

TERÄSPILAREIDEN KOTELOSUOJAUKSEN MALLINNUS FE-MENETELMÄLLÄ

Mari Niemelä os. Lignell
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT

Tiivistelmä

Esitelmässä kuvataan palolle altistettujen koteloitujen ja kotelottoman RHS 150x150x5 teräspilareiden mallintamista elementtimenetelmällä. Lämmönsiirtoparametrien verifiointiseksi luotiin mallit horisontaaliuunikokeessa testatuista pilareista. Näitä parametreja käytettiin julkisivulaitteella testattujen pilareiden elementtimallien luomiseen. Esitelmässä verrataan myös elementtimallien lämpötiloja kokeellisiin koetuloksiin ja pohditaan lyhyesti mallien tarkkuutta.

JOHDANTO

Diplomityön [1] tarkoituksena oli luoda elementtimallit projektiin ”Developments of design rules for the fire behaviour of external steel structures” liittyvässä horisontaaliuunikokeessa testatuista pilareista. Näillä malleilla verifioitiin lämmönsiirto-parametrit, joilla tässä tutkimuksessa tarkoitetaan kappaleen emissiivisyyttä ja konvektion lämmönsiirtokerrointa. Työn toisena tavoitteena oli luoda elementtimallit samaan projektiin liittyvässä julkisivulaitteella tehdyissä kokeissa kuormitetuista pilareista. Näitä malleja voitaisiin käyttää julkisivulaitteen koetulosten laajentamiseen. Lisäksi työn yleisenä tarkoituksena oli tarkastella ABAQUS/Standard ohjelmiston soveltumista palolle altistettujen teräspilareiden lämpötilakehityksen tarkasteluun.

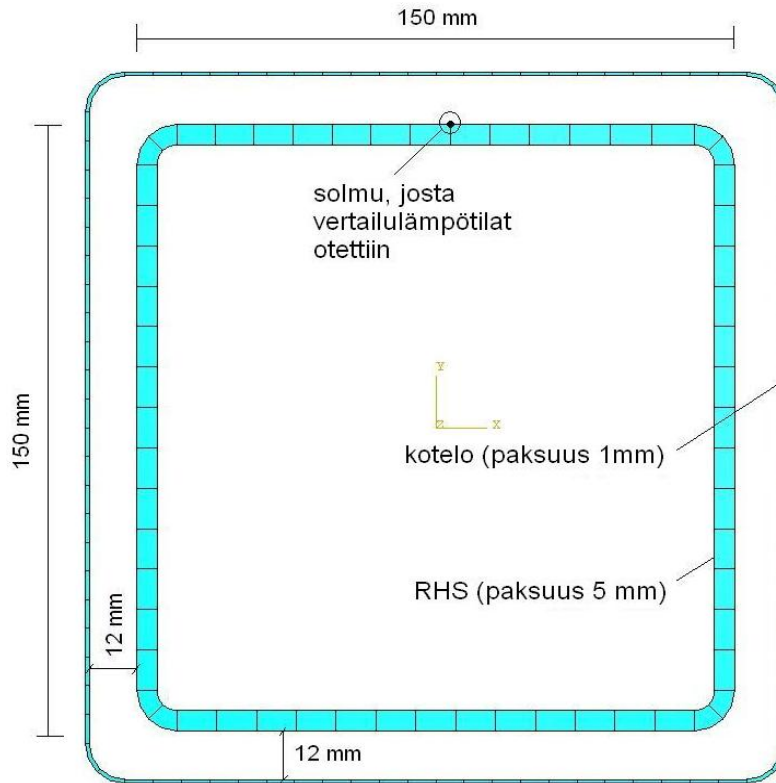
Tässä työssä ei mallinnettu kaikkia testattuja pilareita, vaan keskityttiin neljään taulukossa 1 esitettyyn RHS 150x150x5 pilariin. Nämä pilarit mallinnettiin käyttämällä elementtimenetelmää (finite element method, FEM), jossa tutkittava rakenne jaetaan pieniin osa-alueisiin, elementteihin. Elementtimenetelmällä saadaan rakenteille likimääräisiä ratkaisuja, mutta sillä voidaan analysoida monimutkaisia rakenteita, joita ei muuten pystytä ratkaisemaan.

Taulukko 1. Tutkimuksessa mallinnetut pilarit [2]

Lyhenne	Pilarin materiaali	Kotelon materiaali
S-RHS-Sbox	ruostumaton teräs (AISI 304)	ruostumaton teräs (AISI 304)
M-RHS-Sbox	rakenneteräs (S355)	ruostumaton teräs (AISI 304)
S-RHS-Unp	ruostumaton teräs (AISI 304)	-
M-RHS-Mbox	rakenneteräs (S355)	rakenneteräs (S355)

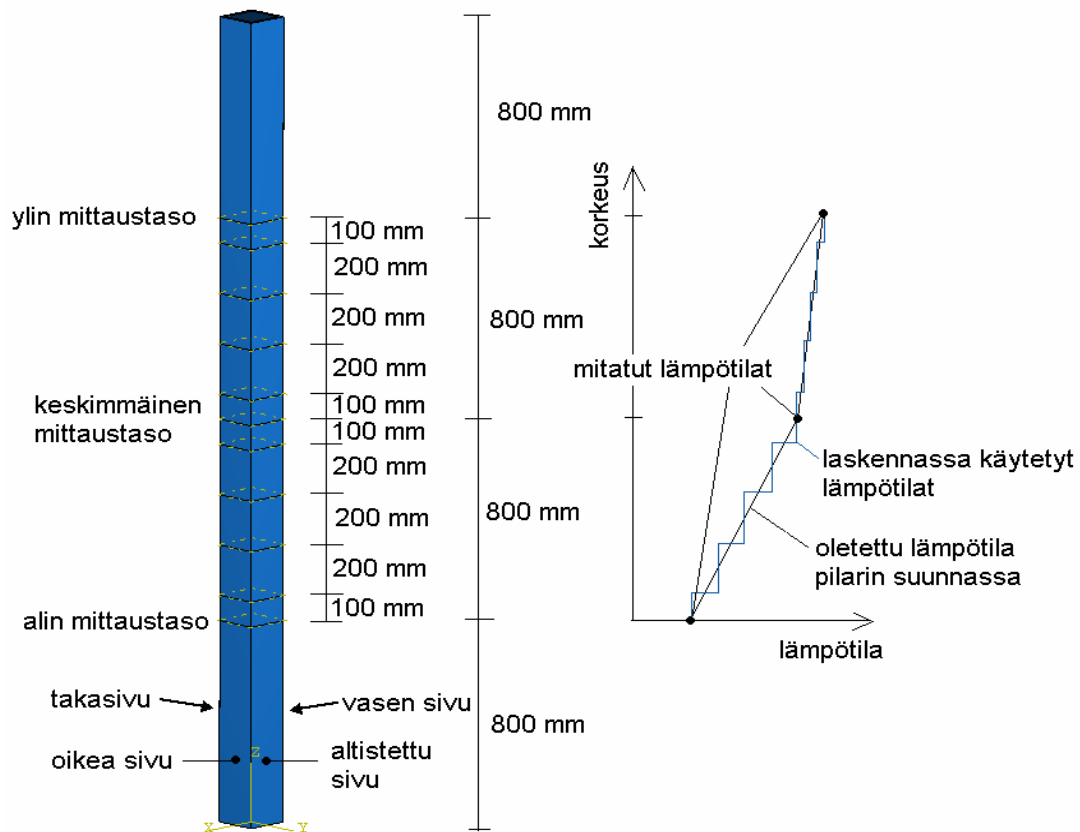
GEOMETRIA

Horisontaaliuunissa rasitettujen pilarien lämpötilajakauma pilarien pystysuunnassa oli vakio, joten näistä pilareista luotiin vain 2D-mallit. Kuvassa 1 on esitetty geometria, jota käytettiin koteloisujattujen pilarien mallintamiseen. Suojaamaton pilari mallinnettiin samoin, mutta luonnollisesti kotelo jätettiin pois.



Kuva 1. Horisontaaliuunikokeessa testattujen koteloitujen pilarien mallinnettu geometria.[1]

Julkisivulaitteella testattujen pilarien ympäristön lämpötilat vaihtelivat sekä pituussuunnassa että pilarien eri sivuilla. Tästä johtuen näistä pilareista yritettiin luoda 3D-mallit. Suojaamattoman pilarin geometria on esitetty kuvassa 2. Todellisuudessa pilarit olivat 4.5 m pitkiä, mutta malli luotiin vain 3.2 m pituiselle pilarille, sillä mallinnuksessa keskityttiin mittaustasojen läheisyyteen.



Kuva 2. Julkisivulaitekokeessa testattujen koteloimattoman pilarin geometria.[1]

MATERIAALIOMINAISUUDET

Kaikissa malleissa käytettiin ruostumattomalle teräkselle (AISI304) ja rakenneteräkselle (S355) standardin EN 1993-1-2:2002 [3] mukaisia lämpötilasta riippuvia materiaaliominaisuuksia. Ilman materiaaliominaisuudet mallinnettiin Laineen [4] mukaan. Horisontaalikokeen perusteella luoduilla elementtimalleilla tutkittiin eri kirjallisuuslähteiden mukaisia lämmönsiirtoparametreja liekeistä teräspilareihin. Näiden mallien perusteella valittiin taulukossa 3 esitetyt lämmönsiirtoparametrit kuvaamaan liekin ja pilarin välistä vuorovaikutusta.

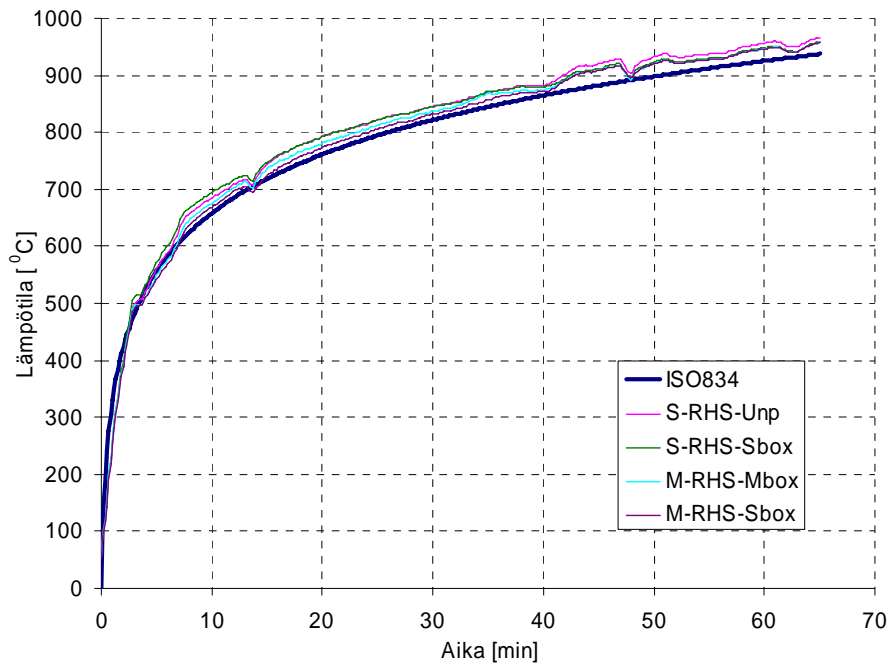
Taulukko 3. Mallinnuksessa käytetyt lämmönsiirtoparametrit.[1]

	konvektion lämmönsiirtokerroin [W/(K·m ²)]	palolle altistetun pinnan emissiivisyys [-]	suojatun pinnan emissiivisyys [-]
ruostumaton teräs (AISI304)	25	0.4	0.5
rakenneteräs (S355)	25	0.7	0.7

KUORMITUS

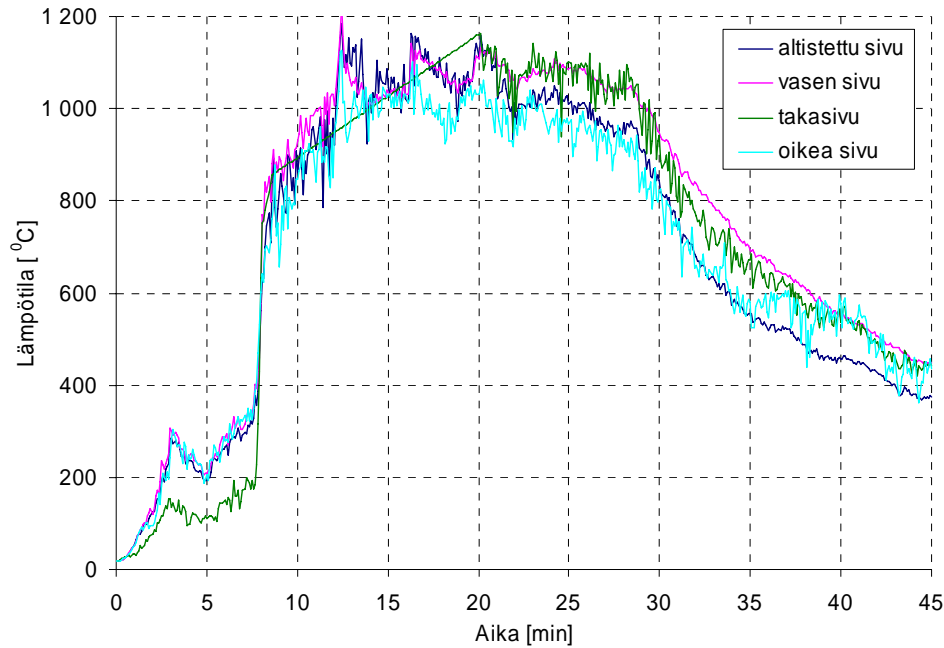
Palolle altistetuilla pinoilla

Horisontaaliuunissa uunin lämpötila pidettiin mahdollisimman lähellä standardin EN 1363-1 (ISO 834-1) [5] mukaista palokäyrää. Lämpötilakehitys oli kuitenkin hieman erilainen eri pilarien ympärillä johtuen uunin polttimien säädöistä ja sijoitteluista. Horisontaalikokeen elementtimalleja luodessa ympäristön lämpötiloina käytettiin kuvan 3 mukaisia lämpötiloja. Lämmönsiirtyminen ympäristöstä pilariin mallinnettiin konvektiolla ja säteilyllä.



Kuva 3. Horisontaaliuunin lämpötilat eri pilarien ympärillä. [1]

Julkisivulaitteella testatuilla pilareilla lämpötilat vaihtelivat myös korkeussuunnassa ja mittaustasojen välisellä alueella ympäristön lämpötilajakauma oletettiin lineaarisiksi. ABAQUS/Standardissa ei ole konvektiolle ja säteilylle algoritmeja, joissa ympäristön lämpötila voisi olla sekä ajasta että paikasta riippuvainen. Tämän takia pilarit jaettiin kuvan 2 osoittamalla tavalla pienempiin osa-alueisiin. Näillä osa-alueilla lämmönsiirto ympäristöön mallinnettiin säteilyllä ja konvektiolla kuten horisontaaliuunin elementtimalleissa. Ympäristön lämpötila osa-alueilla oletettiin olevan sen keskitason suuruinen kuvan 2 mukaisesti. Kuvassa 4 on esitetty koteloimattoman pilarin ympäristön lämpötilat keskimmaisella mittaustasolla.



Kuva 4. Koteloimattoman julkisivulaitteessa testatun pilarin mallinnetut ympäristön lämpötilat keskimmaisella mittaustasolla.[1]

Koteloiden ja pilarien välissä

Lämmönsiirto kotelon ja pilarin välissä mallinnettiin johtumalla ilmaraon läpi sekä ontelosäteilyllä. Konvektiota raossa ei otettu huomioon, koska sen vaikutus lähes koko kokeen aikana oli merkityksetön verrattuna säteilyyn ja johtumiseen. Tosin kokeen alussa konvektiolla saattoi olla vaikutusta, koska lämpötilat olivat kohtuullisen alhaisia ja pilarin ja kotelon lämpötilaero oli kohtalainen. Lämpötilojen noustessa säteily on kuitenkin dominoiva lämmönsiirtomekanismi.

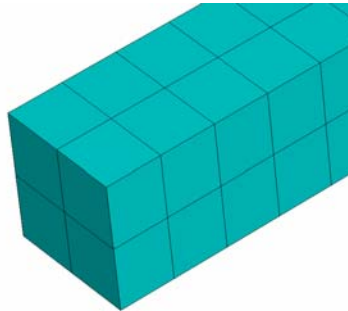
Säteily kotelon ja pilarin välissä mallinnettiin ontelosäteilyllä, jossa ontelon seinät säteilevät lämpöä toisilleen ja vaikuttavat toistensa lämpötiloihin. Elementtimalleissa kotelon sisäseinät muodostivat ontelon, jossa pilarin ulkoseinät varjostivat siten, että kaikki ontelon seinät eivät olleet vuorovaikutuksessa. ABAQUS/Standardin ontelosäteilyn algoritmi vaatii tiheän elementtiverkon ollakseen riittävän tarkka tällaisissa tapauksissa. Horisontaaliuunissa testattujen pilarien 2D-malleilla verkon tiheys ei aiheuttanut ongelmia, mutta julkisivulaitteen malleissa ABAQUS/Standardin ontelon solmurajoituksen ja laskenta-ajan kohtuuttoman kasvamisen takia kotelosuojattuja pilareita ei voitu mallintaa.

Pilarin sisällä

Pilarien sisäpintojen lämpötilat olivat yhtä suuret jokaisella pilarin seinällä symmetrisen lämpökuorman takia ja pilarien sisällä oleva ilma oli hyvä eriste. Tämän takia johtuminen oli merkityksetöntä säteilyyn verrattuna ja se jätettiin pois horisontaaliuunikokeen elementtimalleissa. Myös julkisivulaitteessa testattujen pilarien malleilla johtuminen jätettiin pois vaikka pinnoilla olikin eri lämpötilat, koska tässäkin tapauksessa johtuminen on merkityksetöntä säteilyn rinnalla. Lämmönsiirto pilarin sisällä mallinnettiin kaikissa malleissa vain ontelosäteilyllä.

VERKOTTAMINEN JA ELEMENTTIEN VALINTA

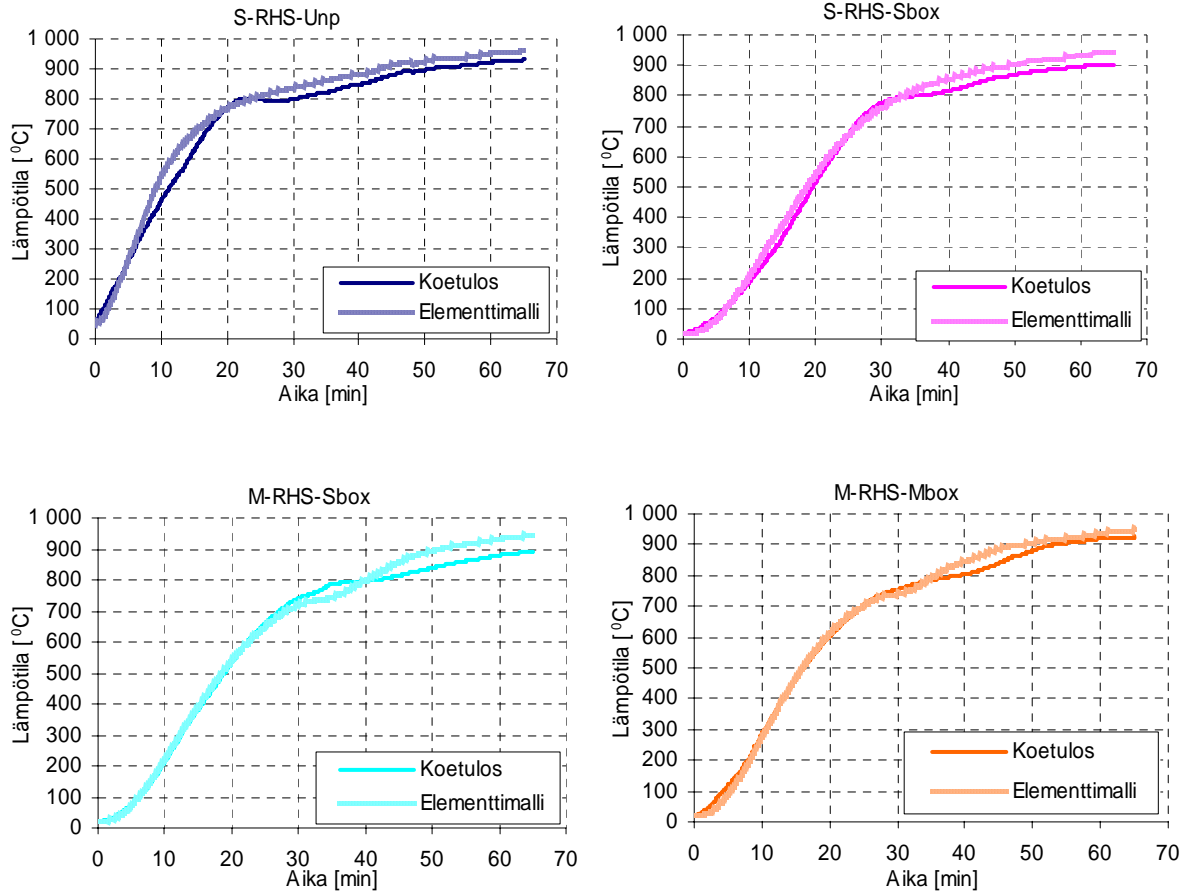
Kuvassa 1 on esitetty horisontaaliuunimalleissa käytetty elementtiverkko. Näissä malleissa käytettiin elementteinä nelisivuisia, parabolisia solid-elementtejä, koska ne ovat analyyseissa tarkempia kuin kolmisivuiset ja lineaariset elementit. Koteloimaton julkisivulaitteessa testattu pilari verkotettiin kuvan 5 mukaisesti ja elementteinä käytettiin lineaarisia kuorielementtejä. Kuorielementit valittiin, koska ne soveltuvat hyvin analyyseihin, joissa kappaleen yksi dimensio on muita huomattavasti pienempi. Lineaariset elementit valittiin, koska niillä saatiin samalla määrällä solmuja tiheämpi elementtiverkko. Tiheää elementtiverkkoa tarvittiin ontelosäteilyn mallintamiseen.



Kuva 5. Julkisivulaitteella testatun koteloimattoman pilarin elementtiverkko.[1]

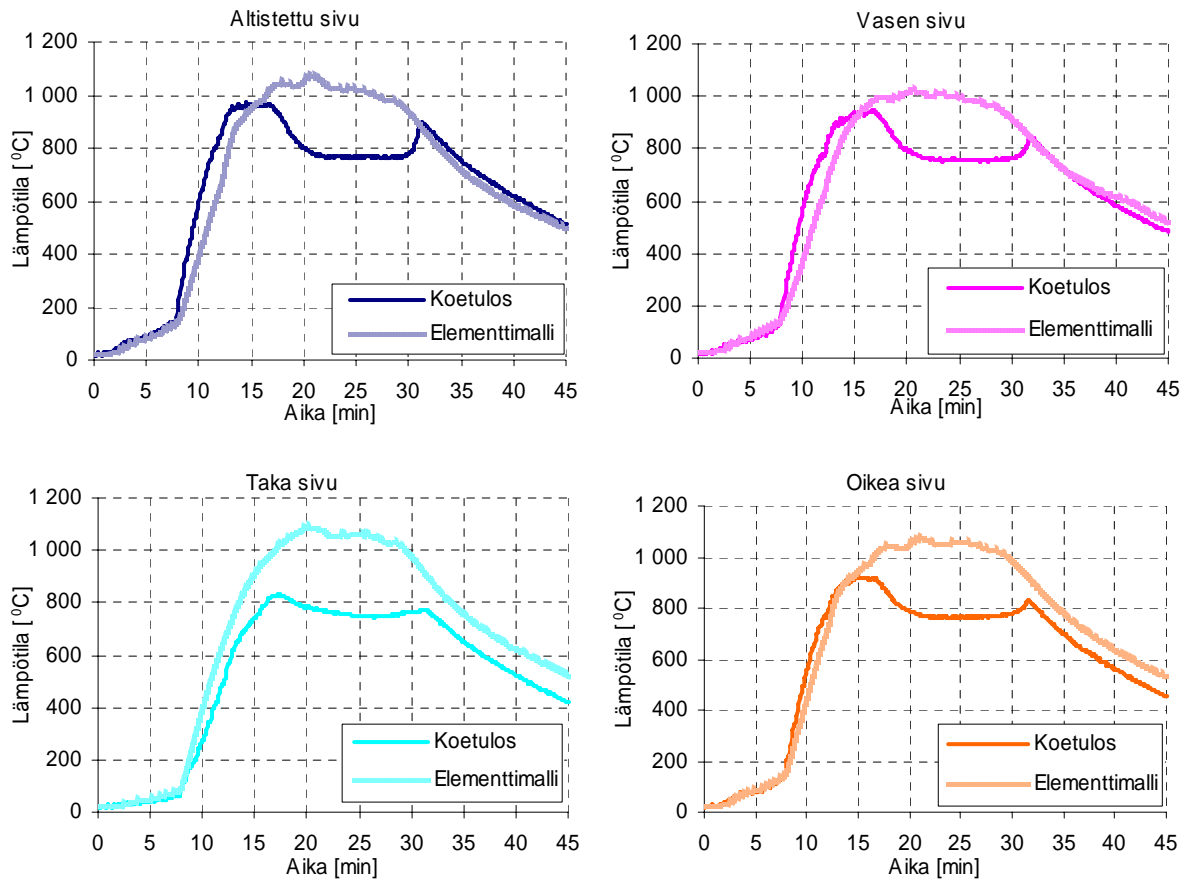
MALLIEN JA KOETULOSTEN VERTAILU

Horisontaaliuunissa rasiuttujen pilarin mallintaminen onnistui hyvin. Kuvassa 6 verrataan näiden pilarien elementtimalleja koetuloksiin. Mallien vertailulämpötila saatiin kuvan 1 osoittamasta solmusta. Kuten kuvasta 6 voidaan todeta, elementtimalleista saadut lämpötilat olivat konservatiivisia lähes koko kokeen ajan. Kaikissa koetuloksissa on noin 800 °C:een kohdalla väliaikainen lämpötilan notkahdus, jota elementtimallit eivät kuvanneet. Ruostumattomalle teräkselle lämpötilanotkahduksen syytä ei tiedetä, mutta rakenneteräksellä ovat todennäköisesti sen materiaaliominaisuudet. Myös pinnan ominaisuuksien muuttuminen, kuten oksidikerroksen tai noen muodostuminen, on saattanut vaikuttaa terästen lämpötilakehitykseen.



Kuva 6. Horisontaaliuunikokeen tulosten vertailu elementtimalleihin. [1]

Julkisivulaiteella testatun koteloimattoman pilarin lämpökehityksen mallinnus onnistui myös melko hyvin alimman ja keskimmäisen mittaustason altistetulla, vasemmalla ja oikealla sivulla. Ylimmällä mittaustasolla ja pilarin takasivulla mallin ympäristön lämpötila oli approksimaatio, joten elementtimalli ei kuvannut todellisuutta yhtä tarkasti kuin muilla sivuilla. Myös mittaustasojen välinen lämpötila oli vain approksimaatio, mikä saattaa aiheuttaa jonkin verran virhettä. Kuvassa 7 on esitetty koteloimattoman pilarin keskimmäisen mittaustason koetulosten ja mallin vertailua.



Kuva 7. Julkisivulaitekokeen tulosten vertailu elementtimalleihin koteloimattomalle pilarille keskimmaisella mittaustasolla.[1]

Erot elementtimallien ja koetulosten välillä johtuivat monista asioista. Mallien materiaalit luotiin standardin ja kirjallisuuden perusteella, mutta todellisuudessa nämä ominaisuudet saattavat vaihdella. Myös lämmönsiirtoparametreja yksinkertaistettiin laskentateknisistä syistä. Konvektion lämmönsiirtymiskerroin ei todellisuudessa ole vakio, sillä liekkien virtauskenttä muuttuu jatkuvasti ja teräksen emissiivisyys on todellisuudessa todennäköisesti lämpötilasta riippuva. Malleissa käytetyt lämmönsiirtoparametrit verifioitiin tapaukselle, jossa pilari oli liekkien ympäröimä, mutta julkisivulaiteen alimmalla mittaustasolla näin ei todellisuudessa ollut. Myös konvektio pilarin ja kotelon välissä saattoi olla merkittävä kokeen alussa. Teräksen ja ympäristön lämpötilojen mittauksissa on myös todennäköisesti jonkin verran virhettä mm. polttimien säätöjen ja mittareiden epävarmuuden takia.

LOPPUSANAT

Vaikka kaikkia työn tavoitteita ei saavutettu, horisontaaliuunissa kuormitettujen pilarien elementtimallit toimivat kunnolla ja lämmönsiirtoparametreille saatiin kohtalaisen hyvät arviot. Myös julkisivulaiteesta testatulle, suojaamattomalle pilarille saatiin toimiva elementtimalli. Kotelosuojattuja julkisivulaiteella testattuja pilareita ei kuitenkaan saatu analysoituja. Syynä tähän oli lähinnä ontelosäteilyn mallintaminen ontelossa, jossa on varjostavia esteitä, kuten pilari kotelon sisällä. Nykyisellä mallinnustavalla ontelosäteilyn mallintaminen vaatii tiheän elementtiverkon, mutta ABAQUS/Standard ohjelmistolla on

solmurajoitus, minkä takia verkkoa ei voitu tihentää riittävästi. Lisäksi mallien laskenta-aika kasvoi kohtuuttomaksi.

KIITOKSET

Kiitän Olli Kaitilaa ja Tuomas Paloposkea (VTT-paloturvallisuus) sekä Reijo Lindgreniä (CSC) heidän panostuksestaan tähän tutkimukseen.

LÄHDELUETTELO

1. Lignell, Mari. Finite Element Analysis of Steel Columns in Fire Conditions. Diplomityö TKK 2005.
2. Kaitila, Olli. Fire test on unloaded short columns with different types of fire protection. ECSC Project No 7210 Doc PR 380-N.43. March 2004. Julkaistaan projektin loputtua 2006.
3. EN 1993-1-2:2002. Eurocode 3: Design of steel structures – General rules – Structural fire design. Bryssel: CEN European Committee for Standardisation, 2002.
4. Laine, J. Kaasujen ainearvot prosessilaskentaa varten. 2. korjattu ja täydennetty painos, Espoo: Otatieto no. 571, 1998, 50 s. ISBN 951-672-229-6.
5. EN 1363-1:1999. Fire resistance tests – Part 1: General requirements. Bryssel: CEN European Committee for Standardisation, 1999.