

Meri Suksi

PIENET MODULAARISET REAKTORIT

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
11/2019

TIIVISTELMÄ

Meri Suksi: Pienet modulaariset reaktorit (Small Modular Reactors)
Kandidaatintyö, 24 sivua
Tampereen yliopisto
Energia- ja prosessitekniikka
11/2019

Avainsanat: SMR-voimala, modulaarisuus, ydinvoima

Pienet modulaariset reaktorit ovat ydinvoimaloita, jotka ovat teholtaan alle 300 MW ja kootaan moduuleista. Tutkielmassa käydään läpi yleisimpien SMR-voimaloiden toimintaperiaatteita ja esimerkkejä. Esiteltävät reaktorityypit on eroteltu niiden hidastinaineen mukaan ja ne ovat kevytvesireaktori, raskasvesireaktori, nestemäisellä metallilla jäähdytettävä reaktori ja kuulakekoreaktori. Tutkielmassa esiteltävät esimerkit ovat KLT-40s, NuScale, PHWR-220, PRISM ja HTR-PM.

Tutkielmassa käydään erilaisten SMR-voimaloiden lisäksi niiden hyötyjä ja ongelmia. SMR-voimaloiden pieni teho helpottaa niiden yhdistämistä sähköverkkoon, joten ne voisivat korvata olemassa olevia voimalaitoksia. SMR-voimalat voivat myös auttaa sähköverkon tasapainon ylläpitämisessä. Tämän lisäksi moduuleista koottavia SMR-voimaloita voitaisiin rakentaa syrjäseuduille ja ne voivat tuottaa myös lämpöä. SMR-voimalat ovat myös turvallisempia kuin suuret ydinvoimalat, sillä ne ovat teholtaan pienempiä ja käyttävät passiivisia turvajärjestelmiä.

SMR-voimaloiden ongelma on se, että ne ovat vielä kehitysvaiheessa. Ei ole vielä olemassa montaa kaupalliseen käyttöön tarkoitettua konseptia, joita olisi myös testattu. SMR-voimalat vaatisivat myös muutoksia lainsäädäntöön. SMR-voimaloissa on uutta tekniikkaa, joka vaatii hyväksynnän ja ison ydinvoimalan lupaprosessi on hidas ja vaikea soveltaa SMR-voimaloille. Taloudellisesti iso ydinvoimala on monissa laskelmissa osoittautunut kustannushinnaltaan halvemmaksi kuin SMR-voimala. Toisaalta SMR-voimaloiden kustannushintaa saadaan alemmaksi, kun niitä rakennetaan useita.

SMR-voimalat voivat olla monelle maalle niiden ensimmäinen ydinvoimalaprojekti. Ne voivat myös tarjota ratkaisun, kun halutaan päästä eroon fossiilisista polttoaineista. Tämä kuitenkin vaatii muutoksia lainsäädäntöön ja SMR-voimaloiden kehittämistä ja testaamista, jotta niistä tulisi taloudellisesti kannattavia.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ERILAISET SMR-MALLIT	3
2.1 Kevytvesireaktori	3
2.2 Raskasvesireaktori	6
2.3 Nestemäisellä metallilla jäähdytetty reaktori.....	8
2.4 Kuulakekoreaktori	10
3. SMR-VOIMALOIDEN HYÖDYT JA KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET	12
3.1 Energiantuotanto	12
3.2 Turvallisuus.....	14
3.3 Taloudellisuus.....	15
4. SMR-VOIMALOIDEN ONGELMAT	17
4.1 Käytännöllisyys	17
4.2 Taloudellisuus ja lainsäädäntö	18
4.3 Ympäristötekijät	19
5. TULEVAISUUS.....	20
6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	22
LÄHTEET	23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

HTR	High-temperature reactor, korkean lämpötilan reaktori, kaasujäähdytteinen
LMR	Liquid metal cooled reactor, nestemäisellä metallilla jäähdytetty reaktori
LWR	Light water reactor, kevytvesireaktori
PBR	Pebble-bed reactor, kuulakekoreaktori
PHWR	Pressurized heavy-water reactor, raskasvesireaktori
SMR	Small modular reactor, pieni modulaarinen reaktori
STUK	Säteilyturvakeskus
U235	Uraanin isotyyppi, jossa on atomin ytimessä 92 protonia ja 143 neutronia.

1. JOHDANTO

Energiantuotannossa primäärienergia muutetaan sekundäärienergiaksi, jolloin sitä on helpompi hyödyntää, esimerkiksi sähkön tai lämmön muodossa. Primäärienergia tarkoittaa energialähteiden sisältämää energiamäärää. Tällä hetkellä International Energy Agencyn (2017) mukaan maailmassa noin 80 prosenttia sekundäärienergiasta tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla. Energiantuotanto on kuitenkin murrosvaiheessa, sillä koko ajan lisääntyvä tarve vähentää kasvihuonepäästöjä ja ympäristökuormitusta, joita varsinkin fossiiliset polttoaineet aiheuttavat. Energiansaannin tarve myös kasvaa, koska kehittyvät maat nostavat elintasoaan. Energiantuotannon tekniikka kehittyikin koko ajan, ja uudenlaisia voimalaitosmalleja kehitetään lisää.

Tässä tutkielmassa käsitellään pieniä modulaarisia reaktoreita, jotka ovat uuden ajan energian tuotantolaitoksia. Tutkielmassa käytetään pienistä modulaarisista reaktoreista kansainvälisesti tunnettua lyhennystä SMR (Small modular reactor). Yksi tapa määritellä SMR-voimaloita on se, että ne ovat tuotantokapasiteetiltaan alle 300 MW reaktoreita (Rowinski et al. 2015). Toinen SMR-voimaloiden määrittelyperuste on se, että ne voidaan rakentaa moduuleista, eli voidaan rakentaa helpommin kuin tavalliset ydinvoimalat (Ingersoll & Carelli 2014). Yksinkertaistettuna SMR-voimalat ovat pienikokoisia ydinvoimaloita, sillä vaikka niillä on normaalia pienempi kapasiteetti, niiden toimintaperiaate on samankaltainen isojen ydinvoimaloiden kanssa.

Tutkielmassa perehdytään SMR-voimaloiden toimintaperiaatteisiin, hyötyihin ja ongelmiin. Tutkielmassa selvitetään voimaloiden toimintaperiaatteita ja sitä, minkälaisia SMR-voimaloita on olemassa tai suunnitteilla. Erilaisia SMR-voimaloiden prototyyppejä on paljon, mutta kaikkia SMR-voimaloiden prototyyppejä ei ole pakosti järkevä toteuttaa käytännön tai taloudellisista syistä (Rowinski et al. 2015). Tämän takia tutkielmassa keskitytään pääasiassa yleisimpiin malleihin, joita on eniten testattu. Erilaisten reaktorimallien lisäksi selvitetään, millaisia käyttötarkoituksia SMR-voimaloilla on eli minkälaisia hyötyjä voidaan saavuttaa niiden avulla. Tutkitaan myös voimaloiden ongelmia eri näkökulmien kautta. Tutkielmassa pohditaan myös SMR-voimaloiden tulevaisuutta ja asemaa energia-alalla.

Erilaisia reaktorimalleja on paljon, ja niiden pääpiirteitä avataan luvussa kaksi. Luvussa kaksi esitellään myös jokaista reaktorimallia vastaava SMR-voimala. Luvussa kolme tutkitaan hyötyjä sähköntuotannon, lämmöntuotannon ja muiden tekijöiden perusteella. Vastaavasti luvussa neljä käsitellään reaktoreiden ongelmia, jotka voivat olla esteenä niiden yleistymiselle energiantuotannossa. Ongelmia tarkastellaan teknisen, lainsäädännöllisen, ympäristöllisen ja taloudellisen näkökulman kautta. Ongelmien ja hyötyjen tutkimisessa voidaan käyttää avuksi vertailua, jossa SMR-voimaloita verrataan isoihin ydinvoimaloihin tai vaihtoehtoisesti muihin SMR:ien kapasiteettia vastaaviin energiantuotantomuotoihin. Luvussa viisi kartoitetaan myös SMR-voimaloiden tulevaisuutta energia-alalla. Luvussa kuusi tehdään edellä mainittujen toimintaperiaatteiden, vertailuiden ja tulevaisuuden näkökulman avulla yhteenveto SMR-voimaloista ja pohditaan, millainen ratkaisu SMR on energiantuotannon kannalta.

2. ERILAISET SMR-MALLIT

Luvussa käsiteltävien SMR-voimaloiden toiminta perustuu fissioreaktioon. Fissioreaktiossa neutroni osuu raskaan atomin ytimeen aiheuttaen atomin hajoamisen lähes samankokoisiin radioaktiivisiin ytimiin. Jakautuessa ytimestä vapautuu uusi neutroni, joka lähtee ketjureaktiolla kohti seuraavan atomin ydintä. Atomin hajotessa vapautuu energiaa, josta lämpöenergia siirretään jäähdytysaineen avulla pois. Tällä lämpöenergialla lämmitetään höyryä, joka kulkee läpi turbiinin tuottaen sekundäärienergiaa. Fissioreaktion toimimiseksi on tärkeää saada hidastettua neutronia, jotta ytimen hajoaminen saadaan tapahtumaan. Tämä tapahtuu käyttäen reaktiossa hidastinainetta, jolle neutroni luovuttaa osan energiastaan. Fissiossa käytetään raskaita atomeja, jotta ketjureaktio saadaan aikaiseksi. Tämän takia yleisimmät fissioreaktiossa käytetyt atomit ovat uraanin ja plutoniumin isotoopit. (Barre 2012)

Seuraavaksi käsitellään monipuolisesti erilaisia reaktorimalleja, joista World Nuclear Associationin (2019) mukaan on rakennettu tai on suunnitteilla rakentaa SMR-voimala. Reaktorimallit on luokiteltu hidastinaineen mukaan. Luvussa esiteltävät tyypit ovat painevesireaktori, raskasvesireaktori, nestemäisellä metallilla jäähdytetty reaktori ja kuulakeko-reaktori. Jokaisesta reaktorimallista annetaan havainnollistava esimerkki, jonka erityispiirteitä käydään läpi.

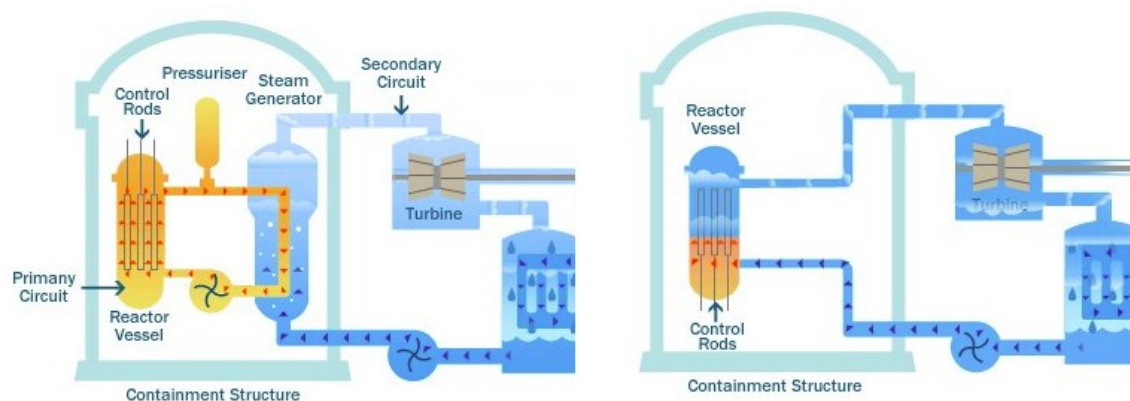
2.1 Kevytvesireaktori

Kevytvesireaktorin nimi tulee siitä, että vettä käytetään reaktorimallissa sekä jäähdytysaineena että neutronien hidastinaineena. Kevytvesireaktorit ovatkin yleisin reaktorimalli, ja yleisesti kevytvesireaktorista käytetään englanninkielistä lyhennettä LWR (Light Water Reactor). (Barre 2012) Kevytvesireaktorimalleja on kuitenkin erilaisia, ja niiden suurimpia eroja ovat veden olomuoto prosessin tietyissä vaiheissa sekä se, käytetäänkö suljettuja vai avoimia vesikiertoja. Yleisimmät kevytvesireaktortyypit ovat painevesireaktori ja kiehutusvesireaktori, joiden lisäksi kehitteillä on ylikriittisessä paineessa toimivia vesijäähdytteisiä reaktoreita. (Energiateollisuus ry 2009)

Painevesireaktorit on aluksi kehitetty laivastokäyttöön, josta ne ovat myöhemmin yleistyneet perinteisen ydinvoimalan reaktorimalliksi. Painevesireaktorin periaate on se, että

ylläpidetään riittävän korkeaa painetta, jotta vesi ei höyrysty korkeassakaan lämpötilassa (Energiateollisuus ry 2009). Näin ollen vesi pysyy koko ajan nestemäisessä olomuodossa primääripiirissä. Primääripiiri lämmittää lämmönsiirtimen kautta sekundääripiirissä kulkevaa vettä, joka on sen verran matalammassa paineessa, että se kiehuu ja höyry menee turbiinin läpi. Koska painevesireaktorissa vesi on jaettu kahteen eri piiriin, jossa primääripiiri on suljettu, turbiiniin menevä höyry ei ole radioaktiivista. (Kiguchi & Oka 2014)

Kiehutusvesireaktorissa vesi kiehuu höyryksi reaktorissa, koska paine on matalampi kuin painevesireaktorissa. Höyrystynyt vesi johdetaan suoraan turbiiniin, josta kerätään generaattorin avulla talteen energiaa. Kiehutusvesireaktorissa ei ole erillistä primäärikiertoa, minkä takia kiehutusvesireaktori on yksinkertaisempi toteuttaa. Koska reaktorissa käynyt vesi johdetaan suoraan turbiiniin, ei turbiinin lähelle saa mennä voimalan käytössä, koska höyry on radioaktiivista. (Energiateollisuus ry 2009) Alla olevassa kuvassa (kuva 1) on havainnollistettu painevesireaktorin ja kiehutusvesireaktorin piirejä, josta voi havaita niiden eroja.



Kuva 1: Painevesireaktorin ja kiehutusvesireaktorin piirien erot. Vasemmanpuoleinen kuvastaa painevesireaktoria ja oikealla oleva kiehutusvesireaktoria. (Nuclear Power Generation 2013)

Seuraavaksi tarkastellaan kahta pientä modulaarista reaktoria, jotka ovat malliltaan kevytvesireaktoreita. Kyseiset reaktorimallit ovat **KLT-40S** ja **Nuscale** (Ingersoll & Carelli 2014). Reaktorimalleja käydään läpi lyhyesti ja tutkitaan niiden ominaispiirteitä ja kerrotaan, missä vaiheessa niiden kehitys on. Kyseiset reaktorimallit kuuluvat tunnetuimpiin SMR-voimaloihin, jotka ovat tyypiltään kevytvesireaktoreita (Ingersoll & Carelli 2014). SMR-malleissa on yleisestikin eniten kevytvesireaktortyyppisiä, mutta se ei kuitenkaan tarkoita sitä, että se olisi paras tyyppi SMR-voimaloille.

KLT-40S on reaktortyyppi, jonka on suunnitellut venäläinen yritys nimeltä OKBM Afrikantov. Se on malliltaan painevesireaktori, joka käyttää polttoaineena uraanioksidia, joka

on rikastettua niin, että U235-pitoisuus on alle 20 %. Yhden KLT-40S reaktorin sähkötehon kapasiteetti on noin 35 MW ja pelkän lämpötehon kapasiteetti on noin 150 MW. (International Atomic Energy Agency 2013) Ulkomuodoltaan KLT-40S muistuttaa vanhoja reaktorimalleja, joita on käytetty sukellusveneissä ja jäänmurtajissa. Tämä onkin järkevää, sillä KLT-40S on suunniteltu sopimaan kelluvaan ydinvoimalaan. Kelluva ydinvoimala on uudenlainen konsepti, jota on Venäjän lisäksi lähtenyt kehittämään muutama muukin maa. Venäjällä on kuitenkin useisiin maihin verrattuna enemmän kokemusta ydinreaktoritekniikasta, jota ne ovat voineet hyödyntää suunnittelussa. Ydinkäyttöisten jäänmurtajien ja sukellusveneiden tekniikkaa voidaan hyödyntää myös kelluvan ydinvoimalan turvallisuuden suunnittelussa. Koska kyseessä on alus, reaktorit on suunniteltu toimimaan siten, että polttoainelataukselle on tarvetta vain 3–4 vuoden välein. Tämän lisäksi alus on suunniteltu hinattavaksi huoltoon 12 vuoden välein ja laitoksen käyttöaika olisi 40 vuotta. (Rowinski et al. 2015)

Ensimmäinen alus, johon on rakennettu kaksi KTL-40S reaktoria, on nimeltään Akademi Lomonosov ja kyseistä laitosta alettiin rakentamaan vuonna 2007. Aluksen pelkkä sähköteho on 70 MW ja pelkkä lämpöteho 300 MW. (International Atomic Energy Agency 2013) Vuoden 2018 keväällä alus siirrettiin Pietarista Muurmanskiin, jossa siihen syötettiin polttoaine. Aluksen koekäyttö aloitettiin marraskuussa 2018 ja laitoksen olisi tarkoitus aloittaa tuotanto vuonna 2019. (Nilsen 2018)

NuScale on yhdysvaltalaisen NuScale Powerin kehittämä SMR-voimala, joka on tyypiltään kevytvesireaktori. Tarkemmin kyseessä on integroitu painevesireaktori, mikä tarkoittaa sitä, että primääripiiri on rakennettu paineastian sisään. NuScale-reaktorin sekundääripiirissä turbiinin tuottaman sähkötehon kapasiteetti on 60 MW ja pelkän lämpötehon kapasiteetti on noin 200 MW. (NuScale Power 2019) NuScale-reaktori on suunniteltu siten, että se toimii luonnonkierrolla, eli esimerkiksi erillisiä pumppuja ei tarvita. Suunnittelun takia reaktorimalli on hyvin kompakti ja yksinkertainen, mikä auttaa moduuliyksiköiden yhdistämisessä. NuScale onkin suunniteltu niin, että jopa 12 moduuliyksikköä pystytään liittämään yhteen. Jokainen yksikkö toimii kuitenkin itsenäisesti, mikä on turvallisuuden kannalta tärkeätä, koska vikaantunut yksikkö voidaan vain eristää. Polttoaineena NuScale-reaktori käyttää uraanioksidia, jossa U235-pitoisuus on alle 5 %. (NuScale Power 2019) Polttoaineen lataus suoritetaan aina kahden vuoden välein (NuScale Power 2019) ja laitoksen käyttöäikäksi on arvioitu 60 vuotta. (Ingersoll et al. 2014)

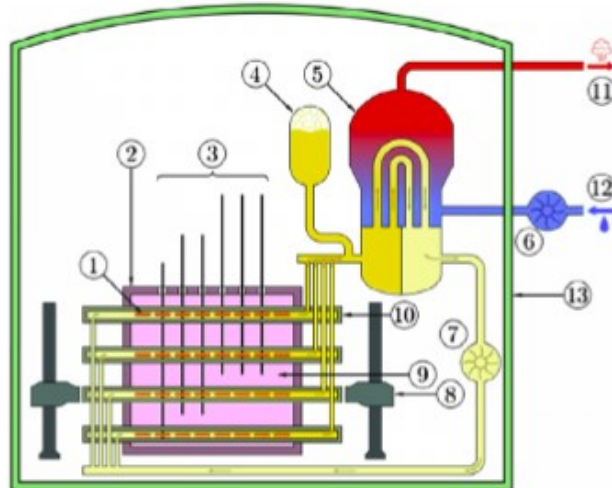
Vuonna 2015 alettiin kehittämään ensimmäistä NuScale-voimalaa Idahoon. Alustavan aikataulun mukaan tuotannon olisi osittain tarkoitus käynnistyä vuonna 2026. Kyseessä

olisi 12 moduulista koostuva voimalaitos, jonka sähkötehon kokonaiskapasiteetti olisi noin 685 MW. Vaikka reaktori on vielä kehitysvaiheessa, niin NuScale on kuitenkin ensimmäisiä kaupalliseen käyttöön tarkoitettuja SMR-voimaloita. (Black & Peterson 2019)

2.2 Raskasvesireaktori

Raskasvesireaktorissa jäähdytinaineena ja hidastimena toimii raskas vesi. Raskas vesi koostuu vesimolekyyleista, jotka rakentuvat yhdestä happiatomista ja kahdesta deuteriumatomista. (Energiateollisuus ry 2009) Deuterium on vedyn raskaampi isotooppi ja se eroaa vedystä siten, että atomin ydin koostuu protonista ja neutronista, kun taas tavallisen vedyn ydin koostuu vain protonista. Deuterium on siis kaksi kertaa painavampi kuin vety, mikä selittää yhdisteen nimen. Raskasvesireaktoreista käytetään yleensä lyhennystä PHWR (Pressurized heavy-water reactor). Lyhennyksestä voidaan huomata, että raskasvesireaktorit ovat tyypiltään samankaltaisia painevesireaktorien kanssa. Raskaan veden käyttäminen mahdollistaa sen, että polttoaineena voidaan käyttää suoraan luonnonuraa, jossa U235-pitoisuus on noin 0,7 %. Kevytvesireaktoreissa taas on aina tarve rikastaa polttoainetta, jotta U235-pitoisuus saadaan sopivaksi. (Barre 2012)

Raskasvesireaktorit ovatkin olleet kiinnostavia juuri sen takia, että niissä voi suoraan hyödyntää luonnonuraa. Luonnonuraanin käyttäminen on mahdollista sen takia, että raskas vesi hidastaa enemmän neutroneita ja absorboi niitä vähemmän kuin kevyt vesi. Raskaan veden hyvän neutronitalouden takia fissioreaktiolle on paremmat olosuhteet, jolloin polttoaineen U235-pitoisuus voi olla matala. Raskasvesireaktorissa, kuten kevytvesireaktoreissakin U235 on se aine, joka pääasiassa osallistuu fissioreaktioon. Raskasvesireaktorin yksi ongelma on se, että raskas vesi on kallista, joten on tärkeätä rakentaa reaktori siten, että raskasta vettä pystytään kierrättämään reaktorissa. Raskasvesireaktoreita on kehitetty ja rakennettu monissa maissa, joista Kanada on pisimmällä. Kanadassa on paljon luonnonuraa, joten maalla on ollut kiinnostusta kehittää reaktoreita, jotka voisivat hyödyntää sitä suoraan. (Barre 2012) Tunnetuin raskasvesireaktori on kanadalainen CANDU- reaktori, jonka periaatekuva on esitelty alla (Kuva 2).



Kuva 2: CANDU-reaktori. Primääripiiri on merkitty keltaisella. Numeroitujen osien nimet: 1. Polttoainenippu, 2. Reaktoriastia, 3. Säätsauvat, 4. Raskaan veden varasto, 5. Höyrystin, 6. Kevyen veden pumppu, 7. Raskaan veden pumppu, 8. Polttoaineen siirtolaitteet, 9. Hidastinaine, 10. paineputki, 11. Turbiinista poistuva höyry, 12. Turbiinin jälkeen palaava jäähtynyt vesi, 13. Reaktorirakennus. (Barre 2012)

Raskasvesireaktorit eivät ole yhtä yleisiä kuin kevytvesireaktorit. Esimerkiksi vuoden 2017 lopulla raskasvesireaktoreiden osuus maailman ydinvoimaloista oli noin 10 % (World Nuclear Association 2018). Niissä on kuitenkin potentiaalia, koska ne pystyvät toimimaan luonnonuraanilla. Tämän takia on myös kehitetty SMR-voimaloita, jotka olisivat malliltaan raskasvesireaktoreita. Seuraavassa luvussa (2.2.1.) käsitellään yhtä SMR-voimalaa, joka on malliltaan raskasvesireaktori. Kyseinen SMR-voimala on nimeltään **PHWR-220**.

PHWR-220 on alun perin kanadalaisten ja intialaisten suunnittelema raskasvesireaktori, josta intialaiset kehittivät myöhemmin oman lopullisen mallinsa. Reaktorin sähkötehon kapasiteetti on 235 MW ja lämpötehon kapasiteetti on 755 MW, jolloin reaktori voidaan luokitella SMR-voimalaksi. (Ingersoll & Carelli 2014) Verrattuna edellä esiteltyihin kevytvesireaktoreihin, niin PHWR-220 on selvästi teholtaan isompi SMR-voimala. Malliltaan PHWR-220 muistuttaa paljon kanadalaista CANDU-reaktoria, joka on toiminutkin esikuvana reaktorille. Reaktorien polttoaineena käytetään luonnon uraanioksidia ja jäähdytysaineena ja hidastimena toimii raskas vesi. (World Nuclear Association 2019) Polttoaineen syöttö toimii jatkuvasti, mikä onnistuu siten, että reaktoriin on rakennettu kaksi eri puolilla sijaitsevaa polttoaineen syöttölaitetta, jolloin ne voivat operoida tauotta. (Ingersoll & Carelli 2014) PHWR-220 on jo käytännössä toimiva reaktori (World Nuclear Association 2019).

Toistaiseksi on rakennettu 16 PHWR-220-laitosta ja niistä ensimmäinen on aloittanut toiminnan vuonna 1973. Pääasiassa reaktorit on sijoitettu niin, että samassa laitoksessa on kaksi reaktoria. Tällöin ne myös jakavat keskenään osan laitoksen järjestelmästä, eli eivät toimi täysin itsenäisesti. Laitokset on suunniteltu myös niin, että ne täytyy huoltaa suunnilleen kahden vuoden välein ja niiden käyttöikä on 40 vuotta. Koska laitoksia on ollut käytössä jo pidemmän aikaa, niin PHWR-220-reaktoria on pystytty jatkuvasti kehittämään. Tavoitteena on lyhentää rakennusaikaa, johon pyritään esimerkiksi sillä, että luodaan enemmän valmiita moduuleita rakennusosista, jotka lyhentävät rakennusaikaa. (International Atomic Energy Agency 2011)

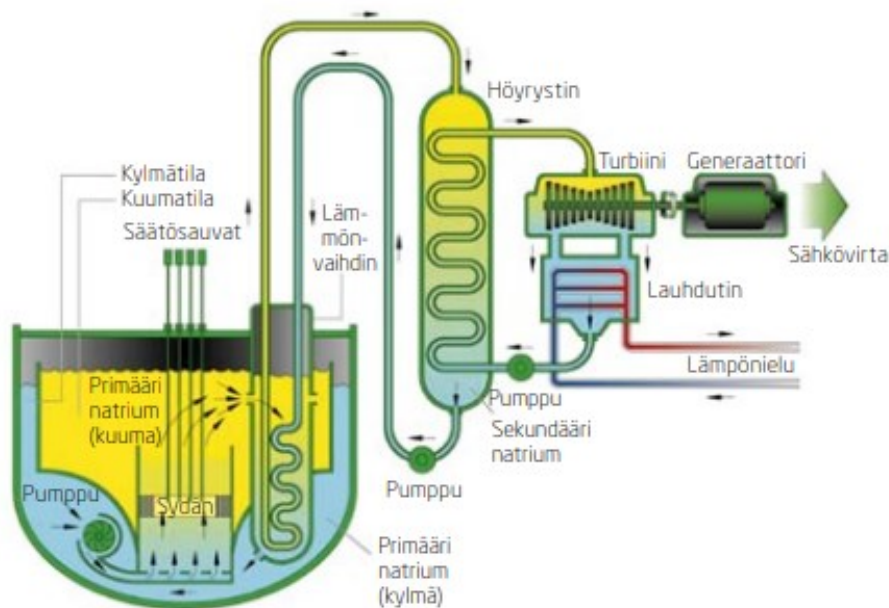
2.3 Nestemäisellä metallilla jäähdytetty reaktori

Nestemäisellä metallilla jäähdytettävän reaktorin yleisin lyhenne on LMR (Liquid metal cooled reactor) ja nimestä voi jo päätellä, että reaktorin jäähdytysaineena toimii nestemäinen metalli. LMR-mallia kutsutaan usein myös nopeaksi reaktoriksi tai hyötöreaktoriksi. LMR-malli ei tarvitse erillistä hidastinta, koska tarkoituksena on, että neutronit pysyvät liikkumaan mahdollisimman nopeasti. Näin voidaan hyödyntää nopeaa neutronispektriä siten, että saadaan korkean energian vuorovaikutuksen osuus paremmaksi. Tämä on nopean reaktorin toiminta-ajatus. (Energiateollisuus ry 2011) Hyötöreaktorin toimintaperiaate taas on se, että se tuottaa omaa halkeamiskelpoista polttoainetta syötetystä polttoaineesta, jolloin tuotettu sähköteho kasvaa (Energiateollisuus ry 2009). Nestemäinen metalli, jota käytetään jäähdyttimenä ei absorboi neutroneita, mikä parantaa fissioreaktion neutronitaloutta. Hyvän neutronitalouden ansiosta jää ylimääräisiä neutroneita, jotka auttavat lisäämään polttoainetta.

Yleisimmät nestemäiset metallit, joita käytetään jäähdytykseen ovat natrium ja lyijy (Rowinski et al. 2015). Sula natrium on hyvä jäähdyte ja sen avulla reaktio voidaan toteuttaa matalassa paineessa. Natriumia käyttäessä ei myöskään tarvita niin suurta virtausnopeutta. Vaikeuksia syntyy turvallisuuden kanssa, sillä natrium reagoi herkästi veden ja ilman kanssa, minkä vuoksi reaktori pitää eristää. Lyijy on natriumia raskaampaa ja sitä on kokeiltu reaktoreissa pelkästään tai lyijyn ja vismutin seoksena. Lyijyn lämmönsiirtoominaisuuksien avulla voidaan jäähdyttää reaktoria luonnonkierrolla. Lyijy ei myöskään ole yhtä reaktiivista kuin natrium, mutta voi aiheuttaa korroosiota. Tämän takia on valittava tarkasti reaktorin materiaalit. (Energiateollisuus ry 2011)

Nestemäisellä metallilla jäähdytettäviä reaktoreita on olemassa vähän ja nekin ovat testivaiheessa. Koska LMR-mallit toimivat hyötöreaktoreina, ne voivat olla ratkaisu polttoainekriisiin, kun uraanivarannot vähentyvät. Niiden avulla voi myös poistaa pitkäikäisiä aktinideja ydinjätteestä, joka on menossa loppusijoitettavaksi. (Energiateollisuus ry 2009) Tällöin voidaan vähentää ydinjätteen radioaktiivisuutta. Iso ongelma LMR-voimaloissa on se, että niissä reaktio tapahtuu hyvin nopeasti, jolloin reaktion säätö on vaikeaa. Tällöin voi tulla ongelmatilanteita, kuten vuotoja. (Energiateollisuus ry 2011) LMR-mallista on myös suunniteltu SMR-voimaloita. **PRISM** on eräs SMR-voimala, jossa käytetään nestemäistä metallia jäähdytteenä.

PRISM on yhdysvaltalainen LMR-reaktori, jonka suunnittelu on aloitettu jo 1980-luvulla. Jäähdytysaineena toimii natrium ja konsepti on integroitu allastyypinen reaktori. (Ingersoll & Carelli 2014) Allastyypinen reaktori tarkoittaa sitä, että reaktorin sydän, pääkiertopumput ja lämmönvaihtimet ovat sijoitettu primäärijäähdytteen täyttämään altaaseen. (Rowinski et al. 2015) Oheisessa kuvassa on esitelty natriumjäähdytteisen LMR-reaktorin toimintaperiaatetta (Kuva 3)



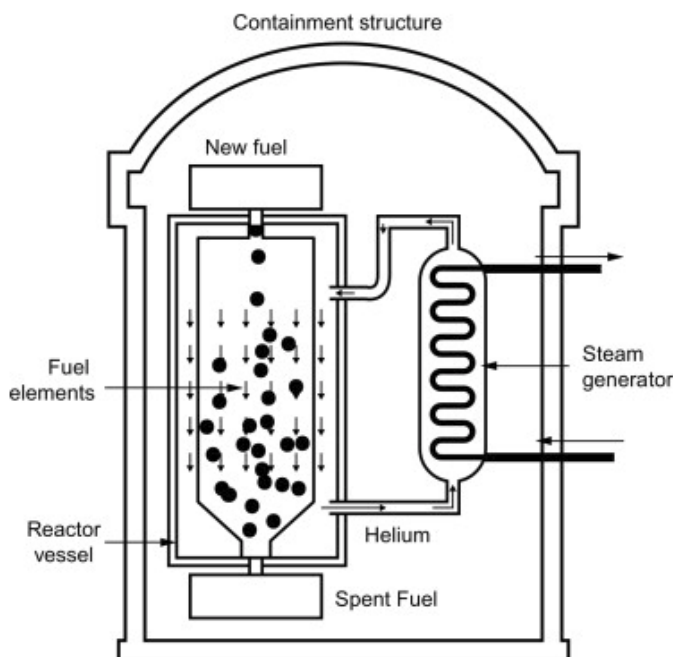
Kuva 3: Natriumjäähdytteinen LMR-reaktori, joka on malliltaan allastyypinen (Energiateollisuus ry, 2011)

Alun perin PRISM-reaktori on suunniteltu hyötöreaktoriksi, jotta uraanivarantoja voisi käyttää paremmin. Myöhemmin painopiste kuitenkin siirtyi reaktorin kyvylle käyttää ydinjätettä ja poistaa siitä vaarallisia aktinideja. GE Hitachin suunnitteleman uudemman reaktorin sähkötehon kapasiteetti on 311 MW ja lämpötehon 500 MW. Ajatuksena on, että

kaksi reaktoria yhdistetään niin, että ne jakavat turbiinigeneraattorin. (Ingersoll & Carelli 2014) Polttoaineen kierrätysversiossa reaktorissa hyödynnetään käytettyä polttoainetta. Polttoaine vaihdetaan neljän vuoden välein, mutta myös vuosittain osa polttoaineesta poistetaan ja vaihdetaan. Vaikka PRISM-reaktoria on kehitetty 30 vuotta, se ei ole vielä kaupallisessa käytössä. Vuoteen 2025 mennessä olisi tarkoitus rakentaa PRISM-mallinen reaktori, jonka avulla voidaan testata erilaisia polttoaineita ja tekniikkaa. (World Nuclear Association 2019)

2.4 Kuulakekoreaktori

Kuulakekoreaktori eli PBR (Pebble-Bed Reactor) poikkeaa selvästi edellä mainituista reaktorimalleista. Tässä mallissa hidastimena toimii yleensä grafiitti. Polttoaine on pakattu tiiviisiin mikropartikkeleihin, jotka sekoitetaan grafiittijauheen sekaan. Seoksesta puristetaan pieniä kuulia tai pellettejä. (Kiguchi & Oka 2014) Fissioreaktio tapahtuu kuulien sisällä ja ne kuumentuvat. Grafiitti kestää hyvin kuumentumista, minkä takia se toimii hidastimena. Jäähdytinaineena toimii helium, joka syötetään kaasumuodossa suoraan reaktoriin. Kaasujäähdytteinen reaktori toimii korkeissa lämpötiloissa, joten reaktorimallia voidaan kutsua myös korkean lämpötilan reaktoriksi eli HTR-malliksi (High-Temperature Reactor). Kuulakekoreaktorissa toimintalämpötila on 700–1000 °C astetta, kun taas tavallisissa kevytvesireaktoreissa toimintalämpötila on 300 °C astetta. (Energiateollisuus ry 2011)



Kuva 4: Kuulakekoreaktorin yksinkertaistettu toimintaperiaate. (Breeze 2014)

Ylläolevasta kuvasta (kuva 4) voidaan huomata, että uutta polttoainetta syötetään koko ajan yläkautta. Vastaavasti käytetty polttoaine poistuu alakautta. (Ingersoll & Carelli 2014) Tämän takia kuulakekoreaktoria ei tarvitse pysäyttää polttoaineen vaihtoa varten, vaan polttoaineen syöttö toimii tauotta. Koska grafiittikuulissa on todella vähän ydinreaktorille sopivaa polttoainetta, ydinjätettä syntyy enemmän, kuin tavallisissa ydinvoimaloissa. Toisaalta syntyvä ydinjäte on vähemmän radioaktiivista ja tuottaa vähemmän jälkilämpöä. (World Nuclear Association 2019) PBR on myös helppo rakentaa, koska tarvitaan vähemmän komponentteja kuin muissa ydinreaktorimalleissa. Tämän takia kuulakekoreaktori on potentiaalinen konsepti SMR-voimalalle. Tällaisia SMR-voimaloita on kehitteillä jo muutamia, mutta esimerkkinä toimii **HTR-PM**, joka on kenties tunnetuin.

HTR-PM on kiinalaisten kehittämä kuulakekoreaktori. Hidastinaineena toimivasta grafiitista muodostetaan kuulia, joiden halkaisija on kuusi senttimetriä. Jäähdytinaineena käytetään heliumia. Reaktorin toimintalämpötila on 750 °C. HTR-PM-voimalan on tarkoitus olla kaupallinen versio HTR-10-reaktorista, jolla on testattu kuulakekoreaktorin toimivuutta ja turvallisuutta. HTR-PM-laitoksen sähkötehon kapasiteetti on 250 MW. (World Nuclear Association 2019) Koska polttoainetta syötetään koko ajan, erillistä polttoainelatausta ei tarvita. Laitoksen oletettu elinikä on 40 vuotta. (Ingersoll & Carelli 2014) HTR-PM on suunniteltu sekä sähköntuotantoon että vedynvalmistukseen.

HTR-PM-voimala on suunniteltu toteutettavan niin, että siinä on kaksi reaktoria yhdessä, eli sähkötehon kapasiteetti olisi noin 500 MW. Kiinaan on jo rakenteilla ensimmäinen HTR-PM-voimala, jonka on tarkoitus tuottaa sähköä jo vuonna 2019. Voimalaan on jo tuotu polttoaine ja painetestit ovat menneet läpi. Tulevaisuudessa on suunnitelmissa rakentaa Kiinaan useita HTR-PM-voimaloita. Tämän lisäksi kehitystiimi harkitsee kapasiteetin nostamista ja toriumin kokeilua polttoaineena. (World Nuclear Association 2019)

3. SMR-VOIMALOIDEN HYÖDYT JA KÄYTTÖ-MAHDOLLISUUDET

SMR-voimaloiden hyödyistä on tehty paljon tutkimuksia. Voimaloille on myös pohdittu erilaisia käyttömahdollisuuksia, kuten luvussa 2.4. mainittu vedynvalmistus. Tässä osiossa keskitytään tarkastelemaan SMR-voimalaa pääasiassa positiivisesta näkökulmasta. Voimalan hyötyjä ja käyttömahdollisuuksia käsitellään energiantuotannon, turvallisuuden ja taloudellisuuden näkökulmasta.

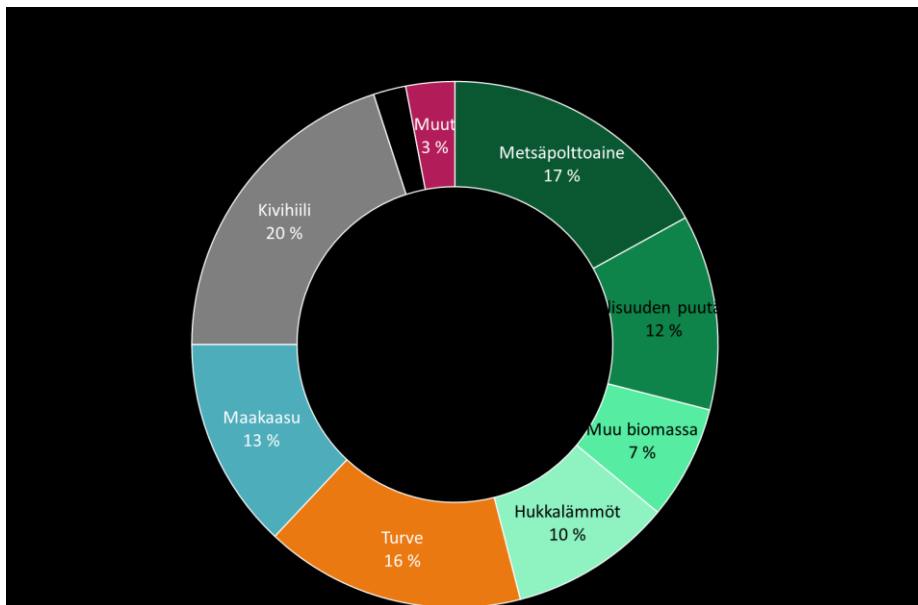
3.1 Energiantuotanto

SMR-voimalat ovat selvästi pienempiä kuin normaalit ydinvoimalat. Pienestä koosta on kuitenkin hyötyä energiantuotannossa. Yhdysvalloissa on tällä hetkellä poistumassa käytöstä useita hiilivoimaloita ja muita fossiililla polttoaineilla toimivia voimaloita. Syynä tähän on pääasiassa se, että voimaloiden käyttöikä on täyttynyt. (Lokhov, et al. 2013) Sama tapahtuu myös muualla maailmassa. Fossiilisia voimalaitoksia suljetaan myös siksi, että halutaan siirtyä vihreämpään energiantuotantoon. Tämän takia tarvitaan ratkaisuja korvaamaan energiantuotantoon syntyvää vajetta. SMR-voimaloiden tehot vastaavat hyvin fossiilisten voimaloiden tehoja, joten niillä voisi suoraan korvata vanhat voimalat.

Toinen hyöty SMR-voimaloiden pienestä koosta ja yksinkertaisuudesta on se, että niitä voi rakentaa helpommin syrjäisille alueille. Tämä auttaa sellaisia alueita, joille on ollut vaikeuksia saada sähköä ja lämpöä, koska ei ole ollut kannattavaa rakentaa kattavaa sähköverkkojärjestelmää. (Lokhov et al. 2013) Pienemmät SMR-voimalat vaativat myös vähemmän jäähdytysvettä, jolloin niitä voisi rakentaa kauemmas isoista vesistöistä (World Nuclear Association 2019). Tietenkin, jos voimalaitos jäähdytetään muulla kuin vedellä, ei vesistön läheisyys ole muutenkaan tarpeellista. Kokonsa takia SMR-voimaloita voisi myös rakentaa teollisuuden omaan käyttöön tuottamaan prosesseihin tarvittava energia. SMR-voimalat vaativat myös pienemmän suoja-alueen, jolloin niitä voi rakentaa lähemmäksi asutusta. Tämä johtuu siitä, että SMR:t ovat pienitehoisia, jolloin onnettomuustilanteissa vahingon laajuus on pienempi. (Ingersoll & Carelli 2014)

SMR-voimaloiden pienen tehon ansioista ne on helpompi liittää verkkoon (Ingersoll & Carelli 2014). Tarkastellaan esimerkiksi Olkiluoto 3:a, jonka sähköntuotannon kapasiteetti on 1600 MW. Olkiluoto 3:n rakentamisessa pitää ottaa huomioon se, miten se liitetään sähköverkkoon. Suomessa sähköverkko toimii 50 Hertzin taajuudella, mutta taajuus muuttuisi rajusti, jos Olkiluoto 3 tippuisi sähköverkosta. Tämä aiheuttaisi Suomessa sen, että sähkönsaannissa ilmenisi huomattavia vaikeuksia. Kyseinen uhkakuva onkin estetty sillä, että Olkiluoto 3:een on tehty järjestelmäsuoja, joka pienentää sähkönkulutusta, jos laitos tippuu verkosta. (Fingrid Oyj 2019) Tällaisia toimenpiteitä ei tarvitse tehdä, kun kyseessä on SMR-voimala, jonka tippuminen verkosta ei aiheuta sähköpulaa. SMR-voimalat on pääasiassa ajateltu toteutettavan niin, että niitä voi rakentaa useita vierekkäin eivätkä ne varsinaisesti vaikuta toisiinsa. Eli yhden tippuessa verkosta loput saattavat silti pysyä verkossa.

SMR-voimalan voi teknisesti rakentaa niin, että sitä voi käyttää myös lämmöntuotannossa. Voimalaitoksen käyttämistä lämmöntuotannossa auttaa se, että SMR-voimalan teho on yhteensopiva jo olemassa olevien lämmönjakeluverkkojen kanssa. (Lokhov, et al. 2013) Lämmöntuotanto on merkittävää sen takia, että esimerkiksi Suomessa lämmöntuotannossa käytetään paljon fossiilisia polttoaineita, kun taas sähköntuotanto on selvästi vihreämpää. Tämän voi havaita alla olevasta kuvasta (kuva 5), jossa esitellään Suomen kaukolämmön tuotantomuotoja.



Kuva 5: Suomen kaukolämmön tuotantomuodot vuonna 2018. (Energiateollisuus ry 2019)

Samanlaista eroa on havaittavissa myös muualla maailmassa. Lämmöntuotannossa jäähditys on myös vähäisempää, jolloin laitoksen paine on alhaisempi. Tämä mahdollistaa monipuolisemmin teknologian hyödyntämisen, esimerkiksi turvallisuuden parantamisessa. (Energiateollisuus ry 2009)

3.2 Turvallisuus

Turvallisuus on tärkeä tekijä SMR-voimaloiden suunnittelussa. Tavoitteena on rakentaa voimaloita, jotka olisivat mahdollisimman turvallisia. Kuuluisat ydinvoimalaonnettomuudet ovat saaneet aikaan sen, että ydinvoimaa pelätään. Tämän takia uudet voimalat on suunniteltu niin, että kaikki mahdolliset vaaratekijät on otettu huomioon. Uudenlainen tekniikka on edesauttanut ydinvoimaloiden rakentamista sellaisiksi, että niiden ei pitäisi aiheuttaa vaaraa onnettomuustilanteissa. (Ingersoll & Carelli 2014) Ydinvoimalaonnettomuudet ovat suuruusluokaltaan sen verran isoja, että on välttämätöntä luoda mahdollisimman turvallinen voimalaitos.

SMR-voimaloiden tärkein turvallisuustekijä on se, että niiden turvajärjestelmät pyritään rakentamaan passiivisiksi. Passiivisuus turvajärjestelmissä tarkoittaa sitä, että niiden toimiminen ei vaadi ulkopuolista voimaa, eli esimerkiksi sähköä. (World Nuclear Association 2019) Tämä tarkoittaa sitä, että hälytyksen tullessa voimalan turvallisuusjärjestelmät toimivat itsenäisesti, eikä kenenkään tarvitse ohjata toimintaa. Passiivisuus vähentää tarvetta aktiivisiin turvajärjestelyihin, jotka koostuvat useimmista komponenteista. Passiivisella järjestelmällä pystytään siis vähentämään varalaitteistoa, eli järjestelmä on yksinkertaisempi. (Energiateollisuus ry 2011) Passiivinen turvajärjestelmä nopeuttaa reagointiaikaa ja poistaa inhimilliset virheet onnettomuustilanteissa. Osa SMR-voimaloista on suunniteltu niin, että useampi moduuliyksikkö on rakennettu vierekkäin. Tällöin turvajärjestelmät on suunniteltu niin, että vikaantunut yksikkö voidaan eristää muista turvallisesti, eli koko laitosta ei tarvitse sulkea. (World Nuclear Association 2019) Passiivinen jäähditys toimii luonnollisella kierrolla, eli ei tarvita pumppuja. Pienillä SMR-voimaloilla ei ole niin suuri jäähditystarve, minkä takia passiivinen turvajärjestelmä sopii voimaloille. Iso ydinvoimala vaatii jäähdyttämiseen pumppuja, jotka toimivat sähköllä. (Energiateollisuus ry 2011)

SMR-voimalat on kehitetty niin, että ne ovat kompakteja ja yksinkertaisia rakentaa. Tämä mahdollistaa sen, että voimalan voisi rakentaa maan alle. Maan alle rakentamisessa on

se hyöty, että pystytään suojautumaan paremmin luonnonkatastrofeilta. Maan alle rakennettu voimala on myös helpompi eristää ympäristöstä, jolloin laajojen ympäristövahinkojen riski on pieni. (World Nuclear Association 2019)

SMR-voimaloissa on myös otettu huomioon ympäristö. Passiiviset turvajärjestelmät pyrkivät siihen, ettei ympäristöön pääse vaarallista säteilyä (World Nuclear Association 2019). Koska SMR-voimalat ovat myös pienempiä kuin tavalliset ydinvoimalat, radioaktiivisen polttoaineen ja ydinjätteen määrä on vähäisempi. Tämän lisäksi kehitetään hyötöreaktoreita, joiden yksi toimintaidea on uusiokäyttää käytettyä ydinpolttoainetta. Tästä kerrottiin tarkemmin luvussa 2.3. Hyötöreaktorit voisivat käyttää isojen ydinvoimaloiden ydinjätteen uudelleen, jolloin ydinjätteen määrä pienenis. Tällaista kutsutaan suljetuksi polttoainekierroksi. Ydinjätteen määrä ja radioaktiivisuus vähentyisi suljetussa polttoainekierrossa.

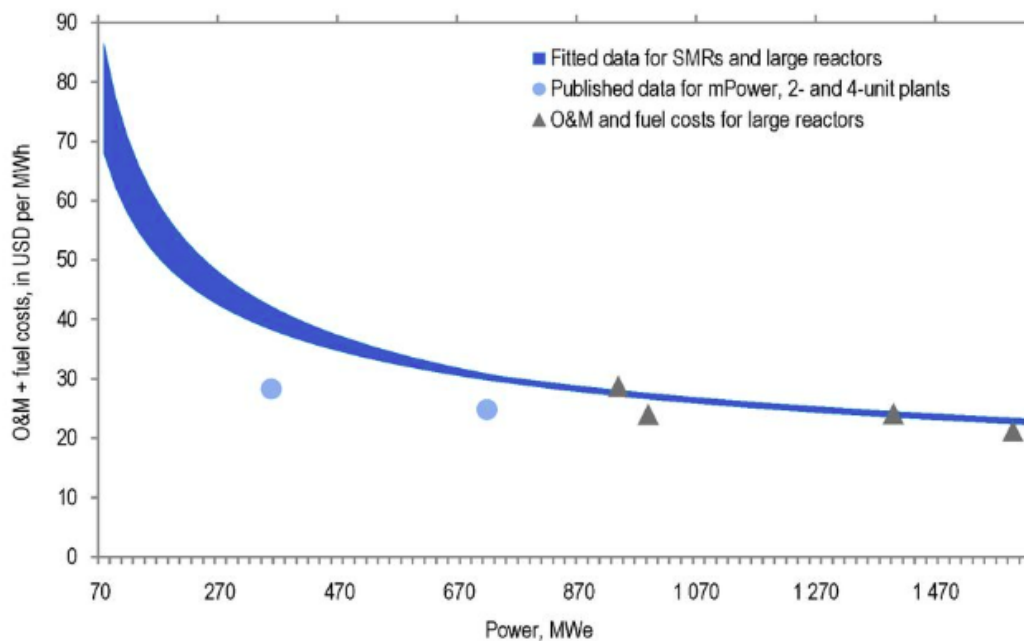
3.3 Taloudellisuus

Ydintekniikka on ollut alun perin valtioiden rahoittamaa ja tukemaa, koska tekniikan pääidea oli kehittää aseellisuutta. Nykyäänkin ydinvoimalat ovat sen verran suuria investointeja ja turvallisuusriskejä, että valtion tuki on pakollista rakentamisen mahdollistamiseksi. Kuitenkin monien uusien SMR-ydinvoimalahankkeiden rahoitukset koostuvat pääosin yksityisistä sijoittajista, jotka usein toimivat energia-alalla. (NEA & OECD 2012) Lainsäädäntö kuitenkin määrittelee voimalaitoksien turvallisuusnäkökohdat ja rakennussäädökset. Ydinvoimalat nähdään kannattavana investointina, kun pyritään pääsemään eroon fossiilisista polttoaineista (NEA & OECD 2012). Tämän takia varsinkin pienet SMR-voimalat ovat helppoja investointikohteita (Lokhov, et al. 2013). Yksityiset sijoittajat aiheuttavat sen, että ydinvoimatekniikkaa kehitetään nimenomaan energiantuotantoon. Tämä mahdollistaa läpimurrot ydinvoimaloiden kehityksessä (NEA & OECD 2012). Luvussa kaksi huomattiin, että reaktorityyppejä on paljon erilaisia. Suurin osa tyypeistä pohjautuu vanhoihin tutkimuksiin, joissa on tutkittu ydintekniikkaa aseellisuuden kannalta. Vanhoista ideoista on alettu jalostamaan tehokkaimpia tai taloudellisesti kannattavampia versioita.

SMR-voimaloiden yksi taloudellinen tekijä on modulaarisuus. Yleensä mikä tahansa tuote muuttuu halvemmaksi, kun sitä voidaan tuottaa sarjatuotannolla. Ydinvoimalat ovat aina olleet suuria rakennusurakoita, jotka vaativat paljon aikaa ja rahaa. SMR-voimalat mahdollistaisivat sen, että rakennusaika lyhentyisi. Modulaariset reaktorit voisivat tulla

osina työmaille, jossa ne kasataan. Näin ei tarvitsisi koota kaikkea alusta asti. (Lokhov, et al. 2013) Tehdastuotannossa myös laatu olisi parempaa, koska toleranssirajat voidaan pitää tarkkoina. Tällöin ei tule niin herkästi virheellisiä tuotteita, joita joutuisi uusiin. Tämä vähentäisi ydinvoimalan rakentamisessa aikaa ja kuluja.

SMR-voimalat ovat pienempiä kuin tavalliset ydinvoimalat, mutta silti on epäilty, että niiden kustannushinta pysyy samoissa lukemissa. Voimaloiden kustannuksia lasketaan siten, että verrataan millä hinnalla sähköä pitäisi myydä, jotta investointi olisi kannattavaa. (NEA & OECD 2016) Alla olevassa kuvaajassa on vertailtu ydinvoimaloiden käyttökustannuksia tehon määrään (Kuva 6).



Kuva 6: Kuvaajassa on vertailtu ydinvoimalan polttoaine-, käyttö- ja kunnossapitokuluja voimalan tehoon. (NEA & OECD 2016)

Kuvasta voidaan havaita, että mitä pienempi teho, sitä suuremmat polttoaine-, käyttö- ja kunnossapitokulut. SMR-voimaloiden sähkön hinnan onkin ajateltu olevan sama tai jopa korkeampi, kuin isojen ydinvoimaloiden (Ingersoll & Carelli 2014). SMR-voimaloita voidaan kuitenkin rakentaa monta vierekkäin ja on laskettu, että ensimmäinen moduuliyksikkö on kallein. Heti seuraavat yksiköt tulisivat olemaan edullisempia kuin suuret ydinvoimalat. SMR-voimaloiden rakentaminen myös kestää lyhyemmän aikaan, mikä tulee pienentää kustannushintaa. (Lokhov, et al. 2013)

4. SMR-VOIMALOIDEN ONGELMAT

Edellisessä luvussa käsiteltiin SMR-voimaloita positiivisesta näkökulmasta, mutta on myös olemassa syitä miksi kyseiset voimalaitokset eivät ole kannattavia. Tässä luvussa käsitellään SMR-voimaloiden ongelmia käytännöllisyyden, lainsäädännön, ympäristön ja taloudellisuuden kannalta.

4.1 Käytännöllisyys

Kun tutkitaan SMR-voimaloita, huomataan heti, että niiden kehitys ei ole vielä kovin pitkällä. Toki osa pienitehoisista ydinvoimaloista on ollut jo pidempään käytössä, mutta niitä ei ole suunniteltu kaupalliseen käyttöön (Rowinski et al. 2015). SMR-voimaloiden yksi pääidea on niiden modulaarisuus, eli se, että ne ovat yksinkertaisia rakentaa ja voidaan jo suurimmaksi osaksi koota tehtaissa valmiiksi. Tällaisesta ei kuitenkaan ole vielä paljoa kokemusta, joten ensimmäiset SMR-voimalat tulevat olemaan enemmän testejä, joista voidaan oppia. On myös arvioitu, että mahdollisesti vasta seitsemäs laitos olisi kannattava, jos modulaarisuutta halutaan hyödyntää tehokkaasti (Lokhov, et al. 2013). Monet SMR-voimalat ovat vasta tutkimustasolla ja vain muutama on alusta alkaen suunniteltu kaupalliseen käyttöön. Tämän takia SMR-voimalat eivät välttämättä ole käytännöllisestä näkökulmasta kannattavia, koska aluksi pitäisi rakentaa useampi koelaitos, että tekniikka vakiintuisi.

Vaikka moni SMR-voimala toimii samalla tavalla kuin isot ydinvoimalat, niissä on kuitenkin paljon uusia ominaisuuksia. Yksi tällainen ominaisuus on passiivinen turvajärjestelmä. (Lokhov, et al. 2013) Turvajärjestelmästä ei ole paljoa kokemusta, joten se vaatii vielä paljon kehittämistä. Toinen ero löytyy toimintaperiaatteesta, sillä osa uusista SMR-voimaloista on suunniteltu käyttämään eri polttoaineita tai jäähdytysmenetelmiä. Tällaiset uudistukset vaativat erilaisen infrastruktuurin esimerkiksi käytetyn polttoaineen varastoiselle. Hyötöreaktorit ovat suunniteltu käyttämään käytettyä polttoainetta, jolloin pitäisi kehittää logistiikkajärjestelmä, jolla voitaisiin turvallisesti kuljettaa polttoainetta reaktorille. (Ingersoll & Carelli 2014) Voidaan siis huomata, että SMR-voimalat ovat vielä alkuvaiheessa ja vaativat paljon uusia ratkaisuja, jotka tulee hyväksyä.

4.2 Taloudellisuus ja lainsäädäntö

SMR-voimalat vaativat paljon uusia järjestelmiä, jotka tulee hyväksyttäväksi. Isoin ongelma SMR-voimaloille onkin lainsäädäntö. Tällä hetkellä kaikkialla on tiukat säädökset siitä, miten ydinvoimaloita rakennetaan. Turvallisuus on yksi tärkeimpiä näkökulmia lainsäädännössä. SMR-voimaloiden uudet ratkaisut ovat kuitenkin sellaisia, että niistä ei ole vielä kokemusta tai hyväksyntää. (Lokhov, et al. 2013) Esimerkiksi passiivinen turvajärjestelmä vaatii paljon tutkimusta, jotta se voidaan hyväksyä, mikä pidentää SMR-voimaloiden hyväksymisprosessia. Sama ongelma on myös muilla uusilla ratkaisulla. (NEA & OECD 2016) Ydinvoimaloihin liittyvä lainsäädäntö koskee pääasiassa isoja ydinvoimaloita, joten SMR-voimalankin lupaprosessi on yhtä raskas ja kallis kuin ison ydinvoimalan (Rowinski et al. 2015).

Lainsäädäntö ei ole kuitenkaan yhtenäistä maiden välillä. Esimerkiksi monissa maissa voi hakea hyväksyntää vain vesijäähdytteisille reaktoreille. Yksi syy tähän on se, että lupaprosessissa ei ole tekniikkaa tuntevaa henkilöstöä. (NEA & OECD 2016) Suomessa ydinvoimalan rakentaminen vaatii ainakin valtioneuvoston päätöksen, ympäristöluvat, rakennusluvat ja STUKin (Säteilyturvakeskuksen) hyväksynnän (Energiateollisuus ry 2009). Pääasiassa kaikki tärkeimmät komponentit pitää hyväksyttäväksi erikseen. Tämä aiheuttaa sen, että hyväksyttäminen ja lupamenettely on raskas prosessi, koska jokaisella maalla voi olla omat kriteerit. Modulaarisuudessa ideana on se, että voimala voidaan rakentaa lähes kokonaan tehtaassa ja kuljettaa sitten isoissa osissa työmaalle. Eri maiden väliset kriteerit komponenteille voivat kuitenkin hankaloittaa valmiiden moduulien kuljettamista kohteeseen. Pelkästään modulaarisuus konseptina on sellainen, johon pitää hakea oma hyväksyntä. (NEA & OECD 2016) Koska tämänhetkinen lainsäädäntö ei ota huomioon SMR-voimaloita, täytyy luoda uudet lupamenettelyt.

Taloudellisesti SMR-voimalat eivät ole tällä hetkellä kannattavia. Monet laskelmat ovat vertailleet energian kustannushintaa SMR-voimaloiden ja isojen ydinvoimaloiden välillä. Laskelmat ovat pääasiassa kallistuneet sen puolelle, että SMR-voimaloiden kustannushinta on korkeampi. (Lokhov, et al. 2013) Tämä johtuu siitä, että monet SMR-voimaloiden eduista tulevat modulaarisuudesta, joka on vielä kehitysvaiheessa. Tämä vaikeuttaa SMR-voimaloiden kaupallistumista. Yksi parhaita puolia SMR-voimaloista on se, että ne voidaan yhdistää olemassa olevaan sähköverkkoon ja rakentaa harvaan asutuille alueille. Harvaan asutut alueet ovat kuitenkin kapea markkinarako, jossa SMR-voimaloita ovat vastassa edullisesti rakennettavat fossiilisella polttoaineella toimivat voimalaitokset. (NEA & OECD 2016)

4.3 Ympäristötekijät

Ydinvoimaa kuvataan usein vihreäksi energiaksi, koska siitä ei tule suoria päästöjä. Ydinvoimalassa kuitenkin syntyy vaarallista ydinjätettä, joka pitää loppusijoittaa turvallisesti. Lisäksi uraanin kaivaminen ja kuljetus ei ole päästötöntä. Tämän takia ydinvoimaloiden rakentamisessa pitäisi ottaa huomioon epäsuorat ympäristöpäästöt. On olemassa monenlaisia laskumenetelmiä, joilla vertaillaan ydinvoimaloiden päästöjä uusiutuviin ja fossiilisiin energialähteisiin. Esimerkiksi elinkaariarviointi on yksi tapa tutkia asiaa. On kuitenkin huomattu, että eri laskentamenetelmillä päästön määrä vaihtelee, joissain se on jopa lähellä uusiutuvia energialähteitä. (NEA & OECD 2012) Alla olevassa kuvassa (Kuva 7) on vertailtu eri tutkimustuloksia keskenään, ja siitä nähdäänkin tutkimustulosten hajonta.

Source of data	GHG emissions for nuclear power generation, in tonnes CO ₂ eq/GWh		
	Mean	Lower range	Upper range
IAEA (2000)	–	9	21
Lenzen (2008)	57.7	10	130
Lenzen (2008)/ Beerten <i>et al.</i> (2009)	30		
Torfs (98)/Voorspoels (2000)/ Beerten <i>et al.</i> (2009)		7	18
WEC (2004)	–	3	40
Weisser (2007)	–	2.8	24
WNA (2011)	29	2	130

Kuva 7: Ydinvoimaloiden päästöistä tehtyjen tutkimusten tulosten vertailua keskenään (NEA & OECD 2012)

Ydinvoimaa onkin pääasiassa pidetty siirtymävaiheen ratkaisuna, sillä vaikka siitä ei suoraan synny päästöjä, se voi silti aiheuttaa vakavia ympäristöhaittoja onnettomuustilanteissa. Myös uraanin louhinta kuormittaa paljon ympäristöä ja sen kuljetus on myös iso päästötekijä, koska harvalla maalla on omia uraanivarantoja (Geologian tutkimuskeskus 2019). Kun nämä kaikki ottaa huomioon, ydinvoimaa voidaan pitää parempana kuin fossiilisia energialähteitä, mutta ei välttämättä pysyvänä ratkaisuna. (NEA & OECD 2012) Tämä aiheuttaa sen, että ei ole kannattavaa investoida ydinvoimaan, jos sen voi suoraan korvata uusiutuvilla energialähteillä, joita monet valtiot tukevat.

Yksi iso ympäristöongelma ydinvoimaloissa on ydinjäte. Harvalla voimalalla on tarpeeksi pitkän ajan suunnitelmia ydinjätteen käsittelyyn. Suomessa on ONKALO-projekti, jossa on tarkoituksena loppusijoittaa ydinjäte syvälle maan alle luolastoon. Kyseinen loppusijoitusprojekti on ensimmäinen maailmassa. (Energiateollisuus ry 2011)

5. TULEVAISUUS

Edellä tutkittiin SMR-voimaloiden hyötyjä ja ongelmia. Monet hyödyt vaativat vielä tekniikan kehitystä. Samoin monet ongelmat voidaan korjata kehityksellä. SMR on konsepti, joka ei ole vielä kaupallisessa käytössä. Tämän takia SMR-voimaloiden tulevaisuuden näkymä on vielä avoin. Suurin ongelma voimaloilla on säädökset ja modulaarisuuden toimiminen. Kuten luvussa 4.1. kävi ilmi, on arvioitu, että vasta seitsemäs samanlainen SMR-voimala olisi kannattava. Tämä tarkoittaisi suuria alkuinvestointeja. Suurimmaksi osaksi vasta kehitysvaiheessa olevan konseptin tulevaisuuden kehitystä on vaikeata arvioida. Vaikka pienitehoisia ydinvoimaloita on ollut jo kauan toiminnassa, ei modulaarisuutta ole aiemmin toteutettu.

SMR-voimaloilla on kuitenkin mahdollisuuksia energia-alalla. Ne voivatkin olla monen maan ensimmäinen ydinvoimalaprojekti. Alla olevassa kuvassa (Kuva 8) on esitetty osalle maista mahdollista tulevaisuuden ydinvoimalatilannetta.

Country	New build in 2020-2035 (low case)	New build in 2020-2035 (high case)	Share of SMRs in new build in 2020-2035 (low case)	Share of SMRs in new build in 2020-2035 (high case)	Comment
Italy	0	0	0%	0%	No nuclear development is envisaged.
Japan	-16 450	-520	0%	0%	SMRs are not envisaged.
Jordan	1 000	2 000	0%	0%	ALWRs are envisaged.
Kazakhstan	300	1 200	0%	25%	SMRs are being considered as an option for the nuclear development.
Korea	14 800	13 800	0%	0%	ALWRs are under construction and envisaged.
Lithuania	0	1 500	0%	10%	Although ALWRs are envisaged, SMRs could be considered, taking into account the size of the economy.
Malaysia	0	1 000	0%	10%	SMRs could be considered as a first step of the nuclear programme.
Mexico	0	1 000	0%	15%	If new nuclear build is developed, part of it could be done with SMRs.
Morocco	0	1 000	0%	10%	SMRs could be considered as a first step in the nuclear programme.
Netherlands	-480	-480	0%	0%	There are no plans for new nuclear power plants.
Pakistan	300	5 375	5%	10%	Small reactors are under construction and could be further deployed (given the grid).

Kuva 8: SMR-voimaloiden osuus uusista ydinvoimalahankkeista (NEA & OECD 2012).

Kuvassa on esitetty tilanteet ydinvoimaloiden huonoimman ja parhaan tilanteen näkökulmista. Sen lisäksi kommentteissa on avattu, millaisia mahdolliset ydinvoimalaratkaisut

tulisivat olemaan. Monet sellaiset maat, jotka eivät ole vielä rakentaneet lainkaan ydinvoimaa, harkitsevat SMR-voimaloita. (NEA & OECD 2012)

Yksi tulevaisuudenkysymyksistä on sähköverkon tasapainon ylläpito. Isot ydinvoimalat eivät kykene tasapainottamaan sähköverkkoa, sillä niitä on kannattavaa ajaa koko ajan täydellä teholla, koska voimalan tehon säätäminen on vaikeata ja hidasta. Sama ongelma voi olla SMR-voimaloilla, jotka toimivat samalla periaatteella kuin isot ydinvoimalat, mutta SMR-voimalat voisivat toisaalta olla myös ratkaisu verkon ylläpitoon. (Ingersoll & Carelli 2014) Suurin osa uusiutuvista energiamuodoista on hyvin sääolosuhteisiin sidottua, eli tehon määrä voi vaihdella todella paljon. Tämän vuoksi neköän eivät välttämättä toimi kovin hyvin verkon tasapainon säätelyssä. Esimerkiksi vesivoima on hyvä säätövoima, paitsi kuiva- ja tulvakaussissa. (Fingrid Oyj 2019) Uusia SMR-voimaloita onkin kehitetty niin, että ne voisivat olla mukana sähköverkon ylläpidossa. Tämä voidaan toteuttaa niin, että osa moottoreista ei olisikaan automaattisesti kytketty verkkoon, vaan ne voitaisiin tarpeen mukaan liittää. (NEA & OECD 2016)

Tulevaisuudessa on tarve päästä eroon fossiilisesta energiasta. SMR-voimalat voivatkin olla hyvä korvike poistuville voimalaitoksille. Ydinvoima nähdään kuitenkin monissa maissa negatiivisena asiana, mikä voi vaikuttaa kysyntään. Suuret ydinvoimalaonnettomuudet, kuten Fukushima aiheuttivat useiden laitoksien sulkemisen. Esimerkiksi Saksa aloitti ydinvoimaloiden poistamisen ja polttaa tilalla kivihiltä, vaikka samalla on sitoutunut EU:n tavoitteissa vähentämään päästöjä. (Kortelainen 2018) Tällaiset ratkaisut voivat aiheuttaa sen, että SMR-voimaloita ei katsota tulevaisuuden vaihtoehdoksi.

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Edellä on esitelty SMR-voimaloita ja niiden erilaisia toimintaperiaatteita. Tämän lisäksi on käyty läpi SMR-voimaloiden mahdollisuuksia ja ongelmia. SMR-voimala voisi olla tulevaisuuden ratkaisu, kun pyritään eroon fossiilisista polttoaineista. Kyseiset voimalat on helppo liittää olemassa olevaan sähköverkkoon ja ne voisivat myös tuottaa lämpöä. Ne voisivat olla myös ratkaisu harvaan asutuille alueille, joille on vaikeaa rakentaa kattavaa sähköverkkoa. Hyviä puolia SMR-voimaloissa ovat niiden pieni koko ja modulaarisuus, jolloin ne olisivat helppoja koota paikan päällä. Pienet SMR-voimalat ovat myös helpompi investointikohde kuin tavalliset ydinvoimalat, jotka vaativat todella suuria investointeja.

SMR-voimalat eivät kuitenkaan välttämättä ole sähkön kustannushinnalta edullisempia verrattuna isoihin ydinvoimaloihin. Suurinta osaa SMR-voimaloista ei ole vielä suunniteltu kaupalliseen käyttöön, eli ne vaativat vielä kehitystyötä. Tämän takia on vaikeata arvioida SMR-voimaloiden tulevaisuutta. Modulaarisuutta, joka olisi yksi SMR-voimaloiden suurimpia hyötytekijöitä, ei ole vielä testattu kunnolla. Lainsäädäntöäkään ei ole vielä suunniteltu ottamaan huomioon SMR-voimaloita, jolloin lupaprosessit ovat yhtä raskaita ja hitaita, kuin suurten ydinvoimaloiden.

Monissa SMR-malleissa on kehitetty uudenlaista tekniikkaa, johon ei ole vielä kehitetty lupaprosesseja. Uudenlaisen tekniikan avulla SMR-voimaloissa voisi käyttää passiivisia turvajärjestelmiä, hyödyntää ydinjätettä polttoaineena tai tuottaa lämpöä. Voimalat voidaan myös jäähdyttää muulla keinoin kuin vedellä, jolloin niiden sijainti ei tarvitsisi olla lähellä vesistöä. SMR-voimalat voisivat syrjäyttää fossiilisilla polttoaineilla toimivat voimalaitokset.

LÄHTEET

Barre, B. (2012). Nuclear reactor systems: a technical, historical and dynamic approach, EDP Sciences, Les Ulis, France

Black, G. & Peterson S. (2019), Economic Impact Report: Construction and Operation of a Small Modular Reactor Electric Power Generation Facility at the Idaho National Laboratory Site, Butte County, Idaho, USA

Breeze, P. (2014) Power Generation Technologies, second edition, Boston, USA pp. 353–378

Demirel, Y. (2016). Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling, 2nd 2016 ed. Springer International Publishing AG, Cham

Energiateollisuus ry (2009), Hyvä tietää ydinvoimasta, https://energia.fi/files/277/ht_ydinvoimasta.pdf (viitattu 7.3.2019)

Energiateollisuus ry (2011), Ydinvoima ja innovaatiot, https://energia.fi/files/276/ydinvoima_ja_innovaatiot.pdf (viitattu 3.4.2019)

Energiateollisuus ry (2019), Energiavuosi 2018 Kaukolämpö, https://energia.fi/ajankoh-taista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi_2018_-_kaukolampo.html (viitattu 15.8.2019)

Fingrid Oyj (2019), Kantaverkko ja sähkömarkkinat, <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/> (viitattu 14.8.2019)

Geologian tutkimuskeskus (2019), Maailman uraanivarannot, tuotanto ja ydinpolttoai-neen tarve, <http://www.gtk.fi/geologia/luonnonvarat/uraani/maailmanuraani/> (viitattu 20.8.2019)

Ingersoll, D.T. & Carelli, M.D. (2014). Handbook of Small Modular Nuclear Reactors, Elsevier Science & Technology, Cambridge

Ingersoll, D.T., Houghton, Z.J., Bromm, R. & Desportes, C. (2014). NuScale small mod-ular reactor for Co-generation of electricity and water, Desalination, Vol. 340 pp. 84–93.

International Atomic Energy Agency (2013), KLT-40s, <https://aris.iaea.org/pdf/KLT-40S.pdf> (Viitattu 1.4.2019)

International Atomic Energy Agency (2011), Status report 74 - Indian 220 MWe PHWR (IPHWR-220), <https://aris.iaea.org/PDF/IPHWR-220.pdf> (viitattu 3.4.2019)

International Energy Agency (2017), Key World Energy Statistics, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf> (viitattu 4.3.2019)

Kiguchi, T. & Oka, Y. (2014), Nuclear Reactor Design, Springer Verlag, Tokyo

Kortelainen, J (2018), Saksan energiäkäännös ontuu pahoin, *Energiauutiset*: <https://www.energiuutiset.fi/uutiset/saksan-energiakaannos-ontuu-pahoin.html> (viitattu 22.8.2019)

Lokhov, A., Cameron, R., Sozoniuk, V. (2013) OECD/NEA Study on the economics and market of small reactors, vol. 45 pp. 701–706.

NEA & OECD (2012), *The Role of Nuclear Energy in a Low-carbon Energy Future*, OECD publishing, Paris

NEA & OECD (2016), *Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment*, OECD publishing, Paris

Nilsen, Thomas (2018), First reactor started at floating nuclear plant, *The Barents Observer* (2.11.2018), <https://thebarentsobserver.com/en/industry-and-energy/2018/11/first-reactor-started-floating-nuclear-plant> (viitattu 1.4.2019)

Nuclear Power Generation (2013), *Pressurised Water Reactor Vs Boiling Water Reactor*, https://www.clpgroup.com/NuclearEnergy/Eng/power/power4_1_2.aspx, (viitattu 7.3.2019)

NuScale Power (2019), *Technology overview*, <https://www.nuscalepower.com/technology/technology-overview> (viitattu 31.3.2019)

Rowinski, M.K., White, T.J. & Zhao, J. (2015). *Small and Medium sized Reactors (SMR): A review of technology*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 44 pp. 643–656.

World Nuclear Association (2019), *Small Nuclear Power Reactors*, <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx> (viitattu 30.5.2019)

World Nuclear Association (2018), *World Nuclear Performance Report 2018*, <https://world-nuclear.org/getmedia/b392d1cd-f7d2-4d54-9355-9a65f71a3419/performance-report.pdf.aspx>