



samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

TIITU LEPPÄNEN

Pienreaktorit kaukolämmön tuotannossa

Opinnäytetyö

ENERGIA- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA
2023

TIIVISTELMÄ

Leppänen, Tiitu: Pienreaktorit kaukolämmön tuotannossa
Opinnäytetyö, AMK
Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma
Kesäkuu 2023
Sivumäärä: 36

Opinnäytetyössä tutkittiin pienreaktorien nykytilaa, reaktorityyppejä, turvallisuutta sekä tulevaisuuden kehitysnäkymiä. Syvemmin opinnäytetyössä tarkasteltiin kaukolämmöntuotantoon suunniteltuja pienreaktoreita. Näiden lisäksi opinnäytetyössä tarkasteltiin tarkemmin VTT:n LDR-50 ja LUT:in LUTHER ja MMR kaukolämpöreaktorikonsepteja. Opinnäytetyö suoritettiin kirjallisuuskatsauksena Satakunnan ammattikorkeakoululle. Tutkimustulokset olivat lupaavia ja luotettavia.

SMR-tekniikan eli pienreaktoritekniikan avulla pystytään vähentämään fossiilisia polttoaineita energian tuotannossa erityisesti kaukolämmön tuotannossa Suomessa. Pienreaktorit ovat kilpailukykyisiä ja luotettavia. Tärkeää olisi uudistaa riittävän ajoissa luvitusta ja lainsäädäntöä pienreaktorien osalta. Suomeen on ensisijaisesti suunniteltu kaukolämpöreaktoreita.

Avainsanat: Pienreaktorit, kaukolämpö, turvallisuus, passiivinen turvallisuus, luvitus, VTT, LUT yliopisto, ydinvoima

Abstract

Leppänen, Tiitu: Small modular reactors in district heat production
Bachelor's thesis
Energy and environmental engineering Degree program
June 2023
Number of pages: 36

In the thesis, the current state of small modular reactors, reactor types, safety and future development prospects were studied. Small modular reactors designed for district heat production were examined more deeply in the thesis. In addition to these, the thesis looked more closely at VTT's LDR-50 and LUT's LUTHER and MMR district heating reactor concepts. The thesis was carried out as a literature review for Satakunta University of Applied Sciences. The research results were promising and reliable.

With the help of SMR technology, it is possible to reduce fossil fuels in energy production, especially in the production of district heat in Finland. Small modular reactors are competitive and reliable. It would be important to reform the licensing and legislation regarding small reactors in sufficient time. District heating reactors are primarily planned for Finland.

Keywords: Small modular reactors, district heating, safety, passive safety, licensing, VTT, LUT University, nuclear power

SISÄLLYS

| | |
|---|----|
| 1 JOHDANTO | 6 |
| 2 PIENREAKTORIEN NYKYTILA | 7 |
| 2.1 Pienydinvoiman erovaisuudet perinteisestä ydinvoimasta..... | 7 |
| 2.2 Kaukolämpöreaktorin kannattavuus | 8 |
| 3 PIENREAKTORITYYPIT | 9 |
| 3.1 Vesijäähdytteiset reaktorit | 9 |
| 3.2 Kaasujäähdytteiset reaktorit | 11 |
| 3.3 Nopeat reaktorit..... | 12 |
| 3.4 Sulasuolareaktorit..... | 13 |
| 4 TURVALLISUUS | 15 |
| 4.1 Ydinjäte | 15 |
| 4.2 Ydinmateriaalinvalvonta ja turvajärjestelyt..... | 16 |
| 5 VTT:N KAUKOLÄMPÖREAKTORI | 17 |
| 5.1 Turvallisuusjärjestelmät | 18 |
| 5.2 Reaktorin toimintaperiaate..... | 20 |
| 5.3 Polttoaine | 23 |
| 5.4 LDR-50 projektin edistyminen | 24 |
| 6 LUT:IN KAUKOLÄMPÖREAKTORIT | 27 |
| 6.1 LUTHER reaktori | 27 |
| 6.2 Ultra Safe Nuclear Corporation MMR reaktori | 29 |
| 7 KEHITYSNÄKYMÄT TULEVAISUUDESSA..... | 30 |
| 8 YHTEENVETO..... | 33 |
| LÄHTEET | 34 |

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

SMR: Small modular reactor eli pienreaktori.

VTT: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

LUT: Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto.

Modulaarinen: Moduuleista koostuva kokonaisuus, johon voi lisätä tai poistaa moduuleja.

MMR: Micro modular reactor eli mikroreaktori.

USNC: Ultra Safe Nuclear Corporation.

YEL: Ydinenergialaki.

CNSC: Kanadan ydinturvallisuuskomissio.

IMSR: Kanadalainen sulasuolareaktori ”Integral Molten Salt Reactor”.

Konsortio: Organisaatioiden väliaikainen yhteenliittymä, joka ajaa molempien yhteisiä etuja.

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö käsittelee pienydinreaktoreita alkuun yleisellä tasolla, josta syvennyttään erityisesti kaukolämmön tuotantoon kehiteltäviin pienreaktoreihin. Työssä käydään läpi pienreaktorien nykytilaa, turvallisuutta, erilaisia pienreaktorityyppejä ja tulevaisuuden kehitysnäkymiä. Tarkemmin keskitytään VTT:n LDR-50 reaktorikonseptiin sekä LUT:in LUTHER ja MMR reaktorikonsepteihin. Pienreaktorit ovat kehittyvää energiatekniikkaa, joka on ympäristöystävällisempää kuin fossiiliset polttoaineet. Suomessa kaukolämmön tuotannossa käytetään edelleenkin paljon fossiilisia polttoaineita, joten kaukolämmön tuotantoon suunnatut pienreaktorit ovat kilpailukykyisiä konsepteja verrattuna muihin kaukolämmön tuotantomuotoihin.

Suomessa erityisesti VTT ja LUT yliopisto ovat tutkineet pienreaktoreita jo muutaman vuoden. Molemmat ovat kehittäneet omia pienreaktorikonsepteja ja osoittaneet lupaavia tuloksia suunnitteluista. Erityisesti VTT on saanut rahoitusta valtiolta LDR-50 projektiin. LUT yliopisto tekee yhteistyötä yhdysvaltalaisen yrityksen kanssa MMR-reaktoriin liittyen. Kiinnostusta pienreaktoritekniikkaan on myös eri energia-alan yrityksiltä kuultu.

Pienydinreaktorit ovat tällä hetkellä erittäin ajankohtainen aihe. Energiakriisi Euroopassa on ennennäkemätön ja samalla ympäristökriisi pakottaa energia-alan toimijoilta ympäristöystävällisiä ratkaisuja ja uusia innovaatioita. Pienydinreaktoreilla voidaan korvata fossiiliset polttoaineet, kuten kivihiili ja turve. Pienydinreaktorit ovat vielä kehitteillä olevaa tekniikkaa, joilla on hyvät tulevaisuuden näkymät. Opinnäytetyön tavoitteena on tehdä kirjallisuuskatsaus pienreaktoreista kaukolämmön tuotannossa sekä pohtia mahdollisia kehityskohteita tulevaisuutta ajatellen.

2 PIENREAKTORIEN NYKYTILA

Pienydinvoimalle ei ole luotu vakinaista määritelmää, ja vastaukset vaihtelevat vastaajan mukaan. STUK:in määritelmän mukaan pienreaktori on alle 300 megawattia (STUK, 2021). Fortum kertoo pienreaktorin olevan sähköteholtaan 70 ja 300 MW välillä (Rantakaulio, 2022). Lisäksi kansainvälinen atomienergiajärjestö IAEA määrittelee ydinreaktorin pienreaktoriksi, kun reaktorin sähköteho on alle 300 MW. (Liou, 2021.)

Suomen yleisin lämmitysmuoto on kaukolämpö. Lämmöntuotannon puhdistamisessa on tällä hetkellä suurempi päästövähennyspotentiaali kuin sähkön tuotannossa. (Leppänen, 2021.) Tällä hetkellä yli kolmasosa kaukolämmön tuotannosta tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, kuten esimerkiksi maakaasulla, turpeella ja kivihieillä. Kaukolämmöstä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä voitaisiin vähentää nopeasti ja pysyvästi pienydinvoiman avulla. (LUT-yliopisto, 2022a.) Kaukolämpöä käytetään Suomen lisäksi myös Ruotsissa, Baltian maissa sekä itäisessä Euroopassa (Leppänen, 2023).

Suomen lisäksi myös muualla maailmassa on kehitteillä tai jo käytössä pienreaktoreita. Kiinassa, Venäjällä ja Yhdysvalloissa on pienydinvoima projektit ovat tällä hetkellä pisimmillään. Lisäksi Kanadassa on parhaimmillaan meneillään valtiopetoinen pienreaktoriohjelma. (Fortum 2023.)

2.1 Pienydinvoiman erovaisuudet perinteisestä ydinvoimasta

Pienydinvoimalla voidaan tuottaa sähköä tai lämpöä tai molempia. Riippuen mitä pienreaktorilla tuotetaan vaikuttaa pienreaktorien maantieteelliseen sijoitukseen. Suuret ydinvoimalat suunnitellaan räätälöityinä yksityishankkeina, joissa on erityisiä rakennustarpeita, kuten käyttötarpeen mukaan mitoitettuja toimilaitteita sekä yksityiskohtaiset turvallisuusjärjestelmät. Esimerkiksi Olkiluoto 3 on mitoitettu kestävästi lentokoneen törmäys. Suurten ydinvoimaloiden rakentamiseen kuluu aikaa moninkertaisesti verrattuna pienreaktoreihin. Pienydinvoimaloita voitaisiin valmistaa sarjatuotantona tehtaissa, jonka

jälkeen riittäisi kokoaminen sijoituspaikalla valmiista moduuleista. Sarjatuotanto on kustannustehokkaampaa ja rakentaminen on helpompaa sekä nopeampaa. (Lindholm 2022.)

Suomeen on kaavailtu ensisijaisesti pienreaktoreita, jotka ovat suunniteltu vain kaukolämpötuotantoon. Tämä eroaa eritoten perinteisistä ydinvoimaloista, joita on Suomessa kohdistettu sähköntuotantoon. Pienreaktoriin ei siis kuuluisi lainkaan turbiinikiertoa sekä sähköä tuottavaa generaattoria. (Leppänen, 2023.)

2.2 Kaukolämpöreaktorin kannattavuus

Lämmöntuotannon käyttöön pienreaktorit soveltuvat teknisesti hyvin. Pienydinenergialla pystytään tuottamaan vähähiilistä lämpöä. Haasteena on kuitenkin saada tuotanto ja kulutus kohtaamaan. Kaukolämpöä tuotetaan ja kulutetaan monesti paikallisesti, eikä sitä voida siirtää samalla tavalla kuin sähköä. Kaukolämpöverkoston syöttöveden lämpötila on monesti 65–120°C. (Leppänen, 2021.)

VTT:n tutkimusprofessori Leppänen Jaakko kertoo yle uutisartikkelissa, että SMR-voimaloiden pitäisi olla riittävän laajamittaisessa käytössä jo ensi vuosikymmenellä, jotta pystyttäisiin vaikuttamaan kasvihuonepäästöihin. Suomesta löytyy yli 100 kaukolämpöverkkoa, johon pienreaktorit sopisivat kaukolämmön tuottoon. (Lindholm, 2022.)

3 PIENREAKTORITYYPIT

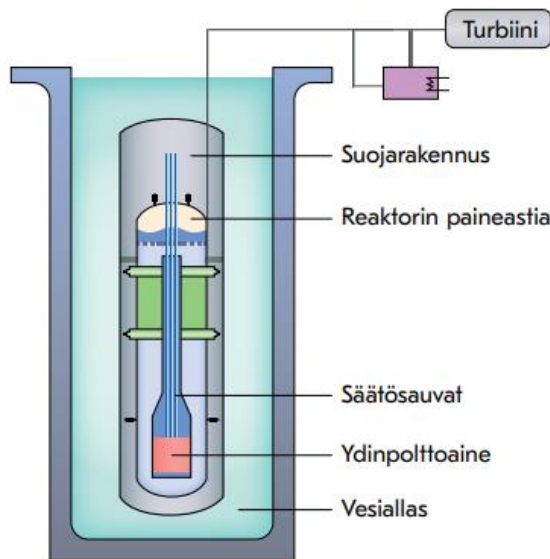
Ympäri maailmaa on kehitteillä useampi erilainen pienreaktori. Kaikki pienreaktorit perustuvat neutronien fissioketjureaktion hallintaan. Pienreaktorit pystytään karkeasti jakamaan eri reaktorityyppeihin teknologian mukaan. Tyypillisimmät erot pienreaktorityyppien välillä muodostuvat polttoaineesta ja reaktorin jäähdytysjärjestelmästä. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)

Kaukolämpökäyttöön suunniteltuja reaktorikonsepteja on kehitetty Suomen lisäksi Kiinassa (DHR-200 ja DHR-400, 200 ja 400 MWth) ja Venäjällä (RUTA-70, 70 MWth). Suomessa LUT yliopisto (LUTHER, 24MWth) ja VTT (LDR-50, 50 MWth) on kehittänyt pienen kaukolämpöreaktorin esikonseptivaiheen suunnitelmaa. Molemmat reaktorikonseptit on suunniteltu yhteensopivaksi olemassa olevan suomalaisen kaukolämpöverkostojärjestelmän kanssa. (Arnold, Hyvärinen, Leppänen, Soppela & Tulkki, 2022.)

3.1 Vesijäähdytteiset reaktorit

Maailman yleisin ydinreaktorityyppi on vesijäähdytteinen reaktori. Tämän reaktorityypin hyödyntämästä teknologiasta löytyy eniten tutkimus- ja käyttökokemustietoa. Tunnetuimmat teknologiat ovat painevesireaktori (PWR) ja kiehutusvesireaktori (BWR). Niiden lisäksi on kehitelty esimerkiksi kaukolämmöntuotantoon tarkoitettu allasreaktori, jossa reaktorin jäähdytyspiiriä ei ole paineistettu. Allasreaktoreita on pääsääntöisesti vain tutkimuskäytössä, esimerkiksi Espoon Otaniemessä. Vesijäähdytteisistä reaktoreista osa sijoittuu merelle tai rannikolle ja osa mantereelle. Tulevaisuudessa voidaan olettaa ensimmäisten kaupallisten pienreaktorien olevan vesijäähdytteisiä, johtuen

teknologian kypsyydestä. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)
Kuvassa yksi havainnollistetaan vesijäähdytteisen reaktorin toimintaperiaate.



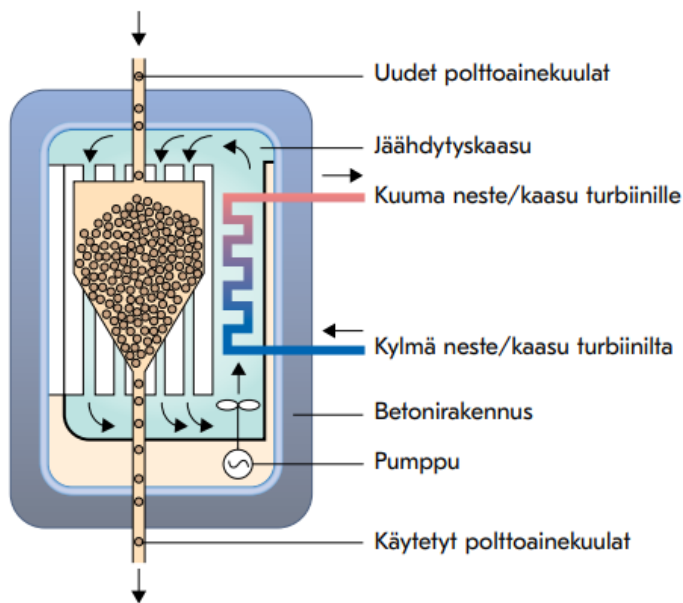
Kuva 1. Vesijäähdytteinen reaktori. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)

Monet kevytvesi pienreaktorit on ensisijaisesti suunniteltu sähkön tuotantoon. Näissä reaktorin käyttöpainne on 12–15 MPa sekä tuorehöyryn lämpötila parhaimmillaan noin 300 °C. Höyryvoimalaitosprosessia pystytään soveltamaan myös sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Kuitenkin sähköntuotantoa menetetään karkeasti yhden megawatin verran jokaista viittä lämpötehomegawattia kohti. Monen kevytvesi pienreaktorin suunniteltu käyttöikä on 40–60 vuotta. (Arnold, Hyvärinen, Leppänen, Soppela & Tulkki, 2022.)

Suomessa VTT suunnittelee vesijäähdytteistä pienreaktorikonseptia, joka kulkee nimellä LDR-50 (Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy, 2021). Projekti on tällä hetkellä etenemässä konseptitasolta perussuunnitteluvaiheeseen. Ensimmäinen demonstraatiolaitos suunnitellaan valmistuvan vuosikymmenen vaihteessa. (Leppänen, 2023.) Lisää VTT:n LDR-50 reaktorikonseptista löytyy kappaleesta viisi.

3.2 Kaasujäähdytteiset reaktorit

Kaasujäähdytteisessä reaktorissa veden sijaan kaasu jäähdyttää reaktorisydäntä ja neutronien hidastamiseen käytetään grafiittia. Helium on tyypillisin kaasu, jota käytetään kaasujäähdytteisen pienreaktorin jäähdyttämiseen. Reaktoriteknologian kehittyessä reaktorisydämen ratkaisut voivat poiketa aiemmasta. Kaasujäähdytteinen reaktoriteknologia mahdollistaa korkean lämpötilan prosessissa, ja tästä syystä se soveltuu myös tehokkaampaan voimalaitosprosessiin. Kaasujäähdytteisessä reaktorityypissä polttoaine muodostuu pienistä "mikroskooppisista" kuulista, joista pystyy muodostamaan suurempia kuulia. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.) Kuvassa kaksi havainnollistetaan kaasujäähdytteisen reaktorin toimintaperiaate.



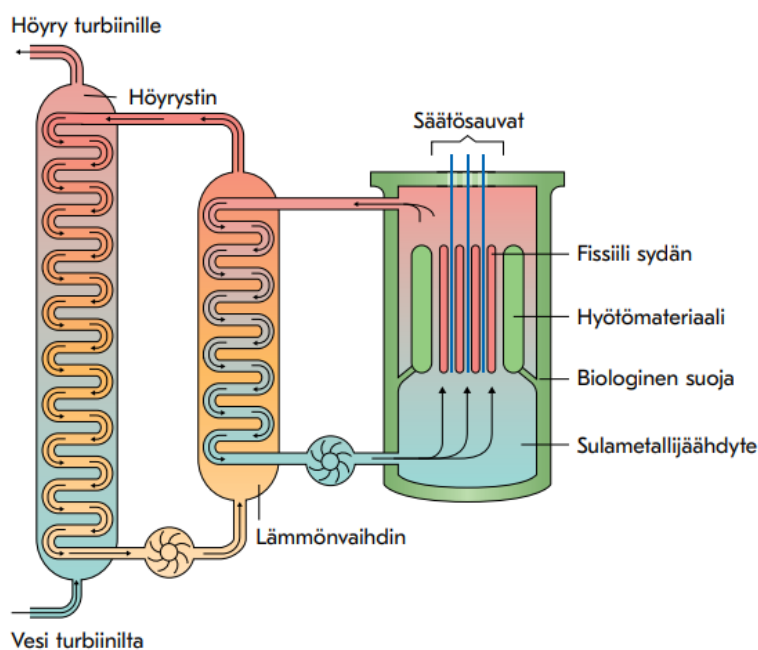
Kuva 2. Kaasujäähdytteinen reaktori. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)

Iso-Britanniassa on suuria voimalaitoskäytössä olevia kaasujäähdytteisiä reaktoreita. Lisäksi Kiinassa on pieni kuulakekoreaktori HTR-PM, joka kuuluu kaasujäähdytteisiin reaktoreihin. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.) HTR-PM:ssä on kaksi pientä reaktoria ja molemmat tuottavat 250 MWt energiaa, jotka käyttävät yhtä 210 MWe:n höyryturbiinia. Jäähdytysnesteinä toimii helium ja grafiittia käytetään hidasteena. Täyden kriittisyyden ensimmäinen HTR-PM reaktori saavutti 2021 syyskuussa ja toinen marraskuussa.

Ydinvoimalaitoksen omistaa China Huanengin (47,5 %) johtama konsortio, jossa on China National Nuclear Corporationin tytäryhtiö China Nuclear Engineering Corporation (32,5 %) ja Tsinghuan yliopiston ydin- ja uuden energia-tekniikan instituutti (20 %). (World Nuclear News, 2022.)

3.3 Nopeat reaktorit

Fissiossa syntyviä neutroneja ei hidasteta lainkaan nopeissa reaktoreissa. Jäähdytteenä toimii esimerkiksi sula natrium tai lyijy. Valtaosa kehitteillä olevista nopeista reaktoreista on lyijyjäähdytteisiä. Polttoaineena voidaan käyttää toriumia tai sellaisia uraaniatomeja, joita ei voida hyödyntää kevytvesireaktoreissa tai muissa neutroneja hidastavissa reaktorityypeissä. Nopea reaktori pystyy myös tuottamaan lisäpolttoainetta, jolloin se toimii samalla hyötöreaktorina. Esimerkiksi U-238 muodostaa Pu-239 ja Th-232 muodostaa U-233. Polttoainetta voi syntyä jopa enemmän kuin mitä reaktori kuluttaa. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.) Kuvassa kolme havainnollistetaan nopean reaktorin toimintaperiaate.



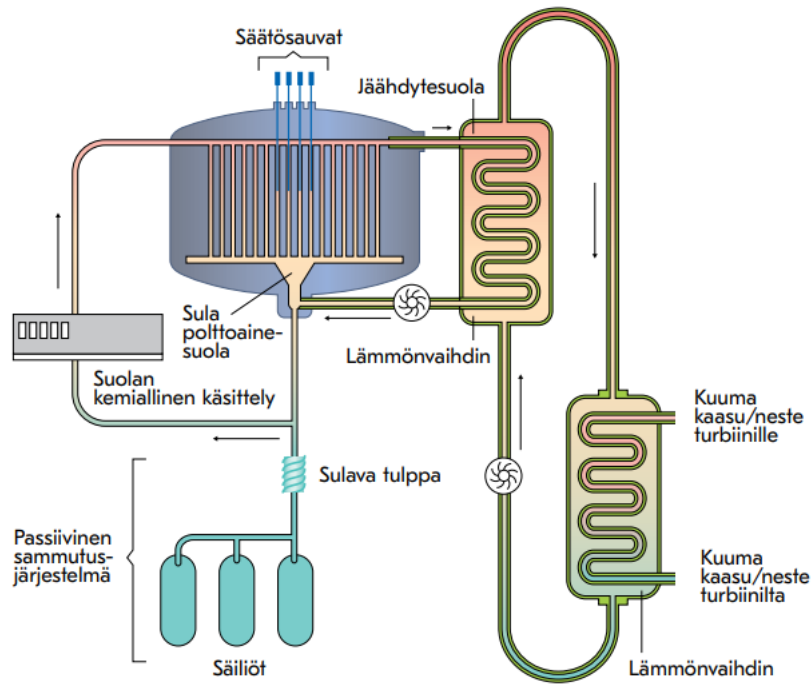
Kuva 3. Nopea reaktori. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)

Nopeita reaktoreita on käytössä tutkimusreaktoreina ja niitä hyödynnetään myös vähäisesti sähköntuotannossa. Ydinenergian historian alkuvaiheessa kehiteltiin aktiivisesti nopeita reaktoreita hyötykäyttöön. Nykypäivänä nopeita reaktoreita kehitetään niin pienreaktoreiksi kuin suurien voimalaitosten reaktoreiksi. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)

Ranskassa valmistui vuonna 1966 kooreaktori Rapsodie, jonka seurauksena rakennettiin demonstraatiolaitos Phenix vuonna 1973. Phenix oli sähkötehoaan 250 MW. Vuonna 1985 rakennettiin huomattavasti suurempi nopea reaktori Superphenix, joka oli sähkötehoaan 1240 MW. Voimalaitos sai jo rakennusvaiheessa voimakasta poliittista vastusta, jonka seurauksena laitos poistettiin käytöstä vuonna 1998. Pienempi Phenix reaktori toimi tutkimuskäytössä vuoteen 2009 asti. (Leppänen, 2018.)

3.4 Sulasuolareaktorit

Sulasuolareaktorin jäähdytteenä käytetään jotain sulasuolaseosta. Lisäksi polttoaine on sulana monissa sulasuolateknologiaan perustuvissa pienreaktoreissa. Neutronien hidasteena käytetään tyypillisesti grafiittia. Sulasuolareaktorin etuja on korkea prosessin lämpötila matalassa paineessa sekä ydinjätteen uudelleenkäytön mahdollisuus polttoaineena tai toiminta hyötöreaktorina. Sulasuolareaktoreita on käytetty vain tutkimuskäytössä. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.) Kuvassa neljä havainnollistetaan sulasuolareaktorin toiminta periaate.



Kuva 4. Sulasuolareaktori. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)

Kanadalainen yritys Terrestrial Energy kehittää sulasuolareaktoria IMSR Ontarioon. Yritys sai toukokuussa 2023 ison viranomaisapurahan tukemaan yhtiön Nuclear Regulatory Commissionin lisenssiohjelmaa IMSR-laitokselle. (Terrestrial Energy, 2023a). MSR on sähkön ja korkean lämmön (585°C) yhteistuotantolaitos, joka tuottaa 392 MW sähköä 884 MW lämpöreaktoriteholla. Polttoaineena toimii vähärikastettu uraani U-235, joka on alle 5 %. Sulasuola toimii jäähdytysnesteena ja grafiitti hidastimena. (Terrestrial Energy, 2023b)

4 TURVALLISUUS

Pienreaktorien tuomat hyödyt ovat merkittäviä ja haitat pieniä yhteiskunnalle ja ympäristölle. Passiiviset turvallisuusominaisuudet ovat kehittyneet merkittävästi, joka tulee huomioida pienreaktoreita koskevaa säännöstöä kehittäessä sekä luotaessa. Ydinenergian käyttöön liittyen on hyvä huomioida, ydin- ja säteilyturvallisuus, ydinmateriaalivalvonta, turvajärjestelyt sekä valmiustoiminta. (Energiateollisuus, 2021.)

Pienreaktorilaitoksen sijoituspaikkaa mietittäessä tulee huomioida tarpeellinen suojavaoähyke ja varautumisalue, jotka arvioidaan ydinlaitoksen ominaisuuksien mukaan. Pienreaktorien rakentaminen asutuskeskuksen tai teollisuuden läheisyyteen edellyttää tätä toimenpidettä. (Energiateollisuus, 2021.) Pienreaktorit, jotka tuottavat kaukolämpöä on sijoitettava kaukolämpöverkon läheisyyteen (Sallinen, 2022).

4.1 Ydinjäte

Suomessa ydinlaitoksen luvanhaltijalla on vastuu huolehtia tuottamiensa ydinjätteiden käsittelystä. Tämän YEL eli ydinenergiälaki periaatteen taustana on huolehtia, että jokaisen laitoksen luvanhaltijalta voidaan edellyttää kykyä huolehtia ydinjätteistä turvallisesti. Nykyään jokaisella ydinvoimalaitoksella on matala- ja keskiaktiivisten jätteiden käsittelyyn ja loppusijoitukseen tarvittavat tilat. Suomessa on käytetylle ydinpolttoaineelle loppujätteensijoituspaikka Eurajolla. (Ahoen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)

Pienreaktoreille olisi käytännöllisempää järjestää esimerkiksi ydinjätehuolto nykyisten ydinvoimayhtiöiden ja Posivan kanssa tai yhteistyönä pienreaktorien luvanhaltijoiden järjestämä jätehuolto tai kansallinen ydinjäteyhtiö, jolla

huolehdittaisiin ydinjätteen käsittelystä ja loppusijoituksesta. Luvanhaltijalla olisi joka tapauksessa vastuu huolehtia YEL:in mukaan ydinjättesijoituksen kustannuksista. Ydinjätteen kuljettaminen ja loppusijoitus Suomen ulkopuolelle on ydinenergialaissa kielletty. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)

4.2 Ydinmateriaalinvalvonta ja turvajärjestelyt

Ydinmateriaalivalvonnan tarkoituksena on huolehtia, että ydinmateriaalit pysyvät rauhanomaisessa sekä ilmoitetussa käyttötarkoituksessa. Tällä tarkoitetaan, että esimerkiksi ydinpolttoainetta ei käytetä ydinaseiden valmistamiseen tai ydinenergialla edistettäisiin ydinaseiden kehittämistä ja leviämistä. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)

Turvajärjestelyillä halutaan turvata tahallinen ydin- tai säteilyturvallisuutta vaarantava toiminta sekä lainvastainen toiminta. Samalla halutaan myös estää muut toimet ydinlaitoksen vahingoittamiseksi. Kansallinen ydinenergiajärjestö IAEA valvoo pienreaktoreita ja tekee satunnaisia yllätystarkastuksia. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)

Suunnitteluperusteuhan mukaisesti mitoitetaan, suunnitellaan ja toteutetaan turvajärjestelyt laitoksen tyyppin ja riskin mukaan. Turvajärjestelyihin vaikuttaa voimalaitoksen sijaintipaikka sekä millaista uhkaa laitoksen vaurioittaminen aiheuttaa ympäristön asukkaille. Näiden lisäksi turvallisuusjärjestelyihin vaikuttavat järjestelmien vaurioittamisen helppous sekä niiden ylläpito. Myös polttoaineen kuljetuksessa on huomioitava riittävät turvajärjestelyt. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)

Pienreaktorien turvallisuuden suunnittelussa on huomioitava vähäinen käyttöhenkilökunta. Mahdollinen kaukokäyttö herättää myös turvallisuuskysymyksiä liittyen tietoturvaan, ydinmateriaalivalvonnan toteutumiseen, kunnon valvontaan sekä turvajärjestelyihin. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)

5 VTT:N KAUKOLÄMPÖREAKTORI

Vuoden 2020 keväänä VTT käynnisti oman projektin liittyen kaukolämmön tuotantoon pienreaktoreilla. VTT:n kaukolämmön tuotantoon tarkoitettu pienreaktori LDR-50 eli "low temperature district heating reactor" on suunniteltu tuottamaan 50 megawattia lämpötehoa suomalaiseen kaukolämpöverkostoon (Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy, 2021). Pienreaktori sopii peruskuorma- ja kuormanseurantakäyttöön. Yksittäinen polttoainelataus toimii noin kaksi vuotta. VTT:n suunnittelemaan kaukolämpöreaktorin voimalaitosprosessiin ei kuulu lainkaan turbiinikiertoa ja generaattoria, sillä tarkoituksena on tuottaa pelkkää lämpöä. (Arnold, Hyvärinen, Leppänen, Soppela & Tulkki, 2022.)

Kaukolämpöreaktori LDR-50 on painevesireaktoriteknologiaa, johon on yhdistetty innovatiivisesti passiivinen turvallisuusjärjestelmä. Reaktorin suunnittelu perustuu mahdollisimman yksinkertaiseen ratkaisuun. Tämän lisäksi reaktorin suunnittelussa pyritään käyttämään hyvin tunnettua reaktoriteknologiaa, josta on paljon tutkimus- ja käyttökokemusta. Konseptisuunnittelussa on pyritty välttämään tarpeettoman poikkeavia monimutkaisia ratkaisuja, materiaaleja ja valmistusmenetelmiä. (Arnold, Hyvärinen, Leppänen, Soppela & Tulkki, 2022.)

Kaukolämpöreaktoriteknologia voisi mahdollisesti kehittää kotimaista teollisuutta. Valmistuksessa pystytään hyödyntämään suomalaista teollisuutta luokun ottamatta polttoainetta ja muita ydinteknisiä komponentteja. Reaktorin polttoainekierto on suunniteltu kotimaisen ydinjätteen loppusijoituskonseptin kanssa yhteensopivaksi. (Arnold, Hyvärinen, Leppänen, Soppela & Tulkki, 2022.) Arviolta 50 MW pienvoimalasta syntyy noin 1500 kiloa ydinjätettä vuodessa (Niemelä, 2022).

Kaukolämpölaitos voidaan muodostaa yhdestä tai useammasta reaktoriyksiköstä tarpeen mukaan. VTT on suunnittelussa tarkastellut useampaa sijoitusvaihtoehtoa. Reaktoriyksiköitä pystytään sijoittamaan maan alle louhittuun kallioluolaan tai maanpäälliseen laitokseen. Lisäksi on teknisesti mahdollista asentaa reaktoriyksikkö olemassa olevaan teollisuuslaitoksen tiloihin, mutta

tällöin sijoitusvaihtoehtoja rajoittaa käytettävissä olevan tilan määrä sekä turvallisuusasetukset turvalliselle käytölle. (Arnold, Hyvärinen, Leppänen, Soppela & Tulkki, 2022.)

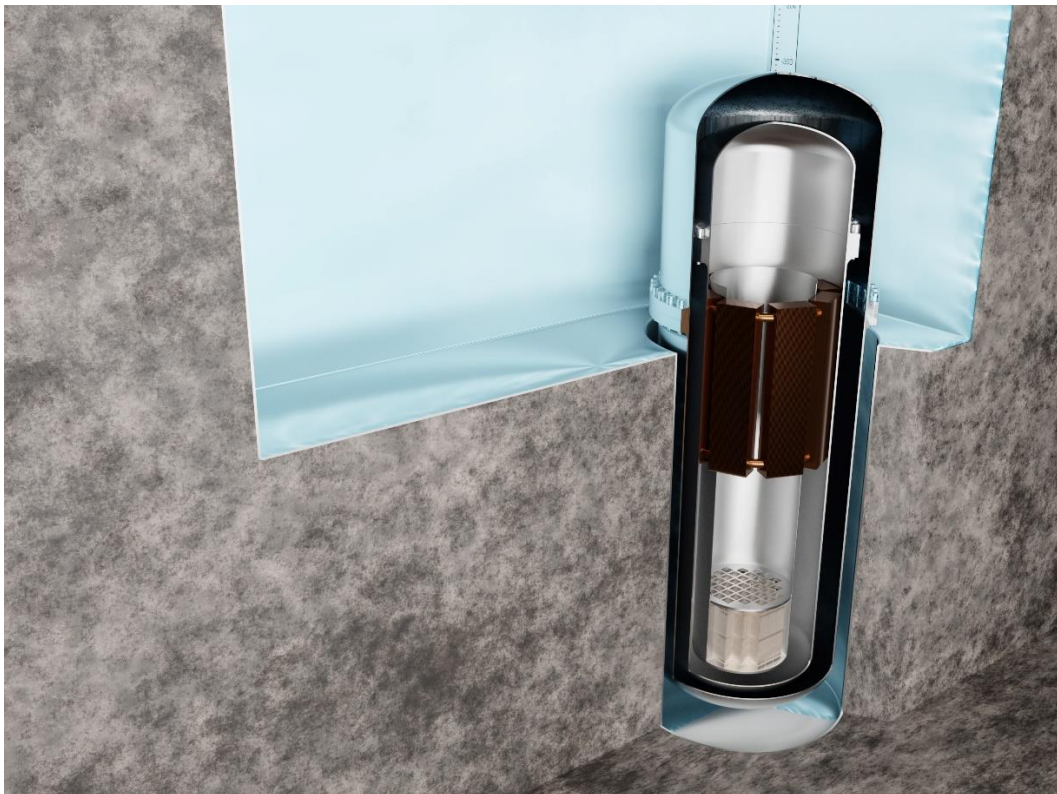


*Kuva 5. Kaukolämpölaitoksen läpileikkaus teollisuusalueeksi kaavoitetulla ton-
tilla. Havainnekuvassa näkyy kaksi LDR-50 reaktorimoduulia sijoitettuna ve-
sialtisiin, jotka toimivat lämpönieluinä. Välipiirin putkistot kulkevat reaktorihal-
lin vieressä olevaan huoneeseen, josta ne yhdistyvät kaukolämpöverkkoon
lämmönsiirtimien avulla. (Leppänen, 2021.)*

5.1 Turvallisuusjärjestelmät

Pienreaktori LDR-50 ei poikkea turvallisuudelle asetetun vaatimustason osalta ollenkaan perinteisistä suurista ydinvoimalaitoksista. Suunnitellusti korkea turvallisuustaso saavutetaan kumminkin yksinkertaisella passiivisella teknologialla. Perinteisesti turvallisuuden takaavat välttämättömät jäähdytysjärjestelmät, jotka toimivat sähkötoimisilla pumpuilla. Tämän sijaan LDR-50 reaktorin jäähdytysjärjestelmä perustuu veden luonnolliseen kiertoon lämpötilaeron vaikutuksesta. VTT:n LDR-50 reaktorikonseptissa jäähdytystoiminto on toteutettu kokonaan ilman mitään mekaanisia liikkuvia osia. (Arnold, Hyvärinen, Leppänen, Soppela & Tulkki, 2022.) LDR-50 reaktorin jäähdytysratkaisulle on myönnetty patentti (Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy, 2021).

VTT:lle myönnetty patentti kytkeytyy pienreaktorin jäähdytyksen toimintaan tilanteissa, joissa normaali lämmönsiirtoreitti menetetään esimerkiksi sähköjakaiverkon häiriön vuoksi. Reaktorimoduuli rakentuu kahdesta sisäkkäisestä paineastiasta, joiden väliin jäänyt tila on osittain täytetty vedellä. Vesi alkaa kiehuaan häiriötilanteessa, jolloin reaktori ei pääse kuumentumaan. Tämän seurauksena lämpöä siirtyy pois reaktorista. (Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy, 2021.)



Kuva 6. VTT:n kehittämän LDR-50 pienreaktorin 3D-havainnekuva. (Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy, 2021).

Kaukolämpötuotannon turvallisuussuunnittelun haasteena on reaktorilaitoksen sijoittaminen järkevästi kaukolämpöverkon alueelle. Tyypillisesti perinteisten ydinvoimalaitosten ympärille on rakennettu laajat suojavyöhykkeet ja varautumisalueet, joilla pyritään pienentämään turvallisuusriskiä sekä vähentämään onnettomuustilanteessa mahdollista ihmisväestöön kohdistuvaa säteilyhaittaa. Kaukolämpökäytössä vastaava turvallisuustaso on saatava muilla keinoilla. Pienreaktorin yhtenä suojavyöhykkeenä toimii käytännössä reaktorin vaatimattomat toimintaolosuhteet, kuten matala paine ja lämpötila, sekä pieni

yksikkökoko, joka vaikuttaa suorasti reaktorin radioaktiivisten aineiden määrään. (Arnold, Hyvärinen, Leppänen, Soppela & Tulkki, 2022.)

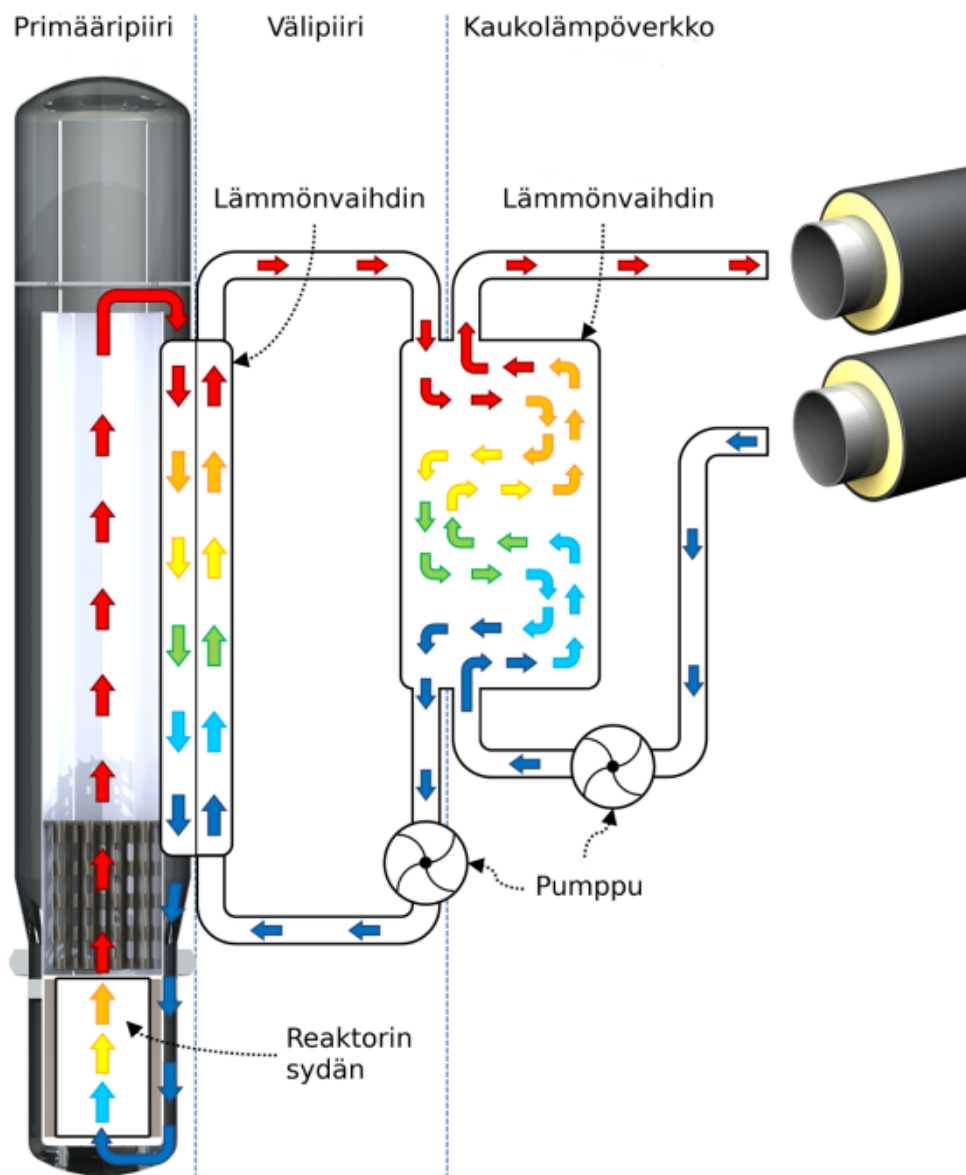
VTT:n reaktorimallissa pienreaktori rakennettaisiin pienen koulun kokoiseen rakennuksen ”kellariin”. Maan alla sijaitisi vesiallas, jolla varmistettaisiin pienreaktorin jäähdytys sekä estettäisiin ydinpolttoaineen pääsy kaukolämpöverkkoon kaikissa olosuhteissa. Tämän lisäksi reaktori olisi hyvin suojassa esimerkiksi lentokoneen törmäykseltä, ilmahyökkäykseltä sekä multa mahdollisilta ulkopuolisilta uhkilta. Ilmahyökkäykseltä pystyy myös suojautua rakentamalla suojavalleja sekä alueelle muita rakennuksia suojaksi. Voimalaitoksella olisi kameravalvonta sekä vartioita mahdollisesti rakennuksen ulkopuolella. (Niemi, 2022).

5.2 Reaktorin toimintaperiaate

Kaukolämpöverkkoon kuuma vesi lähtee 100–120 C° asteisena, joten reaktorin käyttölämpötila on alhaisempi kuin perinteisen sähköä tuottavan ydinvoimalaitoksen. Samalla myös reaktorin käyttöpaine on alhaisempi. VTT:n reaktorin paine on korkeimmillaan alle kymmenesosa Olkiluodon EPR-reaktorin (155 bar) paineesta. Reaktorin paineastioiden seinämäpaksuudessa huomaa matalamman käyttöpaineen (Leppänen, 2023.)

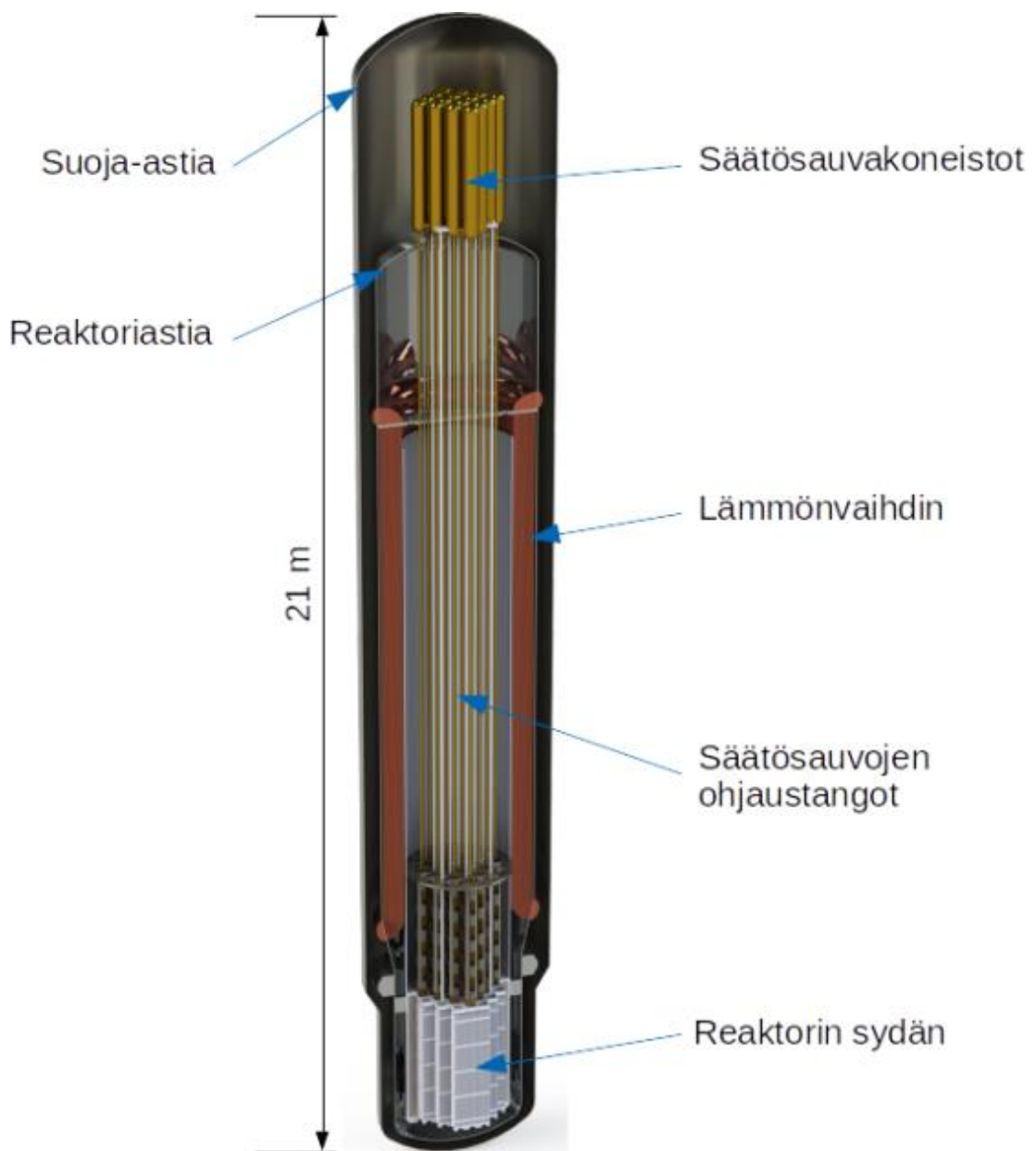
Kaukolämpöverkon tehoa ja lämpötilaa pystytään säätämään tarpeen mukaisesti. Tällöin reaktori yhdistyy kaukolämpöverkkoon, välipiirin ja kahden lämmönvaihtimen välityksellä. Tämä estää myös primääripierin veden pääsyn kaukolämpöverkkoon lämmönvaihtimen vuotaessa. Reaktori sekä välipiiri toimivat myös kaukolämpöverkkoa matalammassa paineessa. Lämpötilan kohottaminen veden kiehumispisteen yläpuolelle vaatii jäähdytyskierron paineistamisen. Reaktorin toimintalämpötila on korkeampi kuin kaukolämpöverkon syöttöveden lämpötila, sillä energian siirtyminen piiristä toiseen edellyttää lämpötilaeron. (Leppänen, 2021.)

Kuvassa seitsemän havainnoidaan VTT:n reaktorin toimintaperiaatetta. Kaukolämpöreaktorin sydämessä lämpenee vesi. Lämpötilan kasvaessa veden tiheys pienenee, jonka seurauksena virtaus suuntautuu ylöspäin nostevoimana. Virtaus kääntyy reaktorin yläosassa, josta lämmin vesi ohjautuu astian ulko-reunoja kiertäviin lämmönvaihtimiin. Lämpö siirtyy sieltä välipiiriin, jolloin veden tiheys kasvaa ja jäähtynyt vesi laskeutuu reaktoriastian pohjalle. Astian pohjalta vesi ohjataan takaisin reaktorisydämeen. Reaktoriastian on oltava riittävän korkea ja kapea, jotta luonnonkierto toteutuu. (Leppänen, 2021.)



Kuva 7. LDR-50 kaukolämpöreaktorin toimintaperiaate. (Leppänen, 2021.)

Kuvasta kahdeksan näkee reaktori moduulin halkileikkauksen. Reaktori moduuli on upotettu vesialtaaseen sekä reaktoriastia on suljettu isomman teräksisen suoja-astian sisälle. Suoja-astia vastaanottaa reaktorista purkautuvan höyryn aiheuttaman painekuorman onnettomuustilanteessa. Sydänvaurion sattuessa suoja-astia estää myös radioaktiivisen päästön ympäristöön eli toimii syvyysuuntaisen puolustuksen uloimpana vapautumisesteenä. Yhden reaktorimoduulin koko vastaa suurin piirtein linja-auton kokoa. (Leppänen, 2021.)



Kuva 8. Lämpileikkaus reaktorista. (Leppänen, 2021.)

5.3 Polttoaine

Polttoaineena toimii matalasti väkevöity uraanioksidi, joka on saman tyyppinen kuin Olkiluoto 3 polttoaine. Havainnekuvassa yhdeksän näkyy uraanipolttoaine polttoainesauvojen sisällä. Yhdessä polttoainenipussa on polttoainesauvoja 264 kappaletta. Polttoainenippuja on reaktorissa 37 kappaletta. Reaktorin aktiivisen osan eli sydämen muodostaa ladatut polttoaineniput. Polttoainenippujen pituus on noin reilu metri. (Leppänen, 2023.)



Kuva 9. Uraanioksidi on pientä pellettiä, joka on suljettu metallikuoristen kaasutiiviiden polttoainesauvojen sisälle.



Kuva 10. Havainnekuvassa näkyy yksittäinen polttoainenippu, jonka vierestä löytyy jakkara antamaan käsitystä mittakaavasta.

5.4 LDR-50 projektin edistyminen

Uusien teknologioiden suunnitteluhankkeet, jotka kestävät pitkään voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen: konseptisuunnittelu, perussuunnittelu ja toteutus-suunnittelu. Hanketta lähdetään kehittämään vaihe kerrallaan eteenpäin ja kehityksen myötä työ laajenee ja suunnitelmat tarkentuvat. Ydinenergiahankkeissa merkittävä vaihe on luvitus, joka on teknisen suunnittelun tyyliin monivaiheinen sekä runsaasti aikaa vievä prosessi. (Leppänen, 2023.)

Ensimmäinen vaihe VTT:n kaukolämpöreaktori projektissa käynnistyi 2020 keväällä. Tavoitteena on suunnitella Suomen kaukolämpöverkkoihin räätälöity pienreaktori, joka toimisi tehokkaasti suurempien kaupunkien lisäksi pienemmillä paikkakunnilla. (Leppänen, 2023.)

Heti hankkeen alussa haluttiin asettaa tavoitteeksi teknologian yksinkertaisuus ja tunnetun tekniikan käyttäminen, jotta saadaan minimoitua teknologiariskit. Haluttiin myös sovittaa pienreaktorin ydinjätteen loppusijoitus yhteensopivaksi

suomalaisen loppusijoitusratkaisun kanssa. Suunnittelua on helpottanut reaktorin vaatimattomat toimintaolosuhteet. (Leppänen, 2023.)

Kaukolämpöreaktorin peruskonsepti syntyi konseptisuunnitteluvaiheessa, jossa konsepti todettiin turvalliseksi ja toimivaksi laskennallisin analyysien. Konseptisuunnitteluvaiheen edetessä jatkokehityksestä käytiin keskusteluja erilaisin sidosryhmin, kuten ydinenergia-alan toimijoiden, lämpöenergian loppukäyttäjien sekä valmistavan teollisuuden yritysten kanssa. (Leppänen, 2023.)

VTT teki vuoden 2023 alussa päätöksen investoida viisi miljoonaa euroa vuosina 2023–2024 kaukolämpöreaktori LDR-50 hankkeeseen. Lisäinvestointi antaa mahdollisuuden moninkertaistaa kehitykseen suunnattuja resursseja. Kuitenkaan valmista pienreaktoria ei sillä rahalla saa. Tällä hetkellä työtä laajennetaan VTT:n ulkopuolelle, jonka myötä suunnittelutiimi kasvaa reilusti kokoa. (Leppänen, 2023.)

Seuraavaksi LDR-50 projekti etenee konseptitasolta perussuunnitteluvaiheeseen. Suunnittelun edetessä pienreaktorin kehitys laajenee reaktorin ja siihen kytkeytyneiden järjestelmien ulkopuolelle. Laajennus koskisi esimerkiksi kaukolämpölaitoksen rakennesuunnittelua sekä reaktorin päivittäistä käyttöä ja määräaikaishuoltoja sekä apujärjestelmiä. Luvitusprosessi käynnistettäisiin kaksivuotisen hankkeen jälkeen, jolloin suunnitteluaineisto alkaa olemaan sisällöllisesti tarpeeksi kattava. Termohydraulisia kokeita suunnitellaan ja valmistellaan hankkeen aikana laskennallisten analyysien tueksi. (Leppänen, 2023.)

Suunnittelutyöstä valtava osa tullaan tekemään ulkopuolisten kumppanien kanssa yhdessä. Tarkoituksena on muodostaa itsenäinen kehitysyritys tästä yhteenliittymästä. Vastuu pienreaktoriteknologiasta siirtyisi viimeistään toteutussuunnittelun vaiheessa, joka on kehityskaaren viimeinen vaihe. Tekninen suunnittelu ja luvitusprosessi kuitenkin kestäisivät tämän jälkeen vielä vuosia. Arvioilta ensimmäinen demonstraatiokaukolämpölaitos valmistuisi

vuosikymmen vaihteessa, jonka jälkeen valmistellaan teknologia kaupalliseen sarjatuotantoon. (Leppänen, 2023.)

6 LUT:IN KAUKOLÄMPÖREAKTORIT

6.1 LUTHER reaktori

LUTHER-konseptissa on suunniteltu kolme eri reaktori kokoa, tutkimuskäyttöön suunniteltu 2 MW, sekä markkinoille tarkoitetut 24 MW ja 120 MW. (Truong, Suikkanen, Hyvärinen, 2021). LUTHER nimi muodostuu sanoista LUT Heat Experimental Reactor. Kaukolämpöreaktori on kevytvesijäähdytteinen paineputkireaktori. Syksyllä 2018 alkoi LUTHER reaktorin kehitystyö. (Suomen atomitekninen seura, 2021.)

Suunnitelmien mukaan reaktorimoduulit lämmönvaihtimeen sijoittuisivat kokonaan maan alle, jolla pystytään suojaamaan reaktoria ulkoisilta uhkilta kuten lentokonetörmäykseltä. Tämän lisäksi maan alle sijoittaminen toimisi fyysisenä esteenä mahdollisille säteilypäästöille sekä toimisi passiivisena lämpökaivona jälkilämmön poistoa varten. (Suomen atomitekninen seura, 2021.)

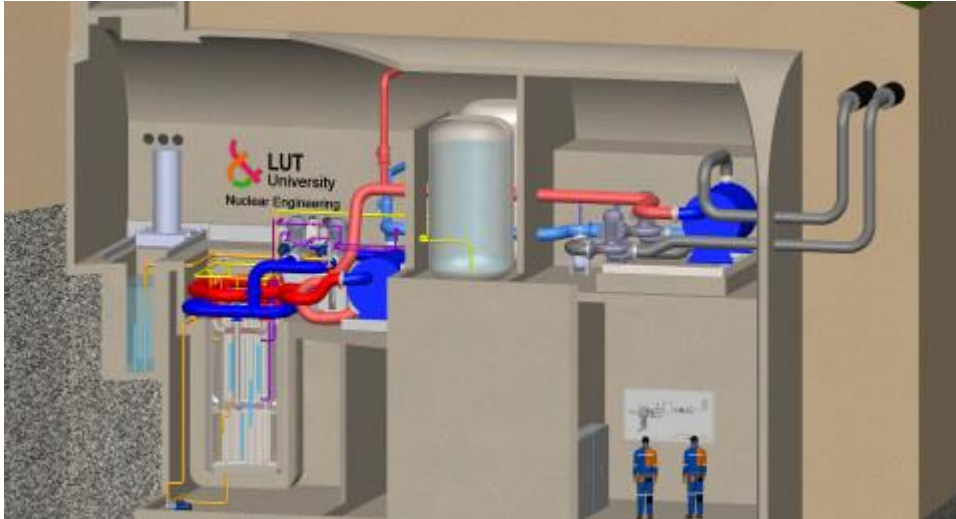
Polttoaineena käytettäisiin tyypillistä matalaväkevöityä uraanioksidia. Perinteisestä ydinvoimalasta poiketen polttoaineen aktiivinen pituus on lyhyempi. Kuu-sikulmion muotisessa reaktorisydämessä sijaitsisi polttoaineniput omissa paineputkissa. Liikuteltavien polttoainenippujen avulla voidaan säätää kaukolämpöreaktorin reaktiivisuutta, jolloin erillisiä säätösauvoja tai booria ei tarvitse. Jäähdyte ja moderaattori on eristetty toisistaan hydraulisesti jäähdytteen virratessa paineputkien sisällä. (Suomen atomitekninen seura, 2021.) Kevytvesireaktoreissa käytetään vettä moderaattorina, joka samalla jäähdyttää polttoainetta virratessaan läpi reaktorisydämen. Väliaine, jossa tapahtuu neutronien hidastuminen fission kannalta edulliselle energia-alueelle, kutsutaan moderaattoriksi. (Leppänen, 2019.)



Kuva 11. Kuvassa havainnollistaa uraanipolttoainetta ja sen rakennetta.

Kaukolämpöverkko yhdistyy reaktoriin lämmönvaihtimien avulla välipiirin kautta primääripiiriin. Reaktorilta kaukolämpöverkkoon lähtevä kuuma vesi on lämpötilaltaan noin 95 °C. Lämmönkierto toimii normaalikäytön aikana pumpeilla ja häiriötilanteessa lämmönkierto perustuu passiivisiin ratkaisuihin. Häiriön aikana vesi kuumenee paineputkissa sekä jäähdyte alkaa kiehumään. Muodostunut höyry tiivistyy suojarakennuksen seinille, josta lämpö siirtyy ympäristöön. Suuren lämmönsiirtopinta-alan takaa paineputkiratkaisu, joka parantaa turvallisuutta. (Suomen atomitekninen seura, 2021.)

Materiaalikustannuksia vähentää reaktorin alhainen paine sekä tarpeettomien säätösauvojen ja boorin puute. Kaukolämpöreaktoria käytetään peruskuorman lämmönlähteenä yhdeksän kuukautta vuodessa, mikä takaa LUTHER-konseptille kilpailukyvyn kaukolämpömarkkinoilla. Tavoitteena on pitää LUTHER-reaktorin investointikustannukset alle 2000 €/kW sekä käyttökustannukset alle 5,3 €/MWh. (Suomen atomitekninen seura, 2021.)



Kuva 12. LUTHER reaktorin läpileikkaus. (LUT-yliopisto, 2022b.)

6.2 Ultra Safe Nuclear Corporation MMR reaktori

Yhdysvaltalainen yritys USNC eli Ultra Safe Nuclear Corporation sekä LUT-yliopisto suunnittelevat Lappeenrantaan mikroreaktoria eli MMR tutkimus-, koulutus- ja demonstraatiokäyttöön. Reaktori on tyypiltään kaasujäähdytteinen ja se pystyy tuottamaan yli 500°C asteista prosessilämpöä. Korkean lämpötilan ansiosta reaktori soveltuu myös lämmön ja sähkön yhteistuotantoon. Tarkoituksena olisi myös yhdistää reaktori Lappeenrannan kaukolämpöverkoon. (LUT-yliopisto, 2022a.) Reaktori on lämmitysteholtaan 15–30 MW (Pelto-Timperi, 2023).



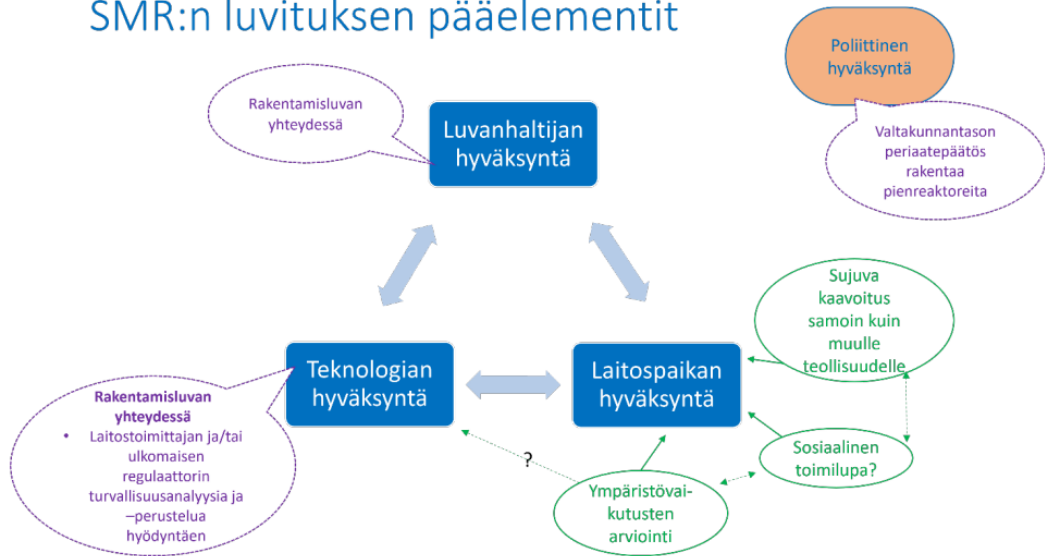
Kuva 13. Tutkimusreaktorin läpileikkaus. (LUT-yliopisto, 2022a.)

7 KEHITYSNÄKYMÄT TULEVAISUUDESSA

Tulevaisuudessa on tärkeää, että yhteiskunta pystyy tuottamaan energiaa luotettavasti, kestävästi sekä ympäristöystävällisesti. Pienreaktoreilla on hyvät tulevaisuuden näkymät ja valtava potentiaali olla osa luotettavaa energiajärjestelmää sekä turvata luonnon monimuotoisuutta. Lisäksi pienreaktoreilla pystytään tuottamaan energiaa kilpailukykyisesti. Kehitettävää riittää kuitenkin lainsäädännössä ja luvitusprosesseissa, jotta saadaan hyödynnettyä tehokkaasti pienreaktoriteknologiaa. Pienreaktoriteknologialla voidaan mahdollistaa parempi omavaraisuus Suomessa sekä vähentää ulkomailta tuotavien fossiilisten polttoaineiden määrää. Tämä parantaisi Suomen kauppasetta merkittävästi. Kiireellisin lakimuutos nykyiseen lainsäädäntöön olisi mahdollistaa periaatepäätöksen hakeminen pienreaktorihankkeille. (Energiateollisuus, 2021.)

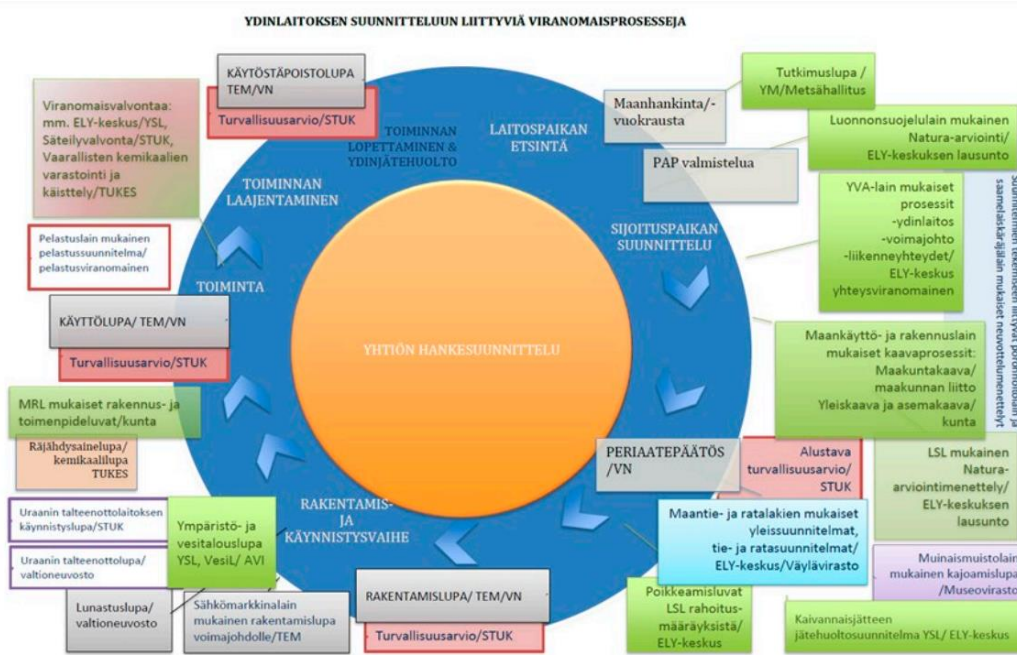
Pienreaktorit eroavat perinteisistä ydinlaitoksista monelta osin, joten kohtuullista olisi nopeuttaa ja keventää pienreaktoreita koskevaa luvitusprosessia. Eri-tyisen tärkeää onkin, että riittävä poliittinen käsittely ja päätökset tehtäisiin varhaisessa vaiheessa, jotta hankkeet olisivat kannattavia. Haluttaisiin, että periaatepäätös ei olisi hanke- tai hakijakohtainen vaan enemmänkin kansallinen periaatepäätösprosessi, joka mahdollistaisi pienreaktorihankkeiden käynnistämisen Suomessa. (Energiateollisuus, 2021.)

SMR:n luvituksen pääelementit



Kuva 14. Kuvassa näkyy SMR:n luvituksen päävaiheet. (Energiateollisuus, 2021.)

LUT-yliopisto on laatinut valtioneuvostolle selvityksen pienreaktoreista, ja niiden mahdollisuuksista Suomessa. Seuraavassa kuvassa näkyy pienydinlaitoksen suunniteluun liittyvät viranomaisprosessit. Kehittämällä ydinenergiala- kien sekä ydinalan luvitus- ja valvontakäytäntöjä saataisiin hyödynnettyä SMR- teknologian tuomat mahdollisuudet rakentamisessa, käytön turvallisuudessa sekä taloudessa. Yhteiskunnan kannalta olisi merkityksellisempää hyväksyä pienreaktoreista koostuva laitoskokonaisuus, kun taas yhden reaktorin lupaprosessin käynnistäminen erillisellä periaatepäätöksellä. Tavoitteena olisi saada lakiesitys eduskuntaan, jonka valmistelisi työ- ja elinkeinoministeriö. Parhaimmillaan lakiuudistus tulisi voimaan uuden hallituskauden aikana, arvioltaan 2027. (Valtioneuvosto, 2022.)



Kuva 15. Viranomaisprosesseja, jotka liittyvät ydinvoimalaitoksen suunnitteluun. (Hujala, Hyvärinen, Rintamaa, Suikkanen, Vihavainen, Wähä, 2022.)

Kehitettävää on jäljellä pienreaktorien käytön, turvallisuuden sekä luvituksen liittyvissä kysymyksissä, jotka vaativat tarkasteluja. Luvanhaltijalla tulee olemaan vastuu turvallisuudesta. Monesti luvanhaltija omistaa ydinlaitoksen, mutta mahdollisia ovat myös muunlaiset järjestelyt. Markkinoille on tulossa uudentyyppisiä ydinvoimalaitoksia seuraavan vuosikymmenen aikana. Tärkeintä on luoda kestävät edellytykset viranomaisten, energiayhtiöiden, tiedeyhteisön ja päättäjien kesken pienreaktoreille. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)



Kuva 16. Kehitettävät elementit tulevaisuudessa liittyen pienreaktoreihin. (Ahonen, Heinonen, Lahtinen & Tuomainen, 2020.)

8 YHTEENVETO

Pienreaktorit ovat lupaavaa tekniikkaa energiasektorilla. SMR-tekniikan tuomat mahdollisuudet ovat huimat niin Suomessa kuin muualla maailmassa. Tällä hetkellä maailmalla ja erityisesti Suomessa on puututtu energian tuotannon päästöihin ja asiaan kehitetään koko ajan uusia innovaatioita ja ratkaisuja. SMR-tekniikka on kilpailukykyinen sarjatuotannon avulla. Pienreaktorit ovat turvallisempia verrattuna perinteisiin ydinvoimaloihin. Turvallisuuteen vaikuttaa reaktorin pienempi koko, polttoaineen määrä sekä passiivinen turvallisuus. Kaukolämmön tuotantoon suunnatut pienreaktorit ovat myös lämpötilaltaan alhaisempia, jonka vuoksi käyttöpaine on myös pienempi.

Tulevaisuuden kannalta tärkeää olisi kehittää pienreaktorien luvitusta ja lainsäädäntöä. Nopeaa toimintaa tarvitaan luvituksen uudistamisessa, jotta pienreaktoritekniikka olisi mahdollisimman tehokasta ja kannattavaa. Nopeat uudistukset lainsäädännössä tukisivat myös ympäristöä ja mahdollistaisi fossiilisten polttoaineiden käytön lopettamisen tai vähentämisen. Suomessa SMR-tekniikka, erityisesti kaukolämmön tuotannon suunnitellut pienreaktorit ovat mahdollisuus myös kotimaiselle teollisuudelle. VTT:n reaktorin osia pystyttäisiin valmistamaan Suomessa luukuun ottamatta polttoainetta ja muita ydinteknisiä komponentteja.

LÄHTEET

Ahonen, E., Heinonen, J., Lahtinen, N. & Tuomainen, M. (30.01.2020). Edellytykset pienreaktorin turvalliselle käytölle – lupajärjestelmän ja valvonnan kehitysnäkymiä. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-309-451-2>

Arnold, M., Hyvärinen, J., Leppänen, J., Soppela, O. & Tulkki, V. (21.12.2022). Ydinkaukolämpöselvitys. VTT:n Tutkimusraportti. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/2023-01/VTT-CR-01059-22.pdf>

Energiateollisuus. (28.09.2021). Pienreaktorit (SMR) saatava pian osaksi uutta energijärjestelmää. Positiopaperi 2021. https://energia.fi/files/6320/ET_SMR-positiopaperi_092021.pdf

Fortum.fi. (2023). Pienreaktorit - ydinvoiman uusi joustava sukupolvi. Haettu 22.3.2023. <https://www.fortum.fi/ydinvoima/pienreaktorit?vtab=accordion-item-93663>

Hujala, E., Hyvärinen, J., Rintamaa, R., Suikkanen, H., Vihavainen, J. & Wähä, S. (2022). Uusien ydinenergiateknologioiden mahdollisuudet ja kehitystarpeet. Pienet modulaariset sarjavalmisteiset ydinreaktorit eli SMR:t. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-189-6>

Leppänen, K. J. (08.06.2018). Missä viipty nopea hyötöreaktori? Fissioreaktori. <https://fissioreaktori.wordpress.com/2018/07/08/missa-viipy-nopea-hyotoreaktori/>

Leppänen, K. J. (14.3.2021). Suomalainen kaukolämpöreaktori – osa 3. Fissioreaktori. <https://fissioreaktori.wordpress.com/2021/03/14/suomalainen-kaukolamporeaktori-osa-3/>

Leppänen, K. J. (19.11.2019). Korkean lämpötilan ydinreaktorit. *Fissioreaktori*. <https://fissioreaktori.wordpress.com/2019/11/19/korkean-lampotilan-ydinreaktorit/>

Leppänen, K. J. (24.01.2023). Suomalainen kaukolämpöreaktori – osa 4. *Fissioreaktori*. <https://fissioreaktori.wordpress.com/2023/01/24/suomalainen-kaukolamporeaktori-osa-4/>

Lindholm, P. (31.10.2022). Pienydinvoimalat ovat todellisuutta jo muutaman vuoden päästä – selvitimme, millaisiin paikkoihin niitä voitaisiin Suomessa sijoittaa. Yle Uutiset. Haettu 23.3.2023. <https://yle.fi/a/3-12664757>

Liou, J. (4.11.2021). What are small modular reactors (SMR). Haettu 21.3.2023. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>

LUT-yliopisto. (15.12.2022a). Lappeenrantaan suunnitellaan pienydinvoimaa. Viitattu 22.3.2023. [https://www.lut.fi/fi/uutiset/lappeenrantaan-suunnitel-
laan-pienydinvoimalaa](https://www.lut.fi/fi/uutiset/lappeenrantaan-suunnitel-
laan-pienydinvoimalaa)

LUT-yliopisto. (23.11.2022b). Modulaarisia pieniä kaukolämpöreaktoreita (SMR) käytetään Suomessa 2020-luvulla. [https://www.lut.fi/fi/artikkelit/modu-
laarisia-pienia-kaukolamporeaktoreita-smr-kaytetaan-suomessa-2020-luvulla](https://www.lut.fi/fi/artikkelit/modu-
laarisia-pienia-kaukolamporeaktoreita-smr-kaytetaan-suomessa-2020-luvulla)

Niemelä, M. (3.11.2022). Kuin pieni koulu, jonka kellarissa on ydinreaktori – tältä näyttäisi kotimainen pienydinvoimala. *Suomenkuvalehti.fi*. [https://suo-
menkuvalehti.fi/tiede-ja-teknologia/kuin-pieni-koulu-jonka-kellarissa-on-ydin-
reaktori-talta-nayttaisi-kotimainen-pienydinvoimala/](https://suo-
menkuvalehti.fi/tiede-ja-teknologia/kuin-pieni-koulu-jonka-kellarissa-on-ydin-
reaktori-talta-nayttaisi-kotimainen-pienydinvoimala/)

Pelto-Timper, J. (07.02.2023). Pieni ydinvoimala monipuolistaa kaukoläm-
möntuotantoa. *Turku Energia*. [https://www.turkuenergia.fi/valopilkku/vastuulli-
suus/pieni-ydinvoimala-monipuolistaa-kaukolammontuotantoa/](https://www.turkuenergia.fi/valopilkku/vastuulli-
suus/pieni-ydinvoimala-monipuolistaa-kaukolammontuotantoa/)

Rantakaulio, A. (25.11.2022). Pienreaktorit ovat ydinvoiman tulevaisuutta. Ha-
ettu 21.3.2023. [https://www.fortum.fi/tietoa-meista/forthedoers-blogi/pienreak-
torit-ovat-ydinvoiman-tulevaisuutta](https://www.fortum.fi/tietoa-meista/forthedoers-blogi/pienreak-
torit-ovat-ydinvoiman-tulevaisuutta)

Sallinen, P. (04.02.2022). Pienreaktori leikkaa päästöjä. [https://www.energia-
uutiset.fi/kategoriat/tuotanto/pienreaktoreista-pelastus.html](https://www.energia-
uutiset.fi/kategoriat/tuotanto/pienreaktoreista-pelastus.html)

STUK. (26.11.2021). Ydinvoimalaitokset - Pienreaktorit. Haettu 21.3.2023. <https://www.stuk.fi/aiheet/ydinvoimalaitokset/pienreaktorit>

Suomen atomiteknillinen seura. (03/2021). ATS Ydintekniikka. Vol 50. https://www.ats-fns.fi/images/files/ydintekniikka/atsyt_2021_3.pdf

Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy. (08.12.2021). Kohti puhdasta kauko-
lämpöä: Merkittävä patentti VTT:n kehittämälle pienydinreaktorin jäähdytysrat-
kaisulle. Uutiset, Lehdistötiedote. [https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-ta-
rinat/kohti-puhdasta-kaukolampoa-merkittava-patentti-vtn-kehittamalle](https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-ta-
rinat/kohti-puhdasta-kaukolampoa-merkittava-patentti-vtn-kehittamalle)

Terrestrial Energy. (17.05.2023a). Terrestrial Energy awarded DOE grant for
IMSR licensing. [https://www.ans.org/news/article-5012/terrestrial-energy-
awarded-doe-grant-for-imsr-licensing/](https://www.ans.org/news/article-5012/terrestrial-energy-
awarded-doe-grant-for-imsr-licensing/)

Terrestrial Energy. (15.06.2023b). How Do Molten Salt Reactors Work? In-
side IMSR Technology. [https://www.terrestrialenergy.com/technology/molten-
salt-reactor/](https://www.terrestrialenergy.com/technology/molten-
salt-reactor/)

Truong, T., Suikkanen, H., & Hyvärinen, J. (2021). Reactor Core Conceptual
Design for a Scalable Heating Experimental Reactor, LUTHER. *Journal of
Nuclear Engineering*, 2(2), 207–214. doi:10.3390/jne2020019

Valtioneuvosto. (30.05.2022). Selvitys: Pieniä modulaarisia reaktoreita voisi
rakentaa Suomessa vaikka heti, mutta ydinenergialakia ja käytäntöjä syytä
päivittää. <https://valtioneuvosto.fi/-/10616/selvitys-pienia-modulaarisia->

[reaktoreita-voisi-rakentaa-suomessa-vaikka-heti-mutta-ydinenergialakia-ja-kaytantoja-syyta-paivittaa](#)

World Nuclear News. (09.12.2022). China's demonstration HTR-PM reaches full power: New Nuclear—World Nuclear News. <https://world-nuclear-news.org/Articles/China-s-demonstration-HTR-PM-reaches-full-power>