TO} - T_u$) | $S_J,$ Kd ($t_e - t_j$) |
|-------------|-----------------|---------------------|---------------|-----------|-----------|----------------|------------|-------|-------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| -20 | 0,011 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,2 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 1,6 | 0,7 | 0,6 |
| -20 | 0,034 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,2 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 3,4 | 1,4 | 1,3 |
| -20 | 0,057 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,2 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 3,4 | 1,4 | 1,3 |
| -20 | 0,137 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -3,0 | 0,95 | 0,41 | 0,39 | 11,9 | 4,9 | 4,7 |
| -19 | 0,217 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -2,0 | 0,95 | 0,42 | 0,40 | 11,6 | 4,9 | 4,7 |
| -18 | 0,297 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | -1,0 | 0,95 | 0,43 | 0,41 | 11,3 | 4,9 | 4,7 |
| -17 | 0,365 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 0,0 | 0,95 | 0,45 | 0,42 | 9,4 | 4,2 | 4,0 |
| -16 | 0,514 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 1,0 | 0,95 | 0,46 | 0,43 | 20,0 | 9,2 | 8,7 |
| -15 | 0,799 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 2,0 | 0,95 | 0,47 | 0,45 | 37,3 | 17,5 | 16,6 |
| -14 | 1,164 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 3,0 | 0,95 | 0,48 | 0,46 | 46,4 | 22,4 | 21,3 |
| -13 | 1,461 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 4,0 | 0,95 | 0,50 | 0,47 | 36,7 | 18,3 | 17,3 |
| -12 | 1,678 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 5,0 | 0,95 | 0,51 | 0,49 | 26,0 | 13,3 | 12,7 |
| -11 | 2,203 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 6,0 | 0,95 | 0,53 | 0,50 | 61,0 | 32,3 | 30,7 |
| -10 | 2,568 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 7,0 | 0,95 | 0,55 | 0,52 | 41,1 | 22,4 | 21,3 |
| -9 | 3,219 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 8,0 | 0,95 | 0,56 | 0,54 | 70,9 | 40,0 | 38,0 |
| -8 | 3,79 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 9,0 | 0,95 | 0,58 | 0,55 | 60,1 | 35,1 | 33,3 |
| -7 | 4,6 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 10,0 | 0,95 | 0,61 | 0,57 | 82,3 | 49,8 | 47,3 |
| -6 | 5,913 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 11,0 | 0,95 | 0,63 | 0,60 | 128,6 | 80,7 | 76,7 |
| -6 | 6,963 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 11,0 | 0,95 | 0,63 | 0,60 | 102,8 | 64,5 | 61,3 |
| -6 | 7,831 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 11,0 | 0,95 | 0,63 | 0,60 | 85,0 | 53,4 | 50,7 |
| -6 | 8,893 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 11,0 | 0,95 | 0,63 | 0,60 | 104,0 | 65,3 | 62,0 |
| -5 | 10,22 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 12,0 | 0,95 | 0,65 | 0,62 | 125,1 | 81,6 | 77,5 |
| -5 | 11,63 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 12,2 | 0,95 | 0,66 | 0,62 | 132,1 | 86,7 | 82,3 |
| -5 | 12,91 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 12,3 | 0,95 | 0,66 | 0,63 | 119,1 | 78,7 | 74,8 |
| -4 | 14,74 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 12,5 | 0,95 | 0,66 | 0,63 | 169,2 | 112,5 | 106,9 |
| -4 | 16,62 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 12,7 | 0,95 | 0,67 | 0,64 | 172,7 | 115,6 | 109,8 |
| -4 | 18,82 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 12,8 | 0,95 | 0,67 | 0,64 | 200,8 | 135,2 | 128,5 |
| -3 | 21,35 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 13,8 | 0,95 | 0,70 | 0,67 | 221,6 | 155,5 | 147,8 |
| -2 | 23,44 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 14,8 | 0,95 | 0,73 | 0,70 | 175,5 | 128,5 | 122,1 |
| -1 | 27,02 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 15,8 | 0,95 | 0,77 | 0,73 | 287,5 | 220,1 | 209,1 |
| 0 | 32,04 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 16,8 | 0,95 | 0,80 | 0,76 | 384,8 | 308,6 | 293,2 |
| 1 | 38,64 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 17,8 | 0,95 | 0,84 | 0,80 | 481,8 | 405,7 | 385,4 |
| 2 | 43,6 | 18 | 5 | 21 | 5,0 | 18,0 | 0,95 | 0,84 | 0,84 | 344,0 | 289,7 | 289,7 |
| 3 | 47,73 | 18 | 5 | 21 | 6,8 | 18,0 | 0,95 | 0,83 | 0,79 | 271,3 | 226,1 | 214,0 |
| 4 | 51,43 | 18 | 5 | 21 | 7,7 | 18,0 | 0,95 | 0,82 | 0,78 | 229,6 | 189,1 | 179,6 |
| 5 | 54,66 | 18 | 5 | 21 | 8,7 | 18,0 | 0,95 | 0,81 | 0,77 | 188,6 | 153,3 | 145,6 |
| 6 | 57,16 | 18 | 5 | 21 | 9,6 | 18,0 | 0,95 | 0,80 | 0,76 | 136,9 | 109,5 | 104,0 |
| 7 | 59,26 | 18 | 5 | 21 | 10,6 | 18,0 | 0,95 | 0,79 | 0,75 | 107,3 | 84,3 | 80,1 |
| 8 | 61,37 | 18 | 5 | 21 | 11,5 | 18,0 | 0,95 | 0,77 | 0,73 | 100,1 | 77,0 | 73,2 |
| 9 | 64,09 | 18 | 5 | 21 | 12,5 | 18,0 | 0,95 | 0,75 | 0,71 | 119,1 | 89,4 | 84,9 |
| 10 | 66,84 | 18 | 5 | 21 | 13,4 | 18,0 | 0,95 | 0,73 | 0,69 | 110,4 | 80,3 | 76,3 |
| 11 | 69,43 | 18 | 5 | 21 | 14,4 | 18,0 | 0,95 | 0,70 | 0,67 | 94,5 | 66,2 | 62,9 |
| 12 | 72,49 | 18 | 5 | 21 | 15,3 | 18,0 | 0,95 | 0,67 | 0,63 | 100,5 | 67,0 | 63,7 |
| Yhteensä | | | | | | | | | | 5227,6 | 3807,1 | 3630,4 |

Vuosihyötysuhteeksi saadaan:

$$\eta_a = \frac{S_J}{S_s} = \frac{3630,4}{5227,6} = 69,5\%$$

8 Vaihtoehtoisten esilämmitysmuotojen vaikutus E-lukuun tyypillisessä asuinkerrostalossa

8.1 Esilämmityksen tehon ja energiankulutuksen laskenta

Ulkolämpötilan pysyvyystiedoista voidaan laskea esilämmitykseen tarvittava teho sekä esilämmitykseen tarvittava vuotuinen energia, kun ilmanvaihtokoneen keskimääräinen ilmamäärä on 1 m³/s. Taulukossa 4 on esitetty esilämmityksen teho sekä energiankulutus.

Taulukko 4. Esilämmityspatterin energian kulutus raitisilman lämmittämiseksi –20 asteeseen.

| t_u , °C | Aika vuodesta % | Esilämmityksen kuluttama energia, kWh | Esilämmittimen teho (tu-(-20)) |
|------------|-----------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| -30 | 0,011 | 11,1 | 11,5 |
| -29 | 0,034 | 21,2 | 10,5 |
| -28 | 0,057 | 19,3 | 9,6 |
| -27 | 0,137 | 58,8 | 8,4 |
| -26 | 0,217 | 50,4 | 7,2 |
| -25 | 0,297 | 42,0 | 6 |
| -24 | 0,365 | 28,5 | 4,8 |
| -23 | 0,514 | 46,9 | 3,6 |
| -22 | 0,799 | 59,9 | 2,4 |
| -21 | 1,164 | 38,3 | 1,2 |
| -20 | 1,461 | 0 | 0 |
| -19 | 1,678 | | |
| -18 | 2,203 | | |
| -17 | 2,568 | | |
| -16 | 3,219 | | |
| -15 | 3,79 | | |
| | | 378 | |

Esilämmityksen tarvitsema huipputeho on –30 asteen pakkasella 11,5 kilowattia, jota vastaava energian kulutus on 11,1 kilowattituntia. Pysyvyystiedoista laskemalla saadaan vuotuseksi esilämmityksen energian kulutukseksi 378 kilowattituntia, kun raitisilma lämmitetään –20 asteeseen.

Alle –20 asteen ulkolämpötilan lyhyestä ajanjaksosta johtuen esilämmityksen energian kulutus on vähäinen pyrittäessä takaamaan huurteeneston toimintavarmuus, mikä tar-

koittaa, että raitisilma lämmitetään esilämmittimellä -20 asteeseen. Vähäinen energi-
ankulutus mahdollistaa esimerkiksi sähköisen esilämmityspatterin hyödyntämisen tällai-
sessa tapauksessa.

Esilämmitykseen tarvittava energia kasvaa nopeasti, kun pyritään esilämmityksellä pa-
rantamaan järjestelmän vuosihyötysuhdetta, tällöin ovat kyseessä niin sanotut ilmais-
lämmöt, jolloin esilämmityksellä vähennetään ilmanvaihdon tarvitsemaa lämpö määrää.
Taulukossa 5 on esitetty tarvittava teho sekä energiankulutus kun ilmaislämmöllä vä-
hennetään ilmanvaihdon tarvitsemaa lämpö määrää. [9.]

Taulukko 5. Esilämmitykseen tarvittava teho ja energiankulutus pyrittäessä korkeampaan vuosi-
hyötysuhteeseen.

| t_u , °C | Aika vuodesta % | Esilämmityksen kuluttama ener- gia, kWh | Esilämmityksen teho kW | Lämpötila esi- lämmityksen jälkeen |
|------------|-----------------------|---|---------------------------|--|
| -30 | 0,011 | 11,1 | 11,5 | -20,4 |
| -29 | 0,034 | 21,2 | 10,5 | -20,3 |
| -28 | 0,057 | 18,1 | 9,0 | -20,5 |
| -27 | 0,137 | 56,1 | 8,0 | -20,3 |
| -26 | 0,217 | 56,1 | 8,0 | -19,3 |
| -25 | 0,297 | 56,1 | 8,0 | -18,3 |
| -24 | 0,365 | 47,7 | 8,0 | -17,3 |
| -23 | 0,514 | 104,4 | 8,0 | -16,3 |
| -22 | 0,799 | 199,7 | 8,0 | -15,3 |
| -21 | 1,164 | 255,8 | 8,0 | -14,3 |
| -20 | 1,461 | 208,1 | 8,0 | -13,3 |
| -19 | 1,678 | 133,1 | 7,0 | -13,2 |
| -18 | 2,203 | 321,9 | 7,0 | -12,2 |
| -17 | 2,568 | 223,8 | 7,0 | -11,2 |
| -16 | 3,219 | 399,2 | 7,0 | -10,2 |
| -15 | 3,79 | 350,1 | 7,0 | -9,2 |
| -14 | 4,6 | 496,7 | 7,0 | -8,2 |
| -13 | 5,913 | 805,1 | 7,0 | -7,2 |
| -12 | 6,963 | 643,9 | 7,0 | -6,2 |
| -11 | 7,831 | 532,3 | 7,0 | -5,2 |
| -10 | 8,893 | 465,2 | 5,0 | -5,8 |
| -9 | 10,22 | 581,2 | 5,0 | -4,8 |
| -8 | 11,63 | 494,1 | 4,0 | -4,7 |
| -7 | 12,91 | 336,4 | 3,0 | -4,5 |
| -6 | 14,74 | 320,6 | 2,0 | -4,3 |
| -5 | 16,62 | 164,7 | 1,0 | -4,2 |
| -4 | 18,82 | | | |
| -3 | 21,35 | | | |
| | | 7303 | | |

8.2 Vaikutus E-lukuun

Esilämmitysvaihtoehtojen vaikutus rakennuksen E-lukuun eri esilämmitystilanteissa, E-lukua laskettaessa huomioidaan eri energiamuotojen primäärikertoimet. Primäärikertoimet suosivat uusiutuvia energiamuotoja epäedullisin on sähkön primäärikerroin.

Esilämmityksen energian kulutuksen lisäyksen vaikutus E-lukuun, kun raitisilmaa lämmitetään siten, että lämpötila ei laske alle -20 asteen:

Kaukolämpöön liitetty esilämmitys:

$$378 \text{ kWh} * 0,7 / 2000 \text{ brm}^2 = 0,13 \text{ kWh/brm}^2$$

Esilämmitys sähköllä:

$$378 \text{ kWh} * 1,7 / 2000 \text{ brm}^2 = 0,32 \text{ kWh/brm}^2$$

Maaperän hyödyntäminen pyrittäessä korkeampaan vuosihyötysuhteeseen:

Maaperästä hyödynnettävässä ilmaislämmössä lämmönsiirtämiseen käytetään kierto-vesipumppua, jolloin pumppauksesta johtuen sähköenergian kulutus lisääntyy hyvin vähän, pumpun on oletettu käyvän täydellä teholla ulkolämpötilan ollessa alle -5 astetta, eli noin 1 500 tuntia vuodessa.

Painehäviöksi putkistossa on oletettu noin 100–140 Pa/m ja esilämmityspatterin painehäviö varusteineen noin 25 kPa, joten yhteispainehäviö noin 80 kPa. Jolloin pumppuvalmistajien valintaohjelmilla saadaan pumpun sähkötehoksi noin 300–350 wattia.

$$1500 \text{ h} * 0,35 \text{ kW} * 1,7 / 2000 \text{ brm}^2 = 0,45 \text{ kWh/brm}^2$$

Esilämmittämällä raitisilma taulukon 5 mukaisesti 7 kilowatin keskimääräisellä teholla saavutetaan noin 4 prosenttiyksikön parannus järjestelmän vuosihyötysuhteeseen, mikäli esilämmityksessä hyödynnetään ilmaislämpöä. Korkeampi vuosihyötysuhde tarkoittaa laskennan ilmamäärällä ja Helsingin ulkolämpötilan pysyvyystiedoilla sitä, että jälkilämmityspatterin energiankulutus laskee 7300 kWh.

$$-7300 \text{ kWh} * 0,7 / 2000 \text{ brm}^2 = -2,55 \text{ kWh/brm}^2$$

Jolloin rakennuksen E-luku maaperän ilmaislämpöä hyödynnettäessä pienenee

$$-2,55 \text{ kWh/brm}^2 + 0,45 \text{ kWh/brm}^2 = -2,1 \text{ kWh/brm}^2$$

9 Maaperän hyödyntäminen kesäajan lämpötilatasojen hallitsemiseksi

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D3 2012 kohdassa 2.2 määrätään ”Rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, että tilat eivät lämpene haitallisesti. Tilojen yllilämpenemisen estämiseksi käytetään ensisijaisesti rakenteellisia ja muita passiivisia keinoja sekä yöllä tehostettua ilmanvaihtoa”.

Kesäajan huonelämpötila asuinrakennuksessa ei saa ylittää +27 asteen lämpötilaa enempää kuin 150 astetuntia 1. kesäkuuta ja 31. elokuuta välisenä aikana.

Vaatimuksen täyttymiseksi erilaiset auringonsuojalipat ja markiisit olisivat tehokkaita ratkaisuja lämpötilatasojen hallinnassa. Asemakaavat asettavat usein rajoituksia näiden rakentamiselle, minkä vuoksi toteuttaminen saattaa olla mahdotonta.

Kesäajan lämpötilatasojen hallitsemiseksi raitisilman viilentäminen on yksi mahdollinen ratkaisu. Vapaajäähdytys maaperästä tai lämpökaivosta lukeutuu passiivisiin ratkaisuihin, koska jäähdytykseen ei tehdä ulkopuolista työtä.

9.1 Maaperästä saatava viilennysenergia

Maaperän lämpötila pysyy lämpökaivossa suhteellisen vakiona noin 6–7 asteessa läpi vuoden, minkä vuoksi lämpökaivoa voidaan hyödyntää myös kesäkuukausina raitisilman viilennykseen lämpötilatasojen hallitsemiseksi.

Lämpökaivoon voidaan viilennyskäytössä siirtää noin 35 W/m, jolloin 200 metriä syvästä lämpökaivosta saadaan noin 7 kilowattia viilennystehoa. [10.]

7 kilowatin teholla saavutetaan ilmamäärällä 1 m³/s noin 4–5 asteen pudotus raitisilman lämpötilaan, joka tarkoittaa asuinrakennusten mitoitusilmamäärällä 0,5 l/sm² asunnoissa viilennystehoa noin 3–5 W/m². Asuinviihtyvyyttä lisää viilennyksellä saatava raitisilman kuivatus, jolloin asunnoissa koetaan lämpöolot mukavammiksi.

10 Johtopäätökset

Korkean lämpötilahyötysuhteen lämmöntalteenoton vuosihyötysuhdetta laskee jäte- ilman ja lämmöntalteenoton jälkeisen lämpötilan rajoitus, jonka vuoksi esimerkiksi 86 %:n lämpötilahyötysuhteen lämmöntalteenotossa vuosihyötysuhde on noin 65 % Helsingin pysyvyystiedoilla.

Esilämmitysvaihtoehdoista kaukolämpö ja sähkö tulevat kyseeseen tilanteessa kun on tarkoitus esilämmittää raitisilma -20 asteeseen, joka on vastavirtakennoisen levylämmöntalteenoton huurteen hallinnan raja. Esilämmitykseen tarvittava vuotuinen energia on niin vähäinen, ettei se käytännössä vaikuta rakennuksen E-lukuun.

Esilämmitys vaihtoehdoista maaperästä saatavalla niin sanotulla ilmaislämmöllä voidaan vähentää ilmanvaihdon tarvitsemaa lämpö määrää, joka parantaa järjestelmän vuosihyötysuhdetta 65:stä 69 %:iin sekä lisää varmuutta huurteeneston hallintaan. Korkeammasta järjestelmän vuosihyötysuhteesta johtuen ilmanvaihdon lämmittämiseen tarvittava energian kulutus pienenee, minkä vuoksi maaperän hyödyntämisessä lisääntyvä sähköenergian kulutus ei vaikuta E-lukuun. Esimerkki tapauksessa esilämmityksellä E-luku parani noin 2 yksikköä.

Maaperään liitettyä esilämmityspatteria voidaan hyödyntää kesäaikana viilennykseen, saavutettava viilennysteho vaakaputkistolla on merkittävästi vähäisempi kuin lämpökaivosta saatava. Lämpökaivosta saatava viilennysteho yhdistettynä hyvään auringonsuojaukseen esimerkiksi auringonsuojalaseilla, voidaan kesäajan lämpötilatasoja hallita sekä raitisilman viilennyksellä saatavalla ilman kuivatuksella lisätä asuinviihtyvyyttä huomattavasti.

Lähteet

- 1 Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden tasauslaskennassa. 2003. Ympäristöministeriön moniste 122. Helsinki: ympäristöministeriö
- 2 Seppänen, Olli. 2004. Ilmastoinnin suunnittelu. Talotekniikka-Julkaisut Oy. Suomen LVI-liito.
- 3 Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi. 2012. Verkkodokumentti. Ympäristöministeriö. <<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=120444>>. Luettu 23.4.2012
- 4 Maalämpöpumppuopas. 2012. Verkkodokumentti. NIBE Energy Systems Oy. <http://www.nibe.fi/Documents/haato_fi/NIBE%20MLP%20JA%20VPDIM%20OPAS%201137-1.PDF> Luettu 20.4.2012.
- 5 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 6 Fläktwoods Oy.2012. Acon-ilmankäsittelykoneiden valintaohjelma.
- 7 Kallio J., Blomqvist R., Engström J. Tiensuu K., Valpola S. & Breilin O. 2008. Maa- ja kalliolämmön mahdollisuuksista. Verkkodokumentti. Green Net Finland. <<http://www.greennetfinland.fi/fi/images/b/b5/GTK16.6.08.pdf>>. Luettu 28.4.2012
- 8 Suomen ilmastopolitiikka. 2012. Verkkodokumentti. Ympäristöministeriö. <<http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=568&lan=fi>>. Luettu 21.4.2012
- 9 Rakennusten energiatehokkuus. 2010. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D3. Ympäristöministeriö.
- 10 Nordell B. 2004. Bergvärme och bergkyla. Verkkodokumentti. Luleå tekniska universitet. <<http://www.siki.se/downloads/borrhal.pdf>>. Luettu 28.4.2012
- 11 Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 12 Tähti E., Selin M., Railio J., Sainio S., Hagström K., Niemelä R., Kulmala I., Sulamäki H., Sjäholm P., Laine J., Kuoksa T., Pöntinen K. 2000. Teollisuusilmastoinnin opas. Helsinki: Suomen talotekniikan kehityskeskus Oy (TAKE).
- 13 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto 2010. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2. Helsinki: ympäristöministeriö.