

Molten Salt Reactor (MSR)

– sulasuolojen ominaisuudet

Pia Käll

Sulasuolareaktori on terminen hyötöreaktori, jossa polttoaine, fertiili materiaali ja jäähdytin on sekoitettu homogeeniseksi, useimmiten fluoridipohjaiseksi, liukseksi. Moderaattorina käytetään grafiittia. Korkeassa lämpötilassa suolaliuos sulaa viskoosittomaksi nesteeksi joka kiertää primääripiirissä. Erikoista sulasuolareaktorissa on että polttoaine ja fissiotuotteet kiertävät reaktoriastian ulkopuolelle. Fluoridisuolat soveltuvat jäähdytinliukseksi koska ne eivät vaurioidu säteilystä ja ne ovat kemiallisesti stabiileja.

Sulasuolareaktorin toimintaperiaatetta tutkittiin laajasti USA:ssa jo 1960- ja 1970-luvuilla, mutta sitä ei koskaan kaupallistettu. Neljännen sukupolven, Generation IV, reaktoreiden myötä sulasuolareaktorit ovat taas kiinnostuksen kohteena, etenkin siksi että sulasuolareaktori hyötää samalla kuin radioaktiivisen jätteen määrää saadaan minimoitua. Etenkin Japanissa, Ranskassa ja Venäjällä on tutkittu eri sulasuolareaktoreiden vaihtoehtoja. Vaikka sulasuolareaktoreilla on etuja kiinteää polttoainetta käyttäviin reaktoreihin nähden, sitä ei ole vielä kaupallistettu.

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	3
2Historia	3
3Sulasuolareaktorin toimintaperiaate.....	4
3.1 Sulasuolan ominaisuudet.....	5
3.2Kemiallinen käsittely.....	6
3.2.1 Protaktiniumin poisto.....	6
3.2.2 Fissiotuotteiden poisto ja uuden polttoaineen lataus.....	6
4Sulasuolareaktorin etuja ja haittoja.....	7
5 Yhteenveto ja pohdinnat.....	8
6 Kirjallisuusviitteet	9

1 JOHDANTO

Koko ajan lisääntyvä energiantarve maailmassa ja yhä korkeammat tavoitteet energiantuotannon turvallisuuden ja ympäristöystävällisyyden suhteen ovat perustana myös uusien ydinreaktorimallien kehitystyössä. Neljännen sukupolven reaktorien, ns. Generation IV reaktorien, odotetaan olevan toiminnassa noin vuoteen 2030 mennessä. Generation IV reaktoreiden suunnittelussa pääpaino on taloudellisuuden, turvallisuuden ja ympäristöystävällisyyden optimoimisessa sekä ydinase materiaalien leviämisen estämisessä. Yksi Generation-IV International Forum (GIF) valitsemista lupaavista neljännen sukupolven reaktorimalleista on sulasuolareaktori. [1]

Sulasuolareaktorin periaatteellinen toimivuus osoitettiin jo 1970-luvulla USA:ssa. Silloin taloudelliset syyt kuitenkin estivät reaktorimallin edelleenkehittämisen ja sen kaupallistamisen. Neljännen sukupolven reaktoreiden myötä sulasuolareaktorit ovat taas kiinnostuksen kohteena, johtuen etenkin siitä että sulasuolareaktori hyötää samalla kun radioaktiivisen jätteen määrä saadaan minimoitua. Etenkin Japanissa, Ranskassa ja Venäjällä on tutkittu eri sulasuolareaktoreiden vaihtoehtoja.

Sulasuolareaktori on termien hyötöreaktori joka toimii ^{233}U - torium kierrolla. ^{233}U on ainoa uraani-isotooppi jolla voi hyötää termisessä reaktorissa. Erikoista sulasuolareaktorissa on, että polttoaine, fertiili materiaali ja jäähdytyn on sekoitettu homogeeniseksi, useimmiten fluoridipohjaiseksi, liuokseksi. Primääripiiriin liuos kiertää grafiittimoderoidun reaktorisydämen läpi jolloin järjestelmä tulee kriittiseksi. Syntynyt fissioenergia absorboituu suoraan sulasuolaliuokseen ja kuumentunut liuos ohjataan lämmönvaihtimen läpi. Toinen erikoinen piiri sulasuolareaktoreissa, joka myös tuottaa ongelmia, on se että polttoaine ja fissiotuotteet kiertävät jäähdytteen mukana reaktorin ulkopuolelle.

Fluoridisuolat ovat hyvin säteilyn kestäviä ja kemiallisesti stabiileja, joten ne soveltuvat hyvin sulasuolaliuoksen pohjaksi. Lisäksi niillä on alhainen höyrynpaine korkeissa lämpötiloissa, jonka takia sulasuolareaktori voi toimia jo vähän ilmanpainetta korkeammassa paineessa huolimatta siitä että suolan lämpötila on yli 800°C .

2 HISTORIA

Sulasuolareaktoreita tutkittiin laajasti 1960 ja 1970-luvuilla etenkin USA:ssa [2]. Yksi ensimmäisistä sulasuolareaktoreista oli koereaktori lentokonesovellusta varten, joka menestyksellisessä testissä vuonna 1954 toimi lyhyen ajan 2,5 MWth teholla ja 860°C lämpötilassa ja osoitti menetelmän toimivuuden. Polttoaineena käytettiin UF_4 ja muista fluorideista koostuvaa liuosta ja moderaattorina Inconel – päällystettyä berylliumia. Hyvin varhaisessa vaiheessa ymmärrettiin että sulasuolareaktori soveltuisi myös tehoreaktoriksi ja vuonna 1957 Oak Ridge National Laboratory (ORNL) aloitti MSRE (Molten Salt Reactor Experiment) projektin kaupallisen sulasuolareaktorin kehittämiseksi.[3] Koeohjelmassa kehitetty prototyyppi toimi menestyksellisesti vuosien 1965 ja 1969 välillä 7,3 MWth teholla. Prototyypistä kerättiin yli 17 000 tuntia dataa sulasuolareaktorin toiminnan tutkimiseksi ja saatiin todistettua että menetelmällä voidaan tuottaa energiaa.[2,3]

MSRE projektin kokemusten perusteella ORNL kehitti uusia reaktorimuunnelmia, niistä menestyksellisin oli 1 GWe hyötöreaktori MSBR (molten salt breeder reactor), joka käytti polttoaineena ${}^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ThF}_4-\text{UF}_4$ suolaliuosta Th-U polttoainekierrossa. Sillä ei saavutettu 1,07 korkeampaa hyötösuhdetta, mutta se saavutettiin hyvin matalalla ydinpolttoainekonsentraatiolla suolaliuoksessa ja sen seurauksena hyvin pienellä fissiopolttoainementaariolla reaktorisydämessä. [2,3] 1970-luvun puolivälissä tutkimus USA:ssa oli niin pitkällä että olisi ollut perusteltua laajentaa tutkimusta kaupalliseen kehittämiseen. Koettiin kuitenkin, että MSR-ohjelma kilpaili rajoitetusta rahoituksesta LMFBR (Liquid Metal Fast Breeder Reactor) ohjelman kanssa, ja välttääkseen LMFBR-ohjelman rahoituksen vähenemistä MSR-ohjelma lopetettiin.[3]

1970- ja 1980-luvulla muissa maissa, kuten Ranskassa, Japanissa ja Venäjällä panostettiin jonkin verran sulasuolareaktoreiden kehittämiseen, koska niissä nähtiin mahdollisuus käyttää ydinpolttoainetta tehokkaammin lisäämällä polttoainekiertoa asteittain toriumia.[3]

Tutkimuksen alussa 1960- ja 1970-luvuilla tavoite oli saada mahdollisimman korkea hyötösuhde. Sulasuolareaktorilla ei kuitenkaan koskaan saavutettu korkeaa hyötösuhdetta muihin kehitettyihin reaktorimalleihin verrattuna. Neljännen sukupolven reaktoreiden myötä kiinnostus sulasuolareaktoreihin on herännyt uudestaan. Tällä kertaa tämä johtuu niiden kyvystä hyötää samalla kun tuotetun pitkäikäisen radioaktiivisen jätteen määrä minimoituu. [2] 1960 - luvulla kehitetty teknologia ei kuitenkaan suoraan täytä nykyajan turvallisuusvaatimuksia. Jälkikäteen on esimerkiksi osoitettu että kokonaislämpötilakerroin ORNL:ssa kehitetyssä MSBR:ssa on positiivinen, eli tietyissä olosuhteissa lämpötilan nousu aiheuttaa reaktorin tehon nousun, joka taas kohottaa lämpötilaa ja syntyy ketjureaktio jossa reaktorin hallinta voidaan menettää. Nykyajan passiivisen turvallisuusajattelun myötä kaikilla reaktoreilla pitää olla negatiivinen kokonaislämpötilakerroin. On myös pystytty osoittamaan että muutokset MSBR:än, joilla lämpötilakerroin saataisiin negatiiviseksi aiheuttaisi hyötöominaisuuden menettämisen. Neljännen sukupolven reaktoreissa hyötöominaisuus katsotaan hyvin tärkeäksi tekijäksi. [2] Tämänpäiväinen tutkimus keskittyykin näiden ongelmien ratkaisemiseen, jotta uudet sulasuolatutkimusreaktorit täyttäsivät neljännen sukupolven reaktoreille asetetut vaatimukset kuten passiivinen turvallisuus, hyötöominaisuudet ja pitkäikäisen radioaktiivisen jätteen minimoiminen.[2]

Tällä hetkellä on käynnissä eri sulasuolareaktorin sovelluksia kehittäviä tutkimusprojekteja eri puolilla maailmaa. Niistä voidaan mainita Japanissa kehitetty THORIMS-NES (Thorium Molten-Salt Nuclear Energy Synegetics) jossa on yhdistetty sulasuolareaktori ilman kemiallista käsittelylaitosta, 1 GeV - protonikiihdytin fissiilin polttoaineen tuottamiseen spallaation kautta ja pyrokemiallinen prosessointilaitos. [3] Ranskassa on kehitetty AMSTER (Actinides Molten Salt TransmutER), joka koostuu jatkuvasti uudelleenladattavasta sulasuolareaktorista joka polttaa transuraaneja uraniumin ja toriumin avulla, sekä TASSE (Thorium based Accelerator-driven System with Simplified fuel cycle for long term Energy production) joka on toriumilla toimiva alikriittinen kiihdytinjärjestelmä. Kurchatov Instituutissa Moskovassa, Venäjällä on kehitetty CSMSR (Cascade Sub-critical Molten Salt Reactor).[3]

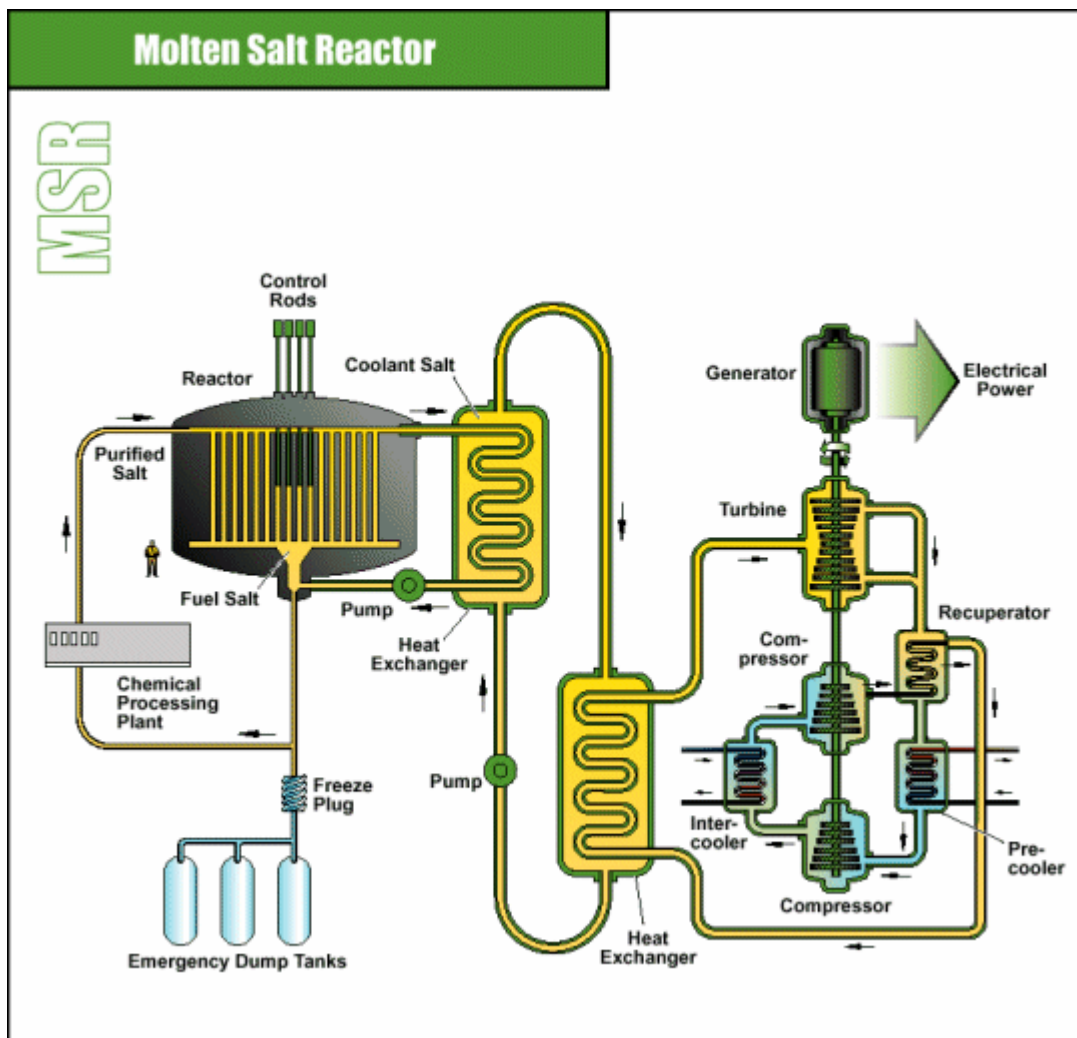
3 SULASUOLAREAKTORIN TOIMINTAPERIAATE

Sulasuolareaktori on terminen hyötöreaktori joka toimii ${}^{233}\text{U} - {}^{232}\text{Th}$ kierrolla. ${}^{233}\text{U}$ on

ainoa fissiili isotooppi jolla voi hyötää termisessä reaktorissa. Sulasuolareaktori on ainutlaatuinen reaktorimalli siinä mielessä että polttoaine, fertiili materiaali ja jäähdytyn ovat sekoitettuna homogeeniseksi liuokseksi. Liuos kostuu erilaisista fluoridisuoloista, jotka korkeassa lämpötilassa sulavat viskoosittomaksi nesteeksi. Tyypillinen sulasuolan koostumus näkyy taulukossa 1.[4]

Taulukko 1. Tyypillinen sulasuolan koostumus [5]

${}^7\text{LiF}$	72 mol-%
BeF_2	16 mol-%
ThF_4	12 mol-%
${}^{233}\text{UF}_4$	0,3 mol-%



Kuva 1. Kaavakuva sulasuolareaktorista [6]

Kuvassa 1 on kaavakuva sulasuolareaktorista. Reaktorisydän koostuu grafiitista tehdyistä moderaattorielementeistä, joissa on kanavat sulasuolanesteelle. Grafiittimoderaattori on välttämätön jotta järjestelmästä tulisi kriittinen. Ilman sen neutroneja hidastavaa vaikutusta liuos ei ole kriittinen, joten kriittisyysongelmilta vältytään. Kun neste kulkee sydämen läpi järjestelmä

tulee kriittiseksi ja syntynyt fissioenergia absorboituu suoraan nesteeseen. Kuumentunut neste ohjataan lämmönvaihtimen läpi sekundaaripiirissä ja palaa sitten reaktoriin. Osa nesteestä voidaan ohjata reaktorisydämen sijasta kemialliseen käsittelyyn, johon on kerätty useita tärkeitä toimintoja. [4] Huomattava ero muihin reaktorimalleihin on myös se että polttoaine ja fissiotuotteet kiertävät reaktorisydämen ulkopuolelle.

3.1 Sulasuolan ominaisuudet

Taulukossa 2 on esitetty sulasuolaliuoksessa esiintyvien alkuaineiden mikroskooppinen absorptiovaikutusala termisille neutroneille. Taulukosta nähdään että kaikille muille aineille, paitsi toriumille ja uraanille, vaikutusala on hyvin pieni. Tämä on erittäin tärkeää termisessä hyötöreaktorissa koska η -arvo on hyvin alhainen, joten neutronitalous on keskeisessä asemassa. η on vapautuvien neutronien lukumäärä polttoaineeseen absorboitunutta neutronia kohden ja $\eta(^{233}\text{U}) = 2.29$. [4]

Taulukko 2. Absorptiovaikutusala termisille neutroneille ($T = 0,0253 \text{ eV}$) [5]

$\sigma_a(^7\text{Li})$	0,037 b
$\sigma_a(\text{Be})$	0,0092 b
$\sigma_a(\text{F})$	0,0095 b
$\sigma_a(^{233}\text{U})$	573,1 b
$\sigma_a(^{232}\text{Th})$	7,4 b

Erinomaisten neutroniominaisuuksien lisäksi fluoridisuoloilla on suuri liukenevuus uraaniin, eivätkä ne vaurioidu säteilystä. Niillä on hyvin alhainen höyrynpaine korkeissa lämpötiloissa, joka mahdollistaa sulasuolareaktorin toiminnan korkeassa lämpötilassa mutta vain hiukan ilmanpainetta korkeammassa paineessa. Täten vältetään kalliista paineastiasta ja korkean paineen aiheuttamista vaaroista ja vaikeuksista. Fluoridisuolat ovat hyvin stabiileja kemiallisia yhdisteitä, eivätkä ne reagoi aggressiivisesti ilman tai veden kanssa kuten esimerkiksi LMBR:ssä jäähdyttimenä käytettävä natrium. Korroosioongelmat yleisten rakennusmateriaalien ja grafiittimoderaattorin kanssa ovat myös huomattavasti pienemmät kuin useimmilla muilla suoloilla. Fluoridisuoloilla on myös kohtuullisen hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet. [4]

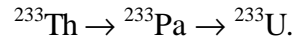
3.2 Kemiallinen käsittely

Osa primääripiirissä kiertävästä suolaliuoksesta voidaan erottaa ja ohjata kemiallisen käsittelyn läpi ennen kuin se uudestaan ohjataan reaktoriin. Kemiallisessa käsittelyssä sulasuolaliuoksen koostumusta voidaan muuttaa esimerkiksi poistamalla syntyneitä fissiotuotteita tai lisäämällä polttoainetta. Ydinase materiaalien leviämisen ehkäisyyn kannalta kemiallinen käsittelylaitos muodostaa ongelmakohdan sulasuolareaktorijärjestelmässä, koska mm. uraanin ja mahdollisen plutoniumin eri isotoopit voidaan siellä erottaa liuoksesta. Kaksi tärkeää osaa

kemiallisesta käsittelystä on protaktiniumin erottelu ja fissiotuotteiden poisto sekä uuden polttoaineen lataus.

3.2.1 Protaktiniumin erottelu

^{233}Th hajoamisketju on seuraavanlainen



^{233}Pa – isotoopilla, joka syntyy ennen kuin ^{233}Th muuttuu ^{233}U :ksi, on 27,4 päivän puoliintumisaika, joka on huomattavasti pitempi kuin suolan läpivirtausaika reaktorissa. Lisäksi ^{233}Pa :n termien absorptiovaikutusala on noin 41 b, eli selvästi suurempi kuin muilla suolassa olevilla alkuaineilla, lukuunottamatta uraania ja toriumia. Jos ^{233}Pa absorboi neutronin se muuttuu ydinenergiänäkölmuoksesta katsottuna arvottomaksi ^{234}Pa -isotoopiksi. Tästä johtuen ^{233}Pa pitää poistaa kiertävästä liuksesta ja säilyttää kunnes se on hajonnut ^{233}U -isotoopiksi, sen sijaan että se reaktorisydämessä muuttuisi ^{234}Pa isotoopiksi. Tämä tehdään kemiallisessa käsittelyssä. Muodostunut ^{233}U erotetaan hajoavasta protaktiniumista ja tarvittava osa palautetaan reaktorinesteeseen. Ylimääräinen ^{233}U myydään polttoaineeksi.[4]

3.2.2 Fissiotuotteiden poisto ja uuden polttoaineen lataus

Toinen kemiallisessa käsittelyssä tapahtuva prosessi on fissiotuotteiden poistaminen liuksesta. Tavallisissa, kiinteää polttoainetta käyttävissä reaktoreissa fissiotuotteet kerääntyvät polttoainesauvoihin ja ovat osasy s siihen että polttoainesauvat pitää vaihtaa säännöllisin väliajoin. Sulasuolareaktorissa ei menetä aikaa polttoaineen uudelleenlatauksessa, koska polttoainetta voidaan vaihtaa ja fissiotuotteita poistaa jatkuvasti, seurauksena hyvin pitkiä yhtämittaisia toimintajaksoja. Tämä piirre tekee sulasuolareaktorista hyvin houkuttelevan vaihtoehdon. Toisaalta, se että kiinteitä polttoaine-elementtejä ei käytetä voi olla esteenä sulasuolareaktorien kehitykselle, koska valmistajat ovat vastahakoisia toteuttamaan reaktorijärjestelmiä, jotka eivät tuo mukanaan lupausa pitkäaikaisista polttoainevalmistussopimuksista. Kemiallisessa käsittelyssä on myös mahdollista lisätä muissa reaktoreissa syntyneitä aktinideja jolloin pitkäikäisen ydinjätteen määrää voidaan pienentää. [4]

Sulasuolareaktorissa, jossa on uudelleen käsittely, osa ydinreaktoriterminologiasta menettää perinteisen merkityksensä. Lukuun ottamatta joitain ylösajoksoja sulasuolareaktori toimii tasapainotilassa, jossa polttoaineen konsentraatio ja määrä eivät muutu ajan mittaan. Käytetty polttoaine korvataan hyötämällä tai lisäämällä uutta. Polttoaineen palamalla, niin kun sitä käytetään kiinteää polttoainetta käyttävässä reaktorissa, ei siis ole merkitystä, koska ei ole olemassa tiettyä tuotettua energiamäärää joka olisi kytketty tiettyyn tunnistettavaan alkuperäiseen määrään polttoainetta. Samasta syystä sulasuolareaktorissa ei ole ylijäämäreaktiivisuutta, joka kompensoisi palamaa tai progressiivista myrkytystä, johtuen fissiotuotteiden kerääntymisestä, kuten perinteisissä reaktoreissa.[3]

4 SULASUOLAREAKTORIN ETUJA JA HAITTOJA

Sulasuolareaktorin hyvän neutronitalouden takia polttoainelataus voi olla hyvin pieni, noin 1,0 –

1,2 kg fissiilia materiaalia MWe kohden, verrattuna 3 kg MWe kohden LWR:ssä ja 3 – 4 kg MWe kohden LMFBR:ssa. Tämä tekee reaktorista taloudellisen ja se on myös turvallisuuden kannalta hyvä asia koska alhaisen polttoainemäärän takia jälkilämpöongelmat eivät ole yhtä vakavia sulasuolareaktoreissa kuin perinteisissä kiinteää polttoainetta käyttävissä reaktoreissa.[3]

Sulasuoloilla on alhainen höyrynpaine korkeissa lämpötiloissa, jonka takia sulasuolareaktori voi toimia jo ilmanpainetta hieman korkeammassa paineessa, jolloin välttyään korkean paineen aiheuttamista vaaroista eikä kallista paineastiaa tarvita. Sulasuoloilla on myös kohtuullisen hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet. Lisäksi, koska sulasuolat sallivat toiminnan korkeissa lämpötiloissa, MSR voi tuottaa ylikuumennettua höyryä 24 MPa paineessa ja 540 °C lämpötilassa, joka osaltaan johtaa voimalaitoksen korkeaan termiseen hyötysuhteeseen (n. 44 %). Fluoridisuolat ovat myös kemiallisesti hyvin stabiileja ja liekinkestäviä, joka vähentää palovaaraa, eivätkä ne reagoi energisesti veden tai ilman kanssa. [3, 4]

Jos sulasuolareaktoreita verrataan neljännen sukupolven reaktoreiden tavoitteisiin ne täyttävät suurimmalta osin. Sulasuolareaktoreilla on mahdollisuus vähentää pitkäikäisen ydinjätteen määrää ja mahdollisuus transmutoida muissa reaktoreissa syntyneitä aktinideja sekoittamalla ne sulasuolaliuokseen. Hyvä neutronitalous, korkea hyötysuhde ja alhainen polttoainelataus tekee sulasuolareaktorin taloudelliseksi. Toisaalta hyötökerroin sulasuolareaktoreissa on vain 1,05 ja 1,07 välillä, eli alhaisempi kuin tavoitteet ja huomattavasti huonompi kuin LMFBR tai GCFR (Gas Cooled Fast Reactor) reaktorimalleissa. Kahdentumisajan odotetaan olevan sulasuolareaktorissa n. 13–20 vuotta. Suurin ongelmakohta on kemiallisten käsittelylaitos, jossa voidaan erottaa ydinaseteollisuuden käyttämiä isotooppeja sulasuolaliuoksesta. [4]

Sulasuolareaktoreilla on myös suoranaisia haittapuolia. Kun polttoaineliuos virtaa ulos reaktorista se vie viivästyneiden neutronien prekursorit mukanaan, ja kun neutronit emittoituvat ne aktivoivat koko polttoainetta sisältävän primääripiirin. Tästä johtuen jotkut ylläpito- ja korjaustoimenpiteet voivat vaatia pitkiäkin reaktoriseisokkeja tai kehittyneitä kauko-ohjattuja laitteita. Tarve käsitellä ja valmistaa radioaktiivista liuosta rajoittaa myös sulasuolareaktoreiden kaupallisia käyttömahdollisuuksia. [4]

5 YHTEENVETO JA POHDINNAT

Sulasuolareaktori on osoitettu jo 1970-luvulla energiantuotantoon soveltuvaksi reaktorimalliksi. Silloin kehitetyt sulasuolareaktorit eivät kuitenkaan suoraan täytä nykyisiä turvallisuusvaatimuksia, mutta puutteisiin on jo suurimmalta osalta löytynyt ratkaisu. Vaikka vaikuttaa siltä että sulasuolareaktorilla on kiinteää polttoainetta käyttäviin reaktoreihin nähden useita etuja, sitä ei ole koskaan onnistuttu kaupallistamaan. Yksi syy siihen voi olla radioaktiivisen suolaliuoksen hankala valmistus ja käsittely. Toinen mahdollinen syy on kemiallisen käsittelyn yhteydessä ilmenevät vaarat ydinasetemateriaalin leviämistä. Lisäksi sulasuolareaktorin laitoskoko on iso ja tämänhetkisiin energiantuotantohintoihin verrattuna luultavasti epätaloudellinen.

Sulasuolareaktori tarjoaa kuitenkin mielenkiintoisen vaihtoehdon ydinenergiantuotantoon, jos edellä mainittuihin ongelmiin löydetään kehityksen edetessä järkevät ratkaisut. Fossiilisten polttoaineiden vähentyessä tai niiden hinnan noustessa ydinenergiatutkimukseen tullaan

varmasti panostamaan enemmän ja olemassa olevia reaktorimalleja tullaan parantamaan, jolloin ehkä myös sulasuolareaktoreiden tutkimus vilkastuu. Uskon myös että vaikka sulasuolareaktorijärjestelmää sellaisenaan ei koskaan kaupallistettaisikaan, fluoridipohjaiselle sulasuolalle tulee bytymään sovelluksia. Jo nyt sulasuolat esiintyvät useassa käynnissä olevassa tutkimusprojektissa transmutaatiosta ja erilaisista reaktorimuunnelmista ja niiden kombinaatioista.

6 KIRJALLISUUSVIITTEET

- [1] *Generation IV Nuclear Power Plants*, WWW-sivu:
<http://gen-iv.ne.doe.gov/> (4.4.2005)
- [2] *D. Lecarpentier, C. Garzenne, "Temperature Feedbacks of a Thermal Molten Salt reactor: Comparison Between Stability and Breeding Performances"*,
WWW-sivu:<http://www3.inspi.ufl.edu/ICAPP03/program/abstracts/3287.pdf>
(4.4.2005)
- [3] *Nuclear Energy Agency, "Accelerator-driven systems (ADS) and fast Reactors (FR) in advanced nuclear fuel cycles"*, WWW-sivu:
<http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2002/3109/nea3109ch9.pdf>
(4.4.2005)
- [4] *J.R. Lamarsh "Introduction to Nuclear Engineering" 3rd Edition, Prentice Hall (2001)*
- [5] *J.R. Lamarsh "Introduction to Nuclear Reactor Theory", Addison-Wesley (1965)*
- [6] *Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Molten Salt Reactor*. WWW-sivu:
<http://energy.inel.gov/gen-iv/msr.shtml> (4.4.2005)