

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Rengaspolttoaineet nykylaitoksiin

Annular fuel for current power reactors

Työn ohjaaja ja tarkastaja: Ville Rintala

Lappeenranta 25.4.2014

Olli Suurnäkki

TIIVISTELMÄ

Olli Suurnäkki

Rengaspolttoaineet nykylaitoksiin

Kandidaatintyö 2014

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

41 sivua, 12 kuvaa, 3 taulukkoa.

Hakusanat: rengaspolttoaine, ydinpolttoaine, tehonkorotus

Kandidaatintyön tarkoituksena on tutkia käytössä oleville laitoksille kehitettyjä rengaspolttoaineita. Työssä kartoitetaan tutkimuksen nykytilaa ja arvioidaan uudenlaisen polttoaineen käyttöönoton mahdollisuuksia. Käsiteltävät aihe-alueet ovat rengaspolttoaineen rakenne, suorituskyky, turvallisuusominaisuudet, valmistettavuus sekä käyttöönoton taloudellinen kannattavuus. Pohja-aineistona on käytetty aiheesta julkaistuja tutkimusraportteja. Lisäksi arvioidaan rengaspolttoaineen käyttömahdollisuuksia Loviisan voimalaitoksessa.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Lyhenneluettelo	4
1 JOHDANTO	5
2 RENGASPOLTTOAINEET	7
2.1 Syyt rengaspolttoaineiden kehittämiseen	7
2.2 Kehityshistoria.....	8
3 RENGASPOLTTOAINEEN RAKENNE	11
3.1 Sauvojen lukumäärä polttoainenipussa	11
4 KÄYTTÖ PAINEVESIREAKTORISSA	17
4.1 13x13-polttoainenipun suorituskyky	17
4.2 Korealainen 12x12-polttoaine	18
4.3 Käyttäytyminen onnettomuustilanteissa.....	19
4.4 Säteilytyskäyttäytyminen	19
4.5 Lataussyklin / rikastusasteen vaatimat muutokset.....	20
4.6 Käyttö VVER-laitoksessa.....	21
4.6.1 Sauvojen määrä nipussa	21
5 KÄYTTÖ KIEHUTUSVESIREAKTORISSA	24
6 VALMISTETTAVUUS	25
6.1 Sintrattu rengaspolttoaine.....	25
7 TALOUDELLINEN KANNATTAVUUS	27
7.1 Polttoaineen valmistuskulut	27
7.2 Kannattavuus eri laitostilanteissa	28
7.2.1 Tehonkorotuksen kannattavuus.....	28
7.2.2 Uusien laitosten kannattavuus.....	28
8 AINEISTON TARKASTELU JA SOVELLUS	30
8.1 Aineiston tarkastelu	30
8.2 Arvio Loviisan VVER-440-reaktorin tehonkorotuksesta.....	32
9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO	37
Lähdeluettelo	39

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

<i>CHFR</i>	Kriittisen lämpövuon suhde (Critical Heat Flux Ratio), vastaa kiehutusvesilaitoksissa lyhennettä <i>DNBR</i>
<i>DNBR</i>	Polttoainesauvan ja kriittisen lämpövuon suhde, ”etäisyys lämmönsiirtokriisistä” (Departure from Nucleate Boiling Ratio)
<i>MDNBR</i>	Polttoainesauvan ja kriittisen lämpövuon suhteen minimi, ”minimietäisyys lämmönsiirtokriisistä” (Minimum Departure from Nucleate Boiling Ratio)

1 JOHDANTO

Ydinvoiman käyttö sähköntuotannossa perustuu maailmanlaajuisesti vesijäähdytteisiin paine- ja kiehutusvesireaktoreihin. Nämä reaktorityypit ovat yleistyneet hyvän tehohinta-suhteen ansiosta. Vuosikymmeniä kestänyt jatkuva kehitys- ja tutkimustyö ydinturvallisuuden ja voimantuotannon luotettavuuden parantamiseksi on kuitenkin johtanut yhä suurempiin laitosten rakennus-, käyttö- ja huoltokustannuksiin. Vaikka laitosten kannattavuus on parantunut kasvaneen luotettavuuden ansiosta, ydinvoiman kilpailukyky sähköntuotannossa on heikentynyt sähkömarkkinoiden avautuessa ja muiden tuotantomuotojen kilpailukykyyn parantuessa. Muuttunut markkinatilanne on lisännyt tarvetta pienentää ydinvoimalla tuotetun sähkön tuotantokustannuksia. Kustannuksia pienennettäessä on kuitenkin säilytettävä korkea laitosturvallisuuden taso. (Hejzlar & Kazimi 2007, 2-3)

Laitoksille tehdyt tehonkorotukset ovat keskeinen osa tuotantokustannusten pienentämistä. Tehoa korottamalla käytössä olevalla laitoksella voidaan tuottaa enemmän sähköä ilman suuria rakentamisesta johtuvia investointeja. Ydinpolttoaineiden tekninen kehitys on mahdollistanut lämmönsiirtopinta-alan kasvattamisen, mikä on käytännössä tarkoittanut polttoainepinnalla olevien polttoainesauvojen lukumäärän kasvua. Lisääntyneen sauvamäärän vuoksi yksittäisen sauvan halkaisijaa on täytynyt pienentää. Halkaisijaa on kuitenkin mahdollista pienentää vain rajallisesti, mikä on lisännyt mielenkiintoa vaihtoehtoisten polttoainegeometrioiden tutkimiseen. (Hejzlar & Kazimi 2007, 3)

Tässä työssä käsitellään käytössä olevien laitosten käyttöön suunniteltuja rengaspolttoaineita. Nämä polttoaineet perustuvat sisä- ja ulkopuoliseen jäähdytykseen eli polttoainetta jäähdytetään polttoainerenkaan ulkopinnalta sekä polttoaineen sisällä sijaitsevan jäähdytyskanavan kautta. Työssä tutustutaan polttoaineen kehityshistoriaan, rakenteeseen, suorituskykyyn, valmistettavuuteen ja taloudelliseen kannattavuuteen. Lisäksi arvioidaan rengaspolttoaineen käyttömahdollisuuksia Loviisan voimalaitoksella.

Työn tavoitteena on arvioida rengaspolttoaineiden kehityksen nykytilaa ja uudenlaisen polttoaineen käyttöönoton mahdollisuuksia käytössä olevissa laitoksissa. Arvioinnin pohjana käytetään aiheesta julkaistuja tutkimusraportteja ja -artikkeleita.

2 RENGASPOLTTOAINEET

Tässä luvussa käydään läpi rengaspolttoaineiden kehittämiseen vaikuttaneita syitä sekä polttoaineen kehityshistoriaa.

2.1 Syyt rengaspolttoaineiden kehittämiseen

Uusien reaktoreiden rakentamistahti länsimaissa, erityisesti Yhdysvalloissa, on hidastunut voimakkaasti 1980-luvulta lähtien. Ydinvoimalla tuotetun sähkön määrä on tästä huolimatta kasvanut tasaisesti käyville laitoksille tehtyjen parannusten ansiosta. Laitosten käyttökertoimet ovat nousseet ja tehonkorotuksia on voitu toteuttaa sekä reaktori- että turbiinipuolella. Laitoksille myönnetyt käyttö lupien pidennykset ovat tarjonneet mahdollisuuden tuottaa enemmän sähköä ilman suuria rakentamisesta johtuvia investointeja. Alkuperäisessä laitossuunnittelussa käytetty ylikonservatiivinen lähestymistapa rajoittaa kuitenkin uusien tehonkorotuksien toteutettavuutta. (Hejzlar & Kazimi 2007, 2-3)

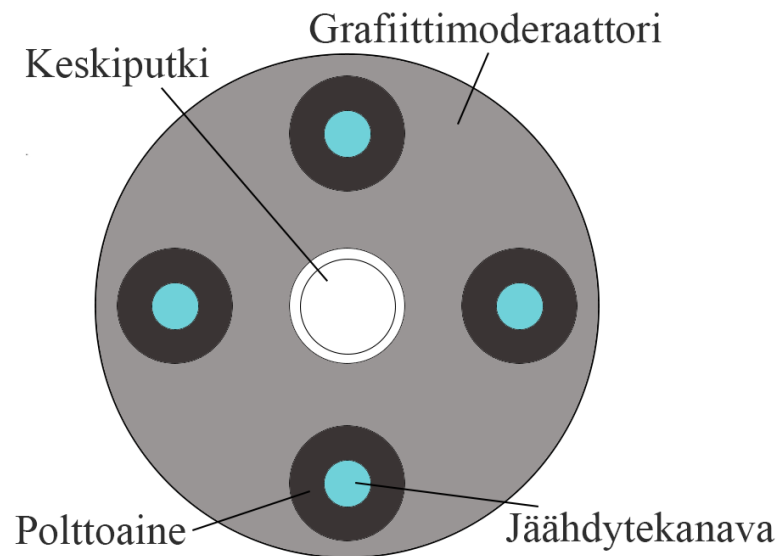
Tehonkorotuksien tärkein mahdollistava tekijä on ollut ydinpolttoaineiden tekninen kehitys. Edistynyt polttoainesuunnittelu ja parantunut suojakuoren laatu ovat parantaneet huomattavasti polttoaineen luotettavuutta ja polttoaineniippujen kehittynyt suunnittelu on nostanut suorituskykyä ja turvallisuustasoa. Suorituskyvyn paraneminen on perustunut yleisesti polttoaineen lämmönsiirtopinta-alan kasvattamiseen, mikä on käytännössä tarkoittanut polttoaineniipussa olevien polttoainesauvojen määrän nousua. Niput ovat kuitenkin säilyneet ulkomitoiltaan ennallaan, jolloin yksittäisen polttoainesauvan halkaisijaa on täytynyt pienentää. Sauvojen määrää lisäämällä onkin saatu huomattavia hyötyjä aikaiseksi, mutta reaktorifysikaaliset tekijät ja sauvan mekaaninen kestävyys asettavat pienimmän mahdollisen sauvan halkaisijan. Kevytvesireaktorissa polttoaineen ja jäähdytteen tilavuuksien suhde on määrätty. Polttoaineen määrää sydämessä on siten vaikea lisätä muuttamatta tilavuuksien suhdetta. Mekaanisen kestävyuden kannalta ohuemman sauvan pienempi jäykkyys aiheuttaa ongelmia jäähdytteen virtauksesta aiheutuvan värinän suhteen. Ohut sauva vaatii myös ohuemman suojakuorikerroksen, mikä lisää suojakuoren alttiutta korroosiolle. (Hejzlar & Kazimi 2007, 3)

Sydämen tehotiheyden nosto nykymallisissa paine- ja kiehutusvesireaktoreissa dioksidipolttoaineita käyttämällä vaatii polttoaineelta edeltävässä kappaleessa mainituista syistä uudenlaista geometriaa (Hejzlar & Kazimi 2007, 3). Tässä työssä keskitytään pääasiassa Yhdysvalloissa vuonna 2001 käynnistetyssä tutkimusohjelmassa kehitettyyn sisä- ja ulkopuolelta jäähdytettyyn rengasmaiseen polttoaineeseen.

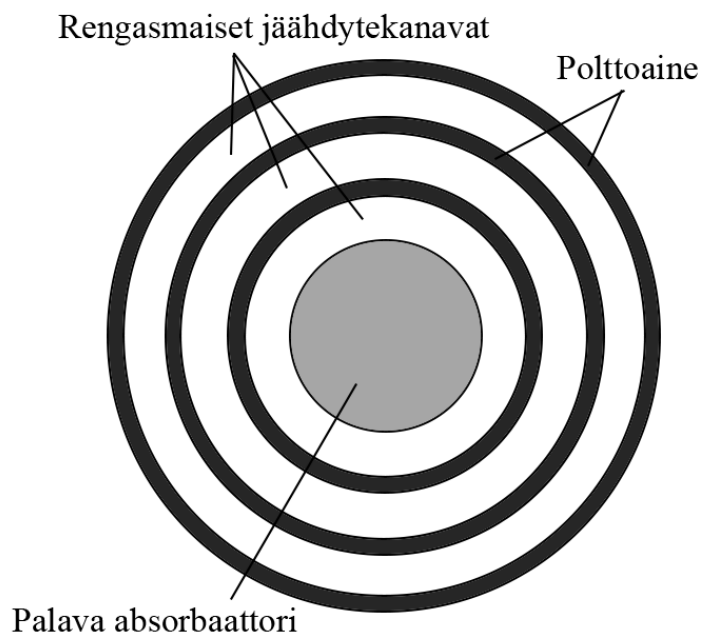
2.2 Kehityshistoria

Ajatus rengasmaisesta, sisä- ja ulkopuolelta jäähdytetyistä ydinpolttoaineesta on ollut esillä ainakin 1960-luvulta lähtien. Vuonna 1965 Yhdysvalloissa myönnettyssä patentissa on kuvattu erilaisia ratkaisuja polttoaineen sisälämpötilan alentamiseen. Patentin pääpaino on eri rikastusasteisia uraanikerroksia käsittävän polttoainepelletin rakenteessa, mutta eräs esitetyistä ratkaisu on putkimainen polttoainepelletti, jossa lämmönsiirto jäähdytteeseen tapahtuu putken sisäpuolisen suojakuoren läpi konventionaalisen ulkopuolisen suojakuoren lisäksi. (Lackey 1965, 3)

Sisäpuolista jäähdytystä hyödyntäviä polttoaineita on ollut käytössä 1950-luvulta lähtien. Neuvostoliittolaisen Obninskin ydinvoimalaitoksen reaktorissa oli käytössä putkimaista polttoainetta (kuva 1), jossa jäähdyte kulki rengasmaisen polttoaineen läpi, ulkokuoren koskettaessa grafiittimoderaattoria. Sisä- ja ulkopuolista jäähdytystä on käytetty joissakin koereaktoreissa, kuvassa 2 on esitetty useasta renkaasta koostuva polttoainesauva. Jäähdyte kulkee sisäkkäisten renkaiden väleissä vastakkaisiin suuntiin. (Blinkov et. al. 2010, 2)



Kuva 1. Obninskin ydinvoimalaitoksessa käytetty sisäpuolelta jäähdytetty rengasmainen polttoaine.



Kuva 2. Sisä- ja ulkopuolelta jäähdytetty useista renkaista koostuva kooreaktorin polttoainesauva.

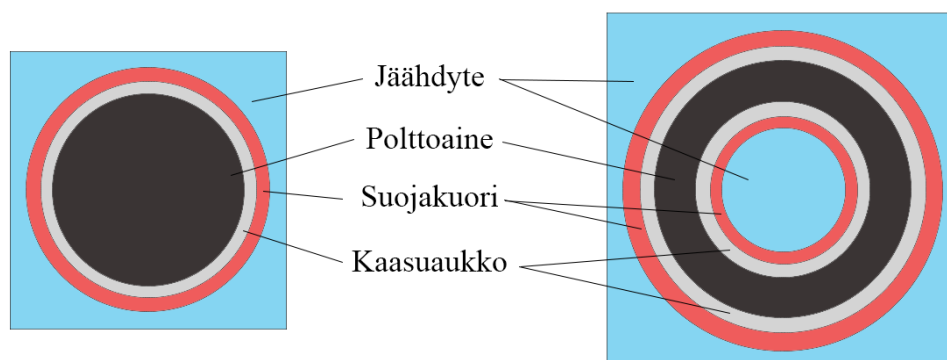
Rengasmaisten polttoaineiden kehitys ja tutkimus tehoreaktorikäyttöä varten on lisääntynyt 2000-luvun alusta lähtien. Tähänastisista tuloksista merkittävimmät syntyivät Yhdysvaltain energiaministeriön (DOE) vuonna 2001 käynnistämän

tutkimusohjelman seurauksena. Ohjelman tarkoituksena oli kehittää sisä- ja ulkopuolelta jäädytetty rengasmainen polttoaine, jota olisi mahdollista hyödyntää käytössä olevissa reaktoreissa. Kehitettävän polttoaineen tuli mahdollistaa huomattava, vähintään 30 %:n korotus tehoiteudessa turvallisuusmarginaalien pysyessä vähintään konventionaalisten polttoaineiden tasolla. Tutkimuksen toteuttivat joukko tutkimuslaitoksia ja kaupallisia toimijoita: Massachusettsin teknillinen korkeakoulu (MIT), Westinghouse Electric Corporation, Gamma Engineering Corporation, Framatome ANP ja Atomic Energy of Canada Limited. Johtavana organisaationa toimi MIT ohjelman päättymisvuoteen 2006 saakka. Tutkimuksessa toteutettiin polttoaineen reaktorifysikaalinen suunnittelu sauva- ja nipputasolla, tutkittiin mekaanista kestävyyttä, polttoaineen valmistettavuutta sekä kartoitettiin rengasmaisella polttoaineella toteutetun tehonkorotuksen taloudellista kannattavuutta. Kehitystyön pääpaino oli painevesireaktorissa käytettävän polttoaineen suunnittelussa ja saatuja tuloksia hyödynnettiin sivuavassa, kiehutusvesireaktorikäyttöä kartoittavassa ohjelmassa. (Hejzlar & Kazimi 2007, 2-3)

Tutkimusta on sittemmin jatkettu DOE:n tutkimusohjelman tulosten pohjalta erityisesti Iranissa sekä Etelä-Koreassa. Iranissa tutkimus on keskittynyt rengaspolttoaineen käyttöön VVER-tyyppisessä painevesireaktorissa (Mozafari & Faghihi 2013, 226). Etelä-Koreassa tutkimuksen tavoitteena on ollut optimoida polttoaineen rakenne korealaisvalmisteisen OPR-1000-laitoksen tehonkorotusta varten (Shin et al. 2013, 375). MIT:n tutkimusohjelman päättyessä kaupallisen käytön Yhdysvalloissa arvioitiin olevan vähintään kymmenen vuoden päässä (Betts 2007, 676).

3 RENGASPOLTTOAINEEN RAKENNE

Ulko- ja sisäpuolelta jäähdytetty rengasmaisen polttoainesauva käsittää kaksi lämmönsiirtopintaa; sauvan ulkopuolinen suojakuori on yhteydessä sauvojen väliseen ja sisäpuolinen sauvan sisäiseen jäähdytevirtaukseen. Rengaspolttoaineen rakenne konventionaaliseen polttoaineeseen verrattuna on esitetty kuvassa 3. Jäähdyte virtaa paineastian pohjasta sekoittuen sauvojen väliseen jäähdytekanavaan ja sisäiseen kanavaan sekoittumatta muodostaen kaksi erillistä virtausta. Polttoaineen kestävyuden, suorituskyvyn ja turvallisuusmarginaalien optimoimiseksi jäähdytyskanavien lämmönsiirrollisten olosuhteiden tulisi vastata toisiaan mahdollisimman hyvin. Tämä tarkoittaa suojakuorien pintalämpötilojen, jäähdytteen entalpiannousujen ja erityisesti DNBR-arvojen vastaavuutta. DNBR-arvolla tarkoitetaan polttoainesauvassa esiintyvän lämpövuon ja jäähdytteen kiehumiseen vaadittavan kriittisen lämpövuon suhdetta. Arvoa kuvataan usein ”etäisyydeksi lämmönsiirtokriisiin”. Sydämen MDNBR eli pienin sydämessä esiintyvä DNBR-arvo maksimoidaan pitämällä sisemmän ja ulomman jäähdytyskanavan DNBR-arvot mahdollisimman lähellä toisiaan. (Feng et al. 2007, 16-17)



Kuva 3. Polttoainesauvan poikkileikkaus, vasemmalla konventionaalinen ja oikealla rengasmaisen ulko- ja sisäpuolelta jäähdytetty polttoainesauva.

3.1 Sauvojen lukumäärä polttoainepussissa

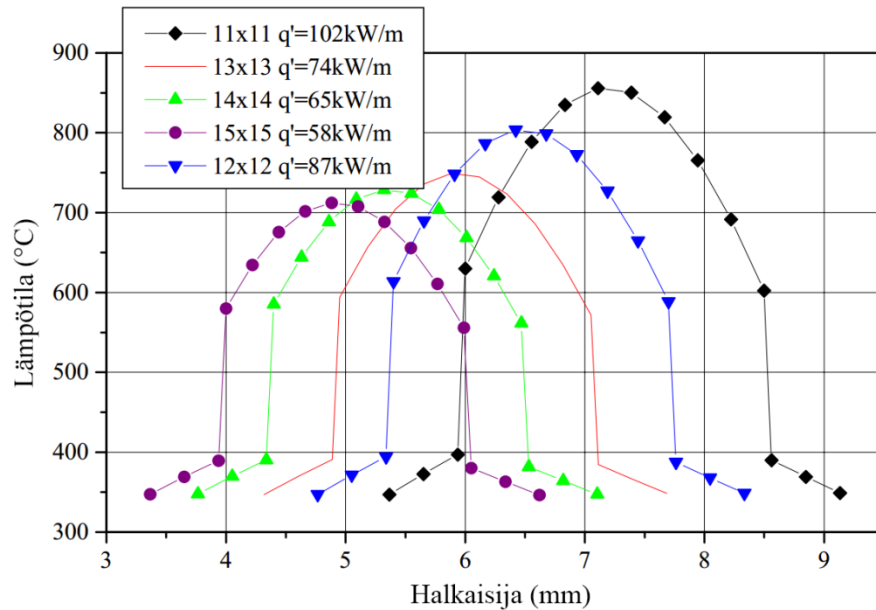
Rengaspolttoaineen käyttö nykyreaktorissa edellyttää rengaspolttoainepuulta perinteisten nippujen kanssa vastaavaa geometriaa. Jotta tavoiteltu pelletin sisäpuolinen

jäähdytevirtaus olisi mahdollinen, on yksittäisen polttoainesauvan halkaisijaa kasvatettava. Tällöin polttoainenippuun mahtuu vähemmän sauvoja, mikä nostaa sauvakohtaista tehoa. MIT:n tutkimusohjelmassa sauvojen optimaalista lukumäärää tutkittiin vertaamalla erilaisilla sauvamäärillä simuloituja nippukonfiguraatioita keskenään. Simuloinnissa käytettiin MIT:n itse kehittämää TAFIX-koodia (Thermal-Hydraulic Model of Annular Fuel with Internal and eXternal Cooling), jolla voidaan simuloida yksinkertaista kuumen sauvan mallia. Koodi laskee annetun jäähdytteen kokonaisvirtauksen ja -painehäviön perusteella jäähdytteen jakautumisen sisempään ja ulompaan virtauskanavaan. Referenssilaitoksena käytettiin Westinghousen neljällä kiertopiirillä varustettua painevesireaktoria. Simuloinnissa käytettyjen nippujen sekä referenssinä käytetyn konventionaalisen Westinghousen 17x17-nipun mitat on esitetty taulukossa 1. Taulukossa alaviitteen ensimmäinen kirjain viittaa polttoaineeseen p tai suojakuoreen s , toinen kirjain polttoaineen sisempään tai ulompaan halkaisijaan tai sisempään tai ulompaan suojakuoreen (s ja u) ja kolmas kirjain suojakuoren sisä- tai ulkohalkaisijaan (s ja u). (Feng et al. 2007, 16,18)

Taulukko 1. Simuloitujen nippujen polttoainesauvojen päämitat (cm). (alkup. taulukko Feng et al. 2007, 19)

Nippu	D_{sss}	D_{ssu}	D_{ps}	D_{pu}	D_{ss}	D_{su}	Sauvaväli
11x11	1,0733	1,1876	1,20	1,700	1,7124	1,8267	1,952
12x12	0,9533	1,0676	1,08	1,540	1,5524	1,6667	1,789
13x13	0,8633	0,9776	0,99	1,410	1,4224	1,5367	1,651
14x14	0,7533	0,8676	0,88	1,294	1,3064	1,4207	1,533
15x15	0,6733	0,7876	0,8	1,1978	1,2102	1,3245	1,431
17x17 (referenssi)	-	-	-	0,8255	0,8379	0,9522	1,263

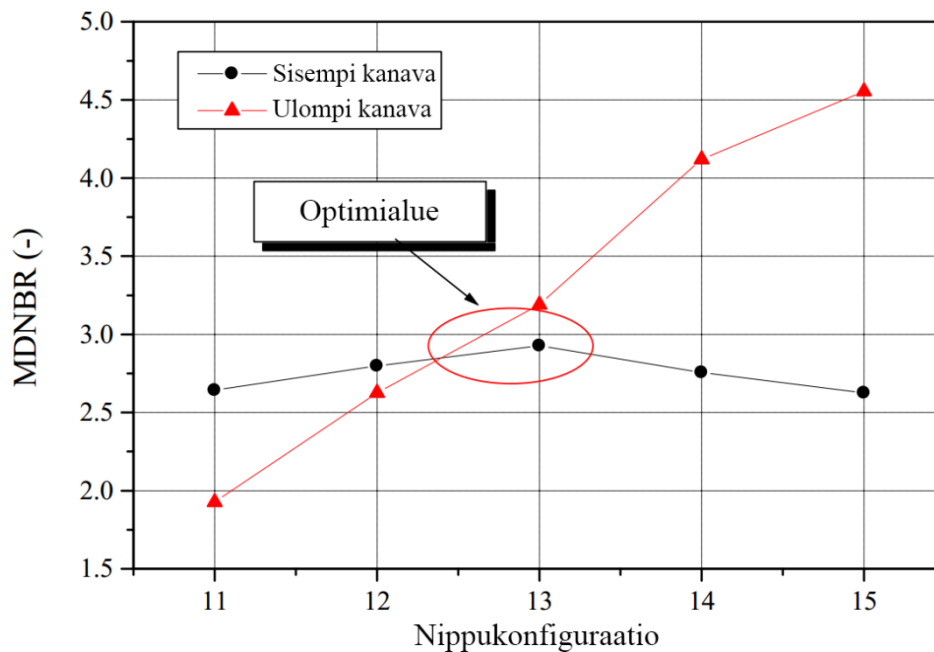
Optimaalisen sauvamäärän löytämiseksi tutkittiin viittä erilaista nippukonfiguraatiota; 11x11, 12x12, 13x13, 14x14 ja 15x15. Simuloinnin tuloksia vertailtiin polttoaineen sisälämpötilan ja erityisesti huippulämpötilan, painehäviön ja MDNBR-arvon suhteen. Polttoaineen sisälämpötiloja on vertailtu kuvassa 4. (Feng et al. 2007, 19)



Kuva 4. Simuloitujen polttoainennippujen sisälämpötilat. (alkup. kuva Feng et al. 2007, 20)

Kuvasta nähdään, kuinka kuuman sauvan polttoaineen huippulämpötila kasvaa sauvojen lukumäärän pienentyessä sillä nippukohtaisen tehon pysyessä vakiona yksittäisen sauvan lineaariteho nousee. Sauvojen määrän pienentäminen myös jyrkentää polttoaineen lämpötilakäyrää. Kaikkien nippukonfiguraatioiden lämpötilat ovat silti huomattavasti referenssipolttoaineen lämpötiloja alhaisemmat. (Feng et al. 2007, 19)

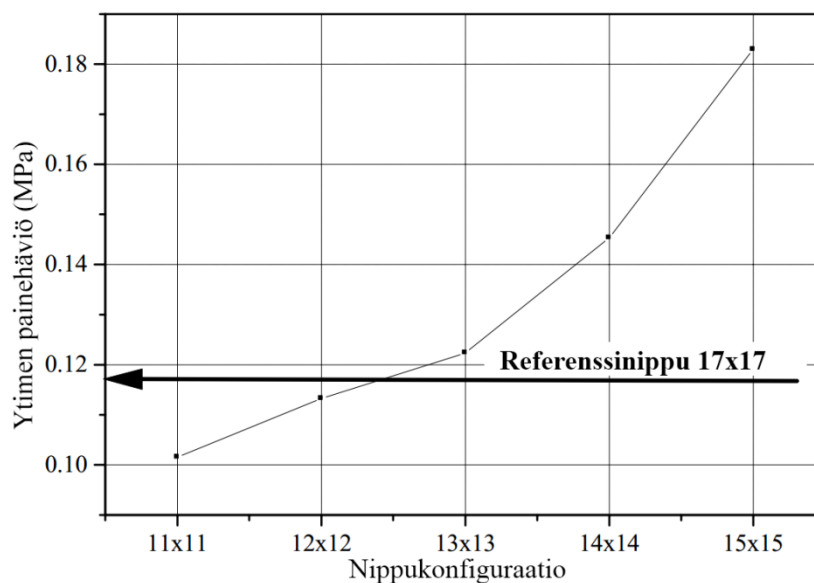
Sisemmälle ja ulommalle jäähdytyskanavalle lasketut MDNBR-arvot on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Nippukonfiguraatioiden sisemmän ja ulomman jäähdityskanavan MDNBR-arvot. (alkup. kuva Feng et al. 2007, 21)

Jäähdityskanavien MDNBR-arvoja vertailtaessa kahdesta lasketusta arvosta pienempi määrittää sauvan todellisen arvon. Suuremmalla sauvamäärällä MDNBR-arvon määrittää sisempi kanava. Sauvojen lukumäärää pienennettäessä jäähdytevirta sisemmässä kanavassa kasvaa halkaisijan kasvaessa ja määrittävä MDNBR-arvo siirtyy ulompaan kanavaan. Optimaalisin tilanne on kuvassa merkityllä alueella, jolle 13x13-nippu sijoittuu. Kyseisellä konfiguraatiolla saavutetaan suurin sisemmän kanavan MDNBR-arvo ja kanavien arvot ovat lähimpänä toisiaan. (Feng et al. 2007, 21)

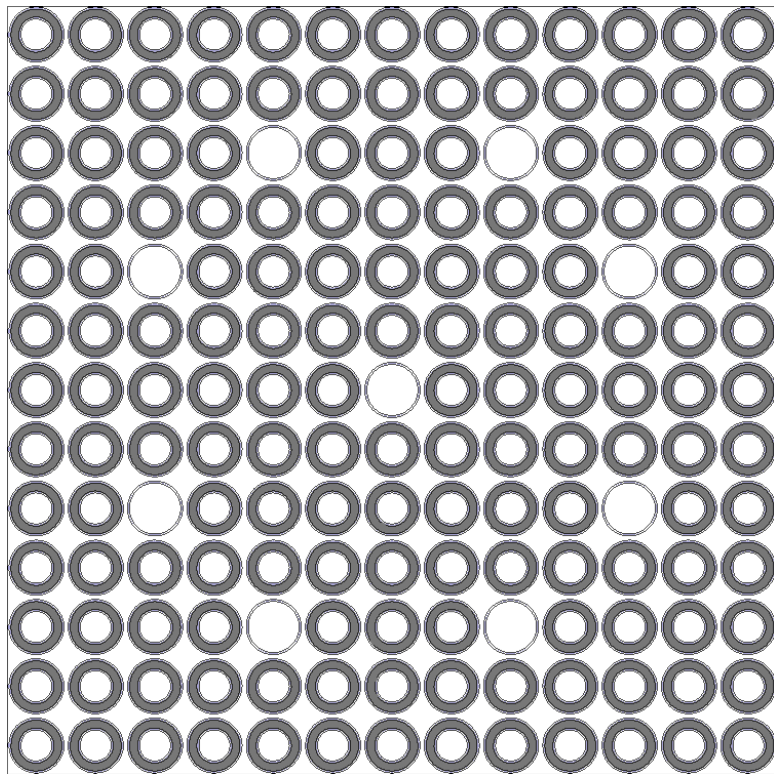
Painehäviöiden määrittämiseksi simulaatio suoritettiin 100 %:n teholla. Saadut tulokset sekä referenssinippuna käytetyn 17x17-nipun arvo on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Sydämen painehäviö eri nippukonfiguraatioilla. (alkup. kuva Feng et al. 2007, 21)

Sydämen painehäviö kasvaa sauvojen lukumäärän lisääntyessä. Kasvu johtuu jäähdytyskanavien pienenevästä hydraulisesta halkaisijasta. 14x14-nipusta alkaen sisäpuolisen jäähdytyskanavan DNBR-arvon ylläpitämiseksi sisäpuolista jäähdytysvirtausta on nostettava muokkaamalla nipun välitukia, mikä kasvattaa virtaushäviöitä ulkopuolisessa virtauskanavassa. 13x13-nipun tuottama painehäviö vastaa referenssinipun tuottamaa painehäviötä. (Feng et al. 2007, 21)

Kuuman sauvan termohydraulisen analyysin perusteella rengasmaiselle polttoaineelle optimaalisin nippukonfiguraatio näyttäisi olevan 13x13-nippu. Nippu tuottaa parhaan MBDNR-arvon, alhaisimman polttoaineen huippulämpötilan ja suhteellisen pienen sydämen painehäviön. Näillä perusteilla 13x13-nippu valittiin referenssikonfiguraatioksi jatkotutkimuksia varten ja tästä syystä suurin osa tutkimuksesta on tehty juurikin tälle konfiguraatiolle. Polttoainesauvat ja ohjausputket sisältävä 13x13-nipun periaatepiirros on esitetty kuvassa 7. (Feng et al. 2007, 20)



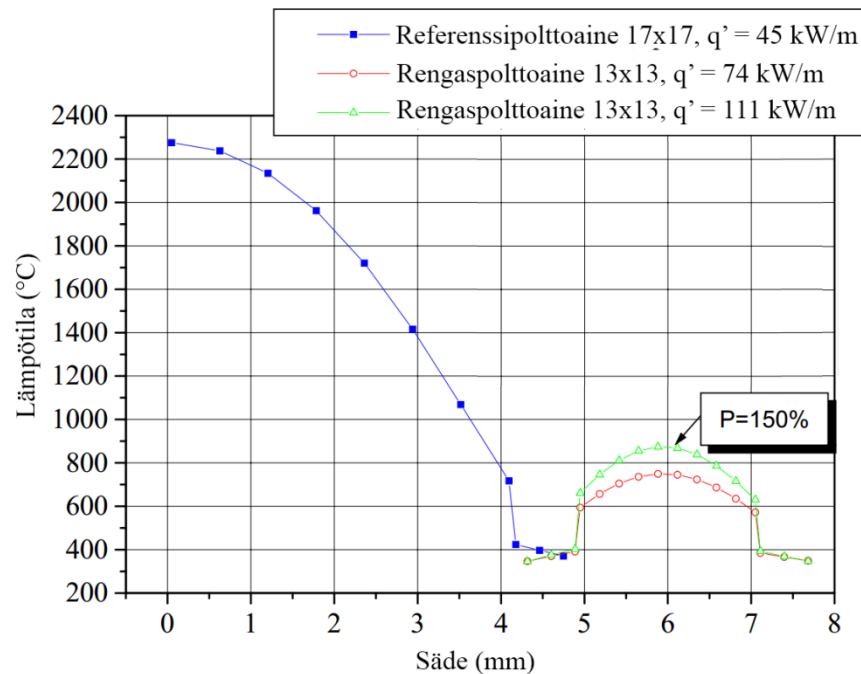
Kuva 7. Rengaspolttoaineesta koostuva 13x13-polttoainenippu.

4 KÄYTTÖ PAINEVESIREAKTORISSA

Tässä luvussa käsitellään edellisessä luvussa esitellyn rengaspolttoaineen käyttöä painevesireaktorissa. Suorituskyvyn lisäksi käydään läpi polttoaineen ominaisuuksia säteilytyksessä, turvallisuusominaisuuksia sekä lataussykliin ja rikastusasteeseen mahdollisesti vaadittavia muutoksia. Luvussa tutustutaan myös VVER-reaktoria varten kehitettyyn kuusikulmaiseen rengaspolttoainenippuun.

4.1 13x13-polttoainenipun suorituskyky

Kuvassa 8 on verrattu konventionaalisen 17x17-polttoainenipun ja rengasmaisen 13x13-nipun lämpötilaprofiileja käyttäen sekä 100 %:n tehotasoa että 50 %:n tehonkorotusta. Laskennassa on oletettu sydämen muotokertoimeksi 2,5 ja yhtäläinen sydämen kokonaisteho 100 %:n teholla. Linearitehojen on oletettu edustavan kuumimman sauvan maksimiarvoa. (Feng et al. 2007, 21)



Kuva 8. Konventionaalisen ja rengasmaisen polttoainesauvan lämpötilaprofiili. (alkup. kuva Feng et al. 2007, 21)

Kuvasta nähdään selkeä ero polttoaineiden lämpötiloissa. 100 %:n tehotasolla rengaspolttoaineen huippulämpötila on 1500 °C referenssipolttoainetta matalampi. 50 %:n korotus sauvakohtaiseen tehoon nostaa huippulämpötilaa, mutta lämpötila jää silti 1100 °C referenssipolttoainetta alhaisemmaksi. Näin suuret erot johtuvat kahdesta tekijästä: rengaspolttoaineen paksuus on noin puolet konventionaalisesta ja kaksipuolinen jäädytys pienentää efektiivistä lämmönjohtumispaksuutta lähes neljännekseen konventionaalisesta. Matalammilla lämpötiloilla on myös kertautuva vaikutus johtuen uraanidioksidin paremmasta lämmönjohtavuudesta matalilla lämpötiloilla. (Feng et al. 2007, 21)

Kuuman sauvan mallin perusteella lupaavimman nippukonfiguraation todennus ja optimointi suoritettiin kokosydänmallinnusta käyttäen. Kuuman sauvan malli ei huomioi sydämen jäädytevirtauksen radiaalista jakautumista, mikä vähentää termohydraulisten tulosten tarkkuutta. VIPRE-01-laskentaohjelmalla suoritettujen simulaatioiden kuvaavat tarkemmin virtauksen jakautumista sisä- ja ulkokanaviin ja tuottavat siten realistisempia DNBR-arvoja. (Feng et al. 2007, 22)

Kokosydänmallilla tulosten perusteella valitun 13x13-nipun geometria ei tuottanut kuuman sauvan mallilla laskettuja MDNBR-arvoja ja sydämen kokonaispainehäviö oli ennakoitua suurempi. Jäädytyskanavien DNBR-tasapainon parantamiseksi polttoainesauvan mittoja oli tarpeen muuttaa. Polttoainerenkaan sisä- ja ulkohalkaisijaa pienentämällä ja polttoainekerroksen paksuutta lisäämällä nipun tuottama MDNBR-arvo 150 %:n teholla tasoittuu ja ylittää hieman 17x17-referenssinipun arvon. (Feng et al. 2007, 31)

4.2 Korealainen 12x12-polttoaine

Koreassa rengaspolttoainetta on suunniteltu käytettäväksi OPR-1000-reaktorin tehonkorotuksessa. Korean atomienergian kehitysinstituutti KAERI on tutkinut mahdollisuutta korottaa reaktorin lämpötehoa 20 %:lla tekemättä muutoksia primääripiiriin komponentteihin. Samalla pyritään laskemaan polttoaineen lämpötilaa vähintään 30 %:lla. (Shin 2013, 375) OPR-1000-reaktorissa käytettävän 16x16-polttoainepinon tilalle kehitetty 12x12-nippu perustuu MIT:n tutkimusohjelman

tuloksiin. Tutkimuksessa on tehty vastaavat kuumasauva- ja kokosydänsimulaatiot kuin 13x13-nipulle minkä lisäksi erityishuomiota on kiinnitetty aiemmin käsittelemättömiin aiheisiin (Zhang 2009, 119-120). Näitä aiheita ovat mm. jäähdytyskanavien osittainen tai täydellinen tukkeutuminen ja polttoainepun fyysinen rakenne. (Shin 2013, 375)

4.3 Käyttäytyminen onnettomuustilanteissa

Polttoaineen matalamman lämpötilan ansiosta rengaspolttoaineeseen varastoituu vähemmän energiaa verrattuna konventionaaliseen polttoaineeseen, mikä parantaa turvallisuusmarginaaleja onnettomuustilanteessa. Jäähdytteenmenetysonnettomuudessa hätäjäähdytyksen varoaika pitenee ja ulospuhallusvaiheessa suojakuoren huippulämpötila laskee. Jälkilämpöteholla (6,5 %) paljaalle sydämelle suoritettussa laskennassa rengaspolttoaineen suojakuori saavuttaa 1200 °C lämpötilan n. 10 kertaa hitaammin verrattuna konventionaaliseen polttoaineeseen. (Kazimi et al. 2006, 32)

Alhaisempi polttoaineen lämpötila pienentää myös polttoaineesta vapautuvien fissiokaasujen määrää, minkä ansiosta polttoaineen käyttäytyminen säteilytettäessä paranee. Lisäksi polttoaineen muodonmuutokset LOCA-tilanteissa ovat maltillisempia ja transienttien aiheuttamien säröytymisten vähentyessä polttoaineen ja suojakuoren väliset ilmiöt lievenevät. (Kazimi et al. 2006, 32)

Rengaspolttoaineen putkimaisen rakenteen ansiosta polttoainesauvojen jäykkyys on konventionaalista sauvaa suurempi. Kasvanut jäykkyys vähentää jäähdytevirtauksen aiheuttamaa värähtelyä. Polttoaineen kasvanut lämmönsiirtopinta-ala nostaa MDNBR-arvoa. Kuten kuvasta 5 nähdään, 13x13-nipun MDNBR-arvo on lähes 3, mikä on miltei kaksinkertainen konventionaaliseen 17x17-nippuun verrattuna. (Kazimi et al. 2006, 32)

4.4 Säteilytyskäyttäytyminen

Rengaspolttoaineen säteilytyskäyttäytymistä on tutkittu sekä MIT:n tutkimusohjelmassa että osana KAERI:n 12x12-nipun tutkimusta. Säteilytyskokeissa on käytetty eri tavoilla valmistettuja polttoainenäytteitä ja niiden tarkoituksena on ollut selvittää polttoaineen mekaaninen kestävyys palaman kasvaessa sekä pienemmän käyttölämpötilan vaikutus fissiokaasujen vapautumiseen.

MIT:n ohjelmassa säteilytettiin VIPAC- eli vibraatiopakkausmenetelmällä valmistettuja polttoainenäytteitä MITR-II-tutkimusreaktorissa. (Kohse et al. 2007, 150) VIPAC-menetelmässä polttoaine puristetaan muotoonsa käyttäen muottina lopullista suojakuorta, jolloin polttoaineen ja suojakuoren väliin ei jää rakoja. Menetelmää on tutkittu paljon mutta pääasiassa pakatun uraanin pienemmästä tiheydestä johtuen se ole syrjäyttänyt muottipuristusmenetelmää. (Yuan et al. 2007, 136) Kuusi kuukautta kestäneessä kokeessa polttoainenäytteiden tehotiheys vastasi 150 % teholla toimivan painevesireaktorin kuumimman sauvan tehotiheyttä. Poistopalamiksi näytteille muodostui 5-7 MWd/kg ja fissiokaasujen vapautuminen noudatti mittauksen perusteella palamalaskennalla saatuja ennakoarvoja. Fissiokaasuennusteissa ja -mittauksissa tulosten epävarmuus määriteltiin suureksi. Rengaspolttoaineen säteilytyskäyttämisen ei kuitenkaan havaittu ennakoimattomia ongelmia. (Kohse et al. 2007, 167)

Muottipuristetulle ja sintratulle polttoainepelletille on suoritettu säteilytyskokeita korealaisessa HANARO-testireaktorissa. 100 %:n tehoa vastaavaa tehotiheyttä käytettäessä näytteitä säteilytettiin yhteensä sata päivää. Suurimmaksi paikalliseksi poistopalamaksi muodostui 10,9 MWd/kgU. Polttoaine laajeni säteilytyksessä ennakoidusti vähemmän kuin vastaava konventionaalinen polttoaine. Näytteissä ei esiintynyt ennakoitua pirstaloitumista vaan polttoaine pysyi pieniä halkeamia lukuunottamana ehjänä. Kirjoitushetkellä on käynnissä pidempiaikainen, vuonna 2011 käynnistynyt säteilytyskoe, jonka tavoitteena on tutkia näytteitä 30 MWd/kgU:n poistopalamalla. (Koo et al. 2013, 3-4)

4.5 Lataussyklin / rikastusasteen vaatimat muutokset

Suuremmasta tehotiheydestä johtuen rengaspolttoaineen palama kasvaa nopeammin konventionaaliseen polttoaineeseen verrattuna. Koska uraanin määrä sydämessä ei muutu, nykyistä n. 5 %:n rikastusastetta käyttämällä reaktorin 50 %:n tehonkorotus aiheuttaisi polttoaineen lataussyklin lyhenemisen yhdysvaltalaisilla laitoksissa yleisestä 18 kuukaudesta 12-14 kuukauteen. Syklin lyhentämistä ei ole Yhdysvalloissa koettu kaupallisesti kannattavaksi, jolloin polttoaineen rakenteeseen on tehtävä muutoksia nykytilanteen säilyttämiseksi. (Lahoda et al. 2007a, 118)

Yksinkertaisin ratkaisu olisi nostaa polttoaineen rikastusaste 8 %:iin mutta noston toteuttaminen aiheuttaisi huomattavia muutoksia rikastuslaitoksen prosessissa eikä ole välttämättä ainakaan vielä kannattava vaihtoehto. Toinen tapa on nostaa uraanidioksidin määrää polttoainesauvassa. Käyttämällä pidempiä polttoainesauvoja sekä nostamalla uraanin tiheyttä lähemmäs teoreettista tiheyttä, voidaan fissiilin uraani-235:n määrää polttoaineessa lisätä lähes viidenneksellä. Suurempi uraanin määrä sekä latauseisokissa vaihdettavien nippujen määrän lisäys mahdollistaisivat 18 kuukauden lataussyklin. Tiheämpien polttoainemateriaalien, kuten uraanikarbidin ja -nitridin sekä beryllium-heijastimien käyttö polttoaineessa on mahdollista mutta ne vaativat huomattavia muutoksia rakenteeseen ja luvitukseen. (Lahoda et al. 2007a, 118)

4.6 Käyttö VVER-laitoksessa

Rengaspolttoaineen käyttöä venäläisvalmisteisissa VVER-tyyppisissä painevesilaitoksissa tutkittiin alkuperäisen MIT:n tutkimusohjelman yhteydessä. Tsekin tasavallassa, Temelinissä käytössä olevan VVER-1000-laitoksen modernisoinnin yhteydessä Westinghouse toimitti laitokselle VVANTAGE 6-tyyppistä heksagonaalista polttoainetta, jota käytettiin tutkimuksessa referenssipolttoaineena. Reaktorista laadittiin kokosydänmalli käyttäen VIPRE-01-ohjelmistoa. Mallia käyttäen pyrittiin löytämään rengasmaisen polttoaineen optimaalinen geometria ja määrittämään mahdollisen tehonkorotuksen suuruus. (Feng et al. 2007, 41)

4.6.1 Sauvojen määrä nipussa

Kuten neliskulmaiseen polttoainenippuun, rengaspolttoainesauvoja mahtuu heksagonaaliseen nippuun vähemmän kuin konventionaalisia sauvoja käytettäessä. Sauvojen optimaalista lukumäärää etsittäessä pidetään polttoaineen ja moderaattorin tilavuussuhde mahdollisimman lähellä konventionaalista polttoainetta. Heksagonaalisen nipun sauvamäärä voidaan määrittää käyttäen yhtälöä $3n^2 - 3n - 1$, jossa n on polttoainesauvojen lukumäärä kuusikulmion yhdellä sivulla. Referenssipolttoaineessa $n = 11$, sauvojen kokonaislukumäärän ollessa 331 sisältäen 312 polttoainesauvaa ja 19 instrumenttiputkea. Rengaspolttoaineen käyttöä varten tutkittiin kahta eri

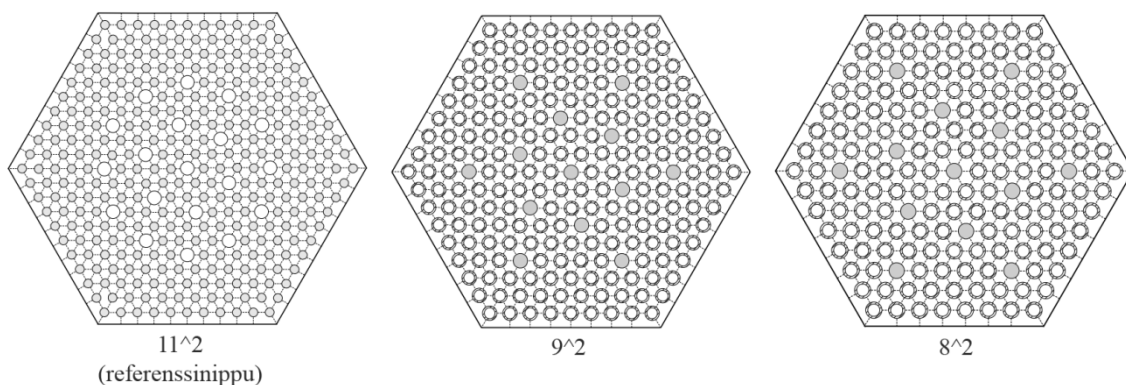
nippukonfiguraatiota käyttäen arvoja $n = 8$ ja $n = 9$. Konfiguraatioiden tunnuksina käytettiin 8^2 , 9^2 ja referenssinipulle 11^2 . (Feng et al. 2007, 41-42)

Nippukonfiguraatioiden termohydraulista käyttäytymistä tutkittiin 150 %:n tehotasolla. Saatuja tuloksia verrattiin referenssipolttoaineen 100 %:n tehotasolla saatuihin arvoihin. Saadut MDNBR-arvot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Kokosydänmallilla saadut MDNBR-arvot käyttäen rengaspolttoainetta ja referenssipolttoainetta. (alkup. taulukko Feng et al. 2007, 42)

Nippukonfiguraatio	MDNBR-arvo	
	sisempi kanava	ulompi kanava
8^2	1,61	1,96
9^2	1,88	1,92
11^2 (referenssinippu)	1,46	

Nippukonfiguraatioista 9^2 tuottaa kanavien välillä yhtenäisemmät MDNBR-arvot. Tutkimuksessa päädyttiin kuitenkin käyttämään 8^2 -konfiguraatioita seuraavista syistä: pienempi polttoainesauvojen määrä pienentää valmistuskustannuksia, polttoaineen aiheuttama painehäviö on 14,1 %:a pienempi 9^2 -konfiguraatioon verrattuna, polttoaineen ja moderaattorin tilavuuksien suhde on lähempänä referenssipolttoainetta ja ulomman kanavan MDNBR-arvo on suurempi, mikä parantaa käytettävyyttä polttoaineen laajentuessa palaman kasvaessa. Valittu 8^2 -nippu käsittää saman lukumäärän polttoainesauvoja (169 kpl) kuin neliskulmaisen polttoainenipun tutkimuksissa kehitetty 13×13 -nippu. Tutkimusten perusteella rengaspolttoaineen käyttö VVER-laitoksessa mahdollistaa 50 %:n tehonkorotuksen. Tutkittujen nippukonfiguraatioiden sekä referenssinipun periaatepiirroksia on esitetty kuvassa 9. (Feng et al. 2007, 42)



Kuva 9. Heksagonaaliset polttoaineniput käyttäen rengasmaista ja konventionaalista polttoainetta. (alkup. kuva Feng et al. 2007, 41)

Heksagonaalinen polttoainenippu soveltuu rengaspolttoaineen käyttöön tietyiltä osin neliskulmaista polttoainenippua paremmin. Jäähdytevirtauksen ohjaaminen sisempään virtauskanavaan onnistuu helpommin tasaisempien sauvavälien ansiosta. Sauvavälit ovat myös selkeästi pidemmät neliskulmaiseen nippuun verrattuna, mikä parantaa jäähdytteen sekoittumista. Tällöin ulomman jäähdytekanavan MDNBR-arvo on vähemmän herkkä muuttuville käyttöolosuhteille. Suuremmat sauvavälit myös parantavat nipun valmistettavuutta. (Feng et al. 2007, 42)

MIT:n tutkimusohjelman jälkeen julkaistua tutkimusta on tehty Iranissa käyttäen referenssilaitoksena Bushehrissa sijaitsevaa VVER-1000-laitosta. Tutkimusta on tehty sekä heksagonaalisen polttoainenipun geometrian optimoimiseksi sekä rengaspolttoaineen tehokäytön kannalta oleellisten turvallisuusmarginaalien määrittämiseksi. Kokosydänmallia käyttäen jäähdytyskanavien MDNBR-arvoja on saatu nostettua erityisesti ulommassa kanavassa sekä polttoaineen ja moderaattorin tilavuuksien suhde saatu vastaamaan tarkemmin referenssipolttoainetta. (Mozafari & Faghihi 2013, 233-234)

5 KÄYTTÖ KIEHUTUSVESIREAKTORISSA

Rinnakkain painevesilaitoksessa käytettävän polttoaineen tutkimuksen kanssa on tutkittu rengaspolttoaineen käyttöä kiehutusvesilaitoksessa. Tämänkin tutkimuksen tavoitteena oli selvittää rengasmaisen polttoaineen mahdollistaman tehonkorotuksen suuruus sekä määrittää optimaalinen nippukonfiguraatio nykylaitoksessa tapahtuvaa käyttöä ajatellen. (Morra 2004, 11)

Rengaspolttoaine ei mahdollista kiehutusvesilaitoksessa vastaavia tehonkorotuksia kuin painevesilaitoksessa. Vaikka polttoaineen lämmönsiirtopinta-ala kasvaa rengasmaisen geometrian ansiosta ja siten nostaa CHF_R-marginaalia, tehokäytön vaatima jäähdytevirtauksen lisäys pienentää liikaa kiehutusvesilaitoksen toiminnan kannalta tärkeää kriittistä lämpövuota. Sisempien jäähdytyskanavien sekoittumattomuus viereisten kanavien kanssa korostaa ilmiötä. (Ellis 2006, 102)

Jäähdytteen sekoittumisen parantaminen olisi mahdollista esim. yhdistämällä ulompi ja sisempi jäähdytekanava reikien avulla tai käyttämällä useampia lyhyitä polttoaineniippuja päällekkäin. Näiden tekniikoiden hyödyntäminen kuitenkin vaikeuttaisi polttoaineen valmistettavuutta ja lisensoitavuutta. (Ellis 2006, 103)

6 VALMISTETTAVUUS

Yksi uudentyypin polttoaineen suurimmista haasteista on sen valmistettavuus tarkkojen standardien mukaisesti. MIT:n tutkimusohjelmassa valmistettavuutta tutkittiin ensin selvittämällä rengaspolttoaineen mahdolliset valmistustavat. Selvityksen perusteella valmistustavoiksi valittiin sintraus käyttäen kaupallista muottipuristinta. (Lahoda et al. 2007b, 100-101)

6.1 Sintrattu rengaspolttoaine

Sintrausmenetelmää tutkittiin ensin Westinghouse Electricin polttoainetehtaalla Columbiassa, Etelä-Carolinassa dioksidipolttoaineen sarjatuotannossa käytettävällä laitteistolla. Erikoissuunniteltua muottia käyttäen puristetut 60 rengasmaista polttoainepellettiä täyttivät dimensioiltaan valmistukselle asetetut vaatimukset, mutta käytetyn laitteiston rajoitusten vuoksi pellettien tiheys jäi tavoiteltua pienemmäksi. Alustavat testit kuitenkin osoittivat muottipuristusmenetelmän käyttökelpoisuuden rengasmaisen polttoaineen valmistuksessa. (Lahoda et al. 2007b, 101)

Sintrausmenetelmän jatkotestit suoritettiin Argentiinan atomienergiakomission tiloissa. Testien tarkoituksena oli demonstroida rengasmaisten polttoainepellettien valmistus riittävällä tarkkuudella sekä polttoainesauvan täyttöön ja kiinnihitsaukseen käytettäviä kaupallisia menetelmiä. Tarkemmin suunniteltua muottia käyttäen valmistetut 200 pellettiä täyttivät asetetut tavoitteet koon ja toleranssien suhteen. Sauvojen valmistuksessa käytetty TIG-hitsausmenetelmä sekä suunniteltu päätytulppa todettiin onnistuneiksi. Valmistetut polttoainepelletit ja -sauvat on esitelty kuvissa 10 ja 11. (Lahoda et al. 2007b, 104-105)



Kuva 10. Koesarjana valmistettuja rengasmaisia polttoainepellettejä. (Lahoda et al. 2007b, 107)



Kuva 11. Kasattuja rengasmaisia polttoainesauvoja. (Lahoda et al. 2007b, 107)

7 TALOUDELLINEN KANNATTAVUUS

Rengaspolttoaineen käyttöönoton houkuttelevuus on voimakkaasti riippuvainen sen tuomista taloudellisista eduista. Tutkimuksen oleellinen osa onkin ollut määrittää rengaspolttoaineen käyttöönotosta aiheutuva mahdollinen taloudellinen hyöty. Käyttöönoton kuluihin kuuluvat uudentyyppisen polttoaineen valmistuskulut ja voimalaitokseen tehtävistä muutoksista aiheutuvat investoinnit. (Kazimi et al. 2006, 11)

7.1 Polttoaineen valmistuskustannukset

Konventionaalisten polttoaineiden valmistukseen suunniteltujen laitteiden käyttö rengaspolttoaineen valmistuksessa edellyttää muutoksia olemassa olevaan kalustoon. MIT:n tutkimusohjelman puitteissa tutkittiin Westinghouse Electricin Columbian polttoainetehtaan laitteistolle vaadittavien muutosten kustannuksia. Tavoitteena oli määrittää rengaspolttoaineen valmistuskulujen suuruus konventionaalisen polttoaineen kuluihin verrattuna. (Kazimi et al. 2006, 11)

Sisemmän suojakuoriputken paikalleen asettaminen, rengasmaisen päätytulpan hitsaus sekä pelletin valmistuksessa käytetyn sintrausuunin kapasiteetin nosto aiheuttavat vähäisiä lisäkuluja rengasmaisen polttoainesauvan valmistuksessa. Paikalleen asetus sekä päätytulpan hitsaus vaativat vain pieniä muutoksia olemassa olevaan kasaus- ja hitsauslaitteistoon. Ainoat pääomainvestoinnit syntyvät sintrausuunin muutoksista, jotka aiheutuvat pellettien alhaisemmasta kokonaistiheydestä. Sauvan suurempi ulkohalkaisija sekä sisempi suojakuorisauva lisäävät hieman valmistuksessa käytettävän zirkonium-seoksen määrää. (Kazimi et al. 2006, 11)

Edellisessä kappaleessa luetelluista syistä rengaspolttoaineen valmistuskustannukset ovat marginaalisesti konventionaalisia polttoaineita suuremmat. Columbian polttoainetehtaalle tehtävien muutosten arvioitiin nostavan polttoaineen hintaa vain 0,4 %. (Kazimi et al. 2006, 11)

7.2 Kannattavuus eri laitostilanteissa

Rengaspolttoaineen mahdollistamia taloudellisia hyötyjä on tutkittu sekä nykyisten laitosten tehonkorotusten että vasta suunnitteilla olevien laitosten tehotiheyden noston kannalta. Hyötyjen laskennassa on otettu huomioon polttoaineen valmistuskulut ja laitokseen tehtävien muutosten aiheuttamat kulut. Investointien kannattavuuksien vertailussa käytettiin laitoksen rakennushintaa kilowattia kohden ja efektiivistä korkoa. (Lahoda et al. 2007a, 118)

7.2.1 Tehonkorotuksen kannattavuus

Käytössä olevalle toisen sukupolven reaktorille toteutettavan 50 %:n tehonkorotukselle käytettiin MIT:n tutkimuksessa mallina Westinghousen 1200 MW_e painevesilaitosta. Tehonkorotuksessa sydämen sisäosat vaihdetaan rengaspolttoaineen käytölle soveltuviksi ja uusitaan pääkiertopumput, höyrystimet sekä paineistin. Vaihdetujen pääkiertopiirin osien oletettiin mahtuvan olemassa olevaan suojarakennukseen. Sekundääripuolella katsottiin kannattavimmaksi toteuttaa vaadittu 600 MW_e lisäkapasiteetti rakentamalla rinnakkainen turbiinipiiri. Tehonkorotus arvioitiin toteutettavaksi 12 kuukauden huoltoseisoksissa, jossa suoritettaisiin vaaditut primääripiirin muutokset sekä liitettäisiin rinnakkainen turbiinipiiri päähöyrylinjaan. (Lahoda et al. 2007a, 119)

Tehonkorotuksen kuluissa huomioitiin laitokseen tehtävien muutosten kustannukset, käyttämättömäksi jäänyt konventionaalinen polttoaine, tehonkorotuksen aiheuttamat korotukset huoltokustannuksiin sekä huoltoseisokin aikaisen korvaavan sähköntuotannon aiheuttamat kustannukset. Korotuksen hinnaksi arvioitiin 1817 \$/kW_e. Efektiiviseksi koroksi saatiin 6,3 %, mikä osoittaa tehonkorotuksen olevan kaupallisesti kannattava. (Lahoda et al. 2007a, 120)

7.2.2 Uusien laitosten kannattavuus

Rengaspolttoaineen käyttöä suunnitteilla olevissa kolmannen sukupolven reaktoreissa tutkittiin käyttäen mallina Westinghousen Electricin suunnittelemaa 1117 MW_e AP1000-laitosta. Kannattavuutta tutkittiin sekä alkuperäisellä että korotetulla

tehotiheydellä käyttäen konventionaalista ja rengasmaista polttoainetta. Laitoksen rakentamisen oletettiin kestävän kaikissa tapauksissa kolme vuotta. (Lahoda et al. 2007a, 119)

Tehonkorotustapauksessa AP1000-laitoksen sähköteho korotettiin 1717 MW_e:iin. Konventionaalista polttoainetta käyttämällä laitoksen primääri- ja sekundääripiirin komponentit sekä suojarakennus skaalattiin vastaamaan korotettua tehoa, jolloin laitoksen hinnaksi arvioitiin 1150 \$/kW_e ja efektiiviseksi koroksi 10,8 %. Rengaspolttoaineen käyttö vaatii muutoksia polttoaineen suunnitteluun sekä primääri- ja sekundääripiirin komponentteihin, mutta pienentää vaadittavan reaktorin paineastian, reaktorin sisäosien sekä suojarakennuksen kokoa. Paineastian ja sisäosien oletettiin pienenevän 25 % ja suojarakennuksen 10 %. Rengaspolttoainetta käytettäessä laitoksen hinnaksi arvioitiin 1103 \$/kW_e ja efektiiviseksi koroksi 11,3 %. (Lahoda et al. 2007a, 119-120)

Vaihtoehtona on myös rakentaa kolmannen sukupolven laitos korottamatta tehotiheyttä. Laitostoimittaja Westinghouse arvioi konventionaalista polttoainetta käytettäessä laitoksen hinnaksi 1313 \$/kW_e, jonka perusteella lasketuksi efektiiviseksi koroksi muodostuu 6,9 %. Rengaspolttoainetta käytettäessä laitoshinta jää hieman pienemmäksi, 1218 \$/kW_e, ja efektiivinen korko on hieman suurempi 7,2 %. (Lahoda et al. 2007a, 119-120)

8 AINEISTON TARKASTELU JA SOVELLUS

Tässä luvussa tarkastellaan edellä esitettyä aineistoa ja tulkitaan siinä esitettyjä tietoja yleismaailmallisesta näkökulmasta. Aineistoa sovelletaan arvioimalla rengaspolttoaineen mahdollistaman tehonkorotuksen suuruutta Loviisan ydinvoimalaitoksella.

8.1 Aineiston tarkastelu

Uudenlainen geometria näyttäisi vievän ydinpolttoaineiden ominaisuuksia tehokkaampaan ja turvallisempaan suuntaan. Kasvanut lämmönsiirtopinta-ala ja ohentunut polttoaineen paksuus pienentävät käyttölämpötiloja huomattavasti. Tämä parantaa ominaisuuksia käyttö- ja onnettomuustilanteissa. Polttoainerengas kärsii palamajakson aikana pienempiä säteilyvaurioita, mikä saattaa mahdollistaa merkittävästi suurempia poistopalamia. Kasvaneet turvamarginaalit antavat lisäaikaa jäähdytteenmenetysonnettomuuksissa ja jälkilämmön poistotilanteissa. Termohydraulisesti suurimmat haasteet liittyvät sisä- ja ulkopuolisen jäähdytiskanavan olosuhteiden hallintaan.

Taloudellisesta kannattavuudesta ei ole julkaistua tutkimusta vuoden 2007 jälkeen. Näissä ennen taloudellista taantumaa tehdyissä laskelmissa rengaspolttoaine näytti olevan hinnaltaan kilpailukykyinen konventionaalisiin polttoaineisiin verrattuna uusia laitoksia rakennettaessa. Lisäksi MIT:n alkuperäisen 50 %:n tehonkorotustavoitteen katsottiin olevan taloudellisesti kannattava ratkaisu. Näissä laskelmissa tarkasteltiin ainoastaan voimalaitokselle tehtävien muutosten aiheuttamia kustannuksia. Laitoksen lisääntynyt sähköteho vaatii useimmiten muutoksia voimalaitoksen ulkopuolisten järjestelmien, kuten ympäröivän sähköverkon toimintaan. Kannattavuuslaskennassa ei myöskään huomioitu tehonkorotuksen ja uudentyypin polttoaineen luvituksen aiheuttamia kuluja. Esitettyjä lukuja on lisäksi vaikea sitoa nykytilanteeseen. Ydinvoimalaitosten rakennuskustannukset ovat nousseet eikä uusien yhdysvaltalaisen laitosten rakennusprojekteja ole aloitettu odotetussa mittakaavassa. Lisäksi laskennassa käytetyt arviot uusien laitosten kolmen vuoden rakennusajasta ja tehonkorotusten

vaatimien muutostöiden vaatimasta vuoden mittaisesta huoltoseisokista ovat nykytietojen valossa melko optimistisia.

Uudentyyppisten polttoainepellettien valmistukselle ei julkaistujen tutkimusten perusteella ole merkittäviä esteitä. Vuosikymmeniä käytössä ollut muottipuristettujen aihoiden sintraukseen perustuva menetelmä soveltuu rengaspolttoaineelle hyvin. Valmistuksessa voidaan käyttää olemassaolevaa kalustoa tekemällä vain pieniä muutoksia muotteihin ja syöttömekanismeihin. Rengasmaisten pellettien valmistus vaikuttaisi olevan suhteellisen triviaali kysymys rengaspolttoaineen käyttöönotossa. Käytettäessä polttoaineelle esim. Suomessa tyypillistä 12 kuukauden lataussykliä rengaspolttoaineen rikastusastetta ei välttämättä ole tarpeen nostaa yli polttoainevalmistuksen nykyisen 5 %:n ylärajan.

Tähänastisten tutkimusten mukaan rengaspolttoaine soveltuisi kuusikulmaisia polttoainenippuja käyttäviin VVER-reaktoreihin jopa neliskulmaisia nippuja hyödyntäviä reaktoreita paremmin. Polttoainevalmistajien ja jatkotutkimuksen kannalta onkin edullista, että rengaspolttoainesauvoja voitaisiin hyödyntää lähes kaikissa rakennetuissa ja rakennettavissa painevesireaktoreissa.

Rengaspolttoaineen käyttö tehonkorotuksissa on ainakin tähänastisten tulosten perusteella rajoittumassa painevesireaktoreihin. Kiehutusvesireaktoreille tehdyissä laskelmissa lämpötehon korotuksen vaatima suurempi jäähdytevirtaus laskee kiehumisen kannalta tärkeää kriittistä lämpövuota. Aiheesta ei ole julkaistua tutkimusta vuoden 2006 jälkeen, minkä perusteella kiinnostusta rengaspolttoaineiden kiehutusvesikäyttöä kohtaan ei juurikaan ole. Mikäli rengaspolttoaineiden käyttö painevesireaktoreissa yleistyy ja osoittaa teknisen ja kaupallisen edullisuutensa, saattaa kiinnostus herätä uudelleen myös kiehutusvesireaktorien saralla. Rengaspolttoaineiden käyttö saattaa kuitenkin olla teoriassa mahdollista nippujen rakennetta radikaalisti muuttamalla.

Lisääntynyt lämmönsiirtopinta-ala ja huomattavasti pienempi käyttölämpötila nostavat suorituskykyä ja turvallisuusomaisuuksia niin merkittävästi, että rengaspolttoaineen käyttö on houkutteleva ratkaisu ilman tehonkorotustakin. Polttoainenippujen vaihtaminen uudenlaisiin vaatii tosin ilman tehonkorotustakin muutoksia laitoksen

käyttöön ja mahdollisesti myös primääripiirin komponentteihin. Näistä syistä rengaspolttoaineen käyttöönotto tehonkorotuksissa tai uusissa laitoksissa on todennäköisesti ainakin yleistymisen ensivaiheessa taloudellisesti houkuttelevampaa.

Nykylaitoksissa rengaspolttoaineen käyttömahdollisuudet ovat konkreettiset. Polttoainetyypin vaihdon edut ovat merkittävät ja käyttöönoton esteet ovat lähinnä kaupallisia. Teknisesti rengaspolttoaine ei ole vielä täysin valmis kaupalliseen käyttöön, mutta millään osa-alueella ei ole esiintynyt ylitsepääsemättömiä haasteita. Vuonna 2007 Yhdysvalloissa kaupallistumiseen johtavan tutkimustyön arvioitiin kestävän vielä vähintään kymmenen vuotta, mikä vaikuttaisi olevan edelleen realistinen arvio. Ydinvoima-alan tiukat viranomaismääräykset sekä laitoksille tehtävien muutosten suuret investointikustannukset eivät kannusta kaupallisia toimijoita ottamaan käyttöön polttoainetta, josta ei ole merkittävää määrää käyttökokemusta. Rengaspolttoainetta vaivaakin uudelle teknologialle tyypillinen ongelma; käyttöönoton edellytyksiin ei kannata investoida ennen päätöstä investoida itse käyttöönottoon. Suomessa mahdollinen käyttö rajoittunee kirjoitushetkellä rakennus- ja suunnitteluvaiheessa oleviin laitoksiin.

8.2 Arvio Loviisan VVER-440-reaktorin tehonkorotuksesta

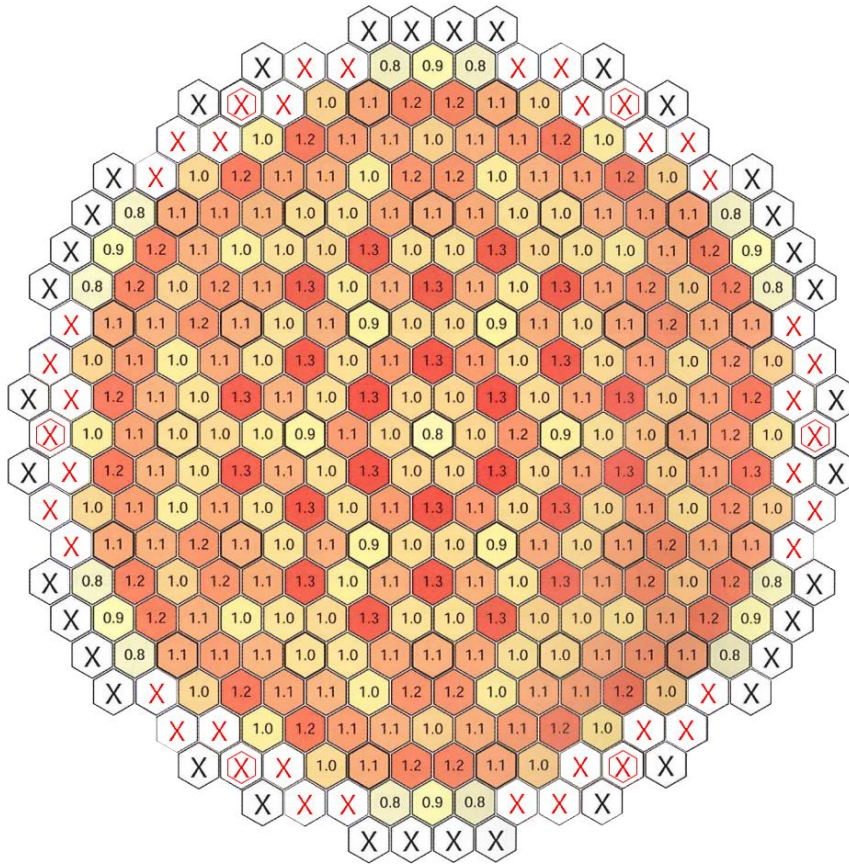
Loviisan voimalaitoksen kaksi reaktoria ovat VVER-440-tyyppiä. Reaktorityyppi on VVER-1000-painevesireaktorin edeltäjä ja eroaa seuraajastaan erityisesti reaktorin tuottaman lämpötehon ja polttoaineen rakenteen suhteen. Loviisan laitoksilla toteutettiin 1990-luvun lopulla tehonkorotuksia, joissa reaktorin lämpöteho nostettiin alkuperäisestä 1375 MW_{th}:sta 1500 MW_{th}:iin. Lämpötehon korotuksen ja turbiinipiirille toteutettujen modernisointien ansiosta laitosten sähköntuotannon nettoteho on voitu nostaa 440 MW_e:sta 496 MW_e:iin. (VTT Prosessit 2004, 286)

Loviisan laitoksilla reaktorin tehokäyttö perustuu osittain vähävuotoiseen lataukseen eli painesäiliön säteilyhaurastumisen minimoimiseksi palaneimmat polttoainepinnot on sijoitettu sydämen reunoille. Sydämen reunoilla käytetään myös tehoa tuottamattomia suojanippuja, jotka osaltaan pienentävät neutronivuotoa sydäimestä. (Lahtinen 2009, 21)

Arvioitaessa rengaspoltoaineen käyttömahdollisuuksia Loviisan laitoksilla on tehtävä konservatiivisia oletuksia tehonkorotuksen suuruudessa ja reaktorin sydänsuunnittelussa. Tässä työssä arvioidaan mahdollisen tehonkorotuksen suuruutta ja sen toteutettavuutta soveltaen VVER-1000-reaktorille tehtyjen laskelmien tuloksia. Muutos lämpötehoon nostaa yksittäisen nipun tuottamaa lineaaritehoa, vaadittavaa jäähdytteen virtausta ja nipun poistopalamaa.

Tehonkorotuksessa neutronivuon tiheys kasvaa koko sydämen alueella, mikä lisää myös vuotoa sydämen reunoilta. Vuodon minimoimiseksi on suojaelementtien määrää lisättävä esim. muodostamalla elementeistä yhtenäinen kehä sydämen reunoille. Kehän muodostaminen edellyttää uloimpien säätösauvojen poistoa. Sydämen reaktiivisuuden hallittavuuden ylläpitämiseksi poistettujen säätösauvojen ympärille on lisätty vielä kaksi ylimääräistä suojaelementtiä. Lisätyt 30 suojaelementtiä pienentävät tehoa tuottavien nippujen lukumäärän 283:een, mikä nostaa entisestään nippukohtaista tehoa.

Tehonkorotusarviossa käytetty sydämen rakenne on esitetty kuvassa 12. Kuvassa alkuperäiset suojaelementit on merkitty mustalla, tehonkorotusta varten lisätyt punaisella. Säätösauvoja korvaavat elementit on lisäksi merkitty punaisella kuusikulmiolla.



Kuva 12. Loviisan sydän lisätyillä suojaelementeillä. (alkup. kuva Lahtinen 2009, 19)

VVER-1000-reaktorille suunniteltu rengaspolttoaine ei suoraan sovellu käyttöön Lovisaan laitoksissa polttoainenipun ulkomittojen ja sydämen rakenteen vuoksi. VVER-440-niput ovat lyhyempiä, halkaisijaltaan pienempiä ja niitä on reaktorissa lukumäärällisesti enemmän. Loviisassa käytettävien nippujen konfiguraatio on 7^2 , eli nipussa on 126 polttoainesauvaa ja instrumenttiputki. (TVEL JSC 2011, 7) Dimensioerojen vuoksi Loviisan sydämessä olisi käytettävä aiemmin esitellyn 8^2 -rengaspolttoainenipun sijaan esim. 5^2 -nippua. Tämän työn arvioissa on käytetty 5^2 -nippua, jossa polttoainesauvat vastaavat dimensioiltaan 8^2 -nippua.

Eriolaisten geometrioiden vuoksi mahdollisen tehonkorotuksen suuruutta ei voi luotettavasti arvioida sauvojen lineaaritehoa vertailemalla, joten tässä työssä arviointiin on käytetty polttoaineiden lämpövuota. Konservatiivisena oletuksena raja-arvoksi on valittu Mozafari & Faghihin (2013, 232) käyttämä alkuperäisen polttoaineen keskimääräinen lämpövuoto, joka on laskettu käyttäen STUK:n ja polttoainevalmistaja

TVEL:n ilmoittamia parametreja ja dimensioita. Tätä lukuarvoa käyttäen on määritetty suurin mahdollinen tehonkorotus valittua 5²-rengaspolttoainenuippua käyttäen. Käytetyt lukuarvot ja tehonkorotuksen suuruus on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Loviisan sydämen parametreja. (konvent. tiedot STUK 2013)

Parametri	Konvent. polttoaine	Rengaspolttoaine
Nippujen lkm sydämessä	313	283
Pa-sauvojen lkm nipussa	126	61
Pa-sauvojen lkm sydämessä	39438	17263
Keskim. lämpövuoto [kW/m ²]	554,3	554,3
Sydämen lämpöteho [MW _{th}]	1500	1815,6
Sauvan keskim. lineaariteho [kW/m]	15,8	43,8
Keskim. poistopalama [MW _d /kgU]	33,08	44,5

Kuten taulukon 3 lämpötehoja vertailemalla nähdään, arviossa käytetyllä lämpövuonon raja-arvolla rengaspolttoaineella olisi mahdollista nostaa tehoa n. 21 %. Tämä vastaavasti nostaa sauvojen keskimääräistä lineaaritehoa. Rengaspolttoainesauvojen lähes kolminkertainen lineaariteho konventionaaliseen polttoaineeseen verrattuna on suhteellisesti hieman neliskulmaisten polttoainenuippujen 50 %:n tehonkorotusta suurempi.

Tehonkorotus edellyttää suurempaa jäähdytevirtausta sydämen läpi. Nelikulmaiselle rengaspolttoaineelle tehdyissä laskelmissa 25 %:n tehonkorotus on mahdollista toteuttaa nostamatta pääkiertopumppujen pumppaustehoa. Lisääntyneitä lämmöntuotantoa kompensoidaan tässä tapauksessa muuttamalla sydämen sisään- ja ulosvirtauksen lämpötiloja. Lämpötilojen muuttaminen laskee laitoshyötysuhdetta 1-2 prosenttiyksikön verran. (Feng et al. 2007, 37) VVER-polttoaineelle vastaavia laskelmia ei ole suoritettu, mutta on oletettavaa että laitokselle olisi tehdä vastaavanlaisia muutoksia.

Konservatiivisesti arvioiden Loviisan laitoksissa olisi nostettava pumppaustehoa, sillä mitoiltaan pienemmät niput aiheuttavat oletettavasti suuremman virtaushäviön. Toisaalta lisätyt suojaelementit pienentävät jäähdytettävien nippujen lukumäärää. VVER-440-nippujen kotelointi estää virtauksen sekoittumisen nippujen välillä, mikä todennäköisesti aiheuttaa eroavaisuuksia VVER-1000-nipuilla saatuihin tuloksiin jäähdytettävyyden ja DNBR-arvojen suhteen.

Suurempi sauvakohtainen teho nostaa polttoaineelta vaadittavaa keskimääräistä poistopalamaa. Taulukossa esitetyt poistopalaman arvot on laskettu kolmivuotislataukselle käyttäen 12 kuukauden latausjakson pituudelle nimellispituutta 7800 h. Rengaspolttoainetta käytettäessä keskimääräinen poistopalama vastaa tällä hetkellä suurinta Suomessa sallittua poistopalaman arvoa $45 \text{ MW}_d/\text{kg}_U$.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin käytössä oleville laitoksille kehitettyjä rengaspolttoaineita. Ensisijaisena tavoitteena oli esitellä tähänastisen kehityksen tilaa ja arvioida polttoaineen käyttöönottoa. Aineistona käytettiin aiheesta julkaistuja tutkimuksia.

Rengaspolttoaineen kehitys on edennyt 2000-luvun alusta lähtien tasaisesti. Suunnittelu on siirtynyt vaiheittain idea-asteelta tekniseen suunnitteluun ja siitä edelleen prototyypin valmistukseen ja alustaviin säteilytyskokeisiin. Tutkimusten pääpaino on kirjoitushetkellä yksittäisten polttoaineen käytön turvallisuuteen ja suorituskykyyn liittyvien ominaisuuksien määrittämisessä.

Ydinvoimalaitoksen käyttöturvallisuuden ja suorituskyvyn kannalta rengaspolttoaine tarjoaa merkittäviä parannusmahdollisuuksia. Uudenlaisen rakenteen ansiosta voidaan korottaa tehoa nykyisissä laitoksissa, uusissa laitoksissa rengaspolttoainetta käytettäessä reaktorin paineastia ja siten suojarakennus voidaan suunnitella pienemmäksi. Paremman jäähdytettävyytensä ansiosta rengaspolttoaineen suorituskyky on häiriö- ja onnettomuustilanteissa konventionaalaisia polttoaineita parempi, jopa huomattavia tehonkorotuksia käytettäessä.

Loviisan voimalaitokselle tehdyssä tehonkorotusarviossa arvioitiin rengaspolttoaineen käytön aiheuttamia muutoksia sydämen parametreille. Kasvaneen neutronivuon haittavaikutuksia paineestialle pyrittiin kompensoimaan lisäämällä suojaelementtien määrää sydämen reunoilla. Tämä nostaa entisestään yksittäisen sauvan tuottamaa tehoa. 21 %:n tehonkorotusta käytettäessä sauvojen keskimääräinen lineaariteho oli noin kolminkertainen alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Nousu on hieman suurempi kuin nelikulmaisille nipoille laskettu lineaaritehon nousu 50 %:n tehonkorotuksella. Tämän perusteella Loviisan laitosten tehonkorotuspotentiaali rengaspolttoaineita käyttäen vastaa pikemminkin korealaiselle OPR-1000-reaktorille suunniteltuja tehonkorotuksia. Loviisassa tehonkorotus olisi tuskin kuitenkaan mahdollinen ilman jäähdytevirtauksen lisäystä. Tarkempaa analyysiä voisi suorittaa esim. muodostamalla kokosydänmalli ja simuloimalla rengaspolttoaineen termohydrauliikkaa. Reaktorin suurempi teho kasvattaa myös poistopalamaa, mikä kuitenkin jää vielä tällä hetkellä sallittua maksimiarvoa pienemmäksi.

Rengaspolttoaineen varsinaista käyttöönottoa ei ole vielä tapahtunut millään käytössä olevalla laitoksella. Polttoaineen tekninen kehitys on edennyt tasaisesti, mutta lopullisia investointipäätöksiä käyttöönotosta ei ole tehty ainakaan julkisesti. Etelä-Koreassa tutkimus tähtää rengaspolttoaineen käyttöönottoon OPR-1000-reaktorissa ja kehitystyö onkin jo varsin pitkällä, mutta hankkeen aikataulu ei ole tiedossa. Iranissa heksagonaalisia polttoaineita on tutkittu vain simulaatioita käyttäen. MIT:n tutkimusohjelmaan merkittävästi osallistunut polttoainevalmistaja Westinghouse ei tiettävästi ole hylännyt rengaspolttoaineiden kehitystä, mutta julkista tietoa kaupallistumisesta ei ole.

LÄHDELUETTELO

Betts Kellyn S., 2007. Reshaping nuclear fuel. *Environmental Science and Engineering*, vol. 41: no. 3. s. 676.

Blinkov V.N.; Boltenko E.A.; Elkin I.V.; Melikhov O.I.; Solov'ev S.L., 2010. Prospects of using annular fuel elements in nuclear power engineering. *Thermal Engineering*, vol. 57: no. 3. s. 213-218. ISSN 0040-6015.

Ellis Tyler Shawn, 2006. *Advanced Design Concepts for PWR and BWR High-Performance Annular Fuel Assemblies*. Diplomityö. Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Science and Engineering. 183 s.

Feng Dandong; Hejzlar Pavel; Kazimi Mujid S., 2007. Thermal-Hydraulic Design of High-Power-Density Annular Fuel in PWRs. *Nuclear Technology*, vol. 160: no. 1.

Hejzlar Pavel & Kazimi Mujid S., 2007. Annular Fuel for High-Power-Density Pressurized Water Reactors: Motivation and Overview. *Thermal-Hydraulic Design of High-Power-Density Annular Fuel in PWRs*. *Nuclear Technology*, vol. 160: no. 1.

Kazimi M.S. et al., 2006. High performance fuel design for next generation PWRs: Final report. Nuclear Energy Research initiative. 292 s.

Kohse Gordon; Carpenter David; Yuan Yi; Ostrovsky Yakov; Hejzlar Pavel; Kazimi Mujid S., 2007. Irradiation Testing of High-Power-Density Vibropacked Annular Fuel. *Nuclear Technology*, vol. 160: no. 1.

Koo Yang-Hyun; Yang Jae-Ho; Park Jeong-Yong; Yang Yong-Sik; Kim Hyung-Kyu; In Wang-Ki; Song Kun-Woo, 2013. Status of Dual Cooled Annular Fuel Development in KAERI. Conference Proceeding. [www-artikkeli] Viitattu 16.2.2014. Saatavissa: http://www.researchgate.net/publication/259127932_Status_of_Dual_Cooled_Annular_Fuel_Development_in_KAERI

Lahoda Edward; Mazzocooli Jason; Beccherie Julien, 2007a. High-Power-Density Annular Fuel for Pressurized Water Reactors: Manufacturing Costs and Economic Benefits. Thermal-Hydraulic Design of High-Power-Density Annular Fuel in PWRs. Nuclear Technology, vol. 160: no. 1.

Lahoda Edward; Mazzocooli Jason; Beccherie Julien, 2007b. High-Power-Density Annular Fuel: Manufacturing Viability. Nuclear Technology, vol. 160: no. 1.

Lahtinen Tuukka, 2009. Loviisan sydänsuunnittelu. ATS Ydintekniikka 1/2009, vol. 38. 39 s.

Morra Paolo, 2004. Design of Annular Fuel for High Power Density BWRs. Diplomityö. Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Engineering. 196 s.

Mozafari M. Amin & Faghihi F., 2013. Design of annular fuels for a typical VVER-1000 core: Neutronic investigation, pitch optimization and MDNBR calculation. Annals of Nuclear Energy, vol. 60 s. 226-234.

Shin Chang-Hwan; Park Ju-Yong; In Wang-Kee, 2013. Pressure loss coefficient and flow rate of side hole in a lower end plug for dual-cooled annular nuclear fuel. Nuclear Engineering and Design, vol. 265. s. 375-382.

STUK, 2013. Tekniset tiedot – Loviisa. [www-sivu] Viitattu 12.2.2014. Saatavissa: http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitosten-toiminta/loviisa/fi_FI/loviisa_tekniset/

TVEL JSC, 2011. Nuclear fuel for VVER reactors. 8 s. [Esite] Saatavissa: http://www.tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite.eng/resources/8b8b638047fdce049ce5ddc33fdd9f8b/brochure_nuclea_eng.pdf

VTT Prosessit. 2004. Energia Suomessa: Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. 3. painos. Helsinki: VTT ja Oy Edita Ab. 396 s. ISBN 951-37-4256-3.

Yuan Yi; Kazimi M. S.; Hejzlar P., Thermomechanical Performance of High-Power-Density Annular Fuel. Nuclear Technology, vol. 160: no. 1.

Zhang Liang, 2009. Evaluation of High Power Density Annular Fuel Application in the Korean OPR-1000 Reactor. Diplomityö. Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Science and Engineering. 144 s.