

Tilaaaja Soodakattilayhdistys

25.9.2006

TULIPESÄSONDIKOE NRO 4**Yhteenveto**

Kokeessa oli tarkoitus altistaa koemateriaalit tulipesäolosuhteille 1000 h ajan niin, että koemateriaalien pintalämpötila on 440°C. Koe tehtiin 1. – 21.9. sen keston ollessa 484 h. Koe keskeytettiin suunniteltua aiemmin, kun sondin nestepinnan todettiin laskeneen selvästi eikä vuotokohta ollut tiedossa. Koepalojen lämpötiloihin nesteen pinnan laskulla ei ollut vaikutusta.

Sondin jäähdytystä ohjattiin San41-koepalan lämpötilan mukaan niin, että koepalojen pintalämpötilat olivat noin 440°C. Tulosten mukaan säätö toimi niin, että San41-koepalan pintalämpötila vaihteli tavoitearvon ympärillä alueella 417 - 470°C yhteensä 297 tunnin ajan, jona aikana pintalämpötilan keskiarvot eri materiaaleilla olivat 431°C (3R12), 437°C (San36Mo), 444°C (San41) ja 432°C (San63). San41-koepalan pintalämpötila oli yli 470°C ainoastaan kolme kertaa suurimman arvon ollessa 509°C. Mittaustiedot tallennettiin kahden minuutin välein, joten San41-koepalan pintalämpötila oli yli 470°C mittausten aikana vain 6 min ajan.

Sondiin oli lisätty vastus paineen ylläpitämiseksi matalan kuorman jaksoilla. Vastus toimi 16.9. saakka, jolloin vastus ilmeisesti paloi aiheuttaen myös sulakkeen palamisen. Sondin mittaukset ja puhallin saivat sähkönsä samaisesta sulakepiiristä, joten sondi oli ilman aktiivista jäähdytystä eikä sen tilasta ei ole varmaa tietoa 47 h tunnin jaksolta.

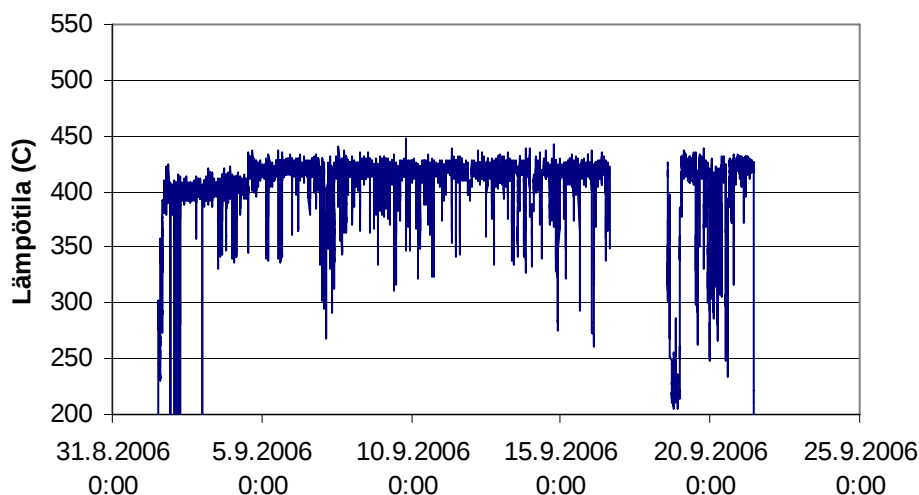
Varoventtiili rajoittaa sondin paineen niin, että koepalojen pintalämpötila voi olla korkeintaan noin 490°C:een. Varoventtiilin tilasta sähkökatkon aikana ei ole varmaa tietoa, mutta varoventtiilin koestustulosten perusteella arvioiden varo ei ole avautunut. On siten mahdollista, että koemateriaalien lämpötilat ovat olleet sähkökatkon ajan em. alhaisempia. Tätä oletusta tukee se, että koepalojen lämpötilat olivat noin 440°C sähkönsyötön palautuessa ja suurimman osan sähkökatkosta kattilan kuorma oli selvästi alhaisempi kuin sähköjen palautuessa.

Sondin rakenne

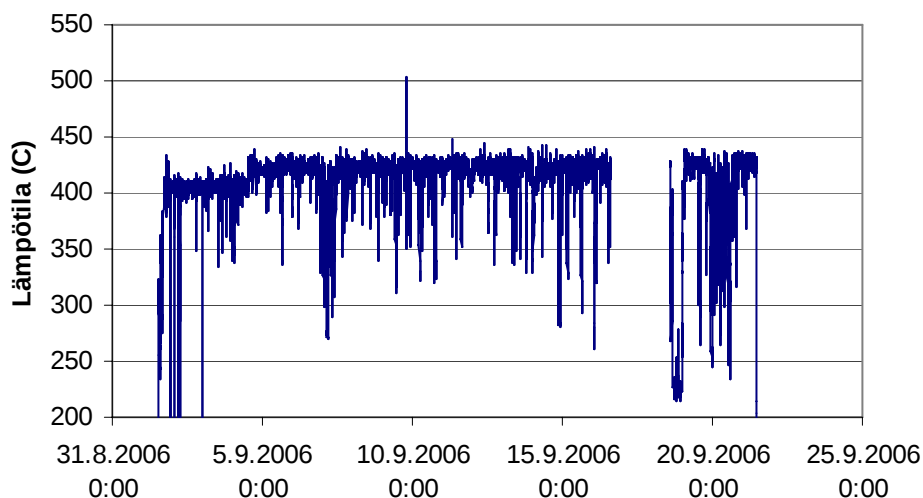
Sondin rakenne oli muutoin sama kuin edellisessä kokeessa, mutta höyrystimen nousuputken ulkopuolelle asennettiin sähkövastus. Vastuksella lämmitettiin sondia paineen ylläpitämiseksi jaksoilla, joilla höyrystin on ilmeisesti määrän lipeän peitossa ja sondin paine laskisi muutoin niin alhaiseksi, että vaarana olisi lämpötilojen karkaaminen lipeän syttyessä.

Mitatut lämpötilat

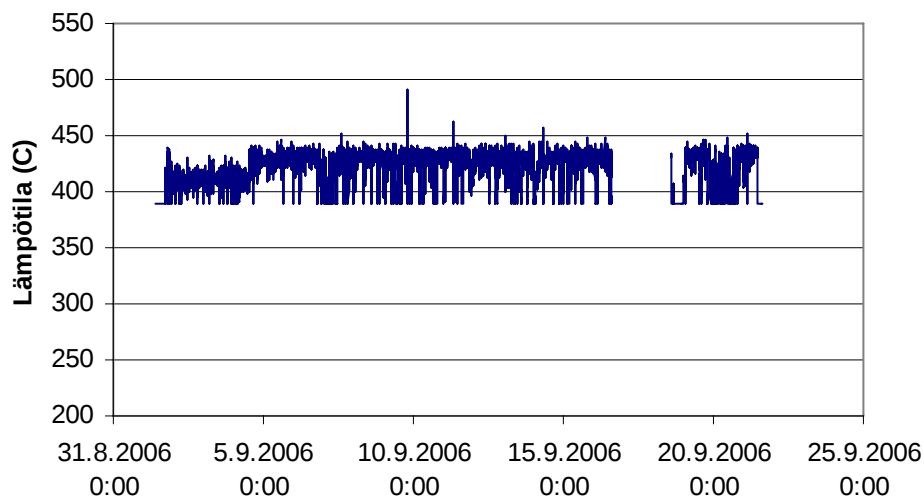
Koejaksolla mitatut koepalojen lämpötilat on esitetty kuvissa 1 - 4.



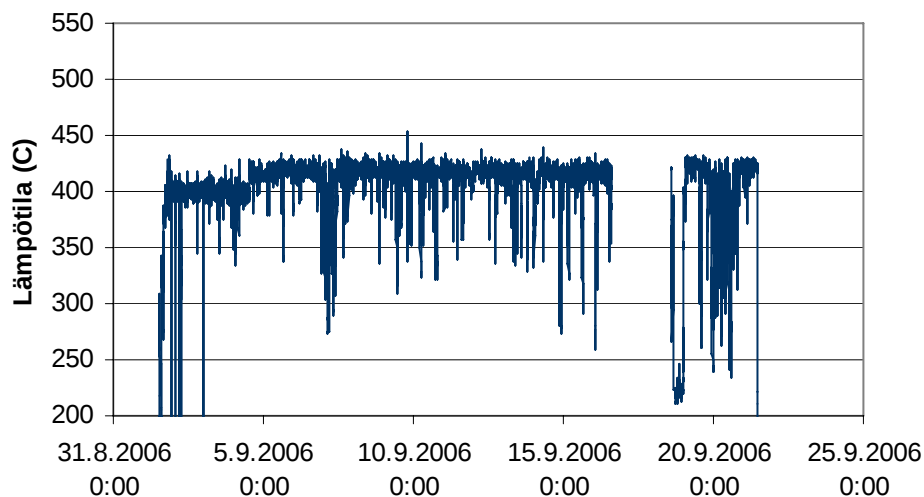
Kuva 1. 3R12-koepalan mitattu lämpötila 1. - 21.9.



Kuva 2. San36Mo-koepalan mitattu lämpötila 1. - 21.9.



Kuva 3. San41-koepalan mitattu lämpötila 1. – 21.9.



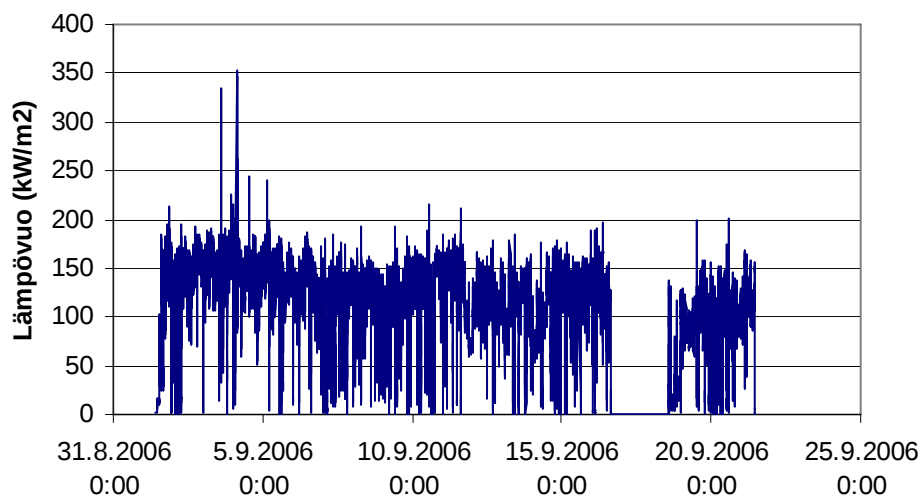
Kuva 4. San63-koepalan mitattu lämpötila 1. – 21.9.

San41-koepalan lämpötilamittausta käytettiin säädössä, jonka vuoksi mÄ-viesti oli rajattu alueelle 390 – 490°C. Rajauksen vuoksi kuvasta 3 puuttuvat alle 390°C olevat mittaustulokset.

Vastuksen ansiosta mitatut lämpötilat näyttäisivät pysyttelevän yli 257°C, jolloin sondin paine on vähintään yhtä suuri kuin normaali ilmanpaine. Ilman vastusta sondin lämpötilat ovat laskeneet alimmillaan tasolle 205 - 210°C, jolloin sondin paine on vain noin 0,3 bar (abs). Näin alhaisessa paineessa lämmönsiirtokriisin vaara on ilmeinen, mikäli sondiin kohdistuva lämpövuoto kasvaa nopeasti. Vastuksen käyttö paineen ylläpitämiseksi on siten välttämätöntä, jotta lämpötilojen karkaaminen saadaan estettyä.

Lämpökuorma

3R12-koepalaan oli asennettu kaksi termoelementtiä eri syvyyksille, joten tulosten perusteella voitiin laskea lämpötilagradientti kuuman ja kylmän pinnan keskikohtien välillä ja edelleen kuumaan pintaan kohdistuva lämpökuorma. Lämpövuoto laskettiin 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 . Tulokseksi saadut lämpövuon arvot koko koejaksolta on esitetty kuvassa 5.

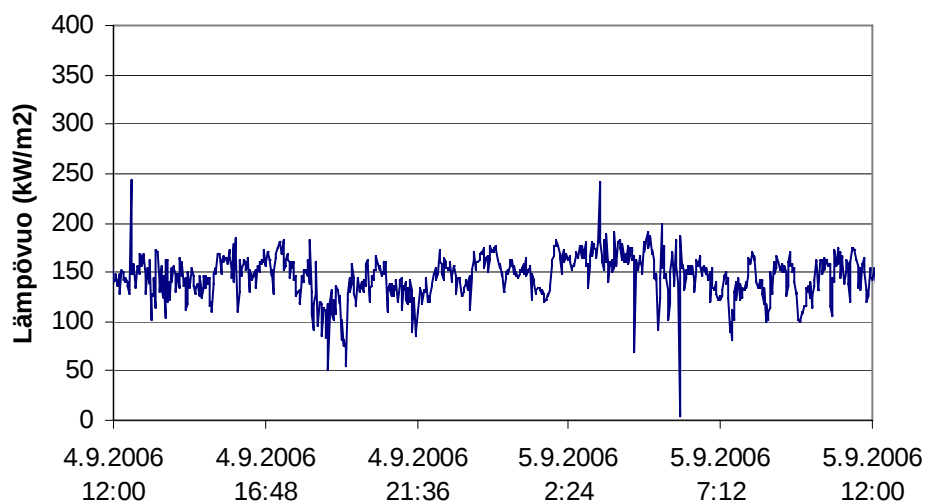


Kuva 5. 3R12-koepalaan kohdistunut lämpövuoto 1. – 21.9.

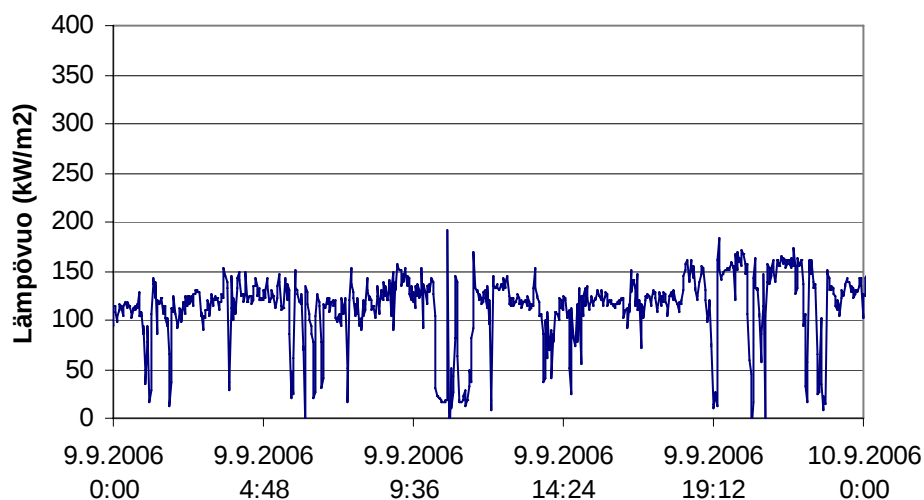
Keskimääräinen lämpövuoto jaksolla 1. – 16.9. oli 123 kW/m^2 . Jos huomioon otetaan ainoastaan jaksot, joilla sondi toimi säätöalueella, oli keskimääräinen lämpövuoto 162 kW/m^2 .

Lämpövuoto oli pienempi kuin edellisessä kokeessa, jossa koko jakson keskiarvo oli 169 kW/m^2 ja säädön aikainen keskiarvo oli 205 kW/m^2 . Syynä on se, että myös kattilan kuorma oli pienempi kuin edellisen kokeen aikaan.

Kuvan 5 perusteella lämpökuorma näyttäisi heiluvan lähes jatkuvasti, mutta todellisuudessa lämpökuorman vaihtelut ovat jaksottaisia. Paremman kuvan vaihtelujen luonteesta antavat vuorokausijakson tulokset, joista esimerkiksi on esitetty kuvissa 6 ja 7.



Kuva 6. Sondiin kohdistunut lämpövuoto 4. - 5.9.



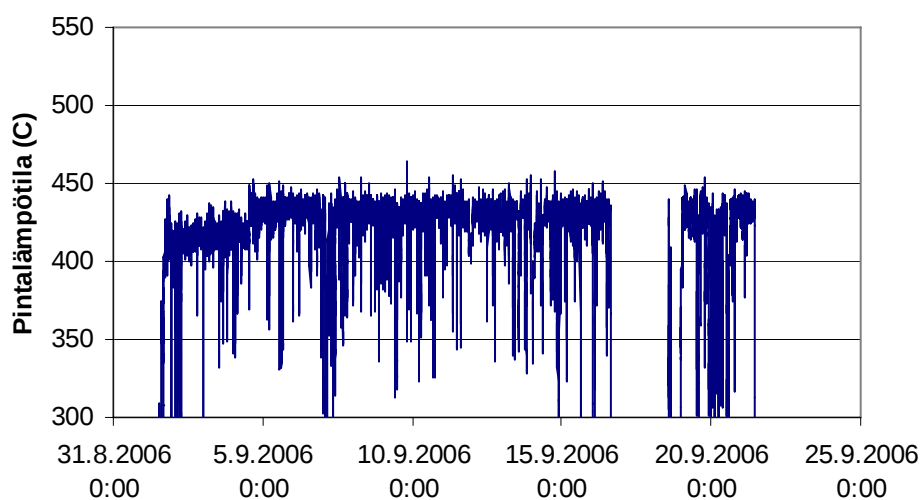
Kuva 7. Sondiin kohdistunut lämpövuoto 9.9.

Kuvan 6 tulokset ovat jaksolta, jolla sondiin kohdistuvan kuorman vaihtelut oli vähäistä. Kuvan 7 tulokset ovat puolestaan jaksolta, jolla kuorma on vaihdellut taajaan ja laajalla alueella.

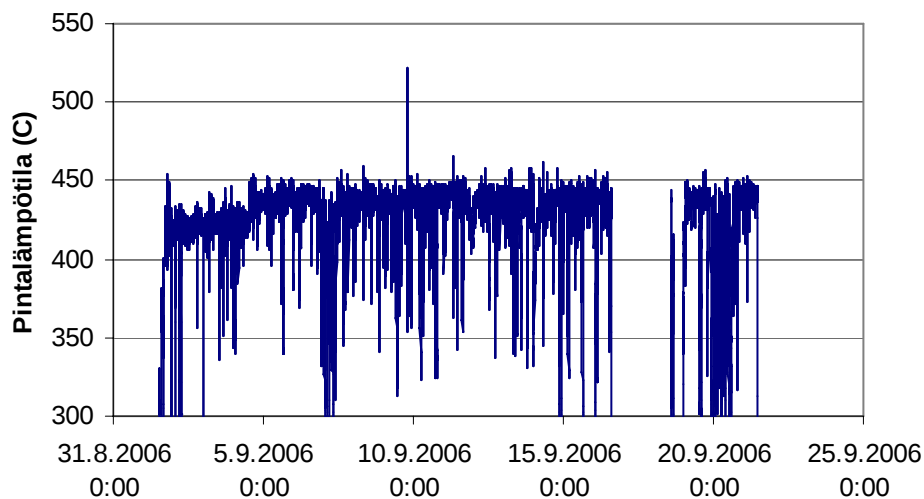
Syynä lämpökuorman voimakkaaseen huojuntaan on ilmeisesti märän mustalipeän osuminen ajoittain suoraan höyrytimeen. Yleisintä "roiskunta" on kattilan toimiessa vajaalla kuormalla, ts. kun lipeäruiskujen paine on alhainen ja mustalipeä ei pisaroidu kunnolla.

Pintalämpötilat

Edellä esitettyjen mitattujen lämpötilojen ja lasketun lämpökuorman avulla voidaan laskea koepalojen pintalämpötilat, jotka on esitetty kuvissa 8 – 11.

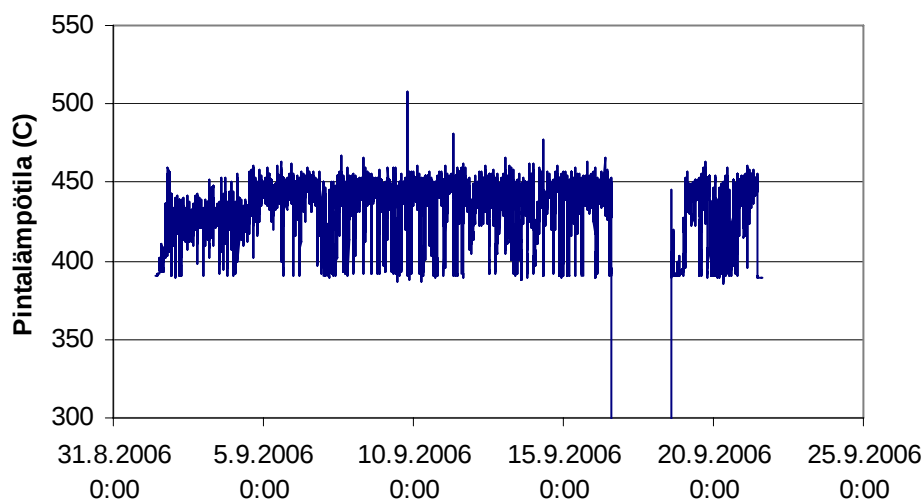


Kuva 8. 3R12-koepalan pintalämpötila 1. – 21.9.2006

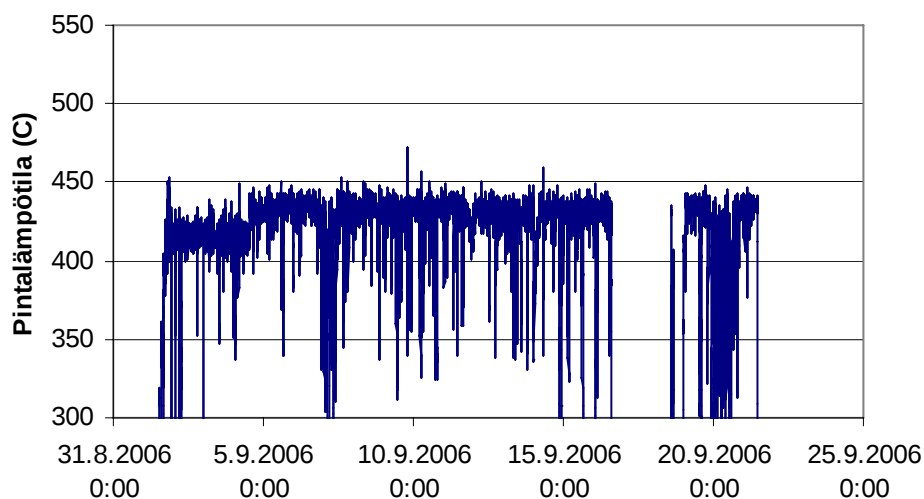


Kuva 9. San36Mo-koepalan pintalämpötila 1. – 21.9.2006

Pintalämpötiloissa näkyvä nousu ensimmäisen viikonlopun jälkeen aiheutui säädön asetusarvojen tarkistuksesta.



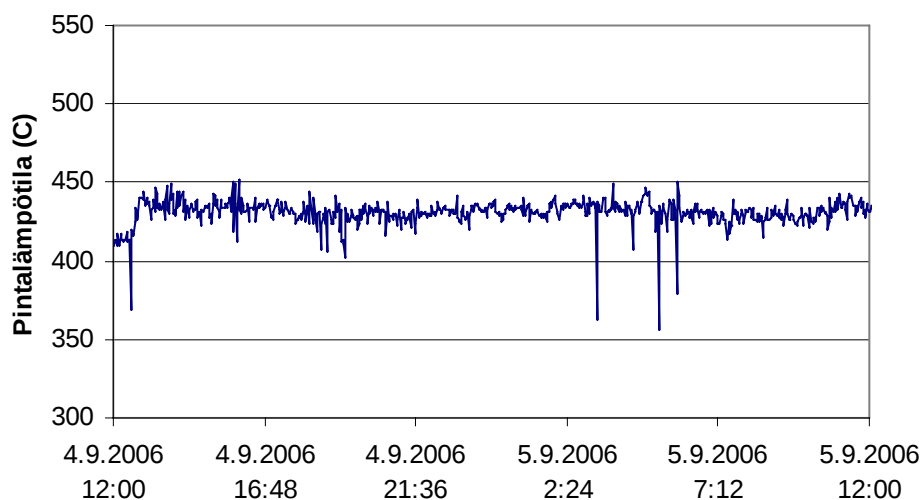
Kuva 10. San41-koepalan pintalämpötila 1. – 21.9.2006



Kuva 11. San63-koepalan pintalämpötila 1. – 21.9.2006

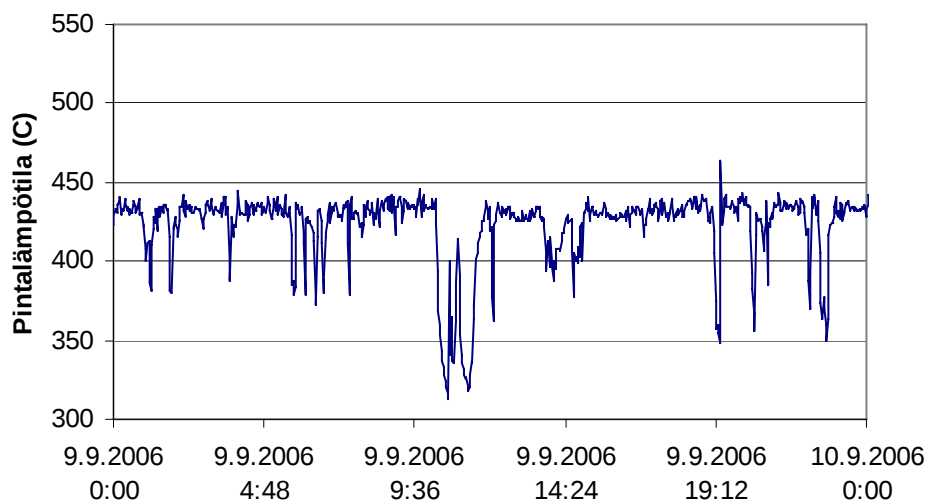
Sanicro-koepalojen lämmönjohtavuudelle käytettiin laskuissa arvoa 18 W/m°C (Sandvikenin ilmoittama arvo materiaalille San63 400°C lämpötilassa). Muista Sanicro-materiaaleista ei lämmönjohtavuutta ollut tiedossa, joten laskut tehtiin käyttäen samaa arvoa kuin San63:lle.

Koepalojen lämpötilat pysyttelivät lähellä asetusarvoa, kun sondiin kohdistuva lämpövuoto ei laskenut hyvin alhaiseksi liian pitkäksi aikaa. Tämä näkyy hyvin vuorokausitason tuloksissa, joista esimerkkejä on esitetty kuvissa 12 ja 13. Tulokset ovat samoilta jaksoilta, joilta lämpökuormat esitettiin kuvissa 6 ja 7.



Kuva 12. 3R12-koepalan pintalämpötila 4. - 5.9.

Kuvan 12 tulokset ovat jaksolta, jolla lämpökuorma vaihteli vähän. Tällä jaksolla säätö toimi erinomaisesti niin, että pintalämpötila oli lähes jatkuvasti alueella 425 - 450°C keskiarvon ollessa hieman alle 440°C. Kuvan vasemmassa reunassa näkyy porrasmuutos, joka tehtiin säädön asetusarvoissa sondin oltua paikoillaan ensimmäisen viikonlopun yli.



Kuva 13. 3R12-koepalan pintalämpötila 9.9.

Kuvan 13 tulokset ovat jaksolta, jolla lämpökuorma vaihteli taajaan. Jakson keskivaiheilla oli noin 1,5 h pituinen aikaväli, jona sondiin kohdistuva lämpökuorma oli hyvin alhainen. Tulokset ovat muuten samanlaisia kuin kuvan 12 jaksolla, mutta lämpötilan pudotuksia on taajempaan ja keskivaiheen

jaksolla sondi jäähdyi niin, että sen lämpötila laski noin 320°C:een. Ilman sähkövastusta lämpötilan lasku olisi mitä ilmeisimmin ollut huomattavasti voimakkaampaa, joten sondissa tehtyä muutosta voidaan pitää tässä suhteessa onnistuneena.

Sondiin kohdistuvan lämpökuorman vaihtelut näkyvät molemmilla jaksoilla pintalämpötilan laskuina, kun lämpökuorma laskee alle n. 100 kW/m². Jakso, joina lämpökuorma on näin alhainen, ovat onneksi sen verran harvinaisia ja lyhytkestoisia niin, että säätö toimi tehokkaasti 68 % ajasta eli 297 tunnin ajan. Tänä aikana säätävän San41-koepalan lämpötilat olivat 415 - 450°C keskiarvon ollessa noin 430°C. Yli 450°C lämpötiloja mitattiin San41-koepalasta koko mittausjakson aikana ainoastaan viisi kertaa, ja näistä ainoastaan yhden kerran lämpötila ylitti mittausalueen ylärajan 490°C. Dataa tallennettiin kahden minuutin välein, joten ylitys oli hyvin lyhytkestoinen. Ylitys ei myöskään ollut kovin suuri, sillä muiden koepalojen mittauksen perusteella korkein pintalämpötila ko. hetkellä oli 521°C.

Koemateriaalien pintalämpötilojen keskiarvot jaksoilta, joilla säätävä San41-koepalan lämpötila oli 415 - 450°C, olivat

- 3R12: 431°C
- San36Mo: 437°C
- San41: 444°C
- San63: 432°C.

Koepalojen paksuudet oli yritetty sovittaa aiempien kokeiden tulosten mukaisesti niin, että pintalämpötilat olisivat kaikissa koepaloissa yhtä suuria. Tässä ei täysin onnistettu, vaan 3R12- ja San63-koepalojen pintalämpötilat jäivät 6 - 13°C alhaisemmiksi kuin koepalojen San36Mo ja San41 pintalämpötilat.

Sähkönmenetys

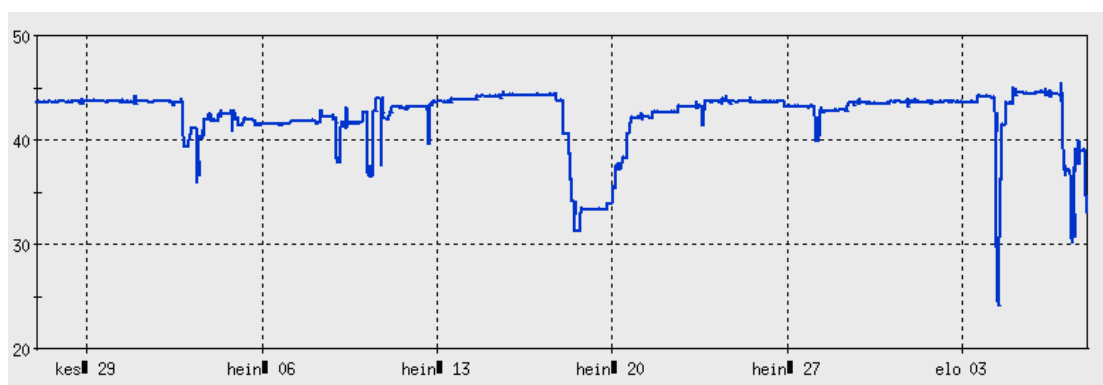
Tiedonkeruu keskeytyi ja puhallin pysähtyi sulakkeen palamisen takia lauantaina 16.9. klo 14.52, jolloin kattilan kuormaa oltiin laskemassa. Kattilan kuorma oli tuolloin noin 3 000 tka/vrk (35 kkg/s) (kuva 14). Tiedonkeruu käynnistyi uudelleen maanantaina 18.9. klo 13.49, jolloin kattilan kuormaa oltiin nostamassa. Kattilan kuorma oli tällöin samaiset 3 000 tka/vrk.

Koko jaksolla, jolta mittaustietoja sondin lämpötiloista ei ole, kattilan kuorma oli korkeintaan em. 3 000 tka/vrk. Suurimman osan jaksosta kuorma oli huomattavasti alhaisempi.



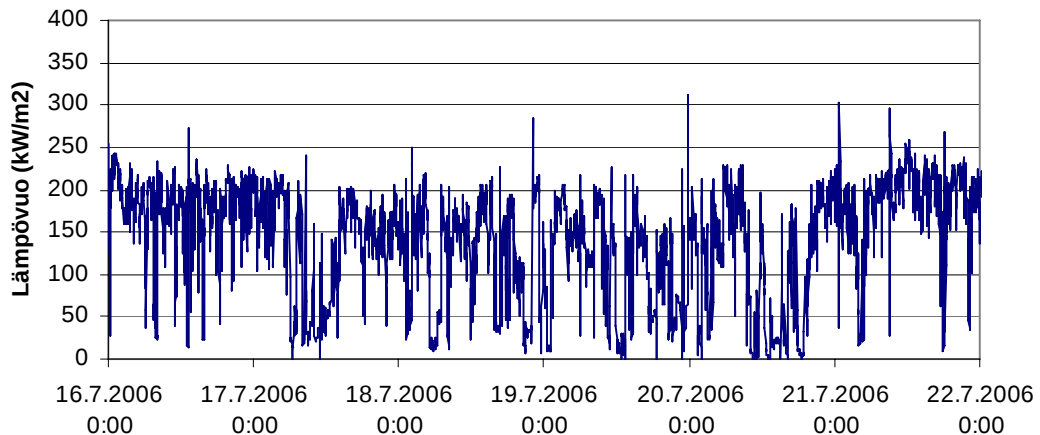
Kuva 14. Kattilan kuorma (tka/vrk) 14. - 18.9.

Sondin käyttäytymistä ko. jaksolla voidaan arvioida edellisen kokeen tulosten perusteella. Edellisessä kokeessa kattilan kuorma oli alle 3 000 tka/vrk (alle 35 kgka/s) kaksi kertaa, 18. - 20.7. ja 4.8. (kuva 15).



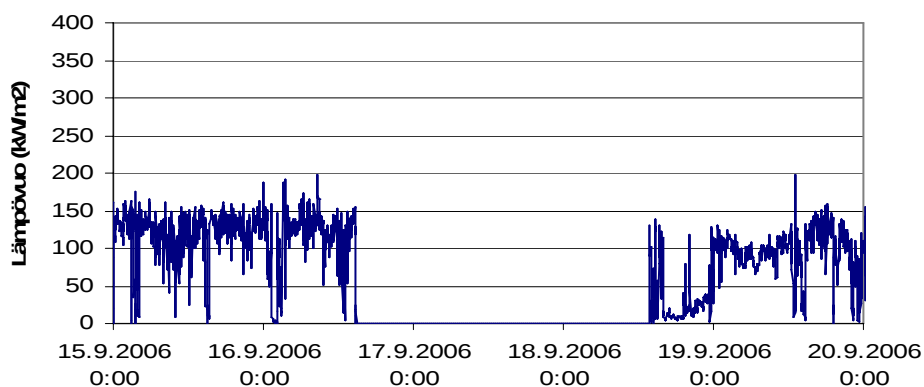
Kuva 15. Kattilan kuorma (kgka/s) 29.6 - 8.8.

Jälkimmäisen jakson aikana toinen 3R12-koepalan lämpötilamittauksista oli jo vikaantunut, joten jaksolla ei voitu määrittää sondiin kohdistuvaa lämpövuota. Ensimmäisellä jaksolla sitä vastoin mittaukset olivat kunnossa ja lämpövuoto oli siten määritettävissä. Tulokset on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Sondiin kohdistuva lämpövuoto 16. – 22.7. kokeessa 3

Kuvassa 16 esitetyllä jaksolla kattilan kuorma oli alhaisimmillaan 18. – 19.7., jolloin se oli 2 750 – 2 900 tka/vrk. Tänä aikana sondiin kohdistuva lämpökuorma oli ajoittain luokkaa 150 kW/m², jolloin sondi todennäköisesti olisi ylikuumentunut ilman puhallinta. On siten mahdollista, että myös nyt tehdyssä kokeessa sondiin kohdistuva lämpövuoto oli ajoittain niin korkea, että sondi ylikuumentui, kun kattilan kuorma oli luokkaa 2 750 – 3 000 tka/vrk ja puhallin oli sulakkeen palamisen takia toimintakunnoton. Näin saattoi käydä varsinkin lauantaina iltapäivällä, sillä alasajon aikana sondiin kohdistuva lämpökuorma oli suhteellisen korkea, vaikka lipeän määrää oli jo las-kettu (kuva 17). Maanantaina sitä vastoin sondiin kohdistuva lämpökuorma oli suhteellisen alhainen, joka selittää sen, että sondin paine ja lämpötila olivat tuolloin hallinnassa ilman puhallintakin.



Kuva 17. Sondiin kohdistuva lämpökuorma 15. – 20.9.

Sondin maksimilämpötiloja sähkökatkon aikana voidaan arvioida karkeasti sen perusteella, että mikäli sondi on paineistunut varoventtiilin avautumispaineeseen (16 bar abs.), niin sondin nesteen lämpötila on ollut noin 435°C. Lämpövuon ollessa noin 150 kW/m² on lämpötilaero koepalojen kuuman ja kylmän pinnan välillä noin 50 - 55°C. Koepalojen pintalämpötilat olisivat siten olleet suurimmillaan tuolloin noin 490°C.

Sondin varoventtiili koestettiin 25.9. VTT:llä. Koestuksessa varoventtiili ei vuotanut paineen ollessa 16 bar. Sondissa käytetylle varoventtiilille on ominaista, että sen avautumispaine laskee, mikäli se avautuu kertaalleen. Näin kävi mm. koesarjan ensimmäisessä kokeessa käytetylle varoventtiilille. Nyt varoventtiilin avautumispaine ei ole laskenut asetusarvosta, josta päätellen varoventtiili ei ole avautunut kokeen aikana. Johtopäätöstä tukee se, että venttiilissä ei ollut havaittavissa värimuutoksia, toisin kuin ensimmäisessä kokeessa käytetyssä varoventtiilissä. Tulokset viittaavat siten siihen, että koemateriaalien maksimilämpötilat sähkökatkon aikana ovat olleet alle 490°C.

Vuoto ja kokeen lopetus

Nesteen häviäminen sondista havaittiin 21.9., kun palanutta vastusta oltiin vaihtamassa. Jälkeenpäin epäiltiin, että nestettä oli saattanut hävitä jo 18.9., kun pinta tarkastettiin edellisen kerran, mutta sondin pinnan heilumisen takia tästä ei voitu olla varmoja.

Silmämääräisessä tarkastuksessa ei sondissa havaittu vuotopaikkaa. Ilmeinen syy tähän oli, että vuoto oli hyvin pieni, karkeasti arvioiden noin 10 ml/h (laskettu olettaen, että vuoto jatkui kolmen vuorokauden ajan).

Varoventtiilin koestuksen yhteydessä 25.9. todettiin yhdyslinjan helmiliittimessä epätiiveyttä, joka viittaisi siihen, että vuoto on ollut ko. liittimessä. Täyttää varmuutta tästä ei ole, sillä liitin saatiin koestuksessa tiiviiksi vääntämällä liittimen mutterit kiinni epätavallisen suurella voimalla eikä tiedossa ole, miten tiukkaan liittimen mutterit oli kierretty sondissa.

Varoventtiilin koestuksen jälkeen Reijo Hukkasen kanssa käydyissä keskusteluissa todettiin kokeen jatkamiseen liittyvän riskin, että vuoto on jossakin muualla kuin koestetussa liittimessä. Vaarana on, että pinta sondissa laskee tällöin tarkastusten välillä niin alas, että höyrystin paljastuu osittain. Pinnan laskun seurauksena koepalojen lämpötila karkaisi, jolloin tulosten saamiseksi koe pitäisi uusia kokonaan. Projektin tiukan aikataulun takia tähän

ei kuitenkaan olisi mahdollisuuksia, jolloin lopputulos olisi, että kenttäkokeita ei saataisi projektin puitteissa tehtyä kuin 400°C lämpötilassa.

Toisaalta koemateriaaleja oli kokeessa koestettu jo lähes 300 h ajan eli saman verran kuin VTT:n autoklaavikokeissa. Vertailukelpoisia tuloksia oli siten saatavissa, vaikka koe keskeytettäisiinkin. Lisäksi kokeen keskeyttäminen varmistaisi sen, että tulokset olisivat käytettävissä marraskuun alussa pidettävässä loppuseminaarissa. Näillä perusteilla päätettiin, että koetta ei enää jatketa, vaan sondi toimitetaan VTT:lle koemateriaalien esikäsittelyä varten.

Vantaalla 25.9.2006

Timo Karjunen