

Åbo Akademi
Prosessikemian keskus
Piispankatu 8
20500 Turku

Suomen soodakattilayhdistys ry

SOTU II - HANKE

**Soodakattilan savukaasupuolen korroosiokemia korkeilla
höyryarvoilla:
2. Tulistinkorroosion sondikokeet kattiloilla**

Raportti Åbo Akademin tehdasmittauksista v. 2005-2006

Bengt-Johan Skrifvars, Tor Laurén, Linus Silvander ja Mikko Hupa
Åbo Akademi

18.09.2006
Turku

**Soodakattilan savukaasupuolen korroosiokemia korkeilla höyryarvoilla.
2. Tulistinkorroosion sondikokeet kattiloilla**

Bengt-Johan Skrifvars, Tor Laurén, Linus Silvander, Mikko Hupa

SISÄLLYS

Esipuhe

1. Tausta

2. Koejärjestelyt

2.1. Kattilat ja mittauskohdat

2.2. Koelaitteisto

2.3. Pintalämpötilojen säätö ja seuranta

2.3. Korroosion mittaus

2.4. Teräslaadut

3. Tulokset

3.1. Rauma

3.2. Pietarsaari

3.3. Uimaharju

3.4. Vertailut laboratoriomittauksiin

3.5. Vertailut kattiloiden välillä

4. Yhteenveto ja johtopäätöksiä

Esipuhe

Tämä työ on osa Suomen soodakattilyhdistyksen osin Tekesin rahoittamaa projektia Soodakattilan tulevaisuus, SOTU II. SOTU II-projekti suunniteltiin kolmelle vuodelle 2004-2006. Projektin tavoitteena oli selvittää mahdollisuuksia soodakattiloitten höyryarvojen olennaiseen nostamiseen nykytasolta, ja sitä kautta korkeampaan sähköntuotannon rakennusasteeseen kattiloilla

SOTU II -projekti koostui useista eri osatöistä. Tässä raportissa esitellään tulokset kolmessa tehtaassa tehdyistä tulistinkorroosiomittauksista, jotka ovat osa Åbo Akademin osaprojektia ”Soodakattilan savukaasupuolen korroosiokemia korkeilla höyryarvoilla”. Tehdasmittaukset tehtiin ilmajäähdytteisillä korroosiosondeilla, joissa voitiin käyttää eri teräsmateriaaleja ja joihin saatiin hallittu lämpötilagradientti testattavalle teräkselle. Nämä tehdasmittaukset olivat jatkoa Åbo Akademin aikaisemmalle korroosiomittausarjalle, joka tehtiin laboratorioolosuhteissa. Tässä aikaisemmassa laboratoriomittausarjassa yhteensä kuutta eri teräslaatua altistettiin erilaisille alkalisuolaseokselle tulistinlämpötiloja vastaavissa lämpötiloissa 450-600°C. Näissä mittauksissa havaittiin huomattavia eroja korroosionopeudessa ja –mekanismeissa sekä eri suolakoostumusten että eri teräslaatujen välillä.

Tässä raportoitavan tehdasmittauksen tarkoituksena oli tarkistaa, missä määrin samoilla teräksillä tehdyt korroosiomittaukset tehdasolosuhteissa vastaavat laboratoriomittauksen tuloksia.

Tutkimuksesta vastasivat Åbo Akademiassa dosentti Bengt-Johan Skrifvars ja professori Mikko Hupa. Tehdasmittauksen käytännön suorittamisesta vastasi DI Tor Laurén ja terästen analysoinnista FM Linus Silvander.

Soodakattilyhdistyksen puolesta projektia valvoi johtoryhmä, jonka puheenjohtaja oli Keijo Salmenoja, Metsä-Botnia Oy ja koordinaattori Esa Vakkilainen, Jaakko Pöyry Oy.

Kirjoittajat kiittävät kaikkia projektiin osallistuneita erinomaisesta yhteistyöstä ja toivovat että saavutetut tulokset – työn toteutukseen liittyneistä vaikeuksista huolimatta - ainakin osaltaan vastaavat työhön kohdistettuja odotuksia.

1. Tausta

Tämä Åbo Akademiassa tehty työ liittyy Suomen soodakattilayhdistyksen Soodakattilan tulevaisuus –projektiin, SOTU II. Projektin tarkoituksena on eri keinoin selvittää mahdollisuuksia soodakattiloitten sähköntuotannon rakennusasteen nostoon höyryarvoja nykytasolta olennaisesti korottamalla.

Åbo Akademin osatyön suunnitelma oli tehty Suomen soodakattilayhdistykselle toimitetun Åbo Akademin esiselvityksen pohjalta (Hupa, M., Backman, R. ”Soodakattilan korroosioriskit korkeilla höyryarvoilla – Esiselvitys korroosiomekanismeista ja tutkimustarpeista.” Åbo Akademin raportti SKY:lle 15.10.2002).

Åbo Akademin esiselvitys päättyi seuraavaan yleisjohtopäätökseen:

”Tässä selvityksessä tehtiin lyhyt katsaus soodakattiloitten savukaasupuolen korroosiotutkimuksen nykytilanteeseen. Tarkoituksena oli selvittää, mitkä korroosiotyypit ovat kriittisiä ja mihin mahdollista tutkimusta kannattaa suunnata, jos kattilan vesi-höyrykierron arvoja halutaan nostaa olennaisesti nykytasoltaan.

Selvityksen mukaan olennaisimmat tutkimustarpeet liittyvät tulistinkorroosioon. Selvityksessä esitetään, että tutkimusta kannattaa kohdistaa erityisesti kloorin roolin edelleenerittelyyn, sekä vähäklooristen kerrostumien korroosiovaikutuksen kartoittamiseen.

Myös pohjaputkien korroosion jatkotutkimukseen kannattaa panostaa siten, että lähemmin selvitetään pohjaan rikastuvan kerrostuman muodostumista ja sulamisominaisuuksia.

Åbo Akademi on valmis osallistumaan SKY:n projektiin ja tekemään tarkemman ehdotuksen tutkimussuunnitelmasta, jossa selvitetään yllä esitettyjä avoimia korroosion kemian kysymyksiä lähemmin. Olemme myös valmiit varmistamaan pohjoisamerikkalaisen tutkimuksen ja tietämyksen seurannasta projektin puitteissa.”

Esiselvityksen perusteella Åbo Akademi teki yksityiskohtaisemmat suunnitelmat osaprojektiinsa ”Soodakattilan savukaasupuolen korroosiokemia korkeilla höyryarvoilla”, jonka Suomen soodakattilayhdistys tilasi helmikuussa v. 2004.

Åbo Akademin osalta SOTU-projektin työt tehtiin kahdessa vaiheessa. Työn ensimmäinen vaihe valmistui keväällä 2005 ja se on raportoitu Soodakattilayhdistykselle syksyllä 2005 (Hupa, Skrifvars, Silvander: SOTU II – HANKE, Soodakattilan savukaasupuolen korroosiokemia korkeilla höyryarvoilla: 1. Tulistinmateriaalien korroosioaltistuskokeet Raportti Åbo Akademin laboratoriotöistä v. 2004-2005, 31.10 2005). Tässä ensimmäisessä osassa yhteensä kuutta eri teräslaatua altistettiin erilaisille alalisuolaseokselle tulistinlämpötiloja vastaavissa lämpötiloissa 450-600 C. Kokeita varten kehitettiin uusi mittaus- ja analyysisysteemi, jolla saatiin edustava kuva suolakerrostumien aiheuttamasta korroosiosta hallituissa olosuhteissa viikon altistusajalla. Korroosioaltistuksia tehtiin kaikkiaan lähes 300. Näissä mittauksissa havaittiin huomattavia eroja korroosionopeudessa ja myös korroosion mekanismeissa - sekä eri suolakoostumusten että eri teräslaatuojen välillä.

Tässä raportoitavan, työn toisen vaiheen tarkoituksena oli selvittää, missä määrin tehdyt laboratoriokorroosiomittaukset vastaavat tehdasolosuhteissa tapahtuvaa korroosiota.

Kokeet aloitettiin syksyllä 2005 ja ne saatiin valmiiksi loppukevällä 2006. Kokeissa käytettiin mittausten menetelmää, jossa kolme eri teräslaatua altistettiin ilmajäähdytteisillä sondeilla noin 700 tunnin ajan (4 viikkoa) soodakattilan tulistinalueen savukaasuille. Sondin teräspinnan korroosio mitattiin muodostuneen oksidikerroksen paksuutena SEM/EDX analyysillä sondin eri kohdista sekä tulo (wind) että jättöpuolelta (lee). Sondiputken lämpötilaa säädettiin jäähdytysilman avulla haluttuun tasoon. Lämpötilaa seurattiin termoelementtien avulla. Putkeen syntyi pituussuunnassa lämpötilaero, joten samoilla mittauksilla saatiin myös tietoa lämpötilan vaikutuksesta korroosionopeuteen.

Kokeiden tarkoituksena oli:

- selvittää miten hyvin laboratoriokokeiden korroosioaltistukset kuvaavat kattilassa tapahtuvaa korroosiota
- kartoittaa valikoitujen teräslaatujen korroosionsietokykyä soodakattilassa kun teräslämpötilaa nostetaan selvästi yli nykyisten tulistinmateriaalien lämpötilatason

Projektissa tehtiin mittauksia kolmessa eri kattilassa n 700 tunnin ajan, kolmella eri teräslaadulla viidellä eri materialilämpötilalla. Kaikkiaan altistettiin 45 näyteholkkia joista 25stä saatiin korroosiomittaus tehtyä sekä holkin otsapinnasta ("wind side") että jättöpinnasta ("lee side"). Näistä näytteistä saatiin myös holkille kerääntyneitten kerrostumien (wind & lee) kemiallinen koostumus.

2. Koejärjestelyt

2.1. Kattilat ja mittauskohdat

Tehdasmittauskampanjaan Soodakattilayhdistyksen projektijohtoryhmä valitsi mukaan kolmen tehtaan soodakattilat; 1) Metsä-Botniaan Rauman tehtaan soodakattila, 2) Wisaforestin Pietarsaaren tehtaan soodakattila ja 3) UPM Kymmenen Uimaharjun tehtaan soodakattila. Yhtenä valintakriteerinä oli näiden kattiloiden korroosiokokemusten erilaisuus - Raumalla ei ollut havaittu tulistimien korroosiovaurioita, Pietarsaaresta oli raportoitu korroosio-ongelmia, samoin Uimaharjulla oli havaittu jonkin verran kiihtynyttä korroosiota.

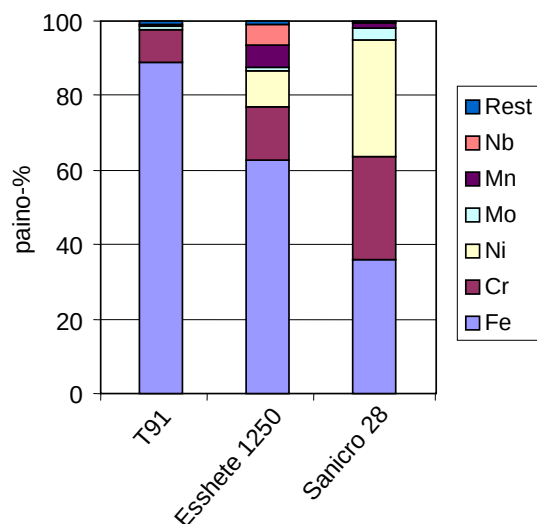
Kaikissa kattiloissa mittauskohdat sijaitsivat etuseinällä, suurinpiirtein nokan korkeudella. Jokaisessa kattilassa käytettiin kolmea sondia. Raumalla kaksi sondia sijoitettiin kattilaan yhden miesluukun kautta ja yksi sondi viereisestä tarkistusluukusta, kattilan etuseinän vasemmassa reunassa. Pietarsaaresta ja Uimaharjulla sondit sijoitettiin kattilaan kolmen etuseinällä sijaitsevan tarkistusluukun kautta.

Rauman mittaus suoritettiin alkusyksyllä 2005, 13.9 – 11.10 välisenä aikana, Pietarsaaren mittaus talvella 2005, 1.12 – 29.12 välisenä aikana ja Uimaharjun mittaus keväällä 2006, 5.4 – 3.5.

2.2. Teräslaadut

Kuudesta laboratorio-olosuhteissa tutkitusta teräslajista kolme valittiin tehdasmittauksiin; ferriittinen T91, sekä austeniittiset Esshete1250 ja Sanicor 28. Taulukko 1 ja kuva 1 esittelevät teräslaatujen koostumukset laskevan rautapitoisuuden mukaisessa järjestyksessä.

Teräs	T91	Esshete 1250 paino-%	Sanicro 28
Fe	87-90	61-70	31-41
Cr	8-9.5	14-16	26-28
Mo	0.85-1.05	0.8-1.25	3-4
Mn	0.3-0.6	5.5-7	0-2.5
Si	0.2-0.5	0.2-1.2	0-1
Ni	0-0.4	9-11	29.5-32.5
V	0.18-0.25	0.15-0.4	
C	0.08-0.12	0.06-0.15	0-0.03
Nb	0.06-0.1	0.75-12.5	
N	0.03-0.07		
Al	0-0.04		
P	0-0.02	0-0.04	0-0.03
S	0-0.01	0-0.03	0-0.03
B		0.003-0.009	



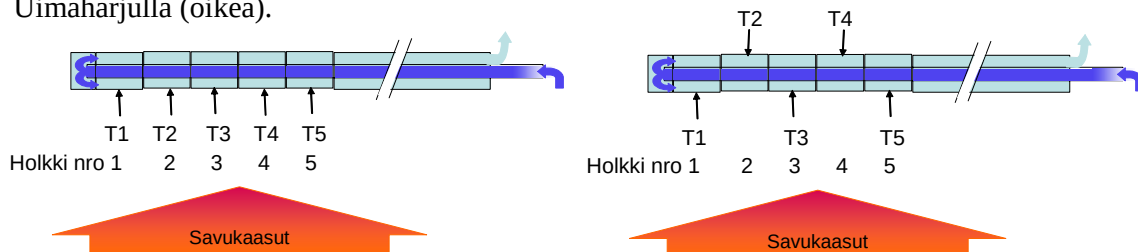
Taulukko 1/Kuva 1. Korroosioaltistuskokeisiin valittujen teräslaatuojen koostumukset laskevan rautapitoisuuden mukaisessa järjestyksessä /Science Direct/.

2.3. Koelaitteisto ja mittausjärjestelyt

Kokeissa käytettiin aiemmin kehitettyä sonditekniikkaa, missä eri teräslaaduista tehtyjä pintalämpötilasäädettävä ilmajäähdytteisiä näyteholkkeja altistetaan soodakattilan savukaasuille valitussa soodakattilan mittauskohdassa. Näytesondiin saadaan kontrolloitu lämpötilagradientti, jota seurataan jatkuvatoimisella monipistemittauksella.

Nyt käytetyissä sondeissa käytettiin viittä näyteholkkia kussakin sondissa. Kaikki näyteholkit olivat samaa terästä samassa sondissa. Sondi johon sijoitettiin T91 teräksestä tehtyt näyteholkit tehtiin kokonaisuudessaan tästä teräksestä. Sondin (ja holkkien) halkaisija oli 63.5 mm ja seinämäpaksuus 5.6 mm. Myös sondi, johon sijoitettiin Esshete1250 teräksestä tehtyt holkit tehtiin kokonaisuudessaan samasta teräksestä. Tämän sondin (ja holkkien) halkaisija oli 38 mm ja seinämäpaksuus 5.6 mm. Sondi johon sijoitettiin Sanicro 28 teräksestä tehtyt holkit tehtiin X10 teräksestä. Holkit olivat compound-putkea jonka halkaisija oli 38 mm ja seinämäpaksuus 6.3 mm. Sanicro 28 teräksen osuus compoundputkessa oli n. 2.5 mm.

Sondien materiaali- ja lämpötilaa mitattiin viidestä eri kohdasta noin 25 cm pituiselta alueelta sondin kärjestä laskettuna. Kahdessa mittausjaksossa (Raumalla ja Pietarsaareissa) kaikki lämpötila-anturit oli suunnattu savukaasuvirtausta vastaan, yhdessä jaksossa (Uimaharjulla) joka toinen anturi oli suunnattu savukaasuvirtauksen mukaan, joka toinen virtausta vastaan. Kuvassa 2 esitetään lämpötilaanturien sijainnit Raumalla ja Pietarsaareissa (vasen) ja Uimaharjulla (oikea).



Kuva 2. Lämpötilaanturien sijainnit Raumalla ja Pietarsaareissa (vas) sekä Uimaharjulla (oikea)

2.4. Pintalämpötilojen säätö ja seuranta

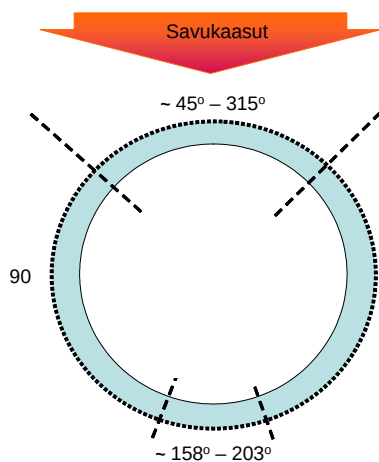
Ensimmäisen mittausjakson aikana (Raumalla) lämpötilaa pyrittiin säätämään kuumimman lämpötila-anturin mukaan. Säätämällä näin, taattiin että aina pysyttiin tarpeeksi korkeissa pintalämpötiloissa. Kokemus kuitenkin osoitti että sondin likaantuessa kylmemmät lämpötilat lähtivät nousuun ja gradientti kapeni. Huomattiin myös että jos savukaasulämpötilat laskivat niin mataliksi että säätävän anturin lämpötilaa ei enää saavutettu, myös jäähdytysilman syöttö katkesi ja tällöin gradientti hävisi kokonaan sondista aiheuttaen kaikkien näteholkkien lämpötilan nousun säätölämpötilaan. Näin kävi Raumalla 27-29.9 välisenä aikana noin 30 tunnin ajan.

Toisessa mittausjaksossa (Pietarsaaressa) lämpötilaa pyrittiin säätämään kylmimmän anturin mukaan. Tällöin vältettiin kylmempien holkkien ylikuumenemista. Tämän mittausjakson aikana kuitenkin yhdessä sondeista (Sanicro 28 sondi) ilmeni säätöongelmia ja gradientti jäi puolen mittausjakson ajaksi liian alhaiseksi.

Kolmannessa mittausjaksossa (Uimaharjulla) päätettiin säätää keskimmäisen anturin mukaan. Tällöin gradientin keskikohta pysyisi aina toivotulla lämpötila-alueella. Gradientti pysyi muutenkin hyvin hallinnassa tämän mittausjakson aikana, paitsi yhdessä kohtaa missä noin 2 tunnin sähkökatkos säätölaitteisiin aiheutti sondien ylikuumenemisen ($T_{\text{pinta}} > 900^{\circ}\text{C}$). Tämä aiheutti kaikkien näteholkkien turmeltumisen.

2.5. Korroosion mittaus

Korroosion mittaus perustui, samoin kuin aiemmin tehdyissä laboratoriokokeissa, teräksen hapettumismittaukseen, eli oksidikerrospaksuusmittaukseen korroosioaltistuksen jälkeen. Näyteholkeista analysoitiin noin 90° sektorin poikkileikkauspinta savukaasuvirtauksen tulopuolelta (wind) sekä noin 45° sektorin alue savukaasuvirtauksen jättöpuolelta (lee). Kuvassa 3 näytetään periaatteellinen kuva analysoiduista sektoreista.



Kuva 3. Näyteholkkien sektorit joista mitattiin poikkileikkauspinnasta oksidikerrospaksuus

Sektorien poikkileikkauspinnoina otettiin SEM-BSE (back-scatter electron) mikroskooppikuvat (20-35 kpl tulopuolelta riippuen holkin halkaisijasta, 14 kpl jättöpuolelta) jotka liitettiin yhteen kuvankäsittelyohjelmalla panoramakuvaksi.

Kuvista identifioitiin korroosiolle altistunut teräsosuus (oksidikerros) ja sen paksuus mitattiin kuva-analysaattorilla noin 1 µm välein. Tuloksissa ilmoitettavat oksidikerroksen paksuusarvot laskettiin lopulta keskiarvona sektorialueilta mitatuista yksittäisistä oksidikerrospaksuusarvoista. Tämän lisäksi laskettiin taas myös paksuusmittausten mediaani sekä jakautuma.

Kaikki keskiarvot on esitetty Liitteessä 1, taulukossa L1.1. Mediaanit, keskiarvot ja maksimisarvot sekä tarkemmat SEM analyysit liitteessä 2 (ainoastaan DVD levy).

Viimeisessä tehdasmittausjaksossa (Uimaharjun mittausjakso) kokeiltiin myös seinämäpaksuusmittausta korroosion mittauksena. Tällöin kaikki holkit tarkkuussorvattiin tiettyyn seinämäpaksuuteen 10 µm tarkkuudella ennen sijoitusta kattilaan. Altistuksen jälkeen hapettumattoman teräksen osuus seinämäpaksuudesta mitattiin SEMin avulla. Seinämäpaksuushäviötä voitiin pitää mittana korroosiosta. Tällainen menettely onnistuu periaatteessa hyvin mutta koska viimeinen tehdasmittausjakso epäonnistui, käyttökelpoisia tuloksia tämältyypisistä mittauksista ei tällä kertaa saatu.

Jokaisesta analysoidusta sektorista suoritettiin myös röntgenmikroanalyysi yhdeltä mikroskoopin kuva-alueelta (yleensä keskimmäisen kuvan alueelta), jolloin saatiin avainalkuaineitten sijainti poikkileikkauspinnan analysoidussa kohdassa. Nämä tulokset on koottu liitteeseen 2. Myös suolakerrostuma tarkasteltujen sektorien päällä analysoitiin. Nämä tulokset on koottu Liitteeseen 1, taulukkoon L1.2.

3. Tulokset

Seuraavassa on esitetty saatujen korroosioaltistusten tulokset pylväsdiagrammeina. Pystyakselinä on muodostuneen korroosiotuotekerroksen paksuus annettuna koko poikkileikkauksen keskiarvona.

Kaikkien kokeitten tarkemmat tulokset on kirjattu liitteeseen 1. Liitteessä 2 on lisäksi esimerkit kunkin terästyypin ja suolan välisen korroosiokerroksen mikroskooppikuvista

3.1. Rauma

Rauman mittaus suoritettiin 13.9 – 11.10.2005 välisenä aikana. Korroosioaltistuksen pituus oli 695.3 h (noin 4 viikkoa). Raumalla sondit sijoitettiin kattilaan etuseinältä vasemmalta puolelta. Kaksi sondia sijoitettiin kattilaan yhden miesluukun kautta, yksi sonni viereisestä tarkistusluukusta. Sondien pintalämpötilat säädettiin sisimmän (kuumimman) lämpötila-anturin mukaan.

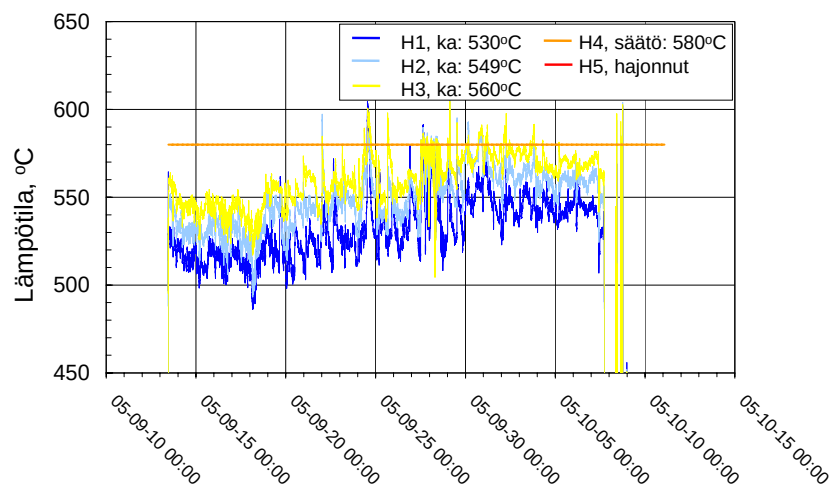
T91-sondi

T91 sondissa säätölämpötila asetettiin 580°C asteeseen. Tässä sondissa kuumin lämpötila-anturi, T5 (kts kuva 2) oli hajonnut joten säätäväksi anturiksi valittiin toiseksi kuumin anturi, T4. Kuva 4 esittää T91 sondin lämpötilat koko mittausajalta sekä jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo mittausjaksolta.

Kuvasta voidaan todeta seuraavat asiat:

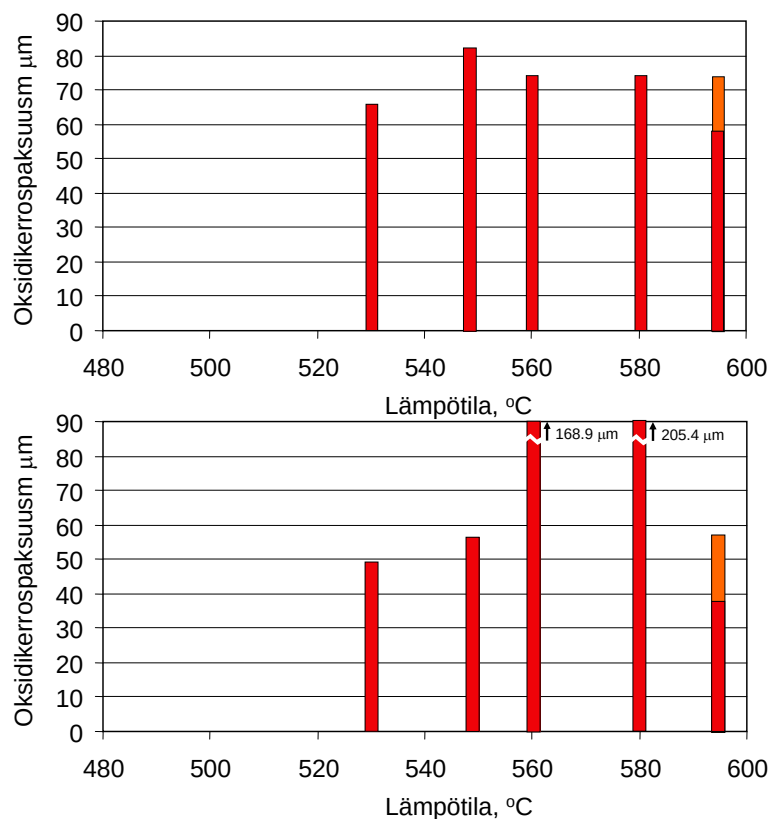
- Lämpötilagradientti kylmimmän ja toiseksi kuumimman holkin välillä on ollut keskimääräisesti n 50-80°C mittausjakson alussa ja n 30-50°C mittausjakson lopussa.

- Gradientti kapeni mittausjakson aikana - luultavasti sondin likaantumisen takia.
- 27.9.05 klo 1945 ja 28.9.05 klo 0620 välisenä aikana (noin 10.5 h) kaikkien holkkien lämpötilat ovat olleet säätölämpötilassa 580°C, kattilan ollessa osittaisella öljytulella.



Kuva 4. T91 sondin lämpötilat koko mittausjakson ajalta sekä jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo mittausjaksolta

Kuva 5 esittää mitatut holkkien oksidikerrospaksuudet. Ylempi kuva esittää tulopuolen oksidikerrospaksuudet, alempi kuva jättöpuolen oksidikerrospaksuudet.



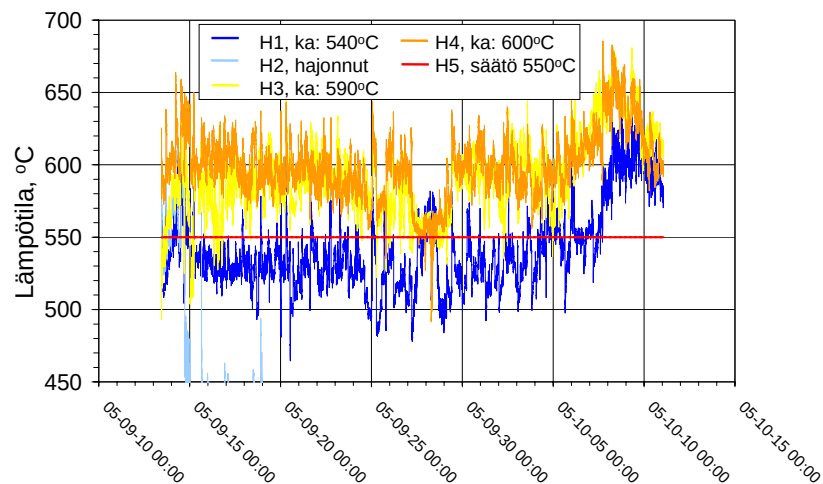
Kuva 5. T91-sondin keskimääräiset oksidikerrospaksuudet tulopuolella (ylempi kuva) ja jättöpuolella (alempi kuva) eri pintalämpötiloissa. Mittausjakso, 695.3 h. Lämpötilat x-akselilla jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo.

Kuvista voidaan havaita seuraavat seikat:

- Oksidikerrospaksuus on merkittävä sekä tulo että jättöpuolella, materiaali oli selvästi korrodoitunut.
- Lämpötilan vaikutus näkyy selvemmin jättöpuolella kuin tulopuolella.
- Kuumimmassa lämpötilassa näyteholkki hilseili jo selvästi. Tämä näkyy Liitteessä 1 esitetyissä poikkileikkauspanoramakuvin kuumimmista holkeista joissa oksidikerros on selvästi irronnut teräspinnasta ja osin hävinnyt.

Esshete1250-sondi

Esshete1250 sondissa säätölämpötila asetettiin 550°C asteeseen. Tässä sondissa kuumin lämpötila-anturi, T5 (kts kuva 2) valittiin säätäväksi anturiksi vaikka se ei näyttänyt kuuminta lämpötilaa. Säättämällä T5 anturin 550°C saatin toivottu lämpötilagradientti aikaan. Kuva 6 esittää Esshete1250 sondin lämpötilat koko mittausajalta sekä jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo mittausjaksolta.

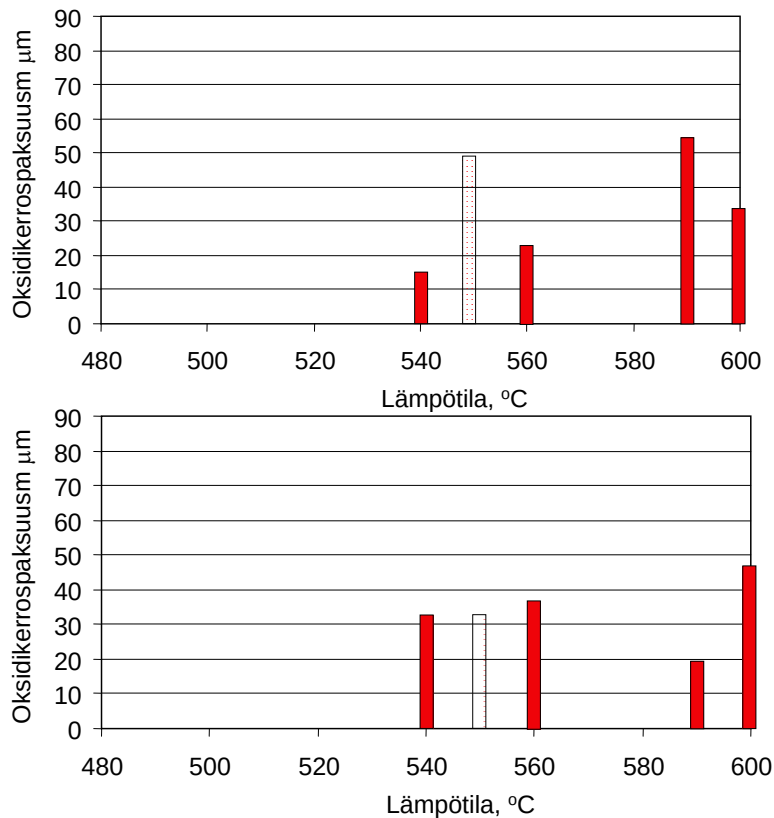


Kuva 6. Esshete1250 sondin lämpötilat koko mittausjakson ajalta sekä jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo mittausjaksolta

Kuvasta voidaan todeta seuraavat asiat:

- Lämpötilagradientti kylmimmän ja toiseksikuumimman holkin välillä on ollut keskimäärin 50-80°C mittausjakson alussa ja 30-50°C mittausjakson lopussa.
- Gradientti kapeni mittausjakson aikana ja lämpötilat nousivat kauttaaltaan mittausjakson loppua kohti. Tämä johtuu todennäköisesti sondin pinnalle kasvaneesta kerrostumasta. Nousu on merkittävä mittausjakson neljän viimeisin päivän aikana.
- Myös tässä sondissa näkyy öljytulijakso 27.9.05 klo 19.45 ja 28.9.05 klo 06.20 välisenä aikana (noin 10.5 h), jolloin kaikkien holkkien lämpötilat ovat olleet säätölämpötilassa 550°C.
- Anturi T5 on selvästi näyttänyt virheellistä lämpötilaa ja holkin todellinen lämpötila on luultavasti ollut selvästi korkeampi kuin 550°C, luultavasti yli 600°C, sillä anturi T4 on jo näyttänyt keskimäärin noin 600°C.

Kuva 7 esittää oksidikerrospaksuudet. Ylempi kuva esittää tulopuolen oksidikerrospaksuudet, alempi kuva jättöpuolen oksidikerrospaksuudet.



Kuva 7. Esshete1250-sondin keskimääräiset oksidikerrospaksuudet tulopuolella (ylempi kuva) ja jättöpuolella (alempi kuva) eri pintalämpötiloissa. Mittausjakso, 695.3 h. Lämpötilat x-akselilla jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo. 550°C asteeseen holkki näytetty himmennettynä sillä tämän holkin lämpötila on epävarma (luultavasti ollut >600°C)

Kuvista voidaan havaita seuraavat seikat:

- Oksidikerrospaksuus on selvästi alempi sekä tulo että jättöpuolella verrattuna T91 teräksen oksidikerrospaksuuksiin.
- Lämpötilan vaikutus näkyy selvästi tulopuolella, heikommin jättöpuolella, jos oletetaan että holkki 5, jonka lämpötila-anturi näytti keskimäärin 550°C, näytti liian alhaista lämpötilaa.

Sanicro28-sondi

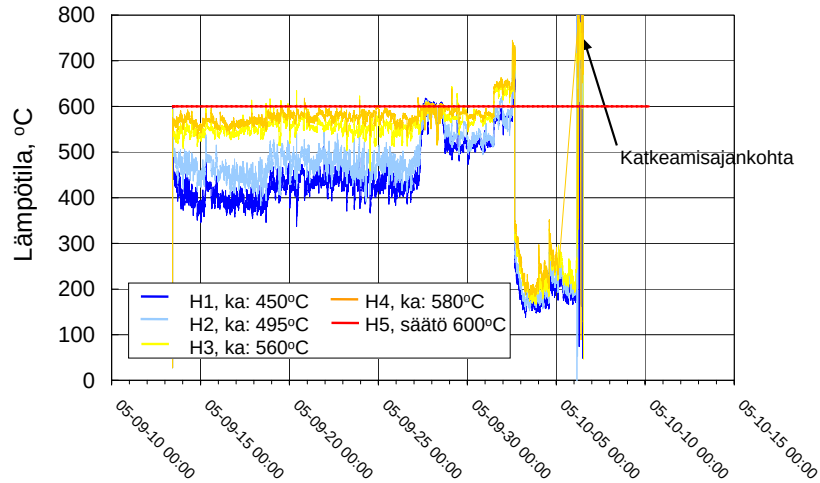
Sanicro28 sondissa säätölämpötila asetettiin 600°C asteeseen. Kuva 8 esittää Sanicro28 sondin lämpötilat mittausajalta sekä jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo mittausjaksolta.

Kuvasta voidaan todeta seuraavat asiat:

- Tässä sondissa lämpötilagradientti kylmimmän ja kuumimman holkin välillä on ollut alussa jopa n 150°C mittausjakson alussa ja kapeutunut n 30-50°C asteeseen mittausjakson lopussa.
- Myös tässä sondissa näkyy öljytulijakso 27.9.05 klo 1945 ja 28.9.05 klo 0620 välisenä aikana (noin 10.5 h) jolloin kaikkien holkkien lämpötilat ovat olleet säätölämpötilassa 600°C.
- Gradientti kapeni mittausjakson aikana ja kylmempien holkkien lämpötilat nousivat mittausjakson loppua kohti sondin likaantumisen takia. Nousu on tapahtunut

askelettain kolmessa jaksossa ja on ollut merkittävä öljytulijakson jälkeen jolloin gradientin alin lämpötila on jäänyt yli 500°C asteeseen.

- 02.10.05 klo 15.59 sondi on saanut iskun ja lämpötilaanturit ovat vioittuneet, jonka jälkeen ne ovat ruvenneet näyttämään alhaisia lämpötiloja kauttaaltaan. Tässä vaiheessa sondi luultavasti on vaurioitunut.
- 06.10.05 klo 11.41 lämpötila-anturit ovat kauttaaltaan ruvenneet näyttämään yli 1000°C. Tässä vaiheessa sondi luultavasti katkesi.



Kuva 8. Sanicro28-sondin lämpötilat mittausjakson ajalta sekä jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo mittausjaksolta. Sondin oletettu katkeamisajankohta osoitettu kuvassa.

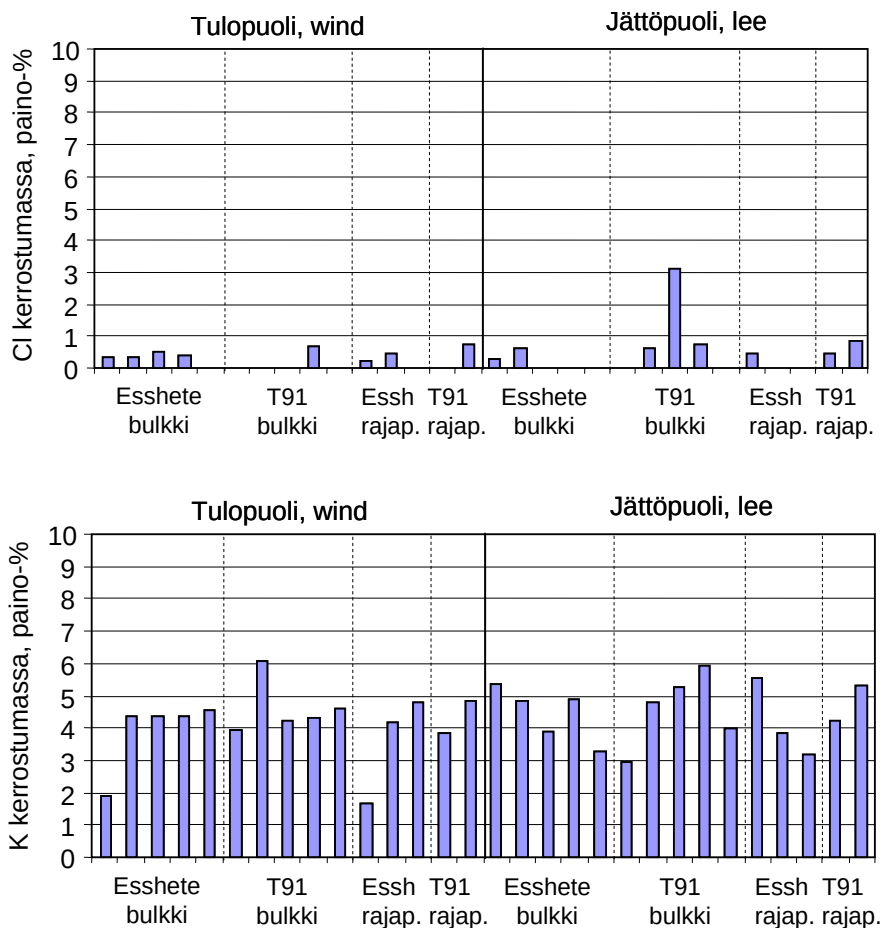
Kuvassa 9 näkyy katkennut Sanicro28 sondi. Kuva vahvistaa käsityksen siitä että sondi on vaurioitunut iskusta, luultavasti irronneesta kerrostumasta, ja sen jälkeen näyteholkit ovat irronneet sondista ja tippuneet kattilan kehoon.



Kuva 9. Sanicro28-sondi mittausjakson jälkeen

Sondikerrostumat

Sondeille kerääntynyt suolakerrostuma analysoitiin myös sekä tulo- että jättopuolelta. Molemmilta puolilta otettiin lisäksi erikseen analyysi sekä bulkkikerrostumasta että teräspinnan lähettyviltä. Kuvassa 10 on esitetty Rauman mittauksesta kerättyjen kerrostumien kaikki kloori sekä kalium analyysit.



Kuva 10. Rauman mittauksesta kerättyjen kerrostumien kloori (ylempi kuva) sekä kalium (alempi kuva) analyysit. Tulopuoli ja jättopuoli eikseen analysoitu eri sondeilta.

Ylemmästä kuvasta (Cl-pitoisuus kerrostumissa) nähdään että klooripitoisuudet kauttaaltaan ovat matalia Raumalla. Ainoastaan yhdessä kerrostumassa on analysoitu yli 1 paino-% Cl-pitoisuus. Muut ovat kaikki alle 1 paino-%. Mitään selvää rikastumista teräspintaa kohti ei tunnu löytyvän Rauman mittauksista, ei myöskään suuria eroja tulo- ja jättopuolen kerrostumien välillä.

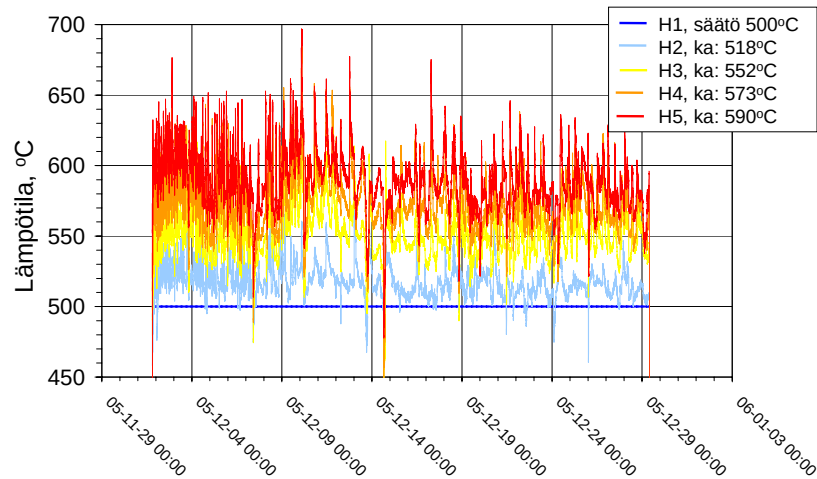
Alempi kuva osoittaa että kalium pitoisuus on luokkaa 4 – 5 paino-% kerrostumissa.

3.2. Pietarsaari

Pietarsaaren mittaus suoritettiin 1.12 – 29.11.2005 välisenä aikana. Korroosioaltistuksen pituus oli 662 h (noin 4 viikkoa). Pietarsaassa sondit sijoitettiin kattilaan etuseinältä kolmesta eri kohtaa samalta tasolta. Sondien pintalämpötilat säädettiin uloimman (kylmimmän) lämpötila-anturin mukaan.

T91-sondi

T91 sondissa säätölämpötila asetettiin 500°C asteeseen. Kuva 11 esittää T91 sondin lämpötilat koko mittausajalta sekä jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo mittausjaksolta.



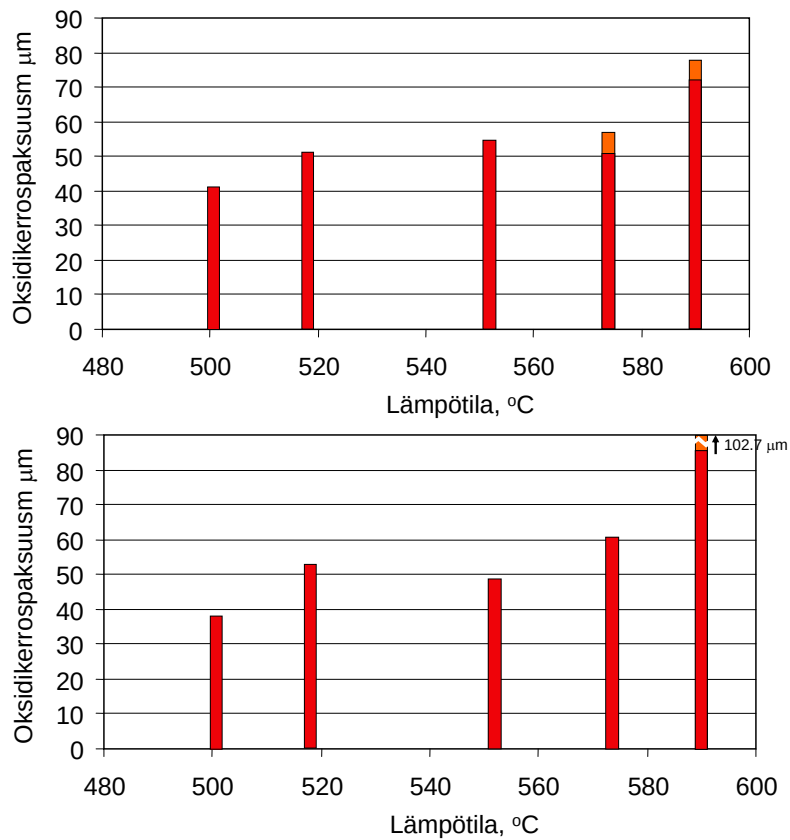
Kuva 11. T91 sondin lämpötilat koko mittausjakson ajalta sekä jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo mittausjaksolta

Kuvasta voidaan todeta seuraavat asiat:

- Lämpötilagradientti kylmimmän ja kuumimman holkin välillä on ollut keskimääräisesti n 80-150°C mittausjakson alussa ja n 50-100°C mittausjakson lopussa.
- Gradientti kapeni mittausjakson aikana luultavasti sondin likaantumisen takia.

Kuva 12 esittää oksidikerrospaksuudet. Ylempi kuva esittää tulopuolen oksidikerrospaksuudet, alempi kuva jättöpuolen oksidikerrospaksuudet. Kuvista voidaan havaita seuraavat seikat:

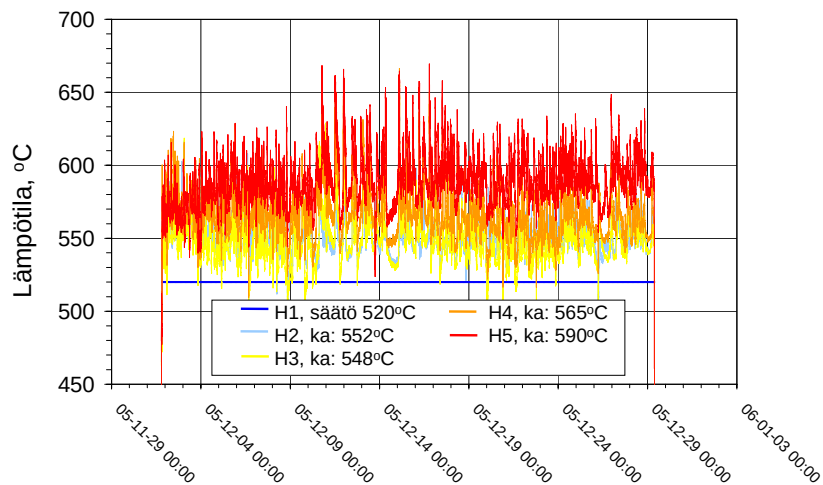
- Oksidikerrospaksuus on merkittävä sekä tulo että jättöpuolella viittaen selvään korroosioon.
- Lämpötilan vaikutus näkyy selvästi sekä tulo- että jättöpuolella.
- Kuumimmassa lämpötilassa näyteholkit taas hilseilivät selvästi. Tämä näkyy Liitteessä 1 esitetyissä poikkileikkauspanoramakuvin kuumimmista holkeista joissa oksidikerros on selvästi irronnut teräspinnasta ja hävinnyt.
- Kuvassa 12 kuumimpien näyteholkkien kohdalla hilseilyn vaikutusta oksidikerrosmittaukseen on otettu huomioon siten että ne alueet missä oksidikerros selvästi on irronnut ja hävinnyt on laskettu pois oksidikerros keskiarvolaskusta. Korjattu arvo näytetään kuvassa vaaleampana pylväikköinä



Kuva 12. T91-sondin keskimääräiset oksidikerrospaksuudet tulopuolella (ylempi kuva) ja jättöpuolella (alempi kuva) eri pintalämpötiloissa. Mittausjakso, 662 h. Lämpötilat x-akselilla jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo. Hilseilystä johtunut korjattu oksidikerroksen keskiarvopaksuus näytetty kuvassa vaaleampana pylväikkönä

Esshete1250-sondi

Esshete1250 sondissa säätölämpötila asetettiin 520°C asteeseen. Kuva 13 esittää Esshete1250 sondin lämpötilat koko mittausajalta sekä jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo mittausjaksolta.

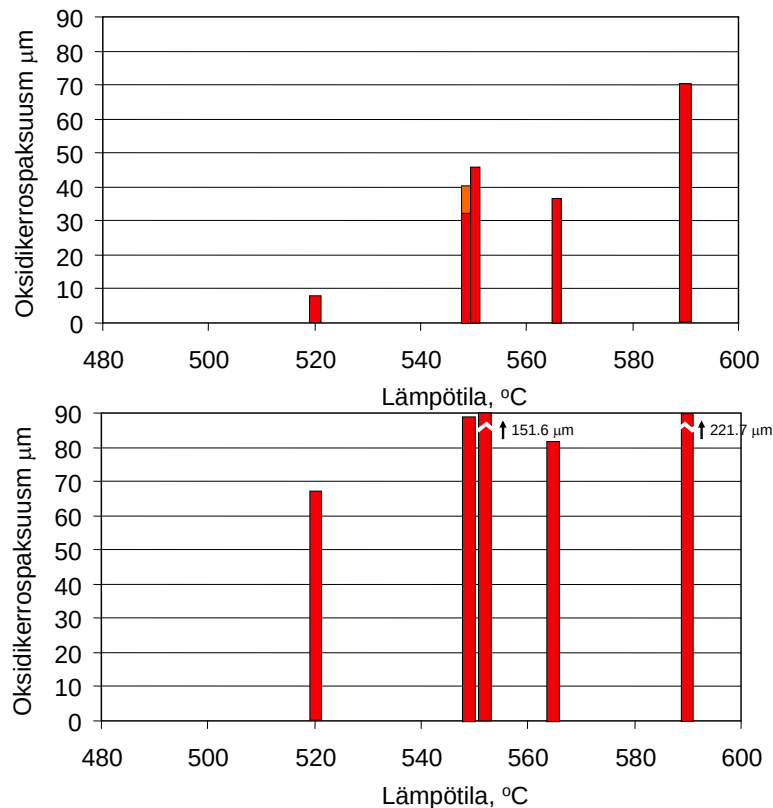


Kuva 13. Esshete1250-sondin lämpötilat koko mittausjakson ajalta sekä jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo mittausjaksolta

Kuvasta voidaan todeta seuraavat asiat:

- Lämpötilagradientti kylmimmän ja kuumimman holkin välillä on ollut 40-80°C koko mittausjakson aikana.
- Gradientti on pysynyt suurinpiirtein samanlaisena läpi koko mittausjaksion, joskin jonkinlaista aaltoilua on havaittavissa.

Kuva 14 esittää oksidikerrospaksuudet. Ylempi kuva esittää tulopuolen oksidikerrospaksuudet, alempi kuva jättöpuolen oksidikerrospaksuudet.



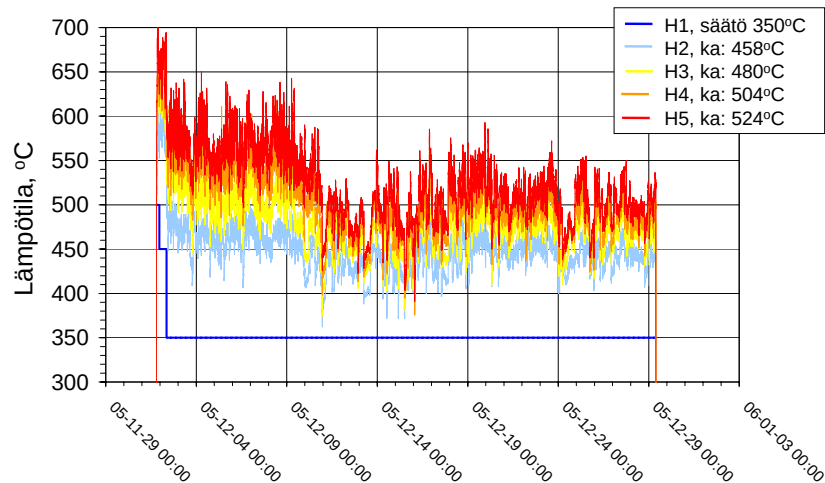
Kuva 14. Esshete1250-sondin keskimääräiset oksidikerrospaksuudet tulopuolella (ylempi kuva) ja jättöpuolella (alempi kuva) eri pintalämpötiloissa. Mittausjakso, 662 h. Lämpötilat x-akselilla jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo.

Kuvista voidaan havaita seuraavat seikat:

- Oksidikerrospaksuus on merkittävä sekä tulo että jättöpuolella mikä viittaa selvään korroosioon.
- Lämpötilan vaikutus näkyy selvästi tulopuolella, heikommin jättöpuolella.

Sanicro28-sondi

Sanicro28 sondissa säätölämpötila asetettiin kylmimmän anturin mukaan ensin 500°C asteeseen, mutta laskettiin 450°C asteeseen heti ensimmäisten tuntien aikana ja vielä 350°C asteeseen ensimmäisen mittauspäivän lopulla jotta kuumimman näyteholkin lämpötila ei nousisi yli 600°C. Kuva 15 esittää Sanicro28 sondin lämpötilat mittausajalta sekä jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo mittausjaksolta.



Kuva 15. Sanicro28-sondin lämpötilat mittausjakson ajalta sekä jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo mittausjaksolta.

Kuvasta voidaan todeta seuraavat asiat:

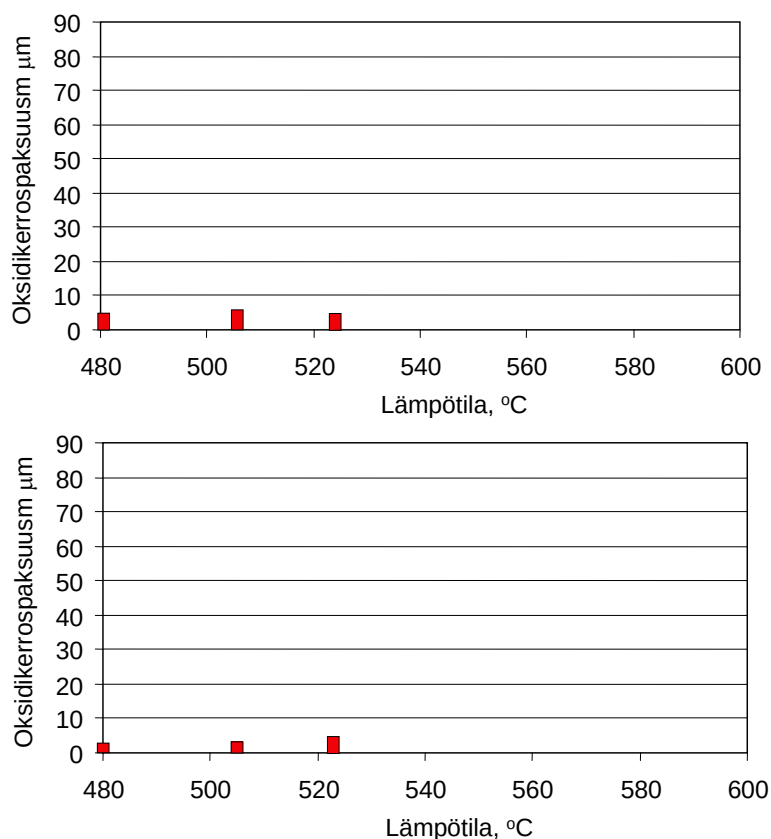
- Tässä sondissa lämpötilagradientti kylmimmän ja kuumimman holkin välillä on mittausjakson alussa ollut jopa n 250°C ja kuumimman holkin lämpötila hetkellisesti jopa 700°C.
- Kahdeksan mittauspäivän jälkeen (10.12.06) gradientti on kaventunut samalla kun lämpötilat yleisesti ovat laskeneet. 9 mittauspäivän jälkeen gradientti on ollut enää n 150°C astetta ja kuumin lämpötila-anturi näyttänyt keskimäärin vain vajaata 500°C astetta.
- Mittausjakson puolivälin jälkeen lämpötilat ovat taas nousseet jonkinverran ja kuumin holkki on tällöin ollut jakson loppuun saakka noin 500°C asteessa. Gradientti on pysynyt noin 150°C asteessa.

Kuva 16 esittää oksidikerrospaksuudet. Ylempi kuva esittää tulopuolen oksidikerrospaksuudet, alempi kuva jättöpuolen oksidikerrospaksuudet.

Kuvista voidaan havaita seuraavat seikat:

- Oksidikerrospaksuus on erittäin pieni sekä tulo että jättöpuolella myös korkeimmissa lämpötiloissa (520°C).
- Lämpötilan vaikutusta ei juuri voida havaita näistä mittauksista

Kuvien ulkopuolelta voidaan todeta että myös ne näyteholkit jotka olivat kylmemmässä lämpötilassa kuin 480°C, oksidikerrospaksuus oli keskimäärin vain muutama mikrometri.

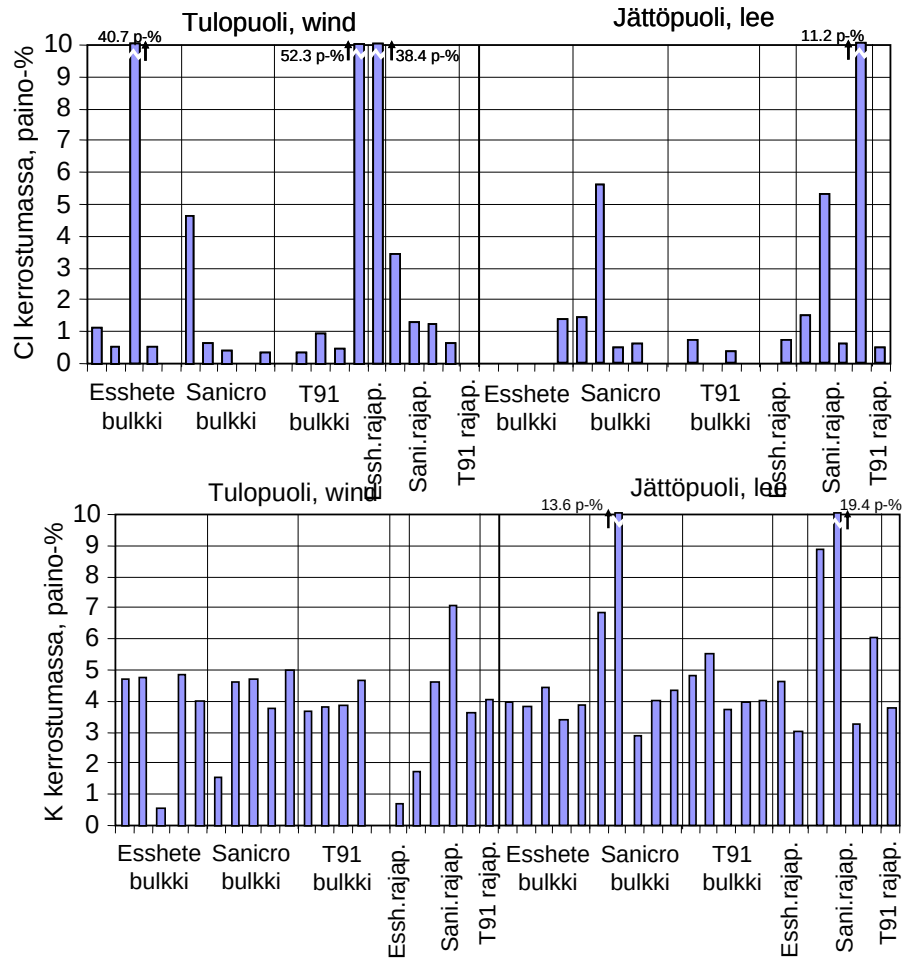


Kuva 16. Sanicro28-sondinkolmen kuumimman näyteholkin keskimääräiset oksidikerrospaksuudet tulopuolella (ylempi kuva) ja jättöpuolella (alempi kuva) eri pintalämpötiloissa. Mittausjakso, 662 h. Lämpötilat x-akselilla jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo.

Sondikerrostumat

Sondeille kerääntynyt suolakerrostuma analysoitiin myös Pietarsaaren näytteistä sekä tulo että jättöpuolelta. Molemmilta puolilta otettiin myös erikseen analyysi sekä bulkkikerrostumasta että teräspinnan lähettyviltä. Kuvassa 17 on esitetty Pietarsaaren mittauksesta kerättyjen kerrostumien kaikki kloori sekä kalium analyysit.

Klooripitoisuus sondikerrostumissa on monin paikoin huomattava sekä tulo- että jättöpuolella. Teräksen ja kerrostuman rajapinnassa analysoitiin suuria klooripitoisuuksia kolmessa näytteessä. Näissä näytteissä rajakerroksessa oli puhdasta alkalikloridia. Tämä poikkeaa Raumalla mitatuista vastaavista klooripitoisuuksista. Pietarsaassa klooripitoisuudet olivat selvästi korkeammat. Kaliumilla vastaavaa trendiä ei löytynyt. Kaliumpitoisuudet Raumalla ja Pietarsaassa olivat suurinpiirtein yhtä korkeita, noin 4-5 paino-% kerrostumassa.



Kuva 17. Pietarsaaren mittauksesta kerättyjen kerrostumien kloori (ylempi kuva) sekä kalium (alempi kuva) analyysit. Tulopuoli ja jättöpuoli eikseen analysoitu eri sondeilta.

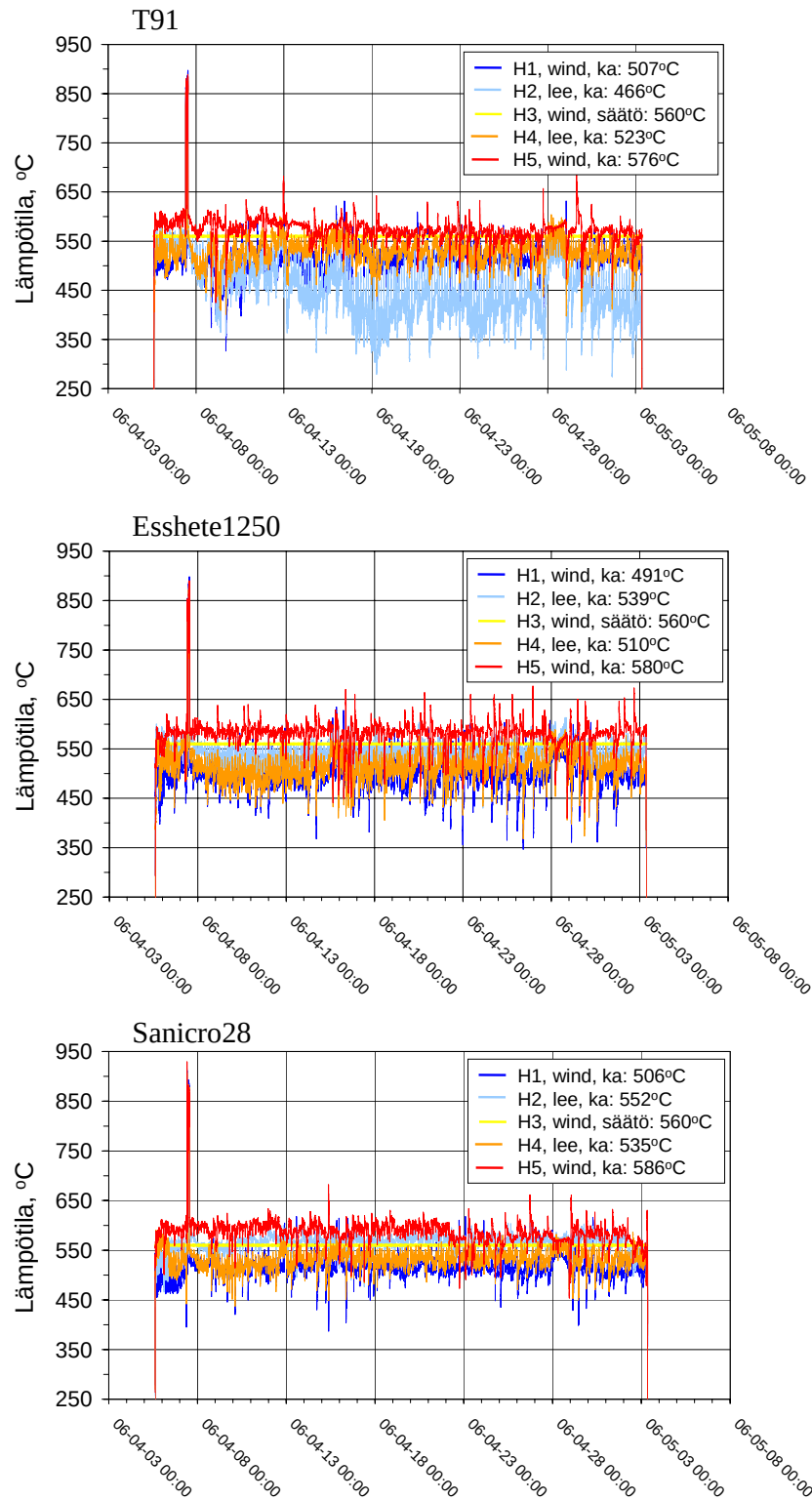
3.3. Uimaharju

Uimaharjun mittaus suoritettiin 5.4 – 3.5.2006 välisenä aikana. Korroosioaltistuksen pituus oli 714 h (runsas 4 viikkoa). Myös Uimaharjulla sondit sijoitettiin kattilaan etuseinältä kolmesta eri kohtaa samalta tasolta. Sondien pintalämpötilat säädettiin keskimmäisen (kylmimmän) lämpötila-anturin mukaan. Kuumin ja kylmin anturi sekä säätävä keskimmäinen anturi käännettiin savukaasun tulosuuntaan. Toiseksikylmin sekä toiseksikuumin anturi käännettiin sondin jättöpuolelle (kts Kuva 2).

Kuva 18 esittää kaikkien kolmen sondin lämpötilat mittausajalta sekä jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo mittausajaksolta. Ylin kuva esittää T91 sondin lämpötilat, keskimmäinen kuva, Esshete1250 sondin lämpötilat sekä alin kuva Sanicro28 sondin lämpötilat.

Kuvasta voidaan todeta että kaikki sondit ovat käyneet yli 900°C asteessa 7.4.2006 kahteen otteeseen; klo 0943 – 1025 välisenä aikana sekä klo 1105 – 1305 välisenä aikana. Tämä ylikuumeneminen on johtunut sähkökatkoksesta. Virta säätöventtiileihin on ollut poiskytketty samanaikaisesti kaikista säätöyksiköistä jolloin jäähdytysilmaa säätävät ilmaventtiilit ovat

sulkeutuneet, aiheuttaen sondien välittömän ylikuumenemisen. Korroosiotarkastelua ajatellen näyteholkit ovat tällöin turmeltuneet.



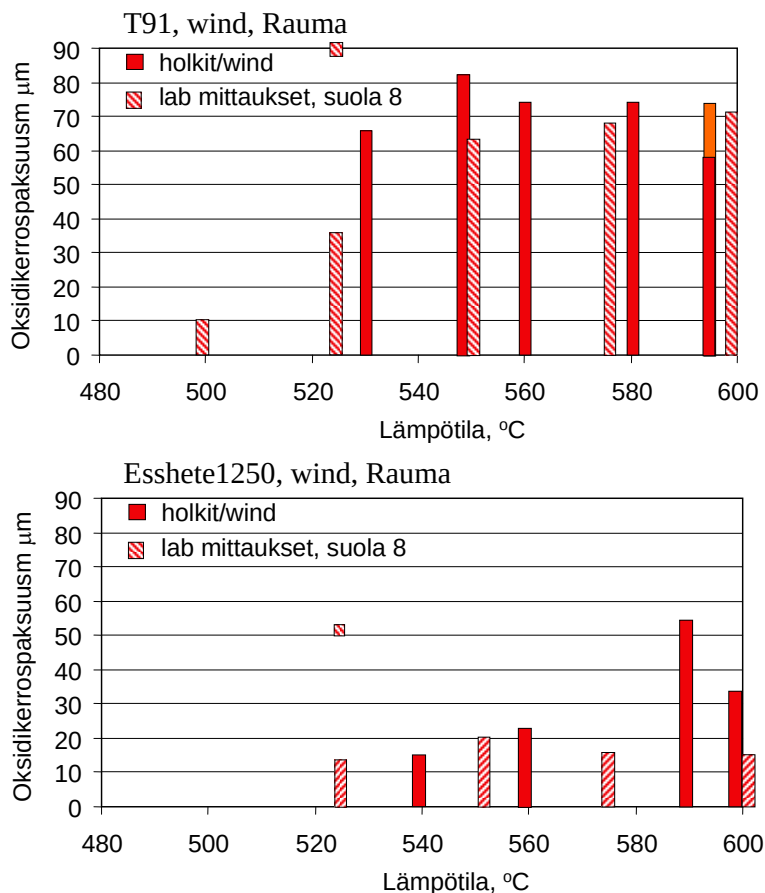
Kuva 18. Kaikkien sondien lämpötilat mittausjakson ajalta sekä jokaisen anturin kohdalta laskettu lämpötilakeskiarvo mittausjaksolta. Ylin: T91. Keskimmäinen: Esshete 1250. Alin: Sanicro28

3.4. Vertailut laboratoriomittauksiin

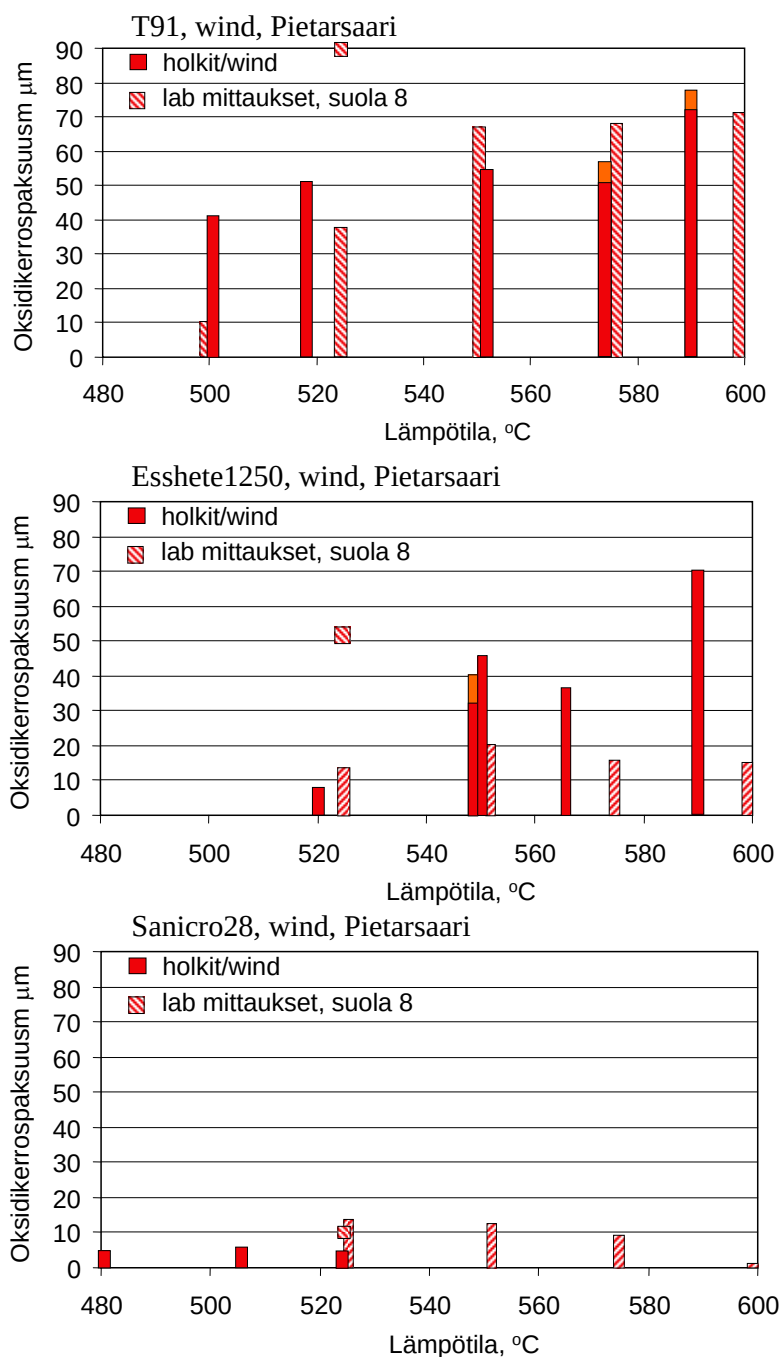
Kuvissa 19-22 on vertailtu Raumalla ja Pietarsaassa kattilamittauksissa saavutettuja oksidikerrospaksuuksia laboratoriomittauksiin.

Kuvissa 19 ja 20 on vertailtu Rauman (kuva 19) ja Pietarsaaren (kuva 20) kattilassa altistettujen T91, Esshete1250 sekä Sanicro28 terästen näyteholkkien tulopuolten oksidikerrospaksuuksia (kuvien yksiväriset pylväät) laboratorio-olosuhteissa suolan 8 (0.2 paino-% Cl, 10 paino-% K) kanssa altistettujen vastaavien terästen oksidikerrospaksuuksiin sekä viikon (kuvien raidalliset pylväät) että 4n viikon (kuvien raidallinen neliö) altistuksen jälkeen.

Kuvista havaitsee että kattilamittauksissa saavutetut oksidikerrospaksuudet vastaavat kohtalaisen hyvin laboratoriomittauksia suolalla 8.



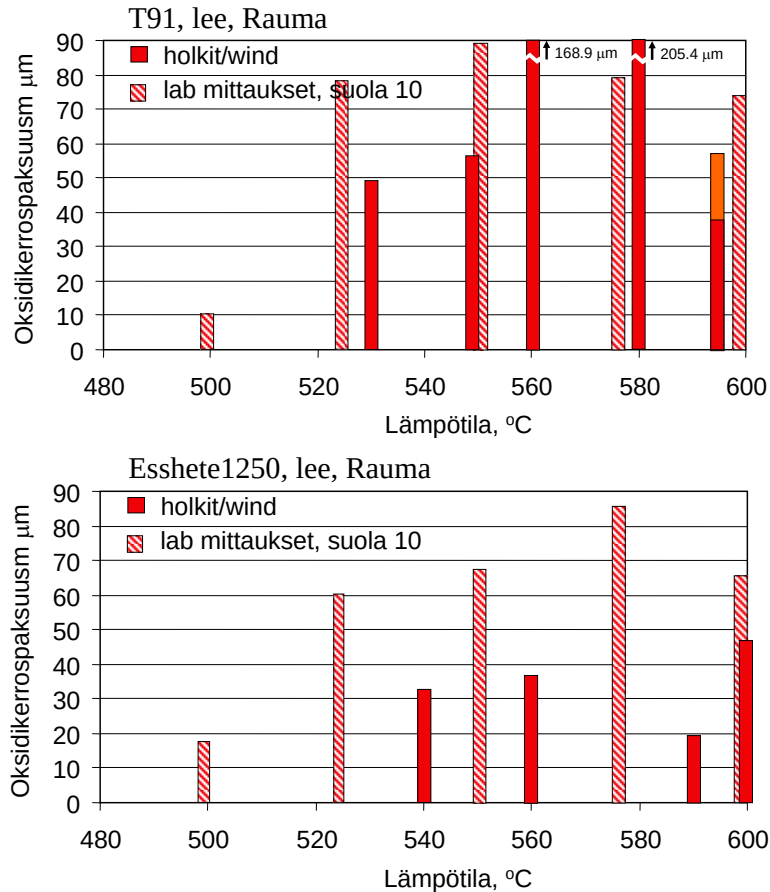
Kuva 19. Rauman mittausten T91 (ylempi kuva) sekä Esshete1250 (alempi kuva) terästen näyteholkkien tulopuolen oksidikerrospaksuuksia (kuvien yksiväriset pylväät) verrattu laboratorio-olosuhteissa suolan 8 (0.2 paino-% Cl, 10 paino-% K) kanssa altistettujen vastaavien terästen oksidikerrospaksuuksiin sekä viikon (kuvien raidalliset pylväät) että 4n viikon (kuvien raidallinen neliö) altistuksen jälkeen. Sanicro 28 teräksestä ei saatu Raumalla näytettä sondin rikkoutumisen takia.



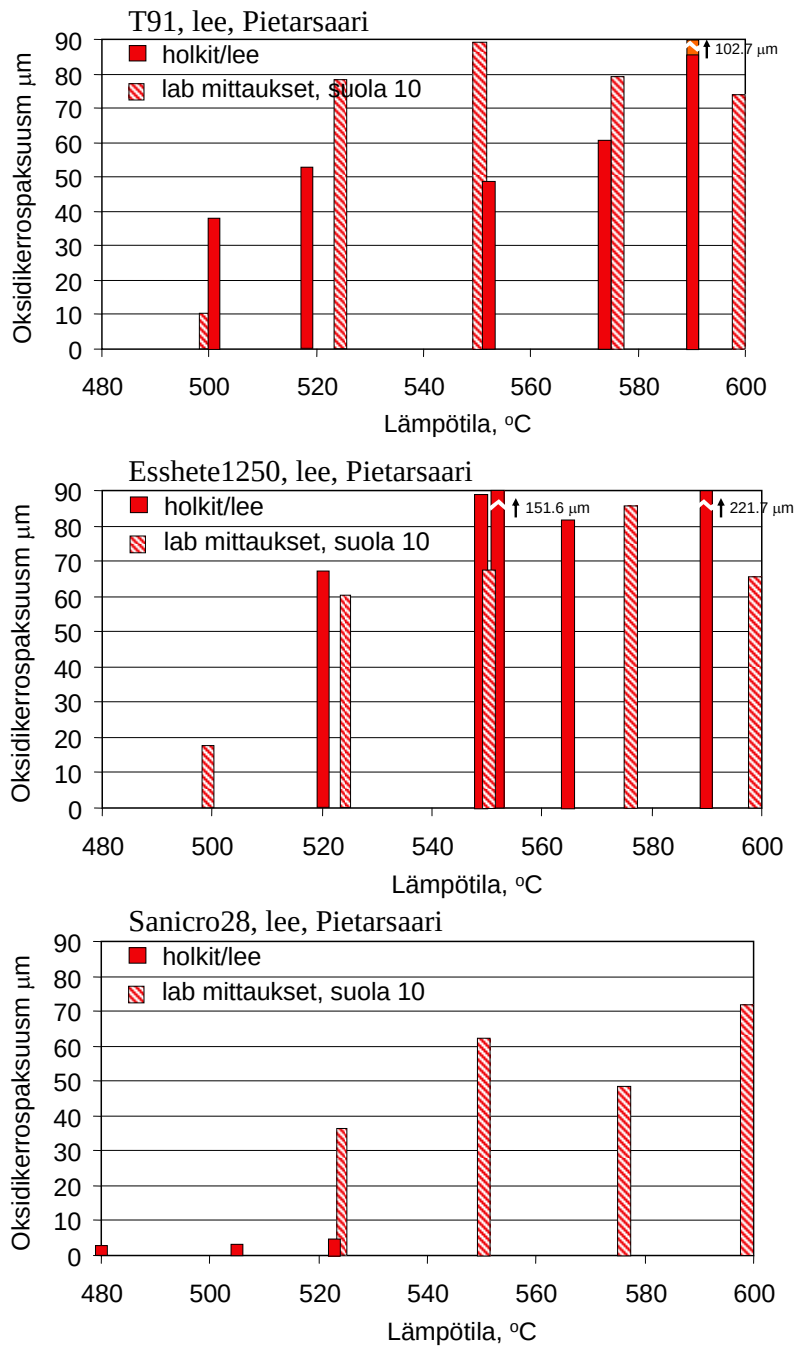
Kuva 20. Pietarsaaren mittausten T91 (ylempi kuva), Esshete1250 (keskimmäinen kuva) sekä Sanicro28 (alempi kuva) terästen näyteholkkien tulopuolten oksidikerrospaksuuksia (kuvien yksiväriset pylväät) verrattu laboratorio-olosuhteissa suolan 8 (0.2 paino-% Cl, 10 paino-% K) kanssa altistettujen vastaavien terästen oksidikerrospaksuuksiin sekä viikon (kuvien raidalliset pylväät) että 4n viikon (kuvien raidallinen neliö) altistuksen jälkeen.

Kuvissa 21 ja 22 on vertailtu Rauman (kuva 21) ja Pietarsaaren (kuva 22) kattilassa altistettujen T91, Esshete1250 sekä Sanicro28 terästen näyteholkkien jättöpuolten oksidikerrospaksuuksia (kuvien yksiväriset pylväät) laboratorio-olosuhteissa suolan 10 (1.2 paino-% Cl, 10 paino-% K) kanssa altistettujen vastaavien terästen oksidikerrospaksuuksiin sekä viikon (kuvien raidalliset pylväät) että 4n viikon (kuvien raidallinen neliö) altistuksen jälkeen.

Myös nämä kuvat osoittavat että kattilamittauksissa saavutetut oksidikerrospaksuudet vastaavat kohtalaisen hyvin laboratoriomittauksia.



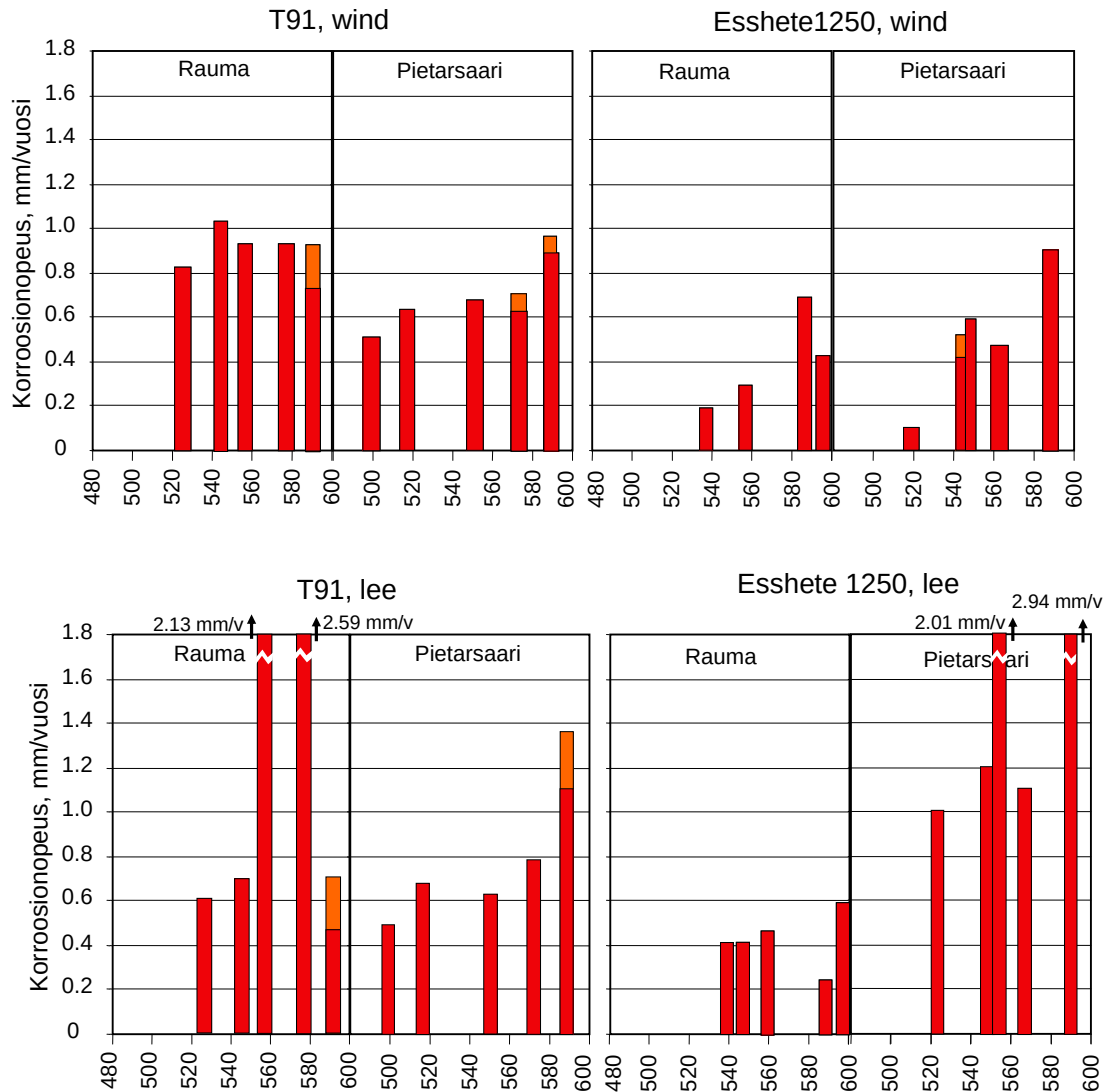
Kuva 21. Rauman mittausten T91 (ylempi kuva) sekä Esshete1250 (alempi kuva) terästen näyteholkkien jättöpuolen oksidikerrospaksuuksia (kuvien yksiväriset pylväät) verrattu laboratorio-olosuhteissa suolan 10 (1.2 paino-% Cl, 10 paino-% K) kanssa altistettujen vastaavien terästen oksidikerros-paksuuksiin sekä viikon (kuvien raidalliset pylväät) että 4n viikon (kuvien raidallinen neliö) altistuksen jälkeen. Sanicro 28 teräksestä ei saatu Raumalla näytettä sondin rikkoutumisen takia.



Kuva 22. Pietarsaaren mittausten T91 (ylempi kuva), Esshete1250 (keskimmäinen kuva) sekä Sanicro28 (alempi kuva) terästen näyteholkkien jättöpuolten oksidikerrospaksuuksia (kuvien yksiväriset pylvää) verrattu laboratorio-olosuhteissa suolan 10 (1.2 paino-% Cl, 10 paino-% K) kanssa altistettujen vastaavien terästen oksidikerrospaksuuksiin sekä viikon (kuvien raidalliset pylvää) että 4n viikon (kuvien raidallinen neliö) altistuksen jälkeen.

3.5. Vertailut kattiloiden välillä

Kuvassa 23 on vertailtu Raumalla ja Pietarsaareissa kattilamittauksissa saavutettuja oksidikerrospaksuuksia keskenään. Kuvan y-akseli on ilmoitettu korroosionopeutena, mm/vuosi, laskettu kattilamittausten tulosten perusteella, käyttäen kattilamittausjaksojen pituudet ja olettaen 8760 h/vuosi.



Kuva 23. Vertaus Rauman ja Pietarsaaren kattilamittauksissa saavutettuja korroosionopeuksien välillä. Rauman mittausjakson pituus 695 h ,Pietarsaaren mittausjakson pituus 662 h, 8760 h/vuosi.

Selviä yksiselitteisiä eroja kattiloiden välillä ei näy. Sen sijaan tulo ja jättöpuolen korroosionopeuksissa voi havaita ero. Jättöpuolen nopeudet ovat useimmissa tapauksissa korkeampia kuin tulopuolen korroosionopeudet. Korroosionopeuksia tarkastellessa kannattaa muistaa että näin mitattu korroosionopeus ei ota huomioon oksidikerroksen hilseilyä, jota varmuudella voitiin todeta tapahtuvan T91-teräksen holkeissa.

4. Yhteenveto ja johtopäätöksiä

Työssä tehtiin sondikokeita kolmen eri teräslaadun korroosiokäyttäytymisestä soodakattilan savukaasukanavassa. Tarkoituksena oli selvittää, missä määrin aikaisemmin tehtyjen laajojen laboratoriokokeitten tulokset vastaisivat tehdasolosuhteissa tapahtuvaa korroosiota.

Sondimittaukset tehtiin kolmella soodakattilalla: Raumalla, Pietarsaareissa ja Uimaharjulla. Sondeissa testattiin kolmea teräslatua: T91, Esshete 1250 ja Sanicro 28.

Kokeiden toteutukseen liittyi ongelmia, minkä vuoksi vain osasta näytteitä saatiin käyttökelpoisia korroosiomittauksia. Korroosiosondien pintalämpötilan säätö ei täysin onnistunut antamaan haluttua lämpötilaeroa sondin eri kohdille. Lämpötilagradientti muuttui sondien likaantumisen myötä. Uimaharjun koejaksoon liittyi onneton sähkökatkos, joka sotki sondien lämpötilasäädön. Näin Uimaharjun sondinäytteet epäonnistuivat kokonaisuudessaan.

Saadut tulokset olivat kuitenkin mielenkiintoisia ja ne antoivat olennaista lisätietoa aikaisempien laboratoriomittausten tulkintaan.

Yleisesti ottaen kattilaolosuhteissa ilmajäähdytetyillä sondeilla mitatut korroosionopeudet vastasivat yllättävänkin hyvin laboratorio-olosuhteissa saatuja mittaustuloksia. Oksidikerroksen paksuus neljän viikon jälkeen oli sekä ferriittisellä teräksellä T91 että austeniittisellä teräksellä Esshete 1250 varsin sama kuin vastaavissa lämpötiloissa laboratoriomittauksissa, joissa samoja teräksiä altistettiin natriumsulfaattisuolakorroosumalle jossa oli pienet määrät klooria ja kaliumia (suolaseos 8 tai 10).

Lisäksi huomattiin, että Rauman ja Pietarsaaren kattiloissa korroosionopeudet asettuivat pääosin samalle tasolle kummallakin teräslaadulla. Kattiloitten savukaasukanavan korroosioolosuhteet olivat siis mittausajanjaksolla varsin samankaltaiset. Pietarsaaren sondikerrostumissa klooripitoisuus oli jonkin verran korkeampi kuin Raumalla. Tämä ero ei kuitenkaan ollut riittävän iso näkyäkseen selvästi eri korroosionopeutena.

Sondien pintalämpötilagradientin muuttumisen takia korroosion lämpötilariippuvuudesta ei saatu riittävän kattavaa mittaustulosta varmoja johtopäätöksiä varten. Kuitenkin voitiin todeta, että kummassakin kattilassa ferriittisen teräksen T91 korroosio oli varsin voimakasta jo 500-520 C lämpötilassa (yli 0,5 mm/v) – sekä savukaasuvirtausta vastaan olevalla putkipinnalla että putken takapinnalla. Austeniittinen Esshete 1250 vaikutti sietävän samoissa olosuhteissa jonkin verran korkeampia lämpötiloja kuin T91.

Tulosten perusteella erilaisten terästen korroosioalttiuden määrittäminen voidaan pitkälti tehdä isothermisissä laboratorio-olosuhteissa aikaisemmin esitetyllä tekniikalla (vrt osaraportti 1).

LIITE 1. Oksidikerrospaksuudet ja holkkien keräämien kerrostumien koostumukset

Taulukko L1.1. Näyteholkkien oksidikerrospaksuudet

Rauma

Sondi nro	Rengas	Teräs	Lämpötila [°C]	Tuulipuoli - oksidikerroksen ka [µm]	Suojapuoli - oksidikerroksen ka [µm]
1	1b+	Sanicro 28	sondi hajosi	sondi hajosi	sondi hajosi
1	2b+	Sanicro 28	sondi hajosi	sondi hajosi	sondi hajosi
1	3b+	Sanicro 28	sondi hajosi	sondi hajosi	sondi hajosi
1	4b+	Sanicro 28	sondi hajosi	sondi hajosi	sondi hajosi
1	5b+	Sanicro 28	sondi hajosi	sondi hajosi	sondi hajosi
2	1b+	Esshete 1250	543	15,0	32,7
2	2b+	Esshete 1250	562	23,0	37,0
2	3b+	Esshete 1250	593	54,4	19,3
2	4b+	Esshete 1250	601	33,2	46,8
2	5b+	Esshete 1250	550	49,3	48,2
3	1b+	T91	533	66,2	48,8
3	2b+	T91	549	81,2	55,9
3	3b+	T91	560	73,1	168,9
3	4b+	T91	580	74,4	205,4
3	5b+	T91	termoel. hajosi	58,5	36,6

Pietarsaari

Sondi nro	Rengas	Teräs	Lämpötila [°C]	Tuulipuoli - oksidikerroksen ka [µm]	Suojapuoli - oksidikerroksen ka [µm]
1	1b+	Esshete 1250	520	8,0	73,9
1	2b+	Esshete 1250	553	46,4	151,6
1	3b+	Esshete 1250	549	31,2	89,4
1	4b+	Esshete 1250	566	36,7	81,6
1	5b+	Esshete 1250	589	70,3	221,7
2	1b+	T91	500	40,6	38,2
2	2b+	T91	518	50,2	53,1
2	3b+	T91	552	53,7	48,2
2	4b+	T91	573	50,4	60,8
2	5b+	T91	590	71,5	85,3
3	1b+	Sanicro 28	350	0,8	2,8
3	2b+	Sanicro 28	450	3,1	2,5
3	3b+	Sanicro 28	481	4,5	3,2
3	4b+	Sanicro 28	504	5,2	3,7
3	5b+	Sanicro 28	524	4,8	4,9

Uimaharju

Sondi nro	Rengas	Teräs	Lämpötila [°C]	Tuulipuoli - oksidikerroksen ka [µm]	Suojapuoli - oksidikerroksen ka [µm]
1	1b+	Sanicro 28	494	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	
1	2b+	Sanicro 28	539*	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	
1	3b+	Sanicro 28	560	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	
1	4b+	Sanicro 28	509*	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	
1	5b+	Sanicro 28	582	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	
2	1b+	T91	509	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	
2	2b+	T91	444*	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	
2	3b+	T91	560	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	
2	4b+	T91	525*	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	
2	5b+	T91	573	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	
3	1b+	Esshete 1250	513	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	
3	2b+	Esshete 1250	565*	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	
3	3b+	Esshete 1250	560	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	
3	4b+	Esshete 1250	529*	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	
3	5b+	Esshete 1250	587	koe epäonnistui jäähditysongelmien takia	

Taulukko L1.2. Näyteholkkien kerrostumien koostumukset

Sondi nro	Rengas	Tulo/jättöpuoli	paino-%			
1	1b+	sondi hajosi	x	x	x	x
1	2b+	sondi hajosi	x	x	x	x
1	3b+	sondi hajosi	x	x	x	x
1	4b+	sondi hajosi	x	x	x	x
1	5b+	sondi hajosi	x	x	x	x
2	1b+	tulo/bulkki	39,66	1,88	16,42	0,33
2	1b+	tulo/teräsräjäp.	40,93	1,68	15,14	0,21
2	1b+	jättö/bulkki	30,74	5,34	20,69	0,26
2	1b+	jättö/teräsräjäp.	30,92	5,56	20,49	0,44
2	2b+	tulo/bulkki	35,85	4,35	18,15	0,36
2	2b+	jättö/bulkki	29,21	4,82	19,22	0,62
2	3b+	tulo/bulkki	34,20	4,38	19,20	0,53
2	3b+	jättö/bulkki	33,71	3,89	17,93	<toteamisraja
2	4b+	tulo/bulkki	33,37	4,34	19,26	0,41
2	4b+	tulo/teräsräjäp.	34,31	4,15	18,53	0,48
2	4b+	jättö/bulkki	31,24	4,87	20,42	<toteamisraja
2	4b+	jättö/teräsräjäp.	32,05	3,84	17,79	<toteamisraja
2	5b+	tulo/bulkki	31,59	4,53	20,61	<toteamisraja
2	5b+	tulo/teräsräjäp.	31,15	4,81	19,87	<toteamisraja
2	5b+	jättö/bulkki	35,51	3,29	19,13	<toteamisraja
2	5b+	jättö/teräsräjäp.	35,90	3,19	18,85	<toteamisraja
3	1b+	tulo/bulkki	34,18	3,92	17,98	<toteamisraja
3	1b+	jättö/bulkki	35,66	2,94	16,02	<toteamisraja
3	2b+	tulo/bulkki	29,46	6,07	20,29	<toteamisraja
3	2b+	jättö/bulkki	35,63	4,77	17,87	0,64
3	3b+	tulo/bulkki	33,73	4,22	19,11	<toteamisraja
3	3b+	tulo/teräsräjäp.	34,25	3,86	19,08	<toteamisraja
3	3b+	jättö/bulkki	27,79	5,24	19,41	3,11
3	3b+	jättö/teräsräjäp.	33,23	4,20	19,09	0,43
3	4b+	tulo/bulkki	34,67	4,33	18,58	0,70
3	4b+	tulo/teräsräjäp.	33,42	4,85	18,90	0,73
3	4b+	jättö/bulkki	29,91	5,92	20,45	0,72
3	4b+	jättö/teräsräjäp.	30,50	5,33	20,10	0,83
3	5b+	tulo/bulkki	33,71	4,61	19,63	<toteamisraja
3	5b+	jättö/bulkki	35,57	4,00	18,92	<toteamisraja

Pietarsaari			Na	K	S	Cl
Sondi nro	Rengas	Tulo/jättöpuoli	paino-%			
1	1b+	tulo/bulkki	32,18	4,73	19,78	1,16
1	1b+	jättö/bulkki	32,62	3,94	20,34	<toteamisraja
1	2b+	tulo/bulkki	28,98	4,76	21,11	0,55
1	2b+	jättö/bulkki	31,84	3,81	20,88	<toteamisraja
1	3b+	tulo/bulkki	1,09	0,57	1,74	40,65
1	3b+	tulo/teräsräjäp.	2,08	0,71	2,49	38,35
1	3b+	jättö/bulkki	31,18	4,44	21,07	<toteamisraja
1	3b+	jättö/teräsräjäp.	30,91	4,61	21,14	<toteamisraja
1	4b+	tulo/bulkki	30,87	4,84	20,07	0,51
1	4b+	jättö/bulkki	31,60	3,41	21,05	<toteamisraja
1	4b+	jättö/teräsräjäp.	33,54	3,04	19,71	0,72
1	5b+	tulo/bulkki	30,41	4,03	21,54	<toteamisraja
1	5b+	jättö/bulkki	30,61	3,89	20,92	1,39
2	1b+	tulo/bulkki	34,45	3,67	19,36	<toteamisraja

Taulukko L1.2. Jatk...

2	1b+	jättö/bulkki	29,90	4,83	21,58	<toteamisraja
2	2b+	tulo/bulkki	29,61	3,80	14,72	0,35
2	2b+	jättö/bulkki	24,12	5,52	23,48	0,69
2	3b+	tulo/bulkki	32,48	3,85	20,26	0,98
2	3b+	jättö/bulkki	34,42	3,74	19,46	<toteamisraja
2	4b+	tulo/bulkki	28,78	4,67	21,41	0,48
2	4b+	tulo/teräsraja.	31,25	4,06	19,88	<toteamisraja
2	4b+	jättö/bulkki	34,12	3,95	19,00	0,38
2	4b+	jättö/teräsraja.	33,48	3,77	18,32	0,45
2	5b+	tulo/bulkki	0,59	<toteamisraja	0,13	52,32
2	5b+	jättö/bulkki	32,23	4,03	20,39	<toteamisraja
3	1b+	tulo/bulkki	12,03	1,55	5,91	4,64
3	1b+	tulo/teräsraja.	7,22	1,73	4,00	3,43
3	1b+	jättö/bulkki	27,58	6,86	21,20	1,41
3	1b+	jättö/teräsraja.	26,38	8,89	20,22	1,50
3	2b+	tulo/bulkki	31,91	4,64	19,57	0,67
3	2b+	tulo/teräsraja.	30,57	4,60	17,51	1,33
3	2b+	jättö/bulkki	23,33	13,81	18,53	5,58
3	2b+	jättö/teräsraja.	19,66	19,37	17,48	5,32
3	3b+	tulo/bulkki	31,79	4,73	20,23	0,40
3	3b+	tulo/teräsraja.	26,87	7,06	20,52	1,25
3	3b+	jättö/bulkki	33,16	2,90	20,10	0,49
3	3b+	jättö/teräsraja.	32,42	3,25	20,20	0,60
3	4b+	tulo/bulkki	33,42	3,76	20,15	<toteamisraja
3	4b+	tulo/teräsraja.	32,91	3,64	18,91	0,63
3	4b+	jättö/bulkki	32,02	4,01	20,46	0,61
3	4b+	jättö/teräsraja.	28,62	6,06	16,33	11,24
3	5b+	tulo/bulkki	30,14	4,98	20,85	0,37
3	5b+	jättö/bulkki	30,45	4,36	20,99	<toteamisraja

Uimaharju			Na	K	S	Cl
Sondi nro	Rengas	Tulo/jättöpuoli			paino-%	
1	1b+	koe epäonnistui	x	x	x	x
1	2b+	koe epäonnistui	x	x	x	x
1	3b+	koe epäonnistui	x	x	x	x
1	4b+	koe epäonnistui	x	x	x	x
1	5b+	koe epäonnistui	x	x	x	x
2	1b+	koe epäonnistui	x	x	x	x
2	2b+	koe epäonnistui	x	x	x	x
2	3b+	koe epäonnistui	x	x	x	x
2	4b+	koe epäonnistui	x	x	x	x
2	5b+	koe epäonnistui	x	x	x	x
3	1b+	koe epäonnistui	x	x	x	x
3	2b+	koe epäonnistui	x	x	x	x
3	3b+	koe epäonnistui	x	x	x	x
3	4b+	koe epäonnistui	x	x	x	x
3	5b+	koe epäonnistui	x	x	x	x

**LIITE 2. SEM analyysit näyteholkkien korroosiosta
(DVD levyllä)**

SOTU2 DVD

Korroosiotulokset

Pietarsaari

Esshete1250

Kerrostumat	(word & PNG tiedostoja)
Korroosio	(word & PNG tiedostoja)
Lämpötilat	(xls tiedosto)

Sanicro28

Kerrostumat	(word & PNG tiedostoja)
Korroosio	(word & PNG tiedostoja)
Lämpötilat	(xls tiedosto)

T91

Kerrostumat	(word & PNG tiedostoja)
Korroosio	(word & PNG tiedostoja)
Lämpötilat	(xls tiedosto)

Rauma

Esshete1250

Kerrostumat	(word & PNG tiedostoja)
Korroosio	(word & PNG tiedostoja)
Lämpötilat	(xls tiedosto)

Sanicro28

Kerrostumat	(word & PNG tiedostoja)
Korroosio	(word & PNG tiedostoja)
Lämpötilat	(xls tiedosto)

T91

Kerrostumat	(word & PNG tiedostoja)
Korroosio	(word & PNG tiedostoja)
Lämpötilat	(xls tiedosto)

Uimaharju

Esshete1250

Kerrostumat	(ei tiedostoja)
Korroosio	(ei tiedostoja)
Lämpötilat	(xls tiedosto)

Sanicro28

Kerrostumat	(ei tiedostoja)
Korroosio	(ei tiedostoja)
Lämpötilat	(xls tiedosto)

T91

Kerrostumat	(ei tiedostoja)
Korroosio	(ei tiedostoja)
Lämpötilat	(xls tiedosto)