

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Jari Havuaho

**PWR PACTEL -KOELAITTEISTON YLÄTILAN
MALLINNUSVAIHTOEHTOJEN TARKASTELU
APROS-OHJELMISTOLLA**

Tarkastajat: Professori Riitta Kyrki-Rajamäki
Tekniikan lisensiaatti Juhani Vihavainen

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Virpi Kouhia

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Jari Havuaho

PWR PACTEL -koelaitteiston ylätilan mallinnusvaihtoehtojen tarkastelu APROS-ohjelmistolla

Diplomityö

2012

82 sivua, 32 kuvaa ja 13 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Riitta Kyrki-Rajamäki
TkL Juhani Vihavainen

Ohjaaja: DI Virpi Kouhia

Hakusanat: APROS, PWR PACTEL, kelpoistusmatriisi, ylätila, mallinnus

Diplomityössä selvitetään PWR PACTEL -koelaitteiston APROS-mallin ylätilan toimivuutta ja tutkitaan tapoja parantaa mallin simulointitarkkuutta. Työssä on esitelty PWR PACTEL -koelaitteiston sekä APROS-simulointiohjelman pääpiirteet ja tutustuttu simulointiohjelmien kelpoistukseen.

Simulointiosiossa tarkastellaan yksinkertaisen ja muokatun ylätilamallin toimivuutta vertaamalla simulointia koelaitteistolla tehtyjen kokeiden mittaustuloksiin. Lisäksi tutkitaan neljää tapaa parantaa ylätilamallin toimivuutta: virtausvastusten säätö, lämpöhäviöiden säätö, rakenteelliset muutokset ja laskentakorrelaatioiden vaihtaminen. Simulointituloksia verrataan kahteen koelaitteistolla suoritettuun kokeeseen, joista toinen on tasapainotilankoe ja toinen dynaamisen tilan koe.

Työssä havaittiin, että nykyisin käytössä olevaa mallia on kehitetty jo varsin paljon, verrattuna ns. yksinkertaiseen malliin. Testatuilla parannusvaihtoehdoilla saatiin hieman parannettua ylätilan lämpötilojen simulointia tasapainotilassa. Dynaamisen tilan osalta havaittiin pientä parannusta mallin toiminnassa ylätilamallin rakennemuutosten jälkeen. Tulosten pohjalta arvioitiin, että mallia on mahdollista kehittää muuttamalla ylätilamallin rakennetta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Energy Technology

Jari Havuaho

Modeling options for the upper plenum of PWR PACTEL test facility with APROS-software

Master's Thesis

2012

82 pages, 32 figures and 13 tables

Examiners: Professor D.Sc. (Tech.) Riitta Kyrki-Rajamäki
Lic. Sc. (Tech.) Juhani Vihavainen
Ohjaaja: M. Sc. (Tech.) Virpi Kouhia

Keywords: APROS, PWR PACTEL, validation matrix, upper plenum, modeling

This Master's thesis investigates functionality of the upper plenum APROS-model of PWR PACTEL test facility and examines different ways to improve the simulation accuracy of the upper plenum model. The thesis introduces basics of PWR PACTEL test facility and APROS system code and also explores validation process of the system codes.

In simulation part, thesis views the functionality of simple and modeled upper plenum models by comparing the simulations to test measurement data from the test facility. Thesis also explores four ways to improve the current model: control of the form loss coefficient, control of heat losses, structural changes and changes of calculation correlations. The simulation results are compared with two experiments performed with the test facility, one of which is a steady state experiment and the other a transient experiment.

In this thesis it was also observed that the model currently in use has been improved much from the basic upper plenum model. With improvements tested in this thesis the functionality of the model was improved slightly in the steady state. In transient simulation there was slight improvement on a model with modified upper plenum structure. According to these results the model can be improved with a structural modification of the upper plenum model.

ALKUSANAT

Aluksi haluan kiittää Lappeenrannan teknillistä yliopistoa sekä professori Riitta Kyrki-Rajamäkeä mahdollisuudesta tämän mielenkiintoisen diplomityön tekemiseen. Erityiskiitokset Virpi Kouhialle haastavasta etäohjauksesta ja neuvoista APROS-ohjelman käytössä. Diplomityön ohjaaminen toiselta puolelta Suomea ei ole helppo tehtävä. Kiitokset myös Juhani Vihavaiselle, joka auttoi monilla hyvillä neuvoilla tämän prosessin aikana.

Haluan kiittää myös muita Lappeenrannan teknillisen yliopiston henkilökunnan jäseniä, jotka ovat opettaneet minua näinä opiskeluvuosina ja totta kai kaikkia opiskelukavereitani, jotka ovat auttaneet minua jaksamaan kaikki nämä vuodet.

Lopuksi haluaisin kiittää perhettäni, erityisesti äitiäni Pirjoa, varauksettomasta tuesta opiskeluaikoina.

"Now this is not the end. It is not even the beginning of the end. But it is, perhaps, the end of the beginning."

-Winston Churchill

Lappeenrannassa 03.12.2012

Jari Havuaho

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	3
1 JOHDANTO	6
2 PWR PACTEL -KOELAITTEISTO	7
2.1 Historia	7
2.2 Rakenne	9
2.2.1 Ylätila	11
2.3 Lämpöhäviöt	15
2.3.1 Lämpöhäviöiden laskentamenetelmät	15
2.3.2 Mitatut lämpöhäviöt	16
3 APROS-SIMULOINTIOHJELMISTO	19
3.1 Toiminnan perusteet	19
3.2 Laskenta ja tärkeimmät yhtälöt	21
3.3 Lauhtumiskorrelaatiot	25
3.4 6-yhtälömalli	27
3.5 Yksiulotteisten simulointiohjelmien ongelmia	29
4 SIMULOINTIOHJELMIEN KELPOISTUS	32
4.1 CSNI-matriisien käyttö	33
4.2 Skaalaus	37
4.3 Kelpoistus osana laadunvarmistusta	37
5 PWR PACTEL -SIMULOINTIMALLI	39
6 PWR PACTEL -KOKKEET	41
6.1 RF-04-koe	41
6.2 SBL-50-koe	42

7 SIMULOINNIT	44
7.1 Yksinkertainen ylätilamalli	44
7.1.1 RF-04-simulaatio: yksinkertainen ylätilamalli	45
7.1.2 SBL-50-simulaatio: yksinkertainen ylätilamalli.....	46
7.2 Muokattu ylätilamalli	47
7.2.1 RF-04-simulaatio: muokattu ylätilamalli	49
7.2.2 SBL-50-simulaatio: muokattu ylätilamalli	50
7.3 Virtausvastusten säädön vaikutus muokattuun ylätilamalliin	56
7.3.1 RF-04-simulaatio: muotohäviökerroin -0,2.....	57
7.3.2 RF-04-simulaatio: muotohäviökerroin +0,2.....	57
7.3.3 RF-04-simulaatio: muotohäviökerroin +0,5.....	58
7.3.4 SBL-50-simulaatio: muotohäviökerroin +0,5	59
7.4 Lämpöhäviöiden säädön vaikutus muokattuun ylätilamalliin.....	61
7.4.1 RF-04-simulaatio	62
7.4.2 SBL-50-simulaatio	63
7.5 Rengastilan mallimuutoksen vaikutus muokattuun ylätilamalliin	65
7.5.1 RF-04-simulaatio: rengastilan nooditusmuutos.....	66
7.5.2 SBL-50-simulaatio: rengastilan nooditusmuutos	67
7.6 Lauhtumiskorrelaatioiden vaikutus muokattuun ylätilamalliin	69
7.6.1 RF-04-simulaatio: Chen-korrelaatio.....	69
7.6.2 RF-04-simulaatio: Nusseltin teoreema putken sisäpinnoille.....	70
7.6.3 SBL-50-simulaatio: Chen-korrelaatio	71
7.6.4 SBL-50-simulaatio: Nusseltin teoreema putken sisäpinnoille	73
8 YHTEENVETO	75
LÄHTEET	78

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Lyhenteet

APROS	Advanced Process Simulation Environment
ATHLET	Analysis of Thermal-Hydraulics of Leak and Transients
CATHARE	Code of thermal-hydraulics during an accident of reactor and safety evaluation
CSNI	Committee of the Safety of Nuclear Installations
EPR	European Pressurized Reactor
ITF	Integral Test Facility
OECD	Organisation for Economic Co-operation and development
PACTEL	Parallel Channel Test Loop
PKL-I	Primärkreislauf-Versuchsanlage
PMK-2	Paks Model Experiment
PWR PACTEL	Pressurized Water Reactor Parallel Channel Test Loop
RELAP5	Reactor Excursion and Leak Analysis Program
ROSA	Rig of Safety Assessment
SETF	Separate Effects Test Facilities
TRACE	TRAC/RELAP Advanced Computational Engine
VVER	Vodo-vodjanoi energetitšeski rektor
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT

Latinalaiset

B	lämmönjohtavuuden kerroin	[-]
C	lämpökapasiteetti	[J/K]
c	säätökerroin	[-]
c_p	lämpökapasiteetti	[J/kg K]
D	hydraulinen halkaisija	[m]

F	kitkavoima	[N/m ³]
g	maan vetovoiman kiihtyvyys	[m/s ²]
Gr	Grashofin luku	[-]
H_i	rajapinnan lämmönsiirtokerroin	[kg/m ³ s]
h	entalpia	[J/kg]
K	muotohäviökerroin	[-]
k	lämmönjohtavuus	[W/m K]
L	korkeus	[m]
l	lämmönsiirtokerroin	[W/m ² °C]
l'	modifioitu lämmönsiirtokerroin	[W/m ² °C]
\dot{m}	massavirta	[kg/s]
n	suure	[-]
P	teho	[W]
p	paine	[Pa]
Pr	Prandtlin luku	[-]
q''	lämpövuoto	[W/m ²]
q'''	lämpövirta	[W/m ³]
Re	Reynoldsin luku	[-]
T	lämpötila	[°C]
t	aika	[s]
v	nopeus	[m/s]
X	höyryn massan laadun tasapainokerroin	[-]

Kreikkalaiset

α	aukko-osuus	[-]
Γ	massan muutosnopeus	[kg/m ³ s]
η	dynaaminen viskositeetti	[kg/m s]
λ	lämmönjohtavuus	[W/m °C]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
σ	pintajännitys	[N/m]

Φ prosessin lämpöhäviöt [W]

Alaindeksit

cr kriittinen
g kaasu
i rajapinta
l neste
max suurin arvo
sat höyrystyminen
w seinä

1 JOHDANTO

Tässä diplomityössä selvitetään PWR PACTEL –koelaitteiston APROS-simulointiohjelmalla rakennetun simulointimallin ylätilan toimivuutta. Tutkittavassa simulointimallissa on havaittu ongelmia ylätilan käyttäytymisessä erilaisissa laskentatilanteissa. Tässä työssä tarkastellaan ylätilan ongelmakohtia ja tutkitaan muutamien mahdollisten parannuskeinojen vaikutusta simulointituloksiin vertaamalla laskentatuloksia koelaitteistolla tehtyihin kokeisiin. Malliin on jo aiemmin tehty joitakin parannuksia, joiden vaikutusta myös tarkastellaan.

Diplomityössä esitellään aluksi lyhyesti mallinnettava PWR PACTEL -koelaitteisto sekä sen ylätila. Sen jälkeen tarkastellaan käytettävää APROS-simulointiohjelmaa sekä yksiulotteisten termohydraulisten simulointiohjelmien yleisiä ongelmia. Luvussa 4 tutustutaan simulointiohjelmien kelpoistusprosessiin ja kelpoistusmatriiseihin.

Luvuissa 5 ja 6 esitellään simuloinneissa käytetty alkuperäinen APROS-malli sekä kaksi PWR PACTEL –koelaitteistolla suoritettua koetta, joiden tuloksiin simulointien tuloksia verrataan. Luvun 7 aluksi esitellään yksinkertaisella ylätilamallilla simuloitujen tulokset. Tämän jälkeen esitetään Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa käytössä olevalla PWR PACTEL -koelaitteiston APROS-mallilla simuloitujen laskentatulokset ja tarkastellaan simulointien poikkeamia mittaustuloksiin nähden. Tämän jälkeen esitellään neljä tapaa parantaa alkuperäistä mallia ylätilan osalta ja arvioidaan niiden toimivuutta vertaamalla simulointituloksia sekä mittaustuloksiin että alkuperäisen mallin simulointituloksiin. Ensiksi mallin toimivuuteen pyritään vaikuttamaan säätämällä mallin ylätilan virtausvastuksia. Toiseksi kokeillaan säätää mallin ylätilan lämpöhäviöitä muuttamalla käytetyn eristeen lämmönjohtavuutta. Tämän jälkeen testataan mallia jossa ylätilan rakennetta on muutettu jakamalla ylätilan diffuusoriputkea ympäröivä rengastila kahteen osaan. Lopuksi testataan ylätilan seinämänlauhnumiskorrelaatioiden vaikutusta laskentatuloksiin.

2 PWR PACTEL -KOELAITTEISTO

PWR PACTEL (Pressurized Water Reactor Parallel Channel Test Loop) on ydinvoimalaitosten termohydrauliikan tutkimiseen tarkoitettu koelaitteisto, joka on käytössä Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa. PWR PACTEL on tarkoitettu erityisesti EPR (European Pressurized Water Reactor) -tyyppisen ydinvoimalaitoksen käyttäytymisen tutkimiseen. Koelaitteistolla saatuja koetuloksia voidaan käyttää muun muassa ydinvoimalaitoksia simuloivien ohjelmien kelpoistukseen. (Riikonen et al. 2009 s.1-2,5)

2.1 Historia

Lappeenrannan teknillinen yliopisto ja VTT (Teknologian tutkimuskeskus) rakensivat alkuperäisen PACTEL (Parallel Channel Test Loop) -koelaitteiston vuonna 1990. Alkuperäisen laitteiston tarkoituksena oli tutkia VVER-440 (Vodo-vodjanoi energetitšeski rektor) -tyyppisen ydinvoimalaitoksen käyttäytymistä. Koelaitteisto rakennettiin tilavuudeltaan kokoluokkaan 1:305, mutta korkeudeltaan 1:1, koska laitteistoon vaikuttavan painovoiman vaikutuksen haluttiin pysyvän samana kuin oikeassa laitoksessa. (Tuunanen et al. 1998 s.3)

PACTEL koostuu reaktorin paineastiaa mallintavasta osasta, johon kuuluu varsinaisen sydänsosan lisäksi ylätila, alatila ja alasmenotila, paineistimesta, kolmesta vaakahöyrystimestä ja kiertopiireistä sekä hätäjähdytysjärjestelmistä. Sekundääripuolella höyrystimillä on omat syöttövesilinjat sekä yhteinen höyrylinja, josta höyry johdetaan ilmakehään. (Tuunanen et al. 1998 s.13–16)

Vuonna 2009 käyttöön otettu uusi PWR PACTEL -koelaitteisto on rakennettu alkuperäisen PACTEL-koelaitteiston rinnalle. Koelaitteistolla on tarkoitus mallintaa Olkiluotoon rakennettavan uuden EPR-tyyppisen ydinvoimalaitoksen toimintaa. PWR PACTEL -koelaitteistoon on asennettu kaksi kiertopiiriä ja pystyhöyrystimet. PWR PACTEL -koelaitteistossa käytetään alkuperäisen PACTEL-koelaitteiston paineastiaa, paineistinta ja hätäjähdytys-

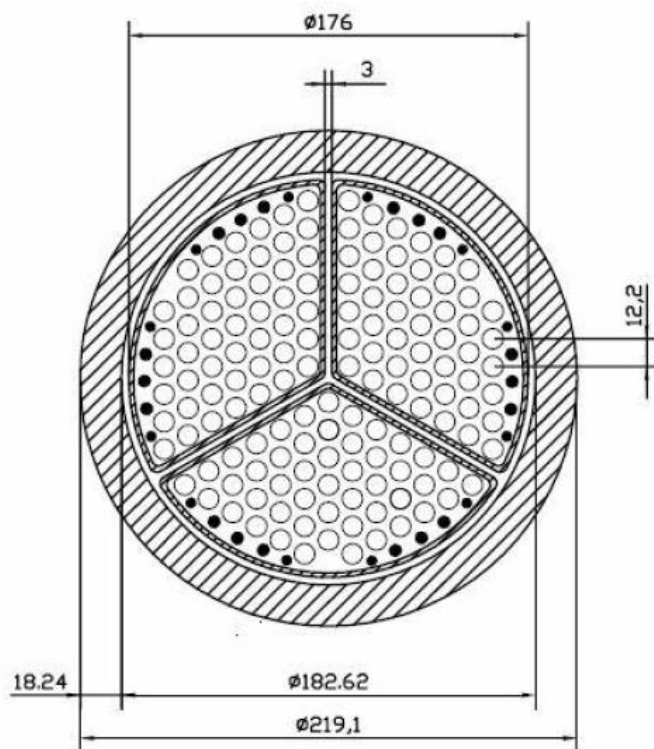
järjestelmää. Koelaitteiston tarkoituksena on kerätä tietoa EPR-tyyppisen ydinvoimalaitoksen termohydraulisesta käyttäytymisestä, erityisesti pystyhöyrystimien osalta. Saatuja mitaustuloksia voidaan käyttää muun muassa simulointiohjelmien kelpoistamiseen ja asiantuntijoiden kouluttamiseen. PWR PACTELin rakenne on esitetty kuvassa 2.1. (Riikonen et al. 2009 s.1, 5-8, A2)



Kuva 2.1. PWR PACTEL -koelaitteisto (Riikonen et al. 2009 s.6)

2.2 Rakenne

Koelaitteistossa tehollinen sydänosa on sisähalkaisijaltaan 182,64 mm ja korkeudeltaan 2,42 m. Polttoainesauvoja simuloivat 144 sähkövastusta, joilla voidaan tuottaa maksimissaan 1 MW teho. Vastussauvat on aseteltu VVER-laitoksen sydänrakenteen mukaisesti kolmihilaan. Sydänsimulaattorissa on kolme virtauskanavaa, joissa kussakin 48 vastusta. Tämä rakenne kuvaa VVER-laitoksen kolmen polttoainepun yhtymäkohtaa. Kaikille kolmelle vastusjoukolle voidaan käyttää eri tehoa. Vastusjoukkojen väliin jää 3 mm leveä virtauskanava. Sydämen rakenne on esitetty kuvassa 2.2. (Riikonen et al. 2009 s.7,A3, OECD 2001 s.85)



Kuva 2.2. PWR PACTEL -koelaitteiston sydämen rakenne. (Riikonen et al. 2009 s.8)

Alasmenotila koostuu kahdesta erillisestä pystyputkesta, jotka on liitetty toisiinsa laippaliitoksella. Ylempi osa on pituudeltaan 0,94 m ja se on halkaisijaltaan paksumpi kylmien haarojen liitosten takia. Ulkohalkaisija on 180 mm. Alempi osa, joka on pituudeltaan 4,955 m, on halkaisijaltaan ohuempi, koska se on skaalattu alkuperäisessä PACTEL-koelaitteistossa oikeaan kokoluokkaan VVER-laitokseen nähden. Tämän osan ulkohalkaisija on 88,9 mm.

Kylmien haarojen liitoskohdassa, alasmienotilan yläosassa on diffuusori, ohjaamassa hätäjähdytysveden kulkua laitteistossa. Alatilaa simuloiva osa koostuu kahdesta putkesta, joiden ulkohalkaisija on 168,3 mm. Nämä putket muodostavat laitteiston alaosan U-putkikenteen. (Riikonen et al. 2009 s.8, A28, Tuunanen et al. 1998 s.13)

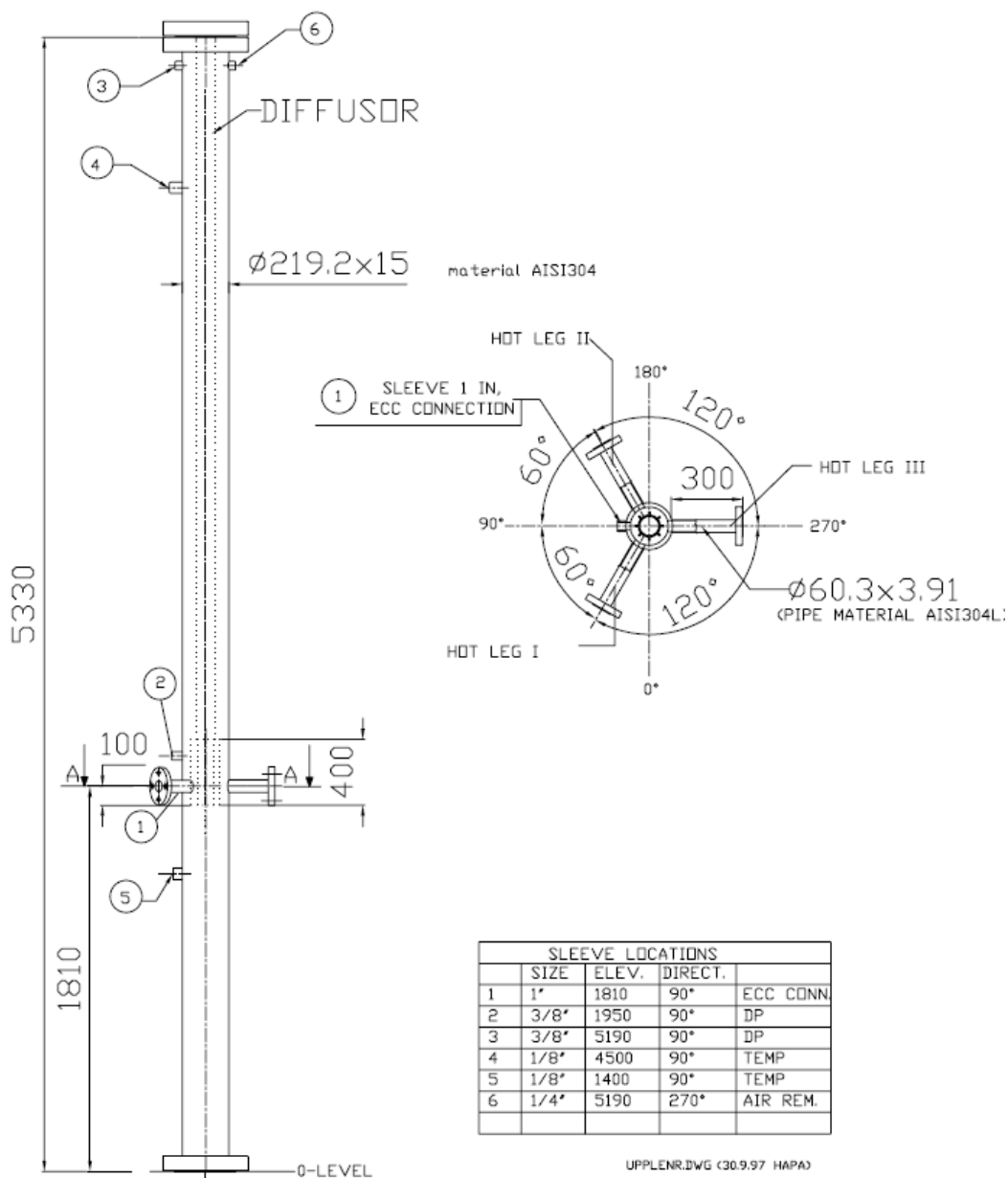
PWR PACTEL -koelaitteistoon on asennettu uudet EPR-laitoksen höyrystimiä simuloivat pystyhöyrystimet. Laitteistoon kuuluu kaksi pystyhöyrystintä ja niihin liittyvät kiertopiirit. Höyrystimien korkeus on tilanpuutteesta johtuen neljäsosa EPR-laitoksen höyrystimien korkeudesta. Höyrystimen sisällä on 51 lämmönvaihtoputkea, jotka kulkevat ensin höyrystimen pohjalta ylös ja kääntyvät yläosassa olevan U-mutkan jälkeen kulkemaan takaisin alas. Putkien sisähalkaisija on 16,57 mm ja keskimääräinen pituus 6,5 m. Sekundääripuolella höyrystin on jaettu höyryosaan, alasmienotilaan ja nousukanavaan, joista alasmienotila ja nousukanava on jaettu edelleen kuumaan ja kylmään osaan. Jako ei ole vesitiivis, joten pieniä ristivirtauksia pääsee syntymään ja paine pääsee tasaantumaan puoliskojen välillä. (Riikonen et al. 2009 s.8-10)

Paineistinta kuvaava osa on kahdesta osasta koostuva, 8,8 m korkea putki, joka on sisähalkaisijaltaan 139,7 mm. Paineistin on alun perin rakennettu vastaamaan VVER-440-laitoksen paineistinta korkeusskaalassa 1:1 ja siitä johtuen se on EPR-laitoksen paineistimeen verrattuna lyhyempi. Paineistimessa on sekä lämmitys että ruiskutusjärjestelmät, joilla primääripiirin painetta säädetään. Paineistin on liitetty toisen kiertopiirin kuumaan haaraan. (Riikonen et al. 2009 s. 10–11, Tuunanen et al. 1998 s.10,16)

Laitteistoon kuuluu myös hätäjähdytysjärjestelmä. Järjestelmään kuuluvat korkea- ja matalapainepumput sekä kaksi erillistä vesiakkua. Matalapainejärjestelmä syöttää hätäjähdytysvettä alasmienotilaan ja ylätilaan. Alkuperäisessä koelaitteistossa korkeapainehätäjähdytysvesi syötettiin ensimmäisen kiertopiirin kylmään haaraan. PWR PACTEL -koelaitteistossa korkeapainehätäjähdytysjärjestelmän liitoskohta tehdään koelaitteistoon myöhemmin tarpeen mukaan. (Riikonen et al. 2009 s.11, Tuunanen et al. 1998 s.16)

2.2.1 Ylätila

Tämän työn kannalta olennainen osa on reaktorin paineastian ylätilaa kuvaava osa. Ylätila alkaa sydämen yläpuolella olevasta laippaliitoksesta, joka on +6,94 metriä laitteiston alimman kohdan yläpuolella. Ylätila on perusrakenteeltaan putki, joka on yläpäätä suljettu. +7,35 metrin korkeudella ylätilassa on kiertopiirien kuumien haarojen liitoskohdat. Ylätilan yläosassa on +12,27 metrin tasolla, jossa se päättyy sokeoituun laippaliitokseen. Ylätilaa kuvaavan putken sisähalkaisija on 189,1 mm ja seinämien paksuus 15 mm. PACTEL-koelaitteiston ylätilan rakenne on esitetty kuvassa 2.3. PWR PACTEL -koelaitteistossa kuumien haarojen liitiskohta on alempana. (Riikonen et al. 2009 s.8, A3, Tuunanen et al. 1998 s.A49)

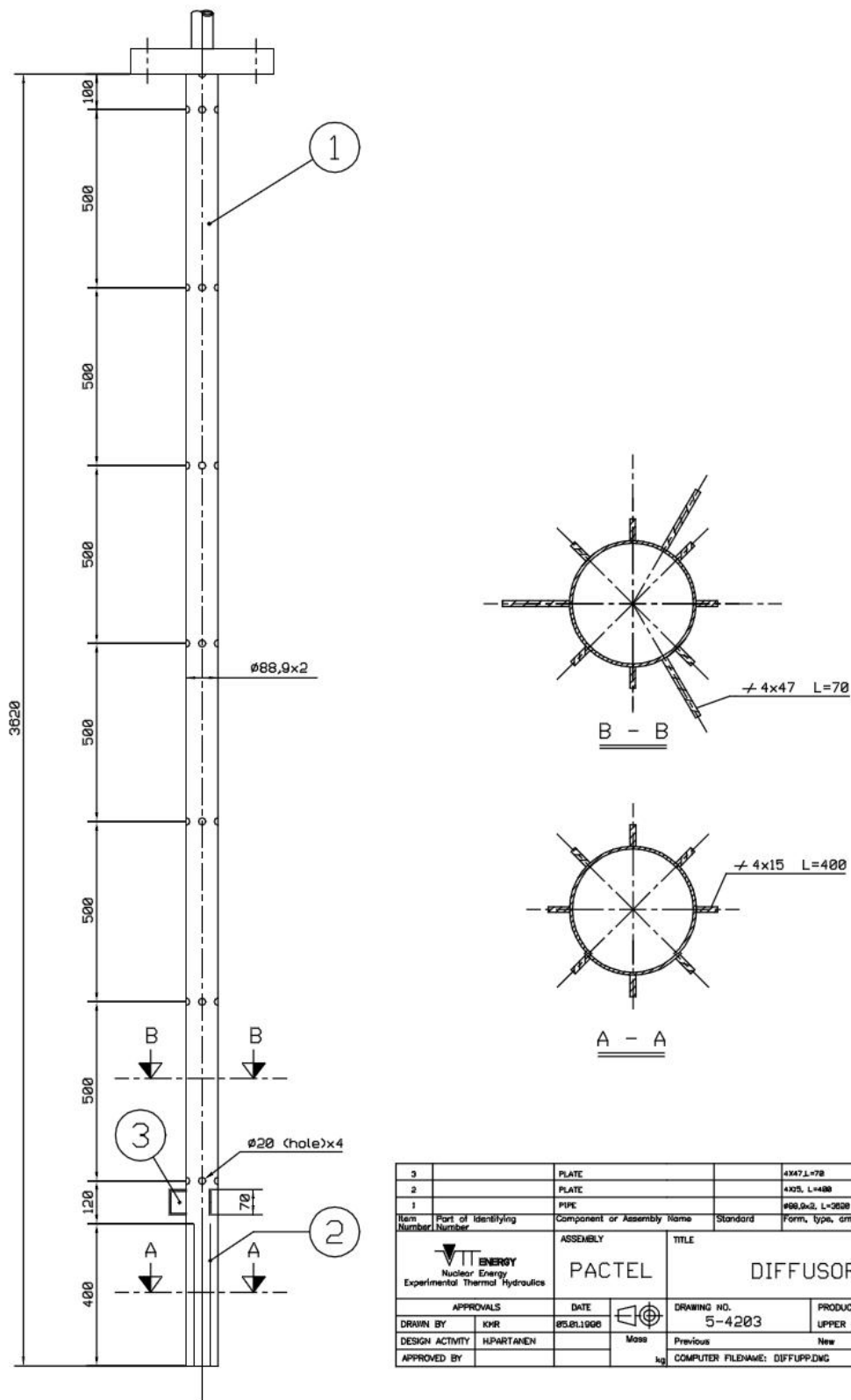


Kuva 2.3. PACTEL-koelaitteiston ylätila (Tuunanen et al. 1998 s.A11)

Ylätilan yläosassa on diffuuseriputki, jonka sisähalkaisija on 84,9 mm, seinämän paksuus 2 mm ja korkeus 3,62 m. Diffuuseri on rakennettu aikanaan PACTEL-koelaitteistoon, jossa sen tarkoituksena on tasoittaa jäähdytystä, estämällä hätäjähdytysvettä virtaamasta hätäjähdytysyhteestä suoraan samalla tasolla oleviin PACTEL-koelaitteiston kuumiin haaroihin. PWR PACTEL -koelaitteiston kuumien haarojen liitoskohta on alempana kuin alkuperäisen PACTEL-koelaitteiston. Diffuuseriputken alaosa on +8,65 metrin korkeudelta. Sen alaosassa on diffuuseriputken ulkopuolelle asennettu levyjä 400 mm matkalle. Diffuuseri-

putki jatkuu ylätilan yläosaan asti. Putkessa on 500 mm välein neljä halkaisijaltaan 20 mm reikää. Diffuusoriputken rakenne on esitetty kuvassa 2.4. (Riikonen et al. 2009 s.8, Leppänen 2000 s.20, Tuunanen et al. 1998 s.A35)

Laitteiston ylätilaan on asennettu mittalaitteita mittaamaan lämpötilaa, painetta ja paineroja. P0001 on paineenmittauspiste, joka sijaitsee 12,17 metrin korkeudella. T0375 on lämpötilamittauspiste ylätilan pohjalla 8,34 metrin korkeudella ja T0376 lämpötilanmittauspiste ylätilan yläosassa, 11,44 metrin korkeudessa. Lähinnä näiden kolmen mittauspisteen avulla saadaan tietoa ylätilan käyttäytymisestä kokeiden aikana. (LUT)



Kuva 2.4. Ylätilan diffusori (Tuunanen et al. 1998 s.A35)

2.3 Lämpöhäviöt

Lämpöhäviöiden osuus suhteessa PWR PACTEL –koelaitteiston käytettyyn tehoon on merkittävä. Laitteiston monimutkaisuuden takia pelkkä lämpöhäviöiden teoreettinen tarkastelu on hyvin epätarkkaa eikä anna kokonaiskuvaa vaikutuksista. Tämän vuoksi on tehty useita lämpöhäviökokeita alkuperäiselle PACTEL koelaitteistolle vuosina 1990–1994 ja 2002–2003 sekä PWR PACTEL –koelaitteistolle 2009. (Riikonen 2009 s.20)

2.3.1 Lämpöhäviöiden laskentamenetelmät

Lämpöhäviöiden mittaamiseen on koelaitteistossa käytettävissä kaksi keinoa: transienttimenetelmä ja tasapainotilan menetelmä. Transienttimenetelmässä koelaitteisto lämmitetään tiettyyn lämpötilaan ja annetaan sitten jäähtyä lämpöhäviöiden vaikutuksesta. Tasapainotilan menetelmässä taas pyritään tuottamaan teho, jolla laitteiston lämpötila pysyy vakiona. Tällöin tuotettu teho vastaa höyrystimien kautta siirtyvää lämpöä ja lämpöhäviöitä. Transienttimenetelmä vaatii näistä kahdesta enemmän laskentaa, mutta tuottaa tarkkoja tuloksia. Tasapainotilan menetelmä taas tuottaa tietoa vain lämpöhäviöistä tietyllä piirin lämpötilalla. (Riikonen 2009 s.20–22)

Transienttimenetelmässä on kaksi erillistä vaihetta: lämmitysvaihe ja jäähtymisvaihe. Lämmitysvaiheessa laitteiston lämpötila nousee kohti haluttua lämpötilaa. Tämän vaiheen energiatasapainoa kuvaa yhtälö (1). Jäähdytysvaiheessa lämmitysteho kytketään pois päältä ja laitteiston lämpötila laskee. Tämän vaiheen energiatasapainoa kuvaa yhtälö (2). (Riikonen 2009 s.20)

$$C \left(\frac{dT}{dt} \right)_h = P_h - \sum(\dot{m}\Delta h)_h - \Phi_h - \sum(\dot{m}_{out}h_{out})_h + \dot{m}_h h \quad (1)$$

Missä:

C on lämpökapasiteetti [J/K]

T	on lämpötila	[°C]
t	on aika	[s]
P	on sydämen lämmitysteho	[W]
\dot{m}	on massavirta	[kg/s]
h	on entalpia	[J/kg]
Φ	on prosessin lämpöhäviöt	[W]

$$C \left(\frac{dT}{dt} \right)_c = P_c - \sum (\dot{m} \Delta h)_c - \Phi_c + \dot{m}_h h_{prz} \quad (2)$$

Yhtälöissä (1) ja (2) oikealla puolella oleva toinen termi kuvaa höyrystimien kautta siirtyvää lämpöä. Koska laitteistossa ei ole pääkiertopumppuja, vähenee kierto piirissä jäähtyvissä vaiheissa aikana. Tämän vuoksi ei höyrystimien kautta siirtyvää lämpömäärää pystytä tarkasti määrittelemään, mutta voidaan myös olettaa, että lämmönsiirtyminen höyrystimien sekundääripuolelle on vähäistä hitaasta kierrosta johtuen. (Riikonen 2009 s.20–21)

Tasapainotilan menetelmässä pyritään saamaan tuotettu teho samansuuruiseksi kuin lämpöhäviöiden ja höyrystimen sekundääripuolelle poistuvan lämmön summa. Tällöin lämpötila piirissä pysyy vakiona. Tällöin saadaan selville lämpöhäviöt tasapainotilan lämpötilassa. Tämän menetelmä on esitetty yhtälössä (3). (Riikonen 2009 s.22)

$$\Phi = P - \sum \dot{m} \Delta h \quad (3)$$

2.3.2 Mitatut lämpöhäviöt

Vuonna 2009 tehdyssä PWR PACTEL -koelaitteiston lämpöhäviökokeessa käytettiin monia menetelmiä lämpöhäviöiden määrittelyyn. Lämpöhäviökokeen aluksi piiri täytettiin vedellä, jonka lämpötila oli 20–25 °C. Tämän jälkeen piiri lämmitettiin 270 °C lämpötilaan. Lämmitysvaiheessa tehoa vaihdeltiin 32 ja 105 kW välillä. Tehoa vaihdeltiin, jotta vesi ei pääsisi kiehumaan piirissä. Kun piirin lämpötila saavutti 270 °C, säädettiin lämpöteho 25 kW, joka vastasi melko tarkasti tasapainotilan menetelmän mukaista tasapainolämpötilaa.

Kahden tunnin jälkeen lämmitysteho kytkettiin pois päältä ja piirin annettiin jäähtyä transi-enttimenetelmän mukaisesti. (Riikonen 2009 s.23)

Koeraportissa lämpöhäviöt jaetaan kahteen luokkaan: eristeiden läpi johtuvat lämpöhäviöt ja eristämättömien osien kautta syntyvät lämpöhäviöt. Eristämättömiä osia laitteistossa ovat esimerkiksi venttiilit ja tukirakenteet. Lämpöhäviökokeilla ei kuitenkaan voida erottaa näitä lämpöhäviöitä toisistaan. Koeraportissa esitetyt lämpöhäviöt prosessille on esitetty taulukossa 2.1 ja laskennalliset lämpöhäviöt eristämättömille osille taulukossa 2.2. (Riikonen 2009 s.26, 30)

Taulukko 2.1. Vuoden 2009 lämpöhäviökokeen jäähtymisvaiheen mukaiset lämpöhäviöt PWR PACTEL -koelaitteistolle eri lämpötiloissa. (Riikonen 2009 s.26)

Lämpötila [°C]	Lämpöhäviöt [kW]
120	3,7 ±1,5
130	3,7 ±1,4
140	4,6 ±1,7
150	6,6 ±2,1
160	7,8 ±2,2
170	8,4 ±2,1
180	8,3 ±1,9
190	8,8 ±1,8
200	9,6 ±1,8
210	11,1 ±1,8
220	11,7 ±1,8
230	12,2 ±1,8
240	13,9 ±1,8
250	16,3 ±2,0
260	20,7 ±2,8
270	23,0 ±3,8

Taulukko 2.2. Vuoden 2009 lämpöhäviökokeen mukaiset lämpöhäviöt PWR PACTEL –koelaitteiston eristämättömille osille 265 °C lämpötilassa. (Riikonen 2009 s.30)

Komponentti	Lämpöhäviö
Piirin venttiilit	5058 W
Paineistinlinjan venttiilit	500 W
Tukirakenteet	862 W
Paine-ero mittausten liitännät	274 W
Sydämen alemmat laipat	175 W
Sydämen ylemmät instrumentointilaipat	302 W
Yhteensä	7170 W

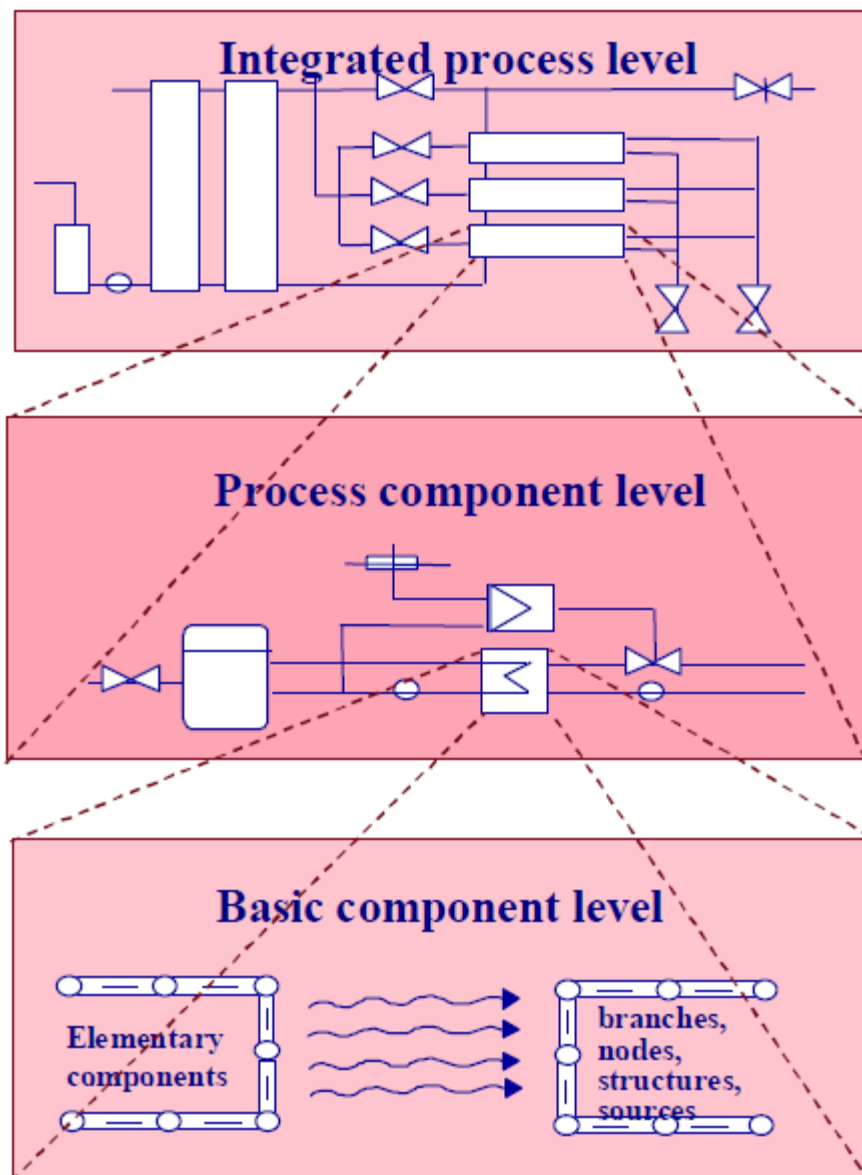
Kokeen perusteella eristämättömien osien lämpöhäviöt vastaavat noin kolmasosaa kaikista lämpöhäviöistä. Tulosten suhteelliset epävarmuudet ovat kuitenkin merkittäviä. (Riikonen 2009 s.31)

3 APROS-SIMULOINTIOHJELMISTO

APROS (Advanced Process Simulation Environment) on VTT:n ja Fortumin kehittämä simulointiohjelma, joka on tarkoitettu ydinvoimalaitosten, polttovoimalaitosten ja paperitehtaiden mallintamiseen ja dynaamisten prosessien simulointiin. Itse APROS käsittää laskentaohjelmiston ja valmiiden komponenttimallien kirjaston. Simuloinnissa virtaus voi olla vain yksiulotteinen. Lisäksi ohjelmaa voidaan käyttää myös sähkö- ja automaatiojärjestelmien mallintamiseen. Ohjelman käyttämistä helpottaa graafinen Grades-käyttöliittymä, jolla voidaan käyttää tässä työssä käytettyä APROS-ohjelman versiota 5.09. Grades-käyttöliittymän avulla voidaan rakentaa malleja komponenttikirjaston pohjalta asettamalla halutut komponentit, niiden väliset yhteydet ja alkuarvot. Tämän jälkeen käyttäjä voi simuloida laitteiston toimintaa. Lisäksi Grades tarjoaa työkalut simuloinnin reaaliaikaiseen seurantaan. (Porkholm et al. 2008 s.2, VTTa s.1, VTTb)

3.1 Toiminnan perusteet

APROS voidaan toimintansa kannalta jakaa kolmeen toimintatasoon. Käyttäjän kannalta keskeisin taso on keskimäinen, eli prosessikomponenttitaso. Tällä tasolla käyttäjä käsittelee valmiita komponenttimalleja, jotka simuloivat yksittäisiä prosessin komponentteja, kuten putkia tai pumppuja. Tämän tason alapuolella on peruskomponenttitaso tai laskentataso, jossa valmiit komponentit on jaettu noodeihin ja niiden välisiin haaroihin, jossa varsinainen laskenta tapahtuu. Ylimpänä tasona taas on integroitu prosessitaso. Tällä tasolla komponentit tai komponenteista rakennetut aliprosessit kootaan yhteen kokonaiseksi prosessimalliksi. APROS-simulointiohjelman toimintatasorakenne on esitetty kuvassa 3.1. (VTTa)



Kuva 3.1. APROS-simulointiohjelman toimintatasot. (VTTa)

APROS voi käyttää virtausten ratkaisussa kolmea ratkaisutapaa: homogeeninen malli, viisi-yhtälömalli tai kuusi-yhtälömalli. Kaikissa malleissa laskennan lähtökohtana ovat massan, liikemäärän ja energian ratkaisevat yhtälöt. Merkittävämpänä erona eri mallien välillä on, lasketaanko suuret erikseen nesteelle ja höyrylle, vai yhteinen suure seokselle. Mallien välillä on myös muita eroja. Eri mallien ratkaisutavat massalle, liikemäärälle ja energialle on esitetty taulukossa 3.1. (VTTc s.1-2, VTTd s.1-2)

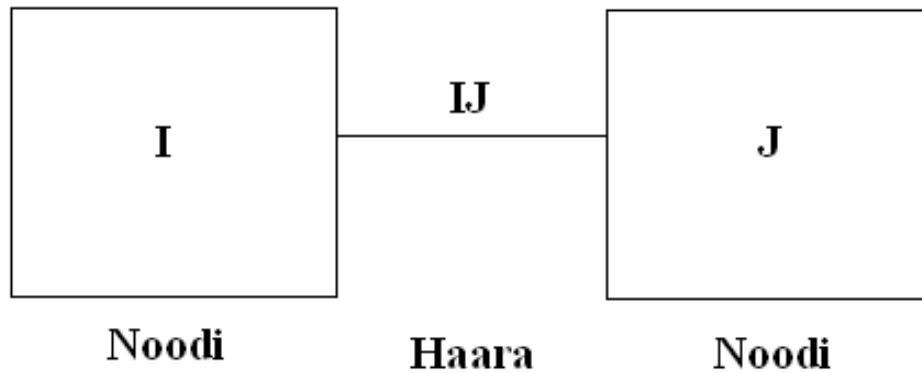
Taulukko 3.1. Massan, liikemäärän ja energian ratkaisutavat APROS-simulointiohjelman eri ratkaisumalleille. (VTTd s.1)

Yhtälöt	Homogeeninen malli	Viisiyhtälömalli	Kuusiyhtälömalli
Höyryn massa		X	X
Nesteen massa		X	X
Seoksen massa	X		
Höyryn liikemäärä			X
Nesteen liikemäärä			X
Seoksen liikemäärä	X	X	
Höyryn energia		X	X
Nesteen energia		X	X
Seoksen energia	X		

Ydinvoimalaitosten termohydrauliseen simulointiin käytetyillä ohjelmilla havaitaan ongelmia tiettyjen tapausten simuloinnissa. Esimerkkejä tällaisista tapauksista ovat muun muassa lämmönsiirto superkriittisessä paineessa, liikemäärän siirtyminen faasien välillä ja suurien tilavuuksien simulointi, kun virtausta ei voida käsitellä yksiulotteisena. Viimeksi mainittu ongelma on keskeinen tämän työn kannalta. Yleensä tämä ongelma esiintyy suurissa tilavuuksissa, kuten paineastiassa ja höyrystimien sekundääripuolella. PWR PACTEL –koelaitteiston paineastian ylätilaa mallintava osa on yläpäästä suljettu putki, jonka sisällä voi olla virtausta useaan suuntaan yhtä aikaa. (Hänninen 2009 s.18–21, Riikonen et al. 2009 s.6)

3.2 Laskenta ja tärkeimmät yhtälöt

Kuten edellä on mainittu, tapahtuu varsinainen laskenta laskentatason noodeissa ja haaroissa. Tilasuureet, kuten esimerkiksi paine ja entalpia, lasketaan noodeissa ja virtaukseen liittyvät suureet, kuten nopeus, taas lasketaan noodien välisissä haaroissa. Noodeja ja haaroja on havainnollistettu kuvassa 3.2. (VTTc s. 1-2)



Kuva 3.2. Laskentatason noodit ja haarat.

APROS-laskenta kaikissa ratkaisumalleissa perustuu massansäilymissyhtälöön (4), Liikemäärän säilymissyhtälöön (5) ja energiansäilymissyhtälöön (6), joiden pohjalta ratkaistaan simuloinnissa tarvittavat arvot. Näiden lisäksi tarvitaan monia muita laskentayhtälöitä. (VTTe)

$$\frac{\partial \alpha \rho}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \rho v}{\partial z} = \Gamma \quad (4)$$

Missä:

α	on aukko-osuus	
ρ	on tiheys	[kg/m ³]
v	nopeus	[m/s]
z	virtauksen suuntainen koordinaatti	
Γ	massan muutosnopeus	[kg/m ³ s]

$$\frac{\partial \alpha \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \rho v^2}{\partial z} = \Gamma v_i + \alpha \rho g + F_w + F_i \quad (5)$$

Missä:

v_i	on rajapinnan virtausnopeus	[m/s]
g	on maan vetovoiman kiihtyvyys	[m/s ²]
F_w	on seinämän kitkavoima	[N/m ³]
F_i	on rajapinnan kitkavoima	[N/m ³]

$$\frac{\partial A \rho h}{\partial t} + \frac{\partial A \rho v h}{\partial z} = \alpha \frac{\partial p}{\partial t} + \Gamma h_i + q'''_i + F_w v + F_i v \quad (6)$$

Missä:

$$p \quad \text{on paine} \quad [\text{Pa}]$$

$$q'''_i \quad \text{on lämpövirta faasien välillä} \quad [\text{W/m}^3]$$

Yhtälöissä tarvittavat tiheydet linearisoidaan paineen avulla yhtälöllä (7) (Hänninen 2009 s.23).

$$\rho^n = \rho + \frac{\partial \rho}{\partial p} (p^n - p) \quad (7)$$

Missä:

$$n \quad \text{on tuntematon suure}$$

Kaksifaasilaskennassa on neste- ja höyryfaasien yhtälöt liitettävä toisiinsa käyttäen sopivia yhtälöitä. Nämä yhteydet löytyvät yhtälöistä (8), (9), (10) ja (11). Yhtälö (8) kuvaa faasien aukko-osuuksien välistä yhteyttä, yhtälö (9) massanmuutosnopeuksien välistä yhteyttä, yhtälö (10) faasien rajapinnan kitkavoimaa ja yhtälö (11) rajapinnan virtausnopeutta. (Hänninen & Ylijoki. 2008 s.18)

$$\alpha_g = 1 - \alpha_l = \alpha \quad (8)$$

Missä:

$$\alpha_g \quad \text{on kaasun aukko-osuus}$$

$$\alpha_l \quad \text{on nesteen aukko-osuus}$$

$$\Gamma_g = -\Gamma_l = \Gamma \quad (9)$$

Missä:

$$\Gamma_g \quad \text{on kaasun massan muutosnopeus} \quad [\text{kg/m}^3\text{s}]$$

$$\Gamma_l \quad \text{on nesteen massan muutosnopeus} \quad [\text{kg/m}^3\text{s}]$$

$$F_{i,l} = -F_{i,g} = F_i \quad (10)$$

Missä:

$F_{i,l}$ on nesteen rajapinnan kitkavoima [N/m³]
 $F_{i,g}$ on kaasun rajapinnan kitkavoima [N/m³]

$$v_{i,g} = v_{i,l} = v_i \quad (11)$$

Missä:

$v_{i,g}$ on kaasun rajapinnan virtausnopeus [m/s]
 $v_{i,l}$ on nesteen rajapinnan virtausnopeus [m/s]

Jos simuloinnissa otetaan huomioon lämpöhäviöt seinämien läpi, kuvaa yhtälö (12) lämmönsiirtoa virtaavasta aineesta märälle seinälle, jonka lämpötila on kiehumispisteen alapuolella. Vastaavasti kuivalle seinälle, jonka lämpötila on korkeampi kuin veden kiehumispiste, käytetään lämmönsiirron laskemiseen yhtälöä (13). (Hänninen & Ylijoki 2008 s.46–47)

$$q''_{tw} = \frac{0,023 Re_l^{0,8} Pr_l^{0,4} \lambda_l}{D} (T_w - T_l) \quad (12)$$

Missä:

q''_{tw} on lämpövuoto seinämään [W/m²]
 Re_l on nesteen Reynoldsin luku
 Pr_l on nesteen Pradtlin luku
 λ_l on nesteen lämmönjohtavuus [W/m °C]
 D on hydraulinen halkaisija [m]

$$q''_{tw} = k_{wg,max} (T_w - T_l) \quad (13)$$

Missä:

$k_{wg,max}$ on suurin lämmönsiirtokerroin [kg/m³ s]

Yhtälössä (13) esiintyvä lämmönsiirtokerroin on suurin neljästä lämmönsiirtokerroimesta, jotka voidaan laskea yhtälöillä (14), (15), (16) ja (17). Yhtälön (14) lämmönsiirtokerroin on allaskiehuksella, yhtälöiden (15) ja (16) kertoimet ovat laminaarisen ja turbulenttisen pako-

tetun konvektion lämmönsiirtokertoimet ja yhtälön (17) kerroin taas on tarkoitettu luonnolliselle konvektiolle (Hänninen & Ylijoki 2008 s.47–48).

$$k_{wg} = 0,425 \left[\frac{\lambda_g^3 \rho_g g^{\frac{3}{2}} (\rho_l - \rho_g)^{\frac{3}{2}} (h_{g,sat} - h_{l,sat})}{\eta_g (T_w - T_g) \sigma^{1/2}} \right]^{1/4} \sqrt{1 - \alpha} [1 + 0,025(T_w - T_g)] \quad (14)$$

Missä:

η on dynaaminen viskositeetti [kg/m s]

σ on pintajännitys [N/m]

$$k_{wg} = \frac{3,66\lambda_g}{D_g} \quad (15)$$

$$k_{wg} = \frac{0,023\lambda_g}{D_g} \left[\frac{\rho_g |u_g| D_g}{\eta_g} \right]^{0,8} Pr_g^{0,4} \quad (16)$$

$$k_{wg} = \frac{\lambda_g}{D_g} \cdot \max(0,401 Gr_g^{\frac{1}{4}} Pr_g^{\frac{1}{4}}, 0,12 Gr_g^{\frac{1}{3}} Pr_g^{\frac{1}{3}}) \quad (17)$$

Missä:

Gr on Grashofin luku

3.3 Lauhtumiskorrelaatiot

APROS-simulointiohjelmaan on rakennettu eri vaihtoehtoja lauhtumiskorrelaatioille: Shah-korrelaatio, Chen-korrelaatio, Nusseltin teoreema sekä putken ulko- että sisäpinnoille. Lisäksi Shah- ja Chen-korrelaatioita voidaan käyttää joko Vierow-Schrock-korjauksen kanssa tai ilman sitä. Vierow-Schrock-korjaus vähentää rajapinnan lämmönsiirtymistä lauhtumatomien kaasujen läsnä-ollessa. Oletusarvona APROS käyttää Shah-korrelaatiota. (VTTF. 2010)

Shah-korrelaatiossa rajapinnan lämmönsiirtokerroin ratkaistaan yhtälöllä (18) ja siinä esiintyvä Reynoldsin luku yhtälöllä (19). (Hänninen & Ylijoki 2009 s.33)

$$H_{il} = \frac{0,092Re_l^{0,8}Pr_l^{0,4}\lambda_l}{D^2C_l} \left[(1 - X)^{0,8} + 3,8X^{0,76}(1 - X)^{0,04} \left(\frac{p_{cr}}{p} \right)^{0,38} \right] \quad (18)$$

Missä:

H_{il}	on rajapinnan lämmönsiirtokerroin	[kg/m ³ s]
X	on höyryn massan laadun tasapainokerroin	
p_{cr}	on kriittinen paine	[Pa]

$$Re_l = \frac{GD}{\eta_l} \quad (19)$$

Tässä työssä tutkitaan Shah-korrelaation korvaamista kahdella korrelaatiolla, jotka sopivat ylätilan simulointiin: Chen-korrelaatio ja Nusseltin teoreema putken sisäpinnoille. Näistä Chen-korrelaatio sopii rengas-filmi-yhteisvirtauksille sekä pysty- että vaakaputkissa. Siinä rajapinnan lämmönsiirtokerroin määritellään yhtälöllä (20). (Hänninen & Ylijoki 2009 s.34)

$$H_{il} = \frac{4Nu\lambda_l}{DC_l \left[\frac{\eta_l^2}{\rho_l^2 g} \right]^{0,33}} \quad (20)$$

Yhtälössä esiintyvä Nusseltin luku ratkaistaan yhtälöllä (21). (Hänninen & Ylijoki 2009 s.34)

$$Nu = \left[\left(0,31Re_l^{-1,32} + \frac{Re_l^{2,4}Pr_l^{3,9}}{2,37 \cdot 10^{14}} \right)^{0,33} + \frac{A \cdot Pr_l^{1,3}}{771,6} (Re_{l,t} - Re_l)^{1,4} Re_l^{0,4} \lambda_l \right]^{0,5} \quad (21)$$

Missä:

A	on kerroin
-----	------------

Yhtälössä (21) esiintyy kaksi eri Reynoldsin lukua. Termi $Re_{l,t}$ määritellään yhtälöllä (19) ja termi Re_l yhtälöllä (22). Lisäksi yhtälössä esiintyvä kerroin A määritellään yhtälöllä (23). (Hänninen & Ylijoki 2009 s.34–35)

$$Re_l = \frac{(1-\alpha)\rho_l|v_l|D}{\eta_l} \quad (22)$$

$$A = \frac{0,252\eta_l^{1,177}\eta_g^{0,156}}{D^2g^{0,666}\rho_l^{0,553}\rho_g^{0,78}} \quad (23)$$

Nusseltin teoreemassa pystysuorille pinnoille keskimääräinen lämmönsiirtokerroin kappa-leelle, jonka korkeus on L , yhtälöllä (24). (Hänninen & Ylijoki 2009 s.35)

$$\bar{H}_L = c \left[\frac{g\rho_l(\rho_l-\rho_g)k_l^3l'_{fg}}{\mu_l(T_{sat}-T_s)L} \right]^{0,25} \quad (24)$$

Missä:

c	on säätökerroin	
k	on lämmönjohtavuus	[W/m K]
l'	on modifioitu lämmönsiirtokerroin	[W/m ² °C]
L	on korkeus	[m]

Pystysuorille pinnoille käytetään yhtälön (24) säätökertoimelle, c arvoa 0,943. Lisäksi Rohsenow'n parannuksen mukaan l' määritellään yhtälöllä (25). (Hänninen & Ylijoki 2009 s.35)

$$l' = l + 0,68c_p(T_{sat} - T_s) \quad (25)$$

Missä:

l	on lämmönsiirtokerroin	[W/m ² °C]
c_p	on lämpökapasiteetti	[J/kg K]

3.4 Kuusiyhtälömalli

Kuusiyhtälömallissa on omat yhtälöt molempien faasien energioille, massoille ja liikemäärille. Nämä on kytketty toisiinsa erilaisilla korrelaatioilla, jotka kuvaavat esimerkiksi kitkaa ja lämmönsiirtoa. Tällä mallilla laskenta on raskasta ja vaatii paljon aikaa, koska paineet, virtaukset, aukko-osuus ja entalpiat ratkaistaan iteratiivisesti. Malli

soveltuu hyvin tarkkoihin simulointeihin kuten turvallisuusanalyysiin. Koska tässä työssä tavoitteena on suuri laskentatarkkuus tuloksille, kuusiyhtälömalli soveltuu parhaiten tähän työhön. (VTTc s.1-2, VTTd s.1-2)

Kuusiyhtälömallissa iteratiivinen laskenta tapahtuu tietyn järjestyksen mukaisesti. Iteraatiokierrosta toistetaan jokaisella aika- ja paikka-askeleella vähintään käyttäjän syöttämä minimimäärä tai kunnes molempien faasien massat ovat riittävän lähellä edellisen laskentakierroksen arvoja. Aika-askeleen ollessa välillä 0,001-0,1 sekuntia, päästään suhteellisessa massavirheessä yleensä alle 10^{-5} . Jos virhettä ei iteratiolla saada riittävän pieneksi, puolittaa ohjelma aika-askeleen pituuden. Yksi iteratiokierros sisältää seuraavat vaiheet: (Hänninen 2009 s.24–25)

1. Pumppujen, venttiilien ja turbiinien tilan laskenta.
2. Rajapinnan lämmönsiirto- ja kitka- sekä seinämäkitkakertoimien laskenta.
3. Paineyhtälön muodostus ja paineen ratkaisu.
4. Faasien nopeuksien ratkaisu.
5. Tiheyksien, höyrystymisentalpian ja lämpötilojen päivitys uuden paineen mukaan.
6. Aukko-osuuden yhtälön muodostaminen ja aukko-osuuden ratkaisu.
7. Lauhtumattomien kaasujen jakautuminen nesteeseen ja höyryyn ja osapaineiden laskenta.
8. Lämpörakenteiden liittäminen virtausmalliin ja niiden lämpövirtojen laskenta.
9. Faasien entalpioiden ratkaisu.
10. Lauhtumattomien kaasujen lämpötilojen ratkaisu, mikäli niitä esiintyy.
11. Rajapinnan massanmuutosnopeuden laskenta.
12. Iteroinnin tarkastus massavirheitä vertaamalla. Joko uusi iterointikierros tai valmis ratkaisu.
13. Iteroinnin valmistumisen jälkeen lasketaan booripitoisuus.

3.5 Yksiulotteisten simulointiohjelmien ongelmia

Maailmalla on käytössä monia ydinvoimalaitosten termohydrauliikan mallintamiseen käytettyjä simulointiohjelmiä. Tässä työssä käytetyn suomalaisen APROS-simulointiohjelman lisäksi ohjelmia ovat esimerkiksi RELAP5 (Reactor excursion and leak analysis program), ATHLET (Analysis of thermal-hydraulics of leak and transients), CATHARE (code of thermal-hydraulics during an accident of reactor and safety evaluation) sekä vuosituhaten vaihteessa kehitetty TRACE (TRAC/RELAP Advanced Computational Engine). Näissä simulointiohjelmissä termohydrauliset ratkaisuperiaatteet ovat samankaltaisia, mutta käytettyjen tasapainoyhtälöiden määrä voi vaihdella. (Hämäläinen 2005 s.17, Murray 2007 s.5)

Simulointiohjelmat ovat rakenteeltaan todella monimutkaisia. Ne sisältävät yleensä monia malleja ja korrelaatioita, joista vain osaa käytetään kunkin aika-askelen laskemiseen. Pienetkin muutokset, voivat johtaa suuriin muutoksiin mallin toiminnassa. (Pourgol-Mohammad et al. 2010 s.3-4)

Laskennallisesti kaksifaasivirtausta ei voida säännönmukaistaa yksiulotteisilla laskentakoodeilla, koska tiettyjä fyysisiä ilmiöitä, kuten pintajännitystä tai viskositeettia ei voida tarkasti mallintaa. Tämä johtuu keskiarvoistamisesta, jonka takia rajapintakappaleen kaarevuus ja paikallinen virtausgradientti katoavat. (Pokharna et al. 1997 s.13)

Kun järjestelmää simuloidaan termohydraulisilla laskentakoodeilla, on rakennettava halutun järjestelmän malli, joka kuvaa sen geometriaa. Laskentaohjelmissa käytetään yleensä erilaisia komponentteja, kuten putkia (pipe) tai noodeja (node) järjestelmän geometrian kuvaamiseen. Yleensä yksittäinen osa voidaan kuvata yhdellä komponentilla. Mikäli virtauspoikkipinta-ala on suuri, tarvitaan rinnakkaisia osia sen kuvaamiseen. Yksiulotteisilla laskentakoodeilla on haastavaa kuvata esimerkiksi tapauksia, joissa samassa putkessa kulkee rinnakkain kaksi virtausta, joilla on eri lämpötila tai eri suunta. Putkissa voi esiintyä monenlaisia virtausmuotoja, jotka riippuvat virtausnopeudesta, rajapinnan kitkasta ja putken seinämän lämpötilasta. Erityisen merkittäviä virtausmuodot ovat pysty- ja vaakasuuntaisten

putkien liittymäkohdissa. Näiden alueiden mallintamisessa tarvitaan yleensä erityisratkaisuja. (Hämäläinen 2005 s.60)

Simulointiohjelmat eivät mallinna turbulenssin aiheuttamaa poikittaissuuntaista sekoittamista virtauksessa. Tämän johdosta simuloinnissa ei myöskään esiinny rinnakkaisten noodien välistä lämpötilan tasaantumista. Ilmiö on merkittävä suurien, umpipäisten tilavuuksien, kuten ylätilan mallintamisessa. Yksiulotteisessa simuloinnissa tällaiset tilat saattavat alkaa toimia paineistimen tavoin ja alkaa säädellä piirin painetta. Toinen mahdollinen seuraus on ylätilan liian korkea lämpötila simuloinnin aikana. (Hämäläinen 2005 s.65)

Kun olemassa olevaa laitteistoa mallinnetaan, joudutaan yksiulotteisella ohjelmalla kuvaamaan kolmiulotteisia ilmiöitä. Jotkut ohjelmat saattavat sisältää erillisiä malleja kolmiulotteisten ilmiöiden mallintamisen helpottamiseksi. Kolmiulotteisuus voidaan huomioida mallia rakennettaessa, esimerkiksi mallintamalla tilavuudet rinnakkaisilla komponenttiketjuilla, yhden komponenttiketjun sijaan. Esimerkiksi paineastian mallinnuksessa simulointiohjelmilla yleisenä sääntönä on esitetty, että rinnakkaisten ketjujen määrän mallissa tulee olla vähintään yhtä suuri kuin kiertopiirien määrä laitteistossa. (Hämäläinen 2005 s.61–64)

Simulointiohjelmien tarkoituksena on kuvata laitteiston toimintaa matemaattisesti. Tärkeintä olisi pystyä kuvaamaan laitteistossa esiintyvät merkittävät fysikaaliset ilmiöt tarkasti. Tätä varten tarvitaan laitteiston riittävän tarkka malli sekä riittävästi mitattuja lähtöarvoja. Ongelmaksi muodostuu laskentamallien rajattu laskentapisteiden määrä. Laskentapisteiden määrän lisääminen vaatii tietokoneelta suurempaa laskentatehoa. Lisäksi tiheämpi nooditus ei aina takaa parempia laskentatuloksia. Noodituksen merkitys simulointitulosten kannalta on merkittävä, joten oikean noodituksen löytäminen kuhunkin malliin on tärkeää. (Hämäläinen 2005 s.61, Mangal et al. 2012 s. 2,15)

Eräs simulointiohjelmien haaste on simuloida boori- ja lämpötilarintamien etenemistä virtauksessa. Tämä ongelma olisi teoriassa mahdollista ratkaista, mutta toistaiseksi toimivien ratkaisujen vaatima laskentateho on ollut niin suuri, ettei niitä ole kannattanut liittää osaksi koodeja. (Hämäläinen 2005 s.17)

Edellä on esitetty yksiulotteisten simulointiohjelmien keskeisimpiä ongelmia, jotka saattavat haitata mahdollisimman tarkan simuloinnin suorittamista. Ongelmien pääkohdat on koottu taulukkoon 3.2.

Taulukko 3.2. Yksiulotteisten simulointiohjelmien ongelmat.

Ongelma	Tarkennus
Simulointiohjelmien monimutkaisuus	Pienetkin muutokset mallissa voivat aiheuttaa suuria poikkeamia simuloinnin tarkkuuteen.
Yksiulotteinen koodi	Aiheuttaa ongelmia kolmiulotteisen todellisuuden simuloinnissa
Nooditus	Laskentapisteitä on aina vain rajallinen määrä, kun todellisuudessa oman tilan omaavia pisteitä on äärettömästi.
Vaikeuksia monien ilmiöiden kanssa	Osin edellisistä syistä yksiulotteisilla koodeilla on vaikeaa tai mahdotonta mallintaa esimerkiksi rinnakkaisia virtauksia samassa tilassa, virtauksen poikittaissuuntainen sekoittuminen, boori- ja lämpötilarintamien eteneminen

4 SIMULOINTIOHJELMIEN KELPOISTUS

Kelpoistuksen tarkoituksena on osoittaa, että laskentaohjelma täyttää sille asetetut vaatimukset. Kelpoistuksen tulee osoittaa, että testattu ohjelma toimii oikein ja riittävän tarkasti tarkoitetuissa sovelluksissa. Ohjelma ei saa suorittaa ei-toivottuja toimia, jotka voivat haitata koko järjestelmää. Lisäksi on osoitettava, että kaikki ei-toiminnalliset vaatimukset, kuten suorituskyky, suunnittelurajoitukset ja ominaisuudet, täytetään. Pääsääntöisesti kelpoistus suoritetaan testaamalla ohjelmaa ja vertaamalla sen tuloksia dokumentoituihin testaustuloksiin, jotka sopivat ohjelmalle asetettuihin toimintatavoitteisiin. (Boyack & Ward 2000 s.1, 4)

OECD:n (Organisation for Economic Co-operation and development) alaisen NEA:n (Nuclear Energy Agency) alainen CSNI-komitea (Committee of the Safety of Nuclear Installations) on kehittänyt kelpoistuselementtejä. Alkuperäinen ITF (Integral Test Facility) –matriisiraportti julkaistiin 1987. Käytettäviä koetuloksia valittaessa käytettiin perusteena tulosten laatua, skaalauksen ja geometrian monipuolisuutta sekä tarkoituksenmukaisuutta. Näissä matriiseissa keskityttiin täysimittaisiin kokeisiin, joilla päästiin mahdollisimman lähelle oikeiden laitosten toimintaa. Samalla oletettiin, että simulointiohjelmien kehittäjät vertaisivat itse koodejaan kokeisiin, joissa mallinnetaan vain ydinvoimalaitoksen yksittäisiä osia. (Petruzzi & D’Auria 2007 s.2)

1980-luvun lopulla alettiin kehittää erillistä SETF (Separate Effects Test Facilities) –matriisia. Siinä otettiin laajemmin huomioon eri termohydrauliset ilmiöt ja erityyppiset testilaitokset ja muun muassa määriteltiin 67 ilmiötä, joiden oletettiin kattavan kaikki termohydrauliset ilmiöt sekä painevesilaitoksilla että kiehutusvesilaitoksilla. Lisäksi siinä määriteltiin kattavan kelpoistuksen laajuus: vähintään tuhat erillistä koetta. (Petruzzi & D’Auria 2007 s.2)

4.1 CSNI-matriisien käyttö

CSNI:n kelpoistusmatriisit koostuvat kuudesta osamatriisista. Ensimmäinen kertoo miten CSNI-matriisi kattaa ilmiön, toinen vertaa ilmiötä ja laitostyyppiä, kolmas vertaa ilmiötä ja testaustapaa, neljäs kuvaa testilaitteistojen sopivuutta ilmiöiden kuvaamiseen, viides testilaitteistojen käyttöä testityypeille ja kuudes vertaa testilaitteistoja ja laitostyyppiä. (OECD 2001 s.43–44)

Ilmiöillä tarkoitetaan tässä tapauksessa kaikkia matriisin kuvaaman tapahtuman aikana oletettavasti esiintyviä ilmiöitä. ”CSNI”-sarake kertoo, onko kyseistä ilmiötä jo tutkittu CSNI-matriisiin liittyen. Laitostyyppi-, testilaitteisto- ja testityyppisarakeet kuvaavat yksinkertaisesti, nimensä mukaisesti, laitteistoja ja kokeita. (OECD 2001 s.43)

Matriiseissa käytetään symboleja, joilla on oma merkityksensä, riippuen siitä missä osamatriisissa ne ovat.

1. CSNI-ilmiö -osamatriisi:
 - [+] Ilmiö katettu.
 - [o] Ilmiö osittain katettu.
 - [-] Ilmiötä ei katettu.
2. Ilmiö-laitostyyppi -osamatriisi:
 - [+] Ilmiö ominainen laitostyypille.
 - [o] Ilmiö osittain ominainen.
 - [-] Ilmiötä ei ominainen.
3. Ilmiö-testityyppi -osamatriisi:
 - [+] Ilmiö esiintyy testissä.
 - [o] Ilmiö esiintyy osittain, eli vain osa ilmiöstä esiintyy.
 - [-] Ilmiötä ei esiinny.
4. Ilmiö-koelaitteisto -osamatriisi:
 - [+] Koelaitteisto on suunniteltu kyseisen ilmiön simulointiin ja tarkasteluun.

- [o] Koelaitteistolla on mahdollista simuloida ja tarkastella kyseistä ilmiötä, mutta skaalaus tai sopimaton instrumentointi voivat aiheuttaa ongelmia.
 - [-] Koelaitteisto ei sovellu ilmiön tutkimiseen.
 - [x] Koelaitteiston oletetaan sopivan ilmiön tutkimiseen. Käytetään lähinnä uusien laitteistojen kohdalla, kun sopivuutta ei ole osoitettu.
5. Testilaitteisto–testityyppi -osamatriisi:
- [+] Koe suoritettu ja tuloksia voidaan käyttää simulointiohjelmien arviointiin.
 - [o] Koe suoritettu, mutta tulokset sopivat huonosti simulointiohjelmien arviointiin.
 - [-] Koetta ei suoritettu.
6. Laitostyyppi–testilaitteisto -osamatriisi:
- [+] Testilaitteisto kattaa laitostyyppin.
 - [o] Testilaitteisto kattaa laitostyyppin osittain.
 - [-] Testilaitteisto ei kata laitostyyppiä.

Lisäksi kaikissa osamatriiseissa tyhjä tila tarkoittaa tilannetta josta ei ole saatavilla tietoa. (OECD 2001 s.44–45)

Alkuperäinen PACTEL-koelaitteisto on mukana mm. OECD:n kelpoistumatriiseissa VVER-laitostyypeille pienten ja keskisuurien vuotojen tapauksessa. Kuten luvussa 3 on esitetty, PACTEL- ja PWR PACTEL –laitteistokomponenteissa käytetään osin samoja laitteisto-osia. Merkittävä ero koelaitteistojen välillä ovat erilliset kiertopiirit sekä erityyppiset höyrystimet. (OECD 2001 s.48)

Tätä työtä tehtäessä ei ole saatavilla matriisia, joka sisältäisi PWR PACTEL -koelaitteiston. VVER- ja PWR-laitostyyppit ovat samankaltaisia. Erityisesti pienen vuodon tapauksessa PWR- ja VVER-matriisit muistuttavat toisiaan. Suuren vuodon tapauksissa laitostyyppien käyttäytymisen välillä on eroja. Edellä mainitun VVER-laitostyyppin pienten ja keskisuurien vuotojen matriisin mukaan PACTEL-koelaitteisto soveltuu tasapainotilan kokeisiin sekä pienten vuotojen kokeisiin. Koska sekä kyseiset matriisit ovat samankaltaisia ja koelaitteistot rakenteeltaan lähellä toisiaan, voidaan tietyllä varauksella olettaa, että PWR PACTEL –

matriisi olisi näiltä osin samankaltainen kuin alkuperäinen PACTEL-koelaitteiston matriisi. (OECD 2001 s.48,82, OECD 1987 s.25)

Näiden tietojen pohjalta laadittiin matriisi PWR PACTEL –koelaitteistolle pienen vuodon tapauksessa. Matriisi pohjautuu CSNI-matriiseihin, jotka on rakennettu PWR- ja VVER-laitostyypeille. Vertailun vuoksi samaan matriisiin on sijoitettu myös muutama muu koelaitteisto. PMK-2 (Paks Model Experiment) on VVER-tyyppinen koelaitteisto ja PKL-I (Primärkreislauf-Versuchsanlage) sekä ROSA (Rig of Safety Assessment) ovat PWR-tyypisiä koelaitteistoja. (OECD 1987 s. 25, OECD 2001 s. 48, Mitsubishi Heavy Industries, LTD 2010 s.42)

Laadittu matriisi on esitetty kuvassa 4.1. Matriisin tiedot PWR PACTEL –koelaitteiston osalta pohjautuvat tässä työssä esitettyihin tietoihin ja ovat tekijän näiden tietojen pohjalta muodostama arvio. Muiden koelaitteistojen osalta tiedot perustuvat olemassa oleviin matriiseihin.

		Testityyppi							Koelaitteistot			Arvio
		Stationsäätitestil. Energian siirtyminen primääripiirissä	Stationsäätitestil. Energian siirtyminen sekundääripiirissä	Pieni vuoto yllisytöillä. Tarvitaan sekundääripiiri	Pieni vuoto ilman yllisytöitä. Tarvitaan sekundääripiiri	Keskikokoinen vuoto. Ilman sekundääripiiriä	Paineistimen vuoto	Höyrystymisen sisäinen vuoto	PMK-2	PKL-I	ROSA	
Ilmiöt	Luonnonkierto 1-faasivirtaus, primääripuoli	+	+	+	o	-	+	+	+	+		+
	Luonnonkierto 2-faasivirtaus, primääripuoli	+	-	o	+	+	o	-	+	+		+
	Kiehumis-kauhtumis-muoto ja CCFL	+	-	-	+	+	-	-	-	o		-
	Epäsymmetrinen piiriin käyttäytyminen	+	-	+	+	-	o	+	-	-	x	+
	Vuotovirtaus	-	-	+	+	+	+	+	o	o		o
	Faasinerotus ilman pinnankorkeuden muodostumista	+	-	o	+	+	+	+	o	o		o
	Vesi-höyry-seoksen pinnankorkeus ja entrainment-ilmio höyrystymässä	-	+	+	+	+	+	+	o	o		o
	Vesi-höyry-seoksen pinnankorkeus ja entrainment-ilmio sydämessä	+	-	-	+	+	+	-	o	o		o
	Kerrostuminen vaakaputkissa	+	-	-	+	+	-	-	o	o	x	o
	Hätäjäähdytyksen sekoittuminen ja lauhtuminen	-	-	o	+	+	+	+	o	o		o
	Vesilukkojen avautuminen	-	-	-	+	+	o	-	o	o		+
	Sydämenlaajuinen aukko- ja virtausjakautuminen	+	-	-	o	+	+	+	o	o	x	o
	Lämmönsiirto veden täyttämässä sydämessä	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+
	Lämmönsiirto osittain paljastuneessa sydämessä	+	-	-	o	+	-	-	o	o		+
	Lämmönsiirto höyrystymisen primääripuolella	+	o	o	+	+	o	o	o	o		+
	Lämmönsiirto höyrystymisen sekundääripuolella	o	+	+	+	+	+	+	o	o		+
	Paineistimen termohydrauliikka	o	-	o	o	+	+	+	o	-		o
	Paineistimen yhdyksinän hydrauliikka	o	-	-	o	+	+	o	o	-		o
	Pumpun käyttäytyminen 1- ja 2-faasitilanteessa	-	-	-	o	+	-	-	-	-		x
	Lämpöhäviöiden vaikutus	+	-	o	+	+	o	o	o	o		o
Lauhtumattomien kaasujen vaikutus	+	-	-	-	-	-	-	+	o		x	
Faasin erottuminen T-haarassa ja vaikutus vuotovirtaukseen	-	-	-	+	+	-	-	-	-		-	
Koelaitteistot	PMK-2	+	-	-	+	+	o	-				
	PKL-I	+	+	-	+	+						
	ROSA	+	+									
Arvio	PWR PACTEL	+	+	o	+	-	-	-				

Kuva 4.1. Kelpoistumatriisi PWR PACTEL -koelaitteistolle, pienen ja keski-suuren vuodon tapauksessa.

Kuten edellä on mainittu, perustuu esitetty matriisi vertailulaitosten osalta OECD:n olemassa oleviin matriiseihin sekä ROSA-koelaitteiston osalta myös osin Mitsubishin omaan matriisiin. Matriisin varsinaisena tarkoituksena on esittää arvio PWR PACTEL –koelaitteistosta. Tältä osin matriisin tiedot perustuvat PACTEL-koelaitteiston matriisiin. Arviota tehdessä on lähdetty olettamuksesta, että PWR PACTEL toimii höyrystimiä lukuun ottamatta samoin kuin PACTEL. Matriisista on jätetty pois sellaiset ilmiöt joita esiintyy ainoastaan VVER-tyyppisissä laitoksissa sekä sellaiset koetyypit jotka liittyvät VVER-laitoksiin. Näitä poikkeuksia lukuun ottamatta on arvioitu, että PWR PACTEL –koelaitteistolla voidaan suorittaa samoja kokeita ja sillä voidaan havainnoida samoja ilmiöitä kuin alkupe- räisellä PACTEL-koelaitteistolla.

4.2 Skaalaus

Yleensä koelaitteistoja ei ole mahdollista rakentaa oikeassa mittakaavassa. Tästä johtuen koelaitteistoa suunniteltaessa täytyy sille määritellä skaalaus. Koelaitteistosta on myös mahdollista rakentaa tietty osa alkuperäisen laitoksen mittojen mukaan ja skaalata samalla muita osia. Simulointiohjelmien kelpoistuksessa tulee ottaa huomioon, että ohjelman tulee pystyä mallintamaan sekä pienemmäksi skaalattu koelaitteisto, että sen esikuvana toimiva täysikokoinen laitos. Tämän varmistamiseksi on kelpoistuksessa mallinnettava samaa tilannetta eri skaalauksilla. Kaikesta huolimatta skaalauksen käsittely on simulointiohjelmien kehityksen kannalta hankala ongelma. Kaikkia ilmiöitä ei voida luotettavasti skaalata isompaan mittaluokkaan. Ongelmaan on esitetty monia lähestymistapoja, mutta kattavaa ratkaisua siihen ei ole. (Purhonen 2007 s.57, Petruzzi & D'Auria 2007 s.2, 9)

Simulointiohjelmien toimivuus ydinvoimalaitoksen mittakaavassa voidaan osoittaa kolmella tavalla. Ensinnäkin ydinvoimalaitoksen kokoluokassa olevan mallin on pystyttävä tuottamaan pienemmän skaalauksen kokeessa esiintyvät merkittävät ilmiöt. Toinen keino on verrata mallin tuloksia hyväksytyllä simulointiohjelmalla laskettuihin tuloksiin. Kolmas keino on verrata tuloksia oikeasta ydinvoimalaitoksesta saatuun mittausdataan. Tässä tulee ottaa huomioon, että kaikista tilanteista ei ole olemassa oikeaa mittausdataa toimivista ydinvoimalaitoksista. (Petruzzi & D'Auria 2007 s.6)

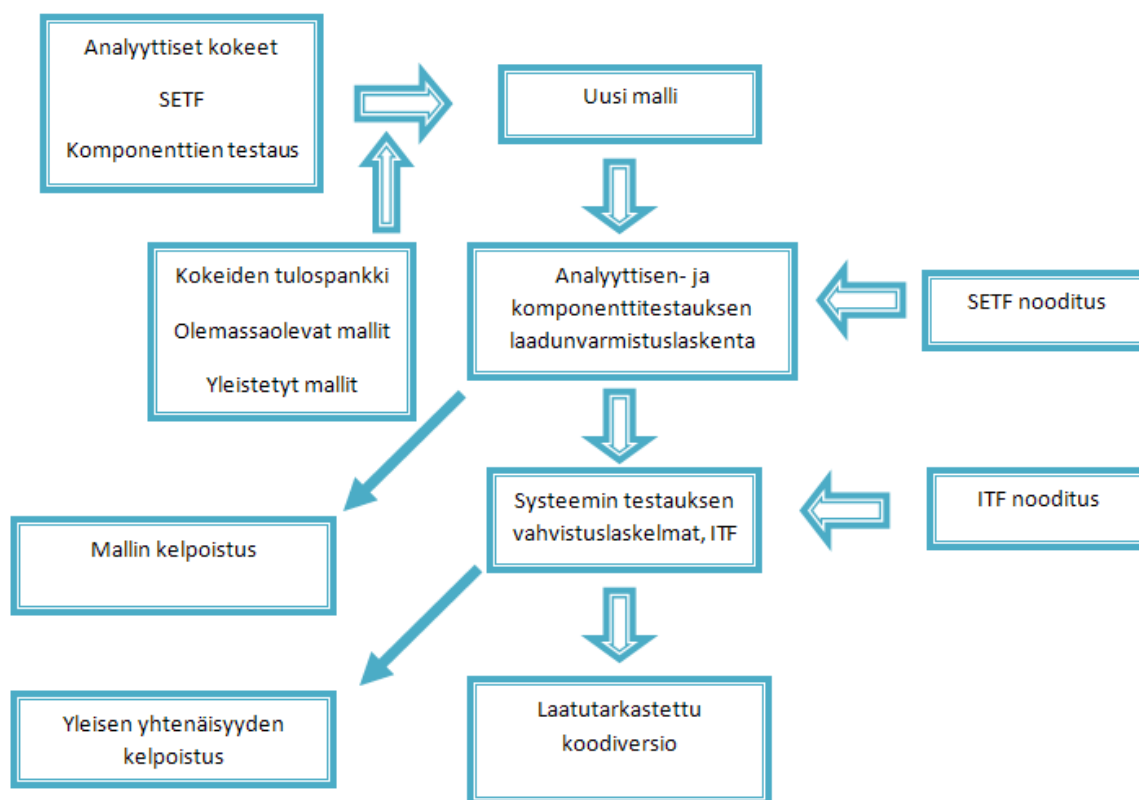
4.3 Kelpoistus osana laadunvarmistusta

Varsinainen kelpoistusprosessi suoritetaan osana simulointiohjelman laadunvarmistusta. Laadunvarmistustestauksen kaksi pääosaa ovat varmentaminen ja kelpoistus. Varmentamisessa pyritään osoittamaan, että simulointiohjelma täyttää sille asetetut vaatimukset koko sen elinkaaren ajan. Sillä pyritään varmistamaan, että ohjelma toimii, niin kuin se on suunniteltu toimimaan. Kelpoistuksessa vastaavasti pyritään osoittamaan, että suunnitellulla tavalla toimiva ohjelma pystyy laskemaan halutut simuloinnit riittävän tarkasti. (Boyack & Ward 2000 s.4)

Laadunvarmistusprosessi koostuu viidestä vaiheesta, joilla varmistetaan uuden simulointiohjelman tai uuden ohjelmaversioiden toimivuus:

1. Suoritetaan analyttiset kokeet, joihin kuuluvat erillisten ilmiöiden ja komponenttien testaukset.
2. Kehitetään säädöskokoelma täydelliselle tarkastukselle, analyttisten koetulosten tietokannasta. Peräkkäiset muutokset toteutetaan peräkkäisissä ohjelmaversioissa.
3. Suoritetaan laadunvarmistuslaskelmat analyttisille kokeille, joilla kelpoistetaan päätepisteiden väliset yhteydet.
4. Suoritetaan testauksen varmennuslaskelmat tai kokonaistestit, joilla kelpoistetaan mallin yleinen yhtenäisyys.
5. Ohjelmaversioiden laaduntarkastus on suoritettu ja dokumentoitu.

Simulointiohjelman laadunvarmistusvaiheet on esitetty kuvassa 4.2. (Petruzzi & D'Auria 2007 s.7-8).



Kuva 4.2. Termohydraulisen simulointiohjelmien laadunvarmistuksen vaiheet.

5 PWR PACTEL -SIMULOINTIMALLI

Tässä työssä hyödynnetään Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa käytettävää APROS-mallia PWR PACTEL -koelaitteistosta. Kyseinen simulointimalli perustuu alkuperäisestä PACTEL-koelaitteistosta tehtyyn APROS-simulointimalliin. (Leppänen 2000)

PWR PACTEL -simulointimalli sisältää 13 verkkoa, joissa kuvataan sydän ja ylätila, alasmenotila ja alatila, paineistin, ensimmäinen kiertopiiri ja höyrystin, ensimmäisen höyrystimen sekundääripuoli, toinen kiertopiiri ja höyrystin, toisen höyrystimen sekundääripuoli sekä hätäjähdytysjärjestelmä. Lisäksi mallissa on erilliset verkot, jotka kuvaavat lämmön siirtymistä seinämärakenteiden kautta koelaitteiston ulkopuolelle.

Sydänosa on mallissa rakennettu kolmesta reaktorikomponentista, joista jokainen kuvaa yhtä koelaitteiston sydämen polttoainenippua kuvaavaa osaa eli ns. sydänkanavaa. Sydämen ohivirtausosiota mallintaa putkikomponentti, joka vastaa kanavien väliin ja reunoille jäävien virtauskanavien tilavuutta. Mallissa käytettyä ylätilan rakennetta tarkastellaan luvussa 7.2.

Mallin yhdessä verkossa on mallinnettu alasmenotila ja alatila. Alasmenotilan yläosassa on mallinnettu ulompi rengastila ja sen sisällä oleva diffuusori-putki. Rengastila ja diffuusori on kuvattu noodeilla ja vaakavirtaukset niiden välillä putkilla. Muu osa alasmenotilasta sekä alatilasta on mallinnettu putkilla ja pisteillä (point).

Paineistin on mallinnettu samoin kuin ylätilan alaosa: kahdella rinnakkaisella ketjulla, jotka on rakennettu noodeista ja haaroista (branch). Näin mallinnuksessa huomioidaan paineistimen sisällä tapahtuvat ristivirtaukset ja sekoittuminen. Paineistimallissa on automatisoidut ruiskutus ja lämmitysjärjestelmät. Lämmitysjärjestelmä on jaettu 2 kW, 4 kW ja 7 kW suuruiset tehot tuottaviin lämpörakenteisiin, joilla simuloidaan koelaitteiston paineistimen lämpövastusrakenteita ja niiden lämmitystehon säätöä. Paineistimen kiertopiiriin liittävä putki on mallinnettu putkilla ja pisteillä.

Molempien höyrystimien primääripuolet ja pääkiertopiirit on mallinnettu samaan tapaan. Paineistin on liitetty toiseen kuumaan haaraan. Pääkiertopiirit on mallinnettu putkilla ja pisteillä. Höyrystimen kollektorit on mallinnettu noodeilla. Höyrystimien lämmönsiirtoputket on mallinnettu viidellä putkella, jotka kuvaavat eripituisia putkiryhmiä. Molempiin kylmiin haaroihin voidaan tarvittaessa avata vuoto venttiilien avulla.

Höyrystimien sekundääripuolet ovat samalla tavalla mallinnettuja. Höyrystinmallit eroavat toisistaan ulkoilmaan johtavan höyrylinjan mallintamisessa. Höyrystimen sekundääripuolen eri osat on mallinnettu noodeilla. Primääripuolen lämmönvaihtoputkilla siirretään lämpöä sekundääripuolelle.

Mallissa on pääosin erillisissä verkoissa mallinnettu eri osien lämpöhäviöiden laskentaa. Lämpöverkot kuvaavat lämpöhäviöitä eri komponenttien seinämien läpi. Laboratorion ilman lämpötilaksi on määritelty 30 °C.

Malliin on rakennettu verkko hätäjähdytysjärjestelmälle. Hätäjähdytysjärjestelmän malli koostuu vesisäiliöstä ja siitä piiriin johtavasta putkilinjasta. Hätäjähdytysjärjestelmää ei tarvita tähän työhön liittyvissä simuloinneissa.

6 PWR PACTEL -KOKEET

Ylätilan käyttäytymisen tutkimiseksi ja simulointimallin toiminnan arvioimiseksi tässä työssä verrataan simulointituloksia kahteen PWR PACTEL -koelaitteistolla suoritettuun kokeeseen. Vertailukokeina käytetään RF-04-koetta, jolla voidaan tarkastella simuloinnin tarkkuutta tasapainotilan simuloinnissa, sekä SBL-50-koetta, jonka avulla tarkastellaan mallin toimivuutta dynaamisessa tilassa.

6.1 RF-04-koe

Simuloinneissa ensimmäisenä ylätilan käyttäytymisen tutkimisen vertailukohtana käytetään PWR PACTEL -koelaitteistolla vuonna 2011 tehdyn RF-04-kokeen 1000 sekunnin tasapainotilan mittausjaksoa. RF-04-kokeen tarkoituksena oli tutkia virtauksen kääntymistä pystyhöyrystimen lämmönsiirtoputkissa. Kokeeseen liittyen suoritettiin myös virhearviointi mitausten osalta. Virhearviointi tässä työssä tarkasteltujen arvojen osalta on esitetty taulukossa 6.1. (Riikonen et al. 2011 s.1, A1)

Taulukko 6.1. RF-04-kokeen virhearviot tämän työn kannalta merkittävillä arvoilla.

P0001	Paine ylätilassa	± 1 bar
P0002	Paine paineistimessa	± 1 bar
T0109	Lämpötila sydämen ulostulossa	± 2 °C
T0124	Lämpötila sydämen sisäänmenossa	± 4 °C
T0375	Lämpötila ylätilassa, korkeudella 8,34m	± 4 °C
T0376	Lämpötila ylätilassa, korkeudella 11,44m	± 2 °C
T0464	Lämpötila ensimmäisen piirin kuumassa haarassa	± 1 °C

RF-04-kokeeseen liittyen suoritettiin myös kokeen APROS-simulointi versiolla 5.09.13. Etukäteislaskenta suoritettiin ennen koetta auttamaan kokeen suunnittelussa ja jälkikäitelaskenta kokeen jälkeen auttamaan kokeen tulosten tarkastelussa ja mallin simulointitarkkuuden arvioimiseksi. Pääpaino näissä simuloinneissa oli höyrystimissä. RF-04-kokeen simuloinnissa virtaus kääntyi vain 10 % höyrystimen lämmönvaihtoputkista, kun kokeen

mittaustulosten perusteella virtaus oli kääntynyt jopa 30 % putkista. Suuren poikkeaman vuoksi simulointia ei käytetty tarkemmin mittaustulosten tarkasteluun. Loppuraportissa eron syyksi arveltiin APROS-mallin yksinkertaistusta, jossa höyrystimen putket oli simuloitu viitenä putkena, joista jokainen kuvasi eripituista putkiryhmää. (Riikonen et al. 2011 s.7-9)

Laitteiston muissa osissa simuloitujen arvojen vastasivat melko tarkasti mitattuja arvoja. Ainoana loppuraportissa mainittuna poikkeamana on piirin massavirta, joka oli simuloinnissa 1,33 kg/s ja mittauksessa 1,24 kg/s mittausepävarmuuden ollessa $\pm 0,3$ kg/s. Tosin näitä arvoja käsitellään loppuraportissa vain pintapuolisesti ja tämän työn kannalta merkittäviä ylätilan simulointituloksia ei mainita lainkaan. (Riikonen et al. 2011 s.7)

6.2 SBL-50-koe

Ylätilan mallin testaamiseksi dynaamisessa tilanteessa simuloidaan tässä työssä myös SBL-50-koetta. Kokeen alkuperäisenä tarkoituksena oli tutkia luonnonkierron toimintaa PWR PACTEL -koelaitteistolla pienen primääripiirin vuodon aikana. Kokeen aluksi laitteistoa ajettiin 1000 sekuntia 155 kW teholla tasapainotilassa. Tämän jälkeen avattiin toiseen kylmään haaraan, vesilukon ja alasmienotilan väliin rakennettuun vuotolinjaan, halkaisijaltaan 1 mm kokoinen vuoto. Lisäksi tässä vaiheessa paineistimen lämpövastukset kytkettiin pois päältä ja paineistin erotettiin muusta piiristä sulkemalla paineistinlinjassa oleva venttiili. Noin 7700 sekunnin kohdalla vuotolinjan venttiili sulkeutui vahingossa. Tämä huomattiin 8960 sekunnin kohdalla, jolloin vuoto avattiin uudestaan. Koetta jatkettiin, kunnes sydämen yläosa kuivui ja lämpötila ylitti 350 °C. Koko koe kesti 10641 sekuntia. (Riikonen & Kouhia 2011 s.8-10)

SBL-50-koetta on simuloitu mm. Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa vuonna 2011 järjestetyn kansainvälisen benchmark-tehtävän yhteydessä. Benchmarkissa käytettiin APROS-ohjelman versioita 5.09.11 ja 5.10.01. Versiolla 5.09.11 suoritettussa simuloinnissa APROS-mallin havaittiin mallintavan koetta melko tarkasti. Loppuraportissa mainittiin

merkittävimpana poikkeamana simuloinnin suurempi vuoto nopeus, joka johti simuloinnissa pinnan nopeampaan laskemiseen paineastiassa. Simuloinnissa sydämen yläosa paljastui 400 sekuntia aikaisemmin kuin kokeessa. Tässä simuloinnissa vuodossa ei käytetty kriittisen virtauksen laskentaa ja tämä kompensoitiin muuttamalla vuotoaukon kokoa. Versiolla 5.10.01 suoritettuna simuloinnin kohdalla, loppuraportissa mainittiin merkittävimpana simuloititulospoikkeamana piirin virtausnopeus, joka oli simuloinneissa merkittävästi suurempi kuin mittaustuloksissa. (Riikonen & Kouhia 2011 s.12, AIII-5-6, AIII-9 ja AVII5)

7 SIMULOINNIT

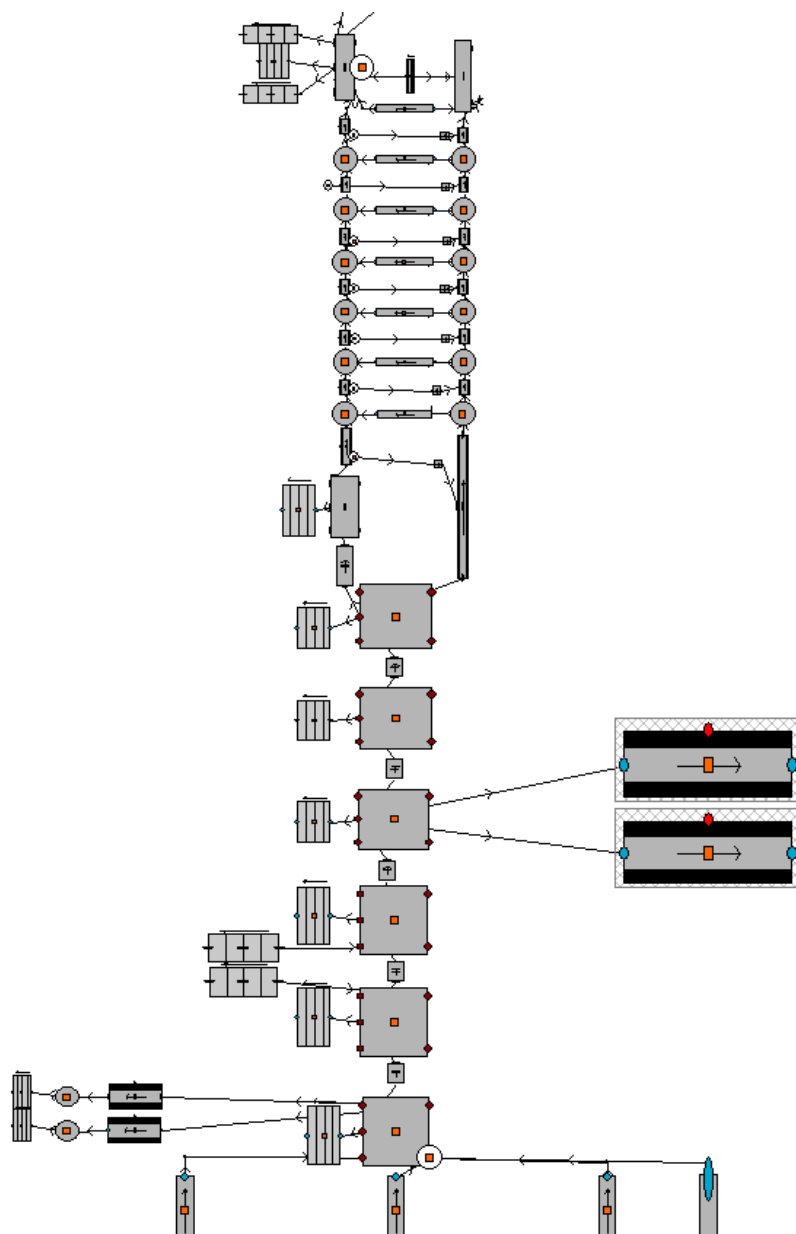
Luvussa 6 esitetyt PWR PACTEL -kokeita on tässä työssä käytetty simulointien vertailukohtina. Tässä työssä tehdyissä simulointilaskuissa on keskitytty ylätilan käyttäytymiseen sekä sen vaikutuksiin koko mallin toiminnan kannalta. Muualla koelaitteistossa olevia mahdollisia ongelmakohtia ei tässä työssä ole kartoitettu eikä tutkittu.

Tässä luvussa esitetään aluksi simulointitulokset mahdollisimman yksinkertaisella ylätilamallilla. Tämän jälkeen esitetään tulokset muokatulla ylätilamallilla, joka on kehitetty jo aiemmin Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa. Laskettuja simulointituloksia verrataan vastaavien vertailukokeiden mittaustuloksiin. Luvun lopussa muokatun ylätilamallin sisältämän laitteistomallin simulointituloksia verrataan testisimulointeihin, joissa ylätilamalliin on tehty lisää muutoksia, joiden oletetaan parantavan ylätilan toimintaa. Lopuksi työssä arvioidaan ylätilamallin käyttäytymiseen vaikuttavien tekijöiden merkitystä testisimulaatioiden tulosten kautta.

7.1 Yksinkertainen ylätilamalli

Tässä työssä selvitettiin miten ylätilaa voidaan simuloida mahdollisimman yksinkertaisella mallilla. Tätä varten rakennettiin malli, jossa ylätila on mallinnettu mahdollisimman yksinkertaisesti.

Sydämen yläosan ja diffuusoriputken välillä oleva ylätilan osa mallinnettiin yhdellä noodiketjulla. Diffuusoriputki ja sen ulkopuolinen rengastila mallinnettiin molemmat yhdellä komponenttiketjulla. Eristemateriaalina käytettiin APROS-simulointiohjelman valmista eristemateriaalia numero 12, joka kuvaa mineraalivillaa putkille. Ylätilan putkien muotohäviökertoimet on asetettu APROS-ohjeiden mukaisiksi. Käytetyn mallin ylätila on esitetty kuvassa 7.1. (VTTg 2010, VTTf)



Kuva 7.1. Yksinkertainen ylätilan malli.

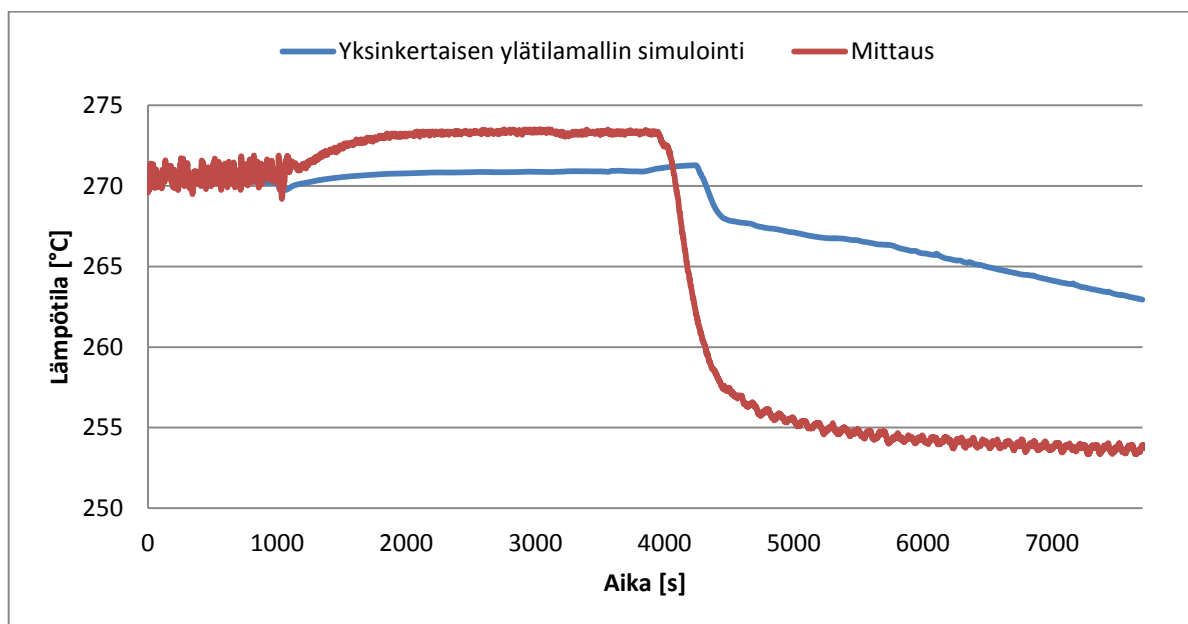
7.1.1 RF-04-simulaatio: yksinkertainen ylätilamalli

RF-04-kokeen simuloinnissa havaittiin, että käytetty yksinkertainen malli ei toiminut. Simuloinnissa vettä ei virrannut lainkaan ylätilaan, vaan kaikki sydäimestä tuleva vesi virtasi suoraan kuumiin haaroihin. Koska ylätilaan ei virrannut yhtään vettä, jäähdyti siellä oleva vesi hiljalleen lämpöhäviöistä johtuen. Havaintojen perusteella voidaan todeta, että yksin-

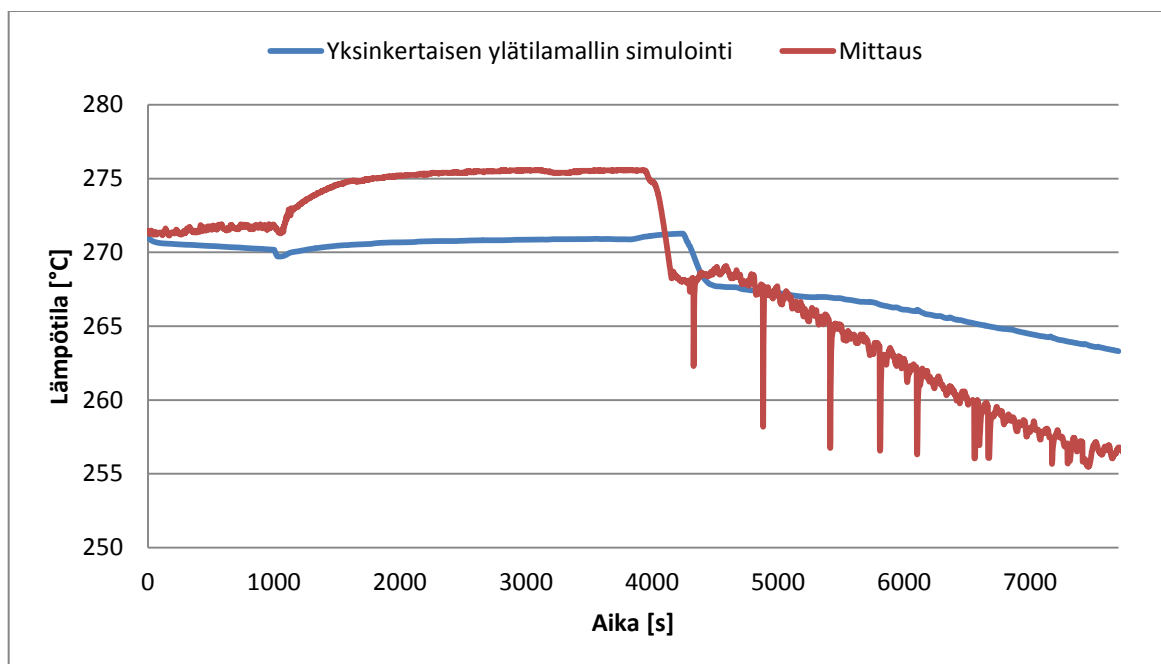
kertaiseen malliin on tehtävä muutoksia, jotta virtaus sekoittuu ylätilassa jo tasapainotilanteessa.

7.1.2 SBL-50-simulaatio: yksinkertainen ylätilamalli

Yksinkertaisen ylätilamallin sisältävällä PWR PACTEL -mallilla ajettiin myös SBL-50 simulaatio. Simulaatiossa oli havaittavissa ylätilamallin heikko toimivuus. Kuvissa 7.2 ja 7.3 on esitetty simuloinnin tuloksia ylätilan lämpötilojen osalta sekä kokeen mittaustuloksia. Kuvista havaitaan, että muutokset ylätilan lämpötilassa ovat simuloinnissa selvästi pienempiä kuin kokeessa mittaustulosten mukaan esiintyvät muutokset. Näiden tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että yksinkertainen ylätilamalli simuloi ylätilan käyttäytymistä huonosti.



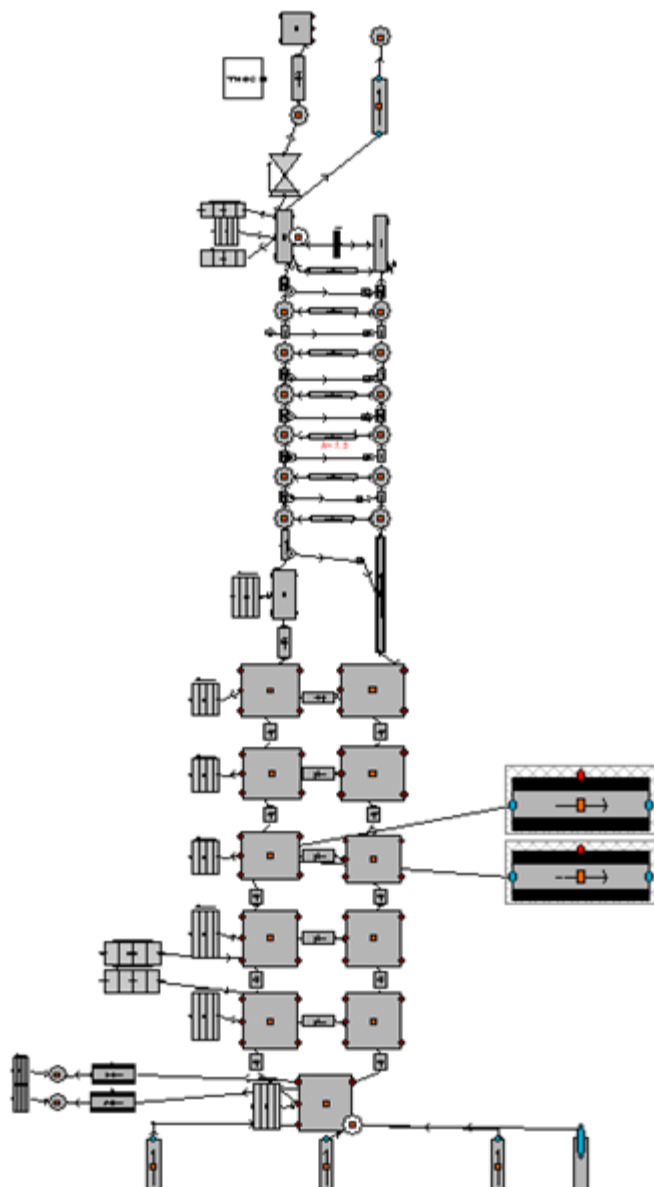
Kuva 7.2. Lämpötila ylätilassa, 8,34 m korkeudella yksinkertaisella ylätilamallilla simuloituna ja SBL-50-kokeessa mitattuna.



Kuva 7.3. Lämpötila ylätilassa, 11,44 m korkeudella yksinkertaisella ylätilamallilla simuloituna ja SBL-50-kokeessa mitattuna.

7.2 Muokattu ylätilamalli

Ylätilan rakenteessa on käytetty kahta erilaista mallinnustapaa prosessikomponenttitasolla: ylätilan alempi osa on rakennettu noodeista ja haaroista, ja ylempi osa pisteistä ja putkista. Ylempi osa kuvaa aluetta, jossa ylätila koostuu rengastilasta ja sen sisällä olevasta diffuusoriputkesta. Vaakasuorat virtauskanavat diffuusoriputken ja rengastilan välillä on rakennettu haaroista. Tämä rakenne kuvaa diffuusoriputken virtausaukkoja. Ylätilan alaosa on rakennettu kahdella rinnakkaisella noodiketjulla noudattaen ylätilan geometriaa. Rakenteella saadaan kuvattua mahdolliset ylätilan sisäiset ristivirtaukset ja parannettua virtausta ylätilan yläosaan. Sydän- ja ylätilaa kuvaava verkko on esitetty kuvassa 7.4.



Kuva 7.4. PWR PACTEL –mallin muokattu ylätilamalli.

Muokatun ylätilamallin eristevillan lämmönjohtavuuden lausekkeen perusosa on nostettu noin viisinkertaiseksi yksinkertaiseen malliin verrattuna. APROS-ohjelman lämmönjohtavuutta käsitellään tarkemmin luvussa 7.4. Lisäksi muokatussa ylätilamallissa on diffuusori-putken sisäänmenoaukon muotohäviökerrointa nostettu hieman ja vastaavasti rengastilan sisäänmenossa muotohäviökerrointa on laskettu hieman.

7.2.1 RF-04-simulaatio: muokattu ylätilamalli

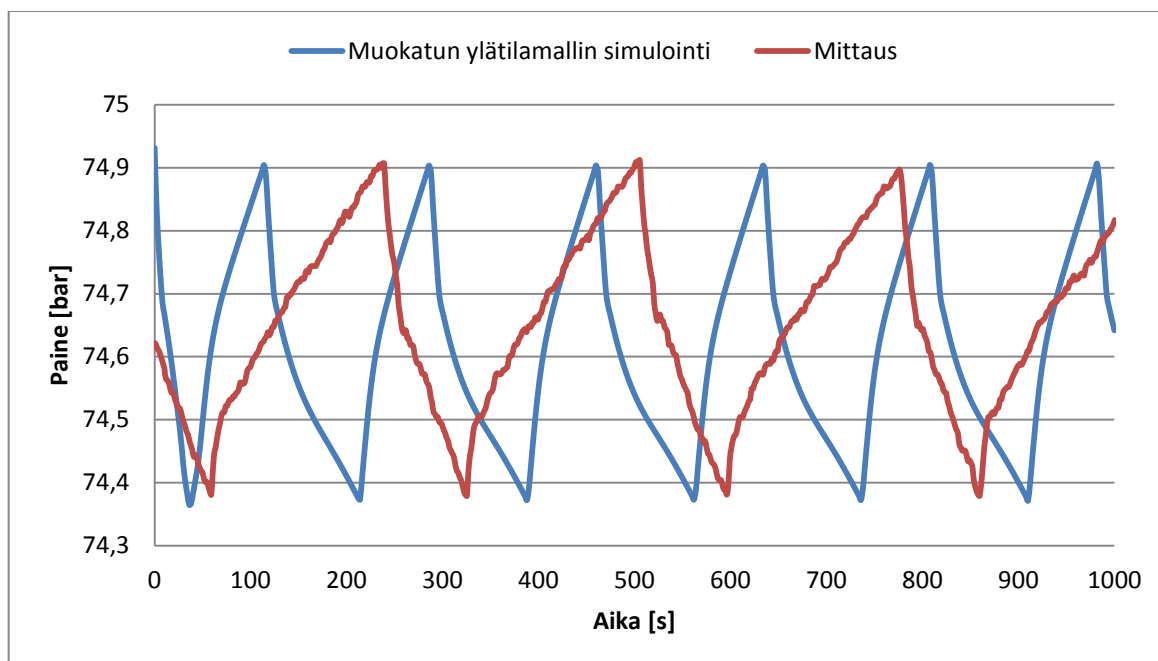
Muokatun ylätilamallin sisältävällä PWR PACTEL -simulointimallilla suoritettiin 1000 sekunnin simulointiajo lähtötilanteen selvittämiseksi. Taulukossa 7.1 on esitetty simuloinnissa saatuja lämpötilojen ja paineiden keskiarvoja verrattuna mittaustuloksiin.

Taulukko 7.1. Simulointitulokset muokatulla ylätilamallilla sekä RF-04-kokeessa mitatut vastaavat arvot.

	Mittaus	Simulointi	Ero	Yksikkö
Lämpötila sydämen sisäänmenossa	248,7	247,9	- 0,8	°C
Lämpötila sydämen ulostulossa	277,1	275,9	- 1,2	°C
Lämpötila ensimmäisessä kuumassa haarassa	277,6	275,2	- 2,4	°C
Lämpötila ylätilassa, +8,34 m	271,2	271,7	0,5	°C
Lämpötila ylätilassa, +11,44 m	272,4	273,0	0,6	°C
Paine ylätilassa	74,6	74,6	0	bar

Tulosten perusteella simuloidut lämpötilat poikkesivat mitatuista noin 1-2,5 astetta. Ylätilassa simuloidut lämpötilat olivat mitattuja korkeampia, kun taas muualla simuloidut lämpötilat olivat hieman mitattuja matalampia. Kaikki lämpötilat ovat mittauksissa sallittujen poikkeamien sisällä, mutta ylätilan lämpötilat ovat mitattuja lämpötiloja korkeampia, kun taas muualla piirissä lämpötilat ovat mitattuja arvoja matalampia. Koska lähtöoletuksena on mallin heikko toimivuus nimenomaan ylätilan osalta, oletetaan näiden tulosten perusteella nimenomaan ylätilan lämpötilojen olevan liian korkeita verrattuna muuhun laitteistoon.

Lämpötilan lisäksi simuloinnissa tarkasteltiin myös paineen käyttäytymistä ylätilassa ja paineistimessa. Kuvassa 7.5 on esitetty ylätilan paine sekä RF-04-kokeen mittauksessa, että muokatun ylätilamallin simuloinnissa.

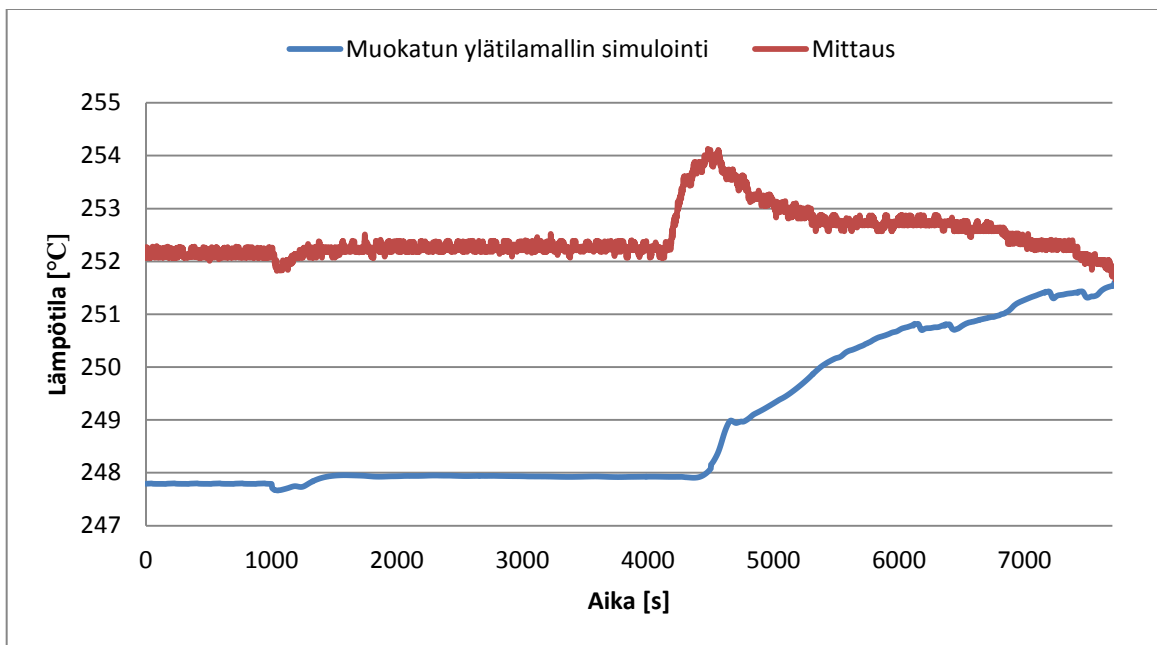


Kuva 7.5. Paine ylätilassa, 12,17 m korkeudella muokatulla ylätilamallilla simuloituna ja RF-04-kokeessa mitattuna.

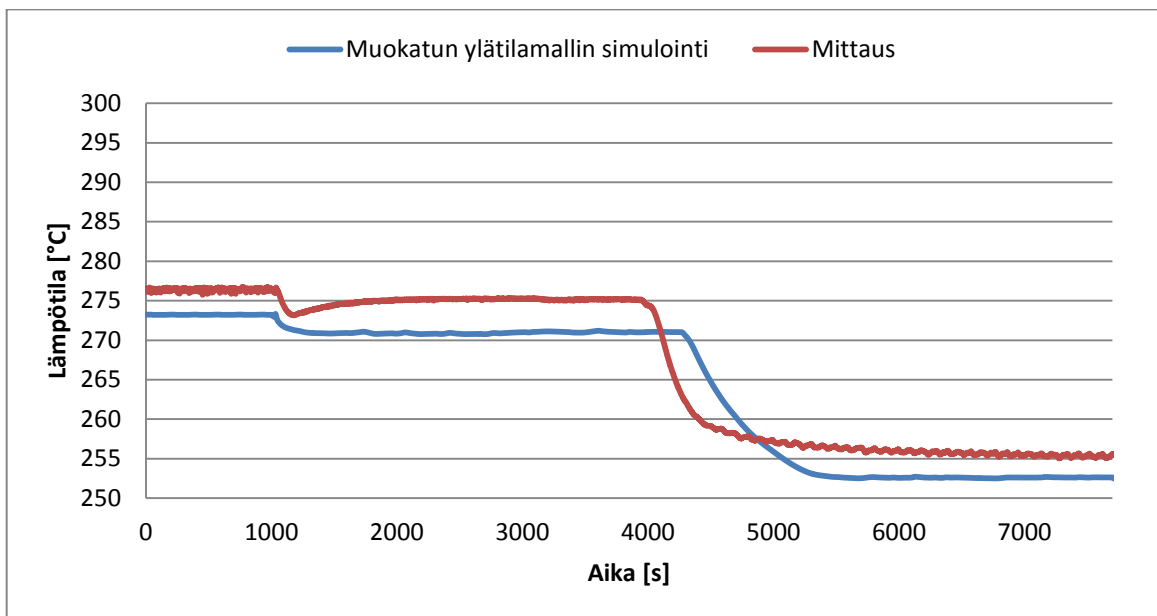
Ylätilassa paineen vaihtelu osuu simuloinnissa tarkasti oikealle välille mittauksen kanssa. Lisäksi voidaan havaita, että simuloinneissa paineen vaihtelu on nopeampaa kuin mittauksessa. Tätä vaihteluväliä voidaan säätää muutamalla paineistimen lämpövastusten automaatiikan asetuksia.

7.2.2 SBL-50-simulaatio: muokattu ylätilamalli

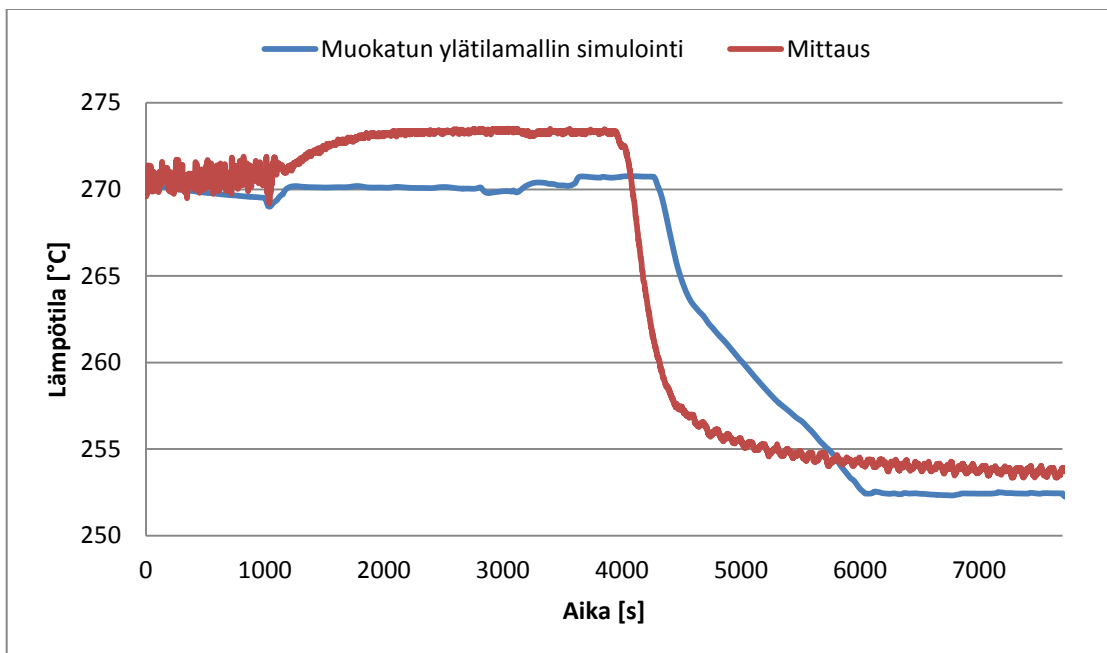
Alkuperäisellä mallilla ajettiin SBL-50-kokeen vertailusimulointi. Simulointi aloitettiin 1000 sekunnin pituisella tasapainotilalla, minkä jälkeen erotettiin paineistin ja avattiin vuoto samoin kuin kokeessa. Simulointi lopetettiin 7700 sekunnin kohdalla, jolloin kokeessa vuotoventtiili sulkeutui vahingossa, koska ylätilan käyttäytymisen kannalta merkittävin vaihe on kokeen alussa tapahtuva nopea pinnan lasku ylätilassa. Simuloinnin tuloksia ja mitattuja arvoja on esitetty kuvissa 7.6–7.13.



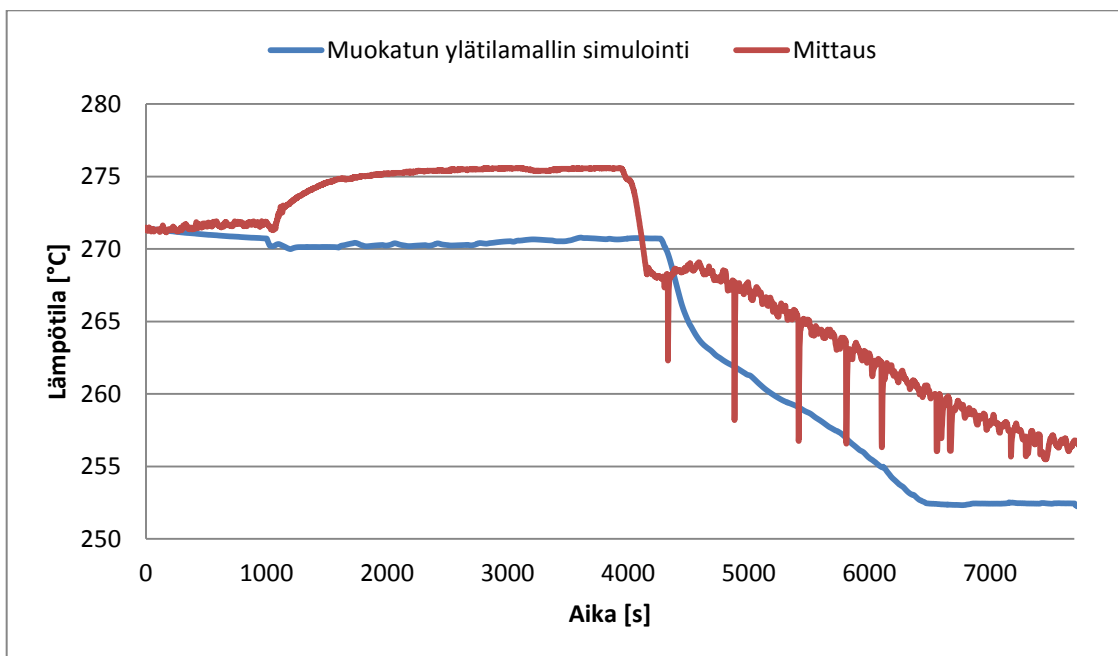
Kuva 7.6. Sydämen sisäänmenolämpötilä muokatulla ylätilamallilla simuloituna sekä SBL-50-kokeessa mitattuna.



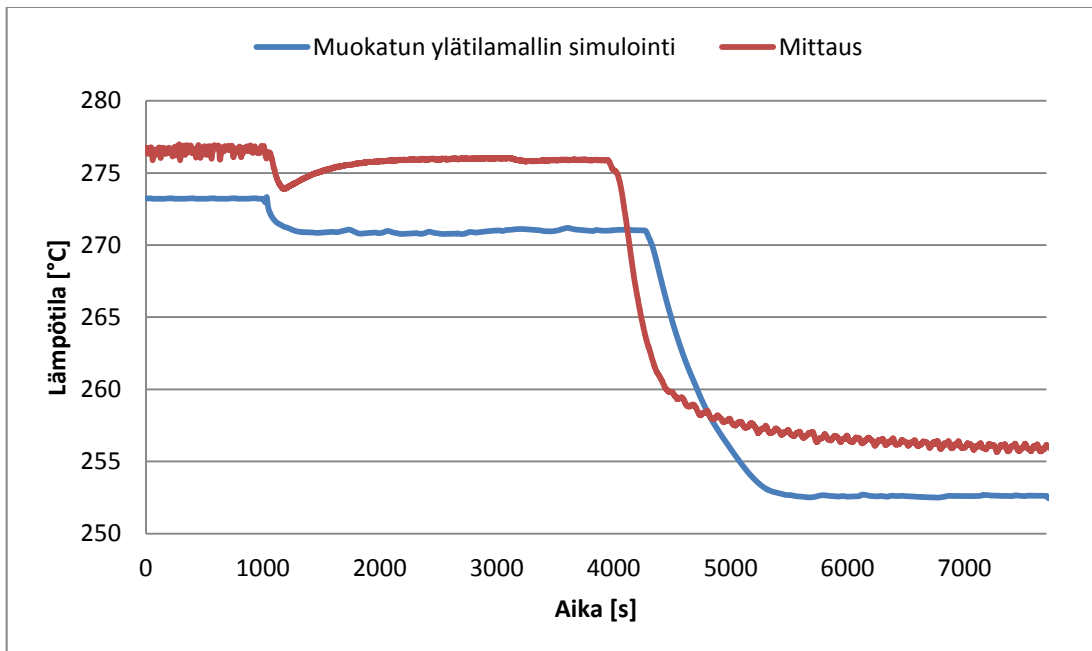
Kuva 7.7. Sydämen ulostulolämpötilä muokatulla ylätilamallilla simuloituna sekä SBL-50-kokeessa mitattuna.



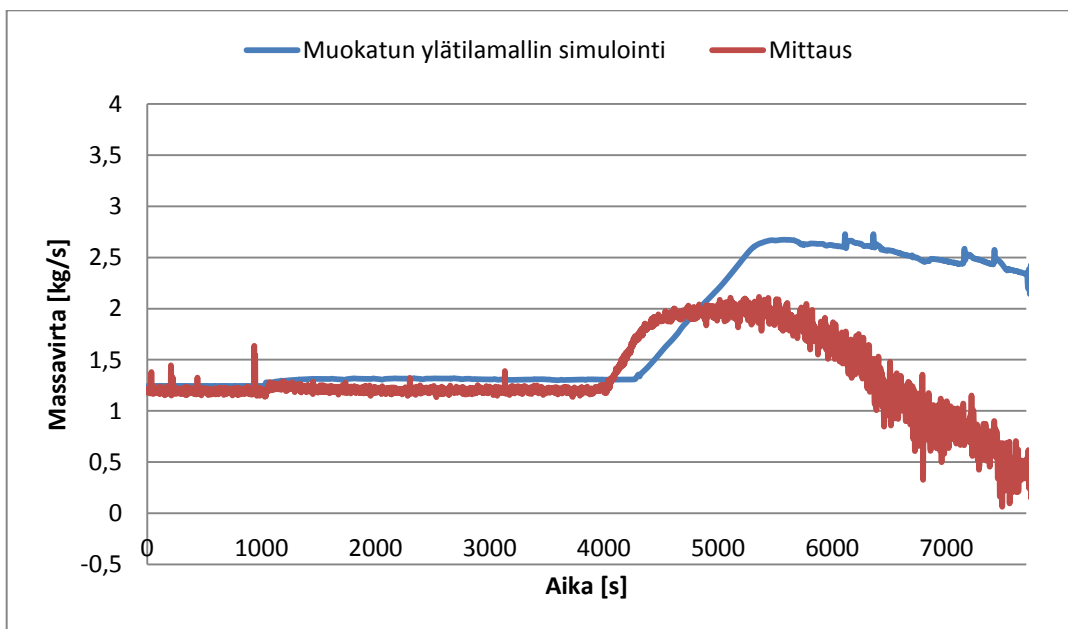
Kuva 7.8 Lämpötila ylätilassa, 8,34 m korkeudella, muokatulla ylätilamallilla simuloituna sekä SBL-50-kokeessa mitattuna.



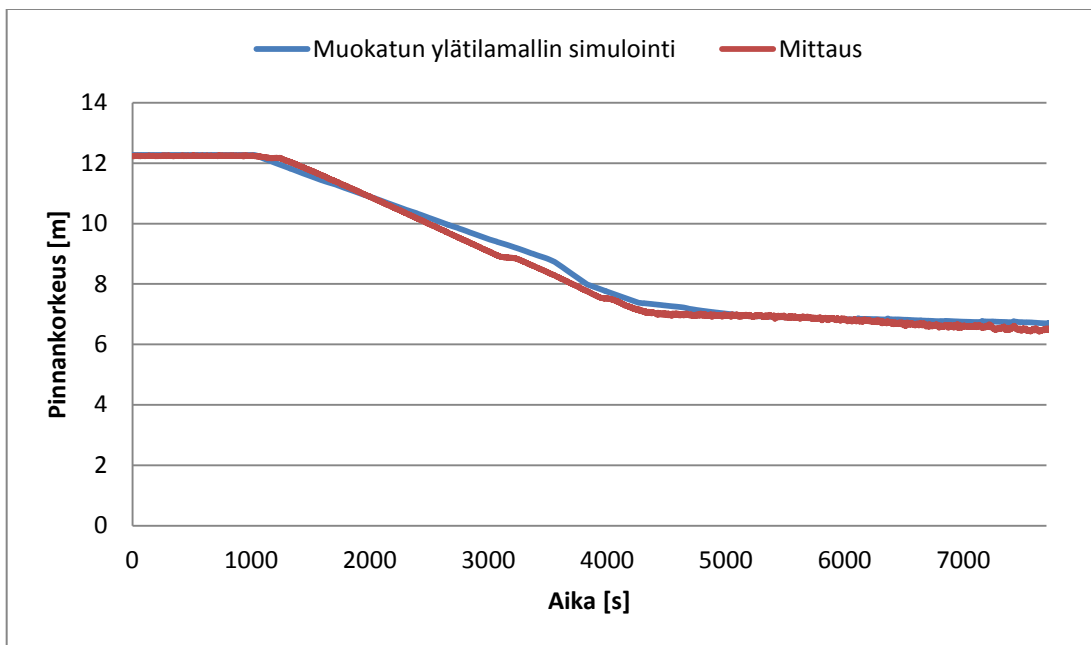
Kuva 7.9. Lämpötila ylätilassa, 11,44 m korkeudella, muokatulla ylätilamallilla simuloituna sekä SBL-50-kokeessa mitattuna.



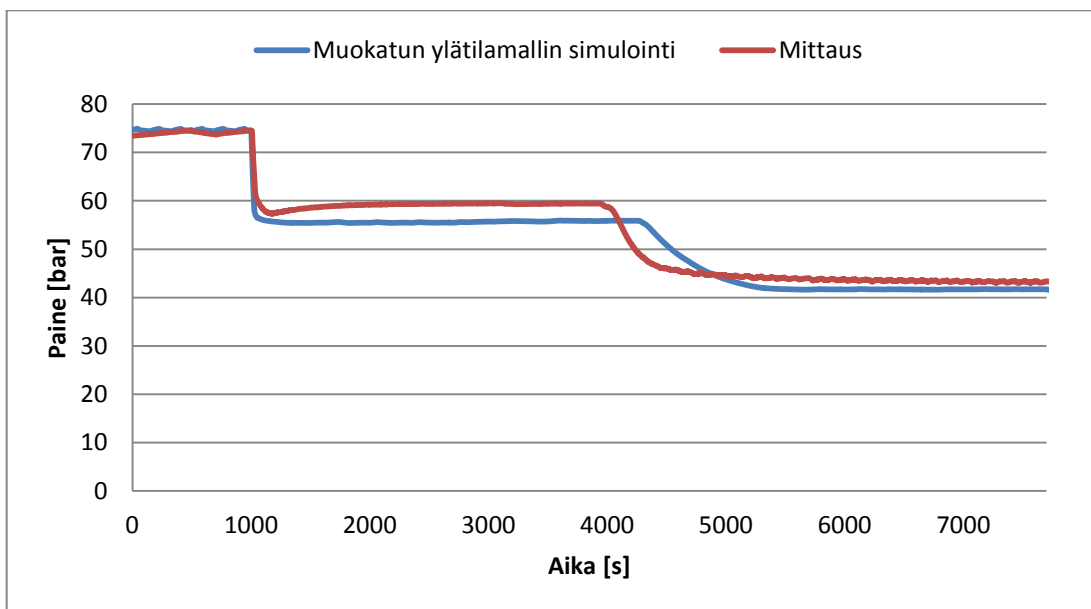
Kuva 7.10. Lämpötila ensimmäisessä kuumassa haarassa muokatulla ylätilamallilla simuloituna sekä SBL-50- kokeessa mitattuna.



Kuva 7.11. Massavirta alasmennössä muokatulla ylätilamallilla simuloituna sekä SBL-50-kokeessa mitattuna.



Kuva 7.12. Vedenpinnan korkeus laitteistossa muokatulla ylätilamallilla simuloituna sekä SBL-50-kokeessa mitattuna.



Kuva 7.13. Paine ylätilassa muokatulla ylätilamallilla simuloituna sekä SBL-50-kokeessa mitattuna.

Simuloinnin tuloksissa (kuvat 7.6–7.13) havaitaan poikkeamia verrattuna mitattuihin arvoihin. Ylätilassa tapahtuu 1200 sekunnin jälkeen pieni paineen ja lämpötilojen nousu. Tätä ilmiötä ei esiinny simuloinnissa. Lisäksi seuraavaa tasaista tilaa seuraava paineen ja lämpöti-

lojen pudotus noin 4000 sekunnin kohdalla, tapahtuu simuloinnissa noin 300 sekuntia myöhemmin kuin kokeessa.

Ylätilan lämpötiloja tarkasteltaessa voidaan havaita, että SBL-50-kokeen simuloinnissa ylätilan lämpötilat olivat paremmin linjassa muiden lämpötilojen kanssa, kuin RF-04-kokeen simuloinnissa. Ylätilan yläosan jyrkän lämpötilan laskun aikana simuloinnin lämpötila ei nouse yhtä korkealle tulistetun höyryn alueelle kuin kokeessa mitattu lämpötila.

Kokonaisuudessaan simuloinnin lämpötilat olivat tässäkin kokeessa hieman kokeen lämpötiloja alempia. Suurimpana poikkeamana on sydämen sisäänmenolämpötila. Simulointi seuraa tässäkin tapauksessa melko tarkasti kokeen tapahtumia hieman alemmalla lämpötilalla aina noin 4800 sekuntiin asti, jolloin kokeessa lämpötila alkoi laskea. Simuloinnissa sitä vastoin lämpötila jatkoi edelleen nousuaan.

Toinen merkittävä poikkeama havaitaan alasmenotilasta mitatussa massavirrassa. Massavirta seurasi simuloinnin alussa hyvin kokeessa mitattuja arvoja. Hieman 4000 sekunnin jälkeen kokeen massavirta kääntyy laskuun, mutta simuloinnin massavirta jatkaa nousuaan 1000 sekuntia pidempään. Myös SBL-50-kokeen benchmark-laskennassa APROS-simulointiohjelmilla simuloidut massavirran arvot olivat korkeampia, kuin kokeessa mitatut arvot (Riikonen & Kouhia 2011 s.13)

Virtauksen osalta vastaavanlaisia arvoja on saatu Mangal et al (2012) tutkimuksessa, jossa selvitettiin RELAP5-simulointiohjelman soveltuvuutta luonnonkierrolla toimivien ydinvoimalaitosten mallintamiseen. Osassa simulointeja havaittiin simuloidun virtauksen olevan selvästi mitattua arvoa suurempi. (Mangal et al. 2012 s.15)

Näiden simulointien perusteella voidaan todeta, että ylätilaan jo tehdyt muutokset ovat selkeästi parantaneet mallin ylätilan toimintaa. Seuraavissa simuloinneissa käytetään vertailusimulointina muokatun ylätilamallin simulointituloksia.

7.3 Virtausvastusten säädön vaikutus muokattuun ylätilamalliin

Ensimmäisenä parannusvaihtoehtona työssä tutkittiin virtausvastuksen vaikutusta ylätilan lämpötiloihin. Virtauksen käyttäytymistä PWR PACTEL -koelaitteiston ylätilassa tunnetaan huonosti. Yksinkertaisen mallin RF-04-simuloinnissa havaittiin, että virtaus ylätilaan oli olematonta ja yksistään tämä seikka teki ylätilan mallista huonosti toimivan. Tämän perusteella voidaan olettaa, että virtauksen käyttäytymisellä on merkittävä vaikutus ylätilan mallin toimintaan.

Virtaukseen voidaan vaikuttaa muuttamalla ylätilan putkien muotohäviökerrointa. Kyseinen kerroin vaikuttaa putkissa tapahtuviin painehäviöihin, jotka johtuvat virtauskanavan muutoksista kuten putken laajenemisesta, supistumisesta tai kääntymisestä. Paineenmuutos lasketaan muotohäviökertoimen avulla yhtälöllä (18). (VTTF 2010)

$$Dp_K = \frac{K\alpha\rho_g v_g^2}{2} + \frac{K(1-\alpha)\rho_l v_l^2}{2} \quad (18)$$

Missä,

K on muotohäviökerroin [-]

Muokatussa ylätilamallissa muotohäviökerrointa on säädetty hieman suuremmaksi, kuin mitä APROS-ohjeiden mukaan kyseisen kokoisille putkille suositellaan. Diffuusori-putken alapuolella oleva putki on mallissa simuloitu kahdeksi erilliseksi putkeksi, joiden välillä olevat poikittaiset putket kuvaavat keinotekoisesti poikittaissuuntaisia virtauksia. Näissä poikittaisputkissa on vertailukohtana käytetyssä muokatussa ylätilamallissa muotohäviökerroin säädetty arvoon 1,0. Rengastilan sisäänmenoa kuvaavassa putkessa muotohäviökerroin tulisi ohjeiden mukaan olla 0,2 mutta alkuperäisessä mallissa se on säädetty arvoon 0. Vastaavasti diffuusori-putken sisäänmenon muotohäviökerroin on säädetty arvoon 0,5, kun ohjeiden mukaan sen tulisi olla 0,4. Diffuusori-putken ja ulomman putken välisten reikien muotohäviökerroin on säädetty arvoon 0,5. (VTTF)

7.3.1 RF-04-simulaatio: muotohäviökerroin -0,2

Aluksi tutkittiin muotohäviökertoimen pienentämisen vaikutuksia ylätilan lämpötiloihin. Taulukossa 7.2 on esitetty ylätilan lämpötilat mittauksessa, muokatussa ylätilamallissa sekä testisimuloinnissa, jossa kaikkia muotohäviökertoimia kuumien haarojen yhteiden yläpuolelta on pienennetty 0,2:lla. Mallia ajettiin ensin 10000 sekuntia tilanteen tasaamiseksi. Tämän jälkeen paineistimen pinta asetettiin kokeen alkutasolle ja suoritettiin varsinainen 1000 sekunnin simulointi.

Taulukko 7.2. Simulointitulokset mallilla, jossa muotohäviökerrointa on vähennetty 0,2 sekä kokeessa mitatut vastaavat arvot ja muutos muokatun ylätilamallin simulointiin nähden.

	Mittaus	Simulointi	Alkuperäinen ero	Uusi ero	Yksikkö
Lämpötila sydämen sisäänmenossa	248,7	247,9	- 0,8	- 0,8	°C
Lämpötila sydämen ulostulossa	277,1	275,9	- 1,2	- 1,2	°C
Lämpötila ensimmäisessä kuumassa haarassa	277,6	275,2	- 2,4	- 2,4	°C
Lämpötila ylätilassa, +8,34 m	271,2	272,3	0,5	1,1	°C
Lämpötila ylätilassa, +11,44 m	272,4	273,5	0,6	1,1	°C
Paine ylätilassa	74,6	74,6	0	0	bar

Tulosten perusteella voidaan todeta, että muotohäviökertoimen pienentäminen ylätilassa kasvattaa ylätilan lämpötilaa simuloinnissa. Muutos on tässä tapauksessa huomompaan suuntaan, joten muotohäviökertoimen pienentäminen ei ole kannattavaa.

7.3.2 RF-04-simulaatio: muotohäviökerroin +0,2

Koska muutos oli luvun 7.3.1 laskenta tapauksessa huomompaan suuntaan, tutkittiin seuraavaksi, millainen vaikutus on muotohäviökertoimen kasvattamisella 0,2 muokatun ylätilamallin arvoista. Jälleen testimallilla ajettiin ensin 10000 sekuntia tilanteen tasaamiseksi,

minkä jälkeen paineistimen pinta säädettiin haluttuun arvoon ja suoritettiin 1000 sekunnin simulointi. Simuloinnin tulokset on esitetty taulukossa 7.3.

Taulukko 7.3. Simulointitulokset mallilla jossa muotohäviökerrointa on kasvatettu 0,2 sekä kokeessa mitatut vastaavat arvot ja muutos muokattuun ylätilamalliin nähden.

	Mittaus	Simulointi	Alkuperäinen ero	Uusi ero	Yksikkö
Lämpötila sydämen sisäänmenossa	248,7	247,9	- 0,8	- 0,8	°C
Lämpötila sydämen ulostulossa	277,1	275,9	- 1,2	- 1,2	°C
Lämpötila ensimmäisessä kuumassa haarassa	277,6	275,2	- 2,4	- 2,4	°C
Lämpötila ylätilassa, +8,34 m	271,2	271,2	0,5	0	°C
Lämpötila ylätilassa, +11,44 m	272,4	272,6	0,6	0,2	°C
Paine ylätilassa	74,6	74,6	0	0	bar

Tuloksista havaitaan, että muotohäviökertoimen kasvattaminen laskee lämpötilaa ylätilassa. Ylätilan lämpötilat ovat edelleen suhteellisen korkeita verrattuna simuloinnin lämpötilatuloksiin muualla piirissä.

7.3.3 RF-04-simulaatio: muotohäviökerroin +0,5

Koska muotohäviökertoimen kasvattamisella saatiin aikaan oikean suuntainen muutos, ajettiin seuraavaksi simulaatio jossa muotohäviökerrointa kasvatettiin 0,5 alkuperäisestä arvosta. Tämä muutos on jo suuri, esimerkiksi pystyputkissa kerroin on nyt kaksinkertainen alkuperäiseen arvoon verrattuna. Simuloinnin tulokset on esitetty taulukossa 7.4.

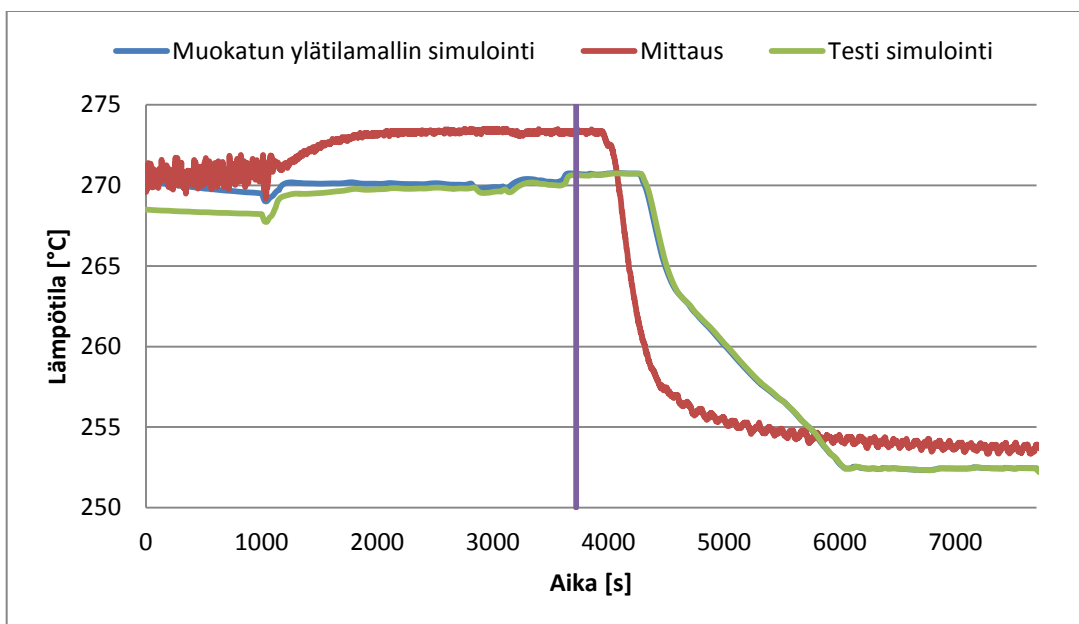
Taulukko 7.4. Simulointitulokset mallilla jossa muotohäviökerrointa on kasvatettu 0,5 sekä kokeessa mitatut vastaavat arvot ja muutos muokattuun ylätilamalliin nähden.

	Mittaus	Simulointi	Alkuperäinen ero	Uusi ero	Yksikkö
Lämpötila sydämen sisäänmenossa	248,7	247,9	- 0,8	- 0,8	°C
Lämpötila sydämen ulostulossa	277,1	275,9	- 1,2	- 1,2	°C
Lämpötila ensimmäisessä kuumassa haarassa	277,6	275,2	- 2,4	- 2,4	°C
Lämpötila ylätilassa, +8,34 m	271,2	270,7	0,5	- 0,5	°C
Lämpötila ylätilassa, +11,44 m	272,4	272,2	0,6	- 0,2	°C
Paine ylätilassa	74,6	74,6	0	0	bar

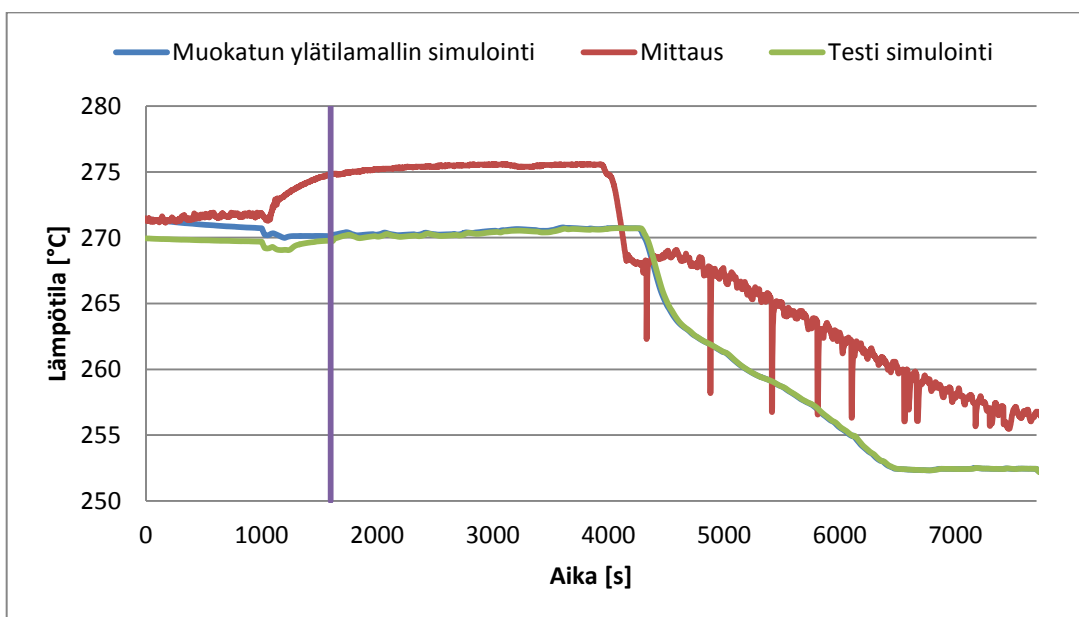
Tulosten perusteella havaitaan, että ylätilan lämpötilat ovat jo oikean suuntaisia ja toisaalta muutoksilla ei ollut vaikutusta simuloinnin käyttäytymiseen ylätilan ulkopuolella. On tosin muistettava, että muotohäviökertoimen muutos tässä tapauksessa oli suhteellisen suuri ja sen kaikkia vaikutuksia ei välttämättä havaita tasapainotilan simuloinnissa.

7.3.4 SBL-50-simulaatio: muotohäviökerroin +0,5

RF-04-kokeen simuloinnin perusteella havaittiin, että ylätilan lämpötilat ovat yhtenevämpiä muihin piirin lämpötiloihin, kun kuumien haarojen yläpuolisten putkien muotohäviökertoimia kasvatettiin 0,5:llä. Tästä johtuen suoritettiin myös SBL-50-kokeen simulointi, jossa samoja muotohäviökertoimia kasvatettiin yhtä paljon. Tavoitteena oli selvittää vaikuttaako muotohäviökerroin myös tilanteessa, jossa vedenpinta laskee ylätilassa. Kuvissa 7.14 ja 7.15 on esitetty lämpötilat ylätilan mittauspisteissä muokatulla ylätilamallilla simuloituna, kokeessa mitattuna sekä simuloituna mallilla, jossa muotohäviökertoimia on kuumien haarojen yläpuolella kasvatettu 0,5:llä.



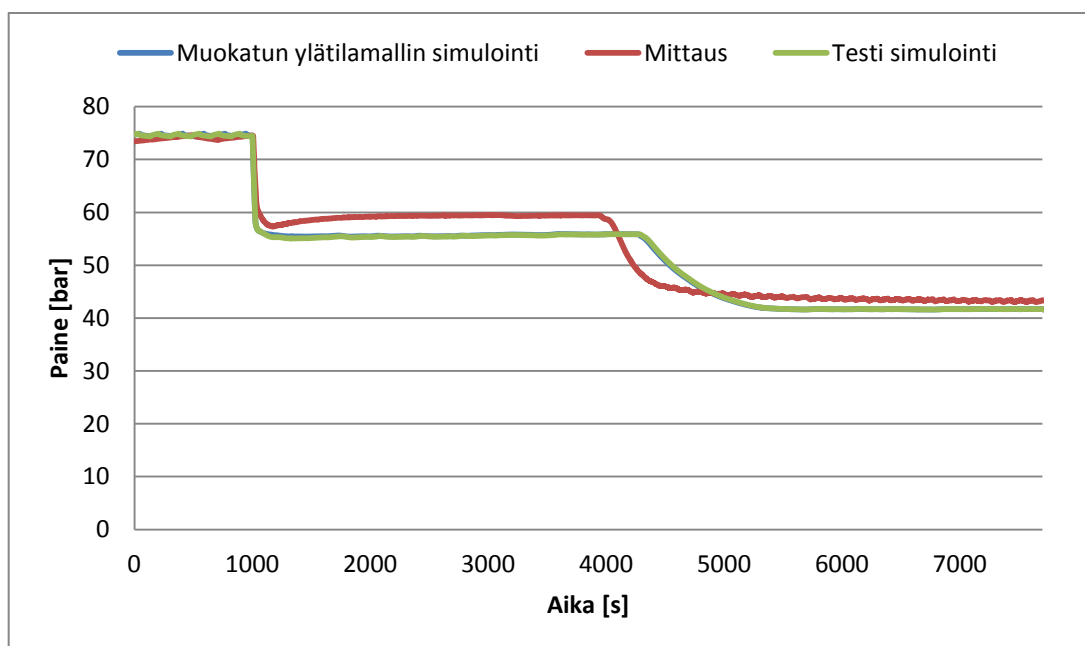
Kuva 7.14. Lämpötila ylätilassa 8,34 m korkeudella kun muotohäviökerrointa on kasvatettu 0,5. Violetti pystyviiva kuvaa hetkeä, jona vedenpinta on laskenut ylätilassa kyseisen mittauspisteen korkeudelle.



Kuva 7.15. Lämpötila ylätilassa 11,44 m korkeudella kun muotohäviökerrointa on kasvatettu 0,5. Violetti pystyviiva kuvaa hetkeä, jona vedenpinta on laskenut ylätilassa kyseisen mittauspisteen korkeudelle.

Kuten kuvista havaitaan, laskee muotohäviökertoimen nostaminen lämpötilaa ylätilassa ennen vuodon avaamista, jolloin ylätilan tasaisen ajon lämpötilat ovat paremmin linjassa muiden lämpötilojen kanssa. Vuodon avaamisen jälkeen simulointien lämpötilat alkavat lähes-

tyä toisiaan ja saavuttavat toisensa kun vedenpinta laskee mittauspisteen alapuolelle. Muotohäviökerroin siis vaikuttaa ylätilan lämpötilaan, kunnes vedenpinta laskee mittauspisteen alapuolelle. Tämän jälkeen ei muotohäviökerroin enää vaikuta simuloinnin tuloksiin havaittavasti. Kuvassa 7.16 on esitetty ylätilasta mitattu piirin paine.



Kuva 7.16. Paine ylätilassa kun muotohäviökerrointa on kasvatettu 0,5.

Kuten kuvasta 7.16 havaitaan, ei muotohäviökertoimen muuttamisella ollut vaikutusta ylätilan paineeseen. Simuloinnissa on edelleen havaittavissa samat poikkeamat mittaukseen nähden, kuin alkuperäisellä mallilla simuloitaessa. Näiden tietojen pohjalta näyttää siltä, että ylätilan muotohäviökerrointa muuttamalla ei voida merkittävästi parantaa tässä työssä tutkitun pienen vuodon simulointia.

7.4 Lämpöhäviöiden säädön vaikutus muokattuun ylätilamalliin

Tässä luvussa testataan ylätilan lämpöhäviöiden vaikutusta simulointiin. Koska muokatun ylätilamallin simuloinnissa havaittiin, että ylätilan lämpötilat poikkesivat mittauksen tuloksista, oli syytä testata mallia jossa niitä säädettiin yksinkertaisesti lämpöhäviöitä muuttamalla. PWR PACTEL –koelaitteiston osalta ei ole olemassa tarkkaa tietoa yksittäisten osi-

en lämpöhäviöistä. Esimerkiksi ylätilan osalta voidaan SBL-50-kokeen tuloksissa havaita, että ylätilan yläosassa lämpötila on tulistetun höyryn alueella. (Riikonen & Kouhia 2011 s.8)

Lämpöhäviöiden vaikutuksen testausta varten luotiin malliin uusi, itse määritelty eristemateriaali, ylätilan yläosien seinämien eristevillan lämmönjohtavuuden laskemiseksi. Näin päästiin vaikuttamaan ylätilan lämpöhäviöihin, muuttamatta koko laitteiston tilannetta. APROS-ohjelman käyttäjän määrittelemän lämpörakennemateriaalin lämmönjohtavuus lasketaan yhtälöllä (19). (VTTg)

$$k = B_1 + B_2T + B_3T^2 + B_4T^3 + B_5T^4 + \frac{B_6}{B_7+B_8T} \quad (19)$$

Missä,

B_1 on lämmönjohtavuuden lausekkeen perusosa

B_2 - B_8 ovat lämmönjohtavuuden lämpötilariippuvuuden kertoimia

Ylätilan eristemateriaalin lämmönjohtavuutta säädettiin haarukoimalla lämmönjohtavuuden lausekkeen perusosaa B_1 , kunnes päädyttiin sopivaan arvoon, jolla RF-04-kokeen simuloidut ylätilan lämpötilat olivat linjassa muiden piirin lämpötilojen kanssa. Parhaisiin tuloksiin päästiin kun B_1 oli kaksinkertainen muokatun ylätilamallin vastaavaan arvoon nähden.

7.4.1 RF-04-simulaatio

Uudella mallilla ajettiin ensin 10000 sekuntia tilanteen tasaamiseksi ja tämän jälkeen suoritettiin 1000 sekunnin testiajo. Tulokset on esitetty taulukossa 7.5.

Taulukko 7.5. Simulointitulokset mallilla, jossa lämmönjohtavuuden lausekkeen perusosaa on kasvatettu kaksinkertaiseksi muokatun ylätilamallin simulointiin nähden sekä kokeessa mitatut vastaavat arvot ja muutos muokattuun ylätilamalliin nähden.

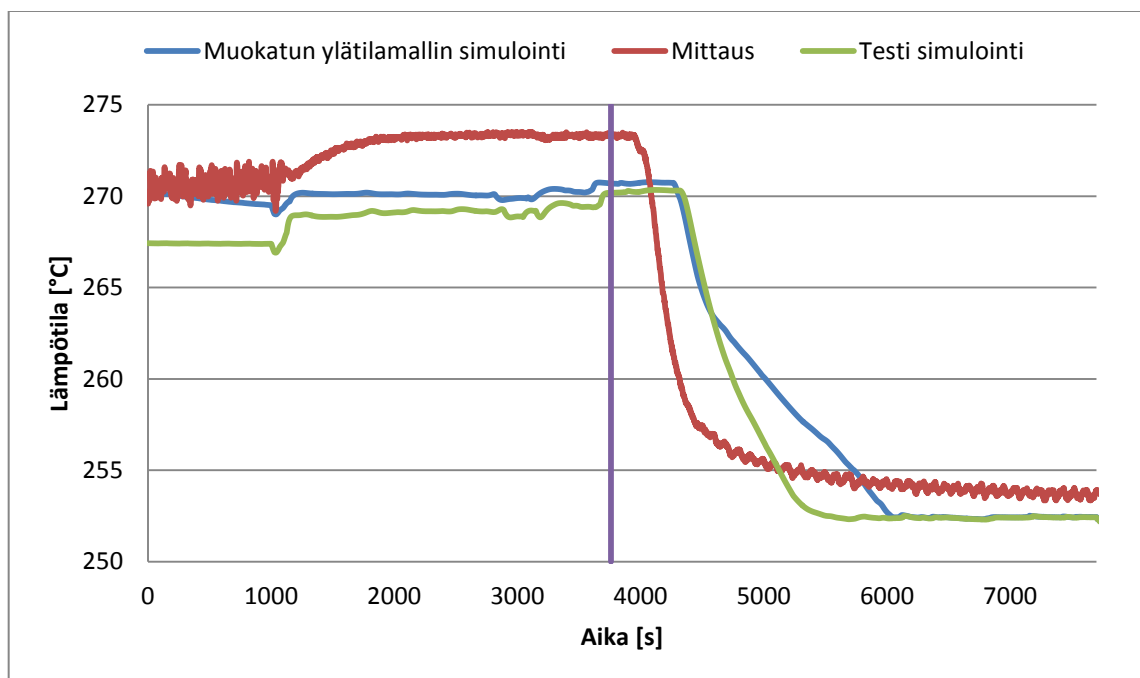
	Mittaus	Simulointi	Alkuperäinen ero	Uusi ero	Yksikkö
Lämpötila sydämen sisäänmenossa	248,7	247,9	- 0,8	- 0,8	°C
Lämpötila sydämen ulostulossa	277,1	275,9	- 1,2	- 1,2	°C
Lämpötila ensimmäisessä kuumassa haarassa	277,6	275,0	- 2,4	- 2,6	°C
Lämpötila ylätilassa, +8,34 m	271,2	270,1	0,5	- 1,1	°C
Lämpötila ylätilassa, +11,44 m	272,4	271,9	0,6	- 0,5	°C
Paine ylätilassa	74,6	74,6	0	0	bar

Tulosten perusteella, ylätilan lämpötilat olivat tällä mallilla melko hyvin linjassa muiden piirin lämpötilojen kanssa verrattaessa mittaustuloksiin. Ylätilan muutosten lisäksi simuloinnissa havaittiin pieni lämpötilan pudotus kuumassa haarassa, mutta muuten vaikutuksia piirin paineisiin tai lämpötiloihin ei tällä muutoksella ollut.

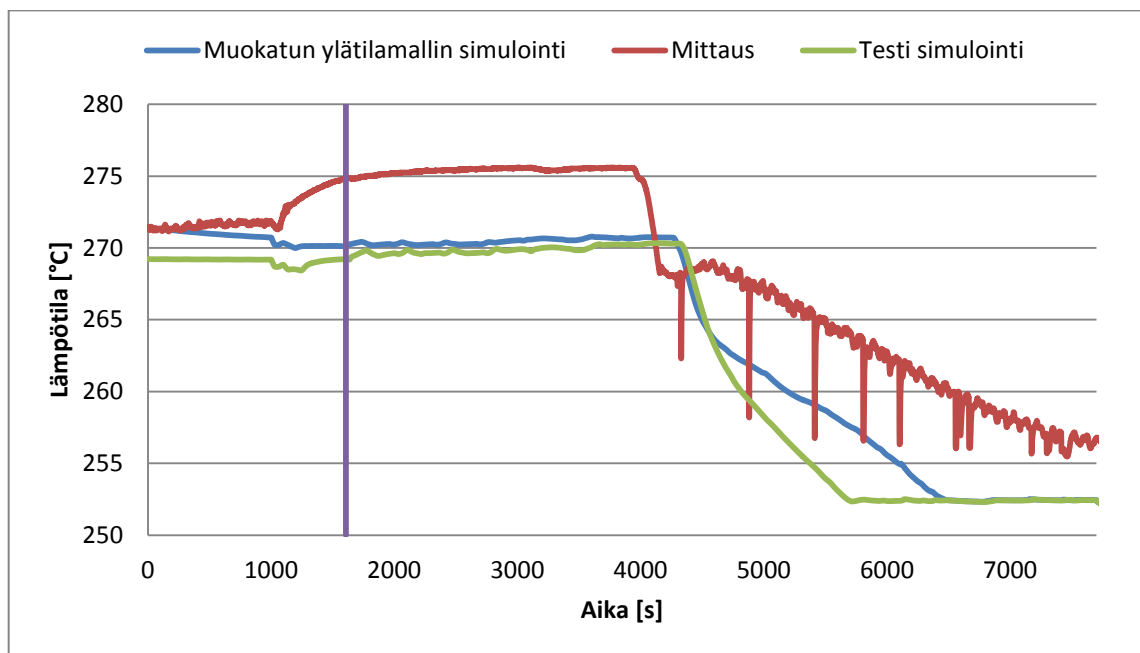
Näiden tulosten lisäksi tarkkailtiin myös mallin kokonaislämpöhäviöitä. Mallin kokonaislämpöhäviöihin ei muutoksella ollut merkittävää vaikutusta. Lämpöhäviöt kasvoivat kokonaisuutena 74 W, mikä on koko piiri huomioiden hyvin pieni ja merkityksetön kokonaisuutena verrattuna.

7.4.2 SBL-50-simulaatio

SBL-50-kokeen simuloinnissa selvitettiin ylätilan lämpöhäviöiden vaikutusta dynaamisen tilan simuloinnissa. Samoin kuin RF-04-kokeen simuloinnissa, muutettiin kaikkien kuumien haarojen yhteiden yläpuolisten eristemateriaalien lämmönjohtavuuden lausekkeen perusosa kaksinkertaiseksi muokattuun ylätilamalliin nähden. Kuvissa 7.17 ja 7.18 on esitetty tulokset ylätilan lämpötilojen osalta.



Kuva 7.17. Lämpötila ylätilassa 8,34 m korkeudella, kun lämmönjohtavuuden lausekkeen perusosa on kak-sinkertainen muokattuun ylätilamalliin nähden. Violetti pystyviiva kuvaa hetkeä, jona vedenpinta on laskenut ylätilassa kyseisen mittauspisteen korkeudelle.



Kuva 7.18. Lämpötila ylätilassa 11,44 m korkeudella, kun lämmönjohtavuuden lausekkeen perusosa on kak-sinkertainen muokattuun ylätilamalliin nähden. Violetti pystyviiva kuvaa hetkeä, jona vedenpinta on laskenut ylätilassa kyseisen mittauspisteen korkeudelle.

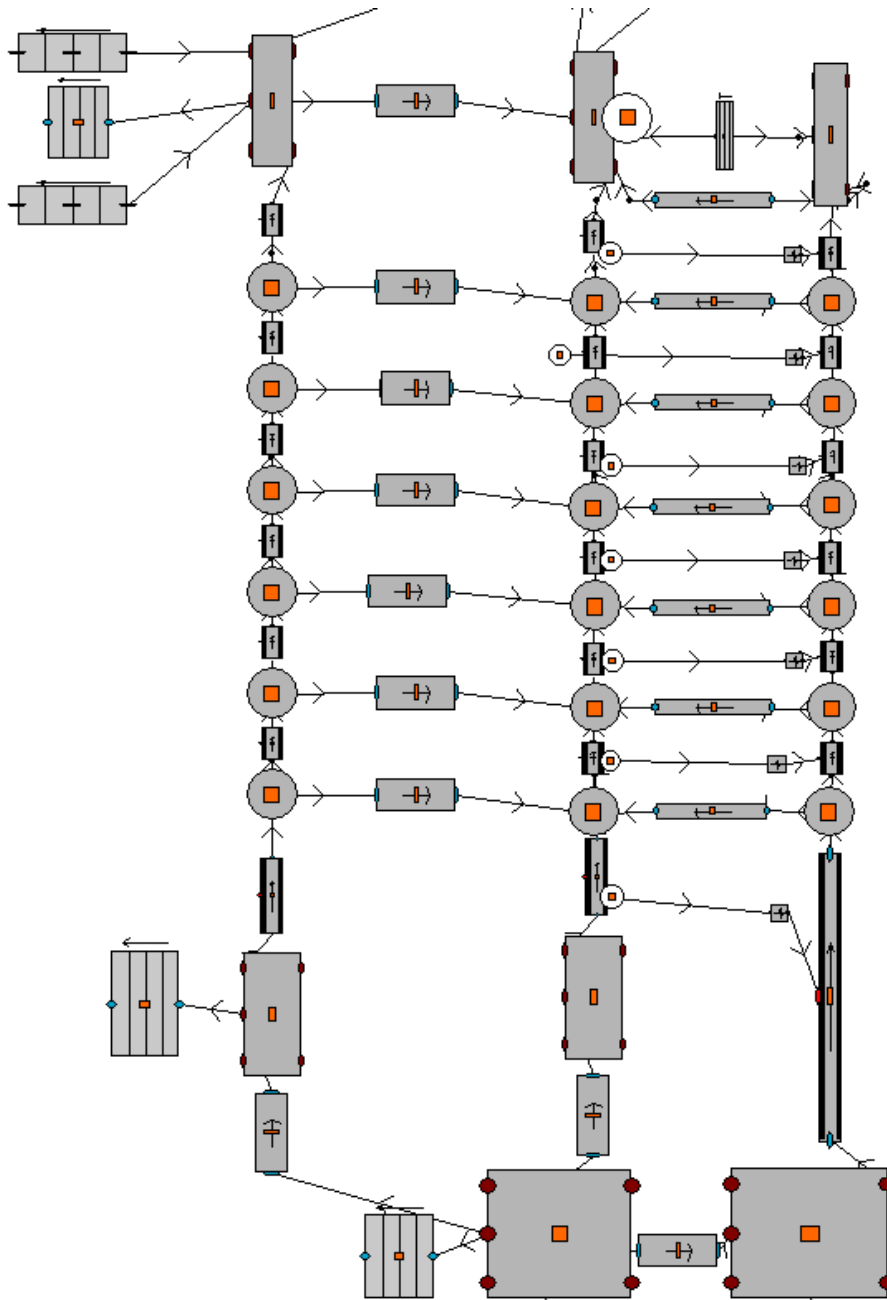
Kuten kuvista 7.17 ja 7.18 havaitaan, tasaisen vaiheen aikana simuloinnin lämpötila on hieman alempi kuin muokatun ylätilamallin simuloinnissa, mutta vuodon avaamisen jälkeen lämpötilaero muokatun ylätilamallin simulointiin alkaa kutistua. Tässä simuloinnissa lämpötilaero muokatun ylätilamallin simulointiin nähden ei supistu nollaan välittömästi kun vedenpinta saavuttaa mittauspisteen. Lisäksi tässä simuloinnissa havaitaan, että lämpötila laskee nyt hieman jyrkemmin. Ylätilan alemmassa mittauspisteessä laskunopeus on hieman lähempänä mitattua arvoa, kun taas ylemmässä mittauspisteessä alkuperäinen laskunopeus vastasi paremmin mittauksen tuloksia.

Ylätilan lämpötilojen käyttäytymisen lisäksi ei lämpöhäviöiden muuttaminen vaikuttanut muuten simulaation käyttäytymiseen. Tuloksissa on edelleen havaittavissa samat poikkeamat mittaukseen nähden kuin alkuperäisen mallin simuloinnissa.

7.5 Rengastilan mallimuutoksen vaikutus muokattuun ylätilamalliin

Rakenteellisena ratkaisuna ylätilan toiminnan parantamiseksi, tässä työssä rakennettiin ylätilasta malli, jossa ylätilan yläosa diffuusoriputken ulkopuolella, eli ns. rengastila, on jaettu kahdeksi erilliseksi noodiketjuksi. Jakamalla tila kahdeksi rinnakkaiseksi noodiketjuksi, pyrittiin virtauksille tarjoamaan erilaisia reittejä ylätilassa ja luomaan näin mahdollisesti realistisempi virtauskäyttäytyminen. Mittaustietoa ylätilan virtauksista ei koelaitteistosta ole saatavilla, mutta on mahdollista, että rengastilassa tapahtuu tietyllä korkeudella, jollakin hetkellä virtausta sekä ylös- että alaspäin eri puolilla rengastilaa.

Uusi rengastila on rakennettu siten, että alkuperäisen rengastilaa kuvaavan putkiketjun rinnalle on rakennettu toinen samanlainen putkiketju. Putkiketjuun rakennettiin 0,5 metrin välein poikittaissuuntaisista haaroista kanavia, joita pitkin poikittaissuuntaiset virtaukset ovat mahdollisia. Putkien tilavuus jaettiin tasan kahden rinnakkaisen putken kesken, niin että molemmat putket vastaavat tilavuudeltaan puolta alkuperäisestä putkesta. Alkuperäisen putken muotohäviökertoimet jaettiin myös tasan uusien putkien välille. Uusi rengastilan malli on esitetty kuvassa 7.19.



Kuva 7.19. Kahdella rinnakkaisella putkella mallinnetun rengastilan rakenne.

7.5.1 RF-04-simulaatio: rengastilan nooditusmuutos

Mallilla, jossa rengastilan rakennetta on muokattu, ajettiin ensin 10000 sekunnin ajo tilanteen tasaamiseksi ja tämän jälkeen 1000 sekunnin simulointiajo. Mallilla suoritetun simulointiajon tulokset on esitetty taulukossa 7.6.

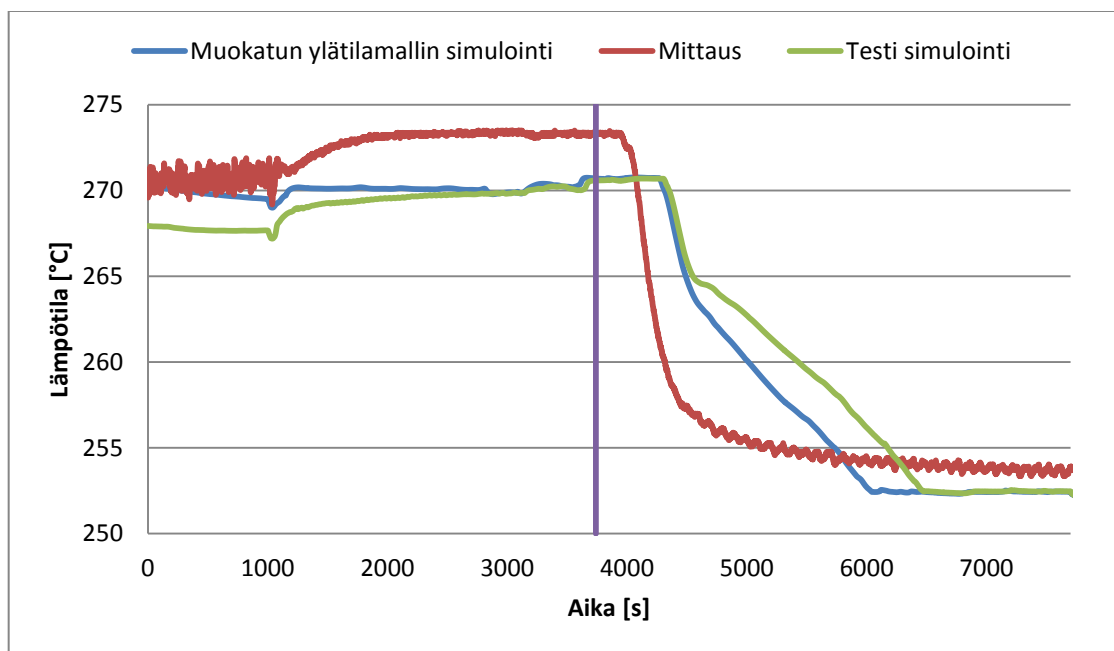
Taulukko 7.6. Simulointitulokset mallilla, jossa ylätilan yläosan rengastila on simuloitu kahdella rinnakkaisella putkiketjulla sekä kokeessa mitatut vastaavat arvot ja muutos muokattuun ylätilamalliin nähden.

	Mittaus	Simulointi	Alkuperäinen ero	Uusi ero	Yksikkö
Lämpötila sydämen sisäänmenossa	248,7	247,9	- 0,8	- 0,8	°C
Lämpötila sydämen ulostulossa	277,1	275,9	- 1,2	- 1,2	°C
Lämpötila ensimmäisessä kuumassa haarassa	277,6	275,0	- 2,4	- 2,6	°C
Lämpötila ylätilassa, +8,34 m	271,2	271,4	0,5	0,2	°C
Lämpötila ylätilassa, +11,44 m	272,4	272,6	0,6	0,2	°C
Paine ylätilassa	74,6	74,6	0	0	bar

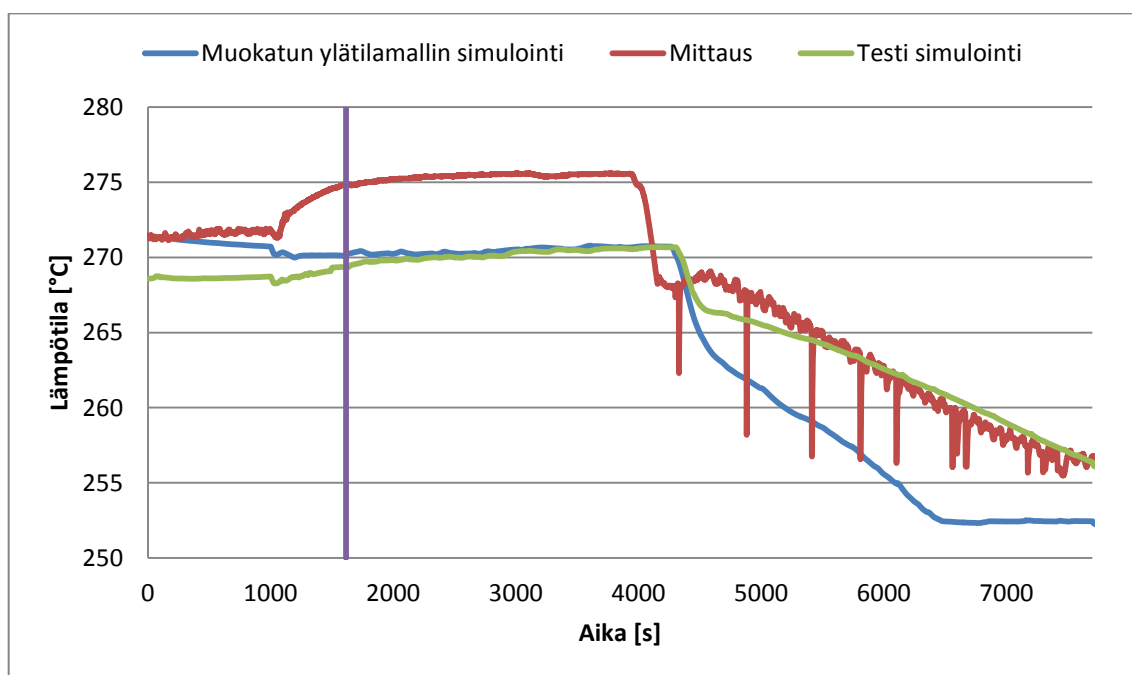
Simuloinnin perusteella havaitaan, että rakennemuutos laskee hieman lämpötiloja ylätilassa ja kuumassa haarassa, mutta ei vaikuttanut muuten simulointiin. Muutokset ylätilassa ovat oikean suuntaisia, mutta ylätilan lämpötilat poikkeavat yhä hieman simuloinnin muiden lämpötilojen linjasta.

7.5.2 SBL-50-simulaatio: rengastilan nooditusmuutos

Mallilla, jossa diffuusoriputken ulkopuolinen rengastila on mallinnettu kahdella rinnakkaisella putkella, simuloitiin myös SBL-50-koetta. Simuloinnissa oli havaittavissa pieniä muutoksia ylätilan toiminnassa. Ylätilasta simuloitujen lämpötilojen on esitetty kuvissa 7.20 ja 7.21.



Kuva 7.20. Lämpötila ylätilassa 8,34 m korkeudella, kun diffuusori-putken ulkopuolinen rengastila on mallinnettu kahdella rinnakkaisella putkiketjulla. Violetti pystyviiva kuvaa hetkeä, jona vedenpinta on laskenut ylätilassa kyseisen mittauspisteen korkeudelle.



Kuva 7.21. Lämpötila ylätilassa 11,44 m korkeudella, kun diffuusori-putken ulkopuolinen rengastila on mallinnettu kahdella rinnakkaisella putkiketjulla. Violetti pystyviiva kuvaa hetkeä, jona vedenpinta on laskenut ylätilassa kyseisen mittauspisteen korkeudelle.

Lämpötilat nousevat vuodon avaamisen jälkeen kohti muokatun ylätilamallin simuloinnin lämpötiloja ja saavuttavat ne, kun vedenpinta ohittaa mittauspisteen. Lisäksi on havaittavissa, että jyrkän lämpötilan pudotuksen aikana lämpötilat ovat nyt hieman korkeampia kuin alkuperäisessä simuloinnissa. Tuossa laskuvaiheessa PWR PACTEL –koelaitteistossa ylätilan lämpötila on tulistetun höyryn alueella. Aikaisemmista simuloinneista poiketen, nousi simuloitu lämpötila kaksinkertaisen rengastilan mallilla selvästi tulistetun höyryn alueelle, samoin kuin mittaustuloksissa. Ylätilan lämpötilojen lisäksi ei mallilla näyttänyt olevan muita vaikutuksia simulointituloksiin. Näiden tulosten perusteella noodituksen lisääminen ylätilassa kaksinkertaisen rengastilan mallilla parantaa mallin simulointitarkkuutta ylätilan lämpötilojen osalta. (Riikonen & Kouhia 2011 s.8)

7.6 Lauhtumiskorrelaatioiden vaikutus muokattuun ylätilamalliin

Luvussa 3.3 esiteltiin APROS-ohjelman vaihtoehtoisia lauhtumiskorrelaatioita ja todettiin niistä kolmen olevan mahdollisia PWR PACTEL –koelaitteiston ylätilan simuloinnissa. Alkuperäisessä mallissa on ylätilassa käytetty Shah-korrelaatiota, joten seuraavaksi tutkittiin toimivatko Chen-korrelaatio tai Nusseltin teoreema pystyputkille paremmin ylätilan simuloinnissa.

Esimerkiksi Eveliina Lappalaisen diplomityössä, jossa käytettiin APROS-versiota 5.05, todettiin Chen-korrelaation sopivan Shah-korrelaatiota paremmin höyrystimen mallintamiseen. (Lappalainen 2005 s.38, 65)

7.6.1 RF-04-simulaatio: Chen-korrelaatio

Tätä simulointia varten muutettiin kaikkien kuumen haaran yläpuolisten laskentapisteen rajapinnan lämmönsiirron kondensaatiokorrelaatioksi Chen-korrelaatio. Tämän jälkeen suoritettiin simulointiajo, jonka tulokset on esitelty taulukossa 7.7.

Taulukko 7.7. Simulointitulokset mallilla jossa ylätilan lauhtumiselle on käytetty Chen-korrelaatiota sekä kokeessa mitatut vastaavat arvot ja muutos alkuperäiseen malliin nähden.

	Mittaus	Simulointi	Alkuperäinen ero	Uusi ero	Yksikkö
Lämpötila sydämen sisäänmenossa	248,7	247,9	- 0,8	- 0,8	°C
Lämpötila sydämen ulostulossa	277,1	275,9	- 1,2	- 1,2	°C
Lämpötila ensimmäisessä kuumassa haarassa	277,6	275,2	- 2,4	- 2,4	°C
Lämpötila ylätilassa, +8,34 m	271,2	271,7	0,5	0,5	°C
Lämpötila ylätilassa, +11,44 m	272,4	273,0	0,6	0,6	°C
Paine ylätilassa	74,6	74,6	0	0	bar

Kuten tuloksista nähdään, eivät Chen-korrelaatiolla lasketut tulokset poikenneet mitenkään Shah-korrelaation tuloksista. Laskentakorrelaatioiden väliset erot eivät siis tule näkyviin pelkässä tasapainotilan simuloinnissa.

7.6.2 RF-04-simulaatio: Nusseltin teoreema putken sisäpinnoille

Toisena vaihtoehtoisena korrelaationa ylätilan lauhtumiskorrelaatioksi testattiin Nusseltin teoreemaa putken sisäpinnoille. Ylätilan kuumien haarojen yläpuolisten laskentapisteiden rajapinnan lämmönsiirron kondensaatiokorrelaatioksi vaihdettiin tarkasteltava korrelaatio. Simuloinnin tulokset on esitetty taulukossa 7.8.

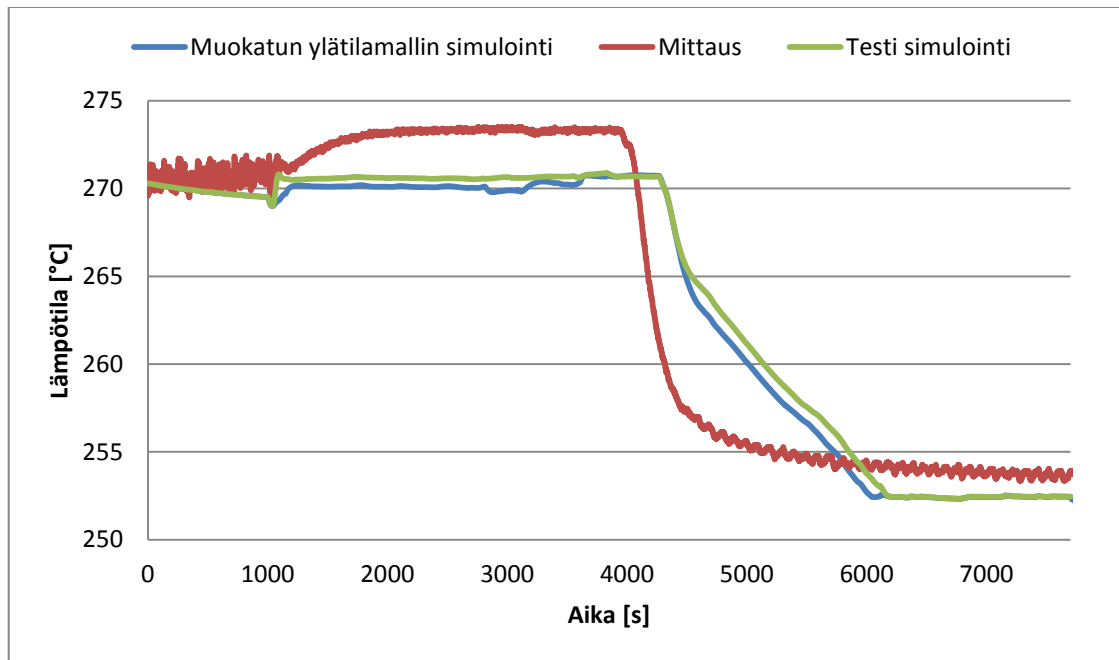
Taulukko 7.8. Simulointitulokset mallilla jossa ylätilan lauhtumiselle on käytetty Nusseltin teoreemaa putken sisäpinnalle sekä kokeessa mitatut vastaavat arvot ja muutos alkuperäiseen malliin nähden.

	Mittaus	Simulointi	Alkuperäinen ero	Uusi ero	Yksikkö
Lämpötila sydämen sisäänmenossa	248,7	247,9	- 0,8	- 0,8	°C
Lämpötila sydämen ulostulossa	277,1	275,9	- 1,2	- 1,2	°C
Lämpötila ensimmäisessä kuumassa haarassa	277,6	275,2	- 2,4	- 2,4	°C
Lämpötila ylätilassa, +8,34 m	271,2	271,7	0,5	0,5	°C
Lämpötila ylätilassa, +11,44 m	272,4	273,0	0,6	0,6	°C
Paine ylätilassa	74,6	74,6	0	0	bar

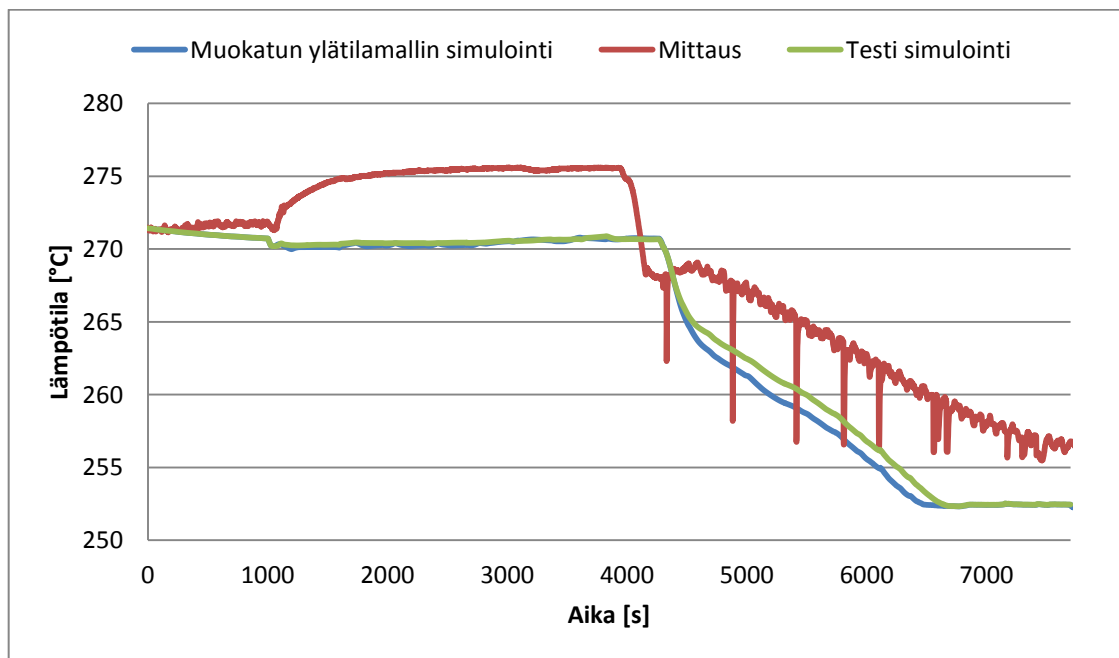
Samoin kuin Chen-korrelaation kohdalla, myös Nusseltin teoreemaa käytettäessä havaitaan, että tulokset ovat identtisiä alkuperäiseen simulaatioon nähden. Näin ollen voidaan todeta, että korrelaatiota vaihtamalla ei saada aikaan näkyviä muutoksia RF-04-kokeen tapaisen tasapainotilan simuloinnissa.

7.6.3 SBL-50-simulaatio: Chen-korrelaatio

Simuloinnissa muutettiin kuumien haaran yläpuoliset seinämänlauhtumiskorrelaatiot Chen-korrelaatioiksi ja suoritettiin tämän jälkeen SBL-50-simulointi. Ylätilan lämpötilat on esitetty kuvissa 7.22 ja 7.23.



Kuva 7.22. Lämpötila ylätilassa 8,34 m korkeudella, kun ylätilan lauhtumiskorrelaationa on käytetty Chen-korrelaatiota.

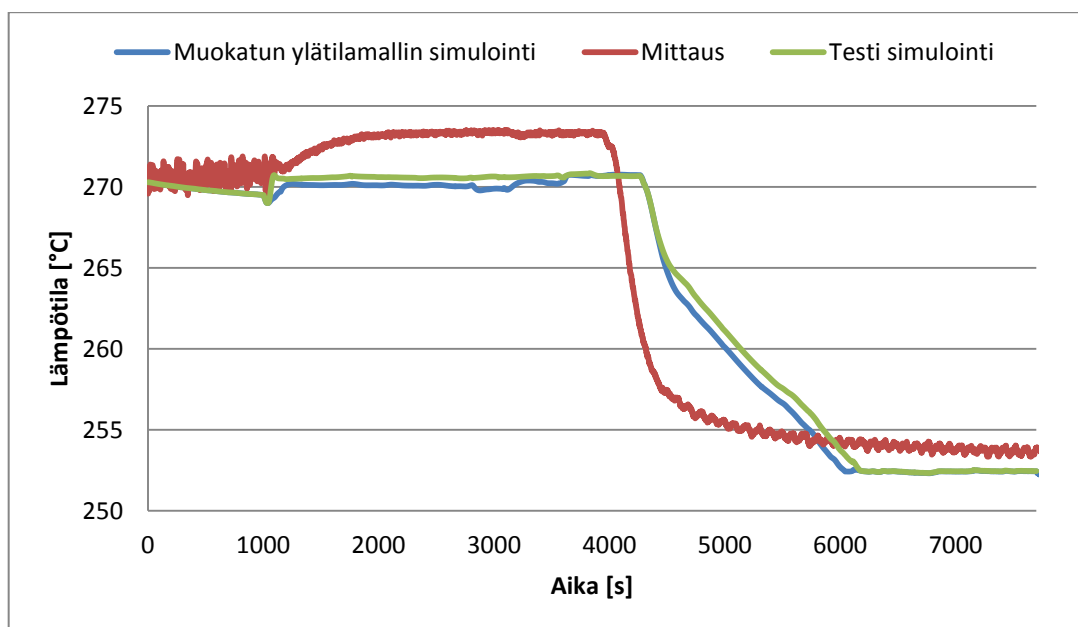


Kuva 7.23. Lämpötila ylätilassa 11,44 m korkeudella, kun ylätilan lauhtumiskorrelaationa on käytetty Chen-korrelaatiota.

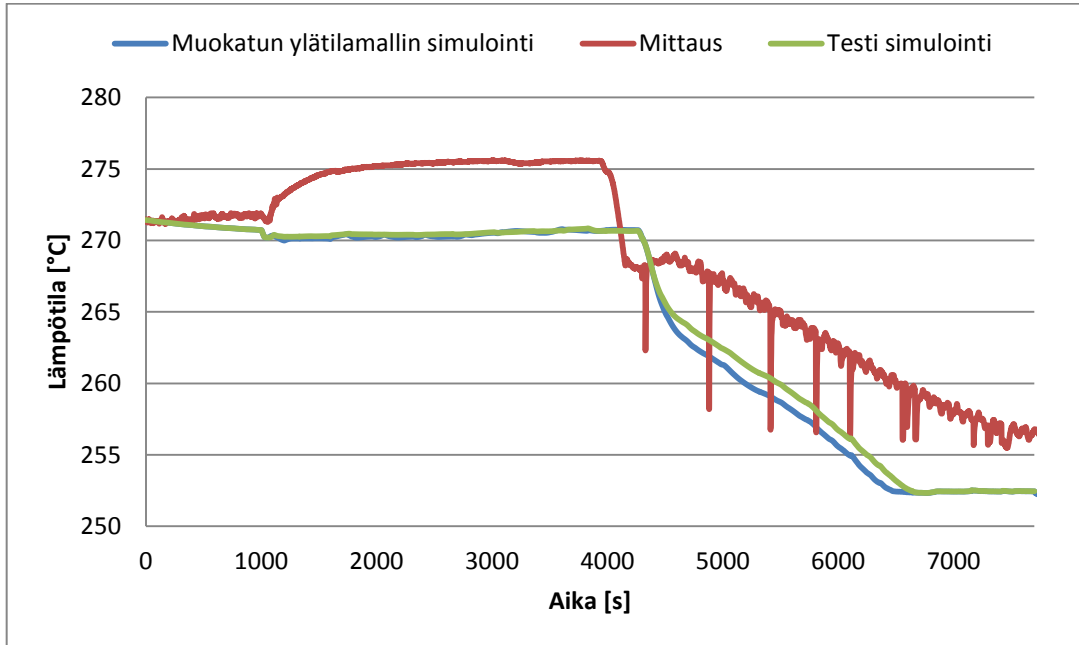
Kuten kuvista 7.22 ja 7.23 huomataan, on laskentakorrelaatioiden välillä havaittavissa pientä eroa, lähinnä jyrkän lämpötilanlaskun aikana. Chen-korrelaatiolla lasketut lämpötilat ovat hieman korkeampia kuin Shah-korrelaatiolla lasketut. Erot ovat suhteellisesti todella pieniä verrattuna lämpötilojen epävarmuuksiin. Muualla piirissä ei havaittu muutoksia simuloinnissa. Näiden tulosten perusteella voidaan todeta, että mallin ylätilan toiminta paranee hieman muuttamalla ylätilan seinämänlauhtumiskorrelaatio Chen-korrelaatioksi, mutta muutos ei ole merkittävä.

7.6.4 SBL-50-simulaatio: Nusseltin teoreema putken sisäpinnoille

Tässä simuloinnissa vaihdettiin kuumien haarojen yläpuolisten laskentapisteen seinämänlauhtumiskorrelaatioksi Nusseltin teoreema putken sisäpinnoille. Tämän jälkeen suoritettiin jälleen simulointi, jonka tulokset ylätilan lämpötilojen osalta on esitetty kuvissa 7.24 ja 7.25.



Kuva 7.24. Lämpötila ylätilassa 8,34 m korkeudella, kun ylätilan lauhtumiskorrelaationa on käytetty Nusseltin teoreemaa pystyputkille.



Kuva 7.25. Lämpötila ylätilassa 11,44 m korkeudella, kun ylätilan lauhtumiskorrelaationa on käytetty Nusseltin teoreemaa pystyputkille.

Kuten kuvista havaitaan, saadaan myös tällä korrelaatiolla aikaan pieni ero alkuperäiseen simulointiin nähden, lähinnä jyrkimmän lämpötilanlaskun aikana. Suhteellinen ero alkupe-
räiseen simulointiin on pieni, lämpötilojen epävarmuuksiin nähden. Simulointituloksissa ei
havaittu ylätilan lämpötilojen lisäksi muita poikkeamia alkuperäiseen simulointiin nähden.
Näiden tulosten perusteella voidaan todeta, että ylätilan laskentakorrelaation vaihtaminen ei
paranna merkittävästi mallin simulointituloksia.

8 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä selvitettiin PWR PACTEL -koelaitteiston APROS-mallin ylätilan toimivuutta. Tarkoituksena oli selvittää mallin poikkeamia ylätilan toiminnan osalta koelaitteistolla saatuihin mittaustuloksiin nähden ja tutkia muutamien yksinkertaisten parannusvaihtoehtojen toimivuutta.

Ylätilan mallintamisen tekee hankalaksi vähäiset mittaustulokset ylätilasta. Käytettävissä on vain kaksi lämpötilanmittausta ja yksi painemittaus ylätilassa. Lisäksi yksiulotteinen APROS-ohjelma soveltuu huonosti PWR PACTEL –ylätilan kaltaisen umpinaisen putken virtausten simulointiin.

Aluksi suoritettiin simuloinnit yksinkertaisella ylätilamallilla, josta oli poistettu kaikki parannukset. Näissä simuloinneissa havaittiin, että yksinkertainen malli toimi todella heikosti ylätilan lämpötilojen osalta. Tulosten perusteella vaikuttaisi siltä, että ylätilan mallintaminen yksinkertaisella noodiketjulla ei anna todellisuutta vastaavia simulointituloksia. Muokatun ylätilamallia käytettäessä simulaatioissa havaittiin myös poikkeamia mittaustuloksiin, mutta erot olivat selvästi pienempiä, kuin yksinkertaisen ylätilamallin simulaatiossa. RF-04-kokeen simuloinneilla tutkittiin mallin käyttäytymistä tasapainotilan simuloinnissa. Simuloinnissa havaittiin, että ylätilan lämpötilat olivat hieman korkeampia kuin kokeessa mitatut lämpötilat, mutta vastaavasti piirin muut lämpötilat olivat hieman matalampia. Koska lähtöoletuksena tässä työssä oli tarve parantaa ylätilamallin toimivuutta, oletettiin että ylätilan toiminnan kannalta ylätilan lämpötilojen ja vastaavien mittaustulosten erotuksen tulisi olla linjassa muun piirin vastaavien erotusten kanssa. On tosin huomioitava, että kaiken kaikkiaan lämpötilapoikkeamat olivat melko pieniä, vain muutamia asteita, ja pääsääntöisesti kaikki poikkeamat olivat virherajojen sisäpuolella.

Toisena kokeena simuloitiin SBL-50-koetta, jossa päästiin tarkastelemaan mallin toimivuutta dynaamisessa tilassa. Tämän kokeen simuloinnin yhteydessä havaittiin hieman suurempia poikkeamia mittaustuloksiin nähden. Merkittävimmät havaitut poikkeamat olivat piirin massavirran huomattavasti mittaustuloksia pidempään jatkuva nousuvaihe, sydämen

sisäänmenolämpötila käyttäytymisen poikkeaminen mittaustuloksista kokeen loppupuolella sekä ensimmäisen pinnanlaskuvaiheen jälkeisen paineen ja lämpötilan nousun puuttuminen. Näiden poikkeamien liittymistä ylätilan toimitaan, ei kuitenkaan voida osoittaa. Ylätilaan suoraan liittyvänä poikkeama havaittiin lämpötilan ylätilan huipulla jäävän selvästi mittaustuloksia alemmaksi simuloinnin jyrkän lämpötilan laskun aikana.

Alkuperäiseen malliin koetettiin neljää parannusvaihtoehtoa. Ensimmäinen oli ylätilan virtausvastuksen säätäminen muuttamalla muotohäviökerrointa ylätilassa. Toisena kokeiltiin lämpöhäviöiden muuttamista säätämällä ylätilan eristeiden lämpövastuksia. Kolmantena koetettiin pientä rakenteellista muutosta ylätilaan, jossa diffuusoriputken ulkopuolinen rengastila mallinnettiin alkuperäisestä mallista poiketen kahdella rinnakkaisella putkella. Näin pyrittiin parantamaan ylätilan sisäisiä poikittaisvirtauksia. Viimeisenä ratkaisuvaihtoehtona muutettiin ylätilan seinämälauhtumiskorrelaatioita.

Kolmella ensimmäisellä parannustavalla saatiin parannettua ylätilan lämpötilojen tuloksia muuhun piiriin nähden RF-04-kokeen simuloinnissa. Lisäksi muutoksilla ei havaittu olevan merkittäviä muutoksi muun piirin simulointituloksiin. Laskentakorrelaatioiden vaihtamisella ei puolestaan ollut näkyvää vaikutusta RF-04-simulointeihin.

SBL-50-kokeen kohdalla havaittiin, että kolmessa ensimmäisessä parannusvaihtoehdossa saavutettu lämpötilaero alkuperäiseen simulointiin nähden alkoi kaventua vuodon avaamisen jälkeen ja ero katosi kun vedenpinta ylätilassa oli laskenut mittauspisteen korkeudelle tai pian sen jälkeen. Kaksinkertaisen ylätilan mallissa havaittiin ylätilan yläosassa mitatun lämpötilan seuraavan kokeen mittaustuloksia tulistetun höyryn alueelle. Tällä mallilla saatiin siis aikaan parannusta ylätilan lämpötilojen simulointiin. Lisäksi yhdelläkään muutoksella ei havaittu olevan vaikutusta muihin havaittuihin poikkeamiin ylätilan lämpötilan lisäksi. Korrelaatioiden vaihdolla havaittiin olevan pieni vaikutus simulointituloksiin, mutta suhteellinen muutos oli pieni verrattuna lämpötilojen epävarmuuksiin. Näiden tulosten perusteella ylätilan simulointitarkkuutta voidaan parantaa lisäämällä ylätilan nooditusta kaksinkertaisen rengastilan mallilla.

Simulointien lähtötilanteet eivät vastanneet kaikilta osin kokeiden lähtötilanteita. Esimerkiksi piirin alkulämpötilojen saaminen oikealle tasolle aiheutti vaikeuksia, mistä johtuen simulointien lämpötilat ovat pääosin hieman alhaisempia kuin kokeessa mitatut arvot. Virtausvastusten ja lämpöhäviöiden muutosten tapauksissa tutkittiin yleisesti samansuuruisia muutoksia koko ylätilan yläosan kohdalta. Näitä malleja olisi mahdollista tutkia myös tarkemmin tekemällä eri puolille ylätilaa erisuuruisia ja suuntaisia muutoksia.

Tulevaisuudessa voisi olla syytä testata joidenkin parannusvaihtoehtojen yhteisvaikutusta. Ylätilan nooditukseen on myös mahdollista testata erilaisia rakenteellisia ratkaisuja. Eri laskentakorrelaatioiden kohdalla voisi olla syytä verrata niiden simulointituloksia useampiin koetuloksiin, jotta eri korrelaatioiden väliset eroavaisuudet saataisiin paremmin esiin.

LÄHTEET

Kirjalliset lähteet

Ahvonen Pasi. 1993. PACTEL-koelaitteiston mallintaminen Apros-ohjelmistolla. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 67 s. (nid).

Hämäläinen Anitta. 2005. Applying thermal hydraulics modeling in coupled processes of nuclear power plant. VTT Publications 578. Väitöskirja. Espoo: VTT processes. 103 s. (nid). ISBN: 951-38-6667-X.

Hänninen Markku, Ylijoki Jukka. 2008. The one-dimensional separate two-phase flow model of APROS. VTT research notes 2443. Espoo: VTT. 61 s. (nid.) ISBN: 978-951-38-7224-3

Hänninen Markku, Ylijoki Jukka. 2009. The Constitutive Equations of the APROS Six-equation Model. VTT. 44 s.

Hänninen Markku. 2009. Phenomenological extensions to APROS six-equation model. VTT publications 720. Espoo: VTT. 60 s. ISBN: 978-951-38-7367-7

Leppänen Ari-Pekka. 2000. Ydinvoimalaitoksen primääripiiriä kuvaavan PACTEL-koelaitteiston mallinnus ja kelpoistus APROS 5 simulointiympäristössä. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 84 s. (nid).

LUT. Lista PWR PACTEL -mittauksista.

OECD. 1987. CSNI Code Validation Matrix of Thermo-Hydraulic Codes for LWR LOCA and Transients. OECD, CSNI Report 132. OECD, Pariisi, Ranska

OECD. 2001. Validation Matrix for the Assessment of Thermal-Hydraulic Codes for VVER LOCA and Transient. NEA/CSNI/R(2001)4. OECD, Pariisi, Ranska. 249 s.

Purhonen Heikki. 2007. Experimental Thermal Hydraulic Studies on the Enhancement of Safety of LWRs. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 293. Väitöskirja. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 73 s. (nid). ISBN: 978-952-214-500-0.

Riikonen Vesa. 2009. Pressure and Heat Loss Experiments with PWR PACTEL Facility. Työraportti YTY 2/2009. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 33 s.

Riikonen Vesa, Kouhia Virpi. 2011. Summary Report of PWR PACTEL Benchmark Experiment Open Calculations. Tutkimusraportti PAX 2/2011. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 16 s.

Riikonen Vesa, Kouhia Virpi, Räsänen Antti, Partanen Harri. 2009. General description of the PWR PACTEL test facility. Tutkimusraportti YTY 1/2009. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 20 s.

Riikonen Vesa, Kouhia Virpi, Vihavainen Juhani. 2011. Study of flow reversing in vertical heat exchange tubes. Tutkimusraportti PAX 4/2011. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 25 s.

Takasuo Eveliina. 2005. Modeling of pressurizer using APROS and TRACE thermal hydraulic codes. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 111 s. (nid).

Tuunanen Jari, Kouhia Jyrki, Purhonen Heikki, Riikonen Vesa, Puustinen Markku, Semken R. Scott, Partanen Harri, Saure Ilkka, Pylkkö Hannu. 1998. General description of the PACTEL test facility. VTT tiedotteita 1929. Espoo: VTT. 35 s. ISBN: 951-38-5338-1.

Sähköiset lähteet

Boyack Brent E, Ward Leonard W. 2000. Validation test matrix for the consolidated TRAC (TRAC-M) code. [PDF-julkaisu]. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, USA. Saatavissa: [<http://www.osti.gov/energycitations/purl.cover.jsp?purl=/763345-eclJx4/webviewable/>] Viitattu: [25.10.2012]

Mangal Amit, Jain Vilkas, Nayak A.K. 2012. Capability of the RELAP5 code to simulate natural circulation behavior in test facilities. [PDF-julkaisu]. Julkaistu: Progress in Nuclear Energy numero 61 sivut 1-16. Marraskuu 2012. Saatavissa: [<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197012000820>]. Viitattu: [18.10.2012].

Mitsubishi Heavy Industries, LTD. 2010. Scaling Analysis for US-APWR Small Break LOCAs. [PDF-julkaisu]. Raporttitunnus: UAP-HF-10289-NP (R0). Saatavissa: [<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1031/ML103120255.pdf>]. Viitattu: [12.11.2012]

Murray Christopher. 2007. Overview of TRACE V5.0. [PowerPoint-esitys]. Esitetty: 14.3.2007 Regulatory Information Conference. Saatavissa: [<http://www.nrc.gov/public-involve/conference-symposia/ric/past/2007/slides/CMurraytraceoverview.pdf>]. Viitattu: [6.11.2012]

Petruzzi Alessandro, D'Auria Francesco. 2007. Thermal-hydraulic System Codes in Nuclear reactor Safety and Qualification procedures. [PDF-julkaisu]. Julkaistu: Science and Technology of Nuclear Installations Volume 2008 Article ID 460795. University of Pisa, Pisa, Italia. Saatavissa: [<http://www.hindawi.com/journals/stni/2008/460795/abs/>]. Viitattu: [29.10.2012].

Pokharna Himanshu, Mori Michitsugu, Ransom Victor H. Regularization of Two-Phase Flow Models: A Comparison of Numerical and Differential Approaches. [PDF-julkaisu]. Julkaistu: Journal of Computation Physics numero 134, osa 2, sivut 282–295. Heinäkuu

1997. Saatavissa: [<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999197956953#>]
Viitattu: [22.10.2012].

Porkholm Kari, Kontio Harri, Plit Herkko. 2008. APROS Simulation Model for Olkiluoto-3 EPR Applications. [PDF-julkaisu]. Saatavissa: [http://www.apros.fi/filebank/83-EPR_OL3_paper_2008.pdf]. Viitattu: [21.5.2012].

Pourgol-Mohammad Mohammad, Mosleh Ali, Moderres Mohammad. 2010. Structured treatment of model uncertainty in complex thermal-hydraulics codes: Technical challenges, prospective and characterization. [PDF-julkaisu]. Julkaistu: Nuclear Engineering and Design numero 241, osa 1 sivut 285–295. Tammikuu 2011. Saatavissa: [<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549310007144#>]. Viitattu: [18.10.2012]

VTTa. APROS. [PDF-julkaisu]. Saatavissa: [http://www.apros.fi/filebank/68-Apros_overview.pdf]. Viitattu: [22.5.2012]

VTTb. APROS Manual. APROS Advanced Process Simulation Software. [Tietokanta]. Viitattu: [22.5.2012]

VTTc. APROS Thermal Hydraulics: Thermal Hydraulics Flow Models. [PDF-julkaisu]. Saatavissa: [http://www.apros.fi/filebank/71-Apros_thermal_hydraulics_-_general.pdf]. Viitattu: [22.5.2012]

VTTd. APROS Thermal Hydraulics: Comparison of Different Thermal Hydraulic Modeling Approaches: Basic Conservation Equations. [PDF-julkaisu]. Saatavissa: [http://www.apros.fi/filebank/69-Apros_thermal_hydraulics_-_comparison.pdf]. Viitattu: [22.5.2012]

VTTe. APROS Manual. APROS Thermal hydraulic solution. [Tietokanta]. Päivitetty: [18.11.2005]. Viitattu: [28.5.2012]

VTTf. 2010. APROS Manual. APROS Thermal hydraulic reference guide: Thermal hydraulic nodes and branches. [Tietokanta]. Päivitetty: [5.7.2010]. Viitattu: [12.9.2012]

VTTg. 2010. APROS Manual. APROS Thermal hydraulic reference guide: Heat Structures. [Tietokanta]. Päivitetty: [1.9.2010]. Viitattu: [27.11.2012]