



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Samuel Pennanen

Pienydinreaktoriteknologiat ja niiden soveltuvuus Suomen kasvaviin energiatarpeisiin

Tekniikan ja innovaatiojohtami-
sen akateeminen yksikkö
Kandidaatin tutkielma
Energia- ja informaatiotekniin-
kan ohjelma

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Samuel Pennanen		
Tutkielman nimi:	Pienydinreaktoriteknologiat ja niiden soveltuvuus Suomen kasvaviin energiatarpeisiin		
Tutkinto:	Energia- ja informaatiotekniikan ohjelma (TKK)		
Oppiaine:	Sähkö- ja energiatekniikka		
Työn ohjaaja:	Anne Mäkiranta		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	28

TIIVISTELMÄ:

Tämän tutkielman tavoitteena on muodostaa kirjallisuuskatsauksen pohjalta kokonaiskuva pienydinreaktoriteknologioista sekä tarkastella niiden mahdollisuuksia ja haasteita Suomen energijärjestelmän kehittämisessä. Tutkielmassa tarkastellaan pienydinreaktoriteknologioita (SMR) ja niiden soveltuvuutta Suomen energiatarpeisiin kirjallisuuskatsauksen perusteella. Työssä esitellään keskeisimmät SMR-teknologiat, kuten kevytvesipohjaiset pienreaktorit, korkean lämpötilan kaasureaktorit, sulasuolareaktorit sekä nopeat neutronireaktorit. Lisäksi tarkastellaan näiden teknologioiden toimintaperiaatteita, turvallisuusratkaisuja, kehitysvaihetta ja kaupallistamisen tilaa.

Teknologioita vertaillaan keskeisten ominaisuuksien, kuten teknisen toteutuksen, turvallisuuden ja käyttöönottoon liittyvien haasteiden näkökulmasta. Tämän jälkeen arvioidaan pienydinreaktorien mahdollista roolia Suomen energijärjestelmässä erityisesti sähköntuotannon ja kaukolämmön osalta.

Kirjallisuuden perusteella pienydinreaktorit tarjoavat potentiaalisia mahdollisuuksia vähäpäästöiseen energiantuotantoon, mutta niiden käyttöönotto riippuu teknologisesta kypsyydestä, taloudellisesta kilpailukyvyistä sekä sääntelyyn ja hyväksyttävyyteen liittyvistä tekijöistä. Lyhyellä aikavälillä teknologisesti kehittyneimmät ratkaisut näyttävät realistisimpina vaihtoehtoina, kun taas osa tarkastelluista konsepteista edustaa pidemmän aikavälin kehityssuuntaa.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että Suomen näkökulmasta pienydinreaktorit voisivat täydentää nykyistä energijärjestelmää tarjoamalla vakaata ja vähäpäästöistä sähköntuotantoa uusiutuvan energiantuotannon rinnalle. Toiseksi ne voisivat toimia ratkaisuna kaukolämmön ja teollisen prosessilämmön päästöjen vähentämiseen, mikä on merkittävä kysymys Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamisessa.

AVAINSANAT: Pienydinreaktorit (SMR), ydinenergiateknologia, Generation IV -reaktorit, energijärjestelmä, lämmöntuotanto, Suomen energia

Sisällys

1	Johdanto	4
2	Ydinenergia ja SMR-tekniikan yleiskatsaus	6
2.1	Ydinreaktorien toimintaperiaate	6
2.2	Pienydinreaktoreiden (SMR) kehitystausta ja määritelmä	7
2.3	SMR:n rooli osana tulevaisuuden energiajärjestelmää	9
3	SMR teknologiat ja toimintaperiaatteet	11
3.1	Kevytvesipohjaiset SMR:t	11
3.2	Korkean lämpötilan kaasureaktorit (HTGR)	12
3.3	Sulasuolareaktorit (MSR)	14
3.4	Nopeat neutronireaktorit (SFR ja LFR)	15
3.5	Kehitysvaihe ja kaupallistamisen tila	17
4	SMR-tekniikoiden vertailu	19
4.1	Tekninen vertailu	19
4.2	Turvallisuusnäkökohdat	19
4.3	Taloudelliset näkökohdat	20
4.4	Käyttöönottoon liittyvät haasteet	20
5	SMR ja Suomen energiatarpeet	22
5.1	Suomen energiajärjestelmien nykytila	22
5.2	SMR-tekniikoiden soveltuvuus sähköntuotantoon	22
5.3	SMR-tekniikat lämmöntuotannossa	23
5.4	Säätely ja hyväksyttävyyys	23
6	Johtopäätökset	24
7	Yhteenveto	26
	Lähteet	27

1 Johdanto

Ilmastonmuutoksen hillitseminen ja energiantuotannon päästöjen vähentäminen ovat keskeisiä tavoitteita sekä kansainvälisesti että Suomessa. Energiasektori on merkittävä hiilidioksidipäästöjen lähde, minkä vuoksi sen kehittämällä on suuri merkitys ilmasto-tavoitteiden saavuttamisessa. Suomessa sähkön- ja lämmöntuotantoa on viime vuosina pyritty ohjaamaan kohti vähäpäästöisempiä ratkaisuja, ja tässä yhteydessä ydinvoimalla on edelleen merkittävä rooli osana energijärjestelmää (IEA, 2023; World Nuclear Association, 2024).

Pienydinreaktorit (Small Modular Reactors, SMR) ovat ydinreaktoreita, joiden teho on selvästi perinteisiä ydinvoimalaitoksia pienempi ja joiden suunnittelussa korostuu modulaarisuus. Reaktorien keskeiset osat voidaan valmistaa teollisesti tehtaissa ja kuljettaa käyttöpaikalle valmiina kokonaisuuksina, mikä on arvioitu helpottavan rakentamista ja vähentävän hankkeisiin liittyviä riskejä (IAEA, 2024). Lisäksi monissa SMR-konsepteissa hyödynnetään passiivisia turvallisuusratkaisuja, joiden tarkoituksena on parantaa laitosten turvallisuutta erityisesti häiriö- ja poikkeustilanteissa (World Nuclear Association, 2024).

Suomessa pienydinreaktorit ovat herättäneet kiinnostusta erityisesti lämmöntuotannon näkökulmasta. Kaukolämpö kattaa merkittävän osan rakennusten lämmityksestä, ja sen päästöjen vähentäminen on keskeinen osa Suomen ilmastotavoitteita. Pienydinreaktoreita on esitetty mahdolliseksi vaihtoehdoksi fossiilisia polttoaineita käyttäville lämpölaitoksille, sillä ne pystyvät tuottamaan tasaista lämpöenergiaa ympäri vuoden (VTT, 2023). Samalla teknologia on kuitenkin vielä pitkälti kehitysvaiheessa, eikä laajamittaisesta kaupallisesta käytöstä ole toistaiseksi kattavaa kokemusta (IAEA, 2024).

SMR-teknologian käyttöönottoon liittyy myös sääntelyyn ja turvallisuusarviointiin liittyviä kysymyksiä, jotka ovat erityisen merkittäviä ydinenergian kaltaisella alalla. Suomessa Säteilyturvakeskus on todennut, että pienydinreaktoreiden turvallisuusarviointi on

periaatteessa mahdollista nykyisen sääntelykehysten puitteissa, mutta käytännön lupaprosessit edellyttävät vielä tarkempaa määrittelyä (STUK, 2023).

Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan pienydinreaktoriteknologioita ja niiden soveltuvuutta Suomen energiatarpeisiin kirjallisuuteen perustuen. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, jossa keskitytään eri SMR-tyyppien toimintaperiaatteisiin, turvallisuuden sekä yleisiin taloudellisiin ja sääntelyyn liittyviin näkökulmiin. Tutkielman tavoitteena on muodostaa kirjallisuuskatsauksen pohjalta kokonaiskuva pienydinreaktoriteknologioista sekä tarkastella niiden mahdollisuuksia ja haasteita Suomen energiajärjestelmän kehittämisessä.

2 Ydinenergia ja SMR-tekniologian yleiskatsaus

Pienydinreaktorien tarkastelu aloitetaan niiden taustasta ja toimintaperiaatteista. Tarkoituksena on muodostaa peruskäsitys siitä, mitä pienydinreaktoreilla tarkoitetaan ja miten ne eroavat perinteisistä ydinvoimalaitoksista. Lisäksi esitellään keskeiset käsitteet ja tekniset lähtökohdat, joihin myöhempi tarkastelu perustuu.

2.1 Ydinreaktorien toimintaperiaate

Ydinreaktorin toiminta perustuu atomiytimien fissioreaktioon, jossa raskas atomiydin, tyypillisesti uraani-235, hajoaa kahdeksi kevyemmäksi ytimeksi neutronin osuessa siihen. Hajoamisen yhteydessä vapautuu suuri määrä energiaa lämpönä sekä uusia neutroneita, jotka voivat edelleen aiheuttaa uusia fissioreaktioita. Kun reaktioiden ketju pidetään hallittuna, syntyy jatkuvaa ja tasaisesti tuotettua lämpöenergiaa, jota voidaan hyödyntää sähkön ja lämmön tuotannossa (IAEA, 2024).

Ydinreaktorissa ketjureaktion hallinta perustuu useisiin rakenteellisiin ja fysikaalisiin ratkaisuihin. Polttoaine on sijoitettu polttoainenippuihin, joita ympäröi jäähdytysaine. Jäähdytysaineen tehtävänä on siirtää fissioreaktiossa syntyvä lämpö reaktorin ulkopuoliseen energiantuotantoprosessiin sekä samalla estää polttoaineen ylikuumentuminen. Lisäksi reaktorissa käytetään säätösauvoja, jotka absorboivat neutroneita ja mahdollistavat ketjureaktion tehon säätämisen tai tarvittaessa reaktorin nopean pysäyttämisen (World Nuclear Association, 2024).

Useimmissa nykyisin käytössä olevissa ydinvoimalaitoksissa hyödynnetään kevytvesireaktoreita, joissa tavallinen vesi toimii sekä jäähdytysaineena että neutronien hidastimena. Hidastimen tehtävänä on alentaa neutronien nopeutta siten, että fissioreaktion todennäköisyys kasvaa. Kevytvesireaktoritekniologia on laajasti käytössä ja hyvin tutkittua, mikä on osaltaan vaikuttanut sen asemaan ydinvoiman valtateknologiana (IAEA, 2024).

Ydinreaktorin tuottama lämpö siirretään tyypillisesti höyrykiertoon, jossa lämpöenergia muutetaan mekaaniseksi energiaksi höyryturbiinin avulla ja edelleen sähköenergiaksi generaattorissa. Lämmöntuotannon näkökulmasta reaktorin lämpöä voidaan hyödyntää myös suoraan kaukolämpöverkossa tai teollisissa prosesseissa, mikäli lämpötila ja järjestelmän rakenne sen mahdollistavat. Tämä peruseriaate on sama riippumatta reaktorin koosta, mutta pienydinreaktoreissa järjestelmät on sovitettu pienempään mittakaavaan ja usein yksinkertaistettuun rakenteeseen (VTT, 2023).

Ydinreaktorien turvallisuus perustuu useisiin toisiaan täydentäviin suojakerroksiin, joita kutsutaan usein syvyysuuntaiseksi turvallisuusperiaatteeksi. Tämän periaatteen mukaan mahdollinen yksittäinen vika ei saa johtaa vakavaan onnettomuuteen, vaan järjestelmässä on useita toisistaan riippumattomia esteitä ja turvajärjestelmiä. Tämä ajattelu-tapa on keskeinen osa myös uusien reaktoriteknologioiden, kuten pienydinreaktoreiden, suunnittelua (STUK, 2023).

2.2 Pienydinreaktoreiden (SMR) kehitystausta ja määritelmä

Pienydinreaktoreiden kehityksen taustalla on tarve vastata energijärjestelmien muuttuviin vaatimuksiin. Perinteiset suuret ydinvoimalaitokset on suunniteltu tuottamaan suuria määriä sähköä keskitetysti, mutta niiden rakentaminen on usein kallista ja aikataulultaan haastavaa. Samalla energijärjestelmät ovat siirtymässä kohti hajautetumpaa tuotantoa, jossa korostuvat joustavuus, toimitusvarmuus ja päästöjen vähentäminen. Näihin haasteisiin vastaamiseksi on alettu kehittää pienempiä ja modulaarisempia ydinreaktoriratkaisuja, joita kutsutaan pienydinreaktoreiksi (Small Modular Reactors, SMR) (IAEA, 2024).

Yleisesti pienydinreaktoreilla tarkoitetaan ydinreaktoreita, joiden sähköteho on enintään noin 300 megawattia. Keskeinen piirre SMR-teknologiassa on modulaarisuus, eli reaktorin tai sen merkittävien osien valmistaminen teollisesti tehtaassa. Valmiit moduulit kuljetetaan käyttöpaikalle, jossa ne kootaan lopulliseksi laitokseksi. Tämän lähestymistavan tavoitteena on parantaa rakentamisen laatua, lyhentää rakentamisaikaa ja vähentää

kustannuksiin liittyviä epävarmuuksia verrattuna perinteisiin ydinvoimalaitoshankkeisiin (World Nuclear Association, 2024).

Pienydinreaktoreiden kehitystyö ei ole täysin uutta, sillä pienikokoisia reaktoreita on hyödynnetty jo pitkään esimerkiksi merivoimien aluksissa. Nykyinen SMR-kehitys eroaa kuitenkin aiemmista sovelluksista siten, että tavoitteena on kaupallinen siviilikäyttö energiantuotannossa. Useat valtiot ja teknologiatoimittajat kehittävät parhaillaan erilaisia SMR-konsepteja, joista osa perustuu tuttuun kevytvesireaktoritekologiaan ja osa täysin uusiin reaktoriratkaisuihin, kuten korkean lämpötilan kaasui- tai sulasuolareaktoreihin (IAEA, 2024).

Turvallisuus on yksi keskeisimmistä tekijöistä pienydinreaktoreiden suunnittelussa. Monissa SMR-konsepteissa on pyritty yksinkertaistamaan järjestelmiä ja vähentämään aktiivisten turvalaitteiden tarvetta hyödyntämällä passiivisia turvallisuusratkaisuja. Näiden ratkaisujen tavoitteena on, että reaktori pysyy turvallisessa tilassa myös tilanteissa, joissa ulkoinen sähkönsyöttö tai käyttäjän toimet eivät ole käytettävissä. Tällainen lähestymistapa nähdään yhtenä keinona parantaa ydinvoiman turvallisuutta ja hyväksyttävyyttä erityisesti uusissa käyttökohteissa (STUK, 2023).

Pienydinreaktoreiden kiinnostavuus liittyy myös niiden monikäyttöisyyteen. Sähköntuotannon lisäksi SMR-teknologiaa on esitetty hyödynnettäväksi kaukolämmön, teollisen prosessilämmön sekä mahdollisesti myös vedyn tuotannossa. Erityisesti Suomen kaltaisessa maassa, jossa lämmöntuotannolla on suuri merkitys energiankulutuksessa, pienydinreaktorit voisivat tarjota vaihtoehdon fossiilisiin polttoaineisiin perustuvalla lämmöntuotannolla (VTT, 2023). Toistaiseksi teknologia on kuitenkin vielä kehitysvaiheessa, ja sen laajamittainen käyttöönotto edellyttää lisätutkimusta, pilotointia sekä sääntelyyn liittyvien kysymysten ratkaisemista.

2.3 SMR:n rooli osana tulevaisuuden energiajärjestelmää

Tulevaisuuden energiajärjestelmiä kehitetään yhä enemmän kohti vähäpäästöisyyttä, toimitusvarmuutta ja joustavuutta. Uusiutuvien energialähteiden, kuten tuuli- ja aurinkovoiman, osuuden kasvu on vähentänyt energiantuotannon hiilidioksidipäästöjä, mutta samalla se on lisännyt tuotannon vaihtelua. Tämä asettaa haasteita sähköjärjestelmän tasapainolle ja korostaa tarvetta tuotantomuodoille, jotka pystyvät tuottamaan energiaa luotettavasti ja ennustettavasti ympäri vuoden (IEA, 2023).

Ydinvoimaa pidetään usein tärkeänä osana vähäpäästöistä energiajärjestelmää juuri sen korkean käyttöasteen ja vakauden vuoksi. Perinteisesti ydinvoiman rooli on painottunut suurten laitosten tuottamaan perusvoimaan, mutta pienydinreaktorit tarjoavat mahdollisuuden joustavampaan ydinenergian hyödyntämiseen. SMR-laitoksia voidaan periaatteessa sijoittaa lähemmäs kulutuskohteita ja ottaa käyttöön vaiheittain energiantarpeen kasvaessa, mikä erottaa ne suurista keskitetysti rakennettavista ydinvoimalaitoksista (IAEA, 2024).

Pienydinreaktoreiden rooli tulevaisuuden energiajärjestelmissä ei rajoitu pelkästään sähköntuotantoon. Useissa selvityksissä on korostettu niiden potentiaalia lämmöntuotannossa, erityisesti kaukolämmön ja teollisten prosessien yhteydessä. Tämä on merkittävää etenkin Pohjoismaissa, joissa lämmitys muodostaa suuren osan kokonaisenergiankulutuksesta. Ydinlämmön hyödyntäminen voisi vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja parantaa energiajärjestelmän kokonaisyötysuhdetta (VTT, 2023).

Lisäksi SMR-teknologiaa on tarkasteltu mahdollisena tukiratkaisuna energiajärjestelmissä, joissa tuotetaan myös uusia energiamuotoja, kuten vetyä. Tasainen ja päästötön sähkön- ja lämmöntuotanto voi mahdollistaa esimerkiksi elektrolyysipohjaisen vedyn tuotannon ilman suurta riippuvuutta sähkömarkkinoiden hintavaihteluista. Vaikka tällaiset sovellukset ovat vielä pitkälti kehitysvaiheessa, ne osoittavat pienydinreaktoreiden potentiaalin monipuolisena osana tulevaisuuden energiajärjestelmää (World Nuclear Association, 2024).

SMR-teknologian roolia arvioitaessa on kuitenkin huomioitava myös siihen liittyvät rajoitteet. Teknologian kaupallinen käyttöönotto on vielä alkuvaiheessa, eikä sen taloudellisesta kilpailukyvyystä ole toistaiseksi kattavaa käytännön kokemusta. Lisäksi ydinenergiaan liittyvä sääntely, luvitus ja yhteiskunnallinen hyväksyttävyys vaikuttavat merkittävästi siihen, millaisessa laajuudessa pienydinreaktoreita voidaan tulevaisuudessa hyödyntää. Tästä huolimatta SMR-teknologia nähdään monissa kansainvälisissä ja kotimaisissa selvitelyissä potentiaalisena osana vähäpäästöistä ja monipuolista energiajärjestelmää (STUK, 2023; IEA, 2023).

3 SMR teknologiat ja toimintaperiaatteet

Seuraavaksi siirrytään tarkastelemaan keskeisimpiä pienydinreaktoriteknologioita ja niiden toimintaperiaatteita. Huomio kohdistuu eri reaktorityyppien teknisiin ominaisuuksiin, turvallisuusratkaisuihin sekä kehitysvaiheeseen kirjallisuuden perusteella. Tarkastelu luo pohjan myöhemmälle vertailulle.

3.1 Kevytvesipohjaiset SMR:t

Kevytvesipohjaiset pienydinreaktorit ovat tällä hetkellä pisimmälle kehittynyt SMR-teknologian muoto. Ne perustuvat samaan peruseriaatteeseen kuin perinteiset painevesi- ja kiehutusvesireaktorit, joissa tavallinen vesi toimii sekä jäähdytysaineena että neutronien hidastimena. Tämän vuoksi kevytvesipohjaisia SMR-ratkaisuja pidetään teknologisesti kypsimpinä ja helpoimmin käyttöönotettavina verrattuna muihin kehittyneisiin reaktorikonsepteihin (IAEA, 2024).

Yksi keskeinen etu kevytvesipohjaisissa SMR-reaktoreissa on se, että ne hyödyntävät pitkälti tuttua ja laajasti tutkittua teknologiaa. Perinteisiin suuriin ydinvoimalaitoksiin verrattuna ero syntyy ennen kaikkea mittakaavasta ja rakenteellisista ratkaisuista. Useissa SMR-konsepteissa reaktorisydän, höyrystin ja paineastia on integroitu yhdeksi kokonaisuudeksi, mikä vähentää putkistojen määrää ja mahdollisia vuotokohtia. Tällaisen rakenteen on arvioitu parantavan laitosten turvallisuutta ja yksinkertaistavan huoltoa (World Nuclear Association, 2024).

Kevytvesipohjaisissa SMR-malleissa turvallisuutta pyritään parantamaan erityisesti passiivisten järjestelmien avulla. Näissä ratkaisuissa reaktorin jäähdytys ja pysäytys voivat toimia ilman ulkoista sähkönsyöttöä hyödyntäen painovoimaa, luonnollista kiertoa ja lämpötilaeroja. Tavoitteena on, että mahdollisissa häiriötilanteissa reaktori siirtyy automaattisesti turvalliseen tilaan ilman aktiivisia käyttäjätoimenpiteitä. Tämä lähestymistapa on nähty tärkeäksi tekijäksi ydinenergian hyväksyttävyyden parantamisessa, erityisesti uusissa käyttökohteissa (IAEA, 2024).

Käyttökohteiden osalta kevytvesipohjaiset SMR:t on ensisijaisesti suunniteltu sähkön- tuotantoon, mutta niitä voidaan soveltaa myös lämmöntuotantoon. Reaktorin tuotta- maa lämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämpöverkossa, mikäli lämpötilataso ja järjestelmän suunnittelu sen mahdollistavat. Suomen kaltaisessa maassa tämä tekee kevytvesipohjaisista SMR-ratkaisuista erityisen kiinnostavia, sillä ne voisivat täydentää nykyistä energiantuotantoa hyödyntämällä jo tuttua teknologiaa uudessa mittakaavassa (VTT, 2023).

Vaikka kevytvesipohjaiset SMR:t ovat teknologisesti pitkällä, niiden kaupallinen käyt- töönotto on edelleen rajallista. Useat hankkeet ovat vielä rakentamis- tai lupavaiheessa, eikä laajamittaisesta käytöstä ole toistaiseksi kertynyt runsaasti käytännön kokemuksia. Tästä huolimatta kevytvesipohjaisia SMR-ratkaisuja pidetään usein realistisimpana en- simmäisenä askeleena pienydinreaktoriteknologian käyttöönotossa, sillä ne perustuvat tunnettuun teknologiaan ja olemassa olevaan sääntelyosaamiseen (World Nuclear Asso- ciation, 2024).

3.2 Korkean lämpötilan kaasureaktorit (HTGR)

Korkean lämpötilan kaasureaktorit (High Temperature Gas-cooled Reactors, HTGR) muo- dostavat oman erityisen ryhmän pienydinreaktoriteknologioiden joukossa. Toisin kuin kevytvesipohjaisissa reaktoreissa, HTGR-reaktoreissa jäähdytysaineena käytetään inert- tiä kaasua, tyypillisesti heliumia. Helium ei reagoi kemiallisesti rakenteiden kanssa eikä muutu radioaktiiviseksi, mikä nähdään yhtenä teknologian turvallisuusetuna verrattuna vesipohjaisiin jäähdytysratkaisuihin (IAEA, 2024; U.S. Department of Energy, 2024).

HTGR-reaktoreiden keskeinen ominaisuus on niiden korkea käyttölämpötila, joka on sel- västi korkeampi kuin perinteisissä kevytvesireaktoreissa. Korkeat lämpötilat mahdollista- vat lämpöenergian tehokkaamman hyödyntämisen paitsi sähköntuotannossa myös teol- lisisissa prosesseissa, joissa tarvitaan korkeita lämpötiloja. Tällaisia sovelluksia ovat esi- merkiksi teollinen prosessilämpö sekä vedyn tuotanto, joissa HTGR-teknologian on

arvioitu tarjoavan merkittäviä etuja perinteisiin reaktorityyppeihin verrattuna (World Nuclear Association, 2024; U.S. Department of Energy, 2024).

Polttoaineratkaisut eroavat merkittävästi muista reaktorityypeistä. HTGR-reaktoreissa käytetään usein niin sanottua TRISO-polttoainetta, jossa uraanipolttoaine on kapseloitu useisiin toisiaan ympäröiviin suojakerroksiin. Näiden kerrosten tehtävänä on sitoa fission tuotteet polttoaineen sisälle myös korkeissa lämpötiloissa ja häiriötilanteissa. Vertaisarvioidussa kirjallisuudessa on todettu, että TRISO-polttoaineen rakenteelliset ominaisuudet ovat keskeinen tekijä HTGR-reaktorien turvallisuuskonseptissa ja vakavien onnettomuuksien riskin pienentämisessä (Alshehri, Said & Usman, 2021).

Turvallisuusajattelu on keskeinen osa HTGR-reaktoreiden suunnittelua. Korkean lämpötilan sietokyvyn, polttoaineen rakenteellisten ominaisuuksien sekä passiivisten jäähdytysmekanismien ansiosta reaktorin lämpötilan nousu häiriötilanteissa on hidasta. Tämä antaa enemmän aikaa poikkeamiin reagoimiselle ja vähentää riippuvuutta aktiivisista turvajärjestelmistä tai ulkoisesta sähkönsyötöstä. Useissa tutkimuksissa on korostettu, että juuri passiivisiin ilmiöihin perustuvat turvallisuusratkaisut ovat modulaaristen HTGR-reaktoreiden keskeinen vahvuus (STUK, 2023; Alshehri et al., 2021).

SMR-kontekstissa HTGR-reaktorit ovat kuitenkin vielä selvästi kehitysvaiheessa. Vaikka teknologiaa on tutkittu jo vuosikymmeniä ja kokeellisia sekä demonstraatiolaitoksia on rakennettu, laajamittainen kaupallinen käyttö on toistaiseksi vähäistä. Tämä asettaa haasteita teknologian käyttöönotolle erityisesti kustannusten, sääntelyn ja käytännön käyttökokemuksen puutteen näkökulmasta. Tästä huolimatta korkean lämpötilan kaasureaktoreita pidetään kirjallisuudessa lupaavana vaihtoehtona tulevaisuuden energijärjestelmissä, joissa korostuvat monipuolinen energiankäyttö, turvallisuus ja päästöttömyys (World Nuclear Association, 2024; Alshehri et al., 2021).

3.3 Sulasuolareaktorit (MSR)

Sulasuolareaktorit (Molten Salt Reactors, MSR) ovat kehittyneitä ydinreaktorikonsepteja, joissa reaktorin polttoaine on liuotettuna nestemäiseen suolaseokseen. Toisin kuin perinteisissä reaktoreissa, joissa polttoaine on kiinteässä muodossa, MSR-reaktoreissa polttoaine ja jäähdytysaine voivat olla samaa nestemäistä ainetta. Tämä mahdollistaa reaktorin toiminnan korkeissa lämpötiloissa ilman korkeaa painetta, mikä erottaa sulasuolareaktorit rakenteellisesti merkittävästi vesijäähdytteisistä reaktoreista. MSR-teknologiaa on tutkittu osana Generation IV -ydinreaktorien kehitystyötä, ja sitä pidetään pitkän aikavälin potentiaalisena ratkaisuna vähäpäästöiseen energiantuotantoon. (IAEA, 2024; World Nuclear Association, 2024)

Sulasuolareaktoreiden keskeinen etu on niiden kyky toimia alhaisessa paineessa. Koska suolaseokset kestävät hyvin korkeita lämpötiloja ilman kiehumista, reaktorin paineenkesto- ja turvallisuusvaatimukset voivat olla yksinkertaisempia kuin perinteisissä reaktortyypeissä. Korkea käyttölämpötila mahdollistaa myös korkean termisen hyötysuhteen sekä potentiaalisen monipuolisiin sovelluksiin, kuten sähköntuotantoon, kaukolämmön tuotantoon ja teolliseen prosessilämpöön. Näiden ominaisuuksien vuoksi MSR-teknologiaa on tarkasteltu vaihtoehtona energijärjestelmissä, joissa vaaditaan joustavuutta ja tehokasta lämmön hyödyntämistä. (World Nuclear Association, 2024)

Polttoainekierron näkökulmasta sulasuolareaktorit tarjoavat mahdollisuuksia, joita ei ole perinteisissä kiinteään polttoaineeseen perustuvissa reaktoreissa. Nestemäinen polttoaine mahdollistaa jatkuvan polttoaineenkäsittelyn, jossa fissiotuotteita voidaan poistaa ja uutta polttoainetta lisätä reaktorin ollessa toiminnassa. Tämän on arvioitu parantavan polttoaineen hyödyntämisastetta ja vähentävän pitkäikäisen ydinjätteen määrää. Lisäksi MSR-konsepteja on tutkittu mahdollisina ratkaisuuina toriumiin perustuvilla polttoainekiertoilla, mikä on herättänyt kiinnostusta erityisesti resurssitehokkuuden näkökulmasta. (IAEA, 2024; World Nuclear Association, 2024)

Sulasuolareaktoreiden kehityksessä merkittävä alakonsepti on Molten Salt Fast Reactor (MSFR), jossa reaktio etenee nopean neutronin spektrissä. MSFR-konsepti on valittu Generation IV International Forumin referenssireaktoriksi, koska se yhdistää sulasuolareaktorien nestemäisen polttoaineen edut nopean neutronispektrin mahdollisuuksiin, kuten tehokkaaseen aktiniidien polttoon ja hyvään polttoaineen hyödyntämiseen. MSFR-suunnittelussa keskeistä on homogeeninen nestemäinen polttoaine, joka mahdollistaa joustavan polttoainekierron ja jatkuvan fissiotuotteiden hallinnan. (Merle et al., 2014)

Turvallisuus on keskeinen osa sekä MSR- että MSFR-reaktorien suunnittelua. Useissa konsepteissa reaktorin turvallisuus perustuu passiivisiin fysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten polttoaineen lämpölaajenemiseen ja negatiivisiin reaktiivisuuskertoimiin. Häiriötilanteissa polttoaineen lämpötilan nousu voi automaattisesti hidastaa ketjureaktiota, mikä vähentää tarvetta aktiivisille turvajärjestelmille. Lisäksi MSFR-tutkimuksessa on korostettu, että nestemäinen polttoaine mahdollistaa joustavamman reaktorikäyttäytymisen poikkeustilanteissa verrattuna kiinteään polttoaineeseen perustuviin ratkaisuihin. (Merle et al., 2014; INAC, 2021)

SMR-kontekstissa sulasuolareaktorit ovat kuitenkin vielä varhaisessa kehitysvaiheessa. Suurin osa hankkeista on tutkimus- tai pilotointitasolla, ja teknologiaan liittyy edelleen merkittäviä haasteita. Näihin kuuluvat erityisesti materiaalien kestävyys kuumissa ja kemiallisesti vaativissa suolaympäristöissä sekä sääntelyyn liittyvät kysymykset, sillä sulasuolareaktorit poikkeavat huomattavasti nykyisistä ydinvoimateknologioista. Tästä huolimatta kirjallisuudessa sulasuolareaktoreita pidetään pitkän aikavälin potentiaalisina vaihtoehtoina tulevaisuuden energijärjestelmissä, joissa korostuvat korkea hyötysuhde, tehokas polttoaineen käyttö ja päästöttömyys. (IAEA, 2024; Merle et al., 2014)

3.4 Nopeat neutronireaktorit (SFR ja LFR)

Nopeat neutronireaktorit muodostavat oman ryhmän kehittyneiden ydinreaktoriteknologioiden joukossa. Toisin kuin kevytvesireaktoreissa, nopeissa reaktoreissa neutronien energiaa ei hidasteta, vaan reaktio etenee nopeassa neutronispektrissä. Tämän ansiosta

reaktorit kykenevät hyödyntämään polttoainetta tehokkaammin ja mahdollistavat myös pitkäikäisten aktiniidien polton. Nopeat neutronireaktorit ovat keskeinen osa Generation IV -ydinreaktoritutkimusta, jossa niiden roolia tarkastellaan erityisesti resurssitehokkuuden ja jätehuollon näkökulmasta. (IAEA, 2024; World Nuclear Association, 2024; Gen IV Forum, 2019)

Yksi tunnetuimmista nopeiden neutronireaktoreiden tyypeistä on natriumjäähdytteinen nopea reaktori (Sodium-cooled Fast Reactor, SFR). SFR-reaktoreissa jäähdytysaineena käytetään nestemäistä natriumia, joka mahdollistaa tehokkaan lämmönsiirron ja reaktorin toiminnan korkeissa lämpötiloissa ilman korkeaa painetta. Teknologiaa on testattu useissa kokeellisissa ja demonstraatiolaitoksissa, ja sitä pidetään yhtenä teknisesti kypsimmistä nopean neutronispektrin reaktorikonsepteista. Natriumin kemiallinen reaktiivisuus veden ja ilman kanssa asettaa kuitenkin merkittäviä vaatimuksia reaktorin suunnittelulle ja turvallisuusjärjestelmille. (IAEA, 2024; World Nuclear Association, 2024; Ecolo, 2005)

Toinen merkittävä nopeiden neutronireaktoreiden alalaji on lyijy- tai lyijy-vismuttijäähdytteinen nopea reaktori (Lead-cooled Fast Reactor, LFR). LFR-reaktoreissa käytetään jäähdytysaineena nestemäistä lyijyä tai lyijy-vismuttiseosta, jotka ovat kemiallisesti vakaampia kuin natrium. Tämä vähentää palamis- ja reaktiivisuusriskejä sekä parantaa passiivisia turvallisuusominaisuuksia. Toisaalta lyijypohjaisten jäähdytysaineiden korkea tiheys ja korroosio-ominaisuudet asettavat haasteita erityisesti materiaalivalinnoille ja pitkäikäiselle rakenteelliselle kestävyydelle. (IAEA, 2024; Ecolo, 2005)

Nopeiden neutronireaktoreiden keskeinen etu liittyy niiden mahdollisuuteen hyödyntää ydinpolttoainetta suljetussa polttoainekierrossa. Nopean neutronispektrin ansiosta reaktorit voivat tuottaa uutta fissioituvaa materiaalia ja polttaa pitkäikäisiä aktiniideja, mikä voi vähentää ydinjätehuollon pitkän aikavälin kuormitusta. Näiden ominaisuuksien vuoksi sekä SFR- että LFR-reaktoreita pidetään tärkeinä vaihtoehtoina kestävän

ydinenergiajärjestelmän kehittämisessä Generation IV -viitekehityksessä. (World Nuclear Association, 2024; Gen IV Forum, 2019)

SMR-kontekstissa nopeat neutronireaktorit ovat vielä kehitysvaiheessa, ja suurin osa hankkeista on tutkimus- tai demonstraatiotasolla. Teknologian käyttöönottoa rajoittavat muun muassa korkeat kehityskustannukset, monimutkaiset turvallisuus- ja materiaaliky-symykset sekä sääntelyyn liittyvät haasteet. Tästä huolimatta kirjallisuudessa SFR- ja LFR-tekniologioita pidetään pitkän aikavälin vaihtoehtoina, joilla voi olla merkittävä rooli re-surssitehokkaassa ja vähäpäästöisessä energiajärjestelmässä. (IAEA, 2024; World Nuclear Association, 2024; Ecolo, 2005)

3.5 Kehitysvaihe ja kaupallistamisen tila

Pienydinreaktoriteknologioiden kehitysvaihe ja kaupallistamisen eteneminen vaihtelevat merkittävästi eri reaktorityyppien välillä. Kevytvesipohjaiset SMR-reaktorit ovat teknologisesti pisimmällä, sillä ne perustuvat pitkälti jo käytössä olevaan ja hyvin tunnettuun reaktoriteknologiaan. Tämän vuoksi niiden turvallisuusanalyysit, luvitusprosessit ja sääntelykehikot ovat helpommin sovellettavissa olemassa oleviin käytäntöihin. Useat kevytvesipohjaiset SMR-hankkeet ovat edenneet rakentamis- tai lupavaiheeseen, ja niitä pidetään realistisimpana vaihtoehtona SMR-tekniologian ensimmäiselle laajemmalle käyttöönotolle. (IAEA, 2024; World Nuclear Association, 2024)

Korkean lämpötilan kaasureaktorit sekä sulasuolareaktorit edustavat teknologioita, jotka ovat vielä selvästi kehitysvaiheessa. Vaikka molempien reaktorityyppien peruseriaatteita on tutkittu jo useiden vuosikymmenten ajan ja kokeellisia tai demonstraatiolaitoksia on rakennettu, kaupallinen käyttökokemus on toistaiseksi rajallista. Näihin teknologioihin liittyy edelleen avoimia kysymyksiä erityisesti materiaalien kestävyden, järjestelmien monimutkaisuuden ja turvallisuusanalyysien osalta. Tästä huolimatta niitä pidetään lupaavina vaihtoehtoina pitkällä aikavälillä, erityisesti teollisen prosessilämmön ja korkean lämpötilan sovellusten näkökulmasta. (IAEA, 2024; World Nuclear Association, 2024; Alshehri et al., 2021)

Nopeat neutronireaktorit, mukaan lukien natrium- ja lyijyjäähdytteiset konseptit, ovat keskeinen osa Generation IV -ydinreaktorien kehitystyötä. Niiden merkitys korostuu erityisesti ydinpolttoainekierron sulkemisessa ja pitkäikäisten aktiniidien hyödyntämisessä. Teknologian kehitystä rajoittavat kuitenkin korkeat kehityskustannukset, vaativat materiaaliratkaisut sekä monimutkaiset turvallisuus- ja sääntelykysymykset. Tämän vuoksi nopeat reaktorit nähdään kirjallisuudessa ensisijaisesti pitkän aikavälin ratkaisuna, jonka laajamittainen käyttöönotto edellyttää merkittäviä teknisiä ja institutionaalisia edistysaskelia. (IAEA, 2024; World Nuclear Association, 2024; Gen IV Forum, 2019)

Kaupallistamisen kannalta merkittävä tekijä kaikille SMR-teknologioille on myös sääntely-ympäristö. Nykyiset ydinenergian lupaprosessit on pääosin suunniteltu suuria, keskitettyjä ydinvoimalaitoksia varten, mikä voi hidastaa uusien ja poikkeavien reaktorikonseptien käyttöönottoa. Erityisesti kehittyneempien reaktorityyppien, kuten MSR- ja nopeiden reaktoreiden, osalta tarvitaan uusia sääntelykäytäntöjä ja kokemukseen perustuvaa tietoa ennen laajamittaista kaupallista käyttöä. (STUK, 2023; IAEA, 2024)

Yhteenvetona voidaan todeta, että pienydinreaktoriteknologioiden kehityksessä ollaan eri vaiheissa riippuen reaktorityypistä. Lyhyellä aikavälillä kevytvesipohjaiset SMR-reaktorit näyttävät realistisimpana vaihtoehtona kaupalliselle käyttöönotolle, kun taas korkean lämpötilan kaasureaktorit, sulasuolareaktorit ja nopeat neutronireaktorit edustavat pitkän aikavälin potentiaalia. Näiden teknologioiden jatkokehitys ja mahdollinen käyttöönotto riippuvat teknologisen kypsymisen lisäksi taloudellisista, sääntelyyn liittyvistä ja yhteiskunnallisista tekijöistä. (IAEA, 2024; World Nuclear Association, 2024)

4 SMR-teknologioiden vertailu

Eri pienydinreaktoriteknologioiden ominaisuuksia tarkastellaan tässä vaiheessa rinnakkain. Vertailussa huomioidaan tekniset ratkaisut, turvallisuusnäkökohdat, taloudelliset tekijät sekä käyttöönottoon liittyvät haasteet. Tavoitteena on tunnistaa teknologioiden keskeiset vahvuudet ja rajoitteet yleisellä tasolla.

4.1 Tekninen vertailu

Teknisestä näkökulmasta pienydinreaktoritekniikat eroavat toisistaan erityisesti jäähdytysaineen, neutronispektrin, käyttölämpötilan ja rakenteellisen monimutkaisuuden osalta. Kevytvesipohjaiset SMR:t hyödyntävät tuttua kevytvesitekniikkaa ja toimivat matalammissa lämpötiloissa verrattuna kehittyneempiin reaktorityyppeihin. Tämä rajoittaa niiden lämpöhyötysuhdetta, mutta toisaalta teknologia on hyvin tunnettu ja laajasti testattu.

Korkean lämpötilan kaasureaktorit ja sulasuolareaktorit mahdollistavat huomattavasti korkeammat käyttölämpötilat, mikä parantaa termistä hyötysuhdetta ja avaa mahdollisuuksia teollisiin sovelluksiin. Nopeat neutronireaktorit eroavat muista erityisesti neutronispektrinsä ansiosta, mikä mahdollistaa tehokkaamman polttoaineen hyödyntämisen ja aktiniidien polton. Näiden etujen vastapainona teknologinen monimutkaisuus ja kehitysvaihe ovat selvästi pidemmällä kuin kevytvesipohjaisissa ratkaisuisa. (IAEA, 2024; World Nuclear Association, 2024)

4.2 Turvallisuusnäkökohdat

Turvallisuus on keskeinen vertailukriteeri kaikille pienydinreaktoritekniikoille. Kevytvesipohjaiset SMR:t hyötyvät pitkästä käyttökokemuksesta ja vakiintuneista turvallisuuskäytännöistä, mikä helpottaa niiden turvallisuusarviointia ja luvitusta. Useissa SMR-malleissa turvallisuutta on parannettu passiivisten järjestelmien avulla, jotka vähentävät riippuvuutta ulkoisesta sähkönsyötöstä.

Korkean lämpötilan kaasureaktorit ja sulasuolareaktorit perustuvat turvallisuusajatteluuun, jossa keskeistä ovat polttoaineen ja jäähdytysaineen fysikaaliset ominaisuudet. Esimerkiksi TRISO-polttoaine ja nestemäisen polttoaineen lämpölaajeneminen toimivat passiivisina turvallisuusmekanismeina. Nopeissa neutronireaktoreissa turvallisuus liittyy erityisesti jäähdytysaineen ominaisuuksiin sekä reaktorin reaktiivisuuskäyttäytymiseen. Näiden teknologioiden turvallisuuskonseptit ovat lupaavia, mutta vaativat vielä laajaa demonstrointia ja sääntelykokemusta. (STUK, 2023; Alshehri et al., 2021; IAEA, 2024)

4.3 Taloudelliset näkökohdat

Taloudellisesta näkökulmasta pienydinreaktoriteknologioiden keskeinen etu verrattuna perinteisiin ydinvoimalaitoksiin on modulaarisuus. Teollinen valmistus ja vaiheittainen käyttöönotto voivat pienentää investointiriskejä ja helpottaa rahoitusta. Kevytvesipohjaiset SMR:t nähdään taloudellisesti realistisimpana vaihtoehtona lyhyellä aikavälillä, koska niiden teknologinen riski on pienempi ja ne nojaavat olemassa olevaan osaamiseen.

Kehittyneempien reaktorityyppien, kuten HTGR-, MSR- ja nopeiden reaktoreiden, osalta taloudellinen kannattavuus on vielä epävarmaa. Korkeat kehityskustannukset, rajallinen käyttökokemus ja sääntelyyn liittyvät epävarmuudet nostavat investointiriskiä. Toisaalta pitkällä aikavälillä näiden teknologioiden parempi polttoaineen hyödyntäminen ja korkeampi hyötysuhde voivat parantaa niiden taloudellista kilpailukykyä. (IEA, 2023; World Nuclear Association, 2024)

4.4 Käyttöönottoon liittyvät haasteet

Pienydinreaktorien käyttöönottoa rajoittavat teknologisten ja taloudellisten tekijöiden lisäksi myös sääntelyyn ja yhteiskunnalliseen hyväksyttävyyteen liittyvät kysymykset. Nykyiset ydinenergian lupaprosessit on pääosin suunniteltu suuria ydinvoimalaitoksia varten, mikä voi hidastaa erityisesti kehittyneempien SMR-teknologioiden käyttöönottoa. Lisäksi uusien reaktorityyppien osalta tarvitaan lisää demonstrointihankkeita ja

käyttökokemusta ennen laajamittaista kaupallista käyttöönottoa. Yhteiskunnallinen hyväksyttävyys ja poliittinen päätöksenteko vaikuttavat merkittävästi siihen, millaisessa laajuudessa pienydinreaktoreita voidaan tulevaisuudessa hyödyntää. Näiden tekijöiden vuoksi SMR-teknologioiden käyttöönotto etenee todennäköisesti vaiheittain, alkaen teknologisesti kypsimmistä ratkaisuista. (STUK, 2023; IAEA, 2024)

5 SMR ja Suomen energiatarpeet

Edellä esitetyn teknologiatarkastelun pohjalta arvioidaan pienydinreaktorien mahdollista roolia Suomen energiajärjestelmässä. Arviointi perustuu kirjallisuuteen sekä Suomen energiantuotannon erityispiirteisiin. Huomiota kiinnitetään erityisesti sähkön- ja lämmöntuotannon näkökulmiin.

5.1 Suomen energiajärjestelmien nykytila

Suomen energiajärjestelmä perustuu monipuoliseen tuotantorakenteeseen, jossa yhdistyvät ydinvoima, vesivoima, tuulivoima, bioenergia sekä fossiiliset polttoaineet. Viime vuosina uusiutuvan energian osuus on kasvanut merkittävästi erityisesti tuulivoiman lisääntymisen myötä. Samalla ydinvoima on säilyttänyt keskeisen roolinsa vakaana ja vähäpäästöisenä perusvoiman lähteenä.

Sähköntuotannon lisäksi Suomessa lämmöntuotannolla on poikkeuksellisen suuri merkitys energiankulutuksessa. Kaukolämpö kattaa merkittävän osan rakennusten lämmityksestä, ja sen tuotanto on perinteisesti perustunut yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon sekä fossiilisiin polttoaineisiin. Ilmastotavoitteiden kiristyessä myös lämmöntuotannon päästöjen vähentäminen on noussut keskeiseksi tavoitteeksi. (IEA, 2023; STUK, 2023)

5.2 SMR-teknologioiden soveltuvuus sähköntuotantoon

Sähköntuotannon näkökulmasta pienydinreaktorit voisivat täydentää Suomen nykyistä energiantuotantorakennetta tarjoamalla vakaata ja sääriippumatonta tuotantoa. Erityisesti kevytvesipohjaiset SMR:t soveltuvat teknisesti hyvin sähköntuotantoon, sillä ne perustuvat tuttuihin reaktoriperiaatteisiin ja ovat teknologisesti pisimmällä kehityksessä.

SMR-laitosten pienempi yksikkökoko mahdollistaa vaiheittaisen kapasiteetin lisäämisen ja paremman soveltuvuuden pienempiin sähköjärjestelmiin tai teollisiin kohteisiin.

Toisaalta yksikkökokojen pienuus voi tarkoittaa korkeampaa yksikkökohtaista tuotantokustannusta verrattuna suuriin ydinvoimalaitoksiin, mikä vaikuttaa investointipäätöksiin. (IAEA, 2024; World Nuclear Association, 2024)

5.3 SMR-teknologiat lämmöntuotannossa

Suomen erityispiirre energiankulutuksessa on laaja kaukolämpöverkko. Tästä näkökulmasta pienydinreaktorit voivat tarjota merkittävän mahdollisuuden päästöttömään lämmöntuotantoon. Erityisesti matalamman lämpötilan sovelluksiin soveltuvat kevytvesipohjaiset SMR:t voisivat toimia kaupunkien lämmönlähteenä korvaten fossiilisia polttoaineita käyttäviä laitoksia.

Korkean lämpötilan kaasureaktorit ja sulasuolareaktorit voisivat puolestaan tarjota ratkaisuja teollisiin prosessilämpösovelluksiin, joissa vaaditaan korkeampia lämpötiloja. Näiden teknologioiden soveltuvuus riippuu kuitenkin niiden kehitysvaiheesta ja sääntelyprosessien etenemisestä. (VTT, 2023; IAEA, 2024)

5.4 Sääntely ja hyväksyttävyyys

Ydinenergian käyttö Suomessa perustuu tiukkaan sääntelyyn ja valvontaan. Pienydinreaktoreiden käyttöönotto edellyttää, että niiden turvallisuus voidaan osoittaa kansallisen lainsäädännön ja Säteilyturvakeskuksen vaatimusten mukaisesti. Erityisesti kehittyneempien reaktorikonseptien osalta sääntelyyn liittyy vielä avoimia kysymyksiä, sillä nykyinen lupaprosessi on suunniteltu pääosin suuria ydinvoimalaitoksia varten.

Lisäksi yhteiskunnallinen hyväksyttävyyys vaikuttaa merkittävästi siihen, missä laajuudessa pienydinreaktoreita voidaan tulevaisuudessa hyödyntää. Julkinen keskustelu ydinenergiasta, sijoituspaikkakysymykset ja turvallisuushuoli ovat tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa hankkeiden etenemiseen. (STUK, 2023; IAEA, 2024)

6 Johtopäätökset

Tämän tutkielman tavoitteena oli tarkastella pienydinreaktoriteknologioita ja arvioida niiden soveltuvuutta Suomen energiatarpeisiin kirjallisuuskatsauksen perusteella. Työssä käsiteltiin keskeisimpiä SMR-teknologioita, niiden teknisiä ominaisuuksia, turvallisuusperiaatteita, kehitysvaihetta sekä mahdollisia käyttökohteita Suomen energiajärjestelmässä.

Kirjallisuuden perusteella pienydinreaktorit muodostavat monipuolisen teknologiakokonaisuuden, jossa eri reaktoryypeillä on toisistaan poikkeavia vahvuuksia ja haasteita. Kevytvesipohjaiset SMR:t ovat teknologisesti pisimmällä kehityksessä ja perustuvat vakiintuneisiin ratkaisuihin, minkä vuoksi niiden käyttöönotto on realistisinta lyhyellä aikavälillä. Korkean lämpötilan kaasureaktorit ja sulasuolareaktorit tarjoavat potentiaalisia etuja erityisesti korkean lämpötilan sovelluksissa ja polttoaineen tehokkaammassa hyödyntämisessä, mutta niiden kaupallinen käyttö on vielä rajallista. Nopeat neutronireaktorit puolestaan liittyvät vahvasti pitkän aikavälin tavoitteisiin, kuten suljettuun polttoainekiertoon ja pitkäikäisten aktinidien hallintaan.

Suomen näkökulmasta pienydinreaktorit voisivat täydentää nykyistä energiajärjestelmää erityisesti kahdella tavalla. Ensinnäkin ne voisivat tarjota vakaata ja vähäpäästöistä sähköntuotantoa uusiutuvan energiantuotannon rinnalle. Toiseksi ne voisivat toimia ratkaisuna kaukolämmön ja teollisen prosessilämmön päästöjen vähentämiseen, mikä on merkittävä kysymys Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Erityisesti pienemmän kokuokan ja modulaarisuuden ansiosta SMR-teknologia voisi soveltua hajautetumpaan energiantuotantoon kuin perinteiset suuret ydinvoimalaitokset.

Toisaalta työn perusteella voidaan todeta, että teknologinen potentiaali ei yksin riitä käyttöönoton edellytykseksi. Taloudellinen kilpailukyky, sääntelykehys, luvitusprosessit sekä yhteiskunnallinen hyväksyttävyyys vaikuttavat ratkaisevasti siihen, missä laajuudessa pienydinreaktoreita voidaan Suomessa hyödyntää. Erityisesti kehittyneempien

reaktorityyppien osalta tarvitaan lisää demonstraatiohankkeita ja käyttökokemusta ennen laajamittaista kaupallista käyttöä.

7 Yhteenveto

Kirjallisuuskatsauksen perusteella pienydinreaktorit tarjoavat useita potentiaalisia hyötyjä Suomen energiajärjestelmälle. Lyhyellä aikavälillä teknologisesti kypsimmät kevytvesipohjaiset SMR:t näyttävät realistisimpana vaihtoehtona sähkö- ja lämmöntuotantoon. Kehittyneemmät reaktorikonseptit, kuten HTGR-, MSR- ja nopeat neutronireaktorit, voivat pitkällä aikavälillä tarjota lisähyötyjä erityisesti polttoaineen hyödyntämisen ja korkean lämpötilan sovellusten osalta.

SMR-teknologioiden laajamittainen käyttöönotto Suomessa edellyttää kuitenkin teknologisen kypsyyden lisäksi taloudellista kilpailukykyä, selkeää sääntelykehystä ja yhteiskunnallista hyväksyttävyyttä. Näiden tekijöiden yhteisvaikutus määrittää sen, millainen rooli pienydinreaktoreilla voi tulevaisuudessa olla Suomen energiajärjestelmässä.

Yhteenvetona voidaan todeta, että pienydinreaktorit tarjoavat useita mahdollisuuksia Suomen energiajärjestelmän kehittämiseen, mutta niiden rooli riippuu tulevasta teknologisesta kehityksestä, kustannustasosta ja poliittisesta päätöksenteosta. Lyhyellä aikavälillä realistisimpana vaihtoehtona näyttävät kevytvesipohjaiset SMR-ratkaisut, kun taas muut tarkastellut teknologiat edustavat pidemmän aikavälin kehityssuuntaa. Jatkossa aihetta olisi perusteltua tarkastella tarkemmin taloudellisesta näkökulmasta tai tapautuskimpuksen avulla, mikäli SMR-hankkeet Suomessa etenevät konkreettisempaan suunnitteluvaiheeseen.

Lähteet

- Alshehri, S. M., Said, I. A., & Usman, S. (2021). A review and safety aspects of modular high-temperature gas-cooled reactors. *International Journal of Energy Research*, 45(8), 11479–11492. <https://doi.org/10.1002/er.6289>
- Ecolo. (2005). SFR vs LFR: *Sodium-cooled fast reactor versus lead-cooled fast reactor*. Noudettu 21.01.2026 osoitteesta https://ecolo.org/documents/documents_in_english/SFRvsLFR-05.pdf
- Generation IV International Forum. (2019). *Fast reactor systems* (Gen IV overview). Noudettu 08.01.2026 osoitteesta <https://indico.ictp.it/event/8324/session/3/contribution/7/material/0/0.pdf>
- International Atomic Energy Agency. (2024). *Advanced reactors: Molten salt reactors*. Noudettu 14.01.2026 osoitteesta <https://www.iaea.org/topics/advanced-reactors>
- International Atomic Energy Agency. (2024). *Nuclear power reactors*. Noudettu 12.01.2026 osoitteesta <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-reactors>
- International Atomic Energy Agency. (2024). *Small modular reactors*. Noudettu 05.01.2026 osoitteesta <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>
- INAC. (2021). *Overview of molten salt reactor systems*. Noudettu 27.12.2025 osoitteesta <https://inac2021.aben.com.br/resumos/R0522-1.pdf>
- Merle, E., Heuer, D., Allibert, M., et al. (2014). Overview and perspectives of the molten salt fast reactor (MSFR) concept. *EPJ Web of Conferences*, 83, 01002. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20158301002>
- Säteilyturvakeskus. (2023). *Small modular reactors*. Noudettu 18.01.2026 osoitteesta <https://stuk.fi/en/small-modular-reactors>
- Säteilyturvakeskus. (2023). *Ydinvoimalaitosten turvallisuus ja sääntely*. Noudettu 09.01.2026 osoitteesta <https://stuk.fi/tietoa-ydinvoimalaitoksista>
- U.S. Department of Energy. (2024). Nuclear 101: *What is a high-temperature gas reactor?* Noudettu 23.01.2026 osoitteesta <https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-what-high-temperature-gas-reactor>

- VTT Technical Research Centre of Finland. (2023). *EcoSMR – Small modular reactors for low-carbon district heating in Finland*. Noudettu 20.12.2025 osoitteesta <https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/small-modular-reactors-pave-way-nuclear-district-heating-finnish-homes>
- World Nuclear Association. (2024). *How nuclear reactors work*. Noudettu 16.01.2026 osoitteesta <https://world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-does-a-nuclear-reactor-work>
- World Nuclear Association. (2024). *High-temperature gas-cooled reactors*. Noudettu 07.01.2026 osoitteesta <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors/high-temperature-gas-cooled-reactors.aspx>
- World Nuclear Association. (2024). *Molten salt reactors*. Noudettu 28.01.2026 osoitteesta <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/next-generation/molten-salt-reactors.aspx>
- World Nuclear Association. (2024). *Small nuclear power reactors*. Noudettu 04.01.2026 osoitteesta <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>