

Amanda Tauru

MODULAARISTEN PIENYDINREAKTO- REIDEN (SMR) ASEMA SUOMESSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Aleksi Sivonen
4/2023

TIIVISTELMÄ

Amanda Tauru: Modulaaristen pienydinreaktoreiden (SMR) asema Suomessa
The role of small modular reactors (SMR) in Finland
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
4/2023

Modulaariset pienydinreaktorit (small modular reactors, SMR) ovat alle 300 MW teholuokan ydinvoimaloita. Tässä työssä tarkastellaan SMR:ien asemaa Suomessa eri näkökulmista. Työssä pohditaan, mitä mahdollisuuksia ja haasteita SMR-teknologioissa on, mitkä ovat niiden kehittymisen edellytykset Suomessa sekä minkälainen rooli niillä on Suomen energiataloudessa. Ydinvoimaan liittyvässä lainsäädännössä on vielä kehitettävää, jotta SMR:iä voitaisiin ottaa osaksi Suomen energijärjestelmää. Työssä on tarkoitus kartoittaa, mitä vaatii, että SMR:iä aletaan rakentamaan Suomeen.

SMR:ien mahdollisuudet perustuvat niiden hiilidioksidipäästöttömyyteen, mikä tekee niistä yhden keinon ilmastomuutoksen hillitsemiseksi. Niiden hiilijalanjälki on myös monia muita energiantuotantotapoja, kuten vesi- tai tuulivoimaa, pienempi. SMR:iä on kehitetty eri puolilla maailmaa, ja niitä voidaan jakaa eri luokkiin niiden ominaisuuksien perusteella. Tässä työssä esitellään Modulaarinen mikroreaktori (MMR), NuScale ja LDR-50, sillä niillä on ominaisuuksia, jotka voisivat sopia Suomen tarpeeseen.

Lämmöntuotanto aiheuttaa vielä toistaiseksi paljon hiilidioksidipäästöjä, joiden vähentämiseksi SMR:iä on mietitty osaksi kaukolämmöntuotantoa. Suuret teollisuuden yritykset taas pitävät niitä mahdollisuutena vähentää hiilidioksidipäästöjä, sillä niillä on mahdollista toteuttaa tehtaiden vaatimat korkeat lämpötilat. Taloudellisesta näkökulmasta SMR:t vaikuttavat lupaavilta. Tutkimuksessa on havaittu, että kaukolämpöä tuottavien SMR:ien kustannusjakauma on pienempi verrattuna esimerkiksi lämpöpumpun tai pellettikäyttöiseen lämpölaitokseen.

Työssä selvisi, että yksi keskeinen ongelma SMR:ien käyttöönotossa Suomeen on lainsäädäntö sijaintiin liittyen. Niiden tulisi sijaita mahdollisimman lähellä käyttäjiä, jotta energiantuotanto on kannattavaa. Tällä hetkellä voimassa oleva ydinenergialaki on tehty kaukana asutuksesta sijaitseville suurille yli 1500 MW tehoisille ydinvoimaloille, ja hätätilannealueeksi on määritetty 25 kilometriä reaktorista. SMR:illä on pienempi ydin, mikä mahdollistaa hätätilannealueen tarkastelun reaktorikoon mukaan. Monet tahot toivovatkin teholuokkaan perustuvaa hätätilannealuetta lainsäädäntöön.

SMR:iin liittyen on käynnissä useita hankkeita, joiden tarkoitus on edistää niiden käyttöönottoa. Tässä työssä esitellään ELSMOR- ja EcoSMR-hanke, sillä ne liittyvät Suomeen. Hankkeiden tulosten perusteella SMR:ien kehitys vaatii taloudellisen tuen, muutoksia lainsäädäntöön sekä etenemissuunnitelman, jossa eri sidosryhmät yhdistettäisiin.

Avainsanat: SMR, modulaarinen pienydinreaktori, ydinvoima, kaukolämpö, hiilidioksidipäästöt

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty keväällä 2023. Aiheena ydinvoima oli itselleni suhteellisen uusi, ja oli kiinnostavaa saada tietää siitä lisää. Haluaisin kiittää ystäviäni, perhettäni sekä kandiohjaajaani tuesta ja avusta kandidaatintyön edetessä.

Tampereella, 25.4.2023

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SMR:N KEHITYSPOLKU SUOMESSA	3
2.1 Ydinvoima Suomessa	3
2.2 Kaukolämmön tuotanto	4
2.3 Hankkeet.....	6
2.3.1 ELSMOR	6
2.3.2 EcoSMR	7
3. SMR-TEKNOLOGIA.....	8
3.1 Modulaarinen mikroreaktori.....	8
3.2 NuScale	9
3.3 LDR-50	11
4. SMR OSANA YHTEISKUNTAA	13
4.1 SMR:n rooli Suomen energiapolitiikassa	13
4.2 Sijainti	14
4.3 Hiilijalanjälki	15
4.4 SMR osana energiajärjestelmää	17
4.5 Taloudelliset näkymät	20
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	23
LÄHTEET	25

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ELSMOR	Towards European Licensing of Small Modular Reactors
EPZ	Emergency planning zone
IEA	International Energy Agency
IEAE	International Atomic Energy Agency
MW(e)	Megawatti (sähköinen teho)
MW(th)	Megawatti (lämpöteho)
PAZ	Precautionary action zone
SMR	Small modular reactor
STUK	Säteilyturvakeskus
UPZ	Urgent protective action planning zone
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen takia fossiilisten polttoaineiden käyttöä on vähennettävä huomattavasti. Ilmaston lämpenemisellä on vakavia seuraamuksia, joita pyritään minimoimaan siirtymällä vähäpäästöisempiin energiantuotantomuotoihin. Suomen tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä ja hiilinegatiivinen vuoteen 2050 mennessä (Ympäristöministeriö, 2022). Suomessa vuonna 2021 Venäjältä tuodun energian osuus oli 34 %. Venäjä lopetti vuoden 2022 keväällä energian tuonnin Eurooppaan, jolloin energiakriisi kärjistyi entisestään. (Tilastokeskus, 2022) Energian puute tarkoittaa Suomen ja koko Euroopan kannalta sitä, että investointeja uusien energiantuotantomuotojen kar-toittamiseen on alettu tekemään entistä nopeammalla aikataululla.

Ydinvoima on tärkeä osa Suomen sähköntuotantoa, sillä kolmasosa Suomessa tuotetusta sähköstä tuotetaan ydinvoimalla (Hujala et al., 2022). Uusiutuvien energiantuotantomuotojen sääriippuvuuden takia ydinvoimalla on tärkeä asema sektori-integraatiossa vakaana sähköntuotantomuotona. Ydinvoimalla tuotettu energia on vähäpäästöistä ja luotettavaa. Ydinvoimalla voi myös tuottaa kaukolämpöä, joka on Suomen yleisin läm-mitysmuoto (Motiva, 2022). Perinteisten ydinvoimaloiden lisäksi kehitteillä on pienem-män teholuokan modulaarisia pienydinreaktoreita.

Modulaarisella pienydinreaktorilla tarkoitetaan alle 300 MW tehoista ydinvoimalaa (Hu-jala et al., 2022). Erilaisia teknologioita on suunnitteilla paljon, ja niiden monipuolisuus tarjoaa paljon mahdollisuuksia osaksi energiantuotantojärjestelmää. Monimuotoisuus muodostuu käyttötarkoituksesta ja teholuokasta, sillä pieniä modulaarisia reaktoreita voi-daan käyttää kaukolämmön, sähkön, vedyn ja höyryn tuotantoon eri teholuokissa riip-puen reaktortyyppistä. Modulaarisuudella tarkoitetaan sitä, että laitokset koostuvat erili-sistä reaktorimoduuleista, joita voi laittaa sarjaan vastaamaan haluttua teholuokkaa. Mo-dulaarisuuden ja pienemmän teholuokan takia kyseessä on yksinkertaisempi teknologia verrattuna suuriin yli 1500 MW kokosiin ydinvoimaloihin. (IAEA, 2022)

Työssä tullaan käyttämään modulaarisista pienydinreaktoreista vakiintunutta lyhennettä SMR, joka tulee sanoista ”small modular reactor”. Työn tarkoituksena on pohtia, mitä mahdollisuuksia ja haasteita SMR-teknologioissa on, mitkä olisivat niiden kehittymisen edellytykset Suomessa sekä minkälainen rooli niillä on Suomen energiataloudessa. Suo-men lainsäädännössä on vielä kehitettävää, jotta SMR:iä voitaisiin ottaa osaksi Suomen

energijärjestelmää. Työssä on tarkoitus kartoittaa, mitä vaatii, että SMR:iä aletaan rakentamaan Suomeen.

Luvussa 2 tarkastellaan SMR:n kehityspolkua Suomessa, mihin sisältyy ydinvoiman sekä kaukolämmön tämänhetkisen tilanteen kartoitus. Myös kahden hankkeen, jotka liittyvät SMR:ien kehittämiseen Euroopassa ja Suomessa, tulokset esitellään. Luvussa 3 esitellään kolme eri SMR-teknologiaa, joissa on potentiaalia Suomen energiatarpeeseen. Teknologioista esitellään niiden rakenne, tekniikka yksinkertaistetusti sekä käyttömahdollisuudet. Luvussa 4 tarkastellaan SMR:n mahdollisuutta osana yhteiskuntaa. Rooli Suomen energiapolitiikassa, sijainnilliset asiat, mahdollinen rooli energijärjestelmässä, hiilijalanjälki sekä taloudelliset näkymät ovat tämän luvun keskeiset teemat. Tarkoituksena on kartoittaa, onko SMR mahdollinen osa Suomen yhteiskuntaa tarkastellen eri näkökulmia. Luvussa 5 kootaan johtopäätökset tutkimuskysymyksiin.

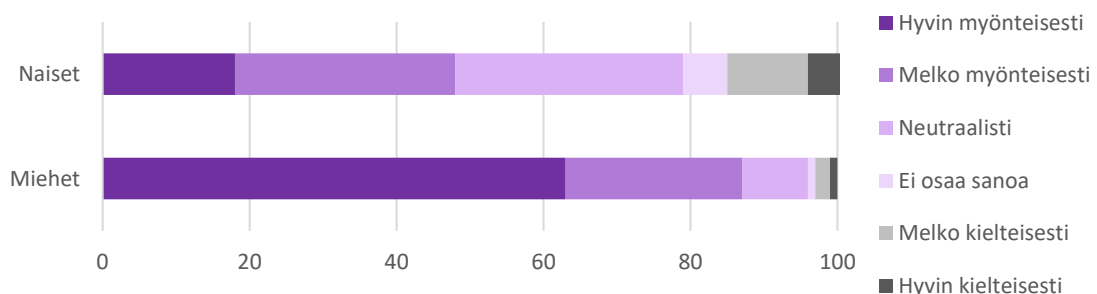
2. SMR:N KEHITYSPOLKU SUOMESSA

Suomessa tarvitaan uusia energiaratkaisuja, jotta energiantuotannosta saadaan mahdollisimman ympäristöystävällistä. SMR:t ovat herättäneet kiinnostusta, ja esimerkiksi Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy on osallistunut moniin hankkeisiin liittyen niiden kehittämiseen Suomessa ja Euroopassa. Suurin osa suunnitelluista SMR:istä on tarkoitettu sähköntuotantoon tai korkean lämpötilan teollisuusprosessien lämmönlähteeksi. (VTT, 2020) Suomessa ollaan kuitenkin kiinnostuneita erityisesti lämmöntuotannon hiilidioksidipäästöjen vähentämisestä, joten kaukolämpöä tuottaviin SMR:iin liittyvää tietoa on pyritty kehittämään eri hankkeilla ja prototyypeillä.

2.1 Ydinvoima Suomessa

Suomessa ydinvoima kattaa sähköntuotannosta noin kolmanneksen, ja Olkiluoto 3 valmistuttua osuus tulee kasvamaan entisestään. Loviisassa sijaitsevat Loviisa 1 ja Loviisa 2 laitostyöyksiköiden nettosähkötehot ovat 507 MW(e) laitosta kohden. Eurajoella sijaitsevat Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 laitostyöyksiköiden nettosähkötehot ovat taas 890 MW(e), eli ne kattavat suuremman osan sähköntuotannosta verrattuna Loviisan ydinvoimaloihin. Olkiluoto 3 laitoksen käyttöönotto on meneillään, ja sen on arvioitu tuottavan täydellä teholla 1600 MW(e), mikä on moninkertainen teholuokka verrattuna muihin Suomen ydinvoimaloihin. (STUK, 2022)

Ydinvoimalla on ollut rooli Suomen energiantuotannossa 1977 luvulta asti, ja sen käyttö on kasvanut siitä lähtien. Suuriin ydinvoimaloihin suomalaiset suhtautuvat myönteisesti, ja niiden kannatus on noussut 1980-luvulta lähtien. (EVA, 2022) Kuvassa 1 on esitetty suomalaisten suhtautuminen ydinvoimaan vuonna 2022.

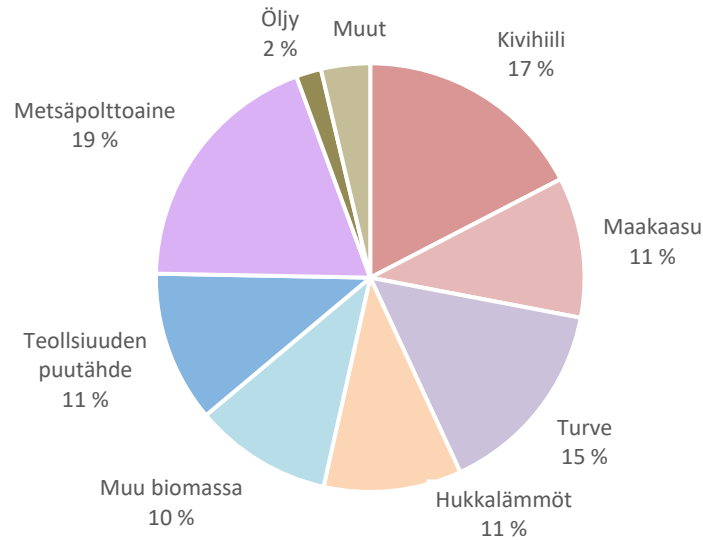


Kuva 1: Suomalaisten suhtautuminen ydinvoimaan 2022, perustuu lähteeseen (EVA, 2022)

Tutkimuksen on tehnyt Elinkeinoelämän valtuuskunta EVA, ja tulokset perustuvat 2088 henkilön antamiin vastauksiin, jolloin virhemarginaaliksi tulee 2–3 prosenttiyksikköä. Kuten kuvasta 1 nähdään, suomalaiset ovat pääosin ydinvoimamyönteisiä. Miehistä jopa 63 % suhtautuvat hyvin myönteisesti ja 24 % melko myönteisesti ydinvoimaan. Naisilla vastaava luvut ovat 18 % ja 30 %, mutta myönteisyys on ollut nousussa, ja ydinvoimaan kielteisesti suhtautuvia on toisaalta vain 16 %. Suurten ydinvoimaloiden vertaaminen SMR:ään väestön mielipiteen suhteen ei kuitenkaan ole täysin pätevää sijainnin vuoksi. SMR:än sijainti pitää lämpöhäviöiden vuoksi olla hyvin lähellä kaukolämpöverkkoa toisin kuin sähköä tuottavan suuren ydinvoimalan. Luvut ei välttämättä olisi samanlaiset, jos tutkimuksessa olisi kysytty, miten henkilö suhtautuu ydinvoimalaan aivan kaupungin tuntumassa.

2.2 Kaukolämmön tuotanto

Sähköntuotanto Suomessa koostuu 89 % ydin-, tuuli-, aurinko- ja vesivoimasta sekä biomassasta, minkä takia se on jo suhteellisen puhdasta. Lämmöntuotanto sen sijaan tuotetaan vielä suurimmaksi osaksi hiilidioksidipäästöjä aiheuttavilla energiantuotantomuodoilla. Erityisesti kylmän sään takia lämmöntarve on korkea, ja siihen halutaan ympäristöystävällisempiä ja vakaita tuotantotapoja. Kaukolämpö on Suomen yleisin lämmitysmuoto, ja sen osuus koko lämmöntuotannosta on noin 46 %. Kaukolämpö on sitä taloudellisempaa, mitä tiheämmin asuttu alue on, ja mitä lähempänä kaukolämmönlähde on. Kaukolämpöä tuotetaan lämmön- ja sähkön yhteistuotantolaitoksissa eli CHP-laitoksissa tai lämpökeskuksissa. CHP-laitokset toimivat hyvällä hyötysuhteella ja ovat tehokkain kaukolämmön tuotantomuoto, mutta tällä hetkellä yli kolmasosa tuotetaan polttamalla fossiilisia polttoaineita, kuten turvetta, maakaasua ja kivihiiltä. Kokonaisuudessaan toimitetun kaukolämmöntuotannon määrä on vuodessa 37–39 TWh (Hujala et al., 2022). Kuvassa 2 on esitetty kaukolämmön energialähteiden jakauma vuonna 2019.



Kuva 2: Kaukolämmön tuotannon energialähteet. Perustuu lähteeseen (Energiamaailma, 2023)

Kuten kuvasta 2 nähdään, kaukolämmöntuotannon haasteena on sen hiilidioksidipäästöt. Kivihiilen osuus on 17 %, ja sen käytön pitäisi loppua vuoteen 2029 mennessä. Venäjä lopetti vuoden 2022 keväällä maakaasun tuonnin Suomeen, ja tällä hetkellä sitä tulee Suomen ja Viron välisestä maakaasuputkesta sekä Inkoon nesteytetyn kaasun terminaalista. Maakaasu halutaan tulevaisuudessa korvata jollain muulla energiantuotantomuodolla sen poliittisen epävarmuuden sekä hiilidioksidipäästöjen takia. Kattavat maakaasuverkostot halutaan kuitenkin pyrkiä hyödyntämään käyttämällä vaihtoehtoista polttoainetta, kuten vetyä. (Gasum, 2023) Jotta kaukolämmön tuotannosta saadaan hiili-neutraali, vaatii se siis vielä paljon tekemistä ja uusia lämmöntuotantoratkaisuja. Yksi potentiaalinen kaukolämmönlähde on SMR, joka voisi kattaa koko yksittäisen kaupungin kaukolämmöntarpeen.

Myös perinteisten ydinvoimalaitosten kohdalla on tehty tarkastelua niiden mahdollisuuksista kaukolämmöntuotantoon. Erityisesti ydinvoimaloiden viiden gigawatin edestä veteen laskemien hukkalämpöjen hyödyntäminen on ollut tutkinnan alla monta kertaa. Tekniikka & Talous -uutislehden toimittaja haastatteli eri energiayhtiöitä sekä ydintekniikan professoria asiasta, ja kannattavuus osoittautui suurimmaksi tekijäksi siihen, miksi ydinvoimaloiden hukkalämpöjä ei hyödynnetä. Jäähdytysvesien käyttö lämpöpumppujen syöttönä on teknillisesti mahdollista, mutta ei energiataloudellisesti kannattavaa, sillä se vaatii huomattavia toimenpiteitä ydinvoimalaan. Loviisan ydinvoimaloiden hukkalämpöjen hyödyntäminen Helsingin kaukolämmöntarpeeseen on kaatunut kahdeksankymmenen kilometrin välimatkaan, jolloin lämmön kuljettaminen on taloudellisesti kannattamatonta. Myös Olkiluodon kohdalla ongelmana on sen kaukainen sijainti suurista kaupungeista. Pääkaupunkiseutu on myös ainoa kaukolämmön kuluttaja, jonka tarve vastaa

voimalaitosten hukkalämpöjen määrää. Muilla sijainnilla kaukolämmön kulutus on niin pientä, että ei ole järkevää ottaa gigawattien tasolla energiaa kaukolämpöverkkoon. Pelkästään lämmöntuotantoon tarkoitettussa SMR:ssä on paljon etuja verrattuna perinteiseen ydinvoimaan tai yhteistuotantoon. Esimerkkinä sähkön epävakaata ja usein matala hinta, jolloin SMR olisi taloudellisesti parempi vaihtoehto. (Tekniikka & Talous, 2020)

Kaukolämmön tarve vaihtelee suuresti riippuen vuodenaajoista. Esimerkiksi Helenin kaukolämpöverkossa menee kesäisin energiaa 250 MW teholla, ja talvella 1–2.5 GW teholla. (Tekniikka&Talous, 2020) Suuren vaihtelun vuoksi kaukolämmöntuotannon pitää olla joustavaa. Tämä on ollut yksi keskeinen ongelma SMR:n kohdalla, sillä se tuottaa tasaisesti energiaa samalla teholuokalla. SMR:n tulisi toimia osakuormalla, ja sen pitäisi olla kustannuskilpailukykyinen noin yhdeksän kuukauden vuosikäytöllä, jotta sen käyttäminen Suomessa kaukolämmöntuotantoon olisi kannattavaa (Suikkanen, 2022).

2.3 Hankkeet

Pienydinreaktoreihin liittyen on käynnissä monia eri hankkeita, jotka keskittyvät eri näkökulmiin. Hankkeiden tarkoituksena on edistää SMR:n käyttöönottoa, ja arvioida mitä vaatii, jotta niitä voitaisiin ottaa laajemmin käyttöön. Hankkeissa halutaan kartoittaa esimerkiksi teknillisiä ja lainsäädännöllisiä asioita. Hankkeet yhdistävät monia ydinvoimasta kiinnostuneita tahoja, ja yhtenä tärkeänä tarkoituksena on saada yhteiskunnan tuki SMR:lle, sillä ilman sitä ei niitä voida rakentaa.

2.3.1 ELSMOR

Eurooppalaisiin luvituskäytäntöihin liittyvä ELSMOR-projekti, jonka nimi tulee sanoista "Towards European Licensing of Small Modular Reactors", on Euroopan unionin rahoittama hanke. ELSMOR-projektia johtaa VTT, ja sen tarkoituksena on helpottaa nimenomaan kevytvesireaktoreiden asentamista Eurooppaan. (De Angelis et al., 2023) Hankkeessa pyritään luomaan välineitä sidosryhmille kevytvesireaktoreiden turvallisuuden arvioimiseksi ja todentamiseksi (VTT, 2023). Tämän hankkeen tekemät työkalut helpottavat myös Suomeen mahdollisesti asennettavien kevytvesireaktoreiden luvitusta.

ELSMOR-projektin tuloksena on havaittu, että aiemmin Euroopan unionin, IAEN:n ja WENRA:n määrittelemät turvallisuudirektiivit pienydinreaktoreille pätevät myös kevytvesireaktoreille. Monissa kevytvesireaktoreissa on passiivinen jäähdytysjärjestelmä, joka vaatii jonkin liikkeellepanevan voiman, jotta jälkilämpö saadaan poistettua. Passiivisiin jäähdytysjärjestelmiin perustuvien SMR:ien turvallisuudesta pitää olla ELMOR-hankkeen raportin mukaan enemmän näyttöä. (Buchholz et al., 2020) SMR:ien kohdalla

voi hyödyntää jo olemassa olevia ydinvoimaan liittyviä turvallisuusperiaatteita, mutta niiden erityispiirteet on otettava huomioon lainsäädäntöjä kohdentaessa (Playez et al., 2020).

Suomen tilanteessa vaadittavia tekijöitä SMR:ien etenemiselle on energiapolitiittinen ja yhteiskunnallinen tuki sekä sidosryhmien yhdistäminen. Suomessa järjestetään paljon seminaareja ja työpajoja liittyen SMR:iin, mutta varsinaista foorumia keskustelulle ei ole. Esimerkkinä Kanadassa ministeriön ja teollisuuden edustajien yhteistyönä on tehty etenemissuunnitelma, joka edistää SMR:ien käyttöönottoa. Suomessa ei ole selkeyttä, kenen tehtävänä yhdistäminen varsinaisesti olisi, ja se on ELSMOR-hankkeen raportin mukaan yksi suurimmista ongelmista. Riskien tunnistaminen ja niiden arviointi on myös tärkeä vaihe, sillä SMR:illä on valtava potentiaali vakaana energialähteenä, mutta ydinriskit on arvioitava tapauskohtaisesti tarkkaan. ELSMOR-hankkeen raportin mukaan resursien laittaminen SMR:iin on kallis investointi, mutta pitkällä aikavälillä järkevä ja kestävä ratkaisu. (Gotcheva et al., 2021)

2.3.2 EcoSMR

Toinen nimenomaan Suomeen liittyvä hanke on nimeltään EcoSMR, joka tulee sanoista ”Finnish Ecosystem for Small Modular Reactors”. Sen on rahoittanut Business Finland, ja hankkeen tutkimuksesta vastaa VTT sekä LUT-yliopisto. Hanke tutki SMR:ien vaatimuksia, lisensointia sekä liiketoimintaa, ja pyrki kehittämään näitä vastaamaan markkinoiden tarvetta. Hankkeessa selvitettiin myös reunaehdot SMR:ille, joilla tuotetaan kaukolämpöä. Erityisesti Suomessa ja myös muualla Euroopassa on tarve kaukolämmön tuotantoon, ja siihen pyritään löytämään hyviä ratkaisuja. (VTT, 2020) EcoSMR-hanke loppui vuoden 2022 lopussa, mutta jatkuu keväällä 2023 nimellä EcoSMR Hub.

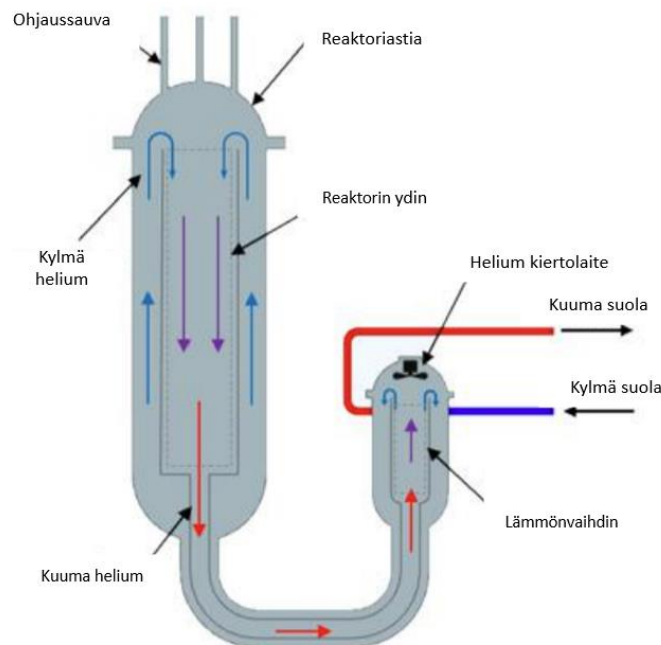
EcoSMR-hankkeen yksi osuus oli kartoittaa pienydinvoimaloihin liittyvää hätävalmiutta. Tarkastelussa kävi ilmi, että Suomessa on vain yleinen hätävalmius liittyen ydinvoimaloihin, ottamatta sen tarkemmin huomioon reaktorin teholuokkaa. Hätävalmius vaikuttaa laitoksen sijaintiin, joka SMR:illä tulisi olla lähellä kaukolämpöverkkoa ja käyttäjiä. (Ilvonen, 2022) Hankkeessa kartoitettiin myös, miten kaukolämpöreaktori, kuten LDR-50, voisi sopia Suomen kaukolämpöverkkoon. Parhaiten käyttötarkoitukseen sopisi muutama kymmenen megawatin kaukolämpöreaktori, kun huomioidaan myös pääkaupunkiseudun ulkopuolella olevat kaupungit. (Suikkanen, 2022)

3. SMR-TEKNOLOGIA

SMR:t voidaan jakaa eri luokkiin niiden ominaisuuksien perusteella. Esimerkkejä luokituista ovat kevytvesireaktorit, nopeat neutronireaktorit sekä sulan suolan reaktorit. Nämä eroavat toisistaan jäähdytystavoiltaan ja kooltaan. Parhaat kaupalliset ennusteet ovat kevytvesireaktoreilla, sillä niiden tutkimukset ovat pisimällä, ja prototyypit ovat osoittautuneet onnistuneiksi. (IAEA, 2022) Suomen kannalta kiinnostavia SMR:iä ovat mikroreaktori MMR sekä kevytvesireaktorit NuScale ja LDR-50, sillä niillä on ominaisuuksia, jotka sopivat nimenomaan Suomen tarpeeseen.

3.1 Modulaarinen mikroreaktori

Modulaarinen mikroreaktori eli MMR kuuluu mikroreaktoreiden luokkaan. Mikroreaktoreiden teholuokka on noin 10 MW eli ne tuottavat vähemmän energiaa verrattuna muihin SMR-teknologioihin. MMR:llä voidaan tuottaa sähköä, lämpöä tai niiden yhdistelmää, mikä tekee siitä monipuolisen energiatuotantomuodon. Muita hyviä puolia ovat sen päästöttömyys sekä automaattisuus, sillä laitos ei tarvitse tukipalveluita. (IAEA, 2022, s. 4–5) MMR:n kiertoineena toimii helium ja lämmön kuljetusaineena sula suola, joiden kierto on esitetty kuvassa 3 (Venneri, 2019).



Kuva 3: MMR:n rakenne sekä heliumin ja suolan kierto. Muokattu lähteestä (Venneri, 2019)

Heliumin operointipaine kierrossa on 3 MPa. Kuuman heliumin lämpötila on 630 °C:ta ja kylmän heliumin 300 °C:ta. Heliumin kierrossa tapahtuu lämmönpoistoa heliumin kierto-laitteen, lämmönsiirtimen sekä ytimen polttoainesauvojen materiaalin takia. Lämmönsiir-timessä heliumin lämpö varastoituu sulaan suolaan, joka kuljettaa energian 565 °C läm-pötilassa ja 0.5 MPa paineessa energiantuotantolaitokselle. Lopulta saatava teho on 15 MW(th) tai 5 MW(e). (USNC, 2021) Lämpöteholtaan MMR on riittävän pieni, jotta se voi-daan sijoittaa lähelle kaukolämpökuormia (USNC, 2022).

MMR:t koostuvat kahdesta osasta, jotka ovat ydinvoimala sekä energiantuotantolaitos. Energiantuotantolaitoksen suunnittelu riippuu siitä, halutaanko ydinvoimalan prosessi-lämpö muuttaa sähkövoimaksi vai pitää lämpöenergiana. Kyseinen laitos sopii syrjäisille alueille esimerkiksi raskaan teollisuuden sovelluksiin tai yksittäisen kaupungin kauko-lämmön tarpeisiin reaktorin teholuokan ja automaation takia. (IAEA, 2022, s. 345–347)

Lappeenrantaan on suunnitteilla MMR tutkimuskäyttöön sekä kaukolämmön tuotantoon. Suunnitteilla oleva laitos pystyy tuottamaan yli 500 °C:ista prosessilämpöä, joten kysei-nen laitos sopii sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. (Lahtinen, 2022) Kyseisen korkean lämpötilan kaasujäähdytteisen mikroreaktorin on tarkoitus toimia koulutus-, tutkimus- ja testilaitoksena sekä Suomelle, että koko ydinvoima-alalle. Laitos sijoitetaan Lappeen-rannan yliopiston kampuksen lähetyville, ja se yhdistetään Lappeenrannan kaukoläm-pöverkkoon. Sopimus laitoksen rakentamisesta allekirjoitettiin joulukuussa 2022 MMR:n suunnitelleen yrityksen Ultra Safe Nuclear Corporation kanssa. (USNC, 2022)

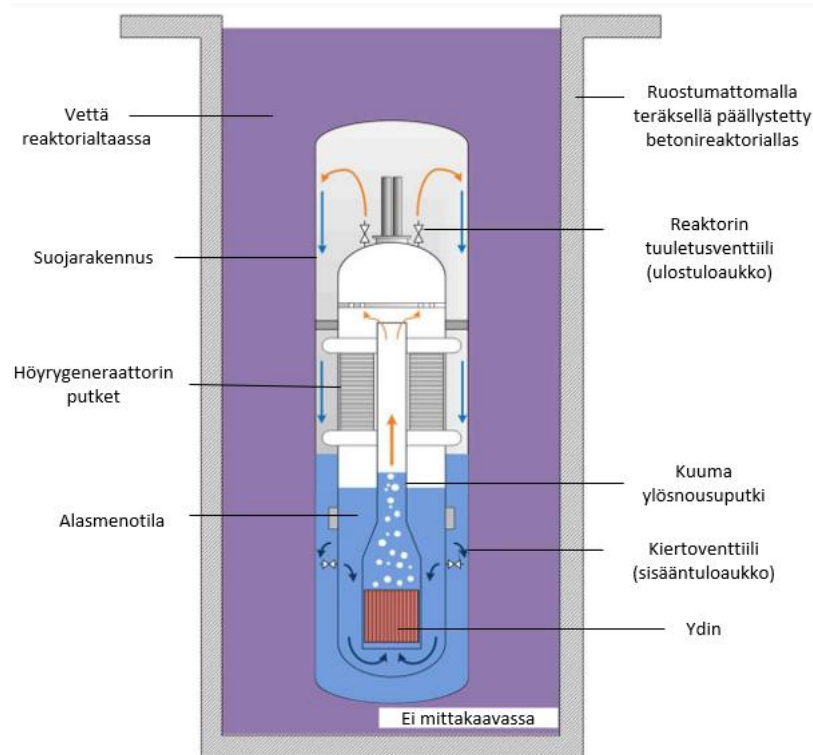
3.2 NuScale

NuScale on yhdysvaltalaisen yrityksen kehittämä SMR, joka on tyypiltään kevytvesire-aktori. Ydinpolttoaineena on uraanioksidi, jossa U235-pitoisuus on alle 5 %. (Pino-Me-dina and François, 2021) NuScale on herättänyt kiinnostusta erityisesti Yhdysvalloissa, mutta myös muualla maailmassa, sillä sen tutkimus on edennyt jo pitkälle, ja tulokset ovat olleet lupaavia. Sitä voi käyttää energianlähteenä sähköntuotantoon, kaukoläm-pöön, lämmön ja sähkön yhteistuotantoon, suolanpoistoon, kaupalliseen vedyn tuotan-toon ja muihin prosessilämpösovelluksiin. (NuScale Power, 2021)

Yksi NuScale reaktorin hyödyistä on sen kompakti koko, mikä mahdollistaa sen, että moduuliyksiköt voidaan valmistaa missä tahansa, ja kuljettaa esimerkiksi rekalla oikeaan paikkaan. Yksi moduuli tuottaa 45 MW(e) tai 160 MW(th), ja kahdentoista moduulin VOYGR-niminen NuScale reaktori tuottaa 924 MW(e) tai 1920 MW(th). (NuScale Power, 2023) NuScale perustuu tunnettuun kevytvesireaktio teknologiaan, josta löytyy paljon

tietoa. Siihen liittyen on olemassa standardeja, joita pystyy hyödyntämään uuden laitoksen suunnittelussa. NuScalesta on myös olemassa prototyyppi, josta saa tietoja, jotka hyödyntävät laitosten lisensointia. (IAEA, 2013)

NuScale moduulin reaktorin ydin jäähdytetään luonnollisella kierrolla, ja kiertoineena toimii vesi. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että vesi lämpenee ytimessä, jolloin sen tiheys laskee, mikä aiheuttaa luonnollisen kierron nousuputkissa. Luonnollinen kierto on merkittävä etu, sillä pumppuja, putkia tai venttiilejä ei tarvita. Tämä tarkoittaa, että vioittuvia osia on vähemmän ja näin ollen huollon tarve pienenee. (IAEA, 2013) Kuvassa 4 on esitetty NuScale reaktorin rakenne yksinkertaistetusti.



Kuva 4: NuScale moduulin rakenne. Muokattu lähteestä (IAEA, 2013)

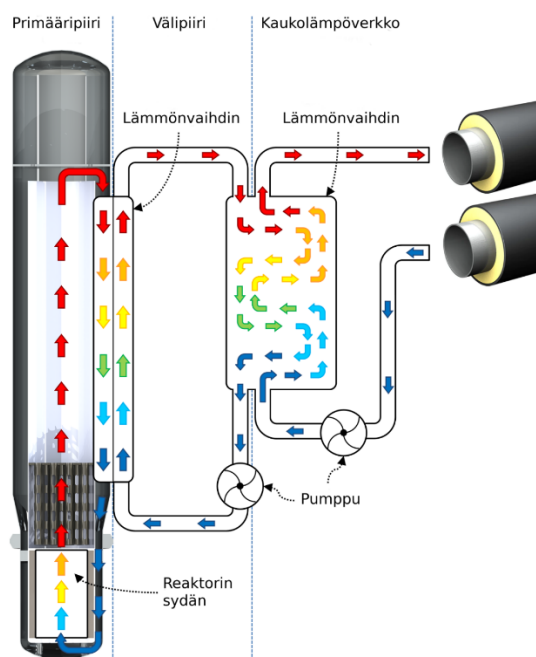
Kuvassa 4 näkyy veden luonnollinen kierto nuolilla merkattuna. Oranssit nuolet kuvaavat ytimessä lämmitetyn fluidin nousemista, ja siniset nuolet kuvaavat fluidin laskeutumista takaisin ytimen ympärille. NuScalen suojarakenne koostuu ytimestä, höyrygeneraattorista ja paineistimesta. Ydin koostuu kevytvesireaktorin polttoainepuista sekä säätösauvaklustereista. (Pino-Medina and François, 2021) Suojarakennus on upotettuna ruostumattomalla teräksellä päällystettyyn maanalaiseen betoniialtaaseen, joka on täytetty vedellä, jota on noin 15 miljoonaa litraa. Betoniallas on riittävän suuri takaamaan kolmenkymmenen päivän ajaksi ytimen ja suojarakennuksen jäähdytyksen ilman veden

lisäämistä. Tämän jälkeen ytimen jälkilämmön muodostuminen on niin pientä, että suojarakennuksen ulkopinnalla tapahtuvan konvektio ilmaan säiliön ulkopuolelle sekä lämpösäteily riittävät lämmönpoistoon rajattomaksi ajaksi. (Reyes, 2012) Tätä passiivista turvajärjestelmää on tutkittu ja testattu useissa laitoksissa ja yliopistoissa, ja tulokset ovat osoittaneet järjestelmän turvalliseksi (NuScale Power, 2021).

3.3 LDR-50

LDR-50 on VTT:n kehittämä SMR, jota on suunniteltu erityisesti kaukolämmön tuotantoon pienten ja keskisuurten kaupunkien tarpeeseen. Toisin sanoen se on räätälöity nimenomaan Suomen tarpeeseen. Lyhenne LDR tulee sanoista ”Low District Heating Reactor” eli kyseessä on matalan lämpötilan kaukolämpöreaktori, joka käyttää kevytvesireaktoritekniikka, ja näin ollen kiertoaineena toimii vesi. (VTT, 2021)

LDR-50 pienydinreaktorille on myönnetty patentti liittyen sen jäähdytysratkaisuun, joka on myös saanut kolmannen palkinnon Nuclear Innovation Prize -kilpailussa vuonna 2022 (VTT, 2022). Kyseinen jäähdytysratkaisu on tehty sellaiselle tilanteelle, jossa reaktoria pitää jäähdyttää silloin, kun sähköjakeluverkossa on häiriö, joka estää normaalin lämmönsiirtoreitin toiminnan. Häiriötilanteessa vesi alkaa kiehumään ja lämpöä alkaa siirtymään ulos reaktorista tehokkaasti. LDR-50 pienydinreaktori ei sisällä liikkuvia osia, jotka voisivat estää järjestelmän toiminnan. (VTT, 2021) Itse moduuli koostuu kahdesta sisäkkäisestä paineastiasta, joiden väliin jäävä tila on täytetty vedellä (Leppänen, 2021). Kuvasa 5 on esitetty LDR-50 pienydinreaktorin toimintaperiaate.



Kuva 5: Kaukolämpöreaktorin toimintaperiaate (Leppänen, 2021)

Kuvasta 5 näkyy nuolilla merkittynä, miten vesi virtaa reaktorimoduulin sydämen läpi. Kuumennut vesi siirtyy lämmönvaihtimen kautta suljettuun välipiiriin, ja sieltä toisen lämmönvaihtimen kautta kaukolämpöverkkoon. (Leppänen, 2021) Yksi LDR-50 moduuli tuottaa 50 MW teholla lämpöä 100–150 °C:een lämpötila-alueella. Moduulin operointipaine on 0.3–0.7 MPa ja operointilämpötila on 100–155 °C. Alhaiset toimintaolosuhteet sekä passiiviset turvallisuusjärjestelmät yhdessä mahdollistavat yksinkertaisen teknologian. (Leppänen et al., 2022)

4. SMR OSANA YHTEISKUNTAA

Kokonaisuudessaan SMR:n tulevaisuus on riippuvainen vielä monista asioista, jotka vaativat tarkastelua ja kehittämistä. Jotta SMR voisi olla osa Suomen energiajärjestelmää, on ydinenergialakiin tultava muutoksia. Vaikka ydinvoimalla tuotettu energia ei aiheuta hiilidioksidipäästöjä, on SMR:illä kuitenkin hiilijalanjälki, joka koostuu sen elinkaaren eri vaiheista.

4.1 SMR:n rooli Suomen energiapolitiikassa

Suomessa ydinvoima-alaa hallitsee eduskunnassa hyväksytty ydinenergialaki (990/1987) ja ydinenergia-asetus (161/1988). Lain tarkoituksena on pitää ydinenergian käyttö yhteiskunnan kokonaisedun mukaisena sekä varmistaa, että sen käyttö on ihmiselle ja ympäristölle turvallista. (FINLEX, 2023) Ydinturvallisuuden ja säteilyn käytön valvonnasta taas vastaa Säteilyturvakeskus STUK, joka kuuluu sosiaali- ja terveysministeriön hallinnonalalle. Suomen Työ- ja elinkeinoministeriö ilmoitti joulukuussa 2021, että ydinenergialakia aiotaan uudistaa. Erityisesti SMR-tekнологiaan liittyen on kehitystarpeita, joiden muuttaminen lainsäädäntöön edistäisi myös suurien ydinvoimalaitosten rakentamista ja käyttöä nykyistä asianmukaisemmalla tavalla. (Liukko et al., 2020)

Ydinturvallisuusneuvottelukunta laati lokakuussa 2019 aloitteen, jossa määriteltiin näkemys liittyen SMR:n kehitystarpeisiin Suomessa. Aloitteessa määriteltiin asiat, jotka Työ- ja elinkeinoministeriön pitäisi saada muutettua lainsäädäntöön. Yhtenä kehitystarpeena määriteltiin lupaprosessin uudistaminen liittyen sijoituspaikkalupa- ja laitoksen suunnittelun tyyppihyväksyntään. (Liukko et al., 2020) Luvitusprosessin tulisi huomioida SMR:n vaikutukset, jotka eroavat paljon suurista ydinvoimaloista, ja näin ollen niille määritetystä luvitusprosessista. Myös Energiateollisuus on määritellyt luvitusprosessin kaikista tärkeimmäksi lainsäädännöllisen muutoksen tarpeeksi. (Energiateollisuus, 2021)

Ydinenergianlain uudistuksessa on myös tarkoitus tarkastella sijaintipaikan sopivuutta turvallisuuden, turva- ja valmiusjärjestelyjen sekä lähiympäristöön kohdistuvien vaikutusten perusteella (Liukko et al., 2020). Lakimuutos sijainnista on välttämätön, jos SMR:iä halutaan ottaa osaksi energiajärjestelmää, sillä tällä hetkellä sijainti vaadittavan etäisyyden päähän käyttäjistä ei ole mahdollinen. Ydinturvallisuusneuvottelukunnan aloitteen mukaan pitäisi myös jätelaitosten päätöksentekomenettelyä päivittää niin, että laitoksia

olisi mahdollista laajentaa ilman erillisiä periaatepäätöksiä (Liukko et al., 2020). On tärkeää, että laitosta pystyisi laajentamaan, sillä modulaarisuus on SMR:n yksi puoli, josta niiden potentiaalisuus johtuu.

4.2 Sijainti

Pienydinreaktoreilla kaukolämmöntuotanto kaupunkikohtaisesti vaatii, että niitä voisi sijoittaa asutuksen lähelle. Mitä lähemmäksi käyttäjiä laitos saadaan, sitä pienemmät häviöt lämmön kuljettamisesta syntyy. (Ilvonen, 2022) Suurin sijaintiin vaikuttava tekijä on hätätilannealue (EPZ), joka koostuu suojavyöhykkeestä (PAZ) ja varautumisalueesta (UPZ). Suojavyöhykkeellä ei saa olla asutusta, ja varautumisalueella pitää olla valmius suorittaa suojatoimenpiteitä tehokkaasti tilanteen vaatiessa. (Kelk et al., 2020) Tällä hetkellä Suomessa PAZ on 5 km ja UPZ on 20 km eli EPZ on 25 km reaktorin ytimeistä. Kyseinen luku on laskettu vastaamaan perinteisen suuren ydinvoimalan säteilytasoja, joten pienydinreaktoreille varautumisalue on mahdollista arvioida erikseen. (Ilvonen, 2022) Taulukossa 1 on esitetty IAEA:n tekemä suosittelu varautumisalueesta eri kokoisille reaktoreille.

Taulukko 1: Suositeltu hätätilanteen alue reaktorikoon mukaan, perustuu lähteeseen (IAEA, 2007)

Reaktorin teholuokka	PAZ (km)	UPZ (km)
> 1000 MW (th)	3–10	5–30
100–1000 MW (th)	0.5–3	5–30
10–100 MW (th)	0	0.5–5
2–10 MW (th)	0	0.5

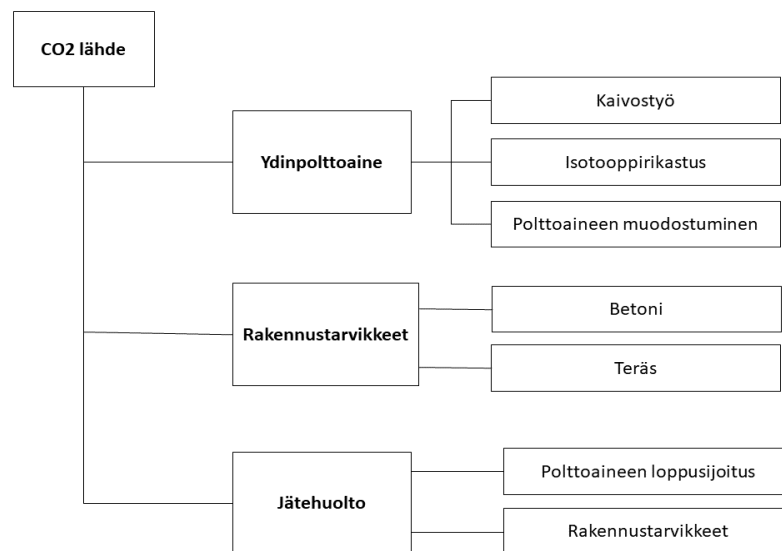
Kuten taulukosta 1 nähdään, pienydinreaktorille suositeltu varautumisalueen säde on huomattavasti pienempi kuin tämänhetkinen 25 km. Tämä johtuu siitä, että pienydinreaktorilla on pienempi reaktorisydän ja fissiotuotteiden varasto. Ilmakehään pääsevän radioaktiivinen säteily on ympäristölle vähemmän haitallista kuin suurien yli 1500 MW ydinvoimalaitosten kohdalla. Pienemmässä teholuokassa jälkijähdytys on myös helpompaa. (Ilvonen, 2022) Alle 100 MW laitokselle varautumisalueeksi on määritetty 0.5–5 km, mikä tarkoittaa, että 50 MW teholla toimiva LDR-50 olisi tämän suosituksen perusteella mahdollista sijoittaa käyttäjien lähelle.

Suomen työ- ja elinkeinoministeriö uudistaa tällä hetkellä ydinenergialakia, ja uudistuksessa on tarkoitus muun muassa arvioida varautumisaluetta erikseen pienydinreakto-

reille. Jos varautumisaluetta muutetaan, pitää mahdollisesti myös hätätilanteiden hallintavaatimukset arvioida tapauskohtaisesti. Jos sijoitus kaupungin lähelle olisi mahdollista, olisi sillä paljon etuja pienydinreaktoreiden näkökulmasta. Lyhyet lämmönsiirtomatkat teollisuudelle ja kaukolämmön asiakkaille pienentävät lämpöhäviötä. Hätätilannesuunnitelma laitokselle olisi yksinkertaisempi ja halvempi toteuttaa sekä lisensointi asiakkaalle ja valvojalle tulisi yksinkertaisemmaksi. (Ilvonen, 2022)

4.3 Hiilijalanjälki

Kuten perinteisten ydinvoimaloiden tapauksessa, SMR ei myöskään aiheuta hiilidioksidipäästöjä energiantuotantovaiheessa, vaan hiilijalanjälki syntyy laitoksen elinkaaren eri vaiheista. (Muralidharan et al., 2022) Hiilijalanjäljen suuruus riippuu laitoksen käyttöiästä, sillä mitä pidempi käyttöikä laitoksella on, sitä pienempi hiilijalanjälki suhteessa tuotettuun energiamäärään on. Hiilidioksidilähteet eri SMR:n elinkaaren vaiheissa on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6: SMR:n hiilijalanjäljen muodostavat tekijät. Perustuu lähteeseen (Muralidharan et al., 2022)

Suurimmat hiilidioksidipäästöjen aiheuttajat ovat ydinpolttoaineen valmistus sekä uraanin keräämiseen tehtävä kaivostyö. Kaivostyön päästöt riippuvat siitä, mikä menetelmä on kyseessä. Louhintatavoista yleisin on liuotusmenetelmä, jonka markkinaosuus on 50 %. (Muralidharan et al., 2022) Kyseisessä tavassa maahan porataan pystysuuntaisia kaivoja, joista osa pumpkaa uraania erottavaa liuosta maahan, ja osa pumpkaa samaa liuosta pois maasta (Bhojwani et al., 2022). Liuotusmenetelmän hiilidioksidipäästöt ovat

0.215 g CO₂-ekvivalenttia/kWh. Tähän verrattuna 25 % markkina osuuden omaava avo-
louhos, jonka hiilidioksidipäästöt ovat 0.68 g CO₂-ekvivalenttia/kWh eli moninkertaiset
verrattuna liuotusmenetelmään. Maanalaisen kaivoksen markkinaosuus on 25 % ja hiili-
dioksidipäästöt 0.255 g CO₂-ekvivalenttia/kWh, mikä vastaa suuruusluokaltaan liuotus-
menetelmän vastaavaa arvoa. (Muralidharan et al., 2022)

Isotooppirikastaminen kattaa myös osan SMR:n hiilijalanjäljestä. Siinä tarkoituksena on
kasvattaa rikasteessa olevan uraanin U-235-isotooppipitoisuutta, jotta siitä saadaan
ydinpolttoainetta. Yleisin tapa isotooppirikastamiseen on kaasusentrifugimenetelmä,
jossa uraaniheksafluoridi laitetaan nopeasti pyörivän sylinterin sisälle, jolloin uraanin eri
isotoopit kerrostuvat eri kohtiin sylinterin akselin ympärille. (Whitaker, 2019, s. 23) Kaa-
susentrifugimenetelmän hiilidioksidipäästöt ovat 0.988 g CO₂-ekvivalenttia/kWh ja mark-
kinaosuus on 90 %. Toinen tapa tuottaa uraanirikastetta on kaasudiffuusio, jonka hiilidi-
oksidipäästöt ovat 16.566 g CO₂-ekvivalenttia/kWh eli kyseessä on huomattavasti epä-
puhtaampi tapa tuottaa ydinpolttoainetta. (Muralidharan et al., 2022)

Hiilidioksidipäästöjä aiheuttaa myös laitoksen rakentamiseen tarvittavat rakennustarvik-
keet ja -materiaalit, kuten teräs ja betoni, sillä niitä tuotetaan pääosin hiilidioksidipäästöjä
aiheuttavilla tavoilla. Materiaaleista aiheutuvaa hiilijalanjälkeä saa pienemmäksi käyttä-
mällä materiaaleina ympäristöystävällisempiä vaihtoehtoja, kuten fossiilivapaata terästä.
Ongelmana siinä on kuitenkin toistaiseksi hinta, joka on huomattavasti korkeampi kuin
perinteisesti tuotetulla teräksellä. (IEA, 2020)

Päästökerroin kertoo hiilidioksidipäästöjen määrän myytyä energiamäärää kohden, ja se
ottaa huomioon tuotannon ja siirron häviöt. Päästökerroin voidaan määrittää eri energi-
antuotantomuodoille, ja taulukossa 2 on esitetty käytetyimpien tuotantomuotojen sekä
SMR:n suorat ja epäsuorat päästökertoimet. Suoralla päästökertoimella tarkoitetaan tuo-
tannosta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä, kun taas epäsuoralla päästökertoimella tarkoi-
tetaan laitoksen elinkaaren aikana vapautuvia hiilidioksidipäästöjä. (Gabbar & Islam,
2014)

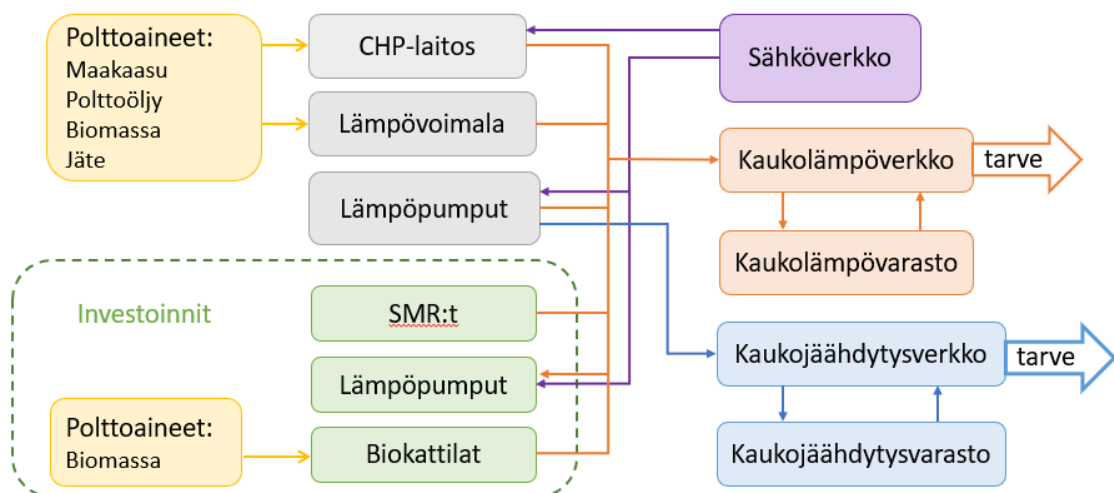
**Taulukko 2: CO₂ päästökertoimet eri tuotantomuodoille. Perustuu lähteisiin
(Gabbar & Islam, 2014; Muralidharan et al., 2022)**

	g CO ₂ -ekvivalenttia/kWh	
	Suorat päästöt	Epäsuorat päästöt
Kivihiili	903	232
Vesivoima	0	120
Aurinkopaneeli	0	190
Tuulivoima	0	29
Ydinvoima	0	15
SMR	0	3.71

SMR:n päästökerroin on ydinpolttoaineen valmistuksen, laitoksen rakentamisen sekä jätehuollon päästökertoimien summa (Muralidharan et al., 2022). Luku on pienempi verrattuna suuren ydinvoimalan vastaavaan luukuun, sillä SMR:n teknologia on yksinkertaisempi (IAEA, 2022), jolloin esimerkiksi rakennusmateriaalien tarve on suhteessa pienempi. Kaikista suurimmat päästökertoimet ovat kivihieillä, ja siksi sen käytöstä pyritään eroon. Uusiutuvilla energiantuotantomuodoilla ja ydinvoimalla suoria päästöjä ei ole, mutta epäsuorissa päästöissä on vaihtelua. Esimerkiksi vesivoiman ja aurinkopaneelien epäsuorat päästöt ovat huomattavasti korkeampia kuin tuuli- tai ydinvoiman. SMR:n päästöt ovat kaikista pienimmät ottaen huomioon koko laitoksen elinkaaren sekä energiantuotannon. Pieni päästökerroin on myös taloudellisesti kannattavaa, sillä päästömaksut ovat silloin pienemmät. Tämä tekee SMR:stä potentiaalisen osan tulevaisuuden yhteiskuntaa.

4.4 SMR osana energiajärjestelmää

Suomen energiajärjestelmä tulee muuttumaan siirryttäessä uusiutuviin energiantuotantomuotoihin. Vaihteleva tuuli- ja aurinkovoima vaativat vakaita energiantuotantomuotoja tasaamaan vaihtelua kysynnän tarpeisiin. Pääkaupunkiseudun kaukolämpöjärjestelmän optimaalisia investointimahdollisuuksia hiilinegatiivisessa tulevaisuudessa on tarkasteltu lämpöpumppujen ja SMR:ien osalta. Kuvassa 7 on esitetty malli kaukolämpö- ja jäähdytysjärjestelmästä pääkaupunkiseudulla.

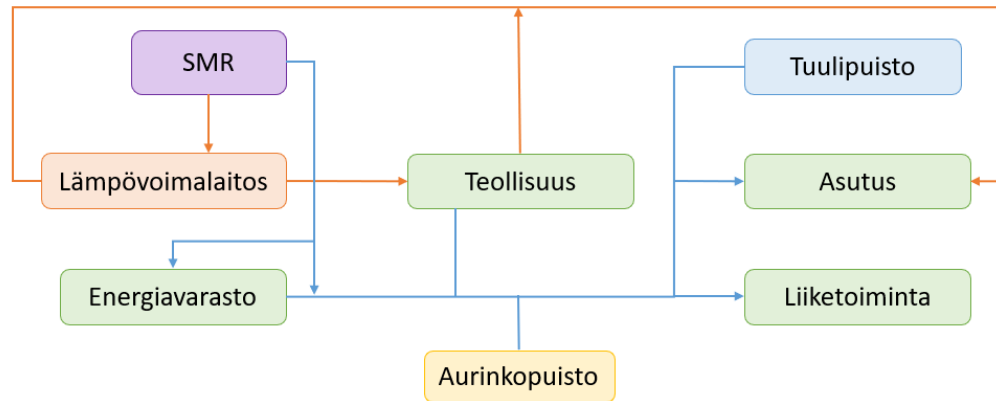


Kuva 7: Malli kaukolämpö- ja jäähdytysjärjestelmästä pääkaupunkiseudulla. Perustuu lähteeseen (Pursiheimo et al., 2022)

Malli on toteutettu liittämällä kaukolämmön ja -jäähdytyksen tuotanto- ja varastointirakenne JavaScriptin "Backbone model" runkomalliin. Se tarkastelee eri investointimahdollisuuksia järjestelmän taloudellisen optimoimisen kannalta. Kuvasta puuttuu järjestelmän jakaminen eri alueisiin pääkaupunkisudulla, eli todellisuudessa kyseessä on monimutkaisempi tilanne. Optimoinnissa tarkasteltiin muun muassa pääoma- ja käyttökustannuksia, polttoaineiden hintoja sekä päästöjä. Kuva 7 havainnollistaa, miten SMR:llä voisi olla rooli nimenomaan kaukolämmöntuotannossa, ja sillä voisi esimerkiksi korvata fossiilisilla polttoaineilla toimivia CHP- tai lämpövoimalaitoksia. Mallin tarkastelun perusteella havaittiin, että sekä lämpöpumput, että SMR:t ovat kannattavia vaihtoehtoja kaukolämpöjärjestelmän hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi, mutta optimaalinen tarkastelu riippuu monista pääkaupunkiseudulle ominaisista tekijöistä. Pääkaupunkiseudun investointistrategia vaatii vielä lisätutkimuksia, ja tällä hetkellä SMR ei muutenkaan ole lainsäädännöllisesti varteenotettava vaihtoehto. (Pursiheimo et al., 2022)

Älykkäät sähköverkot ovat herättäneet keskustelua Suomessa, ja perinteiset yhden-suuntaiset sähköverkot ovat mahdollisesti muutoksen edessä (Blomqvist et al., 2017). SMR edustaa tasaista lämmön tai sähkön tuotantomuotoa, joka voisi olla osa älykästä sähköverkkoa. Mikroverkko on yksi älykkään sähköverkon visioista, ja sillä tarkoitetaan sähkönjakelujärjestelmää, joka sisältää kuormia ja hajautettua tuotantoa. Ne voivat toimia erillisinä saarekkeina tai olla yhteydessä suurempaan kantaverkkoon. Maailmalla mikroverkkojen markkinat ovat kasvussa, ja myös Suomessa uusiutuvapainotteiseen energijärjestelmään edetessä mikroverkkojen mahdollisuuksia on hyvä arvioida. (Teknologiateollisuus, 2020) Niitä on toteutettu jonkin verran, ja esimerkiksi Lidlin Järvenpään jakelukeskuksessa on hajautetulla energiantuotannolla toimiva mikroverkko.

Mikroverkon etuina on muun muassa se, että sähkön tai lämmön tuotantoa ja kulu-tusta pystytään optimoimaan esimerkiksi auringonpaisteen perusteella. SMR:n mahdollisuuksia osaksi mikroverkkoa on tutkittu ja testattu. SMR:ää voidaan käyttää uusiutuvaan energiaan perustuvien mikroverkkojen kanssa kestävien energialähteiden tarjoamiseksi erilaisiin sovelluksiin sähkön tai lämmön lähteenä. (Michaelson & Jiang, 2021) Yksi mahdollinen mikroverkkojärjestelmä on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8: SMR osana mikroverkkoa. Perustuu lähteeseen (Michaelson & Jiang, 2021)

Kuvassa 8 esitetyssä järjestelmässä SMR toimii CHP-laitoksena, ja syöttää energiaa sekä sähkö- että lämpöverkkoon. Oranssit viivat kuvaavat kaukolämpöverkkoa ja siniset sähköverkkoa. SMR:n modulaarinen rakenne sopii hyvin eri soveluksiin tarvittaviin teholuokkiin. Myös niiden kuormituksen seurantakyky mahdollistaa uusiutuvan energian vaihtelevan määrän kompensoinnin ja näin ollen pienentää tarvittavan energiavaraston vaadittavaa kapasiteettia. (Michaelson & Jiang, 2021) SMR:n integroinnissa mikroverkkoihin on kuitenkin vielä ongelmia, joita ei ole saatu selvitettyä. Koska SMR on tuore innovaatio, jonka toiminnasta ei löydy paljoa tietoa, on sen mallintamis- ja simulointilähestymistavoilla suuri rooli moduulien koordinoinnissa, jota tarvitaan taajuuden ja jännitteen ylläpitämiseksi sähköverkossa (Saleem et al., 2020).

Monet teollisuuden alat päästävät ilmakehään hiilidioksidipäästöjä, joiden vähentämiseksi lämmön tuottaminen SMR:llä on varteenotettava vaihtoehto, ja siksi myös kuvassa 8 teollisuus on liitetty SMR:n lämpöverkkoon. Esimerkiksi Outokumpun terästehdas on käynnistänyt selvityksen Suomeen rakennettavasta SMR:stä, jonka avulla voitaisiin tuottaa vähähiilistä terästä. Outokumpu valmistaa ruostumattonta terästä, jonka valmistukseen tarvittavat suuret lämpötilat olisivat mahdollista toteuttaa SMR:llä toisin kuin esimerkiksi vetyteknologialla. Tämän takia nimenomaan SMR on yksi potentiaalinen vaihtoehto ruostumattoman teräksen hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. (Outokumpu, 2023)

Mikroverkkoja käytetään usein paikoissa, jossa yhteydet kantaverkkoon ovat huonot. Esimerkiksi saaret tai syrjäiset kylät voivat olla tällaisia paikkoja. Suomessa erityisesti pohjoiseen päin mennessä kaupunkien välimatkat toisistaan pitenevät. Asunto-, energia- ja ympäristöministeri on tehnyt vuonna 2017 aloitteen, jossa Ahvenanmaasta tehtäisiin joustavan energiamenetelmän mallialue, joka perustuisi

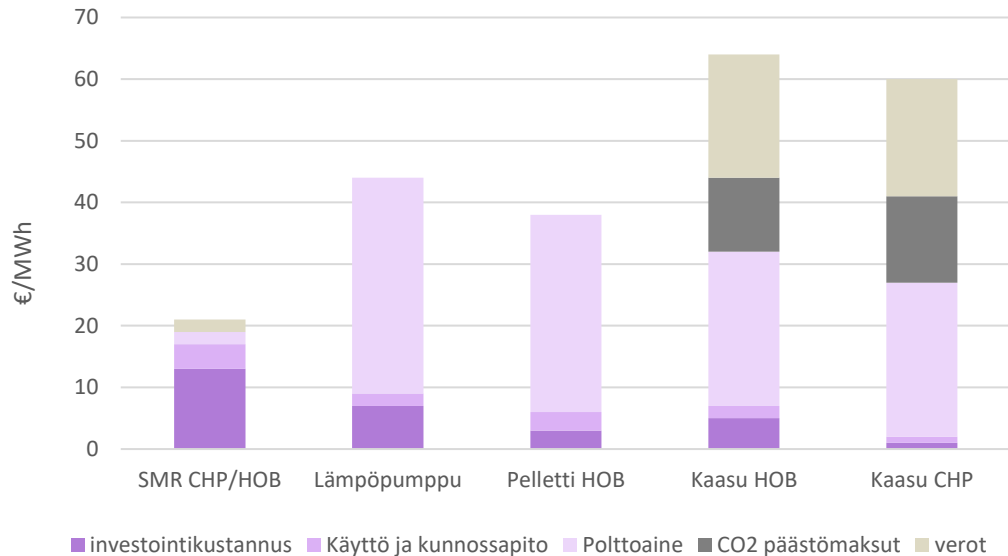
älykkäisiin sähköverkkoihin. Näissä voisi olla potentiaalia SMR:lle ja mikroverkolle. (Blomqvist et al., 2017)

4.5 Taloudelliset näkymät

SMR:llä on paljon hyviä puolia, mutta myös ratkaisemattomia ongelmia, jonka takia sen tulevaisuus Suomessa on epävarma. ELSMOR-hankkeen raportin mukaan resurssien laittaminen SMR:iin on kallis investointi, mutta pitkällä aikavälillä järkevä ja kestävä ratkaisu. (Gotcheva et al., 2021) Jotta SMR voisi olla osa tulevaisuutta, on sen tutkimiseen saatava lisää taloudellista tukea. SMR:n rakentaminen vaatii pienemmän taloudellisen valmiuden verrattuna suuriin ydinvoimaloihin, ja näin ollen niiden rakentamisen aloittaminen sisältää pienemmän taloudellisen riskin. Myös lisäkustannukset ja valmistumisaika ovat luotettavammin ennustettavissa, sillä SMR:n teknologia on yksinkertaisempi ja koko pienempi. (IAEA, 2022)

Vastuu ydinjätteenhuollosta on ydinjätteen tuottajalla. Tähän sisältyy taloudellinen varautuminen ydinjätehuollon edellyttämien toimenpiteiden kustannuksiin etukäteen. Suomessa suurimmassa osassa ydinvoimaloista ydinjätehuolto tapahtuu omissa loppusijoitustiloissa lähellä laitosta. Jos Suomeen tulisi kaukolämpötuotantoon tarkoitettu SMR, tarkoittaisi se sijaintia käyttökohteen lähetyville. Näin ollen samanlainen oma loppusijoituspaikka laitoksen lähellä ei olisi mahdollinen. Ydinturvallisuusneuvottelulautakunnan aloitteessa ydinenergialain uudistukseen liitetyen ehdotetaan, että ydinjätehuolto järjestettäisiin vapaaehtoisen yhteistyön pohjalta muiden ydinjätehuoltovastuullisten kanssa käyttämällä hyväksi jo olemassa olevaa infrastruktuuria. Myös yhteinen matala- ja keskiaktiivisen ydinjätteen sekä käytetyn polttoaineen yhteinen keskitetty välivarastointi helpottaisi SMR:ien toimintaa. Tämä olisi myös taloudellisesti edullisin ratkaisu. (STUK, 2019)

Värri ja Syri tarkastelevat tutkimusartikkelissaan pääkaupunkiseudun mahdollisuuksia kaukolämpöä tuottavalle SMR:lle. Tutkimuksessa arvioidaan NuScale voimalaitosta sekä muita energiantuotantotapoja 300 MW(th) teholuokassa, lukuun ottamatta lämpöpumppua, joka määritettiin toimivan 20 MW(th) teholla. Tarkastelussa käsitellään sekä CHP-laitoksia eli lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksia, että HOB-laitoksia eli pelkästään lämmön tuotantoon tarkoitettuja laitoksia. Kaukolämmön kustannusjakaumat ovat esitetty kuvassa 9.



Kuva 9: Kustannusjakauma eri kaukolämmöntuotantotavoille. Perustuu lähteeseen (Värri & Syri, 2019)

SMR:n kustannusjakauma sekä kaukolämpöreaktorina, että CHP-laitoksena ovat suunnilleen samat, ja siksi niitä ei ole eritelty erikseen omiksi pylväikseen. Kuten kuvasta 9 nähdään, investointikustannukset SMR:llä ovat kaikista suurimmat, mutta kustannukset kokonaisuudessaan on vakaat investointikustannusten vaihtelusta huolimatta. Lämpöpumppujen tapauksessa investointikustannusten vaihtelu vaikuttaa huomattavasti kustannustehokkuuteen. (Pursiheimo et al., 2022) Hiilidioksidin päästökaupasta aiheutuvia kustannuksia ei ole, sillä ydinvoimalan käytöstä ei synny hiilidioksidipäästöjä. Muilla tuotantotavoilla polttoaineen kustannukset ovat korkeat, mutta SMR:llä vain noin 2 €/MWh, minkä takia sen kokonaiskustannukset ovat noin 20 €/MWh eli huomattavasti pienemmät verrattuna esimerkiksi lämpöpumppuun tai kaasuvoimalaitokseen. Vertailussa on hyvä ottaa myös huomioon, että taloudellisesti SMR:n kustannusarviota on vaikea arvioida, sillä niistä ei ole vielä tarpeeksi näyttöä (Saleem et al., 2020). NuScalen prototyypistä saa kuitenkin suuntaa antavaa tietoa.

Päästökauppa on järjestelmä, jossa valtio myöntää yrityksille oikeuden päästää tietty määrä kasvihuonekaasuja ilmakehään. Jos määrä ylittyy, pitää yrityksen ostaa päästöoikeuksia markkinoilta. Vastaavasti jos sallittu määrä alittuu, voi yritys myydä päästöoikeuksiaan. Päästöoikeuksia vaaditaan Suomessa yli 20 MW(th) laitoksilta sekä kaikilta kaukolämpöä tuottavilta laitoksilta (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023), eli Suomeen rakennettavat SMR:t todennäköisesti tulisivat kuulumaan päästökaupan piiriin. Kuten taulukosta 2 nähdään, SMR:n tapauksessa tuotannosta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä ei synny, joten päästökaupasta ei aiheudu

kuluja. Sen piiriin kuulumisesta on siis taloudellisesti hyötyä, sillä päästöoikeuksia voi myydä eteenpäin markkinoilla.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi uusia hiilidioksidipäästöttömiä energiantuotantotapoja on hyvä tarkastella. SMR-teknologioilla on paljon etuja, jotka tekevät niistä potentiaalisen energiantuotantomuodon. Niiden hiilidioksidipäästöttömyys, yksinkertainen rakenne, monipuoliset tuotantomahdollisuudet sekä modulaarisuus ovat hyviä ominaisuuksia osaksi energiantuotantojärjestelmää. Eri teknologioilla on myös omia etuuksia, jotka sopivat eri tilanteisiin esimerkiksi teholuokan tai energiantuotantomuodon mukaan. Ydinvoimalla tuotettu energia on vakaata ja luotettavaa, mikä on hyvä ominaisuus vaihtelevien uusiutuvien energiantuotantomuotojen rinnalle. Vaikka SMR:iä ei ole vielä paljoa käytössä, on niiden prototyypit osoittautuneet onnistuneiksi.

Sähköntuotanto on Suomessa jo lähes hiilidioksidipäästötöntä, mutta lämmöntuotanto aiheuttaa vielä paljon hiilidioksidipäästöjä. Tämän takia SMR:t ovat herättäneet kiinnostusta Suomessa lämmöntuotannon, erityisesti kaukolämmön, hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Eri SMR-teknologioista esimerkiksi MMR, NuScale ja LDR-50 sopivat kaukolämmöntuotantoon, ja ovat siksi potentiaalisia teknologioita Suomen tarpeeseen. Suurin kaukolämmön kulutus tapahtuu pääkaupunkiseudulla, johon SMR:n mahdollisuuksia on myös kaavailtu muun muassa taloudellisesta näkökulmasta. Mallin tarkastelun perusteella havaittiin, että SMR:t ovat kannattavia vaihtoehtoja kaukolämpöjärjestelmän hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Suomessa päästökaupanpiiriin kuuluvat kaikki kaukolämmöntuotantolaitokset, ja koska SMR:t eivät aiheuta hiilidioksidipäästöjä, on päästöoikeuksista taloudellista hyötyä.

SMR:ien tulee sijaita mahdollisimman lähellä käyttäjiä, jotta niiden toiminta on kannattavaa. Tällä hetkellä hätävalmiusalue (EPZ) on Suomessa reaktorikoosta riippumatta 25 kilometriä, mikä tekee SMR:ien käyttöönotosta kannattamatonta. Työ- ja elinkeinoministeriö on parhaillaan uudistamassa ydinenergialakia, jonka yhtenä muutoksena toivotaan reaktorikoosta riippuvaa hätävalmiusalueen laajuutta. IAEA on tehnyt vaadittavasta hätätilannealueesta määritelmän, jossa alle 100 MW teholuokan reaktoreilla on huomattavasti pienemmät tarvittavat etäisyydet kuin suuremmilla reaktoreilla. Ydinvoima on mielipiteitä aiheuttava aihe, joten SMR:n sijoittaminen lähelle asutusta voi aiheuttaa myös vastustusta väestön keskuudessa. Suomessa yleisesti ottaen ollaan kuitenkin ydinvoimamyönteisiä, mikä on positiivinen asia ajatellen SMR:ien tulevaisuutta.

Jos kaukolämpöä tuottava SMR rakennettaisiin Suomeen, pitäisi sen olla energiatuotannoltaan joustava, sillä kaukolämmön tarve vaihtelee suuresti riippuen vuodenaajoista. SMR:n tulisi toimia osakuormalla, ja sen pitäisi olla kustannuskilpailukykyinen noin yhdeksän kuukauden vuosikäytöllä, jotta sen käyttäminen Suomessa kaukolämmöntuotantoon olisi kannattavaa. Koska kyseessä on suhteellisen tuore innovaatio, SMR:stä saatava tieto on osittain puutteellista. Lappeenrantaan tullaan rakentamaan MMR tutkimuskäyttöön, ja siitä toivotaan saavan paljon hyödyllistä tietoa liittyen kaukolämmöntuotantoon. Myös NuScalesta on olemassa prototyyppi, josta on saatu hyvin suuntaa antavaa tietoa, jonka perusteella kannattavuuslaskentoja on tehty. ELSMOR-hankkeen raportin mukaan resurssien laittaminen SMR:iin on kallis investointi, mutta pitkällä aikavälillä järkevä ja kestävä ratkaisu. Jotta SMR voisi olla osa tulevaisuutta, on sen tutkimiseen saatava lisää taloudellista tukea. SMR:n rakentaminen vaatii pienemmän taloudellisen valmiuden verrattuna suuriin ydinvoimaloihin, ja näin ollen niiden rakentamisen aloittaminen sisältää pienemmän taloudellisen riskin.

LÄHTEET

- Bhojwani, D.L., Anderson, G.P., Faryan, M.C., 2022. Pilot-Scale Study for In-situ leaching of Residual Uranium from Remediated Soil-22204a.
- Blomqvist, K., Härkönen, J., Makkonen, T., 2017. Älykkäät sähköverkot.
- Buchholz, S., Ricotti, M., Martin, O., Thuy, N., Lombardo, C., Kornyskyi, A., Playez, N., Israel, S., Kaliatka, A., 2020. Improved safety features of LW-SMR.
- De Angelis, A., Reinke, N., Ambrosini, W., 2023. Assessing water-wall behaviour for a light-water Small Modular Reactor with the aid of CFD analyses. *Ann Nucl Energy* 184. <https://doi.org/10.1016/J.ANUCENE.2022.109672>
- Energiamaaailma, 2023. Kaukolämpö ja -jäähdytys. Saatavissa: URL <https://energiamaa- ilma.fi/energiasta/energiantuotanto/kaukolampo-ja-jaahdytys/> (viitattu 17.3.2023).
- Energiateollisuus, 2021. Pienreaktorit (SMR) saatava pian osaksi uutta energijärjestelmää.
- EVA, 2022. EVA Analyysi No 116 Energijärjestys.
- FINLEX, 2023. Ydinenergialaki 990/1987 - Ajantasainen lainsäädäntö. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1987/19870990> (viitattu 29.3.2023).
- Gabbar, H.A., Islam, Md.R., 2014. Study of small modular reactors in modern microgrids. <https://doi.org/10.1002/etep.1945>
- Gasum, 2023. Maakaasumarkkina Suomessa. Saatavissa: <https://www.gasum.com/kaa- susta/maakaasu/maakaasumarkkina-suomessa/> (viitattu 13.4.2023).
- Gotcheva, N., Värrä, K., Ylönen, M., 2021. Summary report of stakeholder input and Institutional/Organisational Strength-in-Depth.
- Hiilineutraali Suomi 2035 – Ympäristöministeriö, n.d. Saatavissa: <https://ym.fi/hiilineutraali- suomi2035> (viitattu 18.1.2023).
- Hujala, E., Hyvärinen, J., Rintamaa, R., Suikkanen, H., Vihavainen, J., Wähä, S., 2022. Uusien ydinenergiateknologioiden mahdollisuudet ja kehitystarpeet : Pienet modulaariset sarjaval- misteiset ydinreaktorit eli SMR:t.
- IAEA, 2022. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments.
- IAEA, 2007. IAEA Safety Standards Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency 78.
- IEA, 2020. Iron and Steel Technology Roadmap Towards more sustainable steelmaking Part of the Energy Technology Perspectives series 11.
- Ilvonen, M., 2022. Review of SMR siting and emergency preparedness.
- Kelk, R., Murad, A., De Oliveira, R., Jeltsov, M., 2020. Emergency planning zones for small mod- ular reactors 17–18.
- Lahtinen, J., 2022. Pienydinvoiman rakentaminen Suomeen todella lähellä.
- Leppänen, J., 2021. Suomalainen kaukolämpöreaktori – osa 3 – Fissioreaktori. Saatavissa: <https://fissioreaktori.wordpress.com/2021/03/14/suomalainen-kaukolamporeaktori-osa-3/> (viitattu 14.3.2023).
- Leppänen, J., Valtavirta, V., Komu, R., 2022. VTT-beyond the obvious Use of Serpent-Kraken in VTT's LDR-50 district heating reactor project Background: overview.
- Liukko, A., Slant, O., Välimäki, M., 2020. Ydinlaitosten elinkaaren sääntelyn kehittäminen Loppu- raportti. Työ- ja elinkeinoministeriö.
- Michaelson, D., Jiang, J., 2021. Review of integration of small modular reactors in renewable energy microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 152, 111638. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111638>
- Motiva, 2022. Kaukolämpö. Saatavissa: https://www.motiva.fi/koti_ ja_ asuminen/rakentami- nen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo (viitattu 21.10.2022).
- Muralidharan, A., Vankeirsblick, A., Khalid, F., Tanny, N., Shrestha, B., 2022. Carbon footprint of district heating reactors.
- NuScale Power, 2021. NuScale SMR Technology - An ideal Solution for Repurposing U.S. Coal Plant Infrastructure and Revitalizing Communities.
- NuScale Power Modular and Scalable Reactor, 2013.
- Outokumpu, 2023. Outokumpu ja Fortum selvittävät mahdollisuuksia ruostumattoman terästeol- lisuuden hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi.

- Pino-Medina, S., François, J.L., 2021. Neutronic analysis of the NuScale core using accident tolerant fuels with different coating materials. *Nuclear Engineering and Design* 377. <https://doi.org/10.1016/J.NUCENGDES.2021.111169>
- Playez, N., Courtin, E., Ammirabile, L., Israel, S., 2020. LW-SMRs main safety goals.
- Pursiheimo, E., Lindroos, T.J., Sundell, D., Rämä, M., Tulkki, V., 2022. Optimal investment analysis for heat pumps and nuclear heat in decarbonised Helsinki metropolitan district heating system. *Energy Storage and Saving* 1, 80–92. <https://doi.org/10.1016/J.ENSS.2022.03.001>
- Reyes, J.N., 2012. NuScale plant safety in response to extreme events. *Nucl Technol* 178.
- Saleem, R.A., Kelly, J., Rousan, T., Sauer, P.W., 2020. Issues in the Use of Small Modular Reactors in Microgrids. *IEEE*.
- STUK, 2022. Suomen ydinvoimalaitokset. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/ydinvoimalaitokset/suomen-ydinvoimalaitokset> (viitattu 17.3.2023).
- STUK, 2019. Ydinturvallisuusneuvottelulautakunnan näkemys pieniin modulaarisiin reaktoreihin (SMR) liittyvistä kehitystarpeista Suomessa. Ydinturvallisuusneuvottelulautakunta. Saatavissa: https://www.stuk.fi/documents/12547/319501/1882563-YTN_SMR-aloite.pdf/566b1bfb-7500-0cff-ba34-b2ce2fa9478d?t=1575373387656 (viitattu 31.3.2023).
- Suikkanen, H., 2022. Design requirements for a Finnish district heating reactor considering domestic deployment and export potential.
- Suomalainen pienreaktoriosaaminen vahvistuu | VTT, n.d. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/suomalainen-pienreaktoriosaaminen-vahvistuu-uudella-innovaatio-ja> (viitattu 9.3.2023).
- Tekniikka&Talous, 2020. Ydinvoiman hukkalämpö Suomessa – miksi ei hyödynnetä? Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/suomen-ydinvoimalat-laskevat-5000-mw-ja-tulevaisuudessa-10000-mw-lampoa-taysin-hukkaan-selvitimme-miksi-sita-ei-hyodynneta/0106f5fb-b974-4edd-95a8-73143ad1cd37> (viitattu 13.4.2023).
- Teknologia-teollisuus, 2020. Syrjäseuduilta kaupunkeihin – mikroverkot mahdollistavat vähähiilisen energiantuotannon yleistymisen | Teknologia-teollisuus. Saatavissa: <https://teknologia-teollisuus.fi/fi/ajankohtaista/artikkeli/mikroverkot-mahdollistavat-vahahiilisen> (viitattu 30.3.2023).
- Tilastokeskus, 2022. Suomi toi 34 prosenttia energiastaan Venäjältä vuonna 2021 – maakaassussa arvioitu osuus 92 prosenttia.
- Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023. Päästökauppa. Saatavissa: <https://tem.fi/paastokauppa> (viitattu 12.4.2023).
- USNC, 2022. Ultra Safe Nuclear ja LUT kehittävät Suomen ensimmäistä edistynyttä tutkimusmikroydinreaktoria.
- USNC, 2021. USNC Micro Modular Reactor (MMR™ Block 1) Technical Information.
- Värri, K., Syri, S., 2019. The Possible Role of Modular Nuclear Reactors in District Heating-Case Helsinki Region 30–31.
- Venneri, F., 2019. Micro Modular Reactor (MMR) Energy Systems.
- VOYGR SMR Plants | NuScale Power, n.d. Saatavissa: <https://www.nuscalepower.com/en/products/voygr-smr-plants> (viitattu 9.3.2023).
- VTT, 2022. Suomalainen pienreaktorikeksintö nappasi palkintosijan Euroopan komission järjestämässä Nuclear Innovation Prize -kilpailussa - VTT Info. Saatavissa: <https://news.cision.com/fi/vtt-info/r/suomalainen-pienreaktorikeksinto-nappasi-palkintosijan-euroopan-komission-jarjestamassa-nuclear-inno,c3577263> (viitattu 14.3.2023).
- VTT, 2021a. Kohti puhdasta kaukolämpöä: | VTT. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/kohti-puhdasta-kaukolampoa-merkittava-patentti-vtt-kehittamalle> (viitattu 14.3.2023).
- VTT, 2021b. Kohti puhdasta kaukolämpöä: Merkittävä patentti VTT:n kehittämälle pienydinreaktorin jäähdytysratkaisulle. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/kohti-puhdasta-kaukolampoa-merkittava-patentti-vtt-kehittamalle> (viitattu 11.4.2023).
- VTT, n.d. Ydinennergian tulevaisuus. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/ydinennergian-tulevaisuus> (viitattu 9.3.2023).
- Whitaker, J.M., 2019. Uranium Enrichment Plant Characteristics - A Training Manual for the IAEA. Saatavissa: <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub132067.pdf> (viitattu 29.3.2023).