

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Energia

Sähkökiukaan kivimassan vaikutus saunan energiankulutukseen

Lappeenrannassa 23.6.2009

Lassi Karvonen

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
LUT Energia

Lassi Karvonen

Sähkökiukaan kivimassan vaikutus saunan energiankulutukseen

2009

16 sivua, 2 kuvaa, 1 liite

Ohjaaja: Tero Tynjälä

Mittauksissa mukana: Ari Väisänen
Jari Tuominen (IKI-Kiuas Oy)
Samuli Kerrman (IKI-Kiuas Oy)

SISÄLLYSLUETTELO

1	Symboliluettelo.....	2
2	Johdanto.....	3
3	Kiukaan energiankulutus.....	3
3.1	Lämmitys.....	3
3.2	Saunavuorojen välinen aika.....	6
3.3	Saunominen.....	9
4	Mittaukset.....	11
4.1	Mittausmenetelmät.....	12
4.2	Tulokset.....	13
4.3	Tulosten tarkastelu.....	15
5	Johtopäätökset.....	16

1 SYMBOLILUETTELO

A_j	Pinta-ala	[m ²]
$c_{p,i}; c_{v,i}$	Ilman ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
$c_{p,K}$	Kivien ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
$c_{p,v}$	Veden ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
E	Lämmitykseen kuluva energia	[kWh]
m_K	Kiukaan kivimassa	[kg]
P	Kiukaan keskimääräinen teho	[W]
$q_{m,i}$	Ilman massavirta	[kg/s]
$q_{m,v}$	Höyrystyvän veden massavirta	[kg/s]
r	Veden höyrystymislämpö	[kJ/kg]
t	Saunan lämmitykseen kuluva aika	[s]
\bar{T}	Saunan keskimääräinen lämpötila	[°C]
T_1	Tuloilman lämpötila	[°C]
T_2	Poistoilman lämpötila	[°C]
T_K	Kiukaan kivien loppulämpötila	[°C]
T^*	Lämpötila vaipan ulkopuolella	[°C]
U_j	Lämmönläpäisykerroin	[W/m ² °C]
$\Delta q_{m,v}$	Veden massavirtojen erotus	[kg/s]
ΔP	Kiukaiden tehojen erotus	[W]
ΔT	Saunojen lämpötilojen erotus	[°C]
Φ	Vaipan läpi poistuva lämpövuoto	[W]

2 JOHDANTO

Tämä tutkimus on IKI-Kiuas Oy:n teettämä ja se on osa laajempaa tekniikan kandidaatin opinnäytetyötä. Tutkimuksen tarkoitus on selvittää missä määrin taloyhtiöissä on mahdollista vähentää saunan energiankulutusta oikean kiukaan valinnalla. Puukiukaissa säästö voisi olla hyvinkin merkittävä, koska hyötysuhteet eroavat toisistaan. Taloyhtiöiden sähkökiukaissa näin ei kuitenkaan ole, koska niillä hyötysuhde on kiukaasta riippumatta 100 %. Käytännössä kaikki kiukaaseen tuleva sähkö muuttuu lämmöksi. Sähkökiukaiden energiankulutuksien mahdolliset erot johtuvat siis muista tekijöistä.

IKI-Kiuas Oy teetti tämän tutkimuksen saatuaan taloyhtiöiltä positiivista palautetta kiukaistaan. Asiakkaiden sähkölasku oli pienentynyt, kun vanha kiuas vaihdettiin IKI-Kiukaaseen. Tutkimuksessa selvitettiin voisiko pienentynyt energiankulutus johtua kiukaasta ja mistä eri tekijöistä mahdollinen säästö johtuu. Paljon kiviä sisältävän IKI-Kiukaan ja tavallisen sähkökiukaan energiankulutuksia vertaillaan ensin teoreettisilla laskelmilla ja sitten käytännön mittauksilla.

3 KIUKAAN ENERGIANKULUTUS

Tutkiessa kiukaan energiankulutusta on hyvä ensin selvittää, mistä eri tekijöistä se riippuu. Energiankulutuksen tarkastelu on jaettu kolmeen eri osaan: saunan lämmittämiseen, varsinaiseen saunomiseen ja saunavuorojen väliseen aikaan. Näissä energiankulutus riippuu osittain eri tekijöistä ja siksi niistä jokaista käsitellään erikseen.

3.1 Lämmitys

Saunan lämmitykseen kuluva energia voidaan kuvata yhtälöllä (1), jossa otetaan huomioon merkittävimmät siihen vaikuttavat tekijät eli ilmanvaihdossa poistuva energia, vaipan läpi poistuva energia sekä ilman ja kivien lämmitykseen kuluva energia. Ilmanvaihdossa ja vaipan läpi poistuva energiavirta riippuu saunan ominaisuuksien

lisäksi lämmitykseen kuluvasta ajasta.

$$E = \int_0^t P dt = \int_0^t q_{m,i} c_{p,i} (T - T_1) dt + \int_0^t \Phi dt + m_i c_{v,i} (T_2 - T_1) + m_K c_{p,K} (T_K - T_1) \quad (1)$$

E	Lämmitykseen kuluva energia	[kWh]
$\int_0^t q_{m,i} c_{p,i} (T - T_1) dt$	Ilmanvaihdossa poistuva energia	[kWh]
$\int_0^t \Phi dt$	Vaipan läpi poistuva energia	[kWh]
$m_i c_{v,i} (T_2 - T_1)$	Ilman lämmitykseen kuluva energia	[kWh]
$m_K c_{p,K} (T_K - T_1)$	Kivien lämmitykseen kuluva energia	[kWh]

Saunan lämpötilan odotetaan kasvavan lineaarisesti. Kun yhtälöön (1) sijoitetaan saunan lämpötila ajan funktiona ja integroidaan, saadaan lämmitykseen kuluva energia laskettua yhtälöstä (2).

$$E = \left[\left(\frac{q_{m,i} c_{p,i}}{2} + \frac{\sum U_j A_j}{2} \right) t + m_i c_{v,i} \right] \Delta T + m_K c_{p,K} (T_K - T_1) \quad (2)$$

Kun halutaan vertailla kahden kiukaan energiankulutuksien eroa lämmitettäessä, voidaan se laskea yhtälöstä (3).

$$\Delta E = \left(\frac{q_{m,i} c_{p,i}}{2} + \frac{\sum U_j A_j}{2} \right) (t_2 - t_1) \Delta T + (m_{K2} - m_{K1}) c_{p,K} (T_K - T_1) \quad (3)$$

Yhtälöstä (3) voidaan päätellä, miksi suuret varaavat kiukaat kuluttavat lämmitessään enemmän energiaa. Kiukaan kivien suurempi kivimassa ($m_{K2} > m_{K1}$) sitoo enemmän energiaa. Lisäksi suurempi kivimassa hidastaa saunan lämpenemistä ($t_2 > t_1$) ja siten

vaikuttaa epäsuorasti niihin tekijöihin, jotka riippuvat lämpenemisajasta. Ilmanvaihdon massavirta oletetaan vakioksi, joten pitempänä aikana saunan läpi ehtii kulkea enemmän ilmaa ja siten myös ilmanvaihdon kautta poistuu enemmän energiaa. Saunasta poistuu myös seinien ja muiden rakenteiden läpi sitä enemmän lämpöä, mitä pidempään lämmitys kestää.

Seuraavaksi on vertailtu eri kiukaiden lämmityksenaikaisia energiankulutuksia esimerkkitapauksen avulla. Esimerkkisauna on tilavuudeltaan 9 m^3 , sen vaipan sisäpinta-ala A_j on 24 m^2 ja rakenteiden keskimääräinen lämmönläpäisykerroin U_j on $0,2 \text{ W/m}^2\text{C}$. Saunan ilma vaihtuu 4 kertaa tunnissa. Ilman tiheyden ollessa $1,22 \text{ kg/m}^3$, ilmanvaihdon massavirta $q_{m,i}$ on siis $0,0122 \text{ kg/s}$. Varaavassa kiukaassa on tavalliseen kiukaaseen nähden 100 kg enemmän kiviä ($m_{K2} - m_{K1}$) ja sen lämmitys kestää tunnin eli 3600 sekuntia pidempään ($t_2 - t_1$). Lämmityksen aikana kivien lämpötila nousee ($T_K - T_I$) 100°C ja ilman lämpötila ΔT 50°C . Ominaislämpökapasiteetit oletetaan vakioiksi ja ne ovat ilmalle $c_{p,i} = 1008 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ja kiville $c_{p,K} = 800 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$. Esimerkkisaunasta tiedetään siis kaikki tiedot, jotka tarvitaan energiankulutuksien eron laskemiseen yhtälöllä (3).

$$\Delta E = \left(\frac{0,0122 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 1008 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}}{2} + \frac{0,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}} * 24\text{m}^2}{2} \right) * 3600\text{s} * 50^\circ\text{C} \\ + 100\text{kg} * 800 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * 100^\circ\text{C}$$

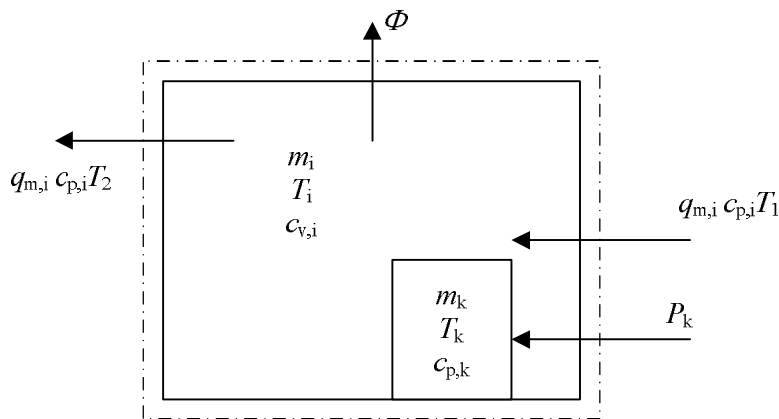
Yhtälön mukaan esimerkkisaunan lämmittämiseen kuluu varaavalla kiukaalla yhteensä $9,541 \text{ kJ}$ eli noin $2,63 \text{ kWh}$ enemmän energiaa. Tästä $2,2 \text{ kWh}$ kuluu kiukaan suuremman kivimassan lämmitykseen. Kiviin varastoitunut energia ei poistu saunasta ympäristöön, vaan se voidaan hyödyntää käytön aikana tai saunan kuivaamisessa. Loput $0,43 \text{ kWh}$ menetetään ilmanvaihdon ja vaipan läpi kulkevan energiavirran mukana.

Oletetaan, että kaikki kiukaiden kiviin varastoitunut energia saadaan käytettyä joko saunan käytön tai kuivaamisen aikana. Tällöin kummallakin kiukaalla saunasta poistuu

yhtä paljon energiaa, jos IKI-Kiukaalla on lämmityksen jälkeisen käytön aikana 0.43 kWh:a pienempi kokonaisenergiankulutus. Kokonaisenergiankulutus pitää sisällään kiukaan vastuksien energiankulutuksen sekä kiukaan kivistä ilmaan ja veteen siirtyvän energian.

3.2 Saunavuorojen välinen aika

Saunavuorojen välisenä aikana kiukaan teho muodostuu ilmanvaihdon mukana poistuvasta energiavirrasta, sekä seinien ja muun vaipan läpi poistuvasta lämpövuosta. Kiuas pitää saunan lämpötilan korkeana, vaikka lämpöä poistuu koko ajan ympäristöön. Tilannetta selventää kuvassa 1 esitetty tasepiirros.



Kuva 1: Saunan tasepiirros saunavuorojen välisenä aikana

Saunan sisään tulevien ja siitä poistuvien energiavirtojen summa on 0, koska tilaan ei kerry energiaa eikä ainetta. Saunavuorojen välinen tilanne oletetaan siis stationaariseksi. Kun merkitään tasetilavuuteen tulevia virtoja positiivisina ja poistuvia negatiivisina saadaan energiatase kirjoitettua yhtälöksi (4). Höyrystyvän veden massavirta oletetaan saunavuorojen välisenä aikana nolllaksi.

$$P + q_{m,i} c_{p,i} T_1 - q_{m,i} c_{p,i} T_2 - \Phi = 0 \quad (4)$$

$$P = \Phi + q_{m,i} c_{p,i} (T_2 - T_1) \quad (5)$$

Yhtälöstä (4) saadaan johdettua yhtälö (5), jonka mukaan kiukaan keskimääräinen teho P on yhtä suuri kuin ilmanvaihdon mukana poistuvan energiavirran $q_{m,i}c_{p,i}(T_2-T_1)$ ja vaipan läpi poistuvan lämpövuon Φ summa. Todellisuudessa kiukaan teho ei ole tasainen, vaan vaihtelee termostaatin säätöjen mukaisesti. Laskennassa käytetty teho sen sijaan on keskiarvo. Nimellisteholtaan esimerkiksi 8 kW:n kiukaan keskimääräinen teho on huomattavasti nimellistehoa pienempi, koska vastukset ovat osan ajasta pois päältä. Samoin laskennassa käytettävät lämpötilat ovat keskiarvoja, joiden oletetaan pysyvän koko jakson ajan samana. Vaipan läpi poistuva lämpövuoto voidaan laskea yhtälöllä (6).

$$\Phi = \sum U_j A_j (\bar{T} - T_*) \quad (6)$$

Yhtälö (6) sijoitetaan yhtälöön (5), jolloin saadaan alla oleva yhtälö (7). Myös poistuvan ilman lämpötilaksi oletetaan saunan keskimääräinen lämpötila. Käytännössä näin ei aina ole, mutta oletus ei aiheuta virhettä myöhemmin kiukaiden keskimääräisiä tehoja vertailtaessa, koska silloin tarvitaan ainoastaan saunojen lämpötilojen ero, joka on suunnilleen sama riippumatta siitä käytetäänkö keskimääräisiä lämpötiloja vai lämpötiloja jossa ilma poistuu saunasta.

$$P = \sum U_j A_j (\bar{T} - T_1) + q_{m,i} c_{p,i} (\bar{T} - T_1) \quad (7)$$

Yhtälö (7) kuvaa kiukaan käyttämään tehoon vaikuttavia tekijöitä. Tehoon vaikuttavat seinien, katon, lattian, oven ja ikkunoiden pinta-alat A_j ja lämmönläpäisykerroin U_j , vaihtuvan ilman massavirta $q_{m,i}$ ja sen ominaislämpökapasiteetti, saunassa oleva keskimääräinen lämpötila \bar{T} , tuloilman lämpötila T_1 ja T^* , joka kuvaa lämpötilaa vaipan eri pintojen ulkopuolella. Kyseinen lämpötila ei välttämättä ole sama eri pintojen ulkopuolella. Esimerkiksi ikkunan T^* voi olla ulkoilman lämpötila ja oven T^* kylpyhuoneen lämpötila. T^* eri pinnoille on tiedettävä, mikäli halutaan laskea tarkasti kiukaan tarvitsema teho, mutta kiukaiden tehojen erotusta ΔP laskettaessa ne pyöristyvät yhtälöistä pois, eikä niitä siis tarvitse tietää.

Vertailtaessa kahden eri kiukaan keskimääräisiä tehoja samassa saunassa ΔP , on saunan

keskimääräinen lämpötila \bar{T} ainoa kiukaasta ja sen käytöstä riippuva muuttuja. Muut tehoon vaikuttavat tekijät riippuvat pelkästään saunasta ja ulkoisista tekijöistä, joten ne oletetaan vakioiksi. Kahden kiukaan tehonkulutuksien ero saadaan yhtälöllä (8).

$$\Delta P = \left(\sum U_j A_j + q_{m,i} c_{p,i} \right) \Delta T \quad (8)$$

Yhtälöstä (8) voidaan päätellä, miksi IKI-Kiukaalla on mahdollista vähentää saunan energiankulutusta. Kiukaalla höyrystyvä vesi siirtää erittäin tehokkaasti lämpöä ihmisen iholle, joten tavallista kosteammassa saunassa lämpötilaa voidaan pitää alhaisempana ja silti saavuttaa vastaava lämmöntuntemus kuin kuivemmassa saunassa korkeammassa lämpötilassa. Suuren kivimassan ansiosta IKI-Kiukaalla saadaan kostea löyly jo pienemmässä lämpötilassa, kuin kilpailijoiden pienen kivimassan sisältävillä kiukailla. Siten myös tarvittava teho on pienempi ja energiaa säästyy.

Pienemmästä lämpötilasta johtuva energiansäästö on seuraavaksi laskettu samassa esimerkisaunassa, jota käytettiin aikaisemmin lämmityksen aikaisia energiankulutuksia vertaillessa.

$$\Delta P = \left(0,2 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * 24m^2 + 0,0122 \frac{kg}{s} * 1008 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right) \Delta T$$

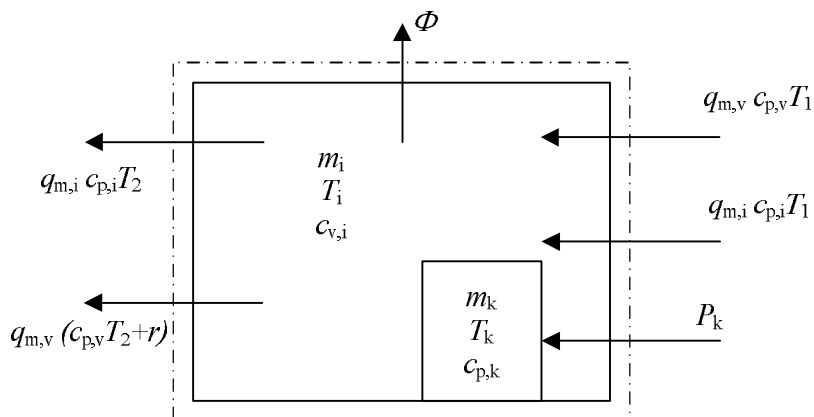
Esimerkkisaunassa tarvittava teho pienenee 17,1 W/°C lämpötilan laskiessa. Laskettaessa lämpötilaa 10 °C, tarvittava teho pienenee siis 171 W. Tällöin energiaa säästettäisiin tunnissa 0,17 kWh. Lämmityksen aikana saunasta poistuva 0,43 kWh:n energiavirta säästettäisiin siis näissä olosuhteissa noin 2½ tunnissa. Tämän jälkeen suuren kivimäärän sisältävällä ja tavallisella kiukaalla saunasta olisi poistunut yhtä suuri määrä energiaa ympäristöön. Saunan ollessa pitempään käytössä, IKI-Kiukaalla olisi vertailukiukaasta pienempi energiankulutus.

Lämpötilaa laskemalla saatu energiansäästö riippuu lämpötilan lisäksi saunan vaipan pinta-aloista A_j ja lämmönläpäisyarvoista U_j , sekä ilmanvaihdon massavirrasta $q_{m,i}$. Lämpötilaa pienentämällä saavutettavissa oleva säästö on sitä suurempi, mitä suurempia

ovat kyseiset arvot. IKI-Kiukaalla saadaan siis suurimmat säästöt suurissa saunoissa, joissa on tehokas ilmanvaihto. Tämänlaisia saunoja on esimerkiksi taloyhtiöissä ja kylpylöissä.

3.3 Saunominen

Saunomisella tarkoitetaan tässä kappaleessa sitä ajanjaksoa, joka alkaa kun kiukaalle aletaan heittää löylyä ja loppuu siihen, kun saunan ja kiukaan lämpötilat ovat palautuneet samaan, joita ne olivat ennen saunomista. Saunomisen aikana kiukaan tarvitsema teho koostuu kaikista niistä tekijöistä kuin saunavuorojen välissäkin, mutta myös kiukaalle heitetyllä vedellä on merkitystä. Veden höyrystymislämpö on korkea, joten jo pieni määrä kiukaalle heitettyä vettä kuluttaa höyrystyessään suuren määrän energiaa ja siten aiheuttaa kiukaan suuren tehonkulutuksen. Yhtälössä (9) otetaan huomioon vain se vesi, joka höyrystyy saunassa ja poistuu höyrynä ilmanvaihdon mukana. Höyrystymättä jäävällä vedellä, tai vedellä joka höyrystyy, mutta tiivistyy takaisin vedeksi saunan sisällä, ei oleteta olevan merkitystä. Viemäriin valuvaa vettä ei huomioida, vaikka se lämpeneekin saunassa, koska sen merkitys on niin pieni. Tilannetta selventää kuvassa 2 esitetty tasepiirros.



Kuva 2: Saunan tasepiirros saunomisen aikana

$$P + q_{m,i} c_{p,i} T_1 + q_{m,v} c_{p,v} T_1 - q_{m,v} (c_{p,v} T_2 + r) - q_{m,i} c_{p,i} T_2 - \Phi = 0 \quad (9)$$

Veden suuren höyrystyslämmön ansiosta, veden höyrystämiseen vaadittava teho on merkittävästi suurempi, kuin veden lämmittämiseen kuluva teho, joka siksi voidaan unohtaa mitättömän pienenä. Höyrystyslämmön vaikutusta kiukaan energiankulutukseen on havainnollistettu liitteen 1 esimerkkilaskelmalla. Kiukaan keskimääräinen teho P saadaan yhtälöstä (10) ja kahden kiukaan tehonkulutuksien ero ΔP yhtälöstä (11).

$$P = \sum U_i A_i (\bar{T} - T_1) + q_{m,i} c_{p,i} (\bar{T} - T_1) + q_{m,v} r \quad (10)$$

$$\Delta P = (\sum U_i A_i + q_{m,i} c_{p,i}) \Delta T + r (q_{m,v1} - q_{m,v2}) \quad (11)$$

Yhtälöstä (11) voidaan päätellä, että kiukaiden tehonkulutuksien mahdolliset erot riippuvat kaikista samoista tekijöistä kuin saunavuorojen välissäkin. Pienemmän lämpötilan ylläpitämiseen vaaditaan pienempi teho ja tehojen erotus on sitä suurempi, mitä suurempia ovat vaipan pintojen pinta-alat A_j , lämmönläpäisykertoimet U_j ja vaihtuvan ilman massavirta $q_{m,i}$. Toisin kuin saunavuorojen välissä, höyrystyvä vesi lisää tarvittavaa tehoa. Osittain tästä syystä kiukaiden energiankulutus onkin saunomisen aikana suurempi, kuin saunavuorojen välissä.

Mikäli veden kulutus on sama eri kiukailla, se ei tietenkään aiheuta mitään eroa energiankulutuksessa. Toisaalta kiukaalle heitetty vesi höyrystyy paremmin suuren kivimassan omaavassa kiukaassa. Tämä lisää käyttömukavuutta, mutta väärin käytettynä myös energiankulutusta. Mikäli höyrystyvän veden määrä lisääntyy, se syö ainakin osan siitä energiansäästöstä, joka voidaan saavuttaa pienemmällä lämpötilalla. Kiuasta vaihdettaessa osalla käyttäjistä saattaa höyrystyvän veden määrä kasvaa huomaamatta, koska vesi ei vanhan mallin mukaan valu kiukaan läpi lattialle. Kiukaalle siis heitetään sama määrä vettä kuin ennenkin, mutta suurempi osa siitä höyrystyy.

Esimerkkisaunan olosuhteissa energiantarve tunnissa 10°C pienemmällä lämpötilalla on samalla tavalla 0,17 kWh:a pienempi, kuin saunavuorojen välisenäkin aikana, mikäli höyrystyvän veden määrä ei lisäänty lainkaan. Seuraavaksi on laskettu, kuinka paljon höyrystyvän veden massavirta saa korkeintaan lisääntyä, jotta IKI-Kiukaan tehontarve

ei kasvaisi tavallisen kiukaan tehontarvetta suuremmaksi saunomisen aikana.

$$\Delta P \geq r * \Delta q_{m,v}$$

$$\Delta q_{m,v} \leq \frac{\Delta P}{r} = \frac{0,17 \frac{kJ}{s}}{2260 \frac{kJ}{kg}} = 7,52 * 10^{-5} \frac{kg}{s}$$

Höyrystyvän veden massavirta saa kasvaa korkeintaan $7,52 * 10^{-5}$ kg/s, eli siis noin 2,7 desilitraa tunnissa. Näin pieni kasvu on hyvinkin todennäköinen, joten IKI-Kiukaan säästöpotentiaali on saunomisen aikana pieni.

4 MITTAUKSET

Teoreettisilla laskelmilla ei voida täysin korvata käytännön mittauksia. Siksi laskelmien tukemiseksi tehtiin käytännön mittauksia 18 ja 19.5.2009 Tehtaankatu 13. saunatiloissa. Taloyhtiössä on kaksi identtistä saunaa, jotka vastaavat mitoiltaan teoreettisissa laskelmissa käytettyä esimerkkisaunaa. Kummankin saunan sisämitat ovat $2*2*2,1$ [m] ja oviaukkojen sisennysten mitat $0,8*2,1*0,3$ [m]. Saunojen tilavuudet olivat siis noin 9 m^3 . Saunoissa oli taloyhtiön asukkaiden käytössä IKI Sähkö 7,5kW – kiukaat, joita ei kuitenkaan tässä tutkimuksessa käytetty. Mittauksia varten toiseen saunaan tuotiin käyttämätön 7,5kW IKI-Kiuas ja vertailusaunaan Helon 8kW:n sähkökiuas, joka oli myös käyttämätön. Vertailukiuas on nimellisteholtaan 8kW, koska markkinoilta ei IKI-Kiukaan lisäksi löytynyt toista 7,5kW:n kiuasta. Nimellistehon erolla ei kuitenkaan pitäisi olla suurta merkitystä, koska tutkimuksessa vertailtiin keskimääräisiä tehoja. Suuremmat vastukset ovat vähemmän aikaa päällä, mikäli energiankulutus on sama. Kiukaiden kivet olivat Sauna Graniittia, kivilaatu Oliviini diapaasi alle 10 cm. Kummassakin kiukaassa käytettiin samoja kiviä, joita IKI-Kiuas Oy oli käyttänyt myös aikaisemmissa tutkimuksissaan tuotekehitykseen liittyen. Kiukaiden kivet olivat keskenään samanikäisiä ja yhtä paljon käytettyjä. IKI-Kiukaaseen pantiin kiviä noin

130kg ja vertailukiukaaseen noin 30kg. Kiukaiden kivimassojen ero oli siis sama 100kg, kuin teoreettisen osion esimerkikiukaissa.

Merkittävä ero teoreettisten laskelmien ja mittausten välillä on se, että laskelmissa käsitellään saunan lämpötilan ylläpitämiseen ja veden höyrystymiseen tarvittavaa energiaa, kun taas mittauksissa mitattiin sähkönkulutusta. Tarvittava energia on sähkönkulutuksen ja kivistä vapautuvan energian summa.

4.1 Mittausmenetelmät

Mittauksissa mitattiin kummankin saunan energiankulutusta Hager ec 310 kWh – mittareilla, joita oli yksi kummallekin kiukaalle. Saunojen lämpötiloja mitattiin kahdeksalla One wire viewer – lämpötilamittarilla, joita oli neljä kummassakin saunassa. Mittarit oli sijoitettu niin, että kummankin saunan ylälauteen ulkoreunalla oli mittari kummassakin reunassa noin 15 senttimetrin etäisyydellä seinästä. Kolmannet mittarit olivat katon oikeassa takakulmassa sijaitsevissa poistoilmaventtiileissä ja neljännet keskellä saunojen takaseiniä selkänöiden päällä. Neljän eri lämpötilan avulla laskettiin saunojen yläosien keskilämpötilat, joita käytettiin laskennassa. Saunojen yläosien lämpötilojen oletettiin antavan paras kuva saunojaan vaikuttavista lämpötiloista. Lisäksi mittauksissa käytettiin Vaisala HMI 41 - ilmankosteusmittaria ja CompuFlow Thermo-anemometer Model 8585 - virtausnopeusmittaria, joilla todistettiin saunojen olevan mahdollisimman samankaltaisia.

Mittauksilla haluttiin vertailla kiukaiden energiankulutuksia lämmityksessä ja käytön aikana eri lämpötiloilla. Saunomisen simuloinnissa käytettiin kahta löylykauhaa, joiden kummankin tilavuuden todettiin olevan noin 3 dl desimitan avulla. Saunomisen aikana kiukaille heitettiin vettä 3 dl kerralla, 2 minuutin 35 sekunnin välein. Erikoinen löylynheittoväli valittiin, koska lämpömittarien mittaussväli oli tasan 1 minuutti. Löylynheittoaajuus ei saa olla mittaustaajuudella jaollinen, koska se heikentäisi mittausten tarkkuutta. Vesi kaadettiin hitaasti joka puolelle kiviä, jotta mahdollisimman pieni osa valuisi kiukaan läpi. Löylyä heitettiin jokaisen saunavuoron aikana kahdeksan kertaa. Ensimmäisen ja viimeisen löylynheiton välinen aika oli siis noin 18 minuuttia.

4.2 Tulokset

Kiukaiden asennusten yhteydessä niiden virrankulutus mitattiin, niiden tarkkojen tehojen selvittämiseksi. Helon virrankulutus oli 11,4 A, joten sen sähköteho oli 7,8 kW. IKI-Kiukaan virrankulutus oli 10,7 A ja teho 7,4k W. Kummankin kiukaan teho erosi siis hieman ilmoitetusta.

Saunoista mitattiin lämpötilat, suhteelliset ilmankosteudet ja poistoilman massavirta, jotta tiedettäisiin eroavatko saunat toisistaan merkittävästi. Kyseiset suureet mitattiin kolmeen kertaan muutaman minuutin välein. Saunojen lämpötilat olivat ennen saunomista noin 23°C ja suhteelliset ilmankosteudet noin 30 % keskeltä saunaa mitattuna. Virtausnopeudet mitattiin kummankin saunan poistoilmaventtiilistä, kohdasta jossa venttiilin halkaisija oli 10 cm. Virtausnopeus oli kummassakin venttiilissä noin 1,0 m/s. Vertailtavat saunat olivat siis samanlaisia myös näiden ominaisuuksien suhteen.

Kiukaat olivat tiistaina 19.5.2009 päällä yhteensä noin 6 tuntia erilaisissa lämpötiloissa. Tänä aikana IKI-Kiuas kulutti yhteensä 17,8 kWh ja Helo 20,8 kWh. Päivän aikana IKI-Kiuas kulutti siis 3 kWh vähemmän energiaa kuin vertailukiuas.

Kummankin saunan lämpötila ennen lämmitystä oli noin 23°C. Saunoja lämmitettiin, kunnes keskimääräinen lämpötila oli IKI-Kiukaan saunassa noin 63°C ja vertailusaunalla noin 70°C. Kyseisissä lämpötiloissa kummatkin kiukaat ovat käyttölämpötilojensa ylärajoilla. Näissä keskimääräisissä lämpötiloissa poistoilman lämpötilat olivat vertailusaunassa 85°C ja IKI-saunassa 74°C. Lämpötila ylälauteen korkeudella oli kummassakin saunassa noin 55°C. IKI-Kiukaalla saatiin siis saunaan aluksi hieman tasaisempi lämpötila. Lämpötilaerot tasoittuivat myöhemmin saunomisen aikana. Ilmanvaihtoa ei suljettu lämmityksen ajaksi. Lämmityksen aikana IKI-Kiuas käytti 10,8 kWh ja vertailukiuas 8,4 kWh sähköä. Ero lämmityksen aikana oli siis 2,4 kWh vertailukiukaan eduksi. Mikäli teoreettiset laskelmat pitävät paikkansa, IKI-Kiukaan 100 kg:a suurempi kivimassa selittää noin 2,2 kWh energiankulutuksien erosta. Kuten jo aikaisemmin todettiin, kiviin varastoitunut energia voidaan saada myöhemmin hyödyksi saunan käytön tai kuivaamisen aikana. Tällöin IKI-Kiukaalla menetetään vain

noin 0,2 kWh:a enemmän energiaa ilmanvaihdon ja vaipan läpi poistuvan energiavirran mukana ympäristöön. Aikaa saunan lämmitykseen kului vertailukiukaalla 1h 38 min ja IKI-Kiukaalla 2h 23 min. Lämmityksen osalta mittausten tulokset olivat siis samaa kokoluokkaa kuin teoreettisten laskelmien tulokset.

Saunavuorojen välisenä aikana kiukaiden keskimääräiset tehot olivat IKI-kiukaalla 2,7 kW ja Helolla 3,0 kW. IKI-Kiukaalla oli siis 0,3 kW pienempi teho, sen saunan keskimääräisen lämpötilan ollessa noin 7°C pienempi. Lämpötilan lasku pienensi siis kiukaalta vaadittavaa tehoa siis noin 0,04 kW/°C. Mittausten tulokset ovat niin lähellä teoreettisten laskelmien tuloksia, että voidaan olettaa tulosten kuvaavan saunojen kokonaisenergiankulutuksia. Lämmityksessä IKI-Kiukaan suurempaan kivimassaan varastoitunutta energiaa ei siis siirtynyt merkittävästi saunan ilmaan saunavuorojen välisenä aikana. Siispä näissä olosuhteissa IKI-Kiukaalla olisi säästetty lämmityksessä saunasta poistuva 0,2 kWh:n energiavirta alle tunnissa.

Tiistain aikana kummallakin saunalla saunottiin kolme kertaa. Saunojen keskimääräiset lämpötilat olivat saunavuorojen aikana IKI-Kiukaalla 68°C, 62°C sekä 59°C ja vertailukiukaalla 73°C, 64°C ja 53°C. Vertailusaunan sähkönkulutus oli kahden ensimmäisen saunavuoron aikana 2,2 kWh ja viimeisessä 2,1 kWh. Sähkönkulutus on mitattu ensimmäisen ja viimeisen löylynheiton väliltä, eli noin 18 minuutin ajalta. Vertailukiukaan keskimääräinen teho oli saunomisen aikana siis noin 7,3 kW, mikä on melko lähellä kiukaan maksimitehoa. Vastaavissa löylyvuoroissa IKI-sauna kulutti sähköä 0,3 kWh, 0,7 kWh ja 0 kWh. Viimeisessä saunavuorossa kiukaan vastukset eivät siis olleet lainkaan päällä. Viimeisen saunavuoron aikana vertailusaunassa oli IKI-saunaa pienempi lämpötila. Teoreettisten laskelmien mukaan vertailusaunassa olisi tällöin pitänyt olla myös pienempi energiankulutus. Samoin keskimääräisen saunavuoron aikana energiankulutuksien olisi pitänyt olla suurin piirtein samat. Lisäksi kaikkien saunavuorojen aikana vertailukiukaan läpi valui merkittävä osa sille kaadetusta vedestä, kun taas IKI-Kiuas höyrysti lähes kaiken, joten myös veden höyrystyminen kulutti IKI-saunassa enemmän energiaa kuin vertailusaunassa.

Saunat eivät siis olleet stationarisessa tilassa, vaan voidaan olettaa, että IKI-saunan

pienempi sähkönkulutus johtui IKI-kiukaan suurempaan kivimassaan varastoituneesta energiasta. Tulos siis vahvistaa sen olettamuksen, että lämmityksessä kiviin varastoitunut energia saadaan hyvin hyödynnettyä saunomisen aikana.

4.3 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksessa käytettiin IKI-Kiukaalla noin 10°C pienempiä lämpötiloja kuin vertailukiukaalla. Tieteellisesti kuitenkin on vaikea todeta, kuinka paljon ilmankosteus vaikuttaa lämmöntuntemukseen saunassa. Jokaisella on varmasti oma mielipiteensä, siitä millainen on hyvä löyly. 10°C – asteen ero oli tutkijan oma mielipide ja perustui omiin kokemuksiin saunoessa.

Esimerkkisaunan ja mittausten saunan välillä pitäisikin olla hieman eroa. Poistoilmaventtiileistä mitattu virtausnopeus osoittaa, että ilma vaihtui mittausten saunoissa noin kolme kertaa tunnissa, kun taas esimerkkisaunan ilma sen sijaan vaihtui neljä kertaa tunnissa. Mittauksissa käytetyt saunat olivat todennäköisesti myös paremmin eristettyjä kuin laskelmien esimerkkisauna. Esimerkkisauna ja mittausten saunat olivat kuitenkin niin lähellä toisiaan, että teoreettisten laskelmien voidaan olettaa olevan oikeansuuntaisia.

Lämpömittarit näyttivät kaikki samaa arvoa pitkän aikaa ennen kuin saunoja alettiin lämmittää ja myös saunojen jäädyttämisen jälkeen. Voidaan siis olettaa, että mikäli lämpötilamittarien näyttämät arvot heittäivät todellisista lämpötiloista, niissä kaikissa on samaa kokoluokkaa oleva virhe. Tällöin virheellä ei pitäisi olla suurta merkitystä saunojen lämpötilaeroja laskettaessa. Mitattaessa suhteellista ilmankosteutta ja ilman virtausnopeutta, käytettiin kummassakin saunassa samaa mittaria. Tällöin myös niiden tuloksissa mittarin epätarkkuuden merkitys on pieni, koska oleellista on saunojen välinen ero, eivätkä tarkat arvot. Kiukaiden erot olivat niin suuria, että mittaustuloksiin voidaan suuntaa-antavasti luottaa. Mitään lukuarvoja, kuten tarkkaa aikaa jolloin IKI-Kiuas alkaa säästää energiaa vähän kiviä sisältävään kiukaaseen nähden, ei voida ottaa kirjaimellisesti. Tuloksista voidaan kuitenkin päätellä, että laskentaan perustuvat arviot olivat oikeansuuntaisia ja että IKI-Kiukaalla on mahdollista säästää energiaa vähän

kiviä sisältävään kiukaaseen verrattuna. Tarkkaan laskentaan perustuvat epävarmuudet sisältyvät laajempaan tekniikan kandidaatintyöhön.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittausten tulokset tukevat teoreettisia laskelmia, joiden mukaan IKI-kiukaalla saunan lämmittämiseen kuluu enemmän energiaa, kuin vähän kiviä sisältävällä kiukaalla. Suurempi energiankulutus lämmityksen aikana johtuu suurelta osin suurempaan kivimassan sitoutuneesta energiasta, joka saadaan hyödynnettyä myöhemmin saunan käytön aikana, eikä sitä siksi menetä ympäristöön. Suuremmasta energiankulutuksesta vain murto-osa selittyy ilmanvaihdon mukana ja vaipan läpi poistuvana energiavirtana ympäristöön.

IKI-Kiukaan suuremman kivimassan ansiosta kiukaalle heitetty vesi höyrystyy tehokkaasti jo pienemmässä lämpötilassa. Siksi kyseisellä kiukaalla voidaan saunoa kilpailijoiden kiukaita hieman pienemmässä lämpötilassa. Pienemmän lämpötilan ylläpitämiseen kiukaalta vaaditaan pienempi teho ja siksi energiaa säästyy saunoessa ja varsinkin saunavuorojen välisenä aikana. IKI-Kiukaalla säästetään kilpailijoiden kiukaaseen verrattuna energiaa silloin, kuin käytönaikaisten energiankulutuksien ero on IKI-Kiukaan eduksi suurempi, kuin lämmityksen aikana energiankulutuksien ero vertailukiukaan eduksi. Energiansäästö saunan käytön aikana riippuu saunan ominaisuuksista ja siitä kuinka pitkään saunat ovat lämmityksen jälkeen käytössä. Mittaustulokset osoittavat, että ainakin taloyhtiöiden saunoissa, joissa saunotaan useita tunteja päivässä, IKI-Kiukaan energiankulutuksen pitäisi olla pienempi kuin vähän kiviä sisältävillä kiukailla. Laskennassa käytetty esimerkkisauna kuvasi tavallista kerrostalon yhteisösaunaa ja siinä energiaa säästettiin jo alle kolmen tunnin päivittäisellä käytöllä. Päivittäiseen käyttöön kuuluvat saunavuorot ja niiden välinen aika.

Liite 1

Höyrystyslämmön merkittävän roolin kiukaan energiankulutuksessa voi todistaa käytännön esimerkillä: Kiukaalle kaadetaan kauhalla 1 dl (eli 0,1kg) 50°C – asteista vettä minuutin välein. Alla höyrystyvän veden massavirta oikeassa yksikössä.

$$q_{m,v} = 0,1kg / 60s = 0,00167 \frac{kg}{s}$$

Seuraavaksi lasketaan ensin vesivirran lämmittämiseen tarvittava teho ja toiseksi veden höyrystymiseen vaadittava teho.

$$q_{m,v} c_{p,v} (T_H - T_1) = 0,00167 \frac{kg}{s} * 4,19 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} * (100^{\circ}C - 50^{\circ}C) \approx 0,35kW$$

$$q_{m,v} r = 0,00167 \frac{kg}{s} * 2260 \frac{kJ}{kg} \approx 3,77kW$$

Tuloksia tulee tulkita niin, että pelkästään yhden desilitran höyrystäminen minuutin välein lisää kiukaan tehonkulutusta keskimäärin 3,77 kW. Eli siis 15 minuutin sanomisen aikana pelkästään veden höyrystyminen kuluttaa 0,94 kWh sähköä. Vastaavana aikana veden lämmitys höyrystyslämpötilaan lisää sähkönkulutusta vain 0,09 kWh. Veden höyrystymisen ollessa näin paljon veden lämmitystä merkittävämpi tekijä energiankulutuksen kannalta, voidaan kiukaiden energiankulutuksia vertailtaessa veden lämpenemiseen kuluva energia unohtaa tilanteen selventämiseksi.