
Tilaaaja Soodakattilayhdistys
Jakelu SOTU:n johtoryhmä ja KTR

8.8.2006

TULIPESÄSONDIKOE NRO 3

Yhteenveto

Kokeessa nro 3 oli tarkoitus altistaa koemateriaalit 3R12, San36Mo, San41 ja San63 tulipesäolosuhteille 1000 h ajan niin, että koemateriaalien pinta-lämpötila on 400°C.

Koe tehtiin 26.6. - 7.8. sen keston ollessa 1006 h. Koemateriaalien pinta-lämpötilaa arvioitiin lämpötilamittausten tulosten sekä niiden perusteella lasketun lämpövuon perusteella. Toinen lämpövuon laskentaan käytetyistä lämpötilamittauksista vikaantui 28.7., joten sen jälkeisiä pinta-lämpötiloja ei voitu laskea. Eri materiaaleissa olleiden lämpötilamittausten tulosten perusteella materiaalien lämpötiloissa ei kuitenkaan tapahtunut muutoksia 28.7. - 7.8., vaan ne olivat keskimäärin samaa tasoa kuin ennen termoelementin vikaantumista.

Laskentatulosten mukaan San41-koepalan, jossa säädössä käytetty lämpötilamittaus oli, pinta-lämpötilat vaihtelivat alueella 388 - 432°C, kun sondiin kohdistuva lämpövuoto oli riittävän suuri jotta säätö pystyi pitämään lämpötilat halutulla alueella. Ko. jaksoina koemateriaalien lasketut keskimääräiset pinta-lämpötilat olivat 391°C (3R12), 405°C (San36Mo), 397°C (San41) ja 401°C (San63). Nämä jaksot kattoivat noin 63 % koko koejaksosta sondiin kohdistuvan lämpövuon ollessa tällöin keskimäärin noin 205 kW/m². Jaksoilla, joilla säätö ei kyennyt pitämään koemateriaalien lämpötiloja riittävän korkeina, sondiin kohdistuva lämpövuoto oli keskimäärin 107 kW/m². Nämä jaksot olivat tyypillisesti alle puolen tunnin kestoisia ja aiheutuivat mahdollisesti määrän lipeän tai suolakerroksen kasaantumisesta sondin pinnalle.

San41-koepalan lämpötilat karkasivat kahteen otteeseen säätöalueen ulkopuolelle. Jaksojen pituudet olivat noin 80 ja 45 min ja niiden aikana koemateriaalien pinta-lämpötilat olivat noin 600°C. Tämän lisäksi 3R12-koepalan lämpötila oli kolmena jaksena, joiden kestot olivat 20, 10 ja 10 min, 500 - 600°C. Syynä lämpötilojen karkaamiseen oli ilmeisesti lämmön-siirtokriisi, joka jälkimmäisissä tapauksissa oli paikallinen. Kriisiä edelsi määrän lipeän keraantuminen sondiin, joka näkyi lämpötilojen ja sondin paineen laskuna.

Laitteisto

Koelaitteisto koostui kiertopiiristä, jossa on höyrystin ja lauhdutin, lauhduttimen jäähdytyksessä käytetystä ilmapuhaltimesta sekä puhaltimen ja lauhduttimen kotelon yhdistävästä ilmastointiputkesta. Kiertopiiristä oli haaroitettu instrumenttiputkilinja, jossa oli paineanturi ja näkölasi. Laitteisto oli muutoin sama kuin kokeessa 2, mutta höyrystin asetettiin 160 mm etäisyydelle lipeäruiskuaukon reunasta (evätasoon) aiemman 130 mm sijaan ja höyrystimen korkeutta kasvatettiin, jolloin koepalat voitiin asentaa ylemmäs sondin etuseinässä. Korkeutta lisättiin sen varmistamiseksi, että myös alimman koepalan kohdalla tapahtuu kiehumista.

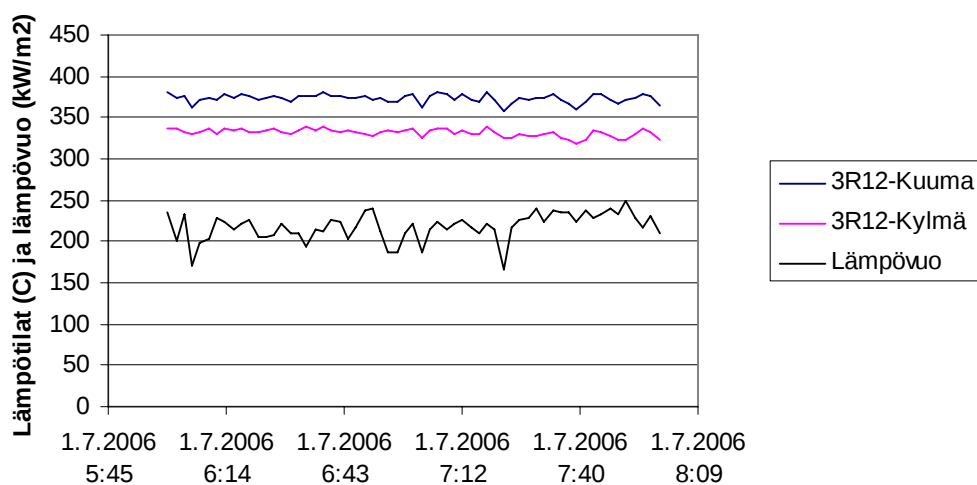
Koelaitteiston instrumentointi koostui lämpötilamittauksista, joita oli kussakin koepalassa, sekä piirin painetta mittaavasta paineanturista. Termoelementit juotettiin hopealla höyrystimen sivuseinään ja johdettiin koepalojen sisään palojen sivusta poratuissa rei'issä, jotka suljettiin hopeajuotoksella. Reiät oli porattu 60 mm leveiden koepalojen sivuista 30 mm syvyyteen. Jokaiseen koepalaan oli asennettu yksi termoelementti reikään, joka kulki etupinnan suuntaisesti 1 mm pinnan alla (reikien halkaisija oli 2 mm ja termoelementti oli 1,6 mm paksu, joten lämpötilat mitattiin noin 2 mm etäisyydellä koepalojen etupinnasta). 3R12-koepalan asennettiin myös kylmälle puolelle termoelementti, joka johdettiin paikoilleen sivusta porattuun reikään samaan tapaan kuin muutkin termoelementit.

Koelaitteiston ohjaus ja säätö toteutettiin niin, että jäähdytysilmapuhaltimen kierroslukua ohjattiin San41-koepalaan asennetun termoelementin lämpötilan mukaan niin, että säätö pyrki hakemaan ennalta asetettua vakio­lämpötilaa.

Koepalojen paksuudet pyrittiin valitsemaan niin, että materiaalien erilaisista lämmönjohtavuuksista ja lämmönsiirtoneste­en erilaisesta lämmönsiirto­kyvystä sondin eri korkeuksilla huolimatta koemateriaalien pintalämpötilat olisivat mahdollisimman lähelle yhtä suuret. Koemateriaalien paksuudet olivat alun perin 3R12 8,0 mm, San36Mo 7,9 mm, San41 7,6 mm ja San63 6,9 mm. Koska ensimmäinen käyttöönotto epäonnistui lämpötilojen karatessa noin puolen tunnin ajaksi ja ylimmäksi sijoitettujen San41- ja San63-koepalojen pinta tämän vuoksi tummui, päätettiin pinnat hioa ennen koeken uutta aloitusta. Hionnan vuoksi koemateriaalien lopulliset paksuudet olivat em. pienempiä eikä paksuuksia tunneta tarkasti.

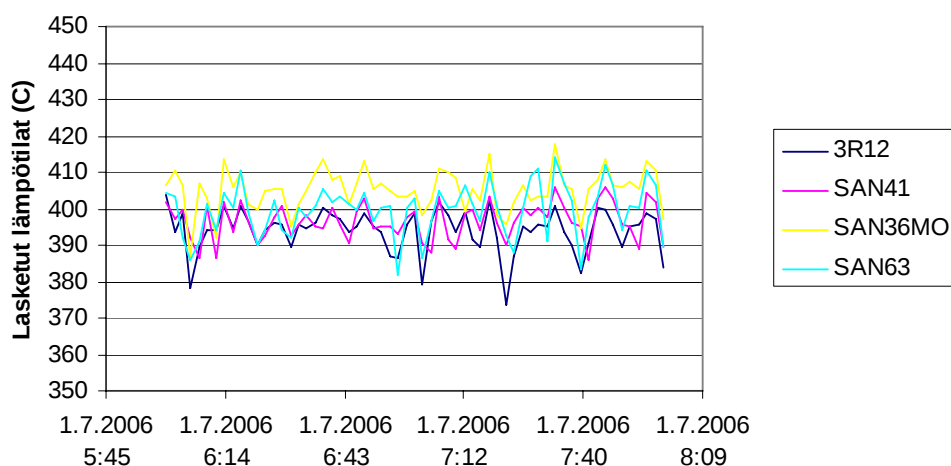
Lämpötilat

Koepalojen lämpötilat pysyttelivät lähellä asetusarvoa, kun sondiin kohdistuva lämpövuoto oli riittävän suuri. Kuvassa 1 on esitetty esimerkkitulokset tällaiselta jaksolta. Lämpövuoto on laskettu suoraan mitattujen lämpötilojen perusteella olettaen lämmönjohtavuudeksi $21 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (keskiarvo Sandvikenin ilmoittamista 3R12-materiaalin lämmönjohtavuuksista 300 ja 400°C lämpötiloissa) ja termoelementtien etäisyydeksi 4 mm .



Kuva 1. 3R12-koepalan mitatut lämpötilat ja niiden perusteella laskettu lämpövuoto 1.7.2006 klo 6 - 8

Kuvassa 2 on puolestaan esitetty mitattujen lämpötilojen, niistä lasketun lämpövuonon sekä koepalojen lämmönjohtavuuksien avulla lasketut etupinnan lämpötilat eri materiaaleille.

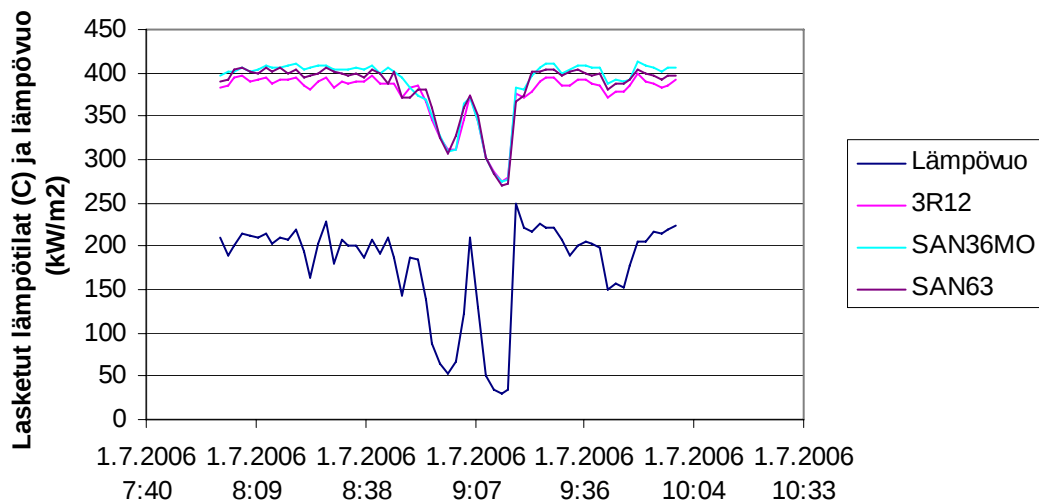


Kuva 2. Koepalojen etupinnan lasketut lämpötilat 1.7.2006 klo 6 - 8

Sanicro-koepalojen lämmönjohtavuudelle käytettiin laskuissa arvoa 18 W/m°C (Sandvikenin ilmoittama arvo materiaalille San63 400°C lämpötilassa). Muista Sanicro-materiaaleista ei lämmönjohtavuutta ollut tiedossa, joten laskut tehtiin käyttäen samaa arvoa kuin San63:lle.

Kuten kuvan 2 tuloksista voidaan havaita, vaihtelivat koemateriaalien lämpötilat alueella 374 - 414°C. Yksittäisten koepalojen osalta lämpötilat vaihtelivat alueilla 374 - 402°C (3R12), 387 - 405°C (San36Mo), 386 - 406°C (San41) ja 382 - 414°C (San63). Keskiarvot olivat vastaavasti 394, 405, 396 ja 400°C (3R12, San36Mo, San41 ja San63). Samalla jaksolla lämpövuovo vaihteli alueella 167 - 250 kW/m² keskiarvon ollessa 218 kW/m².

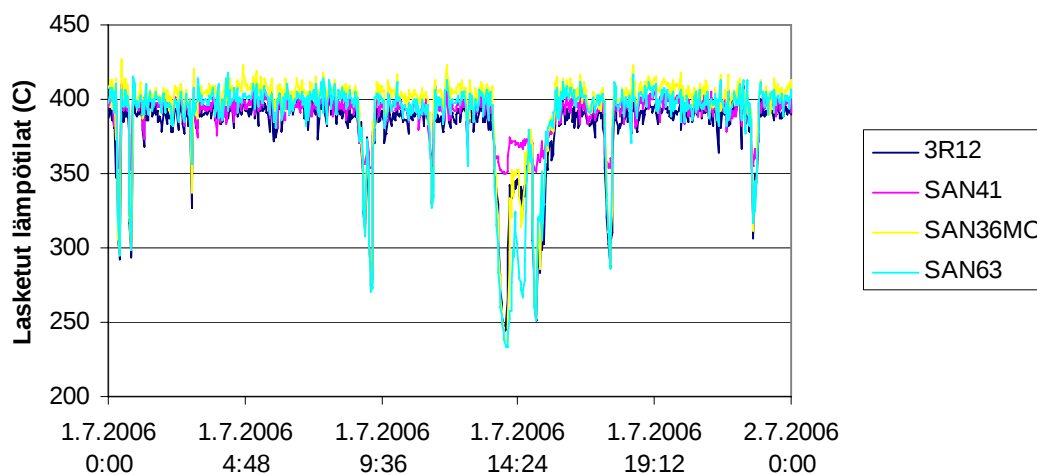
Em. tulokset vastaavat hyvin keskimääräisiä tuloksia koko jaksolla, kun tuloksista karsitaan pois jaksot, joilla sondiin kohdistuva lämpökuorma oli niin pieni, ettei säätö kyennyt pitämään koemateriaalien lämpötilaa tarpeeksi korkeana. Esimerkkejä tällaisista jaksoista on esitetty kuvissa 3 ja 4.



Kuva 3. Lasketut pintalämpötilat ja sondiin kohdistuva lämpövuovo 1.7.2006 klo 8 - 10

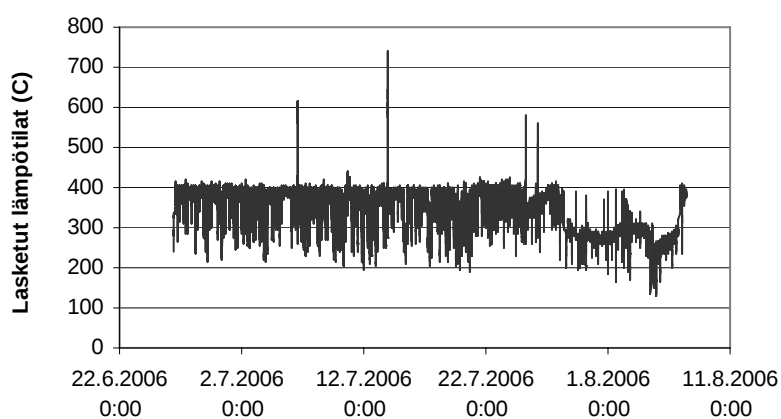
Vastaavia heilahduksia alaspäin oli mittausjaksolla toistuvasti. Kuvassa 4 on esitetty tulokset yhden päivän ajalta ja kuvissa 5 - 8 jaksolta 26.6 - 7.8.

Esimerkkinä käytetyn vuorokauden 1.7. aikana lämpötilojen pudotuksia tapahtui kahdeksan kertaa niiden keston vaihdellessa muutamasta minuutista lähes kahteen tuntiin.

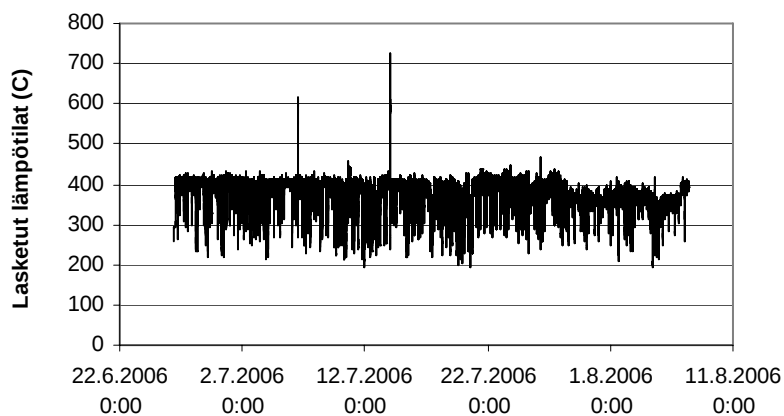


Kuva 4. Lasketut pintalämpötilat 1.7.

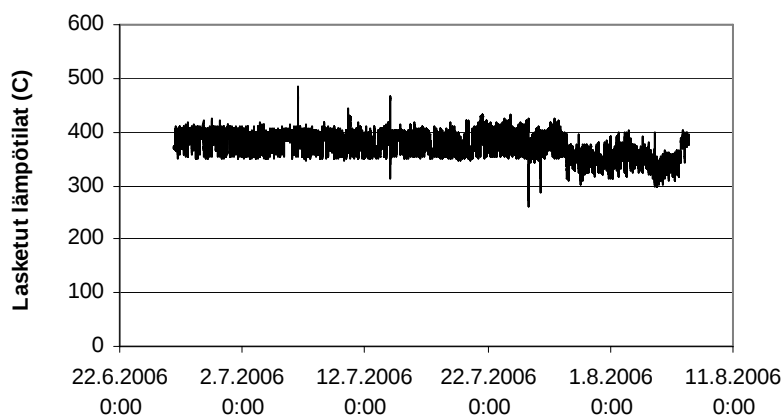
Kuvissa 5 – 8 on esitetty lasketut pintalämpötilat koko jaksolta.



Kuva 5. 3R12-koepalan pintalämpötila 26.6. – 7.8.

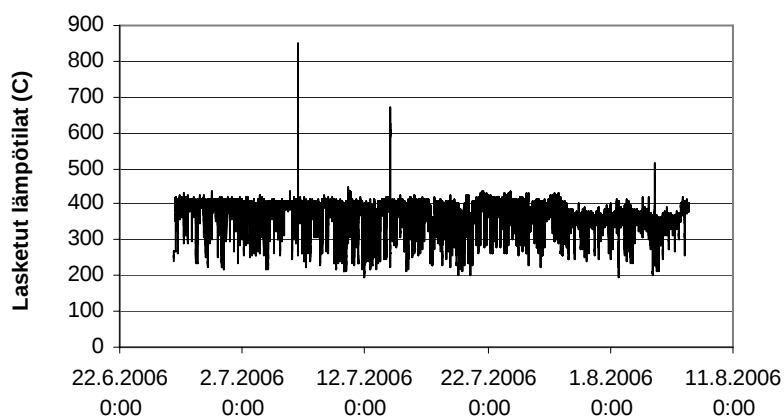


Kuva 6. Sanicro36Mo-koepalan pintalämpötila 26.6. – 7.8.



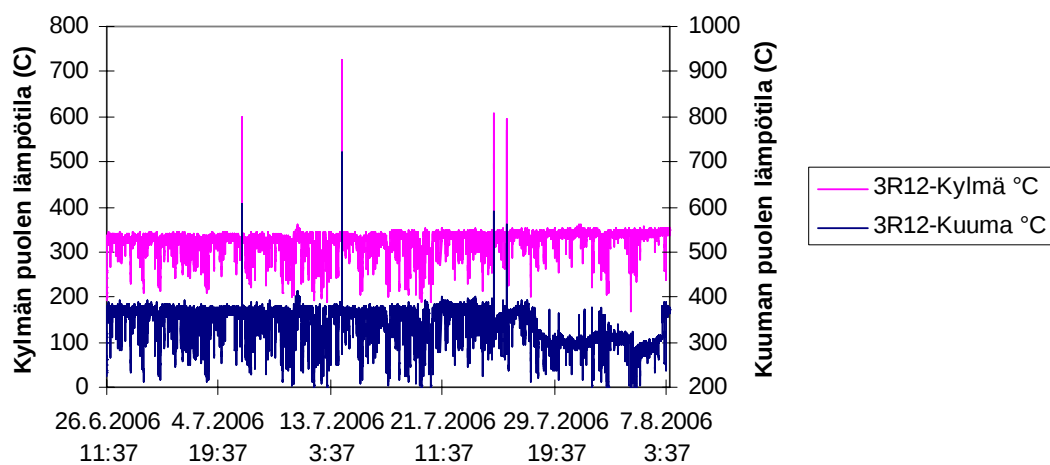
Kuva 7. San41-koepalan pintalämpötila 26.6. – 7.8.

Säädössä käytettävän San41-koepalan termoelementin jänniteviesti jouduttiin säädön vuoksi rajaamaan alueelle 350 - 450°C, jonka vuoksi kuvasta 7 puuttuvat matalat lämpötilat ja muutamien piikkien huiput.

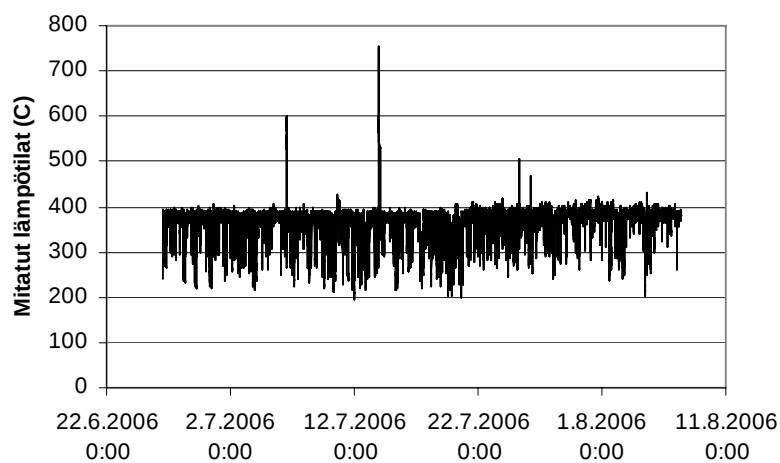


Kuva 8. San63-koepalan pintalämpötila 26.6. – 7.8.

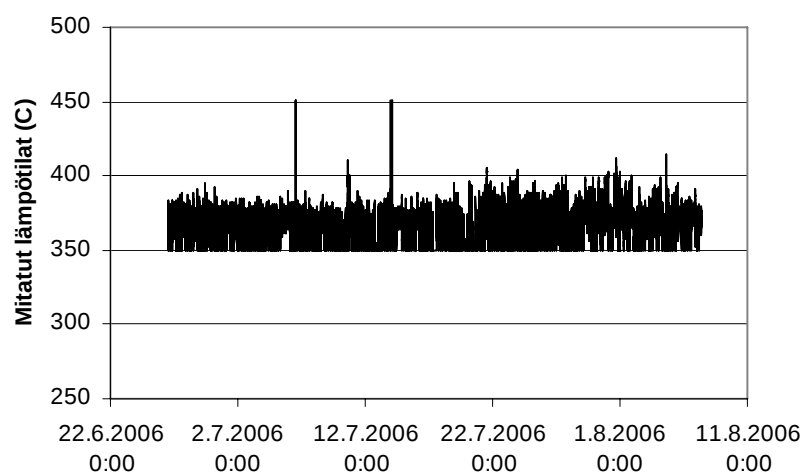
Kuvissa 5 – 8 näkyy lämpötilojen lasku 28.7. jälkeen. Syynä tähän on 3R12-koepalan kuumen puolen termoelementin vikaantuminen, jonka vuoksi ko. elementin ilmoittama lämpötila laski, vaikka muiden termoelementtien lukemissa ei ole havaittavissa muutosta (ks. kuvat 9 – 12). 3R12-termoelementin vikaantuminen aiheutti kuitenkin virheen lämpövuon laskussa, jonka vuoksi laskennalliset lämpötilat kaikissa koepaloissa ovat virheellisiä 28.7. jälkeen. Mittaustulosten (kuvat 9 – 12) mukaan sondin olosuhteissa ei tapahtunut muutoksia loppujaksolla, joten koko jakson tulokset voidaan arvioida jakson 2.6. - 25.7. perusteella.



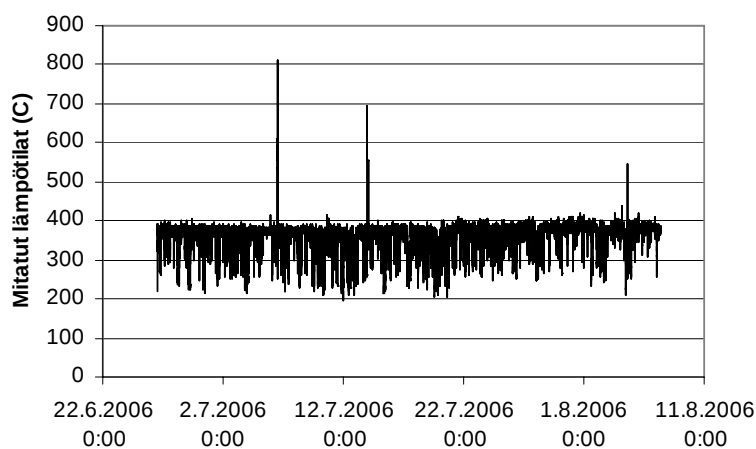
Kuva 9. 3R12-koepalan mitatut lämpötilat



Kuva 10. San36Mo-koepalan mitatut lämpötilat

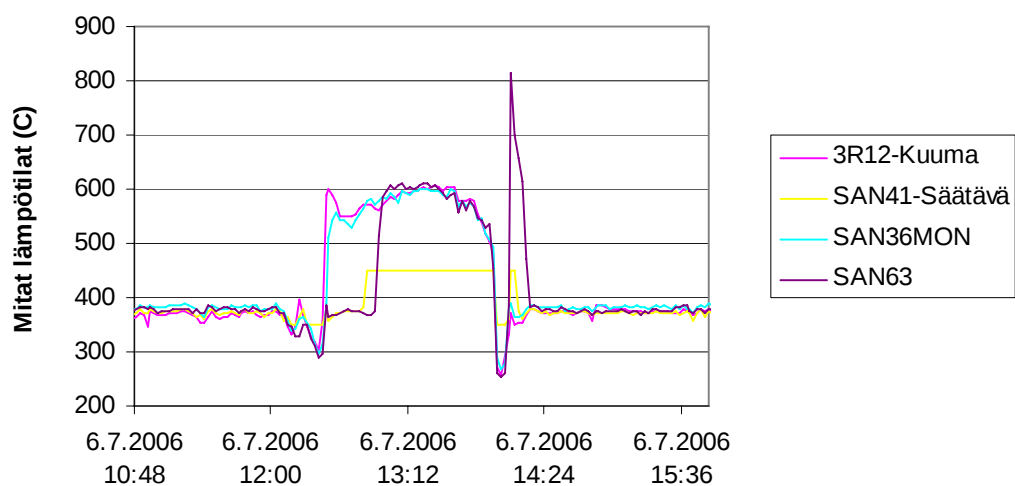


Kuva 11. San41-koepalan mitatut lämpötilat

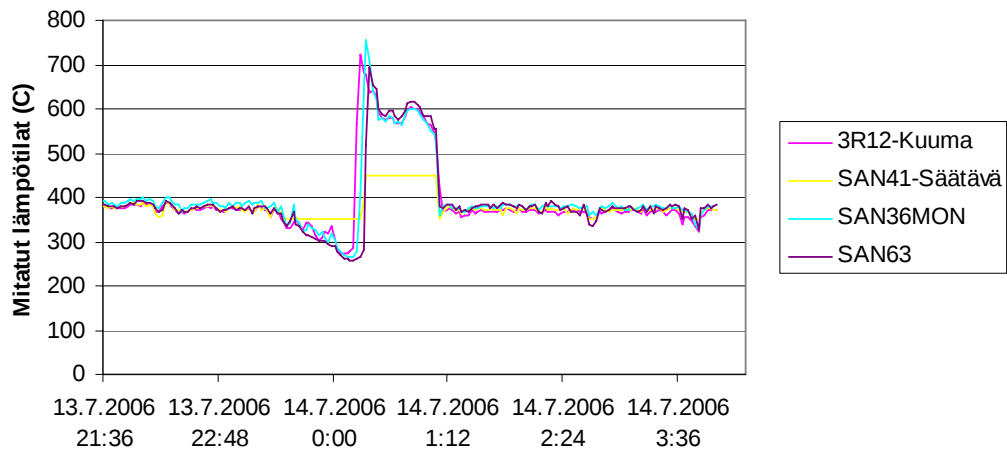


Kuva 12. San63-koepalan mitatut lämpötilat

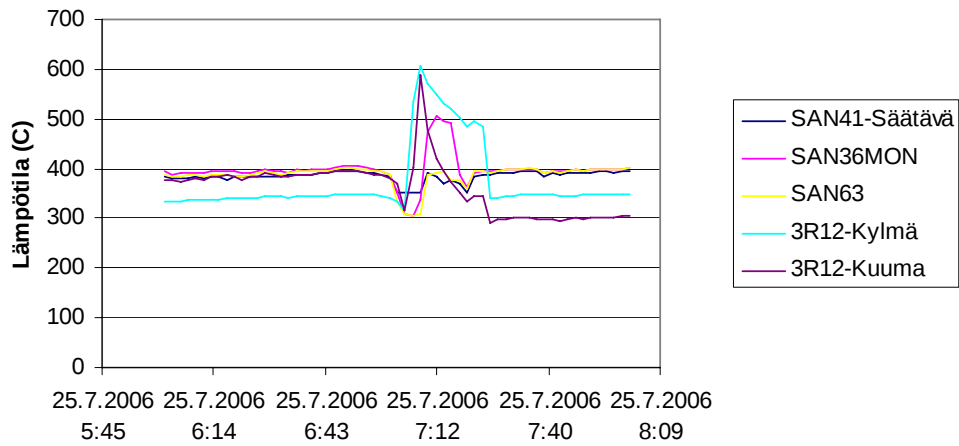
Tuloksissa näkyy neljä piikkiä ylöspäin, 6., 14., 25. ja 26.7. Mittaustulokset ko. jaksoilta on esitetty kuvissa 13 - 16.



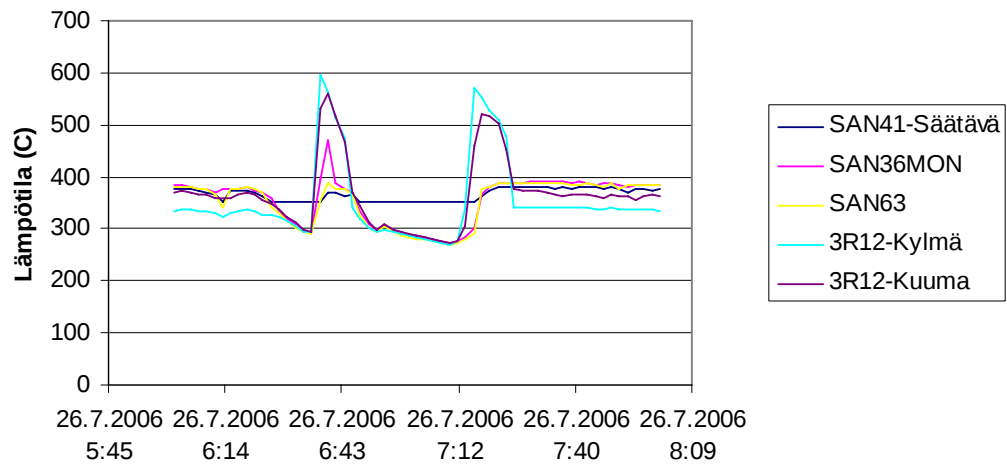
Kuva 13. Mitatut lämpötilat 6.7.2006 klo 11 - 15



Kuva 14. Mitatut lämpötilat 13.7.klo 22 – 14.7. klo 4



Kuva 15. Mitatut lämpötilat 25.7.klo 6 – 8

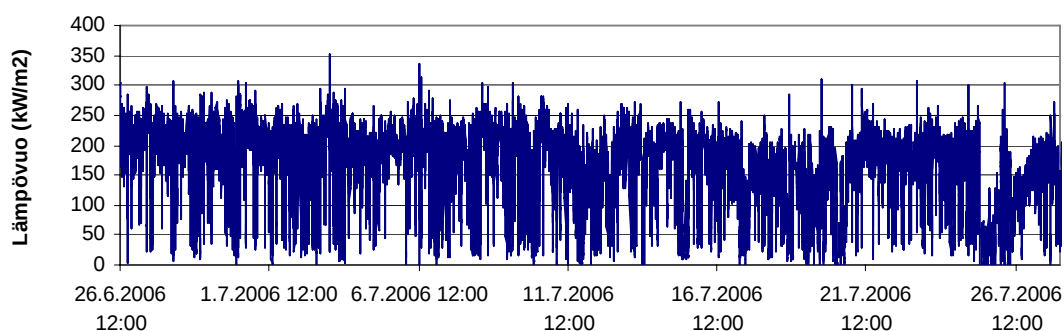


Kuva 16. Mitatut lämpötilat 26.7.klo 6 – 8

Kaikissa tapauksissa lämpötilojen karkaamista edelsi lämpötilojen lasku noin 300°C:een ja sondin paineen lasku normaalin ilmanpaineen tasolle. Lämmönsiirtonesteen kriittinen lämpövuoto on pienen mittakaavan kokeiden tulosten mukaan noin 400 kW/m² normaalissa ilmanpaineessa, mutta sondimittausten tulokset viittaavat siihen, että kriittinen lämpövuoto on tällöin vieläkin alhaisempi. Kriittisen lämpövuodon ylittyessä metallin ja nesteen välille muodostuu höyrykalvo, joka heikentää lämmönsiirtymistä niin, että metallin lämpötila nousee huomattavasti. Kriittinen lämpövuoto kasvaa paineen noustessa, joten tästä syystä lämmönsiirtokriisejä ei tapahtunut sondiin kohdistuvan lämpövuodon ollessa normaali ja sondin ollessa ylipaineessa.

Lämpökuorma

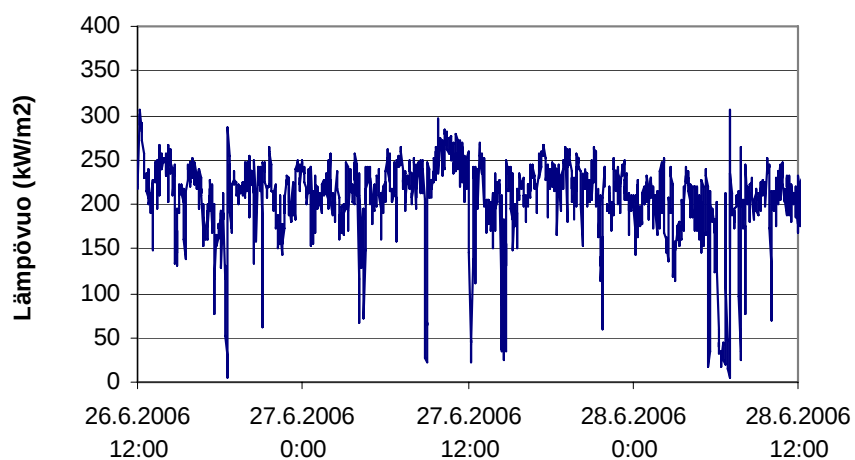
Sondiin kohdistunut lämpövuoto jaksolta 26.6. – 27.7. on esitetty kuvassa 17. Kuvasta on jätetty pois tulokset jaksolta 28.7. – 7.7., koska 3R12-koepalan termoelementin vikaantumisen jälkeen ei lämpövuotoa voitu enää laskea luotettavasti.



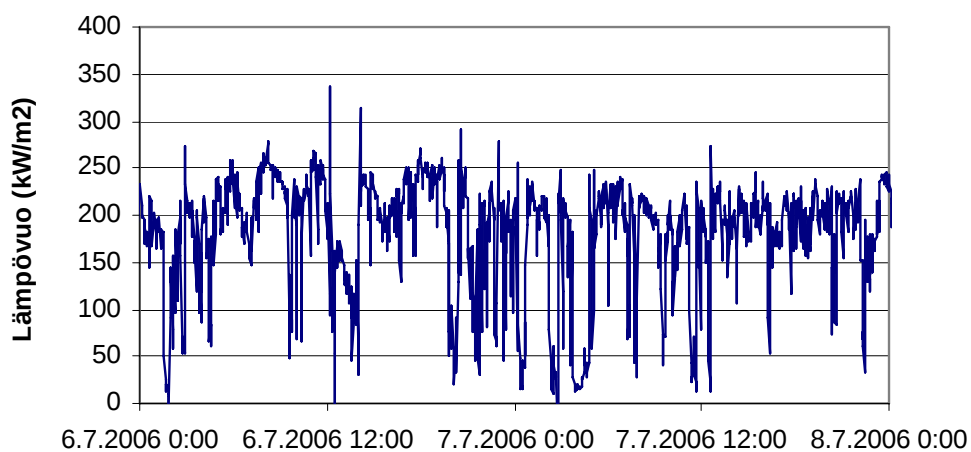
Kuva 17. Sondiin kohdistunut lämpövuoto 26.6. – 25.7.

Keskimäärin lämpövuoto koko mittausjaksolla oli 169 kW/m². Jaksoina, joilla lämpökuorma oli riittävän suuri, jotta lämpötilan säätö toimi kunnolla, keskimääräinen lämpövuoto oli 205 kW/m².

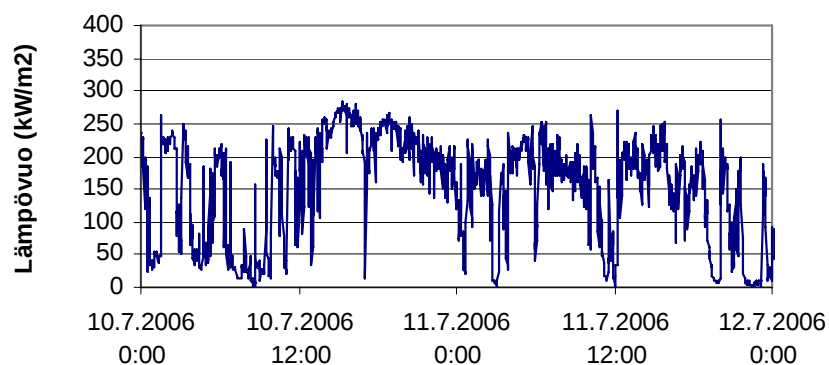
Sondiin kohdistuva lämpövuoto oli ajoittain suhteellisen vakaa (kuva 18), mutta joillakin jaksoilla vaihteluja oli tiheään (kuva 19). Suurimmillaan lämpövuoto oli luokkaa 275 kW/m². Tällainen 10 minuutin jakso oli esim. 10.7. klo 15.18 – 15.28. (kuva 20).



Kuva 18. Sondiin kohdistunut lämpövuoto 26. - 27.6.



Kuva 19. Sondiin kohdistunut lämpövuoto 6. - 7.7.



Kuva 20. Sondiin kohdistunut lämpövuoto 10. - 11.7.

Edellä esitettyihin lämpövuon arvoihin liittyy jonkin verran epävarmuutta, sillä sondia ei ole kalibroitu lämpövuon mittaukseen. Epävarmuutta aiheuttaa lähinnä termoelementtien etäisyyteen liittyvät virheet, jotka ovat arviolta luokkaa $\pm 10 \%$. Kalibrointia ei tehty, sillä lämpövuossa mahdollisesti oleva virhe ei vaikuta pintalämpötiloihin kuin korkeintaan 4°C verran, kun virhe lämpövuossa on alle 20% , ja mahdollinen virhe pintalämpötiloissa on kaikkien koemateriaalien osalta likimain samansuuruinen ja -suuntainen.

Jos sondia käytetään jatkossa lämpövuon seurantaan, voidaan se kalibroida tunnetun lämpölähteen avulla niin, että lämpövuon on mitattavissa yhtä luotettavasti kuin materiaalien lämpötila.

Vantaalla, 8.8.2006

Timo Karjunen